



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ
ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ Φ/Β**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΑΜΗΛΙΑΡΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2017

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ Ν.

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ
ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ Φ/Β**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΑΜΗΛΙΑΡΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ Ν.

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 20/3/2017.

.....
Ν. Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Π. Γεωργιλάκης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 υπό την αιγίδα του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου .

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπο μου ,δίνοντας μου την δυνατότητα ν ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα ,καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ευάγγελο Καρφόπουλο ,χωρίς την βοήθεια του οποίου θα ήταν δύσκολο να φέρω εις πέρας αυτή την εργασία.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους για την υπομονή και την συμπαράσταση που έδειξαν όλη αυτή την περίοδο φοίτησης στο συγκεκριμένο ίδρυμα .

Copyright Γκαμηλιάρη Π. Αγγελική , 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 τον συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια ο κλάδος των ηλεκτροκίνητων οχημάτων παρουσιάζει μεγάλη ανάπτυξη ,η οποία οφείλεται κατά έναν πολύ μεγάλο βαθμό στην αυξανόμενη τιμή των καυσίμων όπως και στις επιβλαβείς εκπομπές και του εκλυόμενου ρύπου .Τα πρώτα αυτοκίνητα αυτού του είδους κινούνται ήδη στους δρόμους και ο αριθμός τους αναμένεται να αυξηθεί ταχύτατα .Ωστόσο η διείσδυση μεγάλου πλήθους στόλου θα μπορούσε να δημιουργήσει προβλήματα στα υπαρκτά δίκτυα . Έτσι, κρίνεται απαραίτητο να ευρεθούν τρόποι εξυπηρέτησης των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων οι οποίοι θα οδηγήσουν στην ομαλότερη λειτουργία του δικτύου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εφαρμοστούν τρεις αλγόριθμοι φόρτισης των συσσωρευτών και τα αποτελέσματα τους θα συγκριθούν με εκείνα ενός τέταρτου , ο οποίος μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε ροή ισχύος τόσο από το δίκτυο προς το ηλεκτρικό όχημα (Grid-to-Vehicle, G2V) όσο και αντίστροφα (Vehicle-to-Grid, V2G) .Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ,για να καταδειχθεί η βέλτιστη μέθοδος για την εφαρμογή σε τμήμα του δικτύου της Κατερίνης .Οι τρεις εναλλακτικές, προς μελέτη στρατηγικές είναι : η μη ελεγχόμενη φόρτιση (dumb charging - που συμβαίνει κατά την επιστροφή των οχημάτων μετά την τελευταία τους μετακίνηση) , η φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging - κατά την οποία η φόρτιση των οχημάτων γίνεται τις ώρες ισχύος του «νυχτερινού ρεύματος » ,δηλαδή όταν έχουμε το ελάχιστο ενεργειακό κόστος) και η ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου (Valley Filling- με χρήση της οποίας, η διαδικασία πραγματοποιείται τις ώρες ελάχιστης ζήτησης φορτίου).Τα στοιχεία στο οποία θα συγκριθούν οι τέσσερις αλγόριθμοι είναι :η επίδραση στην καμπύλη φορτίου , η φόρτιση των γραμμών ,οι απώλειες του δικτύου και το προφίλ και η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων ,των συσσωρευτών τους, των τρόπων φόρτισης και των ισχυόντων προτύπων για την διασύνδεση τους .Στο δεύτερο αναλύεται το προγραμματιστικό περιβάλλον στο οποίο θα γίνουν οι προσομοιώσεις .Στο τρίτο γίνεται η ανάλυση και των τεσσάρων στρατηγικών φόρτισης ,ώστε στο τέταρτο να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για κάθε στρατηγική φόρτισης αλλά και συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ τους. Τέλος ,στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της παραπάνω ανάλυσης .

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρικά οχήματα (HO) ,ημερήσιο φορτίο , διακύμανση τάσης, απώλειες συστήματος , φόρτιση γραμμής ,dumb charging , dual tariff charging ,smart charging , vehicle-to-grid (V2G)

ABSTRACT

In recent years the industry of electric vehicles presents strong growth, driven ,at a very large extent ,by the increasing cost of fuel and the harmful emissions and pollutants released .The first vehicles of this kind are already moving in the streets, and their number is expected to increase rapidly .However the penetration of a large fleet of electric vehicles could create problems in the existent networks. Thus, it is necessary to find ways to cover the energy needs of EV ,which will lead to a smoother operation of the network.

In this thesis three charging algorithms are implemented and their results will be compared to those of a fourth, which enables us to have power flow both from the network into the electric vehicle (Grid-to-Vehicle, G2V) and vice versa (Vehicle-to-grid, V2G) .This work is being done to establish the best method for applying at a portion of Katerini network .The three alternative strategies are : uncontrolled charging (dumb charging - which begins after the returning of the vehicle from its last trip), dual tariff charging (during this method charging is being done during time with the minimum energy cost) and the controlled charging with the minimization of the cost and the simultaneous optimization of the electrical grid operation (Valley Filling- by using this method charging happens during time of minimum load demand). The four algorithms are compared by studying the following aspects: the effect on the load curve, the charge of the lines, the actual losses of the grid and the voltage profile and the voltage deviation of the grids' buses .

The first chapter includes the analysis of the technology of the electric vehicles, their batteries, the charging modes and the existing standards for their connection to the electric power system. In the second chapter, the programming environment in which we will run the simulations is analyzed. In the third ,is done the analysis of the four charging strategies, so as we could present the results of the simulations for each one as well as the comparative results between them.Finally, the fifth chapter presents the conclusions of the above analysis.

KEY WORDS

Electric vehicles (EV), daily load ,voltage deviation, actual losses, line load ,dumb charging , dual tariff charging ,smart charging , vehicle-to-grid (V2G)

1 Περιεχόμενα

1	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	15
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
1.1.1	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	16
1.1.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	26
1.1.3	ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ.....	28
1.2	ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	30
1.2.1	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ –BEV.....	31
1.2.2	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ	32
1.2.3	ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ.....	32
1.2.4	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.....	35
1.2.5	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	35
1.2.6	ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΜΕΝΗ ΜΟΝΑΔΑ ΙΣΧΥΟΣ	36
1.3	ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ.....	36
1.3.1	ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ (LEAD-ACID BATTERY).....	39
1.3.2	ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΚΑΔΜΙΟΥ – NiCd.....	43
1.3.3	ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΥΔΡΙΔΙΟΥ-ΜΕΤΑΛΛΟΥ - (NiMH).....	44
1.3.4	ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΙΟΝΤΩΝ –ΛΙΘΙΟΥ (LITHIUM ION BATTERY).....	45
1.4	ΦΟΡΤΙΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	47
1.4.1	ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕ ΕΠΑΦΗ	48
1.4.2	ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	48
1.4.3	ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	49
1.4.4	ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ	52
2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ-ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ MATPOWER.....	57
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	58
2.2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	58
2.2.1	ΜΟΡΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	59
2.2.2	ΚΛΑΔΟΙ.....	59
2.2.3	ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ	61
2.2.4	ΦΟΡΤΙΑ	61

2.2.5	ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	61
2.2.6	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	62
2.2.7	DC ΜΟΝΤΕΛΟ.....	63
2.3	ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ.....	65
2.3.1	AC ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ.....	65
2.4	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ.....	67
2.4.1	ΣΥΝΗΘΗΣ AC ΒΡΦ.....	68
2.4.2	ΣΥΝΗΘΗΣ DC ΒΡΦ.....	69
2.4.3	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗΣ ΒΡΦ.....	70
2.4.4	ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	73
2.4.5	ΛΥΤΕΣ.....	77
3	ΕΙΣΧΩΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	79
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	80
3.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΖΗΤΗΣΗΣ.....	80
3.3	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	89
3.4	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ.....	92
3.4.1	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ Α (DUMP CHARGING).....	93
3.4.2	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ Β (DUAL TARIFF).....	95
3.4.3	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ Γ (SMART CHARGING).....	96
3.4.4	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ Δ (VEHICLE TO GRID).....	97
4	ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ.....	101
4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	102
4.1.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΤ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ.....	102
4.1.2	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	106
4.2	ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ.....	106
4.3	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (DUMB CHARGING).....	112
4.4	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΔΙΖΩΝΙΚΟΥ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟΥ (DUAL TARIFF CHARGING).....	118
4.5	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΕΞΥΠΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (SMART CHARGING).....	126

4.6	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ V2G.....	133
4.6.1	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ D ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PERC=100%)	133
4.6.2	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ D ΧΩΡΙΣ ΠΛΗΡΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	144
4.7	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	153
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	163
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	167

1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

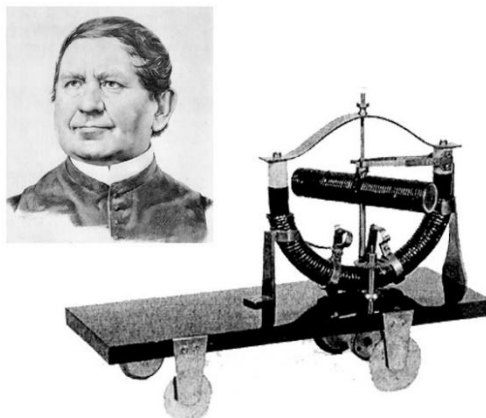
Ηλεκτροκίνητα οχήματα είναι εκείνα τα οποία διαθέτουν τουλάχιστον έναν ηλεκτροκινητήρα για την κίνηση τους και διακρίνονται σε οχήματα συνδεδεμένα με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και σε αυτόνομα ηλεκτροκίνητα (ηλεκτρικά) οχήματα (τα οποία διαθέτουν αποθήκη ή/και άλλης μορφής ενέργειας). Πρωτοεμφανίστηκαν γύρω στα μέσα του 19^{ου} αιώνα και μάλιστα προτιμήθηκαν έναντι των συμβατικών οχημάτων ,αντικαταστάθηκαν σταδιακά από οχήματα με βενζινοκινητήρες ,ωστόσο τα τελευταία χρόνια τείνουν να επανέλθουν δυναμικά λόγω της μόλυνσης του περιβάλλοντος και της αυξανόμενης τιμής των καυσίμων. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες αντί των μηχανών εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Αντιθέτως, τα αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν και τα δύο (ηλεκτρικές μηχανές και ΜΕΚ) καλούνται υβριδικά αυτοκίνητα και συνήθως δεν θεωρούνται καθαρά ΗΑ.

Τα ΗΑ είναι συνήθως δίκυκλα ,αυτοκίνητα ,ελαφριά φορτηγά και έχουν υψηλότερο συντελεστή απόδοσης από όλες τις μηχανές εσωτερικής καύσης .

1.1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι σύντομη .Τοποθετούνται χρονολογικά σχεδόν ταυτόχρονα (λίγο νωρίτερα) από τα αυτοκίνητα με μηχανές εσωτερικής καύσης ,αν και είναι δύσκολο να προσδιορίσουμε ακριβώς την γέννηση τους ή τον πρώτο τόπο δημιουργίας . Ακολούθως παρατίθενται τα σημαντικότερα στάδια της πορείας τους στον χρόνο.

- **1821** : Ο αμερικάνος εφευρέτης Michael Faraday κατασκευάζει τον πρώτο ηλεκτρομαγνήτη .
- **1828** : Ο Ούγγρος εφευρέτης Άγος Jedlik ,έχοντας φτιάξει ένα πρώιμο ηλεκτροκινητήρα ,τροφοδοτεί με αυτόν το πρώτο μικρό όχημα (εικόνα 1.1)



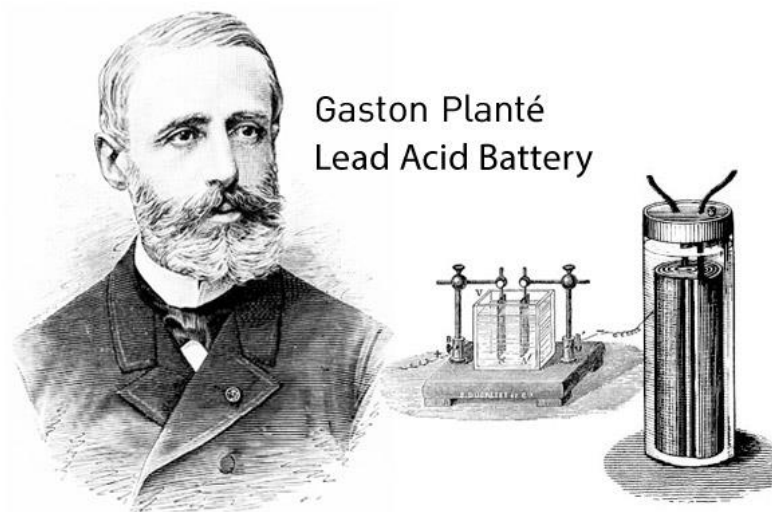
Εικόνα 1.1 : Ο εφευρέτης Άγος Jedlik με το ηλεκτρικό του όχημα (πηγή : <http://www.worldautoevolution.com/130-years-of-auto-evolution-from-blacksmith-product-to-self-driving-wonder/>)

- **1834-1835** : Ο αμερικάνος σιδεράς Thomas Davenport και η γυναίκα του κατασκευάζουν ένα ηλεκτρικό όχημα που κινείται σε κυκλική τροφοδοτούμενη διαδρομή (το οποίο πατεντάρεται το 1837) , ενώ σχεδόν ταυτόχρονα ο Ολλανδός καθηγητής Sibrandus Stratingh και ο βοηθός του κατασκευάζουν ΗΑ που φέρει τους πρώτους (μη επαναφορτιζόμενους) συσσωρευτές (εικόνα 1.2).



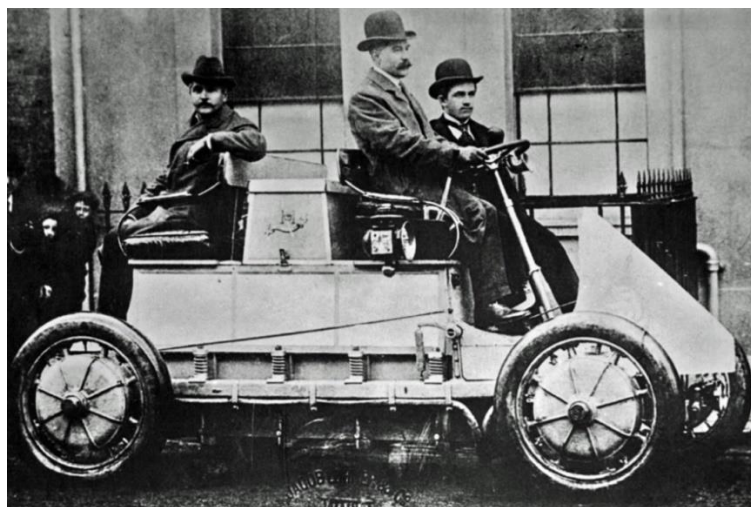
Εικόνα 1.2 :Το ηλεκτρικό όχημα του Sibrandus Stratingh (πηγή : <http://www.rug.nl/society-business/university-museum/prominent-professors/stratingh?lang=en>)

- **1859** : Ο Γάλλος φυσικός Gaston Planté ανακαλύπτει τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέως ,ανοίγοντας ουσιαστικά τον δρόμο για τα ΗΑ (εικόνα 1.3) ,(πολλά από τα οποία χρησιμοποιούν ακόμη και σήμερα τέτοιες διατάξεις για την εκκίνηση τους) .



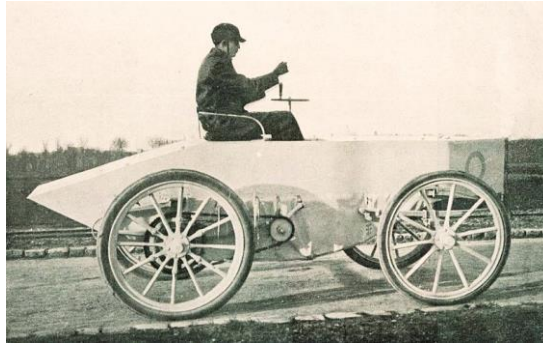
Εικόνα 1.3: Ο φυσικός Gaston Planté ,εφευρέτης του πρώτου συσσωρευτή (πηγή : <https://alchetron.com/Gaston-Plante-1162585-W>)

- **1881** : Ο Γάλλος επιστήμονας Camille Alphonse ,βελτιώνει τον σχεδιασμό την συσσωρευτών μολύβδου-οξέος . Παράλληλα ένα ΗΑ κατασκευασμένο από τον Gaston Planté εκτίθεται στην διεθνή έκθεση ηλεκτρισμού του Παρισιού και εμφανίζεται το πρώτο όχημα με φώτα πορείας .
- **1884** : Ο Άγγλος εφευρέτης Thomas Parker ,κατασκευάζει με μπαταρίες που σχεδίασε το πρώτο ΗΑ στο Λονδίνο .(Ο ίδιος τροφοδότησε τον υπόγειο σιδηρόδρομο του Λονδίνου καθώς και πολλές γραμμές τραμ) . Ταυτόχρονα ο Andrew Riker φτιάχνει το πρώτο όχημα με αυτονομία 25 μίλια .
- **1888-1891** : Κατασκευάζεται το πρώτο ηλεκτρικό όχημα σε Αμερική και Γερμανία , εμφανίζεται το πρώτο τιμόνι .
- **1894-1895** : Ο μηχανικός Henry G. Morris και ο χημικός Pedro G. Salom κατασκευάζουν το πρώτο επιτυχημένο ΗΑ , το οποίο μάλιστα οδηγείται σε μαζική παραγωγή .
- **1895-1897** : Γίνεται ο πρώτος αγώνας ταχύτητας (με νικητή ένα ΗΑ) , δημιουργείται η πρώτη αντιπροσωπεία ΗΑ , η πρώτη εταιρεία αντικατάστασης μπαταρίας καθώς και οι πρώτες εταιρείες ταξί σε ΗΠΑ και Λονδίνο .
- **1898** : Ο καθηγητής Ferdinand Porsche ,κατασκευάζει το πρώτο του όχημα (το οποίο έχει κινητήρα σε κάθε μπροστινό τροχό) .



Εικόνα 1.4: Ο καθηγητής Ferdinand Porsche με το πρώτο του όχημα (πηγή : <https://en.wikipedia.org/wiki/Lohner-Porsche>)

- **1898-1899** : Καθιερώνονται τα πρώτα ρεκόρ ταχύτητας αυτοκινήτων . Το αρχικό το 1898 από τον κόμη Gaston de Chasseloup-Laubat του Παρισιού (ήταν 62,8 km/h) (εικόνα 1.5) και το ακόλουθο το 1899 από τον Camille Jenatzy (105,88 km/h) (εικόνα 1.6) .



Εικόνα 1.5: Ο κόμης Gaston de Chasseloup-Laubat φωτογραφημένος στις 4 Μαρτίου του 1899 στο Acheres της Γαλλίας (πηγή : https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Gaston_de_Chasseloup-Laubat)



Εικόνα 1.6: Ο μηχανικός Camille Jenatton ,φωτογραφημένος με το ηλεκτρικό του όχημα «La Jamais Contente» -1899 (πηγή : http://www.grandprixhistory.org/jenatton_bio.htm)

- **1899** : Εμφανίζεται το πρώτο Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο μαζικής παραγωγής ,το όχημα Backer Electric από την εταιρεία Baker Motor Vehicle (εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7: Ο εφευρέτης Thomas Edison φωτογραφημένος με ένα από τα πρώτα οχήματα Backer Electric (πηγή : <http://electricvehiclesnews.com/History/Companies/Baker.htm>)

- **1901** : Ο Thomas Edison πατεντάρει τους συσσωρευτές νικελίου-σιδήρου .

- **1902** : Ο Walter Baker θέτει νέο ρεκόρ ταχύτητας (το οποίο και καταρρίφθηκε 64 χρόνια μετά) ,αγγίζοντας τα 167 km /h .
- **1908** : Αρχίζει η παραγωγή του Model T κατασκευασμένου από τον Henry Ford .Με κόστος πολύ μικρότερο από τα ηλεκτρικά οχήματα και μεγαλύτερα αυτονομία σηματοδοτεί την αρχή του τέλους τους.
- **1911** : Εμφανίζεται από την εταιρεία Woods Motor Vehicle το πρώτο υβριδικό όχημα (λειτουργούσε με μπαταρία ή καύσιμα) (εικόνα 1.8) .



Εικόνα 1.8: Το πρώτο υβριδικό ηλεκτροκίνητο όχημα (πηγή : <http://electricandhybridcars.com/index.php/pages/WoodsHybridCar.html>)

- **1912** : Εφευρίσκεται ο ηλεκτρικός εκκινητής από τον Charles Kettering (ο οποίος βλάπτει ,πάρα ωφελεί τα ΗΑ)
- **1947** : Εμφανίζεται στην Ιαπωνία το ηλεκτρικό όχημα Tama(από την ομώνυμη εταιρεία ,τον προάγγελο της Nissan) ,το οποίο όμως δεν είχε μεγάλη απήχηση (εικόνα 1.9) .



Εικόνα 1.9: Το ηλεκτρικό όχημα Tama (πηγή : <http://www.hybridcars.com/the-interesting-history-of-tama-the-nissan-leaf-ancestor/>)

- **1959-1961** : Κατασκευάζεται το Henney Kilowatt (από την εταιρεία Henney Coachworks και την εθνική ένωση ηλεκτρικής εταιρείας . Είχε τελική ταχύτητα τα 97 χιλιόμετρα και αυτονομία περίπου 100 (εικόνα 1.10) .



Εικόνα 1.10: Το ηλεκτρικό όχημα Henney Kilowatt (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Henney_Kilowatt)

- **1966** : Η General Motors παράγει το όχημα Electrovairst χρησιμοποιώντας συσσωρευτές αργύρου-ψευδαργύρου .



Εικόνα 1.11: Το ηλεκτρικό όχημα Electrovairst (πηγή : <https://cleantechnica.com/2013/09/21/1966-back-future-fuel-cell-electric-vehicles/>)

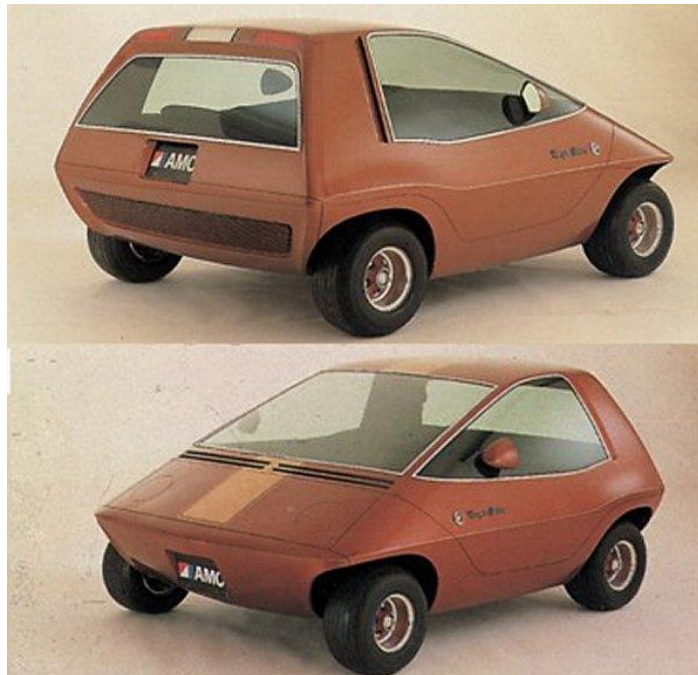
- **1967-1969** : Οι εταιρείες American Motors Corporation και Gulston Industries συνεργάζονται παράγοντας το HA Amitron (1967 , μπαταρίες λιθίου) (εικόνα 1.12) και το HA Rambler American (1969, μπαταρίες νικελίου-καδμίου).



Εικόνα 1.12: Το ηλεκτρικό όχημα Amitron (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/AMC_Amitron)

- **1971** : Το πρώτο επανδρωμένο όχημα που κινείται στο φεγγάρι ,το Lunar Rover είναι ηλεκτρικό .

- **1977** : Οι εταιρείες American Motors Corporation και Gulton Industries παράγουν το AMC Electron (εικόνα 1.13) .



Εικόνα 1.13: Το ηλεκτρικό όχημα AMC Electron (πηγή : http://www.carstyling.ru/en/car/1977_american_motors_electron/)

- **1990** : Παράγεται από την General Motors ,το GM Impact ,και ψηφίζονται πιο αυστηροί νόμοι για την μείωση εκπομπών ρύπων και την καθιέρωση των ΗΑ (διάταξη ZEV) .
- **1991** : Παράγεται το Kewet ένα 100 % μικρό ηλεκτρικό όχημα στην Νορβηγία (εικόνα 1.14) (το 2007 θα επανακυκλοφορήσει ως Buddy) .



Εικόνα 1.14: Το ηλεκτρικό όχημα Kewet (πηγή : <https://en.wikipedia.org/wiki/Kewet>)

- **1994-1997** : Αρχίζει η παραγωγή από την General Electric ,του EV1 (1994) , (το οποίο αναβαθμίζεται το 1999 με νέους συσσωρευτές) και του Chevrolet S10 EV,ενός μικρού ηλεκτρικού φορτηγού .

- **1997-1998** : Η Honda παράγει το EV Plus , η Toyota το RAV4 EV και η Ford το Ranger EV.
- **1999** : Εμφανίζονται ξανά υβριδικά οχήματα μετά από σχεδόν 80 χρόνια , το Toyota Prius (εικόνα 1.15α) και το Honda Insight (εικόνα 1.15β) .



Εικόνα 1.15: (α) Το ηλεκτρικό όχημα Toyota Prius (πηγή : http://www.cars-directory.net/gallery/toyota/prius/1999/toyota_prius_2741346_p.html) και (β) το ηλεκτρικό όχημα Honda Insight (πηγή : http://auto-database.com/honda/insight/1999/insight-i_1999/) σε εκδόσεις του 1999 .

- **2001** : Η εταιρεία REVA Electric Car Company παρουσιάζει το REVAi , ένα μικρό Αγγλικό ΗΑ με μπαταρίες μολύβδου-οξέος (εικόνα 1.16) .



Εικόνα 1.16: Το ηλεκτρικό όχημα REVAi (πηγή : <https://en.wikipedia.org/wiki/REVAi>)

- **2003-2007** : Ιδρύεται η εταιρεία Tesla Motors , η οποία μελετά και τελικά παράγει το πρώτο 100% ηλεκτρικό σπορ αυτοκίνητο Tesla Roadster (εικόνα 1.17) .



Εικόνα 1.17: Το ηλεκτρικό όχημα Tesla Roadster (πηγή : <http://www.thetruthaboutcars.com/2007/03/tesla-roadster/>)

- **2008** : Εμφανίζεται το HA Th!nk City στην Νορβηγία (εικόνα 1.18)



Εικόνα 1.18: : Το ηλεκτρικό όχημα Th!nk City (πηγή https://en.wikipedia.org/wiki/Think_City)

- **2009** : Η εταιρεία REVA παρουσιάζει το REVA L-Ion (HA με μπαταρίες ιόντων λιθίου) , η εταιρεία Tesla το Model S ,η εταιρεία Mitsubishi το i-MiEV (εικόνα 1.20) , ενώ η εταιρεία BYD παρουσιάζει το πρώτο υβριδικό όχημα με βυσματωτή φόρτιση ,το F3DM (εικόνα 1.19) .



Εικόνα 1.19: : Το υβριδικό όχημα F3DM (πηγή <http://www.byd.com/la/auto/f3dm.html>)



Εικόνα 1.20: : Το ηλεκτρικό όχημα i-MiEV (πηγή : <https://chargedevs.com/newswire/mitsubishi-slashes-price-of-2014-i-miev/>)

- **2010** : Η εταιρεία Nissan παρουσιάζει στην αγορά το 100 % ηλεκτρικό όχημα Nissan Leaf (εικόνα 1.21) εμφανίζεται το HA BYD e6 (εικόνα 1.22) ,καθώς και το Chevy Volt της Chevrolet (εικόνα 1.23). Παγκοσμίως υπάρχουν ,μέχρι εκείνη την στιγμή περίπου 25.000 ηλεκτρικά οχήματα.



Εικόνα 1.21: Το ηλεκτρικό όχημα Nissan Leaf ,έκδοση του 2011 (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Nissan_Leaf)



Εικόνα 1.22: Το ηλεκτρικό όχημα HA BYD e6 (πηγή : <https://cleantechnica.com/2015/04/26/electric-car-history/>)



Εικόνα 1.23: Το ηλεκτρικό όχημα Chevy Volt όπως παρουσιάστηκε τον Ιανουάριο του 2007 στην Διεθνή Έκθεση Αυτοκινήτου Βόρειας Αμερικής (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Chevrolet_Volt)

- **2010 –σήμερα** : Ολο και περισσότερες εταιρείες παράγουν ηλεκτρικά η υβριδικά οχήματα (η αγορά των οποίων συχνά συνοδεύεται από

οικονομικές ελαφρύνσεις) , έχει αναγγελθεί η παραγωγή αρκετών μελλοντικών μοντέλων, όπως το Tesla Model X (2015) και το Tesla Model (2017) και έχουν γίνει μελέτες για γεωγραφικά εκτενή δίκτυα φόρτισης.

Παρατηρούμε ότι πάρα την ταυτόχρονη εμφάνιση συμβατικών και ηλεκτρικών οχημάτων , τα πρώτα επικράτησαν (κυρίως μετά το 1920) ,εξ 'αιτίας της αφθονίας των καυσίμων ,της χαμηλότερης τιμής ,της αυτονομίας τους ,αλλά και με την βοήθεια πιέσεων από πετρελαϊκές εταιρείες (όπως χαρακτηριστικά συνέβη με το HA General Motors EV1, που είχε κατασκευάσει σε 1.117 αντίτυπα η General Motors από τον Δεκέμβριο του 1996 έως το 1999 και τελικώς κατέληξε σε μαζική ανάκληση και διάλυση στην πρέσα.^{[8][9][10]} Η ίδια η General Motors μάλιστα, έχει κατηγορηθεί ότι σκόπιμα αυτο-υπονόμευε τότε το EV1) . Γύρω στο 1960 ,όταν άρχισε να διαφαίνεται το πρόβλημα της ατμοσφαιρική ρύπανσης ,τα ηλεκτρικά οχήματα ήρθαν πάλι στο προσκήνιο ,αλλά η μεγάλη τους άνθηση (τόσο των αμιγώς ηλεκτρικών ,όσο και των υβριδικών) παρατηρήθηκε από την δεκαετία του 1990 .Σε αυτό συνεισέφερε η παγκόσμια οικονομική κρίση ,που λειτούργησε συνδυαστικά με την μόλυνση . Κυβερνήσεις και παγκόσμιοι οργανισμοί ,νομοθέτησαν υπέρ των ΗΑ όπως συνέβη με το πρόγραμμα ZEV (Zero Emission Vehicle) στην Καλιφόρνια (1990) ,με τις προεκλογικές δηλώσεις του υποψήφιου τότε προέδρου της Αμερικής Barack Obama (2008) . Αλλαγές παρατηρήθηκαν και στην Ευρώπη όταν το ευρωπαϊκό συμβούλιο έθεσε τον Μάρτιο του 2007 τους στόχους 20-20-20 (μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% κάτω από τα επίπεδα του 1990 , αντικατάσταση του 20% τουλάχιστον της καταναλισκόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και μείωση κατά 20% στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας συγκριτικά με τα προβλεπόμενα επίπεδα βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση) . Επιπρόσθετα κατά τη διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή (2009 στην Κοπεγχάγη), οι ανεπτυγμένες χώρες που παράγουν πάνω από το 80% των παγκόσμιων ρύπων υπέγραψαν τη «Συμφωνία της Κοπεγχάγης» ,η οποία ορίζει πως πρέπει να διατηρηθεί κάτω από 2ο C η υπερθέρμανση του πλανήτη ώστε να αποφευχθούν οι αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Όλα αυτά καθιστούν επιτακτική την αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων από ηλεκτρικά και υβριδικά ,κάτι που διαφαίνεται και από την προσπάθεια-στόχο που έχει τεθεί από την ΕΕ να μειωθούν έως το 2050 ,οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 85-90 % συγκριτικά με τις τιμές του 1990.

1.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει αντιληπτό από όλους και όχι μόνο την επιστημονική κοινότητα το μέγεθος του προβλήματος της μόλυνσης λόγω των αερίων του θερμοκηπίου . Όλοι προσπαθούμε να μειώσουμε το ενεργειακό μας αποτύπωμα (και κατά συνέπεια τις εκπομπές που μας αναλογούν) και ένας από τους βέλτιστους

τρόπους να επιτευχθεί αυτό είναι τα ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα .Όπως είναι αναμενόμενο αυτές οι τεχνολογίες παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα έναντι των συμβατικών τρόπων μετακίνησης η κατανόηση των οποίων θα βοηθήσει στην βελτίωση τους .

Πλεονεκτήματα των ΗΑ :

- ❖ Δεν παράγουν ρύπους εξάτμισης .
Η μόλυνση που ίσως προκαλούν , οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζονται για να τροφοδοτηθούν ,πρόβλημα που μετριαζεται με την εισαγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή . Έτσι σε βάθος χρόνου θα μπορούσε να μειωθεί η υπερθέρμανση του πλανήτη και η εξάρτηση από το πετρέλαιο .
- ❖ Είναι πιο αθόρυβα από τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης ,μειώνοντας έτσι και την ηχορύπανση .
- ❖ Έχουν σχεδόν σταθερή ροπή από την ακινησία εως την μέγιστη ταχύτητα και μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερες στροφές από τα συμβατικά οχήματα .
- ❖ Είναι πιο οικονομικά σε βάθος χρόνου καθώς δεν επηρεάζονται από την αυξανόμενη τιμή καυσίμων και έχουν μειωμένα έξοδα συντήρησης .Πιο αναλυτικά :
 - Δεν χρειάζονται τακτικές αλλαγές λαδιών .
 - Δεν χρειάζονται συστήματα εξάτμισης και καταλύτες καθώς δεν εκπέμπουν ρύπους .
 - Έχουν λιγότερα κινούμενα μηχανικά μέρη από τις μηχανές εσωτερικής καύσης ,άρα χρειάζονται λιγότερες αντικαταστάσεις εξαρτημάτων .
 - Και τέλος ,μπορούν να αυτοφορτίζονται κατά τις επιβραδύνσεις του οχήματος ,ή ακόμη και να προσδίδουν ενέργεια στο δίκτυο όταν δεν χρησιμοποιούνται βελτιώνοντας έτσι τον συντελεστή απόδοσης τους .

Μειονεκτήματα των ΗΑ :

- ❖ Έχουν υψηλό κόστος κατασκευής το οποίο μεταφέρεται στον καταναλωτή . Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος των μειωμένων πωλήσεων συγκριτικά με τα συμβατικά οχήματα .
- ❖ Οι συσσωρευτές τους χρειάζονται επαναφόρτιση ,γεγονός που μειώνει την αυτονομία του οχήματος και περιορίζει την απόσταση των μετακινήσεων . (Το πρόβλημα αυτό ωστόσο τείνει να εξαλειφθεί εξελίσσοντας την τεχνολογία των συσσωρευτών) .

- ❖ Χρειάζονται αρκετό χρόνο για να επαναφορτιστούν πλήρως (γύρω στις 6-8 ώρες) και η μπαταρία τους έχει περιορισμένη διάρκεια ζωής (3-5 έτη) .

1.1.3 ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν έχουν γίνει ακόμη το βασικό μέσο μετακίνησης εξαιτίας των μειονεκτημάτων τους . Με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογίας τους είναι σίγουρη η επικράτηση τους . Ήδη έχουν μελετηθεί διάφορα σενάρια διείσδυσης τους ώστε να μπορέσουν να γίνουν οι κατάλληλες προετοιμασίες για τις αλλαγές που θα επέλθουν .

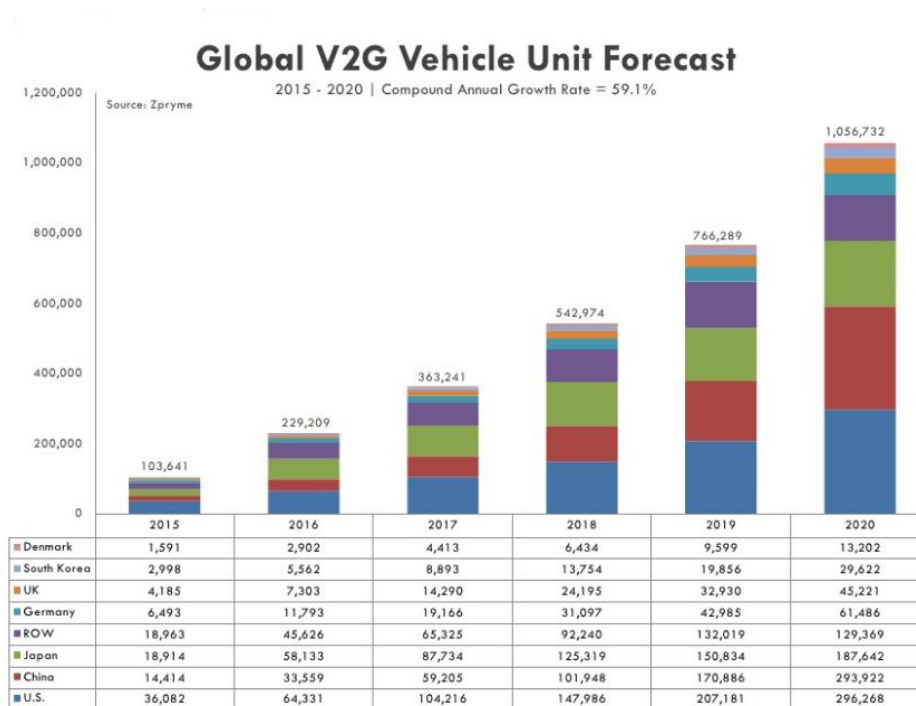
Αναμένεται βελτίωση της τεχνολογίας των υβριδικών οχημάτων γεγονός που θα αυξήσει τις πωλήσεις τους στο κοντινό μέλλον ενώ με την δημιουργία και την ανάπτυξη των κυψέλων καυσίμου (fuel cells) θα ξεπεραστεί οριστικά το πρόβλημα της περιορισμένης αποθηκευτικής ικανότητας των συσσωρευτών των οχημάτων ,τα οποία θα παράγουν μόνα τους την ενέργεια που χρειάζονται (με βάση το υδρογόνο) . Όλα αυτά θα έχουν ως συνέπεια την αύξηση στην πωλήσεις των ΗΑ όπως φαίνεται και στα ακόλουθα διαγράμματα ,που θα αγγίξουν τα 1.060.000 για το έτος 2020 (ρυθμός μέσης ετήσιας αύξησης 59%) (εικόνα 1.24), ενώ το 2035 θα αποτελούν το 63% επί των συνολικών νέων οχημάτων (εικόνα 1.26) . Στην εικόνα 1.25 , παρουσιάζεται το συνολικό παγκόσμιο πλάνο πωλήσεων ΗΑ έως το 2020 .

Global V2G Market Factsheet 2020

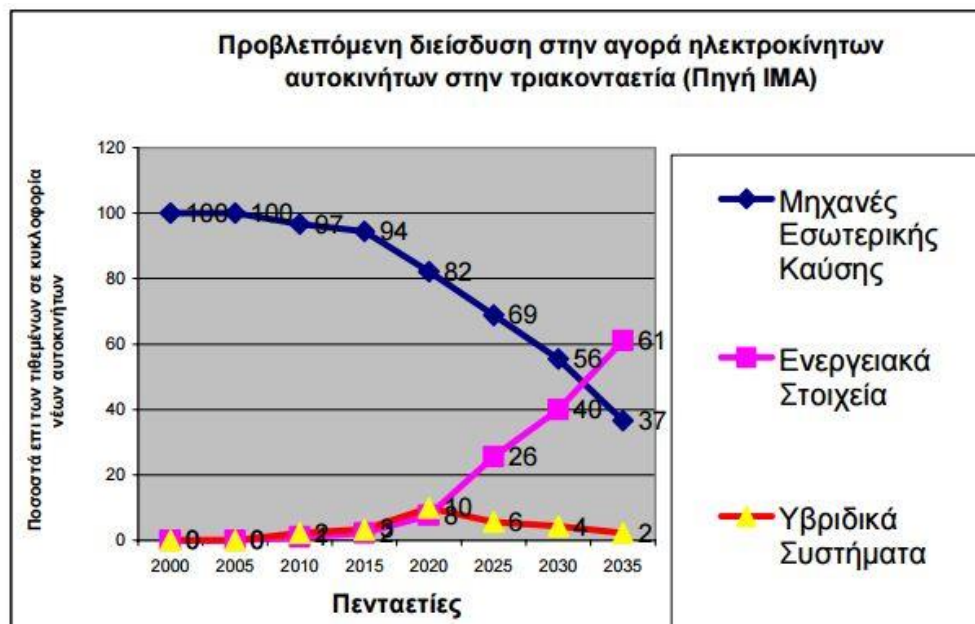
Country	Units	Market	Infrastructure	Technology	Revenue
Global	1,056	\$26.6	\$6.7	\$10.5	\$2.9
US	296	\$8.1	\$1.8	\$2.8	\$654
China	294	\$6.5	\$1.8	\$2.8	\$521
Japan	188	\$4.4	\$1.2	\$1.8	\$735
Germany	62	\$1.6	\$377	\$587	\$587
UK	45	\$1.3	\$277	\$432	\$323
South Korea	30	\$72	\$175	\$283	\$053
Denmark	13	\$038	\$081	\$126	\$093
	thousands	US billions	US billions	US billions	US billions

Source: Zpryme

Εικόνα 1.24: Προβλέψεις για τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων –με δυνατότητα τροφοδοσίας του δικτύου V2G –σε ορισμένες χώρες το έτος 2020 (πηγή : <http://www.slideshare.net/zpryme/electric-vehicle-v2g-report-2010-smart-grid-insights-zpryme-zigbee-alliance>)



Εικόνα 1.25 : Προβλέψεις για τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων –με δυνατότητα τροφοδοσίας του δικτύου V2G –σε ορισμένες χώρες τα έτη 2015-2020 (πηγή : <http://www.slideshare.net/zpryme/electric-vehicle-v2g-report-2010-smart-grid-insights-zpryme-zigbee-alliance>)



Εικόνα 1.26: Προβλέψεις για την διείσδυση των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων στην αγορά και το ποσοστό τους επί του συνόλου των οχημάτων έως το έτος 2035 (πηγή : Δ. Νέγκας ~ Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα, Υφιστάμενη Κατάσταση και Προοπτικές - 12/13 Ιαν.2006)

Όσον αφορά την Ελληνική αγορά , οι ρυθμοί διείσδυσης την ΗΑ αναμένεται να είναι μικρότεροι των αντίστοιχων διεθνών και αυτό οφείλεται κυρίως στο υπέρογκο κόστος εξαιτίας της υψηλής φορολογίας. Χαρακτηριστικά τετραθέσιο ηλεκτρικό όχημα 57 ίππων κοστίζει στην Ελλάδα γύρω στις 40000 ευρώ ,ενώ το ίδιο στην Μ . Βρετανία λίγο πάνω από 25000 ευρώ . Εκτός αυτού από τα 10000 σημεία φόρτισης που αναμένεται να δημιουργηθούν συνολικά σε πόλεις που συμμετέχουν στο πρόγραμμα Green eMotion (πρόγραμμα για δημιουργία σταθμών φόρτισης στον δρόμο ,ώστε να είναι δυνατή κατά την διάρκεια του ταξιδιού) , μόνο 20 θα δημιουργηθούν στην χώρα μας και μάλιστα στην Κοζάνη .

Λαμβάνοντας όλα αυτά υπόψη και με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος MERGE (Mobile Energy Resources in Grids of Electricity) , έχουν αναπτυχθεί τρία πιθανά σενάρια :

- i. **Ρεαλιστικό σενάριο** (34.000 EVs το 2020 και 293.000 EVs το 2030)
- ii. **Αισιόδοξο σενάριο** (70.000 EVs το 2020 και 625.000 EVs το 2030)
- iii. **Υπεραισιόδοξο σενάριο**, (142.000 EVs το 2020 και 1.219.000 EVs το 2030)

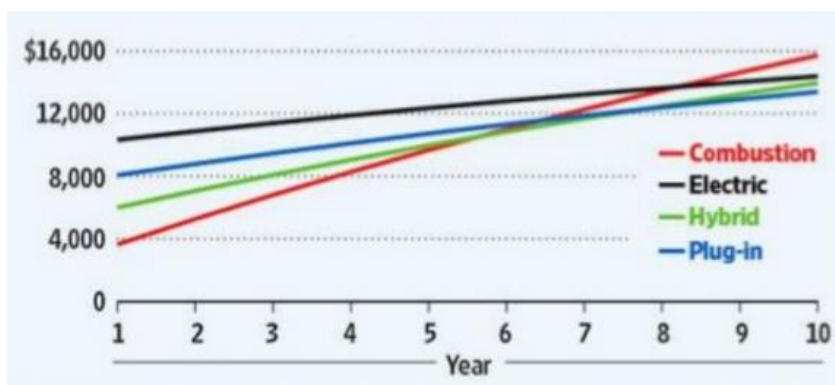
1.2 ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Πλέον υπάρχουν (ή δύναται να υπάρξουν στο άμεσο μέλλον) 6 είδη ηλεκτρικών οχημάτων ,τα οποία διαφοροποιούνται ως προς την τεχνολογία της αποθήκευσης και τροφοδοσίας ενέργειας . Αυτά είναι τα ακόλουθα :

- Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (Battery Electric Vehicles - BEV)
- Ηλεκτρικά οχήματα τροφοδοτούμενα από τον ήλιο (Solar Electric Vehicles – SEV)
- Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα ,τα οποία διαθέτουν κάποια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και μηχανή εσωτερικής καύσης (Hybrid Electric Vehicles - HEV).
- Ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου .Αυτά αναμένονται στο άμεσο μέλλον και η κύρια πηγή ενέργειας τους θα είναι το υδρογόνο (Fuel Cell Electric Vehicles-FCEV).
- Επαναφορτιζόμενα από το δίκτυο ηλεκτρικά οχήματα (Plug-In Hybrid Electric Vehicles – PHEV) και τέλος
- Ηλεκτροκίνητα οχήματα με συσσωρευτές και βοηθητική μονάδα ισχύος (Extended range electric vehicle – EREV).

Τα πιο ακριβά είναι τα ΗΟ με συσσωρευτές (αυξημένο κόστος μπαταρίας και συνδεσμολογιών)ενώ τα πιο οικονομικά τα plug-in . Οι τιμές των υπολοίπων

τεχνολογιών κυμαίνονται κάπου στο ενδιάμεσο . Στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 1.27) βλέπουμε πως διαμορφώνονται οι τιμές για συντήρηση τριών ειδών ΗΟ και ενός συμβατικού όσο η τεχνολογία τους προοδεύει (10ετης πρόβλεψη) .



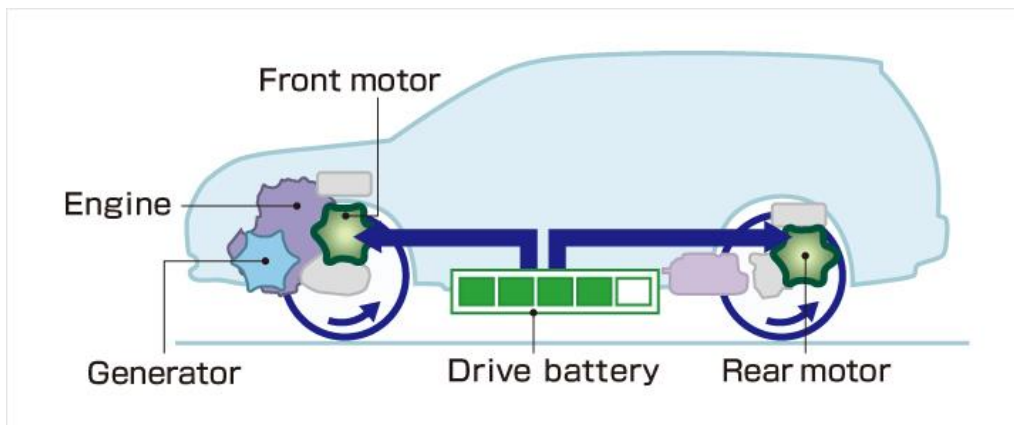
Εικόνα 1.25: 10ετης πρόβλεψη κόστος συντήρησης τεσσάρων ειδών οχημάτων (πηγή : <http://www.slideshare.net/gshobb4005/electric-cars-vs-gas>)

1.2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ -BEV

Τα ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές είναι εκείνα που χρησιμοποιούν αποκλειστικά χημική ενέργεια αποθηκευμένη σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες .Δεν διαθέτουν μηχανή εσωτερικής καύσης κατά συνέπεια δεν χρειάζονται καύσιμα ή δεξαμενή καυσίμων. Έχουν αυτονομία γύρω στα 120-200 km και το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η λίγη συντήρηση που χρειάζονται καθώς έχουν λιγότερα κινούμενα μέρη από τα συμβατικά οχήματα (εικόνες 1.28 & 1.29) .



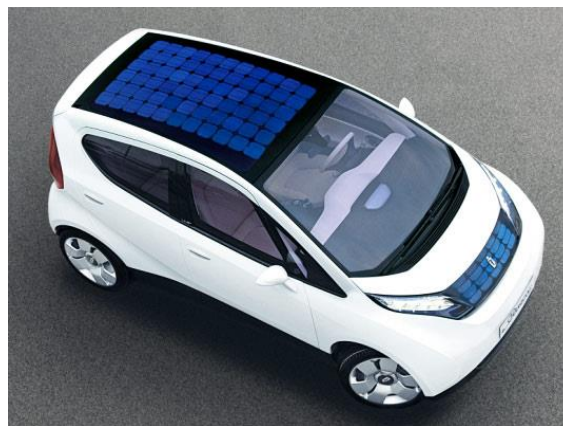
Εικόνα 1.26: Απλή απεικόνιση διάταξης ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία (BEV) (πηγή : <https://www.asdreports.com/news-1688/supercharged-france-be-key-player-electric-vehicle-battery-production-boom>)



Εικόνα 1.27: Διάταξη διάδοσης κίνησης οχήματος με μπαταρία (BEV) (πηγή : <http://www.mitsubishi-motors.com/en/spirit/technology/library/phev.html>)

1.2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΗΛΙΟ

Τα ηλεκτρικά οχήματα τροφοδοτούμενα από τον ήλιο ,χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά πάνελ ώστε να μετατρέψουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική .Αυτού του είδους τα οχήματα δεν έχουν εμπορική σημασία και υπάρχουν κυρίως για επιδείξεις (εικόνα 1.28) .



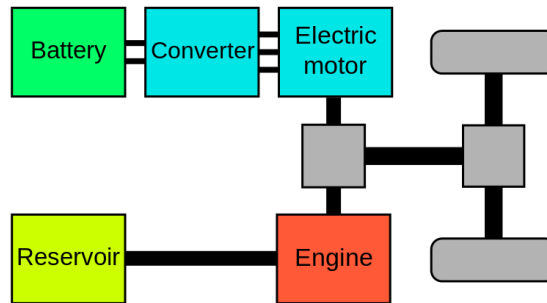
Εικόνα 1.28 :Ηλεκτροκίνητο όχημα με φωτοβολταϊκά πάνελ (πηγή : <http://www.eco-driving.be/tag/solar-electric-vehicles/>)

1.2.3 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

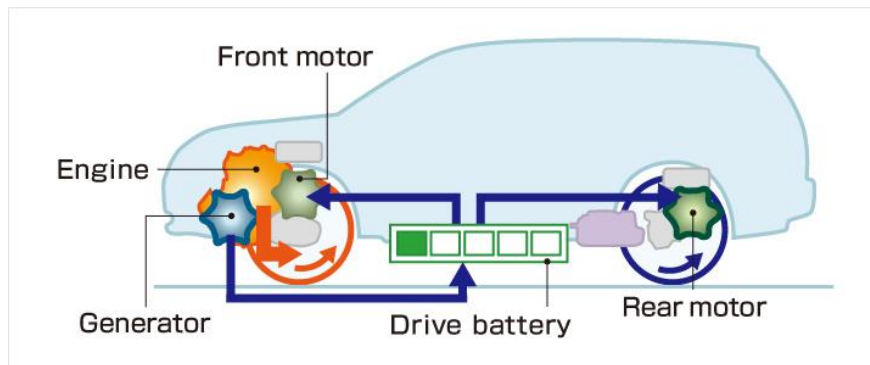
Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα συνδυάζουν την τεχνολογία των μηχανών εσωτερικής καύσης ,με σύστημα ηλεκτρικής προώθησης (δύο είδη ενέργειας),ώστε να επιτευχθεί είτε μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου ,είτε βελτίωση απόδοσης . Κατά το φρενάρισμα η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ,αντί να χαθεί ως θερμότητα ,φορτίζοντας έτσι τις μπαταρίες του (μέθοδος αναγεννητικής πέδησης).Τα οχήματα αυτά χωρίζονται στις εξής κατηγορίες ανάλογα με το σύστημα μετάδοσης :

✚ Παράλληλο υβριδικό σύστημα μετάδοσης (εικόνα 1.30) .

Η μηχανή εσωτερικής καύσης και ο ηλεκτροκινητήρας συνδέονται παράλληλα στον άξονα της κίνησης (εικόνα 1.29) .



Εικόνα 1.29: Δομή ηλεκτρικού οχήματος με παράλληλο υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle_drivetrain)

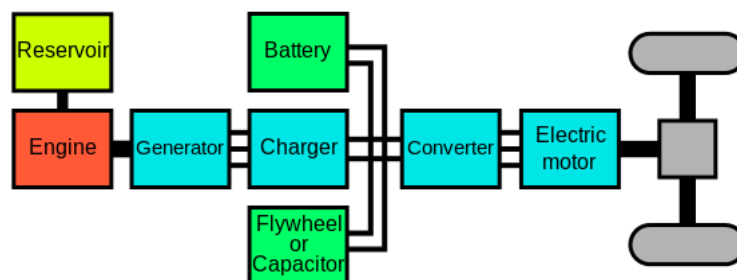


Εικόνα 1.30: Κίνηση τροχών στο παράλληλο υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης .Και οι δύο παίρνουν ενέργεια από την μπαταρία του οχήματος (πηγή : <http://www.mitsubishi-motors.com/en/spirit/technology/library/phev.html>)

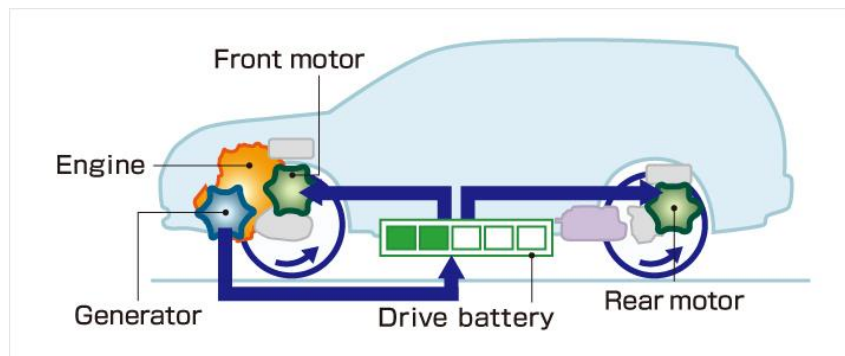
Σε αυτή την περίπτωση το όχημα κινείται από την μηχανή μόνο σε υψηλότερες ταχύτητες καθώς είναι πιο αποδοτικό

✚ Σειριακό υβριδικό σύστημα μετάδοσης (εικόνα 1.32) .

Η μηχανή εσωτερικής καύσης και ο ηλεκτροκινητήρας συνδέονται σε σειρά στον άξονα της κίνησης (εικόνα 1.31) .



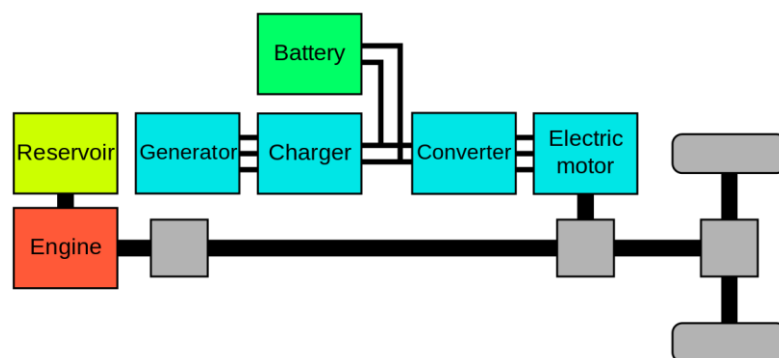
Εικόνα 1.31: Δομή ηλεκτρικού οχήματος με σειριακό υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle_drivetrain)



Εικόνα 1.32: Κίνηση τροχών στο σειριακό υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης . Σε αυτή την περίπτωση οι τροχοί τροφοδοτούνται τόσο από τους συσσωρευτές όσο και από την μηχανή ,όταν η στάθμη μπαταρίας είναι χαμηλή ,κατά την επιτάχυνση ή όταν απαιτείται μεγαλύτερη ροπή . (πηγή : <http://www.mitsubishi-motors.com/en/spirit/technology/library/phev.html>)

🚦 Power-split hybrid ή υβριδικό σύστημα μετάδοσης παράλληλα – σειράς .

Η ενέργεια που ρέει από την μηχανή στους τροχούς είναι είτε μηχανική ή ηλεκτρική (αποτελεί παραλλαγή του παράλληλου συστήματος). Άρα έτσι υπάρχει διαχωρισμός ανάμεσα στην ενέργεια που παράγει το όχημα και αυτήν που ζητάει ο οδηγός (εικόνα 1.33) .



Εικόνα 1.33: Δομή ηλεκτρικού οχήματος με υβριδικό σύστημα μετάδοσης κίνησης παράλληλα – σειράς (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle_drivetrain)

Ακόμη μπορεί να γίνει κατηγοριοποίηση των οχημάτων με βάση τον βαθμό υβριδοποίησης .

- Πλήρως υβριδικά οχήματα (Ισχυρά υβριδικά)

Μπορούν να λειτουργήσουν μόνο με μηχανή εσωτερικής καύσης ,μόνο με μπαταρίες ή με συνδυασμό και των δύο .

- Ήπια υβριδικά οχήματα (ελαφρώς)

Περιλαμβάνουν τα οχήματα που δεν μπορούν να κινηθούν αποκλειστικά και μόνο από τον ηλεκτροκινητήρα τους γιατί είναι πολύ αδύναμος .

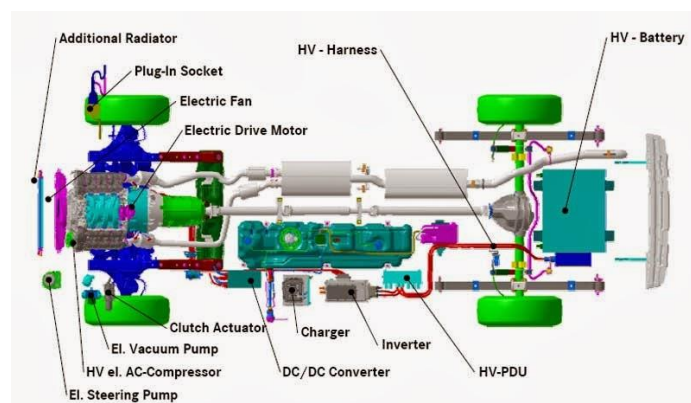
1.2.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου λειτουργούν όπως τα ΗΟ με συσσωρευτές ,μόνο που αντ' αυτών διαθέτουν δεξαμενή υδρογόνου ,το περιεχόμενο της οποίας σε συνδυασμό με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας παράγει ηλεκτρισμό . Παράγωγο της διαδικασίας αυτής είναι το νερό ,ενώ δεν χρειάζονται επαναφόρτιση αλλά επαναπλήρωση της δεξαμενής με αέριο . Το μόνο μειονέκτημα των οχημάτων αυτών (μέχρι στιγμής) είναι η ποσότητα ρύπων κατά την παραγωγή καθαρού υδρογόνου .

1.2.5 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΦΟΡΤΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Τα plug – in οχήματα (εικόνα1.34) είναι υβριδικά οχήματα με συσσωρευτές που επαναφορτίζονται κατά την σύνδεση τους σε πρίζα ή σε άλλη πηγή ηλεκτρικού ρεύματος.Αποκαλούνται και ως “οχήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο” ή GO-HEVs , είναι η εξέλιξη των σημερινών πλήρως υβριδικών οχημάτων και είναι πιο οικονομικά από αυτά. Τα υβριδικά οχήματα εκκινούν και επιταχύνουν χωρίς την χρήση του κινητήρα τους αλλά οι μπαταρίες τους φορτίζουν αποκλειστικά και μόνο από αυτόν και το σύστημα ανάκτησης ισχύος κατά το φρενάρισμα . Ενώ τα plug – in οχήματα έχουν μεγαλύτερους συσσωρευτές και μπορούν να φορτίζουν από πηγή ,γεγονός που τους δίνει μεγαλύτερη αυτονομία , όταν αποφορτιστούν λειτουργούν όπως τα απλά υβριδικά .

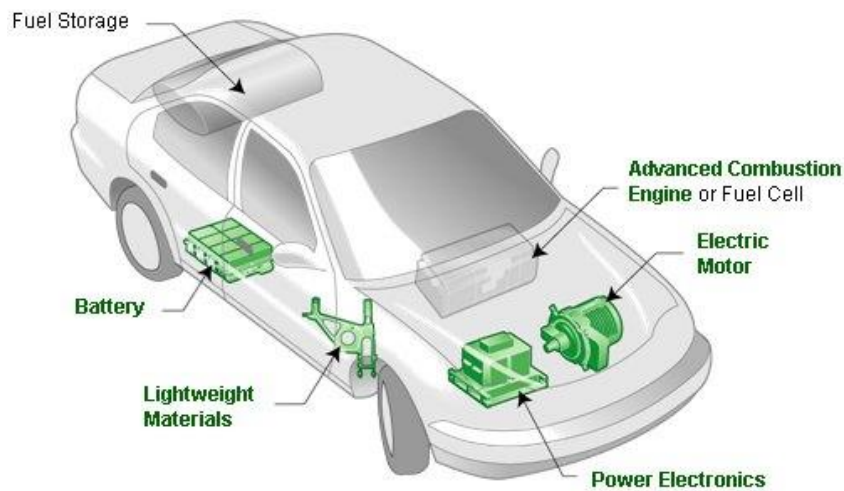
Τέλος έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν ισχύ στο δίκτυο εφόσον είναι συνδεδεμένα σε πρίζα ,σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης (Vehicle to Grid - V2G)



Εικόνα 1.34: Δομή υβριδικού ηλεκτροκίνητου οχήματος (πηγή : <http://akhilesh9601.blogspot.gr/>)

1.2.6 ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΜΕ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΜΕΝΗ ΜΟΝΑΔΑ ΙΣΧΥΟΣ

Τα ηλεκτρικά οχήματα επεκτάσιμου εύρους λειτουργίας ,έχουν συνήθως συσσωρευτές με αυτονομία 50-65 km , οι οποίοι μόλις εξαντληθούν δίνουν την θέση τους σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης που τροφοδοτεί το όχημα για 400+ km .Η ειδοποιός διαφορά με τα plug – in vehicles έγκειται στο είδος της ενέργειας κίνησης ,τα EREV's δεν χρησιμοποιούν τον βενζινοκινητήρα για την κίνηση τους ,αλλά για να παρέχει ενέργεια στις μπαταρίες και να συνεχιστεί η κίνηση του οχήματος (εικόνα 1.35) .



