



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ασύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων και Προστασία Επιβατών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχάλης Φ. Παναγή

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Ασύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων και Προστασία Επιβατών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μιχάλης Φ. Παναγή

Επιβλέπων: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8^η Δεκεμβρίου 2023.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Γκόνοσ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2023

.....
Μιχάλης Φ. Παναγή

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

Copyright © Μιχάλης Παναγή, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Η Ασύρματη Μεταφορά Ισχύος (**Wireless Power Transfer-WPT**) είναι μια μέθοδος επαγωγικής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παρά την ιδιαίτερη πρόοδο της την δεκαετία του '90 έχει τις απαρχές της στα τέλη του 19^{ου} αιώνα με πρωτοπόρο τον Nicola Tesla. Μια από τις εφαρμογές της είναι και η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων κατά την οποία μεταφέρεται ασύρματα ηλεκτρική ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο στην μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος είτε όταν το όχημα σταθμεύει πάνω από τον φορτιστή (*Στατική Επαγωγική Φόρτιση*) είτε όταν το όχημα κινείται στον δρόμο (*Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση*).

Η παρούσα διπλωματική παρουσιάζει και τις δύο κατηγορίες ασύρματης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, την *Στατική* και την *Δυναμική*. Για την *Στατική Επαγωγική Φόρτιση* παρουσιάζεται αρχικά η βασική αρχή λειτουργίας, τοπολογίες αντιστάθμισης, τα ηλεκτρονικά ισχύος και ο έλεγχος που χρησιμοποιούνται και οι βασικές διατάξεις του μαγνητικού συζευκτή με τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματά τους. Για την *Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση* παρουσιάζεται η συνολική διαμόρφωση, οι τοπολογίες αντιστάθμισης, τα ηλεκτρονικά ισχύος, ο έλεγχος και οι διάφορες διατάξεις του μαγνητικού συζευκτή. Παρόλο που η αρχή λειτουργίας της στατικής και της δυναμικής φόρτισης είναι η ίδια, η δυναμική φόρτιση παρουσιάζει πολλές δυσκολίες στην υλοποίησή της αφού το ηλεκτρικό όχημα πρέπει να φορτιστεί κινούμενο με μεγάλες ταχύτητες κάτι που επιβάλλει υψηλές ισχύς της διάταξης WPT καθώς και άλλες λύσεις.

Ακολουθώντας στο δεύτερο μέρος της εργασίας αυτής αναλύονται οι επιδράσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου των συστημάτων επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε χαμηλές ή μεσαίες συχνότητες (50 ή 60 Hz έως και μερικές δεκάδες kHz) στον ανθρώπινο οργανισμό καθώς επίσης και η μελέτη δυνατοτήτων μείωσης των επιδράσεων αυτών μέσω κατάλληλων θωρακίσεων.

Λέξεις-κλειδιά: Ασύρματη Μεταφορά Ισχύος, Στατική Επαγωγική Φόρτιση, Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση, Ηλεκτρικά οχήματα, Μαγνητικός Συζευκτής, Θωράκιση ηλεκτρικών οχημάτων

Abstract

Wireless Power Transfer (WPT) is a method of inductive transfer of electrical energy which, despite its particular progress in the 90s, has its beginnings at the end of the 19th century with Nicola Tesla as a pioneer. One of its applications is the wireless charging of electric vehicles in which electricity is transferred wirelessly from the electrical network to the battery of the electric vehicle either when the vehicle is parked on top of the charger (*Static Inductive Charging*) or when the vehicle is moving on the road (*Dynamic Inductive Charging*).

This diploma presents both categories of wireless charging of electric vehicles, *Static* and *Dynamic*. For *Static Inductive Charging*, the basic principle of operation, compensation topologies, the power electronics and control used and the basic arrangements of the magnetic coupler with their advantages and disadvantages are presented first. For *Dynamic Inductive Charging* the overall configuration, compensation topologies, power electronics, control and various magnetic coupler arrangements are presented. Although the principle of operation of static and dynamic charging is the same, dynamic charging presents many difficulties in its implementation since the electric vehicle must be charged moving at high speeds which imposes high power of the WPT device as well as other solutions.

Subsequently, in the second part of this work, the effects of the electric and magnetic field of the inductive charging systems of electric vehicles at low or medium frequencies (50 or 60 Hz up to a few tens of kHz) on the human body are analyzed, as well as the study of possibilities to reduce these effects through suitable shields.

Keywords: Wireless Power Transfer, Static Inductive Charging, Dynamic Inductive Charging, Electric Vehicles, Magnetic Coupler, Shielding of Electric Vehicles

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα βιβλιογραφική διπλωματική εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Ευάγγελου Χριστοφόρου καθηγητή του τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη συστημάτων επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και μεθόδων θωράκισης του ανθρώπινου οργανισμού έναντι του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που εκπέμπουν αυτά τα συστήματα.

Στο 1^ο Κεφάλαιο, το οποίο αποτελεί και την εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής, παρουσιάζεται μια σύντομη βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης, η οποία είναι παρόμοια με αυτή ενός μετασχηματιστή όπου μεταφέρεται ασύρματα ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ ενός πρωτεύοντος και ενός δευτερεύοντος πηνίου. Ακολούθως παρατίθενται τα πλεονεκτήματα ενός συστήματος ασύρματης φόρτισης και μετά γίνεται η διάκριση μεταξύ στατικής φόρτισης, όπου το όχημα σταθμεύει πάνω από τον φορτιστή, και δυναμικής φόρτισης όπου το όχημα φορτίζεται καθώς κινείται -ακόμα και με υψηλές ταχύτητες- πάνω από τον φορτιστή. Τέλος γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στην προστασία των επιβατών από το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο όπου παρουσιάζεται συνοπτικά η επίδραση των Η/Μ πεδίων σε ζώντες οργανισμούς, τα πρότυπα μέγιστου Η/Μ πεδίου και μερικοί τρόποι θωράκισης έναντι του Η/Μ πεδίου.

Στο 2^ο Κεφάλαιο εξετάζεται λεπτομερέστερα η στατική και δυναμική επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα για την στατική φόρτιση παρουσιάζεται λεπτομερέστερα η αρχή λειτουργίας της επαγωγικής φόρτισης και γίνεται λόγος για τη χρήση διαφόρων μεθόδων αντιστάθμισης για τον περιορισμό της διακινούμενης αέργου ισχύος και την αύξηση της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος στην μπαταρία του οχήματος. Παράλληλα μελετώνται τα ηλεκτρονικά ισχύος (συμπεριλαμβανομένου και για την αμφίδρομη ροή ισχύος) και ο έλεγχος που χρησιμοποιούνται καθώς επίσης και οι απλές αλλά και πιο σύνθετες διατάξεις του μαγνητικού συζευκτή. Για την δυναμική φόρτιση αρχικά παρουσιάζεται η συνολική διαμόρφωση του συστήματος, εδάφους και οχήματος, και ακολούθως το δίκτυο αντιστάθμισης με τις απαιτούμενες προδιαγραφές του και αναλυτικές αναφορές στις διάφορες τοπολογίες. Μετά γίνεται λόγος για τα ηλεκτρονικά ισχύος του κυκλώματος και μια εκτενέστερη ανάλυση της αρχιτεκτονικής παροχής ισχύος τόσο για την ενιαία όσο και για την τμηματική διάταξη. Επιπλέον παρατίθεται μια σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τεχνικών ελέγχου για την δυναμική φόρτιση. Ακολουθεί ο μαγνητικός συζευκτής με ιδιαίτερη αναφορά στην ενιαία διάταξη όπου παρουσιάζεται μια ιστορική διαδρομή της εν λόγω διάταξης φτάνοντας στην τελευταία λέξη της τεχνολογίας. Τέλος ένα

πολύ κρίσιμο ζήτημα που αναλύεται στο Κεφάλαιο 2 είναι οι υποδομές και το κόστος των τεχνολογιών το οποίο ανέρχεται για την δυναμική φόρτιση περίπου στο 1 εκατομμύριο \$/χλμ ενώ για την στατική φόρτιση στα \$2000 για ένα σύστημα 3,3 kW.

Το 3^ο Κεφάλαιο καταπιάνεται με την προστασία επιβατών από το Η/Μ πεδίο που εκπέμπεται από το σύστημα ασύρματης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα εξηγείται η επίδραση των Η/Μ πεδίων σε ζώντες οργανισμούς και παρουσιάζεται μια σύνοψη των ορίων έκθεσης σε Η/Μ πεδία της Διεθνούς Επιτροπής για την Προστασία από Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP). Ακολούθως μελετήθηκαν έγκριτα άρθρα που αφορούν στην θωράκιση του ανθρώπινου οργανισμού έναντι του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου και από τα οποία παρατίθενται μια συνοπτική και περιεκτική περίληψή τους.

Τέλος, τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για την μελλοντική έρευνα δίνονται στο Κεφ.4.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου το συγκεκριμένο θέμα, καθώς επίσης και τους καθηγητές μου κύριους Σταύρο Παπαθανασίου και Ιωάννη Γκόνο οι οποίοι με την διδασκαλία και υποστήριξή τους συντέλεσαν στην συνέχιση των σπουδών μου. Θερμές ευχαριστίες επίσης θα ήθελα να εκφράσω στην υποψήφια διδάκτορα κυρία Τατιάνα Δαματοπούλου η οποία με το επιστημονικό υλικό που μου παρείχε συντέλεσε στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής.

Μιχάλης Παναγή

Αθήνα, Δεκέμβριος 2023

Περίληψη.....	iii
Abstract	iv
Πρόλογος – Ευχαριστίες	v
Κεφάλαιο 1	1
Εισαγωγή στην ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και προστασία επιβατών από το Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.....	1
1.1: Τεχνολογίες υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	1
1.1.1: Ενσύρματη φόρτιση	1
1.1.2: Ασύρματη επαγωγική φόρτιση	2
1.2: Κατηγορίες ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.....	4
1.2.1: Στατική Φόρτιση	5
1.2.2: Δυναμική Φόρτιση	7
1.3: Επίπεδα μεταφοράς ισχύος στην επαγωγική φόρτιση	9
1.4: Προστασία επιβατών από ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.....	10
1.4.1: Επίδραση των Η/Μ πεδίων σε ζώντες οργανισμούς	10
1.4.2: Πρότυπα μέγιστου Η/Μ πεδίου	10
1.4.3: Θωράκιση έναντι ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου	11
Κεφάλαιο 2	15
Στατική & Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων	15
2.1: Στατική Επαγωγική Φόρτιση	15
2.1.1: Βασικές αρχές λειτουργίας επαγωγικής φόρτισης	15
2.1.2: Τοπολογίες αντιστάθμισης.....	19
2.1.3: Ηλεκτρονικά Ισχύος και Έλεγχος.....	22
2.1.4: Μαγνητικός συζευκτήρας.....	26
2.2: Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση (Dynamic Wireless Power Transfer-DWPT)	35

2.2.1: Συνολική διαμόρφωση	35
2.2.2: Δίκτυο αντιστάθμισης	36
2.2.3: Ηλεκτρονικά Ισχύος.....	42
2.2.4: Έλεγχος	48
2.2.5: Μαγνητικός συζευκτήρας.....	49
2.3: Υποδομές και Κόστος	58
Κεφάλαιο 3	61
Προστασία επιβατών από ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο	61
3.1: Επίδραση των Η/Μ πεδίων σε ζώντες οργανισμούς.....	61
3.2: Πρόσφατα πρότυπα μέγιστου Η/Μ πεδίου	63
3.3: Επιδράσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων σε όργανα και ιστούς	65
3.4: Θωράκιση έναντι ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου	68
Κεφάλαιο 4	85
Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία.....	85
Βιβλιογραφία.....	89

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στην ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και προστασία επιβατών από το Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα τον τελευταίο καιρό κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος καθώς δεν καίνε ορυκτά καύσιμα κάτι που τα καθιστά πιο οικονομικά και πιο φιλικά προς το περιβάλλον σε σχέση με τα οχήματα που έχουν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Όμως η περιορισμένη ενεργειακή αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για μία σημαντική διεύρυνση των οχημάτων αυτών στην αγορά των μέσων μεταφοράς. Γι' αυτό σήμερα γίνεται μια προσπάθεια αυτό να επιλυθεί με διάφορους τρόπους τόσο από τις εταιρείες και τους ερευνητές όσο και από τα κράτη. Ένας τρόπος είναι η κατασκευή μπαταριών με μεγαλύτερη αυτονομία και ταχύτερο χρόνο φόρτισής τους. Άλλος τρόπος είναι η κατασκευή μεγαλύτερου δικτύου σταθμών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, μέχρι στιγμής ενσύρματων και τα τελευταία χρόνια ασύρματων σε πιλοτική βάση. Ακόμη κατασκευάζονται πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές τόσο στην κατανάλωση λιγότερης ηλεκτρικής ισχύος όσο και καλύτερων επιδόσεων.

1.1: Τεχνολογίες υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Σήμερα η τεχνολογία παρέχει στους κατόχους ηλεκτρικών οχημάτων διάφορες επιλογές σχετικά με την μεταφερόμενη στο όχημα ισχύ με διαφορετικές διάρκειες φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος. Οι τεχνολογίες για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: την ενσύρματη φόρτιση και την ασύρματη επαγωγική φόρτιση.

1.1.1: Ενσύρματη φόρτιση

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες υποδομών φόρτισης ανάλογα με την ισχύ φόρτισης [1]. Για παράδειγμα έχουμε:

- **Επίπεδο 1 (Mode 1):** Απαιτείται η σύνδεση του οχήματος σε μονοφασική παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος με μέγιστη ισχύ φόρτισης τα **3,2kW**. Το καλώδιο

φόρτισης παρέχεται τις περισσότερες φορές με την αγορά του οχήματος απαιτώντας την απλή σύνδεση σε ένα οικιακό ρευματοδότη. Όμως ο χρόνος φόρτισης είναι ιδιαίτερα μεγάλος (8 ώρες και μεγαλύτερος), με τον συγκεκριμένο φορτιστή να χρησιμοποιείται συνήθως για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων στο σπίτι.

- **Επίπεδο 2 (Mode 2):** Επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ισχύς φόρτισης με μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ τα **7,2kW** σε μονοφασική παροχή, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο φόρτισης σε σχέση με το Επίπεδο 1.
- **Επίπεδο 3 (Mode 3):** Η φόρτιση σε αυτό το επίπεδο επιτρέπει την ταχεία φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων είτε με τριφασική παροχή εναλλασσομένου ρεύματος είτε με την χρήση DC ρεύματος. Η μέγιστη ισχύς φόρτισης για την παροχή **εναλλασσομένου ρεύματος** φτάνει τα **42kW** ενώ για την χρήση **DC ρεύματος** ξεπερνά τα **100kW** (Supercharger). Αυτό κάνει τους φορτιστές DC ρεύματος (Εικόνα 1-1) ιδιαίτερα ελκυστικούς αφού η φόρτιση ολοκληρώνεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα(30 λεπτά περίπου). Όμως η υλοποίηση των DC φορτιστών έχει αυξημένο κόστος (δεκάδες χιλιάδες ευρώ) και πολυπλοκότητα επειδή χρησιμοποιείται μετατροπέας ανόρθωσης του εναλλασσομένου ρεύματος σε συνεχές.

