

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«IoT Στην Αυτοκίνηση»

Μελέτη τεχνολογιών ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε συνδυασμό με την διαδικασία φόρτισης τους και την επικοινωνία των επί μέρους υποσυστημάτων σύμφωνα με το IoT (Internet of Things)



Του φοιτητή
Λύτα Νικόλαου
Αρ. Μητρώου: 512062

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο: Άγγελος Γιακουμής

Ημερομηνία 23/1/2024

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	- 4 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	- 7 -
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΈΞΥΠΝΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΤΑ ΗΛΕΚΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	- 7 -
1.1 Εισαγωγή	- 7 -
1.2 Εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων στα έξυπνα δίκτυα	- 9 -
1.3 Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων	- 10 -
1.3.1 Plug-in Electric Vehicles (PEV)	- 11 -
1.3.2 Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)	- 16 -
1.4 Ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο	- 17 -
1.4.1 Ο ρόλος των ηλεκτρικών οχημάτων στα έξυπνα δίκτυα	- 19 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	- 22 -
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΦΌΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΟΜΉΣ ΤΟΥ ΈΞΥΠΝΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	- 22 -
2.1 Εισαγωγή	- 22 -
2.2 Μέθοδοι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	- 22 -
2.2.1 Προτεινόμενες τεχνολογίες ενσύρματης φόρτισης	- 24 -
2.2.2 Προτεινόμενες τεχνολογίες ασύρματης φόρτισης	- 35 -
2.3 Δομή έξυπνου δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος	- 43 -
2.3.1 Έξυπνη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων	- 43 -
2.3.2 Επικοινωνία έξυπνου δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος	- 44 -
3. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΝΑΝΕΨΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΈΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ G2V ΚΑΙ V2G- 46 -	
3.1 Εισαγωγή	- 46 -

3.2	Ενσωμάτωση πηγών ενέργειας με ηλεκτρικά οχήματα	- 46 -
3.2.1	Φωτοβολταϊκά συστήματα και ηλεκτρικά οχήματα	- 47 -
3.2.2	Αιολικά συστήματα και ηλεκτρικά οχήματα.....	- 49 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 50		- 50 -
4.	ΙΟΤ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΈΣ ΕΦΑΡΜΟΓΈΣ ΣΤΗΝ ΦΌΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΏΝ ΟΧΗΜΆΤΩΝ..	- 50 -
4.1	Εισαγωγή.....	- 50 -
4.2	ΙΟΤ και φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων.....	- 53 -
4.2.1	Μέθοδος συμβατικής φόρτισης (μη ελεγχόμενη φόρτιση)	- 54 -
4.2.2	Ελεγχόμενη φόρτιση	- 54 -
4.2.3	Έξυπνη φόρτιση (Smart Charging)	- 56 -
4.3	Αποδοτικό σχήμα ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας ΙοΤ	- 57 -
	-	
5.	ΣΥΜΠΕΡΆΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΆΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΉ ΈΡΕΥΝΑ.....	- 61 -
5.1	Συμπεράσματα	- 61 -
5.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	- 62 -
6.	ΑΝΑΦΟΡΈΣ.....	- 63 -

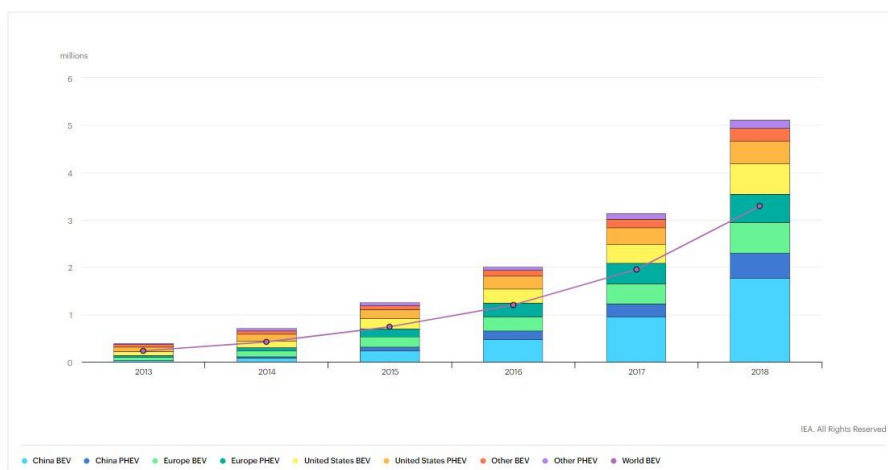
Κεφάλαιο 1^ο

1. Εισαγωγή στα Έξυπνα δίκτυα και τα Ηλεκτρικά Οχήματα

1.1 Εισαγωγή

Καθώς οι τεχνολογίες των μπαταριών και ηλεκτρικών κινητήρων ολοένα και βελτιώνονται, τα ηλεκτρικά οχήματα εισέρχονται ολοένα 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 και αλληλεπίδρασης τους με το ηλεκτρικό δίκτυο στο πλαίσιο των έξυπνων δικτύων κατά τη λειτουργία G2V (Grid to Vehicle). Επίσης, αναλύεται η αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στη κατάσταση V2G (Vehicle to grid), κατά την οποία ενέργεια επιστρέφεται στο δίκτυο.

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 Η.Ε
- 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 και 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.

1.2 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 αφορά 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 ισχύ του δικτύου μέσω της δικατευθυντήριας ανταλλαγής πληροφοριών στα πλαίσια του έξυπνου δικτύου.

1.3 Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα συμπλήρωσης ισχύος, το σύστημα πρόωσης, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν κατηγοριοποιηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Hybrid Electric Vehicles (HEVs)
- Plug-in Electric Vehicles (PEVs)
 - Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)
 - Battery Electric Vehicles (BEVs)
- Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs)

Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με τα εκάστοτε χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, φαίνεται η διαφορά τους ως προς το κυρίαρχο τύπο κινητήρα, το εξωτερικό σύστημα παροχής ισχύος και την κύρια πηγή παροχής ενέργειας.

Τύποι	PEV	HEV	FCEV
Σύστημα Κίνησης	Ηλεκτρική Μηχανή	Ηλεκτρική Μηχανή, Μηχανή Εσωτερικής καύσης (ICE)	Ηλεκτρική Μηχανή
Πηγή Ενέργειας	Μπαταρίες, Υπερπυκνωτές	Μπαταρίες, Υπερπυκνωτές, Μηχανή Εσωτερικής καύσης (ICE)	Κελία Καυσίμου
Εξωτερικό Σύστημα Παροχής Ισχύος	Ηλεκτρική Ενέργεια, Ηλεκτρικό Δίκτυο	Ηλεκτρική Ενέργεια, Δίκτυο, Σταθμός Βενζίνη	Παροχή Υδρογόνου

Πίνακας 1.1 Σύγκριση διαφόρων τύπων Ηλεκτρικών Οχημάτων [4]

1.3.1 Plug-in Electric Vehicles (PEV)

1.3.1.1 Battery Electric Vehicles (BEV)

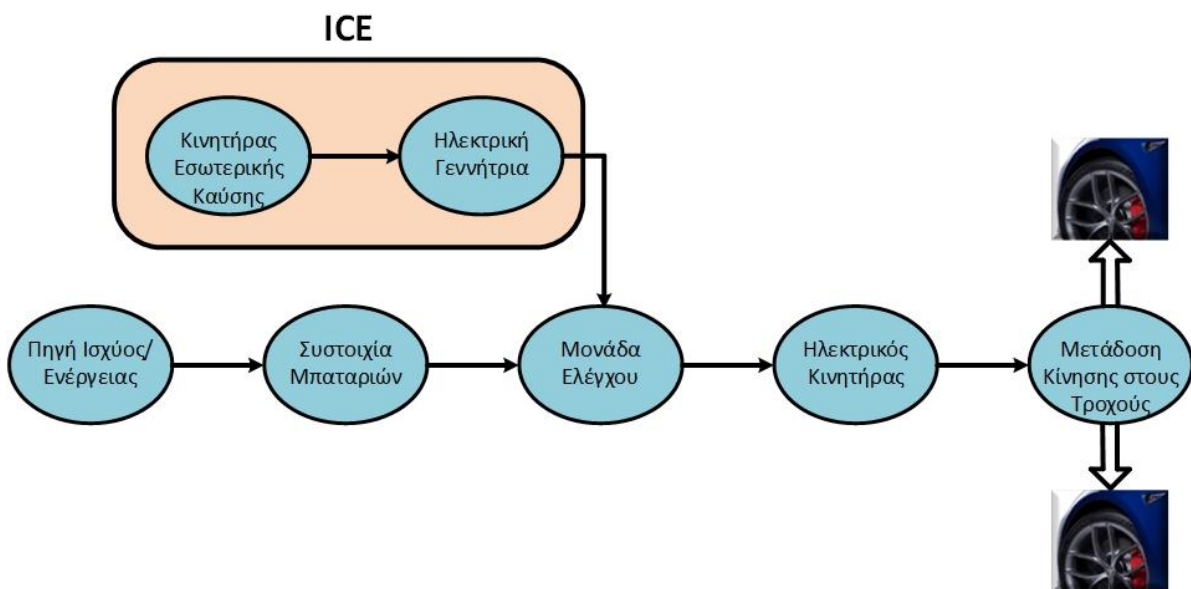
Τα BEV έχουν μόνο ηλεκτρικό σύστημα οδήγησης. Η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται πλήρως από την τεχνολογία της μπαταρίας. Οι μηδενικές εκπομπές του BEV είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται αποκλειστικά από τις μπαταρίες που είναι εγκατεστημένες. Επίσης, αυτός ο τύπος οχήματος διατηρεί το πλεονέκτημα της επαναφόρτισης των μπαταριών ενσωματώνοντας την λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης, όπου συγκεντρώνεται η δυναμική ενέργεια του οχήματος (κινητική ενέργεια) και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια που επαναφορτίζει (αναγεννά) την ενσωματωμένη μπαταρία στο όχημα κατά την επιβράδυνση. Όμως η κύρια πηγή τροφοδοσίας είναι μια εξωτερική πηγή τροφοδότησης ενέργειας, κυρίως το ηλεκτρικό δίκτυο.

Από την άλλη μεριά, οι περιορισμοί της σημερινής τεχνολογίας των εγκατεστημένων μπαταριών, κάνει τα BEV λιγότερο ελκυστικά από τα ICE οχήματα υπό τις ίδιες οικονομικές απαιτήσεις και απαιτήσεις οδήγησης. Επιπροσθέτως, οι μπαταρίες με μεγάλη πυκνότητα ισχύος και χαμηλή πυκνότητα ενέργειας έχουν μεγάλο χρόνο φόρτισης. Ακόμα και με τεχνολογίες γρήγορης φόρτισης χρειάζεται από μία έως αρκετές ώρες για πλήρη φόρτιση. Επιπλέον, τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο δεν παύουν να ισχύουν όπως το μεγάλο αρχικό κόστος, η αυτοδυναμία ως προς την απόσταση οδήγησης, υποδομές φόρτισης κ.α. [4].

1.3.1.2 Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

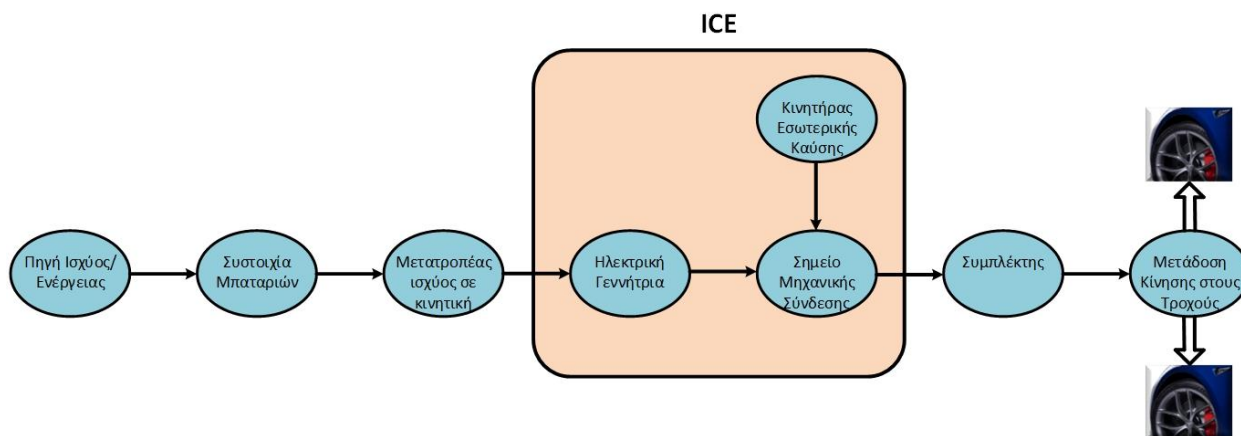
Τα PHEVs είναι εξοπλισμένα με μια μηχανή εσωτερικής καύσης, ακόμα και αν λειτουργούν κυρίως με μπαταρίες, οι οποίες επαναφορτίζονται μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται κυρίως για να φορτίσει την μπαταρία, όταν η στάθμη της αποθηκευμένης ενέργειας είναι χαμηλή ή όταν χρειάζεται περισσότερη ισχύς όπως στην επιτάχυνση.

Υπάρχουν τρεις τύποι τοπολογιών υβριδικών συστημάτων με βάση τις συνδέσεις ανάμεσα στην ICE (κινητήρια μηχανή) και την ηλεκτρική γεννήτρια στο PHEV, η σύνδεση σε σειρά, η παράλληλη σύνδεση και ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων. Η σύνδεση σε σειρά λειτουργεί με την απευθείας ενέργεια που παράγεται από την ICE και στέλνεται στην ηλεκτρική γεννήτρια και στην μπαταρία. Η ισχύς περνάει μέσα από μια μονάδα ελέγχου, η οποία ελέγχει τον ηλεκτρικό κινητήρα και μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3. Η μπαταρία υπάρχει για να διατηρεί την ισορροπία ενέργειας μεταξύ της κινητήριας μηχανής και της ηλεκτρικής γεννήτριας.



Σχήμα 1.3 Σύνδεση σε σειρά του PHEV

Όσο αφορά την παράλληλη σύνδεση, υπάρχουν δύο συνδυασμοί συστημάτων οδήγησης: το συμβατικό ICE και το σύστημα με ηλεκτρικό κινητήρα. Το PHEV μπορεί να λειτουργήσει είτε ανεξάρτητα με το ένα ή το άλλο σύστημα ξεχωριστά είτε συνδυάζοντας τα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Το πλεονέκτημα της παράλληλης σύνδεσης είναι η απλή κατασκευή και το χαμηλό αρχικό κόστος.



Σχήμα 1.4 Σύνδεση παράλληλη του PHEV

Η κύρια διαφορά της σύνδεσης σειράς-παράλληλης από τις άλλες δύο είναι ότι μπορεί να λειτουργεί με ICE και ηλεκτρικό κινητήρα ταυτόχρονα. Τα δύο συστήματα λειτουργίας διατηρούν τα μηχανικά τους μέρη ξεχωριστά. Επίσης, τα δύο συστήματα συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός γραναζιού ή μιας δομής πλανητικού τροχού. Ως αποτέλεσμα, το PHEV ρυθμίζει διεξοδικά τη σχέση

ταχύτητας μεταξύ του ICE και του ηλεκτρικού κινητήρα. Σε σύγκριση με το παράλληλο υβριδικό σύστημα, το σειρά-παράλληλο υβριδικό σύστημα είναι πιο ευέλικτο για τη ρύθμιση της ισχύος εξόδου από το ICE και τον ηλεκτρικό κινητήρα σύμφωνα με το διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας [4].

1.3.1.3 Hybrid Electric Vehicle (HEV)

Το HEV περιλαμβάνει δύο τύπους συστημάτων οδήγησης, το ένα είναι εσωτερική μηχανή που καταναλώνει βενζίνη και το άλλο είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας. Σε αντίθεση με τα PEV, τα HEV δεν μπορούν να επαναφορτιστούν από το ηλεκτρικό δίκτυο, διότι η ενέργεια τους προέρχεται αποκλειστικά από βενζίνη και από την λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης [2].

1.3.1.4 Micro and mild HEV

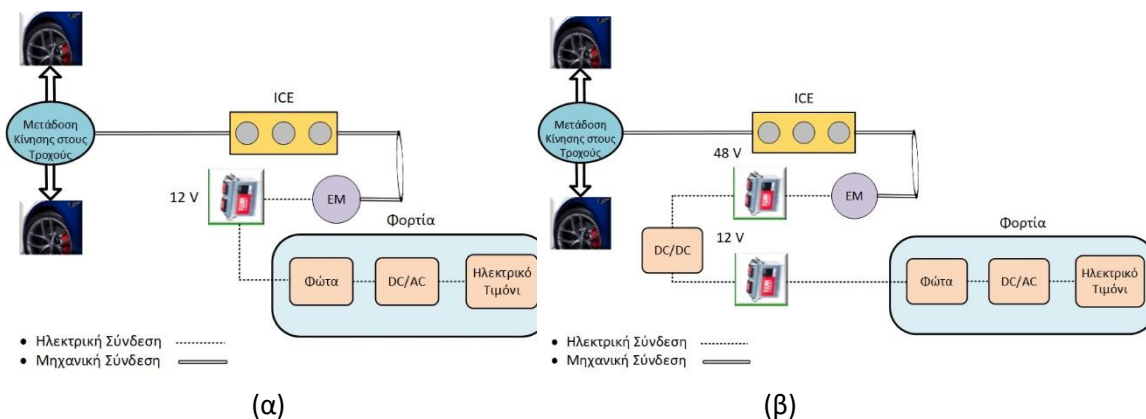
Ανάλογα με την ποσότητα της ισχύος εξόδου από τον ηλεκτρικό κινητήρα, τα HEV μπορούν να διαχωριστούν σε micro, mild και full HEV. Επιπλέον, ο διαχωρισμός των HEV εξαρτάται και από τον συντελεστή υβριδικότητας, όπου είναι η αναλογία της ισχύος που αναπτύσσεται από τον ηλεκτρικό κινητήρα του υβριδικού οχήματος προς την συνολική ισχύ που καταναλώνεται από το υβριδικό όχημα. Τα micro HEV έχουν ποσοστό υβριδικότητας λιγότερο από 5%. Σε σύγκριση με τα οχήματα εσωτερικής καύσης, τα micro HEV λειτουργούν με μια μηχανή εκκίνησης που ονομάζεται κινητήρας εκκίνησης με ενσωματωμένη μια γεννήτρια εκκίνησης (starter/generator system) [5]. Ο ηλεκτρικός κινητήρας χρησιμοποιείται για την απενεργοποίηση της κύριας μηχανής, όταν το όχημα βρίσκεται στην πλήρη ακινησία ενώ εκκινεί την κύρια μηχανή όταν ο χρήστης αποδεσμεύει το φρένο. Καθώς το υβριδικό όχημα βρίσκεται σε κίνηση χρησιμοποιώντας την ICE και ο ηλεκτρικός κινητήρας δεν παρέχει καμία επιπρόσθετη ροπή στο όχημα, η απόδοση του καυσίμου αυξάνεται κατά με 5% -10% με την χρήση του συστήματος micro HEV [5]. Το micro HEV δεν θεωρείται αυστηρώς υβριδικό όχημα, επειδή ο ηλεκτρικός κινητήρας δεν παρέχει συνεχή ισχύ.

