

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ, ΛΑΡΙΣΑ**  
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ»**



**Διαχείριση Ηλεκτρικού Φορτίου σε Καταστάσεις Αυξημένης Διείσδυσης  
Ηλεκτρικών Οχημάτων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας**

**Electric load management in cases of increased penetration of electric  
vehicles into the Electric Power Network**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΖΑΧΑΡΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΜ 7519007**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΜΟΣΧΑΚΗΣ ΜΑΡΙΟΣ**

**ΛΑΡΙΣΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2021**

## Υπεύθυνη Δήλωση

«Δηλώνω υπεύθυνα ότι η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών του ΠΜΣ Πλήρους Φοίτησης του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας «Ενεργειακές Τεχνολογίες και Συστήματα Αυτοματισμών» έχει συγγραφεί από εμένα προσωπικά και δεν έχει υποβληθεί ούτε έχει εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών, στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό. Η εργασία αυτή έχοντας εκπονηθεί από εμένα, αντιπροσωπεύει τις προσωπικές μου απόψεις επί του θέματος και το κείμενο είναι γραμμένο με τα δικά μου λόγια και δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής από τρίτες πηγές. Οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής αναφέρονται στο σύνολό τους, δίνοντας πλήρεις αναφορές στους συγγραφείς, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο».

Ο Δηλών

## **Πρόλογος –Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Μάριο Μοσχάκη για την υποστήριξη και την συμπαράσταση του όλων αυτό τον καιρό που μου παρείχε. Ευχαριστώ τους καθηγητές μου που σε όλη τη διάρκεια των μαθημάτων ήταν δίπλα μου και με προθυμία με βοηθούσανε σε ότι χρειαζόμουν.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου για την συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περίληψη

Στο **κεφάλαιο 1** αναλύονται οι τρόποι αλληλεπίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη κατάσταση V2G (Vehicle to grid), κατά την οποία ενέργεια επιστρέφεται στο δίκτυο. Τελικώς σκόπιμο είναι να μελετηθεί η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αύξηση του φορτίου ή και στη μείωση του δικτύου μέσω της λειτουργίας G2V. Ο ρόλος των έξυπνων συστημάτων με τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και η συνεργασία τους στο δίκτυο μεταφοράς.

Στο **κεφάλαιο 2** ασχολείται με τις τοπολογίες διασύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο διανομής και μελετάει τις ανταλλαγές ενέργειας με αυτό εφαρμόζοντας τις λειτουργίες V2G και G2V. Επιπλέον αναφέρεται στα βασικά χαρακτηριστικά της δομής ενός έξυπνου δικτύου και παραθέτει κάποια στοιχεία για την λειτουργία της έξυπνης φόρτισης. Τέλος μελετάει τρόπους διασύνδεσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τα ηλεκτρικά οχήματα.

Το **κεφάλαιο 3** πραγματεύεται διάφορες τεχνικές πρόβλεψης ηλεκτρικού φορτίου, οι οποίες εμπεριέχουν εμπειρικά μοντέλα ή μοντέλα που εξάγονται και εκπαιδεύονται από μόνα τους όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα.

Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται παραδείγματα πρόβλεψης ηλεκτρικού φορτίου καθώς και οι περιορισμοί που πρέπει να ισχύουν για επιτευχθεί με οποιαδήποτε μέθοδο. Άξιο αναφοράς είναι η κατάλληλη χωρική κατανομή για την μείωση της αιχμής του φορτίου.

## **Abstract**

Chapter 1 analyzes the ways in which electric vehicles interact with renewable energy sources in the V2G (Vehicle to grid) mode, in which energy is returned to the grid. Finally, it is advisable to study the effect of electric vehicles on increasing the load or through the G2V function. The role of intelligent systems with electric vehicles as well as their cooperation in the transmission network.

Chapter 2 deals with the topologies of electric vehicles interconnection with the distribution network, and studies the energy exchanges with it by applying the V2G and G2V functions. In addition, it refers to the basic characteristics of the structure of a smart network and lists some elements concerning the operation of smart charging. Finally, that chapter studies about possible ways of connecting renewable energy sources with electric vehicles.

Chapter 3 deals with various electrical charge prediction techniques, which include empirical models or models that are exported and self-trained such as neural networks.

Chapter 4 presents examples of electric charge prediction as well as the constraints that have to be applied in order for this to be achieved in any way. Worth mentioning is the appropriate spatial distribution aiming to the reduction of the peak load.

## Πίνακας Συντομογραφιών

AC	Alternate Current
AFE	Active Front End
BEV	Buttery Electric Vehicle
BGM	Balance Group Manager
CCM	Continuous Conduction Mode
CET	Contactless Energy Transfer
DCM	Discontinuous Conduction Mode
DC	Direct Current
DERs	Distributed Energy Resources
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DSO	Distribution System Operation
EV	Electric Vehicle
EVM	Electric Vehicle Management
EVT	Electric Variable Transmission
ESP	Energy Service Provider
ESS	Energy Storage System
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
GO	Grid Operator
GUI	Graphical User Interface
G2V	Grid 2 Vehicle
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
IM	Induction Machine
ISG	Integrated Starter Generator
IMG	Industrial Microgrid
IPT	Inductive Power Transfer
PAFC	Phosphoric - Acid Fuel Cells
PEV	Plug-in Electric Vehicle
PEM	Proton Exchange Membrane
PFC	Power Factor Correction

PHEV	Plug-in Hybrid Vehicle
PLC	Power Line Communication
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
PV	Photovoltaic
PWM	Pulse Width Modulator
RES	Renewable Energy Source
SBD	Schottky Barrier Diode
SRM	Switched Reluctance Machine
SOC	State Of Charge
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulator
TSO	Transmission System Operator
V2G	Vehicle 2 Grid
V2H	Vehicle 2 Home
VPP	Virtual Power Plant
WPTS	Wireless Power Transfer System
WSN	Wireless Sensor Network
WECS	Wind Energy Conversion System
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΣΤ	Συνεχή Τάση
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

## Πίνακας περιεχομένων

Υπεύθυνη Δήλωση .....	2
Πρόλογος Ευχαριστίες .....	3
Περίληψη .....	4
Abstract.....	5
Πίνακας Συνοτομογραφιών .....	6
Πίνακας περιεχομένων .....	8
Πίνακας Εικόνων .....	11
Κεφάλαιο 1 .....	12
1. Εισαγωγή.....	12
1.1 Περιγραφή εργασίας.....	12
1.1.1 Ηλεκτροκίνηση και ηλεκτρικά οχήματα .....	12
1.1.2 Εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων στα έξυπνα δίκτυα .....	15
1.2 Ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο .....	15
1.2.1 Ο ρόλος των ηλεκτρικών οχημάτων στα έξυπνα δίκτυα.....	17
1.3 Μέθοδοι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.....	19
Κεφάλαιο 2 .....	23
2. Περιγραφή της Σύνδεσης του Ηλεκτρικού οχήματος με το Δίκτυο .....	23
2.1 Ηλεκτρικής Ενέργειας με τις λειτουργίες V2G G2V .....	23
2.1.1 Προτεινόμενες τεχνολογίες ενσύρματης φόρτισης .....	23
2.2 Τοπολογία μετατροπών ισχύος για εφαρμογές V2G, G2V και V2H .....	25
2.2.1 Μέθοδος ελέγχου της SRM, του DC/DC και AC/AC μετατροπέα .....	30
2.3 Δομή έξυπνου δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος.....	34



2.3.1	Έξυπνη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων .....	34
2.3.2	Επικοινωνία έξυπνου δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος.....	36
2.4	Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για λειτουργίες G2V και V2G .....	37
2.4.1	Ενσωμάτωση πηγών ενέργειας με ηλεκτρικά οχήματα.....	37
2.4.2	Φωτοβολταϊκά συστήματα και ηλεκτρικά οχήματα .....	38
2.4.3	Αιολικά συστήματα και ηλεκτρικά οχήματα .....	40
Κεφάλαιο 3	.....	42
3.	Τεχνικές πρόβλεψης Ηλεκτρικού Φορτίου.....	42
3.1	Εισαγωγή .....	42
3.2	Μοντέλα παλινδρόμησης .....	44
3.2.1	Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση .....	45
3.2.2	Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση .....	46
3.2.3	Αυτοπαλινδρομικά Μοντέλα (AR) .....	47
3.3	Χρονοσειρές .....	48
3.3.1	Εισαγωγή στις χρονοσειρές .....	48
3.3.2	Χαρακτηριστικά Χρονοσειρών.....	48
3.4	Ενεργειακά Μοντέλα .....	49
3.4.1	Μοντέλα Πρόβλεψης Ηλεκτρικού Φορτίου με Αισθητήρες .....	50
3.5	Μηχανές Υποστήριξης Διανυσμάτων (SVM).....	50
3.6	Ασαφής Λογική στη Πρόβλεψη Ηλεκτρικού Φορτίου .....	51
3.6.1	Εισαγωγή.....	51
3.6.2	Βασικές Έννοιες .....	52
3.6.3	Ασαφείς Κανόνες .....	52
3.7	Νευρωνικά Δίκτυα (Neuro Networks) .....	53

3.8	Τα εμπειρικά Συστήματα που Βασίζονται στη Γνώση .....	54
3.9	Παλινδρόμηση Κ Κοντινότερων Γεγονότων (KNN Regression).....	56
3.10	Δένδρα Ταξινόμησης και Παλινδρόμησης (CART) .....	57
3.11	Αυτοπαλινδρομικά Μοντέλα Κ.Μ.Ο με Εξωγενή Μεταβλητή .....	58
3.12	Γκαουσιανή Μέθοδος (GP) .....	59
Κεφάλαιο 4 .....		61
4.	Παραδείγματα πρόβλεψης Ηλεκτρικού Φορτίου που Αφορούν Ηλεκτρικά Οχήματα. ....	61
4.1	Εισαγωγή .....	61
4.2	Υβριδικό Μοντέλο Πρόβλεψης. ....	63
4.2.1	Εισαγωγή στο Δίκτυο Λειτουργιών Ακτινικής Βάσης .....	63
4.2.2	Εισαγωγή στη Μέθοδο Singular Spectrum Analysis.....	63
4.2.3	Μοντέλο Συστήματος .....	65
4.3	Μεθοδολογία .....	67
4.3.1	Δήλωση του Προβλήματος .....	67
4.3.2	Προγραμματισμός PEV χρησιμοποιώντας ορθογώνια τοποθέτηση.....	70
4.3.3	Κυρίως αλγόριθμος .....	71
5.	Αναφορές .....	74

## Πίνακας Εικόνων

Σχήμα 1.1 Σύγκριση πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων από 2013 με 2018 [3] .....	13
Σχήμα 1.2 Σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων της Tesla με παραγωγή της απαιτούμενης για τη φόρτιση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών .....	14
Σχήμα 1.3 Aggregator σε πιθανή υλοποίηση δικτύου ισχύος [6] .....	18
Σχήμα 1.4 Αποκεντροποιημένος έλεγχος ηλεκτρικού οχήματος [6].....	19
Σχήμα 1.5 DC φορτιστής (α) CHAdeMO (β) Combo 2 ή CCS [7] .....	22
Σχήμα 1.6 AC φορτιστής [7] .....	22
Σχήμα 2.1 Δομή του προτεινόμενου διακευθυντήριου συστήματος φόρτισης [9] .....	24
Σχήμα 2.2 Απόξεση διανυσμάτων ελέγχου AC/DC μετατροπέα ισχύος [9] .....	25
Σχήμα 2.3 Ενσωματωμένη προτεινόμενη τοπολογία οδήγησης PHEV [10] .....	26
Σχήμα 2.4 Τροφοδοσία μόνο από συστοιχία μπαταριών [10].....	28
Σχήμα 2.5 Τροφοδοσία μόνο από γεννήτρια [10].....	28
Σχήμα 2.6 Τροφοδοσία και από τις δύο πηγές του PHEV [10].....	29
Σχήμα 2.7 Τροφοδοσία από την γεννήτρια και φόρτιση συστοιχία μπαταριών [10].....	29
Σχήμα 2.8 Διάγραμμα ελέγχου της SRM για το PHEV [10].....	30
Σχήμα 2.9 Διάγραμμα ελέγχου του DC/DC μετατροπέα για PHEV .....	31
Σχήμα 2.10 Διάγραμμα ελέγχου AC/DC μετατροπέα [10] .....	33
Σχήμα 2.11 Διάγραμμα ελέγχου για τη V2H κατάσταση [10] .....	33
Σχήμα 2.12 Βασική τοπολογία αλληλεπίδρασης έξυπνου δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος με την στρατηγική της έξυπνης φόρτισης [21].....	35
Σχήμα 2.13 EV σταθμός φόρτισης σε σύνδεση με ηλεκτρικό δίκτυο για χώρο στάθμευσης με PV [1] .....	40
Σχήμα 3.1 Ο νευρώνας και το νευρωνικό δίκτυο [3].....	54
Σχήμα 4.1 Δομή δικτύου λειτουργίας ακτινικής βάσης .....	64
Σχήμα 4.2 Μοντέλο Συστήματος .....	68
Σχήμα 4.3 Ορθογώνια τοποθέτηση .....	70
Σχήμα 4.4 Ελαχιστοποίηση του ύψους του του ορθογωνίου του προφίλ του φορτίο .....	71

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1. Εισαγωγή

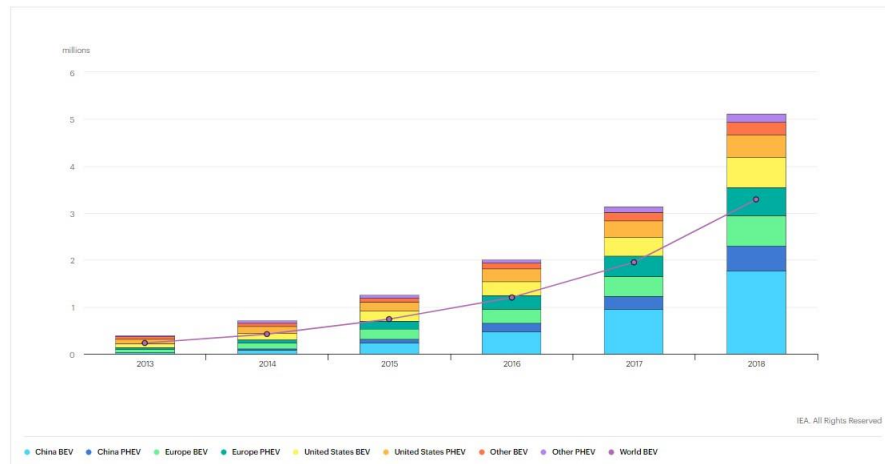
### 1.1 Περίγραμμα εργασίας

Καθώς οι τεχνολογίες των μπαταριών και ηλεκτρικών κινητήρων ολοένα και βελτιώνονται, τα ηλεκτρικά οχήματα εισέρχονται όλο και περισσότερο στην ανθρώπινη καθημερινότητα με σκοπό να αντικαταστήσουν τα συμβατικά μέσα μεταφοράς με κινητήρες εσωτερικής καύσης. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη των σύγχρονων τεχνολογιών των ηλεκτρικών οχημάτων και ο τρόπος διασύνδεσης τους και αλληλεπίδρασης τους με το ηλεκτρικό δίκτυο στο πλαίσιο των έξυπνων δικτύων κατά τη λειτουργία G2V (Grid to Vehicle). Επίσης, αναλύονται οι τρόποι αλληλεπίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη κατάσταση V2G (Vehicle to grid), κατά την οποία ενέργεια επιστρέφεται στο δίκτυο. Τελικώς σκόπιμο είναι να μελετηθεί η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αύξηση του φορτίου ή και στη μείωση του δικτύου μέσω της λειτουργίας G2V.

#### 1.1.1 Ηλεκτροκίνηση και ηλεκτρικά οχήματα

Η έντονη ευαισθητοποίηση των ανθρώπων για την οικολογική επίδραση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα εξαιτίας των μηχανών εσωτερικής καύσης σε συνδυασμό με την ανάπτυξη των μοντέρνων μπαταριών ιόντων-λιθίου καθώς και η εξάρτηση των ανθρώπων από το πετρέλαιο (κατανάλωση πετρελαίου μέχρι το 2035 θα έχει αυξηθεί κατά 54% [1]) έχουν αυξήσει το ενδιαφέρον για την ηλεκτροκίνηση παγκοσμίως. Τα ηλεκτρικά οχήματα σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ολοένα χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αντικαθιστώντας τις μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν κυρίως τα σημερινά οχήματα, όπως και τις συμβατικές πηγές παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας αντίστοιχα. Η εξέλιξη των μέσων μεταφοράς έχει ενισχύσει τόσο την κοινωνία όσο και την βιομηχανία, καθώς τα οχήματα είναι απαραίτητα για την καθημερινή μετακίνηση, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αντικατάσταση των συμβατικών μηχανών εσωτερικής καύσης με ηλεκτρικούς κινητήρες [2]. Επιπλέον, με την πάροδο του χρόνου η τεχνολογία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων βελτιώνεται, με αποτέλεσμα τη

σημαντική μείωση του κόστους και την αύξηση της ζήτησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Σύγκριση πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων από 2013 με 2018 [3]

Τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων ολοένα και αυξάνονται με την βελτίωση των τεχνολογιών, έναντι των συμβατικών οχημάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα πιο σημαντικά από αυτά [1]:

- Ελάχιστες έως και μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.
- Μικρές εκπομπές κατά την παραγωγή της ενέργειας στους σταθμούς Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- Μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τα συμβατικά αυτοκίνητα με μηχανές εσωτερικής καύσης.
- Μικρότερο κόστος του καυσίμου ( πιο φτηνή η τιμή της kWh σε σχέση με την τιμή του πετρελαίου).
- Λιγότερος θόρυβος κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους.
- Οι τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων προσφέρει υποστήριξη δικτύου, προσφέροντας πρόσθετες υπηρεσίες όπως μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας.
- Ρύθμιση τάσης και συχνότητας δικτύου.

Ωστόσο, παρά την πληθώρα των πλεονεκτημάτων τους, η μαζική χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων έχει μείνει στάσιμη, αυτό οφείλεται κυρίως στους παρακάτω λόγους [2]:

- Το κόστος απόκτησης. Ακόμα και με τα σημερινά οικονομικά πλεονεκτήματα που υπάρχουν, τα ηλεκτρικά οχήματα εξακολουθούν να θεωρούνται ακριβά σε σύγκριση με τα οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης.
- Η δυσκολία κάλυψης μεγάλων αποστάσεων, εξαιτίας της σχετικά μικρής αυτονομίας των μπαταριών.
- Ο μειωμένος αριθμός των σταθμών φόρτισης μέσα αλλά κυρίως έξω από τις πόλεις.
- Ο μικρός χρόνος ζωής των μπαταριών (περίπου 8 χρόνια).
- Ο χρόνος φόρτισης των μπαταριών είναι πολύ περισσότερος σε σύγκριση με τον ανεφοδιασμό καυσίμου στα συμβατικά οχήματα.

Φυσικά, η ιδανική περίπτωση θα ήταν ο συνδυασμός της φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων μέσω Α.Π.Ε, αφού δεν υπάρχουν εκπομπές και το κόστος Η.Ε. σχετίζεται μόνο με την εγκατάσταση και συντήρηση των σταθμών.



Σχήμα 1.2 Σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων της Tesla με παραγωγή της απαιτούμενης για τη φόρτιση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών

### **1.1.2 Εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων στα έξυπνα δίκτυα**

Η ενσωμάτωση ενός μεγάλου αριθμού από ηλεκτρικά οχήματα στο ηλεκτρικό σύστημα ισχύος αποτελεί μια σημαντική πρόκληση από την σκοπιά των οικονομικών επιπτώσεων και τα οφέλη της λειτουργίας και του ελέγχου σε βέλτιστες συνθήκες. Πολλές μελέτες έχουν αναλύσει τις επιπτώσεις των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο διανομής ισχύος, ενώ άλλες εμβαθύνουν στις διάφορες εφαρμογές και την υλοποίηση των μοντέλων για την υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων από το σύστημα ισχύος.

Επιπλέον η διείσδυση περισσότερων διανεμημένων πηγών ενέργειας (Distributed Energy Resources DERs) στην αγορά ενέργειας αλλάζει τα δεδομένα για το σύστημα παραγωγής ισχύος και το σύστημα διανομής, όσο αναφορά την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διαχείριση του παραδοσιακού δικτύου να γίνεται πολυπλοκότερη. Έτσι εισάχθηκαν τα έξυπνα δίκτυα, ενισχυμένα ως προς την παραγωγή και διανομή ισχύος, τα οποία είναι πιο ευέλικτα, αποδοτικά, αξιόπιστα και προσφέρουν μεγαλύτερη ασφάλεια [1]. Τα έξυπνα δίκτυα ενσωματώνουν βελτιωμένες τεχνολογίες στην επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων του δικτύου, έξυπνους τρόπους μέτρησης της ενέργειας και αναπτυγμένο έλεγχο. Επίσης αυτά αντιλαμβάνονται τα ηλεκτρικά οχήματα είτε ως δυναμικά φορτία (G2V) είτε ως διανεμημένες πηγές ενέργειας (V2G). Επιπλέον, τα ηλεκτρικά οχήματα μέσω του συστήματος διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων (EVM) λαμβάνει και στέλνει πληροφορίες στο λειτουργό του δικτύου. Το EVM μπορεί να ενσωματώνει έξυπνους μετρητές για να διευκολύνει την μέτρηση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις που έχουν τα ηλεκτρικά οχήματα στο δίκτυο (επιβάρυνση δικτύου όταν λειτουργούν ως φορτία κ.α.) ένας έξυπνος προγραμματισμός μπορεί να υλοποιηθεί για να βελτιστοποιήσει τη διαθέσιμη ισχύς του δικτύου μέσω της δικατευθυντήριας ανταλλαγής πληροφοριών στα πλαίσια του έξυπνου δικτύου.

## **1.2 Ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο**

Η ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί μια σημαντική πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει η επιστημονική κοινότητα από την σκοπιά των οικονομικών επιπτώσεων, της λειτουργίας και των πλεονεκτημάτων ελέγχου του δικτύου σε βέλτιστες συνθήκες. Η τωρινή έρευνα κατευθύνεται είτε στις επιπτώσεις

της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα διανομής ισχύος, είτε στα μοντέλα των διαφόρων εφαρμογών ως προς το τεχνικό μέρος της υιοθέτησης των ηλεκτρικών οχημάτων από το δίκτυο [1]. Σύμφωνα με μελέτες η πλειονότητα των ηλεκτρικών οχημάτων σήμερα φορτίζεται από συστήματα φόρτισης, που συμπεριλαμβάνονται στις οικιακές κατοικίες. Παρόλα αυτά, προβλέπεται φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων είτε δημόσια στις πόλεις, είτε εμπορικά σε σταθμούς φόρτισης, είτε σε σταθμούς εγκατεστημένους στο χώρο εργασίας των εργαζομένων. Ως συνέπεια, οι επιπτώσεις της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να επιδράσουν καθοριστικά στο ηλεκτρικό σύστημα διανομής ισχύος. Το εύρος των επιδράσεων εκτείνεται από την υπερθέρμανση των μετασχηματιστών ισχύος έως την πραγματοποίηση επενδύσεων στις εγκαταστάσεις διανομής ισχύος. Επιπλέον, η υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων προσδίδει αξία στο δίκτυο όσο αναφορά την απόδοση και την ποιότητα ισχύος.