Εικόνα 1.35: Δομή οχήματος με συσσωρευτές και επεκταμένη μονάδα ισχύος (πηγή : <http://exchangeev.aaa.com/getting-started/electric-vehicle-basics/>)

1.3 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Από την στιγμή που δημιουργήθηκαν οι πρώτες μπαταρίες (τέλη 19^{ου} αιώνα) ,έγιναν απόπειρες δημιουργίας οχήματος που θα κινούταν αποκλειστικά και μόνο με αυτές . Πλέον οι συσσωρευτές είναι το σημαντικότερο και ακριβότερο εξάρτημα ενός ηλεκτρικού οχήματος ,εξ ‘αιτίας τους η τιμή αγοράς του είναι τόσο υψηλότερη του συμβατικού . Ήδη έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στην βελτίωση τους ,ώστε τα ηλεκτρικά οχήματα να μπορούν να είναι ανταγωνιστικά ,αλλά υπάρχουν ακόμη μεγάλα περιθώρια βελτίωσης . Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας τους και να συγκρίνουμε τα διάφορα είδη θα πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τα βασικά χαρακτηριστικά τους .

Συσσωρευτής είναι το εξάρτημα εκείνο που μετατρέπει χημική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα . Τα ηλεκτροκίνητα οχήματα έχουν συσσωρευτές υψηλής τάσης ,αποτελούμενους από κελία ,μονάδες και πακέτα . Ένα κελί (η μικρότερη

ποσότητα μπαταρίας) παίρνει τιμές 1-6 volts , μια μονάδα αποτελείται από πολλά κελία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ,ενώ ένα πακέτο από πολλές μονάδες . Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες : ισχύος και ενέργειας .Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι :

i. Στάθμη φόρτισης - State of Charge (SOC)(%)

Έκφραση της τρέχουσας χωρητικότητας του συσσωρευτή συγκριτικά με την μέγιστη .Υπολογίζεται από ολοκλήρωση ρεύματος ,ώστε να καθοριστεί η αλλαγή τιμής στον χρόνο.

ii. Βάθος αποφόρτισης - Depth of Discharge (DOD) (%)

Είναι το ποσοστό της αποφορτισμένης περιεκτικότητας της μπαταρίας συγκριτικά με την μέγιστη . Βαθιά αποφόρτιση λέγεται εκείνη με τιμή τουλάχιστον 80 % DOD .

iii. Τάση άκρων - Terminal Voltage (V)

Είναι η τάση στα άκρα της μπαταρίας όταν εφαρμοστεί φορτίο .Η τιμή της ποικίλει ανάλογα με την στάθμη φόρτισης (SOC) και το ρεύμα φόρτισης /αποφόρτισης .

iv. Τάση ανοιχτού κυκλώματος - Open-circuit voltage (V)

Είναι η τάση στα άκρα της μπαταρίας όταν δεν εφαρμοστεί φορτίο .Η τιμή της εξαρτάται από την στάθμη φόρτισης (SOC) και μάλιστα αυξάνεται με την αύξηση της .

v. Ονομαστική τάση - Nominal Voltage (V)

Η τάση που αναγράφεται στην μπαταρία .

vi. Τάση αποκοπής - Cut-off Voltage

Είναι η μικρότερη επιτρεπτή τάση . Η τιμή αυτή καθορίζει την `` άδεια `` κατάσταση μπαταρίας .

vii. Εσωτερική αντίσταση - Internal Resistance

Είναι η αντίσταση εσωτερικά της μπαταρίας (συνήθως είναι διαφορετική για φόρτιση και αποφόρτιση και εξαρτάται από την στάθμη φόρτισης) . Όσο αυξάνεται ,μειώνεται η αποτελεσματικότητα και η θερμική ευστάθεια της μπαταρίας μετατρέποντας όλο και πιο περισσότερη ενέργεια σε θερμότητα .

viii. Χωρητικότητα/Ονομαστική χωρητικότητα -Capacity /Nominal Capacity (Ah)

Είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας ,τα συνολικά Αμπερώρια (Amp-hours) διαθέσιμα όταν η διάταξη αποφορτίζεται με συγκεκριμένη τιμή ρεύματος από την μέγιστη τιμή της έως την τάση αποκοπής .Υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα αποφόρτισης με τον αντίστοιχο χρόνο .

ix. Ενέργεια/ονομαστική ενέργεια - Energy / Nominal Energy (Wh)

Είναι η `` ενεργειακή `` χωρητικότητα της μπαταρίας ,οι συνολικές Βατώρες (Watt-hours) διαθέσιμες όταν η διάταξη αποφορτίζεται με συγκεκριμένη τιμή ρεύματος από την μέγιστη τιμή της έως την τάση αποκοπής .Η ενέργεια υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την ισχύ αποφόρτισης (Watts)με τον αντίστοιχο χρόνο .

x. Κύκλος ζωής (για συγκεκριμένη DOD -Cycle Life (number for a specific DOD)

Είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης –αποφόρτισης που μπορεί να υποστεί μια μπαταρία πριν καταστεί ακατάλληλη για χρήση . Γενικά ισχύει ότι όσο υψηλότερη η τιμή του βάθους αποφόρτισης ,τόσο μικρότερος ο κύκλος ζωής .Η πραγματική διάρκεια ζωής της μπαταρίας όμως εξαρτάται από το πλήθος των κύκλων ζωής και άλλους παράγοντες όπως υγρασία και θερμοκρασία .

xi. Λόγος ενέργειας ανά μάζα (Πυκνότητα ενέργειας)- Specific Energy (Wh/kg)

Είναι η μέγιστη διαθέσιμη τιμή ονομαστικής ενέργειας ανα μονάδα μάζας και αποτελεί χαρακτηριστικό της χημείας και της διάταξης της μπαταρίας.

xii. Πυκνότητα ενέργειας - Energy Density (Wh/L)

Είναι το πηλίκο της ονομαστικής τιμής ενέργειας ανα μονάδα όγκου και αποτελεί χαρακτηριστικό της χημείας και της διάταξης της μπαταρίας .

xiii. Λόγος ισχύος ανά μάζα (Πυκνότητα μάζας)- Specific Power (W/kg)

Είναι η μέγιστη διαθέσιμη τιμή ισχύος ανα μονάδα μάζας και αποτελεί χαρακτηριστικό της χημείας και της διάταξης της μπαταρίας.

xiv. Πυκνότητα ισχύος - Power Density (W/L)

Είναι η μέγιστη διαθέσιμη τιμή ισχύος ανα μονάδα όγκου και αποτελεί χαρακτηριστικό της χημείας και της διάταξης της μπαταρίας.

xv. Μέγιστο συνεχές ρεύμα αποφόρτισης - Maximum Continuous Discharge Current

Είναι η μέγιστη τιμή ρεύματος στην οποία η μπαταρία μπορεί να αποφορτιστεί αδιάκοπα .Η τιμή καθορίζεται από τον κατασκευαστή ώστε να μην καταστραφεί η διάταξη από πολύ υψηλούς ρυθμούς αποφόρτισης .Μαζί με την

μέγιστη συνεχή ισχύ του κινητήρα καθορίζουν τα άνω όρια ταχύτητας και επιτάχυνσης του οχήματος .

xvi. Μέγιστος παλμός ρεύματος αποφόρτισης διάρκειας 30-δευτερολέπτων - Maximum 30-sec Discharge Pulse Current

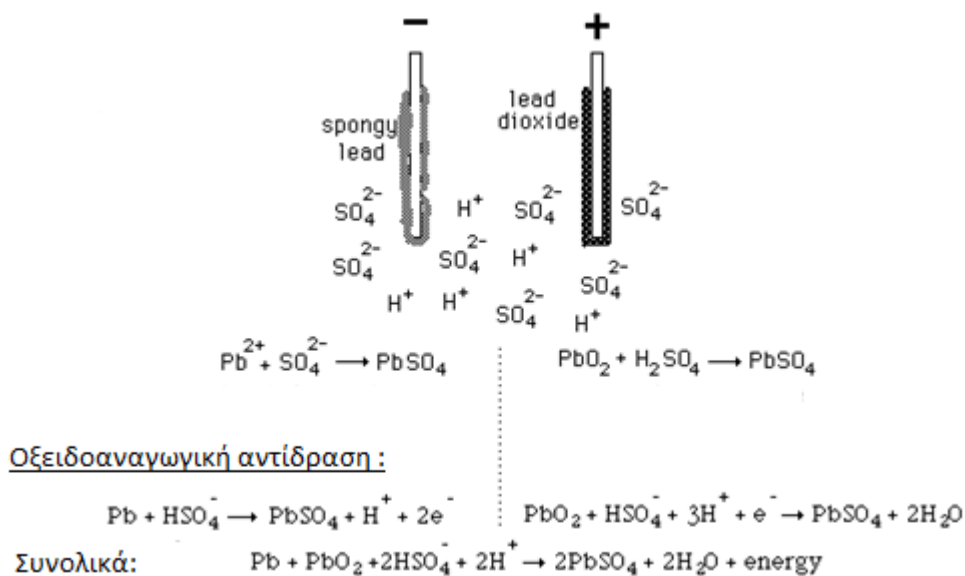
Είναι η μέγιστη τιμή ρεύματος στην οποία η μπαταρία μπορεί να αποφορτιστεί σε διάρκεια παλμών έως 30 δευτερόλεπτα . Η τιμή καθορίζεται από τον κατασκευαστή ώστε να μην καταστραφεί η διάταξη από πολύ υψηλούς ρυθμούς αποφόρτισης . Μαζί με την αιχμή της τιμής ισχύος του κινητήρα καθορίζουν την απόδοση επιτάχυνσης του οχήματος (απαιτούμενος χρόνος για επιτάχυνση 0-100 kmh) .

Τα κυριότερα είδη συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σήμερα στα ηλεκτροκίνητα οχήματα είναι :

- Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος { Lead-acid battery }
- Συσσωρευτές Νικελίου Καδμίου { Nickel Cadmium (NiCd) }
- Συσσωρευτές Νικελίου-Υδριδίου-Μετάλλου { Nickel–metal hydride battery (NiMH) }
- Συσσωρευτές λιθίου-ιόντων { Lithium-ion battery (Li-ion) }
- Νατρίου/Θείου ,ζέβρα ,υγρού μετάλλου...

1.3.1 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ-ΟΞΕΟΣ (LEAD-ACID BATTERY)

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος ανακαλύφθηκαν το 1859 από τον Γάλλο φυσικό Gaston Planté και αποτελούν τις πρώτες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες . Αποτελούνται από κάθοδο από διοξείδιο του μολύβδου ,άνοδο από σπογγώδη μεταλλικό μόλυβδο και ανάμεσα τους παρεμβάλλεται ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα θειικού οξέος (εικόνα 1.36). Η περιεκτικότητά τους σε βαρέα μέταλλα τους κάνει άκρως τοξικούς για το περιβάλλον και η ακατάλληλη απόρριψη μπορεί να είναι επικίνδυνη . Η χωρητικότητα ενός συσσωρευτή μολύβδου –οξέος δεν έχει μια μόνο τιμή αλλά ποικίλει ανάλογα με τον ρυθμό αποφόρτισης (τα δύο μεγέθη συνδέονται με τον νόμο του Peukert). Η τάση κάθε κελιού είναι 2 volts .Κατά την αποφόρτιση η άνοδος και η κάθοδος αντιδρούν με τον ηλεκτρολύτη παράγοντας θειικό μόλυβδο ,νερό και ενέργεια ,ενώ κατά την φόρτιση η διαδικασία αντιστρέφεται αφού μέσω οξειδοαναγωγικής εξωγενούς αντίδρασης ο θειικός μόλυβδος και το νερό παράγουν μόλυβδο ,οξείδιο του μολύβδου και θειικό οξύ . Παράδειγμα τέτοιας μπαταρίας φαίνεται στην εικόνα 1.37 .



Εικόνα 1.36: Η διαδικασία παραγωγής τάσης από μπαταρίες μολύβδου-οξέος .Το ηλεκτρόδιο μολύβδου (αριστερά) παρέχει θετικά φορτισμένα ιόντα και μένει με αρνητικό φορτίο ,ενώ το ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου (δεξιά) παρέχει ηλεκτρόνια και μένει θετικά φορτισμένο (πηγή : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/leadacid.html>)

Υπάρχουν διάφορα είδη μπαταριών μολύβδου-οξέος με βασικότερα τα :

- Μπαταρίες εκκίνησης .

Χρησιμοποιούνται για εκκίνηση μηχανών και δεν πρέπει να υπόκεινται σε βαθιά αποφόρτιση .Αποτελούνται από πολλές λεπτές πλάκες και είναι σχεδιασμένες για μέγιστο ρεύμα εξόδου ωστόσο μπορούν εύκολα να καταστραφούν εάν η στάθμη τους πέφτει συχνά σε χαμηλά επίπεδα .Είναι πιο μικρές και πιο ελαφριές από τις υπόλοιπες .

- Μπαταρίες βαθέως κύκλου (deep cycle batteries) .

Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται συχνή φόρτιση και αποφόρτιση τους και δεν επηρεάζονται από τις συχνές εναλλαγές της στάθμης φόρτισης (ακόμη και εάν αυτή πέφτει σε χαμηλά επίπεδα) . Έχουν παχύτερες πλάκες ,είναι πιο ογκώδεις και δίνουν ρεύμα χαμηλότερης αιχμής .

- Σφραγισμένες μπαταρίες μολύβδου οξέος (Sealed Lead Acid (SLA) batteries.)

Αυτή η κατασκευή ,με σπογγώδη μορφή , είναι σχεδιασμένη ώστε να αποτραπεί η απώλεια ηλεκτρολύτη λόγω εξάτμισης ή διαρροής ,παρατείνοντας την ζωή της μπαταρίας . Αντί καλύμματος η διάταξη ολοκληρώνεται με βαλβίδες πίεσης που ανοίγουν μόνο κάτω από ακραίες συνθήκες .

- Μπαταρίες με κελία γέλης (gel cell) .

Αποτελούν μια εναλλακτική τεχνολογία ,ώστε να επιτευχθεί ταχύτερος επανασυνδιασμός των αερίων που παράγονται κατά την φόρτιση και να αποτραπεί η διαρροή ηλεκτρολύτη .Ωστόσο θα πρέπει να φορτίζονται με βραδύτερους ρυθμούς και μέχρι συγκεκριμένη στάθμη ,αλλιώς μπορεί να καταστραφούν .

- Εμπλουτισμένες μπαταρίες μολύβδου οξέος με άνθρακα .

Η τεχνική αυτή βελτιώνει την αντοχή και την αποδοτικότητα της μπαταρίας μειώνοντας τις επικαθίσεις θειικού μολύβδου στις πλάκες της.



Χαρακτηριστικά	Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος
Ενέργεια ανά μονάδα μάζας	33-42W * h/kg
Ενέργεια ανά μονάδα όγκου (πυκνότητα)	60-110 W * h/L
Ισχύς ανά μονάδα μάζας	180 W/kg
Απόδοσης φόρτισης /εκφόρτισης	50-95%
Ποσοστό ακούσιας εκφόρτισης	3-20% /μήνα
Διάρκεια ζωής (σε κύκλους)	500-800 κύκλοι
Ονομαστική τάση κελίου	2 V
Εσωτερική θερμοκρασία φόρτισης	min -35 C εώς max 45 C

Εικόνα 1.37 :Παράδειγμα μπαταρίας μολύβδου οξέος (μπαταρία αυτοκινήτου) και συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ ΟΞΕΟΣ :

- Οικονομικοί
- Αξιόπιστοι καθώς είναι μια τεχνολογία που υπάρχει εδώ και σχεδόν 150 χρόνια .
- Ανθεκτικοί στην έντονη καταπόνηση και την υπερφόρτιση ,μπορούν να φτάσουν σε πολύ χαμηλές τιμές στάθμης φόρτισης χωρίς καταστροφή

- Μπορούν να αποδώσουν υψηλές τιμές ρεύματος εξόδου
- Έχουν απεριόριστη διάρκεια ζωής εάν αποθηκευτούν χωρίς ηλεκτρολύτη
- Διατίθενται σε πληθώρα μεγεθών και τιμές χωρητικότητας
- Έχουν τα μεγαλύτερα ποσοστά ανακύκλωσης .
- Λειτουργούν ακόμη και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (εως και κάτω των - 45 °C)

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ ΟΞΕΟΣ:

- Είναι πολύ μεγάλοι και ογκώδεις
- Μπορούν να δημιουργήσουν τοξικά υποπροϊόντα
- Κρύβουν κίνδυνο υπερθέρμανσης κατά την φόρτιση .Σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν σημειωθεί εκρήξεις σε τέτοιου τύπου μπαταρίες
- Δεν είναι κατάλληλοι για ταχεία φόρτιση
- Έχουν διάρκεια ζωής 300-500 κύκλους φόρτισης (γύρω στα 3 χρόνια)
- Έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (γύρω στο 70 %) ,η οποία σε εξαιρετικές περιπτώσεις ξεπερνάει το 90 %.
- Μπορούν να αποθηκευτούν μόνο σε κατάσταση φόρτισης εάν ο ηλεκτρολύτης βρεθεί εντός διάταξης ,ώστε να αποφευχθεί η φθορά των χημικών μερών .

Εκτός από τα μειονεκτήματα παρουσιάζουν και ορισμένες φάσεις υπολειτουργίας .

- 1 Αεριοποίηση .Κατά την ηλεκτρολυτική διάσπαση νερού παράγονται φυσαλίδες προκαλώντας απώλεια ηλεκτρολύτη ,γεγονός που μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε εκρήξεις .Εξ 'αιτίας αυτού του φαινομένου οι συσσωρευτές χρειάζονται συχνή αναπλήρωση νερού (εκτός από τις SLA)
- 2 Θεικώση .Είναι η κατάσταση κατά την οποία σχηματίζονται στην επιφάνεια των διόδων κρύσταλλοι θεικού μολύβδου ,που όμως παραμένουν ως έχει κατά την οξειδοαναγωγική αντίδραση και δεν μετατρέπονται σε άλλες μορφές απελευθερώνοντας ενέργεια .Προκαλούν αύξηση της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας και παράγονται από παρατεταμένες περιόδους παραμονής σε αποφορτισμένη ή χαμηλά φορτισμένη στάθμη καθώς και από απώλεια ηλεκτρολύτη .
- 3 Απώλεια υλικού από τις πλάκες .Είναι η κατάσταση κατά την οποία κομμάτια μολύβδου από την διάταξη αφαιρούνται δημιουργώντας τρύπες ,λόγω των υπερβολικών ρυθμών φόρτισης-αποφόρτισης (καταστροφή της διάταξης & τοξικά υποπροϊόντα .

1.3.2 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΚΑΔΜΙΟΥ – NiCd

Οι συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου (εικόνα 1.38) ανακαλύφθηκαν το 1899 ,παρά την μακροχρόνια παρουσία τους όμως παραγκωνίστηκαν την δεκαετία του 1990 από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου και εκείνες νικελίου-υδριδίου-μετάλλου . Αποτελούνται από άνοδο καδμίου , κάθοδο από υδροξείδιο του Νικελίου και ηλεκτρολύτη από αλκαλικό υδροξείδιο του Καλίου .



Χαρακτηριστικά	Συσσωρευτές Καδμίου	Νικελίου-Καδμίου
Ενέργεια ανά μονάδα μάζας	40-60 W * h /kg	
Ενέργεια ανά μονάδα όγκου (πυκνότητα)	50-150 W * h /L	
Ισχύς ανά μονάδα μάζας	150 W/kg	
Απόδοσης φόρτισης /εκφόρτισης	70-90%	
Ποσοστό ακούσιας εκφόρτισης	10% /μήνα	
Διάρκεια ζωής (σε κύκλους)	2000 κύκλοι	
Ονομαστική τάση κελίου	1,2 V	

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΚΑΔΜΙΟΥ

- Χαμηλή εσωτερική αντίσταση
- Υψηλές τιμές ρυθμών φόρτισης και αποφόρτισης
- Αντοχή σε βαθιές αποφορτίσεις
- Μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος (70 °C)
- Έχουν διάρκεια ζωής πάνω από 500 κύκλους (φόρτισης –αποφόρτισης)
- Η διαδικασία φόρτισης είναι ενδόθερμη αντίδραση ,επιτρέποντας τους να φορτίζουν ταχύτερα (χρόνος φόρτισης από 10-15 λεπτά έως 2 ώρες) .
- Μπορούν να αποθηκευτούν χωρίς βλάβη ή απώλειες ένα είναι σφραγισμένοι (είτε φορτισμένοι ,είτε αφορτιστοι)

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΚΑΔΜΙΟΥ:

- Το μεγαλύτερο τους μειονέκτημα είναι ότι επηρεάζονται από το φαινόμενο μνήμης ,κατά το οποίο ο συσσωρευτής «θυμάται » τιμές αποφόρτισης από προηγούμενους κύκλους και περιορίζει την στάθμη φόρτισης και την διάρκεια ζωής του . Οφείλεται σε αλλαγή στα κρυσταλλικά μορφώματα ,

από το επιθυμητό μικρό μέγεθος σε μεγαλύτερο , λόγω φόρτισης του πριν την πλήρη αποφόρτιση

- Είναι επιρρεπείς σε βλάβες από υπερφορτίσεις
- Έχουν μικρή τάση κελιού
- Το στοιχείο Κάδμιο είναι ένα ακριβό βαρύ μέταλλο το οποίο είναι ιδιαίτερω μολυσματικό για την γη .

1.3.3 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΥΔΡΙΔΙΟΥ-ΜΕΤΑΛΛΟΥ - (NiMH)

Οι συσσωρευτές Νικελίου-Υδριδίου-Μετάλλου (εικόνα 1.39) μοιάζουν αρκετά με την προηγούμενη κατηγορία (Νικελίου-Καδμίου) καθώς και οι δύο χρησιμοποιούν υδροξείδιο του οξειδίου του νικελίου . Ωστόσο η άνοδος τους είναι κατασκευασμένη από κάποιο κράμα από απορροφά υδρογόνο ,αντί για Κάδμιο . Έχουν διπλάσια ή τριπλάσια χωρητικότητα από τους αντιστοίχου μεγέθους συσσωρευτές νικελίου-καδμίου και η ενεργειακή τους πυκνότητα πλησιάζει εκείνη των ιόντων λιθίου .



Χαρακτηριστικά	Συσσωρευτές Νικελίου-υδριδίου-μετάλλου
Ενέργεια ανά μονάδα μάζας	
Ενέργεια ανά μονάδα όγκου (πυκνότητα)	140-300 W * h /L
Ισχύς ανά μονάδα μάζας	250-1000 W/kg
Απόδοσης φόρτισης /εκφόρτισης	66%
Ποσοστό ακούσιας εκφόρτισης	13,9 -70,6 %/ μήνα (σε θερμοκρασία δωματίου)
	36,4-97,8 % /μήνα (στους 45 C)
	1,3 -2,9 % /μήνα (στους 20 C)
Διάρκεια ζωής (σε κύκλους)	500-3000 κύκλοι
Ονομαστική τάση κελίου	1,2 V

Εικόνα 1.39 : Παράδειγμα μπαταρίας νικελίου-υδριδίου-μετάλλου και συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93metal_hydrate_battery)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΥΔΡΙΔΙΟΥ-ΜΕΤΑΛΛΟΥ :

- Έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (W/kg) ,ίση περίπου με το 60% εκείνης των συσσωρευτών ιόντων λιθίου ,ενώ είναι σχεδόν 50 % υψηλότερη από την τιμή των Νικελίου –Καδμίου.
- Η τυπική διάρκεια ζωής τους είναι γύρω στους 3000 κύκλους φορτίσεων αποφορτίσεων .
- Έχουν μικρή εσωτερική αντίσταση
- Έχουν μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος
- Αντέχουν ακραίες τιμές φορτίσεων (οι οποίες θα μπορούσαν να ολοκληρωθούν σε 1 ώρα) και αποφορτίσεων
- Είναι φιλικοί προς το περιβάλλον

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΥΔΡΙΔΙΟΥ-ΜΕΤΑΛΛΟΥ :

- Γρήγορος ρυθμός αποφόρτισης κατά την αποθήκευση (κυρίως συγκριτικά με τις μπαταρίες Νικελίου –Καδμίου)
- Μικρότερη αντοχή στην υπερφόρτιση (κυρίως συγκριτικά με τις μπαταρίες Νικελίου –Καδμίου)
- Η τάση του κελίου τους είναι πολύ μικρή ,γύρω στα 1,2 volt (σχεδόν 3 φορές κάτω από ην τάση κελιού μπαταρία ιόντων λιθίου)
- Επηρεάζονται από το φαινόμενο μνήμης ,(όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως).
- Χρειάζονται εξόδους (διόδους) εξαερισμού ασφαλείας ώστε να υπάρξει αποσυμπίεση σε περίπτωση δημιουργίας αερίου .
- Μπορούν να παράξουν μέγιστη ισχύ μόνο μέχρι να φτάσουν το 50 % του βάθους αποφόρτισης .Άρα ακόμη και εάν έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα δεν αποδίδουν απαραίτητα καλύτερα .

1.3.4 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΙΟΝΤΩΝ –ΛΙΘΙΟΥ (LITHIUM ION BATTERY)

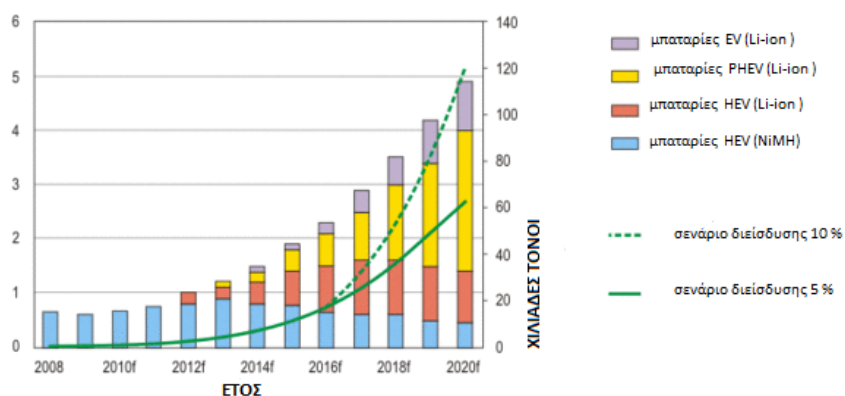
Η δημιουργία των συσσωρευτών ιόντων λιθίου (εικόνα 1.40) ξεκίνησε το 1912 από τον G.N. Lewis ,αλλά έγιναν εμπορικά διαθέσιμοι την δεκαετία του 1970 ,ενώ διαδόθηκαν ιδιαιτέρως το 1990 με την άνθηση των ασύρματων τεχνολογιών . Το λίθιο είναι το πιο ελαφρύ από όλα τα μέταλλα και παρουσιάζει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα ανα μονάδα μάζας (διπλάσια από εκείνη του νικελίου-καδμίου) ,για αυτόν τον λόγο έχει γίνει πιο συχνή η χρήση του σε ηλεκτρικά οχήματα και έχει αυξηθεί η ζήτηση του (εικόνα 1.41) .Εξ 'αιτίας της ασταθούς του

φύσης (ιδίως κατά την φόρτιση) ,οι ερευνητές χρησιμοποίησαν ιόντα λιθίου δημιουργώντας μια μη μεταλλική επαναφορτιζόμενη μπαταρία ,με μηδαμινή ανάγκη συντήρησης και με λιγότερες βλαβερές επιπτώσεις για το περιβάλλον .Αποτελείται από ανθρακική άνοδο ,κάθοδο από κάποιο οξείδιο του μετάλλου και ηλεκτρολύτη από άλας λιθίου σε οργανικό διάλυμα (πολύ εύφλεκτο) .



Χαρακτηριστικά	Συσσωρευτές ιόντων λιθίου
Ενέργεια ανά μονάδα μάζας	100-265 W * h /kg
Ενέργεια ανά μονάδα όγκου (πυκνότητα)	250-676 W * h /L
Ισχύς ανά μονάδα μάζας	250-340 W/kg
Απόδοσης φόρτισης /εκφόρτισης	80-90 %
Ποσοστό ακούσιας εκφόρτισης	8 % /μήνα (στους 21 C)
	15 % /μήνα (στους 40 C)
	31 % /μήνα (στους 60 C)
Διάρκεια ζωής (σε κύκλους)	400-1200 κύκλοι
Ονομαστική τάση κελίου	NMC ~ 3,6 /3,8 V
	LiFePO4 ~ 3,2 V

Εικόνα 1.40: Παράδειγμα μπαταρίας ιόντων λιθίου και συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery)



Εικόνα 1.41: Παγκόσμια ζήτηση λιθίου για μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων (έτη 2008-2020) (πηγή : <http://www.wealthdaily.com/articles/investing-in-lithium-ion-batteries/5266>)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ :

- Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα
- Χαμηλά κόστη συντήρησης και εύκολη αποθήκευση
- Μπορούν να παράγουν πολύ υψηλές τιμές ρεύματος εξόδου
- Έχουν χαμηλούς ρυθμούς αυτό-αποφόρτισης (την μισή τιμή των ρυθμών των συσσωρευτών με νικέλιο)

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ:

- Χρειάζονται κύκλωμα προστασίας ώστε να διατηρηθεί το ρεύμα και η τάση σε επιτρεπτά πλαίσια
- Είναι επιρρεπείς σε γήρανση όταν δεν χρησιμοποιούνται (για μείωση του φαινομένου πρέπει να αποθηκεύονται σε δροσερό μέρος με 40% φόρτιση)
- Η κατασκευή τους κοστίζει πιο πολύ (περίπου 40% περισσότερο από τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου)
- Η τεχνολογία τους είναι ακόμη ανώριμη και ενέχει πολλά περιθώρια βελτίωσης
- Είναι πολύ ευαίσθητοι σε υψηλές θερμοκρασίες ,σε μετακινήσεις κα εάν αποφορτιστούν πλήρως καταστρέφονται .

1.4 ΦΟΡΤΙΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Το βασικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η το «καύσιμο» τους ,δηλαδή η λειτουργία τους με ηλεκτρική ενέργεια ,χωρίς να απαιτείται η μετατροπή από μια μορφή ενέργειας σε άλλη .Έτσι μειώνονται οι ρύποι ,ειδικά εάν η τροφοδοτούμενη ενέργεια είναι καθαρή- έχει παραχθεί και η ίδια με μη ρυπογόνους τρόπους (ΑΠΕ) ,ενώ παράλληλα η αυτονομία του οχήματος μπορεί να διευρυνθεί χωρίς όριο ,δεδομένου ότι σχεδόν παντού πλέον υπάρχει έστω και μια οικιακού τύπου πρίζα για φόρτιση .

Τα είδη την φόρτισης διαχωρίζονται ως προς τον εξοπλισμό που απαιτούν σε δύο είδη :την επαγωγική και την φόρτιση με επαφή και σε 3 στάθμες με βάση τα επίπεδα ισχύος .Κάθε κατηγορία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της όπως αναλύεται στην συνέχεια .

1.4.1 ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕ ΕΠΑΦΗ

Η φόρτιση με επαφή αποτελεί τον πρώτο και βασικότερο τρόπο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων . Η μέθοδος αυτή απαιτεί φυσική σύνδεση μεταξύ του κινητού σώματος και του σταθμού φόρτισης ,ώστε να επιτευχθεί επαφή μέταλλο με μέταλλο .Αν και μοιάζει πολύ με την ρευματοδότηση οποιασδήποτε άλλης οικιακής συσκευής ,το βύσμα που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή έχει παραπάνω θύρες για έλεγχο και επικοινωνία ανάμεσα στον σταθμό και το όχημα ώστε να αποφευχθούν ατυχήματα .Συνήθως οι περισσότεροι φορτιστές βρίσκονται πάνω στο όχημα και έχουν την δυνατότητα να συνδεθούν ,μέσω αντάπτορα, με οποιοδήποτε ρευματοδότη (εικόνα 1.42) .



Εικόνα 1.42 : Το ηλεκτροκίνητο όχημα ford ranger ενώ φορτίζει με ένα από τα πρώτα βύσματα –το βύσμα ancon (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Ranger_EV)

1.4.2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Κατά την επαγωγική φόρτιση ,γίνεται μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από ένα σώμα σε άλλο με την βοήθεια ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που παρεμβάλλει και τα δυο .Τοποθετείται ένα επαγωγικό πηνίο στον σταθμό φόρτισης (το οποίο παράγει το εναλλασσόμενο πεδίο) ,ενώ ένα δεύτερο πηνίο ευρισκόμενο στο όχημα ,μετατρέπει την ισχύ που λαμβάνει σε ηλεκτρικό ρεύμα φόρτισης (εικόνα 1.43) . Πολύ συχνά το δεύτερο πηνίο δεν βρίσκεται στο όχημα αλλά στον σταθμό φόρτισης και τοποθετείται σε συγκεκριμένη θέση μόνο κατά την διάρκεια της διαδικασίας (π.χ. σύστημα magne charge) (εικόνα 1.44) .



Εικόνα 1.43: Επαγωγική φόρτιση του οχήματος Nissan leaf από πηνία επί του δρόμου (πηγή : <https://cleantechnica.com/2015/11/19/nissan-steps-on-inductive-wireless-charging-pedal/>)



Εικόνα 1.44: Διάταξη magne charge επαγωγικής φόρτισης (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Inductive_charging)

Τα πλεονεκτήματα της δεύτερης μεθόδου έναντι της πρώτης είναι :

- Προστασία κυκλωμάτων λόγω της μόνωσης που παρεμβάλλεται ανάμεσα τους. Δεν παρατηρείται διάβρωση και τα βραχυκυκλώματα στο ένα άκρο δεν επηρεάζουν το άλλο .
- Αντοχή .Δεν καταπονείται το βύσμα και τα καλώδια.
- Ευκολία στην χρήση και καλύτερη εμφάνιση της όλης διάταξης .

Τα μειονεκτήματα της δεύτερης μεθόδου έναντι της πρώτης είναι:

- Πιο χρονοβόρα φόρτιση και λιγότερο αποδοτική
- Πιο ακριβή μέθοδος καθώς χρειάζονται και άλλα κυκλώματα για την λειτουργία της
- Απαιτεί μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς την σωστή θέση φόρτισης .

1.4.3 ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

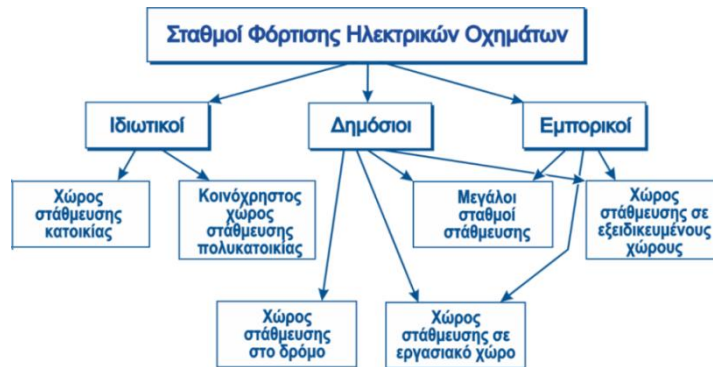
Η άφιξη των ηλεκτρικών οχημάτων στην καθημερινή ζωή του χρήστη δεν πρέπει να αλλάξει τις συνήθειες του ,ούτε να τον εκθέσει σε νέες καταστάσεις πιθανώς επικίνδυνες κατά την διάρκεια φόρτισης τους .Η χωρητικότητα της μπαταρίας των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων είναι γύρω στις 20 kWh (παρέχοντας εύρος κίνησης της τάξης των 150 χλμ.) ,ενώ τα επαναφορτιζόμενα υβριδικά οχήματα έχουν συσσωρευτές χωρητικότητας 3-5 kWh (εύρος 20-40 χλμ.).Εφόσον οι δυνητικά διανυόμενες αποστάσεις είναι σχετικά μικρές ,το όχημα πρέπει να φορτίζεται τακτικά (στην πράξη αυτό γίνεται κάθε φορά που ο οδηγός βρίσκει ευκαιρία) και η διάρκεια φόρτισης ποικίλει με βάση τα χαρακτηριστικά του δικτύου (εικόνα 1.47).Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες σταθμών φόρτισης (εικόνα 1.45) :

1.Οικιακοί σταθμοί .Συνήθως για ολονύκτια φόρτιση σε μονοφασικό δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος

2. Δημόσιοι ή ιδιωτικοί σταθμοί φόρτισης κατά την στάθμευση .Φόρτιση 1-3 ώρες σε συνήθως τριφασικό δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος.

3. Δημόσιοι σταθμοί ταχείας φόρτισης δίνουν λιγότερο από 40 kW σε 10-30 λεπτά (συνήθως συνεχούς ρεύματος)

4. Αλλαγή συσσωρευτή ή σταθμοί για φόρτιση σε λιγότερο από 15 λεπτά

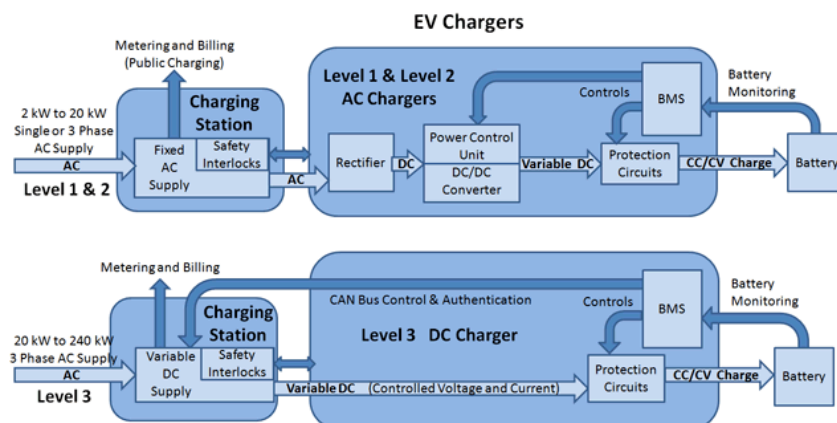


Εικόνα 1.45: Η διάκριση των ενδεχόμενων θέσεων σταθμών φόρτισης ηλεκτροκίνητων οχημάτων (πηγή : http://stefouloglou.blogspot.gr/2016/02/blog-post_4.html)

Για κανονική φόρτιση (3kW) οι κατασκευαστές έχουν εγκαταστήσει ενσωματωμένο φορτιστή στο αυτοκίνητο το οποίο συνδέεται με το δίκτυο (που παρέχει εναλλασσόμενο μονοφασικό ρεύμα 230 Volts) με καλώδιο φόρτισης.

Για ταχύτερη φόρτιση (22 kW ,43 kW ίσως και περισσότερο) οι κατασκευαστές προέβλεψαν δυο λύσεις :

- Χρήση του ενσωματωμένου φορτιστή για φόρτιση από 3 εως 43 kW στα 230 -240 Volts για μονοφασικό δίκτυο ή γύρω στα 400 για τριφασικό .
- Χρήση εξωτερικού φορτιστή που μετατρέπει το εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα και φορτίζει το όχημα σε ισχύ άνω των 50 kW .



Εικόνα 1.46: Διάγραμμα που δείχνει την δομή των διατάξεων φόρτισης επιπέδου 1, 2 & 3 . Και στα τρία το εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου μετατρέπεται σε συνεχές για να καλυφθούν οι ανάγκες του οχήματος . Όμως μόνο για το τρίτο επίπεδο απαιτείται ειδικός εξοπλισμός που δεν περιλαμβάνεται σε αυτό (πηγή : <http://www.mpoweruk.com/infrastructure.htm>)

Έτσι διαμορφώνονται 3 επίπεδα φόρτισης ανάλογα με το επίπεδο της παρεχόμενης ενέργειας και την παρεχόμενη ισχύ (εικόνα 1.46):

- **Επίπεδο 1**

Αναφέρεται σε οικιακό μονοφασικό (εναλλασσόμενου ρεύματος 16 Ampere ,τάσης 240 volts) ή τριφασικό (εναλλασσόμενου ρεύματος έως 16 Amperes και τάσης 400Volts) σταθμό φόρτισης παραγωγής 2-3kW ισχύος και συνήθως αφορά την ολονύκτια φόρτιση οχημάτων .Απαιτούνται πολλές ώρες φόρτισης (6-8) όμως δεν χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός –απλώς συνδέεται ο φορτιστής του οχήματος σε οποιονδήποτε ρευματοδότη .

- **Επίπεδο 2**

Αναφέρεται σε μονοφασικό σταθμό φόρτισης (εναλλασσόμενου ρεύματος 16 Ampere ,τάσης 240 volts)ή τριφασικό σταθμό φόρτισης (εναλλασσόμενου ρεύματος έως 32 Amperes και τάσης 400Volts)παροχής ισχύος εως 20 kW .Ο χρόνος φόρτισης μειώνεται σχεδόν στο μισό συγκριτικά με το επίπεδο 1 αλλά απαιτείται ειδικός εξοπλισμός για την επίτευξη του (με κόστος γύρω στα 750-1500 \$) .Λόγω αυτού συναντάται κυρίως σε κοινόχρηστους σταθμούς φόρτισης και σπανιότερα σε οικιακούς .

- **Επίπεδο 3**

Είναι το ταχύτερο επίπεδο φόρτισης από τα 3 .Με χρήση ειδικού φορτιστή το ρεύμα που παρέχεται στο όχημα είναι συνεχές, τάσης έως 600Volts και έντασης έως 400 Amperes και η παραγόμενη ισχύς αγγίζει τα 240 kW .Συναντάται μόνο σε κοινόχρηστος δημόσιους χώρους φόρτισης καθώς το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του κυμαίνεται στα 20000-50000 \$. Με χρήση ειδικού εξοπλισμού ,ίσως να μπορούσε να προκύψει η ισχύς του επιπέδου 3 σε φόρτιση με εναλλασσόμενο ρεύμα (παρεχόμενης ισχύος έως 40 kW) ωστόσο δεν υπάρχει ακόμη πλήρης προτυποποίηση .

Χρόνος φόρτισης για 100 km δανυόμενη απόσταση	Παροχή ρεύματος	Ισχύς	Τάση	Μέγιστο ρεύμα
6–8 ώρες	Μονοφασική	3.3 kW	230 V AC	16 A
3–4 ώρες	Μονοφασική	7.4 kW	230 V AC	32 A
2–3 ώρες	Τριφασική	10 kW	400 V AC	16 A
1–2 ώρες	Τριφασική	22 kW	400 V AC	32 A
20–30 λεπτά	Τριφασική	43 kW	400 V AC	63 A
20–30 λεπτά	Συνεχές ρεύμα	50 kW	400–500 V DC	100–125 A
10 λεπτά	Συνεχές ρεύμα	120 kW	300–500 V DC	300–350 A

Εικόνα1.47: Χρόνος φόρτισης οχημάτων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Charging_station)

1.4.4 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

Προκειμένου να είναι δυνατή η φόρτιση όλων των οχημάτων παγκοσμίως θα έπρεπε να θεσπιστούν πρότυπα για φορτιστές ,καλώδια και επαφές :

Α.Πρότυπα IEC (International Electrotechnical Commission) της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής που αποτελούνται από δυο τμήματα :

- Το πρότυπο IEC 61851 ένα διεθνές πρότυπο για το σύστημα φόρτισης με αγώγιμη επαφή ηλεκτρικών οχημάτων (“ELECTRIC VEHICLE CONDUCTIVE CHARGING SYSTEM”) το οποίο καθορίζει 4 διαφορετικούς τρόπους φόρτισης :

ΤΡΟΠΟΣ 1:Οικιακή πρίζα και εύκαμπτου καλωδίου (εικόνα 1.48) .

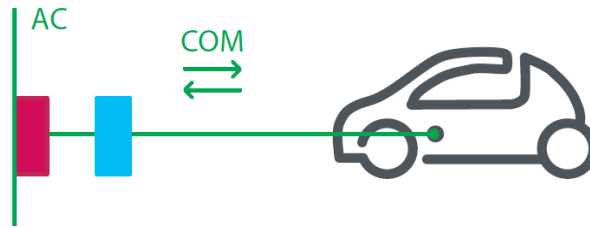
Αποτελεί τον πιο απλό τρόπο φόρτισης ,καθώς το όχημα συνδέεται στο δίκτυο μέσω της υπάρχουσας οικιακής εγκατάστασης .Η σύνδεση δεν έχει επιπλέον θύρα (pin) έλεγχου, οι μόνες απαιτήσεις της ,είναι η εγκατάσταση να πληροί τις προϋποθέσεις ασφαλείας ,να έχει γείωση και διακόπτη διακοπής/αποφυγής .



Εικόνα 1.48 :Πρώτος τρόπος φόρτισης –σε οποιαδήποτε οικιακή πρίζα (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Charging_station)

ΤΡΟΠΟΣ 2: Οικιακή πρίζα και εύκαμπτο καλώδιο με σύστημα προστασίας πάνω σε αυτό (εικόνα 1.49) .

Αποτελεί ημι-ενεργό ,άμεσο τρόπο σύνδεσης του οχήματος με το δίκτυο. Η βασική διαφορά με τον τρόπο 1 έγκειται στο γεγονός ότι το εύκαμπτο καλώδιο φόρτισης διαθέτει σύστημα προστασίας καθώς και πως υπάρχει δυνατότητα παροχής πληροφοριών της φόρτισης μέσω δυο πρόσθετων αγωγών επικοινωνίας ενσωματωμένων σε αυτό. Ενδείκνυται για οικιακή χρήση.



Εικόνα 1.49 : Δεύτερος τρόπος φόρτισης –οικιακή πρίζα και καλώδιο με σύστημα προστασίας (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Charging_station)

ΤΡΟΠΟΣ 3: Εξειδικευμένη πρίζα με κύκλωμα ελέγχου και προστασίας (εικόνα 1.50) .

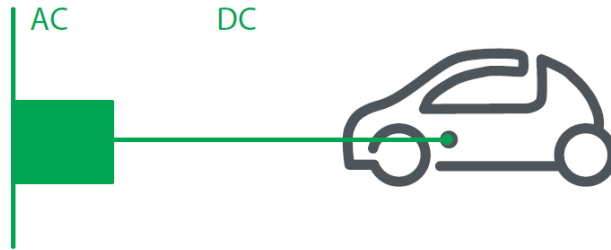
Έμμεση σύνδεση του οχήματος στο δίκτυο μέσω ανεξάρτητης γειωμένης γραμμής με εξειδικευμένη πρίζα και ενσωματωμένο στην εγκατάσταση ,κύκλωμα ελέγχου και προστασίας (σύστημα σταθμού φόρτισης) . Το εύκαμπτο καλώδιο φόρτισης είναι μόνιμα συνδεδεμένο στο σύστημα φόρτισης και καταλήγει σε ειδικών προδιαγραφών ακροδέκτες σύνδεσης (μονοφασικούς ή τριφασικούς) με το όχημα. Υπάρχει δυνατότητα παροχής πληροφοριών της φόρτισης μέσω δυο πρόσθετων αγωγών επικοινωνίας ενσωματωμένων στο καλώδιο σύνδεσης. Ενδείκνυται για οικιακή, και επαγγελματική χρήση



Εικόνα 1.50 :Τρίτος τρόπος φόρτισης - εξειδικευμένη πρίζα με κύκλωμα ελέγχου και προστασίας (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Charging_station)

ΤΡΟΠΟΣ 4:Σύνδεση συνεχούς ρεύματος για ταχεία φόρτιση (εικόνα 1.51) .

Έμμεση σύνδεση του οχήματος στο δίκτυο μέσω ανεξάρτητης γειωμένης γραμμής (όπου γίνεται εξωτερική μετατροπή του εναλλασσόμενου σε συνεχές ρεύμα μέγιστης έντασης 400 A ,600Volts)με εξειδικευμένη πρίζα και ενσωματωμένο στην εγκατάσταση ,κύκλωμα ελέγχου και προστασίας (σταθμός φόρτισης) . Το εύκαμπτο καλώδιο φόρτισης είναι μόνιμα συνδεδεμένο στο σύστημα φόρτισης και καταλήγει σε ειδικών προδιαγραφών ακροδέκτες σύνδεσης. Υπάρχει δυνατότητα παροχής πληροφοριών της φόρτισης μέσω δυο πρόσθετων αγωγών επικοινωνίας ενσωματωμένων στο καλώδιο σύνδεσης. Ενδείκνυται για επαγγελματική χρήση



Εικόνα 1.51 : Τέταρτος τρόπος φόρτισης - σύνδεση συνεχούς ρεύματος (πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Charging_station)

- Το πρότυπο IEC 62196 (ή ΕΛΟΤ EN 62196 – 01), ένα διεθνές πρότυπο που τυποποιεί όλα τα απαιτούμενα εξαρτήματα για την αγώγιμη σύνδεση των οχημάτων κατά την φόρτιση .Βασίζεται στο πρότυπο IEC 61851 και αποτελείται από 3 μέρη :
 - 1° :Γενικές απαιτήσεις (IEC-62196-1)
 - 2° :Συμβατότητα διαστάσεων και απαιτήσεις σύνδεσης για τις θύρες εναλλασσομένου ρεύματος και τα εξαρτήματα καλωδίου επαφής (IEC-62196-2)
 - 3° :Συμβατότητα διαστάσεων και απαιτήσεις σύνδεσης για τις θύρες συνεχούς ή εναλλασσομένου/συνεχούς ρεύματος καθώς και για τους συζευκτήρες οχήματος (IEC-62196-3).

Β. Πρότυπο SAE J1772 (επίσημος τίτλος "SAE Surface Vehicle Recommended Practice J1772, SAE Electric Vehicle Conductive Charge Coupler") από την κοινότητα (ηλεκτρολόγων) μηχανικών αυτοκίνησης (Society of Automotive Engineers) ,με έδρα στην Βόρεια Αμερική .

Γ. Ιαπωνικό πρότυπο ηλεκτρικών οχημάτων G105-1993 θεσπισμένο από το Ιαπωνικό Ινστιτούτο Έρευνας Αυτοκίνησης (JARI).

Παρατηρούμε ότι τα πρότυπα είναι σε γενικές γραμμές αντίστοιχα και συμβατά μεταξύ τους (δηλαδή ισχύουν οι ίδιες τυποποιήσεις για ίδια επίπεδα φόρτισης) . Οι μικρές διαφορές τους έγκεινται στα χαρακτηριστικά δικτύου κάθε γεωγραφική περιοχής .Με βάση τους τρόπους φόρτισης (οι οποίοι είναι κοινοί για όλα τα πρότυπα) και όπως καθορίζεται στο πρότυπο IEC-62196-2 οι σύνδεσμοι φόρτισης χωρίζονται σε 4 κατηγορίες :

- Τύπου 1 -μονοφασικός σύνδεσμος (όπως ο SAE J1772-2009 ή Yazaki)
- Τύπου 2 –μονοφασικός ή τριφασικός σύνδεσμος (όπως ο VDE-AR-E 2623-2-2 ή Mennekes)

- Τύπου 3- μονοφασικός ή τριφασικός σύνδεσμος με κάλυμμα προστασίας (όπως ο Scame)
- Τύπου 4 –σύνδεσμος συνεχούς ρεύματος (όπως ο JEVS G105-1993 ή ο CHAdEMO)

Διάφορα είδη των συνδέσμων αυτών φαίνονται στην εικόνα 1.52 .



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)



(ζ)



(η)



(θ)



(ι)



(κ)



(λ)

Εικόνα 1.52: Διάφορα είδη συνδέσμων .Αναλυτικά : (α) απλή οικιακή πρίζα για πρώτο επίπεδο φόρτισης – Αμερική , (β) απλή οικιακή πρίζα για πρώτο επίπεδο φόρτισης –Ηνωμένο Βασίλειο , (γ) απλή οικιακή πρίζα για πρώτο επίπεδο φόρτισης –Γερμανία , (δ) απλή οικιακή πρίζα για πρώτο επίπεδο φόρτισης – Γαλλία , (ε) βύσμα εναλλασσομένου ρεύματος τύπου 1 σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62196 , (στ) βύσμα SCAME εναλλασσομένου ρεύματος τύπου 3 σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62196-2, (ζ) βύσμα SAE J1772 εναλλασσομένου ρεύματος , (η) βύσμα J1772 ,μετατροπής από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα , (θ) βύσμα συνεχούς ρεύματος CHAdeMO, (ι) κινέζικα βύσματα συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος , (κ) βύσμα εναλλασσομένου ρεύματος Mennekes , (λ) βύσματα CHAdeMO συνεχούς ρεύματος και J1772 εναλλασσομένου ρεύματος όπως υπάρχουν στο Nissan Leaf (πηγή : <http://www.mpoweruk.com/=.htm>)

**2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ
ΟΧΗΜΑΤΩΝ-
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ
MATPOWER**

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Matpower είναι ένα πακέτο λογισμικού ανοιχτού κώδικα m-αρχείων Matlab που χρησιμοποιείται τόσο για εκπαιδευτικούς όσο και για ερευνητικούς σκοπούς ,για την επίλυση προβλημάτων AC και DC Ροής Ισχύος (Power Flow-PF) και Βέλτιστης Ροής Ισχύος (Optimal Power Flow-OPF) .Αναπτύχθηκε από τους Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez και Deqiang Gan του PSERC (Power System Engineering Research Center)στο πανεπιστήμιο Cornell υπό την διεύθυνση του Robert J. Thomas και προέκυψε από τις υπολογιστικές απαιτήσεις του προγράμματος PowerWeb (διαδικτυακή πλατφόρμα προσομοίωσης διαδικασιών ενέργειας) (www.pserc.cornell.edu/powerweb) .

Το Matpower δεν είναι μόνο ένα εργαλείο προσομοιώσεων ,αλλά μπορεί να αποτελέσει πολύτιμη βιβλιοθήκη διαδικασιών σε κώδικα ανεξάρτητων ερευνών . Σε αρχικό επίπεδο υποστηρίζει την διαμόρφωση πινάκων **Ybus** και **B** ενός συνηθισμένου δικτύου , χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταφοράς ισχύος ,των πρώτων και δεύτερων παραγώγων των εξισώσεων ροών φορτίου ,διαφόρων συντελεστών διακοπής της διανομής (PTDFs, LODFs) και άλλων χαρακτηριστικών . Σε υψηλότερο επίπεδο , το πρόγραμμα χαρακτηρίζεται από ευελιξία ,ώστε η δομή των ροών φορτίου να μπορεί να επεκταθεί και με την προσθήκη νέων μεταβλητών να μπορεί να καλύψει πληθώρα νέων προβλημάτων . Ο προεπιλεγμένος λύτης της βέλτιστης ροής φορτίου ,είναι μια μέθοδος επίλυσης μονού-διπλού εσωτερικού σημείου υψηλής απόδοσης (primal-dual interior point solver) ,με εφαρμογή σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης κυρίως . Ωστόσο είναι δυνατή η διαμόρφωση και επίλυση προβλημάτων γραμμικού (Linear Programming-LP) και τετραγωνικού (Quadratic Programming-QP) προγραμματισμού ,με τον λύτη αυτό ,καθώς περιλαμβάνει συναρτήσεις που μπορούν να επεκταθούν σε γενικότερα προβλήματα .

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 5.1 του Matpower , η οποία εγκαταστάθηκε και έτρεξε στην έκδοση R2015a του προγράμματος Matlab .

2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Το Matpower περιέχει όλα τα συνήθη μοντέλα μόνιμης κατάστασης που χρησιμοποιούνται τυπικά για ανάλυση ροής ισχύος . Πρώτα περιγράφονται τα μοντέλα εναλλασσομένου ρεύματος (AC) και μετά τα απλοποιημένα συνεχούς ρεύματος (DC) . Εσωτερικά , οι αγωγιμότητες όλων των συνιστωσών εκφράζονται

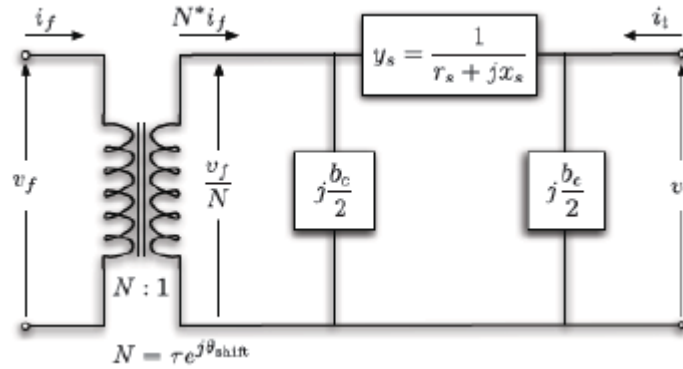
σε ανα μονάδα σύστημα και οι γωνίες των σύνθετων ποσοτήτων σε ακτίνια . Αρχικά όλες οι αποσυνδεδεμένες γεννήτριες καθώς και οι κλάδοι ,αφαιρούνται πριν την δημιουργία του μοντέλου για την επίλυση της ροής φορτίου ή την βέλτιστης ροής φορτίου . Όλοι οι ζυγοί αριθμούνται συνεχόμενα ,ξεκινώντας από το νούμερο 1 και οι γεννήτριες αναδιατάσσονται με βάση τον αριθμό ζυγού .Οι μετατροπές από και προς αυτή την εσωτερική δεικτοδότηση γίνονται με τις συναρτήσεις ext2int και int2ext αντίστοιχα . Χάρη στην δυνατότητα της γλώσσας προγραμματισμού Matlab να χειρίζεται τόσο πίνακες όσο και διανύσματα τα μοντέλα και οι εξισώσεις παρουσιάζονται και στις δύο μορφές .

2.2.1 ΜΟΡΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο Matpower είναι αρχεία Matlab, M ή MAT τύπου ,τα οποία ορίζουν και επιστρέφουν μια μόνο δομή Matlab .Τα αρχεία M έχουν δομή κειμένου και μπορούν να τροποποιηθούν με κάθε επεξεργαστή κειμένου . Τα πεδία της επιστρεφόμενης δομής είναι τα : baseMVA, bus, branch, gen και προαιρετικά gencost , με το μέγεθος baseMVA να είναι βαθμωτό και τα υπόλοιπα πίνακες ,στους οποίους κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε έναν μόνο ζυγό ,κλάδο ή γεννήτρια . Οι στήλες είναι παρόμοιες με εκείνες των IEEE , CDF και PTI μορφών . Ο αριθμός των γραμμών ανά ζυγό ,κλάδο και γεννήτρια είναι n_b , n_l και n_g αντίστοιχα. Τέλος εάν υπάρχει το πεδίο gencost ,έχει n_g γραμμές ,όταν περιέχει στοιχεία μόνο για την ενεργό ισχύ ή $2n_g$ γραμμές ,όταν συμπεριλαμβάνεται και η άεργος ισχύς .

2.2.2 ΚΛΑΔΟΙ

Όλες οι γραμμές μεταφοράς ,οι μετασχηματιστές και οι μετατροπείς γωνίας φάσης απεικονίζονται με ένα κοινό μοντέλο γραμμών ,το οποίο αποτελείται από το ισοδύναμο π κύκλωμα της γραμμής με μιγαδική αντίσταση $z_s = r_s + jx_s$ και συνολική επαγωγική (εγκάρσια)αγωγιμότητα b_c ,συνδεδεμένο σειριακά με έναν ιδανικό μετασχηματιστή γωνίας φάσης . Ο μετασχηματιστής ,του οποίου η αναλογία ρύθμισης έχει μέτρο τ και γωνία μετατόπισης θ_{shift} βρίσκεται στο αριστερό άκρο του κλάδου όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα (εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1 : Κοινό μοντέλο,για την απεικόνιση γραμμών μεταφοράς ,μετασχηματιστών και μετατροπών γωνίας φάσης

Οι παράμετροι $r_s, x_s, b_c, \theta_{shift}$ ορίζονται απευθείας στις λίστες , BR_R(3), BR_X (4), BR_B (5), TAP (9) and SHIFT (10) ,των αντίστοιχων γραμμών του πίνακα κλάδων .

Οι διανυσματικές ροές ρεύματος i_f και i_t στα άκρα αναχώρησης και άφιξης του κλάδου ,εκφράζονται με την χρήση μιας 2x2 μήτρας αγωγιμοτήτων , της μήτρας Y_{br} και των αντίστοιχων τάσεων τερματισμού v_f και v_t .

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = Y_{br} \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Με την εν σειρά αγωγιμότητα στο ισοδύναμο κύκλωμα π να γράφεται $y_s = \frac{1}{z_s}$ η μήτρα αγωγιμοτήτων του κλάδου (των γραμμών) μπορεί να γραφεί ως εξής :

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} (y_s + j \frac{bc}{2}) \cdot \frac{1}{\tau^2} & -y_s \frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ -y_s \frac{1}{\tau e^{j\theta_{shift}}} & y_s + j \frac{bc}{2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Εάν τα τέσσερα στοιχεία του άνωθεν πίνακα για τον κλάδο i συμβολιστούν ως εξής :

$$Y_{br}^i = \begin{bmatrix} y_{ff}^i & y_{ft}^i \\ y_{tf}^i & y_{tt}^i \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

τότε δημιουργούνται 4 $n_l \times 1$ διανύσματα ,τα $y_{ff}, y_{ft}, y_{tf}, y_{tt}$,όπου το i -οστο στοιχείο κάθε ενός προκύπτει από αντίστοιχο στοιχείο της μήτρας Y_{br}^i .Επιπρόσθετα οι αραιοί πίνακες C_f και C_t που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των πινάκων αγωγιμότητας του συστήματος ορίζονται ως ακολούθως . Το $(i, j)^o$ στοιχείο του C_f και το $(i, k)^o$ στοιχείο του C_t ισούνται με 1 για κάθε κλάδο i , ο οποίος συνδέει τους ζυγούς j και k ,ενώ όλα τα υπόλοιπα στοιχεία είναι μηδενικά .