Στα mild HEV, ο συμβατικός κινητήρας εκκίνησης (ICE) αντικαθίσταται από ενσωματωμένο σύστημα starter/generator (ISG), το οποίο εντοπίζεται ανάμεσα στην κύρια μηχανή και στον μηχανισμό μεταφοράς της κίνησης στους τροχούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να μειώνεται το μέγεθος αφού η ISG βοηθάει την κύρια μηχανή να κινήσει το όχημα. Προκειμένου ο ηλεκτρικός κινητήρας να βοηθήσει στην ώθηση του οχήματος, το ποσό της ισχύος που προσφέρει καλύπτει το 10% της ισχύος που θα έδινε η ICE. Μ' αυτό τον τρόπο η απόδοση του καυσίμου για τα mild HEV αυξάνεται σε σχέση με το micro HEV κατά 20%-30%. Η βασική αρχή λειτουργίας του mild HEV είναι η εξής: όταν το όχημα εκκινεί, η ηλεκτρική γεννήτρια εκκινεί, ενώ η ICE σταματάει. Επακολούθως, όλος ο εξοπλισμός κίνησης του οχήματος βασίζεται στον ηλεκτρικό κινητήρα. Όταν ο χρήστης του

οχήματος αποδεσμεύει το φρένο και το όχημα επιταχύνει, η ICE αρχίζει να συνεισφέρει εξολοκλήρου στη ώθηση υπό γρήγορες ταχύτητες [4]. Επίσης, όταν το όχημα επιβραδύνει με ή χωρίς το φρένο η μπαταρία επαναφορτίζεται μέσω της αναγεννητικής πέδησης.

Τελικώς, οι δυο κύριες διαφορές των micro και mild HEV είναι η ροπή που μεταφέρεται ή όχι στο όχημα. Το micro HEV δεν έχει την δυνατότητα μεταφοράς ροπής, επειδή η ηλεκτρική μηχανή τυπικά χρησιμοποιείται για την λειτουργία της εκκίνησης και της απενεργοποίησης της μηχανής, αλλά και ως γεννήτρια χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση άλλων φορτίων του οχήματος όπως το υδραυλικό τιμόνι, τον κλιματισμό και άλλα συστήματα που καταναλώνουν ενέργεια από την μηχανή. Η δεύτερη διαφορά είναι ότι το micro HEV έχει μικρότερου μεγέθους κινητήρα οποίος φτάνει μέχρι την ισχύ των 2.5 kW και λειτουργεί με 12V.

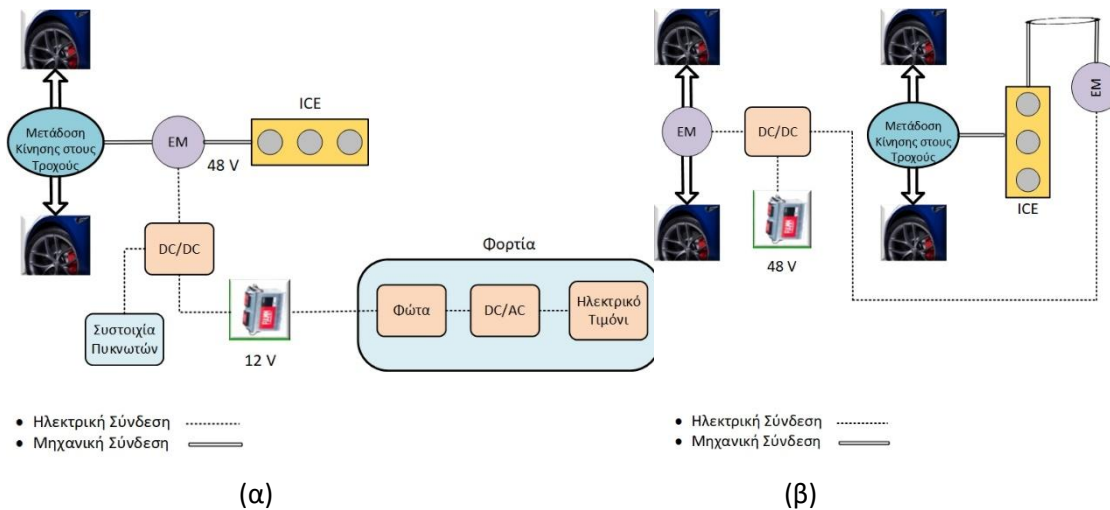
Στο Σχήμα 1.4 φαίνονται τα σχηματικά διαγράμματα του micro HEV όπου διακρίνονται δύο τοπολογίες των 12V και 48V. Η τελευταία τοπολογία (48V) καθιστά δυνατή την περισσότερη ανάκτηση ενέργειας σε μικρότερα χρονικά διαστήματα [5]. Τέλος, στα σχήματα φαίνεται ότι χρησιμοποιούνται και μετατροπείς ΣΤ/ΣΤ, στην τοπολογία των 48V για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού κινητήρα, αυτό γίνεται για την διατήρηση της αλληλεπίδρασης και χρήσης των υπόλοιπων ηλεκτρικών συστημάτων του συστήματος.



Σχήμα 1.5 (α) Micro υβριδικό HEV 12 V αναπαράσταση, (β) Micro υβριδικό HEV 48 V αναπαράσταση [5]

Στο mild HEV η ενέργεια εξάγεται μέσω μετατροπέων ΣΤ/ΣΤ, οι οποίοι την SoC (State of Charge) στα 12 V, όταν η μπαταρία χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού κινητήρα ή των φορτίων του οχήματος. Επίσης, τα mild HEV μπορούν να χρησιμοποιούν και συστήματα υπερπυκνωτών και μπαταρίες λιθίου. Για λόγους αύξησης της απόδοσης και του εύρους των ταχυτήτων τα είδη του ηλεκτρικού κινητήρα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι τα εξής:

- Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμων Μαγνητών (PMSM)
- Επαγωγικός Κινητήρας (IM)
- Σύγχρονος Κινητήρας Μαγνητικής Αντίστασης (SRM), ο οποίος εξαιτίας της καλής του απόδοσης και της δυνατότητας που δίνει να ελέγχεται κάθε φάση ξεχωριστά τον καθιστά τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο σε τέτοιες εφαρμογές.



Σχήμα 1.6 (α) Αναπαράσταση mild HEV με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, (β) Αναπαράσταση mild HEV με 2 ηλεκτρικούς κινητήρες [5]

1.3.1.5 Full και dual-mode HEV

Για τα full HEV, η πιο σημαντική τεχνολογία είναι η μεταβλητή μετάδοση ηλεκτρικής ισχύος (EVT), η οποία λειτουργεί και ως διαχωριστής ισχύος. Ο διαχωριστής ισχύος παρέχεται από το EVT δίνοντας τη δυνατότητα για την ηλεκτρική ώθηση του οχήματος (propulsion), η οποία αναφέρεται στην αρχική επιτάχυνση που βασίζεται στην ηλεκτρική ισχύ μόνο [4]. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους είναι ότι διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα των διαφόρων τύπων των συμβατικών HEV, όπως την λειτουργία εξοικονόμησης της ενέργειας start-stop, την αναγεννητική πέδηση, το μικρότερο μέγεθος κινητήρα και την ηλεκτρική ώθηση (propulsion).

Όμως οι προσπάθειες της ερευνητικής κοινότητας για την αντιμετώπιση του προβλήματος της κατανάλωσης του καυσίμου κατά την διάρκεια της εκκίνησης, της ακινητοποίησης του οχήματος και της επαναφοράς του σε κίνηση στις αστικές περιοχές, δεν σταμάτησαν στα full HEV. Ένα νέο εγχείρημα αποτέλεσαν τα dual-mode HEV τα οποία βασίστηκαν στο σύστημα των full HEV και εισάχθηκαν για την ενίσχυση της συνολικής απόδοσης. Dual mode σημαίνει ότι το υβριδικό σύστημα και οι ηλεκτρικοί κινητήρες συνεργάζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για να πετύχουν μια

εξαιρετική απόδοση υπό συνθήκες γρήγορης επιτάχυνσης και μέγιστης ταχύτητας. Η συνεισφορά των dual-mode δεν σταματάει στα HEV αλλά επεκτείνεται και στα plug-in HEV.

Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι τα micro και mild συμβατικά HEV δίνουν προτεραιότητα στη μηχανή πετρελαίου/αερίου, ενώ η ηλεκτρική γεννήτρια και οι μπαταρίες δρουν σαν βοηθητικές συσκευές παροχής ισχύος. Από την άλλη μεριά, τα full ή τα dual-mode HEV χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό ως κύρια πηγή ενέργειας για να κινήσουν το όχημα. Τα συμβατικά HEV μπορούν να βελτιωθούν σε dual-mode ή full HEV για να αυξηθεί η αυτονομία του οχήματος και για εξοικονόμηση καυσίμου. Τα μειονεκτήματα της κατανάλωσης αερίου/πετρελαίου, το μεγάλο βάρος των μπαταριών και το υψηλό αρχικό κόστος μπορούν να αγνοηθούν.

1.3.2 Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)

Εκτιμάται ότι τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (FCEV) είναι μια καλή λύση για την βελτίωση της απόδοσης και την μείωση των εκπομπών ρύπων. Ακόμα και αν λάβουμε υπόψη όλες τις εκπομπές, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν εκπομπές από χημικές διεργασίες και διοξειδίου του άνθρακα που έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, το FCEV παραμένει ανταγωνιστικό. Οι κυψέλες καυσίμου είναι η κύρια πηγή παροχής ισχύος, ωστόσο η βασική τεχνολογία για το FCEV είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που παράγει DC ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Υπάρχουν πέντε σημαντικά τμήματα στις κυψέλες καυσίμου, η άνοδος, μια στρώση ανόδου, ο ηλεκτρολύτης, η κάθοδος και μια στρώση καθόδου με καταλύτη. Οι διαθέσιμες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου είναι οι εξής:

- **Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM)**, Αυτές οι κυψέλες (κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων) λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και παράγουν ισχύ αρκετή για την εφαρμογή τους στην ικανοποίηση καθημερινών ενεργειακών αναγκών, όπως αυτή για την κίνηση ενός οχήματος. Σε αυτό βοηθά η ικανότητα τους να προσαρμόζονται σε γρήγορες αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος. Η ισχύς που παράγει μια τέτοια κυψέλη κυμαίνεται μεταξύ 50 και 250 kW . Ο συγκεκριμένος τύπος κυψέλης είναι αρκετά ευαίσθητος σε μη καθαρά καύσιμα.
- **Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)**, Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος είναι αυτές όπου είναι διαθέσιμες σήμερα στο εμπόριο. Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του βρίσκονται στην περιοχή των 150 με 200°C. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το φωσφορικό οξύ γίνεται κακός ιοντικός αγωγός και το μονοξείδιο του άνθρακα CO το οποίο σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη επιμολύνει την άνοδο ρίχνοντας πάρα πολύ την απόδοση. Τα

μειονεκτήματα των PA κυψελών καυσίμου, είναι το μεγάλο μέγεθος και βάρος, ο ακριβός καταλύτης όπου χρησιμοποιείται (λευκόχρυσος) ενώ το ρεύμα το οποίο παράγεται είναι χαμηλό και η ισχύς συγκρίσιμη με αυτή άλλων τύπων κυψελών καυσίμου.

- **Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (DMFC)**, Σε όλες τις παραπάνω κυψέλες ως καύσιμο χρησιμοποιείται το υδρογόνο. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη χωρίς να απαιτεί τη μετατροπή της σε υδρογόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο. Η κατηγορία αυτή είναι πιο πρόσφατη των κυψελίδων PEM με αρκετά ακόμα προβλήματα προς επίλυση όπως η μεγάλη ποσότητα καταλύτη όπου απαιτείται. Ωστόσο, εάν η συγκεκριμένη τεχνολογία επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στη θέση των PEM κυψελών δε θα υπήρχε η ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών τρόπων αποθήκευσης του καυσίμου όπως γίνεται στη δεύτερη περίπτωση με το υδρογόνο ενώ δε θα ήταν αναγκαία και η ανάπτυξη αναμορφωτών.

Με την κατάλληλη σύνδεση σειρά/παράλληλη των κυψελών καυσίμου μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη ποσότητα ισχύος εξόδου ώστε να κινήσει το όχημα. Όσο αφορά την αυτονομία απόστασης του οχήματος, τα FCEV ανταγωνίζονται επάξια τα ICEV και ως εκ τούτου οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλο εύρος εφαρμογών από μικρής κλίμακας οχήματα (200 W) έως πολύ μεγαλύτερα κέντρα παραγωγής ενέργειας (500 kW). Παρόλα αυτά, το αρχικό κόστος και η έλλειψη σταθμών ανεφοδιασμού παραμένουν σημαντικές προκλήσεις που είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν. Τέλος, η κοινότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου είναι λιγότερο αξιόπιστη από τις συμβατικές μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα [4].

1.4 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 αφορά την απόδοση και την ποιότητα ισχύος.

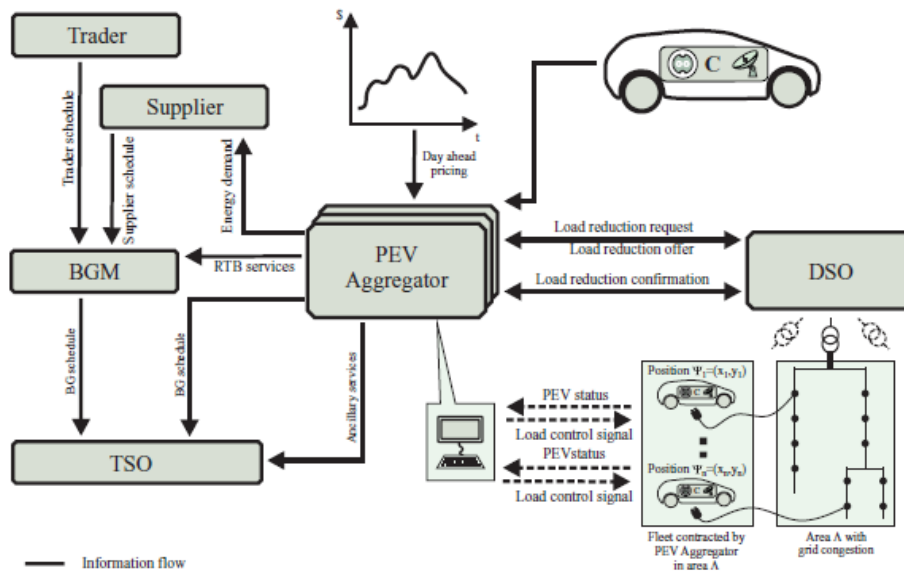
Για να γίνουν κατανοητά τα πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο εξετάζεται η χρήση τους σε δύο περιπτώσεις, όσο αφορά τους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων και τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας που προσφέρουν. Και οι δύο παραπάνω περιπτώσεις μοιράζονται το ίδιο σύστημα 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 παροχείς 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 διασπαρμένη 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 πραγματικού χρόνου 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 ήταν 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.

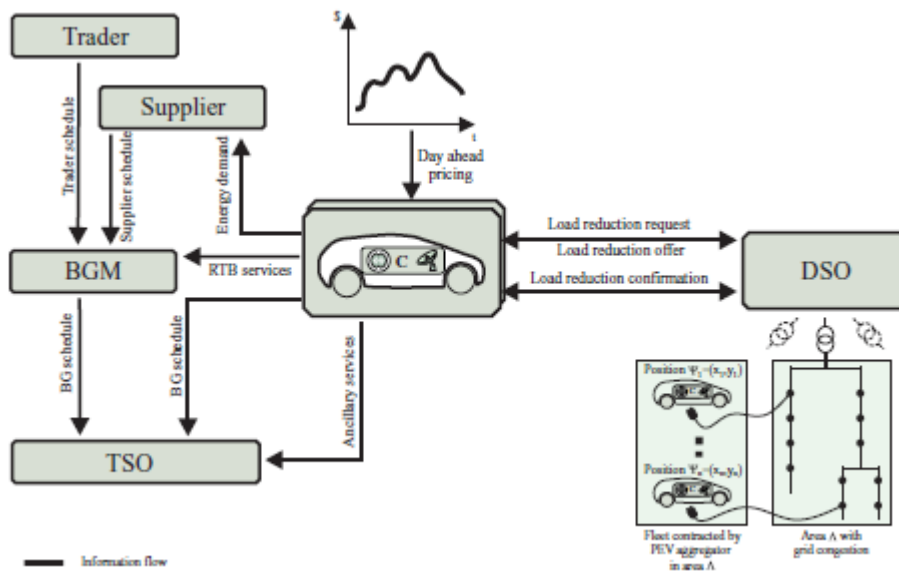
1.4.1 Ο ρόλος των ηλεκτρικών οχημάτων στα έξυπνα δίκτυα

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 οι 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 1.7 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/παροχείς ενέργειας. Το DSO λειτουργεί και συντηρεί το δίκτυο διανομής. Αυτό συμπεριλαμβάνει επίσης την εγκατάσταση και την λειτουργία των εγκαταστάσεων φόρτισης για PEVs. Το 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 στα TSO. Αυτά τα προγράμματα περιλαμβάνουν πληροφορίες, όπως πόσο παράγουν και ή καταναλώνουν τα BG κατά την διάρκεια λειτουργίας τους (περίπου 15 min). Τα 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 1.7 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 1.8 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 1.8 Αποκεντροποιημένος έλεγχος ηλεκτρικού οχήματος [6]

Κεφάλαιο 2ο

2. Ανάλυση των τεχνολογιών φόρτισης και της δομής του έξυπνου δικτύου

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 2 αναλύονται οι μέθοδοι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων για την λειτουργία αλληλεπίδρασης με το δίκτυο G2V. Επιπλέον, αναλύονται κάποιες από τις προτεινόμενες τοπολογίες ηλεκτρονικών ισχύος που αναφέρονται στην πιο πρόσφατη βιβλιογραφία τόσο για την ενσύρματη φόρτιση όσο και για την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται μέθοδοι έξυπνης φόρτισης, καθώς και ο τρόπος επικοινωνίας των ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο.