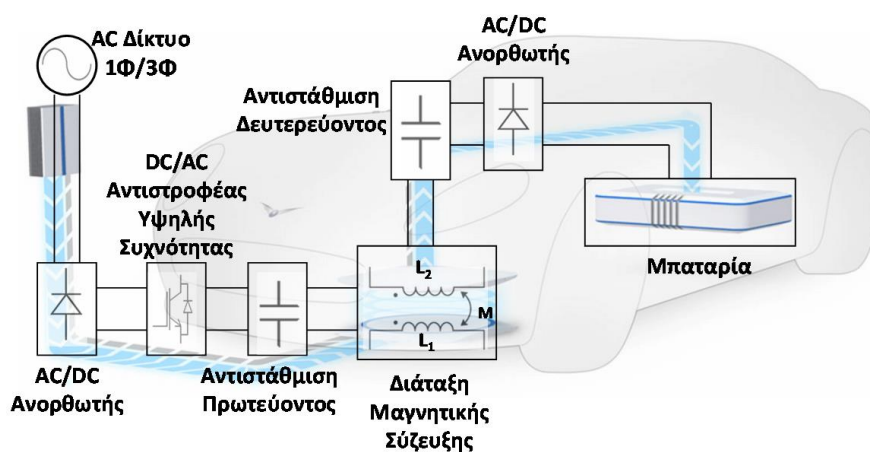


Εικόνα 1-1: Supercharger της Tesla motors [51]

1.1.2: Ασύρματη επαγωγική φόρτιση

Με την ασύρματη επαγωγική φόρτιση μεταφέρεται ισχύς από το ηλεκτρικό δίκτυο στην μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος και αντίστροφα. Παρόλο που αυτή η τεχνολογία

παρουσιάζει μια ιδιαίτερη πρόοδο την τελευταία δεκαετία, τα πρώτα βήματα προς υλοποίησή της άρχισαν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα κυρίως από τον Nicola Tesla ο οποίος επιχείρησε την μεταφορά ισχύος σε μακρινές αποστάσεις με την αποστολή μικροκυματικών σημάτων. Παράλληλα κατασκεύασε τα πηνία Tesla με το οποίο κατάφερε να μεταφέρει ισχύ μέσω μαγνητικού πεδίου ξεπερνώντας τις δυσκολίες της εποχής εκείνης λόγω της απουσίας ηλεκτρονικών ισχύος. Κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα έγιναν πολλές μελέτες σχετικά με την ασύρματη φόρτιση με κύρια εφαρμογή την δεκαετία του 1990 την ασύρματη φόρτιση φορητών ηλεκτρονικών συσκευών. Τα τελευταία χρόνια με την μεγάλη ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος γίνεται εφικτή η μεταφορά μεγάλων ποσών ηλεκτρικής ισχύος κάνοντας έτσι εφικτή την ασύρματη επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων [1].



Εικόνα 1-2: Βασική Λειτουργία Συστήματος Επαγωγικής Φόρτισης [1]

Η βασική λειτουργία ενός συστήματος ασύρματης επαγωγικής φόρτισης παρουσιάζεται στο πιο πάνω σχήμα, η οποία είναι παρόμοια με αυτή των μετασχηματιστών, μόνο που εδώ τα πηνία λειτουργούν σαν ένας ασθενώς συζευγμένος μετασχηματιστής που επιτρέπει την μετάδοση ισχύος μέσω ενός σχετικά μεγάλου διακένου αέρα. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, ένας AC/DC ανορθωτής μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή ακολουθούμενος από ένα διορθωτή συντελεστή ισχύος (ο οποίος δεν φαίνεται στο σχήμα). Κατόπιν ο DC/AC αντιστροφέας μετατρέπει την συνεχή τάση σε μια υψίσυχη εναλλασσόμενη τάση με στόχο ένα υψίσυχο ρεύμα στο 1^ο πηνίο. Ακολούθως το ρεύμα αυτό θα επάγει μια εναλλασσόμενη τάση στο 2^ο πηνίο της διάταξης όπου μετά ένας ανορθωτής AC/DC θα μετατρέψει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή για να φορτιστεί η μπαταρία του οχήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο πλευρές της διάταξης υπάρχει

αντιστάθμιση με πυκνωτές για να παράξει την άεργο ισχύ που απορροφούν τα πηνία και έτσι να περιοριστεί η άεργος ισχύς που διακινείται στο σύστημα αλλά και για να μεγιστοποιηθεί η μεταφερόμενη ισχύς στην μπαταρία του οχήματος.

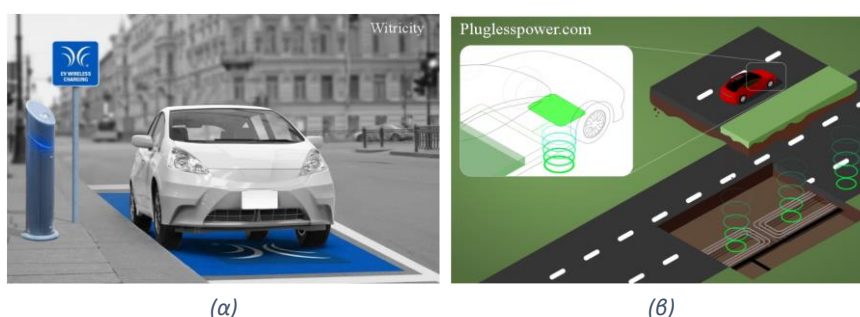
Παρόλο που ο μαγνητικός συζευκτήρας, του οποίου το 1^ο βρίσκεται στο έδαφος και το 2^ο στο όχημα, αυξάνει το κόστος της κατασκευής, έχει αυξημένες διαστάσεις και βάρος και μειώνει την απόδοση του συστήματος σε σχέση με την αγωγίμη φόρτιση λόγω των μαγνητικών απωλειών, εντούτοις οι σημαντικές εξελίξεις που παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια στην επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων επιτρέπουν επίτευξη απόδοσης παραπλήσια με αυτήν της ενσύρματης φόρτισης. Τα πλεονεκτήματα της ασύρματης φόρτισης είναι τα εξής:

1. Απλοποιημένη διαδικασία φόρτισης πιο εύχρηστη και πιο φιλική προς τον χρήστη.
2. Εξαλείφει κάθε είδους κίνδυνο σχετικά με την χρήση καλωδίων, όπως χρήση φθαρμένων καλωδίων σε βροχερό και χιονισμένο περιβάλλον, απομονώνοντας ηλεκτρικά το όχημα από την παροχή τροφοδοσίας.
3. Η υπόγεια τοποθέτηση του πρωτεύοντος στο έδαφος αποτρέπει την έκθεσή του σε μη ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, αυξάνοντας τον χρόνο ζωής της υποδομής φόρτισης.
4. Η τοποθέτηση του πρωτεύοντος στο έδαφος συμβάλλει στην αποφυγή βανδαλισμών των υποδομών φόρτισης όπως κλοπή του καλωδίου φόρτισης κλπ.

Όλα τα πιο πάνω σε συνδυασμό των οικονομικών λύσεων ασύρματης φόρτισης με περιορισμένες διαστάσεις και βάρος του δευτερεύοντος αυξάνουν το ενδιαφέρον των κατόχων ηλεκτρικών οχημάτων για την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων [1].

1.2: Κατηγορίες ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Υπάρχουν δύο κατηγορίες ασύρματης επαγωγικής φόρτισης: η **στατική φόρτιση** όπου το όχημα σταθμεύει πάνω από το 1^ο πηνίο και φορτίζεται (Εικόνα 1-3(α)) και η **δυναμική φόρτιση** όπου το όχημα φορτίζεται καθώς κινείται στο δρόμο (Εικόνα 1-3(β)).

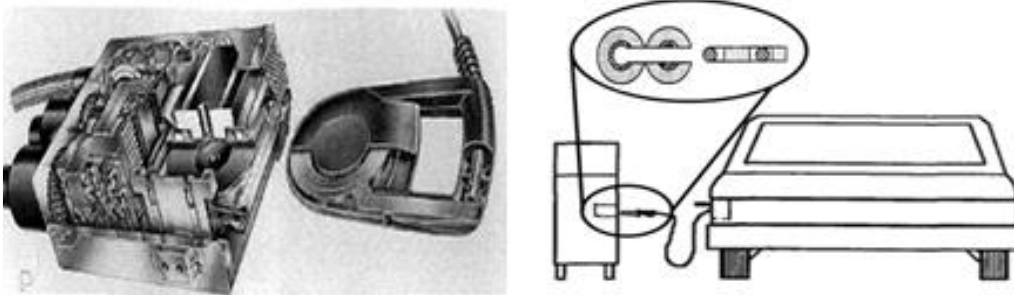


Εικόνα 1-3:(α) Στατική και (β) Δυναμική Επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων [1]

1.2.1: Στατική Φόρτιση

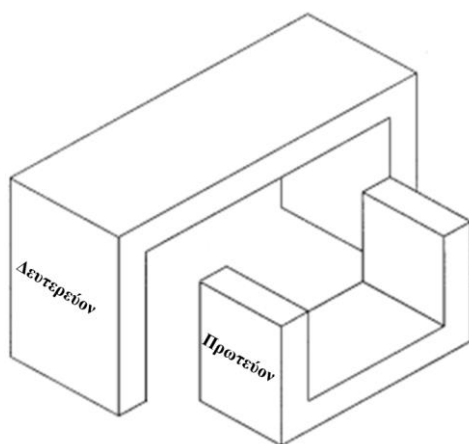
- **Πρώιμες διατάξεις ασύρματης επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων**

Οι πρώτες διατάξεις που προτάθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1990 απείχαν πολύ από το να χαρακτηριστούν ασύρματες αφού έκαναν χρήση ενός καλωδίου φόρτισης το οποίο τοποθετείτο στην είσοδο του φορτιστή όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-4.

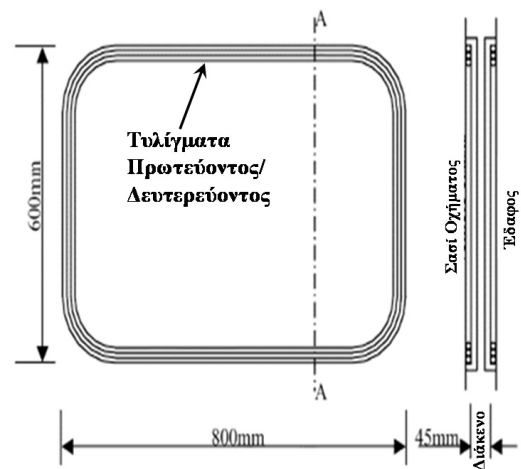


Εικόνα 1-4: Σύστημα επαγωγικής Φόρτισης όπου το δευτερεύον «εισέρχεται» στο πρωτεύον [1]

Άλλες διατάξεις πρώιμης τεχνολογίας ήταν συζευκτές παρόμοιους με ένα πυρήνα μετασχηματιστή οι οποίοι μπορούσαν να μεταφέρουν ισχύ μέσω ενός πολύ μικρού διακένου αέρα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-5. Επίσης κατασκευάστηκαν συζευκτές παρόμοιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται σήμερα Εικόνα 1-6 χωρίς όμως τη χρήση φερρίτη ο οποίος ενισχύει και καθοδηγεί το μαγνητικό πεδίο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τα πηνία να είναι ευαίσθητα στα γύρω σιδηρομαγνητικά υλικά και η μαγνητική ροή να διέρχεται μέσα από το σασί του αυτοκινήτου προκαλώντας υψηλές απώλειες δινορρευμάτων [1].



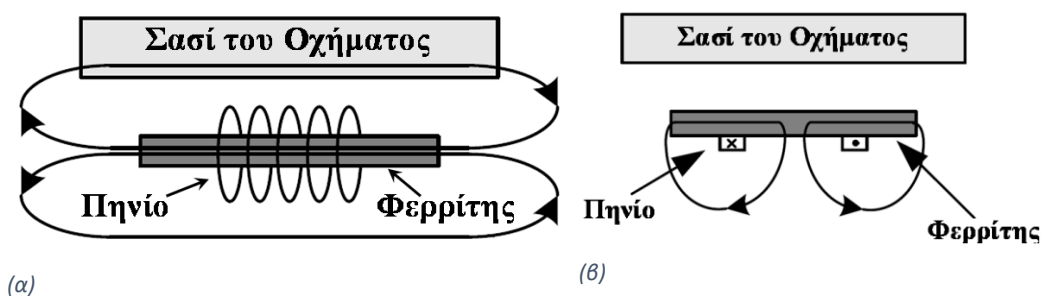
Εικόνα 1-5: Πρώιμο σύστημα επαγωγικής φόρτισης, παρόμοιο με ένα συνηθισμένο μετασχηματιστή [1]



Εικόνα 1-6: Σχεδίαση διάταξης χωρίς τη χρήση φερρίτη[1]

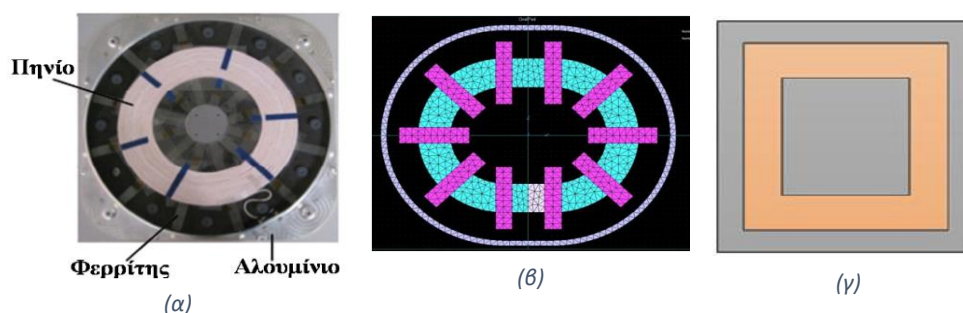
- **Διατάξεις διπλής και μονής όψεως**

Οι μαγνητικοί συζευκτές κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες: τους συζευκτές διπλής όψεως και τους συζευκτές μονής όψεως (Εικόνα 1-7). Στους συζευκτές διπλής όψεως η μαγνητική ροή κατανέμεται και στις δύο πλευρές του συζευκτή. Όμως για την ασύρματη μεταφορά ισχύος χρειάζεται μόνο η μία κατεύθυνση (μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) ενώ η άλλη πλευρά προκαλεί υψηλές απώλειες δινορρευμάτων στο σασί του αυτοκινήτου. Για να περιοριστεί η ανεπιθύμητη μαγνητική ροή μπορεί να χρησιμοποιηθεί θωράκιση αλουμινίου χωρίς όμως να επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των μαγνητικών απωλειών.

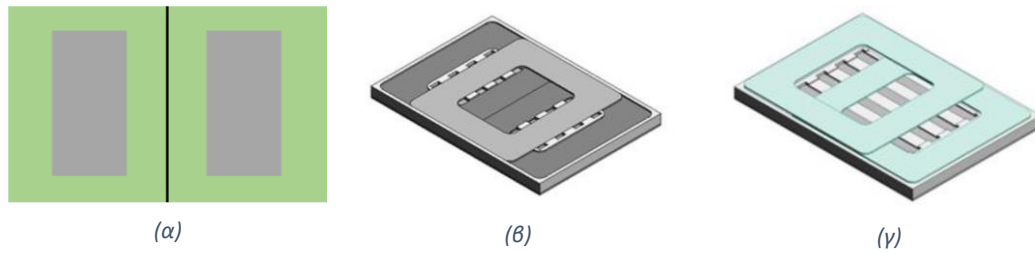


Εικόνα 1-7: Κατεύθυνση της μαγνητικής ροής σε συζευκτές (α) διπλής-όψεως και (β) μονής όψεως [52].

Στις διατάξεις μονής όψεως η κατεύθυνση της μαγνητικής ροής περιορίζεται κυρίως στη μία μόνο πλευρά του συζευκτή και η τοποθέτηση του πηνίου στη μία πλευρά του συζευκτή περιορίζει σημαντικά τη διαρρέουσα ροή στο πίσω μέρος των εν λόγω συζευκτών έχοντας έτσι πολύ μικρότερες απαιτήσεις θωράκισης. Αυτά τα πλεονεκτήματα οδήγησαν στην επικράτηση των διατάξεων μονής όψεως στην ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Παραδείγματα αυτών των διατάξεων φαίνονται στην Εικόνα 1-8, οι οποίες περιλαμβάνουν ένα πηνίο στο 1^ο και ένα στο 2^ο. Επίσης υπάρχουν διατάξεις μονής όψεως δύο πηνίων(DD), δύο πηνίων με ένα βοηθητικό πηνίο(DDQ) καθώς επίσης και διατάξεις με αναδιάταξη των δύο πηνίων(διπολική) όπως φαίνονται στην Εικόνα 1-9 και οι οποίες θα αναλυθούν περαιτέρω στο κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής[1].



