



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

**Αποκεντρωμένη διαχείριση ηλεκτρικών οχημάτων για την
αποδοτική ενσωμάτωση τους σε δίκτυα διανομής μέσης τάσης
με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Κωνσταντίνου Πανουργιά

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017



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

**Αποκεντρωμένη διαχείριση ηλεκτρικών οχημάτων για την
αποδοτική ενσωμάτωση τους σε δίκτυα διανομής μέσης τάσης
με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Κωνσταντίνου Πανουργιά

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την x Σεπτεμβρίου 2017.

.....

Χατζηαργυρίου Νικόλαος

.....

Παπαθανασίου Σταύρος

.....

Γεωργιάκης Πάυλος

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017

.....
Κωνσταντίνος Πανουργίας

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

Copyright © Κωνσταντίνος Πανουργίας , 2017

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 το συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια αυξητική τάση προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Η τάση αυτή που προκαλεί την όλο και αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ είναι το αποτέλεσμα μιας παγκόσμιας συντονισμένης προσπάθειας για στροφή στην πράσινη ενέργεια. Στόχος αυτής της στροφής προς τα ΑΠΕ είναι η εύρεση εναλλακτικών πηγών ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα βοηθώντας παράλληλα στην μείωση των κακών περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.

Η μαζική διείσδυση των ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ελλοχεύει κινδύνους για τις υποδομές όπου οι τεχνικές προδιαγραφές τους δεν είχαν φτιαχτεί για να υποστηρίξουν την μετάβαση από μονόδρομη ροή σε αμφίδρομη.

Μετά τον τομέα της Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, ο τομέας των μεταφορών παίζει τον δεύτερο σημαντικό παράγοντα όσον αφορά τις άσχημες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η απάντηση στις δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες των συμβατικών οχημάτων είναι τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) τα οποία παράγουν μηδενικούς ρύπους.

Παρ' όλα αυτά, μια μαζική διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) μπορεί να προκαλέσει ίδιους κινδύνους στις υποδομές του δικτύου διανομής όπως και στην περίπτωση των ΑΠΕ. Η λύση στο πρόβλημα των υποδομών που τείνουν να αντιμετωπίσουν οι Διαχειριστές των Δικτύων Διανομής προϋποθέτει την σπατάλη υπέρογκων ποσών για την ενίσχυση των δικτύων.

Το κόστος αυτό μπορεί να μειωθεί ή ακόμα και να μηδενιστεί με την οργανωμένη διαχείριση EVs & ΑΠΕ με χρήση αλγόριθμων βέλτιστης συνέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα τεχνικά προβλήματα που προκαλούνται από την διείσδυση των ΑΠΕ καθώς και οι πρακτικές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέγιστου ορίου διείσδυσης των ΑΠΕ σε δίκτυα διανομής. Στο 2^ο Κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση της διείσδυσης των Ηλεκτρικών Οχημάτων σε πραγματικά δίκτυα διανομής. Στο 3^ο Κεφάλαιο εξετάζεται η επίδραση της διείσδυσης των ΑΠΕ σε πραγματικά δίκτυα διανομής. Στο 4^ο Κεφάλαιο αναπτύσσονται δυο αλγόριθμοι για βέλτιστη συνέργεια των ΑΠΕ & των EVs με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης διείσδυσης τους ικανοποιώντας παράλληλα τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου. Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο αναφέρονται συμπεράσματα από την ανάλυση.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρικά οχήματα, aggregator, vehicle-to-grid (V2G), ΑΠΕ, ρύθμιση τάσης, δίκτυα διανομής, μέγιστο όριο διείσδυσης, προγραμματισμός, προβλήματα βελτιστοποίησης.

ABSTRACT

In recent decades, there has been an upward trend in the production of electricity from Renewable Energy Sources (RES). This trend, which is causing an increasing of RES penetration, is the result of a global coordinated effort to shift to green energy. The aim of this shift towards RES is to find alternative energy sources in relation to conventional fuels while helping to reduce their adverse environmental impacts.

The massive penetration of RES in electricity distribution networks runs a risk for infrastructure where its technical specifications were not designed to support the transition from one-direction energy flow to bi-directional.

Following the electricity sector, the transport sector is playing the second important factor in terms of bad environmental impacts. The response to adverse environmental conditions of conventional vehicles is electric vehicles (EVs) that produce zero pollutants.

Nevertheless, a massive penetration of electric vehicles (EVs) can cause the same risks to the distribution network infrastructure as in the case of RES. The solution to the infrastructure problem that Distribution Network Operators tend to face is the wastage of huge sums to boost networks.

This cost can be reduced or even zeroed with organized EVS & RES management using optimal synergy algorithms.

In this dissertation, Chapter 1 make an introduction to the technical problems caused by the RES penetration and the practices used to calculate the maximum the RES penetration in distribution networks. Chapter 2 examines the effect of electric vehicle penetration on a real distribution networks. Chapter 3 examines the effect of RES penetration on a real distribution networks. In Chapter 4 two algorithms are developed for optimal synergy of RES & EVs in order to achieve their maximum penetration while meeting the technical requirements of the network. Chapter 5 presents the results of the simulations. Finally, chapter 6 contains conclusions from the analysis.

KEY WORDS

Electric vehicles, aggregator, vehicle-to-grid (V2G), voltage regulation, RES hosting capacity, scheduling, optimization problems.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Διδάκτορα κ. Ευάγγελο Καρφόπουλο για τη συνεχή βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές και την αμέριστη καθοδήγηση, που μου παρείχε σε όλα τα στάδια ανάπτυξης και συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την γυναίκα μου, που με στήριξε με κάθε δυνατό τρόπο, καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος ΔΠΜΣ Παραγωγής & Διαχείρισης Ενέργειας.

Κωνσταντίνος Πανουργιάς
Σεπτέμβριος 2017

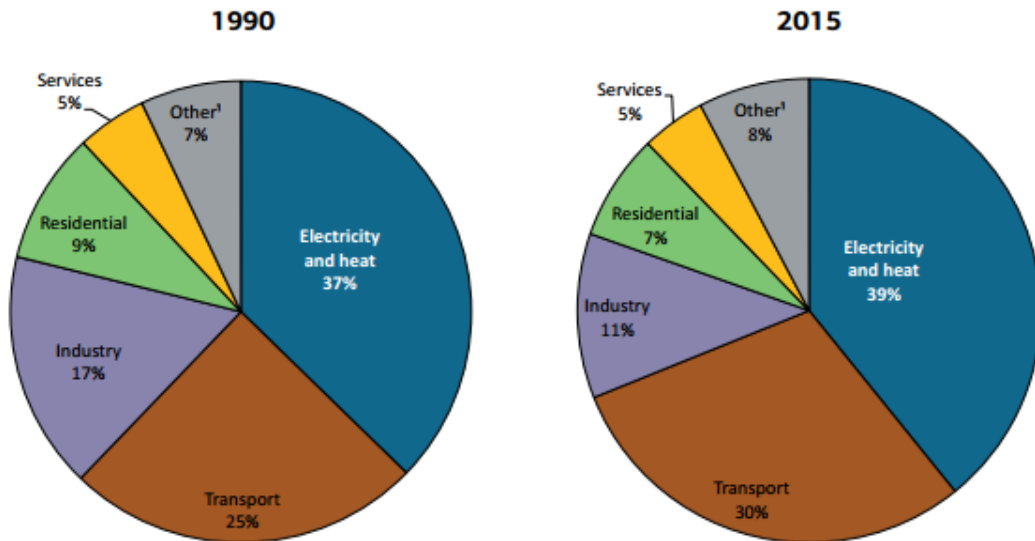
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	7
1.1	Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων	9
1.2	Τεχνολογίες Υποδομών Φόρτισης	10
1.3	Κίνητρα προώθησης Ηλεκτροκίνησης.....	11
1.4	Μοντέλα Ανάπτυξης Υποδομών φόρτισης δημόσιας πρόσβασης.....	12
1.5	Ευκαιρίες και προκλήσεις της ηλεκτροκίνησης.....	15
2	Επίδραση της διείσδυσης των Ηλεκτρικών Οχημάτων στα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	18
2.1	Παράμετροι προσδιορισμού της καμπύλης φορτίου των Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	18
2.2	Αλγόριθμος Προσδιορισμού Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	19
2.3	Μελέτη επίδρασης του φορτίου των Ηλεκτρικών Οχημάτων στην καμπύλη ζήτησης του συστήματος.....	21
2.4	Μελέτη των στρατηγικών φόρτισης σε πραγματικά δίκτυα διανομής μέσης τάσης. 27	
2.4.1	<i>Δίκτυο Διανομής MT Ικαρίας</i>	<i>27</i>
2.4.2	<i>Δίκτυο Διανομής MT Σπερχιάδας.....</i>	<i>33</i>
3	Επίδραση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	38
3.1	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)	38
3.2	Τεχνικά Προβλήματα των Δικτύων Διανομής από την ένταξη των ΑΠΕ. ...	39
3.3	Επισκόπηση των πρακτικών για τον προσδιορισμό του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ	40
3.3.1	<i>Κατηγορία Α. Κριτήρια με βάση την ικανότητα των υφιστάμενων υποδομών δικτύου.....</i>	<i>40</i>
3.3.2	<i>Κατηγορία Β. Κριτήρια με βάση τα όρια λειτουργίας της τάση όπως αυτά καθορίζονται από τις ρυθμιστικές αρχές.</i>	<i>41</i>
3.3.3	<i>Κατηγορία Γ. Κριτήρια με βάση την αναλογία φορτίου-παραγωγής.</i>	<i>43</i>
3.3.4	<i>Κατηγορία Δ. Κριτήρια με βάση την ικανότητα του δικτύου σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.</i>	<i>43</i>
3.4	Μη ελεγχόμενη και ελεγχόμενη διείσδυση ΑΠΕ.....	44
3.5	Προσδιορισμός μέγιστου ορίου διείσδυσης στο δίκτυο διανομής της Σπερχιάδας	46

4	Συνέργεια Ηλεκτρικών Οχημάτων και ΑΠΕ.....	48
4.1	Κεντρικός Αλγόριθμος Συνέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων και ΑΠΕ.....	48
4.1.1	Μέθοδος <i>Generalized Benders Decomposition (GBD)</i>	49
4.1.2	Εφαρμογή της Μεθόδου <i>GBD</i> για την επίλυση του κεντρικού αλγόριθμου συνέργειας Ηλ. Οχημάτων και ΑΠΕ.....	51
4.2	Αποκεντρωμένος Αλγόριθμος Συνέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων και ΑΠΕ 52	
4.3	Αριθμητικό Παράδειγμα Κεντρικού και Αποκεντρωμένου Αλγόριθμου	54
5	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Συνέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων και ΑΠΕ	57
5.1	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων στο Δίκτυο ΜΤ Σπερχιάδας	57
5.2	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων στο Δίκτυο ΜΤ Ικαρίας.....	60
6	Συμπεράσματα	64
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

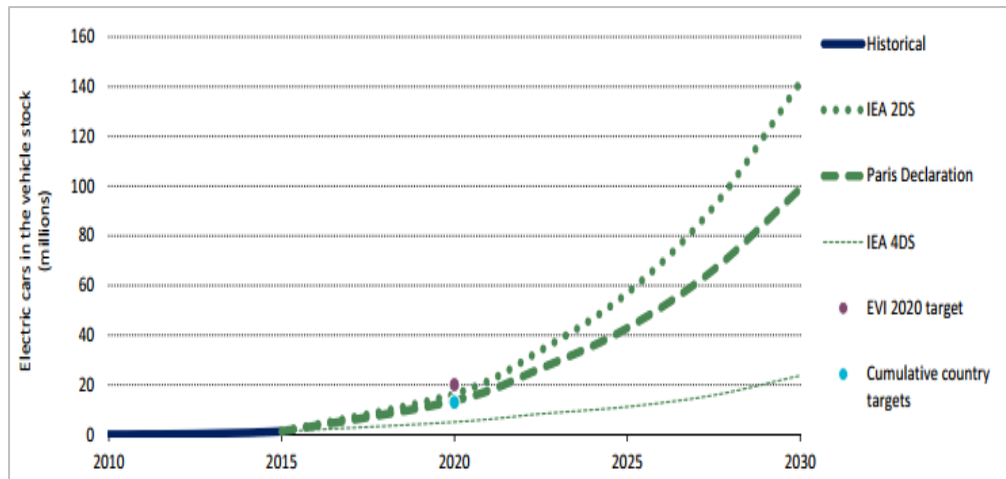
Η ετήσια παγκόσμια παραγωγή σε CO₂ ανέρχεται περίπου στα 12 GtCO₂, από αυτά το 35% οφείλετε στον τομέα της Ηλεκτροπαραγωγής ενώ το 30% στον τομέα των μεταφορών. Τα τελευταία χρόνια το ποσοστό που αναλογεί στον τομέα των μεταφορών έχει αυξηθεί κατά 5% [1], [2]. Λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες πληροφορίες αντιλαμβανόμαστε ότι η μετάβαση από τα συμβατικά οχήματα στα ηλεκτρικά θα βοηθήσει σημαντικά στην μείωση της παραγωγής CO₂.



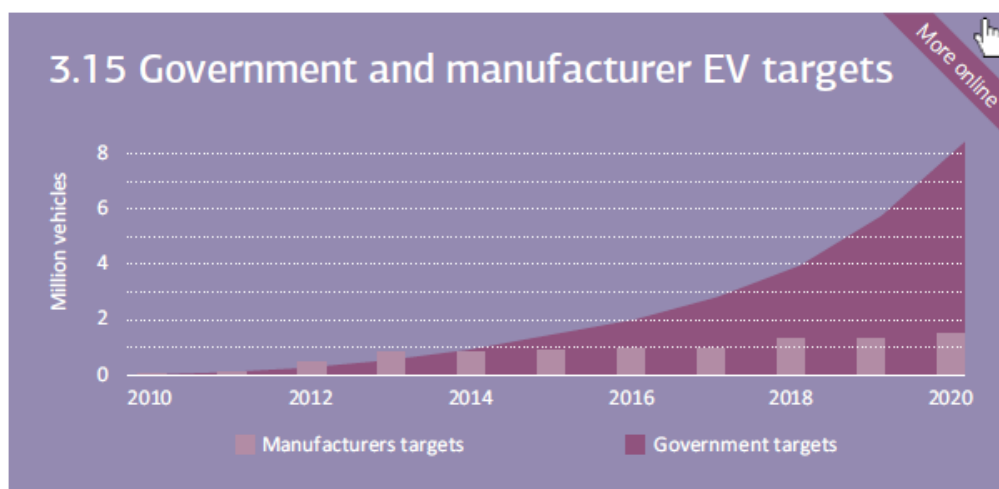
Εικόνα 1.1 – Εκπομπές CO₂ ανά τομέα [2]

Κατά την τελευταία δεκαετία, έχει γίνει ευρέως γνωστή η μαζική ανάπτυξη ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων (EVs και PHEVs) τα οποία λόγω των χαμηλών εκπομπών άνθρακα μπορεί να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση πετρελαίου και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) και έτσι να βελτιώσουν την κατάσταση στις πόλεις όσον αφορά την ατμοσφαιρική ρύπανση και τον θόρυβο. Από την άποψη αυτή, έχουν ανακοινωθεί φιλόδοξοι στόχοι για την αύξηση των πωλήσεων EV / PHEV σε όλο τον κόσμο, δείχνοντας την υψηλή προτεραιότητα στην ανάπτυξη της τεχνολογίας EV / PHEV σε διεθνές επίπεδο. Ενδεικτικά, η “Διακήρυξη του Παρισιού για την Ηλεκτροκίνηση και την Κλιματική Αλλαγή και η Πρόσκληση για Δράση” θέτει σε παγκόσμιο επίπεδο ως στόχο για την ανάπτυξη 100 εκατομμυρίων ηλεκτρικών αυτοκινήτων και 400 εκατομμυρίων ηλεκτρικών δίτροχων και τρίτροχων έως το 2030 προκειμένου να περιοριστεί η μέση αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από τους 2oC. Παρά τους στόχους που βάζουν οι κυβερνήσεις η ανάπτυξη που προβλέπεται από τις αυτοκινητοβιομηχανίες δεν είναι ίδια (εικόνα 1.3).

Η μαζική μετάβαση από τα συμβατικά οχήματα στα ηλεκτρικά πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά διότι μπορεί να επιφέρει σημαντικά προβλήματα στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (πτώσεις τάσης, υπερφορτίσεις κλπ). Παρόλα αυτά μια οργανωμένη ένταξη ηλεκτρικών οχημάτων υπό την καθοδήγηση ενός κεντρικού διαχειριστή (Aggregator) μπορεί όχι μόνο να λύσει το πρόβλημα αλλά και να βοηθήσει τις ήδη υπάρχουσες υποδομές ηλεκτρικών δικτύων στην ένταξη μεγαλύτερου ποσοστού ΑΠΕ.



Εικόνα 1.2 – Σενάρια ανάπτυξης ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι το 2020 [3]



Εικόνα 1.3 – Στόχοι ανάπτυξης ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι το 2020 από τις κυβερνήσεις και από τις αυτοκινητοβιομηχανίες. [4]

Τα υπάρχοντα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχεδιασμένα να κατευθύνουν μονόδρομα την ενέργεια από τις παραγωγικές μονάδες προς τα φορτία. Η ολοένα και αυξανόμενη ένταξη ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής δημιουργεί προβλήματα λειτουργικότητας και αξιοπιστίας τα οποία για να αντιμετωπιστούν χρειάζονται μεγάλες επενδύσεις για αναβάθμιση των υποδομών παλιάς λογικής. Το κόστος αυτό μπορεί να περιοριστεί σημαντικά με την συνέργεια των ΑΠΕ με τα Ηλεκτρικά Οχήματα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι να εξετάσουμε,

- την επίδραση που έχει στο δίκτυο διανομής η ένταξη Ηλεκτρικών Οχημάτων.
- την επίδραση που έχει στο δίκτυο διανομής η ένταξη ΑΠΕ.
- την συνέργεια ΑΠΕ & Ηλεκτρικών Οχημάτων με χρήση αλγορίθμων που θα αναπτύξουμε για την αντιμετώπιση των επιδράσεων και την μεγιστοποίηση του ποσοστού διείσδυσης των ΑΠΕ και των Ηλεκτρικών Οχημάτων.

1.1 Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων

Το ηλεκτρικό όχημα είναι το όχημα που χρησιμοποιεί έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες για πρόωση. Ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να τροφοδοτείται μέσω συστήματος συλλεκτών με ηλεκτρισμό από πηγές εκτός οχήματος ή μπορεί να είναι αυτόνομο με μπαταρία, ηλιακούς συλλέκτες ή γεννήτρια για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στις τεχνολογίες EV που διαθέτουν αυτόνομο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και μπορούν να συνδεθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο για σκοπούς επαναφόρτισης. Από την άποψη αυτή, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- **Ηλεκτροκίνητα οχήματα μπαταρίας (BEV)** που χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες που ενεργοποιούνται από ένα σύστημα αποθήκευσης μπαταριών. Η αυτονομία οδήγησης του BEV περιορίζεται στα 150-200 χιλιόμετρα.
- **Ηλεκτρικά οχήματα ευρείας εμβέλειας (EREV)** εξοπλισμένα με κινητήρα καύσης και ηλεκτρικό κινητήρα. Ο ηλεκτρικός κινητήρας εκμεταλλεύεται την κίνηση του οχήματος ενώ ο κινητήρας καύσης χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας. Η αυτονομία οδήγησης του EREV είναι πάνω από 300 χιλιόμετρα.
- **Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEV)** με μηχανισμό καύσης για την κίνηση του οχήματος και ηλεκτρικό κινητήρα με μικρή μπαταρία που προσφέρει αυτονομία οδήγησης λίγων χιλιομέτρων.

Ο αριθμός των BEV και PHEV στο δρόμο ξεπέρασε τα 1,2 εκατομμύρια το 2015 με τα BEV να είναι ελαφρώς μπροστά από τα PHEV. Η αύξηση των αποθεμάτων σε EV κατά την περίοδο 2010-2015 είναι ένα επίτευγμα των προσπαθειών που καταβάλλουν από κοινού οι κυβερνήσεις και η βιομηχανία τα τελευταία δέκα χρόνια. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 80% των παγκόσμιων αυτοκινήτων EV βρίσκεται στις ΗΠΑ, την Κίνα, την Ιαπωνία, την Ολλανδία και τη Νορβηγία.

Υπάρχουν τέσσερις κύριοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων (οδηγία 2002/24 / ΕΚ):

- **L7e:** Οχήματα με τέσσερις τροχούς των οποίων η μάζα χωρίς φορτίο δεν υπερβαίνει τα 425kg, μη συμπεριλαμβανομένης της μάζας των μπαταριών. Η μέγιστη ταχύτητα για την οποία είναι σχεδιασμένα τα L7e δεν υπερβαίνει τα 45km/h.
- **M1:** Οχήματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά επιβατών, τα οποία δεν περιλαμβάνουν περισσότερες από οκτώ θέσεις μαζί με του οδηγού
- **N1:** Οχήματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά εμπορευμάτων και έχουν μέγιστη μάζα που δεν υπερβαίνει τους 3,5 τόνους.
- **N2:** Οχήματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά εμπορευμάτων και έχουν μέγιστη μάζα άνω των 3,5 τόνων αλλά που δεν υπερβαίνει τους 12 τόνους.



Εικόνα 1.4 – Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων (οδηγία 2002/24 / ΕΚ).

Η χωρητικότητα της μπαταρίας ανά τύπο ηλεκτρικού οχήματος φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί,

Τύπος οχήματος		Χωρητικότητα Μπαταρίας (kWh)		
		Μέση	Ελάχιστη	Μέγιστη
L7e	BEV	8.7	3	15
M1	BEV	28.5	10	72
	PHEV/EREV	12.9	4	22.6
N1	BEV	23	9.6	40
	PHEV/EREV	12.9	4	22.6
N2	BEV	51.2	51.2	120

1.2 Τεχνολογίες Υποδομών Φόρτισης

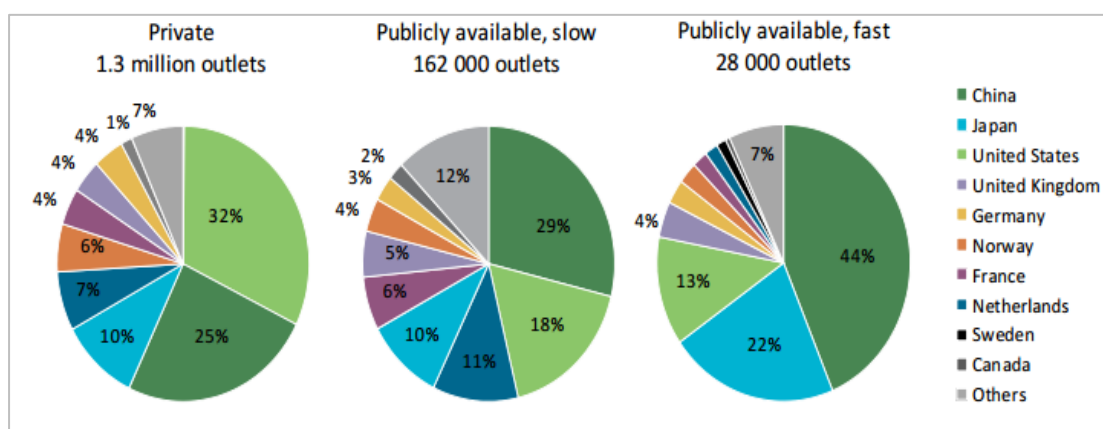
Οι υποδομές φόρτισης επιτρέπουν τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι σταθμών φόρτισης:

1. **Καλωδιακός σταθμός φόρτισης:** τα ηλεκτρικά οχήματα είναι συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω αγωγού φόρτισης ο οποίος είναι σύμφωνος με το πρότυπο IEC 62196-2
2. **Επαγωγικός σταθμός φόρτισης:** δεν χρειάζεται οποιαδήποτε φυσική σύνδεση μεταξύ του ηλεκτρικού οχήματος και του σταθμού φόρτισης, καθώς η ενέργεια μεταφέρεται ασύρματα. Οι επαγωγικοί σταθμοί φόρτισης υποδιαιρούνται σε δύο κατηγορίες:
 - a. **τη στατική τεχνολογία φόρτισης** που απαιτεί το ηλεκτρικό όχημα να είναι σταθμευμένο και
 - b. **τη δυναμική τεχνολογία φόρτισης** που επιτρέπει την φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος κατά την οδήγηση.

Εκτός από τις διαφορετικές τεχνολογίες, οι σταθμοί φόρτισης κατηγοριοποιούνται επίσης σύμφωνα με τη μέγιστη επιτρεπτή ισχύ φόρτισης (IEC 61851) ως εξής:

- **Mode 1:** Φάσεις AC 1/3, 16A
- **Mode 2:** Φάσεις AC 1/3 / 32A
- **Mode 3:** Φάσεις AC 1/3, <250A
- **Mode 4:** DC 600V, 400A

Οι σταθμοί φόρτισης μπορούν να τοποθετηθούν σε ιδιωτικούς χώρους, με περιορισμένη (ιδιωτική) ή ευρύτερη (δημόσια) πρόσβαση ή σε δημόσιους χώρους όπου μπορεί να χρεωθεί κάποιος. Η θέση του σταθμού φόρτισης και η πρόσβαση που υπάρχει επηρεάζουν το επίπεδο φόρτισης. Για παράδειγμα, δεν έχουν νόημα σταθμοί φόρτισης τύπου 1 (αργής φόρτισης) σε δημόσιους χώρους με δημόσια πρόσβαση, δεδομένου ότι η πλήρης φόρτιση μπορεί να διαρκέσει περισσότερο από έξι ώρες και κατά την διάρκεια αυτή ο σταθμός παραμένει κατειλημμένος. Το επίπεδο ισχύος των δημόσιων σταθμών χρέωσης καθορίζεται με βάση την στρατηγική της κάθε χώρας για την ηλεκτροκίνηση και τις προτιμήσεις των τελικών χρηστών. Το Σχήμα 1.5 απεικονίζει τα ποσοστά εξάπλωσης αργών και γρήγορων δημόσιων σταθμών φόρτισης παγκοσμίως, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο συνολικός αριθμός των σταθμών φόρτισης που έχουν αναπτυχθεί είναι 1,45 εκατομμύρια (2015). Ο αριθμός των δημόσιων σταθμών φόρτισης αυξάνεται καθώς το απόθεμα ηλεκτρικών αυτοκινήτων αυξάνεται επιβεβαιώνοντας τον ισχυρό συσχετισμό τους. Αναλύοντας περαιτέρω αυτόν τον αριθμό, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι υπάρχουν 45 ηλεκτρικά οχήματα (εκ των οποίων 27 είναι BEV) ανά διαθέσιμο στο κοινό σταθμό ταχείας φόρτισης. Το αντίστοιχο μέγεθος της σχέσης EV / EVSE για αργούς φορτιστές είναι περίπου 8 ηλεκτρικά οχήματα ανά αργό φορτιστή σε παγκόσμια κλίμακα. Παρόλο που ο αριθμός των διαθέσιμων στο κοινό σταθμών γρήγορης φόρτισης είναι περίπου 6 φορές χαμηλότερος από τον αντίστοιχο αριθμό αργών φορτιστών, η γρήγορη φόρτιση εξασφαλίζει τον ελάχιστο απαιτούμενο χρόνο φόρτισης, που αποτελεί τη βασική απαίτηση για ταξίδια με υπεραστικά φορτία.