2.2 Μέθοδοι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Εκτός από τις καινοτομίες στις τεχνολογίες των ηλεκτρικών οχημάτων, μεγάλη σημασία έχουν 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 αφορά τις εκπομπές καυσαερίων μέχρι το 2030 και 2050, καθώς έχουν πειστεί ότι οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου οφείλονται στα μέσα μεταφοράς [7].

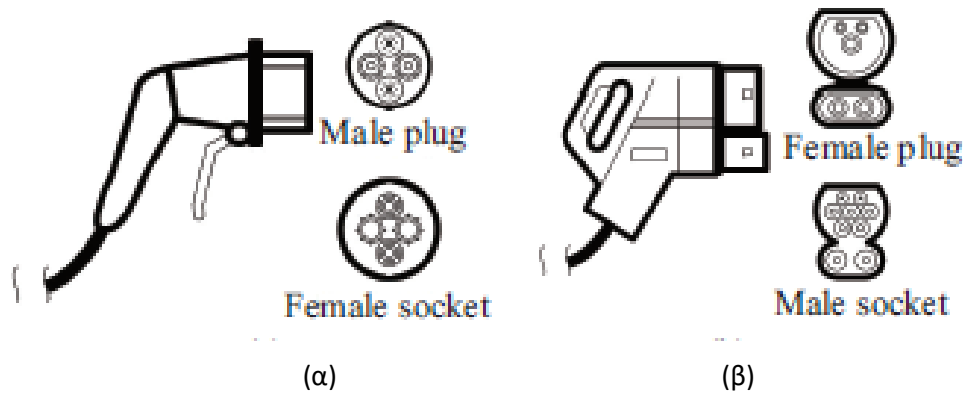
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τρόποι φόρτισης ανάλογα με την χρονική διάρκεια της φόρτισης διακρίνονται σε ταχείας φόρτισης και σε αργής. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα επίπεδα φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και τον χρόνο πλήρους φόρτισης αυτών, σύμφωνα με το πρότυπο J1772. Το τύπου AC επίπεδο 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	<u>3φ παροχή</u> 45 kW φορτιστής PHEV:10min BEV:20min
DC επίπεδο 3	200-600 VDC	Μέχρι 400 A	Μέχρι 240 kW	Υπό κατασκευή

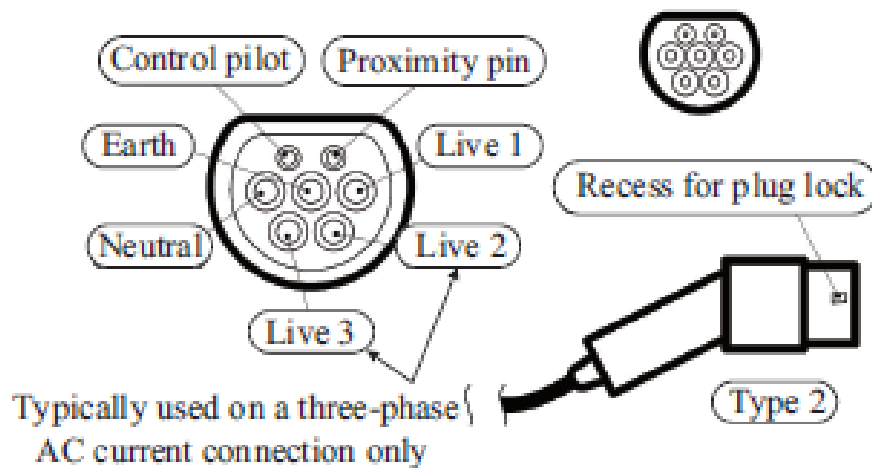
Πίνακας 2.1 Χρόνος και επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος

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 2.1, 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 2.2 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 2.1 DC φορτιστής (α) CHAdeMO (β) Combo 2 ή CCS [7]



Σχήμα 2.2 AC φορτιστής [7]

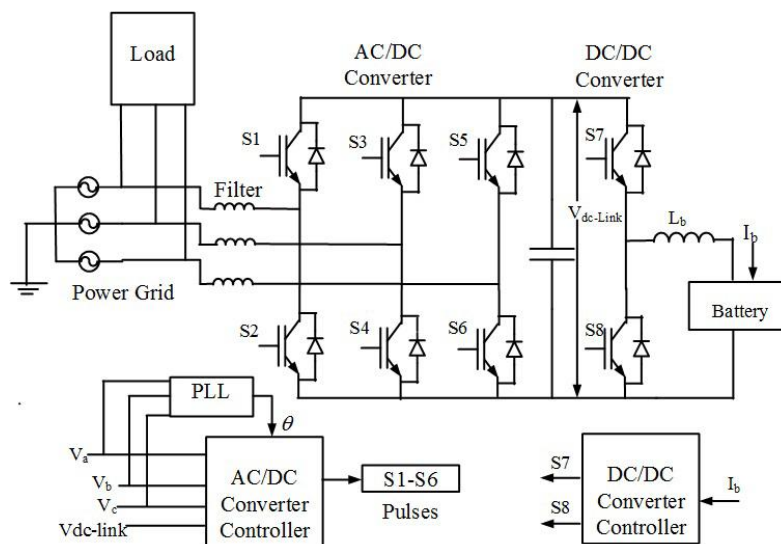
2.2.1 Προτεινόμενες τεχνολογίες ενσύρματης φόρτισης

Ένας φορτιστή 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.

2.2.1.1 Μέθοδος ελέγχου σε DC-DC μετατροπείς στο G2V σύστημα φόρτισης

Η πρώτη προτεινόμενη τοπολογία που εξετάζεται 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 2.3, 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.



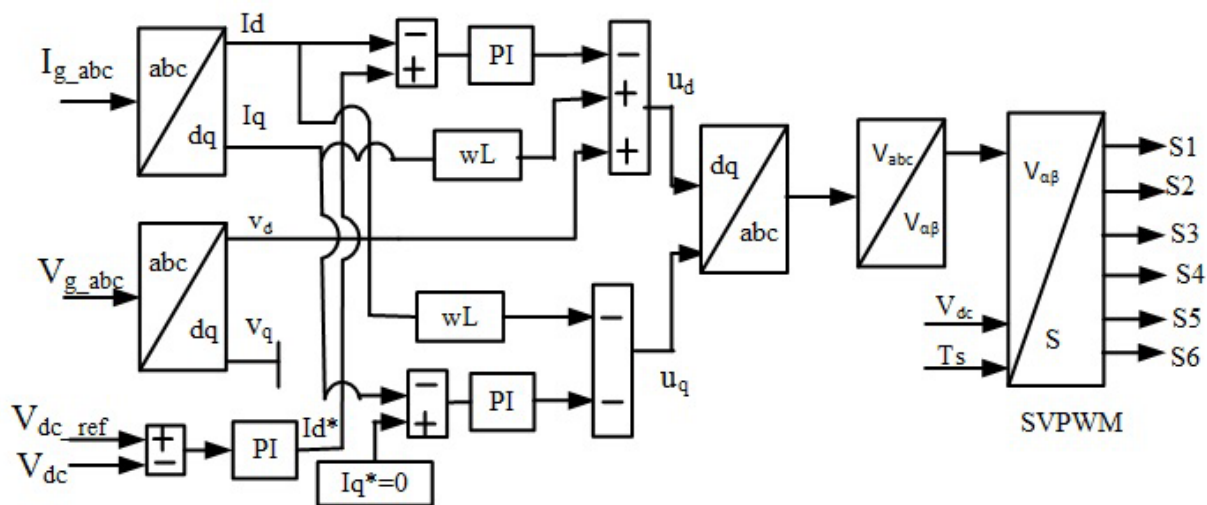
Σχήμα 2.3 Δομή του προτεινόμενου δικατευθυντήριου συστήματος φόρτισης [9]

Στο σχήμα 2.4 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 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.

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

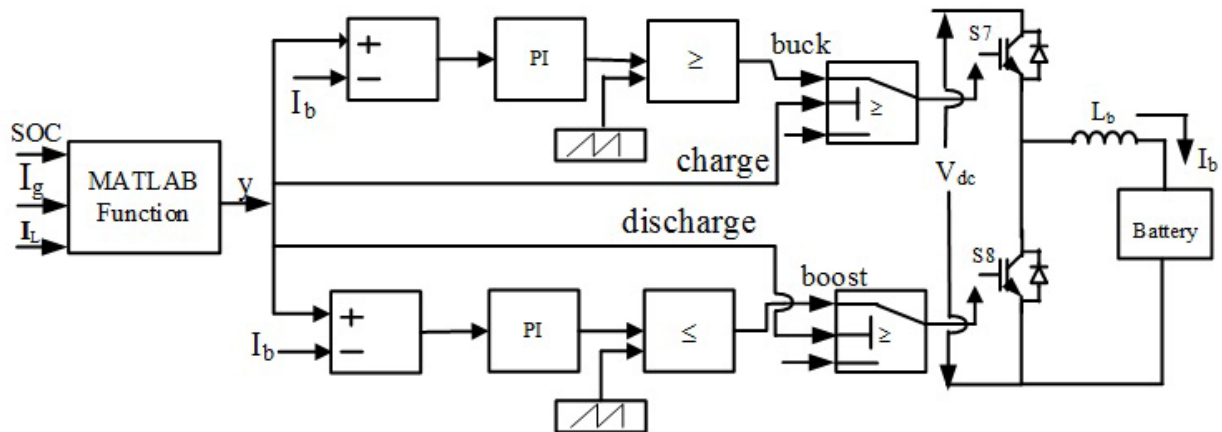
$$u_q = \omega L i_q \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.4 Απόζευξη διανυσμάτων έλεγχου 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 που φαίνεται στο σχήμα 2.5. Σ' αυτήν την τεχνική έλεγχου, 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).



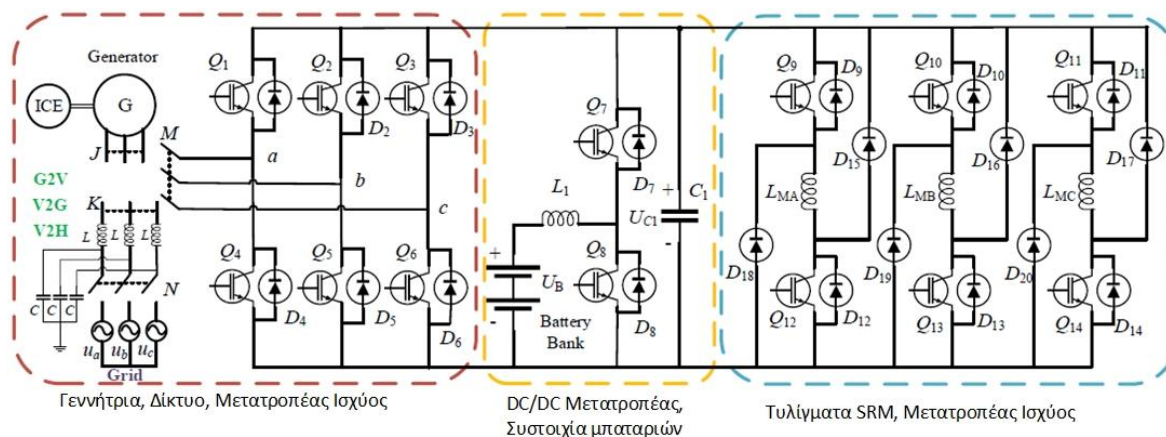
Σχήμα 2.5 Τεχνική PWM για τον έλεγχο του DC/DC μετατροπέα [9]

2.2.1.2 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 απόδοσή 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 επικουρικές υπηρεσίες ηλεκτρικού δικτύου. Το σχηματικό διάγραμμα του σχήματος 2.6 παρουσιάζει το προτεινόμενο ηλεκτρικό δίκτυο του ηλεκτρικού οχήματος.



Σχήμα 2.6 Ενσωματωμένη προτεινόμενη τοπολογία οδήγησης PHEV [10]

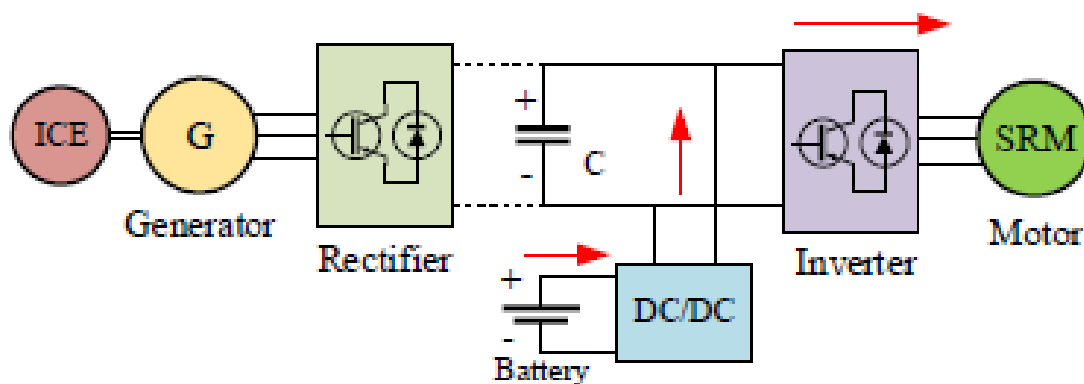
Στο σχήμα 2.6 το ηλεκτρικό δίκτυο του οχήματος αποτελείται από μια ICE, μια γεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ένας AC/DC μετατροπείας για την μετατροπή της AC ισχύος σε DC, έναν DC/DC μετατροπείας για την ρύθμιση της DC τάσης στον πυκνωτή C_1 , μια συστοιχία μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας, τα πρόσθετα φορτία του ηλεκτρικού οχήματος, έναν κύριο μετατροπείας 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 μετατροπείας είναι ένας ασύμμετρος μετατροπείας 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) και τότε λειτουργεί ο AC/DC μετατροπείας 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 μετατροπείας. Αλλιώς η συστοιχία μπαταριών θα παρείχε με περισσότερη ενέργεια την SRM.

Η λειτουργία του συστήματος του σχήματος 2.6 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 και το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία Vehicle to Home (V2H).

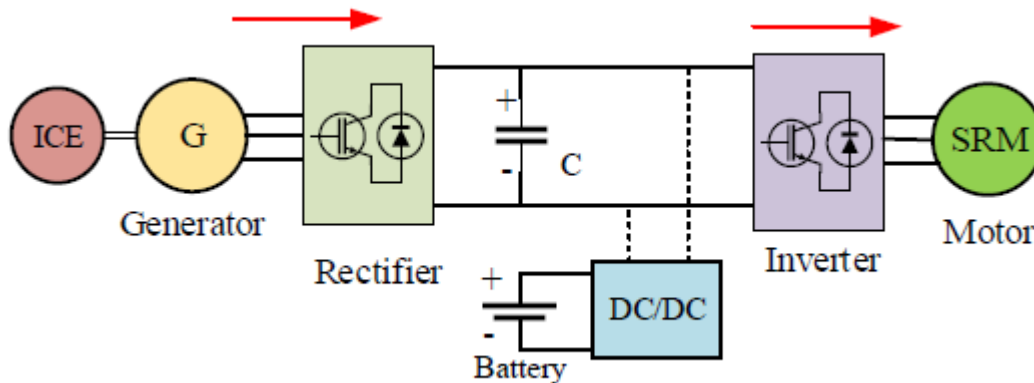
Από την άλλη μεριά, όταν ο διακόπτης M βρίσκεται στη θέση J, τότε το ηλεκτρικό όχημα βρίσκεται σε κατάσταση κίνησης είτε όταν επιταχύνει είτε όταν υφίσταται συμβατική οδήγηση χωρίς πολύ υψηλές ταχύτητες. Σ' αυτή τη περίπτωση υπάρχουν 5 λειτουργίες σύμφωνα με την κατάσταση SOC της συστοιχίας μπαταριών 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 βρίσκονται σε ακινησία. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα αυτή της κατάστασης.



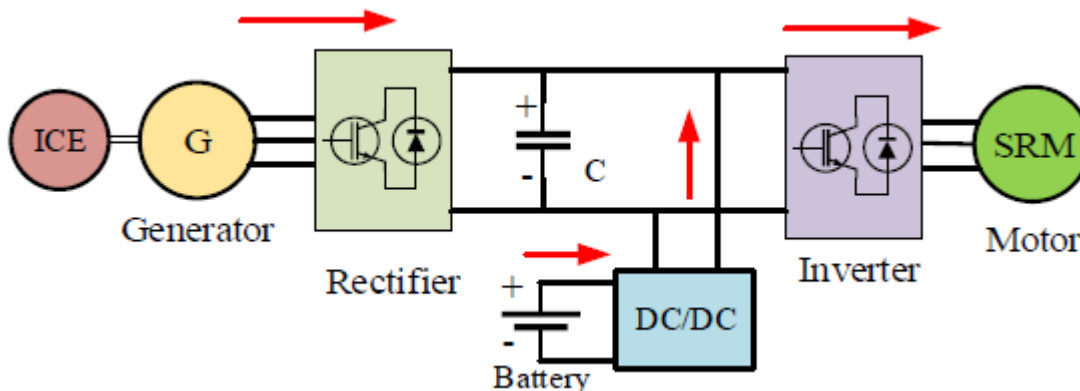
Σχήμα 2.7 Τροφοδοσία μόνο από συστοιχία μπαταριών [10]

- 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 2.8 φαίνεται η ροή ισχύος.