2.2.3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι γεννήτριες μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν σύνθετες εγχύσεις ισχύος σε συγκεκριμένο ζυγό . Για την i -οστή γεννήτρια ,η ροή είναι :

$$s_g^i = p_g^i + jq_g^i \quad (2.4)$$

όπου $S_g = P_g + jQ_g$ είναι το διάνυσμα, μεγέθους $n_g \times 1$, αυτών των εγχύσεων των γεννητριών . Τα ισοδύναμα των p_g^i σε MW και και q_g^i σε MVA_r (πριν την μετατροπή σε ανά μονάδα σύστημα) ορίζονται στις στήλες PG (2) και QG (3) αντίστοιχα στην γραμμή i του πίνακα gen . Έτσι ένας αραιός πίνακας C_g , $n_b \times n_g$, μπορεί να οριστεί ,ώστε το (i,j) ο στοιχείο του να είναι 1 ένα η γεννήτρια j βρίσκεται στο ζυγό i και 0 αντίθετα . Το διάνυσμα $n_b \times 1$ όλων των ροών ισχύος από γεννήτριες σε ζυγούς ,μπορεί να εκφραστεί ως :

$$S_{g,bus} = C_g \cdot S_g \quad (2.5)$$

2.2.4 ΦΟΡΤΙΑ

Τα φορτία σταθερής ισχύος μοντελοποιούνται σαν καθορισμένη ποσότητα ενεργού και άεργου ισχύος καταναλισκόμενης σε έναν ζυγό .Για τον i -οστο ζυγό το φορτίο είναι :

$$s_d^i = p_d^i + jq_d^i \quad (2.6)$$

όπου $S_d = P_d + jQ_d$ υποδηλώνει το $n_b \times 1$ διάνυσμα του μιγαδικού φορτίου σε όλους τους ζυγούς . Τα ισοδύναμα των p_d^i σε MW και και q_d^i σε MVA_r (πριν την μετατροπή σε ανά μονάδα σύστημα) ορίζονται στις στήλες PD (3) και QD (4) αντίστοιχα στην γραμμή i του πίνακα matrix . Σταθερή αντίσταση και φορτία σταθερού ρεύματος δεν δηλώνονται άμεσα ,άλλα τα τμήματα σταθερής αντίστασης μοντελοποιούνται σαν εγκάρσιο στοιχείο όπως περιγράφεται ακολούθως . Τα καταναμεμένα φορτία μοντελοποιούνται σαν αρνητικές γεννήτριες και εμφανίζουν αρνητικές τιμές μιγαδικής ισχύος (S_g).

2.2.5 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ένα εγκάρσια συνδεδεμένο στοιχείο (όπως ένας πυκνωτής ή ένα πηνίο) ,μοντελοποιούνται σαν σταθερά γειωμένη αντίσταση ζυγού . Η αγωγιμότητα ενός τέτοιου στοιχείου σε i -οστο ζυγό δίνεται ως :

$$y_{sh}^i = g_{sh}^i + jb_{sh}^i \quad (2.7)$$

Όπου η ποσότητα $Y_{sh} = G_{sh} + jB_{sh}$ δηλώνει το $(n_b \times 1)$ διάνυσμα της εγκάρσιας αγωγιμότητας σε όλους τους ζυγούς . Οι παράμετροι g_{sh}^i και b_{sh}^i ορίζονται στις στήλες GS (5) και BS (6) ,αντίστοιχα ,της i -οστης γραμμής του πίνακα bus ,σαν ισοδύναμη ενεργή ισχύς σε MW (καταναλισκόμενη) και άεργη σε MVar (εγχεόμενη) σε ονομαστικό μέτρο τάσης 1 ανα μονάδα και μηδενική γωνία φάσης .

2.2.6 ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Για ένα δίκτυο με n_b ζυγούς όλα τα στοιχεία σταθερής σύνθετης αντίστασης του μοντέλου ενσωματώνονται σε μια, μήτρα αγωγιμοτήτων ζυγού , Y_{bus} διαστάσεων $n_b \times n_b$ που συνδέει τις μιγαδικές εγχύσεις ρεύματος κάθε ζυγού I_{bus} με τις αντίστοιχες κομβικές τάσεις V ,ως εξής :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V \quad (2.8)$$

Με το ίδιο σκεπτικό για δίκτυο με n_l κλάδους οι μήτρες αγωγιμοτήτων Y_f και Y_t ,του $n_l \times n_b$ συστήματος ,συσχετίζουν τις τάσεις ζυγών με τους διανυσματικούς πίνακες I_f και I_t (διάστασης $n_l \times 1$)των ρευμάτων αναχώρησης και άφιξης των κλάδων αντίστοιχα.

$$I_f = Y_f \cdot V \quad (2.9)$$

$$I_t = Y_t \cdot V \quad (2.10)$$

Εάν το σύμβολο $[\cdot]$ χρησιμοποιείται για να δείξει την διαδικασία με την οποία από ένα $n \times 1$ διάνυσμα δημιουργείται ο αντίστοιχος $n \times n$ διαγώνιος πίνακας (με τα στοιχεία του διανύσματος να βρίσκονται στην διαγώνιο) ,τότε οι μήτρες αγωγιμότητας σχηματίζονται ως ακολούθως :

$$Y_f = [Y_{ff}] \cdot C_f + [Y_{ft}] \cdot C_t \quad (2.11)$$

$$Y_t = [Y_{tf}] \cdot C_f + [Y_{tt}] \cdot C_t \quad (2.12)$$

$$Y_{bus} = C_f^T \cdot Y_f + C_t^T \cdot Y_t + [Y_{sh}] \quad (2.13)$$

Οι ροές ρεύματος (που αναλύθηκαν πριν) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των ροών μιγαδικής ισχύος συναρτήσει των σύνθετων τάσεων των ζυγών .

$$S_{bus}(V) = [V] \cdot I_{bus}^* = [V] Y_{bus}^* \cdot V^* \quad (2.14)$$

$$S_f(V) = [C_f V] I_f^* = [C_f V] Y_f^* \cdot V^* \quad (2.15)$$

$$S_t(V) = [C_t V] I_t^* = [C_t V] Y_t^* \cdot V^* \quad (2.16)$$

Οι (κομβικές) εγχύσεις μεταξύ ζυγών ,αντιστοιχίζονται έτσι με τις ροές από τα φορτία και τις γεννήτριες ,ώστε να σχηματιστούν οι AC εξισώσεις του ενεργειακού ισοζυγίου ,εκφραζόμενες σαν συνάρτηση των σύνθετων τάσεων ζυγών και των εγχύσεων γεννητριών σε μορφή σύνθετων πινάκων ως εξής :

$$g_s (V, S_g) = S_{bus}(V) + S_d - C_g \cdot S_g \quad (2.17)$$

2.2.7 DC MONTELO

Ο σχηματισμός του μοντέλου συνεχούς ρεύματος (DC) ,βασίζεται στις ίδιες παραμέτρους με πριν ,άλλα με την προσθήκη τριών απλουστευτικών υποθέσεων .

- Υποθέτουμε ότι οι γραμμές δεν έχουν απώλειες .Συγκεκριμένα οι αντιστάσεις r_s και οι χωρητικότητες b_c των κλάδων θεωρούνται αμελητέες .

$$y_s \approx \frac{1}{r_s + jx_s} \approx \frac{1}{jx_s} , \quad b_c \approx 0 \quad (2.18)$$

- Τα μέτρα όλων των τάσεων ζυγών είναι κοντά στην τιμή 1 α.μ (ανα μονάδα)

$$u_i \approx e^{j\theta_i} \quad (2.19)$$
- Οι γωνίες τάσης ανάμεσα στους κλάδους είναι αρκετά μικρές ώστε :

$$\sin(\theta_f - \theta_t - \theta_{shift}) \approx \theta_f - \theta_t - \theta_{shift} \quad (2.20)$$

Χρησιμοποιώντας το πρώτο σετ υποθέσεων που αφορούν τις παραμέτρους γραμμών (2.18) ,η μήτρα αγωγιμοτήτων γραμμών (κλάδων) (2.2) αντιστοιχεί σε :

$$Y_{br} \approx \frac{1}{jx_s} \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau^2} & -\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ -\frac{1}{\tau e^{j\theta_{shift}}} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Συνδυάζοντας την άνωθεν μήτρα και την δεύτερη υπόθεση (2.19) με την εξίσωση (2.1) ,προκύπτει η ακόλουθη προσέγγιση για το ρεύμα αναχώρησης i_f

$$i_f \approx \frac{1}{jx_s} \left(\frac{1}{\tau^2} e^{j\theta_f} - \frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} e^{j\theta_t} \right) = \frac{1}{jx_s \cdot \tau} \left(\frac{1}{\tau} e^{j\theta_f} - e^{j(\theta_t + \theta_{shift})} \right) \quad (2.22)$$

Η κατά προσέγγιση ροή ενεργού ισχύος προκύπτει έτσι με χρήση των εξισώσεων (2.19) (2.22) και (2.20) (κρατώντας το πραγματικό μέρος) :

$$\begin{aligned} p_f &= \Re \{s_f\} \\ &= \Re \{u_f \cdot i_f^*\} \end{aligned}$$

$$\approx \frac{1}{x_s \cdot \tau} \theta_f - \theta_t - \theta_{shift} \quad (2.23)$$

Όπως ήταν αναμενόμενο ,δεδομένης της υπόθεσης χωρίς απώλειες και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως άνωθεν για την ροή ισχύος στο άκρο άφιξης ,συμπεραίνουμε ότι $\mathbf{p}_t = -\mathbf{p}_f$

Η σχέση ανάμεσα στην ροή ενεργού ισχύος και της γωνίας τάσης για ένα μεμονωμένο κλάδο i συνοψίζεται ως :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_f \\ \mathbf{P}_t \end{bmatrix} = \mathbf{B}_{br}^i \begin{bmatrix} \theta_f \\ \theta_t \end{bmatrix} + \mathbf{P}_{shift}^i \quad (2.24)$$

Όπου :

$$\mathbf{B}_{br}^i = b_i \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{shift}^i = \theta_{shift}^i b_i \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$b_i = \frac{1}{x_s^i \tau^i}$$

Για ένα εγκάρσιο στοιχείο στο ζυγό i η ποσότητα της μιγαδικής ισχύος που καταναλώνεται είναι :

$$\begin{aligned} s_{sh}^i &= \mathbf{u}_i (\mathbf{y}_{sh}^i \cdot \mathbf{u}_i)^* \\ &\approx e^{j\theta_i} (\mathbf{g}_{sh}^i - j\mathbf{b}_{sh}^i) e^{-j\theta_i} \\ &= \mathbf{g}_{sh}^i - j\mathbf{b}_{sh}^i \end{aligned} \quad (2.25)$$

Έτσι το διάνυσμα της καταναλισκόμενης ενεργού ισχύος στα εγκάρσια στοιχεία όλων των ζυγών μπορεί να προσεγγιστεί:

$$\mathbf{P}_{sh} \approx \mathbf{G}_{sh} \quad (2.26)$$

Στο DC μοντέλο οι γραμμικές εξισώσεις του συστήματος συσχετίζουν την ενεργό ισχύ με τις γωνίες τάσης ζυγού εν αντιθέσει με τη συσχέτιση του μιγαδικού ρεύματος με την μιγαδική τάση ζυγού στο μοντέλο AC.

Εάν σχηματίσουμε την \mathbf{B}_{ff} μήτρα διαστάσεων $n_b \times 1$ όμοια με την \mathbf{Y}_{ff} όπου το i -οστό στοιχείο της είναι b_i και εάν σχηματίσουμε το διάνυσμα $\mathbf{P}_{f,shift}$ διάστασης $n_b \times 1$ του οποίου το i -οστό στοιχείο της ισούται με $-\theta_{shift}^i b_i$ τότε οι εγχύσεις ενεργού ισχύος στους κόμβους μπορούν να εκφραστούν σαν μια γραμμική συνάρτηση του Θ , του $n_b \times 1$ διανύσματος των γωνιών τάσης των ζυγών :

$$P_{bus}(\theta) = B_{bus}(\theta) + P_{bus,shift} \quad (2.27)$$

Όπου

$$P_{bus,shift} = (C_f - C_t)^T \cdot P_{f,shift} \quad (2.28)$$

Παρομοίως οι ροές στους κλάδους στα άκρα αναχώρησης είναι γραμμικές εξισώσεις των γωνιών τάσεων των ζυγών :

$$P_f(\theta) = B_f(\theta) + P_{f,shift} \quad (2.29)$$

Και λόγω της υπόθεσης ότι δεν υπάρχουν απώλειες ισχύει ότι : $P_t = -P_f$.Η κατασκευή του συστήματος για μήτρα B γίνεται αντίστοιχα με εκείνη για μήτρα Y (για το μοντέλο AC) :

$$B_f = [B_{ff}] \cdot (C_f - C_t) \quad (2.30)$$

$$B_{bus} = (C_f - C_t)^T B_f \quad (2.31)$$

Αντίστοιχα το ισοζύγιο ενέργειας για το DC μοντέλο ,έαν γραφεί σε μητρική μορφή ,γίνεται:

$$g_P(\theta, P_g) = B_{bus}\theta + P_{bus,shift} + P_d + G_{sh} - C_g \cdot S_g = 0 \quad (2.32)$$

2.3 ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

Η συνήθης ροή ισχύος (καθώς και το πρόβλημα ροής φορτίου) περιλαμβάνει λύση για το σύνολο τάσεων και ροών ενός δικτύου που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο πλάνο φορτίων και γεννητριών . Το πρόγραμμα Matpower παρέχει λύτες τόσο για τα AC ,όσο και για τα DC προβλήματα ροής , με κοινό γνώρισμα την επίλυση εξισώσεων της μορφής $g(x) = 0$,οι οποίοι κατασκευάζονται εκφράζοντας ένα υποσύνολο των εξισώσεων αντιστάθμισης ισχύος συναρτήσεως άγνωστων ποσοτήτων τάσης .Όλοι οι λύτες ,με εξαίρεση την μέθοδο Gauss-Seidel ,συμπεριφέρονται πολύ καλά και σε συστήματα μεγάλης κλίμακας ,ωστόσο κανείς δεν έχει πρόβλεψη για αυτόματες ενημερώσεις ώστε να ικανοποιηθούν οι περιορισμοί της βέλτιστης ροής ισχύος .

2.3.1 AC ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

Κατά σύμβαση στο πρόγραμμα Matpower ,ένας ζυγός επιλέγεται σαν ζυγός αναφοράς ,ώστε με βάση αυτόν να ορίζονται οι υπόλοιπες γωνίες τάσεων και οι

διαφορές ενεργού ισχύος (ανάμεσα σε ζυγούς). Αν και η γωνία τάσης στον ζυγό αναφοράς θεωρείται γνωστή, η τιμή της παραγωγής ενεργού ισχύος αγνοείται ώστε να μην γίνεται υπερσυγκεκριμενοποίηση του προβλήματος. Οι εναπομείναντες ζυγοί που περιέχουν γεννήτριες χαρακτηρίζονται σαν PV (καθώς έχουν γνώστες τιμές μέτρου τάσης και έγχυσης ενεργού ισχύος γεννητριών, που προσδιορίζονται στις στήλες VG (6) και PG (3) του πίνακα gen αντίστοιχα). Εφόσον τα μεγέθη της ισχύς φορτίου Pd και Qd θεωρηθούν γνωστά, όλοι οι ζυγοί χωρίς γεννήτριες, ονομάζονται τύπου PQ με δεδομένες τιμές ροής ενεργού και άεργου ισχύος προσδιοριζόμενες στις στήλες PD (3) και QD (4) του πίνακα bus. Οι δείκτες των ζυγών αναφοράς, PV και PQ συμβολίζονται με J_{ref}, J_{PV}, J_{PQ} αντίστοιχα και ταξινόμηση τους με βάση το είδος τους υποδεικνύεται στην στήλη BUS_TYPE (2) του πίνακα matrix (στην οποία δηλώνονται και οι απομακρυσμένοι ζυγοί). Στον κλασικό σχηματισμό του AC προβλήματος ροής ισχύος η εξίσωση ισοζυγίου (2.17) χωρίζεται στο πραγματικό και φανταστικό της μέρος και εκφράζεται συναρτήσει των μέτρων V_m και γωνιών τάσης θ καθώς και των ροών ενεργού P_g και άεργου Q_g ισχύος γεννητριών (οι αντίστοιχες ροές που προκύπτουν από φορτία θεωρούνται σταθερές). Έτσι :

$$g_P(\theta, V_m, P_g) = P_{bus}(\theta, V_m) + P_d - C_g P_g = 0 \quad (2.33)$$

$$g_Q(\theta, V_m, Q_g) = Q_{bus}(\theta, V_m) + Q_d - C_g Q_g = 0 \quad (2.34)$$

Τότε στο πρόβλημα ροής ισχύος εναλλασσομένου ρεύματος (AC) η συνάρτηση $g(x)$ σχηματίζεται παίρνοντας το αριστερό τμήμα της εξίσωσης (2.33), για όλους τους ζυγούς πλην του ζυγού αναφοράς και την εξίσωση (2.34) για όλους του PQ ζυγούς και αντικαθιστώντας τα γνωστά μεγέθη :

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_P^{(i)}(\theta, V_m, P_g) \\ g_Q^{(j)}(\theta, V_m, Q_g) \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \forall i \in J_{PV} \cup J_{PQ} \\ \forall j \in J_{PQ} \end{array} \quad (2.35)$$

Το διάνυσμα x αποτελείται από τις εναπομείναντες άγνωστες τιμές τάσεων, δηλαδή τις γωνίες της τάσης για όλους τους ζυγούς, πλην του ζυγού αναφοράς, και τα μέτρα τάσης των ζυγών PQ.

$$x = \begin{bmatrix} \theta_{(i)} \\ u_m^{(j)} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \forall i \notin J_{ref} \\ \forall j \in J_{PQ} \end{array} \quad (2.36)$$

Έτσι δημιουργείται ένα μη γραμμικό σύστημα $n_{pu} + 2n_{pq}$ εξισώσεων και αγνώστων (όπου n_{pu} και n_{pq} είναι ο αριθμός των PV και PQ ζυγών αντίστοιχα). Αφού λύσουμε το σύστημα, ως προς τον άγνωστο x , με βάση την εξίσωση ροής ενεργού ισχύος που δεν είχε χρησιμοποιηθεί, υπολογίζουμε την ροή ενεργού ισχύος γεννητριών στον ζυγό αναφοράς. Αντιστοίχως με τις $n_{pu} + 1$ εναπομείναντες εξισώσεις ισοζυγίου άεργου ισχύος υπολογίζουμε τις ροές άεργου ισχύος γεννητριών.

Το Matpower περιλαμβάνει 4 διαφορετικούς αλγορίθμους για την επίλυση του AC προβλήματος ροής ισχύος. Ο προεπιλεγμένος λύτης βασίζεται στην μέθοδο σύγκλισης Newton, με δεδομένα σε πολική μορφή και χρήση πλήρους Ιακωβιανής ορίζουσας σε κάθε επανάληψη. Σε κάθε βήμα υπολογίζεται το σφάλμα της συνάρτησης $g(x)$, σχηματίζοντας (κάθε φορά) την Ιακωβιανή ορίζουσα, που βασίζεται σε αυτές τις αναντιστοιχίες ώστε να αλλάζει το διάνυσμα x και να γίνεται επίλυση με βάση τις αναθεωρημένες τιμές.

Οι δυο επόμενοι λύτες, που βασίζονται σε παραλλαγές της ταχεία αποζευγμένης μεθόδου, είναι οι μέθοδοι XB και BX. Με χρήση τους μειώνονται οι υπολογισμοί ανά επανάληψη, καθώς οι τιμές μέτρου τάσης και γωνίας ανανεώνονται ξεχωριστά μέσα από τον συνεχή υπολογισμό Ιακωβιανών πινάκων, που ορίζονται μόνο στην αρχή της διαδικασίας επίλυσης. Ωστόσο η εξοικονόμηση χρόνου, έχει σαν αντίκτυπο την μείωση της ακρίβειας προσέγγισης.

Από επιλογή, οι μέθοδοι επίλυσης του AC προβλήματος ροής ισχύος αγνοούν τυχόν περιορισμούς στα όρια γεννητριών, ροής ζυγού, φορτίων κτλ. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα (με την εντολή `pf.enforce_q_lims`) να γίνουν σεβαστά τα όρια ροής άεργου ισχύος (επηρεάζοντας όμως την ακρίβεια των τιμών τάσης). Αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας την τιμή ροής άεργου ισχύος του προβληματικού στοιχείου στα όρια, κάνοντας τον αντίστοιχο ζυγό PQ και λύνοντας ξανά το πρόβλημα. Η διόρθωση γίνεται μέχρι να μην υπάρχουν παραβιάσεις ορίων και επηρεάζει μόνο τις παραμέτρους QMAX και QMIN (από τις στήλες 4 και 5 του πίνακα gen).

2.4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

Το Matpower περιλαμβάνει τμήματα κώδικα, ώστε να επιλύσει τόσο την AC όσο και την DC βέλτιστη ροή ισχύος. Η συνήθης μορφή έκαστης σχηματίζεται από:

$$\min_x f(x) \quad (2.37)$$

που υπόκειται στις εξής προδιαγραφές:

$$g(x) = 0 \quad (2.38)$$

$$f(x) \leq 0 \quad (2.39)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (2.40)$$

2.4.1 ΣΥΝΗΘΗΣ AC ΒΡΦ

Το διάνυσμα βελτίωσης x για το σύνηθες AC πρόβλημα βέλτιστης ροής ισχύος αποτελείται από $n_b \times 1$ διανύσματα γωνιών τάσεων Θ και μέτρα τάσεων V_m και από $n_g \times 1$ διανύσματα ενεργής και άεργου έγχυσης ισχύος γεννητριών (P_g και Q_g αντίστοιχα)

$$x = \begin{bmatrix} \Theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (2.37) είναι απλώς μια άθροιση των μεμονωμένων συναρτήσεων πολυωνυμικών κοστών των ενεργών και άεργων εγχύσεων ισχύος αντίστοιχα. Για κάθε γεννήτρια ισχύει :

$$\min_{\Theta, V_m, P_g, Q_g} f(x) = \sum_{i=1}^{n_g} f_P^i(p_g^i) + f_Q^i(q_g^i) \quad (2.42)$$

Οι περιορισμοί της ισότητας στην εξίσωση (2.38) είναι το πλήρες σύνολο των $2 \cdot n_b$ μη γραμμικών εξισώσεων ισοζυγίου ενεργού και άεργου ισχύος προερχόμενες από τις (2.33) και (2.34) . Οι περιορισμοί ανισότητας της εξίσωσης (2.39) αποτελούνται από 2 σύνολα n_l ορίων ροής γραμμής (κλάδου) , που περιλαμβάνουν τις μη γραμμικές εξισώσεις των γωνιών και μέτρων τάσεως ζυγού ,ένα για κάθε άκρο άφιξης και ένα για κάθε άκρο αναχώρησης κλάδου .

$$h_f(\Theta, V_m) = |F_f(\Theta, V_m)| - F_{max} \leq 0 \quad (2.43)$$

$$h_t(\Theta, V_m) = |F_t(\Theta, V_m)| - F_{max} \leq 0 \quad (2.44)$$

Οι ροές είναι συνήθως φαινόμενες ροές εκφρασμένες σε MVA ,αλλά μπορούν να είναι και ροές ενεργού ισχύος ή ακόμη και ρεύματος ,παράγοντας τις τρεις ακόλουθες μορφές (με τους περιορισμούς κάθε μιας) :

$$F_f(\Theta, V_m) = \begin{cases} S_f(\Theta, V_m), & \text{φαινόμενη ισχύς} \\ P_f(\Theta, V_m), & \text{ενεργός ισχύς} \\ I_f(\Theta, V_m), & \text{ρεύμα} \end{cases} \quad (2.45)$$

όπου η τιμή του ρεύματος I_f ορίζεται στην εξίσωση (2.9) ,της φαινόμενης ισχύος S_f στην εξίσωση (2.15), για την ενεργό ισχύ P_f δεχόμαστε ότι $P_f = \Re\{ S_f \}$ και το διάνυσμα ορίων ροών F_{max} έχει τις κατάλληλες μονάδες για κάθε περίπτωση . Αντίστοιχα ισχύουν και για τις εξισώσεις $F_t(\Theta, V_m)$. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται

στον υπολογισμό της ΒΡΦ του προγράμματος Matpower για τα όρια ροών δίνονται στην στήλη RATE_A (6) του πίνακα branch .

Τα όρια μεταβλητών (2.40) περιλαμβάνουν μια ισότητα περιορισμού σε κάθε γωνία ζυγού αναφοράς ,στα άνω και κάτω όρια όλων των μέτρων τάσης ζυγών καθώς και στις εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος γεννήτριας:

$$\theta_i^{ref} \leq \theta_i \leq \theta_i^{ref} \quad i \in \mathcal{J}_{ref} \quad (2.46)$$

$$u_m^{i,min} \leq u_m^i \leq u_m^{i,max} \quad i = 1 \dots n_b \quad (2.47)$$

$$p_g^{i,min} \leq p_g^i \leq p_g^{i,max} \quad i = 1 \dots n_g \quad (2.48)$$

$$q_g^{i,min} \leq q_g^i \leq q_g^{i,max} \quad i = 1 \dots n_g \quad (2.49)$$

Η γωνία αναφοράς τάσης θ_i^{ref} και τα όρια μέτρου τάσης $u_m^{i,max}$ και $u_m^{i,min}$ δηλώνονται στις στήλες VA (9) ,VMAX (12) και VMIN (13) αντιστοίχως της γραμμής i του πίνακα bus . Παρομοίως τα όρια γεννητριών $q_g^{i,max}$, $q_g^{i,min}$, $p_g^{i,max}$ και $p_g^{i,min}$ δηλώνονται στις στήλες QMAX (4) ,QMIN (5) , PMAX (9) , PMIN (10) ,αντίστοιχα της γραμμής i του πίνακα gen.

2.4.2 ΣΥΝΗΘΗΣ DC ΒΡΦ

Κατά την χρήση των υποθέσεων και των περιορισμών πολυωνυμικού κόστους δεύτερης τάξης ,για την μοντελοποίηση του DC δικτύου ,το άνωθεν σύνηθες πρόβλημα ΒΡΦ μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα τετράγωνο πρόγραμμα ,με γραμμικούς περιορισμούς και τετράγωνη συνάρτηση κόστους .Σε αυτή την περίπτωση τα μέτρα των τάσεων και της άεργης ισχύος εξαλείφονται πλήρως από το πρόβλημα ,ενώ οι ροές ενεργού ισχύος μοντελοποιούνται σαν γραμμικές συναρτήσεις των γωνιών τάσεων .Η μεταβλητή βελτιστοποίησης είναι :

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ P_g \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

και το συνολικό πρόβλημα ελαχιστοποιείται στην ακόλουθη μορφή :

$$\min_{\theta, P_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_P^i(p_g^i) \quad (2.51)$$

Ενώ υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς :

$$g_P(\theta, P_g) = B_{bus}\theta + P_{bus,shift} + P_d + G_{sh} - C_g P_g \quad (2.52)$$

$$h_f(\theta) = B_f\theta + P_{f,shift} - F_{max} \leq 0 \quad (2.53)$$

$$h_t(\theta) = -B_f\theta - P_{f,shift} - F_{max} \leq 0 \quad (2.54)$$

$$\theta_i^{ref} \leq \theta_i \leq \theta_i^{ref} \quad i \in \mathcal{J}_{ref} \quad (2.55)$$

$$p_g^{i,min} \leq p_g^i \leq p_g^{i,max} \quad i = 1 \dots n_g \quad (2.56)$$

2.4.3 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗΣ ΒΡΦ

Το Matpower υποστηρίζει μια επεκτεινόμενη δομή ΒΡΦ ,επιτρέποντας στον χρήστη να τροποποιήσει ή να αυξήσει την μορφή του προβλήματος χωρίς να γράψει ξανά τα κοινά με τον συνήθη σχηματισμό ΒΡΦ τμήματα .Αυτό επιτυγχάνεται μέσω επιλεκτικής παραμετροποίησης εισόδου ,διατηρώντας την δυνατότητα χρήσης ήδη συνταγμένων χρηστών .Ο συνήθης σχηματισμός τροποποιείται εισάγοντας επιπρόσθετα ,προαιρετικά κόστη ,που ορίζονται από τον χρήστη f_u , περιορισμούς και μεταβλητές z και παίρνει την ακόλουθη μορφή :

$$\min_{x,z} f(x) + f_u(x, z) \quad (2.57)$$

Ενώ ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί :

$$g(x)=0 \quad (2.58)$$

$$h(x)=0 \quad (2.59)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (2.60)$$

$$l \leq \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \leq u \quad (2.61)$$

$$z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (2.62)$$

Τα είδη επεκτάσιμου σχηματισμού ΒΡΦ είναι τα εξής:

i. Κόστη που ορίζονται από τον χρήστη

Η οριζόμενη από τον χρήστη συνάρτηση κόστους f_u προσδιορίζεται μέσω των παραμέτρων H, C, N, \hat{r}, k, d και m . Όλες είναι διανύσματα διάστασης $n_w \times 1$ με εξαίρεση τον συμμετρικό $n_w \times n_w$ πίνακα H και τον $n_w \times (n_x + n_z)$ πίνακα N .Η συνάρτηση παίρνει την μορφή :

$$f_u(x, z) = \frac{1}{2} w^T H w + C^T w \quad (2.63)$$

όπου ο w ορίζεται στα ακόλουθα βήματα .Αρχικά δημιουργείται ένα νέο διάνυσμα u , εφαρμόζοντας γραμμικό μετασχηματισμό N και μετατόπιση \hat{r} στο σύνολο των μεταβλητών βελτιστοποίησης .

$$r = N \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}, \quad (2.64)$$

$$u = r - \hat{r} \quad (2.65)$$

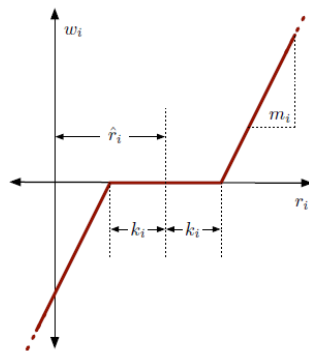
Στην συνέχεια σε κάθε στοιχείο του u ,επιδρά μια τρίκλινη συνάρτηση ,ώστε να παραχθεί το αντίστοιχο w

$$w_i = \begin{cases} m_i f_{d_i}(u_i + k_i) & u_i < -k_i \\ 0 & -k_i \leq u_i \leq k_i \\ m_i f_{d_i}(u_i - k_i) & u_i > k_i \end{cases} \quad (2.66)$$

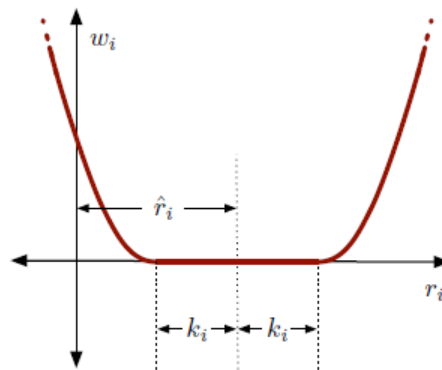
Εδώ το μέγεθος k_i υποδηλώνει τα εύρος της «νεκρής» ζώνης (μηδενική ζώνη) το m_i είναι ένας απλός παράγοντας γραμμικής μετατόπισης και το f_{d_i} είναι μια προκαθορισμένη κλιμακωτή συνάρτηση (καθορισμένη από τον παράγοντα d_i .Προς το παρόν το Matpower παρέχει μόνο γραμμικές και τετραγωνικές επιλογές :

$$f_{d_i} = \begin{cases} a, & \text{εαν } d_i = 1 \\ a^2, & \text{εαν } d_i = 2 \end{cases} \quad (2.67)$$

Αυτές οι παρατηρήσεις συνοψίζονται στα ακόλουθα διαγράμματα (εικόνες 2.2 & 2.3):



Εικόνα 36:Σχέση του w_i με το r_i για $d_i=1$ (γραμμική επιλογή)



Εικόνα 2.3: Σχέση του w_i με το r_i για $d_i=2$ (τετραγωνική επιλογή)

Η συγκεκριμένη μορφή της f_u προσφέρει την ευελιξία του χειρισμού μεγάλου εύρους κοστών ,από απλές γραμμικές συναρτήσεις βελτιστοποίησης μεταβλητών ,σε κλιμακωτές τετραγωνικές καθυστερήσεις σε ποσότητες όπως η τάση ,ή ακόμη και σε συναρτήσεις γραμμικού συνδυασμού ποσοτήτων . Ορισμένοι περιορισμοί τίθενται στις παραμέτρους στην περίπτωση της DC ΒΡΦ καθώς το Matpower χρησιμοποιεί λύτη γενικευμένου τετραγωνικού προγραμματισμού (QP) για την βελτιστοποίηση . Συγκεκριμένα $k_i=0$ και $d_i=1$ για όλα τα i ,ώστε η μηδενική περιοχή να μην λαμβάνεται υπόψη και να είναι διαθέσιμη μόνο η γραμμική επιλογή για το f_{d_i} .Σαν αποτέλεσμα για την περίπτωση DC η εξίσωσή (2.66) απλοποιείται σε $w_i = m_i u_i$.

ii. Περιορισμοί που ορίζονται από τον χρήστη

Οι οριζόμενοι από τον χρήστη περιορισμοί (2.61) είναι κατά κανόνα γραμμικοί που περιλαμβάνουν όλες της μεταβλητές βελτιστοποίησης και δηλώνονται μέσω του πίνακα A καθώς και των άνω και κάτω οριακών διανυσμάτων l και u . Αυτές οι παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν περιορισμούς ισότητας ($l_i=u_i$) , και ανισότητας ,μονόπλευρα φραγμένους άνωθεν ($l_i=\infty$) , κάτωθεν ($u_i =\infty$) ή αμφίπλευρα φραγμένους .

iii. Μεταβλητές που ορίζονται από τον χρήστη

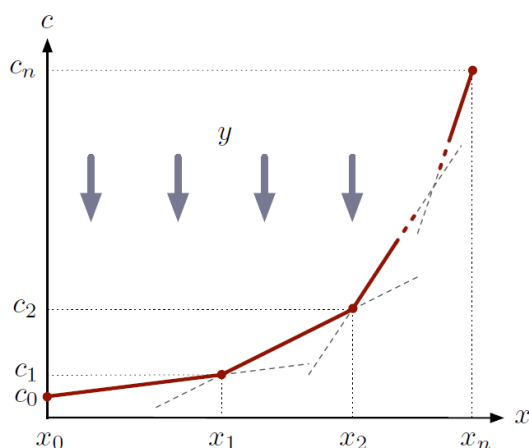
Η δημιουργία επιπρόσθετων οριζόμενων από τον χρήστη μεταβλητών z ,γίνεται αυθαίρετα και βασίζεται στην διαφορά μεγέθους των στηλών του πίνακα A και της διάστασης του x .Τα προαιρετικά διανύσματα z_{min} και z_{max} μπορούν να δηλώσουν τα κάτω και άνω όρια του z αντίστοιχα .

2.4.4 ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Εκτός από την δυνατότητα να κάνει την αυτή την επεκτάσιμη δομή ΒΡΦ διαθέσιμη σε τελικούς χρήστες ,το Matpower την εκμεταλλεύεται εσωτερικά ,ώστε να υποδηλώσει πληθώρα πρόσθετων δυνατοτήτων .

ι. Τμηματικά γραμμικά κόστη

Ο σχηματισμός της συνήθους ΒΡΦ (2.37)-(2.40) δεν μπορεί να διαχειριστεί άμεσα τις (μη παραγωγίσιμες) γραμμικές ,τμηματικές συναρτήσεις κόστους που προκύπτουν τυπικά από την προσφορά και ζήτηση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας .Όταν ,ωστόσο ,τέτοιες συναρτήσεις είναι καμπύλες ,μπορούν να μοντελοποιηθούν με χρήση μεθόδου μεταβλητών περιορισμένου κόστους (CCV) . Η τμηματική γραμμική συνάρτηση κόστους $c(x)$,μπορεί να αντικατασταθεί από μια βοηθητική μεταβλητή y και ένα σύνολο γραμμικών περιορισμών που σχηματίζουν μια περιβάλλουσα καμπύλη απαιτώντας το y να βρίσκεται εντός ορίων της συνάρτησης $c(x)$.Στο ακόλουθο διάγραμμα ,απεικονίζεται μια κυρτή γραμμική, τμηματική συνάρτηση κόστους με n -τμήματα (εικόνα 2.4) .



Εικόνα 2.4 : Απεικόνιση κυρτής γραμμικής, τμηματικής συνάρτησης κόστους με n -τμήματα

όπου :

$$c(x) = \begin{cases} m_1(x - x_1) + c_1, & x \leq x_1 \\ m_2(x - x_2) + c_2, & x_1 < x < x_2 \\ \vdots & \vdots \\ m_n(x - x_n) + c_n, & x_{n-1} < x \end{cases} \quad (2.68)$$

η οποία ορίζεται από μια ακολουθία σημείων (x_j, c_j) , $j=0\dots n$, ενώ ο αριθμός m_j υποδηλώνει την κλίση του j -οστού τμήματος :

$$m_j = \frac{c_j - c_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} \quad ,j=1\dots n \quad (2.69)$$

Επίσης $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ και $m_1 \leq m_2 \leq \dots < m_n$

Η περιβάλλουσα που αντιστοιχεί σε αυτή την συνάρτηση κόστους σχηματίζεται από τους ακόλουθους n περιορισμούς της βοηθητικής μεταβλητής κόστους y :

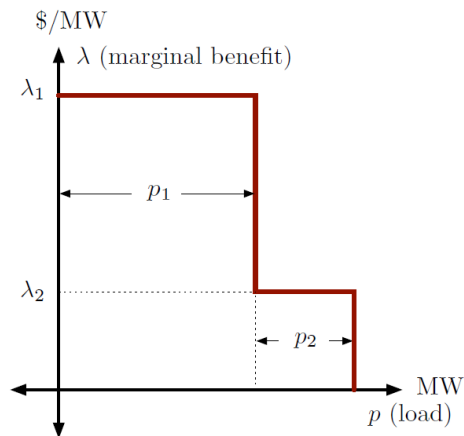
$$y \geq m_j(x - x_j) + c_j, \quad j = 1 \dots n \quad (2.70)$$

Άρα ο όρος κόστους που προστίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση στην θέση του $c(x)$ είναι η μεταβλητή y .

Το Matpower χρησιμοποιεί αυτήν την CCV προσέγγιση εσωτερικά ,ώστε να δημιουργήσει αυτόματα την κατάλληλη βοηθητική μεταβλητή ,τους όρους κόστους και το αντίστοιχο σύνολο περιορισμών για όλα τα τμηματικά γραμμικά κόστη τόσο σε ενεργή όσο και σε άεργη παραγωγή . Όλοι οι λύτες BPF ,για προβλήματα DC και AC ,χρησιμοποιούν την προσέγγιση CCV με εξαίρεση δύο (την βηματική μέθοδο πρώτου-δεύτερου εσωτερικού σημείου -SCPDIPM και την βασισμένη σε διάστημα εμπιστοσύνης , επαυξημένη μέθοδο Lagrangian –TRALM) ,που αποτελούν τμήμα του προαιρετικού πακέτου TSPOPF .

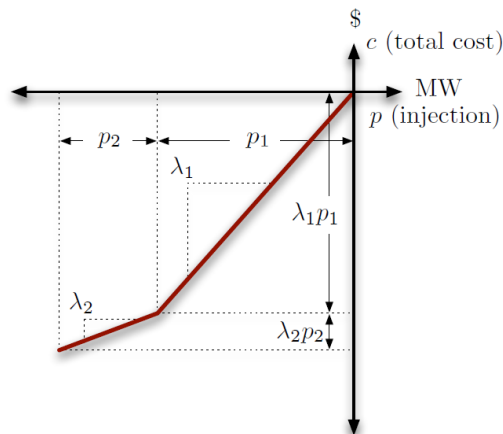
ii. Κατανεμημένα φορτία

Μπορούμε να προσεγγίσουμε απλά τα διεσπαρμένα ή επηρεαζόμενα από τιμές φορτία μοντελοποιώντας τα σαν αρνητικές εγχύσεις ενεργού ισχύος με συσχετιζόμενα αρνητικά κόστη .Αυτό επιτυγχάνεται προσδιορίζοντας μια γεννήτρια με αρνητική παραγωγή και τιμές έγχυσης κυμαινόμενες από την ελάχιστη ,η οποία ισούται με την μεγαλύτερη δυνατή τιμή φορτίου με αρνητικό όμως πρόσημο και την μέγιστη που είναι το μηδέν .Μελετώντας το παράδειγμα ενός φορτίου ευαίσθητου στις αλλαγές τιμής ,του οποίου η περιθώρια συνάρτηση κέρδους απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 2.5) παρατηρούμε ότι η ζήτηση p_d αυτού του φορτίου θα είναι μηδενική για τιμές μεγαλύτερες του λ_1 , θα είναι p_1 για τιμές ανάμεσα σε λ_1 και λ_2 και θα είναι ίση με p_1+p_2 για τιμές μικρότερες του λ_2 .(σελ 50)



Εικόνα 2.5 :Περιθώρια συνάρτηση ή συνάρτηση προσφοράς .

Αυτό αντιστοιχεί σε αρνητική γεννήτρια (γεννήτρια με αρνητική παραγωγή) με την τμηματικά γραμμική καμπύλη κόστους που φαίνεται πιο κάτω (εικόνα 2.6) .



Εικόνα 2.6:Συνάρτηση συνολικού κόστους για αρνητική έγχυση ισχύος

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η προσέγγιση απαιτεί οι μονάδες ζήτησης να είναι μερικώς καταναμημένες και όχι να απορρίπτονται ή να γίνονται δέκτες ολοκληρωτικά .

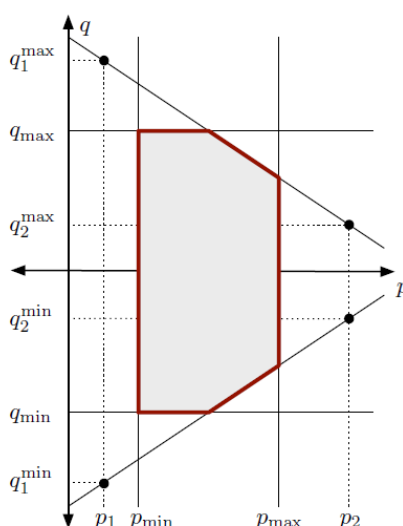
Σε ένα μοντέλο AC τοπολογίας ,τίθεται ακόμη η ερώτηση της άεργου διανομής για τέτοια φορτία .Θεωρητική οι εγχύσεις άεργου ισχύος γεννητριών μπορούν να πάρουν όλες τις τιμές μέσα στα επιτρεπτά όρια. Εφόσον αυτή είναι μη κανονική συμπεριφορά ,το χρησιμοποιούμενο μοντέλο Matlab υποθέτει ότι τα καταναμημένα φορτία διατηρούν σταθερό παράγοντα ισχύος .Κατά τον σχηματισμό, λοιπόν ,του AC προβλήματος BPF το Matpower θα δημιουργήσει αυτόματα έναν επιπρόσθετο περιορισμό ισότητας για να επιβάλλει έναν σταθερό παράγοντα ισχύος για κάθε «αρνητική » γεννήτρια που αντιπροσωπεύει κάποιο καταναμημένο φορτίο .

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ,ότι με αυτόν τον ορισμό των καταναμημένων φορτίων σαν αρνητικές γεννήτριες ,ένα το αρνητικό κόστος αντιστοιχεί σε κέρδος

κατανάλωσης ,η ελαχιστοποίηση του (ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους γεννητριών $c(x)$) ,έχει σαν αποτέλεσμα μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας .

iii. Καμπύλες δυνατοτήτων γεννητριών

Ο συνήθης σχηματισμός της AC BPF περιλαμβάνει περιορισμούς για την έγχυση ενεργού και άεργου ισχύος γεννήτριας ,που προσδιορίζονται απλά σαν άνω και κάτω όρια του p (p_{min} , p_{max}) και q (q_{min} , q_{max}) αντίστοιχα .Αντιθέτως οι αληθινές P-Q καμπύλες δυνατοτήτων των υπαρκτών γεννητριών συνήθως περιλαμβάνουν δίλημμα (αμφιβολία) ανάμεσα στην ενεργό και άεργο ικανότητα ,ώστε να μην είναι δυνατό να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ενεργή και άεργη παραγωγή ταυτόχρονα .Για να μετριαστεί αυτή η απόκλιση το Matpower περιλαμβάνει την δυνατότητα να προσθέτει μια υψηλότερη και χαμηλότερη κεκλιμένη ποσότητα στους υπάρχοντες περιορισμούς όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 2.7) ,όπου το σκιασμένο τμήμα αντιπροσωπεύει την εφικτή περιοχή λειτουργίας της μονάδας .



Εικόνα 2.7:Καμπύλη ικανότητας γεννήτριας P-Q

Οι δύο κεκλιμένες ποσότητες δημιουργούνται από τις γραμμές που ενώνουν τα δύο ζεύγη σημείων ορισμένα από τις παραμέτρους p_1 , q_1^{min} , q_1^{max} , p_2 , q_2^{min} , και q_2^{max} .Εάν αυτές οι παράμετροι προσδιορίζονται για μια δεδομένη γεννήτρια ,στις στήλες PC1-QC2MAX (11-16) ,το Matpower παράγει αυτόματα τους αντίστοιχους επιπρόσθετους γραμμικούς περιορισμούς ανισότητας για το p και το q αυτής της μονάδας .

Εάν κάποια από τις κεκλιμένες ποσότητες των περιορισμών ικανότητας είναι δεσμευτική για την γεννήτρια k ,η αντίστοιχη σκιασμένη τιμή αποσυντίθεται στους παράγοντες μ_{pmax} , μ_{qmin} και μ_{qmax} και προστίθεται στην κατάλληλη στήλη (MU_PMAX,MU_QMIN,MU_QMAX) της k -οστής σειράς του πίνακα gen.

iv. Διαφορικά όρια γωνίας κλάδων

Η διαφορά ανάμεσα στην γωνία τάσης ζυγού στο άκρο αναχώρησης (κλάδου) θ_f και στην αντίστοιχη στο άκρο άφιξης θ_r , μπορεί να φραχτεί άνω και κάτω, ώστε να αποτελεί πληρεξούσιο για, παραδείγματος χάριν, ένα μεταβατικό όριο ευστάθειας. Ένα αυτά τα όρια δηλωθούν στις στήλες ANGMIN (12) και ANGMAX (13) του πίνακα branch, το Matpower μπορεί να δημιουργήσει τους αντίστοιχους περιορισμούς για τις μεταβλητές γωνιών τάσης.

2.4.5 ΛΥΤΕΣ

Οι πρώτες εκδόσεις του Matpower βασίζονταν στην εργαλειοθήκη του Matlab (Matlab's optimization toolbox) για να παρέχουν τους απαραίτητους NPL και QP λύτες για να λυθούν οι AC και DC βέλτιστες ροές φορτίου αντίστοιχα. Αν και δούλευαν καλά για μικρά συστήματα, δεν απέδιδαν καλά σε μεγαλύτερα δίκτυα. Τελικά προστέθηκαν προαιρετικά πακέτα με λύτες για να βελτιωθεί η απόδοση, βασιζόμενα στα αρχεία επέκτασης Matlab (MEX), γραμμένα σε Fortran ή C και προσυμπιεσμένα για την αρχιτεκτονική κάθε μηχανήματος. Κάποια από αυτά τα αρχεία MEX διανέμονται σαν προαιρετικά πακέτα λόγω διαφορών στους όρους χρήσης. Για την DC ΒΡΦ υπάρχει ένα πακέτο λύτη MEX υψηλής απόδοσης εσωτερικού σημείου (BPMPPD) για τα LP/QP προβλήματα. Για την AC ΒΡΦ, τα πακέτα MINOPF και TSPOPF παρέχουν λύτες κατάλληλους για πολύ μεγαλύτερα συστήματα, όπου το πρώτο βασίζεται στο πακέτο MINOS και το δεύτερο περιλαμβάνει σύστημα μονού – διπλού εσωτερικού σημείου και την περιοχή εμπιστοσύνης που βασίζεται στην επαυξημένη μέθοδο Lagrangian. Από την 4^η έκδοση του Matpower και μετά υπάρχει η επιλογή να χρησιμοποιηθεί ο λύτης ανοικτού κώδικα IPOPT (τόσο για AC όσο και για DC ΒΡΦ), ο οποίος βασίζεται στην MEX διεπαφή του Matlab με το πρόγραμμα IPOPT. Περιλαμβάνεται ακόμη η δυνατότητα χρήσης των πακέτων CPLEX, MOSEK, GLPK, CLP, του βελτιστοποιητή Gurobi για την DC ΒΡΦ ή του πακέτου KNITRO για AC ΒΡΦ. Σε περίπτωση που δεν εγκατασταθεί κανένα επιπρόσθετο πακέτο, χρησιμοποιείται ο (ήδη υπάρχων από την 4^η έκδοση) ενσωματωμένος λύτης του Matlab, MIPS, ο οποίος περιλαμβάνει την δική του μέθοδο συστήματος μονού – διπλού εσωτερικού σημείου. Έχει εφαρμογή και σε γενικά με γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης, έκτος του Matpower και μπορεί να κληθεί άμεσα με χρήση της εντολής mips.

3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

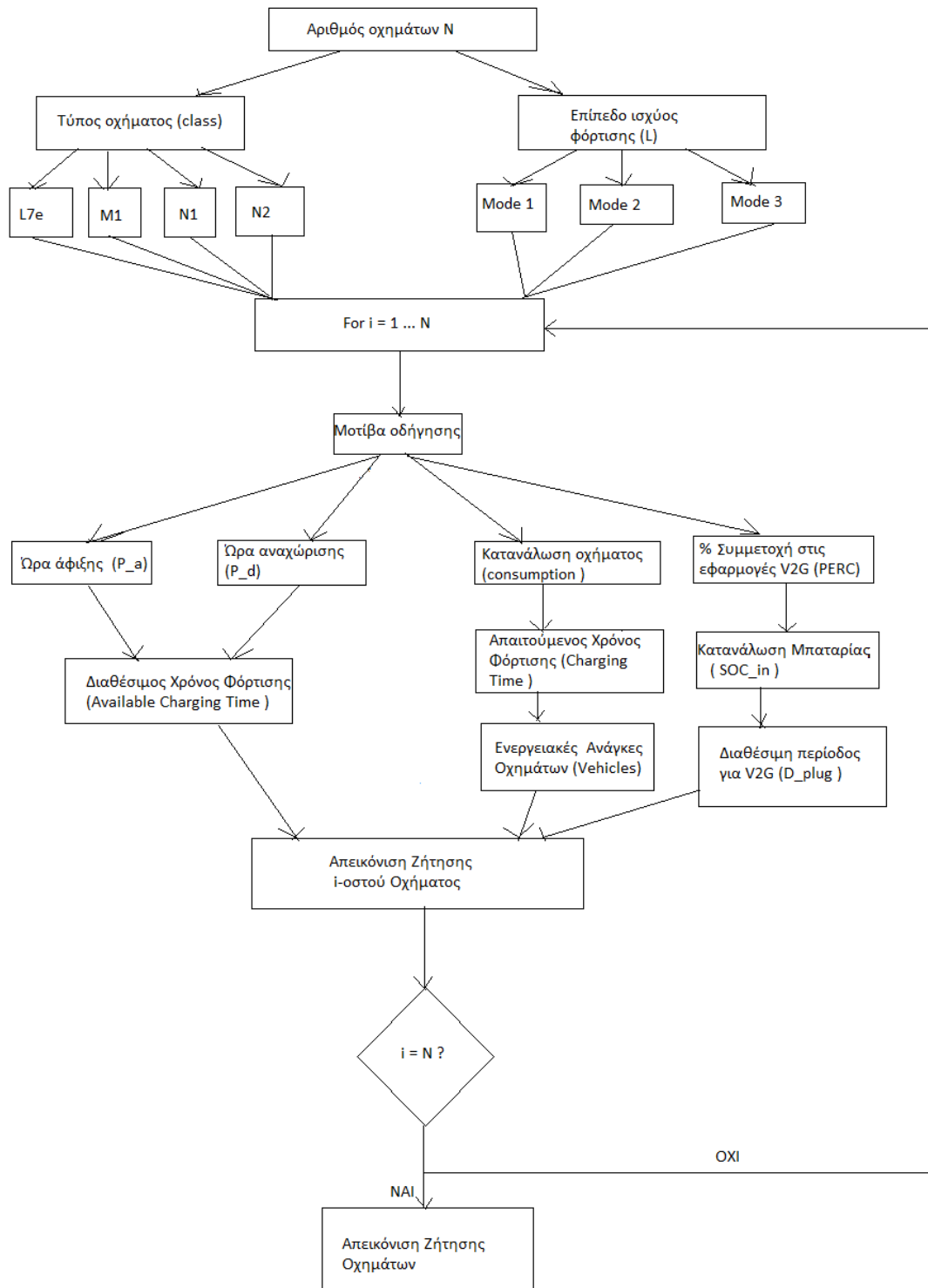
Η ηλεκτροκίνηση και τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν το μέλλον στις ανθρώπινες χερσαίες μετακινήσεις ,ιδίως με την ολοένα ταχύτερη εξάντληση των φυσικών πόρων .Έχει γίνει παγκόσμιος στόχος η ένταξη τους σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό στις ζωές μας . Ωστόσο ,καθώς η τροφοδοσία τους με ενέργεια γίνεται από το δίκτυο ρευματοδότησης , μπορούν να εμφανιστούν προβλήματα σε αυτό από την αλόγιστη φόρτιση τους. Εάν ,παραδείγματος χάριν ,οι ιδιοκτήτες των οχημάτων τα φόρτιζαν όλοι ταυτόχρονα κατά την επιστροφή τους από την δουλεία (η οποία χρονικά συμπίπτει με την κορυφή της καμπύλης φορτίου) θα επιβάρυναν ακόμη περισσότερο ένα δίκτυο που λειτουργεί ήδη στο μέγιστο των δυνατοτήτων του [1]-[13] .Για τον λόγο αυτό είναι επιτακτική ανάγκη η καθιέρωση και τυποποίηση συγκεκριμένων στρατηγικών φόρτισης ανάλογα με παράγοντες όπως ο πληθυσμός της περιοχής, η εποχή ,οι συνήθειες των οδηγών κτλ ,ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες παρενέργειες με όσο τον δυνατόν λιγότερες επεμβατικές αλλαγές .

Στο κεφάλαιο αυτό ,λοιπόν ,θα αναφερθούμε στις μεθόδους υπολογισμού της ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων (για να μπορούν να απορροφηθούν από την εκάστοτε αγορά) και στις ενδεδειγμένες τέσσερις στρατηγικές φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής.

3.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

Ο μόνος τρόπος να προσδιορίσουμε την διείδυση ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο ,ώστε να μην προκαλέσουν προβλήματα στην ποιότητα του ,παραμένοντας ταυτόχρονα λειτουργικά στο μέγιστο , είναι υπολογίζοντας τις ενεργειακές τους ανάγκες .Υπάρχουν πολλές παράμετροι που επηρεάζουν την ζήτηση ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων ,όπως το ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας κατά την αναχώρηση τους ή ακόμη και οι ημερήσιες στάσεις του οδηγού ,οι σημαντικότεροι παράγοντες όμως είναι το πλήθος τους και η στρατηγική φόρτισης που ακολουθείται κάθε φορά .

Στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 3.1) φαίνεται σχηματικά (παραστατικά) η μέθοδος υπολογισμού της ζήτησης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων :



Εικόνα 3.1: Μέθοδος υπολογισμού της ζήτησης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων [14]

Ακολουθεί η ανάλυση του διαγράμματος:

Τύποι οχημάτων (class)

Υπάρχουν οι εξής τέσσερις κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα ηλεκτρικά οχήματα κάθε δικτύου :

i. L7E

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τετρακύλινδρα ,τετράτροχα οχήματα μέγιστης μάζας 400 kg ή 550 kg για μεταφορικό (επαγγελματικό) όχημα και μέγιστης καθαρής ισχύος 15 kW (ανεξαρτήτως κινητήρα) .

ii. M1

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει επιβατικά ,τετράτροχα οχήματα χωρητικότητας συνολικά 9 ατόμων (μαζί με τον οδηγό) .

iii. N1

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει μεταφορικά ,τετράτροχα οχήματα ,μέγιστης μάζας φορτίου 3500 kg .

iv. N2

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει μεταφορικά ,τετράτροχα οχήματα ,με μάζα φορτίου 3500 -12000 kg .

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η πλειονότητα των οχημάτων που κινούνται σε ευρωπαϊκά εδάφη ,είναι της κατηγορίας M1.