Εικόνα 1.5 – Γεωγραφική κατανομή ηλεκτρικών οχημάτων ανά τύπο φορτιστή βάση των δεδομένων του 2015. [6]

1.3 Κίνητρα προώθησης Ηλεκτροκίνησης

Η προώθηση της ηλεκτροκίνησης για την επίτευξη των στόχων ανάπτυξης Ηλεκτρικών Οχημάτων που έχουν τεθεί παγκοσμίως απαιτούν την υιοθέτηση μακροπρόθεσμων πολιτικών επιδότησης που παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Επιδότησεις για τα ηλεκτρικά οχήματα:** Υπάρχει μια ποικιλία επιδοτήσεων που μπορούν να υιοθετηθούν για την αύξηση των πωλήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων. Είναι αλήθεια ότι το κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μάλλον υψηλότερο σε σύγκριση με το αντίστοιχο συμβατικό αυτοκίνητο, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους της μπαταρίας. Το κόστος της μπαταρίας το 2010 ήταν περίπου 800-1000 \$ / kWh. Το κόστος της μπαταρίας θα πρέπει να μειωθεί σε περίπου 300 \$ / kWh έως το 2020, προκειμένου το συνολικό κόστος να φθάσει σε ελκυστικό επίπεδο για τους καταναλωτές. Μέχρι να μειωθεί το κόστος των ηλεκτρικών

οχημάτων, υιοθετούνται διάφορες πολιτικές επιδότησης για την αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων, οι οποίες ενδέχεται να είναι είτε οικονομικά είτε μη οικονομικά κίνητρα. Ενδεικτικά παραδείγματα οικονομικών κινήτρων που εγκρίθηκαν από τις πόλεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι:

- Άμστερνταμ: 5000 € / 10000 € / 40000 € για επιβατικό αυτοκίνητο / ταξί / φορτηγό
- Παρίσι: 4000-7000 € πριμοδότηση (εφάπαξ επιχορήγηση)
- Βαρκελώνη: 25% (μέχρι 6000 €)
- Λονδίνο: 25% (έως 5000 GBP)
- Πορτογαλία: 5000 € για τα πρώτα 5000 νέα ηλεκτρικά οχήματα
- Όσλο: απαλλάσσεται από τον ΦΠΑ και τον φόρο αγοράς 25%

Άλλα κίνητρα μπορεί να είναι:

- Δεν υπάρχουν λίστες αναμονής για άδειες στάθμευσης
- Γκαράζ στάθμευσης με δωρεάν χώρο στάθμευσης
- Μειωμένα τέλη διοδίων και στάθμευσης
- Ειδικά προνόμια οδήγησης, όπως η ελεύθερη χρήση των λεωφορείο-λωρίδων και η μη πληρωμή διοδίων.
- Υπηρεσίες κοινής χρήσης αυτοκινήτων

• **Επιδότησεις για Υποδομές Φόρτισης:** Σε πολλές χώρες, υπάρχουν πολιτικά κίνητρα που υποστηρίζουν την ανάπτυξη υποδομών φόρτισης, είτε αργή φόρτιση είτε γρήγορη φόρτιση. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι:

- Γαλλία: επιδότηση του 50% του κόστους των υποδομών φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα (εξοπλισμός και εγκατάσταση) με συνολικό προϋπολογισμό 50 εκατομμυρίων ευρώ
- Ηνωμένο Βασίλειο: επιδότηση 44 εκατομμύρια ευρώ για τα σημεία φόρτισης σε οικιακούς δρόμους, σιδηροδρόμους και δημόσιους χώρους
- Γερμανία: τα οικονομικά κίνητρα δεν λαμβάνονται υπόψη για αργούς φορτιστές αλλά μόνο για ασύρματους και γρήγορους φορτιστές
- Ισπανία: επιδότηση 10 εκατομμύρια ευρώ (πρόγραμμα Movele)
- Δανία: επιδότηση 10 εκατομμύρια ευρώ
- Φινλανδία: επιδότηση 5 εκατομμύρια ευρώ
- Νορβηγία: επιδότηση 1200 ευρώ εάν τοποθετήσετε σταθμό φόρτισης στο OSLO

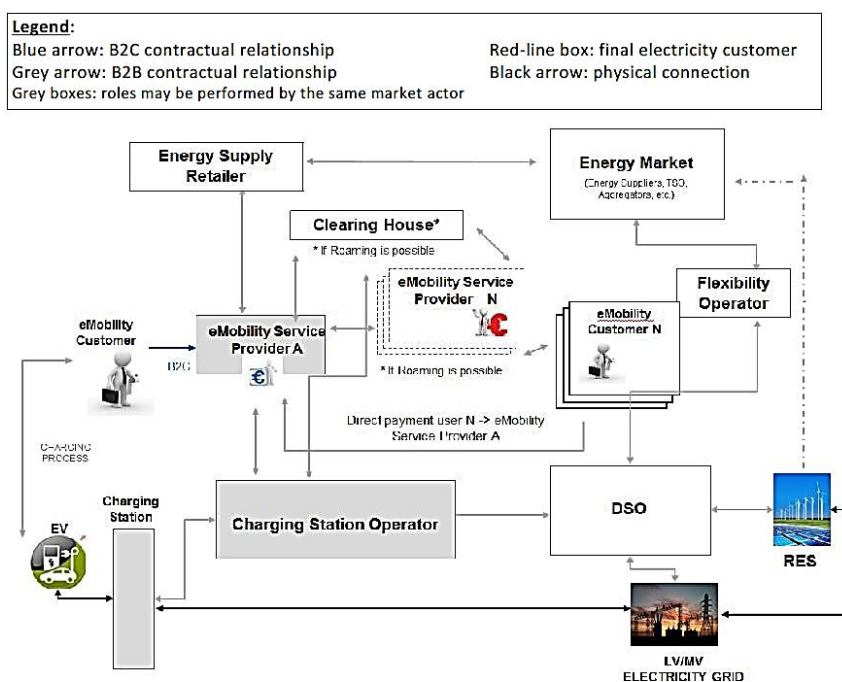
1.4 Μοντέλα Ανάπτυξης Υποδομών φόρτισης δημόσιας πρόσβασης

Η θέση της Eurelectric στην ανάπτυξη δημόσιων υποδομών φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πολύ σημαντική για την ανάπτυξη μοντέλων αγοράς που θα επιτρέψουν την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης σε δημόσιους χώρους. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη σχετική θέση της Eurelectric, υπάρχουν δύο μοντέλα για την ανάπτυξη δημόσιων υποδομών φόρτισης: το μοντέλο της ανεξάρτητης αγοράς για την ηλεκτροκίνηση και το μοντέλο της αγοράς των ολοκληρωμένων υποδομών ("μοντέλο DSO"). Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων αφορά την ιδιοκτησία καθώς και τη λειτουργία των σταθμών φόρτισης.

Και στα δύο μοντέλα, πέραν των ήδη εμπλεκόμενων φορέων (Διαχειριστής Συστήματος Διανομής(DSO), Ενεργειακός Προμηθευτής κ.λπ.), ο ρόλος των νεοεμφανιζόμενων φορέων στον τομέα της ηλεκτροκίνησης αναμένεται να είναι καθοριστικός. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με κάθε συγκεκριμένο μοντέλο παρέχονται παρακάτω.

• Το μοντέλο της ανεξάρτητης αγοράς ηλεκτροκίνησης

Σε αυτό το μοντέλο, η ιδιοκτησία και η λειτουργία των δημόσιων υποδομών φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα θεωρούνται ως ανταγωνιστικές δραστηριότητες που μπορούν να εκτελεστούν από έναν ή περισσότερους παίκτες της αγοράς στην ίδια πόλη/δρόμο (Εικόνα 1.6). Οι δραστηριότητες αυτές δεν υπόκεινται στις ρυθμιστικές ευθύνες του DSO. Ωστόσο, ο ρόλος του DSO παραμένει σημαντικός, δεδομένου ότι τα νέα σημεία σύνδεσης της υποδομής φόρτισης θεωρούνται παρόμοια με οποιοδήποτε άλλο σημείο σύνδεσης στο δίκτυο. Στην ανεξάρτητη αγορά ηλεκτροκίνησης ο DSO παρέχει το μετρητή για το σταθμό φόρτισης (εκτός εάν ο κανονισμός απαιτεί την εγκατάσταση του μετρητή από τρίτο φορέα - Διαχειριστής σημείων μέτρησης) και θα πρέπει να διασφαλίζει ότι οι υποδομές δικτύου μπορούν να υποστηρίξουν το φορτίο του δημόσιου σταθμού φόρτισης. Η εγκατάσταση της δημόσιας υποδομής φόρτισης στο δίκτυο θα πρέπει να πραγματοποιείται με την σύμφωνη γνώμη του DSO.



Εικόνα 1.6 - Το μοντέλο της ανεξάρτητης αγοράς ηλεκτροκίνησης

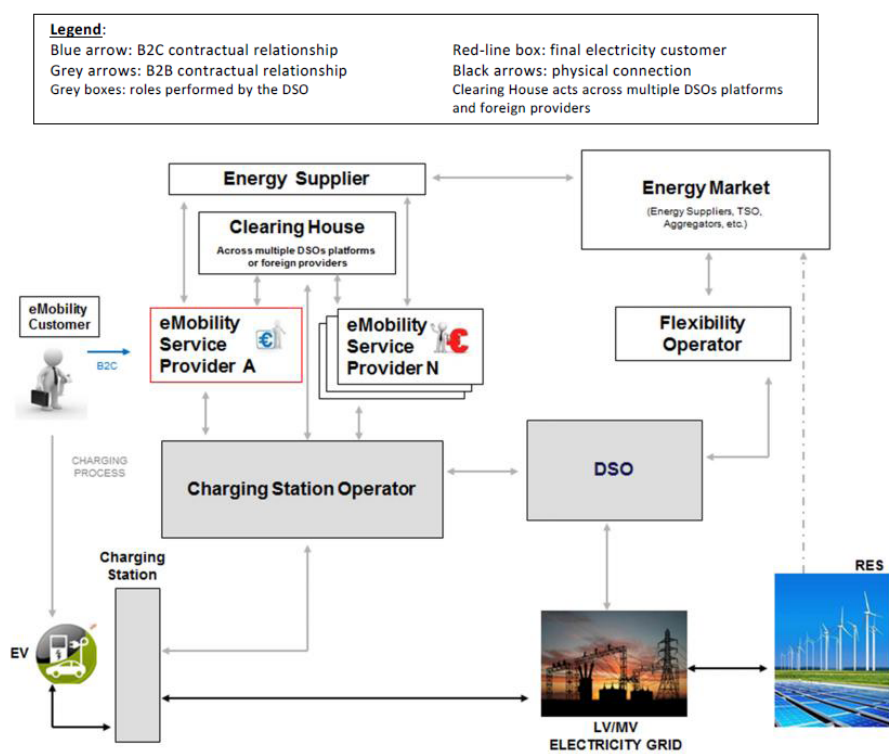
Σε μια πλήρως ανεξάρτητη αγορά ηλεκτροκίνησης, ο ιδιοκτήτης των σταθμών φόρτισης μπορεί επίσης να είναι ο φορέας εκμετάλλευσης των σταθμών φόρτισης καθώς και ο πάροχος υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης. Στην περίπτωση αυτή, οι τρεις παίκτες ηλεκτροκίνησης μέσα στα γκρίζα πλαίσια της εικόνας 1.6 είναι τελικά μόνο ένας φορέας. Σε κάθε περίπτωση, ο Διαχειριστής Υπηρεσιών Φόρτισης πρέπει να παρέχει πρόσβαση σε υπηρεσίες χρέωσης σε οποιονδήποτε Πάροχο Υπηρεσιών Ηλεκτροκίνησης. Η χρήση των δημόσιων υποδομών φόρτισης από τους πελάτες της ηλεκτροκίνησης απαιτεί διμερείς συμβάσεις με πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης ή συστήματα άμεσης πληρωμής (πιστωτικές κάρτες, κάρτες με χρονοχρέωση κ.λπ.). Η χρήση δημόσιων υποδομών φόρτισης που ανήκουν σε πάροχο

υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης με τον οποίο ο ιδιοκτήτης ηλεκτρικού οχήματος (EV) δεν έχει διμερές συμβόλαιο απαιτεί την ανάπτυξη υπηρεσιών περιαγωγής.

Το μοντέλο της ανεξάρτητης αγοράς ηλεκτροκίνησης εξετάζει επίσης τη δυνατότητα ανάπτυξης διαδικασιών έξυπνης χρέωσης με σκοπό την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ο DSO μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις υπηρεσίες για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του δικτύου. Αυτό το μοντέλο υιοθετήθηκε στη Γερμανία, την Ισπανία, τη Γαλλία και τη Δανία.

• Το μοντέλο της αγοράς των ολοκληρωμένων υποδομών ("μοντέλο DSO").

Στο δεύτερο μοντέλο για την ανάπτυξη δημόσιων υποδομών φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα, η ιδιοκτησία καθώς και η λειτουργία των σταθμών φόρτισης θεωρούνται ευθύνη του DSO και θα πρέπει να συμπεριληφθούν στο κανονιστικό πλαίσιο λειτουργίας του δικτύου διανομής μέσης και χαμηλής τάσης (Εικόνα 1.7). Σε αυτό το μοντέλο, η υλοποίηση δημόσιων υποδομών φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα πραγματοποιείται από τον DSO. Ο DSO είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία των υποδομών φόρτισης και πρέπει να επιτρέπει την πρόσβαση χωρίς διακρίσεις σε οποιονδήποτε πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης, επιτρέποντας την ανάπτυξη ανταγωνιστικού περιβάλλοντος για την παροχή υπηρεσιών προς τον πελάτη (B2C). Το μοντέλο αυτό είναι ιδανικό για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης σε χώρες με χαμηλά επίπεδα διείσδυσης στην αγορά EV, όπου οι αυτοκινητοβιομηχανίες ή οι προμηθευτές σταθμών φόρτισης δεν επιθυμούν να αναλάβουν επιχειρηματικό κίνδυνο ("chicken-egg" problem).



Εικόνα 1.7 - Το μοντέλο αγοράς των ολοκληρωμένων υποδομών - "Μοντέλο DSO"

Αυτό το μοντέλο έχει ήδη υιοθετηθεί από την Ιταλία, την Ιρλανδία, το Λουξεμβούργο, τη Σλοβενία (μόνο σε αυτοκινητόδρομους) και την Αυστρία. Ο DSO είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη της υποδομής χρέωσης και των υπηρεσιών μέτρησης, ενώ παρατηρούνται δύο

εναλλακτικές λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη την τεχνική και εμπορική λειτουργία των σταθμών φόρτισης:

- Η εμπορική και τεχνική λειτουργία των σταθμών φόρτισης ανατίθεται σε έναν ανεξάρτητο παίκτη (Λουξεμβούργο, Σλοβενία, Αυστρία). Ο DSO είναι υπεύθυνος για την εγκατάσταση των σταθμών φόρτισης και των μετρήσεων.
- Ο DSO είναι υπεύθυνος για την εγκατάσταση και την τεχνική λειτουργία της υποδομής χρέωσης, ωστόσο η εμπορική λειτουργία των σταθμών έχει εκχωρηθεί σε άλλο παίκτη. Η υπόθεση αυτή εγκρίθηκε στην Ιρλανδία.

Η συμμετοχή του DSO στην ηλεκτροκίνηση θα πρέπει να καθορίζεται από το σχετικό ρυθμιστικό πλαίσιο το οποίο θα πρέπει να καθορίζει την αμοιβή του αναγκαίου κόστους υποδομής. Το κόστος επένδυσης υποδομής μπορεί να συμπεριληφθεί στο κεφάλαιο του DSO και μπορεί να διατεθεί στους πελάτες της ηλεκτροκίνησης (ως μέρος των τελών χρήσης του δικτύου) ή μπορεί να χρηματοδοτηθεί από δημόσιους πόρους για έναν καθαρότερο τομέα μεταφορών.

Σε αυτό το μοντέλο οι πελάτες ηλεκτροκίνησης μπορούν να υπογράψουν σύμβαση με έναν ή περισσότερους παρόχους υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης, ενώ θα πρέπει επίσης να έχουν τη δυνατότητα να χρεώνουν τα EV τους σε οποιονδήποτε δημόσιο σταθμό φόρτισης, που αναπτύσσεται από το DSO. Λαμβάνοντας υπόψη την τιμολόγηση της ηλεκτροκίνησης, ο DSO αποστέλλει πιστοποιημένες πληροφορίες για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στον πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης, ο οποίος καθορίζει την τιμή της διαδικασίας χρέωσης σύμφωνα με τη διμερή σύμβαση με τον σχετικό πελάτη ηλεκτροκίνησης. Το κόστος για την πρόσβαση και τη χρήση του σταθμού φόρτισης μπορεί να προσδιοριστεί από πολλές παραμέτρους, όπως ο χρόνος χρήσης, το επίπεδο χρέωσης, η κατανάλωση ενέργειας κλπ.

Επιπλέον, πέραν της λειτουργίας του σταθμού φόρτισης, ο DSO θα έχει επίσης τη δυνατότητα να αναπτύξει διαδικασίες έξυπνης χρέωσης προκειμένου να αποφευχθούν καταστάσεις τοπικής συμφόρησης του δικτύου σε περιπτώσεις υψηλής κατανάλωσης ενέργειας καθώς και πρόωρες επενδύσεις για τη βελτίωση του δικτύου. Οι υποδομές τηλεπικοινωνιών που επιτρέπουν την παρακολούθηση και τη λειτουργία των σταθμών φόρτισης θα πρέπει να αναπτυχθούν από το DSO. Ως εκ τούτου, η πείρα καθώς και οι υποδομές του DSO που εξετάζουν συστήματα απομακρυσμένης μέτρησης για την κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ σημαντικά όταν εξετάζεται η ανάπτυξη του μοντέλου της αγοράς των ολοκληρωμένων υποδομών.

1.5 Ευκαιρίες και προκλήσεις της ηλεκτροκίνησης

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα αποτελεί ένα πρόσθετο φορτίο. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να θεωρηθούν ως απλά φορτία δηλαδή οι μπαταρίες τους φορτίζονται μόλις συνδεθούν στο δίκτυο ή ως ευέλικτο φορτίο δηλαδή η ζήτηση φόρτισης μπορεί να καταναμηθεί κατά την διαθέσιμη περίοδο στάθμευσης. Σε ένα πιο φιλόδοξο σενάριο, τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ικανά να εισάγουν ενέργεια πίσω στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (Υπηρεσίες οχήματος-δικτύου, Vehicle-to-Grid ή V2G) προκειμένου να υποστηρίξουν τη λειτουργία του δικτύου και να βελτιώσουν την επιχειρησιακή του αποδοτικότητα. Η υλοποίηση των υπηρεσιών V2G προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες στην αγορά και το δίκτυο, ωστόσο, η κύρια ανησυχία είναι η γρήγορη γήρανση της μπαταρίας των

EV λόγω της πρόσθετης διαδικασίας εκφόρτωσης. Η υποβάθμιση της μπαταρίας των EV για την παροχή ενέργειας στο δίκτυο εκτιμάται ότι είναι ίση με το μισό της υποβάθμισης που δέχεται η μπαταρία λόγω οδήγησης σε υψηλές ταχύτητες.

Οι επόμενες παραγράφους υπογραμμίζουν τις κύριες ευκαιρίες και προκλήσεις της ενσωμάτωσης των EVs στο ηλεκτρικό δίκτυο.

• Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτροδότηση του τομέα των μεταφορών απαιτεί την ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω κατάλληλων υποδομών. Οι ενεργειακές απαιτήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να εξυπηρετούνται με τρόπο παρόμοιο με τη ζήτηση των νοικοκυριών χωρίς διακρίσεις. Η διαφορά μεταξύ του EV και της συμβατικής ζήτησης έγκειται στο γεγονός ότι η ζήτηση φόρτισης παρουσιάζει χρονική και χωρική κατανομή λόγω της κινητικότητας των EVs. Από την πλευρά της αγοράς, τα ηλεκτρικά οχήματα αναμένεται να τροποποιήσουν την καμπύλη φορτίου του συστήματος επηρεάζοντας κατά συνέπεια το μίγμα παραγωγής. Το ποσοστό ανάπτυξης των EVs καθώς και η στρατηγική φόρτισης που ακολουθείτε καθορίζει την χρέωση της πρόσθετης ζήτησης ισχύος. Ειδικότερα, η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να αυξήσει την κορυφή της καμπύλης φορτίου του συστήματος, καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα συνδέονται και φορτίζουν στο σπίτι αυξάνοντας κατανάλωση των νοικοκυριών.

Από τη σκοπιά του συστήματος παραγωγής, η αυξημένη ζήτηση αιχμής θα εξυπηρετείται από σταθμούς φορτίου αιχμής που είναι κοστοβόροι σε σχέση με τους σταθμούς φορτίου βάσης. Από την άποψη αυτή, αναμένεται ότι η διασύνδεση των EVs στο δίκτυο θα αυξήσει το λειτουργικό κόστος (€ / MWh) του συστήματος. Αντίθετα, η εφαρμογή των μηχανισμών demand-response στη ζήτηση θα επιτρέψει την κατανομή της ζήτησης από τις ώρες αιχμής σε χαμηλές περιόδους κατανάλωσης, μειώνοντας το ειδικό κόστος του λειτουργικού συστήματος.

Από την οπτική γωνία του χρήστη, η εκμετάλλευση της αμφίδρομης ροής ισχύος μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων και του ηλεκτρικού δικτύου (V2G) μπορεί να προσφέρει κέρδη στους χρήστες EV μέσω της διαδικασίας αρμπιτράζ, δηλαδή προσφέροντας ενέργεια στο δίκτυο όταν οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλές και φορτίζοντας κατά τις ώρες της χαμηλής ζήτησης (valley filling) όπου οι τιμές της ενέργειας είναι χαμηλές. Τα ετήσια κέρδη αρμπιτράζ για έναν χρήστη EV που κατέχει ένα όχημα με μικρή μπαταρία (16kW) μπορεί να είναι 142\$ - 249\$ χωρίς να λαμβάνουν υπόψη το κόστος υποβάθμισης της μπαταρίας, διαφορετικά τα κέρδη περιορίζονται κάτω από τα 118\$.

Εκτός από τις υπηρεσίες για την μείωση του φορτίου αιχμής (peak shaving), τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν επίσης να προσφέρουν πρόσθετες βοηθητικές υπηρεσίες στους DSO. Τα ετήσια κέρδη από την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στους DSO κυμαίνονται μεταξύ 3162\$ και 8442\$, ενώ τα αντίστοιχα κέρδη στρεφόμενης εφεδρείας είναι σημαντικά χαμηλότερα (\$ 700). Επιπλέον, τα κέρδη από την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών εξαρτώνται και από το μείγμα της παραγωγής. Για παράδειγμα, η παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στη Σουηδία δεν είναι κερδοφόρα, διότι οι βοηθητικές υπηρεσίες προσφέρονται κυρίως από υδροηλεκτρικούς σταθμούς, ενώ στη Γερμανία όπου κυριαρχεί η θερμική ισχύς, το μηνιαίο εισόδημα μπορεί να φτάσει τα 80 ευρώ.

• Περιβάλλον

Οι μηδενικές άμεσες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου καθώς και η μειωμένη ηχορύπανση των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν τα κύρια πλεονεκτήματα της ηλεκτροκίνησης για τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στις αστικές περιοχές. Ωστόσο, κατά τη συζήτηση για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι πρόσθετες εκπομπές CO₂ από το σύστημα παραγωγής που εξυπηρετούν την ενεργειακή ζήτηση των EVs. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτάται από το μείγμα παραγωγής. Σε περίπτωση που η ζήτηση των EVs εξυπηρετείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα ηλεκτρικά οχήματα θα πρέπει να θεωρούνται ως "πράσινο" μέσο μεταφοράς. Αντιθέτως, εάν η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια εξυπηρετείται από συμβατικές μονάδες, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της πρόσθετης ενέργειας που παράγεται για να τα τροφοδοτήσει. Το αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων κυμαίνεται ανάλογα με τη στρατηγική χρέωσης και την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σε κάθε περίπτωση, η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στον τομέα των μεταφορών μεταφέρει την περιβαλλοντική ρύπανση από τις αστικές πόλεις στους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής όπου μπορούν να εφαρμοστούν διάφοροι μηχανισμοί προστασίας του περιβάλλοντος.

• Δίκτυο Διανομής

Η επιπρόσθετη ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να επηρεάσει τη λειτουργία των δικτύων διανομής ανάλογα με το επίπεδο διείσδυσης των EVs καθώς και την υιοθετημένη στρατηγική φόρτισης. Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα μπορεί να προκαλέσει λειτουργικά ζητήματα του δικτύου σε τοπικό επίπεδο π.χ. στο δίκτυο διανομής. Κάθε δίκτυο διανομής μπορεί να φιλοξενήσει ένα μέγιστο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων χωρίς να παραβιάζει οποιονδήποτε τεχνικό περιορισμό του δικτύου. Το μέγιστο επίπεδο διείσδυσης των EVs ονομάζεται μέγιστο όριο διείσδυσης των EVs και καθορίζεται με βάση τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του αντίστοιχου δικτύου διανομής. Πιο συγκεκριμένα, τα αστικά δίκτυα διανομής μέσης τάσης είναι πυκνοκατοικημένα και η φόρτωση του εξοπλισμού δικτύου είναι συνήθως υψηλή. Έτσι, η ανάπτυξη των EVs αναμένεται να επιβαρύνει περαιτέρω τον εξοπλισμό του δικτύου. Αντίθετα, τα αγροτικά δίκτυα μέσης τάσης περιλαμβάνουν γραμμές διανομής μεγάλου μήκους που προκαλούν πτώσεις τάσης, ενώ η φόρτιση του δικτύου είναι σχετικά χαμηλή. Κατά συνέπεια, το μέγιστο επίπεδο διείσδυσης των EVs μπορεί να οριστεί είτε με βάση τη φόρτιση του δικτύου είτε με βάση το προφίλ της τάσης. Το μέγιστο επίπεδο διείσδυσης ενός δικτύου μπορεί να αυξηθεί με την εφαρμογή προηγμένων μηχανισμών συντονισμού των EVs που θα επιτρέψουν την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση της χωρητικότητας του δικτύου και των τοπικών πόρων.

2 Επίδραση της διείσδυσης των Ηλεκτρικών Οχημάτων στα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στην ενότητα αυτή θα προσδιοριστεί η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής καθώς και η επίδραση που στις ημερήσιες και ετήσιες καμπύλες φορτίου. Για την ανάλυση αυτή θα αναπτυχτεί μια στοχαστική μέθοδος για τον προσδιορισμό του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων. Η στοχαστικότητα της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι η οδηγική συμπεριφορά και οι αποστάσεις που διανύει κάθε φορά ο χρήστης με το ηλεκτρικό όχημα δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ντετερμινιστικό τρόπο.

2.1 Παράμετροι προσδιορισμού της καμπύλης φορτίου των Ηλεκτρικών Οχημάτων

Για τον προσδιορισμό της καμπύλης φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να καθοριστούν οι παράμετροι που την επηρεάζουν. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να χωριστούν σε ντετερμινιστικές και στοχαστικές παράμετρος,

- **Ντετερμινιστικές παράμετροι:**
 - Το μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων.
 - Ο τύπος των ηλεκτρικών οχημάτων (PHEV, BEV, EREV)
 - Το μέγεθος της μπαταρίας (kWh)
 - Η τεχνολογία φόρτισης που χρησιμοποιείτε (τύπου 1,2 και 3).
 - Τα διαθέσιμα σημεία φόρτισης.
 - Τις απώλειες ισχύος για τη μετατροπή της εναλλασσόμενης ισχύος του δικτύου σε συνεχή για τη φόρτιση των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων, λόγω της λειτουργίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Θεωρούνται ίσες με 10-15% της συνολικής ενεργειακής ζήτησης.
 - Την στρατηγική φόρτισης που ακολουθείτε,
 - **Στρατηγική Α, Φόρτιση στο σπίτι μετά την τελευταία διαδρομή:** Αρχικά λόγω του μικρού αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων, ο αριθμός των σημείων φόρτισης θα περιοριστεί στους οικιακούς φορτιστές. Έτσι, οι περισσότεροι από τους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων θα φορτίζουν το όχημά τους αποκλειστικά και μόνο στον οικιακό φορτιστή τους.
 - **Στρατηγική Β, Φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο:** Σε αυτό το σενάριο φόρτισης θεωρούμε ότι για την μετατόπιση των φορτίσεων των EVs από τις ώρες αιχμής του δικτύου έχει αναπτυχτεί μια τιμολογιακή πολιτική χαμηλότερης χρέωσης για ώρες χαμηλής ζήτησης και υψηλότερης χρέωσης για ώρες υψηλής ζήτησης.
 - **Στρατηγική Γ, Φόρτιση με χρήση μεθόδου valley - filling:** Σε αυτό το σενάριο φόρτισης θεωρούμε ότι η μετατόπιση των φορτίσεων των EVs από τις ώρες αιχμής του δικτύου γίνεται κατάλληλα και με ομοιόμορφο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη εξομάλυνση των διακυμάνσεων της συνολικής ζήτησης του δικτύου.

- **Στοχαστικές Παράμετροι:**

- Τα ημερήσια δρομολόγια που διανύει το κάθε ηλεκτρικό όχημα.

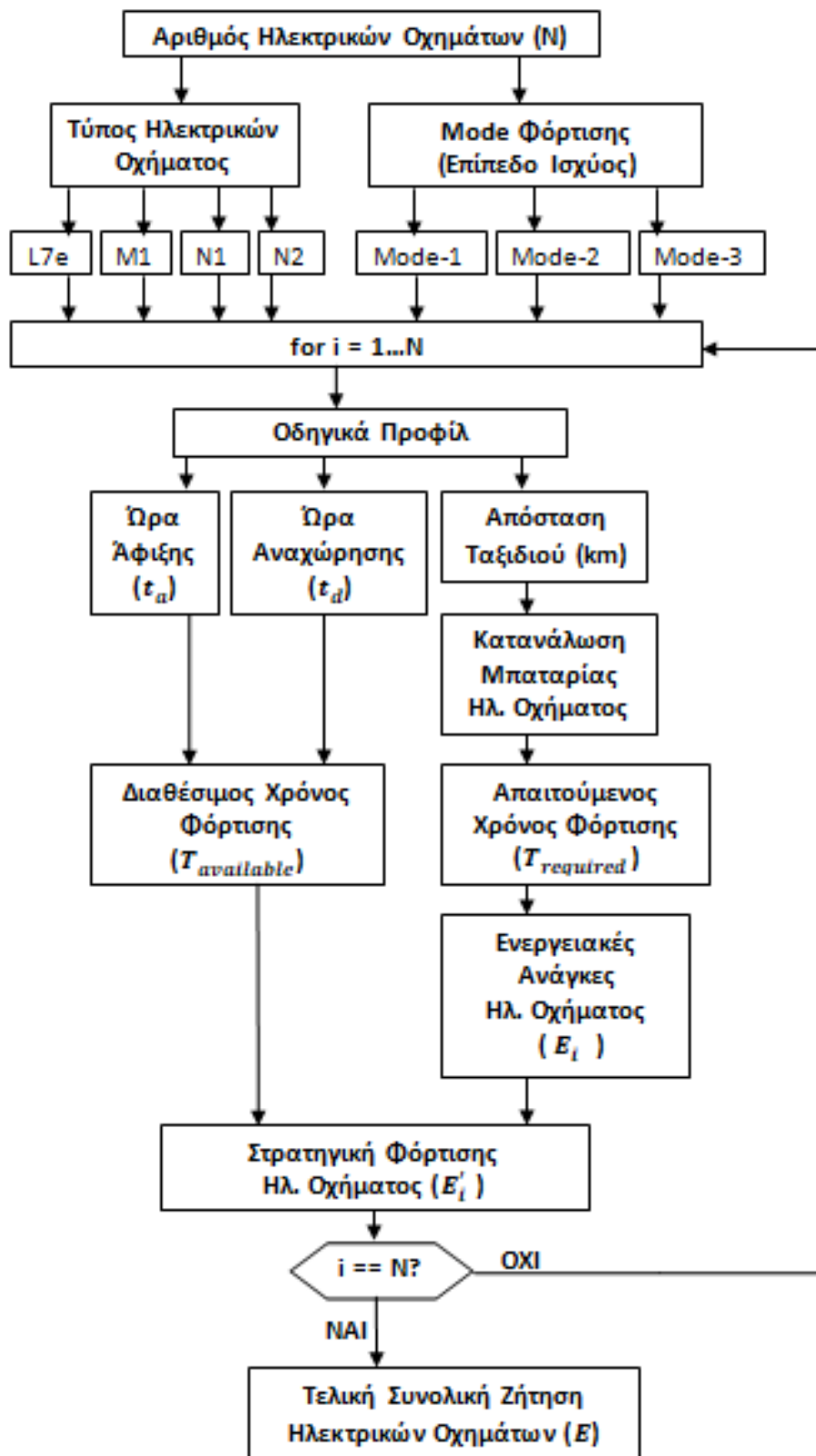
Για τις ντετερμινιστικές παραμέτρους των ηλεκτρικών οχημάτων αναφερθήκαμε εκτεταμένα στο 1^ο κεφάλαιο οπότε εδώ θα αναπτύξουμε μόνο τις στοχαστικές παραμέτρους.