Για να γίνουν κατανοητά τα πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο εξετάζεται η χρήση τους σε δύο περιπτώσεις, όσο αναφορά τους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων και όσο αναφορά τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας που προσφέρουν. Και οι δύο παραπάνω περιπτώσεις μοιράζονται το ίδιο σύστημα αλληλεπίδρασης δικτύου οχήματος. Η πιο βασική αρχιτεκτονική αυτού του συστήματος περιλαμβάνει μια μονάδα συγκέντρωσης πληροφοριών ηλεκτρικών οχημάτων (aggregator). Η μονάδα συγκέντρωσης πληροφοριών ηλεκτρικών οχημάτων θεωρείται ως μια κεντρική μονάδα ελέγχου, που συντονίζει όλες τις απαραίτητες δραστηριότητες, όπως την επικοινωνία με τον διαχειριστή του συστήματος διανομής (DSO), τον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς (TSO) και τους παρόχους ενέργειας [1]. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μονάδα συγκέντρωσης πληροφοριών διατηρεί την σύνδεση μεταξύ των συμμετεχόντων στην αγορά ενέργειας και τους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων. Επίσης η πραγματοποίηση της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να γίνει με την αρχιτεκτονική VPP, στην οποία τα ηλεκτρικά οχήματα συγκεντρώνονται και ελέγχονται ως μία διεσπαρμένη μονάδα παροχής ενέργειας. Με την αρχιτεκτονική VPP, τα ηλεκτρικά οχήματα καθίστανται ορατά στον DSO, TSO και στον διαχειριστή του δικτύου (GO) μέσω της μονάδας συγκέντρωσης πληροφοριών και μπορούν εύκολα να συμμετέχουν στην αγορά ενέργειας [1]. Από την άλλη μεριά, ένα πιθανό σενάριο είναι η ενσωμάτωση ενός μεγάλου αριθμού ομάδων ηλεκτρικών



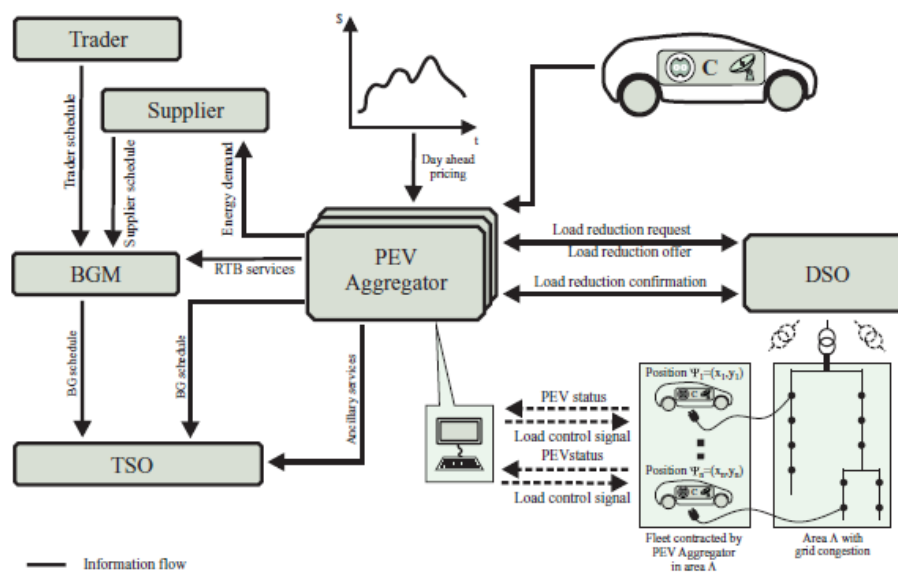
οχημάτων, όπου ο κάθε ιδιοκτήτης θα έχει κεντρικό ρόλο στην αγορά ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι ο κάθε ιδιοκτήτης θα είναι αφοσιωμένος στη διαχείριση της ζήτησης από το DSO, TSO και την αγορά ενέργειας με την βοήθεια της αμφίδρομης επικοινωνίας και των συστημάτων ελέγχου. Αυτή η αρχιτεκτονική ενσωμάτωσης ηλεκτρικών οχημάτων βελτιώνει τη τιμή χρέωσης, έτσι ώστε ο ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος να μπορεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος χρέωσης, ενώ μειώνεται η επιφόρτιση του δικτύου ισχύος.

Τέλος, η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη για την ανταλλαγή πληροφοριών, όπως η τιμή της ενέργειας και η ενεργειακή πρόβλεψη. Ως εκ τούτου, για να τεθεί επιτυχώς σε ισχύ αυτή η δυνατότητα η εξέλιξη των συμβατικών δικτύων σε έξυπνα δίκτυα είναι αναπόφευκτη. Κατά την υλοποίηση των έξυπνων δικτύων υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας προηγμένων υποδομών επικοινωνίας, έτσι ώστε η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά ενέργειας να γίνει δυνατή.

### **1.2.1 Ο ρόλος των ηλεκτρικών οχημάτων στα έξυπνα δίκτυα**

Κατά την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο εξετάζονται δύο είδη ελέγχου τους ανάλογα με την θέση τους στο δίκτυο. Το πρώτο είδος αναφέρεται στον άμεσο έλεγχο, προκειμένου να επιτευχθούν επιθυμητές λειτουργίες των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα ισχύος. Ο άμεσος έλεγχος αναφέρεται σε λειτουργίες που δεν συμπεριλαμβάνουν τον ιδιοκτήτη του οχήματος ενεργά στις δραστηριότητες ελέγχου του PEV όταν αυτό συνδέεται στο δίκτυο ισχύος. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη έννοια στον άμεσο έλεγχο είναι η μονάδες συγκέντρωσης πληροφοριών (aggregators). Τέτοιες ενότητες υπάρχουν για να συγκεντρώνουν και να ελέγχουν μεγάλους αριθμούς από ηλεκτρικά οχήματα. Ως εκ τούτου η μονάδα συγκέντρωσης πληροφοριών πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιεί διάφορους στόχους του ελέγχου, όπως έξυπνη φόρτιση και V2G υπηρεσίες. Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται μια πιθανή δομή της ενσωμάτωσης ενός aggregator σε μελλοντικές λειτουργίες του συστήματος ισχύος [6]. ESPs είναι ενότητες που παρέχουν το σύστημα των φορτίων με ενέργεια από την αγορά ενέργειας κατόπιν συμβολαίου και αναφέρονται ως ενότητες εξυπηρέτησης φορτίου ή πωλητές/πάροχοι ενέργειας. Ο DSO λειτουργεί και συντηρεί το δίκτυο διανομής. Αυτό συμπεριλαμβάνει επίσης την εγκατάσταση και την λειτουργία των εγκαταστάσεων φόρτισης για PEVs. Ο TSO εκτελεί τις ίδιες λειτουργίες για το σύστημα μεταφοράς (υψηλή

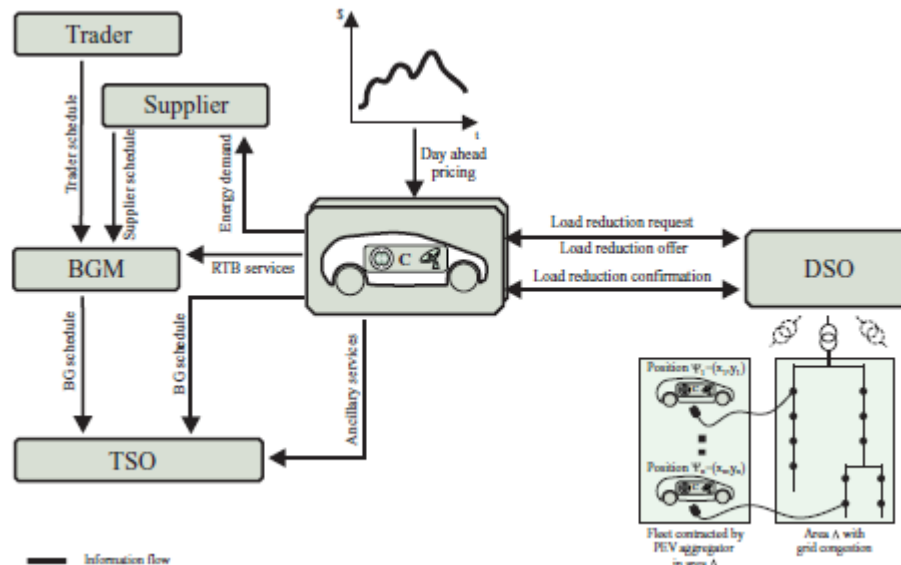
τάση). Τα BGMs είναι υπεύθυνα για τα BG, δηλαδή τα συμβόλαια που αφορούν τα φορτία και τις γεννήτριες. Τα BGM μεταφέρουν προγράμματα μεταφοράς ενέργειας στον TSO. Αυτά τα προγράμματα περιλαμβάνουν πληροφορίες, όπως πόσο παράγουν και/ή καταναλώνουν τα BG κατά την διάρκεια λειτουργίας τους (περίπου 15 min). Οι TSO χρησιμοποιούν την πληροφορία για να εκτιμήσουν την ασφάλεια του δικτύου ισχύος και την λειτουργία που θα απαιτηθεί [6]. Ο aggregator πρέπει να ανταλλάσσει πληροφορίες με τις διάφορες μονάδες όσο είναι ενεργός στο δίκτυο ισχύος. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνει πληροφορίες από κάθε PEV ξεχωριστά που είναι σταθμευμένο σε μια συγκεκριμένη περιοχή του DSO. Οι πληροφορίες περιλαμβάνουν χωρική διαθεσιμότητα, επίπεδα ενέργειας μπαταριών και χωρητικότητα κάθε μεμονωμένου PEV. Αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ζήτησης της ενέργειας και την ευελιξία φόρτισης.



Σχήμα 1.3 Aggregator σε πιθανή υλοποίηση δικτύου ισχύος [6]

Μια άλλη υποσχόμενη προσέγγιση είναι ο πλήρης αποκεντροποιημένος έλεγχος (έμμεσος έλεγχος) του ηλεκτρικού οχήματος. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι ο πλήρης έλεγχος των λειτουργιών μένει στον ιδιοκτήτη του ηλεκτρικού οχήματος χωρίς να εμπλέκεται ο aggregator. Αυτή η δομή μειώνει τις απαιτήσεις επικοινωνίας. Η αρχιτεκτονική του αποκεντροποιημένου ελέγχου έχει ως σκοπό να εισάγει την φόρτιση κατά τις νυχτερινές ώρες. Μ' αυτό το τρόπο ελαχιστοποιείται το κόστος φόρτισης του κάθε

οχήματος. Στο Σχήμα 1.4 εμφανίζεται μια πιθανή υλοποίηση για αποκεντροποιημένο έλεγχο στα PEV. Σ' αυτό το σχήμα εμφανίζεται ένας πλήρως αποκεντροποιημένος έλεγχος, όπου κάθε PEV είναι τώρα υπεύθυνο για την επικοινωνία με άλλες μονάδες του συστήματος ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ηλεκτρικό όχημα να εμφανίζεται στο κέντρο του σχήματος.



Σχήμα 1.4 Αποκεντροποιημένος έλεγχος ηλεκτρικού οχήματος [6]

### 1.3 Μέθοδοι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Για τον υπολογισμό του φορτίου με το οποίο θα επιβαρύνουν το ηλεκτρικό δίκτυο σκόπιμο είναι να αναφερθούν οι μέθοδοι με τις οποίες συνδέονται τα ηλεκτρικά οχήματα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και τι επίπεδα τάσης και ισχύος δεσμεύουν.

Εκτός από τις καινοτομίες στις τεχνολογίες των ηλεκτρικών οχημάτων, υψίστης σημασίας είναι και οι υποδομές αποδοτικών φορτιστών, οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων ως μέσο μεταφοράς. Μέχρι το 2017, υπολογίζεται ότι υπήρχαν περίπου 430 χιλιάδες δημόσιοι φορτιστές παγκοσμίως [7]. Πάνω από 100 χιλιάδες από αυτούς είναι ταχείας φόρτισης. Επιπλέον οι οικιακοί φορτιστές έφταναν τα 3 εκατομμύρια για κατοικίες και χώρους εργασίας. Προτάθηκε ότι 130 εκατομμύρια οικιακοί φορτιστές και 13 εκατομμύρια δημόσιοι φορτιστές πρέπει να εγκατασταθούν μέχρι το 2030, το οποίο αποτελεί μια μαζική παγκόσμια επένδυση

δισεκατομμυρίων. Ειδικότερα στο Ενωμένο Βασίλειο, η κυβέρνηση έχει επιθετική πολιτική όσο αναφορά τις εκπομπές καυσαερίων μέχρι το 2030 και 2050, καθώς έχουν πειστεί ότι οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου οφείλονται στα μέσα μεταφοράς [7].

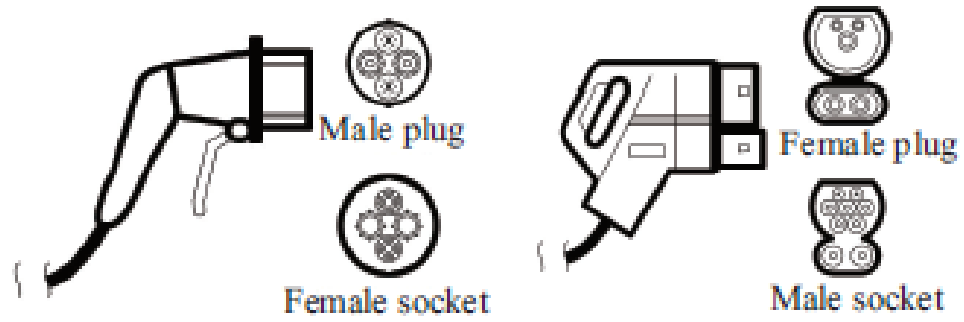
Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι τρόποι φόρτισης ανάλογα με την χρονική διάρκεια της φόρτισης διακρίνονται σε ταχείας φόρτισης και σε αργής. Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα επίπεδα φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και τον χρόνο πλήρους φόρτισης αυτών, σύμφωνα με το πρότυπο J1772. Το τύπου AC επίπεδο 1 χρησιμοποιείται πρακτικά για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων σε οικιακά δίκτυα, ενώ το τύπου AC επιπέδου 2 είναι κατάλληλο για δημόσιες ή εμπορικές περιοχές όπως είναι χώροι εργασίας, θέατρα, εμπορικά καταστήματα κ.α. Από την άλλη μεριά, το τύπου DC επιπέδου 1-3 είναι κατάλληλο για εμπορικούς σκοπούς σε σταθμούς φόρτισης.

Τύπος επιπέδου Ισχύος	Επίπεδο Τάσης [V]	Ικανότητα Παροχής Ρεύματος [A]	Επίπεδο Ισχύος [kW]	Χρόνοι φόρτισης
AC επίπεδο 1	120 VAC	12, 16 A	1.4, 1.6 kW	<u>1φ παροχή</u> PHEV:7h BEV:17h
AC επίπεδο 2	240 VAC	Μέχρι 80 A	19.2 kW	<u>1φ ή 3φ παροχή</u> 3.3 kW φορτιστής PHEV:3h BEV:7h 7 kW φορτιστής PHEV:1.5h BEV:3.5h
AC επίπεδο 3	208-240 VAC	Μέχρι 400 A	Μέχρι 96 kW	Υπό κατασκευή
DC επίπεδο 1	200-500 VDC	Μέχρι 80 A	Μέχρι 40 kW	<u>3φ παροχή</u> 20 kW φορτιστής PHEV:22min

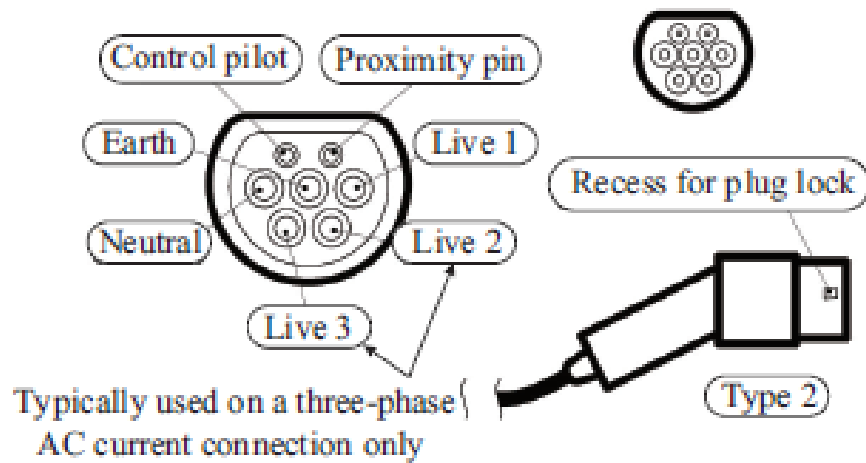
				BEV:1.2h
DC Επίπεδο 2	200-500 VDC	Μέχρι 200 A	Μέχρι 100 kW	3φ παροχή 45 kW φορτιστής ----- PHEV:10min ----- BEV:20min
DC επίπεδο 3	200-600 VDC	Μέχρι 400 A	Μέχρι 240 kW	Υπό κατασκευή

Πίνακας 1.1 Χρόνος και επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος

Σύμφωνα με τα Βρετανικά πρότυπα BS EN 61851 και BS EN 60309-2 υπάρχουν 3 διαφορετικοί τύποι ταχύτητας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων η αργή φόρτιση, η γρήγορη φόρτιση και η πολύ γρήγορη φόρτιση [8], [7]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεταφορά DC ισχύος χρησιμοποιείται μόνο για την πολύ γρήγορη φόρτιση στα 20-50 kW. Επίσης, για την πολύ γρήγορη φόρτιση χρησιμοποιούνται 3 υποδοχές στην πλευρά του οχήματος όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.5, όπου η DC διασύνδεση γίνεται με 2 τρόπους είτε με τον ονομαζόμενο CHAdeMO με ισχύ εξόδου 50 kW είτε με ένα συνδυασμένο σύστημα φόρτισης που ονομάζεται CCS ή Combo 2. Επιπλέον, στο σχήμα 1.6 απεικονίζεται μια σχηματική δομή φορτιστών που υιοθετήθηκε και στις 2 AC/DC καταστάσεις. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2, ο φορτιστής περιέχει αρκετές υποδοχές, ειδικότερα 2 μικρές και 5 μεγάλες υποδοχές. Οι δύο μικρές υποδοχές χρησιμοποιούνται για την μεταφορά των σημάτων ελέγχου. Η κεντρική υποδοχή στη μεσαία σειρά είναι η γείωση και οι υποδοχές όπου αναγράφεται “Live 1” και “Neutral” χρησιμοποιούνται για την παροχή ισχύος. Οι δύο υποδοχές στην τελευταία σειρά χρησιμοποιούνται για την 3-φασική AC παροχή ενέργειας. Το ονομαστικό ρεύμα στον φορτιστή για 3-φασική σύνδεση είναι 63 A, ενώ για μονοφασική σύνδεση είναι 70 A.



Σχήμα 1.5 DC φορτιστής (α) CHAdeMO (β) Combo 2 ή CCS [7]



Σχήμα 1.6 AC φορτιστής [7]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. Περιγραφή της Σύνδεσης του Ηλεκτρικού οχήματος με το Δίκτυο

#### 2.1 Ηλεκτρικής Ενέργειας με τις λειτουργίες V2G G2V

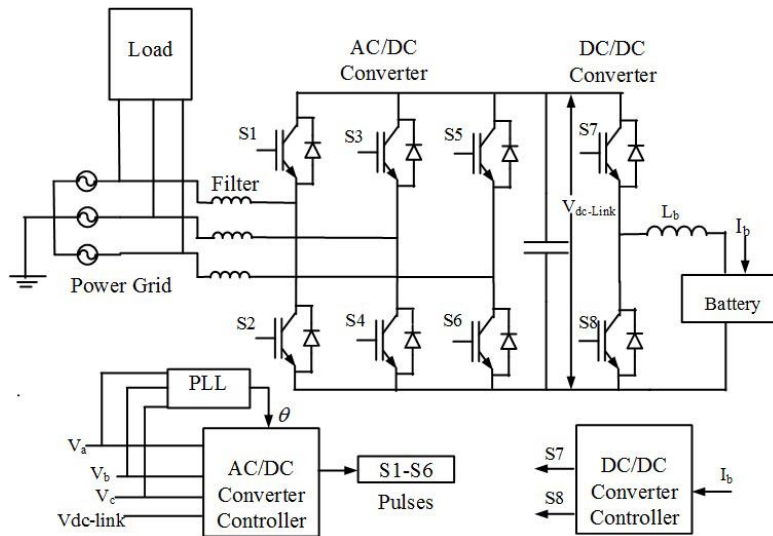
##### 2.1.1 Προτεινόμενες τεχνολογίες ενσύρματης φόρτισης

Ένας φορτιστής μπαταρίας μπορεί να χωριστεί σε 2 στάδια. Αρχικά υπάρχει το AC-DC επίπεδο, όπου ουσιαστικά μια γέφυρα ελεγχόμενων διακοπών (igbt, mosfet κ.α.) λειτουργεί ως ανόρθωση της AC τάσης παρέχοντας τον κατάλληλο συντελεστή ισχύος στην πλευρά της παροχής. Το δεύτερο στάδιο είναι το DC-DC, το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής ισχύος από και προς την μπαταρία.

##### 2.1.1.1 Μέθοδος ελέγχου σε DC-DC μετατροπείς στο G2V σύστημα φόρτισης

Μία από τις προτεινόμενες τοπολογίες που εξετάζονται βρίσκεται στην αναφορά [9], όπου παρουσιάζεται ο σταθμός φόρτισης μιας μπαταρίας ηλεκτρικού οχήματος σε ένα σύστημα έξυπνου δικτύου για την αντιστάθμιση της ενεργού ισχύος, εγχέοντας ενεργό ισχύ από το όχημα μέσω του δικατευθυντήριου φορτιστή στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τοπολογία αναφέρεται στη μοντελοποίηση ενός δικατευθυντήριου μετατροπέα που απεικονίζεται στο σχήμα 2.1, όπου ένας 3-φασικός AC/DC μετατροπέας χρησιμοποιείται ως ανορθωτής και αντιστροφέας κατά την διαδικασία της φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα. Ο DC/DC μετατροπέας καθορίζει την ισχύ εξόδου από το δίκτυο και παράγει το ρεύμα αναφοράς της μπαταρίας για τις καταστάσεις της φόρτισης και εκφόρτισης, σε κάθε μια από τις δύο καταστάσεις χρησιμοποιείται ο μετατροπέας υποβιβασμού και ανύψωσης αντίστοιχα. Ο φορτιστής του ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να λειτουργεί κάτω από μεταβαλλόμενο ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης εξαιτίας της ξαφνικής αλλαγής του φορτίου στο σύστημα διανομής. Κατά τη μεταβολή του φορτίου, το μέγιστο ρεύμα ρέει από το δίκτυο ισχύος στη ζήτηση του φορτίου και στο φορτιστή του ηλεκτρικού οχήματος. Έτσι κατά τη διάρκεια εκτός φορτίου, τόσο η μπαταρία όσο και το φορτίο απορροφούν την πλεονασματική ισχύ του δικτύου προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολική σπατάλη ποσότητας ενέργειας που παράγεται από μονάδα παραγωγής μέσω της αμφίδρομης τοπολογίας του φορτιστή.