Σχήμα 2.8 Τροφοδοσία μόνο από γεννήτρια [10]

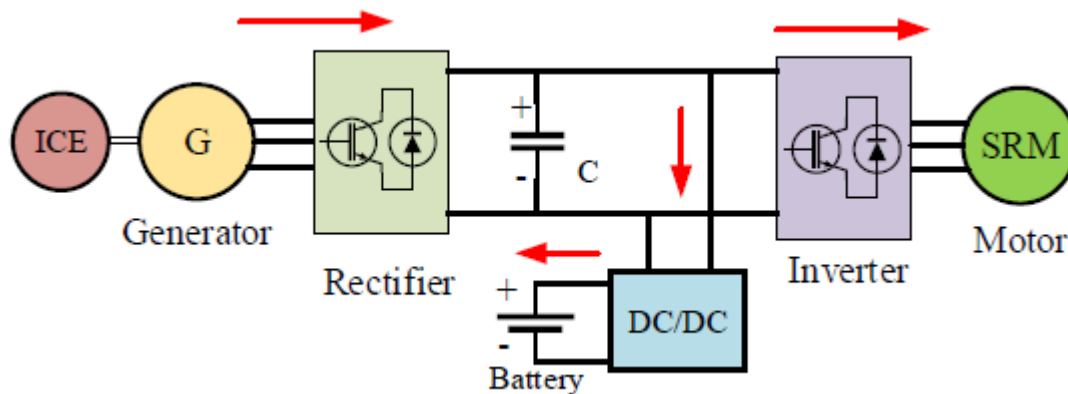
- Όταν το ηλεκτρικό όχημα τροφοδοτείται και από την συστοιχία μπαταριών και από τη γεννήτρια. Στην περίπτωση που το PHEV βρεθεί σε κατάσταση όπου το φορτίο είναι αρκετά υψηλό, τότε και οι δύο πηγές ενέργειας συμβάλλουν για να καλυφθούν οι ανάγκες ισχύος της SRM. Η ροή ισχύος φαίνεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9 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

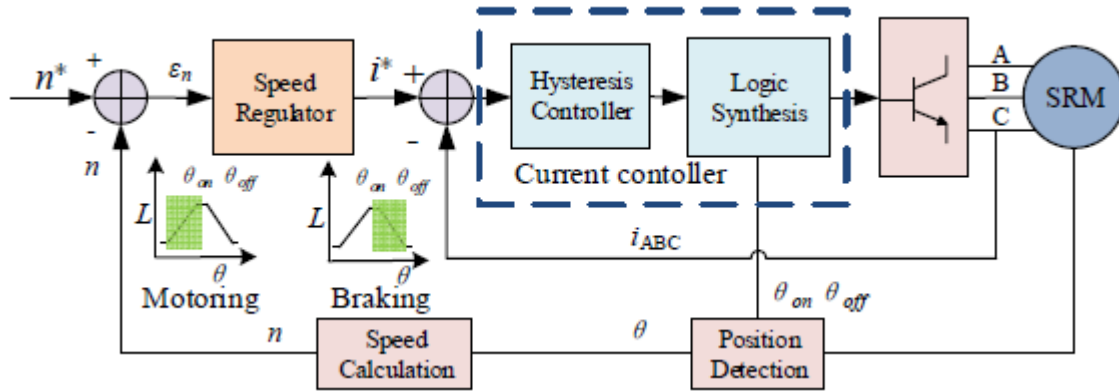
συστοιχία μπαταριών. Η φόρτιση των μπαταριών γίνεται μέσω του μετατροπέα υποβιβασμού.



Σχήμα 2.10 Τροφοδοσία από την γεννήτρια και φόρτιση συστοιχία μπαταριών [10]

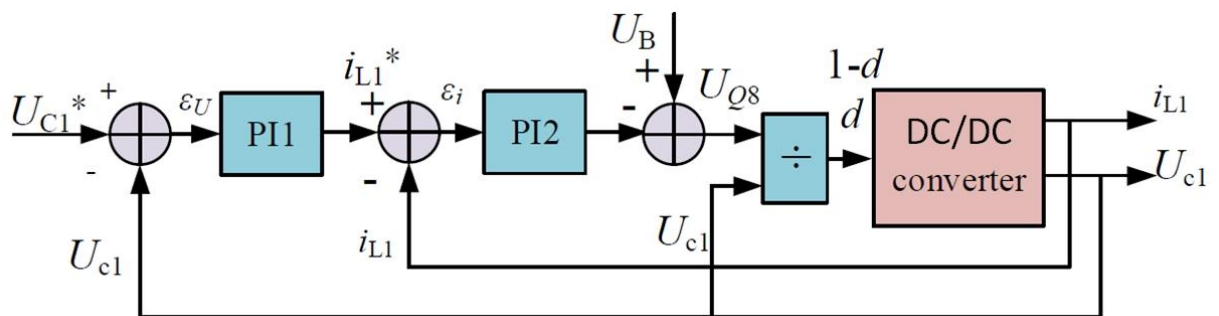
2.2.1.2.1 Μέθοδος ελέγχου της SRM, του DC/DC και AC/DC μετατροπέα

Οι τεχνικές ελέγχου των μετατροπέων και της SRM αποτελούν καίριο κομμάτι για την εύρυθμη και πιο αποδοτική λειτουργία του ηλεκτρικού οχήματος. Στο σχήμα 2.11 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα ελέγχου της SRM. Μέσω ενός αισθητήρα θέσης ανιχνεύεται η γωνία θ του δρομέα και κατ' επέκταση η ταχύτητα του δρομέα. Αφού συγκριθεί η πραγματική μετρούμενη ταχύτητα με μια ταχύτητα αναφοράς το σφάλμα e_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 2.11, κατά την οποία στο πρώτο μισό φορτίζει το πηνίο. Στη γωνία θ_{on} οι δύο διακόπτες αρχίζουν να άγουν ανάλογα με τους παλμούς που δημιουργούνται από την υστέρηση, ενώ στη γωνία θ_{off} κλείνουν οι διακόπτες και σταματάει η λειτουργία της SRM σαν κινητήρας. 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 θ_{on} και θ_{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 2.11 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 C_1 σταθερή. Ο βρόγχος ελέγχου φαίνεται στο σχήμα 2.12. 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 2.12 φαίνεται η υιοθέτηση ενός διπλού κλειστού βρόγχου ελέγχου, όπου ο PI1 ελεγκτής χρησιμοποιείται για την μείωση του σφάλματος της τάσης εξαγοντας 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 εξαγει 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).



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

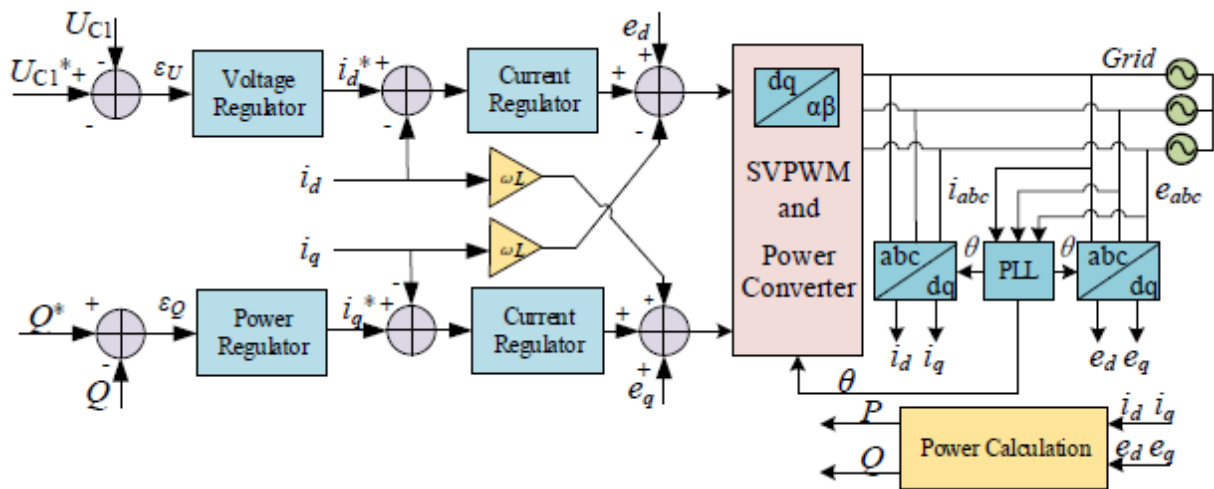
$$d = 1 - \frac{U_{Q8}^*}{U_{c1}} \quad (2.4)$$

Τέλος, η ανάλυση του ελέγχου του AC/DC μετατροπέα στην 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 2.13 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].

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

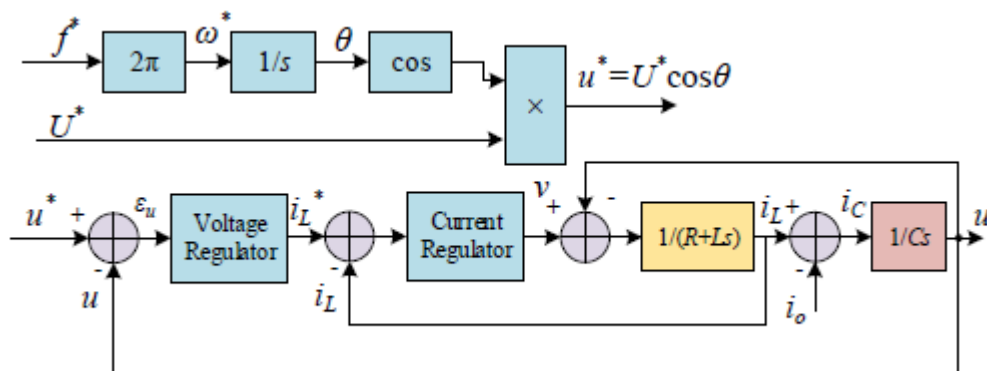
$$Q = \frac{3}{2}(e_q i_q - e_d i_d) \quad (2.6)$$

Το σφάλμα των τάσεων στο πυκνωτή C_1 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 απόζευξη 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 2.13 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 2.14 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.



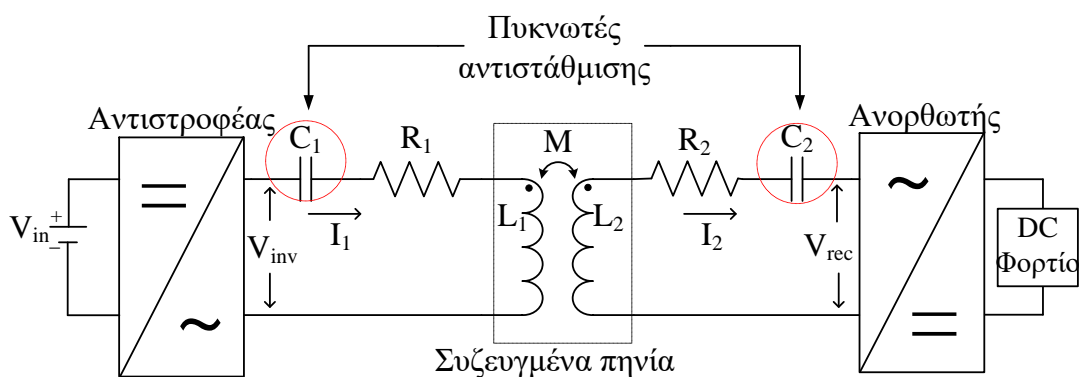
Σχήμα 2.14 Διάγραμμα ελέγχου για τη V2H κατάσταση [10]

2.2.2 Προτεινόμενες τεχνολογίες ασύρματης φόρτισης

Η ασύρματη μεταφορά ισχύος βασίζεται στη μαγνητική ζεύξη δύο ή περισσότερων πηνίων και η δυνατότητα μεταφοράς ισχύος καθορίζεται από την μεταξύ τους αμοιβαία μαγνητική ροή.

Η διαδικασία μεταφοράς ισχύος με αυτή του κλασικού μετασχηματιστή, με τη σημαντική διαφορά ότι σε εφαρμογές ασύρματης φόρτισης τα συζευγμένα πηνία χωρίζονται από μεγάλο διάκενο αέρα [12]. Συνεπώς ενώ στους μετασχηματιστές το ποσοστό της μαγνητικής ροής που δημιουργείται από το ένα τύλιγμα στο άλλο πλησιάζει το 100%, στα WPTS μεγάλο ποσοστό της ροής κλείνει βρόγχο γύρω από το ίδιο τύλιγμα σκέδασης (ροή σκέδασης). Τα WPTS μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, σε εκείνα όπου ο συντελεστής ζεύξης τους είναι μεγαλύτερος από 0,6 τα οποία αποκαλούνται και ισχυρά συζευγμένα και σ' αυτά που συντελεστής ζεύξης τους είναι μικρότερος από 0,6 τα οποία καλούνται και χαλαρά συζευγμένα. Τα χαλαρά συζευγμένα παρουσιάζουν χαμηλή αμοιβαία ροή και υψηλή ροή σκέδασης [12]. Επομένως τα χαλαρά συζευγμένα πηνία έχουν περιορισμένη μεταφορά ισχύος.

Στο σχήμα 2.15 φαίνονται τα δομικά στοιχεία ενός συστήματος ασύρματης φόρτισης. Όπου ένα WPTS αποτελείται από μια πηγή Σ.Τ., έναν υψίσυχο μετατροπέα, το πρωτεύον (εκπομπός) και το δευτερεύον (αποδέκτης) πηνίο μαζί με τα κυκλώματα αντιστάθμισης, έναν ανορθωτή και ένα φορτίο Σ.Τ [12].

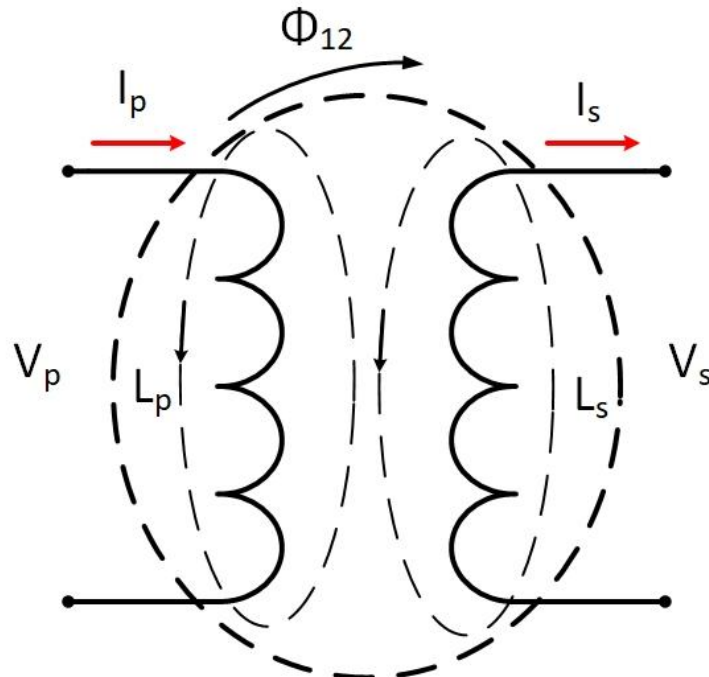


Σχήμα 2.15 Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος μεταφοράς ισχύος [12]

2.2.2.1 Βασικές αρχές της επαγωγικής μεταφοράς ισχύος (IPT)

Η επαγωγική μεταφορά ισχύος εισάχθηκε αρχικά από τον Ampere και τον Faraday αλλά η πιο σημαντική πρόοδος έγινε από τον Tesla, ο οποίος κατάφερε την μεταφορά σημαντικής ποσότητας ισχύος σε AC συχνότητες χρησιμοποιώντας πηνία συντονισμού. Η μεταφορά ισχύος χρησιμοποιώντας τα πηνία γίνεται μέσω του διακένου αέρα μεταξύ τους. Στο σύστημα επαγωγικής

μεταφοράς η ισχύς μεταφέρεται από το πρωτεύον τύλιγμα στο δευτερεύον τύλιγμα μέσω της ηλεκτρομαγνητικής τους αλληλεπίδρασης όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.17. Στην περίπτωση που τα πηνία χαρακτηρίζονται ως ισχυρά συζευγμένα, η αμοιβαία επαγωγή τους είναι μεγαλύτερη από την επαγωγή διαρροής ενώ όταν τα πηνία χαρακτηρίζονται ως χαλαρά συζευγμένα η επαγωγή διαρροής είναι μεγαλύτερη από την μαγνητική επαγωγή.



Σχήμα 2.16 Μεταφορά ισχύος αντισταθμιστή μέσω συζευγμένων πηνίων

Στο σχήμα 2.16 φαίνονται τα δύο πηνία όπου το καθένα διαρρέεται από την δικιά του μαγνητική ροή, η οποία οφείλεται τόσο στο μαγνητικό πεδίο του καθενός όσο και στη μαγνητική ροή λόγω του δεύτερου μαγνητικού πεδίου του δεύτερου πηνίου. Το συνολικό σύστημα των συζευγμένων πηνίων του σχήματος 2.16 καλείται στοιχείο αμοιβαία επαγωγής ή αλληλεπαγωγής (mutual inductance) [15]. Υποθέτουμε ότι το πρώτο πηνίο αποτελείται από N_1 σπείρες και διαρρέεται από ρεύμα I_p και το δεύτερο από N_2 σπείρες και διαρρέεται από ρεύμα I_s με αμοιβαία μαγνητική ροή Φ_{12} .

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday που φαίνεται και στην εξίσωση 2.7 όπου η τάση που αναπτύσσεται στο πηνίο είναι ανάλογη της μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από αυτό, καθώς και του πλήθους των σπειρών.

$$\varepsilon_1 = N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = L_p \frac{di_p}{dt} \quad (2.7)$$

, όπου L_p ορίζεται η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος πηνίου. Επιπλέον προκύπτει ότι:

$$L_p = \frac{N_p \Phi_1}{i_p} \quad (2.8)$$

Επειδή ένα μέρος της Φ_1 εμπλέκει το δεύτερο πηνίο, δημιουργείται η αμοιβαία ροή Φ_{21} . Έτσι η τάση στα άκρα του δεύτερου πηνίου εξαιτίας της μεταβολής της ροή Φ_1 είναι:

$$\varepsilon_{21} = N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} \quad (2.9)$$

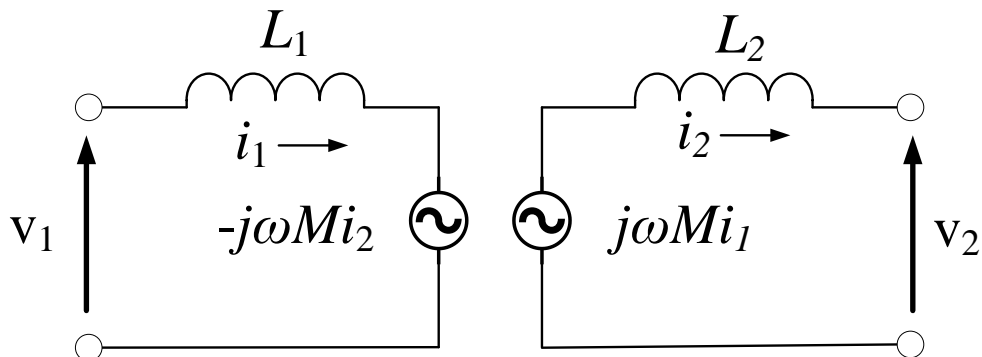
Επίσης σύμφωνα με τις εξισώσεις 2.7-2.9 είναι δυνατό να ορισθεί η αμοιβαία επαγωγή M ως εξής:

$$M = N_2 \frac{\Phi_{21}}{i_p} = N_1 \frac{\Phi_{12}}{i_2} \quad (2.10)$$

Στο σχήμα 2.18 φαίνεται το ισοδύναμο το οποίο περιγράφεται από τις εξισώσεις 2.11 και 2.12.