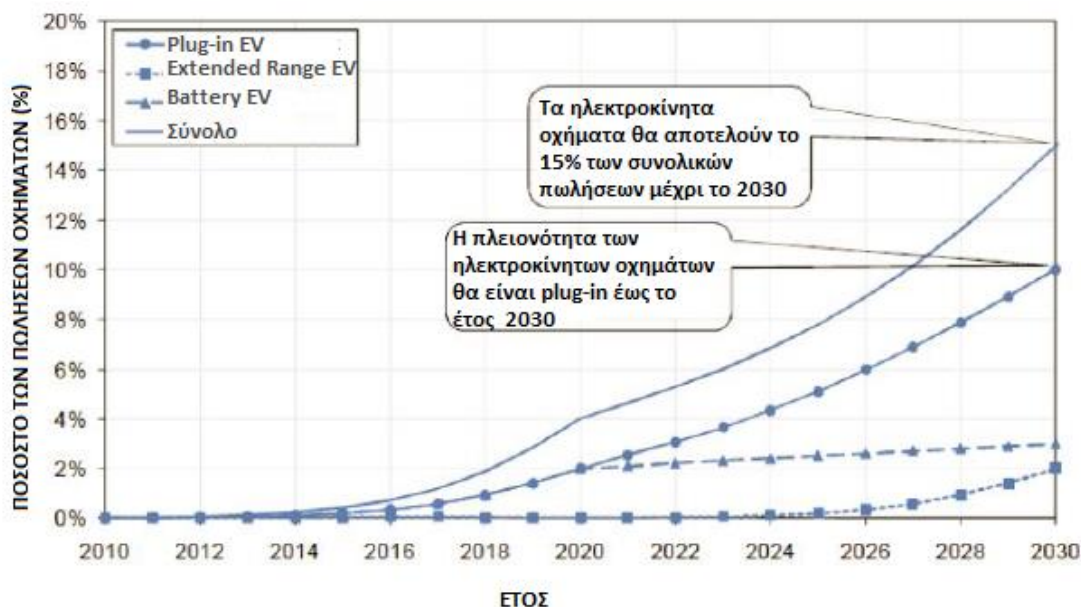
Αριθμός οχημάτων N

Ο παράγοντας αυτός υποδεικνύει τον αριθμό των προς κίνηση οχημάτων την εκάστοτε ακόλουθη μέρα .Προκειμένου να υπάρξει ελαστικότητα στην διείσδυση οχημάτων ,ώστε να προσεγγίσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματικότητα εφαρμόσαμε στην εργασία αυτή τρία σενάρια (τα οποία έχουν οριστεί και αναλυθεί στην αναφορά του δεύτερου work package του προγράμματος MERGE¹)ένα συντηρητικό ,ένα αισιόδοξο και ένα υπεραισιόδοξο ,στην ανάλυση των όποιων οδήγησαν παράμετροι όπως η τιμή ,οι επιβαλλόμενοι φόροι ,η εκπομπές ρύπων ,η διαδικασία φόρτισης ,η γεωγραφική θέση του αγοραστή κ.ά. .Αυτά αναφέρονται ακολούθως :

¹MERGE -MODELLING ELECTRIC STORAGE DEVICES FOR EV ,AUTHORS : Robert Ball , Nicola Keers , Marcus Alexander , Ed Bower ,CONTRIBUTORS : Peter Miller , Ben Hasset , Neil Downing , Filipe J. Soares ,PROJECT COORDINATOR : N. Hatzirygiou , TECHNICAL COORDINATOR : J. Peças Lopes

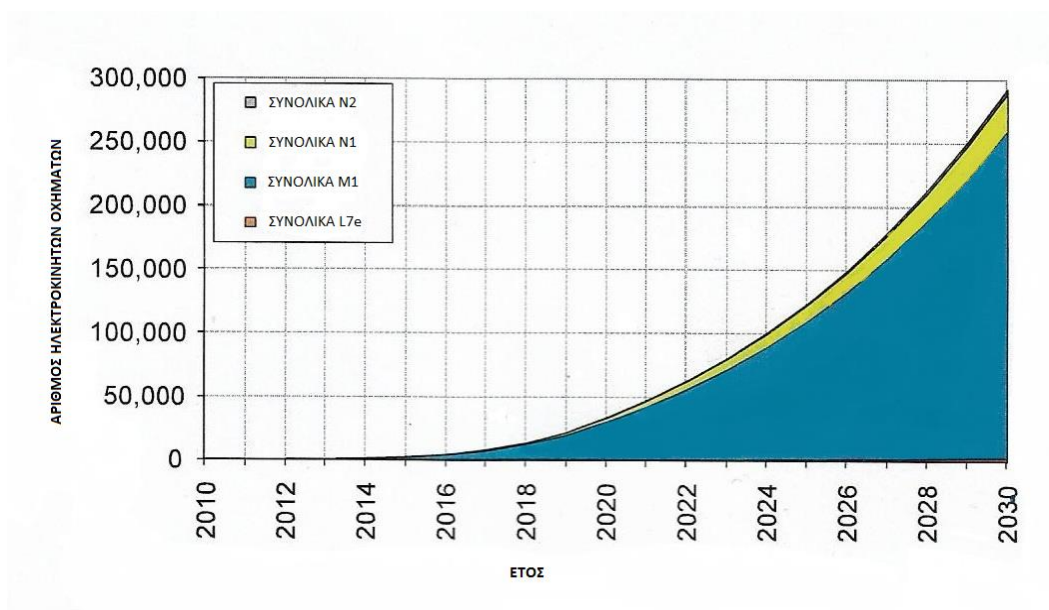
- **Συντηρητικό σενάριο**

Είναι το πιο πιθανό σενάριο ,σύμφωνα με το οποίο οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων θα αγγίξουν το 15 % των συνολικών πωλήσεων έως το 2030 (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Προβλέψεις πωλήσεων ηλεκτροκίνητων οχημάτων για το συντηρητικό σενάριο έως το έτος 2030 (πηγή : πρόγραμμα MERGE- <http://www.ev-merge.eu/>)

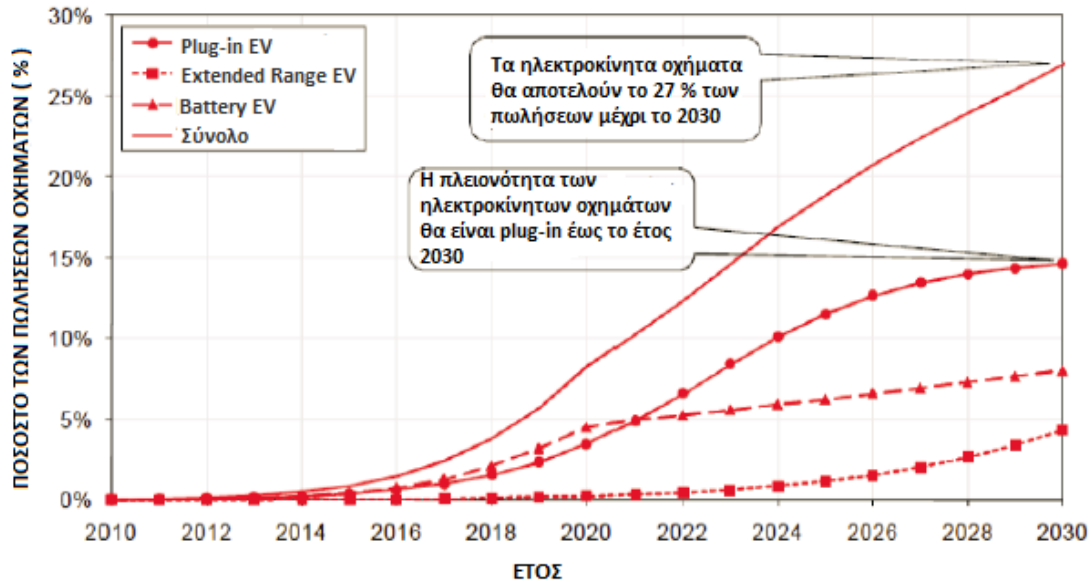
Σύμφωνα με το σενάριο αυτό ,προσαρμοσμένο στην ελληνική πραγματικότητα τα όχημα που θα κινούνται στους δρόμους μέχρι το 2030 καθώς και τα είδη τους φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 3.3):



Εικόνα 3.3 : Προβλέψεις αριθμού ηλεκτροκίνητων οχημάτων στην Ελλάδα για το συντηρητικό σενάριο έως το έτος 2030 (πηγή : πρόγραμμα MERGE- <http://www.ev-merge.eu/>)

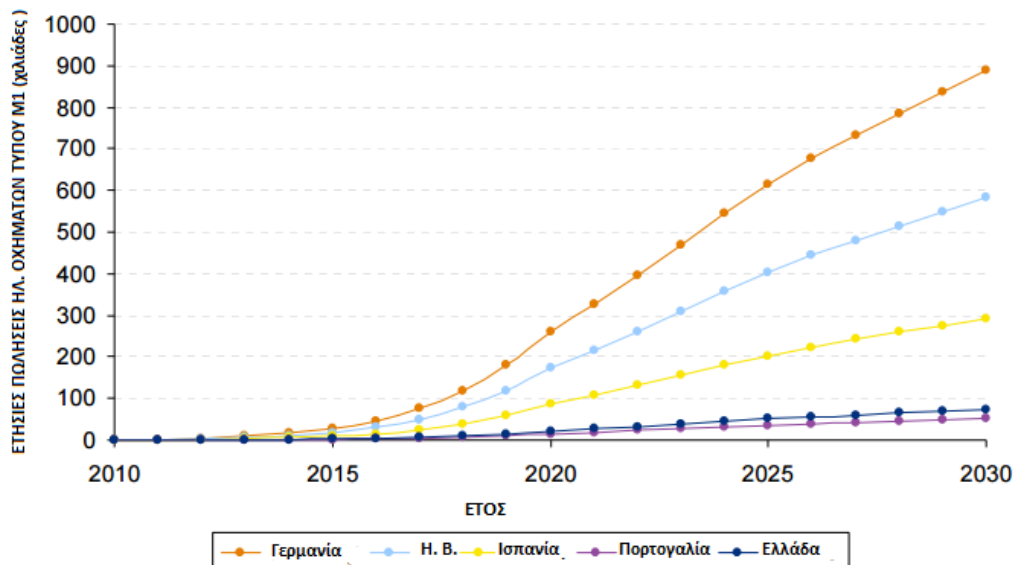
- **Αισιόδοξο σενάριο**

Είναι το πιο κατάλληλο σενάριο για χρήση στην ευρωπαϊκή αγορά, σύμφωνα με το οποίο οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων θα αγγίξουν το 27% των συνολικών πωλήσεων έως το 2030, όπως φαίνεται και ακολούθως (εικόνα 3.4):



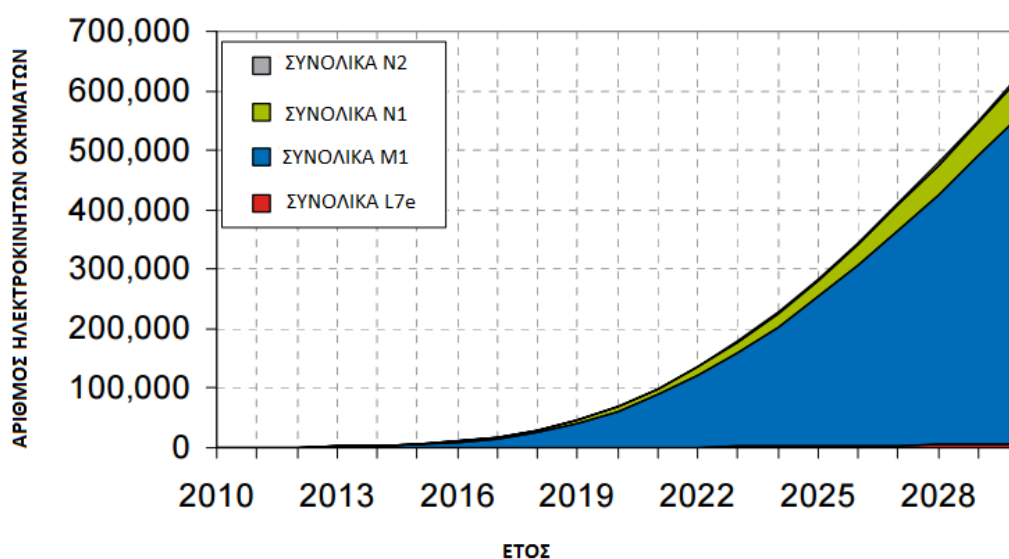
Εικόνα 3.4: :Προβλέψεις πωλήσεων ηλεκτροκίνητων οχημάτων για το αισιόδοξο σενάριο έως το έτος 2030 (πηγή : πρόγραμμα MERGE- <http://www.ev-merge.eu/>)

Οι ετήσιες πωλήσεις οχημάτων τύπου M1 σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες (ανάμεσα τους και η Ελλάδα) διαμορφώνονται ως εξής (εικόνα 3.5) :



Εικόνα 3.5: Προβλέψεις πωλήσεων ηλεκτροκίνητων οχημάτων τύπου M1 σε ορισμένες ευρωπαϊκές χώρες ,για το αισιόδοξο σενάριο έως το έτος 2030 (πηγή : πρόγραμμα MERGE- <http://www.ev-merge.eu/>)

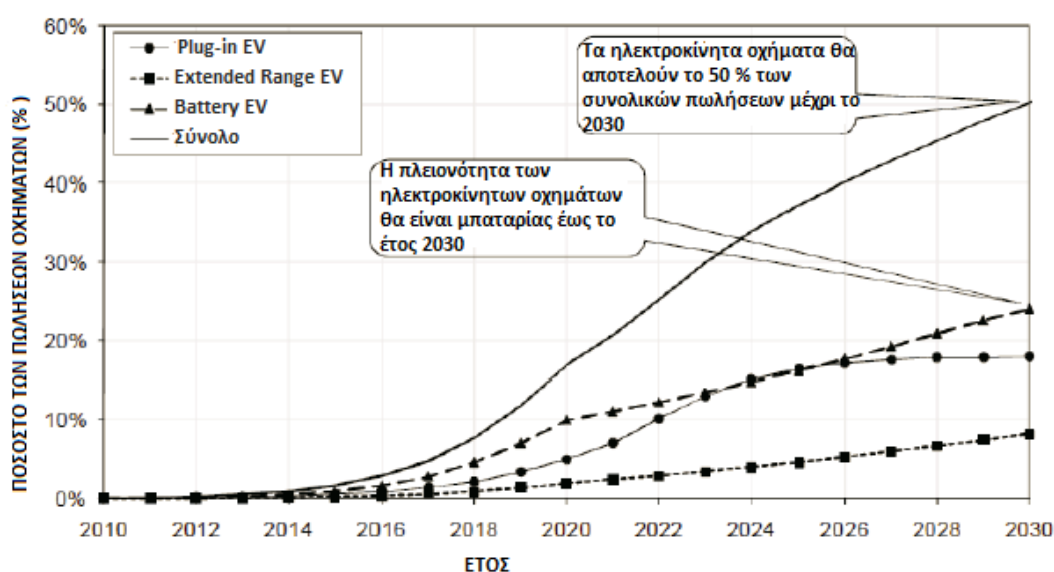
Οι πωλήσεις οχημάτων μέχρι το 2030, σύμφωνα με το σενάριο αυτό προσαρμοσμένο στα ελληνικά δεδομένα διαμορφώνονται ως εξής (εικόνα 3.6) :



Εικόνα 3.6: Προβλέψεις αριθμού ηλεκτροκίνητων οχημάτων στην Ελλάδα για το αισιόδοξο σενάριο έως το έτος 2030 (πηγή : πρόγραμμα MERGE- <http://www.ev-merge.eu/>)

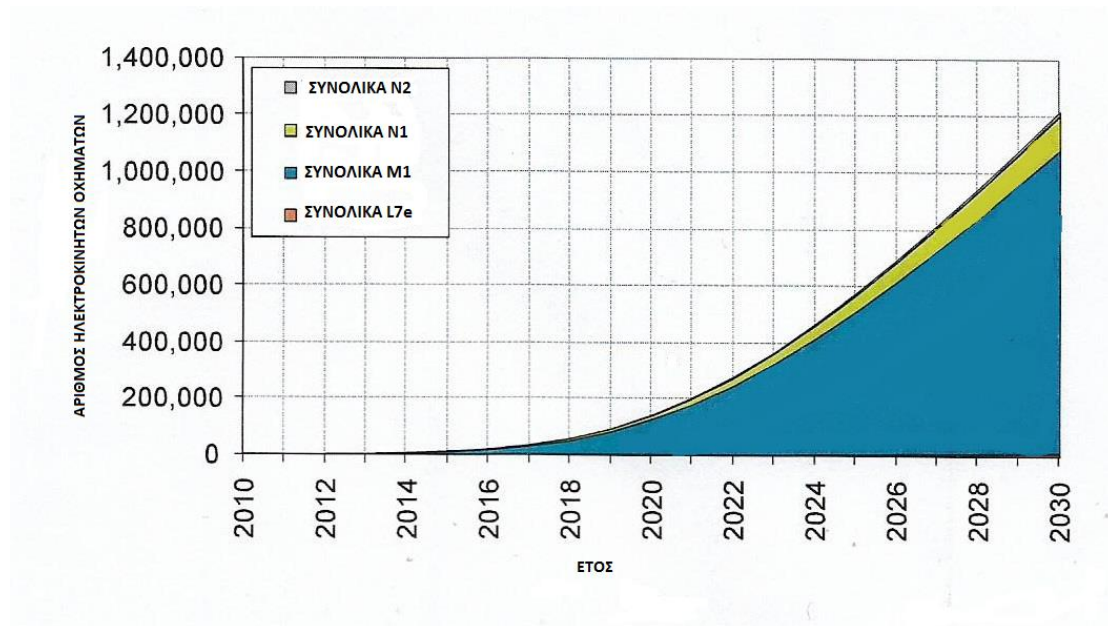
- **Υπεραισιόδοξο σενάριο**

Είναι το πιο επιθετικό εκ των τριών σεναρίων , σύμφωνα με το οποίο οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων θα αγγίξουν το 50% των συνολικών πωλήσεων έως το 2030 (εικόνα 3.7).



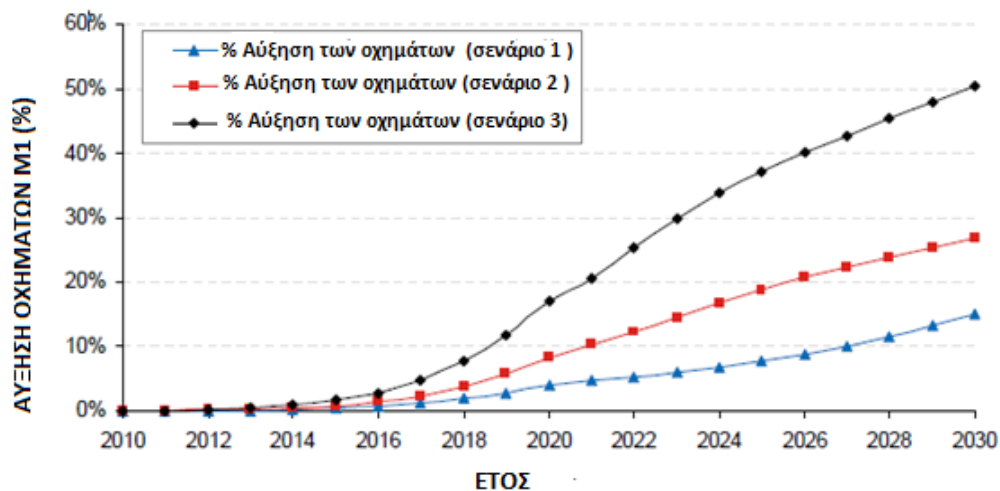
Εικόνα 3.7: Προβλέψεις πωλήσεων ηλεκτροκίνητων οχημάτων για το υπεραισιόδοξο σενάριο έως το έτος 2030 (πηγή : πρόγραμμα MERGE- <http://www.ev-merge.eu/>)

Η πραγματοποίηση του σεναρίου αυτού στην Ελλάδα οδηγεί στο εξής διάγραμμα (εικόνα 3.8):



Εικόνα 3.8 : Προβλέψεις αριθμού ηλεκτροκίνητων οχημάτων στην Ελλάδα για το υπεραισιόδοξο σενάριο έως το έτος 2030 (πηγή : πρόγραμμα MERGE- <http://www.ev-merge.eu/>)

Τέλος ,συγκριτικά τα ποσοστά αύξησεως στις πωλήσεις οχημάτων κατηγορίας M1 για τα τρία σενάρια είναι (εικόνα 3.9) :



Εικόνα 3.9: Προβλέψεις ποσοστιαίας αύξησεως αριθμού ηλεκτροκίνητων οχημάτων τύπου M1 και για τα τρία σενάρια έως το έτος 2030 (πηγή : πρόγραμμα MERGE- <http://www.ev-merge.eu/>)

Επίπεδο ισχύος φόρτισης (L)

Η παράμετρος αυτή αναλύθηκε στο πρώτο κεφάλαιο και απαρτίζεται από τρία επίπεδα :το πρώτο που αποτελεί την μονοφασική φόρτιση ,το δεύτερο ,δηλαδή την τριφασική φόρτιση και το τρίτο την ταχεία φόρτιση .

Ώρα άφιξης (P_a)

Η παράμετρος αυτή ,είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας ,ο οποίος απεικονίζει την ώρα που το όχημα επιστρέφει στο σπίτι . Για λόγους ποικιλομορφίας ,θεωρούμε τρεις διαφορετικές κατηγορίες οχημάτων ,με άλλη ώρα άφιξης η κάθε μια .

Ώρα αναχώρησης (P_d)

Η παράμετρος αυτή ,είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας ,ο οποίος απεικονίζει την ώρα που το όχημα φεύγει από το σπίτι .

Διαθέσιμος χρόνος φόρτισης (available charging time)

Η παράμετρος αυτή δηλώνει το χρονικό διάστημα φόρτισης κάθε οχήματος μέσα στην μέρα .Εξαρτάται από την ώρα αναχώρησης ,την ώρα άφιξης καθώς και την εκάστοτε στρατηγική φόρτισης .

Απαιτούμενος χρόνος φόρτισης (charging time)

Η παράμετρος αυτή δηλώνει το απαιτούμενο χρονικό διάστημα σύνδεσης με την πηγή ρεύματος ,ώστε το όχημα να είναι πλήρως φορτισμένο .Εξαρτάται από την μέγιστη ισχύ φόρτισής και από την χρήση του οχήματος .

Ενεργειακές ανάγκες οχημάτων (Vehicles)

Η παράμετρος αυτή δηλώνει την απαιτούμενη ισχύ του οχήματος ώστε να θεωρηθεί πλήρως φορτισμένο.

Κατανάλωση μπαταρίας (Soc_in)

Η παράμετρος αυτή δηλώνει την καταναλισκόμενη ποσότητα ενέργειας .Εξαρτάται από παράγοντες όπως την ταχύτητα του οχήματος ,την κατάσταση του δρόμου ,τις καιρικές συνθήκες και εξαιτίας του εύρους της ,χρησιμοποιούμε μια κοινή ,μέση τιμή .

Εκατοστιαία συμμετοχή σε εφαρμογές V2G (PERC)

Η παράμετρος αυτή δηλώνει το ποσοστό του συσσωρευτή που μπορεί να συμμετάσχει σε εφαρμογές V2G δηλαδή να επιστρέφει ενέργεια στο δίκτυο ενισχύοντας το ,χωρίς να εμποδίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του οχήματος .Μας

ενδιαφέρει μόνο για την V2G στρατηγική φόρτισης ,καθώς για όλες τις άλλες είναι μηδέν.

Διαθέσιμη περίοδος για V2G (D_plug)

Η παράμετρος αυτή δηλώνει το απαιτούμενο χρονικό διάστημα ,κατά το οποίο το όχημα μπορεί να συμμετάσχει σε εφαρμογές V2G .Όπως και ο προηγούμενος παράγοντας ,έχει τιμές διαφορετικές του μηδενός μόνο για την V2G στρατηγική φόρτισης .

Κατανάλωση οχήματος (consumption)

Η παράμετρος αυτή δηλώνει την ημερήσια κατανάλωση οχήματος ,ανά είδος (κατηγορία).

Απώλειες φόρτισης

Το κύριο ποσοστό των απωλειών φόρτισης ,απαρτίζεται από τις απώλειες λόγω μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος του δικτύου μας σε συνεχές (που χρειάζεται για την λειτουργία του οχήματος) .Λόγω του εύρους τιμών της παραμέτρου αυτής ,θεωρούμε μια κοινή τιμή της τάξης του 15 % της ισχύος φόρτισης , για όλες τις στρατηγικές της εργασίας.

Στρατηγική φόρτισης

Η παράμετρος αυτή -η σημαντικότερη για τον υπολογισμό της καμπύλης ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων – αποτελείται από τις εξής τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες :

- **Στρατηγική A-Μη ελεγχόμενη φόρτιση (Dump charging)**
Είναι η πιο απλή μορφή φόρτισης ,η οποία πραγματοποιείται όποτε επιθυμεί ο εκάστοτε οδηγός .Συνήθως αυτό γίνεται από την ώρα επιστροφής του οχήματος έως το πρωί της επόμενης μέρας .Το σύνολο των ωρών φόρτισης διαφέρει για κάθε ένα από τα τρία γκρουπ αυτοκινήτων της παρούσας εργασίας .
- **Στρατηγική Β –Φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο(dual tariff charging)**
Με χρήση αυτής της στρατηγικής ,η φόρτισης των οχημάτων πραγματοποιείται αργά την νύχτα και τις πρώτες πρωινές ώρες ,όταν το κόστος αγοράς ρεύματος είναι μικρότερο . Εδώ το σύνολο των ωρών φόρτισης είναι ίδιο και για από τα τρία γκρουπ αυτοκινήτων της παρούσας εργασίας .
- **Στρατηγική C-Έξυπνη φόρτιση (smart charging)**
Στην συγκεκριμένη στρατηγική ,η φόρτιση γίνεται τις περιόδους μη αιχμής ,ώστε να ελαχιστοποιηθεί η κυμάτωση της καμπύλης φορτίου και κατά

συνέπεια η διακύμανση της τάσης και η πιθανή υπερφόρτιση . Οι ώρες μη αιχμής συνήθως συμπίπτουν με τις ώρες ακινησίας των οχημάτων ,οπότε η στρατηγική αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί απρόσκοπτα .

▪ **Στρατηγική D-Φόρτιση με λειτουργία επιστροφής ενέργειας από το όχημα στο δίκτυο (Vehicle-to-grid)**

Η στρατηγική αυτή αποτελεί προέκταση της έξυπνης φόρτισης ,καθώς εκτός του ότι φορτίζουν τις ώρες μη αιχμής ,τα οχήματα μπορούν να επιστρέψουν ενέργεια το δίκτυο της ώρες αιχμής ,εξομαλύνοντας ακόμη περισσότερο την ημερήσια καμπύλη ,εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του δικτύου και προσφέροντας οικονομικά οφέλη στους οδηγούς .

3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μεθόδων διαχείρισης του προβλήματος του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων για τις στρατηγικές C και D, οι κεντρικές μέθοδοι και οι αποκεντρωμένες (που διαμοιράζουν το ζήτημα σε επιμέρους τμήματα) .Στην παρούσα εργασία ,προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της φόρτισης οχημάτων στο δίκτυο , χρησιμοποιήθηκε ένας κεντρικός αλγόριθμος ,το μαθηματικό μοντέλο του οποίου παρουσιάζεται ακολούθως [15]:

Αντικειμενική συνάρτηση για την στρατηγική C :

$$\sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^N P_{ch,i}^{EV}(t) - \sum_{j=1}^M P_j^{DG} + D(t))^2 \quad (1i)$$

Περιορισμοί για την στρατηγική C:

$$h_{1,i} = \sum_{t=1}^T \frac{1}{C_{bat}} \cdot P_{ch,i}^{EV}(t) \cdot C_{eff} - (SOC_{des} - SOC_{in}) = 0 \quad (2i)$$

$$h_{3,i} = (1 - D_{plug,i}(t)) \cdot P_{ch,i}^{EV}(t) = 0 \quad (4i)$$

$$g_{2,i} = SOC_i(t) + \sum_T^{dep,i} P_{ch,i}^{EV}(t) \cdot \frac{C_{eff}}{C_{bat}} - 1 \leq 0 \quad (6i)$$

$$g_{4,i} = (P_{ch,i}^{EV}(t) - P_{plug}) \leq 0 \quad (8i)$$

$$g_{5,i} = P_{ch,i}^{EV}(t) \geq 0 \quad (9i)$$

Αντικειμενική συνάρτηση για την στρατηγική D:

$$\sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^N \{P_{ch,i}^{EV}(t) - P_{dch}^{EV}(t)\} - \sum_{j=1}^M P_j^{DG} + D(t))^2 \quad (1ii)$$

Περιορισμοί για την στρατηγική D:

$$h_{1,i} = \sum_{t=1}^T \frac{1}{C_{bat}} \cdot (P_{ch,i}^{EV}(t) \cdot C_{eff} - \frac{P_{dch,i}^{EV}(t)}{C_{eff}}) - (SOC_{des} - SOC_{in}) = 0 \quad (2ii)$$

$$h_{2,i} = P_{ch,i}^{EV}(t) \cdot P_{dch,i}^{EV}(t) = 0 \quad (3ii)$$

$$h_{3,i} = (1 - D_{plug,i}(t)) \cdot (P_{ch,i}^{EV}(t) + P_{dch,i}^{EV}(t)) = 0 \quad (4ii)$$

$$g_{1,i} = \sum_{t=1}^T \frac{P_{dch,i}^{EV}(t)}{C_{eff}} - \min\{PERC, (SOC_{in,i} - P_{bat_{low}})\} \cdot C_{bat} \leq 0 \quad (5ii)$$

$$g_{2,i} = SOC_i(t) + \sum_{T_{ar,i}}^{T_{dep,i}} P_{ch,i}^{EV}(t) \cdot \frac{C_{eff}}{C_{bat}} - 1 \leq 0 \quad (6ii)$$

$$g_{3,i} = P_{bat_{low}} - SOC_i(t) + \frac{P_{dch,i}^{EV}(t)}{C_{bat} \cdot C_{eff}} \leq 0 \quad (7ii)$$

$$g_{4,i} = (P_{ch,i}^{EV}(t) - P_{plug}), (P_{dch,i}^{EV}(t) - P_{plug}) \leq 0 \quad (8ii)$$

$$g_{5,i} = P_{ch,i}^{EV}(t), P_{dch,i}^{EV}(t) \geq 0 \quad (9ii)$$

Όπου:

t = time slot

N = ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων

$P_{ch,i}^{EV}(t)$ = η ισχύς φόρτισης ανά time slot

$P_{dch,i}^{EV}(t)$ = η ισχύς εκφόρτισης ανά time slot

P_j^{DG} = η παραγόμενη ισχύς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

$D(t)$ = η αρχική ζήτηση του δικτύου

C_{bat} = η χωρητικότητα του συσσωρευτή των οχημάτων

C_{eff} = η απόδοση κατά τη φόρτιση ή την εκφόρτιση της μπαταρίας

SOC_{des} = το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας πριν αρχίσει να φορτίζει για πρώτη φορά μέσα στη μέρα

SOC_{in} = το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας αφού σταματήσει να φορτίζει για τη συγκεκριμένη μέρα

$D_{plug,i}(t)$ = η διαθέσιμη χρονική περίοδος κατά την οποία το όχημα μπορεί να συμμετάσχει σε εφαρμογές V2G

$PERC$ = το ποσοστό της μπαταρίας που συμμετέχει στη V2G λειτουργία

$P_{bat_{low}}$ = το ελάχιστο ποσοστό μέχρι το οποίο επιτρέπεται να εκφορτίσει η μπαταρία

T_{ar} = ο χρόνος άφιξης του οχήματος

T_{dep} = ο χρόνος αναχώρησης του οχήματος

$SOC_i(t)$ = το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ανά time slot

P_{plug} = η μέγιστη ισχύς φόρτισης της μπαταρίας σε ένα time slot

- Ο περιορισμός (2) δείχνει ότι η ημερήσια συνολική ισχύς φόρτισης ελαττωμένη κατά την ημερήσια συνολική ισχύ εκφόρτισης πρέπει να είναι μικρότερη του ποσού $SOC_{des} - SOC_{in}$
- Η ισότητα (3) υποδεικνύει ότι ένα όχημα δεν μπορεί να φορτίζει και να εκφορτίζει ταυτόχρονα .
- Ο περιορισμός (4) καταδεικνύει τις ώρες τις ημέρας κατά τις οποίες συμβαίνουν οι φορτίσεις και εκφορτίσεις .
- Ο περιορισμός (5) υπάρχει ώστε η εκφόρτιση του κάθε οχήματος μέσα στη μέρα να μην ξεπερνάει τα επιτρεπτά όρια(φυσικά όρια συσσωρευτή ή όρια τιθέμενα από τον οδηγό) .
- Ο περιορισμός (6) υπάρχει για να **μην** μπορεί να έχει η μπαταρία επίπεδο φόρτισης μεγαλύτερο του 100 % .
- Ο περιορισμός (7) περιορίζει την εκφόρτιση ώστε η στάθμη του συσσωρευτή να μην πέφτει κάτω από επιθυμητά όρια (δηλαδή την τιμή $P_{bat_{low}}$).
- Οι περιορισμοί (8) και (9) καταδεικνύουν τα άνω και κάτω όρια της ισχύς φόρτισης του οχήματος ανά χρονική μονάδα .

Παρατήρηση: Time slot είναι μια μονάδα μέτρησης χρόνου και αποτελεί το μικρότερο δυνατό διάστημα μέσα στο οποίο το εξωτερικό σύστημα θεωρείται αναλλοίωτο .Κατά συνέπεια συνδέσεις και αποσυνδέσεις οχημάτων στο δίκτυο ,αλλαγή στρατηγικής και άλλες διαφοροποιήσεις γίνονται αντιληπτές μονό σε ακέραια πολλαπλάσια του .Στην εργασία μας έχουμε θεωρήσει την διάρκεια του time slot ίση με μια ώρα .

3.4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ

Στην παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε τους τρόπους και την διαδικασία υλοποίησης των τεσσάρων στρατηγικών φόρτισής που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας ,ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους και να μπορέσουμε να τις συγκρίνουμε μεταξύ τους .Για τον λόγο αυτό έχουν γίνει ορισμένες παραδοχές στους ακόλουθους τομείς:

- Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων
Έχουμε θεωρήσει στόλο 1000 οχημάτων κοινό σε όλες της στρατηγικές στα ακόλουθα παραδείγματα
- Ισχύς φόρτισης
Υποθέτουμε ότι όλα τα οχήματα φορτίζονται με τον ίδιο τρόπο και με την ίδια ισχύ τάξεως 3,6 kW .
- Καταναλώσεις οχημάτων
Προκειμένου να υπάρξει μια πιο σφαιρική προσέγγιση του θέματος έχουμε κατηγοριοποιήσει τα οχήματα σε τρεις ομάδες με διαφορετική ημερήσια κατανάλωση ισχύος έκαστη όπως φαίνεται ακολούθως (εικόνα 3.10) :

Ομάδα οχημάτων	Κατανάλωση
1	30 % της συνολικής ισχύος του συσσωρευτή
2	20 % της συνολικής ισχύος του συσσωρευτή
3	40 % της συνολικής ισχύος του συσσωρευτή

Εικόνα 3.10:Κατηγορίες οχημάτων ανάλογα με την ημερήσια κατανάλωση τους.

- Συσσωρευτές
Θεωρούμε ότι όλα τα οχήματα έχουν συσσωρευτές χωρητικότητας 21 kW
- Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Θεωρούμε για όλες τις στρατηγικές φόρτισης την ίδια ημερήσια καμπύλη φορτίου (τυχαίας ημέρας) καθώς και την ίδια διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από φωτοβολταϊκά .Οι τιμές φαίνονται στην συνέχεια (εικόνα 3.11).

Ώρα	Ημερήσιο φορτίο (MW)
1:00	4,473911
2:00	3,96866
3:00	3,949825
4:00	3,760955
5:00	3,618389
6:00	3,642142
7:00	3,999367
8:00	4,561424
9:00	5,35154
10:00	6,243604
11:00	6,654273
12:00	6,754529
13:00	6,800946
14:00	6,733075
15:00	6,368944
16:00	6,249255
17:00	6,43118
18:00	6,939348
19:00	7,276364
20:00	7,215414
21:00	7,070229
22:00	6,400174
23:00	5,749606
24:00	5,363744

Εικόνα 3.11: Πίνακας ημερήσιας καμπύλης (καλοκαιρινού) φορτίου .

3.4.1 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ Α (DUMP CHARGING)

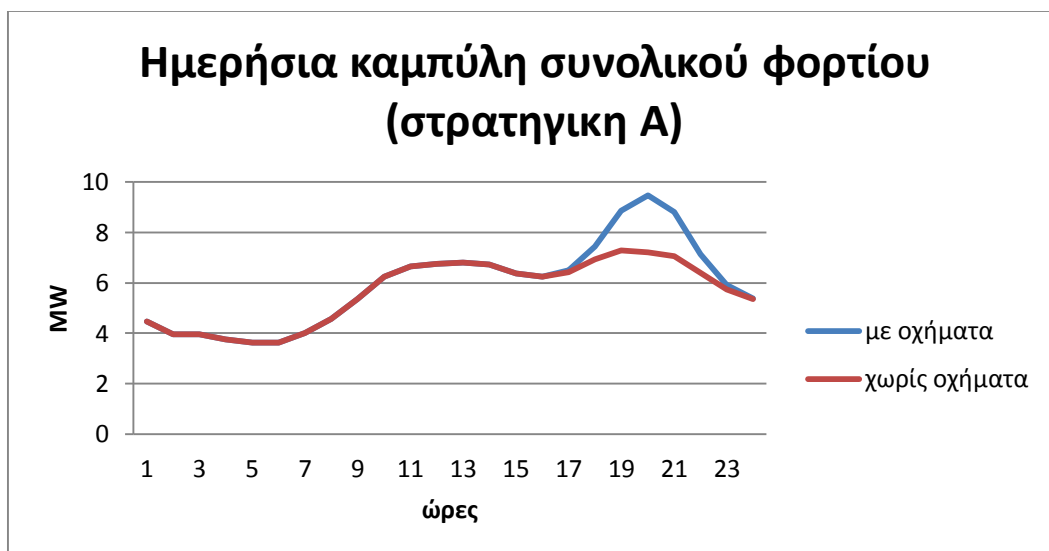
Με χρήση αυτής της στρατηγικής φόρτισης τα οχήματα τροφοδοτούνται με ενέργεια από την ώρα της επιστροφής τους (αργά το απόγευμα)μέχρι το επόμενο πρωί την ώρα αναχώρησής τους .Ενδεικτικά ακολουθεί η καμπύλη ζήτησης φορτίου για στόλο 1000 οχημάτων ,με χρήση της στρατηγικής φόρτισης Α (εικόνα 3.12) :



Εικόνα 3.12: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου στόλου 1000 ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση της στρατηγικής φόρτισης A.

Παρατηρούμε ότι η αιχμή της καμπύλης φορτίου λόγω ηλεκτρικών οχημάτων είναι γύρω στις 8 το βράδυ καθώς περίπου εκείνη την ώρα έχουν επιστρέψει οι οδηγοί και φορτίζουν τα οχήματά τους .

Ακολουθεί η τελική καμπύλη φορτίου με την συμβολή των οχημάτων στην ημερήσια ζήτηση (εικόνα 3.13):

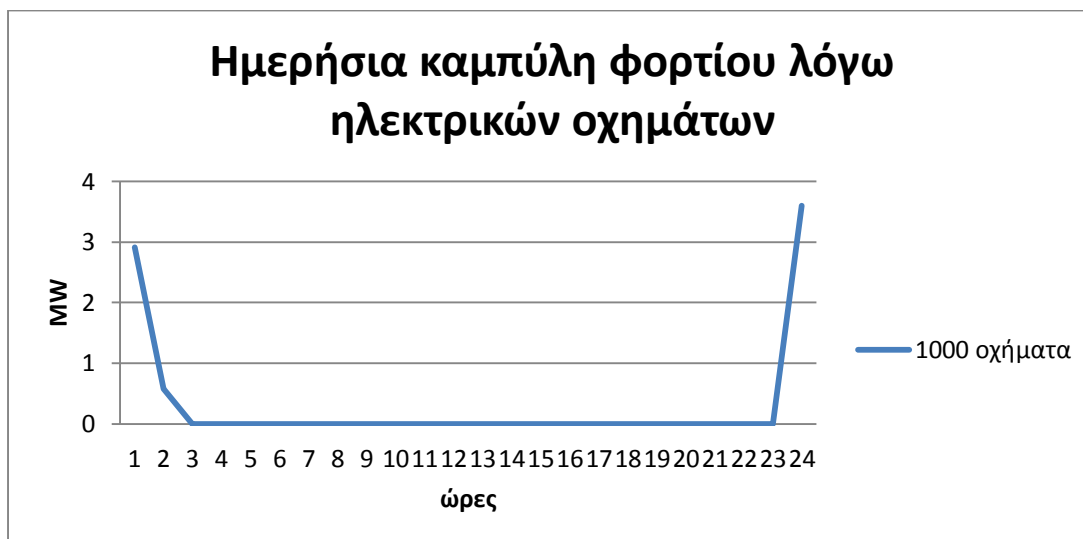


Εικόνα 3.13: Τελική ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου, με στόλο 1000 ηλεκτρικών οχημάτων και χρήση της στρατηγικής φόρτισης A.

Συμπεραίνουμε ότι με αυτή την στρατηγική φόρτισης το peak της ημερήσια καμπύλης συνολικού με φορτίου με οχήματα , συμπίπτει με την κορυφή της καμπύλης φορτίου χωρίς οχήματα . Δηλαδή όλο το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων εμφανίζεται τις ώρες αιχμής του δικτύου , επιβαρύνοντας το ακόμη περισσότερο .

3.4.2 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ Β (DUAL TARIFF)

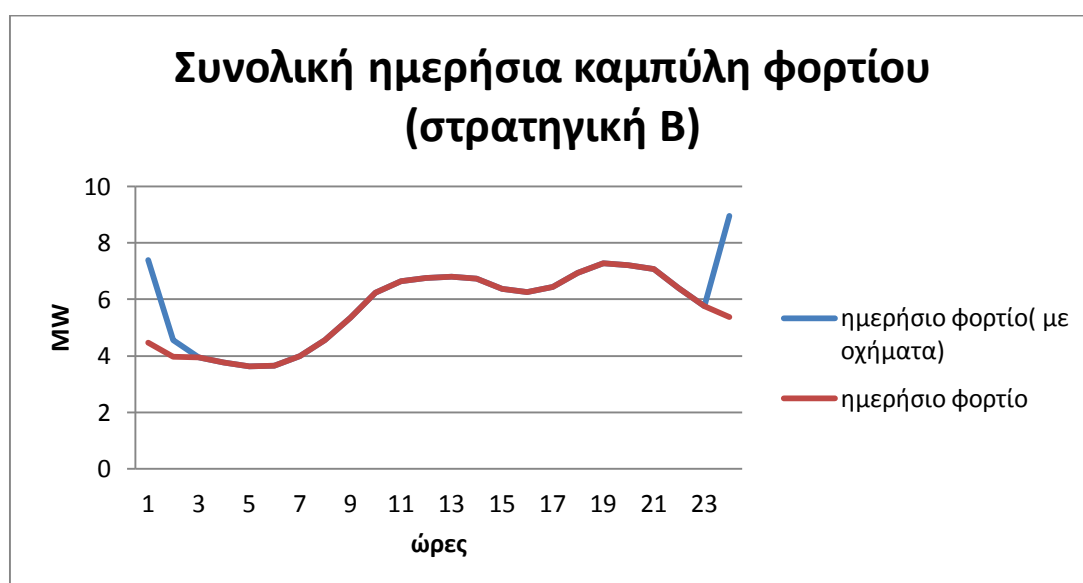
Με χρήση αυτής της στρατηγικής φόρτισης τα οχήματα τροφοδοτούνται με ενέργεια κατά την διάρκεια της νύχτας όταν η χρέωση ανά κιλοβατώρα ρεύματος είναι χαμηλότερη . Ακολουθεί η καμπύλη ζήτησης φορτίου για στόλο 1000 οχημάτων ,με χρήση της στρατηγικής φόρτισης Β (εικόνα 3.14) :



Εικόνα 3.14: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου στόλου 1000 ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση της στρατηγικής φόρτισης Β.

Παρατηρούμε ότι η αιχμή της καμπύλης φορτίου λόγω ηλεκτρικών οχημάτων είναι μετά τις 11 το βράδυ και τις πρώτες πρωινές ώρες καθώς τότε είναι εν ισχύ το βραδινό τιμολόγιο ρεύματος .

Ακολουθεί η τελική καμπύλη φορτίου με την συμβολή των οχημάτων στην ημερήσια ζήτηση (εικόνα 3.15) :



Εικόνα 3.15: Τελική ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου, με στόλο 1000 ηλεκτρικών οχημάτων και χρήση της στρατηγικής φόρτισης Β.

Συμπεραίνουμε ότι με αυτή την στρατηγική φόρτισης η ζήτηση ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων δεν επιβαρύνει επιπροσθέτως την καμπύλη φορτίου μας ,ωστόσο δημιουργεί νέα αιχμή τις ώρες φόρτισης οχημάτων .

3.4.3 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ C (SMART CHARGING)

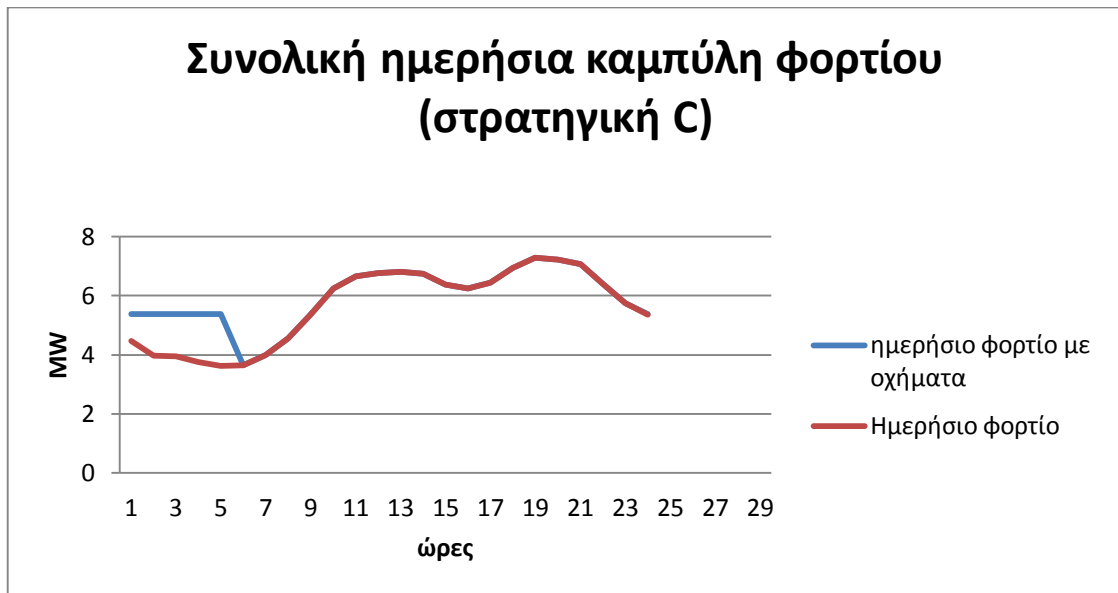
Με χρήση αυτής της στρατηγικής φόρτισης τα οχήματα τροφοδοτούνται με ενέργεια κατά τις ώρες που η καμπύλη φορτίου δεν παρουσιάζει αιχμή. Ακολουθεί η καμπύλη ζήτησης φορτίου για στόλο 1000 οχημάτων ,με χρήση της στρατηγικής φόρτισης C (εικόνα 3.16) :



Εικόνα 3.16: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου στόλου 1000 ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση της στρατηγικής φόρτισης C .

Παρατηρούμε ότι η αιχμή της καμπύλης φορτίου λόγω ηλεκτρικών οχημάτων εμφανίζεται 1:00-6:00 το πρωί καθώς τότε υπάρχει η μικρότερη ζήτηση ρεύματος.

Ακολουθεί η τελική καμπύλη φορτίου με την συμβολή των οχημάτων στην ημερήσια ζήτηση (εικόνα 3.17) :



Εικόνα 3.17: Τελική ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου, με στόλο 1000 ηλεκτρικών οχημάτων και χρήση της στρατηγικής φόρτισης C .

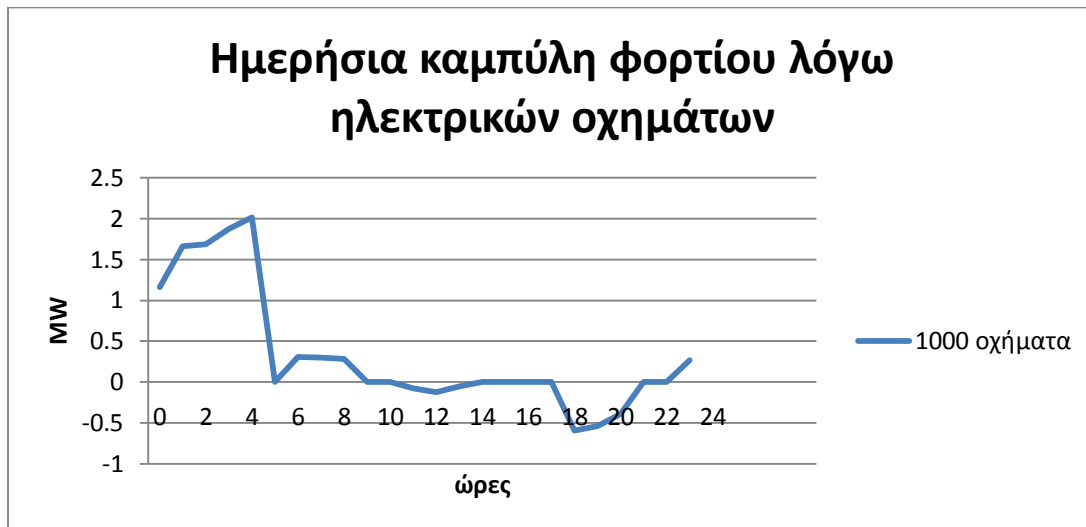
Συμπεραίνουμε ότι με αυτή την στρατηγική φόρτισης, η ζήτηση ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων δεν επιβαρύνει επιπροσθέτως την καμπύλη φορτίου μας ,αντιθέτως τείνει να σταθεροποιήσει το δίκτυο μας ,καθώς ζητώντας ενέργεια τις ώρες βύθισης φορτίου ,ευθυγραμμίζει την καμπύλη .

3.4.4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ D (VEHICLE TO GRID)

Αυτή η στρατηγική φόρτισης αποτελεί μια βελτίωση της μεθόδου smart charging . Τα οχήματα τροφοδοτούνται κατά της ώρες μη αιχμής ,αλλά παράλληλα μπορούν να προσδώσουν ενέργεια στο δίκτυο όταν αυτό είναι απαραίτητο . Η υλοποίηση της στρατηγικής αυτής επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες (όπως η χωρητικότητα και η στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή) .Στην παράγραφο αυτή ,όμως, μας ενδιαφέρει το ποσοστό συμμετοχής της μπαταρίας σε λειτουργία V2G (PERC) και για τον λόγο αυτό θα μελετήσουμε δύο περιπτώσεις μια με PERC 10 % και μια με PERC 20 %.

- PERC=10%

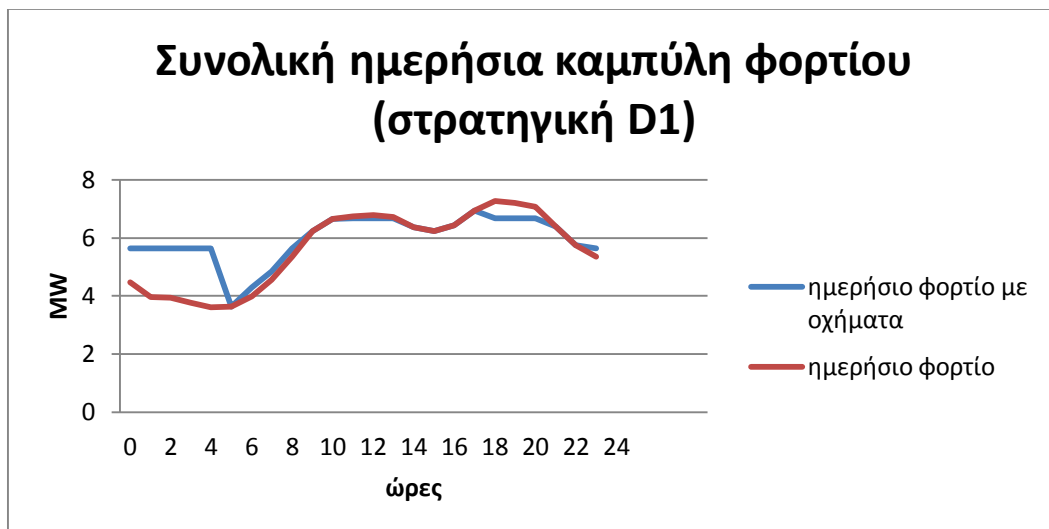
Η καμπύλη ζήτησης φορτίου για στόλο 1000 οχημάτων ,στην περίπτωση αυτή είναι (εικόνα 3.18) :



Εικόνα 3.18: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου στόλου 1000 ηλεκτρικών οχημάτων ,με χρήση της στρατηγικής φόρτισης D και PERC=10%.

Παρατηρούμε ότι η αιχμή της καμπύλης φορτίου λόγω ηλεκτρικών οχημάτων εμφανίζεται 23:00-6:00 το πρωί καθώς τότε υπάρχει η μικρότερη ζήτηση ρεύματος (και φορτίζουν) ,ενώ βύθιση εμφανίζεται 17:00-21:00 το απόγευμα αφού τότε εκφορτίζουν τα οχήματα (βοηθώντας το δίκτυο τις ώρες που παρουσιάζει peak).

Ακολουθεί η τελική καμπύλη φορτίου με την συμβολή των οχημάτων στην ημερήσια ζήτηση (εικόνα 3.19) :



Εικόνα 3.19: Τελική ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου, με στόλο 1000 ηλεκτρικών οχημάτων και χρήση της στρατηγικής φόρτισης D με PERC=10%.

Συμπεραίνουμε ότι με αυτή την στρατηγική φόρτισης, η ζήτηση ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων δεν επιβαρύνει επιπροσθέτως την καμπύλη φορτίου μας ,αντιθέτως τείνει να σταθεροποιήσει το δίκτυο μας ,καθώς ζητώντας ενέργεια τις ώρες βύθισης φορτίου και προσφέροντας στο δίκτυο τις ώρες αιχμής του, ευθυγραμμίζει την καμπύλη .

- PERC=20%

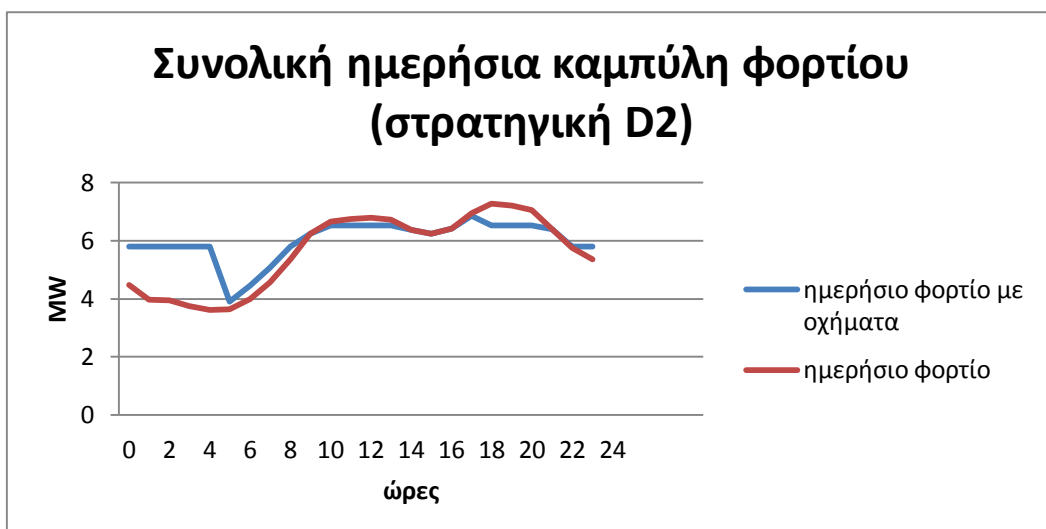
Η καμπύλη ζήτησης φορτίου για στόλο 1000 οχημάτων ,στην περίπτωση αυτή είναι (εικόνα 3.20):



Εικόνα 3.20: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου στόλου 1000 οχημάτων ,με χρήση της στρατηγικής φόρτισης D και PERC=20%.

Παρατηρούμε ότι η αιχμή της καμπύλης φορτίου λόγω ηλεκτρικών οχημάτων εμφανίζεται 23:00-6:00 το πρωί καθώς τότε υπάρχει η μικρότερη ζήτηση ρεύματος (και φορτίζουν) ,ενώ πιο έντονη βύθιση από πρίν εμφανίζεται 17:00-21:00 το απόγευμα αφού τότε εκφορτίζουν τα οχήματα (βοηθώντας το δίκτυο τις ώρες που παρουσιάζει peak).

Ακολουθεί η τελική καμπύλη φορτίου με την συμβολή των οχημάτων στην ημερήσια ζήτηση (εικόνα 3.21):



Εικόνα 3.21: Τελική ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου με στόλο 1000 ηλεκτρικών οχημάτων και χρήση της στρατηγικής φόρτισης D με PERC=20%.

Συμπεραίνουμε ότι με αυτή την στρατηγική φόρτισης, η ζήτηση ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων δεν επιβαρύνει επιπροσθέτως την καμπύλη φορτίου μας ,αντιθέτως τείνει να σταθεροποιήσει το δίκτυο μας ,καθώς ζητώντας ενέργεια τις ώρες βύθισης φορτίου και προσφέροντας στο δίκτυο τις ώρες αιχμής του, ευθυγραμμίζει την καμπύλη .

Τέλος παρατηρούμε ότι η αύξηση το ποσοστού του συσσωρευτή των οχημάτων σε εφαρμογές V2G (PERC=20%) ευθυγραμμίζει ακόμη περισσότερη την καμπύλη φορτίου εξυγιαίνοντας το δίκτυο μας.

Να σημειωθεί εδώ ότι παρατηρείται ένα σημείο ελαχίστου γύρω στις 6 το πρωί και στις δύο περιπτώσεις .Αυτό οφείλεται στους περιορισμούς της προσομοίωσης στο Matlab , καθώς την ώρα εκείνη οι συσσωρευτές του στόλου είναι πλήρως φορτισμένοι ,οπότε για να συνεχιστεί η φόρτιση τους πρέπει να αναχωρήσουν ορισμένα οχήματα (τυχαίο πλήθος από όλες τις κατηγορίες) και αφού κινηθούν να μπορέσουν να απορροφήσουν ισχύ .

4 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ

4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

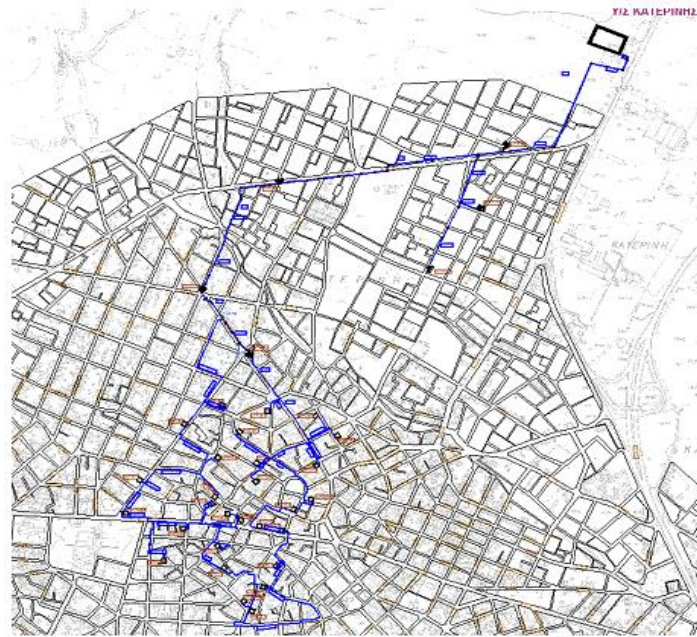
Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί πως επηρεάζεται το ενεργειακό σύστημα της Κατερίνης από την διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων ,εναλλάσσοντας τρόπους φόρτισης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι-σενάρια φόρτισης:

- Στρατηγική A: Μη ελεγχόμενη φόρτιση (Dumb charging)
- Στρατηγική B: Ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging)
- Στρατηγική C: Έξυπνη φόρτιση (Smart charging)
- Στρατηγική D: Φόρτιση με δυνατότητα μεταφοράς ενέργειας από το Όχημα στο Δίκτυο (Vehicle-to-grid)

Η υλοποίηση στρατηγικών θεωρούμε οι γίνεται την ίδια τυχαία μέρα του χρόνου και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (SOC_{out}) μετράται στις 7 το πρωί (πριν την αναμενόμενη αναχώρηση των οδηγών) . Ο αριθμός του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων κυμαίνεται από 0 έως 2000 ενώ θεωρούμε ότι η διείσδυση των ΑΠΕ (στην περίπτωση μας φωτοβολταϊκή ενέργεια) κατά τη μελέτη μπορεί να είναι από 0 έως και 30 MW.

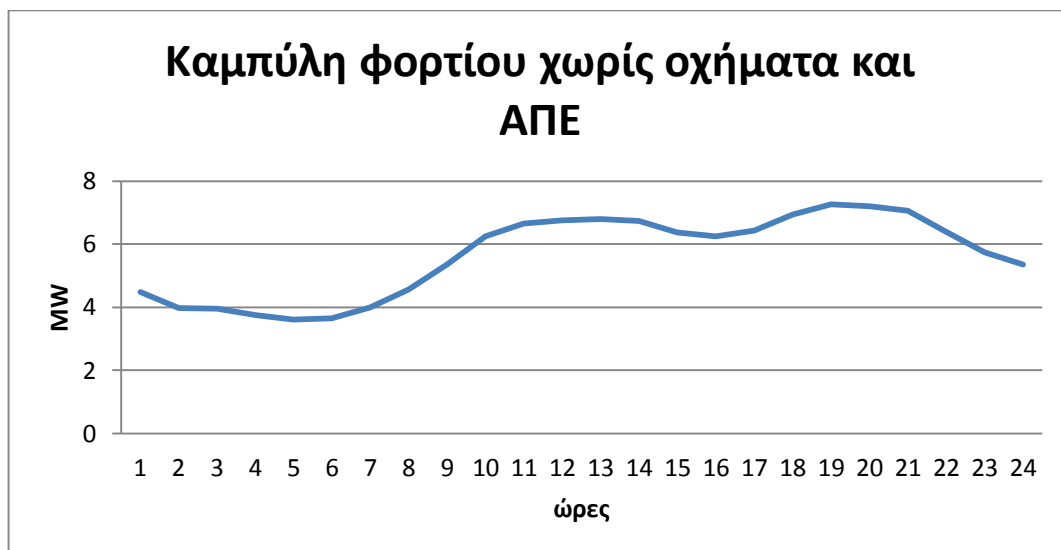
4.1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΤ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ

Στην παρούσα εργασία ,θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα από γραμμή διανομής ,που αποτελεί τμήμα του αστικού δικτύου διανομής μέσης τάσης της Κατερίνης (εικόνα 4.1) . Αυτή περιλαμβάνει 35 υποσταθμούς φορτίου ΜΤ/ΧΤ με τις ακόλουθες ονομαστικές ισχύεις: 3 των 160KVA, 1 των 250KVA, 3 των 400KVA, 1 των 500KVA, 22 των 630KVA, 1 των 100kVA και 4 των 1260KVA. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του κεντρικού μετασχηματιστή (ΥΤ/ΜΤ) της γραμμής είναι 25MVA.



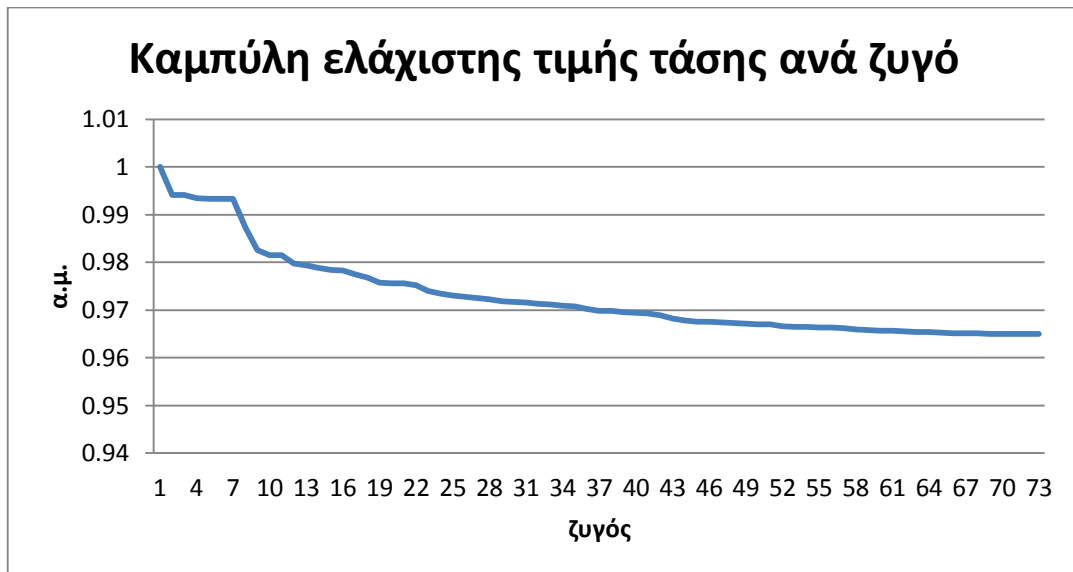
Εικόνα 4.1: Γραμμή διανομής μέσης τάσης του δικτύου της Κατερίνης (με μπλε χρώμα)

Η ημερήσια καμπύλη φορτίου , για την γραμμή αυτή ,χωρίς επήρεια οχημάτων ή εισροή ισχύος από φωτοβολταϊκά φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (εικόνα 4.2) και έχει αιχμή ζήτησης 7,276 MW (γύρω στις 7 το απόγευμα) .

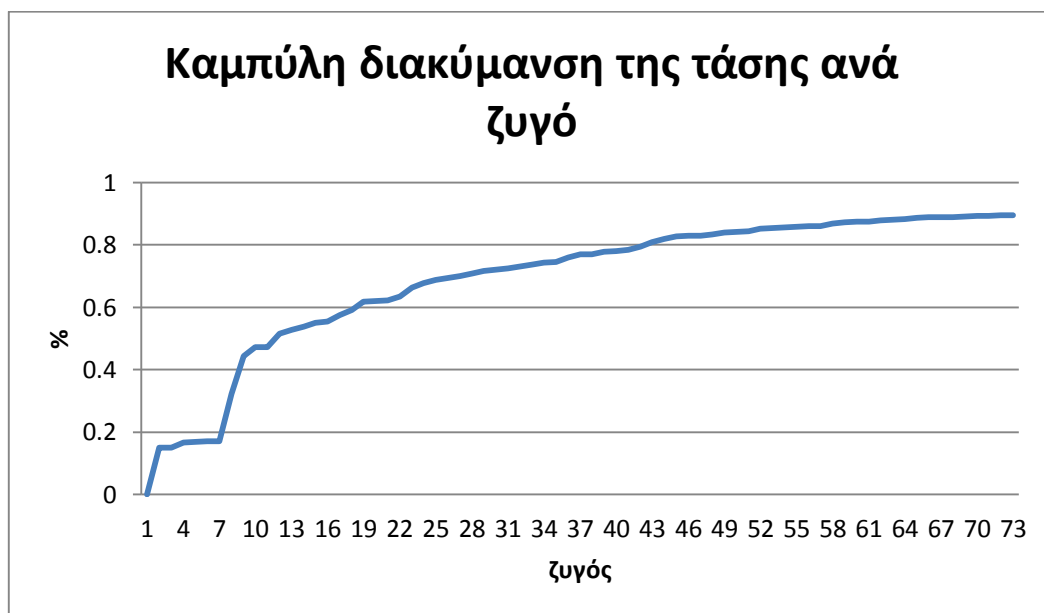


Εικόνα 4.2 : 24ωρη καμπύλη φορτίου για το προς μελέτη τμήμα του δικτύου της Κατερίνης χωρίς οχήματα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .

Στις δύο ακόλουθες εικόνες παρουσιάζονται τα στοιχεία του προφίλ της τάσης ,δηλαδή η ελάχιστη τιμή (εικόνα 4.3) και η διακύμανση της τάσης ανά ζυγό (εικόνα 4.4) .

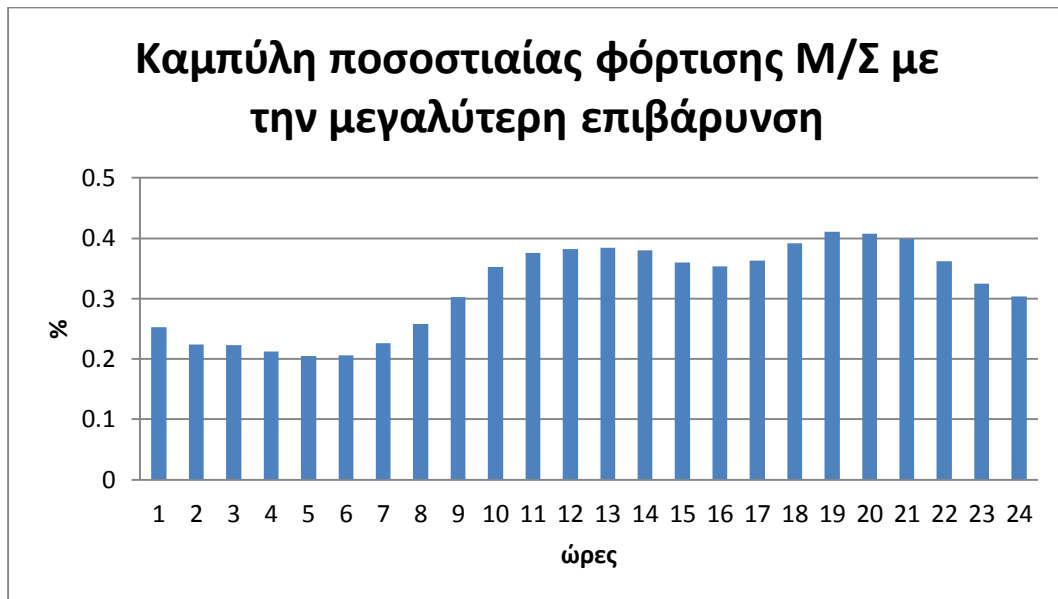


Εικόνα 4.3: Καμπύλη ελάχιστης τιμής τάσης ανά ζυγό υπολογισμένης σε σύστημα ανά μονάδα, για το προς μελέτη τμήμα του δικτύου της Κατερίνης χωρίς οχήματα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .



Εικόνα 4.4: Καμπύλη ποσοστιαίας διακύμανσης της τάσης ανά ζυγό , για το προς μελέτη τμήμα του δικτύου της Κατερίνης χωρίς οχήματα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .

Όσον αφορά στην φόρτιση του δικτύου της Κατερίνης, η Εικόνα 4.5 ,απεικονίζει τη φόρτιση του μετασχηματιστή με τη μεγαλύτερη επιβάρυνση ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του.



Εικόνα 4.5: Καμπύλη φόρτισης του Μ/Σ με τη μεγαλύτερη επιβάρυνση (ποσοστό επί της ονομαστικής ισχύος)

Εδώ θα πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο παραδοχές:

- i. Οι ανανεώσιμες πηγές στις οποίες αναφερόμαστε είναι φωτοβολταϊκές πηγές ισχύος .Αυτό σημαίνει ότι συνεισφέρουν στο δίκτυο μόνο κατά την διάρκεια της ημέρας με μέγιστη τιμή γύρω στην μια το μεσημέρι . Για τις ανάγκες των προσομοιώσεων θεωρήθηκε ένα ενδεικτικό προφίλ φωτοβολταϊκής παραγωγής (εικόνα 4.6) .Η ωριαία παραγωγή καθορίζεται από το αντίστοιχο ποσοστό παραγωγής της εικόνας 4.6 επί την εξεταζόμενη φωτοβολταϊκή παραγωγή .



Εικόνα 4.6: Καμπύλη ποσοστιαίας ημερήσιας ηλιοφάνειας.

- ii. Ως τιμή αναφοράς για τον υπολογισμό των απωλειών συστήματος ανά στρατηγική φόρτισης ,θα ληφθεί η τιμή των απωλειών χωρίς οχήματα και ΑΠΕ η οποία είναι 2,8839 MW

4.1.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Στην εργασία αυτή θα μελετήσουμε την επίδραση της διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα υπαρκτό δίκτυο ,το δίκτυο της Κατερίνης .Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να προσδιορίσουμε τα χαρακτηριστικά του στόλου που θα χρησιμοποιηθεί. Ο στόλος αποτελείται από οχήματα κατηγορίας M1 (επιβατικά ,τετράτροχα οχήματα χωρητικότητας συνολικά 9 ατόμων) με μέση κατανάλωση 0,15 kWh /km . Η χωρητικότητα της μπαταρίας τους είναι 21 kW ,ενώ η κατανάλωση τους χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες ,ώστε η προσομοίωση να είναι ρεαλιστική προσέγγιση της πραγματικότητας :

- i. Οχήματα με μέση ημερήσια διανυόμενη απόσταση 30km
- ii. Οχήματα με μέση ημερήσια διανυόμενη απόσταση 40km
- iii. Οχήματα με μέση ημερήσια διανυόμενη απόσταση 50km

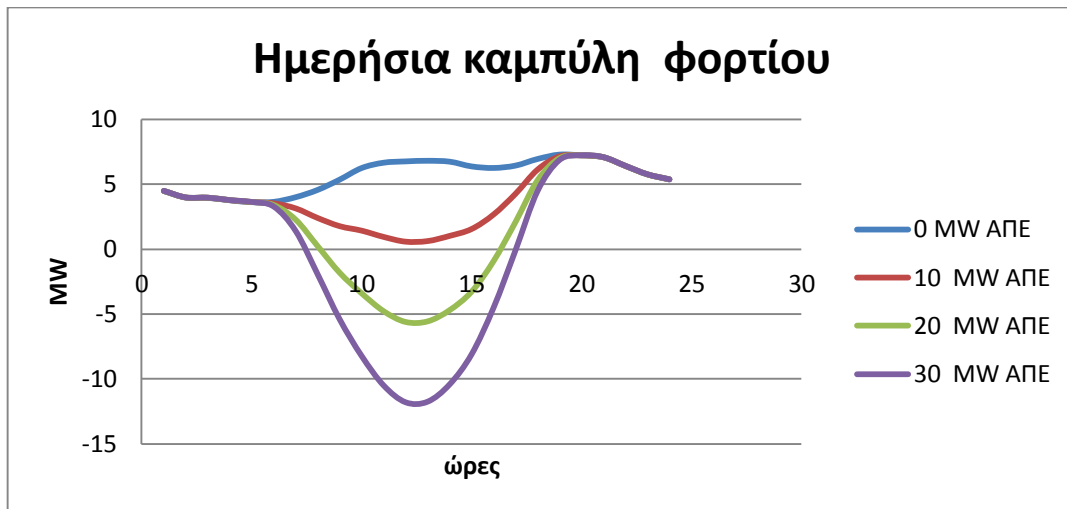
Η φόρτιση γίνεται από μονοφασική οικιακή παροχή ,με μέγιστη ισχύ 3,6 kW ,ενώ οι απώλειες φόρτισης αγγίζουν το 85 % της χωρητικότητας του συσσωρευτή .

4.2 ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Σε αυτή την παράγραφο θα μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος της Κατερίνης χωρίς προσθήκη ηλεκτρικών οχημάτων . Η μελέτη θα κινηθεί σε τέσσερις άξονες :

- Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 4.7) φαίνεται η ημερήσια καμπύλη φορτίου (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) χωρίς την προσθήκη ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ από φωτοβολταϊκά κάθε φορά .

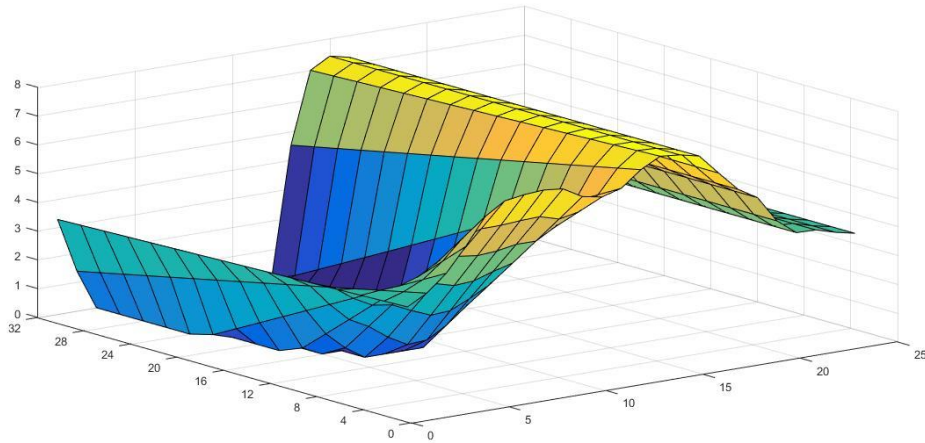


Εικόνα 4.7: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου χωρίς την προσθήκη ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ (0, 10, 20, 30 MW αντίστοιχα).

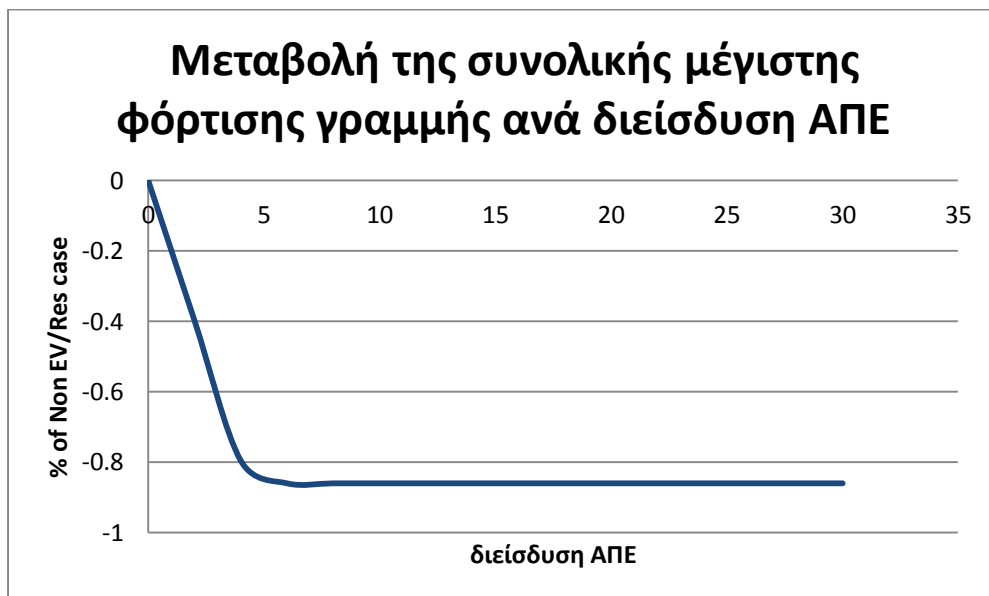
Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη ΑΠΕ στο δίκτυο, η καμπύλη φορτίου παρουσιάζει κάποια βύθιση τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας (07:00-16:00 περίπου) καθώς οι φωτοβολταϊκές μονάδες συνεισφέρουν στο δίκτυο μειώνοντας την ζήτηση ενέργειας από συμβατικές μεθόδους ηλεκτροπαραγωγής, τις ώρες λειτουργίας τους. Η βύθιση γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται η παραγόμενη ισχύς των ΑΠΕ, οδηγώντας σε αρνητικές τιμές στο διάγραμμα για διείσδυση μεγαλύτερη των 10 MW.

- Φόρτιση γραμμής

Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζεται η συνολική φόρτιση γραμμής του δικτύου ανά ώρα και ανά διείσδυση ΑΠΕ (εικόνα 4.8). Παρατηρούμε ότι η μέγιστη φόρτιση ταυτίζεται χρονικά με τις ώρες αιχμής του ημερήσιου φορτίου, καθώς τότε οι γραμμές επιβαρύνονται περισσότερο. Ακόμη, γίνεται εμφανές από την εικόνα 4.9 ότι η ποσοστιαία μεταβολή της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών ανά διείσδυση ΑΠΕ διατηρείται κάτω του 1%, γεγονός αναμενόμενο, καθώς η αιχμή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών διατάξεων (γύρω στη 1 το μεσημέρι) δεν συμπίπτει χρονικά με την αιχμή του ημερήσιου φορτίου που εμφανίζεται αργά τις απογευματινές ώρες (η φόρτιση γραμμών επηρεάζεται ελάχιστα από την διείσδυση ισχύος ΑΠΕ).



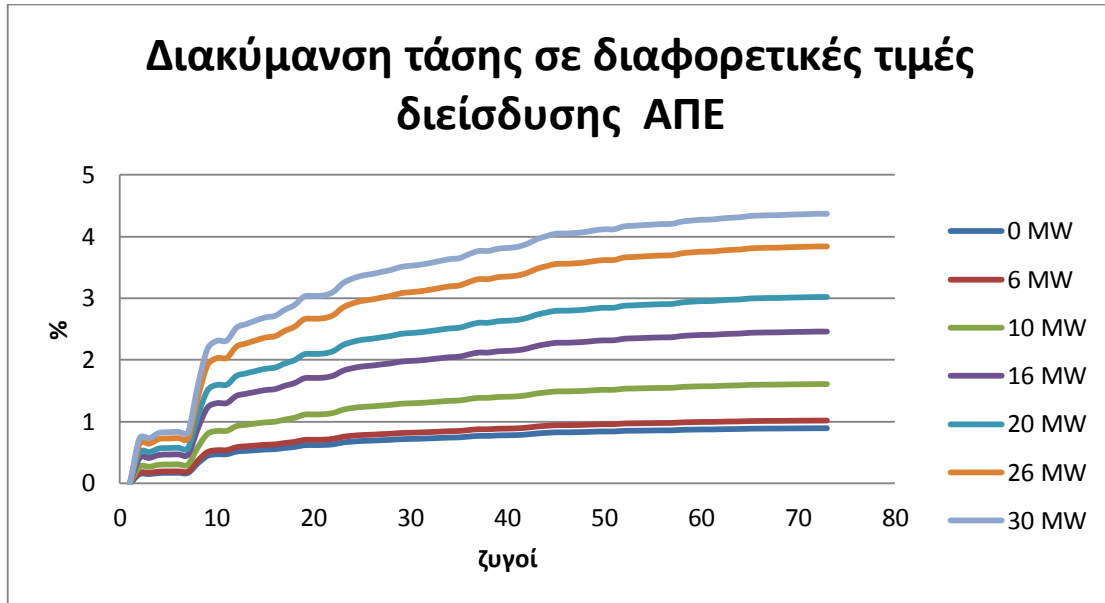
Εικόνα 4.8: Καμπύλη της η συνολικής φόρτισης των γραμμών του δικτύου ανά ώρα και ανά διείσδυση ΑΠΕ ,για μηδενικό στόλο ηλεκτρικών οχημάτων .



Εικόνα 4.9:Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για διαφορετικές τιμές διείσδυσης ΑΠΕ και μηδενικό στόλο ηλεκτρικών οχημάτων .

- Διακύμανση και προφίλ της τάσης

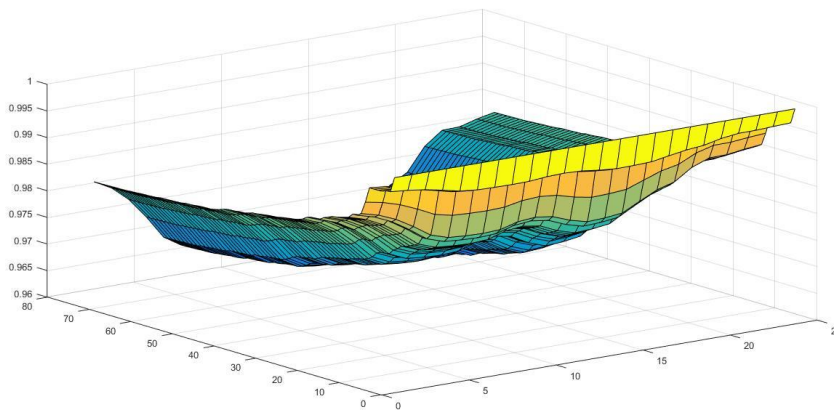
Στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 4.10) φαίνεται η διακύμανση της τάσης ζυγών (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) χωρίς την προσθήκη ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετική διείσδυση ισχύος από φωτοβολταϊκά κάθε φορά .



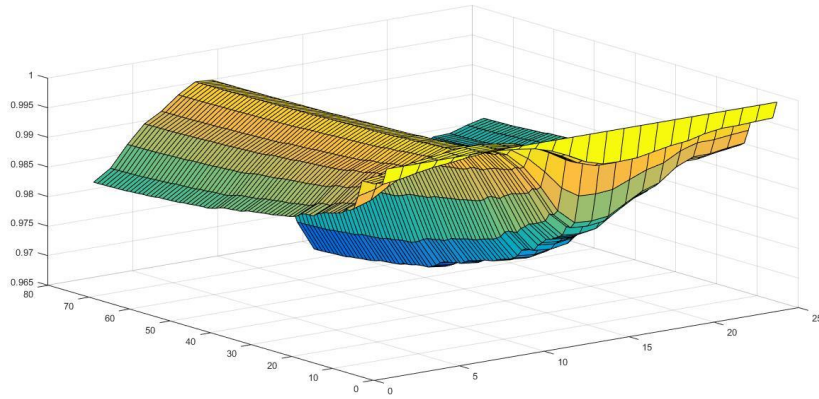
Εικόνα 4.10: Καμπύλες διακύμανσης τάσης χωρίς την προσθήκη ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετική δειόδυση ΑΠΕ (0 ,6 ,10,16 ,20,26 ,30 MW αντίστοιχα) .

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται αυτή η ισχύς ,αυξάνεται και η τάση των ζυγών στους οποίους συνδέονται οι ΦΒ μονάδες . Σαν αποτέλεσμα μεγαλώνει η διακύμανση μέχρι να βγει εκτός ορίου (3 %) γύρω στα 20 MW ΑΠΕ .

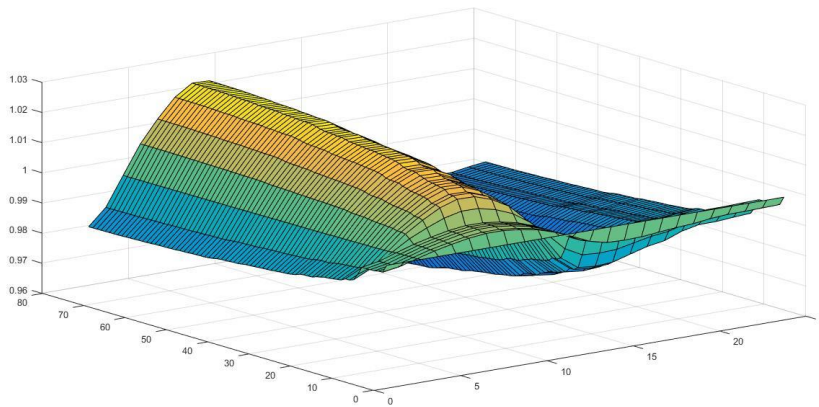
Αντιστοίχως ακολουθούν τα διαγράμματα για το προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της ημέρας για 4 διαφορετικές τιμές δειόδυσης ΑΠΕ (εικόνες 4.11 - 4.14) .



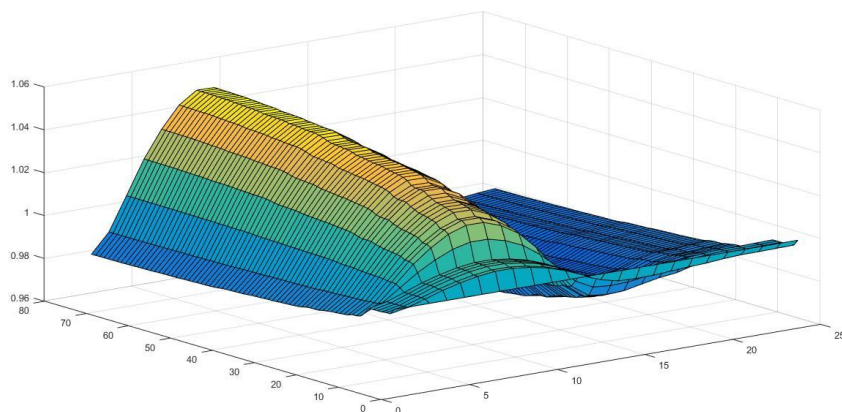
Εικόνα 4.11: Καμπύλη του προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της ημέρας για 0 MW ΑΠΕ και μηδενικό στόλο ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 4.12 : Καμπύλη του προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της ημέρας για 10 MW ΑΠΕ και μηδενικό στόλο ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 4.13: Καμπύλη του προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της ημέρας για 20 MW ΑΠΕ και μηδενικό στόλο ηλεκτρικών οχημάτων.



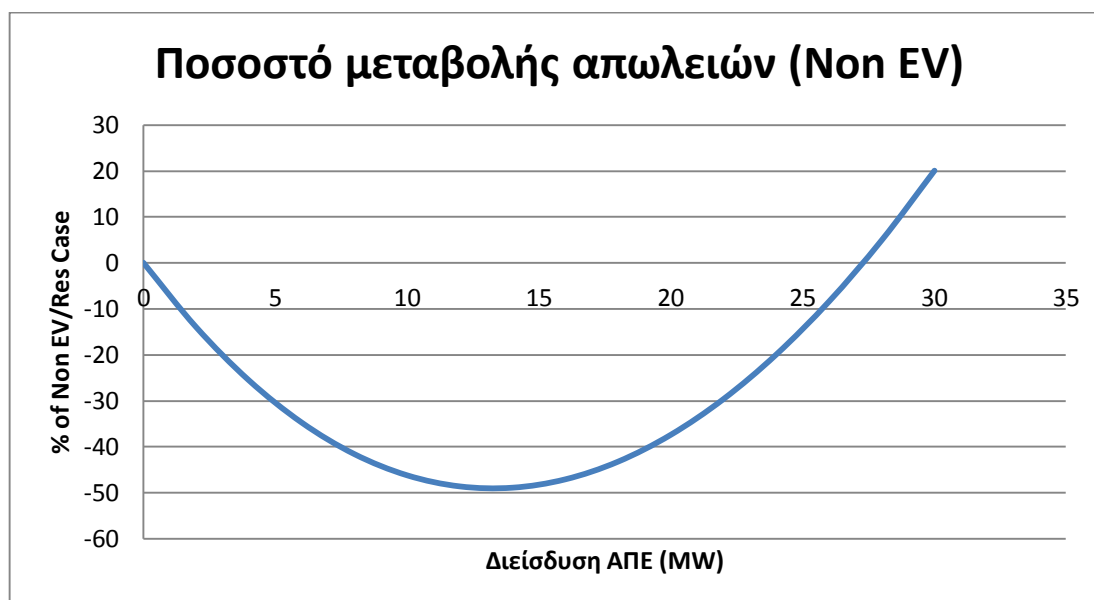
Εικόνα 4.14: Καμπύλη του προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της ημέρας για 30 MW ΑΠΕ και μηδενικό στόλο ηλεκτρικών οχημάτων.

Από τις τέσσερις άνωθεν εικόνες φαίνεται ότι το προφίλ τάσης ,παρότι αυξάνεται με την εισροή ισχύος από ΦΒ ,παραμένει εντός ορίων ($0,95 < \text{voltage profile} < 1,05$)

,οπότε και η μέγιστη επιτρεπτή τιμή διείσδυσης ΑΠΕ θα καθοριστεί μόνο από την διακύμανση τάσης .

- Απώλειες δικτύου (συστήματος)

Οι απώλειες του δικτύου ,χωρίς προσθήκη ηλεκτρικών οχημάτων , απεικονίζονται στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 4.15) :



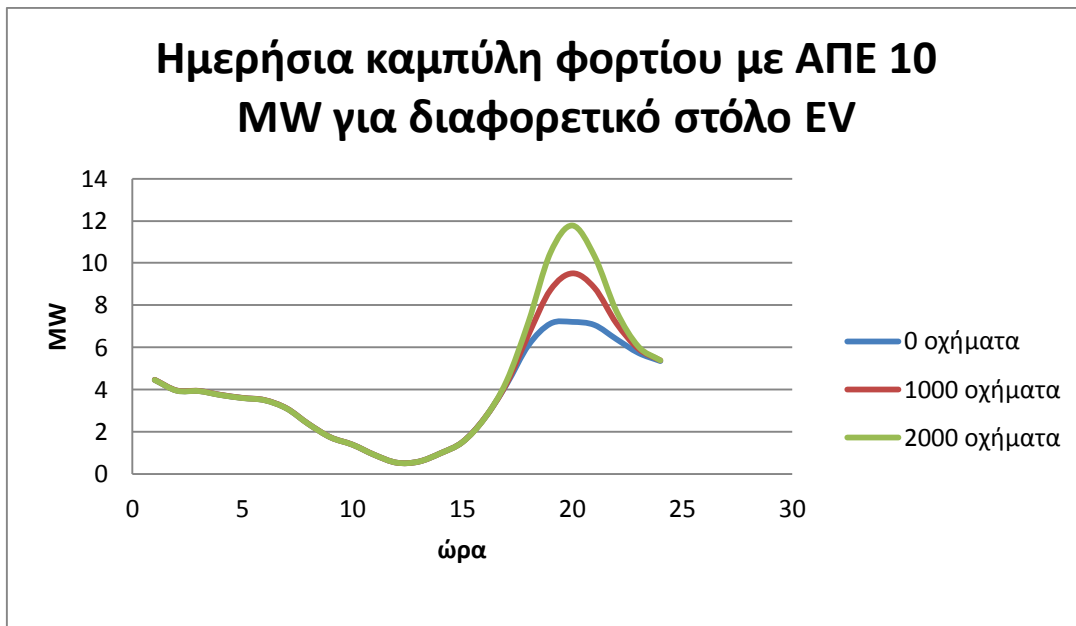
Εικόνα 4.15: Καμπύλη απωλειών δικτύου χωρίς την προσθήκη ηλεκτρικών οχημάτων

Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο δίκτυο μας οι απώλειες του συστήματος τείνουν να μειωθούν ,μέχρι περίπου τα 14 MW όπου και γίνονται ελάχιστες .Αυτό συμβαίνει γιατί η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά (διεσπαρμένες μονάδες) ,επιστρέφει κατά ένα μέρος στο (ανάντι) άνωθεν δίκτυο ,ενώ η υπόλοιπη καταναλώνεται τοπικά ,οπού είναι απαραίτητη , με αποτέλεσμα η διανυόμενη απόσταση της μέχρι το σημείο ζήτησης (άρα και οι απώλειες) να μειώνονται . Από την διείσδυση 14 MW οι απώλειες αυξάνονται ,φτάνοντας ,μετά τα 26 MW, επίπεδα μεγαλύτερα ακόμη και εκείνων χωρίς καθόλου ΑΠΕ ,διότι η παραγόμενη τοπικά ενέργεια δεν μπορεί πλέον να απορροφηθεί και επιστρέφει όλη στο δίκτυο.

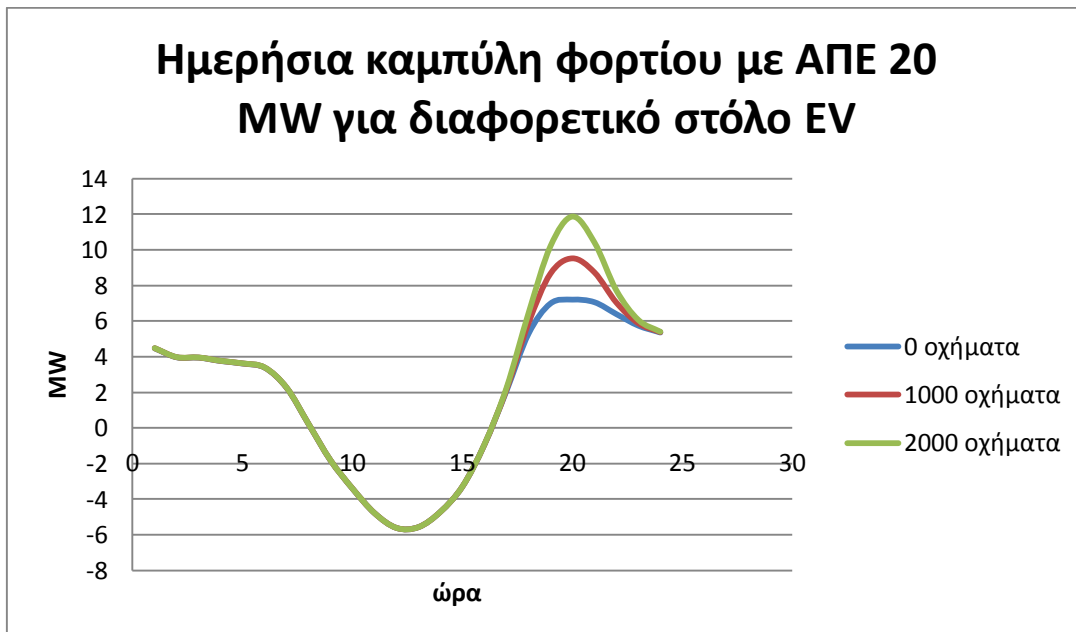
4.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (DUMB CHARGING)

- Ημερήσια καμπύλη φορτίου

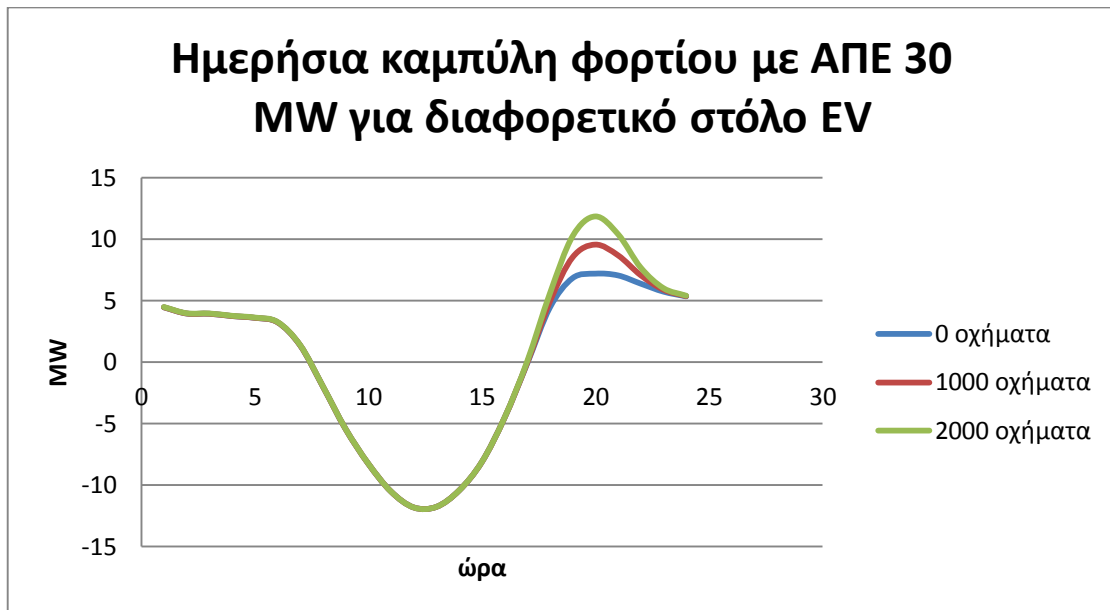
Στα ακόλουθα διαγράμματα (εικόνα 4.16 – 4.18) φαίνεται η ημερήσια καμπύλη φορτίου (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) με την προσθήκη στόλου διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων ανά διείσδυση ΑΠΕ .



Εικόνα 4.16: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 10 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική Α.

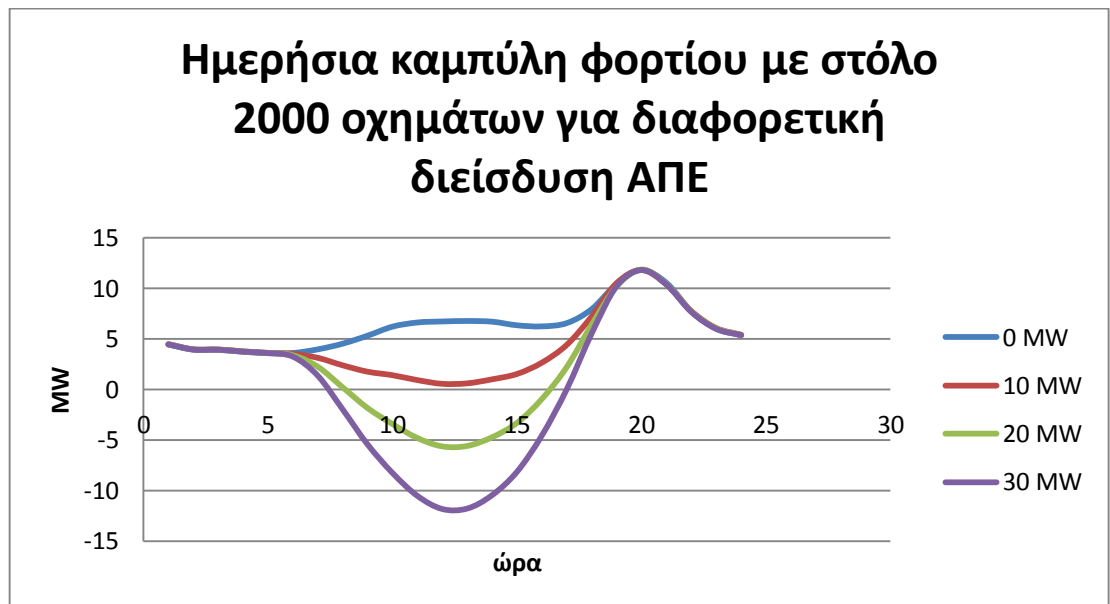


Εικόνα 4.17: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική Α.



Εικόνα 4.18 : Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 30 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική Α.

Παρατηρούμε ότι στην στρατηγική αυτή (dumb charging), όπου τα οχήματα φορτίζουν όλα ταυτόχρονα κατά την επιστροφή τους , η αιχμή της καμπύλης φορτίου τους συμπίπτει με την αιχμή του ημερήσιου φορτίου δικτύου , επιβαρύνοντας το . Μάλιστα αυξάνοντας τον αριθμό των οχημάτων , μεγαλώνει ακόμη πιο πολύ η κορυφή του διαγράμματος (ανεξαρτήτως προστιθέμενων μονάδων ΑΠΕ) καθώς απαιτείται περισσότερη ισχύς για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του στόλου .



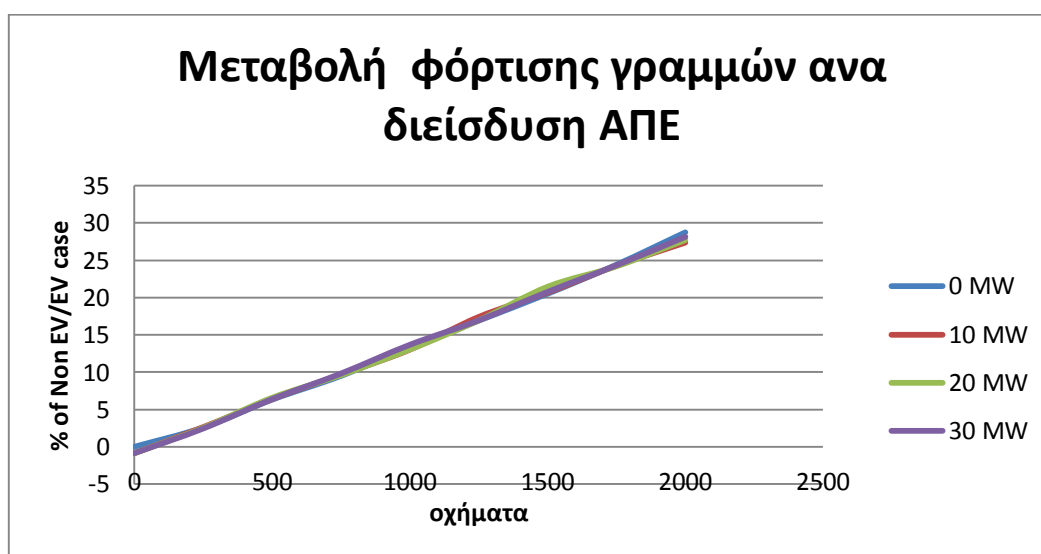
Εικόνα 4.19: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (0,10,20,30 MW) – στρατηγική Α.

Αντιστοίχως για στόλο ίδιου πλήθους οχημάτων και διαφορετική διείσδυση ενέργειας από φωτοβολταϊκά διαμορφώνεται το άνωθεν διάγραμμα (εικόνα 4.19) από το οποίο παρατηρούμε ότι η καμπύλη του φορτίου επιβαρύνεται ανάλογα με την προστιθέμενη αυτή ενέργεια .Η κοιλία σημειώνεται τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας (07:00-16:00) και παίρνει αρνητικές τιμές για διείσδυση ισχύος μεγαλύτερη των 10 MW .

- Φόρτιση γραμμής

Η μεταβολή φόρτισης των γραμμών του δικτύου (της στρατηγικής Α συγκριτικά με το σενάριο ύπαρξης μηδενικών οχημάτων και ΑΠΕ) , για διάφορες τιμές διείσδυσης ΑΠΕ, μέχρι την προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων, φαίνονται στην εικόνα 4.20 .

Παρατηρούμε , ότι με την αύξηση του αριθμού των αυτοκινήτων , μεγεθύνεται ανάλογα (γραμμική σχέση) η φόρτιση των γραμμών ,εξίσου ,για οποιαδήποτε τιμή διείσδυσης ΑΠΕ .Οι φωτοβολταϊκές διατάξεις δεν έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην προς εξέταση παράμετρο ,καθώς η αιχμή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας τους (γύρω στη 1 το μεσημέρι) δεν συμπίπτει χρονικά με την αιχμή του ημερήσιου φορτίου που εμφανίζεται αργά τις απογευματινές ώρες.

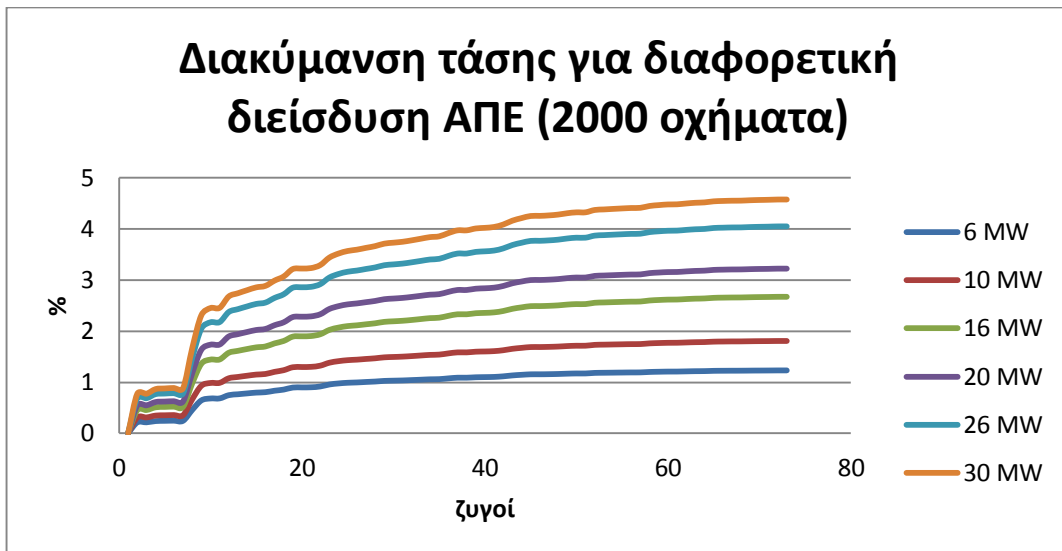


Εικόνα 4.20: Καμπύλες φόρτισης γραμμών δικτύου για στόλο 1000 οχημάτων και διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (0,10,20,30) – στρατηγική Α .

- Διακύμανση και προφίλ τάσης

Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η διακύμανση της τάσης δικτύου (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) με προσθήκη διαφορετικού στόλου ηλεκτρικών οχημάτων και διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ από φωτοβολταϊκά κάθε φορά .

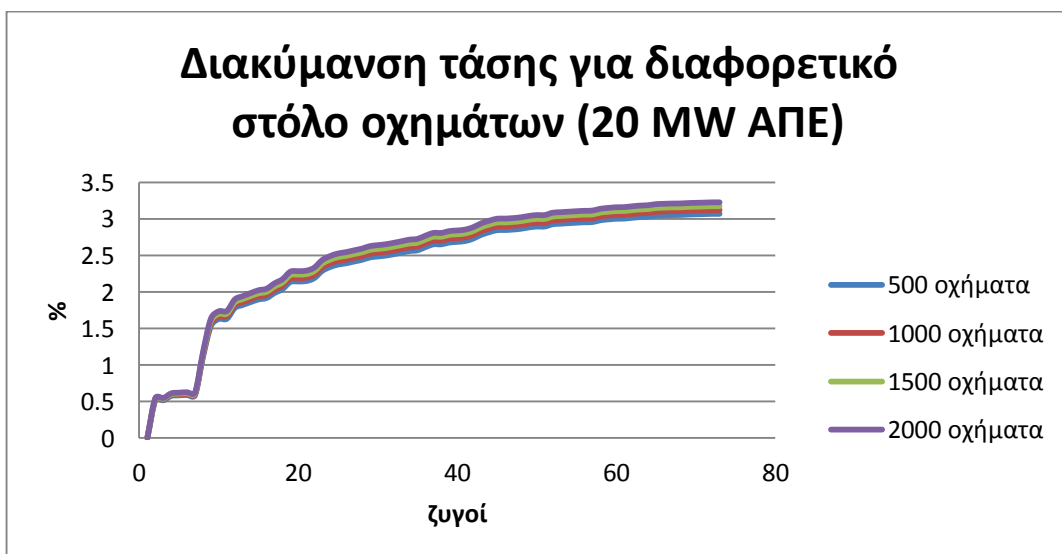
Αρχικά θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται (η διακύμανση) από την διείσδυση επιπρόσθετων μονάδων ΑΠΕ ,για τυχαίο πλήθος στόλου (εικόνα 4.21).



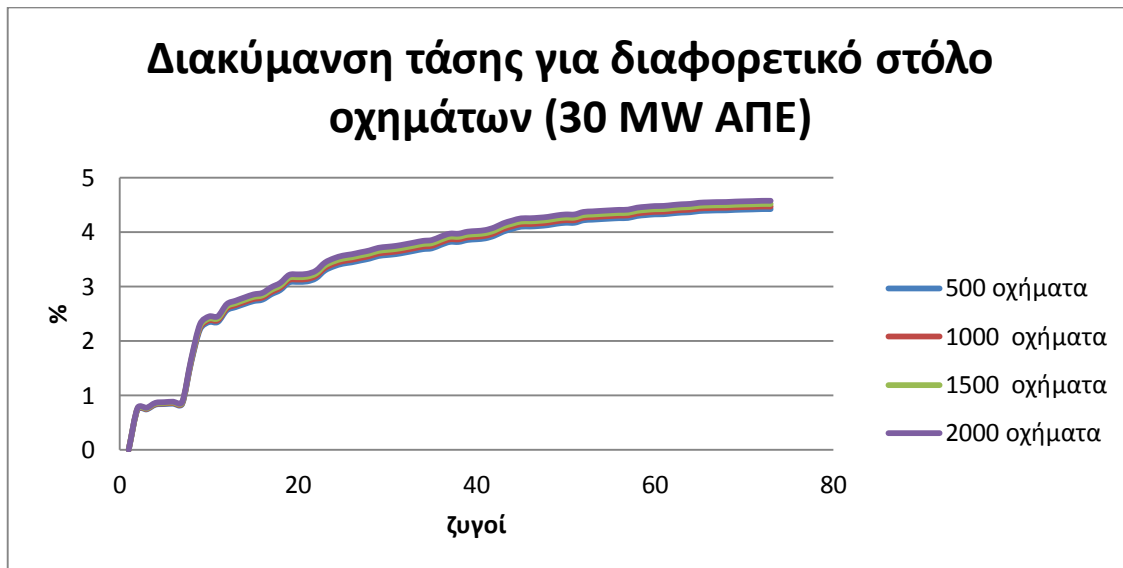
Εικόνα 4.21: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (6,10,16,20,26,30 MW) – στρατηγική Α.

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η προδιδόμενη ισχύς από ΑΠΕ ,για τον ίδιο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων , αυξάνεται και η τάση των ζυγών στους οποίους συνδέονται αυτές οι φωτοβολταϊκές μονάδες . Σαν αποτέλεσμα, η διακύμανση τάσης, ανέρχεται σε υψηλότερα επίπεδα (γεγονός αναμενόμενο ,καθώς αυτή η προσαύξηση γίνεται όπου έχουμε ήδη μέγιστο φορτίο δικτύου) μέχρι να θεωρηθεί εκτός ορίου για τιμές μεγαλύτερες του 3 % . Αυτό συμβαίνει για στόλο 500 οχημάτων στα 20 MW διεισδυσίας ενέργειας , για στόλο 1000 οχημάτων στα 19 MW, για στόλο 1500 οχημάτων στα 18 MW και για στόλο 2000 οχημάτων στα 17 MW (εικόνα 4.21).

Ακολούθως θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται η διακύμανση τάσης δικτύου από το μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων για κοινή τιμή διείσδυσης ΑΠΕ (εικόνες 4.22 – 4.23).



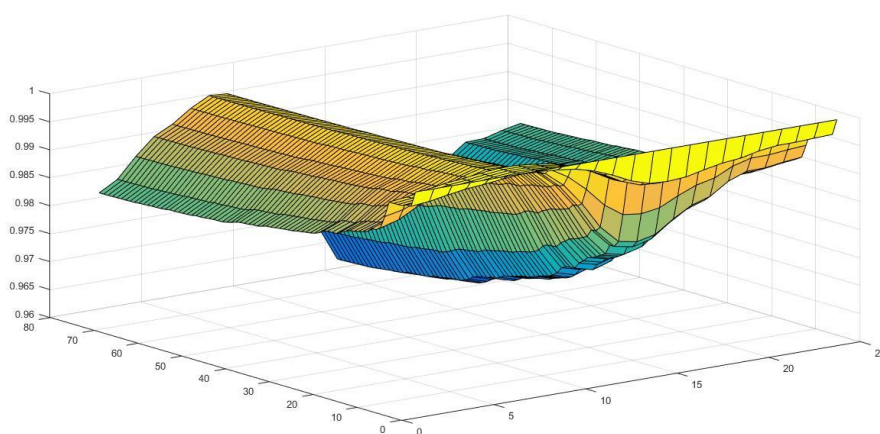
Εικόνα 4.22: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (500,1000,1500,2000 οχήματα) – στρατηγική Α.



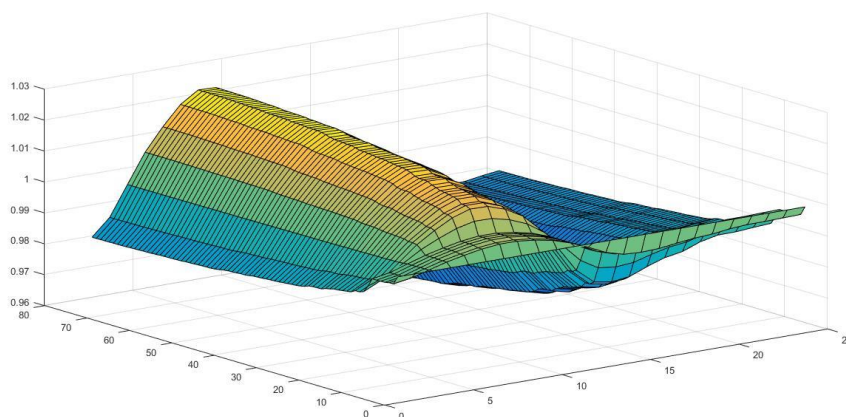
Εικόνα 4.23: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με διείσδυση 30 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (500,1000,1500,2000 οχήματα) – στρατηγική Α.

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων ,για την ίδια τιμή διείσδυσης ΑΠΕ ,αυξάνεται και η διακύμανση της τάσης ,γεγονός αναμενόμενο ,καθώς το επιπλέον φορτίο από αυτά ,προστίθεται όπου έχουμε ήδη μέγιστο φορτίο δικτύου, ενώ η ακόμη μεγαλύτερη προσθήκη ισχύος από φωτοβολταϊκά οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερη άνοδο . Σε τιμές διείσδυσης ΑΠΕ κοντά στα 20 MW βρισκόμαστε εκτός ορίου διακύμανσης (3 %) για κάθε μέγεθος στόλου οχημάτων .

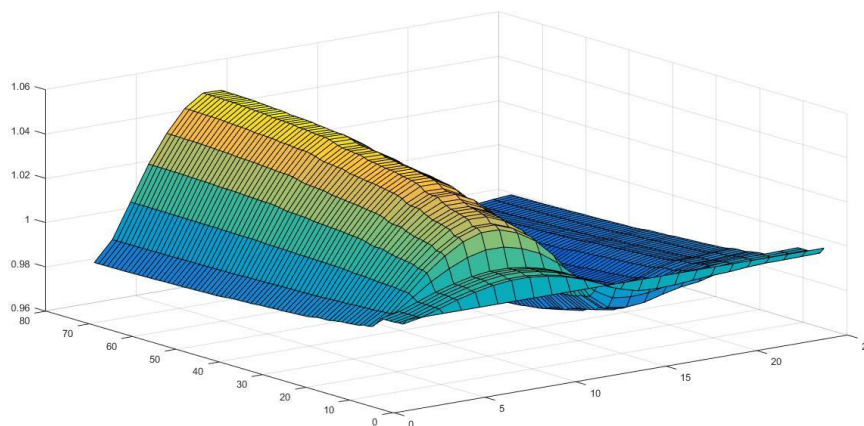
Ακολουθούν τα τρισδιάστατα διαγράμματα για το προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της ημέρας για 3 διαφορετικές τιμές διείσδυσης ΑΠΕ και στόλο 2000 οχημάτων (εικόνες 4.24 - 4.26) .



Εικόνα 4.24: Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 10 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική Α .



Εικόνα 4.25 : Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική Α.

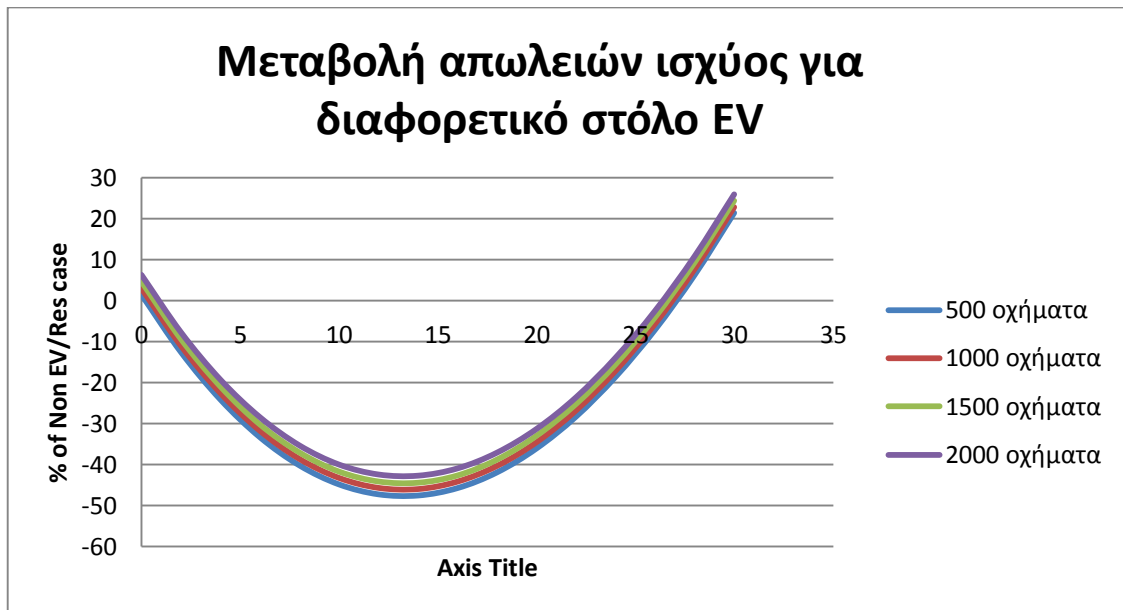


Εικόνα 4.26 : Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 30 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική Α .

Παρατηρούμε ότι το προφίλ της τάσης ,αν και αυξάνεται με την προσθήκη οχημάτων , παραμένει εντός ορίων ($0,95 < \text{voltage profile} < 1,05$) ,οπότε και η μέγιστη επιτρεπτή τιμή διείσδυσης ΑΠΕ θα καθοριστεί μόνο από την διακύμανση τάσης .

- Απώλειες δικτύου (συστήματος)

Οι απώλειες του δικτύου ,με την προσθήκη διαφορετικού πλήθους στόλου ηλεκτρικών οχημάτων , φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 4.27) .



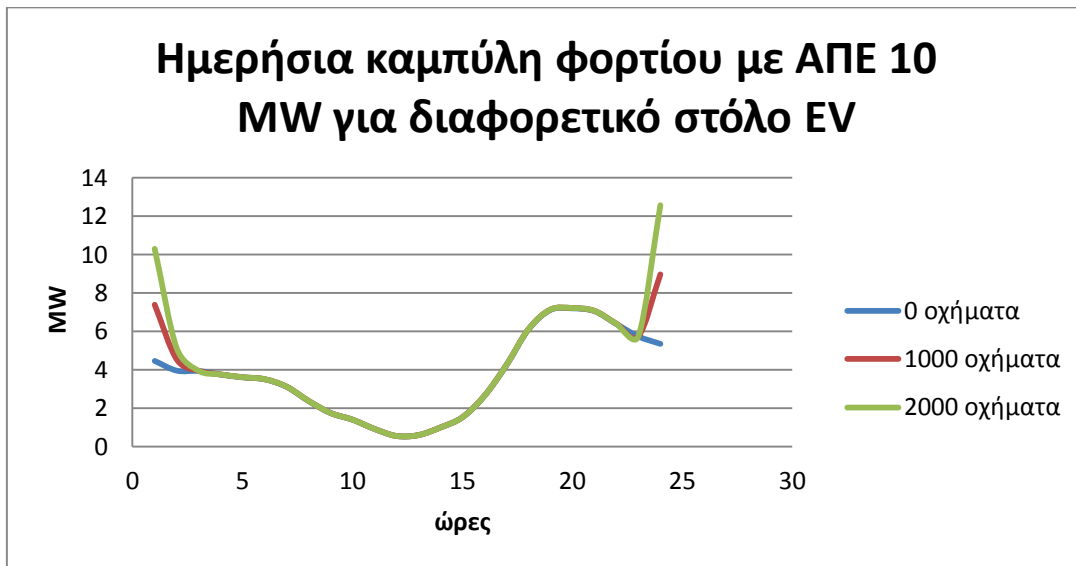
Εικόνα 4.27: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής των απωλειών του συστήματος ανά διείσδυση ΑΠΕ, για διαφορετικό αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων(500,1000,1500,2000) – στρατηγική Α .

Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο δίκτυο μας οι ενεργές απώλειες του συστήματος τείνουν να μειωθούν ,μέχρι περίπου τα 14 MW όπου και γίνονται ελάχιστες .Με μεγαλύτερη διείσδυση φωτοβολταϊκών οι απώλειες αυξάνονται ,φτάνοντας ,μετά τα 26 MW, επίπεδα μεγαλύτερα ακόμη και εκείνων χωρίς ΑΠΕ . Ακόμη ,όπως ήταν αναμενόμενο , οι απώλειες αυξάνονται με την προσθήκη οχημάτων ,καθώς αυξάνεται και το συνολικό φορτίο του δικτύου .

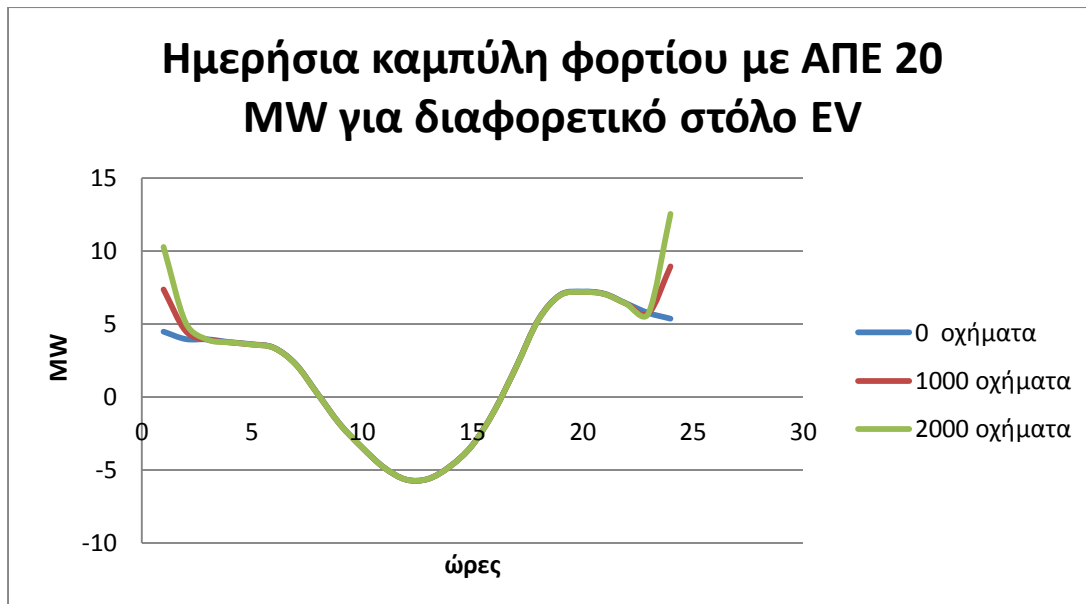
4.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΔΙΖΩΝΙΚΟΥ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟΥ (DUAL TARIFF CHARGING)

- Ημερήσια καμπύλη φορτίου

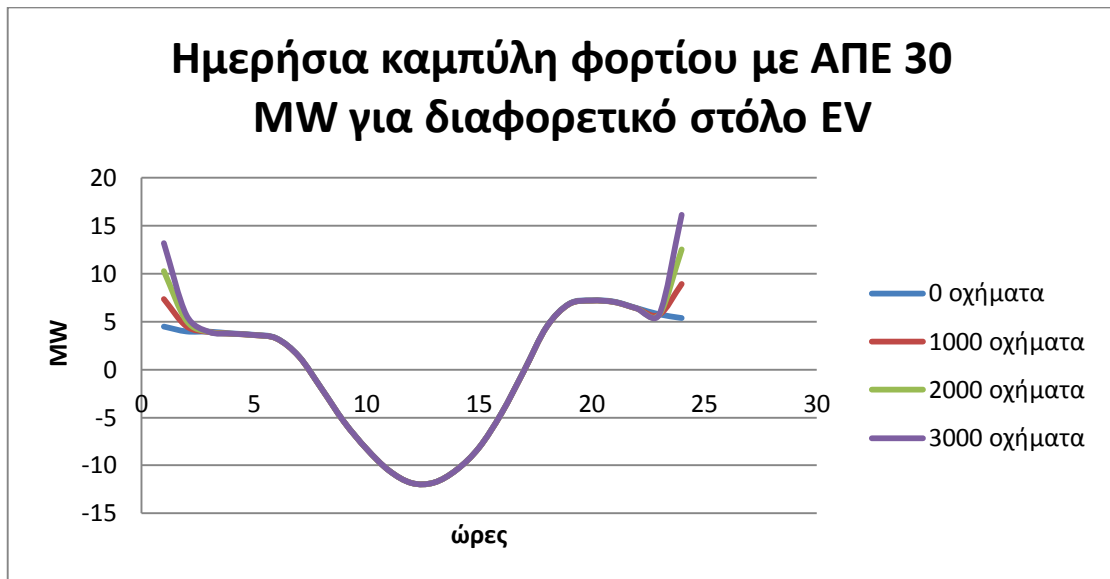
Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η ημερήσια καμπύλη φορτίου (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) με την προσθήκη στόλου ηλεκτρικών οχημάτων διαφορετικού πλήθους ανά διείσδυση ΑΠΕ (εικόνες 4.28 – 4.30) .



Εικόνα 4.28: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 10 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική Β.



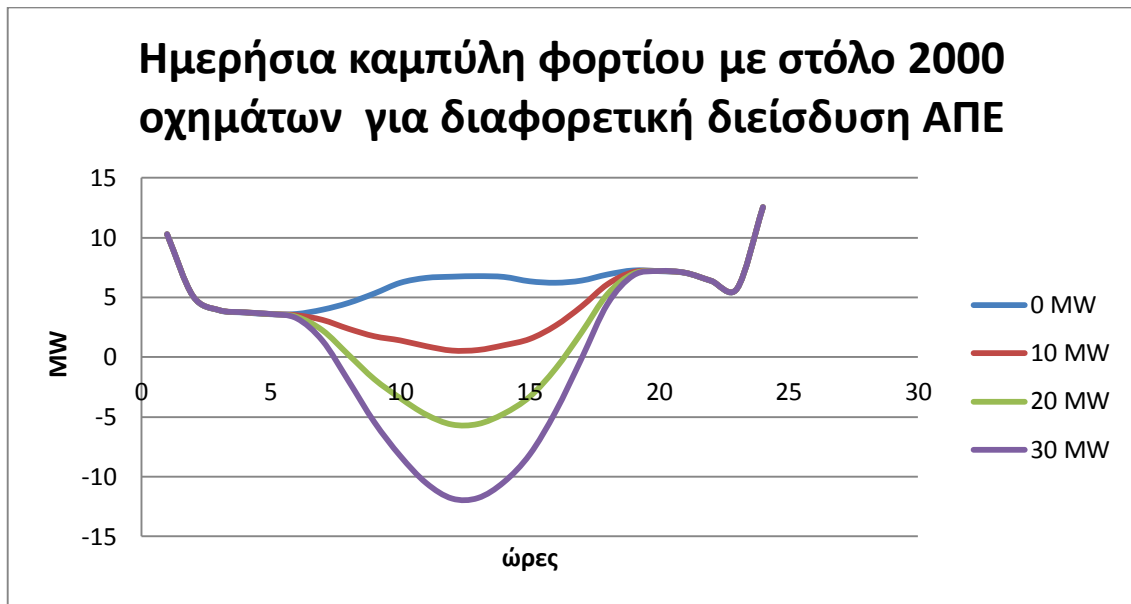
Εικόνα 4.29: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική Β.