Ημερήσια διανύμενα δρομολόγια, αυτή η στοχαστική παράμετρος περιγράφει την απόσταση που διανύει ένα ηλεκτρικό όχημα μεταξύ δυο φορτίσεων. Το προφίλ διαφοροποιείται σε,

- **προφίλ εργάσιμων ημερών**, όπου τα οχήματα χρησιμοποιούνται επί το πλείστον για την εύκολη και γρήγορη πρόσβαση των χρηστών στο εργασιακό τους περιβάλλον και
- **προφίλ Σαββατοκύριακου**, όπου τα οχήματα χρησιμοποιούνται για τις εξόδους των χρηστών.

2.2 Αλγόριθμος Προσδιορισμού Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τον προσδιορισμό της ημερήσιας φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο αλγόριθμος αρχικά κάνει πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών του *i*-οστού οχήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν λεπτομερώς στην προηγούμενη ενότητα και δημιουργώντας ένα αρχικό προφίλ. Στην συνέχεια ανάλογα με την στρατηγική που θα επιλέξουμε (A, B, Γ) δημιουργείται το τελικό προφίλ ζήτησης του οχήματος. Ο αλγόριθμος επιλύεται για κάθε όχημα και στο τέλος μας δίνει την αθροιστική ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων (η οποία εξαρτάται άμεσα από την στρατηγική φόρτισης). Η απαραίτητη χρονική διάρκεια για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας εξαρτάται από την διανυόμενη απόσταση και την κατανάλωση του οχήματος. Από την άλλη, το διαθέσιμο χρονικό διάστημα για την φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος καθορίζεται από την χρονική στιγμή αναχώρησης του. Τα ηλεκτρικά οχήματα παραμένουν περισσότερο από 90% της ημέρας σταθμευμένα. Ως εκ τούτου, το διαθέσιμο χρονικό περιθώριο για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι αρκετό για να καλυφθούν πλήρως οι ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης τους. Η μετατόπιση της φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος εντός του διαθέσιμου χρονικού περιθωρίου καθορίζεται από την υιοθετούμενη στρατηγική φόρτισης.

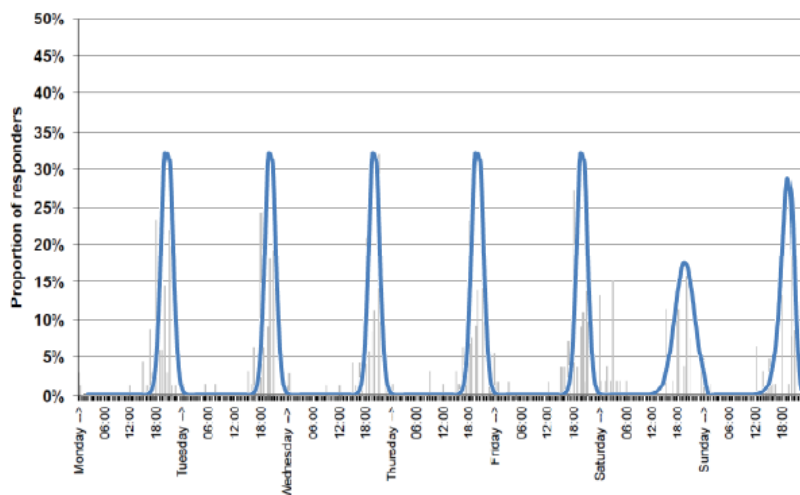


Εικόνα 2.1 – Αλγόριθμος προσδιορισμού φόρτισης στόλου Ηλεκτρικών Οχημάτων ανάλογα με την στρατηγική φόρτισης.

2.3 Μελέτη επίδρασης του φορτίου των Ηλεκτρικών Οχημάτων στην καμπύλη ζήτησης του συστήματος.

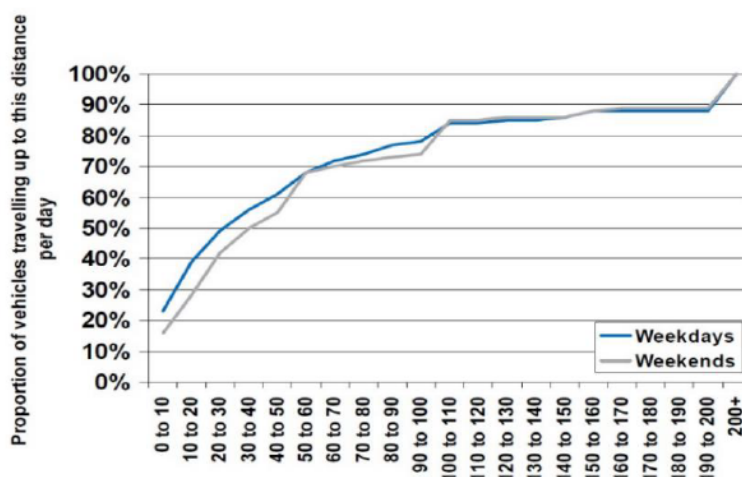
Με βάση την ανάλυση του ευρωπαϊκού προγράμματος MERGE [1],[3] προέκυψαν για την ηλεκτροκίνηση τα εξής στοιχεία,

- Το μεγαλύτερο ποσοστό των οδηγών αναμένετε να φορτίζει το ηλεκτρικό του όχημα αμέσως μόλις επιστρέφει στο σπίτι. Από την ανάλυση προέκυψε για την ώρα επιστροφής μια μέση τιμή 20:00 με τυπική απόκλιση ± 1 ώρα.

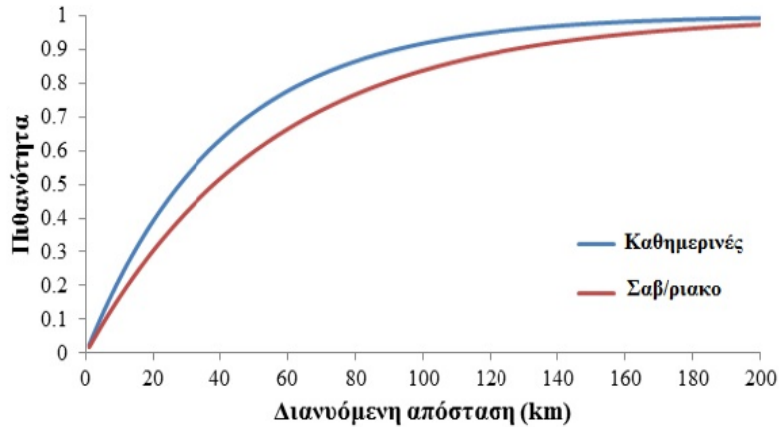


Εικόνα 2.2 - Κατανομή της ώρας επιστροφής από την τελευταία διαδρομή της ημέρας.

- Για την διανυόμενη απόσταση των ηλεκτρικών οχημάτων το 95% των οδηγών διανύει ημερήσιες αποστάσεις μικρότερες των 100km, ενώ το 5% που εκτελεί μεγαλύτερα ημερήσια δρομολόγια δεν επιφέρει σοβαρές αλλαγές στο συνολικό προφίλ και δεν λαμβάνετε υπόψη. Οπότε τις καθημερινές η μέση διανυόμενη απόσταση θεωρείτε 35km ενώ τα Σαββατοκύριακα 46km.

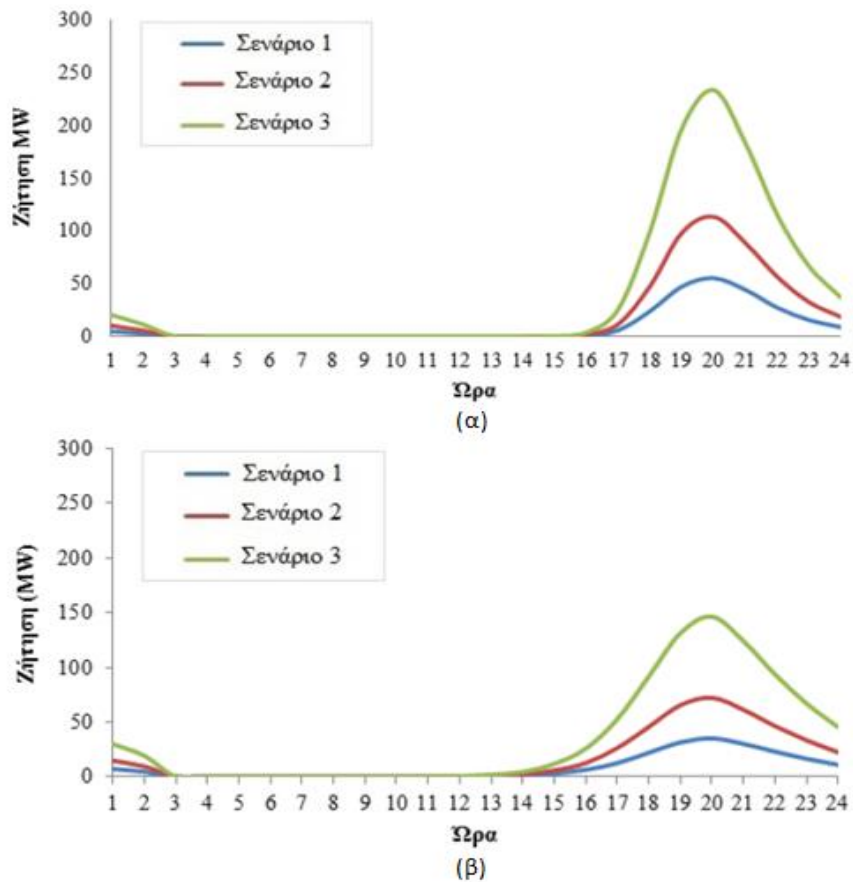


Εικόνα 2.3 - Μέσο Ευρωπαϊκό προφίλ διανυόμενων αποστάσεων ανά ημέρα



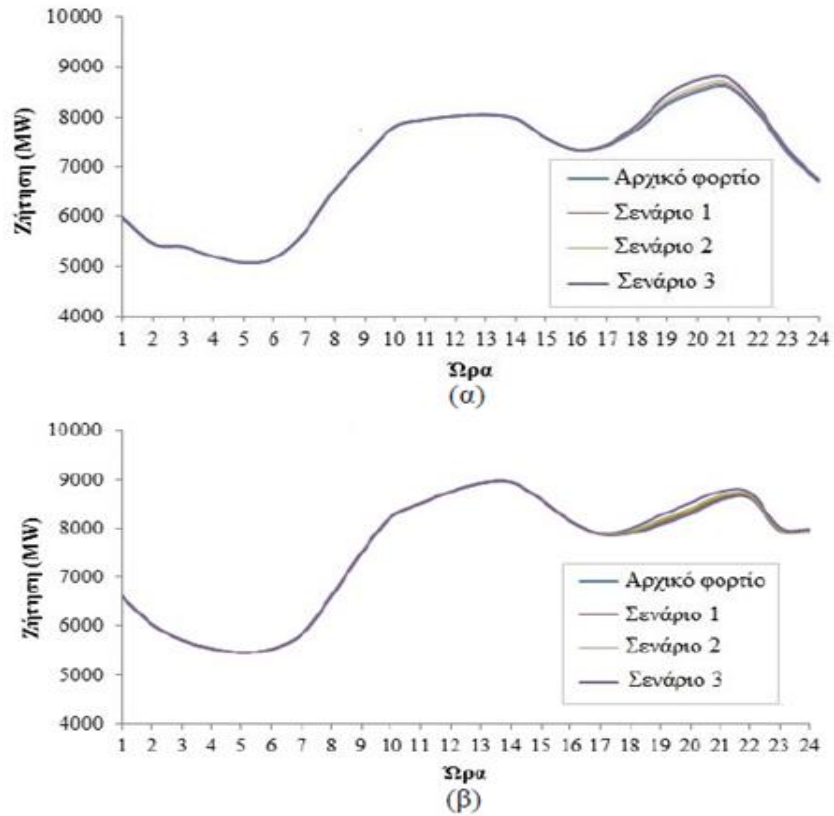
Εικόνα 2.4 - Αποστάσεις που διανύονται Καθημερινές και Σαββατοκύριακα

- Σενάριο Α. Το σενάριο της μη ελεγχόμενης φόρτισης όπου τα ηλεκτρικά οχήματα μετά την τελευταία διαδρομή συνδέονται στον οικιακό ρευματοδότη και φορτίζουν με την μέγιστη επιτρεπτή ισχύ. Το ημερήσιο προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων τις καθημερινές διαμορφώνεται ως εξής, (Σενάριο 1) 34000 EVs, Ενέργεια Φόρτισης 236MWh και Αιχμή 55MW, (Σενάριο 2) 70000 EVs, Ενέργεια Φόρτισης 485MWh και Αιχμή 113MW και (Σενάριο 3) 142000 EVs, Ενέργεια Φόρτισης 995MWh και Αιχμή 233MW.**

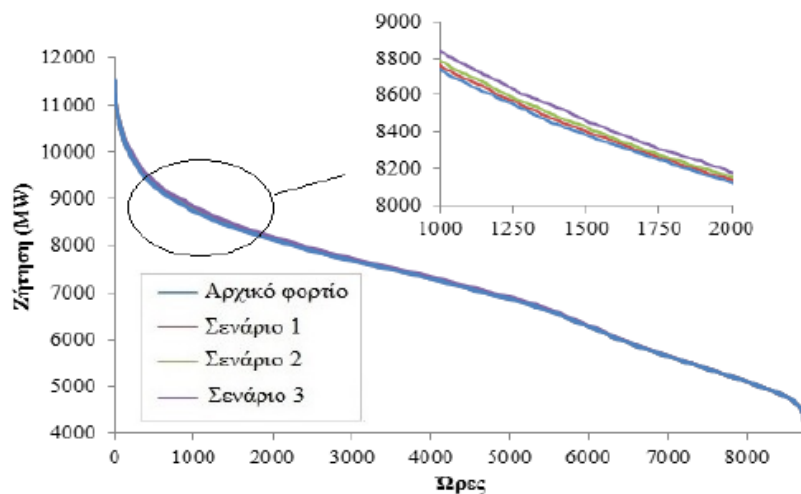


Εικόνα 2.5 - Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων για μη ελεγχόμενη φόρτιση (α) Καθημερινές (β) Σαββατοκύριακο.

Η μη ελεγχόμενης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την χειμερινή περίοδο την αύξηση της αιχμής της καμπύλης φορτίου του συστήματος (Σενάριο 1: 0,51%, Σενάριο 2: 1,02% και Σενάριο 3: 2,13%) ενώ το καλοκαίρι την αύξηση της ζήτησης κατά τις βραδινές ώρες. Η αύξηση αυτή είναι ανάλογη του ποσοστού διεύθυνσης των ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 2.6 - Ημερήσιο προφίλ ζήτησης του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την επίδραση από τα σενάρια μη ελεγχόμενης φόρτισης (α) Χειμώνας (β) Καλοκαίρι.

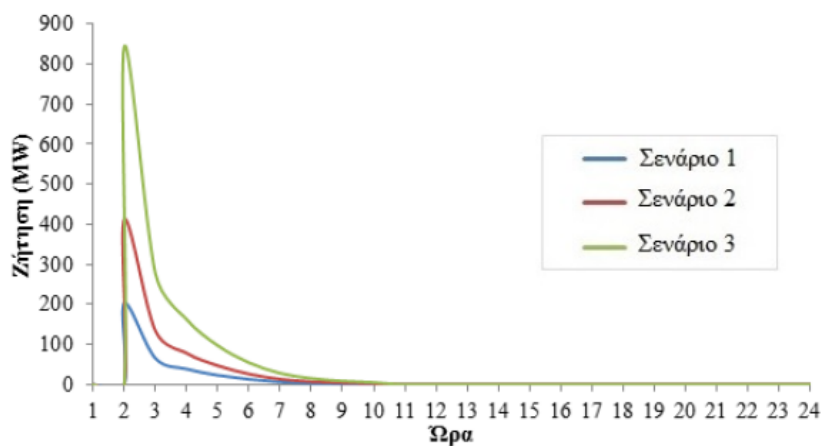


Εικόνα 2.7 - Ετήσιο προφίλ ζήτησης του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την επίδραση από τα σενάρια μη ελεγχόμενης φόρτισης.

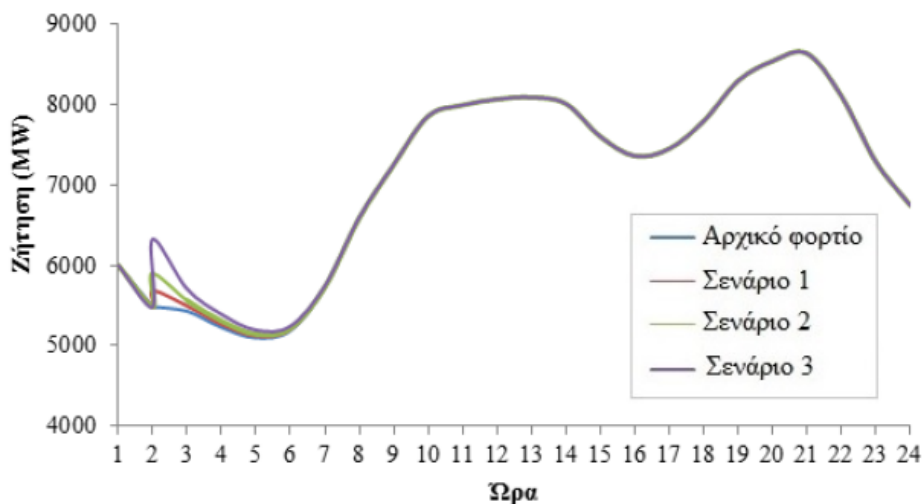
- **Σενάριο Β. Το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης με χρήση διζωνικού τιμολογίου,** όπου έχουμε μεταφορά της φόρτισης ενός ποσοστού των ηλεκτρικών οχημάτων από τις ώρες αιχμής στις ώρες χαμηλής χρέωσης. Για το διζωνικό τιμολόγιο θεωρούμε,

Ώρες Χαμηλής Χρέωσης	
Χειμερινή περίοδος (1/11 – 30/4)	02:00 - 08:00 το βράδυ 15:30 - 17:30 το μεσημέρι.
Καλοκαιρινή περίοδο (1/5 – 30/10)	3:00 - 07:00

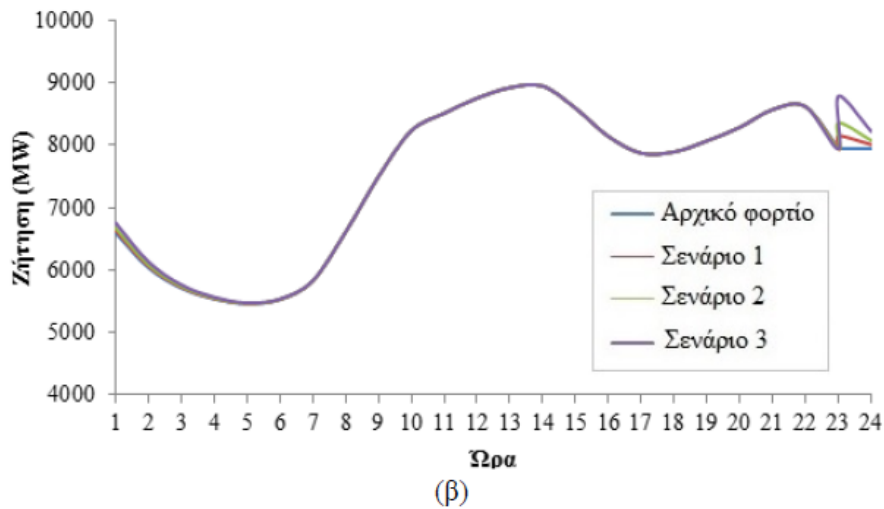
Παρατηρούμε ότι εφαρμόζοντας διζωνικό τιμολόγιο στα τρία σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων έχουμε μετατόπιση του φορτίου στην ώρα έναρξης της χαμηλής χρέωσης. Η μετατόπιση αυτή παρά το γεγονός ότι επιφέρει μείωση της αιχμής του συστήματος δημιουργεί πρόβλημα λόγω της απότομης ζήτησης σε ώρες που το σύστημα παραγωγής δεν ήταν συνηθισμένο να παράγει.



Εικόνα 2.8 - Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων για ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο.

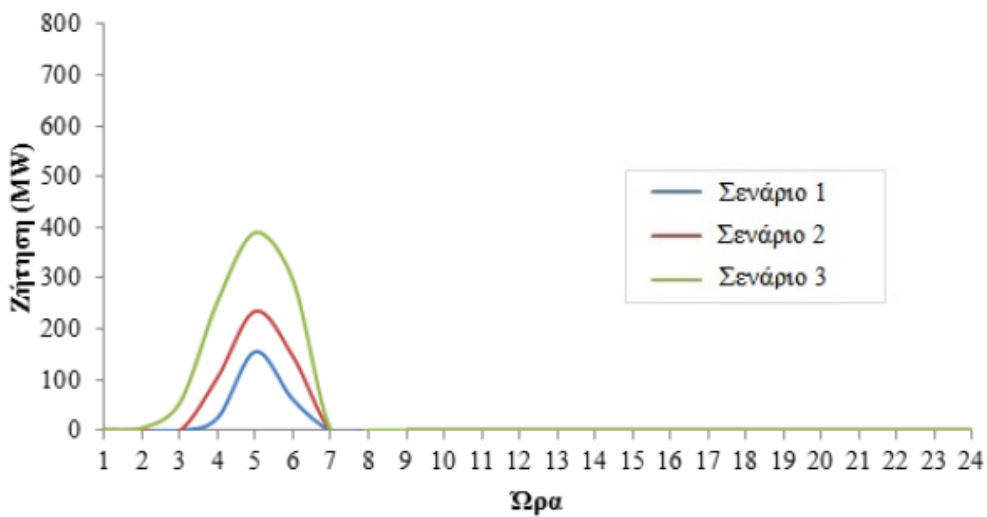


(α)

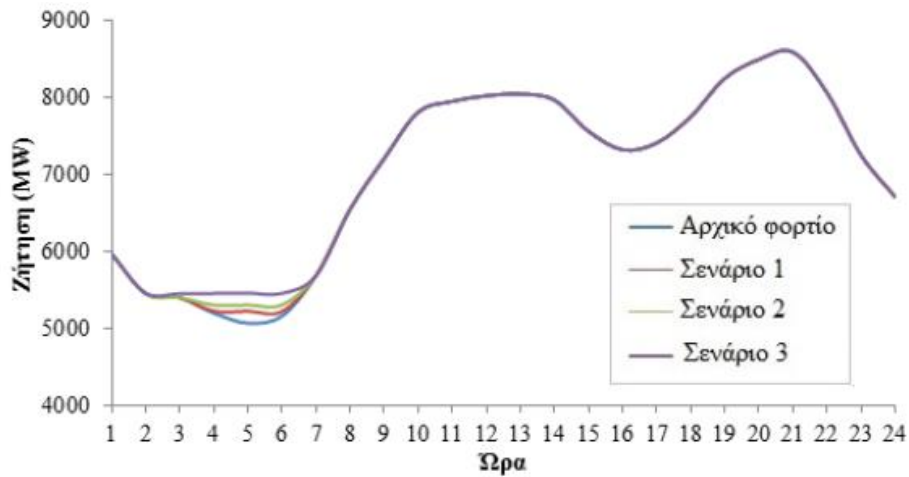


Εικόνα 2.9 - Ημερήσιο προφίλ ζήτησης του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την επίδραση από τα σενάρια ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο (α) Χειμώνας (β) Καλοκαίρι.

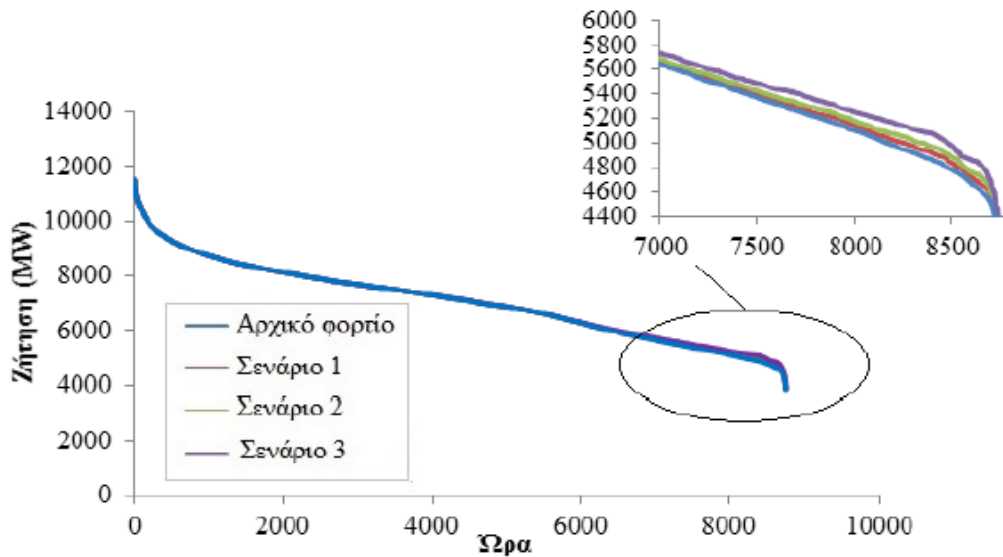
- Σενάριο Γ. Το σενάριο της ελεγχόμενης φόρτισης με χρήση valley – filling στρατηγικής.** Με την στρατηγική αυτή τα EVs μετατοπίζουν ομοιόμορφα την φόρτιση τους στις κοιλάτες (valleys) της καμπύλης ζήτησης του συστήματος στις οποίες έχουμε την ελάχιστη ζήτηση, δημιουργώντας μια πιο ομοιόμορφη καμπύλη συστήματος και τείνοντας να ελαχιστοποιήσουν της διακυμάνσεις. Η αιχμή ζήτησης με την εφαρμογή αυτής της στρατηγικής είναι περίπου η μισή από την ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο.



Εικόνα 2.10 - Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων για ελεγχόμενη φόρτιση με valley – filling στρατηγική.



Εικόνα 2.11 - Ημερήσιο προφίλ ζήτησης του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την επίδραση από τα σενάρια ελεγχόμενης φόρτισης με valley – filling στρατηγική.



Εικόνα 2.12 - Ετήσιο προφίλ ζήτησης του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με την επίδραση από τα σενάρια ελεγχόμενης φόρτισης με valley – filling στρατηγική.

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από την ετήσια καμπύλη ζήτησης του συστήματος, η στρατηγική του valley - filling αυξάνει το φορτίο βάσης άρα το επιπλέον φορτίο των EVs εξυπηρετείται από τις οικονομικές μονάδες βάσης.

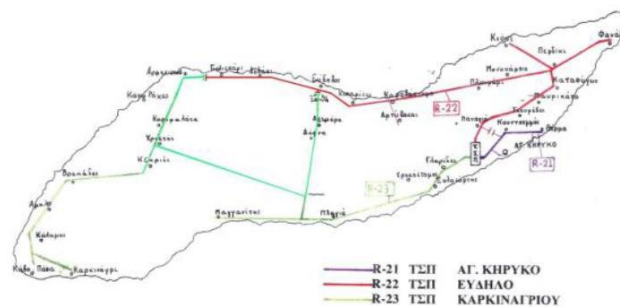
2.4 Μελέτη των στρατηγικών φόρτισης σε πραγματικά δίκτυα διανομής μέσης τάσης.

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε τις στρατηγικές φόρτισης σε δυο πραγματικά δίκτυα διανομής.

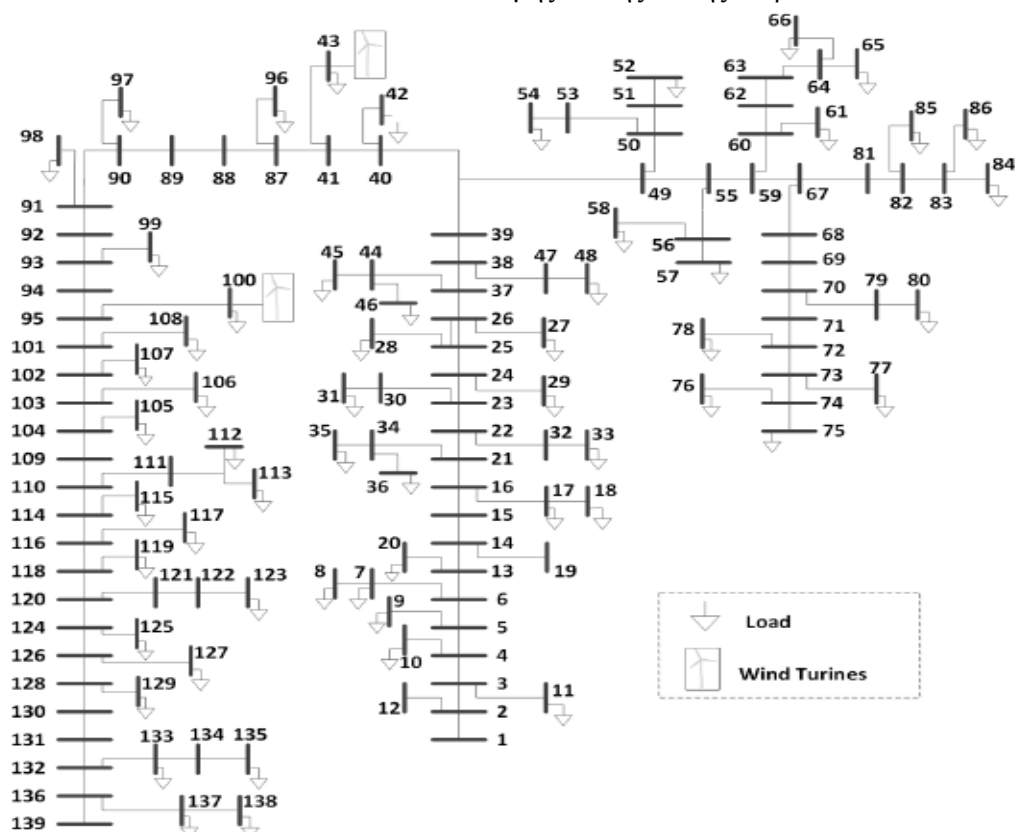
1. Δίκτυο Διανομής MT Ικαρίας το οποίο έχει εγκατεστημένη αιολική παραγωγή
2. Δίκτυο Διανομής MT Σπερχειάδας το οποίο έχει εγκατεστημένη Φωτοβολταϊκή παραγωγή

2.4.1 Δίκτυο Διανομής MT Ικαρίας

Το δίκτυο MT που θα εξετάσουμε φαίνεται στην εικόνα 2.13 με κόκκινο χρώμα και αποτελεί το δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης (15kV) της Ικαρίας. Στην εικόνα 2.15 φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα της Ικαρίας το οποίο χαρακτηρίζεται από αιολική παραγωγή.