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (2.11)$$

$$v_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2.12)$$



Σχήμα 2.17 Ισοδύναμο κύκλωμα συζευγμένων πηνίων

Επίσης είναι δυνατό να ορισθεί ο συντελεστής σύζευξης των πηνίων ως εξής:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (2.13)$$

, όπου $0 \leq k \leq 1$

Από το νόμο του Faraday προκύπτει ότι η τάση που επάγεται από το πρωτεύον ότι δευτερεύον τύλιγμα από την εξίσωση:

$$U_2 = j\omega M i_1 \quad (2.14)$$

Αν οριστεί ως V_{oc} και I_{sc} η τάση ανοιχτοκυκλώσεως και το ρεύμα βραχυκυκλώματος αντίστοιχα στο δευτερεύον, τότε η μέγιστη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος δίνεται από την εξίσωση 2.15.

$$P_{max} = \frac{|V_{oc}| |I_{sc}|}{2} \quad (2.15)$$

Η παραπάνω η εξίσωση της μέγιστης ισχύος μπορεί να δοθεί και από την εξίσωση 2.16.

$$P_{max} = \frac{\omega i_1^2 M^2}{2L_s} \quad (2.16)$$

, όμως σύμφωνα με την εξίσωση 2.13 η εξίσωση 2.16 μπορεί να μετασχηματισθεί ως εξής:

$$P_{max} = \frac{\omega i_1^2 k^2 L_2}{2} \quad (2.17)$$

Οπότε το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί στο φορτίο του δευτερεύοντος δίνεται από την εξίσωση 2.17. Επιπροσθέτως, στη περίπτωση των χαλαρά συζευγμένων πηνίων ($k < 0.3$) η ικανότητα μεταφοράς ισχύος περιορίζεται σημαντικά. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο η χρήση αντιστάθμισης η οποία υλοποιείται με πυκνωτές, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να αποσβέσουν τις μεγάλες σκεδάσεις των πηνίων άρα και την άσκοπη απώλεια ενέργειας. Απαραίτητη προϋπόθεση της αντιστάθμιση είναι η λειτουργία του κυκλώματος σε συνθήκες συντονισμού και σε αρκετά υψηλές συχνότητες.

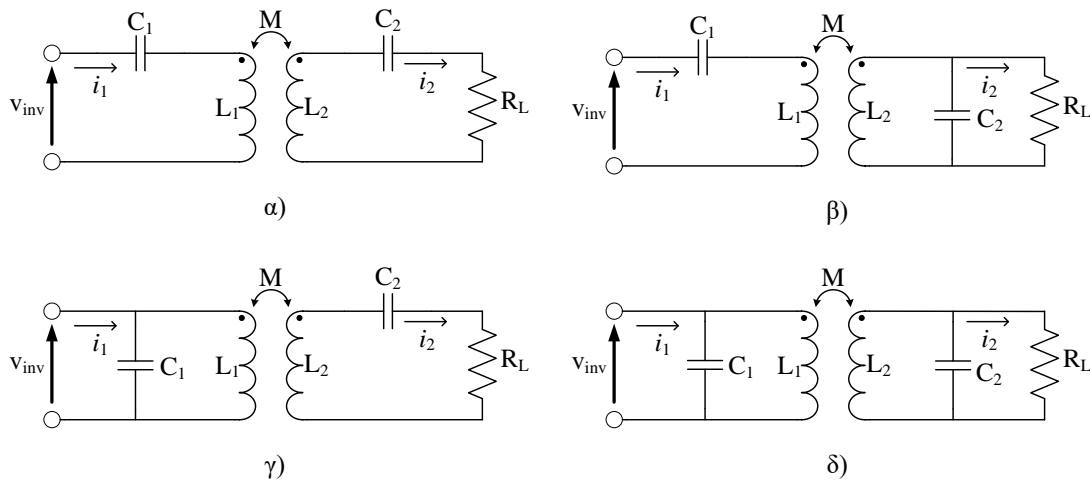
2.2.2.2 Χωρητική αντιστάθμιση και περιγραφή βασικών τοπολογιών

Εξαιτίας της ροής διαρροής και της μαγνητικής επαγωγής το σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος είναι φυσικώς επαγωγικό. Θεωρώντας ότι το εύρος συχνότητας λειτουργίας είναι 10-100 kHz η εμπέδηση που φαίνεται ως φορτίο στη μεριά του δευτερεύοντος έχει επαγωγική φύση, ως εκ τούτου ο συντελεστής ισχύος είναι χαμηλός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, προκειμένου η ισχύς που δίνεται στο φορτίο να είναι περισσότερη, η πηγή παροχής ενέργειας πρέπει να έχει υψηλότερο ρυθμό παροχής ισχύος ($S=VA$ ratings). Επίσης, εξαιτίας των μεγάλων σκεδάσεων που παρουσιάζουν τόσο το πρωτεύον, όσο και το δευτερεύον πηνίο, η απόδοση και η ικανότητα μεταφοράς ισχύος των συζευγμένων πηνίων περιορίζεται σημαντικά. Η μέθοδος η οποία εφαρμόζεται συνήθως για την εξάλειψη των επαγωγικών σκέδασης είναι η χρήση πυκνωτών αντιστάθμισης.

Σήμερα, για τα WPTS υπάρχουν τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κόρον και φαίνονται στο σχήμα 2.18. Ο διαχωρισμός των τοπολογιών έγκειται στην τοποθέτηση των πυκνωτών στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο [13] [14]. Έτσι διακρίνονται οι εξής τοπολογίες:

- Σειράς-Σειράς (Series-Series, SS)
- Σειράς-Παράλληλα (Series-Parallel, SP)
- Παράλληλα-Σειράς (Parallel-Series, PS)
- Παράλληλα-Παράλληλα (Parallel-Parallel, PP)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο σκοπός της αντιστάθμισης στο δευτερεύον κύκλωμα είναι να βελτιώσει την ικανότητα μεταφοράς ισχύος του WPTS. Από την άλλη μεριά, η αντιστάθμιση του πρωτεύοντος κυκλώματος χρησιμοποιείται για να μειωθεί το ποσό της άεργης ισχύος από την πλευρά του αντιστροφέα και να διασφαλιστεί έτσι η μεταφορά ισχύος υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος [13].



Σχήμα 2.18 Βασικές τοπολογίες χωρητικής αντιστάθμισης α) Σειράς-Σειράς (SS), β) Σειράς-Παράλληλα (SP), γ) Παράλληλα-Σειράς (PS), δ) Παράλληλα-Παράλληλα (PP) [13]

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πυκνωτής αντιστάθμισης στο πρωτεύον πηνίο επιλέγεται με τέτοιο τρόπο για όλες τις τοπολογίες, έτσι ώστε η εμπέδηση που θα φανεί από την πλευρά της πηγής, δηλαδή από την πλευρά του αντιστροφέα, να είναι αμιγώς ωμική, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Επιπλέον, με την ωμική συμπεριφορά στο φορτίο του δευτερεύον ο αντιστροφέας θα προσφέρει την ελάχιστη δυνατή άεργο ισχύ, το οποίο σημαίνει ότι διασφαλίζεται ότι το ρεύμα εισόδου και η τάση θα είναι συμφασικά [14]. Επιπροσθέτως, η επιλογή τοπολογίας επηρεάζει δραστικά την επιλογή του πυκνωτή στο πρωτεύον [16].

Αρχικά, παρατηρείται ότι για να αυξηθεί η ικανότητα μεταφοράς ισχύος στο δευτερεύον, το επαγωγικό σύστημα μεταφοράς ισχύος πρέπει να λειτουργεί στη συχνότητα συντονισμού. Επιπλέον, ο δεύτερος πυκνωτής στη μεριά του δευτερεύοντος πηνίου καθορίζεται σύμφωνα με την συχνότητα λειτουργίας του συστήματος με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε η επίδραση της αυτεπαγωγής του δευτερεύοντος πηνίου να αντισταθμίζεται πλήρως σ' αυτή τη συχνότητα. Το αποτέλεσμα αυτού είναι η ανακλώμενη εμπέδηση του δευτερεύοντος κυκλώματος να έχει καθαρά ωμικό χαρακτήρα. Η τιμή της χωρητικότητας για όλες τις τοπολογίες του πυκνωτή δίνεται από την εξίσωση 2.18.

$$C_2 = \frac{1}{\omega_o^2 L_2} \quad (2.18)$$

Κάθε μια από τις παραπάνω τοπολογίες έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που τις κατατάσσει κατάλληλες για συγκεκριμένες εφαρμογές. Αρχικά για την τοπολογία σειράς στο πρωτεύον είναι ευκολότερο να συντονιστεί και λειτουργεί αποδοτικότερα όσο αφορά την απόρριψη αρμονικών [17]. Επιπλέον, η τοπολογία που περιλαμβάνει σύνδεση σειράς στο πρωτεύον δεν απαιτεί επιπρόσθετο πηνίο για τον αντιστροφέα. Η αντιστάθμιση του πρωτεύοντος είναι ανεξάρτητη από το φορτίο, όταν εφαρμόζεται ρύθμιση σειράς στο δευτερεύον, καθώς στη συχνότητα συντονισμού δεν αντανακλάται στο πρωτεύον μια χωρητική αντίδραση ή επαγωγική αντίδραση [18]. Όταν εφαρμόζεται παράλληλη σύνδεση στο πρωτεύον το LC κύκλωμα ενεργεί ως πηγή ρεύματος και έχει χαμηλή καταπόνηση λόγω της τάσης στους πυκνωτές συντονισμού [17]. Επίσης, όταν εφαρμόζεται παράλληλη ρύθμιση στο δευτερεύον αντανακλάται στο πρωτεύον μια χωρητική αντίδραση η οποία εξαρτάται από το φορτίο. Επομένως, ο παράλληλος συντονισμός του πρωτεύοντος εξαρτάται από το συντελεστή σύζευξης και από το φορτίο. Πολλές βιβλιογραφίες επισημαίνουν ότι για την κατάλληλη επιλογή τοπολογίας σειράς ή παράλληλα πρέπει να ληφθεί υπόψη η απόδοση, καθώς και ότι είναι κατάλληλος ο συνδυασμός τους με πιο αναπτυγμένες τοπολογίες [17]. Τέλος, η τοπολογία σειράς-παράλληλα απαιτεί υψηλότερες τιμές πυκνωτών για να επιτύχει καλύτερη μαγνητική σύζευξη και η μέγιστη απόδοση της είναι κατώτερη συγκριτικά με την τοπολογία σειράς-σειράς [13].

2.2.2.3 Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος σε ακινησία

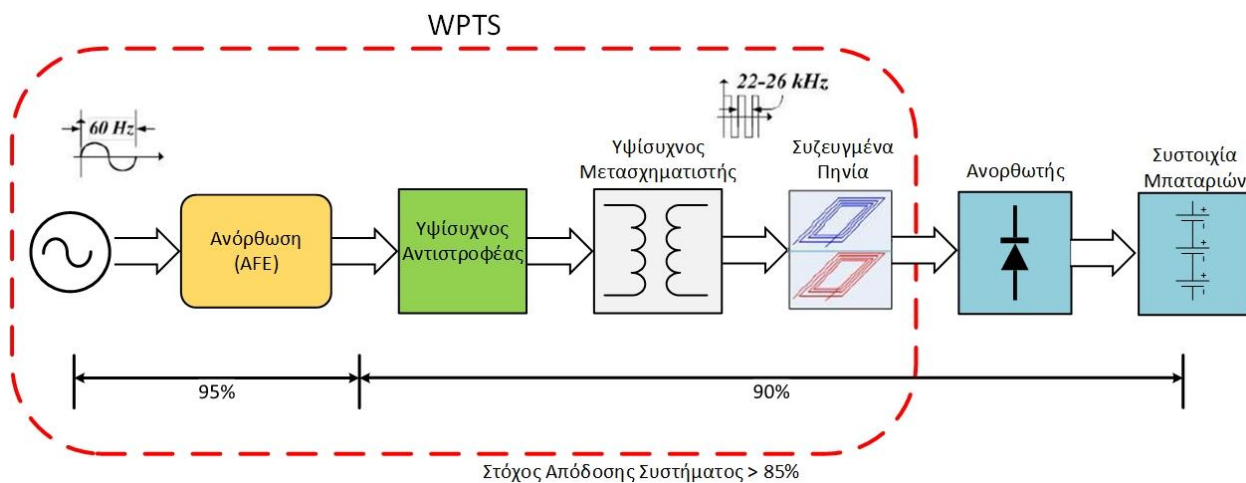
Στο σχήμα 2.20 απεικονίζεται μια από τις πολλές τοπολογίες WPT που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για την ασύρματη μεταφορά ισχύος. Στη τοπολογία του σχήματος 2.20 παρουσιάζεται μια ανόρθωση (AFE) για να διατηρείται η ποιότητα ισχύος του δικτύου, ένας υψίσυχνος αντιστροφέας ισχύος που χρησιμοποιεί IGBT 1200 V για λειτουργία σε ζυγούς από 340 Vdc μέχρι 800 Vdc, ένας υψίσυχνος μετασχηματιστής με πυρήνα χαμηλών απωλειών από φερίτες ο οποίος διαθέτει και μεγαλύτερη πυκνότητα ροής. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι στη παρούσα τοπολογία

χρησιμοποιείται η τοπολογία σειράς-παράλληλα για την λειτουργία σε συντονισμό και ότι στον ανορθωτή στη πλευρά του δευτερεύοντος κυκλώματος χρησιμοποιούνται δίοδοι Sic Schottky (SBD) με χαμηλότερες διακοπτικές απώλειες με μέση απόδοση κοντά στο 99% ανεξαρτήτως συχνότητας λειτουργίας από 10 kHz με 148 kHz [12].

Η AC ισχύς του δικτύου μετατρέπεται σε μια ελεγχόμενη dc τάση από τον AFE συμβάλλοντας στη διόρθωση του συντελεστή ισχύος (PFC). Η dc τάση εφαρμόζεται στην είσοδο του υψίσυχνου αντιστροφέα (Full Bridge) έχοντας προσαρμόσιμο ρυθμό σβέσης και ανοίγματος των διακοπών ισχύος. Μετά τον υψίσυχνου αντιστροφέα το ρεύμα διέγερσης μεταφέρεται στο σειρά συνδεδεμένο πηνίο του πρωτεύοντος κυκλώματος. Τέλος, το ρεύμα διέγερσης οδηγείται σε μια ανορθωτική διάταξη διόδων, όπου ανορθώνεται, φιλτράρεται και εγχέεται σε έναν ζυγό συνεχούς τάσης, ο οποίος αναπαρίσταται από τη συστοιχία μπαταριών του EV [12] [13] [19].

Επιπλέον, είναι δυνατό να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις λειτουργίας για την γέφυρα διόδων όσο αναφορά το dc ρεύμα εξόδου της που εγχέεται στο ζυγό Σ.Τ [13].

- Συνεχής ροή ρεύματος (Συνεχής Αγωγή CCM): η περίπτωση αυτή παρουσιάζεται όταν τα χαρακτηριστικά του WPTS και του φορτίου «αναγκάζουν» τη γέφυρα ανόρθωσης να λειτουργεί αδιάλειπτα. Άρα η τάση στο σημείο σύνδεσης του αντιστροφέα είναι τετραγωνικής μορφής, με συχνότητα ίση με τη διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα. Επιπλέον, το dc ρεύμα δεν έχει μηδενικά διαστήματα πέραν την καθυστέρηση της μετάβασης των διόδων.
- Ασυνεχής ροή ρεύματος (Ασυνεχής Αγωγή DCM): η περίπτωση αυτή μπορεί να παρουσιαστεί είτε σε μεγάλο λόγο τάσεων εξόδου και εισόδου του συστήματος είτε σε λειτουργία μακριά από τον συντονισμό.

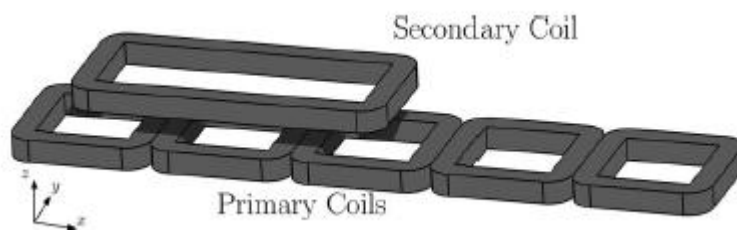


Σχήμα 2.19 WPTS για φόρτιση σε ακινησία ενός EV [12]

2.2.2.4 Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος όταν κινείται

Το μέλλον όμως της ηλεκτροκίνησης δεν σταματάει μόνο στη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων όσο αυτά βρίσκονται σε ακινησία, αλλά ερευνητικές προσπάθειες γίνονται για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς βρίσκονται σε κίνηση. Το CET αποτελεί την ιδανική λύση για την βελτίωση των συστημάτων που απαιτούν μεταφορά ισχύος σε κινούμενα φορτία. Τέτοιες εφαρμογές θεωρούνται οι μεταφορές Maglev τα οποία είναι τρένα που χρησιμοποιούν δύο είδη μαγνητών όπου το ένα απωθεί και σπρώχνει το τρένο προς τα πάνω ενώ το άλλο είδος μαγνητών αναγκάζει το τρένο να κινηθεί προς τα μπροστά εκμεταλλευόμενο την απουσία της τριβής του εδάφους, άλλη εφαρμογή μπορούν να θεωρηθούν οι ανελκυστήρες χωρίς σχοινιά και τα ηλεκτρικά οχήματα PEV κατά τη διάρκεια της κίνησης τους. Το κοινό σημείο όλων των προαναφερθέντων εφαρμογών είναι η μεταφορά ενέργειας ανάμεσα στο σταθερό κινούμενο μέρος της συσκευής, το οποίο σήμερα καλύπτεται είτε από συνδέσεις καλωδίων είτε από μπαταρίες. Οι σημερινές επιλογές για την μεταφορά ενέργειας σε κινούμενα φορτία έχουν περιορισμούς όπως την μείωση της κινητικότητας της συσκευής [20].