Εικόνα 4.30: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 30 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000,3000 οχήματα) – στρατηγική Β.

Βλέπουμε ότι σε αυτή την στρατηγική (dual-tariff charging), η αιχμή της καμπύλης φορτίου παρατηρείται τις βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες, καθώς τότε φορτίζουν τα οχήματα, διότι η τιμή για την αγορά ρεύματος είναι χαμηλότερη (η φόρτιση πραγματοποιείται την ώρα έναρξης της χαμηλής τιμολόγησης της ενέργειας). Μάλιστα αυξάνοντας τον αριθμό τους, δεν επηρεάζεται καθόλου η κορυφή του αρχικού διαγράμματος (γύρω στις 8 το απόγευμα), αλλά εμφανίζεται νέα μέγιστη τιμή (κατά τις ώρες φόρτισης), οποία εξαρτάται από το πλήθος τους, καθώς απαιτείται περισσότερη ισχύς για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του στόλου (εικόνα 4.30).

Αντιστοίχως για στόλο ίδιου πλήθους οχημάτων και διαφορετική διείσδυση φωτοβολταϊκής ενέργειας διαμορφώνεται το κάτωθεν διάγραμμα (εικόνα 4.31) από το οποίο παρατηρούμε ότι η καμπύλη του φορτίου επιβαρύνεται ανάλογα με την προστιθέμενη αυτή ενέργεια. Η κοιλία σημειώνεται τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας (07:00-16:00) και παίρνει αρνητικές τιμές για διείσδυση ισχύος μεγαλύτερη των 10 MW, ενώ το μέγιστο φορτίο λόγω οχημάτων δεν επηρεάζεται.



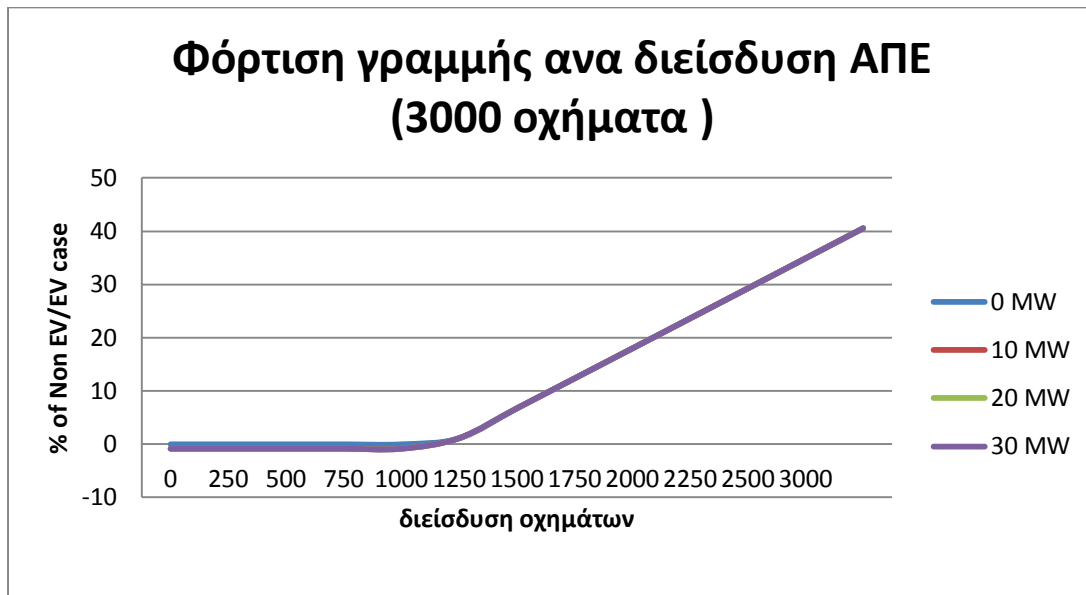
Εικόνα 4.31: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (0,10,20,30 MW) – στρατηγική Α.

- Φόρτιση γραμμής

Η μεταβολή φόρτισης των γραμμών του δικτύου (της στρατηγικής Β συγκριτικά με το σενάριο μη ύπαρξης οχημάτων και ΑΠΕ), για διάφορες τιμές διείσδυσης ΑΠΕ, έως την προσθήκη 3000 ηλεκτρικών οχημάτων φαίνονται στην εικόνα 4.32.

Παρατηρούμε πως η φόρτιση των γραμμών (που εξαρτάται από την αιχμή του δικτύου) ενώ αρχικά διατηρείται σταθερή, από κάποιο πλήθος οχημάτων και μετά (1250 οχήματα), αυξάνεται σημαντικά ανεξαρτήτως διείσδυσης ΦΒ. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην νέα μέγιστη τιμή της καμπύλης του ημερήσιου φορτίου, λόγω της συγκεκριμένης στρατηγικής. Δηλαδή η κορυφή του διαγράμματος φορτίου παραμένει στις 8 το απόγευμα μέχρι να τεθούν σε λειτουργία περισσότερα από 1250 ΗΟ οπότε και εμφανίζεται νέο ακρότατο τις πρώτες πρωινές ώρες.

Επιπλέον, όπως στην προηγούμενη στρατηγική φόρτισης, οι φωτοβολταϊκές διατάξεις δεν έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην προς εξέταση παράμετρο, καθώς η αιχμή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας τους (γύρω στη 1 το μεσημέρι) δεν συμπίπτει χρονικά με την αιχμή του ημερήσιου φορτίου που εμφανίζεται τα ξημερώματα.

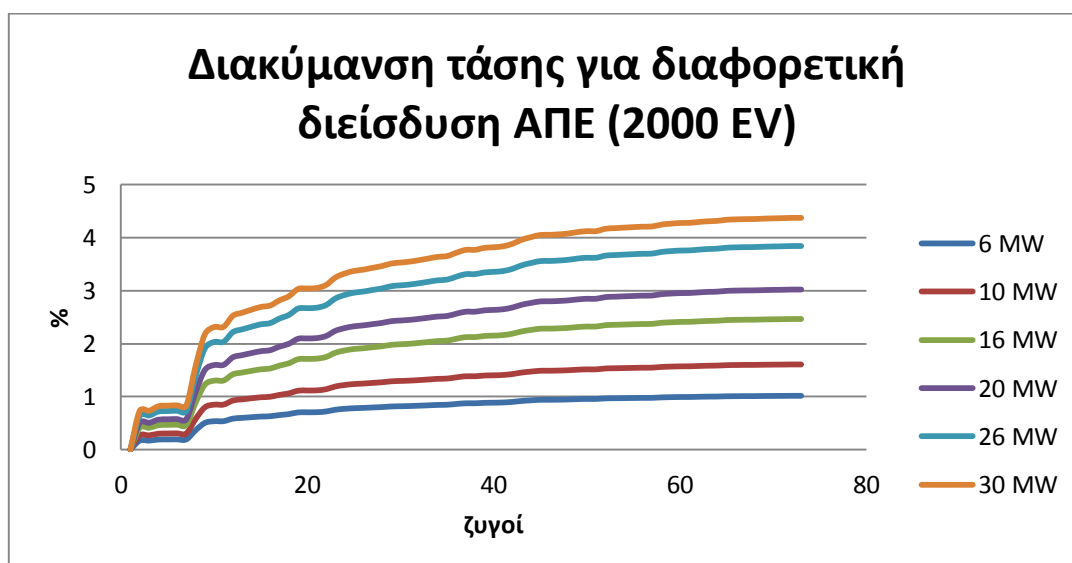


Εικόνα 4.32: Καμπύλες ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης των γραμμών δικτύου για στόλο 3000 οχημάτων και διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (0,10,20,30) – στρατηγική Β .

- Διακύμανση και προφίλ τάσης

Το υπό μελέτη δίκτυο σε αυτή την εργασία ,το δίκτυο της Κατερίνης ,είναι αστικό ,δηλαδή οι γραμμές έχουν μικρό μήκος και δεν περιμένω να εμφανιστεί αξιοσημείωτη διακύμανση τάσης .Για να αποδειχθεί αυτή η υπόθεση θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται η διακύμανση με προσθήκη διαφορετικού στόλου ηλεκτρικών οχημάτων και διαφορετική διείσδυση ισχύος από φωτοβολταϊκά κάθε φορά .

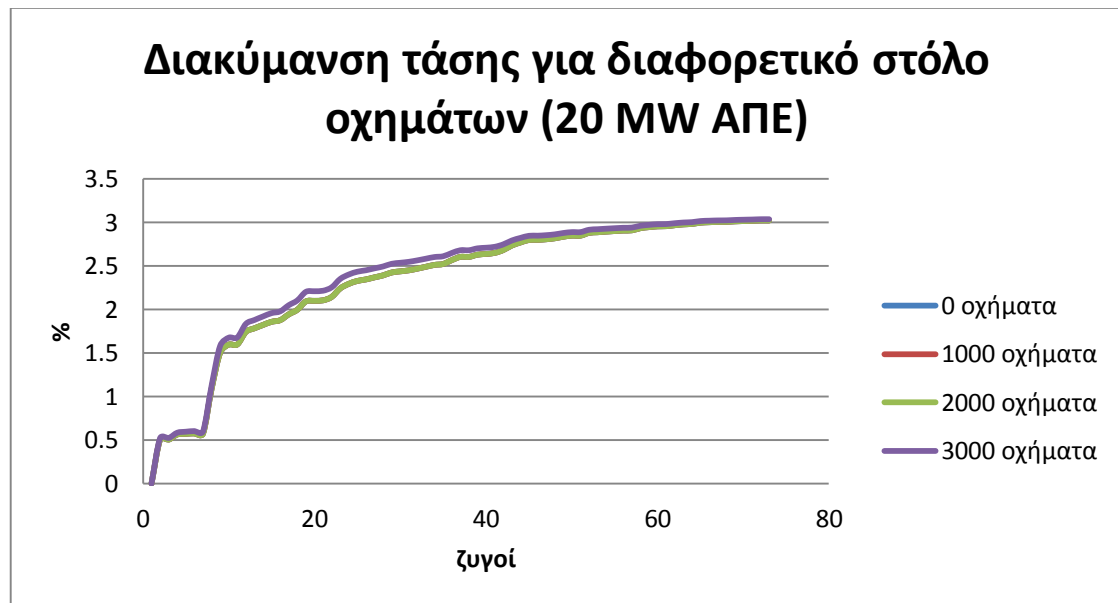
Αρχικά θα μελετήσουμε την επίδραση των επιπρόσθετων μονάδων ΑΠΕ στην συγκεκριμένη παράμετρο ,για τυχαίο πλήθος στόλου ΗΟ (εικόνα 4.33)



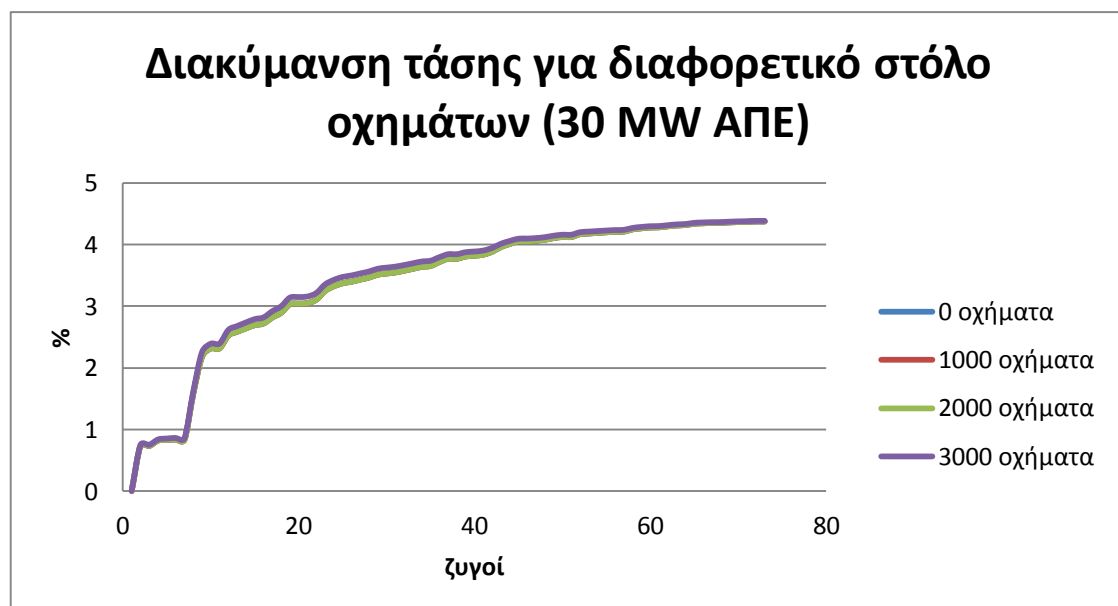
Εικόνα 4.33: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (6,10,16,20,26,30 MW) – στρατηγική Β.

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η διείσδυση ΑΠΕ ,για τον ίδιο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων ,αυξάνεται και η διακύμανση της τάσης ,γεγονός αναμενόμενο ,καθώς το επιπλέον φορτίο από τις φωτοβολταϊκές μονάδες ,προστίθεται όπου έχουμε ήδη μέγιστο φορτίο δικτύου .

Ακολούθως θα παρατηρήσουμε την επίδραση του μεγέθους του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων ,για κοινή τιμή διείσδυσης ισχύος από ΦΒ. (εικόνα 4.34 & 4.35).



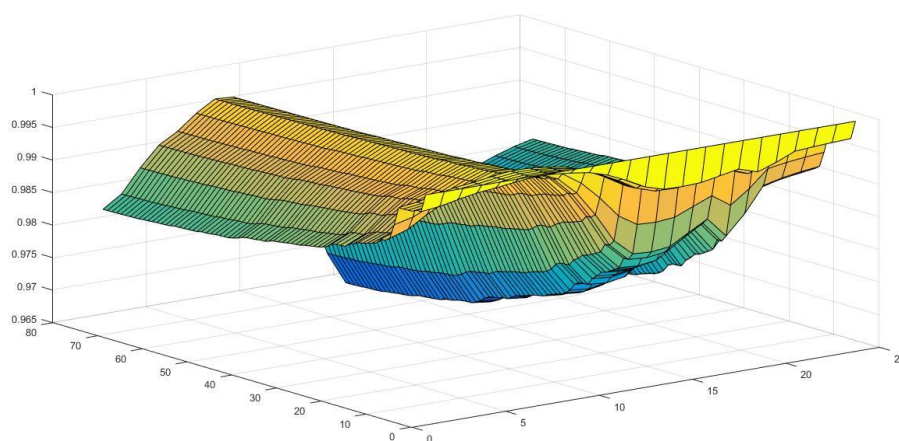
Εικόνα 4.34: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000,3000 οχήματα) – στρατηγική Β .



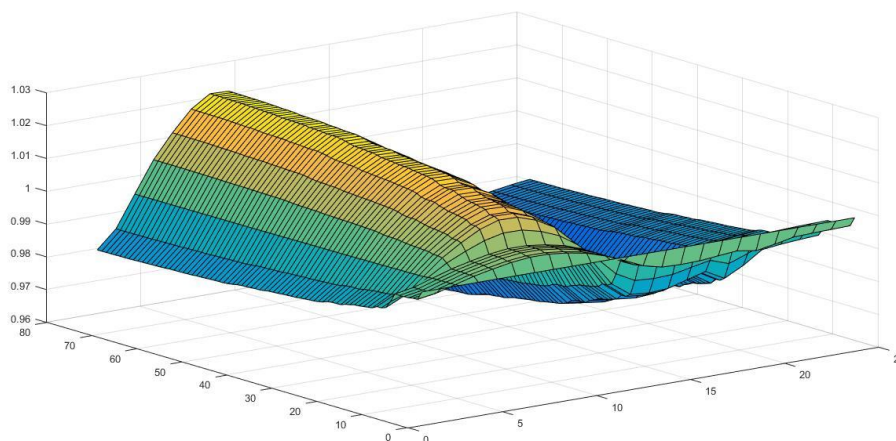
Εικόνα 4.35: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με διείσδυση 30 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000,3000 οχήματα) – στρατηγική Β .

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη διακύμανσης τάσης ,για συγκεκριμένη διείσδυση ΑΠΕ ,ανά διαφορετικό πλήθος οχημάτων, ταυτίζεται για στόλο μικρότερο των 2000 και παρουσιάζει αύξηση προσθέτοντας EVs. Ακόμη γίνεται εμφανές ότι σε τιμές διείσδυσης ισχύος από ΑΠΕ μεγαλύτερες των 30 MW βρισκόμαστε εκτός ορίου διακύμανσης (3 %) για κάθε μέγεθος στόλου οχημάτων.

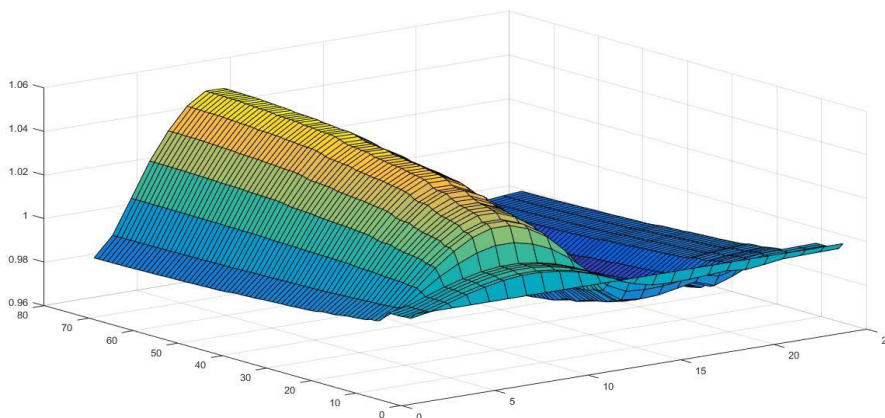
Ακολουθούν τα διαγράμματα για το προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της ημέρας για 3 διαφορετικές τιμές διείσδυσης ΑΠΕ και στόλο 2000 οχημάτων (εικόνες 4.36 – 4.38).



Εικόνα 4.36: Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 10 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική Β .



Εικόνα 4.37: Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική Β .

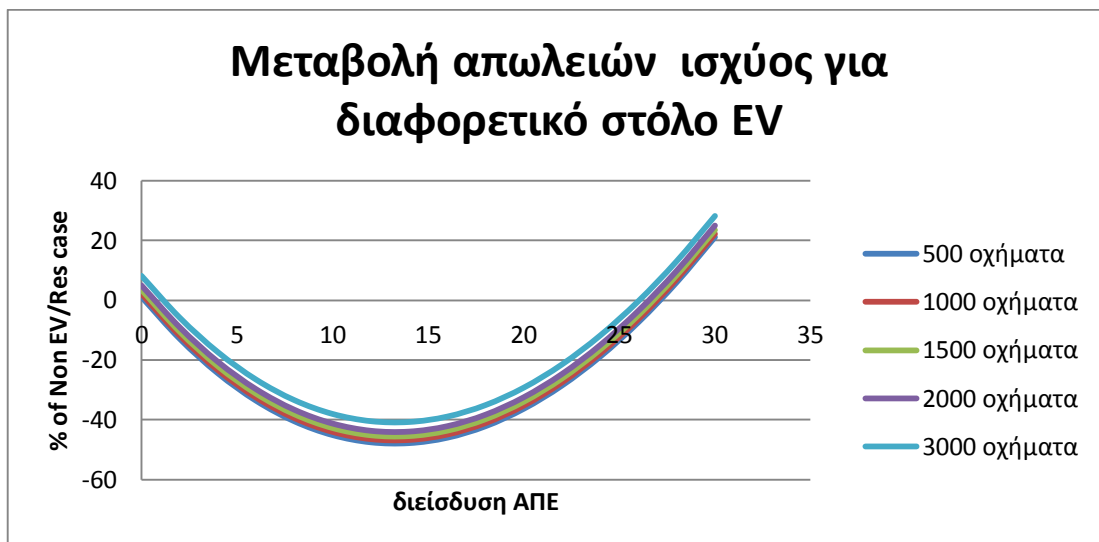


Εικόνα 4.38: Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 30 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική Β .

Παρατηρούμε ότι το προφίλ της τάσης, αν και αυξάνεται με την προσθήκη ΑΠΕ, παραμένει εντός ορίων ($0,95 < \text{voltage profile} < 1,05$) ,οπότε και η μέγιστη επιτρεπτή τιμή διείσδυσης ΑΠΕ θα καθοριστεί μόνο από την διακύμανση τάσης .

- Απώλειες δικτύου (συστήματος)

Οι απώλειες του δικτύου ,με την προσθήκη διαφορετικού πλήθους στόλου ηλεκτρικών οχημάτων , φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 4.39) .



Εικόνα 4.39 : Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής των απωλειών του συστήματος ανά διείσδυση ΑΠΕ, για διαφορετικό αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων(500,1000,1500,2000,3000) – στρατηγική Β .

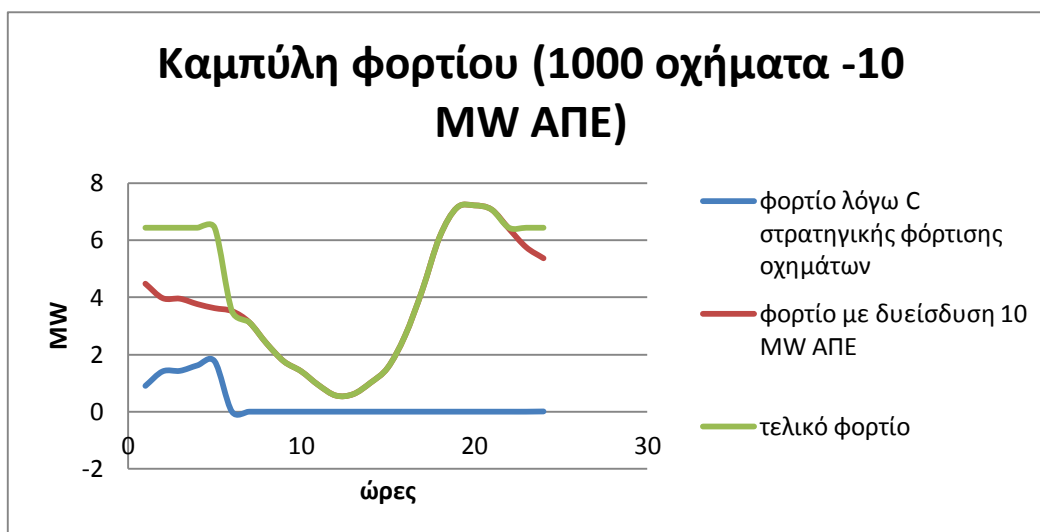
Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο δίκτυο μας οι απώλειες του συστήματος τείνουν να μειωθούν ,μέχρι περίπου τα 14 MW όπου και γίνονται ελάχιστες .Με μεγαλύτερη διείσδυση φωτοβολταϊκών οι απώλειες αυξάνονται ,φτάνοντας ,μετά τα 26 MW, επίπεδα μεγαλύτερα ακόμη και εκείνων

χωρίς ΑΠΕ . Ακόμη ,όπως ήταν αναμενόμενο , οι απώλειες αυξάνονται με την προσθήκη οχημάτων ,καθώς αυξάνεται και το συνολικό φορτίο του δικτύου .

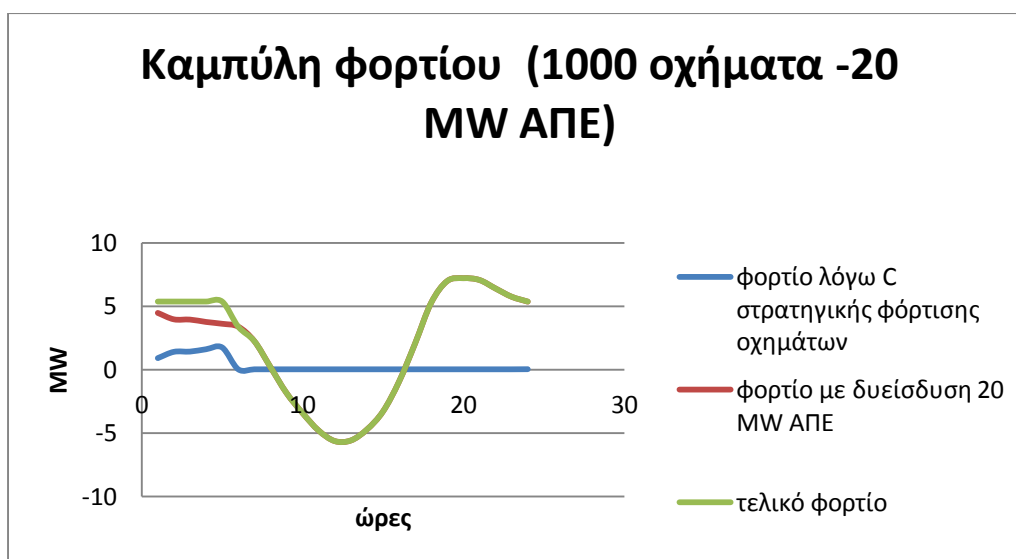
4.5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΜΕ ΕΞΥΠΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (SMART CHARGING)

- Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Στα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζεται πως προκύπτει η ημερήσια καμπύλη φορτίου (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) με την προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ από φωτοβολταϊκά κάθε φορά (εικόνες 4.40- 4.42) .

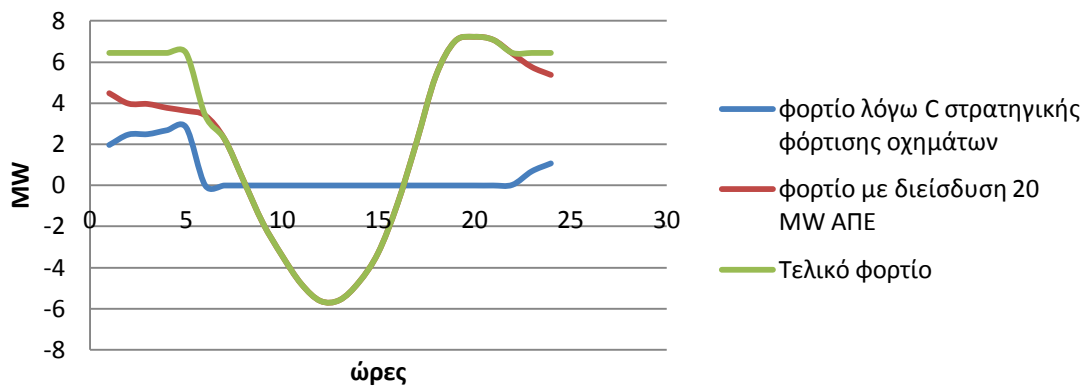


Εικόνα 4.40: Ημερήσια καμπύλη φορτίου με διείσδυση 10 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη 1000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική C.



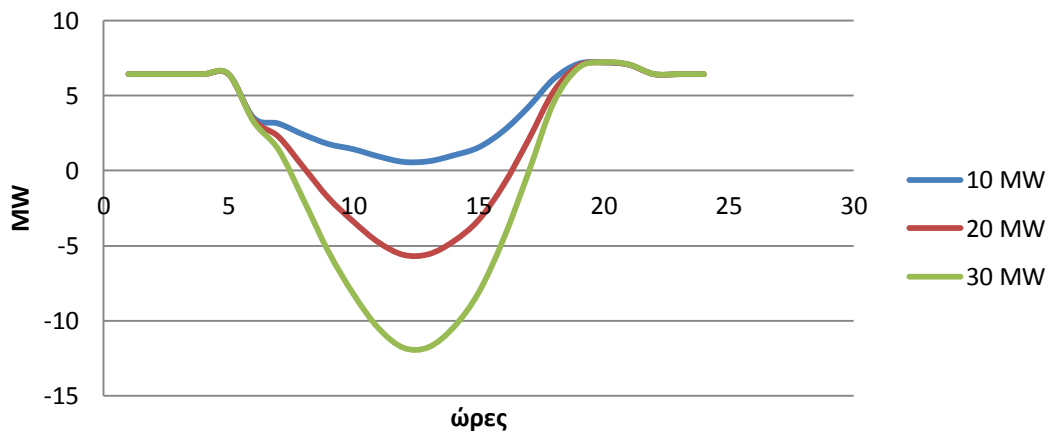
Εικόνα 4.41: Ημερήσια καμπύλη φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη 1000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική C.

Καμπύλη φορτίου (2000 οχήματα -20 MW ΑΠΕ)

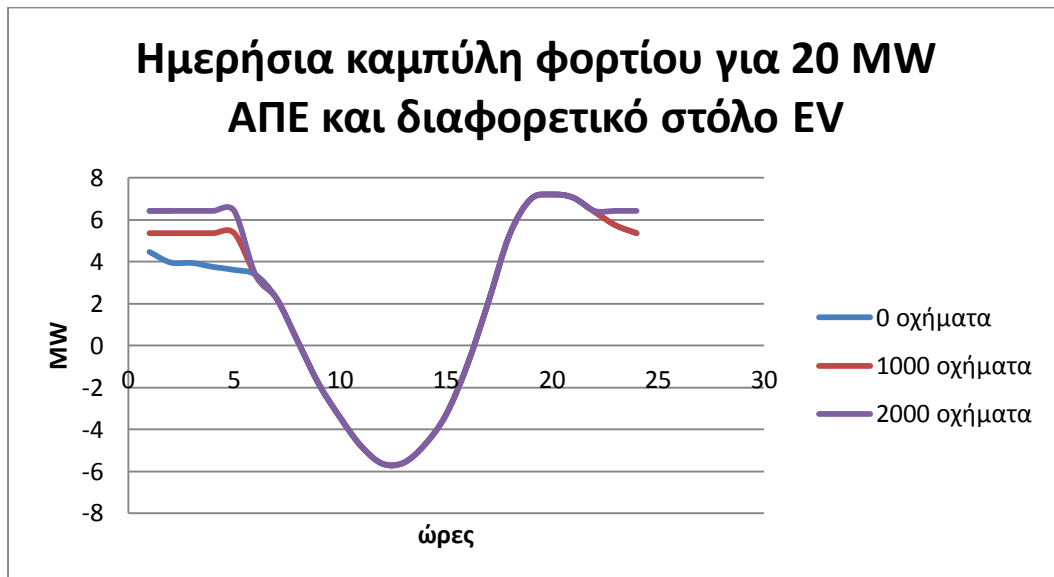


Εικόνα 4.42: Ημερήσια καμπύλη φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική C.

Καμπύλη φορτίου για ίδιο πλήθος οχημάτων και διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ



Εικόνα 4.43: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (10,20,30 MW) – στρατηγική C.



Εικόνα 4.44: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική C.

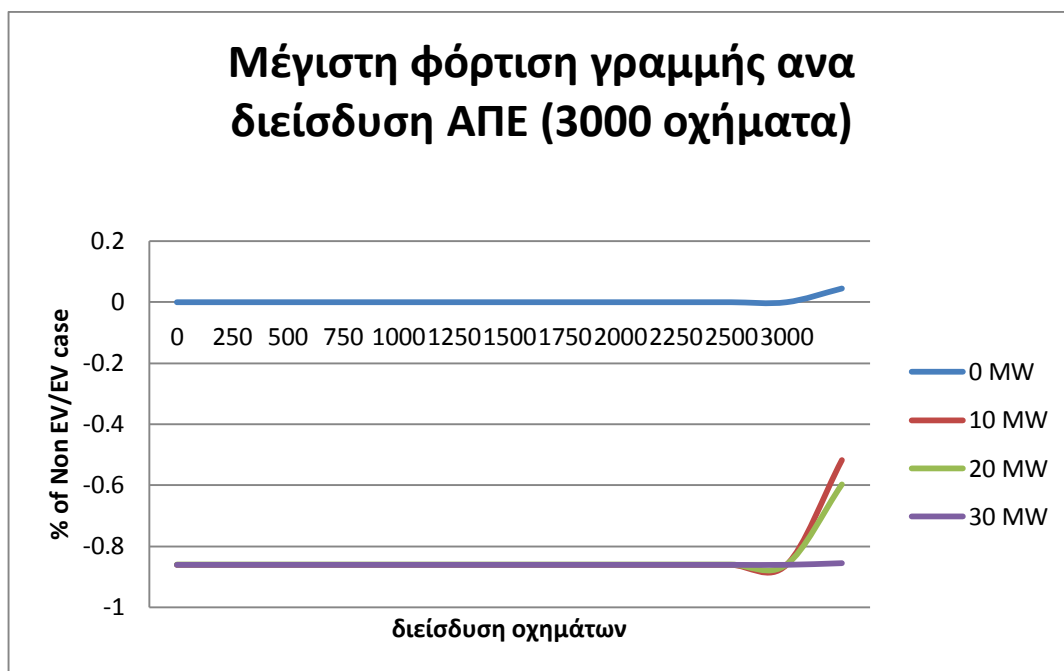
Στην στρατηγική αυτή, η φόρτιση πραγματοποιείται κατά την μεγαλύτερη πτώση της καμπύλης φορτίου, αμέσως μετά την κορυφή της, με σκοπό να επιτευχθεί καλύτερη σταθερότητα του δικτύου. Αυτό φαίνεται στην μπλε γραμμή των άνωθεν διαγραμμάτων, ενώ με την πράσινη απεικονίζεται το τελικό αποτέλεσμα. Πράγματι παρατηρούμε ότι, με χρήση αυτής της μεθόδου, η καμπύλη φορτίου έχει μικρότερη κλίση τις βραδινές και πρώτες πρωινές ώρες όταν φορτίζουν τα οχήματα. Ακόμη, διακρίνεται μεγαλύτερη ανύψωση ανάλογα με το πλήθος των οχημάτων (εικόνα 4.44), ενώ επιτυγχάνεται η ίδια σταθεροποίηση για διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ αλλά ίδιο πλήθος οχημάτων (καθώς από αυτό το μέγεθος εξαρτάται η ανόρθωση) (εικόνα 4.43).

- Φόρτιση γραμμής

Η μεταβολή της φόρτισης των γραμμών του δικτύου (της στρατηγικής C συγκριτικά με το σενάριο μη ύπαρξης οχημάτων και ΑΠΕ), για διάφορες τιμές διείσδυσης ΑΠΕ φαίνονται στην εικόνα 4.45.

Παρατηρούμε πως η μέγιστη φόρτιση των γραμμών, για μηδενική διείσδυση ΑΠΕ, είναι ανεπηρέαστη από την εισαγωγή ΗΟ για στόλο, όμως, πλήθους έως 3000. Η ίδια συμπεριφορά φαίνεται και στις περιπτώσεις εισροής ισχύος από φωτοβολταϊκά, δηλαδή παρότι η φόρτιση μειώνεται (80% συγκριτικά με το μηδενικό σενάριο), παραμένει σταθερή μέχρι τα 3000 ΗΟ. Αυτό συμβαίνει διότι με την προσθήκη πολλών οχημάτων (>3000) δημιουργείται, κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, νέα κορυφή της καμπύλης φορτίου που υπερβαίνει αυτή του μηδενικού σεναρίου. Να σημειωθεί εδώ, ότι πάλι, όπως στις προηγούμενες στρατηγικές, οι φωτοβολταϊκές διατάξεις δεν έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην προς εξέταση παράμετρο λόγω

χρονικής ασυμφωνίας της αιχμής καμπύλης του ημερήσιου φορτίου με την αιχμή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας τους .



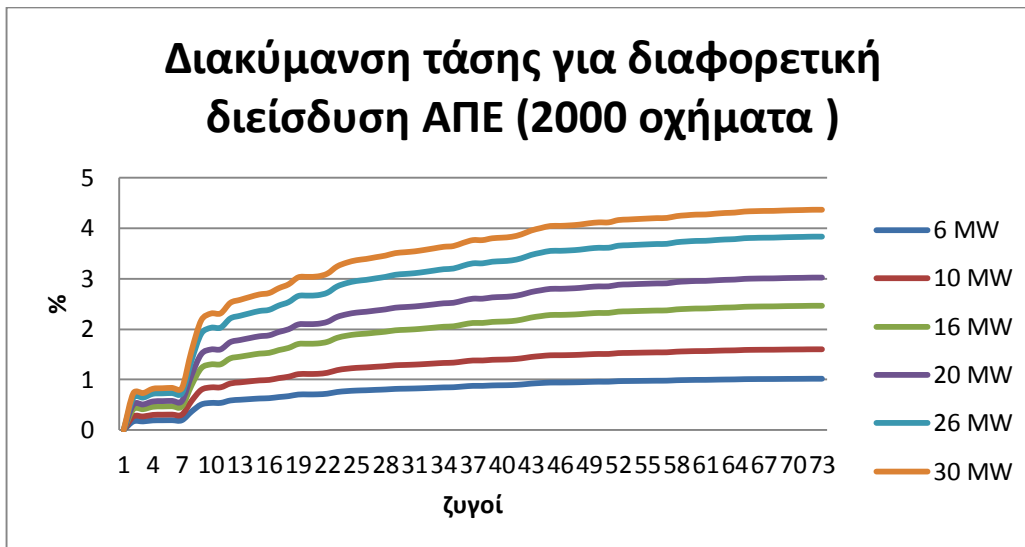
Εικόνα 4.45: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για διαφορετικές τιμές διείσδυσης ΑΠΕ (έως 3000 οχήματα)- στρατηγική C .

- Διακύμανση και προφίλ τάσης

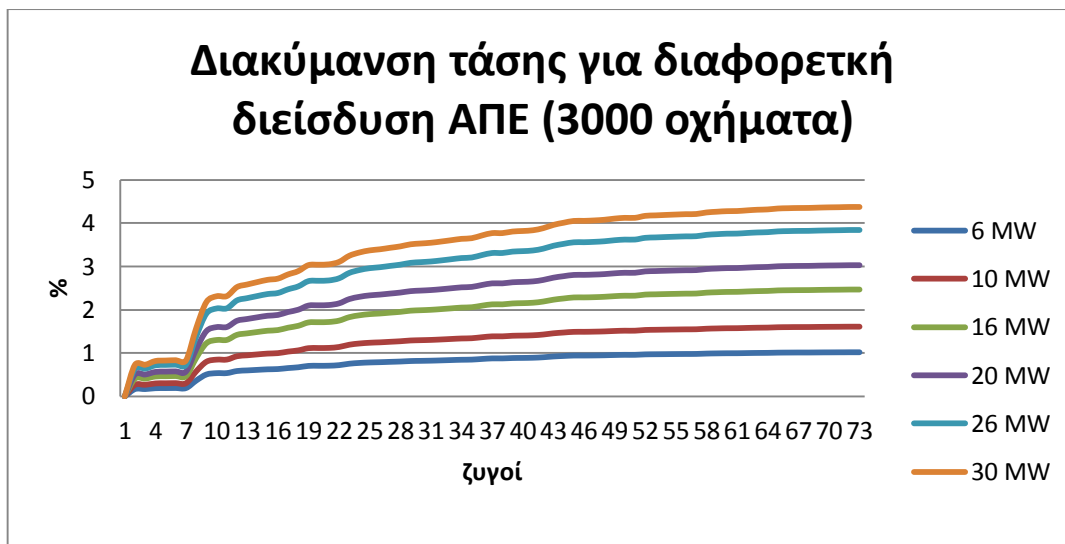
Η διακύμανση της τάσης του δικτύου καθορίζεται από την διαφορά της μέγιστης τιμής τάσης (που σημειώνεται στο ελάχιστο σημείο της καμπύλης φορτίου) και της ελάχιστης (στην κορυφή της καμπύλης φορτίου) .Επομένως με την μετακίνηση αυτών των ακρότατων μεταβάλλεται το προς εξέταση μέγεθος .

Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η διακύμανση της τάσης δικτύου (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) με προσθήκη διαφορετικού στόλου ηλεκτρικών οχημάτων και διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ από φωτοβολταϊκά κάθε φορά .

Αρχικά θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται από την διείσδυση επιπρόσθετων μονάδων ΑΠΕ ,για τυχαίο πλήθος στόλου (εικόνες 4.46 - 4.47).



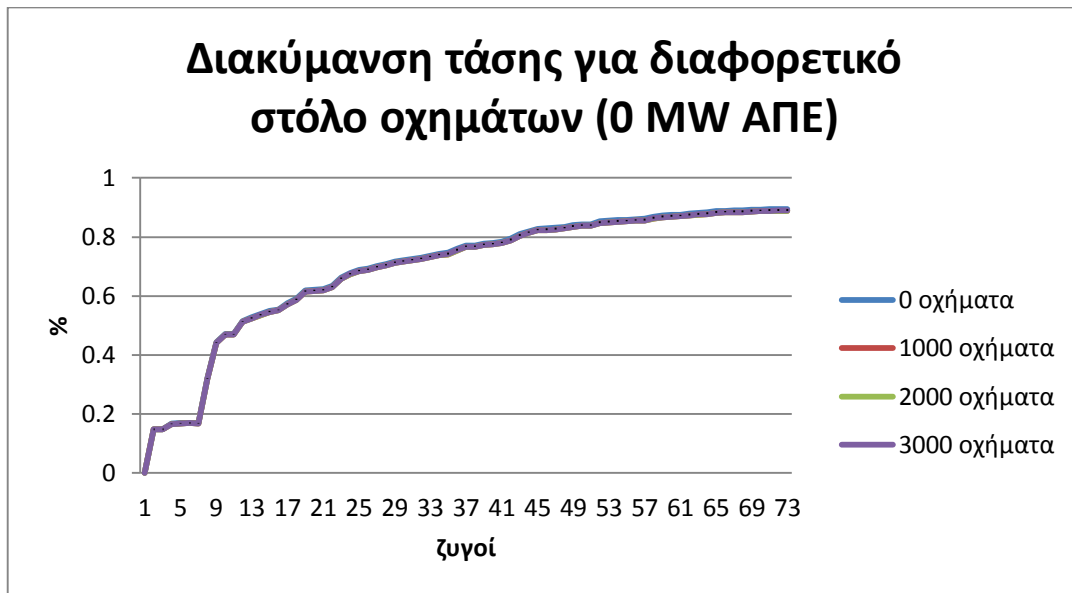
Εικόνα 4.46: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (6,10,16,20,26,30 MW) – στρατηγική C.



Εικόνα 4.47: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με προσθήκη 3000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (6,10,16,20,26,30 MW) – στρατηγική C.

Παρατηρούμε ότι όσο εντάσσονται νέες φωτοβολταϊκές μονάδες στο σύστημα μας ,για τον ίδιο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων ,αυξάνεται και η διακύμανση της τάσης ,γεγονός αναμενόμενο ,καθώς η επιπρόσθετη ισχύ από αυτές , προστίθεται όπου έχουμε ήδη μέγιστο φορτίο δικτύου, επιβαρύνοντας το και μεταφέρει σε χαμηλότερα επίπεδα την ελάχιστη τιμή καμπύλης φορτίου με την μέγιστη να μένει σταθερή . Άρα καθώς η απόσταση των ακρότατων μεγαλώνει ,η διακύμανση βγαίνει εκτός ορίου για τιμές μεγαλύτερες των 20 MW .

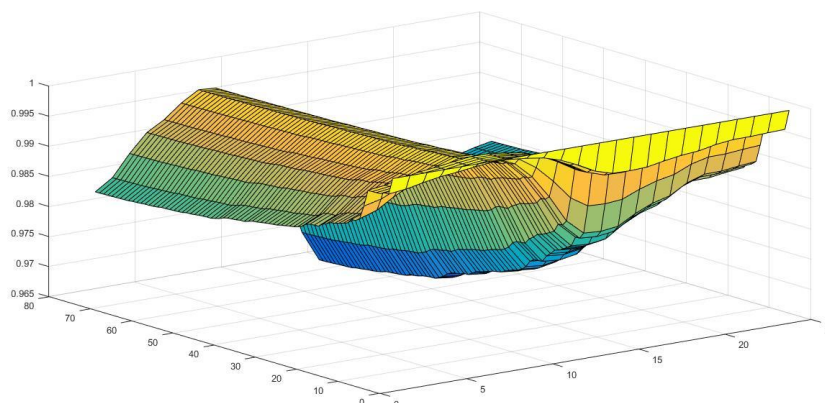
Ακολούθως θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται η διακύμανση τάσης δικτύου από το μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων για κοινή τιμή διείσδυσης ΑΠΕ (εικόνα 4.48) .



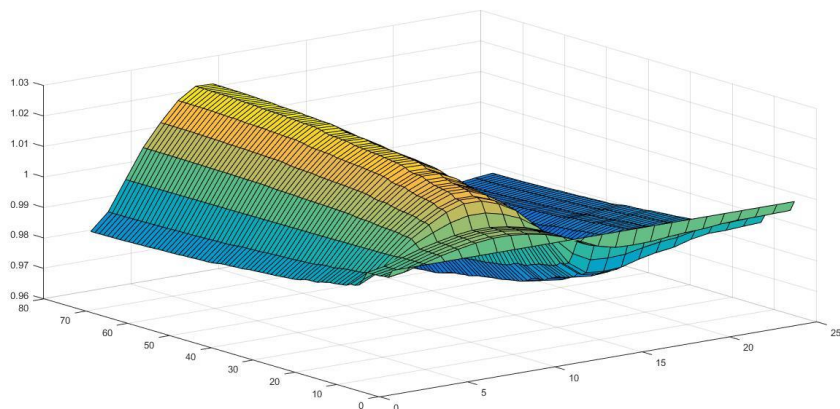
Εικόνα 4.48: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με διείσδυση 30 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000,3000 οχήματα) – στρατηγική C .

Από το άνωθεν διάγραμμα ,γίνεται εμφανές ότι για οσοδήποτε μεγάλη αύξηση του πλήθους των ηλεκτρικών οχημάτων ,για την ίδια τιμή διείσδυσης ΑΠΕ (κοινό ελάχιστο σημείο της καμπύλης φορτίου σε όλες τις περιπτώσεις) , η διακύμανση της τάσης παραμένει σχεδόν αναλλοίωτη καθώς θα πρέπει να προσθέσουμε πολλά ΗΟ για να επιβαρυνθεί η καμπύλη φορτίου ,δημιουργώντας μέγιστο σημείο μεγαλύτερο του υπάρχοντος τις ώρες φόρτισης της στρατηγικής C και να αυξηθεί η απόσταση των ακρότατων .

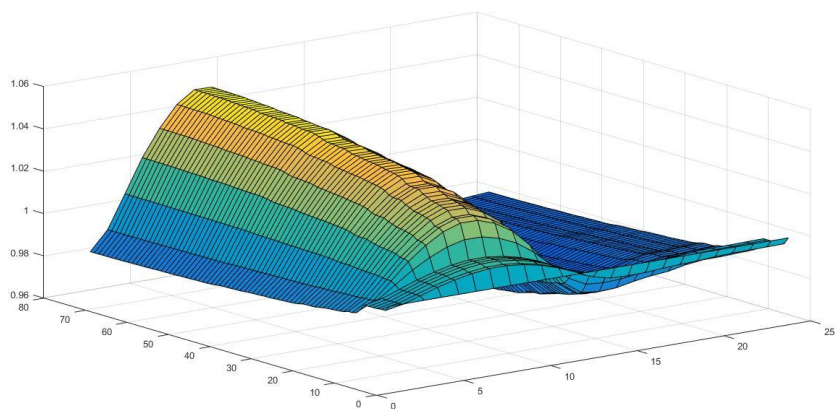
Ακολουθούν τα διαγράμματα για το προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της ημέρας για 3 διαφορετικές τιμές διείσδυσης ΑΠΕ και στόλο 2000 οχημάτων (εικόνες 4.49 – 4.51) .



Εικόνα 4.49 : Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 10 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική C .



Εικόνα 4.50: Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική C .

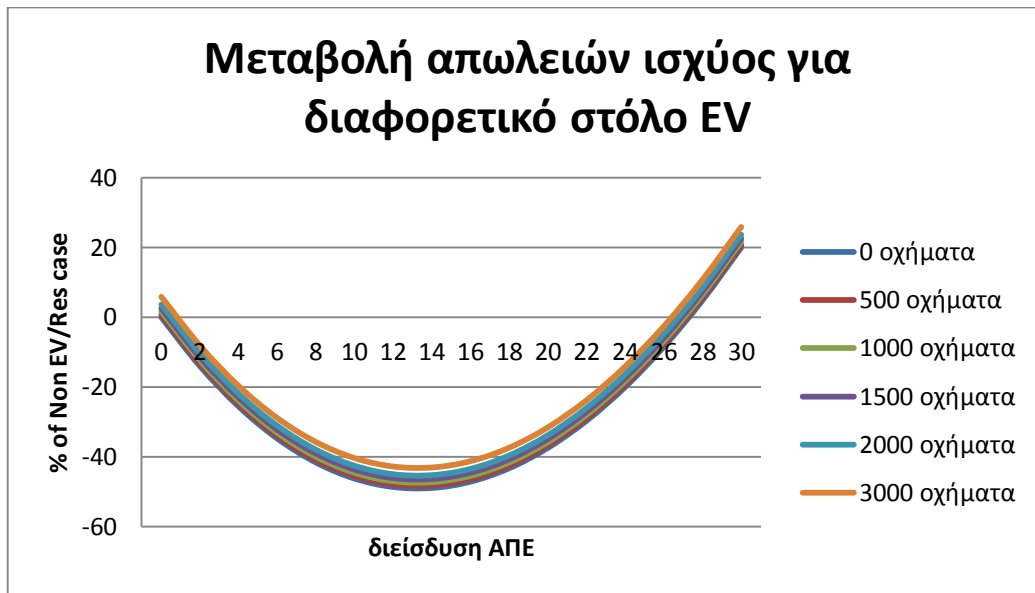


Εικόνα 4.51: Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 30 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική C .

Παρατηρούμε ότι το προφίλ της τάσης παραμένει εντός ορίων ($0,95 < \text{voltage profile} < 1,05$), ή ίσως σε ορισμένα σημεία και για την μέγιστη διείσδυση ισχύος ΑΠΕ (30 MW) να ξεπερνά οριακά το άνω φράγμα. Βεβαίως πολύ δύσκολα θα εφαρμοστεί στην πράξη τόσο μεγάλη εισροή φωτοβολταϊκών σε αυτό το δίκτυο, οπότε και η μέγιστη επιτρεπτή τιμή διείσδυσης ΑΠΕ θα καθοριστεί μόνο από την διακύμανση τάσης.

- Απώλειες δικτύου (συστήματος)

Οι απώλειες του δικτύου της στρατηγικής C, ανά την προσθήκη διαφορετικού πλήθους στόλου ηλεκτρικών οχημάτων, συγκριτικά με το σενάριο μη ύπαρξης οχημάτων και ΑΠΕ, φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνα 4.52).



Εικόνα 4.52: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής των απωλειών του συστήματος ανά διείσδυση ΑΠΕ, για διαφορετικό αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων(0, 500,1000,1500,2000 ,3000) – στρατηγική C .

Γίνεται εμφανές ότι (όπως και στις προηγούμενες στρατηγικές)με την προσθήκη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο δίκτυο μας οι ενεργές απώλειες του συστήματος τείνουν να μειωθούν ,μέχρι περίπου τα 14 MW όπου και γίνονται ελάχιστες .Με μεγαλύτερη διείσδυση φωτοβολταϊκών οι απώλειες αυξάνονται ,φτάνοντας ,μετά τα 26 MW, επίπεδα μεγαλύτερα ακόμη και εκείνων χωρίς ΑΠΕ . Ακόμη ,όπως ήταν αναμενόμενο , οι απώλειες αυξάνονται με την προσθήκη οχημάτων ,καθώς αυξάνεται και το συνολικό φορτίο του δικτύου (εικόνα 4.52) ,γεγονός που γίνεται εμφανές από τα 3000 οχήματα και μετά .

4.6 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΟΥ ΠΕΡΙΛΑΜΒΑΝΕΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ V2G

Προκειμένου να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη εξομάλυνση της ημερήσιας καμπύλης φορτίου και με βάση τα ευνοϊκά αποτελέσματα της στρατηγικής C , οδηγούμαστε στην τέταρτη και τελευταία στρατηγική φόρτισης αυτής της εργασίας ,σύμφωνα με την οποία ,όχι μόνο τα οχήματα καταναλώνουν ισχύ κατά τις ώρες πτώση της καμπύλης ,αλλά ακόμη μπορούν να επιστρέφουν ισχύ στο δίκτυο της ώρες αιχμής του ,εξυγιάνοντας το (vehicle to grid) .

4.6.1 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ D ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (PERC=100%)

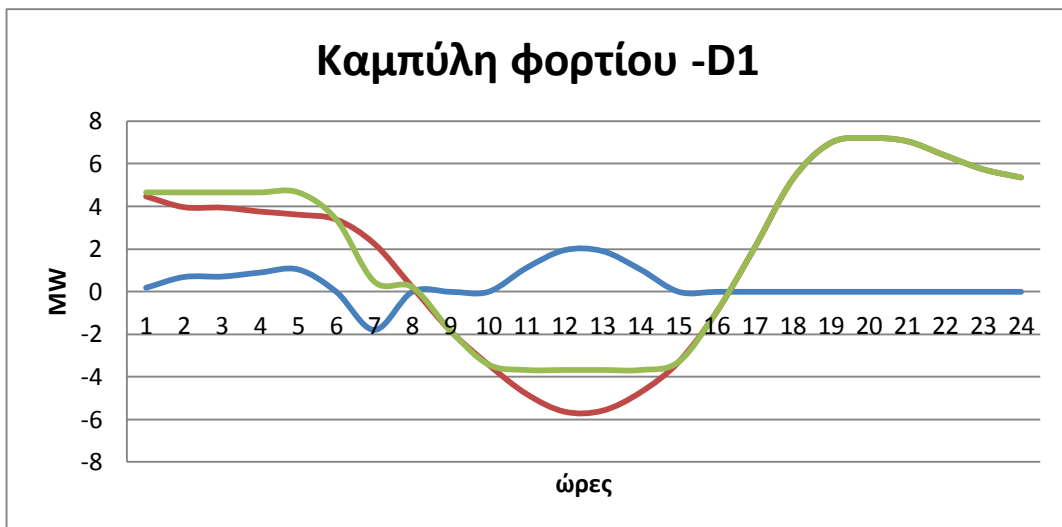
Σε αυτή την παράγραφο θα μελετήσουμε τις δύο εξής περιπτώσεις ,που διαφοροποιούνται μόνο στο ποσοστό συνεισφοράς μπαταρίας σε εφαρμογές V2G :

- i. Στρατηγική D1: Με $SOC_{out} = 100\%$ (ποσοστό φόρτισης μπαταρίας πριν την εκκίνηση του οχήματος)και $PERC = 10\%$ (ποσοστό συνεισφοράς μπαταρίας σε εφαρμογές V2G).

- ii. Στρατηγική D2: Με $SOC_{out} = 100\%$ (ποσοστό φόρτισης μπαταρίας πριν την εκκίνηση του οχήματος)και $PERC = 20\%$ (ποσοστό συνεισφοράς μπαταρίας σε εφαρμογές V2G).

- Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η ημερήσια καμπύλη φορτίου (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) με την προσθήκη στόλου διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ από φωτοβολταϊκά κάθε φορά και για τις δύο στρατηγικές .



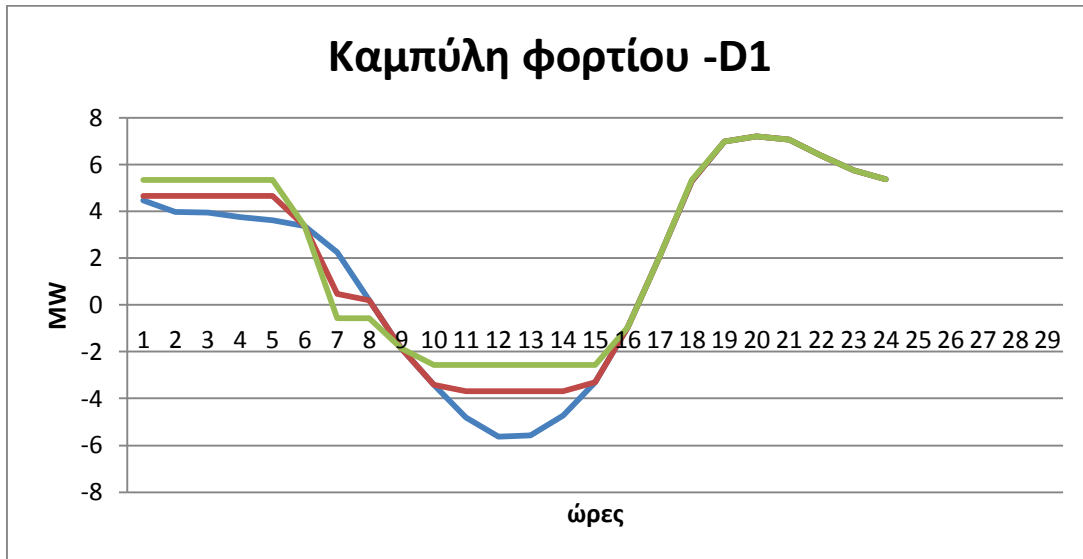
Εικόνα 4.53: Ημερήσια καμπύλη φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη 1000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική D1.



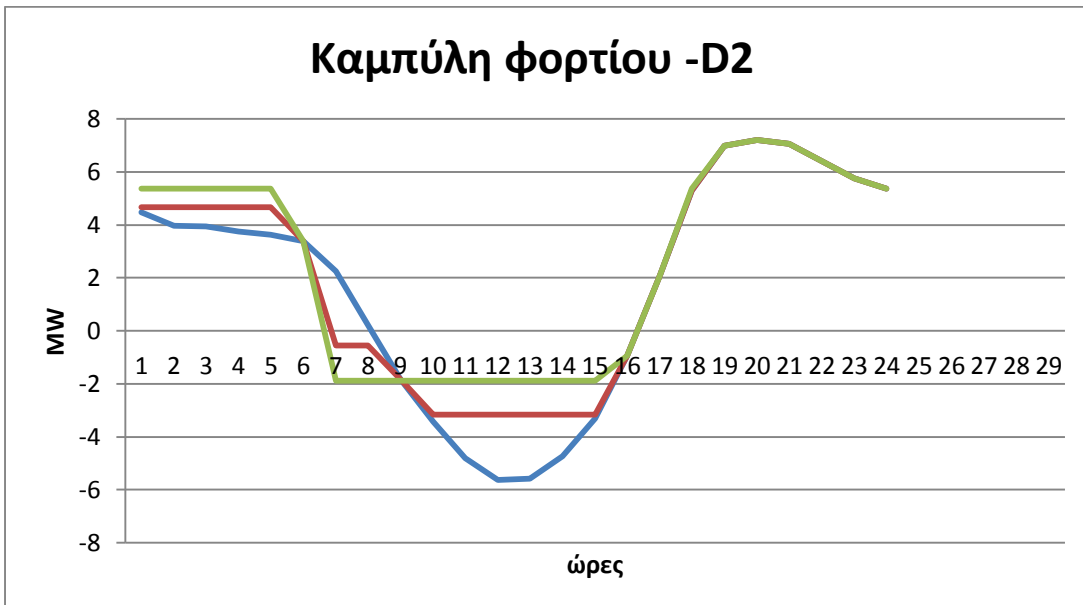
Εικόνα 4.54: Ημερήσια καμπύλη φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη 1000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική D2.

Όπου :

- φορτίο λόγω εκάστοτε στρατηγικής φόρτισης
- φορτίο με διείσδυση 20 MW ΑΠΕ
- τελικό φορτίο



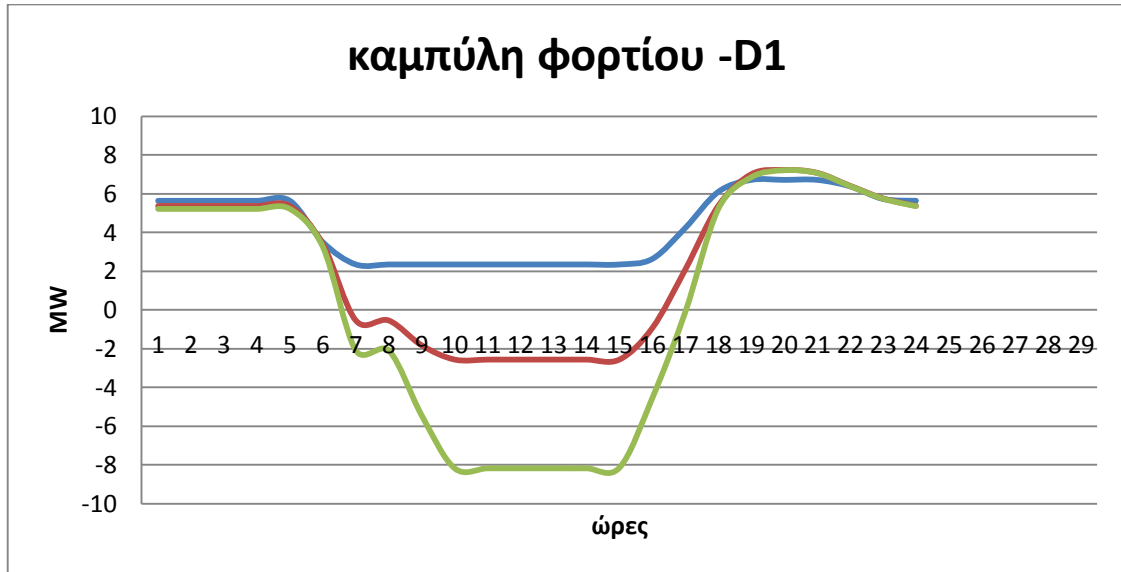
Εικόνα 4.55: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική D1.



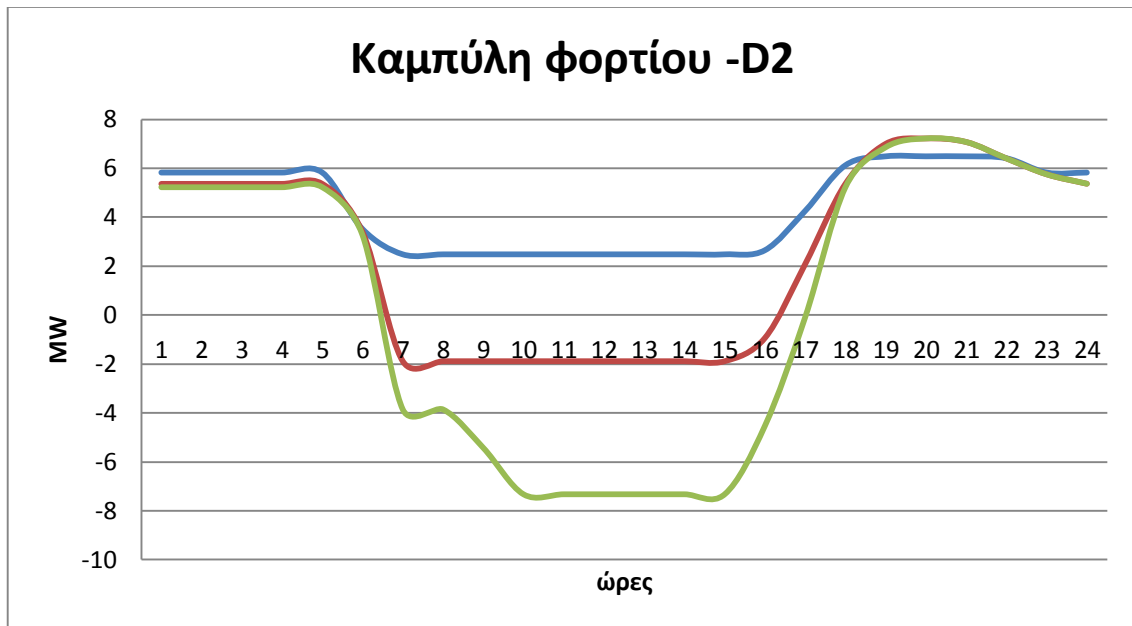
Εικόνα 4.56: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική D2.