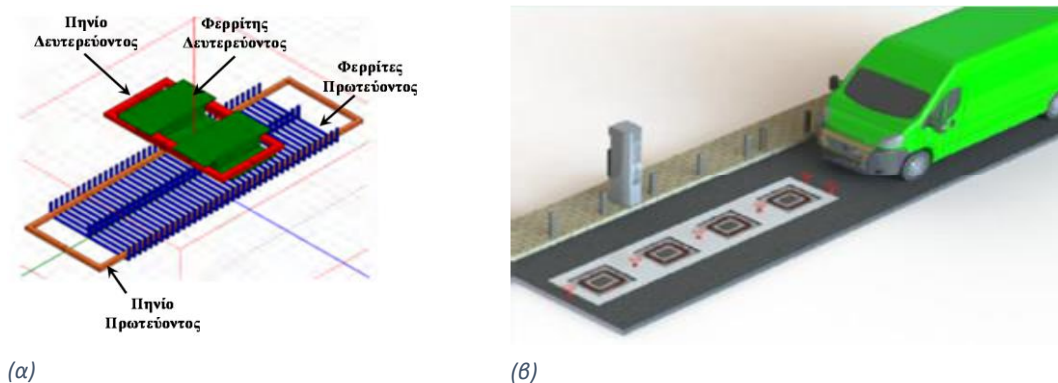
Εικόνα 1-8: Διατάξεις μονής όψης: (α) κυκλική, (β) οβάλ και (γ) ορθογώνια[1].



Εικόνα 1-9: Μονής όψεως διατάξεις δύο πηνίων: (α) DD διάταξη, (β) DDQ διάταξη και (γ) διπολική[1]

1.2.2: Δυναμική Φόρτιση

Η δυναμική φόρτιση είναι η ασύρματη φόρτιση κατά την οποία το όχημα φορτίζεται καθώς κινείται στο δρόμο χωρίς να χρειάζεται να σταθμεύσει κάπου για να φορτιστεί. Με αυτό τον τρόπο η αυτονομία του ηλεκτρικού οχήματος αυξάνεται σημαντικά επιλύοντας επιτυχώς τα όποια προβλήματα παρουσιάζονται σχετικά με την περιορισμένη ικανότητα των ηλεκτρικών οχημάτων για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Η βασική λειτουργία της δυναμικής φόρτισης είναι παρόμοια με αυτή της στατικής φόρτισης έχοντας ένα πηνίο θαμμένο μέσα στο έδαφος (πρωτεύον) και ένα πηνίο προσκολλημένο κάτω από το ηλεκτρικό όχημα (δευτερεύον). Υπάρχουν δύο είδη πρωτεύοντος στη δυναμική φόρτιση: η **ενιαία** και **τμηματική** διάταξη (Εικόνα 1-10-α και β αντίστοιχα).

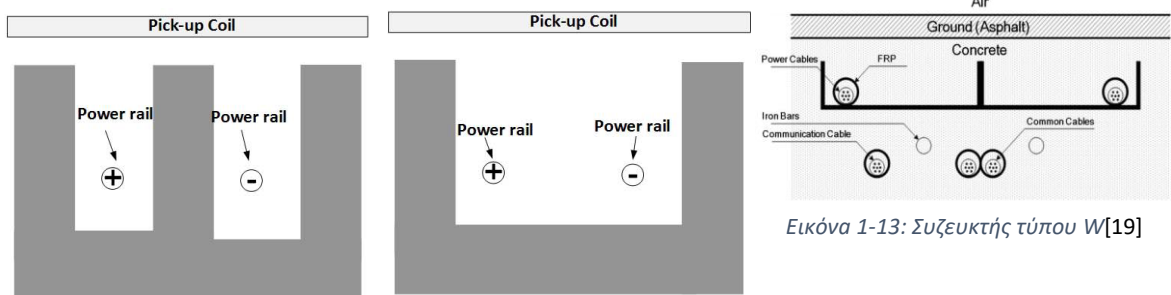


Εικόνα 1-10: (α) Ενιαία και (β) Τμηματική διάταξη δυναμικής επαγωγικής φόρτισης[1]

- **Ενιαία διάταξη**

Το πρωτεύον της ενιαίας διάταξης είναι μια μεγάλη ράγα κατά μήκος του δρόμου της οποίας το όνομα προκύπτει από τον σχηματισμό των φερριτών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της. Σε πρώτη φάση κατασκευάστηκε ο

συζευκτής τύπου E όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-11 ο οποίος είναι ιδιαίτερα επιρρεπής στην οριζόντια μετατόπιση και επιτυγχάνει την μεταφορά ισχύος σε ένα πολύ μικρό διάκενο αέρα. Για να βελτιωθούν αυτά προτάθηκε ο συζευκτής τύπου U όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-12. Προκειμένου να μειωθεί η ποσότητα φερρίτη που χρησιμοποιείται στην διάταξη τύπου U προτάθηκε ο συζευκτής τύπου W (Εικόνα 1-13), ο οποίος με κατάλληλη τοποθέτηση των φερριτών επιτυγχάνει τη χρήση 1/5 του φερρίτη που απαιτείται για τον τύπο U συζευκτή, ενώ επιτυγχάνει και αυξημένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Στο κεφάλαιο 2 αναλύεται πιο λεπτομερώς ο μαγνητικός συζευκτής για την ενιαία διάταξη.

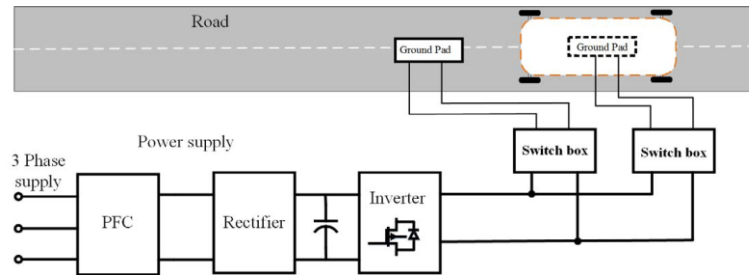


Εικόνα 1-11: Συζευκτής τύπου E [14] Εικόνα 1-12: Συζευκτής τύπου U [14]

Εικόνα 1-13: Συζευκτής τύπου W[19]

- **Τμηματική διάταξη**

Το δεύτερο είδος της δυναμικής φόρτισης είναι η τμηματική διάταξη κατά την οποία το πρωτεύον αποτελείται από πολλά μικρά τμηματικά πηνία όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-10-β. Αυτά τα τμήματα είναι όμοια με τις διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην στατική φόρτιση. Στην τμηματική διάταξη κάθε διάταξη του πρωτεύοντος οδηγείται συνήθως από ένα ανεξάρτητο αντιστροφέα ισχύος και ενεργοποιείται μόνο όταν ένα όχημα περνά πάνω από αυτή. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση και ένα σημαντικός περιορισμός των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Όμως το μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υψηλό της κόστος αφού κάθε πρωτεύον απαιτεί και ένα αντιστροφέα. Για να επιλυθεί αυτό το μειονέκτημα έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι όπως η οδήγηση περισσότερων του ενός πρωτεύοντων πηνίων από τον ίδιο μετατροπέα όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-14. Περαιτέρω λεπτομέρειες ακολουθούν στο Κεφάλαιο 2.



Εικόνα 1-14: Τμηματικά πηνία δρόμου οδηγούμενα από ένα ενιαίο αντιστροφέα και διακόπτες ON/OFF [14]

1.3: Επίπεδα μεταφοράς ισχύος στην επαγωγική φόρτιση

Σύμφωνα με τα πρότυπα [1], SAE J2954 και IEC 61980 οι κατηγορίες ισχύος σε συστήματα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας (Wireless Power Transfer – WPT) για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων είναι οι ακόλουθες:

- **WPT-1:** Η κατηγορία αυτή αφορά συστήματα επαγωγικής φόρτισης με τη μικρότερη δυνατή μεταφορά ενέργειας. Η μέγιστη ισχύς εισόδου στα συστήματα αυτά είναι ίση με **3,7 kVA**. Η ελάχιστη δυνατή απόδοση των συστημάτων αυτών είναι ίση με 85% και περιορίζεται σε 80% όταν παρατηρείται μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.
- **WPT-2:** Στα συστήματα αυτής της κατηγορίας η μέγιστη ισχύς εισόδου τους είναι ίση με **7,7KVA**. Οι περιορισμοί σχετικά με την ελάχιστη απόδοση είναι αυτές που ισχύουν και για την πρώτη κατηγορία(WPT-1).
- **WPT-3:** Τα συστήματα που ανήκουν σ' αυτήν την κατηγορία έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν μεγαλύτερα ποσά ισχύος, αφού η ισχύς εισόδου τους είναι ίση με **11,1KVA**. Οι περιορισμοί σχετικά με την απόδοση είναι ίδιοι με των κατηγοριών WPT-1 και WPT-2.
- **WPT-4:** Η ισχύς εισόδου στα συστήματα της κατηγορίας αυτής είναι ίση με **22KVA** και επιτρέπει τη μεταφορά μεγάλων ποσών ενέργειας μεταξύ φορτιστή και οχήματος.

1.4: Προστασία επιβατών από ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο υπάρχει παντού γύρω μας και είναι είτε φυσικής είτε ανθρωπογενής προέλευσης. Αποτελείται από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο. Ηλεκτρικό πεδίο έχουμε όπου υπάρχει διαφορά δυναμικού και μαγνητικό πεδίο έχουμε όπου υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα.

1.4.1: Επίδραση των Η/Μ πεδίων σε ζώντες οργανισμούς

Τα ηλεκτρικά πεδία χαμηλής συχνότητας επιδρούν στο ανθρώπινο σώμα επηρεάζοντας την κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων στην επιφάνειά του σώματος, δημιουργούν ηλεκτρικές τάσεις μέσα στο σώμα οι οποίες με την σειρά τους δημιουργούν ρεύματα από το σώμα προς το έδαφος. Τα μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας προκαλούν και αυτά ρεύματα μέσα στο σώμα τα οποία όταν είναι μεγάλα μπορούν να προκαλέσουν διέγερση των νεύρων και των μυών ή να επηρεάσουν άλλες βιολογικές διεργασίες, αλλά είναι πολύ μικρά σε σχέση με τα ρεύματα που προκαλούν ηλεκτροπληξία. Το 1996 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) ξεκίνησε ένα μεγάλο επιστημονικό έργο με συμμετοχή ερευνητών από διάφορους κλάδους και χώρες έχοντας ως στόχο τη μελέτη των πιθανών επιπτώσεων στην υγεία του ανθρώπου από πολλές και διαφορετικές πηγές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και ανακοίνωσε ότι δεν υπάρχουν ακόμη επαρκείς ενδείξεις για τις συνέπειες στην υγεία από την έκθεση σε χαμηλά πεδία επισημαίνοντας ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα που αφορά τις βιολογικές επιπτώσεις της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

1.4.2: Πρότυπα μέγιστου Η/Μ πεδίου

Η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP), η οποία είναι μια μη-κυβερνητική οργάνωση, επίσημα αναγνωρισμένη από τον ΠΟΥ, αξιολογεί επιστημονικά αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν παγκοσμίως και εκδίδει οδηγίες οι οποίες συνιστούν ανώτατα όρια έκθεσης. Αν και η κάθε χώρα έχει τα δικά της όρια για την έκθεση του κοινού σε Η/Μ πεδία τα περισσότερα από αυτά στηρίζονται στα όρια της ICNIRP.

Όταν το ανθρώπινο σώμα εκτίθεται σε Η/Μ πεδία επάγονται σ' αυτό ηλεκτρικά ρεύματα ασυσχέτιστα με τα φυσιολογικά ρεύματα του σώματος. Γι' αυτό και η ICNIRP καθόρισε οδηγίες για τις χαμηλές συχνότητες οι οποίες διασφαλίζουν ότι η ένταση των ρευμάτων που οφείλονται στα Η/Μ πεδία είναι χαμηλότερη από την ένταση των φυσιολογικών ρευμάτων.

1.4.3: Θωράκιση έναντι ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου

Η έκθεση στο μαγνητικό πεδίο (MF) εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) στα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) έχει προκαλέσει την ανησυχία του κοινού για την ανθρώπινη υγεία. Διαπιστώθηκε ότι τα πλάτη των μαγνητικών πεδίων και τα φασματικά στοιχεία τους μπορούσαν να τροποποιηθούν αντικαθιστώντας εξαρτήματα, ενώ οι τακτικοί έλεγχοι ή η συντήρηση δεν επηρέασαν τις τιμές του B μέσα στο όχημα. Αυτή η παρατήρηση υπογραμμίζει την ανάγκη τακτικής παρακολούθησης των μαγνητικών πεδίων ELF μέσα στα ηλεκτρικά οχήματα, ειδικά μετά από μεγάλες επισκευές ή ατυχήματα, για την προστασία των χρηστών αυτοκινήτων από πιθανή υπερβολική έκθεση σε μαγνητικά πεδία ELF. Επίσης διαπιστώθηκε ότι το υλικό του αμαξώματος του ηλεκτρικού οχήματος με υψηλότερη ειδική αντίσταση και μαγνητική διαπερατότητα είναι πιο ασφαλές για το σώμα του οδηγού.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για δημόσιες και ιδιωτικές μεταφορές και αντιπροσωπεύουν πιθανές πηγές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (ElectroMagnetic Interference-EMI). Οι πιθανές επιπτώσεις για ασθενείς με καρδιακές εμφυτεύσιμες ηλεκτρονικές συσκευές (Cardiac Implantable Electronic Devices-CIED) όπως οι βηματοδότες μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα την δυσλειτουργία της συσκευής. Μελέτη έδειξε ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία όμως δεν επηρέασαν τη λειτουργία ή τον προγραμματισμό του CIED. Η οδήγηση και η φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων φαίνεται να είναι ασφαλής για ασθενείς με CIED.

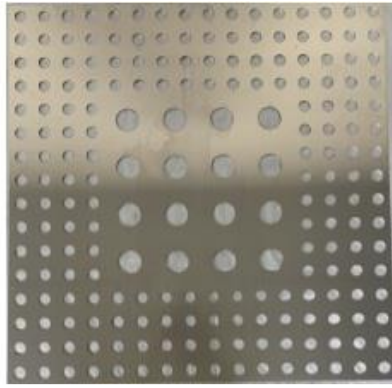
Για ένα σύστημα ασύρματης φόρτισης πηνίου DD 100kW προτάθηκε μια τεχνική θωράκισης για την καταστολή των εκπομπών μαγνητικού πεδίου κάτω από τα όρια που έχει θέσει η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP). Το πρότυπο διαρροής που παράγεται από το πηνίο DD είναι διαφορετικό από τα μονοπολικά (κυκλικά, ορθογώνια, κ.λπ.) πηνία και οι παραδοσιακές θωρακίσεις αλουμινίου που βασίζονται σε δινορεύματα δεν είναι αποτελεσματικές στην καταστολή αυτού του πεδίου διαρροής. Γι' αυτό η τεχνική που προτάθηκε είναι ένας συνδυασμός θωράκισης αλουμινίου και μαγνητικής θωράκισης χαμηλής μαγνητικής αντίστασης για την καταστολή των εκπομπών μαγνητικού πεδίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η θωράκιση αλουμινίου αυξάνει τις εκπομπές των πηνίων DD κατά 25% και η προτεινόμενη μαγνητική θωράκιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταστολή της εκπομπής κατά 60%.

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα για την αξιολόγηση της ασφάλειας της ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης ενός συστήματος ασύρματης φόρτισης μαγνητικού

συντονισμού σε ηλεκτρικά οχήματα στο ανθρώπινο κεντρικό νευρικό σύστημα εξετάζοντας τρία μοντέλα ηλεκτρικών αυτοκινήτων, το πρώτο ηλεκτρικό όχημα ήταν κατασκευασμένο από ανθρακονήματα (CFRP), το αμάξωμα του δεύτερου ήταν από κράμα αλουμινίου και του τρίτου από χάλυβα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα οχήματα από ανθρακονήματα CFRP, κράματος αλουμινίου και χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα μπορούν να θωρακίσουν αποτελεσματικά τους ανθρώπους από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ότι το σύστημα ασύρματης φόρτισης μαγνητικού συντονισμού ενός ηλεκτρικού οχήματος δεν θα βλάψει το ανθρώπινο κεντρικό νευρικό σύστημα στο όχημα.