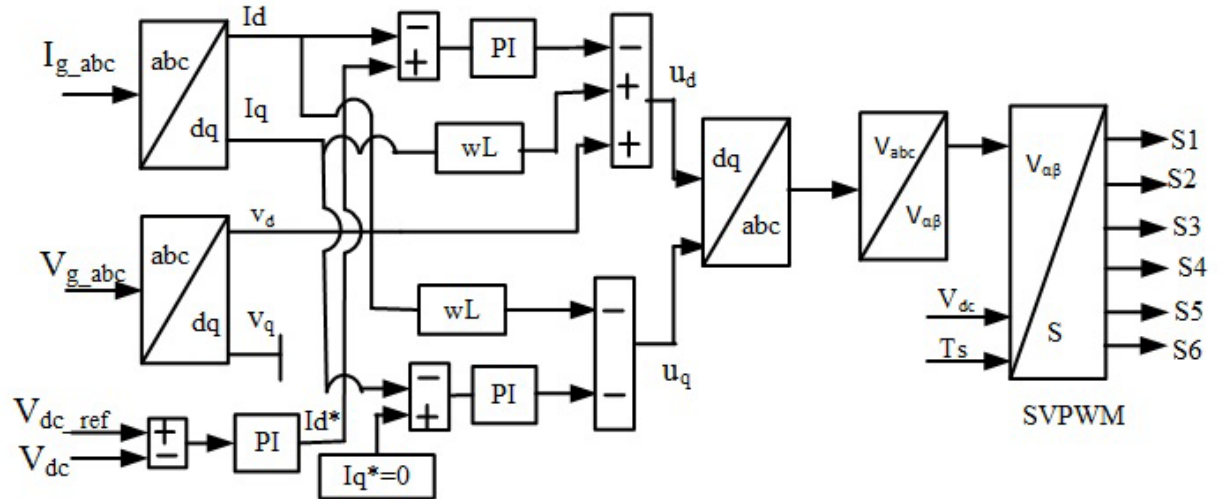
Σχήμα 2.1 Δομή του προτεινόμενου διακευθυντήριου συστήματος φόρτισης [9]

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται το σύστημα ελέγχου του AC/DC μετατροπέα. Αρχικά παρατηρείται ότι όλη η διαδικασία εκτελείται στο στρεφόμενο διφασικό d-q πλαίσιο αναφοράς. Επιπλέον, για τον συγχρονισμό με την συχνότητα του δικτύου χρησιμοποιείται ένα PLL, προκειμένου να εντοπιστεί το μέτρο και η φάση της τάσης του δικτύου. Ο d-άξονας και κατ' επέκταση ο εξωτερικός έλεγχος της τάσης σ' αυτόν τον άξονα και ο εσωτερικός βρόγχος του ρεύματος ελέγχουν την ροή ενεργού ισχύος AC, προκειμένου να επιτραπεί η δικατεθυντήρια ροή ισχύος στο μετατροπέα. Ο q-άξονας και κατ' επέκταση ο εσωτερικός βρόγχος ρεύματος προσαρμόζει την άεργο ισχύ στη μονάδα του συντελεστή ισχύος, προπορεύοντας ή ακολουθώντας την λειτουργία του συντελεστή ισχύος. Επιπροσθέτως, επειδή οι τάσεις των διανυσμάτων dq που παράγονται στους βρόγχους ελέγχου βρίσκονται σε πεπλεγμένη μορφή, δηλαδή εμπλέκονται οι συνιστώσες μεταξύ τους, προστίθεται μια συνιστώσα τάσης ώστε να γίνει απόζευξη των σημάτων και να βελτιωθεί η απόδοση κατά την διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων. Η εφαρμογή του πλαισίου αναφοράς d-q φαίνεται στα DC σήματα που εξάγονται από τους PI ελεγκτές τα οποία βοηθούν στην εξάλειψη του σφάλματος μόνιμης κατάστασης. Οι όροι που χρησιμοποιούνται για την απόζευξη των σημάτων φαίνονται από τις εξισώσεις 2.1 και 2.2, με τις οποίες βελτιώνεται η απόδοση του βρόγχου ελέγχου του ρεύματος. Τελικά, με την χρήση της τεχνικής SVPWM παράγονται οι παλμοί ελέγχου στους διακόπτες ελέγχου του μετατροπέα ισχύος.



$$u_d = \omega L i_d \quad (2.1)$$

$$u_q = \omega L i_q \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.2 Απόζευξη διανυσμάτων ελέγχου AC/DC μετατροπέα ισχύος [9]

Εκτός από τον έλεγχο του AC/DC μετατροπέα ισχύος η εύρυθμη λειτουργία του φορτιστή του ηλεκτρικού οχήματος έγκειται και στον έλεγχο του DC/DC μετατροπέα. Σ' αυτή τη τεχνική ελέγχου, ο ελεγκτής συγκρίνει το ρεύμα αναφοράς της μπαταρίας με το μετρούμενο-πραγματικό ρεύμα της μπαταρίας, αφού προηγουμένως έχει επιλέξει την κατάσταση λειτουργίας φόρτισης ή εκφόρτισης για την ενεργοποίηση του κατάλληλου μετατροπέα υποβιβασμού ή ανύψωσης αντίστοιχα. Αυτή η επιλογή βασίζεται στη τιμή της κατάστασης SOC της μπαταρίας, η οποία αν είναι μεγαλύτερη από 30% τότε ο φορτιστής μπαίνει στην λειτουργία εκφόρτισης (V2G), ενώ αν η κατάσταση SOC κάτω από κανονικές συνθήκες φορτίου είναι μικρότερη από 30% τότε ο φορτιστής μπαίνει σε λειτουργία φόρτισης (G2V).

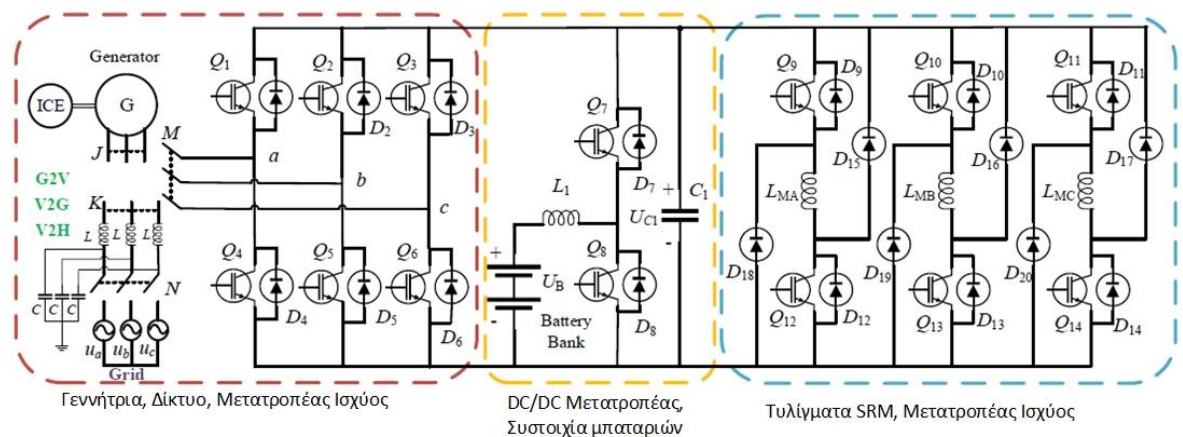
## 2.2 Τοπολογία μετατροπέων ισχύος για εφαρμογές V2G, G2V και V2H

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν ένας ικανοποιητικός αριθμός από ηλεκτρικά οχήματα συνδεθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο, τότε οι συστοιχίες μπαταριών χρησιμοποιούνται ως μονάδες διανεμημένης αποθήκευσης ενέργειας και όταν το φορτίο του δικτύου είναι μεγάλο και τα ηλεκτρικά οχήματα βρίσκονται σε ακινησία, τότε τα ηλεκτρικά οχήματα

μπορούν να τροφοδοτήσουν το ηλεκτρικό δίκτυο με την αποθηκευμένη τους ενέργεια μέσω ενσωματωμένων διακατευθυντήριων φορτιστών ή ενός εξωτερικού μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος εφαρμόζοντας την λειτουργία V2G. Αν ανιχνευθεί state-of-charge (SOC) χαμηλή τότε το ηλεκτρικό όχημα μπαίνει στη διαδικασία της φόρτισης [10].

Το ηλεκτρικό σύστημα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου αποτελεί το πιο σημαντικό μέρος των PHEV. Διαφορετικοί τύποι κινητήρων μπορούν να εφαρμοστούν για τις εφαρμογές των ηλεκτρικών οχημάτων, όπως PMSG, IM, SRM. Όπου η κάθε τοπολογία κινητήρα έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Θετικό αποτελεί το γεγονός ότι διαφορετικοί τύποι κινητήρων είναι δυνατό να εφαρμόζονται σε ένα ηλεκτρικό όχημα για να αυξήσουν την απόδοση του.

Στην παρούσα προτεινόμενη τοπολογία που αναφέρεται στη σύγχρονη βιβλιογραφία εμφανίζεται ένα προηγμένο ηλεκτρικό δίκτυο ηλεκτρικού οχήματος, που περιέχει PMSM, SRM και τους αντίστοιχους μετατροπείς ισχύος που έχουν προταθεί για PHEV. Το προτεινόμενο ηλεκτρικό δίκτυο του οχήματος μπορεί να υλοποιήσει πολλαπλές καταστάσεις λειτουργίας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι λόγω της αμφίδρομης ανταλλαγής ισχύος, άεργος ισχύς παρέχεται στο δίκτυο καλύπτοντας τις επικουρικές υπηρεσίες του ηλεκτρικού δικτύου. Το σχηματικό διάγραμμα του σχήματος 2.3 παρουσιάζει το προτεινόμενο ηλεκτρικό δίκτυο του ηλεκτρικού οχήματος.



Σχήμα 2.3 Ενσωματωμένη προτεινόμενη τοπολογία οδήγησης PHEV [10]

Στο σχήμα 2.3 το ηλεκτρικό δίκτυο του οχήματος αποτελείται από μια ICE, μια γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ένας AC/DC μετατροπέας για την μετατροπή της AC ισχύος σε DC, έναν DC/DC μετατροπέα για την ρύθμιση της DC τάσης

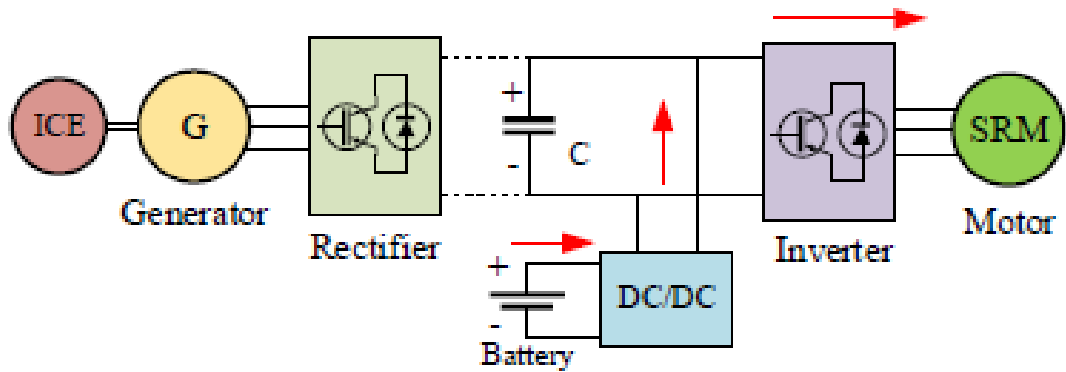
στον πυκνωτή C1, μια συστοιχία μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας, τα πρόσθετα φορτία του ηλεκτρικού οχήματος, έναν κύριο μετατροπέα ισχύος και έναν κινητήρα (SRM) για προώθηση-επιτάχυνση [10]. Η γεννήτρια συνδέεται μηχανικά με την ICE μέσω ενός άξονα μετάδοσης κίνησης όπου μετατρέπεται η μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ο κύριος μετατροπέας είναι ένας ασύμμετρος μετατροπέας ημιγέφυρας που εφαρμόζεται για την τροφοδότηση με ισχύ της SRM.

Βάζοντας έναν διακόπτη M στη θέση J, το PHEV βρίσκεται σε λειτουργία κίνησης (κατά τη διάρκεια οδήγησης), τότε λειτουργεί ο AC/DC μετατροπέας για την μετατροπή ενέργειας. Όταν η παραγόμενη ενέργεια από την γεννήτρια και την ICE είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη ενέργεια της SRM, τότε η συστοιχία μπαταριών φορτίζεται από την περίσσεια ενέργεια μέσω του DC/DC μετατροπέα. Αλλιώς η συστοιχία μπαταριών θα παρείχε με περισσότερη ενέργεια την SRM.

Η λειτουργία του συστήματος του σχήματος 2.3 είναι η εξής: όταν η θέση του διακόπτη M βρίσκεται στη θέση K και ο διακόπτης N είναι κλειστός, τότε το PHEV βρίσκεται είτε στη G2V είτε στη V2G κατάσταση. Ο AC/DC μετατροπέας συνδέεται με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργεί ως αντιστροφέας, ο οποίος σε συνεργασία με τον DC/DC μετατροπέα όπου σ' αυτή την περίπτωση λειτουργεί ως μετατροπέας υποβιβασμού (buck converter) φορτίζουν την συστοιχία μπαταριών (G2V). Από την άλλη μεριά όταν ο AC/DC μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας ο DC/DC μετατροπέας λειτουργεί ως μετατροπέας ανύψωσης (boost converter) και επιστρέφεται ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο ενέργειας (V2G). Όταν ο διακόπτης M είναι στη θέση K και ο διακόπτης N είναι ανοιχτός, τότε η τάση της συστοιχίας μπαταριών ανυψώνεται μέσω του μετατροπέα ανύψωσης και ο AC/DC μετατροπέας συνεχίζει να λειτουργεί ως αντιστροφέας τροφοδοτώντας με ενέργεια οικιακές συσκευές όπως ηλεκτρονικούς υπολογιστές και είδη μαγειρικών συσκευών, τότε σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία Vehicle to Home (V2H).

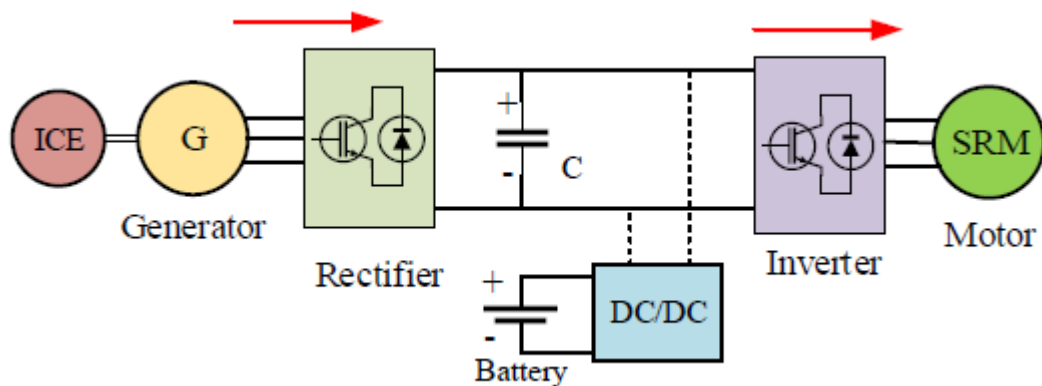
Από την άλλη μεριά, όταν ο διακόπτης M βρίσκεται στη θέση J, τότε το ηλεκτρικό όχημα βρίσκεται σε κατάσταση κίνησης είτε όταν επιταχύνει είτε όταν υφίσταται συμβατική οδήγηση χωρίς πολύ υψηλές ταχύτητες. Σ' αυτή τη περίπτωση υπάρχουν 4 λειτουργίες σύμφωνα με την κατάσταση SOC της συστοιχίας μπαταριών και τον τρόπο χειρισμού του ηλεκτρικού οχήματος.

- Όταν το ηλεκτρικό όχημα τροφοδοτείται μόνο από την μπαταρία. Αυτό συμβαίνει στη περίπτωση που η κατάσταση SOC της συστοιχίας μπαταριών είναι πολύ υψηλή, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο μετατροπέας ανύψωσης να παρέχει την απαραίτητη τροφοδοσία στον ασύμμετρο μετατροπέα ημιγέφυρας του κινητήρα SRM, ενώ ο κινητήρας εσωτερικής καύσης και η γεννήτρια βρίσκεται σε ακινησία. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα αυτή της κατάστασης.



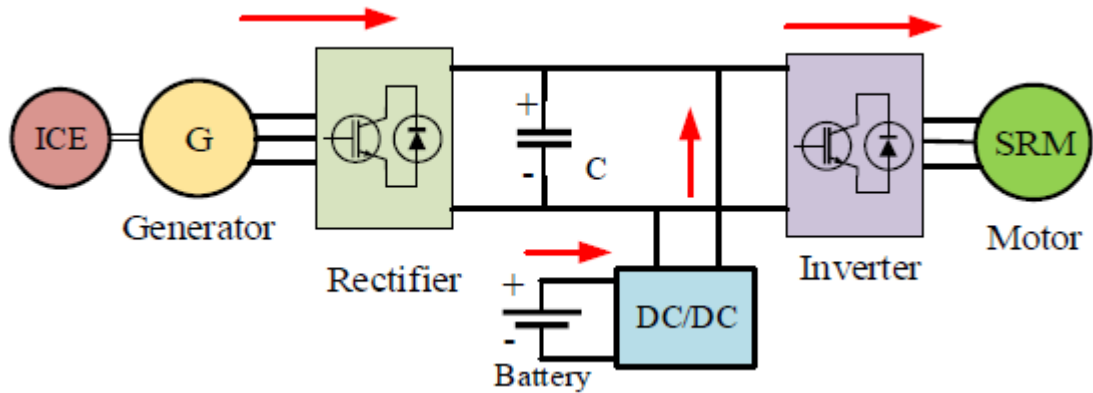
Σχήμα 2.4 Τροφοδοσία μόνο από συστοιχία μπαταριών [10]

- Όταν το ηλεκτρικό όχημα τροφοδοτείται μόνο από την γεννήτρια. Σ' αυτή τη λειτουργία η παραγόμενη από την γεννήτρια ενέργεια είναι ίση με την απαιτούμενη ενέργεια από την SRM. Ο AC/DC μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτής παρέχοντας ενέργεια στην SRM. Στο σχήμα 2.5 φαίνεται η ροή ισχύος.



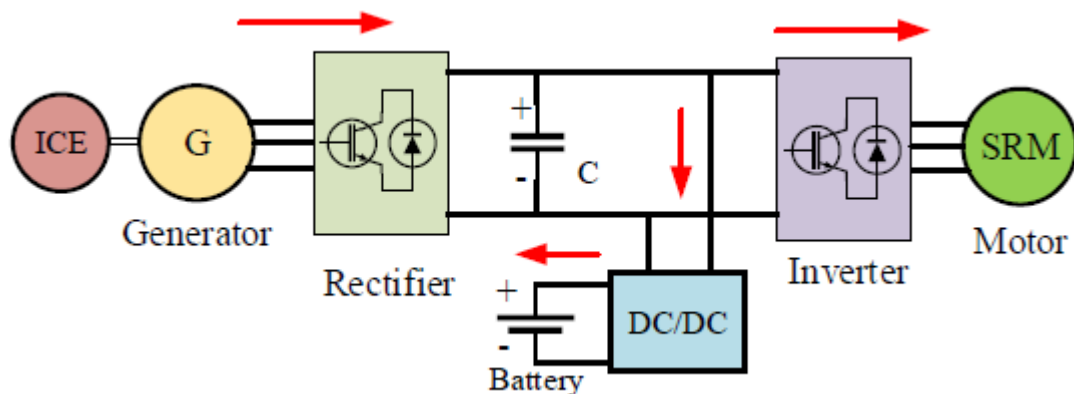
Σχήμα 2.5 Τροφοδοσία μόνο από γεννήτρια [10]

- Όταν το ηλεκτρικό όχημα τροφοδοτείται και από την συστοιχία μπαταριών και από τη γεννήτρια. Στην περίπτωση που το PHEV βρεθεί σε κατάσταση όπου το φορτίο είναι αρκετά υψηλό, τότε και οι δύο πηγές ενέργειας για να καλυφθούν οι ανάγκες ισχύος της SRM, η ροή ισχύος φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Τροφοδοσία και από τις δύο πηγές του PHEV [10]

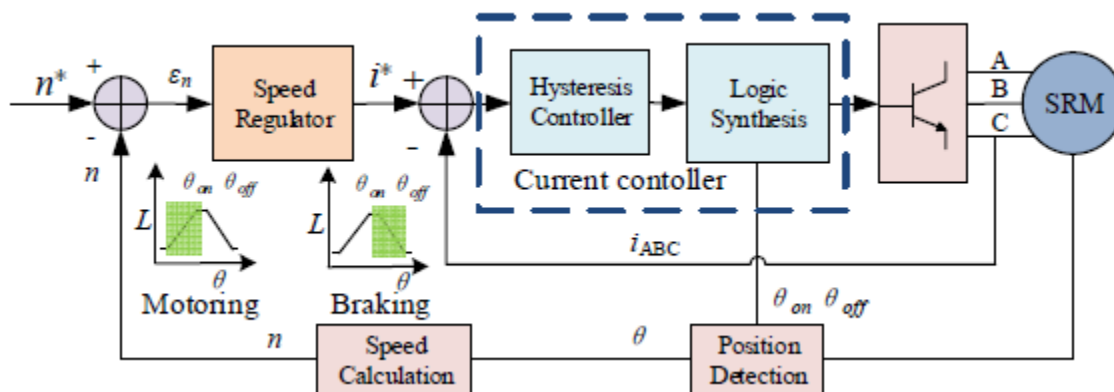
- Όταν το ηλεκτρικό όχημα τροφοδοτείται από την γεννήτρια ενώ η συστοιχία μπαταριών φορτίζεται. Όταν το PHEV είναι σε κατάσταση χαμηλού φορτίου και η κατάσταση SOC είναι και αυτή χαμηλή, τότε η παραγόμενη ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη, ως αποτέλεσμα η περίσσεια ενέργεια αποθηκεύεται στη συστοιχία μπαταριών. Η φόρτιση των μπαταριών γίνεται μέσω του μετατροπέα υποβιβασμού.



Σχήμα 2.7 Τροφοδοσία από την γεννήτρια και φόρτιση συστοιχία μπαταριών [10]

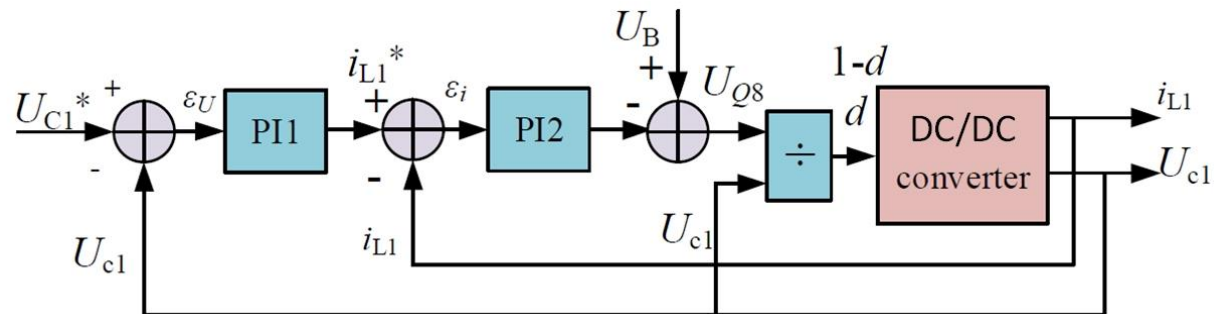
### 2.2.1 Μέθοδος ελέγχου της SRM, του DC/DC και AC/AC μετατροπέα

Οι τεχνικές ελέγχου των μετατροπέων και της SRM αποτελούν καίριο κομμάτι για την εύρυθμη και πιο αποδοτική λειτουργία του ηλεκτρικού οχήματος. Στο σχήμα 2.8 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ελέγχου της SRM. Μέσω ενός αισθητήρα θέσης ανιχνεύεται η γωνία  $\theta$  του δρομέα και κατ' επέκταση η ταχύτητα του δρομέα, ανάλογα με την μεταβολή της  $\theta$ . Αφού συγκριθεί η πραγματική μετρούμενη ταχύτητα με μια ταχύτητα αναφοράς το σφάλμα  $\varepsilon_n$  που προκύπτει μπαίνει ως είσοδος σε ένα PI ελεγκτή ταχύτητας. Η έξοδος του PI διαμορφώνει το ρεύμα αναφοράς  $i^*$ , το οποίο χρησιμοποιείται ως αναφορά στο κλειστό βρόγχο ελέγχου του ρεύματος. Αφού συγκριθεί το ρεύμα αναφοράς με το πραγματικό ρεύμα, το σφάλμα των ρευμάτων μπαίνει ως είσοδος στον ελεγκτή υστέρησης. Το τελικό στάδιο ελέγχου περιλαμβάνει μια λογική μονάδα που συνδυάζει τους παλμούς της υστέρησης με τις εντολές που δίνονται σύμφωνα με την γραφική παράσταση της αυτεπαγωγής του πηνίου που φαίνεται στο σχήμα 2.8, κατά την οποία στο πρώτο μισό φορτίζει το πηνίο. Στη γωνία  $\theta_{on}$  οι δύο διακόπτες αρχίζουν να άγουν ανάλογα με τους παλμούς που δημιουργούνται από την υστέρηση, ενώ στη γωνία  $\theta_{off}$  κλείνουν οι διακόπτες και σταματάει η λειτουργία της SRM σαν κινητήρα. Αντίθετα στο δεύτερο μισό της γραφικής παράστασης της αυτεπαγωγής των πηνίων των τυλιγμάτων κάθε φάσης κατά την οποία το πηνίο εκφορτίζεται, υπάρχουν αντίστοιχα οι γωνίες  $\theta_{on}$  και  $\theta_{off}$  περίοδος λειτουργίας της SRM σε κατάσταση πέδησης (braking mode) και αν το ηλεκτρικό όχημα υποστηρίζει την λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης (regenerative braking) τότε σ' αυτό το διάστημα η SRM λειτουργεί σαν γεννήτρια.



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα ελέγχου της SRM για το PHEV [10]

Ανάλογα με τις 5 καταστάσεις λειτουργίας που αναλύθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο διαμορφώνεται και ο έλεγχος των διακοπών ισχύος του DC/DC μετατροπέα. Όταν η συστοιχία των μπαταριών βρίσκεται σε κατάσταση εκφόρτισης παρέχοντας ισχύ στην SRM, ο DC/DC μετατροπέας λειτουργεί ως μετατροπέας ανύψωσης, ενώ στη κατάσταση φόρτισης της συστοιχίας των μπαταριών είτε από την SRM είτε από την γεννήτρια ο DC/DC μετατροπέας λειτουργεί ως μετατροπέας υποβιβασμού. Ο κεντρικός σκοπός αυτού του μετατροπέα είναι να κρατήσει την τάση  $U_{c1}$  στον πυκνωτή C1 σταθερή. Ο βρόγχος ελέγχου φαίνεται στο σχήμα 2.9. Όταν η τάση  $U_{c1}$  είναι μικρότερη από την τάση αναφοράς  $U_{c1}^*$  ο DC/DC μετατροπέας είναι στην κατάσταση ανύψωσης αλλιώς είναι στην κατάσταση υποβιβασμού. Στο σχήμα 2.9 φαίνεται η υιοθέτηση ενός διπλού κλειστού βρόγχου ελέγχου, όπου ο PI1 ελεγκτής χρησιμοποιείται για την για την μείωση του σφάλματος της τάσης εξάγοντας το ρεύμα εξόδου αναφοράς  $i_{L1}^*$  το οποίο συγκρίνεται με το πραγματικό μετρούμενο ρεύμα και το σφάλμα αυτών μπαίνει ως είσοδος σε έναν δεύτερο PI2 ελεγκτή. Η έξοδος του PI2 ελεγκτή εξάγει την τάση στο πηνίο L1 το οποίο αφαιρείται από την τάση της συστοιχίας των μπαταριών ώστε να εξαχθεί η τάση στον διακόπτη Q8. Ο τελικός σκοπός είναι η εξαγωγή του λόγου κατάτμησης (duty cycle) σύμφωνα με τις εξισώσεις 2.3 και 2.4.