Τα τελευταία χρόνια, για την ανάπτυξη του προαναφερθέντος συστήματος η έρευνα προσανατολίζεται στους συρόμενους μετασχηματιστές (Sliding transformers), οι οποίοι έγιναν γνωστοί για την αντικατάσταση των καλωδίων στους γραμμικούς κινητήρες. Οι συρόμενοι μετασχηματιστές παρέχουν ανέπαφη σύνδεση ανάμεσα στο στατικό μέρος και στο κινούμενο φορτίο και μπορούν να παρέχουν/μεταφέρουν σταθερή ισχύ της τάξης των μερικών kW. Το βασικότερο μειονέκτημα τους είναι το μεγάλο μέγεθος της μεριάς του πρωτεύοντος στο οποίο το δευτερεύον σύρεται κατά μήκος. Το μακρύ πηνίο του πρωτεύοντος δημιουργεί μια επαγωγική διαρροή, η οποία μειώνει την απόδοση του συστήματος CET, όμως με την σωστή κατάτμησή του πηνίου του πρωτεύοντος υπερνικάτε το μειονέκτημα της χαμηλής απόδοσης. Από την άλλη μεριά, το μειονέκτημα της περιορισμένης κινητικότητας παραμένει, το οποίο αντιμετωπίζεται με την υλοποίηση οριζόντιου διακένου ανάμεσα στο πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα [20].



Σχήμα 2.20 Sliding transformer [20]

2.3 Δομή έξυπνου δικτύου και ηλεκτρικού οχήματος

Μέχρι τώρα έχουν αναλυθεί ο σκοπός, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα αλλά και οι 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 αναπτυσσόμενων τρόπων επικοινωνίας τους.

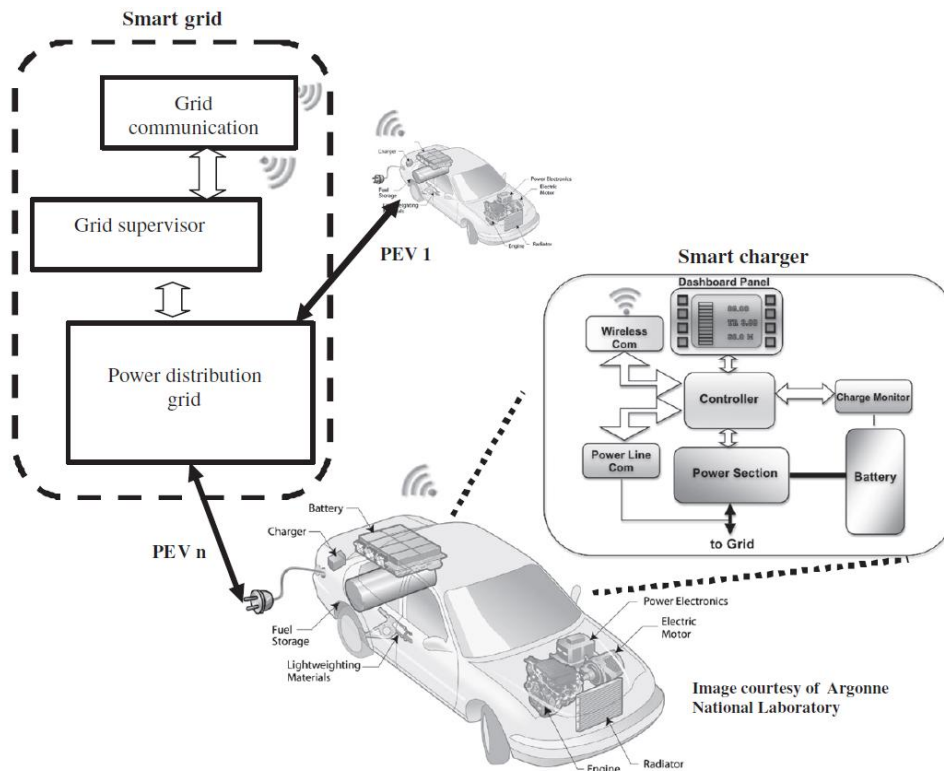
2.3.1 Έξυπνη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Ευρέως γνωστές είναι 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 αποσυμφόρηση 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 2.22 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 της 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 2.21 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 συνεχής 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 διεύθυνση των ηλεκτρικών οχημάτων, ωστόσο υπάρχουν 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.

3. Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για λειτουργίες G2V και V2G

3.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο 3 ασχολείται με την 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.

3.2 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.

3.2.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα και ηλεκτρικά οχήματα

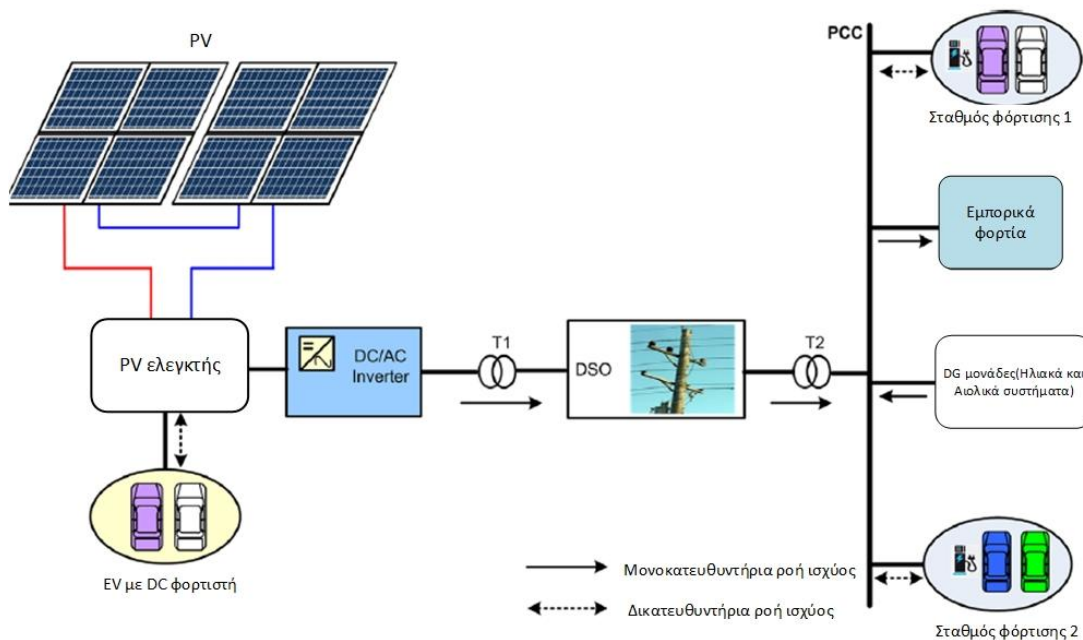
Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά έχει ήδη δείξει ότι είναι μία από τις πιο υποσχόμενες πηγές RES. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ συλλέγουν ηλιακή ενέργεια την οποία την παρέχουν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Με την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων να μεγαλώνει, τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι πιο 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 φωτοβολταϊκά συστήματα. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να αναφερθούν κάποιες βασικές αρχές για την συνεργασία των φωτοβολταϊκών στις κατοικίες με φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων. Τα τρία βασικά στοιχεία που καθορίζουν και το μέγεθος ενός φωτοβολταϊκού 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 3.1

απεικονίζεται το προαναφερθέν σενάριο, όπου σε έναν χώρο στάθμευσης οχημάτων έχει εγκατασταθεί ένα φωτοβολταϊκό 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 3.1 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].

3.2.2 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 ηλεκτρικής 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.

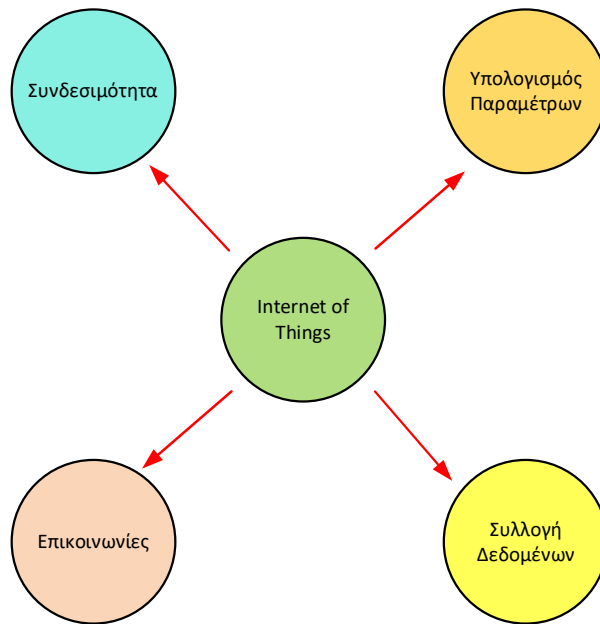
Κεφάλαιο 5ο

4. IOT και διαδικτυακές εφαρμογές στην φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

4.1 Εισαγωγή

Αρχικά ως IOT ορίζεται η σύνδεση πολλών πολύπλοκων συσκευών, όπως ηλεκτρονικών, αισθητήρων κ.τ.λ. Αυτές οι συσκευές συνδέονται και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω ενός μεγάλου εύρους ασύρματου δικτύου. Η κύρια ιδέα συνοψίζεται στο ότι τα συνδεδεμένα αντικείμενα μοιράζονται πληροφορίες μεταξύ τους και λειτουργούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Ως ακολούθως, το IOT το οποίο αποτελεί ένα ολοκληρωμένο κομμάτι του συνολικού διαδικτύου θα μπορούσε να οριστεί ως μια δυναμική παγκόσμια υποδομή δικτύου με δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης παραμέτρων βάσει προτύπων και δια λειτουργικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας όπου έχουν φυσικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούν έξυπνες συσκευές, οι οποίες είναι ενσωματωμένες απρόσκοπτα στο δίκτυο πληροφοριών [16].

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του IOT είναι ότι επιτρέπει στους χρήστες των συσκευών να συνδέονται οποιαδήποτε στιγμή, από οποιοδήποτε μέρος, με οποιοδήποτε μέσο και να χρησιμοποιείται οποιαδήποτε υπηρεσία. Στο Σχ. 3.1 φαίνονται οι λειτουργίες, οι οποίες περιλαμβάνονται στις υπηρεσίες που προσφέρει το IOT και σχετίζονται με τη αλληλεπίδραση μεταξύ συσκευών και ανθρώπων, με την συλλογή δεδομένων, υπολογισμοί παραμέτρων και επικοινωνίες μεταξύ των υποσυστημάτων.



Σχήμα 4.1 Internet of Things.

Το IOT ενσωματώνει μια βιώσιμη αλληλεπίδραση μεταξύ του πραγματικού/φυσικού και του ψηφιακού/εικονικού κόσμου, το οποίο σημαίνει ότι φυσικά υποσυστήματα έχουν ψηφιακά μέρη. Συμπερασματικά, μέσω των ψηφιακών μερών και για τις ανάγκες των εφαρμογών χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι ανάληψης απόφασης (decision—making algorithm) με σκοπό την άμεση απόκριση σε φυσικά φαινόμενα βασιζόμενοι στις τελευταίες πληροφορίες που συλλέχθηκαν. Με βάση τα προαναφερθέντα, οι δομές των IOT επιτρέπουν τον συνδυασμό έξυπνων συσκευών (π.χ. αισθητήρες με ασύρματες επικοινωνίες, κινητές ρομποτικές συσκευές κ.τ.λ.), τεχνολογίες αισθητήρων δικτύων και ανθρώπων χρησιμοποιώντας δια λειτουργικές επικοινωνίες και πρωτόκολλα δημιουργώντας ένα δίκτυο με δυναμική απόκριση.

Με την αύξηση των πωλήσεων παγκοσμίως στις αυτοκινητοβιομηχανίες από το 2016 και ξεπερνώντας τα 75-80 εκατομμύρια πωλήσεις ετησίως ο τομέας της αυτοκίνησης έγινε μία από τις μεγαλύτερες κατασκευαστικές βιομηχανίες. Σύμφωνα με υπολογισμούς, εκτιμάται ότι οι πωλήσεις αυτοκινήτων απέφεραν 3 τρισεκατομμύρια δολάρια το 2017 [17]. Με βάση τη παραπάνω εκτίμηση, η οποία δείχνει την σημαντικότητα της αυτοκίνησης, η έλευση του IOT αναμένεται να ανοίξει νέους δρόμους τόσο για τους κατασκευαστές όσο και για τους αγοραστές αυτοκινήτων. Οι δυνατότητες που προσφέρει ένα τέτοιο δίκτυο είναι τεράστιες με κύρια την επανάσταση που έφεραν στην αλληλεπίδραση των χρηστών με τα οχήματά τους. Ωστόσο, οι εφαρμογές στο τομέα της αυτοκίνησης συγκεντρώνονται στα εξής [17]:

- Στη σύνδεση των αυτοκινήτων μεταξύ τους, το οποίο διευκολύνει την μετάδοση πληροφοριών μεταξύ τους μέσω των γρήγορων επικοινωνιών μεταξύ των οχημάτων,

-
- το σύστημα συντήρησης, σχετίζεται με τους αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε διαφορετικά μέρη του αυτοκινήτου. Το IOT βοηθά τους χρήστες να ελέγχουν σε διάφορα σημεία τη λειτουργία πριν συμβεί κάποιο σφάλμα,
 - τα αυτόνομα αυτοκίνητα, τα οποία αναλαμβάνουν τις λειτουργίες της οδήγησης και του παρκαρίσματος,
 - επιπλέον μία από τις κυριότερες λειτουργίες του IOT στο τομέα της αυτοκίνησης είναι η εφαρμογή του στο τομέα της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, όπου ενσωματώνονται λειτουργίες αφενός για τη παρακολούθηση διαφόρων υποσυστημάτων όπως το SoC της μπαταρίας και αφετέρου τη χρήση έξυπνων εφαρμογών που αναφέρονται στη διευκόλυνση του χρήστη κατά τη διάρκεια της φόρτισης όπως είναι η διαδικασία χρέωσης.

Σε αντίθεση με τα προαναφερθέντα στον τομέα της αυτοκίνησης κινείται τόσο η ερευνητική κοινότητα όσο και η πληθώρα των αυτοκινητοβιομηχανιών, οι οποίες υποστηρίζουν την επέκταση της εν λόγω βιομηχανίας προς τα ηλεκτρικά οχήματα τα οποία γίνονται μια βιώσιμη εναλλακτική των αυτοκινήτων με μηχανή εσωτερικής καύσης [18]. Τα ηλεκτρικά οχήματα κέρδισαν γρήγορα δημοτικότητα ως μια καινούργια τεχνολογία αιχμής εξαιτίας των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων αλλά και των επιπρόσθετων πλεονεκτημάτων π.χ. νέες αποθήκες ενέργειας, που προσφέρουν με την ενσωμάτωση τους στα έξυπνα δίκτυα/υπέρ-δίκτυα. Ειδικότερα, η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στη δομή των έξυπνων δικτύων προσφέρει την δυνατότητα της ασφαλούς λειτουργίας και της επιτήρησης αυτών. Με την εισαγωγή του IOT οι λειτουργίες τόσο της απομακρυσμένης παρακολούθησης, της διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων και της απομακρυσμένης παρακολούθησης της κατάστασης φόρτισης των μπαταριών (SoC) όσο και η πληθώρα άλλων λειτουργιών είναι εφικτή. Παρόλα αυτά ο αριθμός των σταθμών φόρτισης που υπάρχουν σε μια πόλη είναι χαμηλός με αποτέλεσμα σε μια μαζική ζήτηση από ηλεκτρικά οχήματα να μην είναι ικανός να καλύψει τις διάφορες απαιτήσεις σε ζήτηση ή στους σταθμούς φόρτισης να υπάρχει υπερβολική συσσώρευση οχημάτων εξαιτίας της σχετικά αργής φόρτισης. Συμπερασματικά, υπάρχει η ανάγκη είτε της διαμόρφωσης αλγορίθμων για την υλοποίηση της έξυπνης φόρτισης (smart charging) είτε της εξαγωγής της συχνότητας χρήσης των σταθμών φόρτισης, πληροφορία που αποθηκεύεται σε cloud και είναι προσβάσιμη από τον οδηγό του κάθε οχήματος [18].

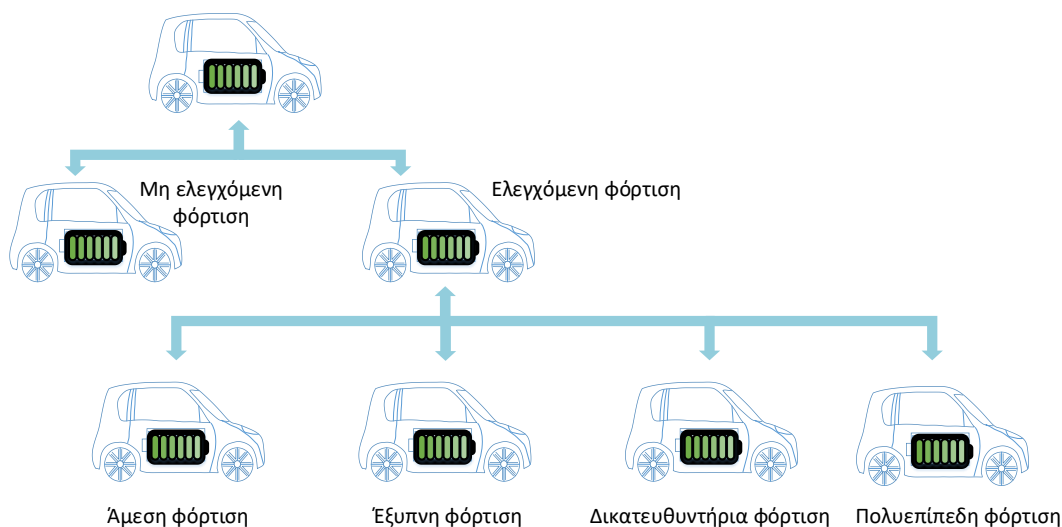
Τέλος, με γνώμονα την μετάβαση από τη συμβατική εποχή της ανεξέλεγκτης χρήσης ορυκτών καυσίμων και συνεπώς οχημάτων με μηδενική προστασία του περιβάλλοντος από ρύπους, στην εποχή της ηλεκτροκίνησης με την ελαχιστοποίηση του αποτυπώματος άνθρακα, το IOT έρχεται να γεφυρώσει το χάσμα ανθρώπου και μηχανής. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω έξυπνων εφαρμογών που

προσφέρουν ευελιξία τόσο στον οδηγό παρακολουθώντας τη διαδικασία της φόρτισης κ.τ.λ. όσο και στην επιχείρηση διευκολύνοντας διαδικασίες όπως η τιμολόγηση [3].