Εικόνα 2.13 – Δίκτυο Διανομής Μέσης Τάσης Ικαρία

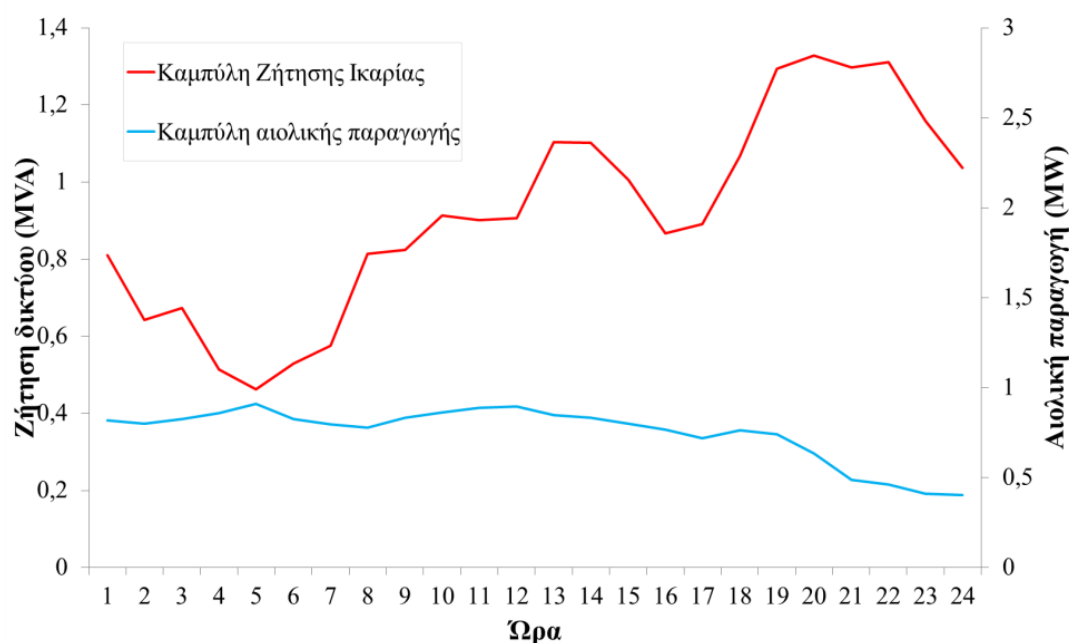


Εικόνα 2.14 – Μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου της Ικαρίας.

Η γραμμή Μ.Τ. της Ικαρίας έχει μήκος 50 km και αποτελείται από,

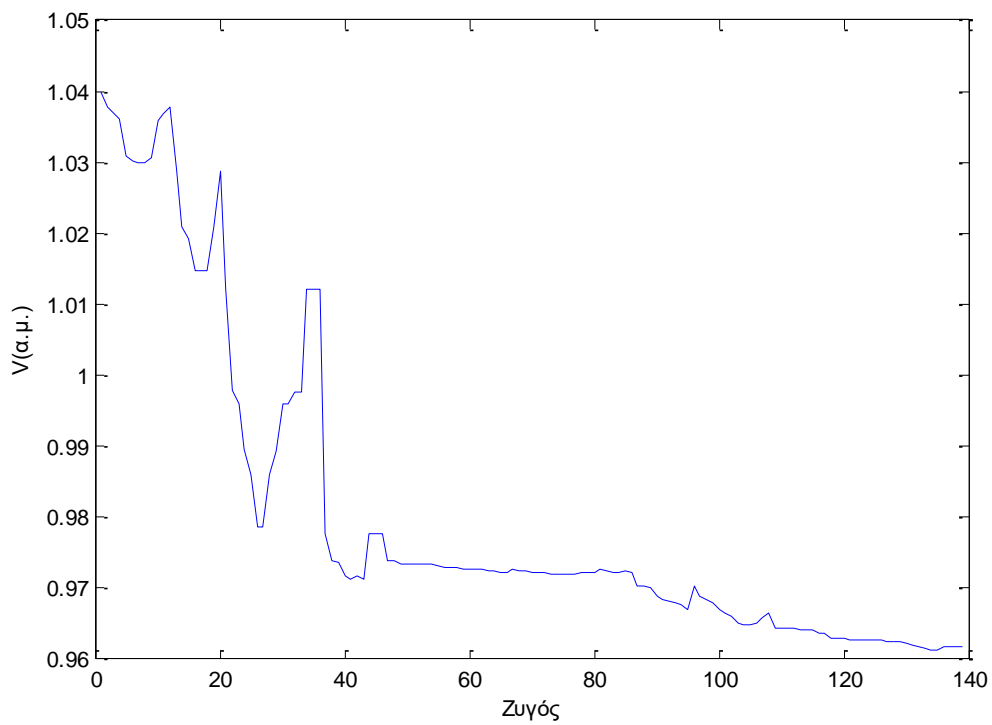
- 1 Υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ 250kVA
- 5 Υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ 160kVA
- 1 Υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ 150kVA
- 8 Υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ 100kVA
- 3 Υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ 75kVA
- 29 Υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ 50kVA
- 7 Υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ 25kVA
- 1 Υποσταθμό ΜΤ/ΧΤ 15kVA

Στην εικόνα 2.15 μπορούμε να δούμε την ημερήσια καμπύλη φορτίου της Ικαρίας καθώς και την ημερήσια αιολική παραγωγή που θεωρήσαμε για εγκατεστημένη αιολική παραγωγή 1,5MW.

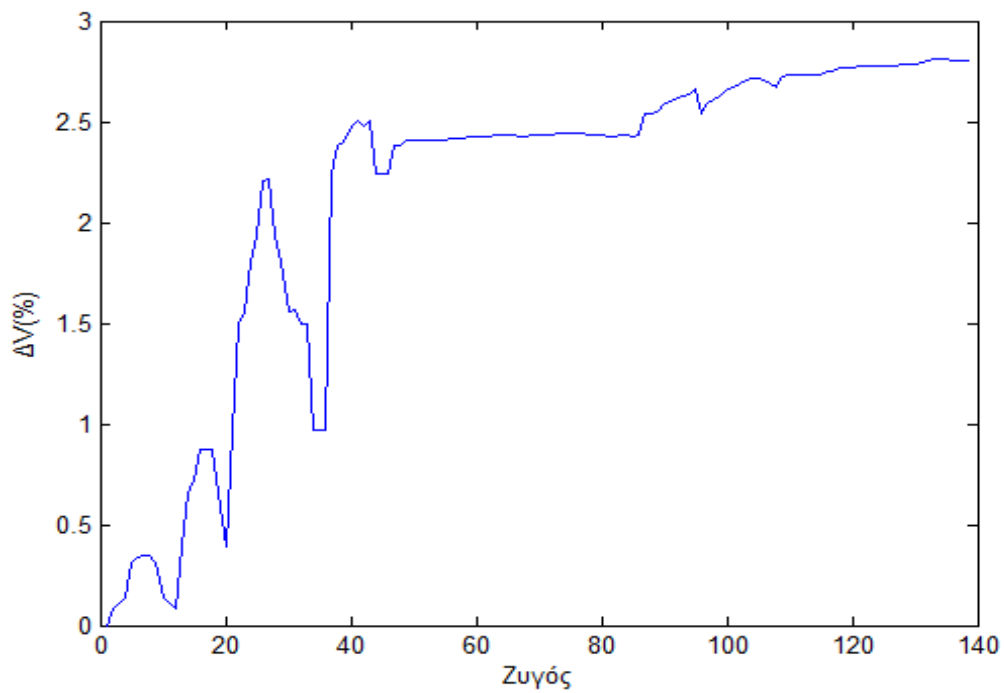


Εικόνα 2.15 - Ημερήσια καμπύλη φορτίου και αιολική παραγωγή της Ικαρίας

Στα επαρχιακά δίκτυα τα περισσότερα προβλήματα αφορούν πτώσης τάσης που οφείλονται στις μεγάλες αποστάσεις των γραμμών και στις διακυμάνσεις των φορτίων. Στις εικόνες 2.18 και 2.19 απεικονίζονται η ελάχιστη τάση ανά ζυγό του δικτύου καθώς και η μέγιστη διακύμανση ανά ζυγό.

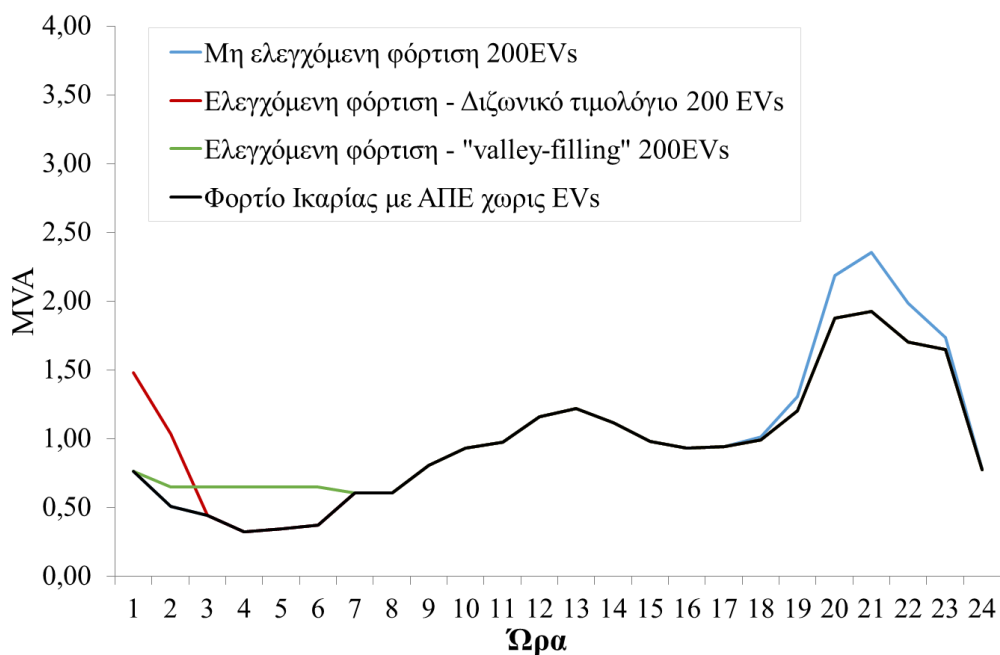


Εικόνα 2.18 - Ελάχιστη τάση (α.μ.) ανά ζυγό του δικτύου της Ικαρίας



Εικόνα 2.19 - Μέγιστη διακύμανση (%) ανά ζυγό του δικτύου της Ικαρίας

Λαμβάνοντας υπόψη το δίκτυο της Ικαρίας εφαρμόζονται όλα τα σενάρια που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα για 200 ηλεκτρικά οχήματα, τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 2.20.



Εικόνα 2.20 - Ημερήσια καμπύλη φορτίου του δικτύου της Ικαρίας για διάφορα σενάρια φόρτισης με στόλο 200 EVs.

Με την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων παρατηρούμε ότι,

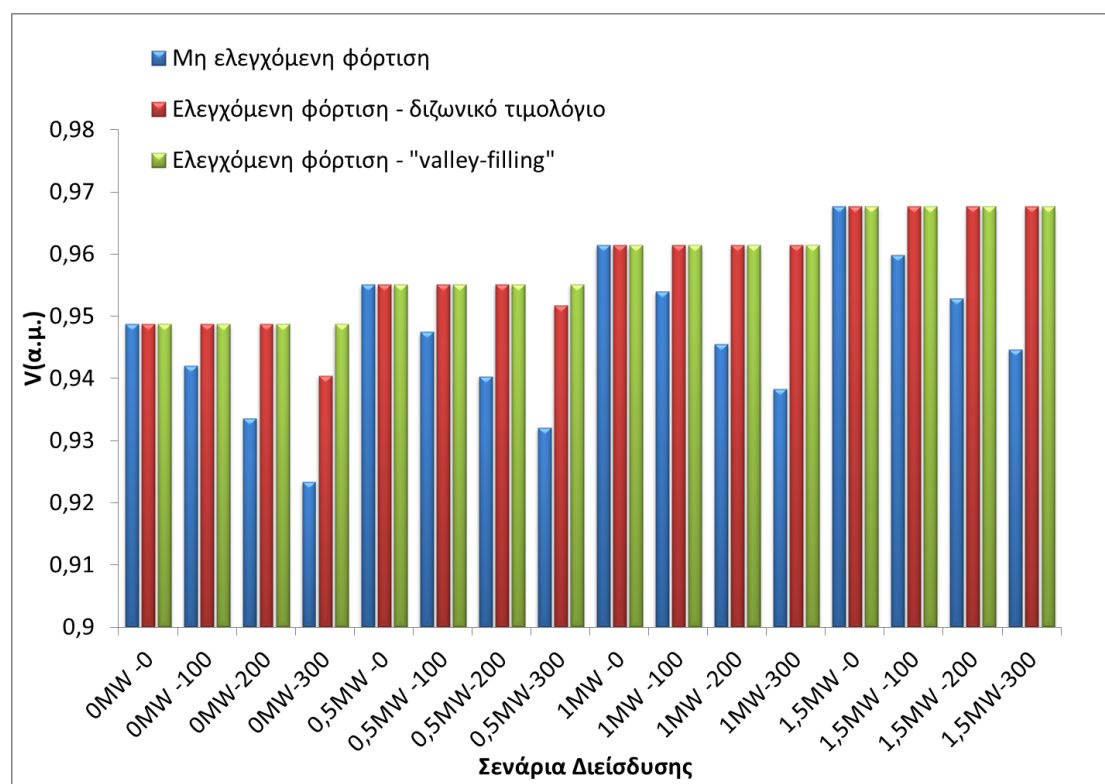
- Για την μη ελεγχόμενη φόρτιση εμφανίζεται μια αύξηση της αιχμής της τάξης του 22%.
- Για την ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο παρά την μετατόπιση του φορτίου από τις ώρες αιχμής, η ταυτόχρονη ένταξη των EVs την πρώτη ώρα χαμηλής χρέωσης δημιουργεί προβλήματα στον ημερήσιο προγραμματισμό καθώς και στο δίκτυο.
- Για την ελεγχόμενη φόρτιση με “valley – filling” το φορτίο των EVs κατανέμεται ομοιόμορφα στις κοιλότητες του ημερήσιου φορτίου χωρίς να μεταβάλλει την αιχμή του δικτύου. Η διακύμανση της τάσης μειώνεται κατά 13%.

Χαρακτηριστικά καμπύλης φορτίου Ικαρίας για τα διάφορα σενάρια φόρτισης των EVs.

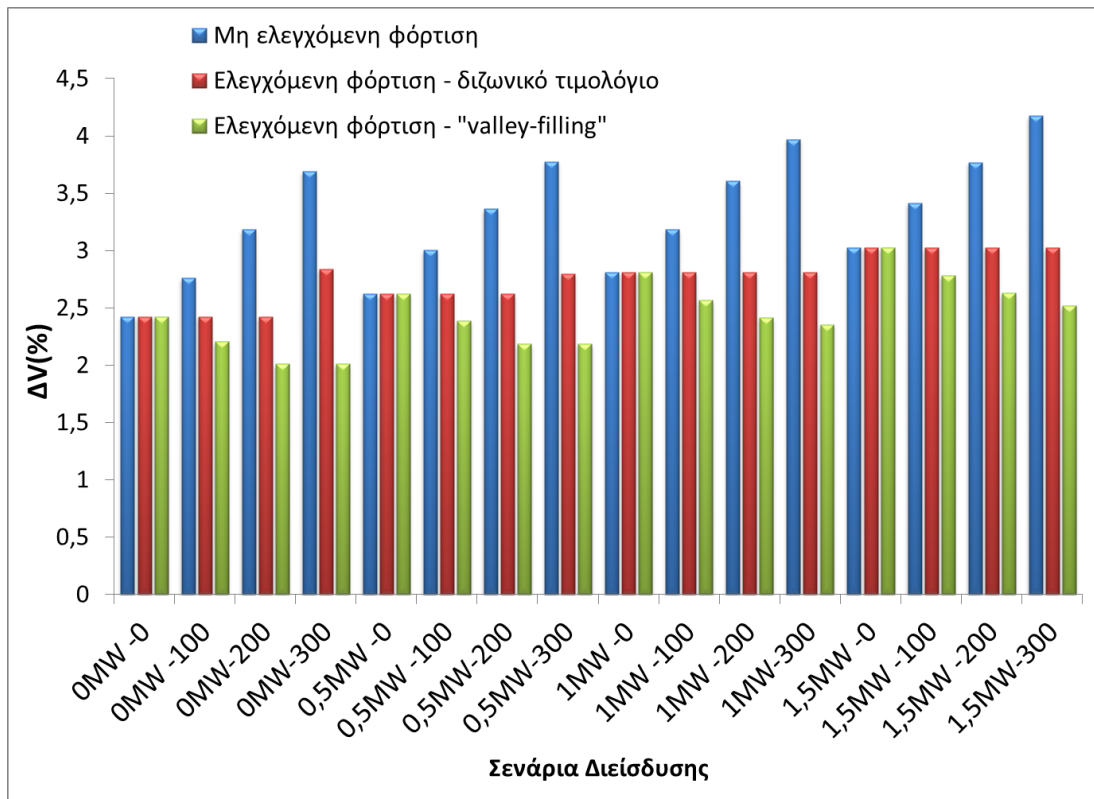
	Συντελεστής Φορτίσεως (Load Factor)	Συντελεστής ομοιομορφίας (Uniformity factor)	Αύξηση αιχμής (%)
Αρχικό Σενάριο	0,501	0,169	-
Μη ελεγχόμενη φόρτιση	0,432	0,138	22.32%
Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	0,528	0,169	0%
Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	0,560	0,337	0%
	Μέγιστη Φόρτιση Γραμμών	Ελάχιστη Τάση	Μέγιστη Διακύμανση τάσης
Αρχικό Σενάριο	2,0336	0,9614	3,026
Μη ελεγχόμενη φόρτιση	2,593 (+27.5%)	0,952 (-1.5%)	3,777(+24.8%)
Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	2,0336	0,9614	3,026
Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	2,0336	0,9614	2.62 (-13.14%)

Από τον πίνακα χαρακτηριστικών παρατηρείται ότι η επιβάρυνση του δικτύου λόγω της μη ελεγχόμενης και της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο αν και είναι σημαντική δεν ξεπερνά τα θερμικά όρια των γραμμών. Το κύριο πρόβλημα είναι η διακύμανση της τάσης όπου για την μη ελεγχόμενη φόρτιση υπερβαίνει το όριο του 3% ενώ για την ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο η διακύμανση παραμένει σταθερή χωρίς να βελτιώνει τις συνθήκες του δικτύου. Οπότε την περίπτωση της Ικαρίας αλλά και γενικά επαρχιακών δικτύων ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την μέγιστη διείσδυση των EVs είναι η διακύμανση της τάσης (<3%).

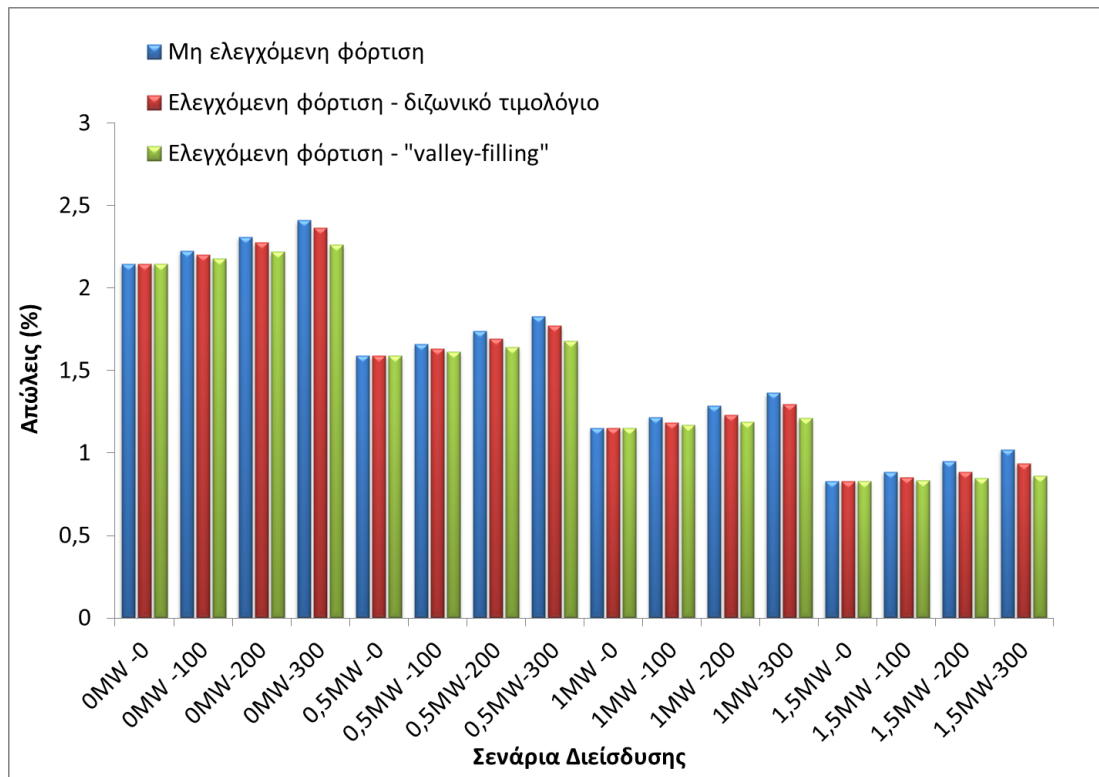
Στις Εικόνες 2.20, 2.21 και 2.22 παρουσιάζονται η ελάχιστη τιμή και η διακύμανση της τάσης του δικτύου καθώς και οι απώλειες για διάφορα σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Παρατηρούμε ότι η μη ελεγχόμενη φόρτιση επιβαρύνει το δίκτυο και στους τρεις παράγοντες που παρουσιάζονται, το οποίο ήταν αναμενόμενο εφόσον επηρεάζει την αιχμή του. Η στρατηγική του διζωνικού τιμολογίου έχει μικρότερο αντίκτυπο, ενώ η στρατηγική valley - filling όχι μόνο δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα στην τάση του δικτύου αλλά την βελτιώνει σε σχέση με το συμβατικό δίκτυο χωρίς οχήματα με τις λιγότερες δυνατές απώλειες.



Εικόνα 2.20 - Ελάχιστη τάση του δικτύου της Ικαρίας για διάφορα σενάρια διείσδυσης και στρατηγικές φόρτισης.



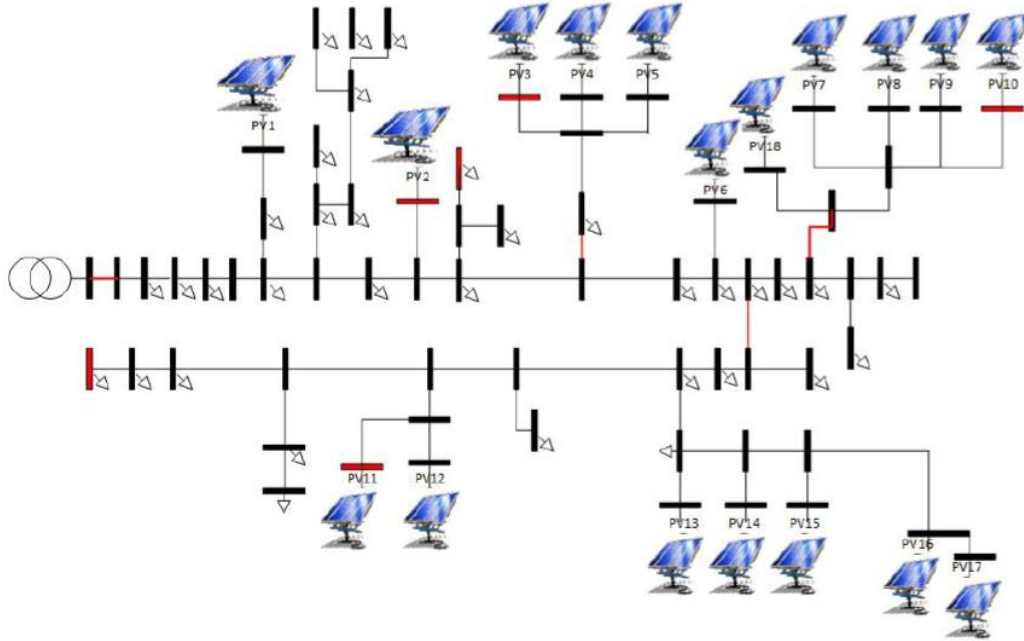
Εικόνα 2.21 – Μέγιστη διακόμανση τάσης του δικτύου της Ικαρίας για διάφορα σενάρια διείσδυσης και στρατηγικές φόρτισης.



Εικόνα 2.22 – Απώλειες του δικτύου της Ικαρίας για διάφορα σενάρια διείσδυσης και στρατηγικές φόρτισης.

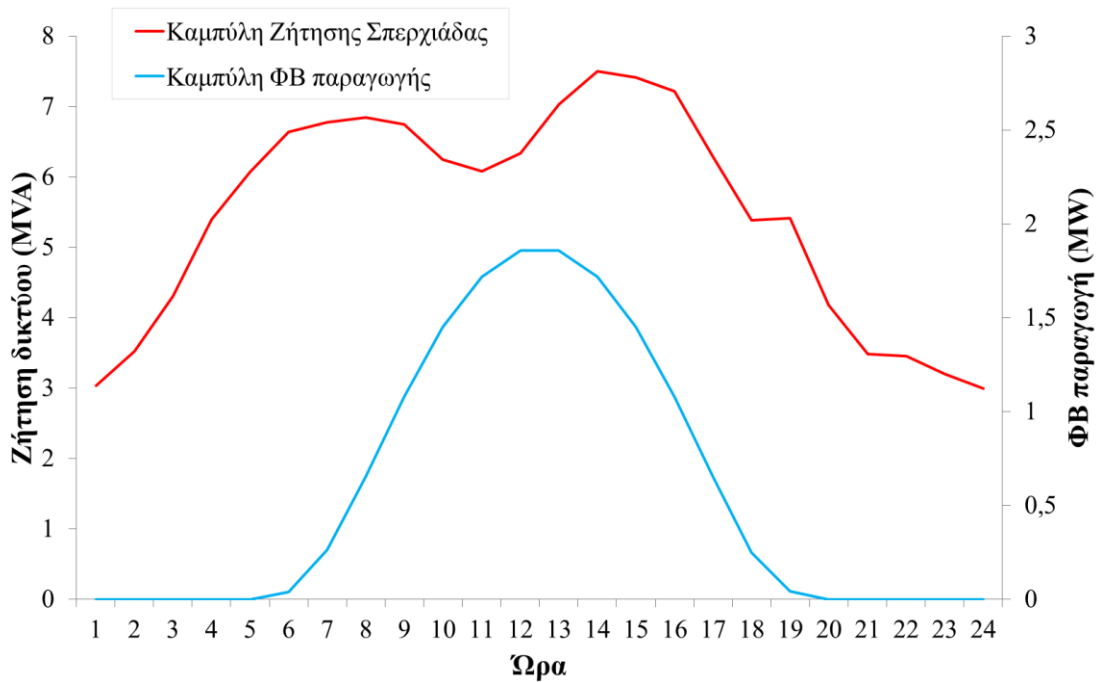
2.4.2 Δίκτυο Διανομής MT Σπερχιάδας

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε το δίκτυο MT της Σπερχιάδας. Το μονογραμμικό σχέδιο του δικτύου φαίνεται στην Εικόνα 2.23 και χαρακτηρίζεται από διεσπαρμένη παραγωγή Φωτοβολταϊκών.



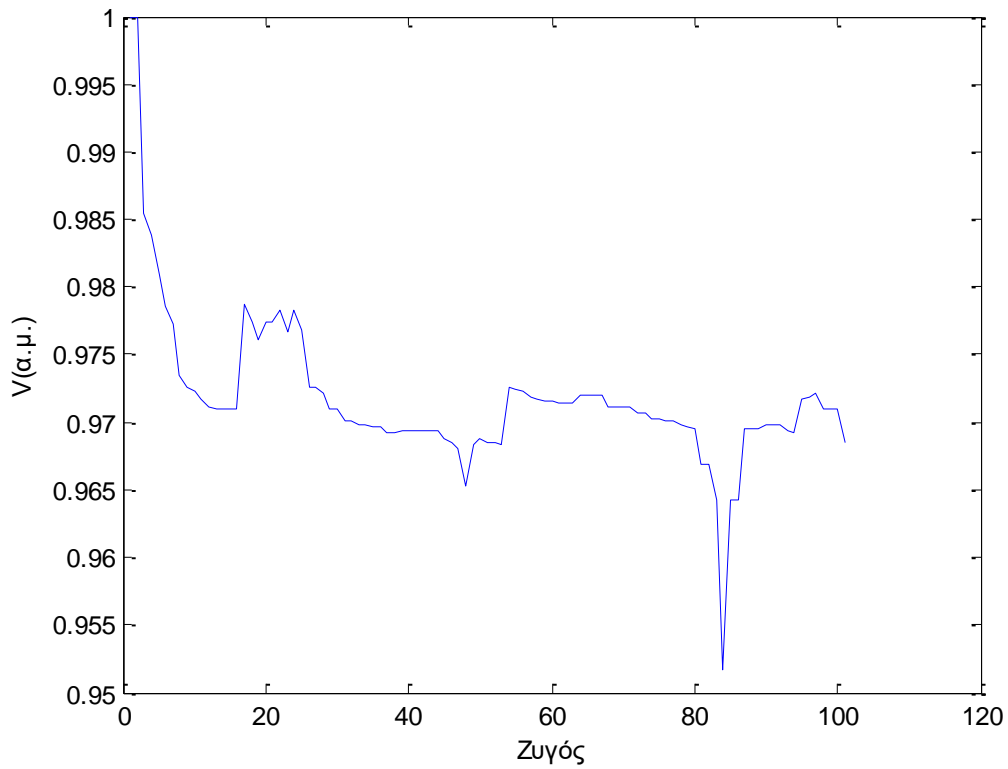
Εικόνα 2.23 – Μονογραμμικό Διάγραμμα Σπερχιάδας

Στην εικόνα 2.24 μπορούμε να δούμε την ημερήσια καμπύλη φορτίου της Σπερχιάδας καθώς και την ημερήσια παραγωγή από Φωτοβολταϊκά με εγκατεστημένη ισχύ 3MW.