Σχήμα 2.9 Διάγραμμα ελέγχου του DC/DC μετατροπέα για PHEV

$$U_{Q8} = (1-d)U_{c1} \quad (2.3)$$

$$d = 1 - \frac{U_{Q8}^*}{U_{c1}} \quad (2.4)$$

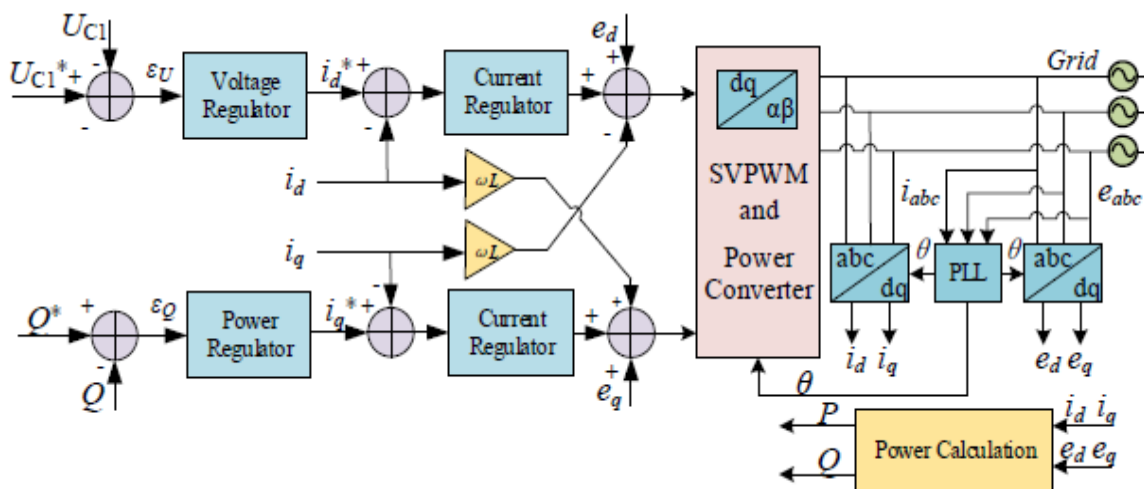
Τέλος, η ανάλυση του ελέγχου του AC/DC μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου για τις διάφορες καταστάσεις του συστήματος G2V, V2G και V2H είναι απαραίτητη. Ο έλεγχος για την κατάσταση G2V φαίνεται στο σχήμα 2.13 κατά την οποία ο διακόπτης M βρίσκεται στη θέση K και ο διακόπτης N είναι κλειστός. Η PMSG βρίσκεται σε αδρανή κατάσταση και ο AC/DC μετατροπέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μετατροπέας διασύνδεσης με το δίκτυο. Επιπλέον, το φίλτρο LC σε κάθε φάση χρησιμοποιείται για να κόβει τις ανώτερες αρμονικές. Σύμφωνα με τον έλεγχο που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.10 ο ενσωματωμένος φορτιστής μπορεί να λειτουργήσει και στα 4 τεταρτημόρια του πλαισίου PQ. Αρχικά χρησιμοποιείται ένα PLL για τον συγχρονισμό με το δίκτυο για την ανίχνευση της φάσης και του μέτρου της τάσης του δικτύου. Επίσης, τα τριφασικά ρεύματα και οι τριφασικές τάσεις μετασχηματίζονται στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς Clark και Park. Η ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς P, Q αντίστοιχα υπολογίζονται από τις εξισώσεις 2.5 και 2.6 αντίστοιχα [11].

$$P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \quad (2.5)$$

$$Q = \frac{3}{2}(e_q i_q - e_d i_d) \quad (2.6)$$

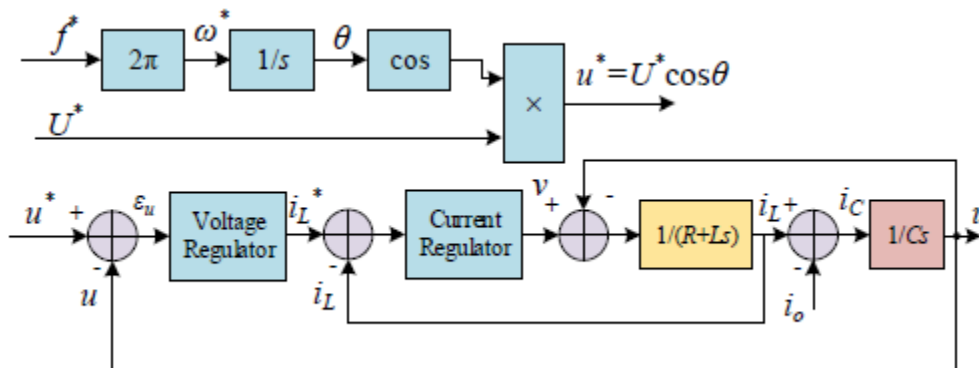
Το σφάλμα των τάσεων στο πυκνωτή C1 μπαίνει στο ρυθμιστή τάσης για να υπολογιστεί το ρεύμα αναφοράς στον άξονα d το οποίο συγκρίνεται με το πραγματικό και είναι το ρεύμα που φορτίζει το ηλεκτρικό όχημα ή και στέλνεται στο δίκτυο ανάλογα την κατάσταση λειτουργίας και το σφάλμα μπαίνει στο ρυθμιστή ρεύματος και εξάγεται η τάση στον άξονα d. Γίνεται η αντίστοιχη διαδικασία λαμβάνοντας ως ανάδραση την άεργο ισχύ που μπορεί να υπάρχει και στα 4 τεταρτημόρια ανάλογα με το αν στέλνεται στο δίκτυο ή παρέχεται στο ηλεκτρικό όχημα. Τελικά υπολογίζεται το ρεύμα αναφοράς στον άξονα q το οποίο συγκρίνεται με το πραγματικό και το σφάλμα εισάγεται στον ρυθμιστή ρεύματος. Αφού γίνεται απόξευση σημάτων με αντίστροφο μετασχηματισμό Clark εξάγονται τα σήματα στο α-β στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς όπου μέσω της τεχνικής παλμοδότησης SVPWM παράγονται οι παλμοί στους διακόπτες του AC/DC μετατροπέα.





Σχήμα 2.10 Διάγραμμα ελέγχου AC/DC μετατροπέα [10]

Η τελευταία λειτουργία είναι η V2H δηλαδή όταν το ηλεκτρικό όχημα χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση οικιακών συσκευών. Στο σχήμα 2.11 φαίνεται το διάγραμμα ελέγχου του AC/DC μετατροπέα για την V2H λειτουργία. Αρχικά μέσω της RMS τάσης αναφοράς και του  $\cos\theta$  υπολογίζεται η συνιστώσα της τάσης αναφοράς  $u^*$ . Μέσω του ρυθμιστή τάσης παράγεται το ρεύμα αναφοράς το οποίο συγκρίνεται με το ρεύμα φορτίου το πραγματικό. Το σφάλμα περνάει σε έναν P (proportional) ελεγκτή και δίνει την τάση αναφοράς. Όπου με PWM παράγονται οι παλμοί για τους διακόπτες.



Σχήμα 2.11 Διάγραμμα ελέγχου για τη V2H κατάσταση [10]

## 2.3 Δομή έξυπνου δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος

Μέχρι τώρα έχει αναλυθεί ο σκοπός, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα αλλά και τις τεχνολογίες που διέπουν την διασύνδεση των έξυπνων δικτύων με τα ηλεκτρικά οχήματα. Σκοπός αυτής της παραγράφου είναι η αναφορά για τα αποτελέσματα της διασύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων από την σκοπιά των έξυπνων δικτύων, τους τρόπους που διαχειρίζονται τα ηλεκτρικά οχήματα με σκοπό να γίνει η διασύνδεση οικονομικά αποδοτική αλλά και ανάλυση των αναπτυγμένων τρόπων επικοινωνίας τους.

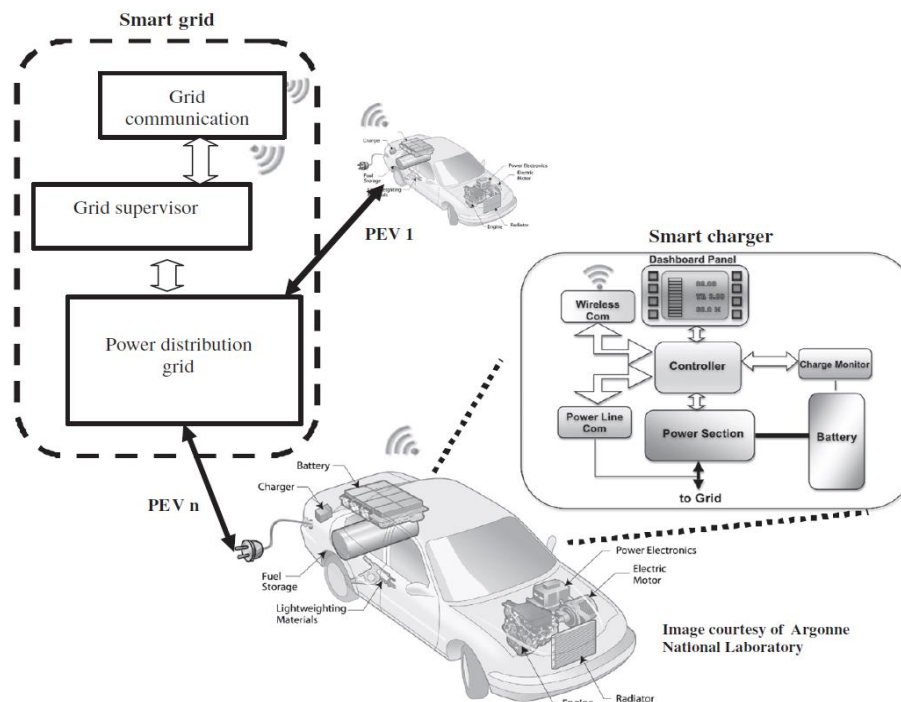
### 2.3.1 Έξυπνη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Ευρέως γνωστές αποτελούν οι επιπτώσεις της μη ελεγχόμενης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, τέτοιες επιπτώσεις μπορεί να είναι η υπερφόρτωση του δικτύου καθώς και η αύξηση της ζήτησης η οποία οδηγεί σε λιγότερο αποδοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου μεγάλο μέρος της ερευνητικής κοινότητας έχει αφοσιωθεί στα συστήματα έξυπνης φόρτισης. Με τον όρο έξυπνη φόρτιση νοείται η ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, την αποσυμφόρτηση του δικτύου και την αποδοτικά οικονομική διασύνδεση. Τα έξυπνα δίκτυα παίζουν θεμελιώδη ρόλο καθώς αποτελούν τη φυσική πλατφόρμα υλοποίησης των στρατηγικών της έξυπνης φόρτισης ικανών να μειώσουν την αιχμή του φορτίου στο δίκτυο ενέργειας. Ένα μέρος της έρευνας εστιάζει στην ελαχιστοποίηση του συστήματος του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ή την ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης στην αγορά ενέργειας. Ενώ άλλο μέρος της έρευνας δεν ασχολείται με την παροχή ενέργειας, αλλά εστιάζει στον τρόπο μείωσης των αρνητικών επιπτώσεων του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας [1].

Με την εξαιρετικά μεγάλη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχουν έρθει στο φως περιορισμοί όσο αναφορά την υλοποίηση των αλγορίθμων της έξυπνης φόρτισης. Οι περιορισμοί δεν είναι σταθεροί αλλά μεταβάλλονται ανάλογα με τις παραμέτρους του συστήματος ηλεκτρικών οχημάτων, όπως ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (φαινόμενο θερμοκηπίου) και τις απώλειες στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [1].

Στο σχήμα 2.12 φαίνεται η βασική αρχή της έξυπνης φόρτισης καθώς το ηλεκτρικό όχημα αλληλοεπιδρά με το έξυπνο δίκτυο [21]. Σ' αυτή την εκδοχή, το δίκτυο διανομής

ισχύος μεταφέρει ισχύ σε ένα αριθμό από PEV σύμφωνα με την στρατηγική διαμοιρασμού ενέργειας που υλοποιείται από τον επόπτη του δικτύου, ο οποίος καθορίζει την ισχύ που θα διαμοιραστεί σε κάθε έναν από τους χρήστες των PEV με βάση τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ του τομέα επικοινωνιών (πληροφορίες που παίρνει από το υπόλοιπο ΣΗΕ) του δικτύου και του συστήματος της έξυπνης φόρτισης (η επικοινωνία αυτών των συστημάτων υλοποιείται είτε μέσω γραμμών μεταφοράς είτε ασύρματα). Στο συγκεκριμένο σύστημα έξυπνης φόρτισης η κατάσταση της μπαταρίας (SOC) και οι συνθήκες λειτουργίας παρακολουθούνται και καταγράφονται απευθείας στον πυρήνα ελέγχου του έξυπνου φορτιστή [21]. Ο ελεγκτής ελέγχει το σύστημα ισχύος θέτοντας έναν ρυθμό φόρτισης ή με βάση ενός προγράμματος που έχει καθοριστεί, λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις του χρήστη (αντίτιμο της αγορασμένης ενέργειας, χρόνος αναμονής κ.τ.λ.), τα χαρακτηριστικά του συστήματος (μέγιστος ρυθμός φόρτισης, αρχική κατάσταση φόρτισης, προβλεπόμενη απαιτούμενη ενέργεια για να ολοκληρωθεί η φόρτιση κ.τ.λ.) και την διαθεσιμότητα του δικτύου [21]. Μια μονάδα GUI ενσωματωμένη στο όχημα επιτρέπει τα παραπάνω χαρακτηριστικά να εγκατασταθούν και την επίβλεψη της διαδικασίας από τον χρήστη.



Σχήμα 2.12 Βασική τοπολογία αλληλεπίδρασης έξυπνου δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος με την στρατηγική της έξυπνης φόρτισης [21]

### 2.3.2 Επικοινωνία έξυπνου δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος

Η υποδομή για ένα δίκτυο αμφίδρομης επικοινωνίας στα έξυπνα δίκτυα απαιτεί την απόκριση πολλών συσκευών, οι οποίες ελέγχουν έναν μεγάλο αριθμό από διανεμημένες πηγές ενέργειας σε μια τεράστια διεσπαρμένη γεωγραφικά περιοχή. Σ' αυτή τη περίπτωση, η ασύρματη επικοινωνία αποτελεί φιλόδοξη λύση ιδιαίτερα για εφαρμογές V2G. Μερικά από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι το χαμηλό κόστος και η κάλυψη ευρείας περιοχής. Με την συνεχή αλληλεπίδραση του έξυπνου δικτύου και των ηλεκτρικών οχημάτων, αναμένεται συνεχή ανταλλαγή πληροφοριών και η συνεργασία διαφόρων συστημάτων μέσα στο έξυπνο δίκτυο όπως είναι οι έξυπνοι μετρητές για την επιτυχή λειτουργία.

Σύμφωνα με την τοπολογία ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στα έξυπνα δίκτυα, οι τρόποι επικοινωνίας μεταξύ αυτών μπορούν να υλοποιηθούν με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι οι συνδέσεις επικοινωνίας από τους αισθητήρες στα διάφορα σημεία του έξυπνου δικτύου μέχρι τους έξυπνους μετρητές. Ο δεύτερος είναι οι επικοινωνίες ανάμεσα στους έξυπνους μετρητές, τους διαχειριστές του δικτύου/aggregators και κέντρα συγκέντρωσης πληροφοριών (data centers). Το πρώτο σενάριο υλοποιείται με PLC ή ασύρματες επικοινωνίες, ενώ το δεύτερο σενάριο υλοποιείται εφαρμόζοντας τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται και στη κινητή τηλεφωνία, όπως 3G, WiMAX και 4G.

Για την επιτυχή λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να είναι ικανά οποιαδήποτε ώρα (όπου υπάρχει διαθέσιμο σημείο φόρτισης) να επαναφορτίσουν τις μπαταρίες τους ή να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο. Σ' αυτή τη περίπτωση, ο διαχειριστής του δικτύου ή ο aggregator πρέπει να είναι σε θέση να ταυτοποιεί ένα ηλεκτρικό όχημα σε πραγματικό χρόνο όταν αυτό συνδέεται, έτσι ώστε να είναι σε θέση να ικανοποιήσει την ζήτηση αποδοτικά. Από την άλλη μεριά ο χρήστης του ηλεκτρικού οχήματος πρέπει να γνωρίζει το χρόνο χρήσης σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε είτε να αποδώσει το ανάλογο αντίτιμο στην αγορά ενέργειας είτε να το αντισταθμίσει επιστρέφοντας ενέργεια στο δίκτυο όταν έχει περίσσεια.

Για την πραγματοποίηση των προαναφερθέντων απαιτήσεων υιοθετήθηκαν διάφορες τεχνολογίες όπως του WSN. Ο WSN είναι ένας αισθητήρας που έχει γίνει πολύ δημοφιλής στα έξυπνα δίκτυα, εξαιτίας της λειτουργίας του σε εφαρμογές μικροδικτύων. Με την χρήση του αισθητήρα WSN ενισχύεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων,

ωστόσο υπάρχουν αρκετοί κάποιοι περιορισμοί στη χρήση του όπως ότι δεν καλύπτουν μεγάλη περιοχή όπως άλλες ασύρματες τεχνολογίες και επίσης το ποσοστό επιτυχίας του αισθητήρα μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των σφαλμάτων. Από την άλλη μεριά, τα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι αξιοπιστία και μετάδοση πληροφοριών στον διαχειριστή του δικτύου/aggregator με τον ελάχιστο αριθμό αναμεταδόσεων (ειδικά σε εφαρμογές V2G).

Τέλος, η εφαρμογή των ασύρματων τεχνολογιών εξαρτάται από την απόσταση των επικοινωνούντων σημείων και το μέγεθος των πληροφοριών που μεταδίδονται. Επιπλέον, μια από τις προτεινόμενες λογικές που έχει επικρατήσει για τον έλεγχο και την κατάσταση της φόρτισης είναι η χρήση των κινητών τηλεφώνων ως διεπαφές για την επικοινωνία μεταξύ των λειτουργιών που παίρνουν μέρος κατά τη φόρτιση όπως η αγορά ενέργειας, το σημείο φόρτισης και ο aggregator, η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω GPS ή Bluetooth. Βέβαια, η παραπάνω επικοινωνία είναι αδύνατο να επιτευχθεί χωρίς τα απαραίτητα πρωτόκολλα, όπως το πρωτόκολλο WiNMAX που εφαρμόζεται για μεγάλες αποστάσεις επικοινωνιών, το NFC πρωτόκολλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποστήριξη της λειτουργίας των Bluetooth.

## **2.4 Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για λειτουργίες G2V και V2G**

Άξια αναφοράς για την πρόβλεψη του ηλεκτρικού φορτίου θεωρείται και η συνεργασία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Renewable Energy Sources RES) με τα ηλεκτρικά οχήματα, προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση λειτουργίας των έξυπνων δικτύων αλλά και να αντιμετωπιστούν τα διάφορα μειονεκτήματα των RES. Πιο συγκεκριμένα αναλύεται η σχέση των ηλεκτρικών οχημάτων με τα φωτοβολταϊκά συστήματα αλλά και με τα συστήματα ανεμογεννητριών είτε για την φόρτιση τους είτε για την αποθήκευση ενέργειας είτε για υποστήριξη του δικτύου σε περιόδους υψηλής ζήτησης.

### **2.4.1 Ενσωμάτωση πηγών ενέργειας με ηλεκτρικά οχήματα**

Η ενσωμάτωση των RES στο ηλεκτρικό σύστημα ισχύος φαίνεται αρκετά ελκυστική, δεδομένου ότι το σύστημα ισχύος υποφέρει από την απρόβλεπτη και διακοπτόμενη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές ενέργειας όπως ο άνεμος και ο ήλιος. Η ηλεκτρική ενέργεια από τέτοιες πηγές μπορεί να είναι πολύ μεγάλη (περισσότερη από την ζήτηση) ή πολύ μικρή (λιγότερη από την ζήτηση) εξαρτάται από την

διαθεσιμότητα της εκάστοτε πηγής, δηλαδή την ταχύτητα του ανέμου και την ηλιακή ακτινοβολία. Ωστόσο η αποδεκτή λύση που υιοθετήθηκε για την εξισορρόπηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις RES στο δίκτυο είναι είτε η εγκαθίδρυση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (ESS) είτε τα ελεγχόμενα φορτία που μεταφέρουν συγκεκριμένες καταναλώσεις σε άλλη χρονική στιγμή από το την χρονική στιγμή της μέγιστης ζήτησης με σκοπό να μειώσουν το peak της καμπύλης ισχύος. Το ESS απορροφά ή παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε περίπτωση υψηλής παραγωγής και χαμηλής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα από τα RES.

Η πρώτη ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων με τις RES γίνεται με την χρήση των μπαταριών, οι οποίες δρουν ως ένα ESS όπου στρέφουν την ενσωμάτωση των RES στην αγορά ενέργειας ως δυναμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Τα ηλεκτρικά οχήματα αποθηκεύουν την επιπλέον παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις RES μέσω διάφορων σχημάτων φόρτισης (κάποια απ' αυτά αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2) ή μπορούν να μεταφέρουν ισχύ στο δίκτυο εφαρμόζοντας την λειτουργία V2G. Τελικά, τα ηλεκτρικά οχήματα δρουν ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας για εξυπηρέτηση πρόσθετων υπηρεσιών, ενώ παράλληλα μειώνονται οι εκπομπές λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου με την εισαγωγή των RES. Από τις πολλές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ο άνεμος και ο ήλιος είναι οι πιο υποσχόμενες πηγές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για την επίτευξη αποδοτικής συνεργασίας με τα ηλεκτρικά οχήματα.