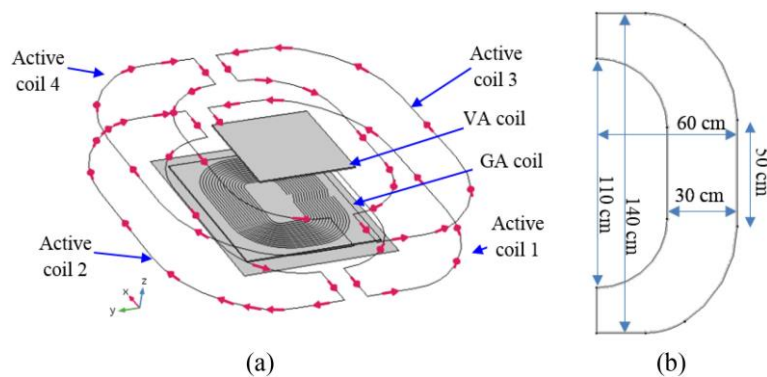
Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Έργου EMPIR-16ENG08 MICEV, διεξήχθη μια ευρεία πειραματική και αριθμητική μελέτη για την αξιολόγηση της έκθεσης του κοινού σε εκτρεπόμενα μαγνητικά πεδία (Inductive Power Transfer-IPT) για δύο διαφορετικά σενάρια έκθεσης: (1) για ένα σύστημα μοντέλου IPT που προέρχεται από το πρότυπο SAE J2954 που λειτουργεί στα 85 kHz για ένα ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα σε συνδυασμό με το μοντέλο ενός ρεαλιστικού μοντέλου αμαξώματος και (2) για ένα σύστημα μοντέλου IPT με μέγιστη ονομαστική ισχύ 50 kW στα 27,8 kHz για ένα πραγματικό μικρό λεωφορείο που αναπαρήχθη με ορισμένες απλοποιήσεις σε δύο διαφορετικά εργαλεία προσομοίωσης 3D πεπερασμένων στοιχείων (FEM) (λογισμικό Opera 3D και CST). Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν **ότι το αμάξωμα του οχήματος αποτελεί αποτελεσματική θωράκιση έναντι του μαγνητικού πεδίου και προκαλεί μείωση του πεδίου κατά τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους κοντά στα πηνία.**

Συνήθως τα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος χρησιμοποιούν μια πλάκα αλουμινίου για την προστασία από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, η οποία αν και έχει καλή απόδοση θωράκισης μειώνει αρκετά την απόδοση μετάδοσης αυτών των συστημάτων. Γι' αυτό προτάθηκε μια πλάκα αλουμινίου με οπές διαφορετικών μεγεθών για την απόσβεση των δινορρευμάτων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-15. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η πλάκα μπορεί να μειώσει τις παρεμβολές στην απόδοση μετάδοσης του συστήματος ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και να βελτιώσει περαιτέρω αποτελεσματικά το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον του συστήματος ταυτόχρονα.



Εικόνα 1-15: Πλάκα αλουμινίου με οπές διαφορετικών μεγεθών [43]

Τα ρεύματα που ρέουν στα πηνία ενός συστήματος ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) για τη φόρτιση των μπαταριών ενός ηλεκτρικού οχήματος δημιουργούν μαγνητικό πεδίο γι' αυτό και προτείνεται ένας νέος σχεδιασμός θωράκισης ενεργού πηνίου για την μείωση αυτού του μαγνητικού πεδίου. Η κύρια ιδέα (Εικόνα 1-16) είναι να διαιρεθεί ο παραδοσιακός ενεργός βρόχος που χρησιμοποιείται για τη θωράκιση μιας πηγής σε δύο ξεχωριστά πηνία θωράκισης (το ένα στο έδαφος και το άλλο στο αυτοκίνητο), ώστε να μην επηρεαστεί αρνητικά η απόδοση του WPT.



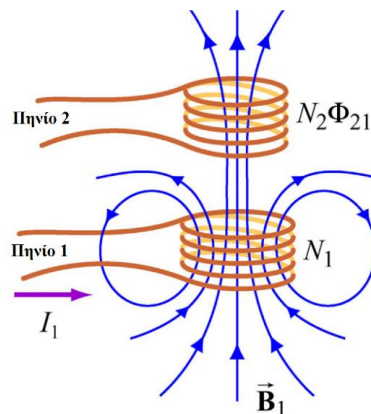
Εικόνα 1-16: (a) Διαμόρφωση και (b) διαστάσεις των ενεργών πηνίων θωράκισης [49].

Στατική & Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

2.1: Στατική Επαγωγική Φόρτιση

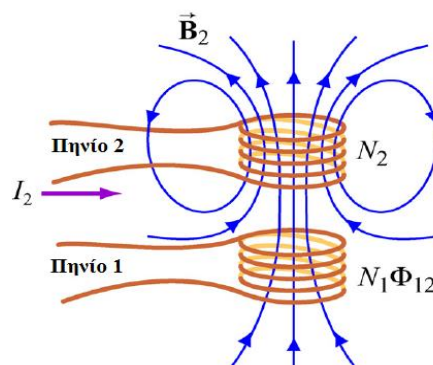
2.1.1: Βασικές αρχές λειτουργίας επαγωγικής φόρτισης

Η επαγωγική φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος στηρίζεται στην επαγωγική σύζευξη μεταξύ δύο πηνίων από τα οποία το ένα βρίσκεται στο έδαφος και το άλλο είναι προσκολλημένο στο κάτω μέρος του οχήματος. Πριν να προχωρήσουμε στο πραγματικό σύστημα η βασική αρχή λειτουργίας της επαγωγικής φόρτισης φαίνεται και στην εικόνα 2-1.



Εικόνα 2-1: Το ρεύμα στο πηνίο 1 παράγει μια μαγνητική ροή στο πηνίο 2[2]

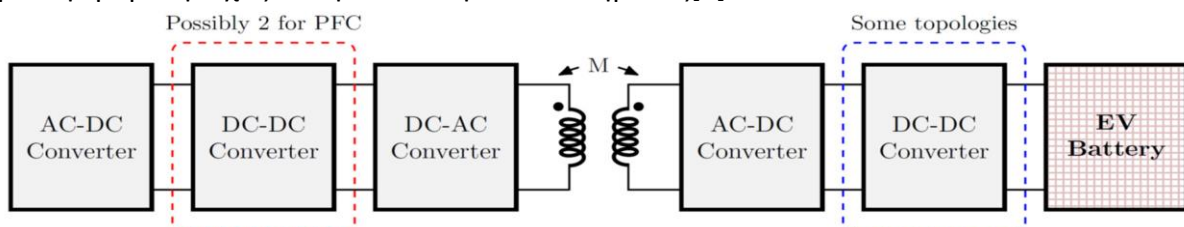
Το πρώτο πηνίο έχει N_1 τυλίγματα και φέρει ένα ρεύμα I_1 που παράγει ένα μαγνητικό πεδίο B_1 . Όταν τα πηνία είναι σε μια ορισμένη απόσταση κοντά το ένα από το άλλο η ροή Φ_{21} η οποία περνά από το πηνίο 1 θα περάσει και από το πηνίο 2. Αν το ρεύμα I_1 μεταβάλλεται ως προς τον χρόνο θα μεταβάλλεται και η Φ_{21} οπότε θα αναπτυχθεί μια επαγόμενη Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) στο πηνίο 2[1], [2]. Αυτή με την σειρά της θα προκαλέσει ένα ρεύμα στο πηνίο 2 το οποίο θα φορτίσει την μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος.



Εικόνα 2.2: Το ρεύμα στο πηνίο 2 παράγει μια μαγνητική ροή στο πηνίο 1[2]

Στην περίπτωση που θέλουμε να μεταφέρεται ενέργεια από το όχημα στο δίκτυο (Vehicle to Grid) θα ισχύσει κάτι παρόμοιο με πιο πάνω. Το πηνίο 2 έχει N_2 τυλίγματα και φέρει ένα ρεύμα I_2 το οποίο παράγει ένα μαγνητικό πεδίο B_2 (Εικόνα 2-2). Όταν τα πηνία είναι σε μια ορισμένη απόσταση κοντά το ένα από το άλλο η ροή Φ_{12} η οποία περνά από το πηνίο 2 θα περάσει και από το πηνίο 1. Αν το ρεύμα I_2 μεταβάλλεται ως προς τον χρόνο θα μεταβάλλεται και η Φ_{12} οπότεν θα αναπτυχθεί μια επαγόμενη Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) στο πηνίο 1[1], [2]. Αυτή με την σειρά της θα διοχετεύσει στο δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια από την μπαταρία του οχήματος.

Ένα τυπικό σύστημα (Εικόνα 2-3) επαγωγικής φόρτισης αποτελείται από μια πρωτεύουσα και μια δευτερεύουσα πλευρά οι οποίες συζεύγονται επαγωγικά μέσω πηνίων. Η πρωτεύουσα πλευρά συνδέεται με το δίκτυο μέσω ενός ανορθωτή ο οποίος μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές(AC/DC). Ακολούθως ένας DC/DC μετατροπέας διορθώνει τον συντελεστή ισχύος έτσι ώστε το σύστημα να τροφοδοτείται με μια κατάλληλη τάση. Μετά ένας αντιστροφέας δημιουργεί ένα εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας για να οδηγήσει το 1^ο πηνίο. Όπως περιεγράφηκε και πιο πάνω το εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας στο 1^ο πηνίο θα επάγει μια ΗΕΔ στο 2^ο πηνίο η οποία θα προκαλέσει ένα εναλλασσόμενο ρεύμα στην δευτερεύουσα πλευρά. Ακολούθως ένας ανορθωτής μετατρέπει το υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές (AC/DC) και τελικά ένας DC/DC μετατροπέας δίνει την επιθυμητή τάση στην μπαταρία του οχήματος για να φορτιστεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο πλευρές χρησιμοποιούνται τοπολογίες αντιστάθμισης για να εξαλειφθούν διαρροές μαγνητικής ροής και για να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος. Επίσης η συχνότητα του υψίσυχνου εναλλασσομένου ρεύματος στην πρωτεύουσα πλευρά επιλέγεται έτσι ώστε να συντονίζεται η πρωτεύουσα πλευρά με την τοπολογία αντιστάθμισης της δευτερεύουσας πλευράς για να μεγιστοποιείται η μεταφερόμενη ισχύς και η απόδοση του συστήματος[3].

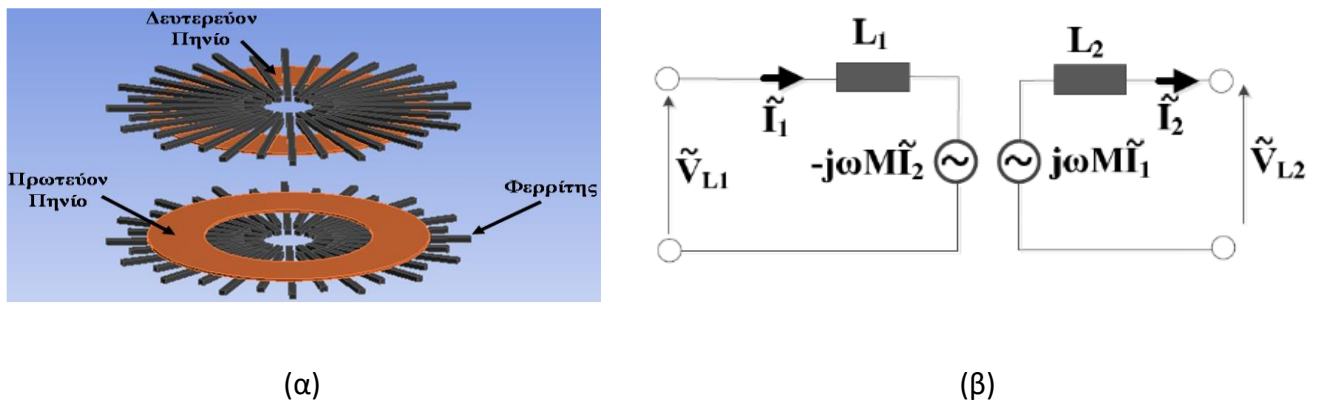


Εικόνα 2.3: Τοπολογία μετατροπέων επαγωγικής φόρτισης (PFC= Power Factor Correction)[3]

Ο μαγνητικός συζεύκτης σ' ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης (Εικόνα 2-4) αποτελείται από ένα πηνίο στην πλευρά του πρωτεύοντος που διαρρέεται από ρεύμα υψηλής συχνότητας και επάγει μια τάση στο 2^ο πηνίο όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου θεωρείται ίση με L_1 και L_2 αντίστοιχα, ενώ τα δύο πηνία έχουν αμοιβαία επαγωγή ίση με M . Η αμοιβαία επαγωγή M δείχνει πόσο καλά το σύστημα είναι συζευγμένο και ισχύει

$$M \leq \sqrt{L_1 L_2} \quad (2.1)$$

Για να κατευθυνθεί και να ενισχυθεί η μαγνητική ροή που παράγεται από το 1^ο πηνίο χρησιμοποιούνται σιδηρομαγνητικά υλικά όπως φερρίτης.



Εικόνα 2.4: (α) Μαγνητικός συζεύκτης σε σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και (β) Ισοδύναμο κύκλωμα μαγνητικού συζεύκτη [1]

Από το ισοδύναμο κύκλωμα συμπεραίνουμε ότι η τάση στα άκρα των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα είναι:

$$\tilde{V}_{L1} = j\omega L_1 \tilde{I}_1 - j\omega M \tilde{I}_2 \quad (2.2)$$

$$\tilde{V}_{L2} = j\omega M \tilde{I}_1 - j\omega L_2 \tilde{I}_2 \quad (2.3)$$

Ο όρος $j\omega M \tilde{I}_1$ είναι η τάση που επάγεται στην δευτερεύουσα πλευρά από το \tilde{I}_1 . Αντίστοιχα ο όρος $-j\omega M \tilde{I}_2$ είναι η τάση που επάγεται στην πρωτεύουσα πλευρά από το \tilde{I}_2 .

Σε αυτό το σημείο αξίζει να εισάγουμε και τον όρο του συντελεστή σύζευξης (coupling factor) k ο οποίος εκφράζει τον λόγο της σύζευξης την μαγνητικής ροής μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου και ισούται με:

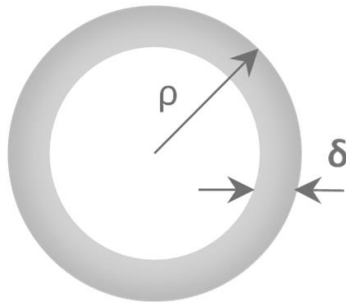
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.4)$$

Καλώδια Litz

Σε εφαρμογές συνεχούς ρεύματος το ρεύμα που διαρρέει ένα αγωγό ισοκατανέμεται σε όλη την επιφάνεια της διατομής του αγωγού κάτι που δεν συμβαίνει σε εφαρμογές εναλλασσομένου ρεύματος. Αυτό συμβαίνει στις AC εφαρμογές λόγω του επιδερμικού φαινομένου και του φαινομένου εγγύτητας. Το επιδερμικό φαινόμενο εκφράζει την τάση του εναλλασσομένου ρεύματος που διαρρέει ένα κυκλικό αγωγό να μεταδίδεται κοντά στην εξωτερική του επιφάνεια κάτι που αυξάνει τις ωμικές απώλειες του αγωγού (Εικόνα 2.5). Η περιοχή που ρέει το ρεύμα κοντά στην επιφάνεια έχει βάθος δ (=επιδερμικό βάθος).

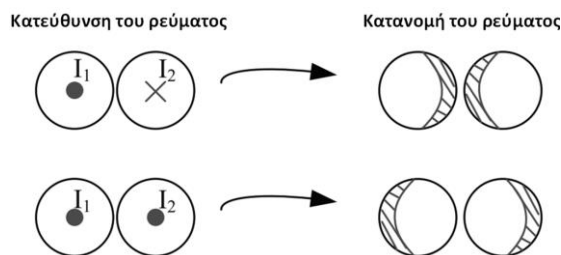
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (2.5)$$

Όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του ρεύματος, σ είναι η αγωγιμότητα του αγωγού και μ η μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού. Από τον τύπο 2.5 συμπεραίνουμε ότι το βάθος δ εξαρτάται από την ω και άρα και από την συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.



Εικόνα 2.5: Επιδερμικό φαινόμενο[1]

Το φαινόμενο εγγύτητας εκφράζει την τάση του εναλλασσομένου ρεύματος να ρέει σε μη επιθυμητές διαδρομές κατά μήκος ενός αγωγού, λόγω της παρουσίας μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από κοντινούς σε αυτόν αγωγούς, αυξάνοντας έτσι τις απώλειες του αγωγού (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Φαινόμενο εγγύτητας[1]

Τα πιο πάνω προβλήματα αντιμετωπίζονται με χρήση καλωδίων Litz στα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Τα καλώδια Litz αποτελούνται από πολλά μικρότερα καλώδια τα οποία είναι μεταξύ τους μονωμένα και κατάλληλα περιεστρεμμένα (Εικόνα 2.7).