4.2 ΙΟΤ και φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθούν οι μέθοδοι φόρτισης/εκφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων βασισμένες στην ικανότητα του δικτύου να διαχειρίζεται τα ηλεκτρικά οχήματα ως φορτία. Ακόμα, μελετάτε η έννοια του V2G, όπου η κύρια ιδέα είναι ότι όταν η ζήτηση αυξάνεται, οι μπαταρίες των παρκαρισμένων οχημάτων εγχέουν ισχύ στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [19]. Μ' αυτόν τον τρόπο, τα συστήματα V2G παρέχουν μία βοηθητική πηγή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο διανομής.

Καθώς η αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται και οι υποδομές των σημερινών σταθμών φόρτισης να μη είναι επαρκής για την κάλυψη της ζήτησης, δημιουργούνται σοβαρές προκλήσεις που αφορούν τόσο την ικανότητα κάλυψης των αναγκών όσο και τεχνικά θέματα που αφορούν τις συνέπειες της ενσωμάτωσης ηλεκτρικών οχημάτων που αφορούν την ποιότητα ισχύος, την ρύθμιση της τάσης κ.τ.λ. Η μέθοδος της φόρτισης/εκφόρτισης εξαρτάται αφενός από το μέγεθος του αριθμού στάθμευσης και αφετέρου από την τοποθεσία των παρκαρισμένων οχημάτων, καθώς και από τη ζήτηση του φορτίου. Στο Σχ. 3.2 απεικονίζεται ένα γενικό σχεδιάγραμμα φόρτισης/εκφόρτισης, το οποίο χωρίζεται στην ελεγχόμενη και μη ελεγχόμενη φόρτιση. Η ελεγχόμενη φόρτιση χωρίζεται σε 4 υποκατηγορίες την άμεση, την δικατευθυντήρια, την έξυπνη και την πολυεπίπεδη ελεγχόμενη φόρτιση.



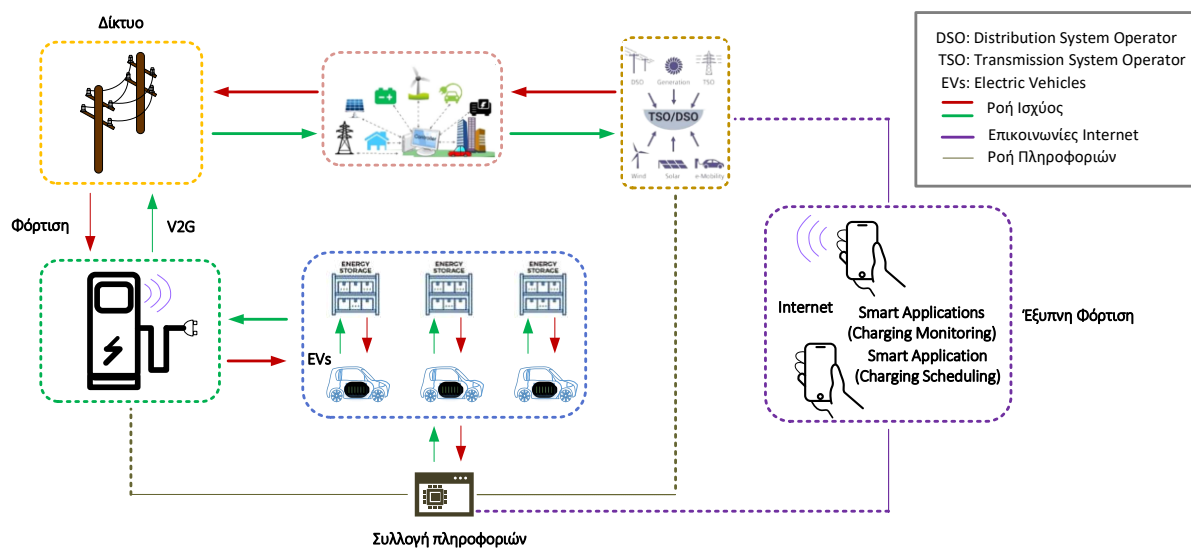
Σχήμα 4.2 Είδη φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων [19].

4.2.1 Μέθοδος συμβατικής φόρτισης (μη ελεγχόμενη φόρτιση)

Στη μη ελεγχόμενη φόρτιση/εκφόρτιση, δεν συνίσταται ο προγραμματισμός κάποιων απαιτούμενων ηλεκτρικών οχημάτων για φόρτιση. Σ' αυτού του είδους την φόρτιση κάποιο ηλεκτρικό όχημα αρχίζει τη φόρτιση αμέσως μετά την σύνδεση του στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είτε κατά τη διάρκεια αιχμής φορτίου είτε εκτός αιχμής φορτίου. Η προαναφερθείσα κεντρική ιδέα έχει ως αποτέλεσμα την απλότητα της μεθόδου εκθέτοντας το ηλεκτρικό όχημα απευθείας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, σ' αυτή τη μέθοδο ο διαχειριστής του δικτύου δεν λαμβάνει καμία πληροφορία σχετικά είτε σχετικά με τον χρήστη (οδηγός) είτε με την κατάσταση του συστήματος (κατάσταση ηλεκτρικού οχήματος), το οποίο ενδέχεται στη πρόκληση σφαλμάτων που σχετίζονται με την σταθερότητα του δικτύου (stability), την ποιότητα ισχύος, την απόδοση και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC- State of Charge) [19]. Συμπερασματικά, σε μια μεγάλη κλίμακα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (π.χ. χώροι στάθμευσης) η επίδραση αυτών είναι κρίσιμη τόσο για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για τις συσκευές αποθήκευσης των ηλεκτρικών οχημάτων, οποίες σε συνεργασία με τις ΑΠΕ αυξάνουν την αξιοπιστία του δικτύου. Επιπλέον, στη μη ελεγχόμενη φόρτιση το ηλεκτρικό όχημα φορτίζεται αμέσως μετά τη σύνδεση του ή αμέσως μετά τη πρόσθεση μιας σκόπιμης καθυστέρησης από τον χρήστη με σκοπό την έναρξη της διαδικασίας σε περιόδους μη αιχμής φορτίου.

4.2.2 Ελεγχόμενη φόρτιση

Η ελεγχόμενη μέθοδος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων κέρδισε γρήγορα δημοτικότητα τόσο από την ερευνητική κοινότητα όσο και από τον διαχειριστή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος πλέον έχει τη δυνατότητα προγραμματισμού της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό την αποφυγή προβλημάτων με την ποιότητα ισχύος και με την σταθερότητα του συστήματος κατά τη διάρκεια ικανοποίησης των απαιτήσεων φόρτισης του χρήστη. Στο Σχ. 3.3 φαίνεται η καθολική απεικόνιση της δομής της ελεγχόμενης φόρτισης.



Σχήμα 4.3 Μέθοδος ελεγχόμενης φόρτισης/εκφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων [19].

Αναφορικά με τις υποκατηγορίες της ελεγχόμενης, συμπεριλαμβάνεται η άμεσα ελεγχόμενη φόρτιση. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη τις αποφάσεις των καταναλωτών. Η δημοτικότητα της μεθόδου έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας των ρυθμιζόμενων τιμών που προσφέρει η ηλεκτρική αγορά ενέργειας ως κίνητρο [19]. Η αυξανόμενη τιμή της ενέργειας ωθεί μερικά ηλεκτρικά οχήματα στη φόρτιση εκτός των ωρών αιχμής όπου το δίκτυο έχει περίσσεια ενέργειας. Η μετατόπιση του φορτίου χωρικά αφήνεται στην απόφαση του χρήστη του ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο είναι το χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου [20]. Η άμεσα ελεγχόμενη φόρτιση υλοποιείται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται στη διαφορετική χρέωση της φόρτισης σε περιόδους αιχμής της ζήτησης και σε περιόδους εκτός αιχμής. Ο δεύτερος τρόπος έγκειται στη παροχή πρόσθετων υπηρεσιών όπως την χρέωση σε πραγματικό χρόνο μέσω αλγορίθμου που λαμβάνει υπόψη τον χρόνο χρήσης (χρόνος φόρτισης) και την τιμή της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο κάθε χρονική στιγμή. Ο αλγόριθμος χρέωσης σε πραγματικό χρόνο λαμβάνει υπόψη αρχικά την ενέργεια που καταναλώθηκε και το κόστος φόρτισης αναφορικά με το δίκτυο διανομής στο οποίο εξελίχθηκε η διαδικασία. Δεύτερον, ο ιεραρχικός έλεγχος ηλεκτρικών οχημάτων, στον οποίο το ανώτερο στρώμα του ελεγκτή ελέγχει απευθείας τον ελεγκτή χαμηλότερου επιπέδου, με αποτέλεσμα τον έλεγχο κόστους με βάση την αγορά και την διαχείριση ηλεκτρικών οχημάτων.

Όσον αφορά την δικατευθύντηρια φόρτιση, αυτή η μέθοδος ενισχύει την λειτουργία V2G κατά την οποία τα ηλεκτρικά οχήματα εγχέουν ενέργεια στο δίκτυο. Η παροχή ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι βολική τόσο για τους χρήστες όσο και για το ίδιο το δίκτυο από τη στιγμή που έρευνες έχουν δείξει ότι μένουν παρκαρισμένα το 90-95% της συνολικής τους ζωής [21]. Επίσης υπάρχουν ποικίλες λειτουργίες της δικατευθύντηριας φόρτισης που ενισχύουν μακροπρόθεσμα τα πλεονεκτήματα της V2G λειτουργίας εκτός από την παροχή ενέργειας σε περιόδους αιχμής της

ζήτησης, όπως είναι η σύνδεση/αποσύνδεση απ' το δίκτυο και η λειτουργία ομαλής εκκίνησης/διακοπής. Αυτές οι λειτουργίες παρέχουν στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων μειωμένα κόστη φόρτισης και ομαλότερη τάση εξόδου. Επιπρόσθετα, τα ηλεκτρικά οχήματα στην δικατευθυντήρια φόρτιση έχουν τον ρόλο του εξωτερικού μέσου αποθήκευσης γεφυρώνοντας το χάσμα ανάμεσα στην άγνωστη πηγή τροφοδοσίας και στην απρόσμενη υψηλή ζήτηση.

Στα πλαίσια της ελεγχόμενης φόρτισης ανήκει και η μέθοδος του πολυεπίπεδου ιεραρχικού ελέγχου, η οποία διαφέρει σε σχέση με τις προαναφερθείσες. Αυτή η μέθοδος αποτελείται από έναν εξελιγμένο αλγόριθμο, ο οποίος συνδυάζοντας τον έλεγχο μέσω γενετικού αλγορίθμου και τεχνικές ελέγχου από τεχνητή νοημοσύνη παρουσιάζει έναν πολυεπίπεδο ιεραρχικό αλγόριθμο λήψης αποφάσεων βάση προτεραιότητας. Ο μηχανισμός λειτουργίας της ιεραρχικής μεθόδου έγκειται στην οργάνωση τεσσάρων διακριτών τομέων διανομής σύμφωνα με την φόρτιση της τρέχουσας υποδομής, τις προτεραιότητες της τρέχουσας υποδομής π.χ. η κατάσταση SoC των μπαταριών, το κόστος φόρτισης και ο χρόνος χρήσης. Κατά τη διάρκεια της αιχμής αυτά τα τμήματα συνδέονται με το δίκτυο, ενώ αναγνωρίζουν τα ποσοστά προσφοράς και ζήτησης σύμφωνα με τον μεγαλύτερο αριθμό συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων που είναι σταθμευμένα στην περιοχή. Όταν υπάρχει μια υψηλή διαφορά μεταξύ της ζήτησης και της παροχής, όλοι οι aggregator επικοινωνούν μεταξύ τους για να καθορίσουν τον μέγιστο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία μπορούν να εγγέουν ισχύ στο δίκτυο.

4.2.3 Έξυπνη φόρτιση (Smart Charging)

Η έξυπνη φόρτιση παραμένει το κλειδί της διαφοροποίησης και της εξέλιξης του τομέα της αυτοκίνησης, δίνοντας ευελιξία στην αναπτυσσόμενη επιχείρηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Για τους διαχειριστές των σταθμών φόρτισης υπάρχουν ξεκάθαρα οφέλη της χρήσης της έξυπνης φόρτισης, τα οποία συμπεριλαμβάνουν την μείωση των λειτουργικών εξόδων και το κόστος κεφαλαίου. Επιπλέον, οι χρήστες δεν χρειάζεται να επεκτείνουν την σύνδεση τους στο δίκτυο πληρώνοντας μηνιαίες χρεώσεις. Μία δημοφιλής πλατφόρμα που χρησιμοποιεί τη λογική της έξυπνης φόρτισης θέτοντας όρια στη χρέωση είναι η GreenFlux [22]. Με την μαζική παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων καθίσταται αναγκαία η μαζική παραγωγή σημείων φόρτισης και ως εκ τούτου η διείσδυση της έξυπνης φόρτισης είναι αναγκαία. Αυτό συμβαίνει γιατί η ηλεκτρική φόρτιση γίνεται πιο διαδεδομένη με την κλιμάκωση τόσο της αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων όσο και των επιχειρήσεων, καθώς η έξυπνη φόρτιση παρακολουθεί την αυξανόμενη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων που φορτίζουν ταυτόχρονα εξασφαλίζοντας ότι τα όρια της διαθεσιμότητας ενέργειας και της χωρητικότητας του οχήματος δεν ξεπερνιούνται. Ταυτόχρονα, η έξυπνη φόρτιση παρέχει ευελιξία

στην ενσωμάτωση ΑΠΕ. Από την στιγμή που η παραγωγή των ΑΠΕ είναι λιγότερο προβλέψιμη, τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν μια ιδανική έξοδο για την πλεονάζουσα παραγωγή ενέργειας. Συνεπώς, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας μπορούν να προσαρμόσουν τα επιχειρηματικά τους μοντέλα για την χρησιμοποίηση της συνεργασίας των ηλεκτρικών οχημάτων με τις ΑΠΕ, ενώ οι τελικοί χρήστες μπορούν επίσης να επωφεληθούν από τις χαμηλότερες τιμές της ενέργειας [22]. Τέλος, μέρος της έξυπνης φόρτισης προβλέπει οι χρήστες να μην επεμβαίνουν στη διαδικασία της χρέωσης της φόρτισης, αντ' αυτού η διαδικασία της χρέωσης αναλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από τον αλγόριθμο διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ενώ οι χρήστες αποδέχονται τις αλλαγές έχοντας μια εφαρμογή ανάλογα τον πάροχο που θα τους ενημερώνει για την εξέλιξη της φόρτισης.

Η έξυπνη φόρτιση/εκφόρτιση μπορεί να υλοποιηθεί μόνο σε πραγματικό χρόνο, καθώς οι μηχανισμοί ελέγχου των σταθμών φόρτισης, των ηλεκτρικών οχημάτων και των επικοινωνιών με το υπόλοιπο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούν μακροπρόθεσμες λύσεις και βοηθητικές υπηρεσίες. Η έξυπνη φόρτιση αναφέρεται σε ένα σύστημα μέσω του οποίου η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στα ηλεκτρικά οχήματα και στους σταθμούς φόρτισης διαμοιράζεται από τους σταθμούς φόρτισης στον διαχειριστή του συστήματος διανομής/μεταφοράς. Επιπρόσθετα, η έξυπνη φόρτιση επιτρέπει στον διαχειριστή του σταθμού φόρτισης την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τον περιορισμό της απομακρυσμένης χρήσης των συσκευών τους με σκοπό τη βελτιστοποίηση της αντιμετώπισης της ζήτησης ενέργειας. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης και οι έξυπνοι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται στην έξυπνη φόρτιση συνήθως αποσκοπούν στη διατήρηση της ποιότητας ισχύος και της ευστάθειας μέσα σε αποδεκτά οριακά επίπεδα αποφεύγοντας τις αστάθειες του δικτύου και ικανοποιώντας τα κριτήρια φόρτισης [19]. Οι παράμετροι που μελετώνται με σκοπό τη βελτιστοποίηση της έξυπνης φόρτισης είναι η ισχύς φόρτισης (ανταλλαγές ισχύος με το δίκτυο και με τα ηλεκτρικά οχήματα με μεγαλύτερη απόδοση), η πρόβλεψη της τιμής φόρτισης και η κατάσταση SOC της μπαταρίας κάθε στιγμή.

4.3 Αποδοτικό σχήμα ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με την ενσωμάτωση της τεχνολογίας IoT

Μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές της ασύρματης μεταφοράς ισχύος είναι η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία βρίσκεται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια και γνωρίζει ραγδαία εξέλιξη. Αυτό οφείλεται, όπως συζητήθηκε εκτενέστερα και στο Κεφάλαιο 2, στο γεγονός ότι η ασύρματη φόρτιση προσφέρει μια ευέλικτη, ασφαλή και φιλική προς τον χρήστη διαδικασία φόρτισης με χαμηλά κόστη συντήρησης εξαιτίας της απουσίας

μηχανικών κινητών μερών. Σε αυτό το πλαίσιο, η ενσωμάτωση της ασύρματης φόρτισης στα ηλεκτρικά οχήματα, μπορεί να αποτελέσει ένα βήμα προς την περαιτέρω διεύρυσή τους στη διεθνή αγορά.