#### **2.4.2 Φωτοβολταικά συστήματα και ηλεκτρικά οχήματα**

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταικά έχει ήδη δείξει ότι είναι μία από τις πιο υποσχόμενες πηγές RES. Τα φωτοβολταικά πάνελ συλλέγουν ηλιακή ενέργεια την οποία την παρέχουν συσσωρευμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο. Με την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων να μεγαλώνει, τα φωτοβολταικά συστήματα είναι πιο πιθανό να χρησιμοποιηθούν για φόρτιση των μπαταριών, έτσι εξασφαλίζεται μετακίνηση του χρήστη με αποδοτικό τρόπο από την άποψη του κόστους και χωρίς εκπομπές ρύπων το οποίο συνεπάγεται αποφυγή μόλυνσης του περιβάλλοντος με οποιοδήποτε τρόπο. Καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα στρέφουν την αγορά οχημάτων μακριά από τα παραδοσιακά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, η παγκόσμια ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια θα αυξηθεί ραγδαία για την αποδοτική φόρτιση των μπαταριών λιθίου. Γ' αυτό το λόγο,

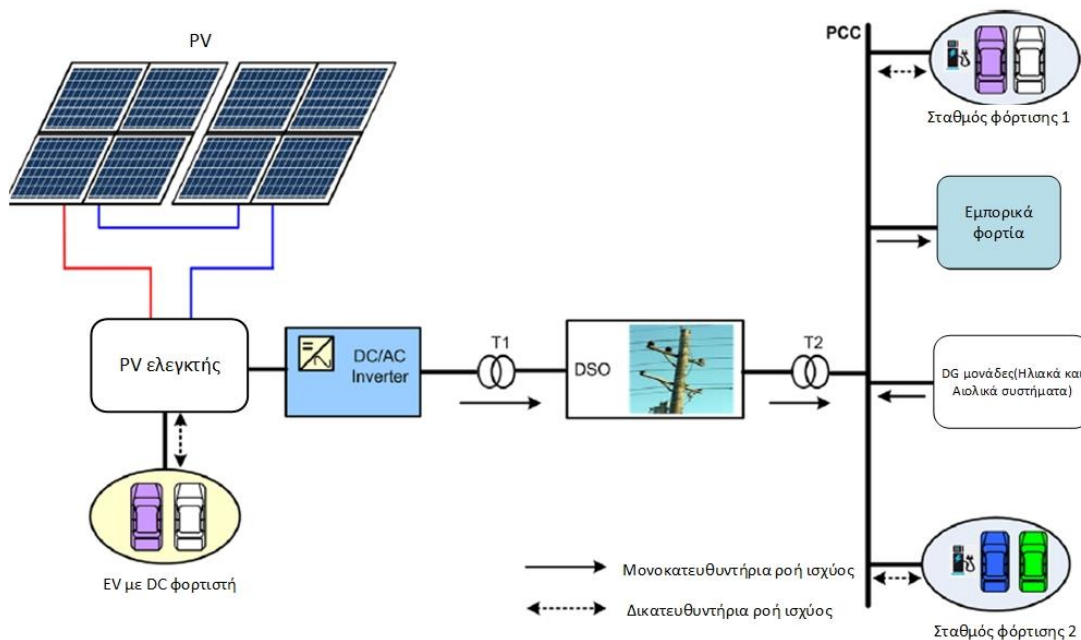
φαίνεται ότι η ενσωμάτωση της φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με RES οδήγησε στην αύξηση των κατοικιών που εγκαθιστούν Φωτοβολταικά συστήματα. Ωστόσο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθούν κάποιες βασικές αρχές για την συνεργασία των φωτοβολταικών στις κατοικίες με φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων. Τα τρία βασικά στοιχεία που καθορίζουν και το μέγεθος ενός φωτοβολταικού συστήματος για οικιακές κατοικίες είναι τα εξής:

- Μέση ηλεκτρική ζήτηση των αναγκών της οικίας συμπεριλαμβάνοντας και τις απώλειες μετατροπής από DC σε AC.
- Μέση χρήση του ηλεκτρικού οχήματος και οι οδηγίες επαναφόρτισης του κατασκευαστή.
- Το βέλτιστο μέγεθος και τύπος συστήματος PV, το οποίο θα είναι ικανό να επιφέρει τις μέγιστες εκπτώσεις, φορολογικά κίνητρα, προγράμματα δανείων και εκτεταμένα οφέλη εγγύησης.

Συμπεριλαμβάνοντας τις οδηγίες πολλών κατασκευαστών, έχει αποφασιστεί ότι η φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος απαιτεί ένα PV σύστημα με εύρος ισχύος 2kW – 14kW. Στην περίπτωση που το σύστημα PV θα χρησιμοποιείται και για οικιακή χρήση εκτός από φόρτιση τότε το εύρος ισχύος αλλάζει και είναι από 6kW – 18kW.

Στην αναφορά [22] περιγράφεται ένα σχήμα παραγωγής και διανομής της ενέργειας με δυναμική φόρτιση των PEV σε IMG. Το σχήμα ενσωματώνει το σύστημα διανομής με RES (στην περίπτωση των PV συστημάτων) και συνδυάζει την παραγωγή θερμότητας και ισχύος. Στο σχήμα 2.13 απεικονίζεται το προαναφερθέν σενάριο, όπου σε έναν χώρο στάθμευσης οχημάτων έχει εγκατασταθεί ένα φωτοβολταικό σύστημα για την χρήση του σε σταθμό φόρτισης και είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός δικατευθυντήριου DC/AC μετατροπέα ισχύος. Τα δύο σημεία φόρτισης 1&2 αντιπροσωπεύουν την πιθανότητα να υπάρχουν πολλά σημεία φόρτισης στο σύστημα διανομής. Τα σημεία φόρτισης 1&2 προσφέρουν υποστήριξη δικτύου σαν ESS και παρέχουν πρόσθετες υπηρεσίες μέσω των δικατευθυντήριων μετατροπέων ισχύος DC/AC. Επιπλέον, τα ηλεκτρικά οχήματα συνδέονται απευθείας στον ελεγκτή του PV και μπορούν να απορροφήσουν την παραγόμενη ισχύ. Το DC δίκτυο ισχύος έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι ευέλικτο και αποτελεί μια ελκυστική λύση για το μελλοντικό ηλεκτρικό δίκτυο σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Σ' αυτή τη περίπτωση ο

δικατευθυντήριος DC φορτιστής μπορεί εύκολα να περιληφθεί στο ηλεκτρικό μοντέλο και ακόμα να τροφοδοτήσει ενέργεια πίσω στις μπαταρίες για αποθήκευση, έως ότου χρειαστεί σε περιόδους υψηλής ζήτησης όταν η παραγωγή ενέργειας από το PV είναι χαμηλή (π.χ. χειμερινές περιόδους).



Σχήμα 2.13 EV σταθμός φόρτισης σε σύνδεση με ηλεκτρικό δίκτυο για χώρο στάθμευσης με PV [1]

Οι επιπτώσεις της διείσδυσης των PV στα ηλεκτρικά οχήματα είναι αυτές που προκαλούν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Αρχικά, η αμοιβαία σχέση αυτών των δυο λειτουργεί έτσι ώστε να συμπληρώνει το ένα το άλλο, ως εκ τούτου τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να ενισχύσουν την ενσωμάτωση των PV συστημάτων παρέχοντας υποστήριξη τάσης και μειώνοντας την επιφόρτιση του ηλεκτρικού δικτύου μέσω των V2G υπηρεσιών. Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι με την συνεργασία των PV και EV έχουν μειωθεί οι διακυμάνσεις της τάσης κατά 15% [1].

### 2.4.3 Αιολικά συστήματα και ηλεκτρικά οχήματα

Η αρχική ιδέα της χρήσης των αιολικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας (WECS) για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γεννήθηκε με την υιοθέτηση μιας εναλλακτικής ευέλικτης λύσης για την μείωση των ρύπων και την εκμετάλλευση των RES όπως



συζητήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η συνεργασία των WECS και EV έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την ερευνητική κοινότητα με σκοπό να καθοριστούν οι επιπτώσεις της συνεργασίας και η βιωσιμότητα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πρώτα σενάρια αναφέρονται στη χρήση των EV για την κάλυψη πρόσθετων αναγκών καθώς και την ρύθμιση της αγοράς ενέργειας με βάση την αλληλεπίδραση του WECS και του δικτύου. Επιπλέον, πρέπει να καθοριστεί η ποσότητα του αέρα που μπορεί να εξασφαλιστεί σε ένα απομονωμένο δίκτυο με ενσωματωμένα ηλεκτρικά οχήματα. Τα ηλεκτρικά οχήματα μέσω των V2G υπηρεσιών υποστηρίζουν την αύξηση των αιολικών συστημάτων από 41% σε 59% σε απομονωμένο δίκτυο.

Επιπρόσθετα, είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι εκτός από την τροφοδότηση φορτίων τα ηλεκτρικά οχήματα αναλαμβάνουν και επικουρικές λειτουργίες. Οι μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν υπό την κατάσταση λειτουργίας V2G για υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου ηλεκτρική ενέργειας. Οι αστάθειες στη συχνότητα του δικτύου οφείλονται στις διακυμάνσεις των μεγάλων ποσοτήτων ισχύος που προέρχονται από την διείσδυση του αέρα ως πηγή ενέργειας. Μετά από πολλές έρευνες [1] έχει διαπιστωθεί ότι συγκεντρωμένες μπαταρίες αποθηκευτικής ενέργειας της τάξης των 16 MW μπορούν να υποστηρίξουν (μέσω V2G) ποσότητα ισχύος 42 MW προερχόμενη από τον αέρα, ενώ σε αντίθετη περίπτωση χωρίς την χρήση των μπαταριών θα επιτρεπόταν μόνο 20 MW ισχύ από τον αέρα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. Τεχνικές πρόβλεψης Ηλεκτρικού Φορτίου

#### 3.1 Εισαγωγή

Η παρακολούθηση του ηλεκτρικού φορτίου συνεχώς θεωρείται μια από τις πιο σημαντικές διαδικασίες στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι μέσω των καμπυλών φορτίου οι επιτηρητές του ΣΗΕ είναι σε θέση να κάνουν προβλέψεις με όσο γίνεται μεγαλύτερη ακρίβεια των περιόδων των αιχμών αλλά και το κατά προσέγγιση φορτίο, με σκοπό να μπορέσουν να προετοιμάσουν τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας για τη ζήτηση αλλά και τη χρήση αποθηκευμένης ενέργειας με όσο το δυνατό αποδοτικότερη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Ο έλεγχος καθώς και η οικονομική λειτουργία του ΣΗΕ έγκειται στη παρακολούθηση του φορτίου ανά τακτά χρονικά διαστήματα από το στάδιο της παραγωγής. Συστήματα όπως ο Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής (ΑΕΠ) φροντίζουν μέσω των καμπύλων οικονομικής κατανομής φορτίου, να ανταπεξέρχονται στα μεταβατικά φαινόμενα λόγω της αυξομείωσης της ζήτησης με αποτέλεσμα να αποκαθιστούν το φορτίο. Η αντιμετώπιση όλων των συνεχών αλλαγών του φορτίου απαιτούν την όσο το δυνατό αποδοτικότερη διαχείριση των μονάδων που είναι ήδη ενταγμένες στο δίκτυο και λέγονται μονάδες βάσης αλλά και εκείνων των μονάδων που δεν χρησιμοποιούνται ως βάσης αλλά είναι έτοιμες να ενταχθούν ανά πάσα στιγμή για την κάλυψη της ζήτησης.

Για την πρόβλεψη του ηλεκτρικού φορτίου εκτελείται ο λεγόμενος βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός όπου γίνεται η εξέταση δεδομένων πολλών ετών για τον υπολογισμό φορτίου, σε περίπτωση που το φορτίο υφίστανται μια απότομη αλλαγή (κυρίως αύξηση), τότε μπαίνει σε λειτουργία η υδροθερμική συνεργασία αυτό γίνεται συνήθως για να αντιμετωπιστούν μεταβατικά φαινόμενα του φορτίου διότι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί εντάσσονται πολύ γρήγορα στο δίκτυο, αλλά από την άλλη μεριά έχουν περιορισμένη διαθεσιμότητα σε νερό αυτό σημαίνει ότι ενώ καλύπτουν το φορτίο αδυνατούν να καλύψουν την ζήτηση δηλαδή την ενέργεια που θα πρέπει προσφέρουν γ' αυτό συνεργάζονται με θερμικούς (λιγνιτικούς ή πετρελαϊκούς ή σταθμούς φυσικού αερίου) σταθμούς για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την οικονομικότερη λειτουργία των θερμικών σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται και παρακολούθηση του καυσίμου, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής το οποίο αποτελείται από την χρησιμοποίηση του καταλληλότερου καυσίμου, το κόστος μεταφοράς και την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου. Η βέλτιστη λειτουργία αποτελεί πρόβλημα της οικονομικής κατανομής του φορτίου, το οποίο αποτελεί την ακριβή πρόβλεψη του φορτίου μακροπρόθεσμα δηλαδή υπολογισμός ετήσιων εποχιακών αιχμών φορτίου, οικονομικό προγραμματισμό γεννητριών δηλαδή τον βέλτιστο καθορισμό του συνδυασμού γεννητριών και την οικονομική φόρτιση μονάδων σε λειτουργία δηλαδή την χρήση του βέλτιστου συνδυασμού φορτίσεως των μονάδων που είναι σε λειτουργία. Τα τελευταία αναφέρονται στην βέλτιστη ένταξη των μονάδων, δηλαδή τον βέλτιστο καθορισμό της χρησιμοποίησης γεννητριών για την εξυπηρέτηση της ωριαίας ζήτησης.

Είδος Πρόβλεψης	Χρονικός Ορίζοντας	Λειτουργίες για τις οποίες χρειάζεται
Πολύ Βραχυπρόθεσμη	Μερικά sec -Μερικά min	Αυτόματος Έλεγχος παραγωγής Οικονομική Κατανομή φορτίου
Βραχυπρόθεσμη	Μερικές h - 1 εβδομάδα	Ένταξη Μονάδων Υδροθερμική Συνεργασία Ανταλλαγές Ισχύος
Μεσοπρόθεσμη	Μερικοί μήνες - 5 έτη	Προγραμματισμός Καυσίμων Χρήση Υδάτινων Πόρων Προγραμματισμός Συντήρησης
Μακροπρόθεσμη	10 - 25 έτη	Προγραμματισμός Ένταξης Νέων Μονάδων

Πίνακας 3.1 Χαρακτηρισμός προβλέψεων φορτίου ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα

Γενικά μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν το ηλεκτρικό φορτίο χωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες [12]:

- Οικονομικοί: Εννοούνται όλοι οι οικονομικοί παράγοντες στο περιβάλλον του φορτίου που μπορούν να το επηρεάσουν όπως είναι οι εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, δημογραφικοί παράγοντες, επίπεδα βιομηχανικής δραστηριότητας, ανάπτυξη ή και κορεσμός της αγοράς νέων ηλεκτρικών συσκευών, αλλαγές στον αγροτικό τομέα, κρατικές παρεμβάσεις και γενικά η οικονομική δραστηριότητα, έχουν μεγάλη επίδραση στο ρυθμό αύξησης ή μείωσης του φορτίου του συστήματος.
- Χρονικοί: Τρεις είναι οι παράγοντες που εντάσσονται στους χρονικούς, εποχιακές μεταβολές, εβδομαδιαίος/ημερήσιος κύκλος και εθνικές και θρησκευτικές εορτές ή αργίες.
- Καιρικοί: Οι καιρικοί παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά την καμπύλη του φορτίου γιατί ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες μπαίνουν σε λειτουργία συσκευές θέρμανσης ή ψύξης, όπου οι περισσότερες απ' αυτές καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια
- Τυχαίοι: Στην κατηγορία ανήκουν όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το φορτίο και δεν ανήκουν σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες. Η λειτουργία του συστήματος δέχεται συνεχώς διαταραχές οι οποίες οφείλονται στο γεγονός ότι η ζήτηση του φορτίου συνίσταται από ένα μεγάλο αριθμό επιμέρους ζητήσεων των καταναλωτών.

Τέλος είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι η πρόβλεψη φορτίου είναι ύψιστης σημασίας για την ομαλή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το κίνητρο για ακριβείς και συνεχείς προβλέψεις κρύβεται στην εμπορευματοποίηση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αποθήκευση του ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται δύσκολα ακόμα και με την σημερινή τεχνολογική πρόοδο στα μέσα αποθήκευσης όποτε η εκτίμηση της μελλοντικής απαίτησης είναι αναγκαία για την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας και καυσίμου.

### 3.2 Μοντέλα παλινδρόμησης

Η εφαρμογή των μοντέλων παλινδρόμησης αφορά την εύρεση συσχετίσεων ανάμεσα σε μια ανεξάρτητη μεταβλητή και μια εξαρτημένη μεταβλητή που παίζει το ρόλο του εξεταζόμενου μεγέθους αλλά και τις μεταβλητές που βρίσκονται στο περιβάλλον του εξεταζόμενου μεγέθους και την επηρεάζουν. Ανάλογα με τον αριθμό των ανεξάρτητων

μεταβλητών προκύπτουν τα μοντέλα απλής ή πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Σχετικά με τις προβλέψεις, αν θεωρηθούν δεδομένες οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών, είναι δυνατό με την βοήθεια των μοντέλων παλινδρόμησης να κατανοήσουμε την εξέλιξη της εξαρτημένης μεταβλητής μέσω της εξίσωσης παλινδρόμησης. Ένα από τα πλεονεκτήματα των μεθόδων παλινδρόμησης είναι η δυνατότητα της προσέγγισης της αλλαγής της εξαρτημένης μεταβλητής για οποιαδήποτε αλλαγή της ανεξάρτητης μεταβλητής λειτουργώντας ως συνάρτηση, με την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιπες ανεξάρτητες μεταβλητές παραμένουν σταθερές.

Η χρήση της παλινδρόμησης είναι ευρεία στη στατιστική. Ειδικότερα στο τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας η παλινδρόμηση χρησιμοποιείται ως τεχνική πρόβλεψης ηλεκτρικού φορτίου για την διαμόρφωση της σχέσης μεταξύ της κατανάλωσης φορτίου και εξωτερικών παραγόντων όπως είναι οι καιρικοί παράγοντες, οι απώλειες του συστήματος ισχύος το επίπεδο της ζήτησης κ.τ.λ. Οι βασική ιδέα της παλινδρόμησης είναι ότι η τάση του φορτίου διαχωρίζεται στην τάση που του παρέχεται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και από μια άλλη τάση που έχει το ρόλο της διακύμανσης αφού απ' αυτή εξαρτάται αν θα μειωθεί ή όχι το επίπεδο της τάσης παροχής. Η τάση που προκαλεί η διακύμανση εξαρτάται από τους παράγοντες που περιεγράφηκαν παραπάνω. Στην αναφορά [13] περιγράφονται μοντέλα πρόβλεψης αιχμής φορτίου για την επόμενη μέρα. Στα μοντέλα αυτά ενσωματώνονται εξωγενείς παράγοντες όπως ο καιρός, ντετερμινιστικές επιδράσεις όπως οι περίοδοι διακοπών και άλλες στοχαστικές εφαρμογές στα μοντέλα όπως είναι η μέση η τιμή των φορτίων. Οι μέθοδοι παλινδρόμησης προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα, αρχικά συσχετίζουν τις τιμές εξόδου και εισόδου των ηλεκτρικών στοιχείων, δίνουν συμπεράσματα για την τιμή της απόδοσης [14]. Ωστόσο παρά τα πλεονεκτήματα τους, επειδή εισάγουν ένα είδος γραμμικότητας στα μοντέλα είναι δύσκολος ο καθορισμός του ακριβούς μοντέλου.

### **3.2.1 Απλή Γραμμική Παλινδρόμηση**

Όταν οι τιμές των δύο μεταβλητών που εκφράζουν τις ιδιότητες σχετίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η μία έστω η  $y$  να προβλεφθεί καλύτερα, όταν η άλλη η  $x$  είναι γνωστή, τότε λέμε ότι τα  $x$  και  $y$  σχετίζονται (θετικά και αρνητικά). Η απλούστερη μορφή συσχέτισης είναι η γραμμική και θα ασχοληθούμε μόνο μ' αυτή τη περίπτωση. Στη

περίπτωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης γίνεται προσπάθεια πρόβλεψης της εξαρτημένης μεταβλητής δοσμένης της ανεξάρτητης μεταβλητής. Για την πρόβλεψη χρονοσειρών θεωρούμε τον χρόνο ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την συγκεκριμένη μέθοδο φαίνονται παρακάτω:

$$\hat{Y}_i = a + bX_i + e \quad (3.1)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sum_{i=1}^n [(X_i - \bar{X})^2]} \quad (3.2)$$

$$a = \hat{Y}_i - bX_i - e \quad (3.3)$$

, όπου

$X_i$ : η ανεξάρτητη μεταβλητή

$Y_i$ : η εξαρτημένη μεταβλητή

$\hat{Y}_i$ : η εκτιμώμενη τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής

$a$ : η τεταγμένη του σημείου τομής με τον άξονα των εξαρτημένων μεταβλητών

$b$ : η κλίση της ευθείας

$\bar{X}$ : η μέση τιμή των ανεξάρτητων μεταβλητών

$\bar{Y}$ : η μέση τιμή των εξαρτημένων μεταβλητών

$n$ : ο αριθμός των διαθέσιμων παρατηρήσεων

Η πρώτη εξίσωση περιγράφει τη γραμμική σύνδεση μεταξύ της ανεξάρτητης και εξαρτημένης μεταβλητής. Για τον υπολογισμό των συντελεστών  $a$ ,  $b$  χρησιμοποιείται η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων, δηλαδή γίνεται επιλογή τέτοιων συντελεστών έτσι ώστε ελαχιστοποιείται το σφάλμα των μετρούμενων (πραγματικών) τιμών από τις προβλεπόμενες τιμές [15].

### 3.2.2 Πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση

Η πολλαπλή Γραμμική Παλινδρόμηση αποτελεί μια γενίκευση της παραπάνω μεθόδου καθώς η εξαρτημένη μεταβλητή  $y$  είναι πιο πιθανό να εξαρτάται από περισσότερες από μία εξαρτημένες μεταβλητές. Οπότε ο σκοπός της εκάστοτε εφαρμογής πρόβλεψης ηλεκτρικού φορτίου έγκειται στη λήψη όλων των μεταβλητών που μπορούν να

επηρεάσουν την πρόβλεψη. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει το μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης είναι η παρακάτω:

$$Y = b_0 + b_1 X_{1,i} + b_2 X_{2,i} + \dots + b_k X_{k,i} + e_i \quad (3.4)$$

όπου δείκτης  $i$  δείχνει τον ακριβή αριθμό των ανεξάρτητων παραμέτρων που επηρεάζουν την πρόβλεψη και  $b_i$  οι συντελεστές - σταθεροί παράμετροι και  $e_i$  το σχετικό σφάλμα από τις πραγματικές τιμές.

Μια από τις προ απαιτούμενες δεσμεύσεις για την εφαρμογή του μοντέλου της παλινδρόμησης είναι να μην υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών και κατ' επέκταση των εξωτερικών φαινομένων που επηρεάζουν την πρόβλεψη. Αρχικός στόχος είναι ο υπολογισμός των συντελεστών  $b_i$  σύμφωνα με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Ειδικότερα για τον υπολογισμό των συντελεστών, υπολογίζονται αρχικά οι μερικές παράγωγοι του αθροίσματος του τετραγώνου των σφαλμάτων  $e_i$  στη συνέχεια τις θέτουμε ίσες με μηδέν με σκοπό να υπολογίσουμε σε ποια σημεία η αρχική συνάρτηση λαμβάνει το κατώτερο ακρότατο της όπου τελικά θα προκύψει και ο ελάχιστος συντελεστής, σημειώνεται ότι μετά τον μηδενισμό των μερικών παραγώγων θα προκύψει ένα σύστημα εξισώσεων. Η επίλυση αυτού του συστήματος συνήθως με την Μέθοδο απαλοιφής Gauss θα προκύψουν όλοι οι ελάχιστοι συντελεστές.

### 3.2.3 Αυτοπαλινδρομικά Μοντέλα (AR)

Τα Αυτοπαλινδρομικά Μοντέλα (Aggressive Models) είναι υπεύθυνα για την διαμόρφωση του προφίλ του φορτίου, δηλαδή σε ποια σημεία και σε ποιες χρονικές περιόδους εμφανίζεται η αιχμή και πόση είναι αυτή. Σύμφωνα με την αναφορά [16] η μαθηματική σχέση που περιγράφει αυτό το μοντέλο είναι η εξής:

$$\hat{L}_k = -\sum_{i=1}^m a_{i,k} L_{k-i} + w_k \quad (3.5)$$

όπου  $\hat{L}_k$  η προβλεπόμενη τιμή του φορτίου τη χρονική στιγμή  $k$ ,  $w_k$  οποιαδήποτε διαταραχή του φορτίου ενώ  $a_i$  είναι άγνωστοι συντελεστές. Σημειώνεται πως για την εύρεση των συντελεστών

γίνεται χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Αντίστοιχες εφαρμογές παρουσιάζονται στις αναφορές [17], [18].

### 3.3 Χρονοσειρές

#### 3.3.1 Εισαγωγή στις χρονοσειρές

Με τον όρο χρονοσειρές εννοούμε μια σειρά διαδοχικών παρατηρήσεων οι οποίες περιγράφουν την εξέλιξη ενός μεγέθους στο χρόνο. Οι παρατηρήσεις αυτές λαμβάνονται ανάμεσα σε ισαπέχοντα χρονικά διαστήματα. Οπότε συμβολίζουμε με  $X_i$  της  $n$  χρονικές στιγμές και με  $Y_i$  τις παρατηρήσεις που προκύπτουν και σχηματίζουν ζεύγη της μορφής  $K(X_i, Y_i)$ . Ενώνοντας όλα τα  $K_i=0,1,2,\dots,n$  σημεία σχηματίζεται η προς εξέλιξη χρονοσειρά. Επιπλέον τα είδη των χρονοσειρών με βάση των υπαρκτών εφαρμογών μπορούν να χωριστούν σε 2 μοντέλα:

- **Ντετερμινιστικά Μοντέλα:** Περιγράφουν το ακριβές μοντέλο με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστοί οι παράγοντες που επηρεάζουν το εξελισσόμενο μέγεθος.
- **Στοχαστικά Μοντέλα:** Αυτό το είδος των χρονοσειρών είναι σε θέση να συμπεριλάβουν και την επίδραση τυχαίων παραγόντων που τυχόν να συμβάλουν στην εξέλιξη του μεγέθους.