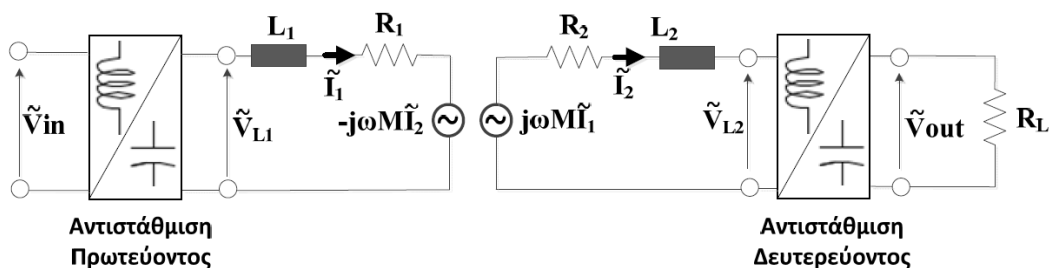


Εικόνα 2.7: Καλώδιο Litz[1]

Το ότι αποτελούνται από πολλά μικρότερα καλώδια συντελεί στο γεγονός το βάθος δ της περιοχής που ρέει το υψίσυχο εναλλασσόμενο ρεύμα να είναι μεγαλύτερο από την ακτίνα ρ της διατομής του αγωγού. Επίσης οι μικρότεροι αγωγοί του καλωδίου Litz είναι περιστραμμένοι κατάλληλα έτσι ώστε να ισοκατανέμονται τα ρεύματα σε κάθε αγωγό και έτσι να αλληλοαναιρούνται τα μαγνητικά πεδία με αποτέλεσμα την μη εμφάνιση του φαινομένου της εγγύτητας[1].

2.1.2: Τοπολογίες αντιστάθμισης

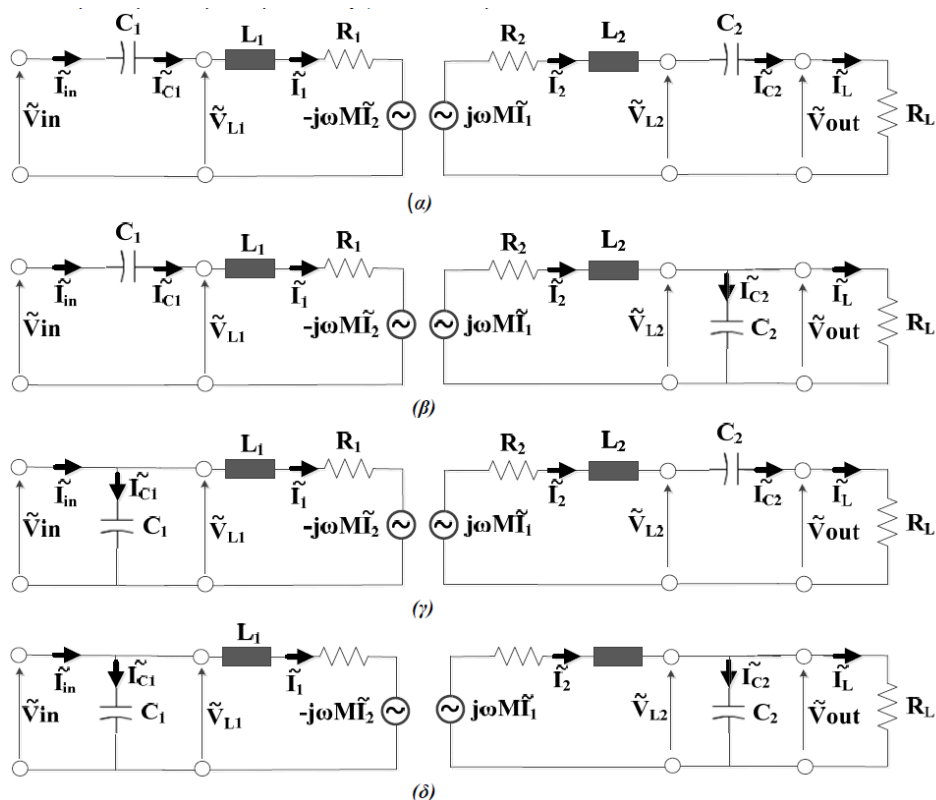
Σ' ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης μετά τον αντιστροφέα υψηλής συχνότητας στην πρωτεύουσα πλευρά και πριν τον ανορθωτή στην δευτερεύουσα πλευρά εγκαθίστανται τοπολογίες αντιστάθμισης (Εικόνα 2.8 - επειδή το καλώδιο Litz δεν εξαλείφει τελείως τις ωμικές απώλειες εμφανίζεται μια μικρή ωμική αντίσταση R_1 και R_2 στο 1^{ov} και 2^{ov} αντίστοιχα).



Εικόνα 2.8: Αντιστάθμιση στο πρωτεύον και στο δευτερεύον του συστήματος[1]

Αυτό γίνεται κυρίως για την αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος και την μείωση της αέργου ισχύος που διακινείται στο σύστημα ώστε να επιτευχθεί μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος [1]. Όμως υπάρχουν και άλλοι σημαντικοί λόγοι που χρησιμοποιείται η αντιστάθμιση. Στην δευτερεύουσα πλευρά η αντιστάθμιση ρυθμίζει το κύκλωμα έτσι ώστε να έχει την ίδια συχνότητα συντονισμού με την πρωτεύουσα τοπολογία και έτσι να μεγιστοποιείται η μεταφερόμενη ισχύς. Επιπλέον οι τοπολογίες αντιστάθμισης βοηθούν στο ομαλό ανοιγόκλημα των τρανζίστορ ισχύος με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απώλειες ανοιγοκλεισήματος [4]. Τέλος με την αντιστάθμιση επιτυγχάνεται σταθερό ρεύμα και σταθερή τάση στην δευτερεύουσα πλευρά με αποτέλεσμα η φόρτιση να μην εξαρτάται από το φορτίο της μπαταρίας κάτι που είναι πολύ επιθυμητό στην φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων [3].

Υπάρχουν τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης οι οποίες βασίζονται στην τοποθέτηση ενός πυκνωτή στο πρωτεύον και ενός στο δευτερεύον και ανάλογα με την θέση που τοποθετούνται (Σειρά ή Παράλληλα) στο 1^ον και 2^ον καθορίζουν την ονομασία της τοπολογίας. Αυτές είναι Σειρά-Σειρά (**Series-Series,SS**), Σειρά-Παράλληλα (**Series-Parallel,SP**), Παράλληλα-Σειρά (**Parallel-Series,PS**) και Παράλληλα-Παράλληλα (**Parallel-Parallel,PP**) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.9.



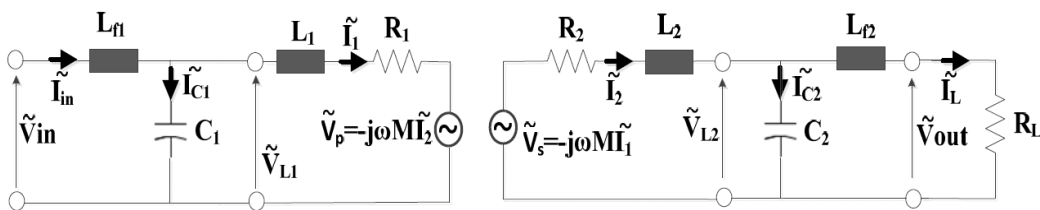
Εικόνα 2.9: Τοπολογίες αντιστάθμισης: (α)Σειρά-Σειρά (β) Σειρά-Παράλληλα (γ) Παράλληλα-Σειρά (δ) Παράλληλα-Παράλληλα[1]

Μετά από έρευνα έχει αποδειχθεί ότι οι τοπολογίες SS και SP είναι οι πιο προτιμητέες με κάποιες επιφυλάξεις. Οι SS και SP είναι ικανές να μειώσουν το απαιτούμενο εύρος της προσφερόμενης ισχύος. Η SP τοπολογία έχει βρεθεί να έχει μια τάση εξόδου ανεξάρτητη από το φορτίο. Όμως όταν οι τοπολογίες SS και SP λειτουργούν με μια πηγή τάσης και ένα παράγοντα σύζευξης $k=0$, ο οποίος έχει την τιμή αυτή λόγω κακής ευθυγράμμισης και μεγάλων αποστάσεων του ενός πηνίου από το άλλο, μπορούν να καταστούν επικίνδυνες για την παροχή ισχύος. Γενικά ο κύριος στόχος των βασικών τοπολογιών αντιστάθμισης είναι να έχουν μια χωρητική αντιστάθμιση η οποία να αναπληρώνει την διαφεύγουσα αυτεπαγωγή και να επιτυγχάνεται έτσι μέγιστη μεταφορά ισχύος[3].

Τοπολογίες με χρήση περισσότερων του ενός στοιχείου αντιστάθμισης στο 1^{ov} και 2^{ov} :

- **LCL τοπολογία αντιστάθμισης**

Υλοποιείται με την χρήση ενός πυκνωτή παράλληλα με το πηνίο της διάταξης και ενός επιπλέον πηνίου αντιστάθμισης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-10[1].

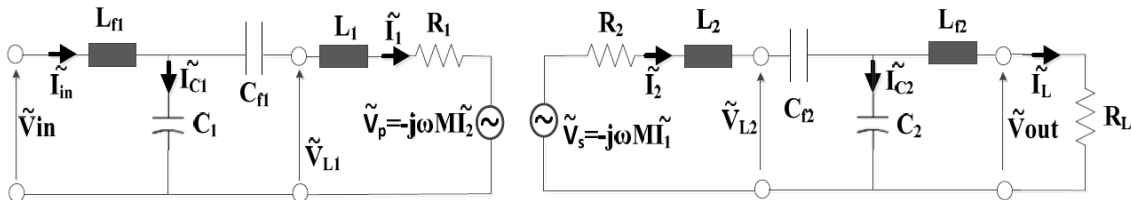


Εικόνα 2-10: LCL Τοπολογία Αντιστάθμισης[1]

Αυτή η τοπολογία επιτυγχάνει την προστασία του πυκνωτή αντιστάθμισης από τον τετραγωνικό παλμό εξόδου του αντιστροφέα, ο οποίος παλμός υποβάλλει τον πυκνωτή σε μεγάλες στιγμιαίες αλλαγές της τάσης, με την τοποθέτηση ενός επιπλέον πηνίου μετά τον αντιστροφέα αυξάνοντας έτσι τον χρόνο ζωής του εν λόγω πυκνωτή. Επίσης η LCL τοπολογία χρησιμοποιείται κυρίως στο 1^{ov} μέρος γιατί όχι μόνο αυξάνει τον χρόνο ζωής του πυκνωτή αλλά και γιατί λειτουργεί με σταθερό ρεύμα χωρίς μεταβολές το οποίο εξαρτάται από το φορτίο λαμβάνοντας υπόψη μεταβαλλόμενους παράγοντες σύζευξης k . Ακόμα η εν λόγω τοπολογία λειτουργεί και σαν φίλτρο για αρμονικές ανώτερης τάξης.

- **LCC τοπολογία αντιστάθμισης**

Είναι παρόμοια με την LCL τοπολογία αντιστάθμισης με την διαφορά ότι προστίθενται οι πυκνωτές C_{f1} και C_{f2} στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-11[1].



Εικόνα 2-11: LCC τοπολογία αντιστάθμισης[1]

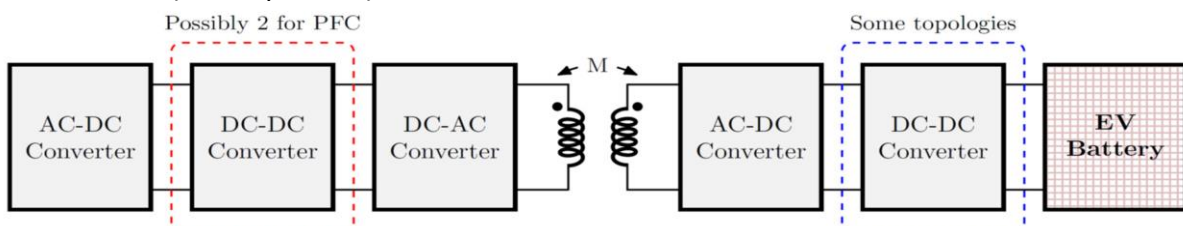
Όπως παρουσιάζεται και στο [5] η LCC τοπολογία είναι λιγότερο ευαίσθητη από την SS στις μεταβολές των αυτεπαγωγών οι οποίες προκαλούνται από την αλλαγή της σχετικής θέσης του πρωτεύοντος από το δευτερεύον πηνίο. Η LCC καθώς επίσης και η LCL τοπολογίες μπορούν να επιτύχουν DC to DC αποδόσεις της τάξεως του 96% για ισχείς εξόδου από 7,36-7,7 kW.

Από τα πιο πάνω διαπιστώνεται ότι η χρήση τοπολογιών αντιστάθμισης με επιπλέον στοιχεία αντιστάθμισης παρέχει την δυνατότητα για αμφίδρομη μεταφορά ισχύος. Επίσης παρέχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στο ρεύμα που διαρρέει τα διάφορα σημεία της διάταξης. Όμως λόγω των υψηλών τάσεων που αναπτύσσονται στα άκρα των στοιχείων αντιστάθμισης απαιτούνται ακριβότερα και πολλαπλάσια στοιχεία σε σχέση με μια βασική τοπολογία αντιστάθμισης[1].

2.1.3: Ηλεκτρονικά Ισχύος και Έλεγχος

Ηλεκτρονικά Ισχύος

Ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται από διάφορους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-3 η οποία ξαναπαρουσιάζεται εδώ.



Εικόνα 2.3: Τοπολογία μετατροπέων επαγωγικής φόρτισης (PFC= Power Factor Correction)[3]

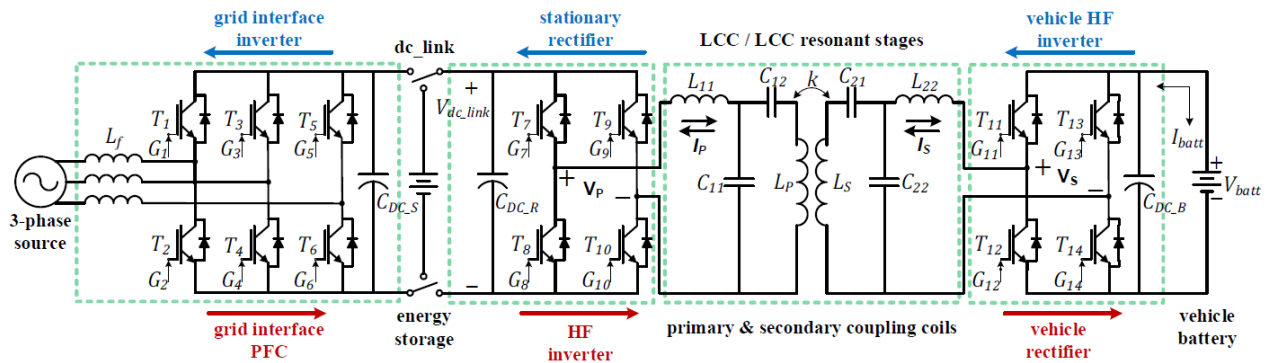
Στην πρωτεύουσα πλευρά οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν την παροχή ισχύος στο σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός ανορθωτή και ενός αντιστροφέα οι οποίοι παρέχουν τις επιθυμητές συχνότητες από ένα τυπικό δίκτυο. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στον αντιστροφέα ο οποίος επιτυγχάνει τον συντονισμό του συστήματος. Ο συντονισμός του συστήματος επιτρέπει λειτουργία με μηδενική διαφορά φάσης κάτι που αυξάνει δραστικά την μεταφορά ισχύος. Επίσης οι διακόπτες του αντιστροφέα πρέπει να αντέχουν την μεταφερόμενη ισχύ και να λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες με τις οποίες μεταφέρονται μεγάλα ποσά ισχύος διαμέσου του κενού αέρα που βρίσκεται μεταξύ των δύο πηνίων. Όταν το σύστημα συντονίζεται η αντιστάθμιση του συστήματος λειτουργεί και σαν φίλτρο για αρμονικές υψηλότερης τάξης [3]. Ο Σύνδεσμος Μηχανικών της Αυτοκινητοβιομηχανίας (Society of Automotive Engineers-SAE) έχει αποφασίσει ότι η κυματομορφή της εξόδου του αντιστροφέα πρέπει να έχει ένα εύρος ζώνης από 79kHz-90kHz.