Επιπρόσθετα, το ίδιο το προφίλ φόρτισης του συσσωρευτή θέτει επίσης σημαντικές προκλήσεις στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης, μιας και το φορτίο μεταβάλλεται συνεχώς. Επομένως, ένα σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος το οποίο είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί βέλτιστα για έναν συγκεκριμένο συντελεστή σύζευξης και για ένα συγκεκριμένο φορτίο, θα παρουσιάσει αναπόφευκτα κακή απόδοση σε περίπτωση μεταβολής του φορτίου ή αστοχίας στην ευθυγράμμιση των πηνίων, αφού η μέγιστη απόδοση δεν μπορεί να επιτευχθεί σε κάθε σημείο λειτουργίας και σε κάθε τιμή του συντελεστή σύζευξης. Ο έλεγχος της ροής της ισχύος και η επίτευξη του μέγιστου βαθμού απόδοσης υλοποιούνται παρεμβαίνοντας είτε στην πλευρά του πρωτεύοντος, είτε στην πλευρά του δευτερεύοντος ή και στις δύο πλευρές, σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 2. Ωστόσο, η πλευρά του δευτερεύοντος είναι επιφορτισμένη ούτως η άλλως και με την υλοποίηση του προφίλ φόρτισης των συσσωρευτών. Επομένως, όταν εφαρμόζεται η διαδικασία της μεγιστοποίησης του βαθμού απόδοσης στην πλευρά του δευτερεύοντος καθίσταται δύσκολο να επιτευχθούν ταυτόχρονα η ρύθμιση του ρεύματος και της τάσης φόρτισης και οι συνθήκες βέλτιστης προσαρμογής του φορτίου. Επομένως, η διαδικασία μεγιστοποίησης του βαθμού απόδοσης είναι προτιμότερο να μην παρεμβαίνει στην πλευρά του δευτερεύοντος. Εάν η διαδικασία της μεγιστοποίησης του βαθμού απόδοσης αποσυνδεθεί από την πλευρά του δευτερεύοντος, τότε το σύστημα AMI μπορεί να λειτουργεί πάντα στη βέλτιστη απόδοση και υπό συνθήκες ομαλών μεταβάσεων στη βαθμίδα του αντιστροφέα, με τη βοήθεια τεχνικών εύρεσης του σημείου μέγιστης απόδοσης (Maximum Efficiency Tracking, MET). Στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνονται και μελετώνται διάφοροι αλγόριθμοι εύρεσης του σημείου μέγιστης απόδοσης, ενώ υπάρχουν και άλλα σχήματα ελέγχου, τα οποία περιλαμβάνουν είτε την εύρεση του ελάχιστου ρεύματος εισόδου είτε τη ρύθμιση του λόγου εναλλασσόμενων τάσεων. Η πλειονότητα των σχημάτων MET βασίζεται στην λογική της “διαταραχής και παρατήρησης” (Perturbation and Observation, P&O) στην ισχύ ή στον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Τα σχήματα ελέγχου τα οποία βασίζονται στη λογική της διαταραχής και παρατήρησης είναι εκ φύσεως αργά, εξαιτίας των αβεβαιοτήτων της ταχύτητας και του πλάτους διαταραχής, ωστόσο αποτελούν επαρκείς λύσεις

για τις εφαρμογές φόρτισης, όπου τα δυναμικά φαινόμενα είναι αργά. Τέλος, υπάρχουν και ορισμένες εναλλακτικές λύσεις με ταχεία δυναμική απόκριση και οι οποίες βασίζονται σε μεθόδους επικοινωνίας πραγματικού χρόνου, όπως αυτήν που προτείνεται στην εργασία. Ωστόσο, η ταχεία δυναμική απόκριση και η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο δεν είναι απαραίτητες σε εφαρμογές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με αργά δυναμικά φαινόμενα. Μία ακόμη σημαντική παράμετρος, η οποία πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη στα συστήματα AMI με προσαρμογή της εμπέδησης φορτίου για την επίτευξη του μέγιστου βαθμού απόδοσης, είναι το γεγονός ότι η βέλτιστη τιμή της ισοδύναμης εμπέδησης αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο συντελεστή σύζευξης καθώς και σε συγκεκριμένες τιμές αντιστάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Εντούτοις, ο συντελεστής σύζευξης δεν είναι συγκεκριμένος στα συστήματα ασύρματης φόρτισης. Τουναντίον, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθέτηση του οχήματος επάνω στη βάση φόρτισης και την ευθυγράμμιση μεταξύ των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Επομένως, εάν η πιθανότητα αστοχίας ευθυγράμμισης δεν λαμβάνεται υπόψη, τότε η μέθοδος βελτιστοποίησης γίνεται λιγότερο αποδοτική και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει ακόμη και αποτυχία φόρτισης. Επιπρόσθετα, οι τιμές των αντιστάσεων των κυκλωμάτων συντονισμού πρωτεύοντος και δευτερεύοντος μπορεί να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια της λειτουργίας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας. Η πλειοψηφία των εργασιών, οι οποίες περιλαμβάνουν σχήματα μεγιστοποίησης του βαθμού απόδοσης χωρίς επικοινωνία, είτε δεν λαμβάνουν υπόψη τους τις συνθήκες αστοχίας ευθυγράμμισης [235] είτε η λειτουργία τους εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της πλευράς του δευτερεύοντος. Η ανάπτυξη λοιπόν ενός ασύρματου φορτιστή με μέγιστο βαθμό απόδοσης, ο οποίος θα προσαρμόζεται στις συνθήκες αστοχίας της ευθυγράμμισης για ένα μεγάλο σχετικά εύρος και ταυτόχρονα θα αποτελεί μια λύση γενικού σκοπού η οποία θα είναι ανεξάρτητη από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υπό φόρτιση οχήματος, απαιτεί τη μετάδοση των απαραίτητων πληροφοριών από την πλευρά του δευτερεύοντος για τη ρύθμιση της ισχύος. Όσο αφορά τη μετάδοση των πληροφοριών, οι μέθοδοι και οι τρόποι υλοποίησης για τους ασύρματους φορτιστές αναλύθηκαν εκτενώς στο Κεφάλαιο 2. Η ενσωμάτωση της επικοινωνίας IoT σε συστήματα AMI πλεονεκτεί έναντι άλλων συμβατικών μεθόδων επικοινωνίας, καθώς προσφέρει απλότητα, χαμηλό κόστος, ευελιξία και επικοινωνία σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Επιπρόσθετα, η επικοινωνία IoT αποτελεί μια γενικού σκοπού λύση, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα υποσυστήματα που χρησιμοποιούν μέσα επικοινωνίας και μετάδοση πληροφοριών όχι σε πραγματικό χρόνο, ενώ είναι συμβατή και με

τις υποδομές επικοινωνίας των Έξυπνων Πόλεων (Smart Cities) [236]. Συγκεκριμένα, η τεχνολογία IoT καθιστά εφικτό τον γρήγορο διαμοιρασμό των διαθέσιμων πληροφοριών μεταξύ των διάφορων υποσυστημάτων μιας Έξυπνης Πόλης, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στη διαμόρφωση πιο αποτελεσματικών υπηρεσιών. Για παράδειγμα, η χρήση του IoT σε ένα έξυπνο δίκτυο, το οποίο αποτελεί βασικό συστατικό στοιχείο μιας έξυπνης πόλης, μπορεί να υποστηρίξει την άμεση απόκριση στη ζήτηση ενέργειας, τη δέσμευση ή αποδέσμευση των μονάδων παραγωγής κ.α. Επομένως, το IoT μπορεί να αξιοποιηθεί και για την επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη ισχύος σε εφαρμογές ασύρματης φόρτισης οχημάτων, όπου η πλευρά του δέκτη είναι ενσωματωμένη στο όχημα ενώ η πλευρά του πομπού είναι εγκατεστημένη στη βάση φόρτισης (συνήθως στο έδαφος). Επιπρόσθετα, σημαντική είναι και η συμβολή του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου για τη μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης, το οποίο προσαρμόζει συνεχώς την ισοδύναμη εμπέδηση του φορτίου με τη βέλτιστη τιμή της, καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης (χωρίς την ανάγκη επικοινωνίας πραγματικού χρόνου), και είναι ανεξάρτητο από:

- 1) τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δευτερεύοντος (τοπολογία ενσωματωμένου στο όχημα φορτιστή, βρόχος ελέγχου, τύπος συσσωρευτή, προφίλ φόρτισης,)
- 2) τις συνθήκες αστοχίας ευθυγράμμισης μεταξύ των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος
- 3) τις λειτουργικές συνθήκες (μεταβολή των ωμικών αντιστάσεων των πηνίων λόγω θερμοκρασιακής αύξησης, γήρανση πηνίων-πυκνωτών)

Το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου υλοποιείται στην πλευρά του πρωτεύοντος και προσαρμόζει την ισοδύναμη εμπέδηση του φορτίου με τη βέλτιστη τιμή της, η οποία σχετίζεται με τον συντελεστή σύζευξης, τα χαρακτηριστικά του φορτίου (τάση/ρεύμα φόρτισης) και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά. Η ανίχνευση της βέλτιστης εμπέδησης του φορτίου (προκειμένου να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός βαθμός απόδοσης) βασίζεται στην παρακολούθηση και στην προσαρμογή του ελάχιστου ρεύματος εισόδου (στην πλευρά ΣΤ του πρωτεύοντος) με τη χρήση ενός αλγορίθμου P&O και με τη βοήθεια του IoT. Ως εκ τούτου, το IoT συμβάλλει στη διατήρηση της λειτουργίας του συστήματος στο σημείο του βέλτιστου βαθμού απόδοσης, χωρίς να χάνονται οι συνθήκες ομαλών μεταβάσεων στη βαθμίδα του αντιστροφέα (για ένα μεγάλο εύρος μεταβολής του φορτίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης) ούτε να διακυβεύεται η επιτυχής ολοκλήρωση της διαδικασίας της φόρτισης (αστοχία φόρτισης). Ταυτόχρονα, αποτελεί μια λύση γενικού σκοπού για εφαρμογές στατικής ασύρματης φόρτισης, η οποία, όπως προαναφέρθηκε είναι ανεξάρτητη από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δευτερεύοντος

συστήματος . Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για το προτεινόμενο σύστημα AMI επιλέγεται η τοπολογία αντιστάθμισης σειράς-σειράς καθώς (όπως αναλύθηκε εκτενώς και στο Κεφάλαιο 2) αποτελεί μια πλεονεκτική λύση για εφαρμογές φόρτισης συσσωρευτών.

5. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μια εκτενής ανάλυση για τα σημαντικότερα θέματα που απασχολούν όσο αφορά την διασύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και την αλληλεπίδραση τους με τα έξυπνα δίκτυα.

Πιο συγκεκριμένα συζητήθηκε ότι με την αύξηση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα καθώς και λόγω της οικολογικής συνείδησης των ανθρώπων η αύξηση των αγορών των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ραγδαία τα τελευταία χρόνια, αλλά αναμένεται να είναι και ακόμα μεγαλύτερη τα επόμενα χρόνια. Επιπλέον, εκτενής ανάλυση έγινε και για τις τεχνολογίες των ηλεκτρικών οχημάτων, οι οποίες όπως φαίνεται συνδυάζουν οποιοδήποτε τύπο κινητήρα έχοντας ως βασικό είτε των εσωτερικής καύσης είτε ως βασικό ηλεκτρικό κινητήρα, παρουσιάζοντας και τοπολογίες οχημάτων που είναι αμιγώς ηλεκτρικά με τις μηχανές εσωτερικής καύσης να έχουν επικουρικό χαρακτήρα για την τροφοδότηση των διάφορων φορτίων.

Ένα σημαντικό ζήτημα που αναλύθηκε εκτενώς είναι η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων λειτουργία G2V αλλά και η χρήση των ίδιων τοπολογιών για λειτουργία V2G. Είναι σκόπιμο να παρατηρηθεί ότι όσο αφορά την ενσύρματη φόρτιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι ηλεκτρικών μηχανών που αναπτύσσουν εξαιρετικά υψηλές στροφές (SRM, PMSG) και μπορούν να κάνουν ανάκτηση ενέργειας με διάφορους τρόπους όπως αναγεννητική πέδηση όπου η ενέργεια είτε φορτίζει τις μπαταρίες είτε επιστρέφεται στο δίκτυο (V2G). Ωστόσο, παρά την εκτενή έρευνα που έχει γίνει για την λειτουργία V2G και τις αμέτρητες δημοσιεύσεις που υπάρχουν στον κλάδο αυτό τα σημερινά δεδομένα του κλάδου της βιομηχανίας δεν έχουν ενσωματώσει καμία εφαρμογή.

Τέλος, αναφορά γίνεται και στην αλληλεπίδραση των RES με τα ηλεκτρικά οχήματα, όπου έτσι όπως φαίνεται η λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων περιορίζεται στη χρήση των μπαταριών ως αποθηκευτικά μέσα, στη τροφοδότηση φορτίων σε περιόδους υψηλής ζήτησης και στην υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου σε περιπτώσεις μεγάλων διακυμάνσεων της ισχύος εισόδου από τις RES.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα εκτείνονται από τον κλάδο βέλτιστης διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά ενέργειας αλλά και στο τρόπο κατανομής της στα διάφορα φορτία έως πιο τεχνικά κομμάτια που αφορούν τις τεχνολογίες των ηλεκτρικών οχημάτων ώστε να γίνουν αμιγώς ηλεκτρικά αλλά και των μετατροπών ισχύος ώστε να γίνουν πιο αποδοτικοί. Όσο αναφορά τα ηλεκτρικά οχήματα έρευνα θα μπορούσε να γίνει για την εξάλειψη της υποστήριξης των φορτίων με κινητήρες εσωτερικής καύσης και την εγκατάσταση μεγαλύτερης χωρητικότητας μπαταριών ή την εγκατάσταση υπερπυκνωτών. Όσο αφορά το ηλεκτρικό σύστημα ισχύος των EV, οι μετατροπείς ισχύος 2 επιπέδων (αντιστροφείς, ανορθωτές κ.α.) θα μπορούσαν να αντικατασταθούν με την χρήση πολυεπίπεδων μετατροπών που προσφέρουν πλεονεκτήματα, όπως καλύτερη ποιότητα ισχύος χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις, μικρότερη καταπόνηση στα διακοπτικά στοιχεία και υψηλότερη τάση εξόδου με μικρή κυμάτωση. Ως προς την συνεργασία των RES και των EV προσπάθειες θα μπορούσαν να γίνουν για την σχεδίαση και εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων απευθείας στα ηλεκτρικά οχήματα, έτσι ώστε να καλύπτουν μέρος της απαιτούμενης ενέργειας τους. Τέλος, σχετικά με την συνεργασία των έξυπνων δικτύων και των EV μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να γίνει στον αποκεντροποιημένο έλεγχο με εστίαση στην ανάπτυξη έξυπνων αλγορίθμων και εύκολων στη χρήση εφαρμογών, για την μέτρηση όσο περισσότερων δεδομένων γίνεται για την πλήρη ενημέρωση του ιδιοκτήτη και τις αποδοτικές συναλλαγές με την αγορά ενέργειας.

6. Αναφορές

- [1] [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.investopedia.com/terms/n/neuralnetwork.asp>.
- [2] j. Chadjivassiliadis, *Solar Photovoltaic and Wind Power in Greece*, Thessaloniki, 1987.
- [3] Mariya Soshinkayaa, Wina H. J. Grausa, Josep M. Guerrero, Juan C. Vasquezb, «Microgrids: experiences, barriers and success factors,» *Renewable & Sustainable Energy Reviews*.
- [4] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, A. Dimeas, «Microgrids Management,» *IEEE Power and Energy Magazine*, τόμ. 6, αρ. 3, pp. 54-65, May - June 2008.
- [5] T. Bourgeois, «Microgrid Study Findings,» 11 June 2013.
- [6] Γ. Β. Γιαννακόπουλος, Ν. Α. Βοβός, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, εκδ. ΖΗΤΗ, 2008.
- [7] A. K. Basu, A. Bhattacharya, S. Chowdhury, «Planned Scheduling for Economic Power Sharing in a CHP-Based Microgrid,» *IEEE Transactions on Power Systems*, τόμ. 27, αρ. 1, pp. 30-38, Feb. 2012.
- [8] N. Hatziargyriou, «Microgrids: Architectures and Control,» *Wiley-IEEE Press*, March 2014.
- [9] T. Dragicevic, X. Lu, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, «DC Microgrids-Part 2: A review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issues,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, τόμ. 31, αρ. 5, pp. 3528-3549, May 2016.
- [10] A. T. Elsayed, A. A. Mohamed, O. A. Mohammeda, «DC microgrids and distribution systems: An overview,» *Electric Power Systems Research*, τόμ. 119, pp. 407-417, 2015.
- [11] M. A. Tavakkoli, A. Radan, H. Hassibi, «Simulation and Analysis of a Compact Electronic Infrastructure for a DC Microgrid,» *Scientific Smart Grid and Renewable Energy*, τόμ. 3, αρ. 2, pp. 73-82, 2012.
- [12] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, «Low-voltage Bipolar-Type DC Micrigrid for Super High-Quality Distribution,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, τόμ. 25, αρ. 12, pp. 3066-3075, Dec. 2010.
- [13] Θ. Ζαχαρίας, *Ήπιες μορφές ενέργειας 2*, Πάτρα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2009.
- [14] R. T. P. R. Dezso Sera, «PV panel model based on datasheet values».
- [15] S. McCalmont, «Low Cost Arc Fault Detection and Protection for PV Systems,» *NREL*, p. 24, 2013.
- [16] W. D. X. Weidog, «A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems,» σε *IEEE Power Electronics Specialists Conf*, 2004.
- [17] D. Paul, «DC Traction power system grounding,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, τόμ. 38, αρ. 3, pp. 818-824, May 2002.
- [18] Luque A., Hegedus S., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd επιμ., 2011.
- [19] J. A. Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, «Defining control strategies for microgrids islanded operations,» *IEEE Transactions Power Systems*, τόμ. 21, αρ. 2, pp. 916-924, May 2006.

-
- [20] Q. C. Zhong, T. Homik, «Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration,» *Wiley-IEEE Press*, Feb. 2013.
- [21] E. Rodriguez-Diaz, M. Savaghebi, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, «An overview of low voltage DC distribution systems for residential applications,» σε *5th IEEE International Conference on Consumer Electronics* , Berlin, Germany, Sep. 2015.
- [22] P. Salonen, T. Kaipia, P. Nuutinen, P. Peltoniemi, J. Partanen, «An LVDC distribution system concept,» σε *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, Finland, 9-11 June 2018.
- [23] T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, D. Skrlec, «Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks,» *IEEE Electrification Magazine*, τόμ. 2, αρ. 1, pp. 54-65, March 2014.
- [24] L. Xing, «Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,» pp. 511-536, 2015.