Όπου:

- 0 οχήματα
- 1000 οχήματα
- 2000 οχήματα



Εικόνα 4.57: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (10,20,30 MW) – στρατηγική D1.



Εικόνα 4.58: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (10,20,30 MW) – στρατηγική D2.

Όπου:

— 10 MW — 20 MW — 30 MW

Στην στρατηγική αυτή, η πλήρης φόρτιση της μπαταρίας ($SOC_{out}=100\%$) πραγματοποιείται κατά την μεγαλύτερη πτώση της καμπύλης φορτίου, με σκοπό να επιτευχθεί σταθεροποίηση της, ενώ παράλληλα ισχύς μπορεί να επιστραφεί από τα οχήματα στο δίκτυο τις ώρες αιχμής, ώστε να ελαττωθεί η μέγιστη τιμή φορτίου

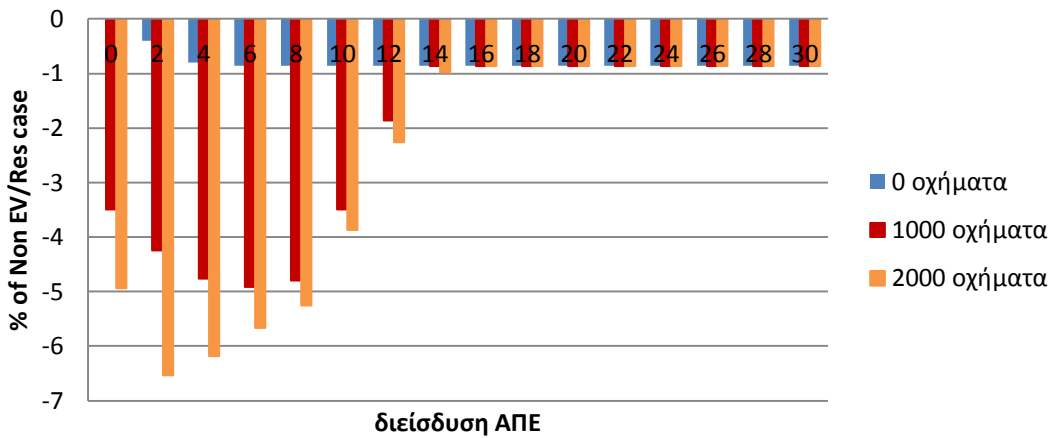
- διατίθεται το 10% της ισχύος της μπαταρίας για την στρατηγική D1 (PERC=10%) ή το 20% για την στρατηγική D2 (PERC=20%) . Έτσι επιτυγχάνεται γενικότερη ευθυγράμμιση της σχηματικής παράστασης του ημερήσιου φορτίου . Αυτό φαίνεται στην μπλε γραμμή των άνωθεν διαγραμμάτων ,ενώ με την πράσινη απεικονίζεται το τελικό αποτέλεσμα (εικόνες 4.53 – 4.54) .Ακόμη , για ίδια τιμή διείσδυσης ΑΠΕ ,όσο μεγαλύτερο το πλήθος των οχημάτων ,τόσο μεγαλύτερή και η ανύψωση του ελάχιστου του γραφήματος , φαινόμενο πιο έντονο για την στρατηγική D2 (εικόνες 4.55 – 4.56) ,ενώ επιτυγχάνεται καλύτερη σταθεροποίηση, για ίδιο πλήθος οχημάτων ,στα 10 MW διείσδυσης ΑΠΕ (συγκριτικά με μεγαλύτερες τιμές) ,πάλι με καλύτερα αποτελέσματα στην δεύτερη μέθοδο (εικόνες 4.57 – 4.58). Το συγκεκριμένο πρόβλημα ίσως να μπορούσε να αντιμετωπιστεί με την χαλάρωση του περιορισμού της πλήρους φόρτισης των ΗΟ πριν την αναχώρησή τους ,ώστε να μειωθεί και το απαιτούμενο φορτίο ,όπως θα δούμε παρακάτω .

- Φόρτιση

Οι τιμές μεταβολής φόρτισης των γραμμών του δικτύου (των στρατηγικών D1 & D2 συγκριτικά με το σενάριο μη ύπαρξης οχημάτων και ΑΠΕ) , για διαφορετικά μεγέθη στόλου μέχρι την διείσδυση 30 MW ΑΠΕ, φαίνονται στις εικόνες 4.59 και 4.60 .

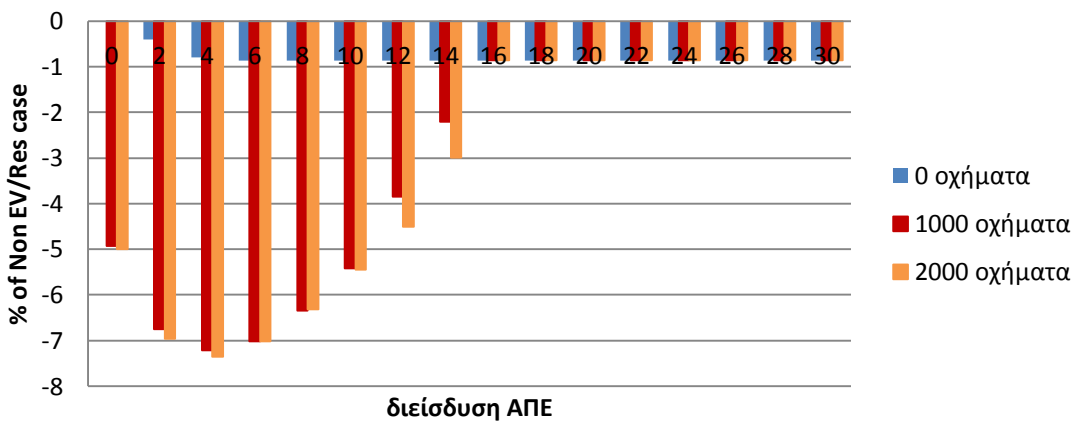
Παρατηρούμε πως και για τις δύο μεθόδους παρουσιάζεται παρόμοια συμπεριφορά ,καθώς η φόρτιση των γραμμών γενικά μειώνεται ,όμως η μέγιστη ελάττωση γίνεται για τιμές 0-14 MW ισχύος από ΑΠΕ και είναι εξαρτώμενη από τον αριθμό των ΗΟ . Δηλαδή (για την ίδια τιμή ΦΒ) ,προσθέτοντας πιο πολλά αυτοκίνητα , μέχρι τα 14 MW ,η φόρτιση θα μειωθεί ,ενώ πέρα από αυτή την διείσδυση ,διατηρείται σταθερά μικρότερη αυτής του μηδενικού σεναρίου , σε ποσοστό 1% ,όσα οχήματα και αν προσθέσω . Το κατώτατο σημείο , για την στρατηγική D1 εμφανίζεται στον συνδυασμό 2000 οχημάτων και 2 MW ισχύος από ΑΠΕ και για την D2 στα 2000 οχήματα αλλά 4 MW ισχύος από ΑΠΕ (η D2 μπορεί να απορροφήσει πιο πολλές ΦΒ μονάδες) .Η εξήγηση αυτού του φαινομένου έγκειται στον τρόπο υλοποίησης των συγκεκριμένων στρατηγικών φόρτισης. Απαιτώντας πλήρη φόρτιση των συσσωρευτών , τα οχήματα (όσο μεγάλο και εάν είναι το πλήθος τους) δεν μπορούν να απορροφήσουν την περιττή ισχύ από ΑΠΕ από κάποια τιμή διείσδυσης και μετά (να γίνει τοπική κατανάλωση)καθώς τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας το ποσοστό SoC (πληρότητας μπαταρίας) είναι ήδη 100 %..Αυτή επιστρέψει στο υπόλοιπο δίκτυο ,αυξάνοντας την φόρτιση .

Μεταβολή φόρτισης γραμμών δικτύου ανα πλήθος οχημάτων -D1



Εικόνα 4.59: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για 30 MW διείσδυσης ΑΠΕ και διαφορετικά μεγέθη στόλου ηλεκτρικών οχημάτων -στρατηγική D1 .

Μέγιστη φόρτιση γραμμών δικτύου ανα πλήθος οχημάτων -D2

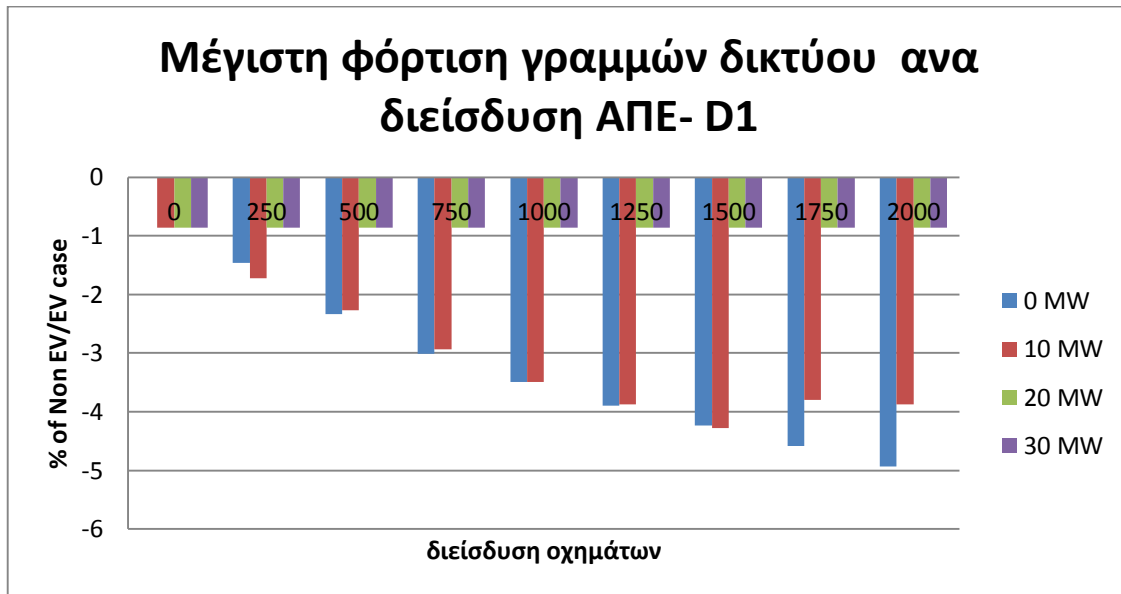


Εικόνα 4.60: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για 30 MW διείσδυσης ΑΠΕ και διαφορετικά μεγέθη στόλου ηλεκτρικών οχημάτων -στρατηγική D2 .

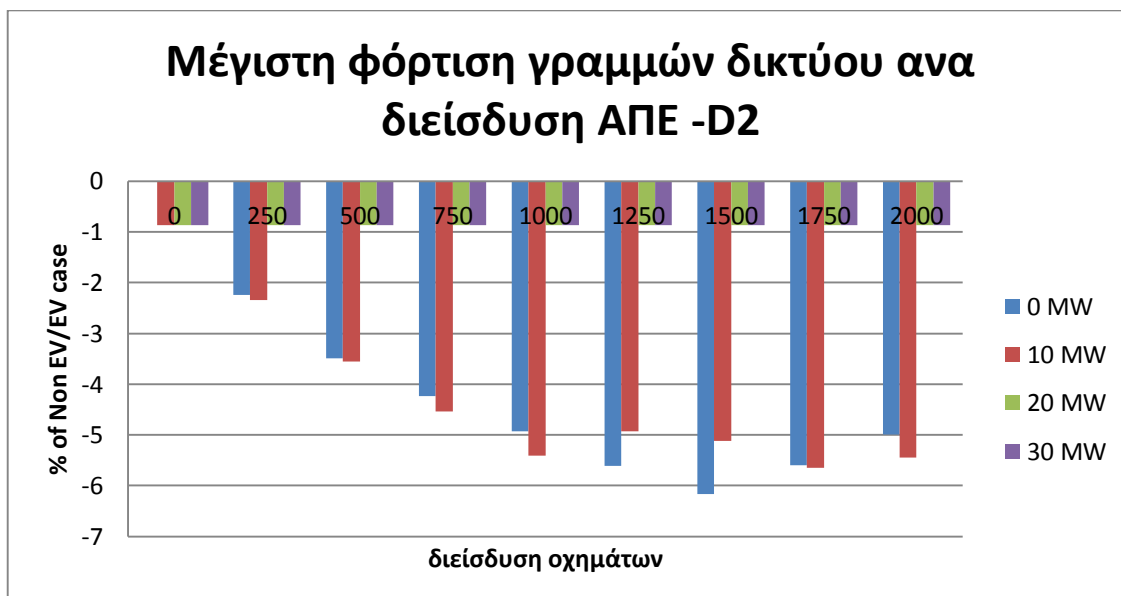
Αντίστοιχα παρουσιάζονται και οι τιμές μεταβολής φόρτισης των γραμμών του δικτύου ,ανά διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ , μέχρι την προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων (εικόνες 4.61 & 4.62) ,όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση για τις χαμηλές τιμές ισχύος (0 ,10 MW) ,ενώ για μεγαλύτερη διείσδυση ,η φόρτιση παραμένει σταθερά μικρότερη αυτής του μηδενικού σεναρίου κατά 1% περίπου .

Το φαινόμενο είναι αναμενόμενο ,αφού ,όπως φαίνεται και από τις εικόνες 4.57-4.58 ,το μέγιστο σημείο της ημερήσιας καμπύλης φορτίου (από το οποίο εξαρτάται η φόρτιση) μετατοπίζεται προς τα πάνω με την αύξηση ισχύος ΦΒ καθώς την ώρα

αιχμής της προστίθεται σε αυτήν η «ουρά» της καμπύλης φορτίου ΑΠΕ (όσο πιο πολλά ΦΒ τόσο μεγαλύτερη η υπέρθεση).Ουσιαστικά με την μεγάλη προσθήκη ισχύος από ΑΠΕ εμφανίζεται πρόβλημα απορρόφησης της τοπικά με αποτέλεσμα να επιστρέφει στο ανάντι δίκτυο .Αυτές οι ροές αυξάνουν την φόρτιση. Να σημειωθεί εδώ ότι ενώ στην μέθοδο D2 το ελάχιστο σημείο εμφανίζεται στον συνδυασμό 1500 οχημάτων και 20MW ισχύος από ΑΠΕ ,στην D1 βρίσκεται στα 2000 οχήματα και 0 MW ισχύος από ΑΠΕ και ίσως να παρουσιαστεί άλλο ελάχιστο διευρύνοντας το διάγραμμα .



Εικόνα 4.61: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για στόλο 2000 οχημάτων και διαφορετικές τιμές διείδυσης ΑΠΕ -στρατηγική D1 .



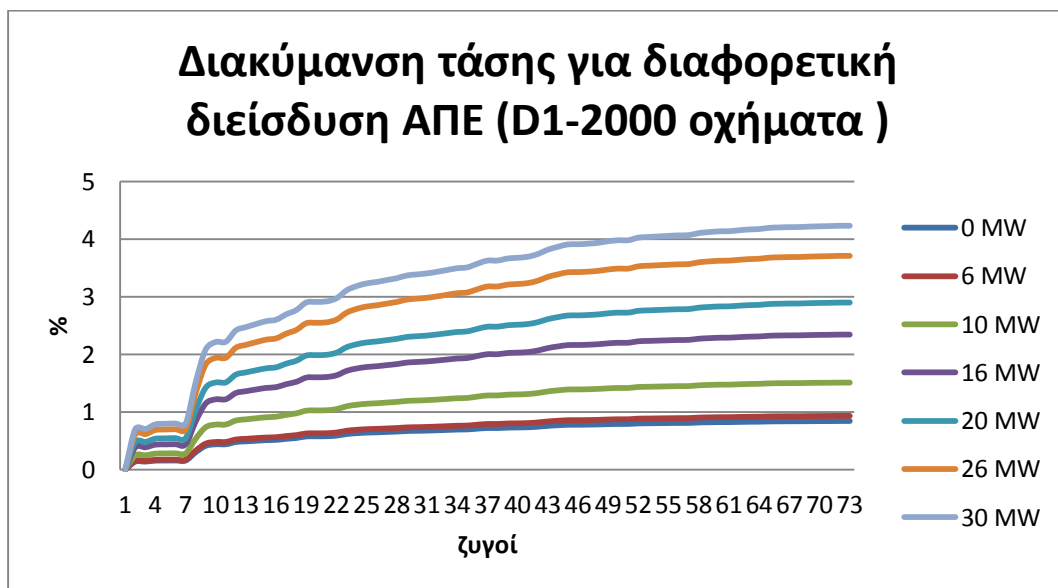
Εικόνα 4.62: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για στόλο 2000 οχημάτων και διαφορετικές τιμές διείδυσης ΑΠΕ -στρατηγική D2 .

- Διακύμανση και προφίλ τάσης

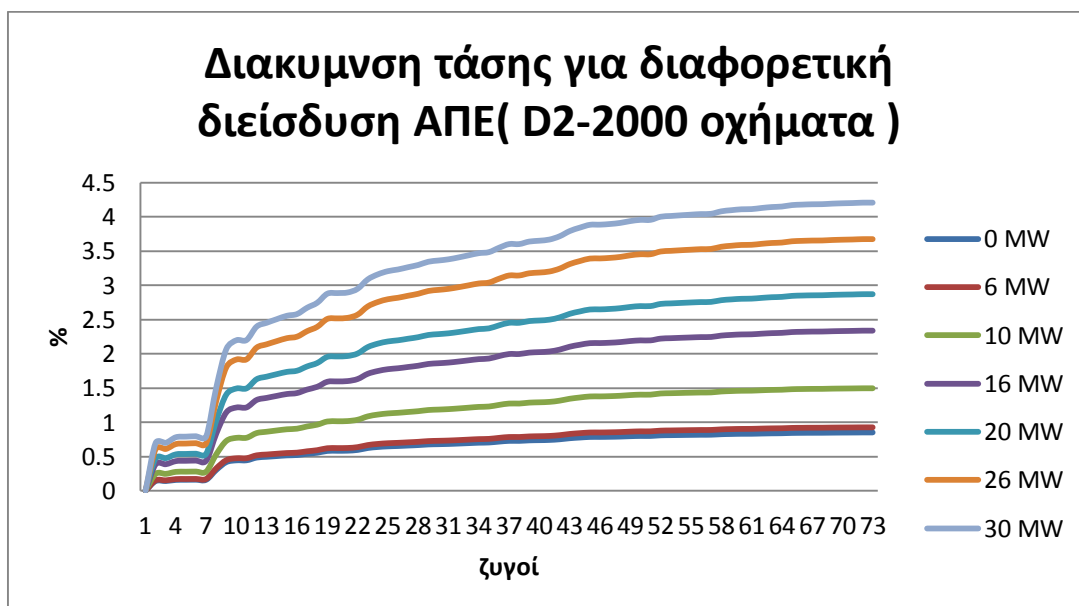
Η διακύμανση της τάσης δικτύου εξαρτάται από το μέγιστο σημείο της καμπύλης φορτίου (ελάχιστη τιμή τάσης) και το ελάχιστο (μέγιστη τιμή τάσης) .Μεγαλώνοντας την απόστασή τους ,αυξάνεται το προς μελέτη μέγεθος .

Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η διακύμανση (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) με προσθήκη διαφορετικού στόλου ηλεκτρικών οχημάτων και διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ από φωτοβολταϊκά κάθε φορά .

Αρχικά θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται από την διείσδυση επιπρόσθετων μονάδων ΑΠΕ ,για τυχαίο πλήθος στόλου (εικόνες 4.63 – 4.64) .

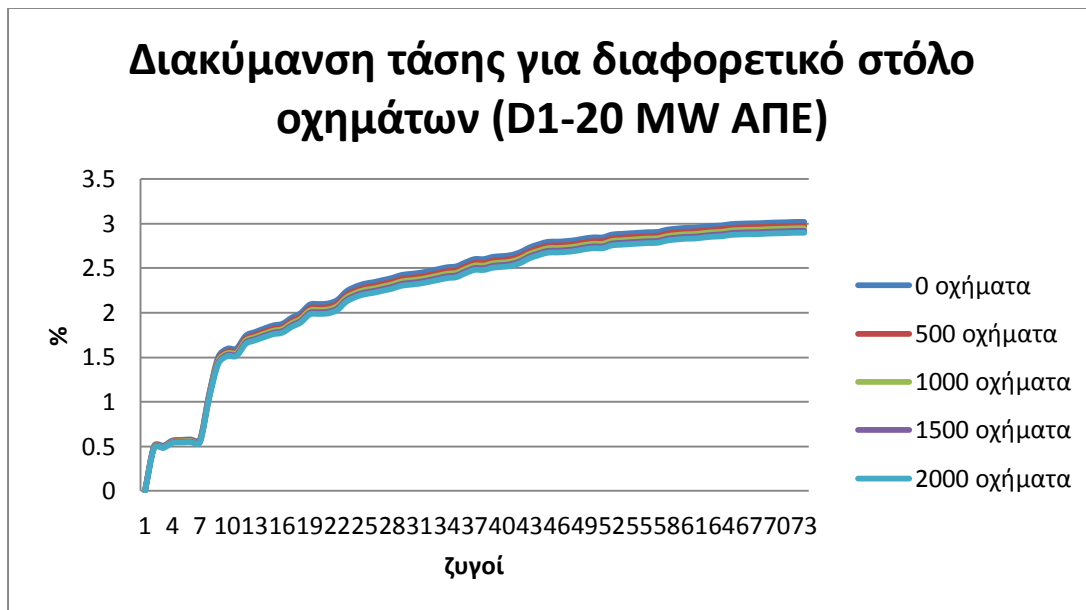


Εικόνα 4.63: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (0,6,10,16,20,26,30 MW) – στρατηγική D1.

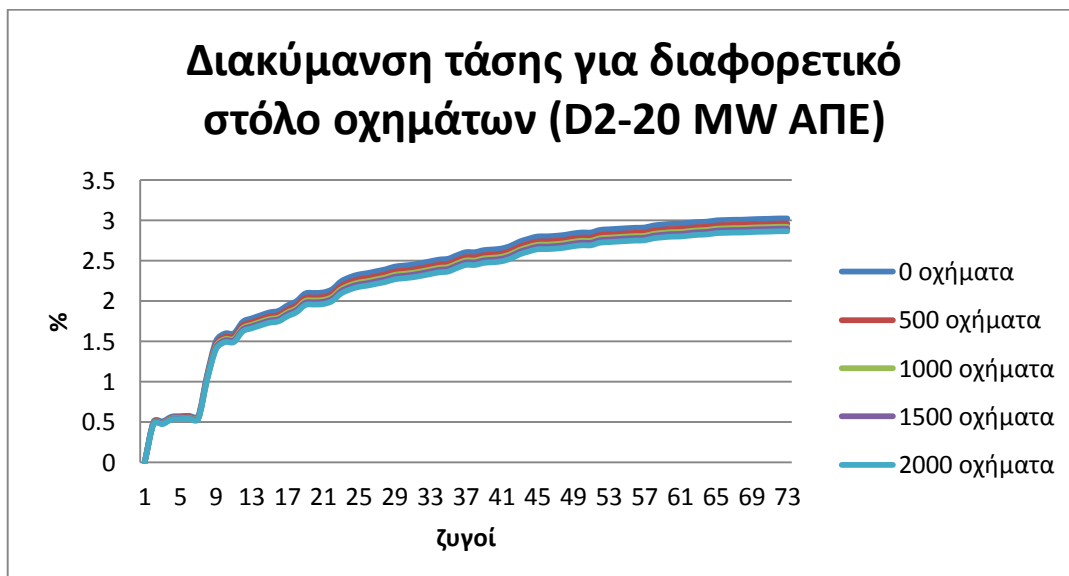


Εικόνα 4.64: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (0,6,10,16,20,26,30 MW) – στρατηγική D2.

Τα αποτελέσματα και για τις δύο στρατηγικές είναι ίδια .Όσο αυξάνεται η διείσδυση ΑΠΕ ,για τον ίδιο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων ,αυξάνεται και η διακύμανση της τάσης ,γεγονός αναμενόμενο ,καθώς το επιπλέον φορτίο από τις φωτοβολταϊκές μονάδες ,επιβαρύνει την κοιλία της καμπύλης φορτίου (εικόνες 4.57-4.58). Ακολουθώντας θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται η διακύμανση τάσης δικτύου από το μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων για κοινή τιμή διείσδυσης ΑΠΕ (εικόνες 4.65 – 4.66) .



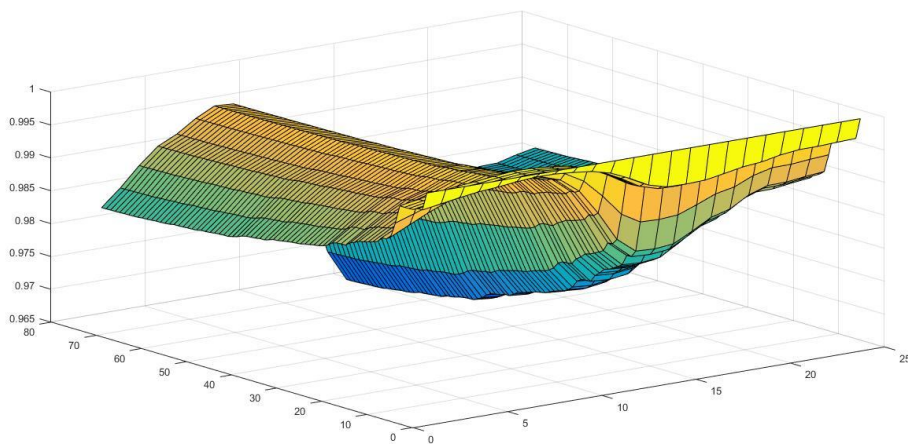
Εικόνα 4.65: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,500,1000,1500,2000 οχήματα) – στρατηγική D1.



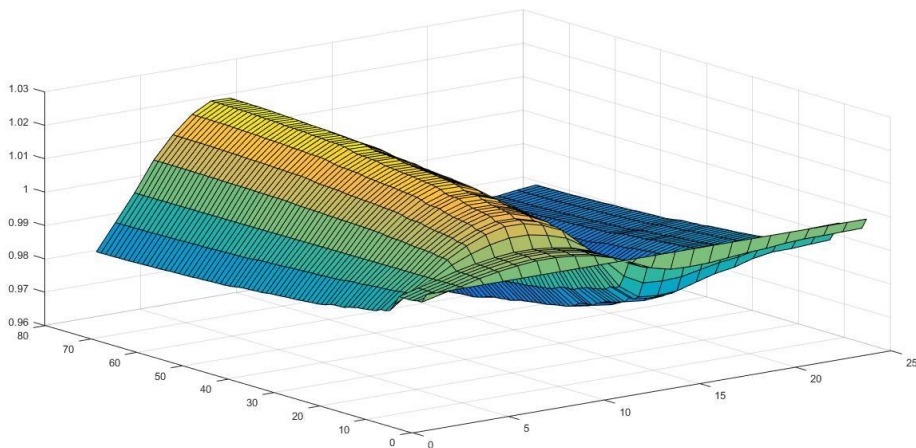
Εικόνα 4.66: Καμπύλη διακύμανσης τάσης ανά ζυγό με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,500,1000,1500,2000 οχήματα) – στρατηγική D2.

Παρατηρούμε ότι η διακύμανση τάσης παραμένει σχεδόν ίδια ανεξαρτήτως στόλου και στρατηγικής φόρτισης (για κοινές τιμές ισχύος ΦΒ) .Οι μικρές διαφοροποιήσεις

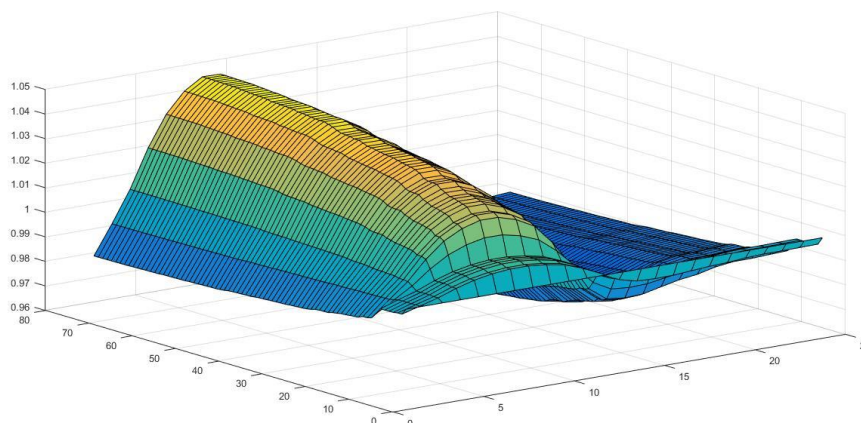
των καμπυλών ανά αριθμό οχημάτων ,οφείλονται στην λειτουργία V2G , καθώς με αυξανόμενο πλήθος μετατοπίζεται προς τα πάνω η κοιλία τα καμπύλης φορτίου (δηλαδή το σενάριο χωρίς οχήματα έχει μεγαλύτερη διακύμανση). Σε τιμές διείσδυσης ΑΠΕ κοντά στα 20 MW βρισκόμαστε εκτός ορίου του προς μελέτη μεγέθους (3 %) για κάθε τιμή στόλου οχημάτων . Ακολουθούν τα διαγράμματα για το προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της ημέρας για 3 διαφορετικές τιμές διείσδυσης ΑΠΕ και στόλο 2000 οχημάτων για την στρατηγική D1 (είναι κοινά και για D2) (εικόνες 4.67-4.69).



Εικόνα 4.67: Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 10 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική D1 .



Εικόνα 4.68: Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική D1 .

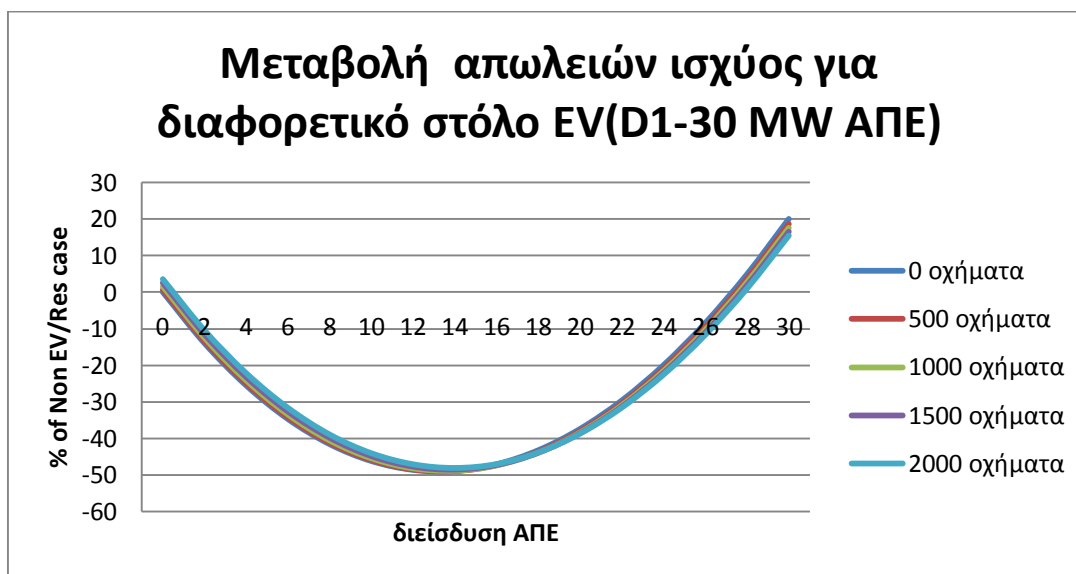


Εικόνα 4.69: Ημερήσιο διάγραμμα του προφίλ της τάσης ανά ζυγό ,για διείσδυση 30 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική D1 .

Παρατηρούμε ότι το προφίλ της τάσης, αν και αυξάνεται με την προσθήκη ΑΠΕ, παραμένει εντός ορίων ($0,95 < \text{voltage profile} < 1,05$) ,οπότε και η μέγιστη επιτρεπτή τιμή διείσδυσης ΑΠΕ θα καθοριστεί μόνο από την διακύμανση τάσης .

- Απώλειες δικτύου (συστήματος)

Για κάθε στρατηγική D η σχέση απωλειών –διείσδυσης ΑΠΕ έχει την κοινή ακόλουθη μορφή (εικόνα 4.70) .

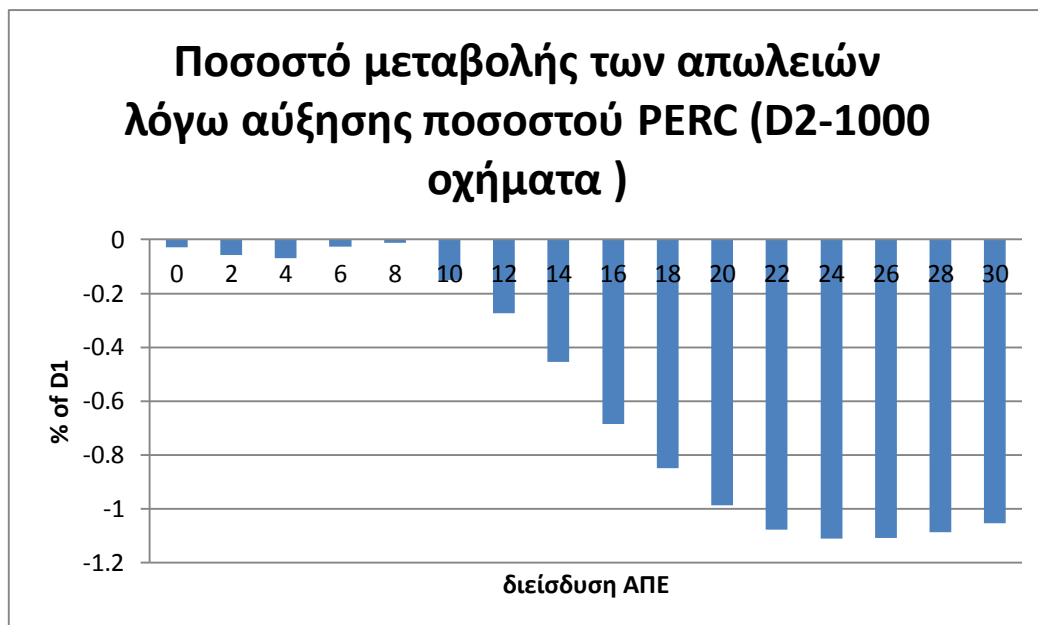


Εικόνα 4.70: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής των απωλειών του συστήματος ανά διείσδυση ΑΠΕ, για διαφορετικό αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων(0 ,500,1000,1500,2000) – στρατηγικές D .

Με την προσθήκη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο δίκτυο μας οι απώλειες του συστήματος τείνουν να μειωθούν ,μέχρι περίπου τα 14 MW όπου και γίνονται ελάχιστες .Με μεγαλύτερη διείσδυση φωτοβολταϊκών οι απώλειες αυξάνονται ,φτάνοντας ,μετά τα 27 MW, επίπεδα μεγαλύτερα ακόμη και εκείνων χωρίς ΑΠΕ .

Ακόμη ,όπως ήταν αναμενόμενο , οι απώλειες μειώνονται με την προσθήκη οχημάτων λόγω της λειτουργίας V2G , αν και οι διαφορές τους είναι αμελητέες .

Στην συνέχεια θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της στρατηγικής D1 με την D2 (εικόνα 4.71) των οποίων η διαφορά έγκειται στο ποσοστό συνεισφοράς της μπαταρίας σε εφαρμογές V2G (στην D1 είναι PERC= 10 % ενώ στην D2 PERC= 20%). Οι απώλειες για στόλο 1000 οχημάτων διαμορφώνονται ως εξής:



Εικόνα 4.71: Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης των απωλειών της στρατηγικής D2 ,συγκριτικά με εκείνες της στρατηγικής D1 (εξαιτίας αύξησης PERC).

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής σε εφαρμογές V2G μειώνονται οι απώλειες του συστήματος ,γεγονός που γίνεται ιδιαίτερα εμφανές από την διείσδυση 10 MW ΑΠΕ και μέγιστο για 22-24 MW.Παρόλα αυτά για πολύ μεγάλη προσθήκη φωτοβολταϊκής ενέργειας (26 MW και πάνω) ο ρυθμός μεταβολής μειώνεται.

4.6.2 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ D ΧΩΡΙΣ ΠΛΗΡΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

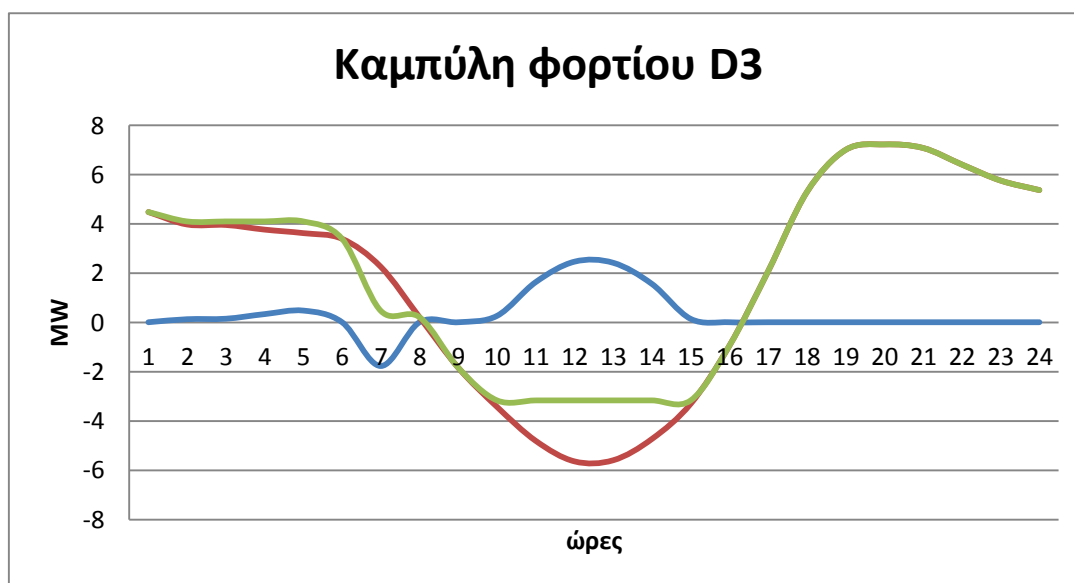
Αφού εξετάστηκε η τέταρτη στρατηγική ,απαιτώντας πλήρη φόρτιση του συσσωρευτή πριν την αναχώρηση του οχήματος (SoC =100%) διαπιστώσαμε από τις καμπύλες φορτίου (εικόνες 4.55 - 4.58) ότι με προσθήκη μεγάλου πλήθους ΗΟ ή με διείσδυση υψηλής ισχύος από ΑΠΕ, τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου γίνονται λιγότερο εμφανή ,αφού δεν συγχρονίζεται η ζήτηση ενέργειας των ΗΟ (φόρτιση) με τις ώρες προσφοράς από ΑΠΕ .Έτσι οδηγούμαστε στην χαλάρωση του περιορισμού της 100% πλήρωσης του συσσωρευτή (δεν χρειάζεται να είναι γεμάτος την ώρα αναχώρησης των οχημάτων ,ώστε να μπορεί να απορροφήσει ισχύ από ΦΒ) και

στις ακόλουθες δύο υποπεριπτώσεις της D στρατηγικής φόρτισης ,των οποίων τα χαρακτηριστικά θα αναλυθούν στην συνέχεια :

- i. Στρατηγική D3: Με $SOC_{out} = 90\%$ (ποσοστό φόρτισης μπαταρίας πριν την εκκίνηση του οχήματος)και $PERC = 10\%$ (ποσοστό συνεισφοράς μπαταρίας σε εφαρμογές V2G) .
- ii. Στρατηγική D4: Με $SOC_{out} = 80\%$ (ποσοστό φόρτισης μπαταρίας πριν την εκκίνηση του οχήματος)και $PERC = 10\%$ (ποσοστό συνεισφοράς μπαταρίας σε εφαρμογές V2G) .

▪ Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Στα ακόλουθα διαγράμματα φαίνεται η ημερήσια καμπύλη φορτίου (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) για τις υποπεριπτώσεις D3 και D4 (εικόνες 4.72-4.77) .Αρχικά παρουσιάζονται τα γραφήματα για τον υπολογισμό της τελικής μορφής (εικόνες 4.72 – 4.73) και στην συνέχεια εκείνα που απεικονίζουν την μεταβολή της καμπύλης για σταθερή ισχύ από ΑΠΕ και μεταβαλλόμενο αριθμό ΗΟ (εικόνες 4.74-4.75) και για σταθερό πλήθος ΗΟ και διαφορετική διείδυση φωτοβολταϊκών (εικόνες 4.76-4.77) .



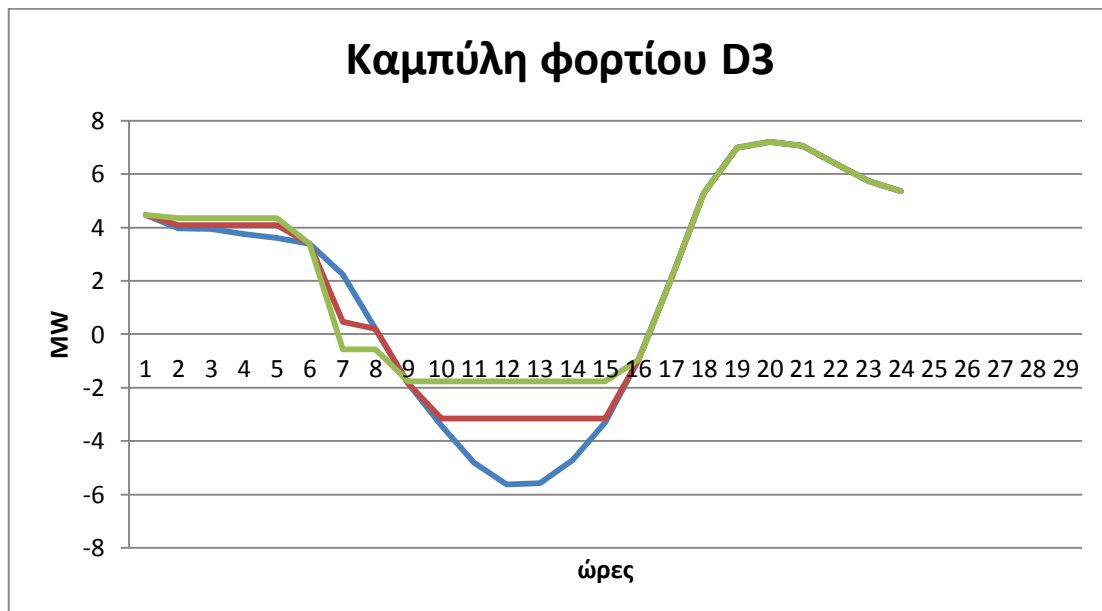
Εικόνα 4.72: Ημερήσια καμπύλη φορτίου με διείδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη 1000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική D3.



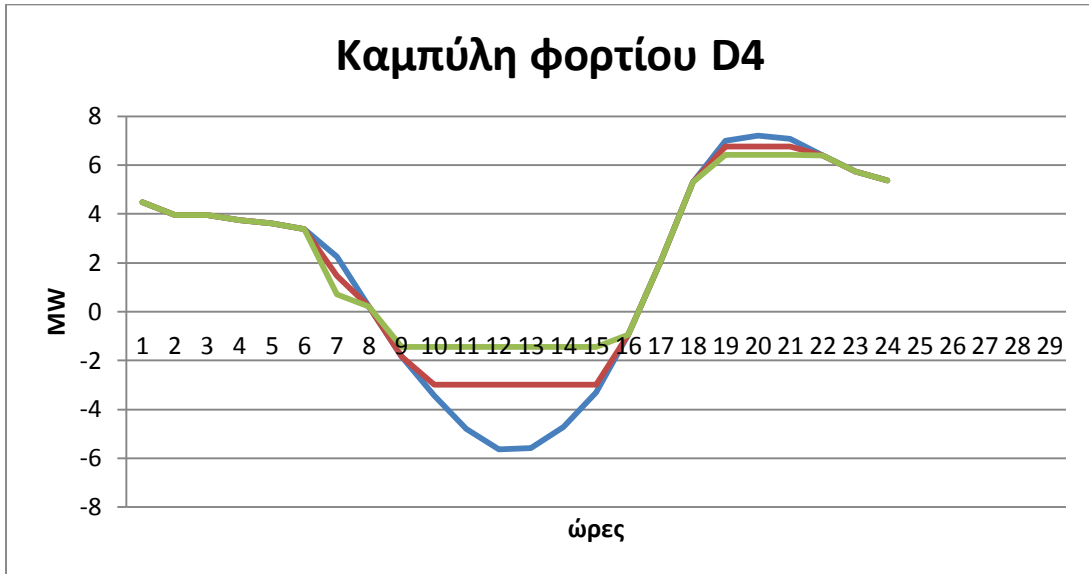
Εικόνα 4.73: Ημερήσια καμπύλη φορτίου με διείδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη 1000 ηλεκτρικών οχημάτων – στρατηγική D4.

Όπου :

- φορτίο λόγω εκάστοτε στρατηγικής φόρτισης
- φορτίο με διείδυση 20 MW ΑΠΕ
- τελικό φορτίο



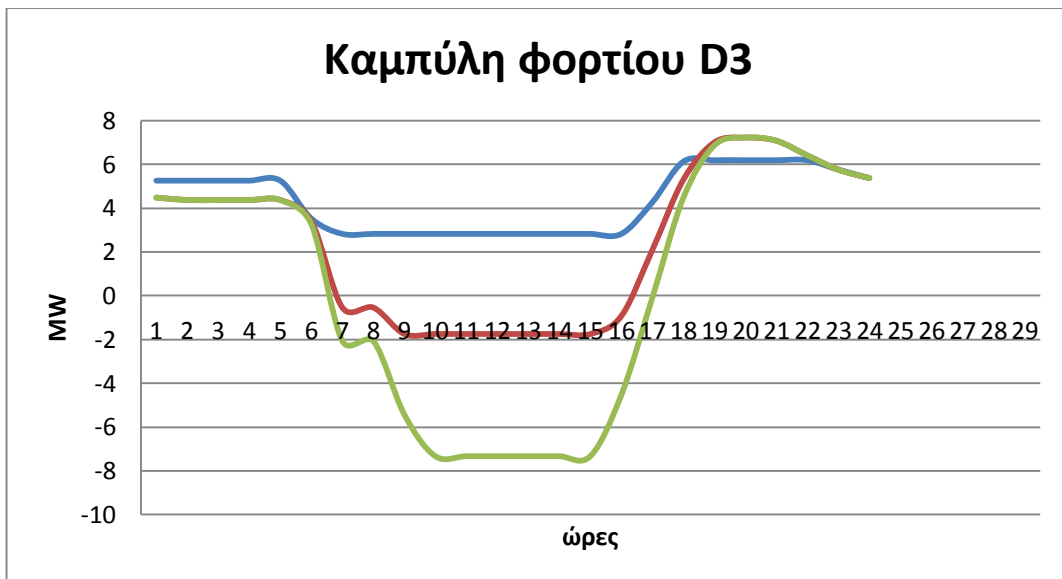
Εικόνα 4.74: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική D3.



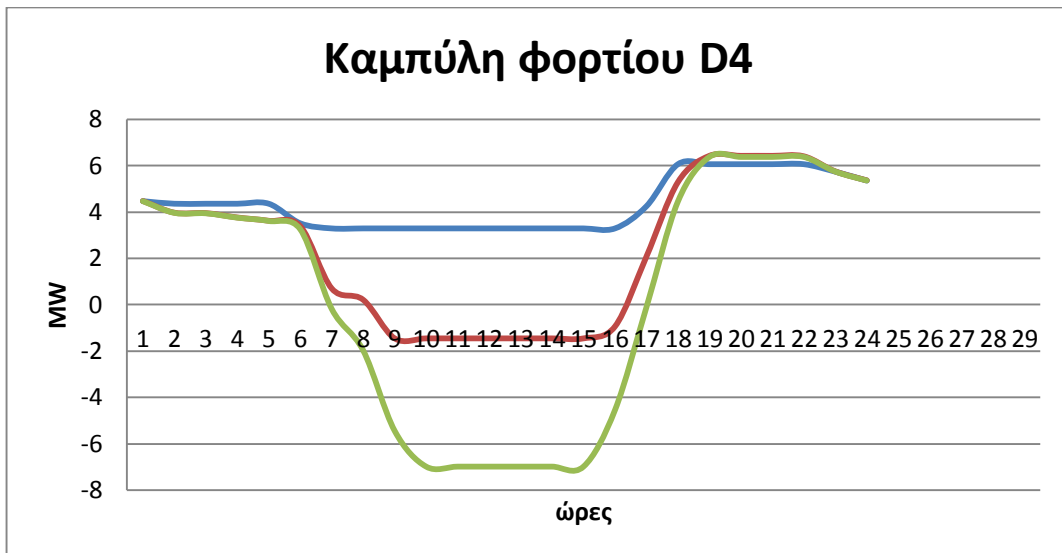
Εικόνα 4.75 : Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη διαφορετικού πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων (0,1000,2000 οχήματα) – στρατηγική D4.

Όπου:

— 0 οχήματα — 1000 οχήματα — 2000 οχήματα



Εικόνα 4.76: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (10,20,30 MW) – στρατηγική D3.



Εικόνα 4.77: Ημερήσιες καμπύλες φορτίου με προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων και με διαφορετική διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ (10,20,30 MW) – στρατηγική D4.

Όπου:

— 10 MW — 20 MW — 30 MW

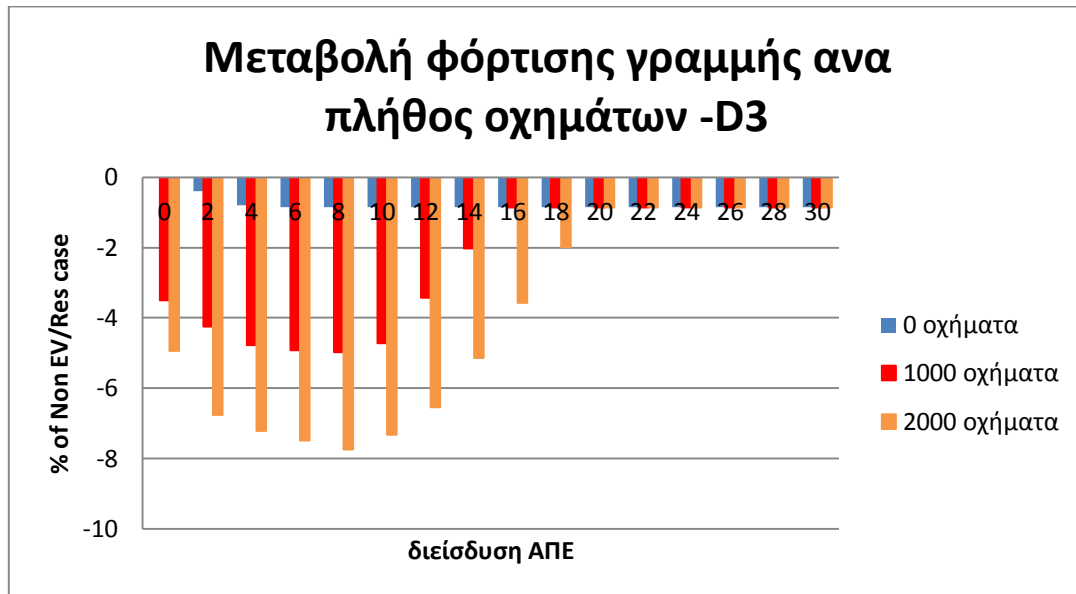
Πράγματι αυτές οι δύο στρατηγικές (κυρίως η D4) επιτυγχάνουν καλύτερα την εξομάλυνση της ημερήσιας καμπύλης φορτίου ,καθώς παρατηρείται ακόμη μεγαλύτερη ανύψωση του γραφήματος με την εισαγωγή περισσότερων ΗΟ και καλύτερη σταθεροποίηση, με την αύξηση της διείσδυσης ισχύος από ΑΠΕ, γεγονός εμφανές στις εικόνες 4.75 & 4.77 (η μείωση του ποσοστού SoC έδωσε την δυνατότητα κατανάλωσης της περιττής ενέργειας των ΦΒ).

- Φόρτιση γραμμής

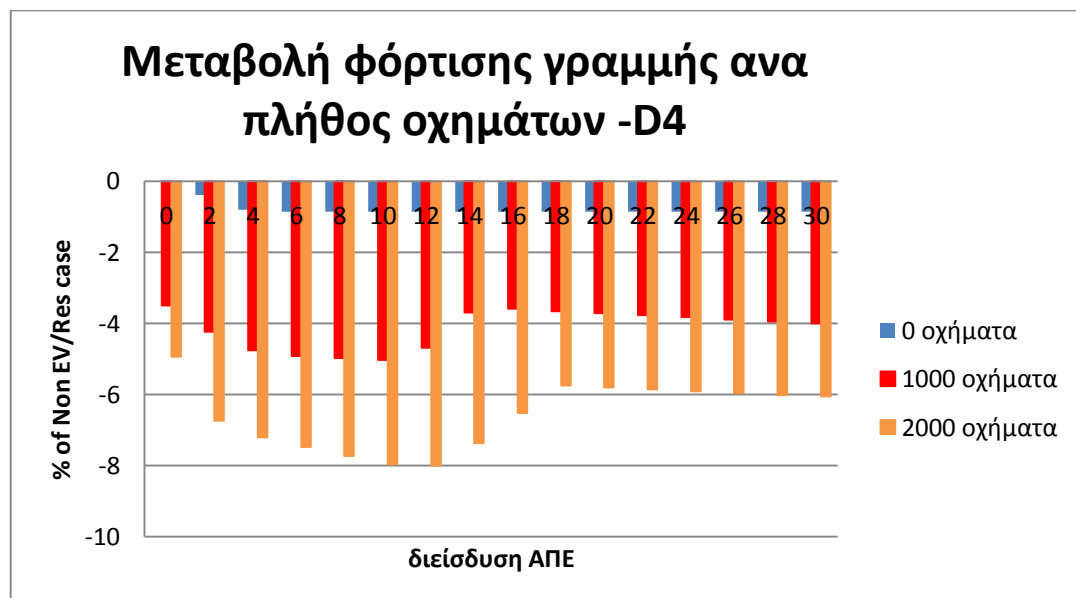
Οι τιμές μεταβολής φόρτισης των γραμμών του δικτύου (των στρατηγικών D3 & D4 συγκριτικά με το σενάριο μη ύπαρξης οχημάτων και ΑΠΕ) , για διαφορετικά μεγέθη στόλου ΗΟ φαίνονται στις εικόνες 4.78 & 4.79 .

Παρατηρούμε πως και για τις δύο μεθόδους παρουσιάζεται παρόμοια συμπεριφορά ,αφού οι τιμές φόρτισης γενικά μειώνονται .Ωστόσο η μείωση είναι εντονότερη για διείσδυση 0-16 MW ΑΠΕ (και για τις δύο στρατηγικές)και είναι εξαρτώμενη από τον αριθμό των ΗΟ . Δηλαδή (για την ίδια τιμή ΦΒ) ,προσθέτοντας πιο πολλά αυτοκίνητα , μέχρι τα 16 MW , για την στρατηγική D3 η φόρτιση θα μειωθεί ,ενώ πέρα από αυτή την διείσδυση θα διατηρηθεί σταθερά μικρότερη αυτής του μηδενικού σεναρίου κατά 1% όσα οχήματα κ εάν προσθέσω , ενώ για την στρατηγική D4 θα διατηρηθεί σταθερά μικρότερη αυτής του μηδενικού σεναρίου κατά 4% για στόλο 1000 οχημάτων και κατά 6 % για στόλο 2000. .Η εξήγηση του

φαινομένου βασίζεται στο διαφορετικό ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας (SoC=90% -D3 , SoC =80% -D4),καθώς αυτή ελαστικότητα δίνει την δυνατότητα τοπικής απορρόφησης μεγαλύτερης ισχύς από ΑΠΕ τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας ,μειώνοντας την επιστροφή περιττής ενέργειας στο ανάντι δίκτυο . Να σημειωθεί ότι το κατώτατο σημείο , για την στρατηγική D3 εμφανίζεται στον συνδυασμό 2000 οχημάτων και 8 MW ισχύος από ΑΠΕ και για την D4 στα 2000 οχήματα αλλά 12 MW ισχύος από ΑΠΕ (η D4 μπορεί να απορροφήσει πιο πολλές ΦΒ μονάδες) .Φαίνεται άμεσα η υπεροχή τους ,συγκριτικά με τις αρχικές υποθέσεις (D1 & D2) .

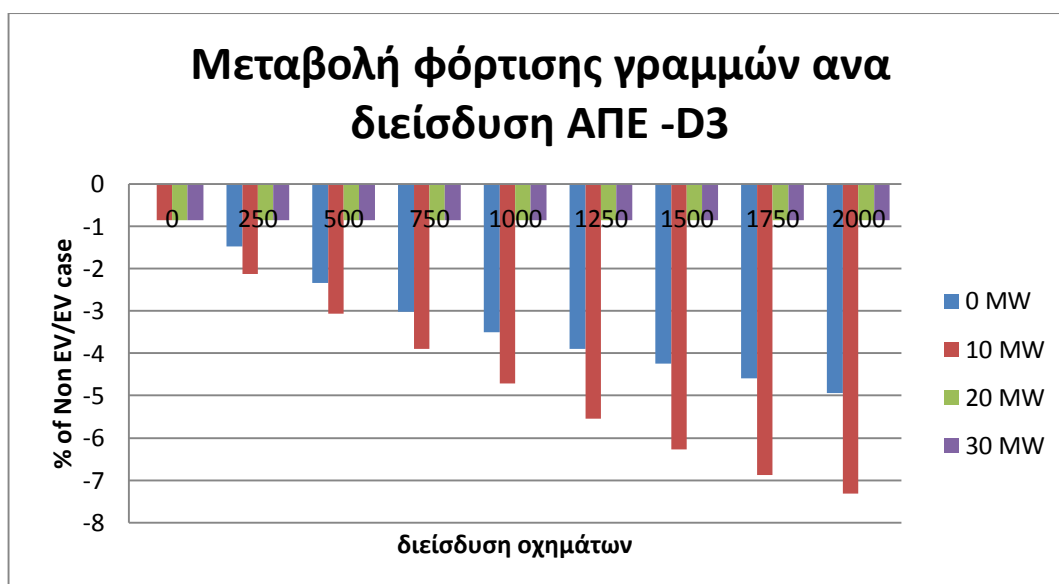


Εικόνα 4.78: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για για διείσδυση ΑΠΕ έως 30 MW και διαφορετικά μεγέθη στόλου ηλεκτρικών οχημάτων -στρατηγική D2 .

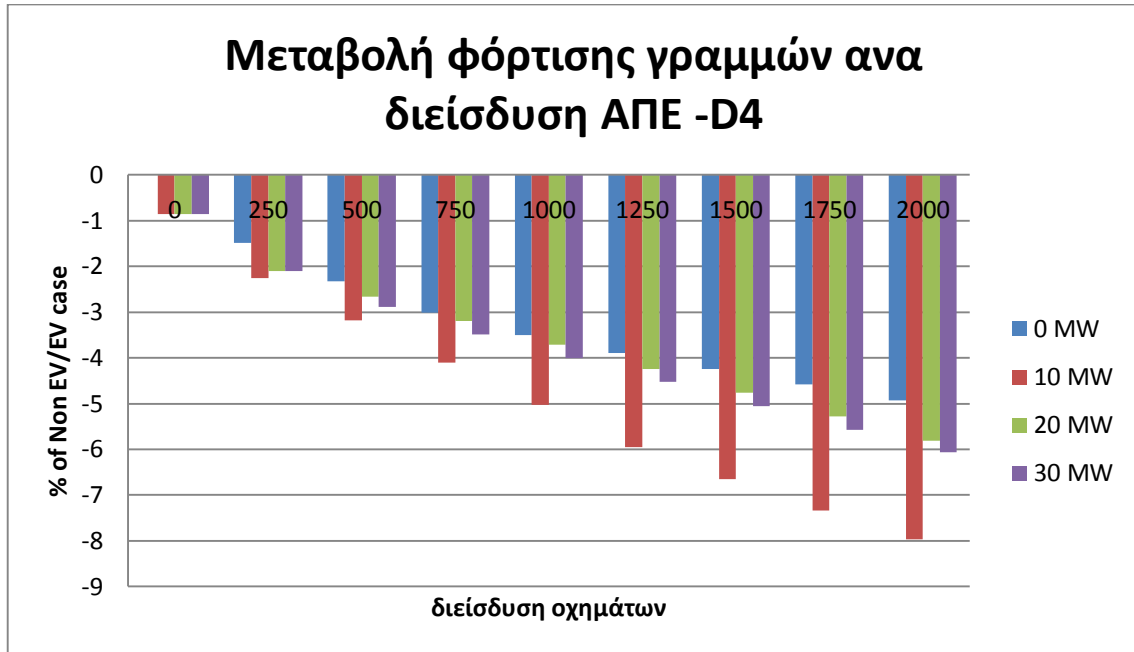


Εικόνα 4.79: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για διείσδυση ΑΠΕ έως 30 MW και διαφορετικά μεγέθη στόλου ηλεκτρικών οχημάτων -στρατηγική D4.