Στην δευτερεύουσα πλευρά οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των παραμέτρων του φορτίου. Η συνεχής τάση είναι επιθυμητή για την φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων. Στις περιπτώσεις που η αντιστάθμιση επιτρέπει λειτουργία ανεξάρτητη του φορτίου, χρειάζεται μόνο ένας ανορθωτής στο 2^{ον} για να παρέχει ένα DC ρεύμα στο φορτίο. Όταν όμως η συνεχής τάση δεν είναι έμφυτο μέρος του συστήματος, χρειάζεται ένας DC-DC μετατροπέας για να ελέγχει την τάση στο φορτίο.

Σε πολλές περιπτώσεις τα συστήματα λειτουργούν με τέσσερις μετατροπείς κάτι που προκαλεί προβλήματα όπως οι απώλειες που έχει ο κάθε μετατροπέας και ο χώρος που καταλαμβάνει κάθε μετατροπέας. Για να αντιμετωπισθεί αυτό έγινε κάποια έρευνα προς το να απλοποιηθούν τα συστήματα και να μειωθεί ο αριθμός των μετατροπέων. Ένα παράδειγμα είναι η εργασία στο[6] όπου χρησιμοποιείται ένας AC-AC μετατροπέας στην πρωτεύουσα πλευρά εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για ανορθωτή. Το προτεινόμενο σύστημα έχει την δυνατότητα να παράγει μια κυματομορφή των 30 kHz από μια πηγή των 50 Hz.

Τα τελευταία χρόνια εικάζεται ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορούν να παίξουν ένα σημαντικό ρόλο στην αποκέντρωση του δικτύου αφού μπορούν να λειτουργούν σαν μέσα μαζικής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό είναι ανάγκη να

αναπτυχθούν αμφίδρομες τοπολογίες για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο στο όχημα και από το όχημα στο δίκτυο όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-12 [7].



Εικόνα 2-12: Το προτεινόμενο αμφίδρομο σύστημα ασύρματης φόρτισης μπαταριών ηλεκτρικών αυτοκινήτων με αποθήκευση ενέργειας και διεπαφή με το δίκτυο[7]

Το πιο πάνω σύστημα επιτρέπει την μεταφορά ενέργειας από το δίκτυο στην μπαταρία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Επιπλέον η διάταξη μπορεί να εκφορτίσει ασύρματα την μπαταρία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου στο ac δίκτυο ή στον dc δίαυλο του πρωτεύοντος όπου μπορεί να συνδεθεί μια σταθερή μπαταρία. Η σταθερή μπαταρία που είναι συνδεδεμένη στο 1^ο μέρος μπορεί να παρέχει ενέργεια πίσω στο δίκτυο ή να φορτίσει την μπαταρία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Η λειτουργικότητα αυτή μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη ειδικά για την ώρα που χρησιμοποιείται η ηλεκτρική ενέργεια αφού η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ίδια κατά την διάρκεια της ημέρας. Για παράδειγμα η σταθερή μπαταρία μπορεί να φορτιστεί από το δίκτυο όταν η κατανάλωση είναι χαμηλή και οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλές. Ακολούθως το όχημα μπορεί να φορτιστεί το βράδυ χρησιμοποιώντας την ενέργεια που είχε αποθηκευτεί προηγουμένως στην σταθερή μπαταρία. Ακόμα η σταθερή μπαταρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ως εφεδρικό σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είτε στο δίκτυο είτε για την φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος.

Έλεγχος

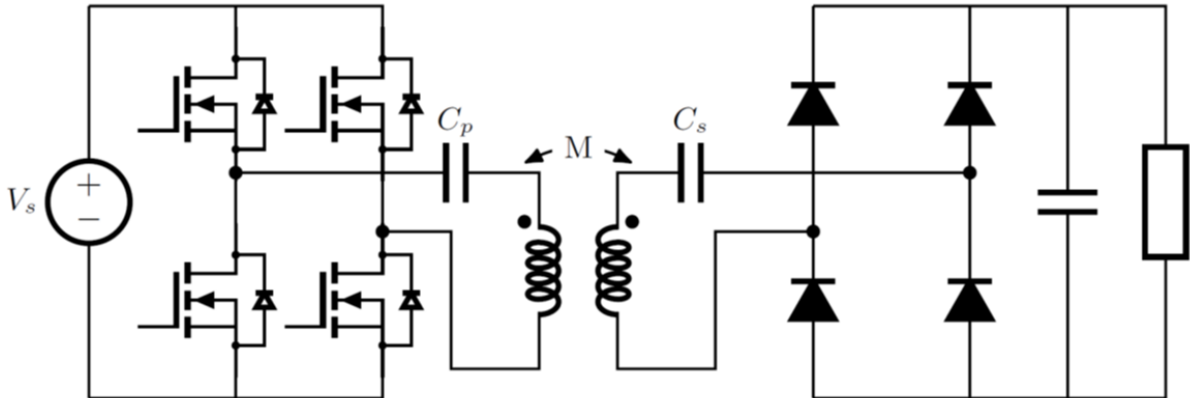
Ο ενεργός έλεγχος ενός συστήματος ασύρματης μεταφοράς ισχύος εστιάζεται κυρίως στην μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος και την μεγιστοποίηση της

μεταφοράς ισχύος. Για την στατική φόρτιση η σχεδίαση για τον ενεργό έλεγχο εστιάζεται στην γρήγορη και βέλτιστη λειτουργία όταν αρχικά ενεργοποιείται το σύστημα, στην υψηλή απόδοση του συστήματος, στην εξαγωγή επιθυμητών εξόδων και στην αμφίδρομη μεταφορά ισχύος μεταξύ δικτύου και μπαταριών του οχήματος [3], [4]. Η ρύθμιση συχνότητας του συστήματος είναι ανάμεσα στις πιο δημοφιλείς μεθόδους για τον έλεγχο των συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ισχύος. Ο συντονισμός είναι παράγοντας κλειδί στην υψηλή απόδοση λειτουργίας του συστήματος. Η συχνότητα συντονισμού μπορεί να προσδιοριστεί για ένα πηνίο και ένα πηνίο όπως ακολούθως:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} \quad (2.6)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (2.7)$$

Όπου L_p, C_p είναι το πηνίο και ο πυκνωτής αντιστάθμισης στο 1^ον και L_s, C_s είναι το πηνίο και ο πυκνωτής αντιστάθμισης στο 2^ον όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-13.



Εικόνα 2-13: Αντισταθμισμένο SS σύστημα Ασύρματης Μεταφοράς Ισχύος[3]

Όταν το σύστημα λειτουργεί στην συχνότητα συντονισμού η τάση και το ρεύμα παραμένουν συμφασικά γιατί ο πυκνωτής ακυρώνει την μετατόπιση φάσης που προκαλεί το πηνίο. Μεταβολές στη συχνότητα του συστήματος παρέχουν την δυνατότητα ελέγχου της ισχύος εξόδου και/ή μείωσης της αέργου ισχύος στην έξοδο του αντιστροφέα[1]. Στο άρθρο [8] οι ερευνητές προτείνουν μια νέα τεχνική ελέγχου και για το 1^ον μέρος αλλά και για το 2^ον και

κατασκευάζουν ένα σύστημα ασύρματης φόρτισης των 5 kW με πάνω από 90% απόδοση δικτύου προς μπαταρία.

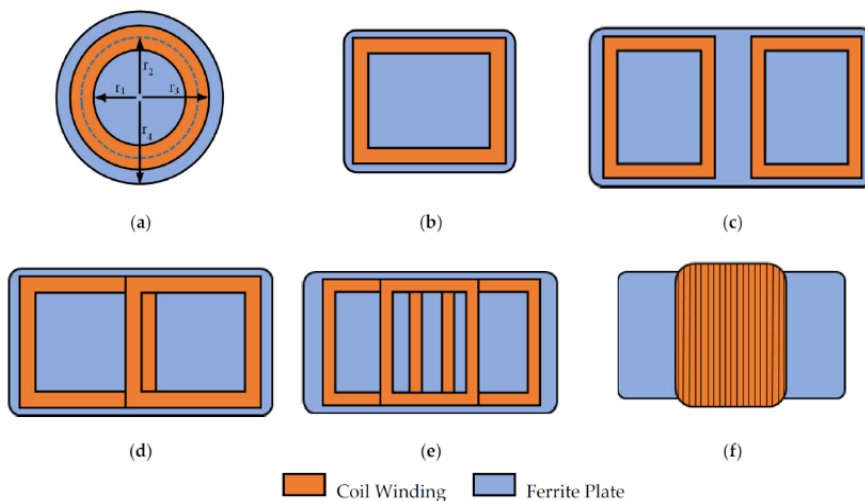
2.1.4: Μαγνητικός συζευκτής

Τα πηνία ενός συστήματος ασύρματης μεταφοράς ισχύος είναι το πιο κρίσιμο μέρος του συστήματος. Χωρίς τα πηνία δεν υπάρχει μετατροπή από ηλεκτρική σε μαγνητική ενέργεια και το αντίθετο για αυτό και ο σχεδιασμός των πηνίων είναι πολύ σημαντικός. Ο συντελεστής ποιότητας Q (quality factor) είναι παράγοντας κλειδί στον όλο σχεδιασμό του συστήματος. Ο συντελεστής ποιότητας των πηνίων σχετίζεται με το εύρος συχνοτήτων στο οποίο υπόκεινται και ισούται με:

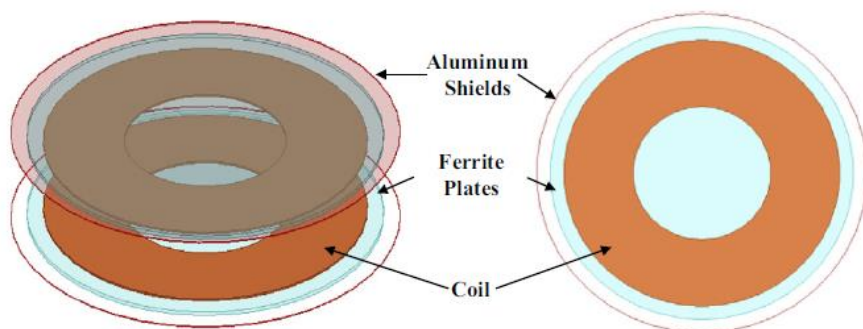
$$Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1} \quad (2.8)$$

$$Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2} \quad (2.9)$$

Όπου Q_1 , Q_2 ο συντελεστής ποιότητας στο 1^ο και 2^ο πηνίο αντίστοιχα. Για ένα στατικό σύστημα δύο πηνίων ο παράγοντας σύζευξης k είναι περίπου 0,2 με συντελεστές ποιότητας περίπου 300 κάτι που σχετίζεται με μια θεωρητική μέγιστη απόδοση μεταφοράς ισχύος ίση με 96,7%[3]. Όπως αναφέρεται και στο 1^ο κεφάλαιο οι διατάξεις μονής όψεως τείνουν να επικρατήσουν σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και μπορούν να διακριθούν σε διατάξεις ενός ή περισσότερων πηνίων. Στην Εικόνα 2-14 φαίνονται διατάξεις μονής όψεως καθώς επίσης και μία διάταξη διπλής όψεως (Σωληνοειδές πηνίο). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις διατάξεις τοποθετείται μια πλάκα από αλουμίνιο πίσω από τον φερρίτη η οποία προστατεύει από το διαρρεόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο όπως στην Εικόνα 2-15[4].



Εικόνα 2-14: Κατασκευές πηνίων WPT συστημάτων για φόρτιση μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων: (a)Κυκλικό πηνίο. (b) Ορθογώνιο πηνίο. (c) DD πηνίο. (d) Bi-Polar πηνίο. (e)DDQ πηνίο. (f) Σωληνοειδές πηνίο[3]



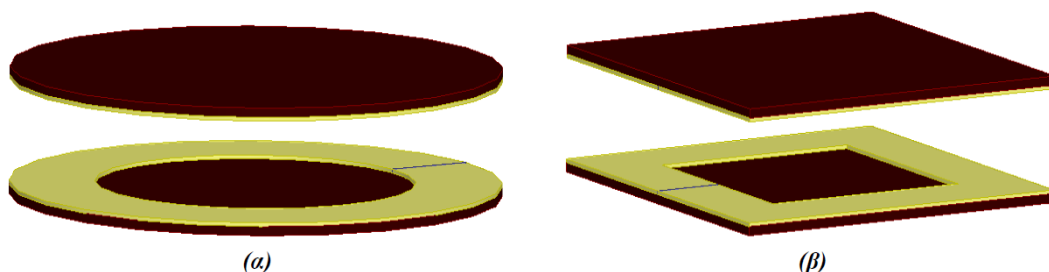
Εικόνα 2-15: Προστασία από Η/Μ πεδίο με πλάκα από αλουμίνιο[4]

2.1.4.1 Διατάξεις ενός πηνίου

Στις διατάξεις ενός πηνίου υπάρχουν διάφορες γεωμετρίες τόσο για το πηνίο όσο και για τον φερρίτη και παρουσιάζονται παρακάτω.

- **Διατάξεις ενιαίου φερρίτη**

Οι διατάξεις ενιαίου φερρίτη έχουν μια ενιαία πλάκα φερρίτη στο πρωτεύον και στο δευτερεύον [9] όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-16 και ανάλογα με το σχήμα της πλάκας του φερρίτη και κατ' επέκταση και του πηνίου διακρίνονται σε κυκλικές και ορθογώνιες διατάξεις.



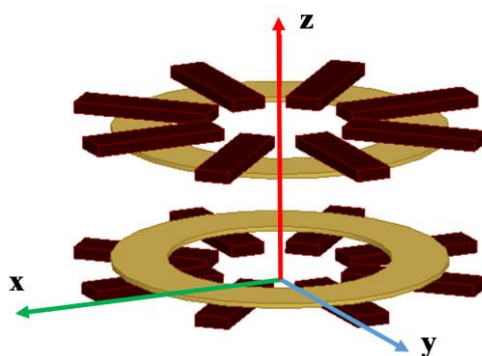
Εικόνα 2-16: Διάταξη Ενιαίου Φερρίτη: (α)Κυκλική, (β) Ορθογώνια[1]

Όμως αυτές οι διατάξεις κάνουν χρήση μεγάλης ποσότητας φερρίτη κάτι που είναι ασύμφορο. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να μετριασθεί ειδικά για την κυκλική διάταξη είτε μειώνοντας το πάχος του φερρίτη είτε αφαιρώντας φερρίτη κάνοντας ένα άνοιγμα στο εσωτερικό της διάταξης ίσο με περίπου 35% της συνολικής διαμέτρου χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η μεταφορά ισχύος της διάταξης. Σχετικά με την ορθογώνια διάταξη έχει παρατηρηθεί ότι οι τετράγωνες διατάξεις αποδίδουν μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με τις αντίστοιχες ορθογώνιες ίδιου εμβαδού. Και εδώ στις τετράγωνες παρόμοια με τις κυκλικές διατάξεις επιτυγχάνεται μείωση του

απαιτούμενου φερρίτη μειώνοντας το πάχος τους και διανοίγοντας ένα άνοιγμα στο εσωτερικό της πλάκας[1].

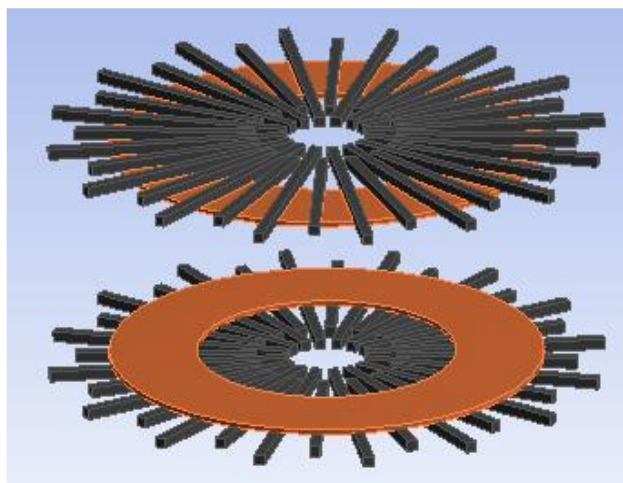
- **Διατάξεις ράβδων φερρίτη**

Διατάξεις που αξιοποιούν με ιδιαίτερα αξιόλογο τρόπο τη χρήση φερρίτη είναι κυκλικές διατάξεις με ράβδους φερρίτη όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-17. Η επίδραση των χαρακτηριστικών της διάταξης όπως το μήκος, το πλάτος, το πάχος του φερρίτη κλπ. στη μεταφερόμενη ισχύ μελετώνται αναλυτικά στην αναφορά [10] .