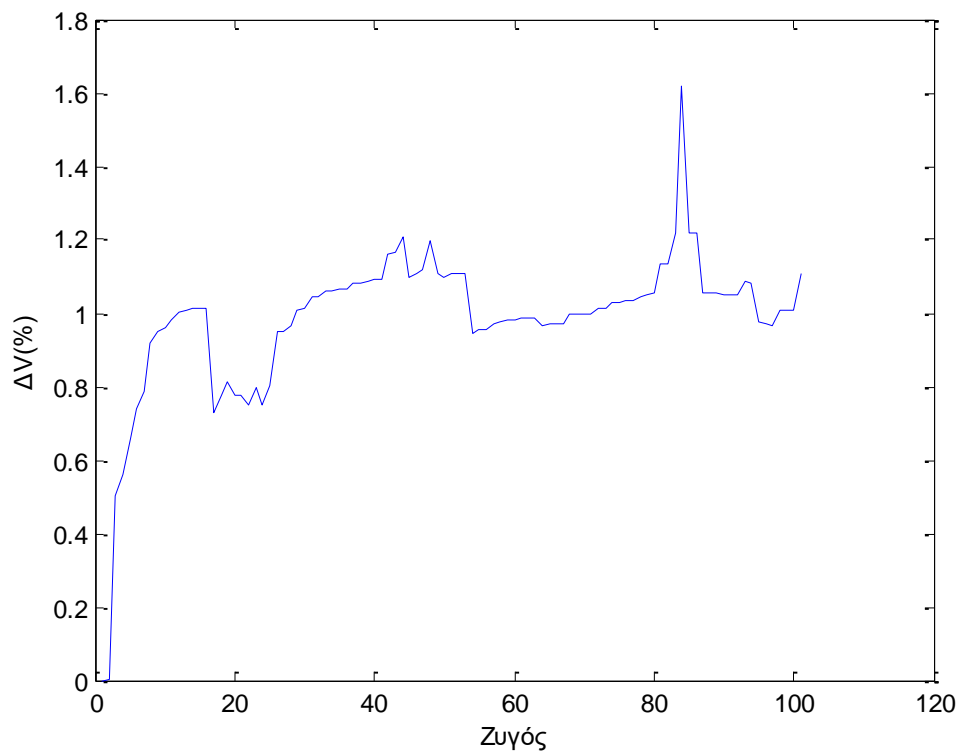


Εικόνα 2.24 - Ημερήσια καμπύλη φορτίου και ΦΒ παραγωγή της Σπερχιάδας

Στις εικόνες 2.25 και 2.26 απεικονίζονται η ελάχιστη τάση ανά ζυγό του δικτύου καθώς και η μέγιστη διακύμανση ανά ζυγό.

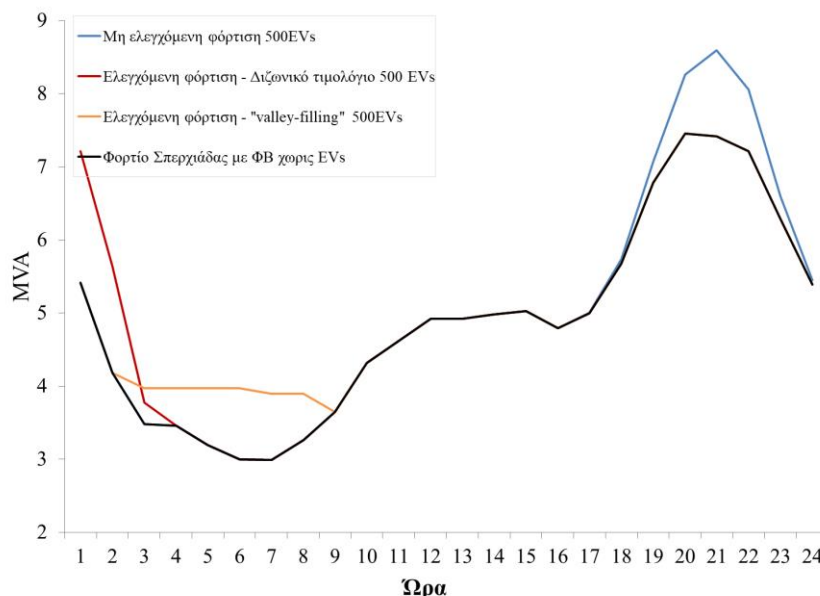


Εικόνα 2.27 - Ελάχιστη τάση (α.μ.) ανά ζυγό του δικτύου της Σπερχιάδας



Εικόνα 2.24 - Μέγιστη διακύμανση (%) ανά ζυγό του δικτύου της Σπερχιάδας

Λαμβάνοντας υπόψη το δίκτυο της Σπερχιάδας εφαρμόζονται όλα τα σενάρια που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα για 500 ηλεκτρικά οχήματα, τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 2.25.



Εικόνα 2.25 - Ημερήσια καμπύλη φορτίου του δικτύου της Σπερχιάδας για διάφορα σενάρια φόρτισης με στόλο 200 EVs.

Με την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων παρατηρούμε ότι,

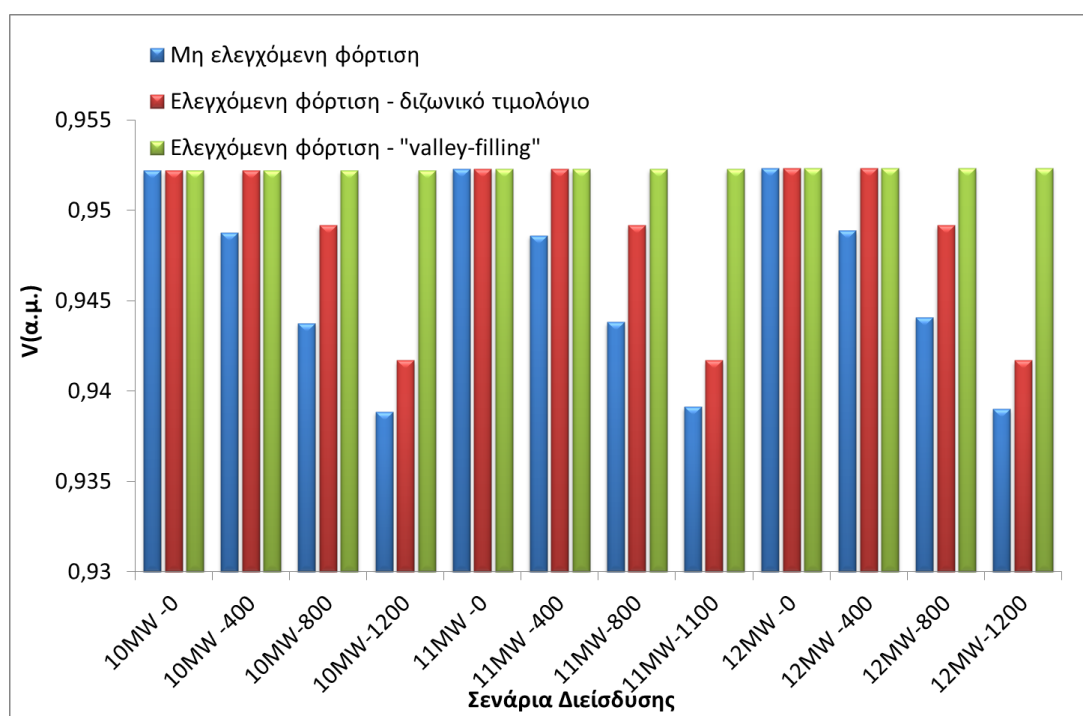
- Για την μη ελεγχόμενη φόρτιση εμφανίζεται μια αύξηση της αιχμής της τάξης του 15%.
- Για την ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο παρά την μετατόπιση του φορτίου από τις ώρες αιχμής, η ταυτόχρονη ένταξη των EVs την πρώτη ώρα χαμηλής χρέωσης δημιουργεί προβλήματα στον ημερήσιο προγραμματισμό.
- Για την ελεγχόμενη φόρτιση με “valley – filling” το φορτίο των EVs κατανέμεται ομοιόμορφα στις κοιλότητες του ημερήσιου φορτίου χωρίς να μεταβάλλει την αιχμή του δικτύου. Η διακύμανση της τάσης μειώνεται κατά 10%.

Χαρακτηριστικά καμπύλης φορτίου Σπερχιάδας για τα διάφορα σενάρια φόρτισης των EVs.

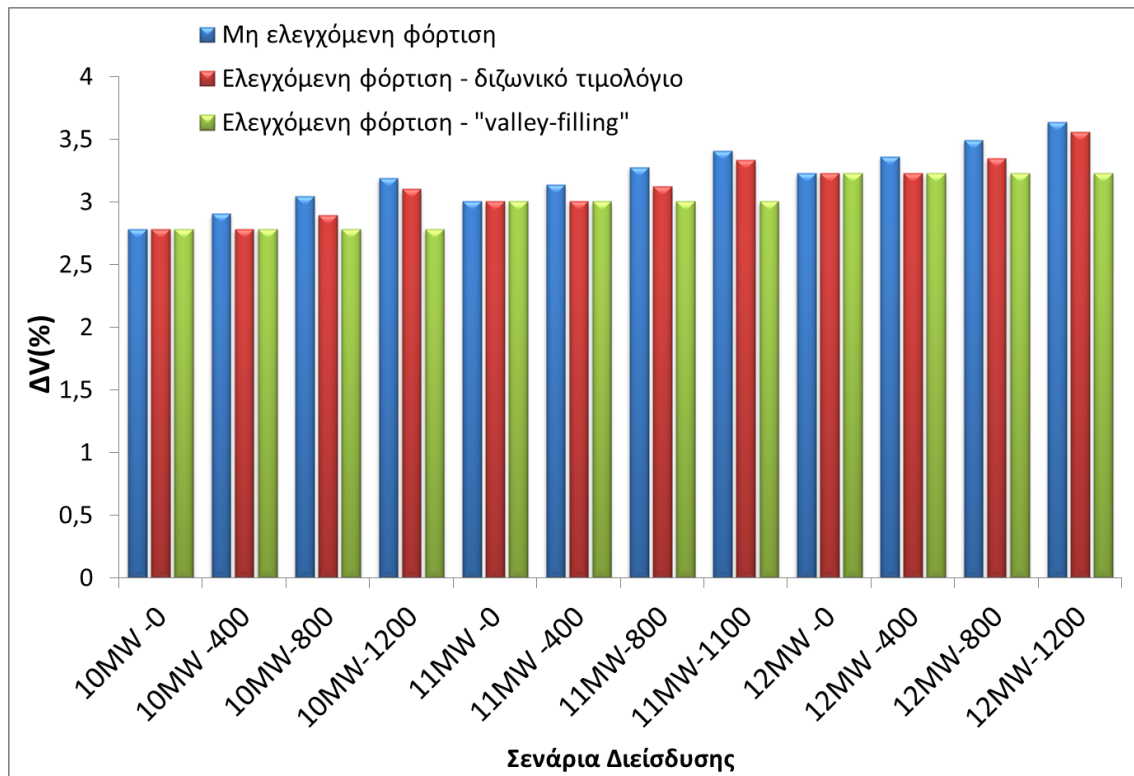
	Συντελεστής Φορτίσεως (Load Factor)	Συντελεστής ομοιομορφίας (Uniformity factor)	Αύξηση αιχμής (%)
Αρχικό Σενάριο	0,6563	0,4015	-
Μη ελεγχόμενη φόρτιση	0,5866	0,3484	15.2%
Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	0,6761	0,4015	0%
Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	0,7154	0,5329	0%
	Ελάχιστη Τάση	Μέγιστη Διακύμανση τάσης	
Αρχικό Σενάριο	0.9517	1,6171	
Μη ελεγχόμενη φόρτιση	0.9517	1,8274 (+13%)	
Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	0.9517	1,6171	
Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	0.9517	1,448 (-10.04%)	

Το κύριο πρόβλημα και σε αυτό το δίκτυο είναι η διακύμανση της τάσης όπου για την μη ελεγχόμενη φόρτιση υπερβαίνει το όριο του 3% ενώ για την ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο η διακύμανση παραμένει σταθερή χωρίς να βελτιώνει τις συνθήκες του δικτύου. Οπότε και στην περίπτωση της Σπερχιάδας ο σημαντικότερος παράγοντας που καθορίζει την μέγιστη διείσδυση των EVs είναι η διακύμανση της τάσης (<3%).

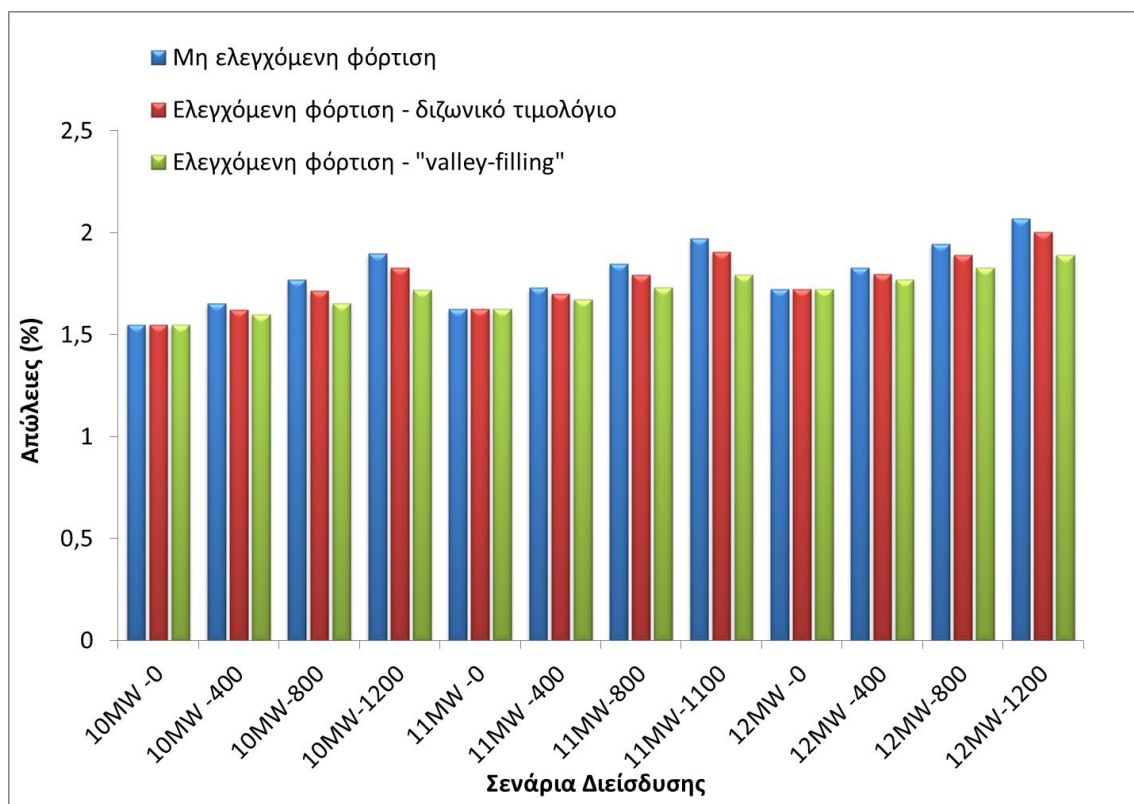
Στις Εικόνες 2.26, 2.27 και 2.28 παρουσιάζονται η ελάχιστη τιμή και η διακύμανση της τάσης του δικτύου καθώς και οι απώλειες για διάφορα σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Όπως και στο δίκτυο της Ικαρίας ομοίως παρατηρούμε ότι η μη ελεγχόμενη φόρτιση επιβαρύνει το δίκτυο και στους τρεις παράγοντες που παρουσιάζονται, το οποίο ήταν αναμενόμενο εφόσον επηρεάζει την αιχμή του. Η στρατηγική του διζωνικού τιμολογίου έχει μικρότερο αντίκτυπο, ενώ η στρατηγική valley - filling όχι μόνο δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα στην τάση του δικτύου αλλά την βελτιώνει σε σχέση με το συμβατικό δίκτυο χωρίς οχήματα με τις λιγότερες δυνατές απώλειες.



Εικόνα 2.26 - Ελάχιστη τάση του δικτύου της Σπερχιάδας για διάφορα σενάρια διείσδυσης και στρατηγικές φόρτισης.



Εικόνα 2.27 – Μέγιστη διακύμανση τάσης του δικτύου της Σπερχιάδας για διάφορα σενάρια διεΐδυσης και στρατηγικές φόρτισης.



Εικόνα 2.28 – Απώλειες του δικτύου της Σπερχιάδας για διάφορα σενάρια διεΐδυσης και στρατηγικές φόρτισης.

3 Επίδραση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τις τελευταίες δεκαετίες σε όλον τον κόσμο έχουν δημιουργηθεί διάφορα συστήματα για την στήριξη των Διεσπαρμένων Μονάδων Παραγωγής ή ΑΠΕ όπως τιμολόγια feed-in, πράσινα πιστοποιητικά, άμεσες επιδοτήσεις, φορολογικές απαλλαγές κ.λπ. τα οποία έχουν οδηγήσει στην ραγδαία ανάπτυξη τους. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι Διαχειριστές Δικτύων Διανομής αντιμετωπίζουν τον κίνδυνο παραβίασης των τεχνικών ορίων, τα οποία όρια δεν είναι ακόμα πλήρως καθορισμένα.

3.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)

Με τον όρο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) θεωρούμε οποιαδήποτε από τις ακόλουθες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας :

- Αιολική Ενέργεια – Ανεμογεννήτριες, Αιολικά Πάρκα.
- Ηλιακή Ενέργεια - Φ/Β Πάρκα.
- Υδροηλεκτρικά.
- Κυψέλες καυσίμου.
- Συστήματα εκμετάλλευσης της ενέργεια των Θαλασσίων κυμάτων.
- Συστήματα Γεωθερμίας
- Συστήματα Βιομάζας

Στον παρακάτω πίνακα δείχνουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ΑΠΕ.

Πλεονεκτήματα ΑΠΕ	Μειονεκτήματα ΑΠΕ
<ul style="list-style-type: none">▪ Φιλικά προς το περιβάλλον. Δεν παράγονται απόβλητα προς το περιβάλλον.▪ Ανεξάντλητα Καύσιμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.▪ Εύκολη και φθηνή συντήρηση.▪ Μεγάλος χρόνος ζωής.▪ Αυτονόμηση περιοχών που είναι εκτός δικτυου (off-grid διασύνδεση).	<ul style="list-style-type: none">▪ Χαμηλός συντελεστής απόδοσης.▪ Στοχαστικός χαρακτήρας των ΑΠΕ.

Η μείωση των αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων καθώς και η ανάγκη για τον περιορισμό των δυσμενών επιπτώσεων τους (εκπομπές CO₂ κλπ), οδηγούν σε μια αυξητική τάση ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ευρώπη βάση της οδηγίας 2009/28/ΕΚ στόχος είναι το 20% της ηλεκτρικής ενέργειας να παράγεται από ΑΠΕ μέχρι το 2020.

3.2 Τεχνικά Προβλήματα των Δικτύων Διανομής από την ένταξη των ΑΠΕ.

Στην παράγραφο συνοψίζονται τα προβλήματα που εμφανίζονται στα Δίκτυα Διανομής και περιορίζουν την ένταξη των ΑΠΕ και των Ηλεκτρικών Οχημάτων.

1. **Θερμική Ικανότητα:** Κάθε στοιχείο του δικτύου διανομής (γραμμές, μετασχηματιστές κλπ.) χαρακτηρίζεται από μια μέγιστη ικανότητα ρεύματος που ονομάζεται θερμική ικανότητα. Αν το όριο αυτό ξεπεραστεί για μεγάλο χρονικό διάστημα τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εμφανιστούν μόνιμες ζημιές στο δίκτυο και στα φορτία ακόμα και εκρήξεις συσκευών ή πυρκαγιές. Η συνεχώς αυξανόμενη σύνδεση των ΑΠΕ έχει ως αποτέλεσμα την εναλλαγή των ενεργειακών ροών στο δίκτυο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε παραβίαση των επιπέδων φόρτισης των στοιχείων του δικτύου, ειδικά υπό συνθήκες μέγιστης παραγωγής και ελάχιστου φορτίου.
2. **Στάθμη Σφάλματος:** Τα δίκτυα διανομής χαρακτηρίζονται από το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος που μπορεί να διακοπεί από τον αντίστοιχο διακόπτη ισχύος. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υπερβαίνει τη θερμική και μηχανική αντοχή του εξοπλισμού του δικτύου. Δεδομένου ότι οι ΑΠΕ συνεισφέρουν στο ρεύμα βραχυκυκλώματος, η διασύνδεσή τους μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση της στάθμης σφάλματος του δικτύου. Η συνεισφορά των ΑΠΕ στην στάθμη σφάλματος εξαρτάται από τους εξής παράγοντες,
 - Τον τύπο της ΑΠΕ (π.χ. Φ/Β, Ανεμογεννήτριες κλπ)
 - Την απόσταση από το σημείο που υπολογίζεται η στάθμη σφάλματος. Όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο τόσο μικρότερη η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης λόγω της αύξησης της σύνθετης αντίστασης του καλωδίου.
 - Αν παρεμβάλλεται μεταξύ ΑΠΕ και σημείου κάποιος Μ/Σ. Η σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ μειώνει την συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης.
 - Την τοπολογία του δικτύου μεταξύ ΑΠΕ και σημείου, η οποία επηρεάζει την στάθμη σφάλματος λόγω των εναλλακτικών διαδρομών και των διαφορετικών εξαρτημάτων που μπορεί να είναι συνδεδεμένα.
 - Τον τρόπο σύνδεσης στο δίκτυο, ΑΠΕ με γεννήτριες απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά στην στάθμη σφάλματος από ΑΠΕ που είναι συνδεδεμένα μέσω ηλεκτρονικών ισχύος.
3. **Ρύθμιση τάσης:** Μεγάλα ποσά διείσδυσης ΑΠΕ μπορεί να οδηγήσουν σε φαινόμενα πτώσης τάσης, υπέρτασης, προβλήματα στα συστήματα έλεγχου της τάσης ανάλογα με το πώς διαμορφώνεται το δίκτυο και τα σημεία σύνδεσης των ΑΠΕ. Η ρύθμιση τάσης επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο μέσω ΣΑΤΥΦ, ρυθμιστές τάσης, συστοιχίες πυκνωτών.
4. **Ποιότητα ισχύος:** Η εγκατάσταση ΑΠΕ μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως,
 - Γρήγορες μεταβολές της τάσης λόγω των γρήγορων μεταγωγικών διαδικασιών που επιβάλλουν τα ΑΠΕ.
 - Αρμονικές λόγω των Ηλεκτρονικών Ισχύος.
 - Flickering
5. **Άλλοι τεχνικοί περιορισμοί:** Η αναστροφή των ροών ισχύος στο δίκτυο που μπορεί να επιφέρουν τα ΑΠΕ ενδέχεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις σε ορισμένους τύπους ΣΑΤΥΦ και ρυθμιστών τάσης, όπως και σε συσκευές προστασίας από υπερεντάσεις.

Παρόλο που μια συγκρατημένη και οργανωμένη ενσωμάτωση ΑΠΕ μπορεί να έχει θετικό αποτέλεσμα στο δίκτυο αντισταθμίζοντας τις πτώσεις τάσης, οι υψηλές διεισδύσεις των ΑΠΕ περιπλέκουν τον έλεγχο τάσης και μπορεί να οδηγήσουν σε καταστάσεις υπερτάσεων και υπερβολικής χρήσης των ΣΑΤΥΦ και των Ρυθμιστών Τάσης, με αποτέλεσμα αύξηση στη φθορά του εξοπλισμού και στο κόστος συντήρησης.

3.3 Επισκόπηση των πρακτικών για τον προσδιορισμό του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ

Σαν μέγιστο όριο διείσδυσης ορίζουμε έναν δείκτη ο οποίος προσδιορίζει την μέγιστη δυνατή εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ που μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα δίκτυο διανομής. Η παραβίαση του μέγιστου ορίου διείσδυσης προκαλεί προβλήματα σε κάποιο από τα τεχνικά όρια του δικτύου (π.χ. σταθερότητα τάσης, ρεύμα βραχυκύκλωσης, φόρτιση γραμμών κλπ).

Δεν υπάρχει ενιαία μέθοδος προσδιορισμού του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ, όμως τα πρακτικά κριτήρια διεθνώς μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες [1], [4].

- **Κατηγορία Α.** Κριτήρια με βάση την ικανότητα των υφιστάμενων υποδομών δικτύου.
- **Κατηγορία Β.** Κριτήρια με βάση τα όρια λειτουργίας της τάση όπως αυτά καθορίζονται από τις ρυθμιστικές αρχές.
- **Κατηγορία Γ.** Κριτήρια με βάση την αναλογία φορτίου-παραγωγής
- **Κατηγορία Δ.** Κριτήρια με βάση την ικανότητα του δικτύου σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

3.3.1 Κατηγορία Α. Κριτήρια με βάση την ικανότητα των υφιστάμενων υποδομών δικτύου

Το μέγιστο όριο διείσδυσης με βάση την ικανότητα των υφιστάμενων υποδομών δικτύου ορίζεται είτε,

1. ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ (μεταξύ 50% με 65%) ή
2. ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος του Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ (μεταξύ 50% με 100%) ή
3. ως ποσοστό των θερμικών ορίων των γραμμών αναχώρησης ΜΤ.
 - a. Για γραμμές που τροφοδοτούν πολλούς καταναλωτές το μέγιστο όριο διείσδυσης για ΑΠΕ είναι 25% της ονομαστικής ισχύος του Μ/Σ
 - b. Για γραμμή που είναι αποκλειστικά για τροφοδοσία ΑΠΕ το μέγιστο όριο διείσδυσης για ΑΠΕ είναι 75% της ονομαστικής ισχύος του διακόπτη ισχύος.

Σε κάποιες χώρες επιβάλλονται επιπρόσθετοι περιορισμοί όπως,

- A. αντίστροφη ροή ισχύος
- B. κανόνας N-1

3.3.2 Κατηγορία Β. Κριτήρια με βάση τα όρια λειτουργίας της τάση όπως αυτά καθορίζονται από τις ρυθμιστικές αρχές.

Το μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ με βάση τα όρια λειτουργίας της τάση όπως αυτά καθορίζονται από τις ρυθμιστικές αρχές ορίζεται,

$$a. \quad 0,95\alpha\mu \leq V_{i,\alpha\mu} \leq 1,05\alpha\mu \quad \text{ή} \quad 95\% \leq |V_{i,median}| \leq 105\%$$

$$b. \quad |\Delta V_{i,median}| \leq \beta\% \quad (\text{μια τυπική τιμή για το } \beta \text{ είναι } 3\%)$$

Όπου για έναν κόμβο i του δικτύου ορίζονται,

$$V_{i,median} (\%) = \frac{\frac{V_{i,max} - V_{i,min}}{2} - V_{nominal}}{V_{nominal}} 100\%$$

$$\Delta V_{i,median} (\%) = \frac{V_{i,max} - V_{i,min}}{2V_{nominal}} 100\%$$

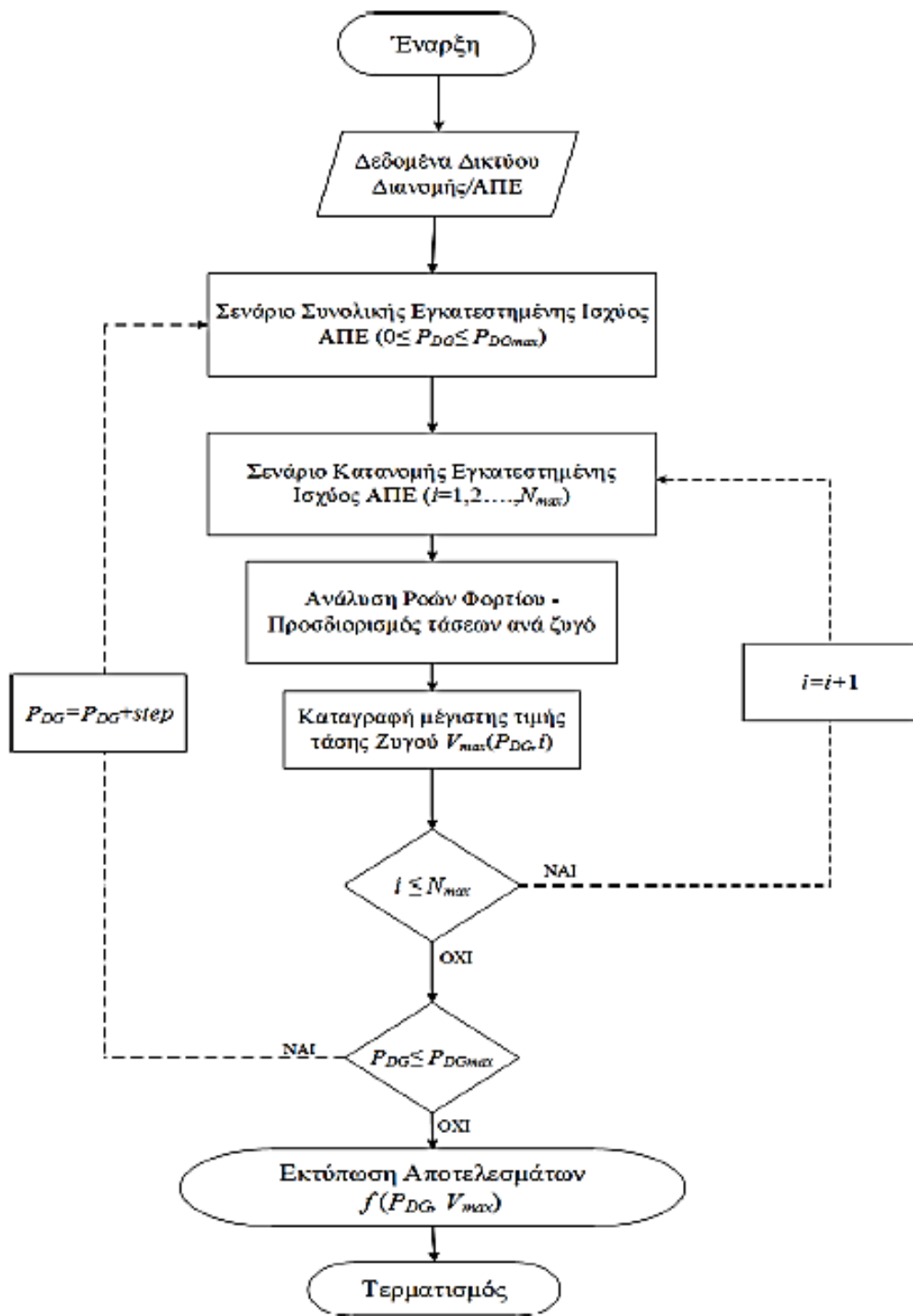
$V_{i,max}$, είναι η τάση στον κόμβο i όταν έχουμε ελάχιστο φορτίο και μέγιστη παραγωγή.