#### 3.3.2 Χαρακτηριστικά Χρονοσειρών

- **Τάση:** Η τάση αντιπροσωπεύει την γενική εξέλιξη της χρονοσειράς και ορίζεται ως η μακροπρόθεσμη μεταβολή του μέσου όρου των τιμών αυτής. Η χρονοσειρά μπορεί να πάρει διαφορετικές μορφές, δηλαδή μπορεί να αυξάνει μπορεί να διατηρείται σταθερή αλλά και να ακολουθεί και καθοδική πορεία ενώ η κυματομορφή που μπορεί να πάρει είναι εκθετική ή ευθεία. Για τον σχηματισμό τέτοιων καμπύλων είναι αναγκαίος ένας ικανός αριθμός παρατηρήσεων για να υποστηρίξει το κατάλληλο μήκος περιόδου όπου θα γίνει η αναζήτηση της τάσης.
- **Κυκλικότητα:** Αντιπροσωπεύει την «κυκλική» μεταβολή που εμφανίζεται κατά περιόδους. Η μεταβολή οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες που τείνουν να είναι οι οικονομικοί. Στις χρονοσειρές κυκλικότητα βρίσκεται σε περιόδους



ανόδου και σε περιόδους πτώσεως ανάμεσα στην χαμηλότερη και υψηλότερη τιμή.

- **Εποχιακότητα:** Η εποχιακότητα αντιπροσωπεύει μια κυμάτωση της χρονοσειράς, με σταθερό μήκος και χρονική διάρκεια μικρότερη από ένα έτος. Η κυμάτωση εντοπίζεται με εύκολο τρόπο καθώς επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο και σε ίδιες χρονικές περιόδους. Κύριος παράγοντας επίδρασης τέτοιων χρονοσειρών είναι η εποχή.
- **Τυχειότητα:** Η τυχειότητα δείχνει τις μη κανονικές διακυμάνσεις που μένουν αν διαχωρίσουμε τα πρώτα χαρακτηριστικά των χρονοσειρών. Στοιχείο σφάλματος είτε από κάποια αλλαγή σε κάποια ανεξάρτητη μεταβλητή είτε μετά από κάποια ασυνέχεια ενός συμβάντος που επηρεάζει την έξοδο.

### 3.4 Ενεργειακά Μοντέλα

Όσο αναφορά τα ενεργειακά μοντέλα πρόβλεψης ηλεκτρικού χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με κάποιους παράγοντες όπως το μεγάλο πλήθος των παραμέτρων εισόδου ιδιαίτερα αν πρόκειται για κάποια κτηριακή δομή. Στη κατηγορία αυτή βρίσκονται οι δύο βασικότεροι τύποι παραδοσιακής μοντελοποίησης η «πρόσθια» και η «αντίστροφη».

- **«πρόσθια» μοντελοποίηση:** Σ' αυτό το είδος μοντελοποίησης χρησιμοποιούνται στοιχεία όπως τα καιρικά δεδομένα, τη γεωμετρία μιας κτηριακής δομής, ο χρόνος λειτουργίας κ.τ.λ. Στη συνέχεια με κατάλληλο προσωμοιοτικό πρόγραμμα δημιουργείται το μοντέλο που κινείται προς τα εμπρός και υπολογίζει την κατανάλωση ενέργειας της κτηριακής δομής.
- **«αντίστροφη» μοντελοποίηση:** Για την «αντίστροφη» μοντελοποίηση εξάγουμε ένα σύνολο εξισώσεων που περιγράφουν την σχέση ανάμεσα στο σύνολο εισόδων (Θερμοκρασία, υγρασία κ.λ.π.) και στην έξοδο, όπου αφού αναφερόμαστε στις ενεργειακές εφαρμογές το πιο πιθανό είναι η έξοδος να είναι ενεργειακή κατανάλωση. Στη συνέχεια γίνεται χρήση στατιστικών μεθόδων για την εύρεση ή την τουλάχιστον την προσέγγιση των παραμέτρων του προβλήματος [19].

### 3.4.1 Μοντέλα Πρόβλεψης Ηλεκτρικού Φορτίου με Αισθητήρες

Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι τα δεδομένα που λαμβάνονται από την εκάστοτε κτηριακή δομή παρέχουν ένα βιώσιμο μοντέλο για το σύνολο του κτηρίου. Επίσης, τα δεδομένα που λαμβάνονται εμπεριέχουν πληροφορίες για τις καιρικές συνθήκες και τον εξοπλισμό του κτηρίου και το χρονοδιαγράμμα του. Έτσι με τη χρήση λογισμικού παράγεται στατικά το τεχνολογικό μοντέλο. Μ' αυτό το τρόπο γίνεται κατανοητό ότι το μοντέλο των αισθητήρων λειτουργεί ως εναλλακτική προσέγγιση των εναλλακτικών μοντέλων [20], [21]. Από την άλλη μεριά δεν έχει γίνει τόσο εκτενής έρευνα για την προσέγγιση της μεθόδου σε οικιακά δίκτυα, αυτό οφείλετε κυρίως στην έλλειψη αναλυτικών δεδομένων σε μηνιαία βάση.

### 3.5 Μηχανές Υποστήριξης Διανυσμάτων (SVM)

Οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης προτάθηκαν από τον Vapnik και αποτελεί σημαντική μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων ταξινόμησης και παλινδρόμησης. Εφαρμογές τέτοιας μεθόδου ανήκει στον κλάδο της μηχανικής μάθησης (Machine learning) με εργαλείο τη στατιστική θεωρία μάθησης. Αυτή η μέθοδος έρχεται σε αντίθεση με τη μέθοδο των νευρωνικών δικτύων, τα οποία προσπαθούν να καθορίσουν τις σύνθετες λειτουργίες του χώρου των παραμέτρων εισόδου σε ένα πολυδιάστατο χώρο χαρακτηριστικών, στον οποίο κατασκευάζεται ένα βέλτιστο υπερεπίπεδο. Καθώς αυτό το υπερεπίπεδο ανταποκρίνεται σε μη-γραμμική επιφάνεια στο χώρο εισόδου, οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης χρησιμοποιούν απλές συναρτήσεις για να δημιουργήσουν γραμμικά όρια απόφασης στο νέο χώρο. Επομένως το πρόβλημα της επιλογής μιας αρχιτεκτονικής για το νευρωνικό δίκτυο, αντικαθίσταται σε αυτήν την περίπτωση με την επιλογή ενός κατάλληλου τύπου μηχανή εκμάθησης για τα διανύσματα υποστήριξης [14] [22].

Τα SVMs αντικαθιστούν την αρχή της ελαχιστοποίησης του εμπειρικού ρίσκου (ERM) [14], το οποίο εφαρμόζεται παραδοσιακά στα νευρωνικά δίκτυα, με την αρχή της ελαχιστοποίησης του διαρθρωτικού ρίσκου (SRM – structural risk minimization) [23] [14]. Η πιο σημαντική ικανότητα αυτής της μεθόδου είναι η εφαρμογή της ελαχιστοποίησης ενός άνω ορίου στο σφάλμα γενίκευσης και όχι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος εκπαίδευσης. Με βάση λοιπόν αυτή την αρχή, ένα SVM είναι ισοδύναμο με την επίλυση

ενός γραμμικά περιορισμένου προβλήματος δυαδικού προγραμματισμού. Η μέθοδος SVM δίνει εξίσου εξαιρετικά αποτελέσματα σε εφαρμογές ταξινόμησης [24] [25] [26] [27]. Το πιο γνωστό μοντέλο SVR είναι η γραμμική παλινδρόμηση. Η μαθηματική συνάρτηση εκτίμησης του γραμμικού μοντέλου σε αυτό το χώρο χαρακτηριστικών δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$f(x) = \langle w, \varphi(x) \rangle + b \quad (3.6)$$

όπου  $\varphi(x)$  δηλώνει το πολυδιάστατο χώρο χαρακτηριστικών, ο οποίος έχει χαρτογραφηθεί μη γραμμικά από το χώρο εισόδου,  $w$  περιέχει τους συντελεστές που πρέπει να εκτιμηθούν από τα δεδομένα και  $b$  είναι μια πραγματική σταθερά.

Ο στόχος της μεθόδου είναι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης ρίσκου που περιγράφεται ως εξής, [28]:

$$\min_{w, b, \xi_i, \xi_i^*} \left( \frac{1}{2} \|w\|^2 \right) + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \quad (3.7)$$

Υπό τους περιορισμούς

$$\begin{cases} y_i - \langle w, \varphi(x_i) \rangle + b \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \langle w, \varphi(x_i) \rangle + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i \\ \xi_i^*, \xi_i \geq 0 \end{cases}$$

όπου  $x_i$  έχει χαρτογραφηθεί σε έναν υψηλότερο χώρο διαστάσεων μέσω της συνάρτησης  $\varphi$ ,  $\xi_i$  το μικρότερο σφάλμα εκπαίδευσης εντός της παραμέτρου  $\varepsilon$ ,  $\xi_i^*$  το ανώτερο σφάλμα εκπαίδευσης εντός της παραμέτρου  $\varepsilon$ ,  $\frac{1}{2} \|w\|^2$  ο όρος τακτοποίησης,  $C$  η σταθερά τακτοποίησης, η οποία καθορίζει την εξισορρόπηση μεταξύ της μείωσης της κλίσης για την  $\varphi$  και της ακρίβειας κατά τη λήψη των δεδομένων.

### 3.6 Ασαφής Λογική στη Πρόβλεψη Ηλεκτρικού Φορτίου

#### 3.6.1 Εισαγωγή

Μετά τη μεγάλη χρησιμότητα των κλασικών συνόλων στην πρόοδο των μαθηματικών που χρησιμοποιούνται ως εργαλεία για την πρόβλεψη του ηλεκτρικού φορτίου, παρόλα αυτά δεν καλύπτουν όλο το φάσμα των εφαρμογών καθώς τα κλασικά

σύνολα δεν μπορούν να περιγράψουν επαρκώς όλες έννοιες του αληθινού κόσμου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλο βαθμό ασάφειας και απροσδιοριστίας. Η ασάφεια είναι απόρροια των πολύπλοκων πολυμεταβλητών πραγματικών συστημάτων που μελετώνται και είναι δύσκολο να καθοριστεί η λειτουργία τους με συμβατικές μεθόδους. Οπότε η ασαφής λογική δημιουργήθηκε για την προσομοίωση του ανθρώπινου τρόπου σκέψης, όπου λειτουργεί με σύμβολα και υποθέσεις και όχι με συγκεκριμένες τιμές.

### 3.6.2 Βασικές Έννοιες

Σαν ορισμό θεωρούμε ότι ένα ασαφές σύνολο μπορεί να παρασταθεί ως μια επέκταση ενός κλασικού συνόλου. Επιπλέον θεωρούμε ότι τα σύνορα των κλασικών συνόλων είναι σαφώς καθορισμένα. Τα κλασικά σύνολα χρησιμοποιούν μια συνάρτηση που στηρίζεται σε 2 εκδοχές « βάλε 1 αν  $x$  αν ανήκει στο σύνολο  $A$  ενώ βάλε μηδέν αν  $x$  δεν ανήκει στο σύνολο  $A$ ». Αντιθέτως το ασαφές σύνολο καθορίζεται από μια μετοχική συνάρτηση  $\mu(x)$  που παίρνει τιμές από ένα διάστημα από 0 έως 1. Στην ουσία η μετοχική συνάρτηση δείχνει τον βαθμό με τον οποίο ανήκει το στοιχείο  $x$  στο σύνολο  $A$ . Ανάλογα με το είδος των κλασικών συνόλων γίνεται λόγος για τα συνεχή ή διακριτά ασαφή σύνολα. Επίσης ορίζουμε ως βασικές πράξεις των ασαφών συνόλων την τομή, την ένωση, το συμπληρωματικό ενός ασαφούς συνόλου, την έννοια του υποσυνόλου και την ισότητα [29] [30].

### 3.6.3 Ασαφείς Κανόνες

Τα ασαφή συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται εκτενώς σε εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου παράστανται με την μορφή ασαφών IF/THEN κανόνων. Οι ασαφείς κανόνες είναι υποθετικές που χαρακτηρίζονται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ασαφείς Σχέσεις: Οι ασαφείς σχέσεις είναι σύνολα τα οποία ορίζονται σε πολυδιάστατους χώρους και αποτελούν μια γενίκευση των κλασικών σαφών σχέσεων. Τέτοια ασαφή σχέση στον χώρο  $XY$  περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$R(X,Y) = \int_{xy} \mu_R(X,Y) d(X,Y) \quad (3.8)$$

- Λεκτική Μεταβλητή: Ως λεκτική μεταβλητή ορίζεται η ασαφής μεταβλητή οι οποία παίρνει σαν τιμές λέξεις. Οι λέξεις αυτές περιγράφονται από σύνολα τα

οποία ορίζονται στον τόπο που ορίζεται και η μεταβλητή. Με άλλα λόγια αποτελούν γενικεύσεις των μεταβλητών των κλασικών συνόλων [30].

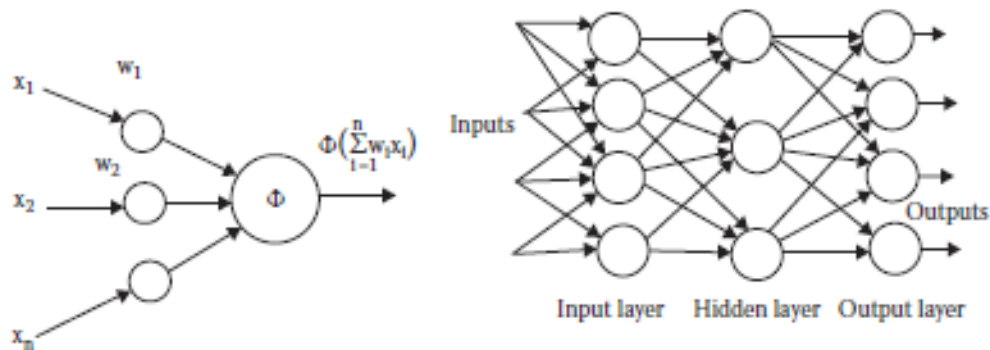
### 3.7 Νευρωνικά Δίκτυα (Neuro Networks)

Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν προσπάθειες του ανθρώπου να μιμηθεί και να καταλάβει τι συμβαίνει στο νευρωνικό σύστημα, με την ελπίδα να αξιοποιήσει μέρος από τα πελονεκτήματα αυτών των βιολογικών συστημάτων. Είναι σε θέση να επικοινωνούν στέλνοντας σήματα μεταξύ τους μέσω ενός μεγάλου αριθμού μεροληπτικών ή σταθμισμένων συνδέσεων. Κάθε νευρώνας δέχεται πληροφορίες στους κόμβους εισόδου και συγκεντρώνει δεδομένα. Η συσχετισμένη συνάρτηση μεταφοράς του, περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο το σταθμισμένο άθροισμα των εισόδων του μετατρέπεται σε μια έξοδο. Η είσοδος αυτή μπορεί να αποτελέσει είσοδο για άλλους νευρώνες.

Η εισχώρηση των νευρωνικών δικτύων στην τεχνολογία, τα οποία βασίστηκαν στη λειτουργία των βιολογικών νευρωνικών δικτύων έχουν αναπτυχθεί ραγδαία και εφαρμόζονται στα συστήματα ισχύος και ειδικότερα σε εφαρμογές της προστασίας. Συγκεκριμένες εφαρμογές είναι η διαφορική προστασία 3-φ μετασχηματιστή, σφάλματα στα τυλίγματα γεννητριών και στους ηλεκτρονόμους αποστάσεως [11].

Τα νευρωνικά δίκτυα σχεδιάστηκαν για να αναγνωρίζουν εκδοχές λειτουργίας συστημάτων. Συστήματα νευρωνικών δικτύων έχουν την δυνατότητα να “εκπαιδεύονται” σύμφωνα με πληροφορίες που λαμβάνουν από προηγούμενες καταστάσεις, έτσι ώστε να αναγνωρίζουν σφάλματα και άλλες επιδράσεις στο σύστημα προστασίας.

Η βασική αρχή που τα διέπει φαίνεται στο σχήμα 3.1, όπου η διαδικασία την επεξεργασίας χωρίζεται σε διαφορετικές στρώσεις του νευρωνικού δικτύου μ’ αυτό τον τρόπο δημιουργούνται πολλά μικρότερα δίκτυα. Κάθε μικρότερο δίκτυο είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση μια λειτουργίας της προστασίας. Ως είσοδοι μπορούν να δοθούν οι τάσεις και τα ρεύματα του ΣΗΕ [11]. Η λειτουργία του νευρωνικού δικτύου βασίζεται σε μια συνάρτηση  $\Phi$ , η οποία συμβολίζει μια συνάρτηση κορεσμού. Τα βάρη  $w_i$  καθορίζονται βάση των πληροφοριών και της “εκπαίδευσης” του νευρωνικού δικτύου από προηγούμενες καταστάσεις. Η διαδικασία της “εκπαίδευσης” είναι η πιο δύσκολη, αφού για να είναι αποδοτικό ένα νευρωνικό δίκτυο είναι αναγκαίο να ληφθούν όσο το δυνατό περισσότερες περιπτώσεις γίνεται.



Σχήμα 3.1 Ο νευρώνας και το νευρωνικό δίκτυο [3]

Ένα σενάριο τιμολόγησης είναι αυτό που προτείνεται στην αναφορά [32] σε πραγματικό χρόνο όπου οι τιμές ενέργειας θα μπορούν να αλλάζουν σε ωριαία βάση και ο καταναλωτής θα έχει τη δυνατότητα να αντιδράσει στις τιμές μέσω της μετατόπισης της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας του από τις ακριβές ώρες σε άλλες, όταν κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί. Το σχεδιάγραμμα φορτίου αυτού του σεναρίου θα είχε διαφορετικές χαρακτηριστικές σε σχέση με αυτή της ρύθμισης της εποχής με καθορισμένες τιμές. Συνεπώς τα βραχυπρόθεσμα πρότυπα πρόβλεψης φορτίου που προσαρμόζονται στα ιστορικά δεδομένα της ρυθμιζόμενης εποχής με καθορισμένες τιμές. Η πρόβλεψη του πρώτου σταδίου είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στις βιομηχανικές προβλέψεις και είναι γνωστή ως ANNSTLF. Για το σύστημα fuzzy logic του δεύτερου σταδίου, αναπτύσσεται μια προσέγγιση βασισμένη σε ένα γενετικό αλγόριθμο για να βελτιστοποιήσει αυτόματα τον αριθμό παραμέτρων των ασαφών λειτουργιών. Ένα άλλο σύστημα ασαφούς λογικής αναπτύσσεται για να προσομοιώσει τα δεδομένα φορτίου από PS από τα ιστορικά δεδομένα PIS μια εγκατάστασης. Αυτή η νέα πρόβλεψη ονομάζεται NFSTLF εξετάζεται σε τρεις βάσεις δεδομένων και αποδεικνύεται ότι παράγει ανώτερες προβλέψεις στο PIS ANNSTLF.

### 3.8 Τα εμπειρικά Συστήματα που Βασίζονται στη Γνώση

Τα εμπειρικά αυτά συστήματα ( knowledge-based Expert Systems) είναι τεχνικές που έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα της προόδου στον τομέα τεχνητής νοημοσύνης. Το έμπειρο σύστημα αναφέρεται σε ένα υπολογιστικό σύστημα το οποίο έχει την ικανότητα

να εξηγεί, να αιτιολογεί και να διευρύνει την γνωστική του βάση όσο αυξάνονται οι διαθέσιμες πληροφορίες που κατέχει. Ένα εξειδικευμένο σύστημα ενσωματώνει κανόνες και διαδικασίες που χρησιμοποιούνται από εμπειρογνώμονες στο συγκεκριμένο τομέα για τη δημιουργία κατάλληλου λογισμικού το οποίο είναι ικανό να παράγει προβλέψεις αυτόματα, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Για τη δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου, εξάγεται γνώση από εμπειρογνώμονες στον τομέα της πρόβλεψης ηλεκτρικού φορτίου, από τη συνιστώσα βασικών γνώσεων του ειδικού συστήματος. Με τη σειρά της η γνώση αυτή αναπαρίσταται ως γεγονότα και κανόνες της λογικής «Εάν-Τότε» (If-Then rules) και αποτελείται από το πλήθος των σχέσεων που περιγράφουν τις αλλαγές στο φορτίο αλλά και τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικοί από τους κανόνες που προκύπτουν δεν αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, ενώ άλλοι απαιτούν διαρκή ενημέρωση.

Οι πρώτες εφαρμογές των εξειδικευμένων συστημάτων εντοπίζονται το 1960 και αφορούν σε γεωλογικές αναζητήσεις και σχεδιασμό με τη χρήση ηλεκτρικών υπολογιστών. Απαραίτητη προϋπόθεση για την καλύτερη απόδοση αυτών των συστημάτων είναι η συνεργασία ανάμεσα σε ειδικούς στον τομέα της πρόβλεψης φορτίου και σε προγραμματιστές λογισμικού. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να υλοποιηθεί ένα λογισμικό που ενσωματώνει τις γνώσεις των ειδικών και τις κωδικοποιεί σε κανόνες. Η διεύρυνση των συντακτικών σχέσεων μεταξύ του ηλεκτρικού φορτίου και συνιστωσών όπως η θερμοκρασία, οι καιρικές συνθήκες, το είδος της ημέρας κ.α. οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων προσεγγίσεων. Οι Ho et al. (1990) ανέπτυξαν ένα εξειδικευμένο σύστημα βασισμένο στη γνώση, όπου με τη χρήση ωριαίων παρατηρήσεων για κατανάλωση φορτίου καθορίστηκαν έντεκα διαφορετικού τύπου ημερών[114]. Ο αλγόριθμος αυτός που περιλάμβανε και παραμέτρους για τον καιρό αποδείχτηκε πιο αποτελεσματικός από τη συμβατική μέθοδο των Box-Jenkins. Σε μία προσέγγιση οι Brown κ.α. (1999) συνδύασαν την υπάρχουσα γνώση του συστήματος διαφορετικών σεναρίων εξέλιξης της κατανάλωσης. Επιπλέον υπάρχουν και υβριδικές μέθοδοι οι οποίες συνδυάζουν τα έμπειρα συστήματα με άλλα μοντέλα πρόβλεψης, όπως στο [115] με τη χρήση μεθόδου ασαφούς λογικής. Εναλλακτικές προσεγγίσεις των εξειδικευμένων συστημάτων παρουσιάζονται στα ([116],[117])

### 3.9 Παλινδρόμηση K Κοντινότερων Γειτόνων (KNN Regression)

Η μέθοδος παλινδρόμησης των K κοντινότερων γειτόνων (K Nearest Neighbor Regression) είναι μια μη παραμετρική μέθοδος πρόβλεψης, η οποία έχει μη παραμετρικό, μικρό ποσοστό σφάλματος και καλή κατανομή σφάλματος [118]. Η αρχή πίσω από αυτήν τη μέθοδο, είναι η εύρεση ενός προκαθορισμένου αριθμού δειγμάτων εκπαίδευσης, σε πολύ κοντινή απόσταση από το νέο σημείο και ο προσδιορισμός της κατηγορίας αυτών. Ως πρόβλεψη του σημείου λαμβάνεται το αποτέλεσμα μίας διαδικασίας μέσου όρου, όπου τιμή του προκύπτει από τη μέση τιμή K κοντινότερων σημείων (γειτόνων). Ο αριθμός των δειγμάτων μπορεί να είναι σταθερά καθορισμένος από το χρήστη ή να διαφέρει ανάλογα με την τοπική πυκνότητα των σημείων.

Πιο αναλυτικά για ένα δοσμένο σημείο υπολογίζεται η Ευκλείδεια απόσταση του από τα υπόλοιπα σημεία εκπαίδευσης. Στη συνέχεια επιλέγονται τα πλησιέστερα δεδομένα κατάρτισης K και λαμβάνεται ως πρόβλεψη για το σημείο, ο μέσος όρος των εξόδων για αυτά τα δεδομένα [119]. Στην πράξη η διαδικασία αυτή μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη βαρών στα K κοντινότερα δεδομένα κατάρτισης, όπου τα βάρη είναι ανάλογα της απόστασης από το ζητούμενο σημείο. Εάν υποθέσουμε το ζητούμενο σημείο. Εάν υποθέσουμε το ζητούμενο σημείο  $x$ , η μαθηματική περιγραφή του μοντέλου δίνεται από τη ακόλουθη σχέση:

$$\hat{Y} = \frac{1}{K} \sum_{m \in J(x)} Y_m$$

Όπου

$J(x)$ : το σύνολο των K κοντινότερο γειτόνων του σημείου  $x$

$Y_m$ : η έξοδος για κάθε σημείο κατάρτισης  $x_m$

Όπως αντιλαμβανόμαστε από την παραπάνω σχέση, το K αποτελεί παράμετρο κλειδί για τη μέθοδο. Έτσι μια μεγάλη τιμή του K μπορεί να οδηγήσει σε πιο ομαλή προσαρμογή και ως εκ τούτου μικρότερη διακύμανση σε βάρος όμως της υψηλότερης προκατάληψης για τα δεδομένα. Παρά την απλότητα της μεθόδου K κοντινότερων γειτόνων, βρίσκει συχνά εφαρμογή σε προβλήματα ταξινόμησης και παλινδρόμησης. Ιδιαίτερα σε



περιπτώσεις ταξινόμησης όπου τα όρια απόφασης είναι ακανόνιστα, η μη παραμετρική αυτή μέθοδος παρουσιάζει σημαντική επιτυχία.