Αντίστοιχα παρουσιάζονται και οι τιμές μεταβολής φόρτισης των γραμμών του δικτύου ,ανά διαφορετική διείσδυση ΑΠΕ μέχρι την προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων (εικόνες 4.80 & 4.81) .Με χρήση της στρατηγικής D3 παρατηρείται η μεγαλύτερη μείωση για τις χαμηλές τιμές ισχύος (0 ,10 MW) ,αυξανόμενη αναλογικά με το πλήθος των οχημάτων ,ενώ για επιπρόσθετη διείσδυση ,η φόρτιση παραμένει σταθερά μικρότερη αυτής του μηδενικού σεναρίου κατά 1% περίπου . Με εφαρμογή της στρατηγικής D4 η φόρτιση των γραμμών ελαττώνεται για όλες τις τιμές διείσδυσης ΑΠΕ καθώς προστίθενται οχήματα στο δίκτυο ,η εντονότερη, ωστόσο ,μεταβολή είναι εμφανής για 10 MW ισχύος .Το φαινόμενο είναι αναμενόμενο ,αφού ,όπως φαίνεται και από τις εικόνες 4.76-4.77 ,αυξάνοντας την ισχύ από ΦΒ, η κορυφή της ημερήσιας καμπύλης φορτίου μετατοπίζεται προς τα πάνω, καθώς την ώρα αιχμής της, προστίθεται ελάχιστο φορτίο από την «ουρά» της καμπύλης φορτίου ΑΠΕ (όσο πιο πολλά ΦΒ τόσο μεγαλύτερη η υπέρθεση) . Η μείωση ,όμως , του ποσοστού φόρτισης των οχημάτων πριν την αναχώρηση τους (SoC) δίνει την δυνατότητα απορρόφησης της περιττής ενέργειας από ΑΠΕ τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας (όπως φαίνεται με την πολύ μικρή αύξηση της κορυφής της καμπύλης στην εικόνα 4.77) ,δείχνοντας έτσι τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου (D4) .Να σημειωθεί εδώ ότι στις δύο περιπτώσεις το ελάχιστο σημείο εμφανίζεται στον συνδυασμό 2000 οχημάτων και 10MW διεισδυσάσης ισχύος ,με πιθανότητα να μετακινηθεί δεξιότερα διευρύνοντας το διάγραμμα .



Εικόνα 4.80: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για στόλο έως 2000 οχήματα και διαφορετικές τιμές διείσδυσης ΑΠΕ -στρατηγική D3.



Εικόνα 4.81: Καμπύλη ποσοστιαίας μεταβολής της συνολικής μέγιστης φόρτισης γραμμών για στόλο έως 2000 οχήματα και διαφορετικές τιμές διείσδυσης ΑΠΕ -στρατηγική D4 .

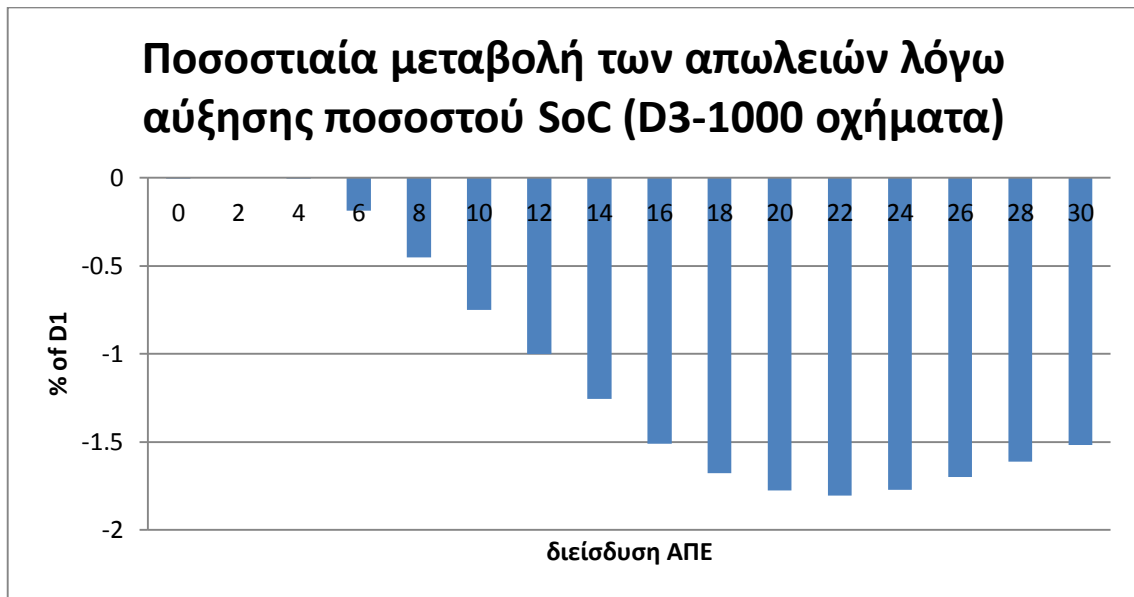
- Διακύμανση και προφίλ τάσης

Όλες οι στρατηγικές D παρουσιάζουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά ,όσον αφορά την διακύμανση και το προφίλ της τάσης ζυγών .Οπότε ισχύει ότι αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο .

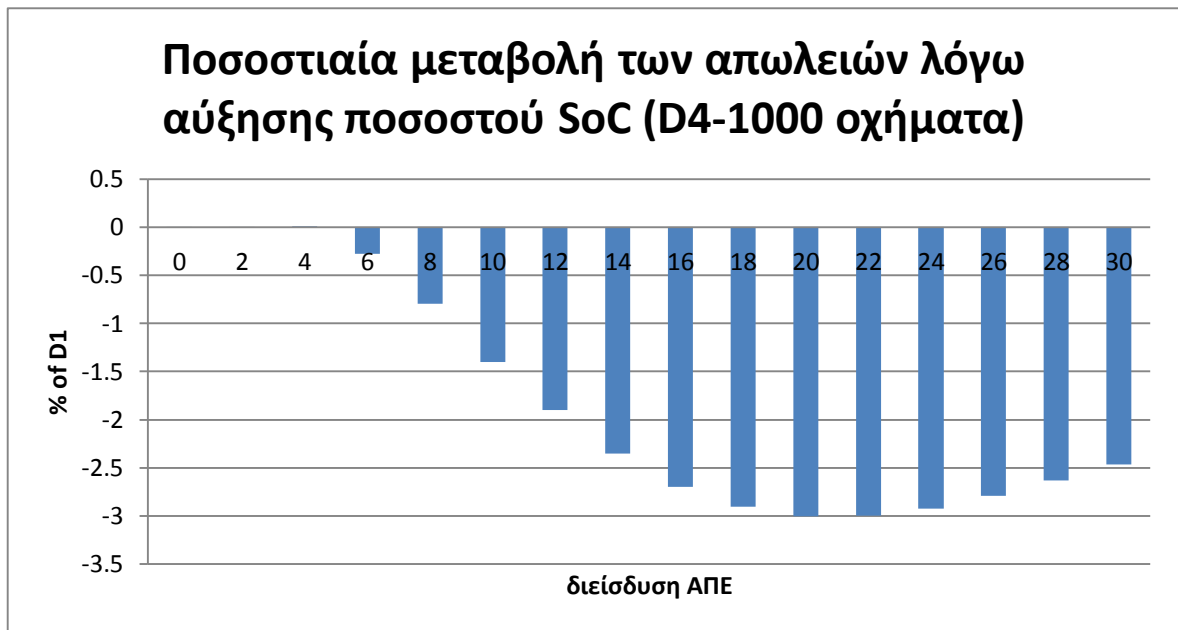
- Απώλειες δικτύου (συστήματος)

Για κάθε στρατηγική D η σχέση απωλειών –διείσδυσης ΑΠΕ έχει την κοινή μορφή της εικόνα 4.70 .

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της στρατηγικής D1 με τις υπόλοιπες ,προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις :Οι στρατηγικές D1 ,D3 και D4 έχουν ίδιο ποσοστό συνεισφοράς της μπαταρίας σε εφαρμογές V2G (PERC=100%) αλλά διαφέρουν στο ποσοστό φόρτισης της μπαταρίας (πριν την αναχώρηση του οχήματος) ,καθώς για την μεν πρώτη το ποσοστό SoC είναι 100% ,ενώ για την δεύτερη SoC=90% και για την Τρίτη SoC=80% . Έτσι τα συγκριτικά τους διαγράμματα είναι :



Εικόνα 4.82: Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης των απωλειών της στρατηγικής D3 ,συγκριτικά με εκείνες της στρατηγικής D1 (εξαιτίας PERC=100% και SoC= 90%).



Εικόνα 4.83: Διάγραμμα ποσοστιαίας μείωσης των απωλειών της στρατηγικής D2 ,συγκριτικά με εκείνες της στρατηγικής D1 (εξαιτίας PERC=100% και SoC= 80%).

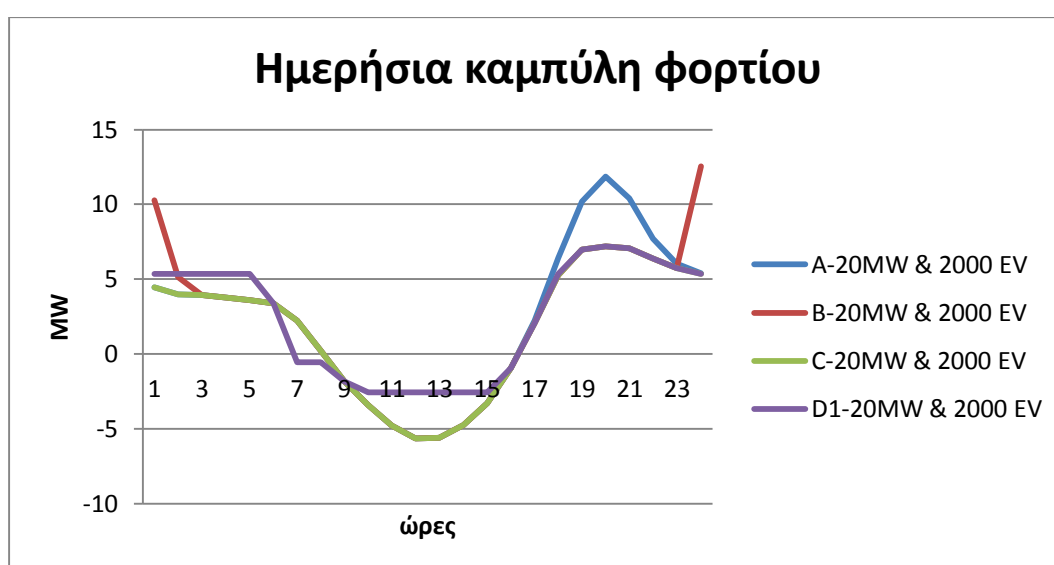
Είναι εμφανές και σε αυτές τις στρατηγικές ,ότι με την προσθήκη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο δίκτυο μας , οι απώλειες του συστήματος τείνουν να μειωθούν και γίνονται ελάχιστες με διείσδυση 22 MW ισχύος από ΦΒ .Ωστόσο με την μείωση του ποσοστού φόρτισης των συσσωρευτών των οχημάτων πριν την αναχώρησή τους (D4=80% < D3=90 %) οι απώλειες γίνονται λιγότερες ,όπως φαίνεται στην εικόνα 4.83 (τα αυτοκίνητα μπορούν να απορροφήσουν περισσότερη περιττή ενέργεια από ΦΒ) , καταδεικνύοντας την υπεροχή της τελευταίας μεθόδου.

4.7 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των τεσσάρων στρατηγικών ,ώστε να φανούν τα πλεονεκτήματα της τελευταίας μεθόδου . Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι από την τέταρτη μέθοδο φόρτισης ,έχει επιλεχθεί ,στις περισσότερες συγκρίσεις ,η στρατηγική D4 ,καθώς όπως είδαμε και προηγουμένως έχει την μεγαλύτερη απόδοση .

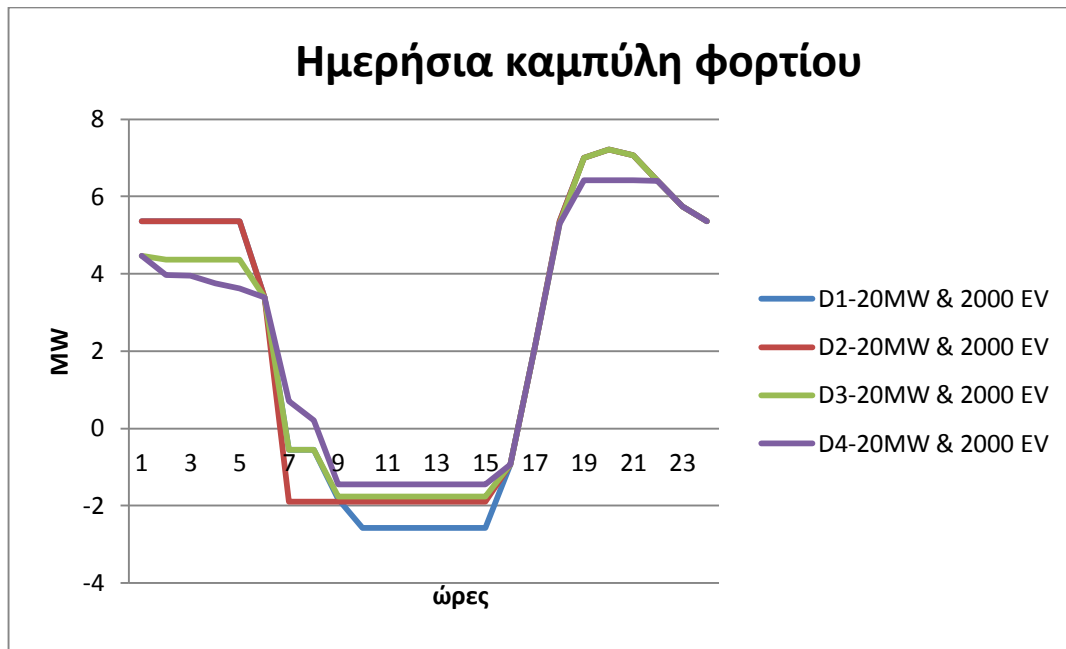
- Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Στο ακόλουθο διάγραμμα (εικόνες 4.84 – 4.85)φαίνεται η ημερήσια καμπύλη φορτίου (για κάποια ,ίδια ,τυχαία μέρα) με την προσθήκη στόλου 2000 ηλεκτρικών οχημάτων 20 MW διείδυση ΑΠΕ από φωτοβολταϊκά για όλες τις στρατηγικές.



Εικόνα 4.84: Ημερήσια καμπύλη φορτίου με διείδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων για όλες τις στρατηγικές .

Είναι εμφανές ότι τα βέλτιστα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με χρήση της στρατηγικής D1 ,καθώς το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζει τις λιγότερες αυξομειώσεις και την καλύτερη σταθεροποίηση τάσης (έχει μεν κοινό μέγιστο με άλλες δύο μεθόδους ,αλλά παρουσιάζει υψηλότερο ελάχιστο σημείο). Στην συνέχεια θα συγκρίνουμε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις της στρατηγικής D μεταξύ τους , ώστε να καταλήξουμε σε τελικό συμπέρασμα (εικόνα 4.85) .



Εικόνα 4.85: Ημερήσια καμπύλη φορτίου με διείσδυση 20 MW ισχύος από ΑΠΕ και προσθήκη 2000 ηλεκτρικών οχημάτων για όλες τις στρατηγικές D .

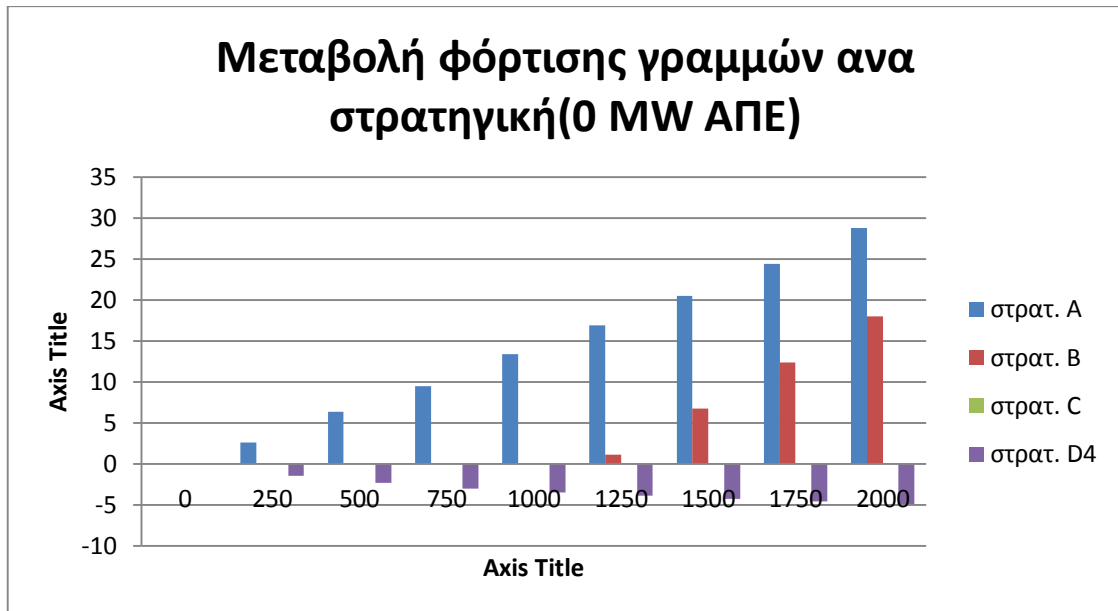
Παρατηρούμε ότι τα θετικά οφέλη δεν είναι τόσο έντονα με αύξηση του ποσοστού συμμετοχής σε λειτουργία V2G (D2) ,όσο με αντίστοιχη ποσοστιαία μείωση της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών(D3-D4) .Όπως ήταν αναμενόμενο ,την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει η στρατηγική D4 καθώς ,πέρα από την επιστροφή ισχύος στο δίκτυο όταν απαιτείται , με την χαλάρωση του περιορισμού της πλήρους φόρτισης (SoC=80%) επιτρέπει στα οχήματα να απορροφήσουν περισσότερη περιττή ενέργεια κατά τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας από ΦΒ μονάδες.

- Φόρτιση γραμμής

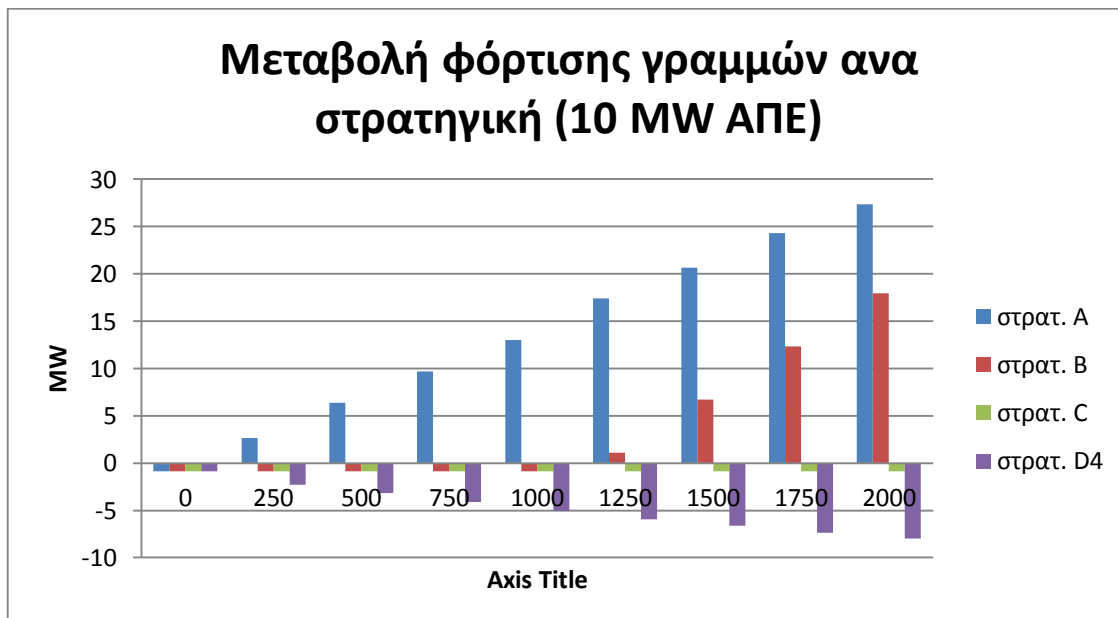
Στα ακόλουθα διαγράμματα (εικόνες 4.86-4.89) γίνεται σύγκριση της φόρτισης γραμμών του συστήματος (υπολογισμένων αναφορικά με το σενάριο μη ύπαρξης οχημάτων και ΦΒ) ,για διαφορές τιμές διείσδυσης ισχύος από ΑΠΕ ,μέχρι 2000 ηλεκτρικά οχήματα . Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το μέγιστο της καμπύλης φορτίου .

Συμπεράσματα :Παρατηρούμε ότι η φόρτιση για τις στρατηγικές A και B (για την B μετά τα 1000 ΗΟ καθώς για πλήθος 0-1000 είναι σταθερή με τιμή -1%)αυξάνεται με την προσθήκη οχημάτων ,το ίδιο, ανεξαρτήτως της παραγόμενης ενέργειας από ΦΒ. Στην πρώτη περίπτωση βέβαια (στρατηγική A) οι μεταβολές είναι εντονότερες .Στις μεθόδους C και D4 όμως δεν συμβαίνει το ίδιο .Η φόρτιση παραμένει σταθερά μικρότερη του μηδενικού σεναρίου κατά 1% περίπου ,ανεξαρτήτως ΦΒ για την στρατηγική C (βλέπουμε ότι στο πρώτο διάγραμμα –εικόνα 4.86 – είναι μηδενική) ,ενώ για την D4 παρουσιάζει μείωση ανάλογη του πλήθους των οχημάτων .Να σημειωθεί ότι οι βέλτιστες τιμές παρατηρούνται στα 10 MW ΑΠΕ

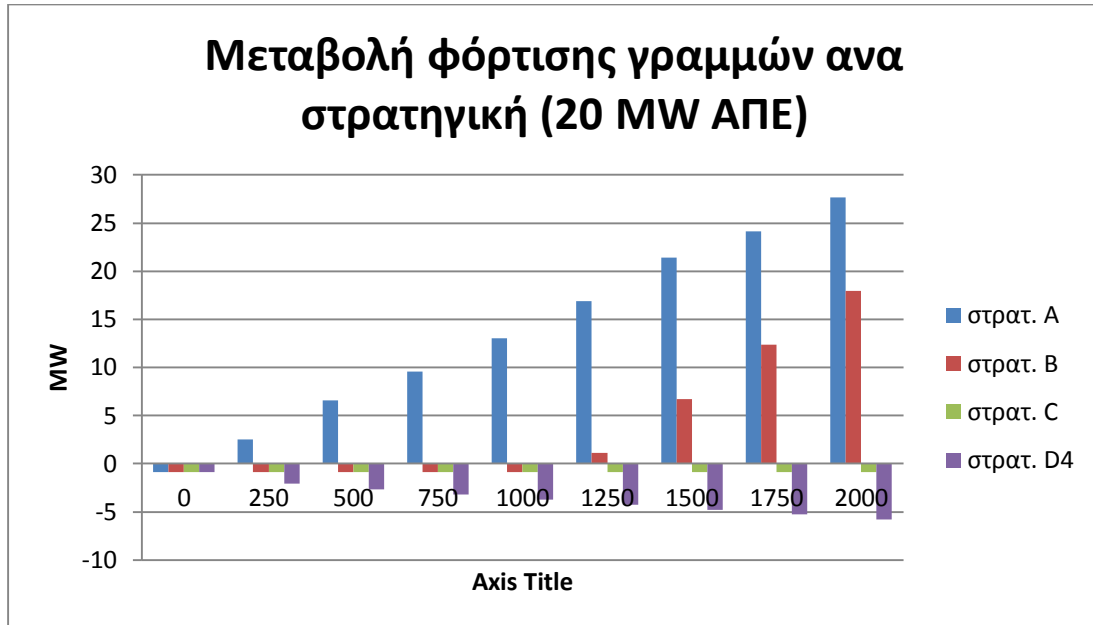
ενώ από αυτή την τιμή και πέρα η ελάττωση γίνεται με μικρότερους ρυθμούς .Η συμπεριφορές αιτιολογούνται με βάση την κορυφή της καμπύλης φορτίου η αύξηση της οποίας οφείλεται όχι μόνο στην εκάστοτε στρατηγική φόρτισης αλλά και στην ανικανότητα απορρόφησης μεγάλης ισχύος από ΑΠΕ τοπικά ,η οποία επιστρέφει στο ανάντι δίκτυο .Αυτές οι ανάστροφες ροές αυξάνουν το φορτίο των γραμμών από ένα σημείο και μετά .



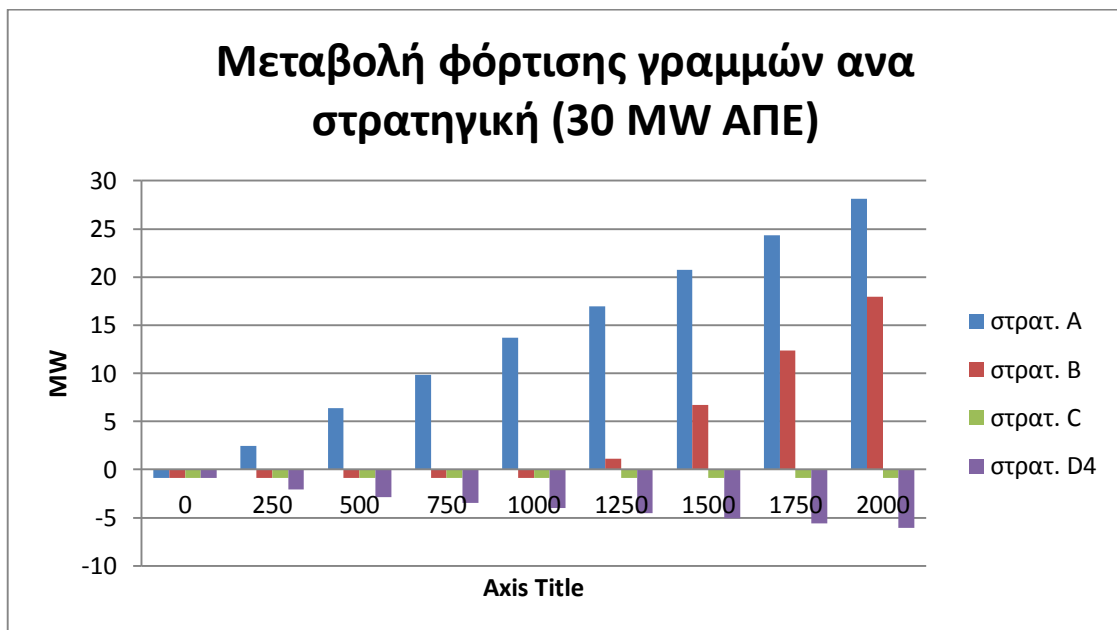
Εικόνα 4.86: Καμπύλες ποσοστιαίας μεταβολής των απωλειών του συστήματος για όλες τις στρατηγικές και 0 MW διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ .



Εικόνα 4.87: Καμπύλες ποσοστιαίας μεταβολής των απωλειών του συστήματος για όλες τις στρατηγικές και 10 MW διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ .



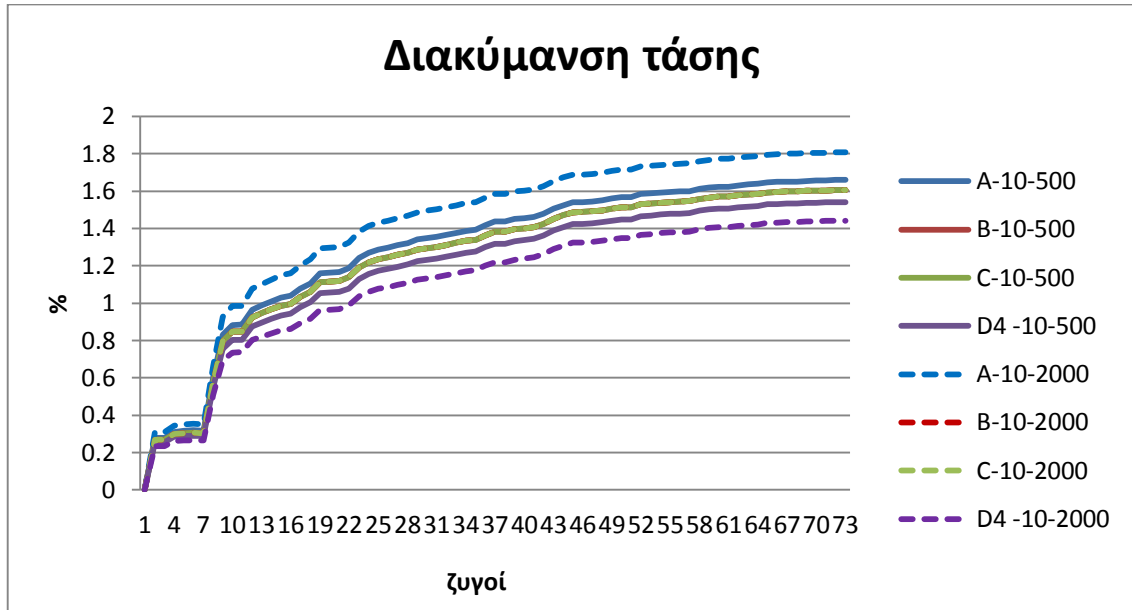
Εικόνα4.88: Καμπύλες ποσοστιαίας μεταβολής των απωλειών του συστήματος για όλες τις στρατηγικές και 20 MW διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ .



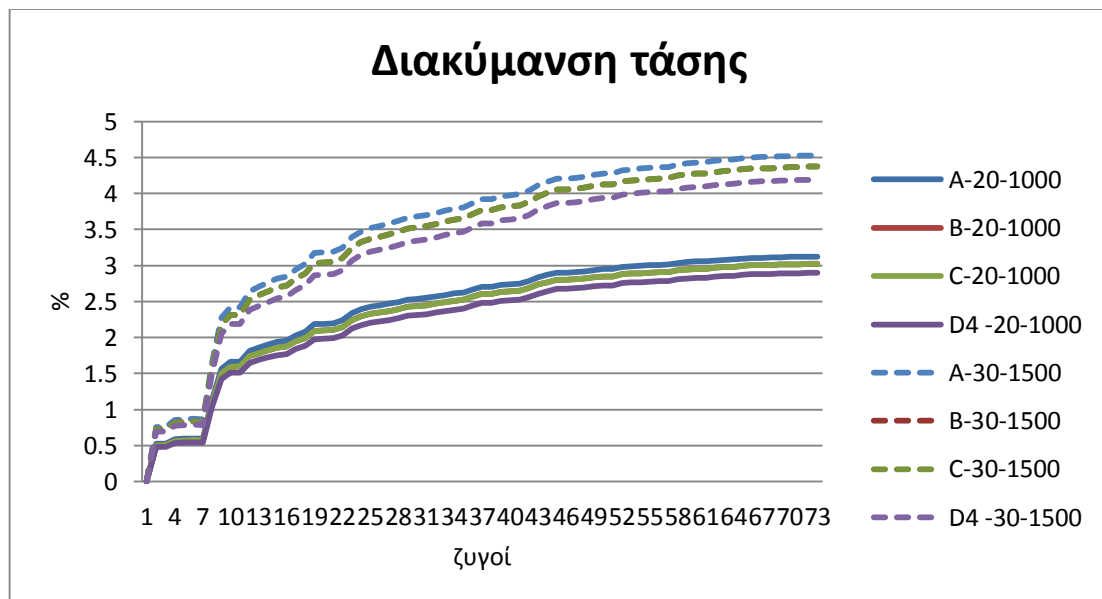
Εικόνα 4.89: Καμπύλες ποσοστιαίας μεταβολής των απωλειών του συστήματος για όλες τις στρατηγικές και 30 MW διείσδυση ισχύος από ΑΠΕ .

- Διακύμανση τάσης

Θα παρουσιάσουμε την διακύμανση τάσης και των τεσσάρων μεθόδων σε τυχαίους συνδυασμούς ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων (εικόνες 4.90 -4.91):



Εικόνα 4.90: Καμπύλες διακύμανσης τάσης ανά ζυγό σε διάφορους συνδυασμούς (10 MW & 500 οχήματα, 10 MW & 2000 οχήματα) για όλες τις στρατηγικές.



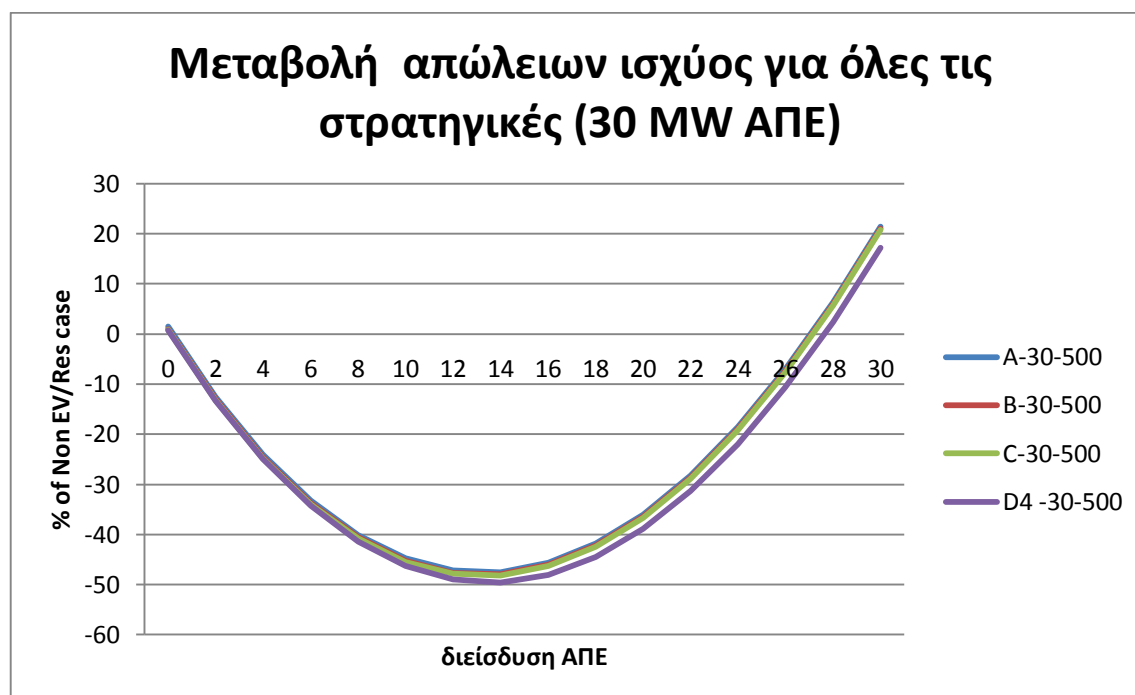
Εικόνα 4.91: Καμπύλες διακύμανσης τάσης ανά ζυγό σε διάφορους συνδυασμούς (20 MW & 1000 οχήματα, 30 MW & 1500 οχήματα) για όλες τις στρατηγικές.

Συμπεράσματα : Παρατηρούμε ότι για όλους τους συνδυασμούς οχημάτων και διεύθυνσης ΑΠΕ η στρατηγική D4 παρουσιάζει την μικρότερη διακύμανση ,ενώ οι στρατηγικές B και C ταυτίζονται σε όλα τα διαγράμματα .Ακόμη γίνεται εμφανές ότι η διακύμανση αυξάνεται ανάλογα με την διεύθυνση ΑΠΕ ,ενώ σε περιπτώσεις προσθήκης ίδιας ισχύος από φωτοβολταϊκά η διακύμανση αυξάνεται ανάλογα με το πλήθος των οχημάτων και η απόκλιση των στρατηγικών μεταξύ τους αυξάνεται .Τέλος ,όπως υποδεικνύει το τρίτο διάγραμμα με μεγαλύτερη διεύθυνση από 20 MW ΑΠΕ και στόλο 1000 οχημάτων η διακύμανση τάσης για τις στρατηγικές A,B ,C

βγαίνει εκτός ορίων (μόνο η D μπορεί να δεχτεί περισσότερα οχήματα ή μεγαλύτερη ισχύ φωτοβολταϊκών). Στο τελευταίο διάγραμμα όλες οι στρατηγικές είναι εκτός ορίων.

- Απώλειες συστήματος

Αντιστοίχως θα παρουσιάσουμε τις απώλειες συστήματος και των τεσσάρων μεθόδων σε κοινό διάγραμμα και σε τυχαίους συνδυασμούς ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων :

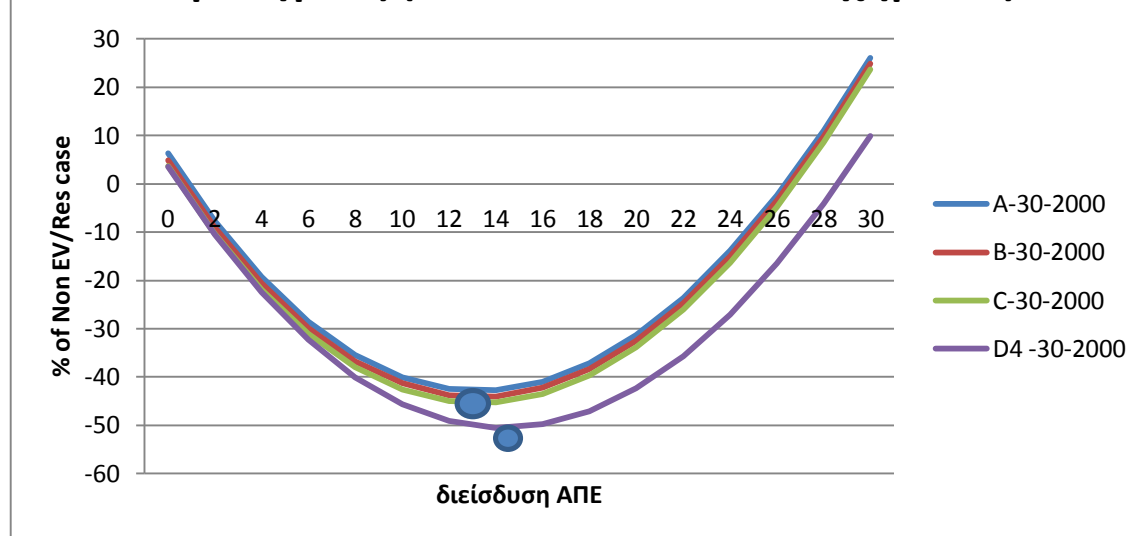


Εικόνα 4.92: Καμπύλες μεταβολής απωλειών ισχύος ανά δείσδυση ΑΠΕ σε διάφορους συνδυασμούς (για 30 MW & 500 οχήματα) για όλες τις στρατηγικές.

Συμπεράσματα : Παρατηρούμε ότι στο άνωθεν συνδυασμό (30 MW ΑΠΕ και 500 οχήματα) οι απώλειες για όλες τις στρατηγικές μέχρι την δείσδυση των 12 MW ΑΠΕ είναι ίδιες. Από εκείνο το σημείο και μετά για τις A, B και C είναι ταυτοσημές ενώ για την στρατηγική D4 το ποσοστό μείωσης είναι μεγαλύτερο. Συνεπώς με χρήση της λειτουργίας V2G (στρατηγικές D) μπορούμε να εκμεταλλευτούμε ακόμη περισσότερο την φωτοβολταϊκή ενέργεια, μέχρι, όμως, ενός σημείου.

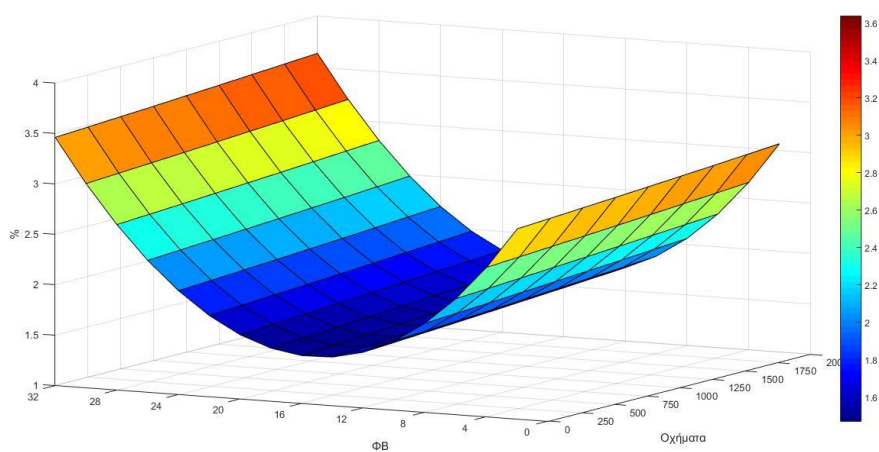
Προσθέτοντας οχήματα παρατηρούμε ότι ανοίγει ακόμη περισσότερο η ψαλίδα ανάμεσα στις μεθόδους, καθώς η στρατηγική D4, ωφελείται από την αύξηση του στόλου καθώς εκμεταλλεύεται την λειτουργία V2G ή ακόμη απορρόφει περιττή ισχύ από ΦΒ για την φόρτιση του (εικόνα 4.93).

Μεταβολή απώλειων ισχύος για όλες τις στρατηγικές (30 MW ΑΠΕ & 2000 οχήματα)

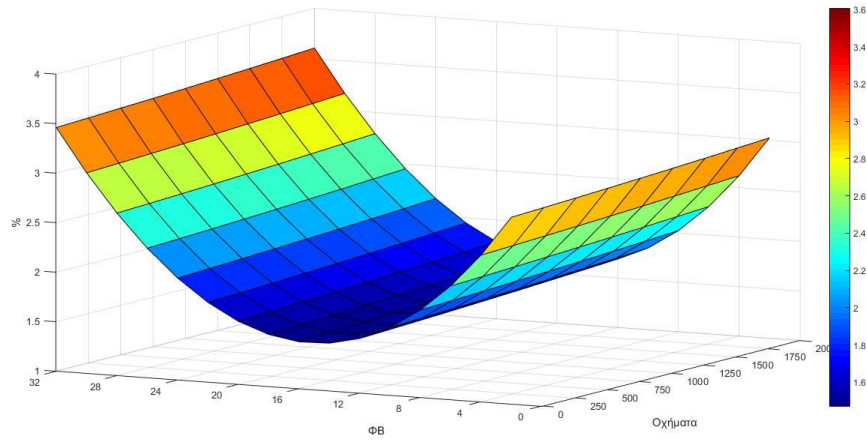


Εικόνα 4.93: Καμπύλες μεταβολής απωλειών ισχύος ανά διείσδυση ΑΠΕ σε διάφορους συνδυασμούς (για 30 MW & 2000 οχήματα) για όλες τις στρατηγικές

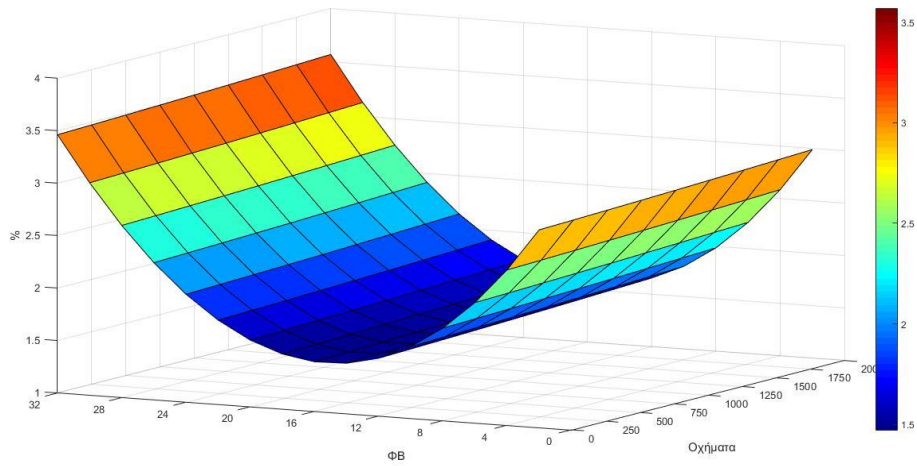
Ακολουθούν τρισδιάστατα διαγράμματα της μεταβολής των απωλειών ισχύος με διείσδυση 30 MW ισχύος ΑΠΕ και 2000 οχήματα (για όλες οι στρατηγικές) (εικόνες 4.94 - 4.101):



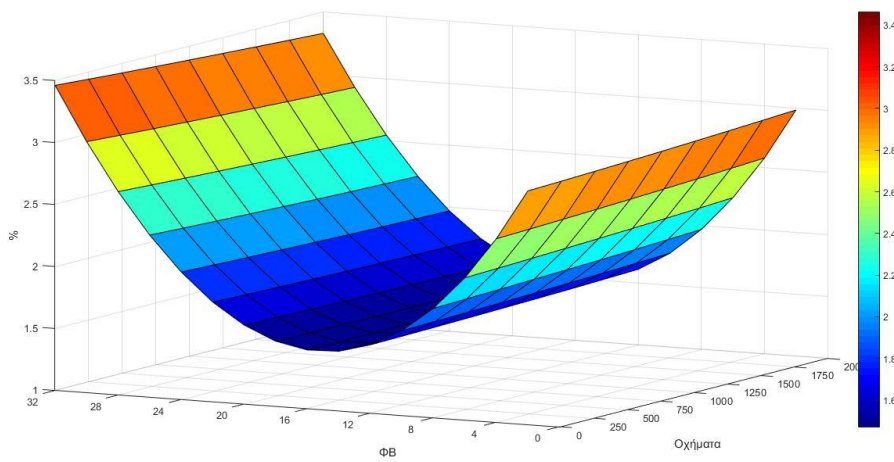
Εικόνα 4.94:Διάγραμμα μεταβολής των απωλειών ισχύος με διείσδυση 30 MW ισχύος ΑΠΕ και 2000 οχήματα-στρατηγική Α.



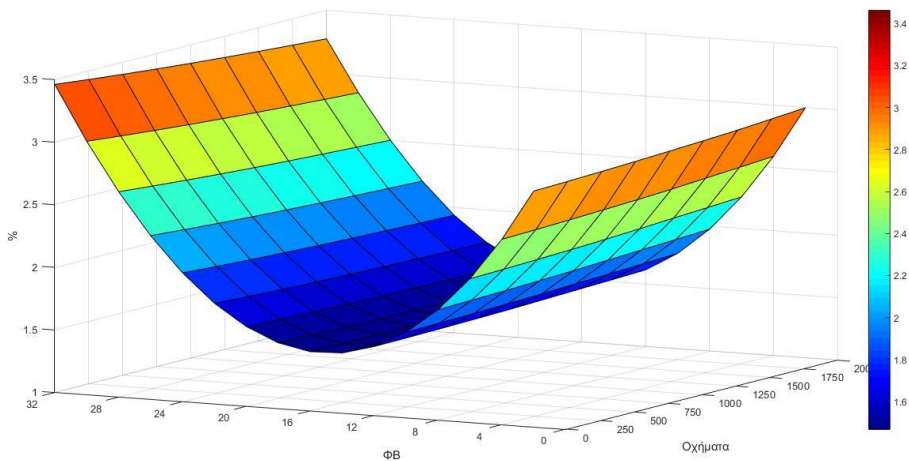
Εικόνα 374.95::Διάγραμμα μεταβολής των απωλειών ισχύος με διείδυση 30 MW ισχύος ΑΠΕ και 2000 οχήματα-στρατηγική Β.



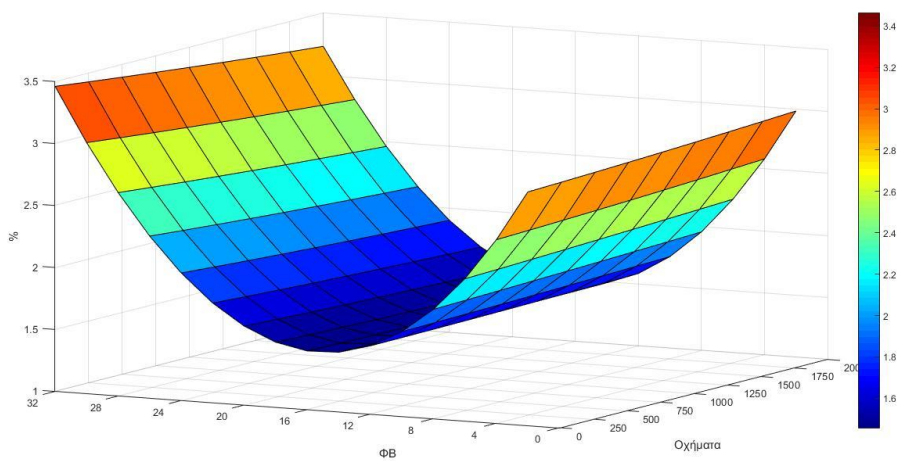
Εικόνα 384.96::Διάγραμμα μεταβολής των απωλειών ισχύος με διείδυση 30 MW ισχύος ΑΠΕ και 2000 οχήματα-στρατηγική C.



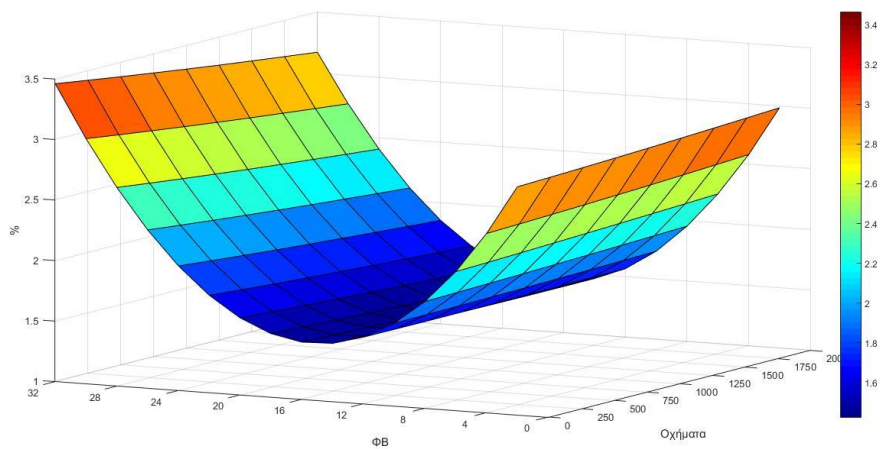
Εικόνα 394.97::Διάγραμμα μεταβολής των απωλειών ισχύος με διείδυση 30 MW ισχύος ΑΠΕ και 2000 οχήματα-στρατηγική D1



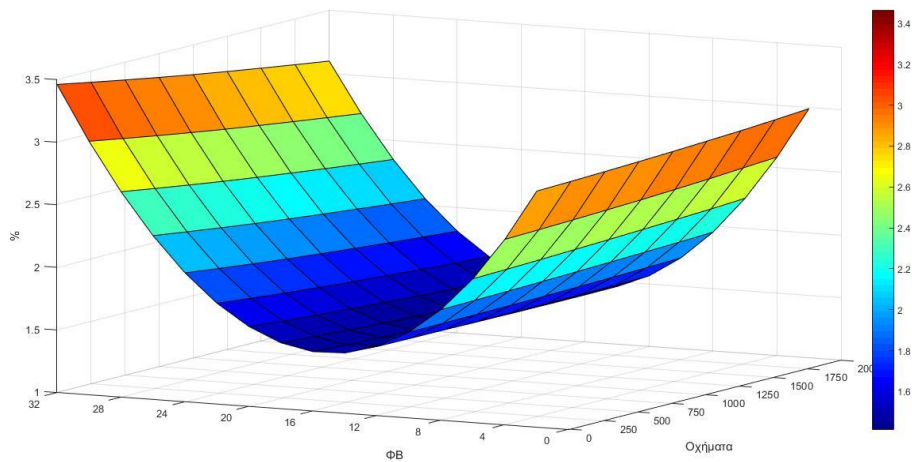
Εικόνα 404.98::Διάγραμμα μεταβολής των απωλειών ισχύος με διείσδυση 30 MW ισχύος ΑΠΕ και 2000 οχήματα-στρατηγική D2.



Εικόνα 414.99::Διάγραμμα μεταβολής των απωλειών ισχύος με διείσδυση 30 MW ισχύος ΑΠΕ και 2000 οχήματα-στρατηγική D3.



Εικόνα 42::Διάγραμμα μεταβολής των απωλειών ισχύος με διείσδυση 30 MW ισχύος ΑΠΕ και 2000 οχήματα-στρατηγική D4.



Εικόνα 4.101:Διάγραμμα μεταβολής των απωλειών ισχύος με διείσδυση 30 MW ισχύος ΑΠΕ και 2000 οχήματα-στρατηγική D5.

Συμπεράσματα: Στα τα άνωθεν διαγράμματα φαίνεται πως μεταβάλλονται οι απώλειες ισχύος ,με εφαρμογή διαφορετικής στρατηγικής φόρτισης ,για ίδιο αριθμό οχημάτων και διείσδυση ΑΠΕ κάθε φορά . Γενικά οι καμπύλες έχουν ίδια μορφή παρουσιάζοντας όλες ελάχιστο γύρω στα 12-14 MW ΑΠΕ ,μόνο όμως στις υποπεριπτώσεις της μεθόδου D οι απώλειες μειώνονται ,προσθέτοντας ΗΟ .Για να γίνει ακόμη πιο εμφανής αυτή η παρατήρηση έγινε προσομοίωση και για την στρατηγική D5 με ποσοστό συμμετοχής σε εφαρμογές V2G (PERC)=20% και στάθμη συσσωρευτή πριν την εκκίνηση (SoC)=80% .

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στην διπλωματική αυτή ,αφού πρώτα αναλύθηκαν τα βασικά τους χαρακτηριστικά ,εξετάστηκε η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα υπαρκτό δίκτυο ,το δίκτυο της Κατερίνης ,χρησιμοποιώντας τέσσερα πιθανά σενάρια φόρτισης των συσσωρευτών τους .Σκοπός ήταν να μελετηθεί η επίδραση της κάθε στρατηγικής και να καταδειχθεί η βέλτιστη ,δηλαδή εκείνη με λειτουργία V2G (επιστροφής ενέργειας στο δίκτυο) έναντι των υπολοίπων .Τα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

Από την μελέτη που διεξήχθη ,είναι εμφανές ότι η μη ελεγχόμενη φόρτιση (A-dumb charging) και η φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (B-dual tariff charging),προκαλούν αύξηση του φορτίου ,κυρίως τις ώρες αιχμής . Ωστόσο ,καθώς το δίκτυο της Κατερίνης είναι αστικό ,με μικρές γραμμές μεταφοράς , η διακύμανση της τάσης δύσκολα θα του δημιουργήσει πρόβλημα . Πράγματι αυξάνεται ,ωστόσο οι περιορισμοί στην επιτρεπτή τιμή διεισδύσασας ισχύος από ΑΠΕ είναι πολύ υψηλοί (η διακύμανση βγαίνει εκτός του μέγιστου ορίου ,που είναι 3%, για τιμές μεγαλύτερες των 18 MW) και μεταβάλλονται με τον αριθμό των οχημάτων ,καθώς όσο πιο πολλά προστίθενται ,τόσο περισσότερο μεγαλώνει η διακύμανση ,οδηγώντας σε μικρότερη εκμετάλλευση των φωτοβολταϊκών διατάξεων . Εντός ορίων βρίσκεται πάντα και το προφίλ της τάσης ανά ζυγό (έστω και εάν προσθέτοντας οχήματα το προφίλ εκείνων με την μεγαλύτερη καταπόνηση κινδυνεύει να βγει εκτός).Ακόμη οι απώλειες ισχύος του δικτύου μειώνονται συγκριτικά με το μηδενικό σενάριο(0 ΗΟ & 0 ΑΠΕ) και γίνονται ελάχιστες με την προσθήκη 14 MW ισχύος ΦΒ . Από αυτή την τιμή και μετά ,μειώνονται με μικρότερο ρυθμό και γίνονται μεγαλύτερες των αρχικών πέρα των 26MW .Όπως είναι αναμενόμενο οι απώλειες αυξάνονται καθώς μεγαλώνει ο στόλος των οχημάτων ,οι διαφορές όμως είναι πολύ μικρές. Το σημαντικότερο ,ωστόσο πρόβλημα είναι η φόρτιση των γραμμών καθώς στις μεθόδους αυτές αυξάνεται γραμμικά με την προσθήκη οχημάτων (στην Β η αύξηση σημειώνεται μετά ένταξη 1250 ΗΟ) και παίρνει πολύ υψηλές τιμές ,για όλα τα μεγέθη διείσδυσης ΑΠΕ . Η ένταση της μεταβολής είναι ικανή να προξενήσει προβλήματα στο δίκτυο ,άρα οι μέθοδοι φόρτισης Α και Β κρίνονται ακατάλληλες .

Αντίθετα με χρήση των έξυπνων στρατηγικών φόρτισης (C-valley filling & D1-V2G) οι αρνητικές επιπτώσεις αντιμετωπίζονται κατά ένα βαθμό αφού η φόρτιση των οχημάτων γίνεται σε ώρες μη αιχμής και το φορτίο από την λειτουργία τους κατανέμεται καλύτερα .Έτσι η διακύμανση βγαίνει εκτός ορίου για μεγαλύτερες τιμές διείσδυσης ισχύος από ΦΒ (γύρω στα 22 MW) και το προφίλ της τάση έχει καλύτερη σταθεροποίηση ,όσα οχήματα κ εάν προσθέσω .Οι απώλειες μειώνονται περισσότερο (παρουσιάζοντας όμως ελάχιστο στην ίδια τιμή προσφερόμενης ισχύος -14 MW) .Η σημαντικότερη βελτίωση απαντάται στην φόρτιση γραμμής ,καθώς για την στρατηγική C το μέγεθος της μεταβάλλεται ελάχιστα προσθέτοντας ΑΠΕ ,μέχρι όμως τα 3000 οχήματα όπου και αρχίζει να αυξάνεται , ενώ στην στρατηγική D1 παρατηρείται μείωση ,μεγαλύτερη για χαμηλές τιμές ΑΠΕ και περισσότερα ΗΟ

.Όπως γίνεται εμφανές με χρήση αυτών των στρατηγικών επιτυγχάνεται η ένταξη μεγαλύτερου στόλου οχημάτων και μπορούν να αξιοποιηθούν καλύτερα οι ΦΒ διατάξεις .

Συγκρίνοντας τις δύο προαναφερθείσες στρατηγικές φόρτισης μεταξύ τους , γίνεται εμφανές από τις προσομοιώσεις ότι η μέθοδος με λειτουργία επιστροφής ισχύος στο δίκτυο (D-V2G) επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα από την απλή έξυπνη φόρτιση (C-valley filling) .Οι τιμές απωλειών , διακύμανσης και προφίλ φορτίου μειώνονται όπως και η φόρτισή γραμμής ,καθώς το φορτίο των οχημάτων κατανέμεται καλύτερα μέσα στο εικοσιτετράωρο .Αυτό σημαίνει ότι αυξάνοντας τον στόλο σταθεροποιείται το δίκτυο και απορροφάται καλύτερα η ισχύς από ΦΒ .Ειδικά εάν τροποποιήσουμε την παράμετρο στάθμης του συσσωρευτή (SoC) ώστε να είναι μικρότερη του 100% μπορούμε να προσθέσουμε ακόμη πιο πολλές μονάδες ΑΠΕ ,αφού τα EV μπορούν να απορροφήσουν περιττή ισχύ φορτίζοντας τις ώρες έντονης ηλιοφάνειας ,ενώ η παράμετρος συμμετοχής σε εφαρμογές V2G (PERC) καθιστά αυτή την μέθοδο ιδανική για όλα τα δίκτυα ,διότι ρυθμίζοντας την κατάλληλα μπορούμε να τα ενισχύσουμε τις ώρες αιχμής . Γίνεται κατανοητό, δηλαδή, ότι ανάλογα με την τοπολογία που έχουμε, θα μπορούν να εφαρμόζονται και διαφορετικές παραλλαγές της στρατηγικής D οι οποίες θα οδηγούν στα βέλτιστα αποτελέσματα κάθε φορά .

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EU MERGE project, Task 3.2, Part 1 of Deliverable D3.2, "Evaluation of the Impact that a Progressive Deployment of EV will Provoke on Electricity Demand, Steady State Operation, Market Issues, Generation Schedules and on the Volume of Carbon Emissions-Electric Vehicle Penetration Scenarios in Germany, UK, Spain, Portugal and Greece".
- [2] K. Clement, K. Van Reusel, J. Driesen: "The consumption of electrical energy of plug-in hybrid electric vehicles in Belgium", EETF- European Ele-Drive Transportation Conference, Brussels, Belgium, June 2007
- [3] S. Blumsack, C. Samaras, P. Hines, "Long-Term Electric System Investments to support Plug-in Hybrid Electric Vehicles", Tech. Rep., 2008
- [4] G.A. Putrus, P. Suwanapingkarl, D. Johnston, E.C. Bentley, M. Narayana "Impact of electric vehicles on power distribution networks", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 827-831, Vancouver, Canada, Sept. 2009
- [5] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, "Stochastic analysis of the impact of plug-in hybrid electric vehicles on the distribution grid", 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2009
- [6] P. Papadopoulos, S. Skarvelis-Kazakos, I. Grau, L. M. Cipcigan, N. Jenkins, "Predicting Electric Vehicle Impacts on Residential Distribution Networks with Distributed Generation", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010
- [7] A.S. Masoum, S. Deji, P. S. Moses, A.A. Siada, "Voltage Profile and THD Distortion of Residential Network with High Penetration of Plug-in Electrical Vehicles", IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010
- [8] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid", IEEE Transactions on Power Systems, pp. 371-380, Feb. 2010
- [9] S. Acha, T.C. Green, N. Shah, "Effects of optimized plug-in hybrid vehicle charging strategies on electric distribution network losses", IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1-6, Apr. 2010
- [10] L. Pieltain Fernandez, T. Gomez San Roman, R. Cossent, C. Mateo Domingo, P. Frias, "Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, May 2010
- [11] M. Aliakbar Golki, H. Valizadeh Haghi, "Using a Multivariate DOE Method for Congestion Study in Distribution Systems under Impacts of Plug-in Electric Vehicles", 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, June 2011
- [12] A. G. Anastasiadis, E. Voreadi, and N. D. Hatziaargyriou, "Probabilistic Load Flow Methods with High Integration of Renewable Energy Sources and Electric Vehicles – Case Study of Greece", IEEE PowerTech Conference, Trondheim, June 2011

- [13] C. Wu, H.M. Rad, J. Huang, J. Jatskevich, PEV-based combined frequency and voltage regulation for smart grid, in: Rec. IEEE PES Innovative Smart Grid Tech. Conf. (ISGT), January 2012.
- [14] E. Karfopoulos, C. Marmaras, N. Hatziargyriou: "Charging Control Model for Electric Vehicle Supplier Aggregator", 3rd ISGT Conference, IEEE, Berlin, Germany, Oct. 2012.
- [15] E. Karfopoulos, N. Hatziargyriou, "Distributed Coordination of Electric Vehicles Providing V2G Services", IEEE Trans. on Power Systems, vol 31, issue 1, pp. 329-338, Jan 2016 - DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2395723