Εικόνα 2-17: Κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη[1]

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορούν να τοποθετηθούν οι ράβδοι φερρίτη στη διάταξη όμως σύμφωνα με την [10] ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μεταφορά ισχύος και καλύτερη χρήση του διαθέσιμου φερρίτη είναι οι ράβδοι να είναι όσο το δυνατό πιο λεπτές σε πάχος και μακρές σε μήκος όπως στην Εικόνα 2-18.



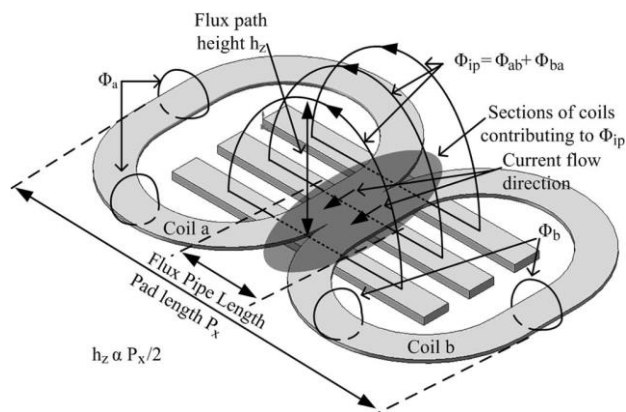
Εικόνα 2-18: Διάταξη ράβδων φερρίτη με ράβδους όσο το δυνατόν πιο λεπτές σε πάχος και πιο μακρές σε μήκος[1]

2.1.4.2 Διατάξεις δύο πηνίων

Η χρήση ενός επιπλέον πηνίου σε μία διάταξη μονής όψης δύναται να επιτρέψει μία μεγαλύτερη ανοχή σε πλευρικές μετατοπίσεις[1]. Ένα παράδειγμα διάταξης δύο πηνίων είναι η DD διάταξη η οποία είναι και η πιο απλή[11]. Υπάρχουν όμως και παραλλαγές της DD διάταξης όπως η DDQ η οποία έχει ένα επιπλέον πηνίο (Q πηνίο) ή η BP-BiPolar διάταξη στην οποία τα δύο πηνία είναι αναδιατεταγμένα. Οι διατάξεις αυτές παρουσιάζονται παρακάτω.

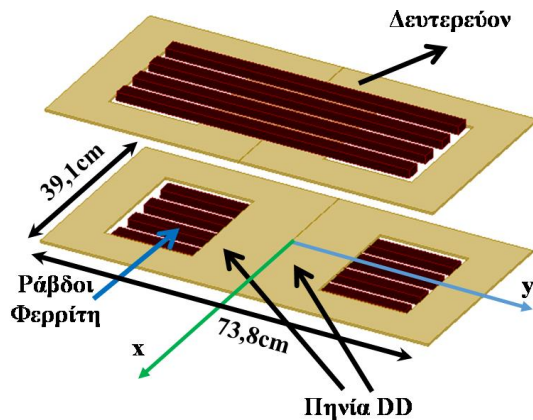
- **DD διάταξη**

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 2-19[11] τα δύο πηνία είναι τοποθετημένα σε σχήμα D εξού και η ονομασία DD-rad. Στην DD διάταξη το κύριο μέρος της μαγνητικής ροής προσδιορίζεται στο κέντρο της διάταξης. Όπως και στις διατάξεις ενός πηνίου δεν χρειάζεται μια ενιαία πλάκα φερρίτη αλλά χρησιμοποιούνται ράβδοι φερρίτη κατάλληλα τοποθετημένοι.

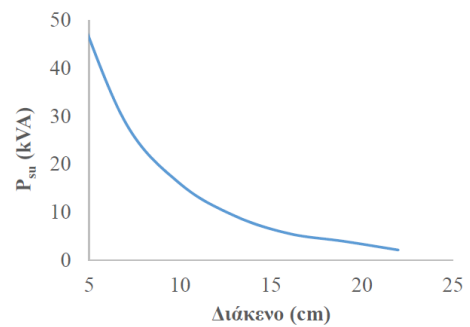


Εικόνα 2-19: DD διάταξη με ράβδους φερρίτη[1]

Σύμφωνα με το [11] υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί τοποθέτησης των ράβδων ωστόσο η βέλτιστη τοποθέτηση είναι σε σχηματισμό με 4 σειρές των 6 ράβδων όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-20[1]. Με τον βέλτιστο αυτό τρόπο τοποθέτησης των ράβδων μπορούν να μεταφερθούν μεγάλα ποσά ισχύος με την προϋπόθεση ότι η απόσταση του πρωτεύοντος από το δευτερεύον πηνίο να είναι μικρή όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 2-21[1]. Σύμφωνα με το [1] για την επίτευξη μίας μεταφοράς ισχύος ίσης με 3,6kW η ανοχή ως προς τον x άξονα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική και ίση με 26 εκατοστά, ενώ η ανοχή ως προς τον y άξονα περιορίζεται σημαντικά στα 17 εκατοστά.



Εικόνα 2-20: Κατασκευή DD διάταξης[1]

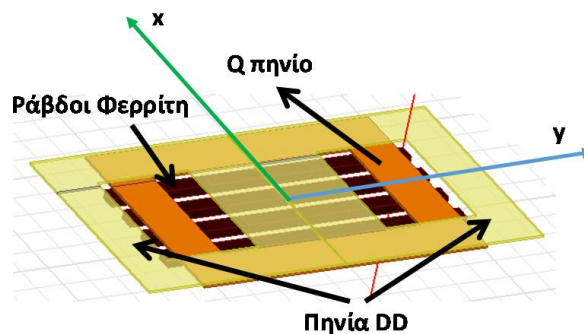


Εικόνα 2-21: Μεταφερόμενη Ισχύς σε σχέση με το διάκενο για την DD διάταξη[1]

Αξίζει να σημειωθεί ότι η DD διάταξη διαθέτει πέντε φορές μεγαλύτερη περιοχή φόρτισης από την κυκλική διάταξη με παρόμοιο κόστος υλικού, βελτιωμένη πλευρική ανοχή και ικανότητα μεταφοράς ισχύος για διάκενο ίσο με 200mm.

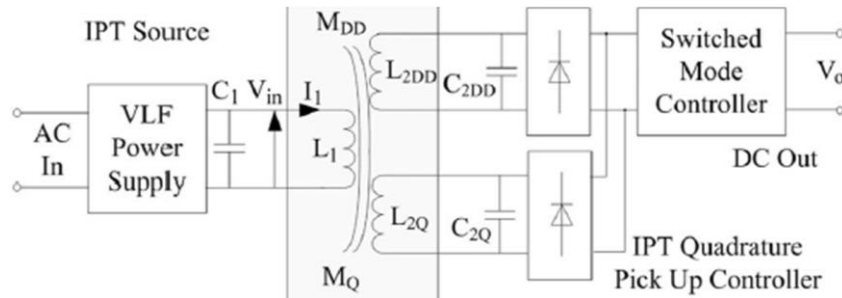
- **DDQ διάταξη**

Για να επιτύχουμε καλύτερη ανεκτικότητα στην οριζόντια ευθυγράμμιση σε σχέση με τον μεταδότη (1^ο μέρος) προσθέτουμε στην DD διάταξη, που εδώ την εξετάζουμε σαν δέκτη (2^ο μέρος), ένα επιπλέον πηνίο που έχει τετράγωνη μορφή (Quadrature) και ονομάζεται Q πηνίο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-22. Έτσι προκύπτει η DDQ διάταξη.



Εικόνα 2-22: DDQ διάταξη[1]

Για να λειτουργήσει η DDQ διάταξη χρειάζεται ένας επιπλέον ανορθωτής για το Q πηνίο όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-23.



Εικόνα 2-23: Κύκλωμα ελέγχου για το πηνίο Q της διάταξης[1]

Στην περίπτωση της DDQ διάταξης όπως και στην DD η μεταφερόμενη ισχύς εξαρτάται από τον τρόπο τοποθέτησης των ράβδων φερριτή καθώς και των πηνίων. Αυτός ο τρόπος μελετάται στην βιβλιογραφία [11],[12] ορίζοντας τις προδιαγραφές για την κατασκευή DDQ διατάξεων.

Εξετάζοντας μηδενικές πλευρικές μετατοπίσεις, στην περίπτωση όπου μια διάταξη με ένα δευτερεύον DDQ βρίσκεται πάνω από ένα φορτιστή που υλοποιείται με μία DD διάταξη το πηνίο Q δεν φαίνεται να έχει κάποια επίδραση στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος, όσον αφορά το διάκενο λειτουργίας. Επίσης το πηνίο Q δεν συμβάλλει σε ουσιαστική αύξηση της ανοχής σε μετατόπιση ως προς τον άξονα x, καθώς για μηδενικές πλευρικές μετατοπίσεις ως προς τον άξονα y η ισχύς που μεταφέρει το πηνίο Q είναι σχεδόν μηδενική. Ωστόσο το πηνίο Q συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της ανοχής του συστήματος ως προς την μετατόπιση κατά τον y άξονα[1].

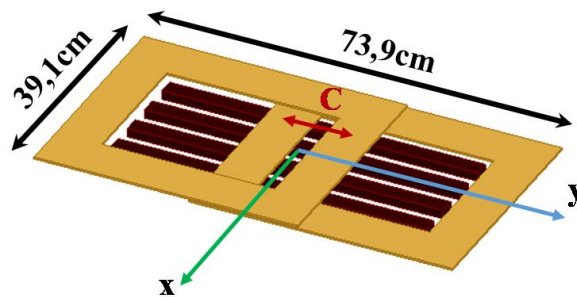
Όπως αναφέρεται στο [12] έχει αποδειχθεί ότι μια διάταξη με ένα DDQ δέκτη και ένα DD μεταδότη παρέχει μια ζώνη φόρτισης πέντε φορές μεγαλύτερη από εκείνη με ένα κυκλικό δέκτη/μεταδότη με ίδιο κόστος υλικών και μικρότερο μέγεθος. Επίσης ένας DDQ δέκτης όχι μόνο δεν είναι διαλειτουργικός με ένα κυκλικό μεταδότη αλλά αυξάνει την ζώνη φόρτισης σχεδόν τρεις φορές περισσότερο από την διάταξη με ένα κυκλικό μεταδότη/δέκτη.

Σύμφωνα και πάλι με το [12] σε μια DDQ διάταξη η DD κατασκευή η οποία αποτελείται από δύο συνδεδεμένα σε σειρά πηνία, είναι αμοιβαία φυσικά

αποσυνδεδεμένη από το Q πηνίο λόγω της σχετικής φυσικής τους θέσης κάτι το οποίο επιτρέπει την ανεξάρτητη ρύθμιση και έλεγχο των εν σειρά συνδεδεμένων DD πηνίων και του Q πηνίου.

- **BP διάταξη**

Η DDQ διάταξη παρέχει μια πολύ καλή ανοχή σε οριζόντιες κακές ευθυγραμμίσεις όμως λόγω του Q πηνίου χρησιμοποιεί αυξημένη ποσότητα καλωδίου Litz δηλαδή χαλκού κάτι που αυξάνει το κόστος της κατασκευής. Με την BP(BiPolar) διάταξη το προαναφερθέν πρόβλημα εξομαλύνεται(χρησιμοποιείται 25% λιγότερος χαλκός σε σχέση με την DDQ διάταξη) με τα επικαλυπτόμενα πηνία τα οποία αποτελούν μια αναδιάταξη των πηνίων της DD διάταξης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-24. Πιο συγκεκριμένα η σχεδίαση με τα επικαλυπτόμενα πηνία πετυχαίνει ανοχή σε οριζόντιες μετατοπίσεις γιατί, καθώς η επαγόμενη ισχύς στο ένα πηνίο αρχίζει να πέφτει λόγω της σχετικής κακής ευθυγράμμισης από τον μεταδότη, η επαγόμενη ισχύς στο άλλο πηνίο αρχίζει να αυξάνεται και ξεκινά να παρέχει επαρκή ισχύ στο φορτίο(μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος) πριν η έξοδος του πρώτου πηνίου μηδενιστεί[12]. Επίσης η επικάλυψη C των δύο πηνίων τα οποία αποτελούν την BP διάταξη είναι σχεδιασμένη να διασφαλίζει όσο γίνεται μηδενική αμοιβαία σύζευξη μεταξύ τους κάτι που επιτρέπει στα δύο πηνία ανεξάρτητη ρύθμιση και έλεγχο.



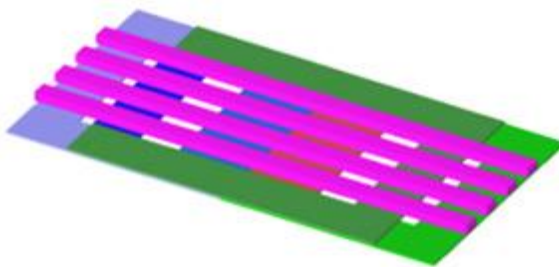
Εικόνα 2-24: Τοποθέτηση των πηνίων της διάταξης BP[1]

Αξίζει να σημειωθεί ότι εδώ τόσο η DDQ διάταξη όσο και η BP εξετάζονται ως δέκτες. Παρόμοια με την DDQ διάταξη το κάθε ένα από τα δύο πηνία απαιτεί ένα ξεχωριστό ανορθωτή και ένα ξεχωριστό σύστημα αντιστάθμισης αυξάνοντας τόσο το κόστος κατασκευής αλλά και την πολυπλοκότητα στη λειτουργία του συστήματος. Επίσης η BP διάταξη δεν εμφανίζει κάποιο πλεονέκτημα ως προς τις διατάξεις DD και

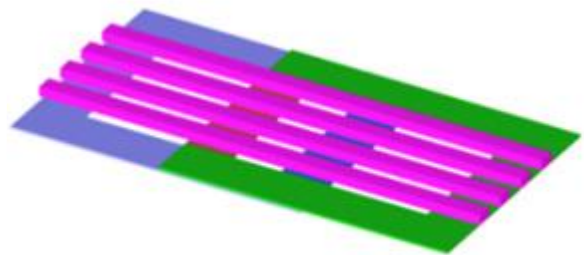
DDQ όσων αφορά το διάκενο λειτουργίας. Ακόμα η αναδιάταξη των πηνίων λαμβάνει χώρα κατά τον γ άξονα της BP διάταξης και έτσι δεν παρατηρούνται μεταβολές ως προς την ανοχή στην μετατόπιση κατά τον x άξονα σε σχέση με την DDQ ή την DD διάταξη[1].

Όμως η BP διάταξη μπορεί να παρέχει σχεδόν την ίδια ισχύ, ανοχή σε κακή ευθυγράμμιση και διαλειτουργικότητα όπως η DDQ διάταξη. Επίσης σύμφωνα με το άρθρο [12] παρόλο που ο DDQ δέκτης ανταποκρίνεται καλύτερα από ένα BP δέκτη σε ένα κυκλικό μεταδότη, ο BP σχεδιασμός χρησιμοποιεί 25,17% λιγότερο χαλκό σε σχέση με τον DDQ ενώ όλες οι διαστάσεις και οι ποσότητες των υλικών των δύο δεκτών είναι ακριβώς οι ίδιες.

Στο άρθρο [12] εξετάζονται διάφορες κατασκευές φερρίτη τόσο για την DDQ διάταξη όσο και για την BP και προκύπτει ότι η παραδοσιακή κατασκευή, Εικόνα 2-25 α και β, διασφαλίζει την αποδοτικότερη χρήση υλικού καθώς το επιπλέον υλικό που χρησιμοποιείται στις άλλες κατασκευές δεν παρέχει κάποια αξιόλογη βελτίωση στην μεταφορά ισχύος.