### 3.10 Δένδρα Ταξινόμησης και Παλινδρόμησης (CART)

Η μέθοδος αυτή (classification and Regression Trees) είναι ένα πρότυπο ταξινόμησης ή παλινδρόμησης το οποίο βασίζεται σε μία ιεραρχική κατάτμηση με μορφή δέντρου το χώρο εισόδου [120]. Το δέντρο απόφασης διευκρινίζει τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου σύμφωνα με τις συνθήκες διάσπασης και επιτρέπει την απεικόνιση του υπό μελέτη προβλήματος με τη μορφή δυαδικού δέντρου. Αυτό σημαίνει ότι το δέντρο απόφασης εντοπίζει κανόνες ενσωματωμένους σε δεδομένα εισόδου και εξόδου.

Τα δέντρα παλινδρόμησης χρησιμοποιούνται για συνεχή μεταβλητή εξόδου. Η διαδικασία περιλαμβάνει αρχικά τη διαίρεση του χώρου εισόδου σε τοπικές περιφέρειες, όπως αυτές προσδιορίζονται από μία σειρά αναδρομικών διασπάσεων. Κάθε δέντρο αποτελείται από εσωτερικούς κόμβους απόφασης και τερματικά φύλλα. Ο κόμβος ρίζας (root node) ορίζει την έναρξη του δέντρου παλινδρόμησης. Ο κόμβος διάσπασης (split node) βοηθά τον διαχωρισμό των μεταβλητών εισόδου σε δύο ομάδες σύμφωνα με κάποιον κανόνα και ο τερματικός κόμβος (terminal node) υποδεικνύει τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης τους σε παρόμοιες ομάδες. Έτσι για ένα δοσμένο σημείο ξεκινά μία ακολουθία δοκιμών κατά μήκος των κόμβων απόφασης από τον κόμβο ρίζας, η οποία θα καθορίσει την πορεία μέσα στο δέντρο, μέχρι να φτάσει σε ένα κόμβο φύλλου. Σε αυτό το σημείο επιχειρείται η παραγωγή πρόβλεψης σύμφωνα με το σχετικό μοντέλο για αυτόν τον κόμβο.

Η κατασκευή ενός τέτοιου δένδρου στηρίζεται σε ένα σύνολο δεδομένων κατάρτισης και ξεκινά από τον κόμβο ρίζας. Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή της μεταβλητής, η διάσπαση της οποίας θα οδηγήσει στη μεγαλύτερη μείωση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος. Το σφάλμα ενός κόμβου είναι ο λόγος διακύμανσης όλων των δεδομένων εκμάθησης με τα δεδομένα αυτά που ανήκουν στον κόμβο [121]. Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει το σφάλμα είναι η ακόλουθη :

$$R(n) = \frac{V(n)}{V_0}$$

$R(n)$  : το σφάλμα του κόμβου  $n$

$V(n)$ : η διακύμανση των δεδομένων εκπαίδευσης που ανήκουν στον κόμβο  $n$

$V0$ : η διακύμανση όλων των δεδομένων εκπαίδευσης

Οι καλύτερες συνθήκες διάσπασης είναι εκείνες που μεγιστοποιούν τη μείωση σφάλματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αναδρομικά έως ότου το σφάλμα φθάσει ένα αποδεκτό όριο. Μία τυπική πρακτική είναι η εκτέλεση ενός είδους «κλαδέματος» του δέντρου μετά τη σχεδίαση του. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η απομάκρυνση των αναποτελεσματικών κόμβων και η μείωση της πολυπλοκότητας του μοντέλου.

### 3.11 Αυτοπαλινδρομικά Μοντέλα Κ.Μ.Ο με Εξωγενή Μεταβλητή

Ο προσδιορισμός ενός τέτοιου αυτοπαλινδρομικού μοντέλου ( Autoagressive Moving Average with Exogenous variable) για την πρόβλεψη της ενεργειακής ζήτησης μπορεί να επιτευχθεί με δύο βασικές προσεγγίσεις. Είτε με τη βοήθεια ενός γενετικού αλγορίθμου (GA -Genetic Algorithm) είτε μέσω προσέγγισης εξελικτικού προγραμματισμού (EP- Evolutionary Programming). Η πρώτη τεχνική προσομοιώνει τη φυσική διαδικασία εξέλιξης και αποτελεί ένα στοχαστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Με τη βοήθεια του γενετικού αλγόριθμου (GA) είναι δυνατή η ταυτόχρονη αξιολόγηση πολλών σημείων στο χώρο αναζήτησης, ανεξάρτητα από το αν ο χώρος είναι διαφορίσιμος ή όχι, και η εύρεση ασυμπτώτων που συγκλίνουν στη βέλτιστη λύση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση ακριβείας για το μοντέλο πρόβλεψης.

Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο που στηρίζεται σε γενετικούς αλγόριθμους ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία: Οι τιμές των εξεταζόμενων μεταβλητών στο γενετικό αλγόριθμο παριστάνονται ως ένα  $D$  - διάστατο διάνυσμα  $P$ . Ο αρχικός πληθυσμός των  $k$  μητρικών διανυσμάτων  $R_j, i= 1, \dots, k$ , παράγεται από ένα τυχαίο εύρος σε κάθε διάσταση. Έπειτα κάθε μητρικό διάνυσμα δημιουργεί έναν "απόγονο" συγχωνεύοντας ή τροποποιώντας τα διανύσματα του υπάρχοντος πληθυσμού. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται  $2k$  νέα διανύσματα σε πληθυσμό. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η συνάρτηση  $f$  να μην επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση είτε να έχει επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός γενεών. Η μαθηματική περιγραφή ενός μοντέλου ARMAX σύμφωνα με το [122] προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t)$$

Όπου,

$y(t)$ : το φορτίο για τη χρονική στιγμή  $t$

$u(t)$ : η θερμοκρασία για τη χρονική στιγμή  $t$

$e(t)$ : ο λευκός θόρυβος για τη χρονική στιγμή  $t$

$A(q)$ : η παράμετρος του αυτοπαλινδρομικού μέρους (AR)

$B(q)$ : η παράμετρος του εξωγενούς μέρους (X)

$C(q)$ : η παράμετρος του κινητού μέσου (MA)

Οι λύσεις της παραπάνω σχέσης με τη μέγιστη καταλληλότητα επιλέγονται ως δοκιμαστικά μοντέλα για την πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου. Περαιτέρω εφαρμογές του μοντέλου ARMAX και των γενετικών αλγοριθμών περιγράφονται στα [123][124][125].

### 3.12 Γκαουσιανή Μέθοδος (GP)

Η διαδικασία Γκαουσιανής Παλινδρόμησης (Gaussian Process) αποτελεί μη παραμετρική μέθοδο η οποία στηρίζεται στη μοντελοποίηση των παρατηρούμενων αποκρίσεων για τα διαφορετικά δεδομένα κατάρτισης ως μια πολυδιάστατη τυχαία μεταβλητή [126]. Υποθέτουμε μια a priori κατανομή για αυτές τις τιμές λειτουργίας, με στόχο την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα όσο μικρότερη είναι η Ευκλείδεια απόσταση των διαμυσμάτων εισόδου, η συσχέτιση καθώς τα διανύσματα απομακρύνονται.

Θεωρούμε ως  $V(X,X)$  τη μήτρα συνδιακυμανσης μεταξύ των τιμών λειτουργίας, όπου με  $X$  περιγράφονται τα διανύσματα εισόδου από τα δεδομένα εκπαίδευσης. Αν θεωρήσουμε ως  $X_i$  το  $i$ -οστό διάνυσμα κατάρτισης, τότε η μαθηματική περιγραφή ενός τυπικού πίνακα διακύμανσης εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V(x_i, x_j) = \sigma_f^2 e^{-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\gamma^2}}$$

Το αρχικό διάνυσμα τιμών της συνάρτησης  $f$  ακολουθεί την πολυμεταβλητή Γκαουσιανή πυκνότητα, δηλαδή:

$$f \sim N_f(0, V(X, X))$$

Όπου

$Nf(\mu, \Sigma)$ : η πολυμεταβλητή συνάρτηση πυκνότητας μιας μεταβλητής  $f$  με μέση τιμή  $\mu$  και μήτρα συνδιακύμανσης  $\Sigma$ .

Στη συνέχεια προστίθενται στις τιμές λειτουργίας ορισμένες τιμές θορύβου με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση  $\sigma_n$ , για να παραχθούν οι ζητούμενες αποκρίσεις.

Έτσι η πρόβλεψη  $\hat{f}_*$  για ένα δοσμένο διάνυσμα εισόδου προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\hat{f}_* = E(f_* | X, y, x_*) = V(x, X) [V(X, X) + \sigma_n^2 I]^{-1} y$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4. Παραδείγματα πρόβλεψης Ηλεκτρικού Φορτίου που Αφορούν Ηλεκτρικά Οχήματα.

#### 4.1 Εισαγωγή

Αυξανόμενες ανησυχίες για τις εκπομπές CO<sub>2</sub>, σε συνδυασμό με τις εξελίξεις που κάνουν τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας πιο αποτελεσματικές και βιώσιμες, προκαλούν μια αργή αλλά σταθερή ανάπτυξη στον αριθμό κυκλοφορούντων ηλεκτρικών οχημάτων (EV) που αναμένεται να συνεχιστεί και στα επόμενα χρόνια. Τα EV προσφέρουν περισσότερη ποικιλία σε πρωτογενείς πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα συστήματα μεταφορών, και κατά συνέπεια πιθανά οικονομικά οφέλη. Από την άλλη πλευρά αναμένεται επίσης να φέρουν νέες τεχνικές προκλήσεις και αξιοσημείωτους κινδύνους στα δίκτυα διανομής. Ειδικότερα η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων με βύσμα (plug-in EVs) ξεκινούν με πλήρη ισχύ μόλις παρκάρουν, εκτός αν εισαχθούν τα χαρακτηριστικά συντονισμού. Αυτό θα οδηγήσει σε αλλαγή των αναμενόμενων προφίλ ηλεκτρικής ζήτησης, με την πιθανή εμφάνιση πρωτοφανών κορυφώσεων της ζήτησης σε περιόδους όπου η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές είναι παραδοσιακά χαμηλή. Το Εθνικό (Oak Ridge) εργαστήριο ανέλυσε τη επέμβαση των ηλεκτρικών οχημάτων στο περιφερειακό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας διεξοδικά και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι όλες οι περιφέρειες θα χρειαστούν επιπλέον παραγωγή ενέργειας για να εξυπηρετήσουν την επιπλέον ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων. Στο ίδιο πλαίσιο, η πρόβλεψη φόρτωσης (LF) θα έχει βασικό ρόλο στην παραγωγή αξιόπιστων και έξυπνων ενεργειακά δικτύων σήμερα και μελλοντικά. Για τον λόγο αυτό η αξιοποίηση της ενεργειακής ζήτησης σε συνδυασμό με τις τεχνικές πρόβλεψης της ενεργειακής παραγωγής, μαζί με στρατηγικές διαχείρισης της φόρτισης για την διευκόλυνση των δικτύων διανομής εξελίσσεται σε ένα πολύ φλέγον ζήτημα. Για παράδειγμα, σε μία στρατηγική διαχείρισης της φόρτισης, βασισμένη στην οργάνωση του σχεδίου της επόμενης μέρας και σε ένα δυναμικό σύστημα διανομής, θα πρέπει να αποφευχθεί η συμφόρηση στο τοπικό σύστημα διανομής. Τα εργαλεία LF επιτρέπουν σε συσκευές ή πελάτες τη βελτίωση των λειτουργικών τους αποφάσεων βάσει της πρόβλεψης του φορτίου για τις επόμενες ώρες ή μέρες, ενισχύοντας έτσι την ικανότητα του μηχανισμού να αλλάζει αξιόπιστα τη χρήση ενέργειας και την αποφυγή αιχμής φορτίου. Σε συγκεκριμένες εφαρμογές, οι τεχνικές βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου

(STLF) είναι πολύ βολικές, μιας και βασίζονται σε στατιστικές διαδικασίες που χρησιμοποιούν παρελθοντικό φορτίο και εξωγενείς μεταβλητές όπως αυτές που σχετίζονται με τον καιρό, για τη πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης από μία ώρα έως και μία μέρα. Κλασσικές τεχνικές όπως οι μέθοδοι παλινδρόμησης, νευρωνικά δίκτυα (NN), Δίκτυο λειτουργιών ακτινικής βάσης (RBFN), έχουν αναπτυχθεί για STLF.

Ωστόσο, είναι δύσκολο να βρεθεί μία μέθοδος που μπορεί να ταιριάζει σε όλες τις περιπτώσεις πρόβλεψης από τότε, που γεωγραφικοί, κλιματικοί παράγοντες και άλλες καταστάσεις συχνά πολύ διαφορετικές σε διαφορετικές περιόδους και σε διαφορετικό βαθμό επηρεάζουν τους παράγοντες πρόβλεψης. Επομένως είναι πολύ δύσκολο να κατανοηθούν αυτοί οι παράγοντες συνολικά και με ακρίβεια. Οι περισσότερες των παραδοσιακών προσεγγίσεων βασίζονται στη γραμμική ανάλυση αλλά τα φορτία φόρτισης EV είναι πολύπλοκα και συνήθως έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης, είναι απαραίτητο να εξακριβωθούν τα δυναμικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών φορτίων. Τέτοιες μέθοδοι βασίζονται στην μέθοδο Singular Value Decomposition (SVD) και Singular Spectrum Analysis (SSA). Το SSA βασίζεται στην ανάπτυξη και εφαρμογή του θεωρήματος Karhunen-Loeve, το οποίο εφαρμόστηκε αρχικά στην επεξεργασία ψηφιακού σήματος και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη βιομηχανικής παραγωγής, την πρόβλεψη της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας, την πρόβλεψη φορτίου, και ούτω καθεξής.

Η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου και η αύξηση της τιμής του πετρελαίου οδήγησαν στην υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η εισαγωγή του ηλεκτρικού οχήματος με βύσμα (PEV) που χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ως πηγή ενέργειας έχει την δυνατότητα ηλεκτροδότησης στον τομέα των μεταφορών οδηγώντας έτσι στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Εκτός από τις περιβαλλοντικές ανησυχίες, η ενέργεια που απαιτείται για τη φόρτιση των PEV είναι φθηνότερη σε σύγκριση με τα καύσιμα με βάση τη βενζίνη. Τα PEV έχουν επίσης καλύτερη απόδοση με ομαλή επιτάχυνση και λιγότερο θόρυβο. Αν και τα PEV έχουν πολλά οφέλη, η ευρεία μετάδοσή τους είναι δύσκολη, δεδομένου ότι είναι αναγκαία η εγκατάσταση και εγκαθίδρυση εκτεταμένων υποδομών φόρτισης για την πραγματοποίησή της χρήσης τους. Με την αναμενόμενη ανάπτυξη των PEV ως δημοφιλής επιλογή μεταφοράς, η σύμπλεξη τους με το έξυπνο δίκτυο και την Παροχή Εξοπλισμού Ηλεκτρικών Οχημάτων (EVSE) είναι υψίστης

σημασίας. Η διείσδυση των PEV σε μεγάλη κλίμακα θα αυξήσει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ασκώντας πίεση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπλέον, η εκτεταμένη ενέργεια που απαιτείται για την φόρτιση των PEV, η απρόβλεπτη φύση του φορτίου των PEV και η διαφορετική απαίτηση φόρτισης αναδιαμορφώνουν την καμπύλη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του καταναλωτή. Ως εκ τούτου, η φόρτιση των PEV πρέπει να συγχρονιστεί έτσι ώστε να μην επηρεάζει το προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.

## **4.2 Υβριδικό Μοντέλο Πρόβλεψης.**

### **4.2.1 Εισαγωγή στο Δίκτυο Λειτουργιών Ακτινικής Βάσης**

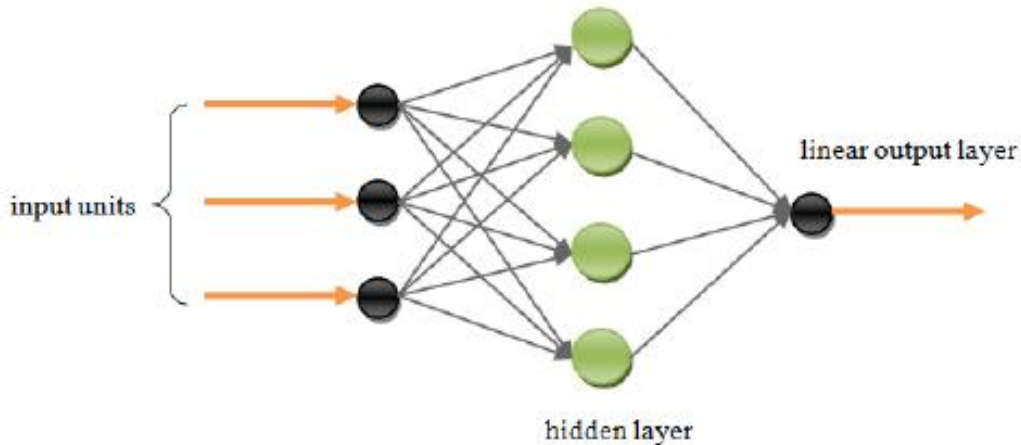
Το RBFN είναι ένα multi-inputs, μονής εξόδου δίκτυο, το οποίο περιέχει ένα επίπεδο εισόδου, ένα κρυμμένο επίπεδο και ένα γραμμικό επίπεδο εξόδου. Είναι ένα απλό NN, αλλά η χρήση του επεκταμένης μάθησης και της υψηλής ταχύτητας των υπολογιστών, το καθιστά μία πολλά υποσχόμενη τεχνική για το LF σήμερα. Τα βάρη του κρυφού στρώματος, που αποτελούνται από μονάδες με τη Γκαουσσιανή συνάρτηση μεταφοράς υπολογίζονται μέσω τεχνικών ομαδοποίησης και στη συνέχεια αναλύονται με τις μονάδες εισόδου, με βάση την Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ τους στο χώρο εισόδου, ενώ τα βάρη των εξόδων συνδιάζονται γραμμικά.

### **4.2.2 Εισαγωγή στη Μέθοδο Singular Spectrum Analysis**

Η μέθοδος SSA προορίζεται για την αποσύνθεση των αρχικών χρονοσειρών σε έναν αριθμό συστατικών που είναι ανεξάρτητα, ερμηνεύσιμα και με αργά μεταβαλλόμενη τάση και δομή λιγότερου θόρυβου και για την χρήση ορισμένων από αυτά τα στοιχεία με σκοπό την πρόβλεψη. Η SSA δεν απαιτεί στατιστικές παραδοχές κατά την εκτέλεση της ανάλυσης.

Η διαφορά μεταξύ της SSA και των παραδοσιακών μεθόδων είναι ότι η SSA θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε κλασικά προβλήματα ανάλυσης χρονοσειρών άλλα και σε καταστάσεις όπως η διερευνητική ανάλυση για την εξόρυξη δεδομένων και εκτίμηση παραμέτρων στην επεξεργασία σήματος. Τα πλεονέκτημα της SSA είναι δύο. Πρώτον, η SSA είναι μία χωρίς μοντέλο προσέγγιση της πρόβλεψης που δεν απαιτεί τον συντονισμό παραμέτρων, διαδικασία εκπαίδευσης ή σύνολο δεδομένων επικύρωσης. Επομένως,

μπορούν να αποφευχθούν τα προβλήματα που προκαλούνται από τη χρήση άλλων μεθόδων πρόβλεψης όπως η ανατροφοδότηση για την εκπαίδευση συστημάτων νευρωνικών δικτύων, όπως τοπικά ελάχιστα και η επικάλυψη. Δεύτερον, η υιοθέτηση του SSA δεν απαιτεί την υπόθεση μοντέλου, δηλαδή δεν χρειάζεται να γνωρίζουμε πόσες είναι οι περιοδικότητες και οι τιμές εκ των προτέρων.



Σχήμα 4.1 Δομή δικτύου λειτουργίας ακτινικής βάσης

Μια μη συντονισμένη φόρτιση των PEV μπορεί να προκαλέσει ξαφνική αλλαγή φορτίου καθώς πολλά PEV ενδέχεται να είναι συνδεδεμένα για φόρτιση σε μικρό χρονικό διάστημα. Μια ξαφνική αλλαγή φορτίου οδηγεί σε μία διακύμανση τάσης που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση των συσκευών, οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο ίδιο σύστημα μετάδοσης. Μία απότομη αλλαγή φορτίου οδηγεί επίσης στην πρόωρη εξουθένωση των κυκλωμάτων ηλεκτρικών ισχύος, όπως οι μετασχηματιστές. Επιπλέον, προκαλεί απώλεια της ισχύος και αρμονικές παραμορφώσεις. Εκτός από μια απροσδόκητη αλλαγή του φορτίου, και μια μη συντονισμένη φόρτιση των PEV προκαλεί αλλαγή στο ηλεκτρικό φορτίο σε διαφορετικό χρονικά διαστήματα σε μια μέρα, με αποτέλεσμα η κορύφωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας να διαφέρει σε σημαντικό βαθμό από το μέση ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η διακύμανση φορτίου μειώνει το τιμή του συντελεστή φορτίου, που είναι ο λόγος της μέσης ισχύος ζήτηση για μέγιστη ζήτηση ενέργειας.

Αντίθετα, οι καταναλωτές, με υψηλό συντελεστή φορτίου που έχουν μικρότερη διαφορά μεταξύ της μέγιστης ζήτησης και της μέσης ζήτησης φορτίζονται λιγότερο σε σύγκριση με καταναλωτές με συντελεστή χαμηλού φορτίου. Επιπλέον, η παραγωγή και η



διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται από βραχυπρόθεσμη ζήτηση ενέργειας. Ένα προφίλ ηλεκτρικού φορτίου με λιγότερες παραλλαγές διευκολύνει το πρόβλημα της πρόβλεψης φορτίου έτσι ώστε η τελευταία να είναι καλύτερη συμβάλλοντας στη καλύτερη διαχείριση της παροχής ισχύος. Δεδομένου ότι η μείωση της διακύμανσης φορτίου είναι βασική πτυχή της συντονισμένης φόρτισης των PEV, διερευνούμε τη επιτευξιμότητα και τον μηχανισμό του κεντρικού συγκεντρωτή για τον προγραμματισμό της φόρτισης των PEV. Το προτεινόμενο μοντέλο αθροιστών αποφασίζει για την φόρτιση των PEV ,αντί των PEV, με στόχο την μείωση της διακύμανσης της ισχύος και τη βελτίωση του συντελεστή φορτίου. Η κύρια συμβολή αυτής της δουλειάς είναι η εξής:

- Απεικονίζεται η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ενός διαχειριστή για τη φόρτιση των PEV σε μία θέση στάθμευσης. Το προτεινόμενο μοντέλο αυτοματοποιεί τη διαδικασία φόρτισης έτσι ώστε να προσαρμόζεται σε κάθε ατομική απαίτηση φόρτισης των PEV, μειώνει την διακύμανση του ηλεκτρικού φορτίου κατά διαφορετικά διαστήματα μες την μέρα και βελτιώνει την αξία του συντελεστή φορτίου.
- Ο αρχικός αλγόριθμος ορθογωνίας τοποθέτησης αναθέτει τον πιθανό χρόνο και επίπεδο φόρτισης των PEV δίνοντας προτεραιότητα στην ώρα άφιξης τους στο χώρο στάθμευσης.
- Περιγράφεται ένας αλγόριθμος επιλογής του επιπέδου τάσης που αποφασίζει τον ρυθμό φόρτισης με τον οποίο θα πρέπει να φορτίζονται διαφορετικά PEV.
- Προτείνεται ένας αλγόριθμος μετατόπισης ορθογωνίου που θα μετατοπίζει την θέση των ορθογωνίων, με σκοπό την εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο αλγόριθμος επιλογής επιπέδου τάσης και ο αλγόριθμος μετατόπισης ορθογωνίου επαναλαμβάνονται πολλές φορές για τη δημιουργία ενός καλύτερου προφίλ ηλεκτρικού φορτίου, ύστερα από την αρχική τοποθέτηση ορθογωνίου.