$V_{i,min}$, είναι η τάση στον κόμβο i όταν έχουμε μέγιστο φορτίο και ελάχιστη παραγωγή.

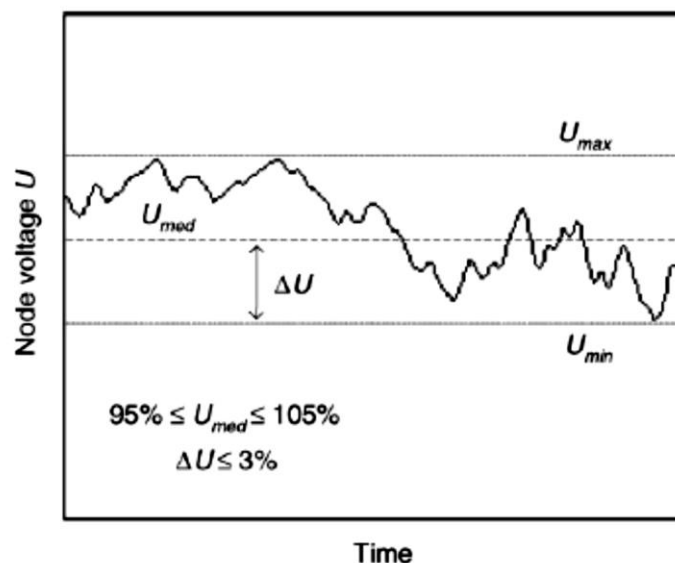
$V_{nominal}$, είναι η ονομαστική τάση του δικτύου XT ή MT (1α.μ.)

Για την μελέτη της διείσδυσης των ΑΠΕ βάση της τάσης λειτουργίας ακολουθούντε τα εξής βήματα,

1. Θεωρούμε την κατανομή στο δίκτυο ίδια με την πραγματική κατανομή.
2. Θεωρώντας αρχικά την εγκατεστημένη ισχύ των ΑΠΕ μηδενική, την αυξάνουμε βηματικά μέχρι την max τιμή.
3. Η κατανομή της εγκατεστημένης ισχύος γίνεται για κάθε τυχαίο σενάριο και κάθε φορά καταγράφονται τα μέτρα των τάσεων των ζυγών και προσδιορίζεται ο ζυγός με την μέγιστη τιμή.
4. Τελικά ο ζυγός με την max τιμή σε σχέση με όλα τα σενάρια καθορίζει και το όριο διείσδυσης λαμβάνοντας υπόψη $V_i \leq 1.05\alpha\mu$, για κάθε $i=1,2,\dots,N_{bus}$.



Εικόνα 3.1 – Διάγραμμα ροής μελέτης του ορίου διείσδυσης ΑΠΕ σε ένα δίκτυο διανομής με κριτήριο την τάση λειτουργίας



Εικόνα 3.2 – Μεταβολή τάσης λόγω της σύνδεσης ΑΠΕ στο δίκτυο.

3.3.3 Κατηγορία Γ. Κριτήρια με βάση την αναλογία φορτίου-παραγωγής.

Το μέγιστο όριο διεύθυνσης ΑΠΕ με βάση την αναλογία φορτίου-παραγωγής ορίζεται,

- Σαν ποσοστό της Αιχμής της Ετήσιας Καμπύλης Φορτίου (π.χ. 5~20%).

Σε κάποιες χώρες εκτός του ποσοστού της Αιχμής συνυπολογίζεται και ότι η αθροιστική ονομαστική ισχύς των ΑΠΕ σε μια γραμμή διανομής πρέπει να είναι μικρότερη από το ελάχιστο φορτίο της γραμμής.

3.3.4 Κατηγορία Δ. Κριτήρια με βάση την ικανότητα του δικτύου σε περίπτωση βραχυκυκλώματος.

Το μέγιστο όριο διεύθυνσης ΑΠΕ με βάση την ικανότητα του δικτύου σε περίπτωση βραχυκυκλώματος ορίζεται από το τεχνικό όριο βραχυκύκλωσης,

$$SCC = \frac{S_{base}}{Z + \frac{S_{base}}{MVA_{M/\Sigma}}} \leq \alpha\%$$

Όπου,

- S_{base} , είναι η βασική ισχύς του δικτύου.
- Z , είναι η σύνθετη αντίδραση του πιο απομακρυσμένου ζυγού από τον Μ/Σ
- $MVA_{M/\Sigma}$, είναι η ονομαστική ισχύς του Μ/Σ.
- α είναι το όριο που βάζουν οι Διαχειριστές που είναι 10% ~25% ανάλογα την χώρα.

3.4 Μη ελεγχόμενη και ελεγχόμενη διείσδυση ΑΠΕ

Στην περίπτωση της μη ελεγχόμενης διείσδυσης ΑΠΕ θεωρούμε ένα δίκτυο διανομής με N ζυγούς, όπου η τάση στον k ζυγό δίνεται από τον τύπο,

$$V_k = V_0 + \sum_{i=1}^N Z_{ki} I_i$$

και,

- $V_0 = 1\alpha. \mu.$ είναι η ονομαστική τάση του ζυγού αναχώρησης (ζυγός αναφοράς)
- $Z_{ki} = \begin{cases} \sum_{r \in path(k)} Z(r) & , k = i \\ \sum_{r \in path(k) \cap path(i)} Z(r) & , k \neq i \end{cases}$ όπου $path(k)$ είναι οι ζυγοί που ανήκουν στην γραμμή μεταξύ του ζυγού k και του ζυγού αναφοράς.
- $I_i = S_i^* / V_i^* \cong P_i$ είναι το συνολικό ρεύμα του ζυγού i όπου P_i είναι η εγγεόμενη ισχύς του ζυγού i

Αν θεωρήσουμε ότι όλο το φορτίο και όλες οι ΑΠΕ συνδέονται στον ζυγό $-i$ τότε,

$$V_k = V_0 + Z_{kk} \sum_{i=1}^N P_i$$

Αν θεωρήσουμε τον ζυγό N ως τον ζυγό που βρίσκετε σε μεγαλύτερη απόσταση από τον ζυγό 0 αναφοράς τότε,

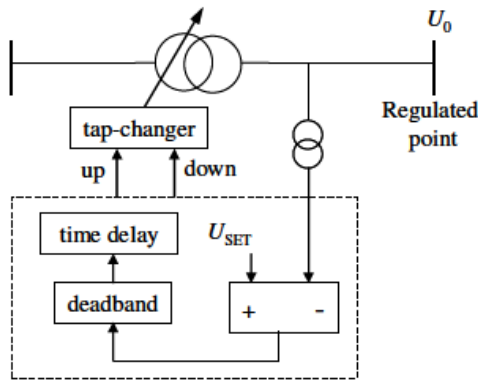
$$Z_{NN} \geq Z_{kk} \geq Z_{ki} \rightarrow V_N \geq V_k \quad \forall k = 1, 2, \dots, N$$

Άρα το χειρότερο σενάριο ανύψωσης τάσης για την μη ελεγχόμενη διείσδυση ΑΠΕ θα είναι ο πιο απομακρυσμένος ζυγός και για αυτό σαν όριο διασύνδεσης καθορίζεται το όριο διασύνδεσης ΑΠΕ στον πιο απομακρυσμένο ζυγό του δικτύου από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ της γραμμής.

Στην περίπτωση της ελεγχόμενης διασύνδεσης ΑΠΕ γίνεται χρήση συστημάτων ρύθμισης της τάσης όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα (ΣΑΤΥΦ, ρυθμιστές τάσης, πυκνωτές) για την αύξηση του μεγίστου ορίου διείσδυσης.

I. Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ).

Οι μηχανισμοί ΣΑΤΥΦ εμφανίζονται στους μεγάλους μετασχηματιστές ισχύος και βοηθάνε στην αλλαγή της τάσης εξόδου τους χωρίς διακοπή του φορτίου. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται με αλλαγή λήψεως στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, δεδομένου ότι η τάση ανά σπείρα παραμένει σταθερή. Ο μηχανισμός αυτός βρίσκεται στην πλευρά υψηλής τάσης καθώς εκεί ρέουν μικρότερα ρεύματα και υπάρχουν περισσότερες σπείρες επιτρέποντας ακριβέστερη ρύθμιση της τάσης. Τα ΣΑΤΥΦ είναι αργοί μηχανισμοί, οι οποίοι μεταβάλλονται μόνο κατά ένα βήμα την φορά, όταν η τάση στο δευτερεύων βρεθεί εκτός μιας νεκρής ζώνης περισσότερο από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα.



Ο ελεγκτής του ΣΑΤΥΦ προσπαθεί να κρατήσει σταθερή την τάση U_0 μεταξύ των ορίων:

$$U_{LB} \leq U_0 \leq U_{UB}$$

$U_{LB} = U_{SET} - 0.5 U_{DB}$: κάτω όριο της τάσης.

$U_{UB} = U_{SET} + 0.5 U_{DB}$: άνω όριο τάσης.

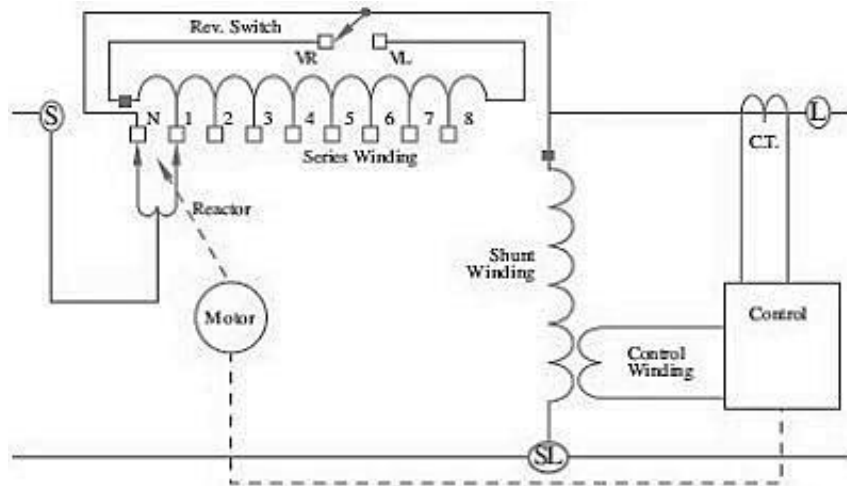
U_{SET} : η τάση αναφοράς που δίνουμε.

U_{DB} : η νεκρή ζώνη που δίνουμε.

Εικόνα 3.3 – Μ/Σ ΜΕ ΣΑΤΥΦ

II. Ρυθμιστές Τάσης.

Είναι Μ/Σ χαμηλότερης ισχύος οι οποίοι έχουν σχέση μετασχηματισμού 1:1 και χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τη ρύθμιση της τάσης. Οι μετασχηματιστές αυτοί έχουν δυνατότητα αλλαγής λήψεων με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε και για τους Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.



Εικόνα 3.4 – Σχηματικό Διάγραμμα Ρυθμιστή Τάσης¹

III. Συστοιχίες πυκνωτών.

Οι συστοιχίες πυκνωτών μέσω αυτοματισμών πραγματοποιούν εύκολα ζεύξη και απόζευξη με το δίκτυο, δίνοντας τη δυνατότητα ελεγχόμενης έγχυσης άεργου ισχύος μέσω της οποίας ρυθμίζουν την τάση.

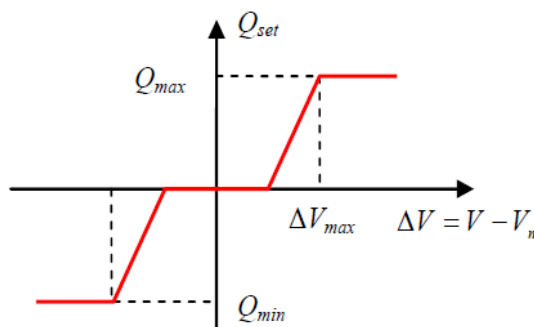


Εικόνα 3.5 – Συστοιχίες πυκνωτών

1. <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/step-voltage-regulator-utility.html>

IV. Έλεγχος Τάσης μέσω αντιστροφέα (VSI – control)

Ο έλεγχος του αντιστροφέα έχει στόχο να παρέχει στο φορτίο προκαθορισμένες τιμές τάσης και συχνότητας. Η ενεργός κι άεργος ισχύς στην έξοδο του αντιστροφέα μπορούν να ορίζονται αυτόματα ανάλογα με τη ζήτηση φορτίου. Με τον τρόπο αυτό οι διεσπαρμένες μονάδες μπορούν να αντισταθμίζουν την τάση στον ζυγό τους απορροφώντας ή εγχέοντας άεργο ισχύ ανά περίπτωση. Η ανταλλαγή άεργου ισχύος με το δίκτυο καθορίζεται από την παρακάτω καμπύλη.



Εικόνα 3.6 – Έλεγχος τάσης μέσω άεργου ισχύος (VSI – control)

3.5 Προσδιορισμός μέγιστου ορίου διείσδυσης στο δίκτυο διανομής της Σπερχιάδας

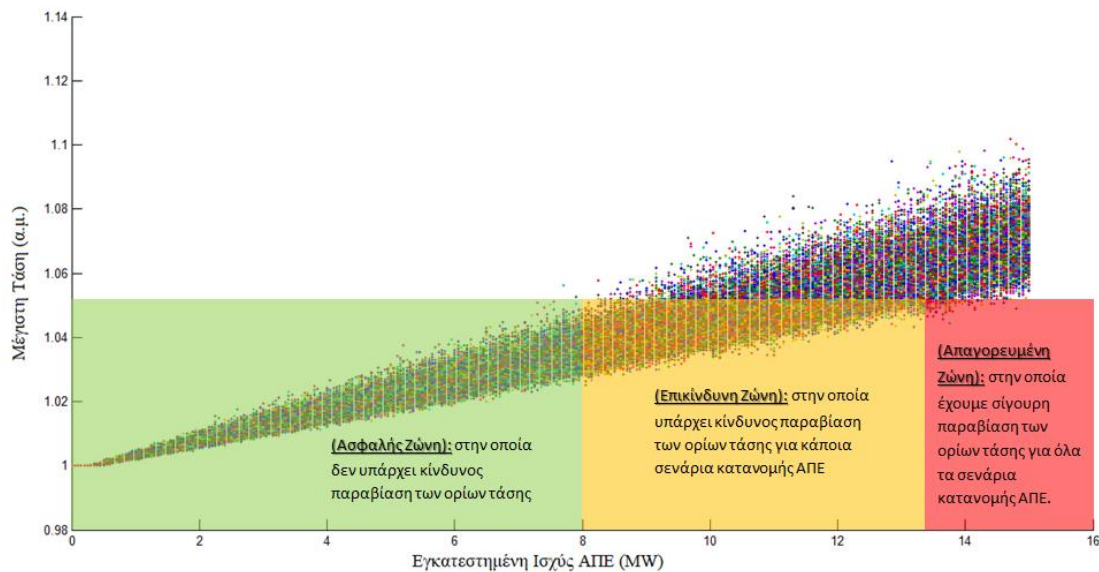
Στην ενότητα αυτή θα προσδιορίσουμε το μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο Μέσης Τάσης της Σπερχιάδας με βάση τα κριτήρια των τεσσάρων κατηγοριών που περιγράψαμε στο κεφάλαιο αυτό.

Για την κατηγορία Α, το μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ θεωρείται το ποσοστό 50%-100% της Ονομαστικής Φόρτισης της γραμμής Σπερχιάδας από τον κεντρικό Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ άρα θεωρούμε ότι κυμαίνεται μεταξύ **2,36MW – 3,06MW** (Όριο φόρτισης γραμμής 4,71MVA)

Για την κατηγορία Β, το μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ καθορίζεται από τα όρια λειτουργίας της τάσης.

Αν θεωρήσουμε την διακύμανση της τάσης ως κριτήριο τότε υπολογίζουμε την ελάχιστη τάση (Max Φορτίο – Min Παραγωγή ΑΠΕ) και την μέγιστη τάση (Min Φορτίο – Max Παραγωγή ΑΠΕ) θεωρώντας για το παράδειγμα μας τις πραγματικές θέσεις των ΑΠΕ και αυξάνοντας κάθε φορά την εγκατεστημένη ισχύ βηματικά μέχρι να παραβιαστεί το όριο διακύμανσης του 3%. Το αποτέλεσμα του αλγόριθμου δίνει όριο διείσδυσης ΑΠΕ για την Σπερχιάδα 5,4MW.

Αν θεωρήσουμε την τάση λειτουργίας ως κριτήριο τότε εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο της εικόνας 3.1 στο παράδειγμα μας για διάφορες τιμές εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ παίρνουμε ως αποτέλεσμα τις τρεις περιοχές αποφάσεων βάση του κριτηρίου $0,95\alpha\mu \leq V_{i,\alpha\mu} \leq 1,05\alpha\mu$.



Εικόνα 3.7 – Μέγιστη τάση ζυγών συναρτήσει της εγκαταστημένης ισχύος ΑΠΕ και των σεναρίων κατανομής της βάση του αλγόριθμου της εικόνας 3.1

Για την κατηγορία Γ, το μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ καθορίζετε σαν ποσοστό της αιχμής της ετήσιας καμπύλης φορτιού. Οπότε για αιχμή 3MW για την περίπτωση της Σπερχιάδας έχουμε μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ 5~20% της αιχμής άρα **0,15MW – 0,6MW**.

Για την κατηγορία Δ, το μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ καθορίζετε σαν ποσοστό 10-25% της ισχύος βραχυκύκλωσης, SCC. Οπότε για την περίπτωση της Σπερχιάδας για SCC=14,2MW το όριο διείσδυσης είναι **1,42MW – 3,54MW**.

Η επιλογή της κατηγορίας κριτηρίων έχει να κάνει με το υπό εξέταση δίκτυο. Για αστικό δίκτυο με μεγαλύτερα φορτία και πιο συγκεντρωμένα κάνουμε χρήση των κατηγοριών Γ και Δ, ενώ για επαρχιακό δίκτυο όπως στο παράδειγμα μας όπου έχουμε μεγάλο μήκος γραμμών και άρα οι διακυμάνσεις στην τάση είναι πιο έντονες εφαρμόζετε κυρίως η κατηγορία Β.

Στην περίπτωση που έχουμε μη ελεγχόμενη διασύνδεση θεωρώντας ως μέγιστο όριο το όριο του πιο απομακρυσμένου ζυγού καταλήγουμε ότι το μέγιστο όριο είναι 4,8MW.

Στην περίπτωση της ελεγχόμενης διασύνδεσης με ρύθμιση της τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ με περιθώρια έλεγχου: $1-0,125 \leq U_0 \leq 1+0,075$, $U_0 = 1\mu$ και $step=1,25\%$ καταλήγουμε ότι το μέγιστο όριο είναι 5,9MW για την Σπερχιάδα.

Στην περίπτωση της ελεγχόμενης διασύνδεσης με ρύθμιση της τάσης μέσω άεργου ισχύος καταλήγουμε ότι το μέγιστο όριο είναι 7,2MW για την Σπερχιάδα.

4 Συνέργεια Ηλεκτρικών Οχημάτων και ΑΠΕ

Στην ενότητα αυτή θα αναπτυχθούν δυο αλγόριθμοι διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και ΑΠΕ ένας κεντρικός και ένας αποκεντρωμένος. Για την βέλτιστη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων θα θεωρήσουμε από κοινού ότι τα EVs μπορούν να παρέχουν V2G (Vehicle to Grid) υπηρεσίες, δηλαδή μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τις μπαταρίες των οχημάτων όταν αυτές είναι διαθέσιμες για να παρέχουμε ισχύ στο δίκτυο.

4.1 Κεντρικός Αλγόριθμος Συνέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων και ΑΠΕ

Ο κεντρικός αλγόριθμος που θα αναπτυχθεί έχει στόχο την ομοιόμορφη κατανομή των ηλεκτρικών οχημάτων και των ΑΠΕ με στόχο την ελαχιστοποίηση των μεταβολών στην καμπύλη ζήτησης του δικτύου καθώς και την μεγιστοποίηση του ορίου διείσδυσης των EVs και των ΑΠΕ.

Το πρόβλημα βέλτιστης φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων εκφράζεται από τους παρακάτω τύπους.

$$\min_{P_{ch,i}^{EV}, P_{dch,i}^{EV}} f = \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{i=1}^N (P_{ch,i,t}^{EV} - P_{dch,i,t}^{EV}) - \sum_{j=1}^M P_{j,i}^{DG} + D_t \right) \right]^2 \quad (I)$$

μ. π.

$$\sum_{i=1}^N \left\{ \left(P_{ch,i,t}^{EV} \cdot C_{eff} - \frac{P_{dch,i,t}^{EV}}{C_{eff}} \right) \cdot \Delta t - P_{trip,i,t}^{EV} \right\} = 0 \quad (1)$$

$$u_{c,t} + u_{d,t} - 1 \leq 0 \quad (2)$$

$$P_{ch,i,t}^{EV} - u_{c,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS} \leq 0 \quad (3)$$

$$P_{dch,i,t}^{EV} - u_{d,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS} \leq 0 \quad (4)$$

$$\sum_{\tau=1}^t \left(P_{ch,i,\tau}^{EV} \cdot C_{eff} - \frac{P_{dch,i,\tau}^{EV}}{C_{eff}} \right) \cdot \Delta t - \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV} \leq 0 \quad (5)$$

$$- \sum_{\tau=1}^t \left(P_{ch,i,\tau}^{EV} \cdot C_{eff} - \frac{P_{dch,i,\tau}^{EV}}{C_{eff}} \right) \cdot \Delta t - C_{bat,i} + \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV} \leq 0 \quad (6)$$

$$\sum_{\tau=1}^t \frac{P_{dch,i,\tau}^{EV}}{C_{eff}} \cdot \Delta t - Perc_i \cdot C_{bat,i} \leq 0 \quad (7)$$

Οπου,

- $P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV} \in \mathbb{R}_+[kW]$ είναι οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης που δηλώνουν το επίπεδο φόρτισης και εκφόρτισης, του i -οστού οχήματος την χρονική στιγμή t .
- $P_{j,i}^{DG} \in \mathbb{R}_+[kW]$ είναι η παραγωγή της j διεσπαρμένης παραγωγής (ΑΠΕ) την χρονική στιγμή t .
- $D_t \in \mathbb{R}_+[kW]$ είναι η μη ελεγχόμενη ζήτηση του δικτύου την χρονική στιγμή t .

- $C_{eff} \in \mathbb{R}_+$ είναι ο β.α. του ηλεκτρικού οχήματος όταν φορτίζει ενώ $1/C_{eff}$ είναι ο β.α. όταν εκφορτίζει.
- $P_{trip,i,t}^{EV} \in \mathbb{R}_+[kWh]$ είναι η ενέργεια που έχει καταναλώσει το i -οστό όχημα την χρονική στιγμή t για να μετακινηθεί.
- $u_{c,t}, u_{d,t} \in \mathbb{N} \cap \{0,1\}$ είναι δυαδικές μεταβλητές που επιτρέπουν (1) ή όχι (0) την λειτουργία φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων την χρονική στιγμή t .
- $Plug_{i,t} \in \mathbb{N} \cap \{0,1\}$ είναι η δυαδική μεταβλητή που καθορίζει αν το i -οστό όχημα είναι συνδεδεμένο (1) ή όχι (0) στο δίκτυο την χρονική στιγμή t .
- $Perc_i \in \mathbb{R}$ είναι η μέγιστη επιτρεπτή φόρτιση ή εκφόρτιση της μπαταρίας του i -οστού οχήματος.
- $P_{nomCS} \in \mathbb{R}$ είναι η ονομαστική ισχύς φόρτισης του σταθμού.
- $C_{bat,i} \in \mathbb{R}_+[kW]$ είναι η ονομαστική ισχύς της μπαταρίας του i -οστού οχήματος.

Ο περιορισμός (1) εξασφαλίζει την πλήρη φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος μέχρι την αναχώρηση του λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης αλλά και την έγχυση ισχύος στο δίκτυο για παροχή επικουρικών υπηρεσιών θεωρώντας ότι όλα τα οχήματα είναι πλήρως φορτισμένα. Ο περιορισμός (2) εξασφαλίζει ότι κανένα όχημα δεν φορτίζει και εκφορτίζει ταυτόχρονα. Ο περιορισμός (3) εκφράζει το άνω όριο φόρτισης του i -οστού οχήματος την χρονική στιγμή t λαμβάνοντας υπόψη την ονομαστική ισχύ φόρτισης του σταθμού και αν το όχημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Ο περιορισμός (4) εκφράζει το άνω όριο εκφόρτισης του i -οστού οχήματος την χρονική στιγμή t λαμβάνοντας υπόψη την ονομαστική ισχύ φόρτισης του σταθμού και αν το όχημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Οι περιορισμοί (5), (6) και (7) εξασφαλίζουν ότι η μπαταρία λειτουργεί εντός των αποδεκτών ορίων λειτουργίας κατά το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης (I) είναι ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (MIQP). Για την επίλυση του θα κάνουμε χρήση της μεθόδου Generalized Benders Decomposition (GBD) [7], [8].

4.1.1 Μέθοδος Generalized Benders Decomposition (GBD)

Η μέθοδος GBD εφαρμόζεται για την επίλυση προβλημάτων MIQP της μορφής,

$$\min_{x,y} f(x,y) \quad , x \in X \subseteq \mathbb{R}, y \in Y: \{0,1\} \subset \mathbb{N}$$

μ. π.

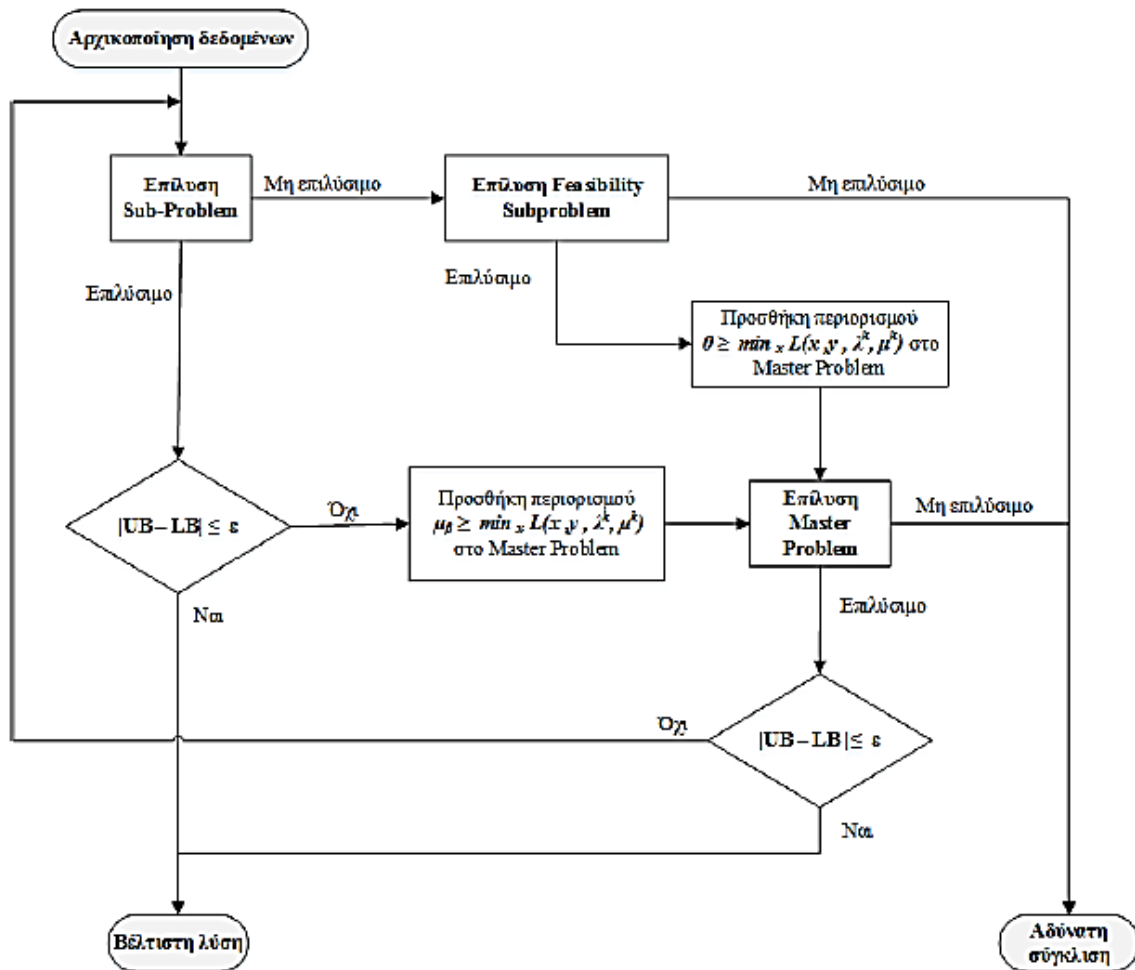
$$h(x,y) = 0$$

$$g(x,y) \leq 0$$

Θεωρώντας ότι,

- το X είναι ένα μη κενό κυρτό σύνολο
- οι συναρτήσεις f και g είναι κυρτές $\forall y \in Y: \{0,1\} \subset \mathbb{N}$
- η συνάρτηση h είναι γραμμική $\forall y \in Y: \{0,1\} \subset \mathbb{N}$
- το $\{x \in X, y \in Y: h(x,y) = 0, g(x,y) \leq 0\}$ είναι ένα κλειστό σύνολο
- $\forall y \in Y \cap \{h(x,y) = 0, g(x,y) \leq 0\} \rightarrow \exists x \in X$ τ.ω. το πρόβλημα να έχει πεπερασμένη λύση και μοναδικούς πολλαπλασιαστές Lagrange ή το πρόβλημα να είναι μη φραγμένο και η αντικειμενική του συνάρτηση να τείνει στο $-\infty$.