### 4.2.3 Μοντέλο Συστήματος

Το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει το προτεινόμενο μοντέλο συστήματος. Το μοντέλο αποτελείται από ηλεκτρικά οχήματα με βύσμα (PEVs), εξοπλισμό ηλεκτρικών οχημάτων (EVSEs) και από έναν διαχειριστή. Ο EVSE χρησιμοποιείται για τη παροχή ηλεκτρικού

ρεύματος στη φόρτιση των PEV. Ο διαχειριστής είναι ένας κεντρικός ελεγκτής που συλλέγει δεδομένα από τα ηλεκτρικά οχήματα (PEVs) και των EVSEs, και προγραμματίζουν την φόρτιση των PEV ανάλογα με την ώρα άφιξης τους, την ώρα αναχώρησης τους και τις απαιτήσεις της φόρτισης τους. Σε μεγάλους χώρους στάθμευσης υπάρχει πρόβλημα στην οργάνωση της φόρτισης λόγω του μεγάλου ηλεκτρικού φορτίου που δημιουργείται από την φόρτιση των PEV. Για παράδειγμα, σε μία πανεπιστημιούπολη ή μία εταιρία ο μεγάλος αριθμός των οχημάτων που συμπληρώνονται σε 100 εργάσιμες ώρες δημιουργούν σημαντικό ηλεκτρικό φορτίο. Εξετάζεται τώρα ο προγραμματισμός της φόρτισης των PEV σε ένα σενάριο στο οποίο οι ώρες άφιξης και αναχώρησης θα είναι γνωστές εκ των προτέρων. Παραδείγματος χάριν, σε εταιρίες και γραφεία οι ώρες αναχώρησης και άφιξης των οχημάτων εξαρτώνται κυρίως από τις εργάσιμες ώρες. Ομοίως, σε μία πανεπιστημιούπολη οι ώρες άφιξης και αναχώρησης εξαρτώνται από το πρόγραμμα των μαθημάτων.

Έστω το φουτουριστικό σενάριο, στο οποίο κάθε χώρος στάθμευσης έχει υποδοχές και διαθέτει EVSE για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο EVSE εξοπλισμός αποτελείται από έναν σύνδεσμο που μπορεί να συνδεθεί με ένα ηλεκτρικό όχημα PEV μέσω μίας εισόδου για φόρτιση. Το προτεινόμενο μοντέλο EVSE θεωρητικά παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα των 120 Volt (AC) 1 ή 2, 220 Volt( AC) 3 για φόρτιση. Τα διαφορετικά επίπεδα τάσης φορτίζουν τα PEV με διαφορετικό ρυθμό. Μία φόρτιση σε υψηλό επίπεδο τάσης, αν και φορτίζει τα PEV σε λιγότερο χρόνο αντλεί επίσης περισσότερη ισχύ από τον EVSE. Η διαθεσιμότητα διαφορετικών επιπέδων τάσης στη φόρτιση αξιοποιείται για να ισορροπήσει το προφίλ ηλεκτρικού φορτίου, ρυθμίζοντας την φόρτιση σε υψηλότερα επίπεδα τάσης όταν φορτίζονται λιγότερα οχήματα και την φόρτιση σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης όταν τα οχήματα είναι περισσότερα. Η έρευνα των Συνδυαστικών Συστημάτων Φόρτισης (Combined Charging Systems) επέτρεψε τη χρησιμοποίηση του ίδιου συνδέσμου για φόρτιση (AC) επιπέδου 1 ή επιπέδου 2. Αυτό διευκολύνει την διαδικασία φόρτισης όταν διαφορετικά επίπεδα τάσης παρέχονται από τον ίδιο EVSE, μιας και η υποδοχή δεν χρειάζεται να αντικατασταθεί με βάση την τάση που παρέχεται. Ο χρήστης θα πρέπει απλά να συνδέσει το CCS σύνδεσμο στην υποδοχή του PEV και έτσι η διαδικασία της φόρτισης και η προσαρμογή του επιπέδου τάσης μπορούν να αυτοματοποιηθούν. Για την παρακολούθηση της κατάστασης της φόρτισης του

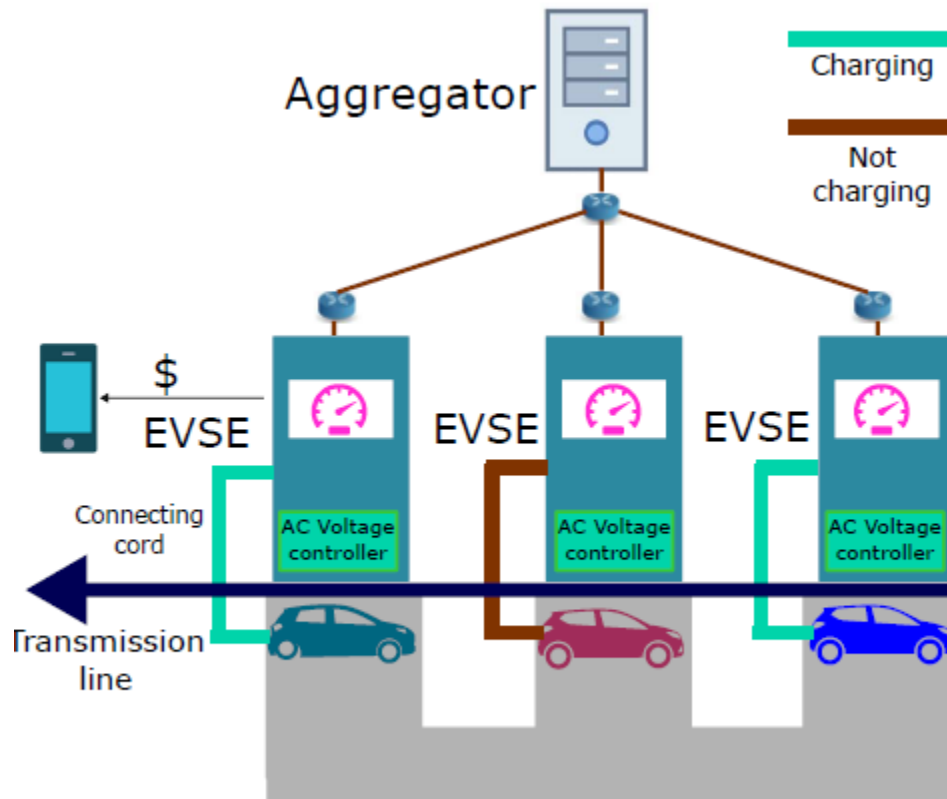
οχήματος, ο EVSE δημιουργεί έναν σύνδεσμο επικοινωνίας με τα ηλεκτρικά οχήματα PEV. Χρησιμοποιείται ειδικό καλώδιο στην υποδοχή CCS για ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των PEV και της EVSE. Ο εγκατεστημένος ελεγκτής τάσης στα EVSEs μετατρέπει 120 Volt (ή 220) σε παροχή 220 Volt (ή 120). Αυτό επιτρέπει στον EVSE να παρέχει διαφορετική τάση για φόρτιση χωρίς να υπάρχει ξεχωριστή καλωδίωση για τάση 120 Volt και 220 Volt.

### 4.3 Μεθοδολογία

#### 4.3.1 Δήλωση του Προβλήματος

Έστω έναν αριθμό  $N$  ηλεκτρικών οχημάτων PEV, όπου κάθε PEV αντιπροσωπεύεται από μία μεταβλητή  $i$  έτσι ώστε  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ . Διακρίνουμε τον χρόνο σε τμήματα διάρκειας  $\tau$ . Ένα συγκεκριμένο χρονικό τμήμα αντιπροσωπεύεται από μία μεταβλητή  $j$  τέτοια ώστε  $j \in \{1, 2, \dots, M\}$  και όπου  $M$  το σύνολο των χρονικών τμημάτων που απαιτούνται για την φόρτιση όλων των ηλεκτρικών οχημάτων PEV. Παρουσιάζεται ως  $V1$  η τάση φόρτισης που παρέχεται από τον EVSE στο επίπεδο 1. Το ποσό ρεύματος που χρησιμοποιείται από τα PEV εξαρτάται από το επίπεδο τάσης  $V1$  που παρέχεται από τον EVSE για τη φόρτιση και το κύκλωμα της μπαταρίας που είναι συγκεκριμένο για κάθε PEV. Εμφανίζεται ως  $I1i$  το ρεύμα που παρέχεται από τον EVSE όταν φορτίζεται το όχημα PEV σε τάση  $V1$ . Η απαιτούμενη ενέργεια  $i$  για τη φόρτιση των PEV ονομάζεται Κατάσταση Φόρτισης  $SOC_i^i$  (Status of Charge). Η ώρα άφιξης και αναχώρησης των PEV  $i$  στον χώρο στάθμευσης δίνεται από τα  $\tau_a^i$  και  $\tau_d^i$ . Το σύνολο των των χρονικών τμημάτων που απαιτούνται για την φόρτιση των PEV  $i$  σε επίπεδο φόρτισης  $I$ , που δίνεται από την εξίσωση (1). Στην εξίσωση (1) το προϊόν  $V1^i \times I1^i$  είναι η ισχύς που παρέχεται από τον EVSE. Αν το PEV φτάσει σε χρόνο  $\tau_a^i$  και αναχωρεί σε χρόνο  $\tau_d^i$ , τότε η θέση άφιξης  $\tau_a^i$  και η θέση αναχώρησης  $\tau_d^i$  δίνονται από τις εξισώσεις (2) και (3). Το  $\tau_{in}$  αποτελεί την αρχική τιμή συσχέτισης του χρόνου. Για παράδειγμα, αν ένα τμήμα χρόνου είναι διάρκειας 5 λεπτών και η αρχική ώρα συσχέτισης είναι στις 7 π.μ. τότε 7:00-7:05 π.μ. αποτελεί την μηδενική χρονική θέση. 7:05-7:10 π.μ. είναι η πρώτη χρονική θέση κ.ο.κ. Αν το όχημα PEV φτάσει στις 7:03 π.μ. τότε η χρονική θέση αναχώρησης θα είναι από τις 7:05 έως τις 7:10 π.μ. που είναι η χρονική θέση νούμερο 1. Αν αναχωρήσει στις 4:02 μ.μ. τότε η χρονική θέση αναχώρησης είναι η 107((3:55 PM4:00 PM). Αν το PEV χρειάζεται 30 θέσεις για να

φορτίζει τότε αυτές οι θέσεις πρέπει να κατανέμονται ανάμεσα στις θέσεις 1 και 170 για τη φόρτιση του.



Σχήμα 4.2 Μοντέλο Συστήματος

Το ηλεκτρικό φορτίο του δικτύου στον χώρο στάθμευσης στη θέση  $j$  δίνεται από την εξίσωση 4. Η μεταβλητή  $x_l$  είναι μία δυαδική μεταβλητή που παρουσιάζει εάν ο EVSE φορτίζει σε επίπεδο τάσης 1. Η εσωτερική άθροιση στην εξίσωση 4 προσθέτει όλα τα επίπεδα φόρτισης. Οι εξισώσεις (4) και (5) εγγυούνται μόνο ένα μοναδικό επίπεδο φόρτισης χρησιμοποιείται για την φόρτιση των PEV. Το εξωτερικό άθροισμα προσθέτει τις απαιτήσεις ενέργειας για κάθε όχημα σε θέση στάθμευσης στην υποδοχή  $j$ . Η μεταβλητή  $y_i^j$  είναι μία δυαδική μεταβλητή που καθορίζει εάν ένα ηλεκτρικό όχημα PEV  $i$  φορτίζεται στην υποδοχή  $j$ . Εναλλακτικά, το όχημα PEV συνδέεται στον EVSE αλλά δεν αντλεί ρεύμα.

$$n_l^i = \lceil \frac{SOC_r^i}{V_l \times I_l^i \times |\tau|} \rceil \quad (1)$$

$$\tau_a^i = \lceil \frac{t_a^i - t_{in}}{|\tau|} \rceil \quad (2)$$

$$\tau_d^i = \lfloor \frac{t_d^i - t_{in}}{|\tau|} \rfloor \quad (3)$$

Η αλλαγή στο φορτίο των PEV μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών τμημάτων δίνεται από την εξίσωση (7).

$$P_j = \sum_{i=1}^N (\sum_{l=1}^L V_l I_l^i x_l) y_i^j \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^L x_l = 1 \quad (5)$$

$$x_m \times x_n = 0 \quad \forall m \neq n, m, n \in 1 \dots L \quad (6)$$

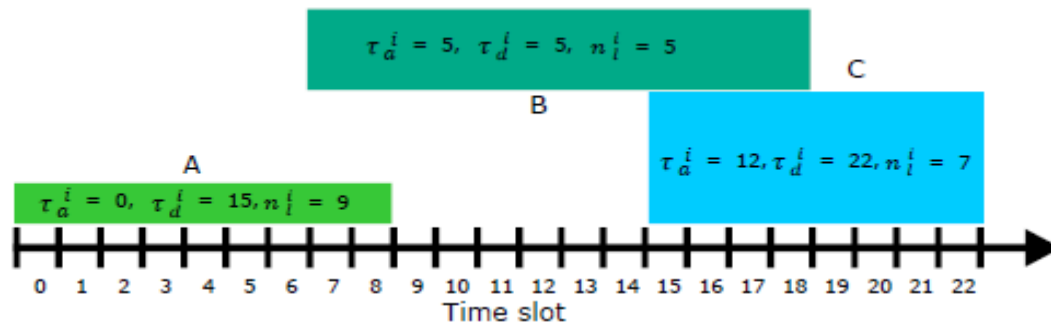
Στις εξισώσεις (8) και (9) δίνεται ο στόχος βελτιστοποίησης. Η εξίσωση (8) ελαχιστοποιεί τη μέση απόκλιση ισχύος πάνω σε διάφορες χρονοθυρίδες, ενώ η εξίσωση (9) μεγιστοποιεί τον συντελεστή του ηλεκτρικού φορτίου (αναλογία μέσης ισχύος έως μέγιστη ισχύ). Το  $P_{avg}$  είναι ο μέσος όρος της ισχύος που εκχωρείται κατά τα διάφορα χρονικά διαστήματα.

$$\min\left\{\frac{\sum_{j=1}^M \delta P_j}{M}\right\} \quad (8)$$

$$\max\left\{\frac{P_{avg}}{\max\{P_1, P_2, \dots, P_M\}}\right\} \quad (9)$$

#### 4.3.2 Προγραμματισμός PEV χρησιμοποιώντας ορθογώνια τοποθέτηση

Το πρόβλημα του αυξημένου ηλεκτρικού φορτίου λύθηκε προγραμματίζοντας τα PEVs, έτσι ώστε να φορτίζονται σύμφωνα με το χρόνο που αποφασίζεται από τους αλγορίθμους. Η φιλοσοφία των αλγορίθμων είναι ότι για κάθε PEV, θεωρείται ένα ορθογώνιο του οποίου το μήκος είναι ο χρόνος που το PEV χρειάζεται για να φορτιστεί και το ύψος είναι η ισχύς που απαιτείται για την φόρτιση. Για παράδειγμα, αν ένα PEV  $i$  απαιτεί  $n_i^i$  θέσεις για φόρτιση με επίπεδο τάσης  $V_i$  και ρεύμα  $I_i^i$  τότε για ένα PEV  $i$  θεωρούμαι ένα ορθογώνιο με μήκος  $n_i^i \times |T|$  και ύψος  $V_i \times I_i^i$ . Η περιοχή του ορθογωνίου η οποία είναι ο πολλαπλασιασμός του μήκους (χρόνος) και του ύψους (ισχύς) αναπαριστούν την απαιτούμενη ενέργεια  $SOC_r^i$  για την φόρτιση του PEV. Από τη στιγμή που το ύψος του ορθογωνίου είναι η ισχύς χρειάζεται ένα PEV, το δίκτυο υψών των ορθογωνίων για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή αφότου έχουν χωριστεί οριζόντια στη χρονική κλίμακα είναι η απαιτούμενη ενέργεια για την φόρτιση όλων των PEVs που προγραμματίστηκαν για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



Σχήμα 4.3 Ορθογώνια τοποθέτηση

### 4.3.3 Κυρίως αλγόριθμος

Για τη λύση του προβλήματος της μείωσης της μεταβολής του ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ διαφορετικών χρονικών στιγμών χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του σχήματος 4.4 [33], ο οποίος τοποθετεί τα ορθογώνια με βάση το κάθε PEV να ελαχιστοποιήσει την απόκλιση σε ύψος στο προφίλ του φορτίου.

---

**Algorithm 1** Main algorithm

---

**Input:**  $V$  - Vehicle charging request list

**Output:**  $aSlotP$  - Assigned power at all slot

```
1: InitialRectanglePlacement( $V$ )
2:  $tmpaSlotP = aSlotP$ 
3:  $LF_{curr} = \frac{avg(aSlotP)}{max(aSlotP)}$ 
4:  $LF_{max} = LF_{curr}$ 
5:  $P_{ref} = min(aSlotP)$ 
6:  $P_{max} = max(aSlotP)$ 
7: while  $P_{ref} < P_{max}$  do
8:   VolageLevelSelection( $V, P_{ref}$ )
9:   ShiftRectangle( $V, P_{ref}$ )
10:   $LF_{curr} = \frac{avg(aSlotP)}{max(aSlotP)}$ 
11:  if  $LF_{curr} > LF_{max}$  then
12:     $LF_{max} = LF_{curr}$ 
13:     $aSlotP = tmpaSlotP$ 
14:  end if
15:   $P_{ref} = P_{ref} + h$ 
16: end while
```

---

Σχήμα 4.4 Ελαχιστοποίηση του ύψους του του ορθογωνίου του προφίλ του φορτίο

---

**Algorithm 2** Initial rectangle placement

---

**Input:**  $V$  - Vehicle charging request list

$P_r$  - Reference power

**Output:**  $aSlotP$  - Assigned slots

$LF$  - Load factor

```
1:  $V.sort(arrivalTime)$ 
2:  $aSlotP.all() = 0$ 
3: for  $i \leftarrow 1$  to  $|V|$  do
4:    $w = 0$ 
5:    $a = False$ 
6:   while  $a \neq True$  do
7:     for  $j \leftarrow V(i).\tau_a^i$  to  $V(i).\tau_d^i - n_l^i$  do
8:       if  $all(aSlotP(j : j + n_l^i) < w)$  then
9:          $all(aSlotP(j : j + n_l^i)) += V_l \times I_l^i$ 
10:         $a = True$ 
11:      else
12:         $w = w + wI$ 
13:      end if
14:    end for
15:  end while
16: end for
```

---



---

**Algorithm 3** Voltage level selection

---

**Input:**  $V$  - Vehicle charging request list

$P_{ref}$  - Reference power

**Output:**  $aSlotP$  - Assigned slots

$LF$  - Load factor

```
1: for  $i \leftarrow 1$  to  $|V|$  do
2:   if  $all(aSlotP.(i)) < P_{ref}$  then
3:     if  $all(aSlotP.(i)([sSlot_i : n_i^i]) - V_l \times I_l^i + V_{l-1} \times I_{l-1}^i < P_{ref}$  then
4:        $all(aSlotP.(i)(sLot : n_i^i)) - = V_l \times I_l^i$ 
5:        $nSlot = \lceil SOC_r^i / (V_{l+1} \times I_{l+1}^i \times \tau) \rceil$ 
6:        $aSlotP.(i)[sSlot_i : nSlot] + = V_{l+1} \times I_{l+1}^i$ 
7:     end if
8:   end if
9:   if  $all(aSlotP.(i)) > P_{ref}$  then
10:    if  $all(aSlotP.(i)[sSlot_i : n_i^i]) - V_l \times I_l^i + V_{l-1} \times I_{l-1}^i > P_{ref}$  then
11:       $all(aSlotP.(i)[sLot : n_i^i]) - V_l \times I_l^i$ 
12:       $nSlot = \lceil SOC_r^i / (V_{l-1} \times I_{l-1}^i \times \tau) \rceil$ 
13:       $aSlotP.(i)[sSlot_i : nSlot] + = V_{l-1} \times I_{l-1}^i$ 
14:    end if
15:  end if
16: end for
```

---

## 5. Αναφορές

- [1] F. Mwasilu, J. J. Justo, E.-K. Kim, J.-W. Jung και T. Do, Electric vehicles and smart grid interaction A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration, South Korea: ELSEVIER.
- [2] R. Gago, S. Pinto και J. Silva, G2V and V2G Electric Vehicle Charger for Smart grids, Lisboa, 2016.
- [3] <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>, 2019.
- [4] M. D. Galus, M. G. Vaya´ , T. Krause και G. Andersson, The role of electric vehicles in smart grids, 2012.
- [5] T. Chen, X.-P. Zhang , J. Wang, J. Li, C. Wu , M. Hu και . H. Bian, A Review on Electric Vehicle Charging Infrastructure Development in the UK, JOURNAL OF MODERN POWER SYSTEMS AND CLEAN ENERGY, 2020.
- [6] Electric Vehicle Conductive, AUTOMOTIVE INDUSTRY STANDARD, 2016.
- [7] S. Nayak, S. Mohanty και H. J. Saikia, An Improved Control Method for the DC-DC Converter in Vehicle to Grid Charging System, 14th IEEE India Council International Conference (INDICON), 2017.
- [8] H. Cheng, H. Chen και Q. Wang, An Integrated Drive Power Converter Topology for Plug-in Hybrid Electric Vehicle with G2V, V2G and V2H Functions, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.
- [9] H. Akagi, E. Watanabe και M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, Institute of Electricals and Electronics Engineers, 2007.
- [10] F. A. Amoroso και G. Cappuccino, Advantages of efficiency-aware smart charging strategies for PEVs, ELSEVIER, 2011.
- [11] S. Y. Derakhshandeh, A. S. Masoum, S. Deilami, M. A. S. Masoum και M. E. H. Golshan, Coordination of Generation Scheduling with PEVs Charging in Industrial Microgrids, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, 2013.

- [12] Σ. Μαρκουλάκης, ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ, Κρήτη: Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2004.
- [13] R. Engle, C. Mustafa και J. Rice, Modeling Peak Electricity.
- [14] Π. Λαδάς, Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Ενεργειακής ζήτησης Προσεγγίσεις βασισμένες στη Μηχανική Μάθηση, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2014.
- [15] R. Edwards, J. New και L. Parker, Predicting future hourly residential electrical consumption: A machine learning case study, Energy and Buildings, 2012.
- [16] LIU, SUBBARAYAN, s. SHOULTS, MANRY, KWAN, LEWIS και NACCARINO, Comparison of very short-term load forecasting, IEEE transaction on power system, 1996.
- [17] Huang, Short - term load forecasting using threshold autoaggressive models, IEEE Proceedings : Generation, Transmission and Distribution.
- [18] Short - Term Load forecasting considering weekly period based on periodical auto regression. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineers.
- [19] j. Kissock, J. Haberl και D. Claridge, Inverse modeling toolkit: numerical algorithms, ASHRAE Transactions 109 (Part 2), 2003.
- [20] K. Li, H. Su και J. Chu, Forecasting building energy consumption using neural networks and hybrid neuro-fuzzy system: a comparative study, Energy and Buildings, 2011.
- [21] Assimakopoulos και Nikolopoulos, The theta model Q a decomposition approach to forecasting, International Journal of Forecasting.
- [22] N. Christiani και J. Taylor, An Introduction to support Vector Machines and Other Kernel-Based Learning Methods, Cambridge University Press, 2000.
- [23] E. Elattar, J. Goulermas και Q. Wu, Electric load forecasting based on locally weighted support vector regression, Systems Man and Sybernetics.
- [24] B. Scholkopf, C. Burges και V. Vpanik, Extracting Support Given task, AAAI Press.
- [25] B. Ribeiro, Support Vector Machines for quality monitoring in a plastic injection molding process, IEEE transaction System.

- [26] J. Park, S. Baek, M. Jeong και S. Bae, Dual features functional support vector machines for fault detection of rechargeable batteries, IEEE transaction System.
- [27] A. Smola και B. Scolkopf, A tutorial on support vector regression, statistics and computing.
- [28] V. Vpanik, Statistical Learning Theory, New York: Wiley, 1998.
- [29] Bazaraa, M. Shera και C. Shetty, Nonlinear programming - theory and algorithms, Singapore: John Wiley & Sons, 1993.
- [30] Ι. Θεοχάρης, Ασαφή Συστήματα, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2002.
- [31] G. Chawla, M. S. Sachdev και G. Ramakrishna, ARTIFICIAL NEURAL NETWORK APPLICATIONS FOR POWER SYSTEM PROTECTION, Saskatchewan: iee, 2005.
- [32] A. Khotanzad, Z. Enwang και H. Elragal, A neuro-fuzzy approach to short term load forecasting in a price-sensitive enviroment, IEEE Transaction on Power Systems.
- [33] R. M. Shukla, S. Sengupta και A. N. Patra, Smart Plug-in Electric Vehicle Charging to Reduce Electric Load Variation at a Parking Place.