Η GBD είναι μια επαναληπτική μέθοδος επίλυσης της οποίας το διάγραμμα ροής παρουσιάζετε στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 – Επίλυση Προβλήματος με χρήση της μεθόδου GBD.

Για την επίλυση του προβλήματος σπάμε το αρχικό πρόβλημα σε περισσότερα προβλήματα το Master Problem και τα Sub-Problems.

Λύνουμε τα Sub-Problems επαναληπτικά θεωρώντας συγκεκριμένες τιμές για τις ακέραιες μεταβλητές, δηλαδή για την k-επανάληψη θεωρούμε την τιμή y^k .

k-Sub-Problem $\min_x f(x, y^k) \quad , x \in X \subseteq \mathbb{R},$

μ. π.

$$\begin{aligned} h(x, y^k) &= 0 & | & \lambda^k \\ g(x, y^k) &\leq 0 & | & \mu^k \end{aligned}$$

Αν το πρόβλημα της k-επανάληψης είναι επιλύσιμο τότε προκύπτει η λύση x^k η οποία μας δίνει το άνω φράγμα της βέλτιστης λύσης : $UB = f(x^k, y^k)$ και η συνάρτηση Lagrange που προκύπτει είναι η $L(x, y, \lambda^k, \mu^k) = f(x, y) + \lambda^k h(x, y) + \mu^k g(x, y)$

Αν το πρόβλημα της k-επανάληψης δεν είναι επιλύσιμο τότε το Sub-Problem τροποποιείτε ως εξής,

k-Feasibility-Sub-Problem $\min_x \sum_{j=1}^p a_j$

μ. π.

$$\begin{aligned} h(x, y^k) &= 0 & | & \bar{\lambda}^k \\ g(x, y^k) &\leq a_j & | & \bar{\mu}^k \\ a_j &\geq 0 \\ j &= 1, 2, \dots, p \end{aligned}$$

οπου p : είναι ο αριθμός των ανισοτικών περιορισμών

Η επίλυση του ‘χαλαρωμένου’ από πλευράς περιορισμών Sub Problem δεν λαμβάνετε υπόψη για το άνω φράγμα της βέλτιστης λύσης. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η συνάρτηση Lagrange που μας δίνει το νέο πρόβλημα,

$$\bar{L}(x, y, \bar{\lambda}^k, \bar{\mu}^k) = \bar{\lambda}^k h(x, y) + \bar{\mu}^k g(x, y)$$

Μετά από την επίλυση του k-Sub-Problem ή του k-Feasibility-Sub-Problem η λύση που πρόεκυψε χρησιμοποιείτε σαν δεδομένο για την επίλυση του k-Master-Problem και τον προσδιορισμό του κάτω φράγματος της βέλτιστης λύσης.

k-Master-Problem $\min_{y, \mu} \mu_\beta$

μ. π.

$$\mu_\beta \geq \inf_{x \in \mathbb{R}_{\geq 0}} L(x, y, \lambda^k, \mu^k), \text{ αν η λύση προέκυψε απο το } k - \text{Sub} - \text{Problem}$$

ή

$$0 \geq \inf_{x \in \mathbb{R}_{\geq 0}} \bar{L}(x, y, \bar{\lambda}^k, \bar{\mu}^k), \text{ αν η λύση προέκυψε απο το } k - \text{Feasibility} - \text{Sub} - \text{Problem}$$

Άρα από την επίλυση του βρίσκουμε τα x^{*k}, y^{*k} τα οποίο μας δίνουν το κάτω φράγμα της βέλτιστης λύση $LB = f(x^{*k}, y^{*k})$.

Αν $|UB - LB| \leq \varepsilon$, όπου ε είναι το σφάλμα που θεωρούμε ανεκτό για λύση τότε ο αλγόριθμος σταματάει διαφορετικά συνεχίζουμε με νέα επανάληψη $k+1$.

4.1.2 Εφαρμογή της Μεθόδου GBD για την επίλυση του κεντρικού αλγόριθμου συνέργειας Ηλ. Οχημάτων και ΑΠΕ

Εφαρμόζοντας την μέθοδο GBD στο πρόβλημα που αναπτύξαμε στην αρχή του κεφαλαίου για την συνέργεια ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ καταλήγουμε στα παρακάτω επαναληπτικά προβλήματα.

k-Sub-Problem

$$\begin{aligned} \min_{P_{ch,k,i,t}^{EV}, P_{dch,k,i,t}^{EV}, u_c^k, u_d^k} f_{i,t}^k = & \quad (J) \\ & c^T P_{ch,k,i,t}^{EV} + d^T P_{dch,k,i,t}^{EV} + \frac{1}{2} (P_{ch,k,i,t}^{EV})^T Q P_{ch,k,i,t}^{EV} + \frac{1}{2} (P_{ch,k,i,t}^{EV})^T R P_{dch,k,i,t}^{EV} \\ & + \frac{1}{2} (P_{dch,k,i,t}^{EV})^T S P_{dch,k,i,t}^{EV} + \frac{1}{2} (P_{ch,k,i,t}^{EV} - P_{dch,k,i,t}^{EV})^2 \end{aligned}$$

μ. π.

$$\sum_{i=1}^N \left\{ \left(P_{ch,i,t}^{EV} \cdot C_{eff} - \frac{P_{dch,i,t}^{EV}}{C_{eff}} \right) \cdot \Delta t - P_{trip,i,t}^{EV} \right\} = 0 \quad (a)$$

$$P_{ch,i,t}^{EV} - u_{c,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS} \leq 0 \quad (b)$$

$$P_{dch,i,t}^{EV} - u_{d,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS} \leq 0 \quad (c)$$

$$\sum_{\tau=1}^t \left(P_{ch,i,\tau}^{EV} \cdot C_{eff} - \frac{P_{dch,i,\tau}^{EV}}{C_{eff}} \right) \cdot \Delta t - \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV} \leq 0 \quad (d)$$

$$- \sum_{\tau=1}^t \left(P_{ch,i,\tau}^{EV} \cdot C_{eff} - \frac{P_{dch,i,\tau}^{EV}}{C_{eff}} \right) \cdot \Delta t - C_{bat,i} + \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV} \leq 0 \quad (e)$$

$$\sum_{\tau=1}^t \frac{P_{dch,i,\tau}^{EV}}{C_{eff}} \cdot \Delta t - Perc_i \cdot C_{bat,i} \leq 0 \quad (f)$$

Όπου,

$$c = p^k - P_{ch,k-1,i,t}^{EV} + P_{dch,k-1,i,t}^{EV}$$

$$d = -c$$

$$Q = S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}_{TxT}$$

$$R = -Q$$

k-Master-Problem

$$\min_{u_{c,t}, u_{d,t}, \mu_\beta} \mu_\beta \quad (JJ)$$

μ. π.

$$u_{c,t} + u_{d,t} - 1 \leq 0 \quad (i)$$

$$\mu_\beta \geq \inf_{P_{ch,k,i,t}^{EV}, P_{dch,k,i,t}^{EV} \in \mathbb{R}_{\geq 0}} L(P_{ch,k,i,t}^{EV}, P_{dch,k,i,t}^{EV}, u_{c,t}, u_{d,t}, \lambda^k, \mu^k) \quad (ii.1)$$

, αν η λύση προέκυψε απο το k – Sub – Problem

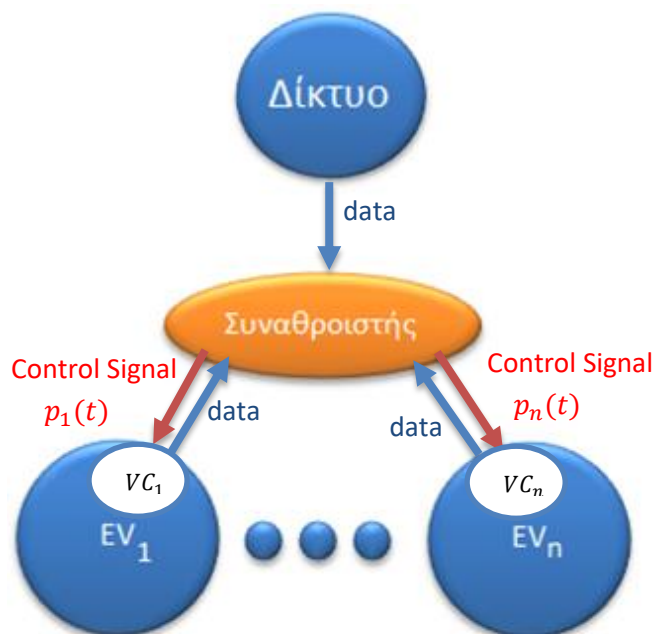
ή

$$0 \geq \inf_{P_{ch,k,i,t}^{EV}, P_{dch,k,i,t}^{EV} \in \mathbb{R}_{\geq 0}} \bar{L}(P_{ch,k,i,t}^{EV}, P_{dch,k,i,t}^{EV}, u_{c,t}, u_{d,t}, \bar{\lambda}^k, \bar{\mu}^k) \quad (ii.2)$$

, αν η λύση προέκυψε απο το k – Feasibility – Sub – Problem

4.2 Αποκεντρωμένος Αλγόριθμος Συνέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων και ΑΠΕ

Στην ενότητα αυτή θα αναπτύξουμε έναν αποκεντρωμένο αλγόριθμο για την επίλυση του προβλήματος συνέργειας Ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ. Ο αλγόριθμος αυτός διαχειρίζεται το πρόβλημα σαν ένα πρόβλημα απόφασης με πολλούς αποφασίζοντες οι οποίοι δεν συνεργάζονται μεταξύ τους αλλά επιλέγουν την στρατηγική που θα ακολουθήσουν βάση των σημάτων ελέγχου που δίνει ένας κεντρικός συντονιστής στα ηλεκτρικά οχήματα. Η αρχιτεκτονική του συστήματος φαίνεται στην εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 – Αρχιτεκτονική Συστήματος με χρήση αποκεντρωμένου αλγόριθμου διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ.

Ο κεντρικός συντονιστής του παιχνιδιού αποφάσεων είναι ο **Συναθροιστής**, ο οποίος βρίσκεται στο επίπεδο υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ και διαχειρίζεται τους ελεγκτές των ηλεκτρικών οχημάτων.

Ο **Συναθροιστής (Aggregator)** λαμβάνει οικονομικά κίνητρα από τον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς (DSO) για να μειώσει την διακύμανση του συνολικού φορτίου του δικτύου. Για να φέρει εις πέρας το έργο του βέλτιστα στους ρόλους του συμπεριλαμβάνονται τα ακόλουθα:

- Παρακολουθεί και προβλέπει το προφίλ παραγωγής των ΑΠΕ που συνδέονται στους ζυγούς του δικτύου του.
- Προσδιορίζει τις απαραίτητες τεχνολογίες επικοινωνιών για την σωστή μετάδοση της πληροφορίας και την συνεχή εκτέλεση του αλγόριθμου χωρίς προβλήματα και καθυστερήσεις.
- Μετατοπίζει την ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες χαμηλής ζήτησης με προτίμηση σε ώρες περίσσειας παραγωγής ΑΠΕ.
- Κάνει χρήση της V2G λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων για την μείωση της αιχμής του συνολικού φορτίου του δικτύου.

Ο **VC (Vehicle Controller)** είναι ο ελεγκτής που έχει κάθε ηλεκτρικό όχημα με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του οχήματος για τις μετακινήσεις του. Ρυθμίζετε από τον χρήστη του EV και εκφράζει τις προτιμήσεις του.

Ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος εκτελείτε επαναληπτικά από τον **Συναθροιστή**, σε κάθε επανάληψη παράγει σήματα έλεγχου p_t για την φόρτιση ή εκφόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Αν η ζήτηση στο επίπεδο ΜΣ ΥΤ/ΜΤ είναι υψηλή τα σήματα έλεγχου έχουν υψηλές τιμές ενώ αντίστοιχα για χαμηλές τιμές ζήτησης τα σήματα έχουν χαμηλές τιμές. Τα σήματα έλεγχου που αποστέλλει ο **Συναθροιστής** παράγονται από την εξίσωση,

$$p(t, D_{net}, P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV}) = \gamma \cdot \nabla U(D_{net}, P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV})$$

Όπου,

- $U(D_{net}, P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV}) = \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{2} (\sum_{i=1}^N (P_{ch,i,t}^{EV} - P_{dch,i,t}^{EV}) - \sum_{j=1}^M P_{j,i}^{DG} + D_t) \right]^2$
 $D_{net} = D_t - \sum_{j=1}^M P_{j,t}^{DG}$ με D_t το συμβατικό φορτίο του δικτύου και $P_{j,t}^{DG}$ η παραγωγή του j-ου ΑΠΕ
- γ είναι μια θετικά κατάλληλα ορισμένη σταθερά για την σύγκλιση του αλγόριθμου.

Βάση των σημάτων έλεγχου κάθε VC ξεχωριστά επιλύει το παρακάτω πρόβλημα βέλτιστου προφίλ για το ηλεκτρικό όχημα.

$$\min_{P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV}} J_i^{k+1} = \sum_{t=1}^T p_t^{k+1} \cdot P_{k+1,i,t}^{EV} + \frac{1}{2} (P_{k+1,i,t}^{EV} - P_{k,i,t}^{EV})^2 \quad (K)$$

Όπου, $P_{k,i,t}^{EV} = P_{ch,i,t}^{EV} - P_{dch,i,t}^{EV}$

μ.π.

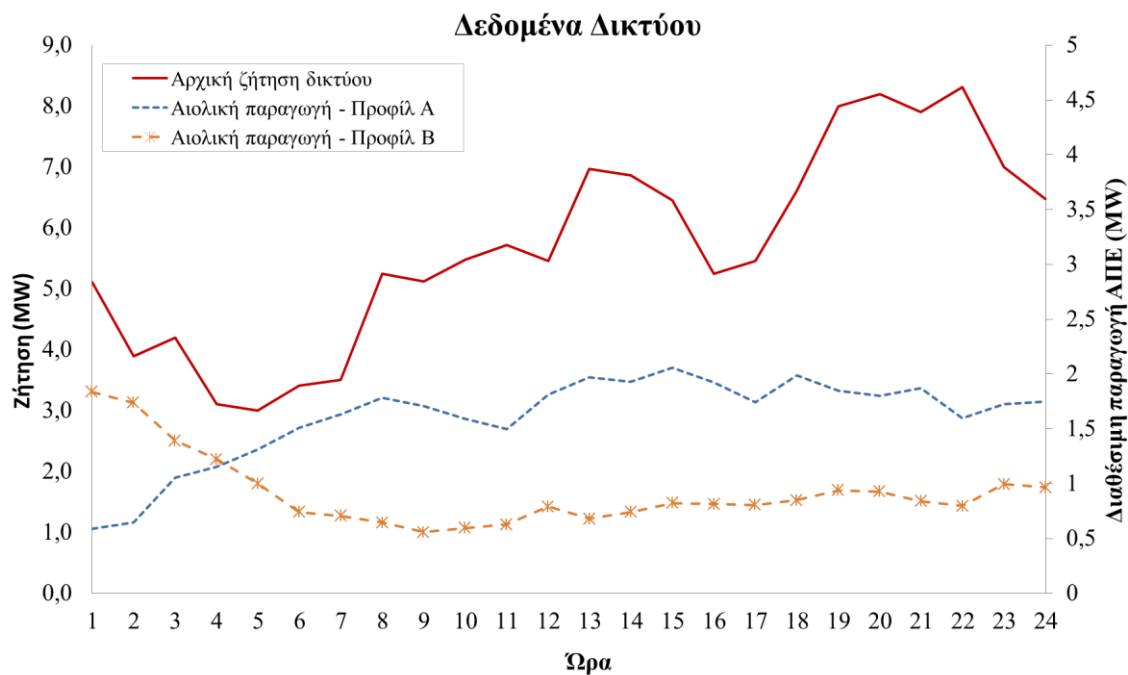
Οι περιορισμοί είναι ίδιοι με του κεντρικού αλγόριθμου (1) – (7)

Ο πρώτος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης αφορά το κέρδος ή κόστος που έχει το i-οστό EV βάση των σημάτων ελέγχου από την φόρτιση ή εκφόρτιση του. Ο δεύτερος όρος αποτελεί έναν συντελεστή ποινής ο οποίος αποτρέπει τις απότομες μεταβολές μεταξύ δυο επαναλήψεων του αλγόριθμου.

4.3 Αριθμητικό Παράδειγμα Κεντρικού και Αποκεντρωμένου Αλγόριθμου

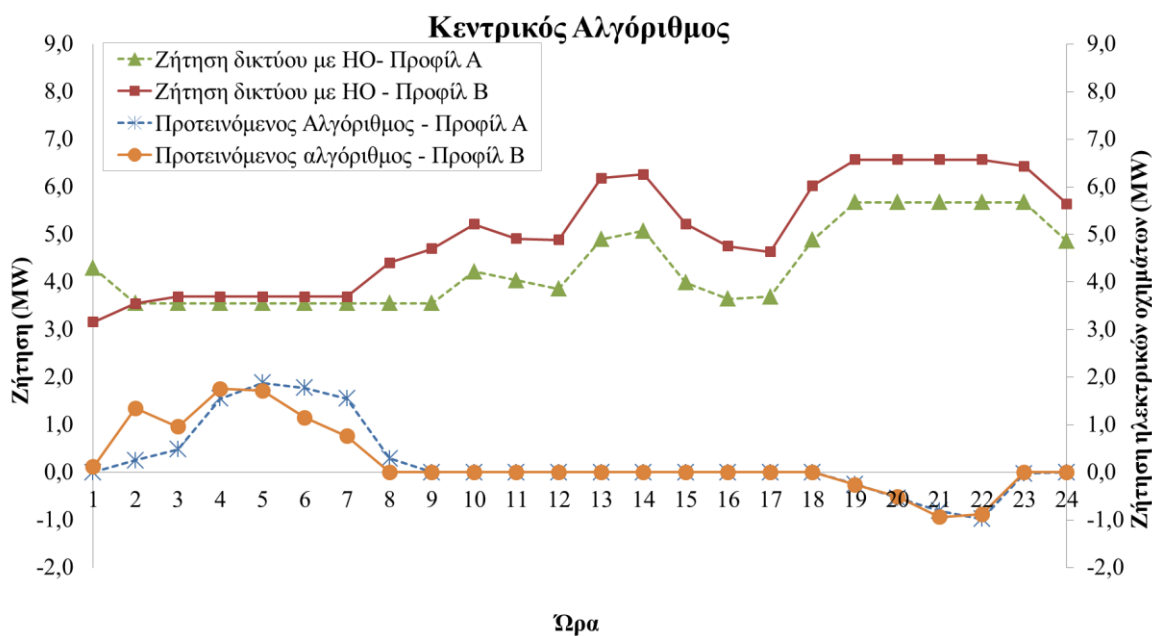
Για να εξετάσουμε την σύγκλιση των δυο αλγορίθμων θεωρούμε το εξής πρόβλημα. Έστω ότι τα δεδομένα μας είναι,

1. Στόλος 600EV με χωρητικότητα μπαταρίας 24kWh και απώλειες φόρτισης 0,9.
2. Ονομαστική Ισχύς Φόρτισης σταθμού 3kW.
3. Η ημερήσια μέση κατανάλωση της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος λόγω ταξιδιού είναι 11,5kWh (55%).
4. Η ημερήσια καμπύλη ζήτησης του δικτύου καθώς και τα δυο διαφορετικά προφίλ αιολικής παραγωγής. (Εικόνα 4.3)

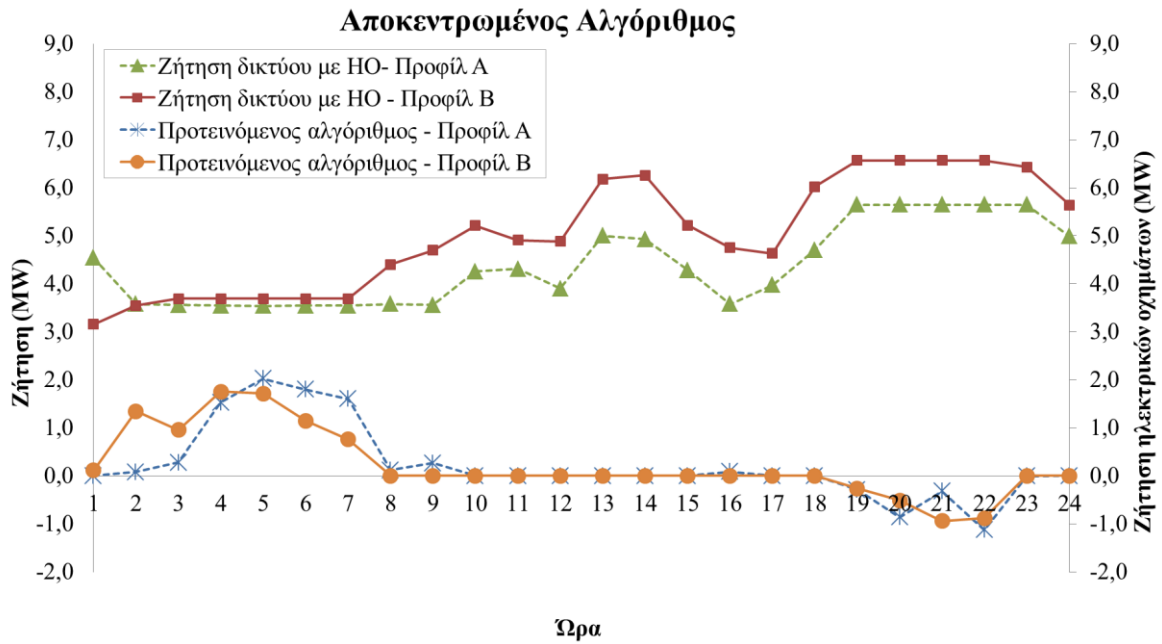


Εικόνα 4.3 - Ημερήσια καμπύλη Ζήτησης Δικτύου χωρίς EVs και Προφίλ Α & Β Αιολικής Παραγωγής (Δεδομένα Αριθμητικού Παραδείγματος).

Τα αποτελέσματα από την επίλυση του προβλήματος με την χρήση του κεντρικού και αποκεντρωμένου αλγόριθμου παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.4 και 4.5.

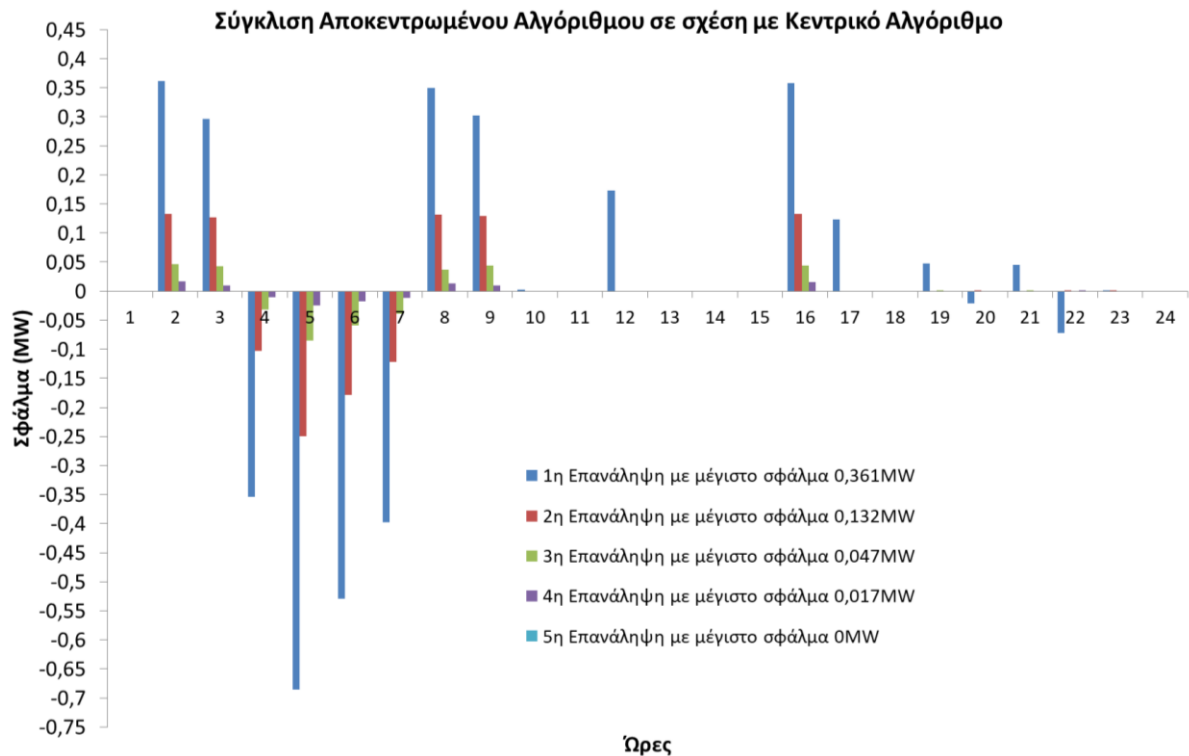


Εικόνα 4.4 – Αποτελέσματα Κεντρικού Αλγόριθμου για δυο διαφορετικά προφίλ ΑΠΕ.



Εικόνα 4.5 – Αποτελέσματα Αποκεντρωμένου Αλγορίθμου για δυο διαφορετικά προφίλ ΑΠΕ.

Στην Εικόνα 4.6 φαίνεται ότι σε λιγότερο από 5 επαναλήψεις ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος έχει συγκλίνει επιβεβαιώνοντας την ισοδυναμία των δυο αλγορίθμων.



Εικόνα 4.6 – Σύγκλιση Αποκεντρωμένου σε σχέση με τον Κεντρικό Αλγόριθμο

5 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Συνέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων και ΑΠΕ

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων με δεδομένα τα πραγματικά δίκτυα Μέσης Τάσης της Ικαρίας και της Σπερχιάδας για τις τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στρατηγική Α. Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση

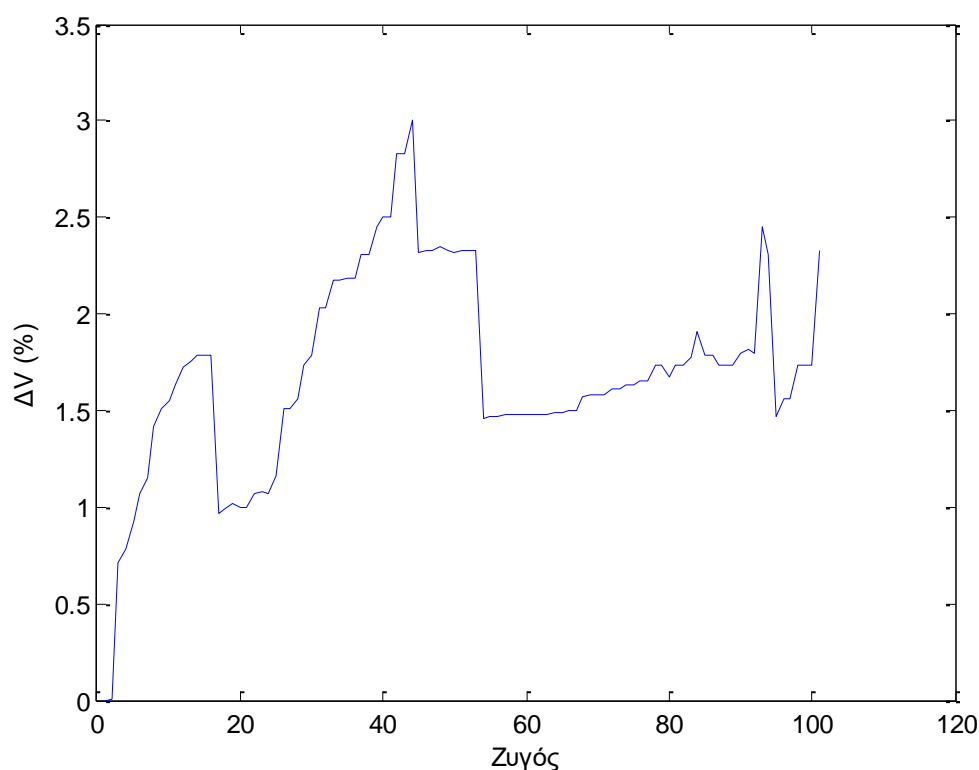
Στρατηγική Β. Ελεγχόμενη Φόρτιση με Διζωνικό Τιμολόγιο

Στρατηγική Γ. Ελεγχόμενη Φόρτιση με Valley-Filling

Στρατηγική Δ. Ελεγχόμενη Φόρτιση με δυνατότητα V2G (δηλαδή αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ δικτύου και Ηλεκτρικών Οχημάτων)

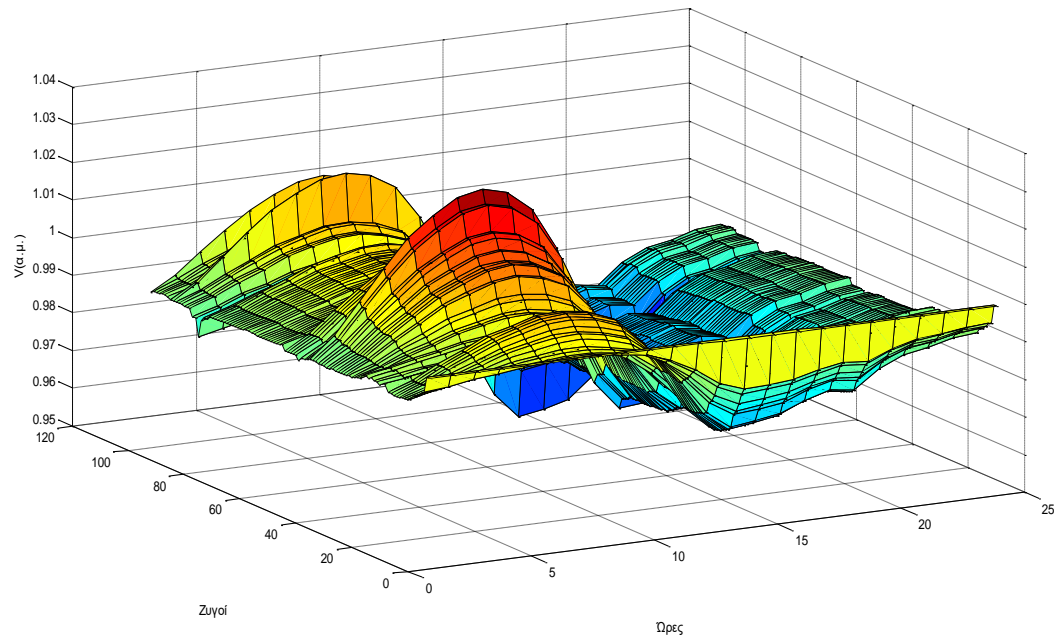
5.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων στο Δίκτυο ΜΤ Σπερχιάδας

Αν μελετήσουμε το δίκτυο της Σπερχιάδας χωρίς φορτίο ηλεκτρικών οχημάτων για διάφορες τιμές εγκατεστημένης ισχύος θα παρατηρήσουμε ότι το κριτήριο της μέγιστης διακύμανσης τάσης του 3% παραβιάζεται για εγκατεστημένη ισχύ περίπου 11MW Φωτοβολταϊκών (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1 - Διακύμανση Τάσης Ζυγών για εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ 11MW.

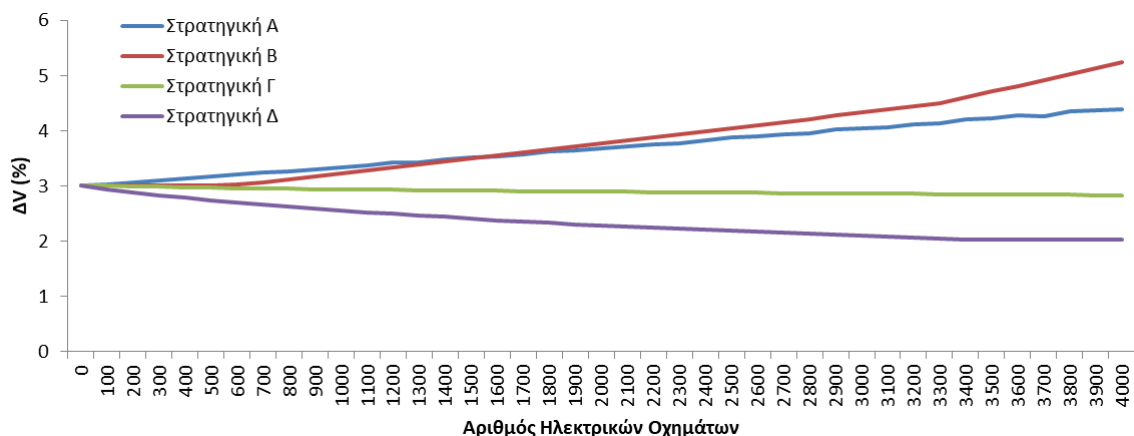
Ενώ η τάση στους ζυγούς για εγκατεστημένη ισχύ Φωτοβολταϊκών 11MW είναι όλο το 24Ωρο εντός των ορίων: $0,95\alpha\mu \leq V_{i,\alpha\mu} \leq 1,05\alpha\mu$



Εικόνα 5.2 – Τάση ανά ζυγό και ανά ώρα στο δίκτυο της Σπερχιάδας για ΦΒ 11MW.

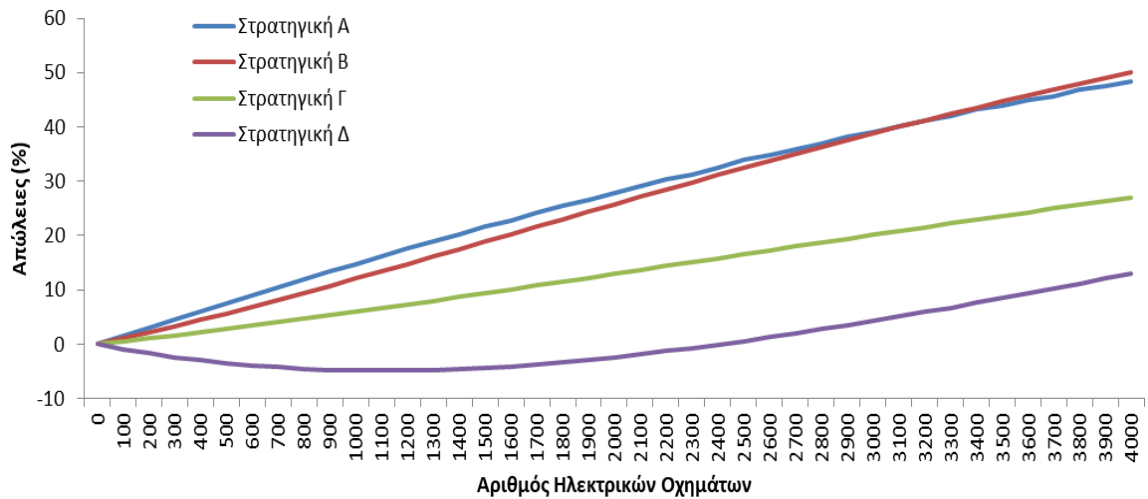
Άρα το κριτήριο που θα χρησιμοποιήσουμε για να εξετάσουμε την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα την στρατηγική που θα επιλέξουμε συμπεριλαμβάνοντας και την νέα στρατηγική V2G(είτε με τον αποκεντρωμένο είτε με τον κεντρικό αλγόριθμο εφόσον δείξαμε ότι είναι ισοδύναμοι) είναι η διακύμανση της τάσης.

Επιλύοντας ως προς όλες τις στρατηγικές και για διάφορες διεισδύσεις ηλεκτρικών οχημάτων με εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ το όριο των 11MW παρατηρούμε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μειώνει την διακύμανση της τάσης όσο αυξάνεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων δίνοντας έτσι την δυνατότητα για μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ.

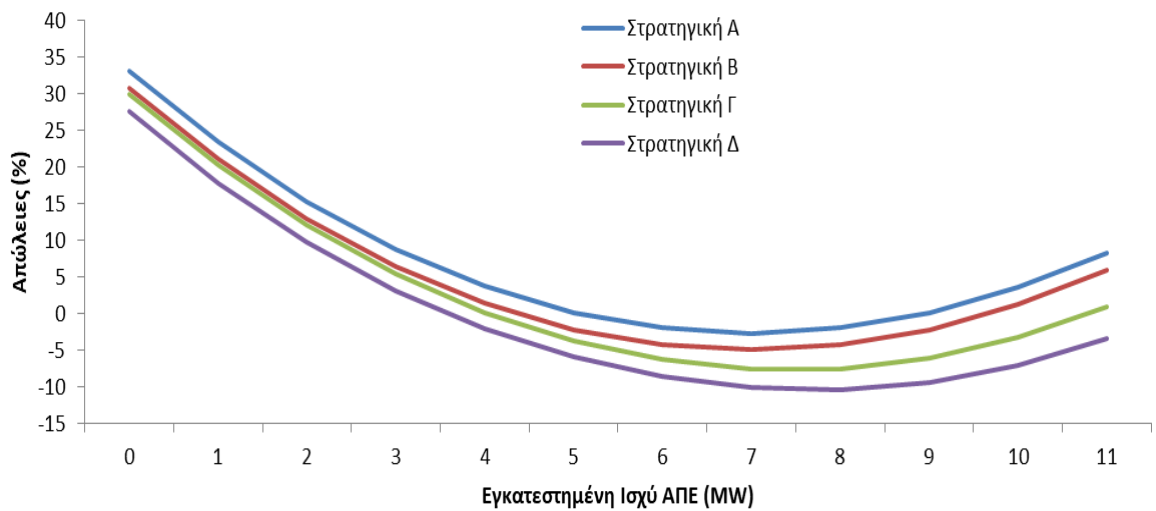


Εικόνα 5.3 – Μέγιστη Διακύμανση Τάσης στο δίκτυο της Σπερχιάδας για ΦΒ 11MW ανά στρατηγική και διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων .

Επίσης στην Στρατηγική Δ παρατηρούμε ότι οι απώλειες συγκριτικά με τις υπόλοιπες στρατηγικές αυξάνονται ελάχιστα (Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.3 – Απώλειες του δικτύου της Σπερχιάδας για ΦΒ 11MW ανά στρατηγική και διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων .



Εικόνα 5.4 – Απώλειες του δικτύου της Σπερχιάδας για 500EVs με ΦΒ 0 έως 11MW ανά στρατηγική και διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων.

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται ενδεικτικά η καμπύλη φόρτισης που ακολουθεί ένας στόλος 800 ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με την στρατηγική που θα επιλέξουμε για εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ 11MW.

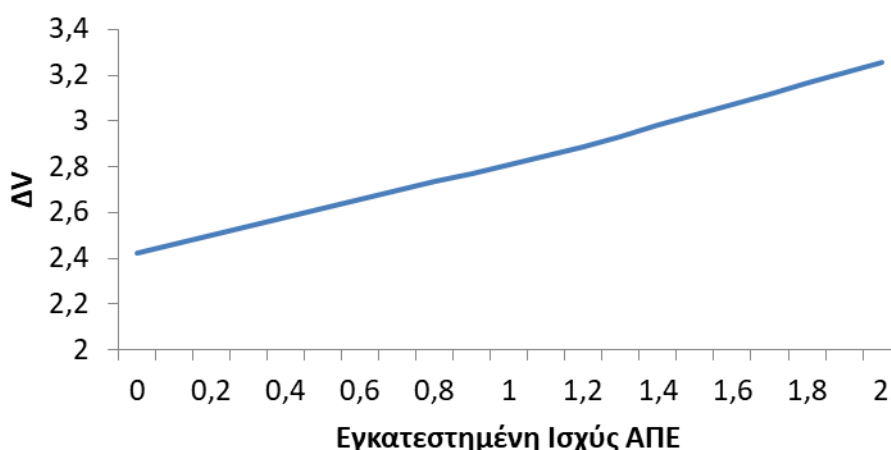


Εικόνα 5.5 – Φορτίσεις ανά Στρατηγική για 800 EVs στο δίκτυο της Σπερχειάδας με ΦΒ 11MW

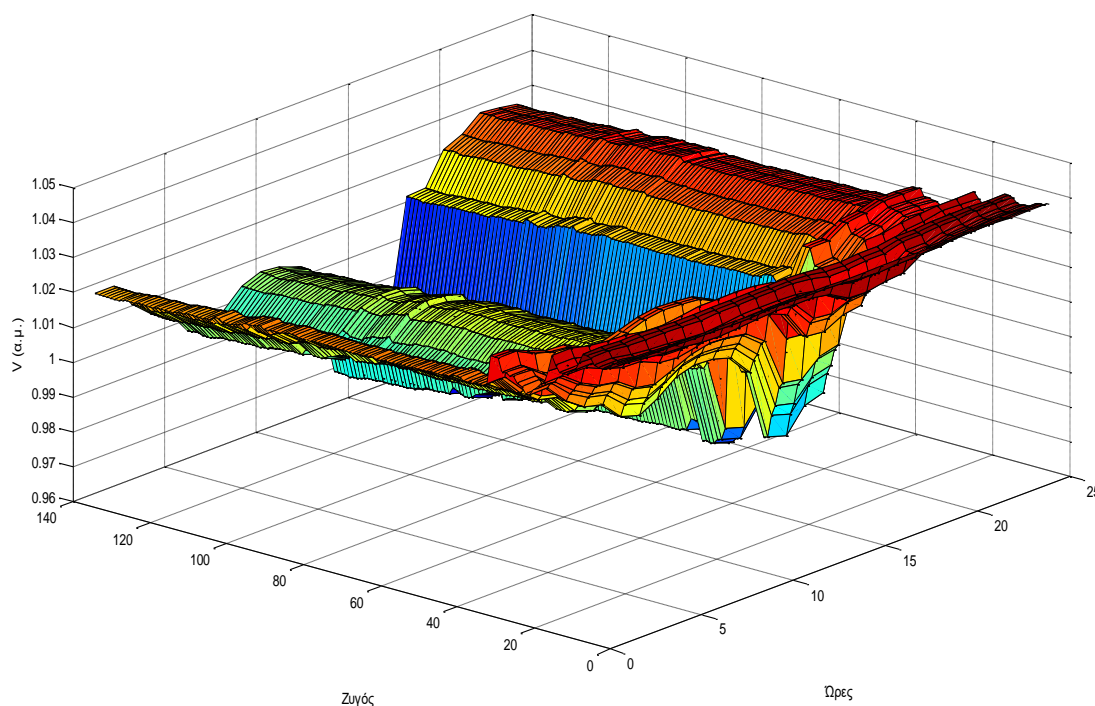
5.2 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων στο Δίκτυο ΜΤ Ικαρίας

Αν μελετήσουμε το δίκτυο της Ικαρίας χωρίς φορτίο ηλεκτρικών οχημάτων για διάφορες τιμές εγκατεστημένης ισχύος θα παρατηρήσουμε ότι το κριτήριο της μέγιστης διακύμανσης τάσης του 3% παραβιάζεται για εγκατεστημένη ισχύ περίπου 1,5MW Αιολικής Παραγωγής (Εικόνα 5.6). Για την ίδια ισχύ η τάση στους ζυγούς παραμένει εντός των επιτρεπτών ορίων (Εικόνα 5.7).

Μέγιστη Διακύμανση Τάσης



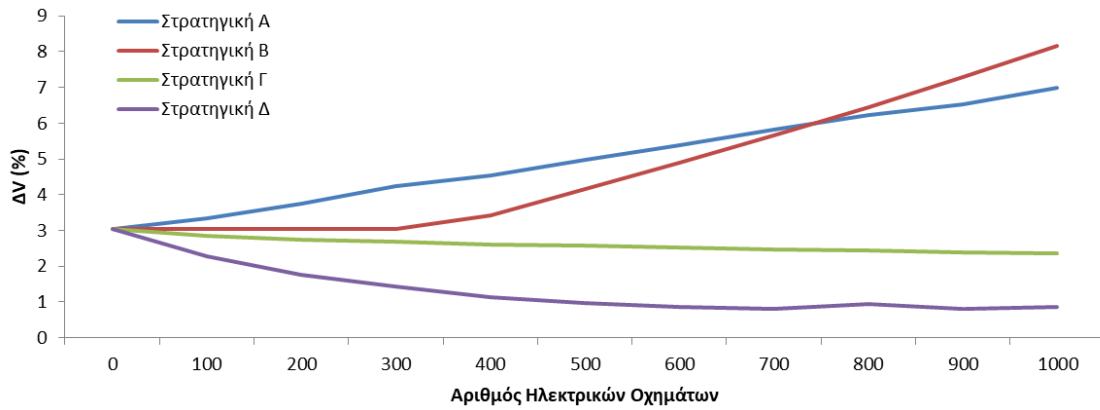
Εικόνα 5.6 -Μέγιστη Διακύμανση Τάσης ανά εγκατεστημένη ισχύ αιολικής παραγωγής στο δίκτυο ΜΤ της Ικαρίας.



Εικόνα 5.7 - Τάση ανά ζυγό και ανά ώρα στο δίκτυο ΜΤ της Ικαρίας.

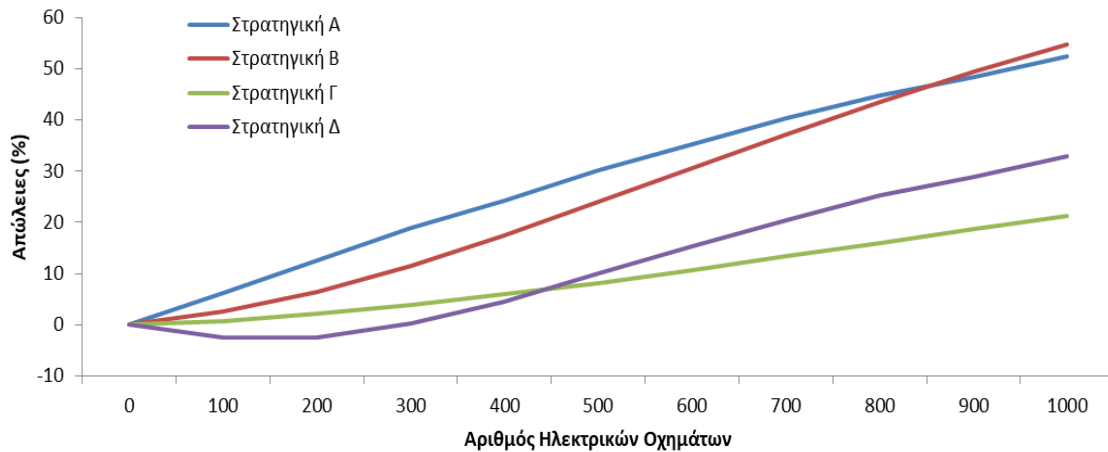
Άρα το κριτήριο που θα χρησιμοποιήσουμε και σε αυτό το δίκτυο για να εξετάσουμε την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα την στρατηγική που θα επιλέξουμε συμπεριλαμβάνοντας και την νέα στρατηγική V2G(είτε με τον αποκεντρωμένο είτε με τον κεντρικό αλγόριθμο εφόσον δείξαμε ότι είναι ισοδύναμοι) είναι η διακύμανση της τάσης.

Επιλύοντας ως προς όλες τις στρατηγικές και για διάφορες διεισδύσεις ηλεκτρικών οχημάτων με εγκατεστημένη ισχύ αιολικής παραγωγής το όριο των 1,5MW παρατηρούμε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μειώνει την διακύμανση της τάσης όσο αυξάνεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων δίνοντας έτσι την δυνατότητα για μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ (Εικόνα 5.8).

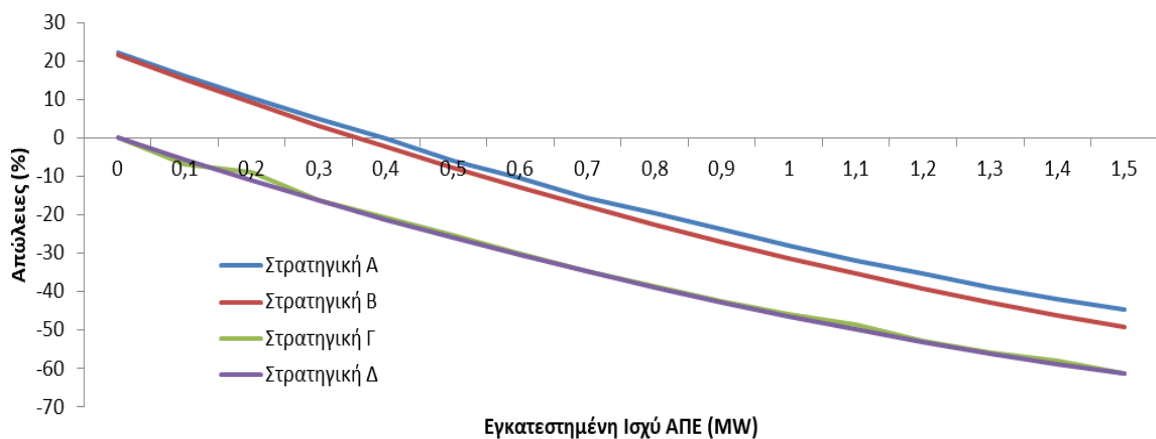


Εικόνα 5.8 – Μέγιστη Διακύμανση Τάσης στο δίκτυο της Ικαρίας για αιολική παραγωγή 1,5MW ανά στρατηγική και διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων .

Επίσης στην Στρατηγική Δ παρατηρούμε ότι οι απώλειες αυξάνονται ελάχιστα (Εικόνες 5.9 και 5.10).

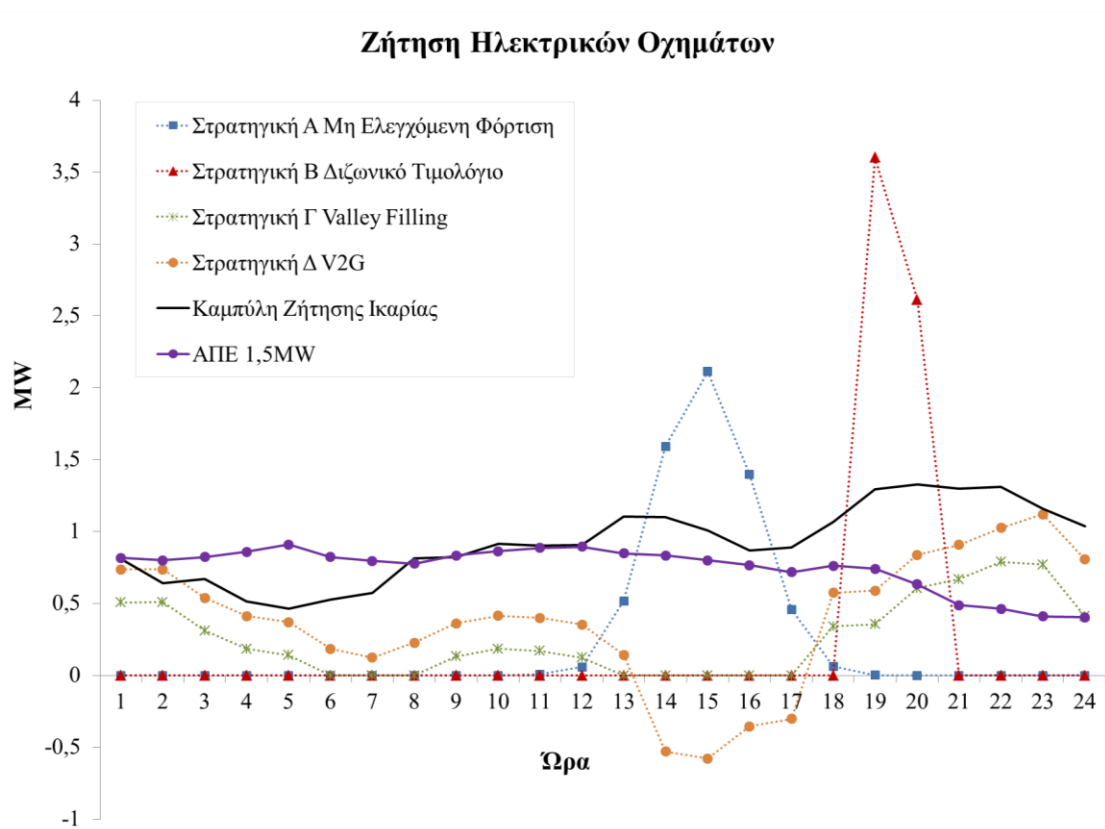


Εικόνα 5.9 – Απώλειες του δικτύου της Σπερχειάδας της Ικαρίας για αιολική παραγωγή 1,5MW ανά στρατηγική και διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 5.10 – Απώλειες του δικτύου της Σπερχειάδας για 500EVs για αιολική παραγωγή 0 έως 1,5MW ανά στρατηγική και διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων.

Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζεται ενδεικτικά η καμπύλη φόρτισης που ακολουθεί ένας στόλος 1000 ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με την στρατηγική που θα επιλέξουμε για εγκατεστημένη αιολική παραγωγή 1,5MW στο δίκτυο της Ικαρίας.



Εικόνα 5.11 – Φορτίσεις ανά Στρατηγική για 1000 EVs στο δίκτυο της Ικαρίας με ΑΠΕ 1,5MW

6 Συμπεράσματα

Στην μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάστηκαν τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Παρατηρήσαμε ότι,

- Η στρατηγική της μη ελεγχόμενης φόρτισης αποτελεί την χειρότερη περίπτωση φόρτισης διότι αναγκάζει όλα τα ηλεκτρικά οχήματα να φορτίζουν τις απογευματινές ώρες στο σπίτι μετά την επιστροφή τους από την δουλειά. Έτσι δημιουργείται μια έντονη επιβάρυνση όπου σε συνδυασμό με την ζήτηση του δικτύου δημιουργεί μια έντονη αιχμή που προκαλεί προβλήματα στο προφίλ της τάσης των ζυγών, αυξημένες απώλειες και τελικά χαμηλά ποσοστά διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων καθώς και ΑΠΕ.
- Η στρατηγική της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο αν και μεταφέρει το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων από τις απογευματινές ώρες και έτσι δεν ταυτοχρονίζεται με την αιχμή του δικτύου, παρόλα αυτά η καμπύλη φόρτισης των EVs παραμένει μια απότομη αιχμή στις πρώτες ώρες όπου εφαρμόζεται η τιμολογιακή πολιτική. Στο συνολικό φορτίο μπορεί πλέον να μην έχουμε αύξηση της αιχμής όμως η διακυμάνσεις του φορτίου αυξάνονται δημιουργώντας έντονες διακυμάνσεις στο προφίλ της τάσης και αυξημένες απώλειες. Τελικά οδηγούμαστε σε χαμηλά ποσοστά διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων καθώς και ΑΠΕ ανάλογα με της 1^{ης} στρατηγικής.
- Η στρατηγική της ελεγχόμενης φόρτισης με μέθοδο “valley-filling” μεταθέτει ομοιόμορφα το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων από τις απογευματινές ώρες σε ώρες χαμηλής ζήτησης λαμβάνοντας υπόψη τα οδηγικά προφίλ και τις διαθέσιμες ώρες φόρτισης των EVs. Στο συνολικό φορτίο εμφανίζονται μικρότερες και πιο ομαλές διακυμάνσεις με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων (μέχρι ένα κρίσιμο σημείο) τόσο να βελτιώνεται το προφίλ της τάσης ενώ οι απώλειες αυξάνονται ελάχιστα.
- Η στρατηγική της ελεγχόμενης φόρτισης με μέθοδο “V2G” εμφανίζει όλα τα πλεονεκτήματα της “valley-filling” με το επιπλέον προτέρημα ότι τα οχήματα πλέον μπορούν να εγχείουν ενέργεια από τις μπαταρίες τους πίσω στο δίκτυο όταν αυτό είναι δυνατό (V2G υπηρεσίες) λαμβάνοντας υπόψη το προφίλ παραγωγής ΑΠΕ και τις ανάγκες των οχημάτων. Στο συνολικό φορτίο εμφανίζονται ακόμα μικρότερες και πιο ομαλές διακυμάνσεις με αποτέλεσμα δυνατότητα μεγαλύτερης διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ (Συνέργεια Ηλεκτρικών Οχημάτων & ΑΠΕ).

Η τελευταία στρατηγική υλοποιήθηκε με δυο διαφορετικούς τρόπους, τον κεντρικό αλγόριθμο και τον αποκεντρωμένο. Ο κεντρικός αλγόριθμος τρέχει αποκλειστικά από έναν κεντρικό συντονιστή ο οποίος συγκεντρώνει όλη την πληροφορία υπολογίζει την βέλτιστη καμπύλη φόρτισης για κάθε ηλεκτρικό όχημα και αποστέλλει την πληροφορία σε κάθε ένα ξεχωριστά. Η μέθοδος αυτή είναι καλή πρακτική για μικρά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων καθώς όμως η διείσδυση αυξάνεται ο χρόνος επίλυσης αυξάνει πολυωνυμικά δημιουργώντας καθυστερήσεις.

Για μεγάλες διεισδύσεις προτείνεται ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος ο οποίος όπως είδαμε καταλήγει σε ισοδύναμη λύση και ο χρόνος σύγκλισης του είναι ανεξάρτητος από τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων (maximum 5 επαναλήψεις). Ο χρόνος σύγκλισης παραμένει σταθερός διότι πλέον ο κεντρικός συντονιστής δεν επιλύει τον αλγόριθμο για κάθε ηλεκτρικό

όχημα ξεχωριστά, αλλά με βάση την πρόβλεψη φορτίου και παραγωγής ΑΠΕ υπολογίζει και αποστέλλει σε κάθε όχημα σήματα ελέγχου για την ρύθμιση της φόρτισης τους ή την παροχή V2G υπηρεσίας. Το κάθε όχημα ξεχωριστά επιλύει από μόνο του την αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα του (στάθμη μπαταρίας, οδηγικό προφίλ κλπ) καθώς και το σήμα ελέγχου που του έχει αποσταλεί. Από την επίλυση των αποκεντρωμένων προβλημάτων προκύπτουν οι καμπύλες φόρτισης όλων των οχημάτων οι οποίες συλλέγονται από τον κεντρικό συντονιστή ως δεδομένα. Ο κεντρικός συντονιστής υπολογίζει και αποστέλλει τα νέα σήματα ελέγχου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου οι καμπύλες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ταυτιστούν με τις βέλτιστες (λύση κεντρικού αλγόριθμου).

Η συνέργεια Ηλεκτρικών Οχημάτων και ΑΠΕ που επιτυγχάνεται με την χρήση της αποκεντρωμένης στρατηγικής V2G βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του δικτύου οδηγώντας σε μεγάλες διεισδύσεις ΑΠΕ και EVs χωρίς την σπατάλη υπέρογκων ποσών για ενίσχυση των υποδομών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Συμβολή στη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων για την αποδοτικότερη ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, Διδακτορική Διατριβή, Ευάγγελος Α. Καρφόπουλος
- [2] IEA - Energy and CO2 emissions in the OECD With detailed data up to 2015
- [3] MERGE: Mobile Energy Resources in Greeds of Electricity, Task 1.1, Deliverable 1.1, Specification for an enabling smart technology, 3 August 2011.
- [4] IEA Global EV Outlook 2016
- [5] IEA “Tracking clean energy progress 2013”
- [6] CIGRE - Working Group C6.24 - Capacity of Distribution Feeders for Hosting DER
- [7] IEA report 2016, “Global EV outlook 2016”
- [8] A. M. Goeffrion, “Generalized Benders Decomposition”, Journal of optimization theory and applications, vol. 10, no. 4, pp. 237-260, 1972
- [9] A. M. Goeffrion, “Generalized Benders Decomposition”, Journal of optimization theory and applications, vol. 10, no. 4, pp. 237-260, 1972
- [10] N. Rotering, M. Ilic, “Optimal Charge Control of Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Deregulated Electricity Markets”, IEEE Transactions on Power Systems, Nov. 2010
- [11] Zhongjing Ma, Callaway, D., Hiskens, I., “Decentralised charging control for large population of plug-in electric vehicles: Application of the Nash certainty equivalence principle”, in IEEE International Control applications (CCA) Conference, Yokohama, Sept. 2010.
- [12] E. Sortomme, M.M. Hindi, S.D.J. MacPherson, S.S. Venkata, “Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses”, IEEE Transactions on Smart Grid, March 2011
- [13] S. Deilami, A.S. Masoum, P.S. Moses, M.A.S. Masoum, “Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile”, in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, Issue 3, pp 456-467, Sept. 2011.
- [14] Q. Li, T. Cui, R. Negi, F. Franchetti, M. Ilic, “Online Decentralised Charging of Plug-In Electric Vehicles in Power Systems”, eprint arXiv:1106.5063, Nov. 2011.