Εικόνα 2-25α. Παραδοσιακή κατασκευή DDQ διάταξης[12]

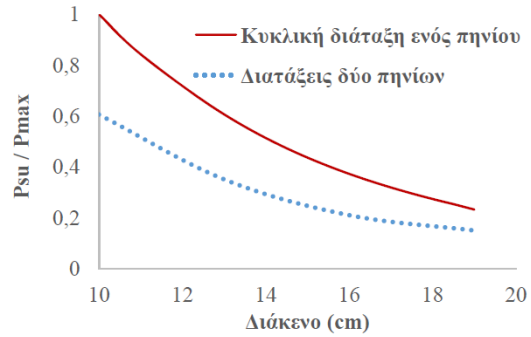


Εικόνα 2-25β: Παραδοσιακή κατασκευή BP διάταξης[12]

2.1.4.3: Σύγκριση μεταξύ των διατάξεων ενός και δύο πηνίων

Από την προσομοίωση που έγινε στο άρθρο [1] προέκυψε ότι η κυκλική διάταξη φαίνεται να υπερτερεί ως προς τις διατάξεις δύο πηνίων όσων αφορά στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος σε σχέση με το διάκενο λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή ισχύος επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερο διάκενο στην κυκλική διάταξη σε σχέση με τις διατάξεις δύο πηνίων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-26. Επίσης προέκυψε ότι η χρήση ενός δεύτερου πηνίου στις διατάξεις μονής όψης επιτρέπει σημαντική αύξηση σχετικά με την ανοχή του συστήματος σε οριζόντιες μετατοπίσεις. Όμως αυτό απαιτεί την χρήση επιπλέον ανορθωτών στην πλευρά του

δευτερεύοντος, αλλά και επιπλέον συστημάτων αντιστάθμισης, αυξάνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.



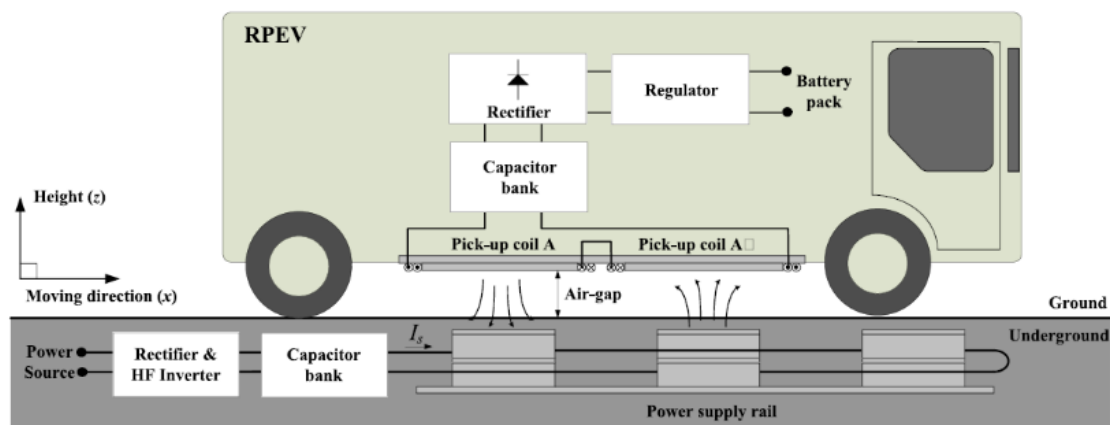
Εικόνα 2-26: Σύγκριση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος ως προς το διάκενο για διατάξεις ενός και δύο πηνίων[1]

2.2: Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση (Dynamic Wireless Power Transfer-DWPT)

2.2.1: Συνολική διαμόρφωση

Τα τελευταία χρόνια η δυναμική φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων δηλαδή η φόρτιση κατά την οποία το όχημα παίρνει ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από τον δρόμο καθώς κινείται, αποκτά όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον καθώς το όχημα απαλλάσσεται από τα προβλήματα των μπαταριών όπως το μεγάλο μέγεθος, το μεγάλο βάρος τους, το μεγάλο κόστος και ο μεγάλος χρόνος φόρτισης. Το όχημα που φορτίζεται με αυτόν τον τρόπο ονομάζεται και **RPEV- Roadway Powered Electric Vehicle**. Τα οχήματα αυτά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως μέχρι τώρα λόγω του μεγάλου αρχικού κόστους επένδυσης για εμπορευματοποίηση. Γι' αυτό πρέπει να υπάρξει ένα ισχυρό κίνητρο για να φτιαχτούν κυβερνητικές υποδομές για τα RPEVs. Έτσι το καλύτερο σενάριο θα είναι τα συστήματα στατικής δυναμικής φόρτισης να είναι πλήρως συμβατά με τα συστήματα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης.

Γενικά τα συστήματα επαγωγικής φόρτισης αποτελούνται από δύο υποσυστήματα: Το ένα είναι το υποσύστημα δρόμου το οποίο περιλαμβάνει ένα ανορθωτή και ένα αντιστροφέα υψηλών συχνοτήτων, ένα πρωτεύον σύστημα αντιστάθμισης και μια ράγα παροχής ισχύος (εκπομπός). Το άλλο είναι το επί του οχήματος υποσύστημα το οποίο λαμβάνει ισχύ από το υποσύστημα δρόμου και περιλαμβάνει το πηνίο παραλαβής (δέκτης) ή αλλιώς pick-up coil, το δευτερεύον σύστημα αντιστάθμισης, ένα ανορθωτή και ένα ρυθμιστή για την φόρτιση της μπαταρίας [13]. Τα πιο πάνω παρουσιάζονται στην Εικόνα 2-27.



Εικόνα 2-27: Διαμόρφωση ενός Συστήματος Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος για ένα RPEV[13]

Η αρχή λειτουργίας της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης είναι παρόμοια με αυτή της στατικής επαγωγικής φόρτισης μόνο που εδώ το πηνίο του δευτερεύοντος κινείται προς την φορά κίνησης του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα ο ανορθωτής που βρίσκεται κάτω από το έδαφος μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου σε συνεχές και με αυτόν τον τρόπο εκτός του ότι παρέχει συνεχές ρεύμα στον αντιστροφέα διορθώνει και τον συντελεστή ισχύος. Ακολούθως ο αντιστροφέας μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε υψίσυχνο εναλλασσόμενο ρεύμα και το τελευταίο οδηγείται στο δίκτυο αντιστάθμισης για να αναπληρωθεί η άεργος ισχύς που απορροφάται από το πρωτεύον πηνίο. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι το πρωτεύον πηνίο μπορεί να είναι τμηματικό πηνίο ή μια μακριά ράγα ή μικρότερες ράγες οι οποίες ενεργοποιούνται όταν το όχημα περνά από πάνω τους μειώνοντας έτσι το μαγνητικό πεδίο στο οποίο εκτίθενται πεζοί και ηλεκτρονικές συσκευές. Ακολούθως η μαγνητική ροή περνά μέσα από το pick-up coil κατά τον λίγο χρόνο που το όχημα βρίσκεται πάνω από το τμηματικό πηνίο ή την ράγα και επάγεται τάση στα άκρα του pick-up coil. Ισχύει δηλαδή εδώ ο νόμος του Faraday και πιο πριν στο πρωτεύον πηνίο ο νόμος του Ampere αφού το ρεύμα που περνά από το πρωτεύον πηνίο προκαλεί μαγνητικό πεδίο. Η τάση που επάγεται στα άκρα του pick-up coil προκαλεί ένα εναλλασσόμενο ρεύμα το οποίο περνά από αντιστάθμιση και ακολούθως από τον ανορθωτή. Τέλος το dc ρεύμα στην έξοδο του ανορθωτή μεταβάλλεται ανάλογα από τον ρυθμιστή φόρτισης της μπαταρίας για να επιτευχθεί τάση 400V (συνήθως) στα άκρα της μπαταρίας. Το δίκτυο αντιστάθμισης είναι σχεδιασμένο να συντονίζεται μέσα στο κατανεμημένο εύρος συχνοτήτων (81,38-90 kHz), γενικά στο κέντρο του στα 85 kHz [14].

2.2.2: Δίκτυο αντιστάθμισης

Οι απώλειες του συστήματος αυξάνονται λόγω του μεγάλου άεργου ρεύματος. Για να αποφευχθεί αυτή η κυκλοφορία υψηλού άεργου ρεύματος χρησιμοποιούνται πυκνωτές αντιστάθμισης συνδεδεμένοι είτε παράλληλα είτε εν σειρά ακυρώνοντας έτσι την διαρρέουσα αυτεπαγωγή[14]. Οι απαιτούμενες προδιαγραφές από ένα δίκτυο αντιστάθμισης είναι οι ακόλουθες:

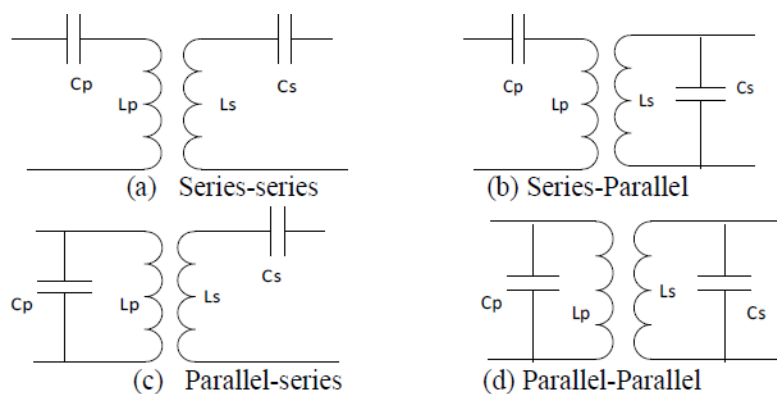
1. Μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος
2. Ελαχιστοποίηση του VA rating της παροχής ισχύος
3. Σταθερή Τάση(Constant Voltage-CV) και Σταθερό ρεύμα(Constant Current-CC) στην έξοδο ανάλογα με την εφαρμογή

4. Υψηλή απόδοση
5. Ανοχή στην διακλάδωση
6. Υψηλή ανοχή στην κακή ευθυγράμμιση

Η βασική απαίτηση από ένα δίκτυο αντιστάθμισης είναι να ελαχιστοποιεί την διατίμηση της φαινόμενης ισχύος (VA rating) της παροχής ισχύος παρέχοντας την άεργη ισχύ που απαιτείται για να εγκατασταθεί και διατηρηθεί το μαγνητικό πεδίο. Για να μεγιστοποιηθεί η λήψη ισχύος από την δευτερεύουσα πλευρά, ακυρώνεται η διαρρέουσα αυτεπαγωγή στην πρωτεύουσα και δευτερεύουσα πλευρά μέσω του δικτύου αντιστάθμισης. Ανεπαρκής και αρύθμιστη αντιστάθμιση έχει ως αποτέλεσμα ένα υψηλότερο άεργο ρεύμα το οποίο οδηγεί σε αυξημένη διατίμηση της φαινόμενης ισχύος της παροχής ισχύος. Επίσης η ροή αυτού του άεργου ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες απώλειες στους ημιαγωγούς και στους αγωγούς, ειδικότερα στις διόδους του αντιστροφέα. Γενικότερα, ο πρωτεύον συντονισμός ακυρώνει την πρωτεύουσα διαρρέουσα αυτεπαγωγή αυξάνοντας έτσι τον συντελεστή ισχύος κοντά στην μονάδα, με το δευτερεύον πηνίο να λειτουργεί στην ίδια ή παραπλήσια συχνότητα συντονισμού[15].

Τα διάφορα δίκτυα αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται για να μεγιστοποιήσουν την μεταφορά ισχύος επιλέγονται να ταιριάζουν την πηγή τάσης ή ρεύματος του πρωτεύοντος με την πηγή τάσης ή ρεύματος του δευτερεύοντος φορτίου σύμφωνα με τον τύπο του φίλτρου εξόδου, όπου στην ασύρματη φόρτιση είναι συνήθως μπαταρία. Η μπαταρία απαιτεί ρεύμα φόρτισης σταθερό σε χαμηλή κατάσταση φόρτισης (State Of Charge-SOC) μέχρι η SOC να φτάσει περίπου το 85% και μετά το σύστημα πρέπει να αλλάξει σε λειτουργία σταθερής τάσης φόρτισης[14].

Παρακάτω και στην Εικόνα 2-28 παρουσιάζονται τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης:

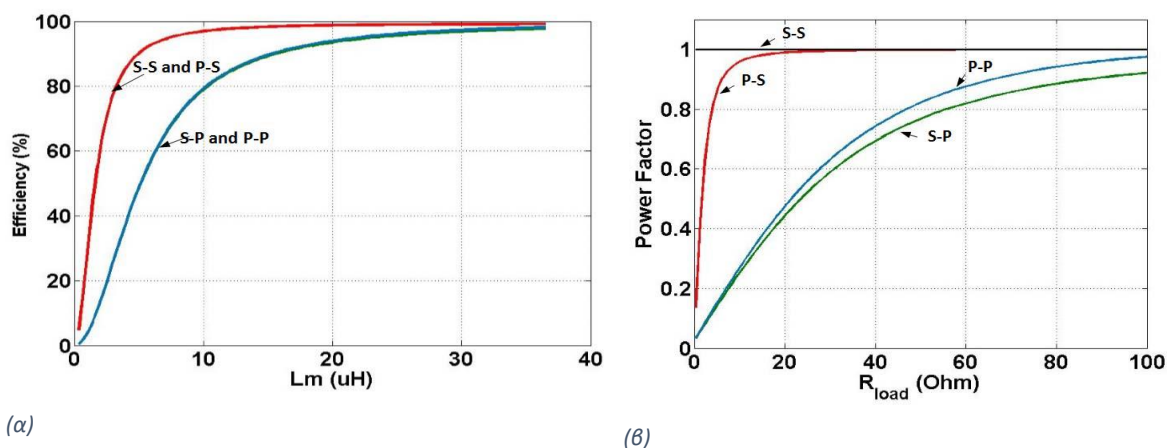


Εικόνα 2-28: Βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης για Ασύρματη Φόρτιση[15]

A. Σειρά-Σειρά (Series-Series_S-S)

Το κύριο πλεονέκτημα της τοπολογίας S-S είναι ότι η τιμή της πρωτεύουσας χωρητικότητας δεν επηρεάζεται από την μεταβολή του συντελεστή σύζευξης. Αυτή η ιδιότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην τμηματική DWPT όπου ο συντελεστής σύζευξης μεταβάλλεται με την κίνηση του οχήματος. Το κύριο μειονέκτημα πραγματοποιείται στην περίπτωση χαμηλού φορτίου, και όταν ο δέκτης δεν είναι παρών και η ισοδύναμη αντίσταση που φαίνεται είναι μηδέν στην πρωτεύουσα συχνότητα συντονισμού με μόνο την παρασιτική αντίσταση του πυκνωτή και του πηνίου να ελαττώνουν το ρεύμα. Γι' αυτό η τάση που επάγεται στο δευτερεύον είναι πολύ μεγάλη κάτι που κάνει την τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας πολύ μεγάλη οδηγώντας το σύστημα σε μη ασφαλή κατάσταση [14].

Οι επιθυμητές προδιαγραφές από ένα δίκτυο αντιστάθμισης είναι η υψηλή απόδοση και ο υψηλός συντελεστής ισχύος, τα οποία μεταβάλλονται δυναμικά με την μεταβολή του συντελεστή σύζευξης και του φορτίου. Ο συντελεστής ισχύος είναι ίσος με την μονάδα στην συχνότητα συντονισμού για τοπολογία S-S όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-29 (β). Επίσης για τοπολογία S-S έχουμε υψηλή απόδοση ακόμα και για ένα χαμηλό συντελεστή σύζευξης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-29 (α).



Εικόνα 2-29: (α) Επίδραση κακής ευθυγράμμισης στην απόδοση (β) Επίδραση αντίστασης φορτίου στον Συντελεστή Ισχύος[14]

B. Σειρά-Παράλληλα (Series-Parallel_S-P)

Από την μεταφερόμενη εμπέδηση (Πίνακας 1) συμπεραίνουμε ότι ανεξάρτητα από το φορτίο, θα υπάρξει κάποια εμπέδηση η οποία θα μεταφερθεί στο πρωτεύον. Αν ο δέκτης ή το φορτίο δεν είναι παρών (όπως συμβαίνει στην Δυναμική Ασύρματη Φόρτιση), η πρωτεύουσα πλευρά θα εξακολουθήσει να υφίσταται ένα βραχυκύκλωμα στη συχνότητα συντονισμού. Γι' αυτό πρέπει στην πρωτεύουσα πλευρά να εφαρμοσθεί ένας έλεγχος περιορισμού του ρεύματος [14]. Ακόμα παρατηρούμε ότι η μεταφερόμενη εμπέδηση στο πρωτεύον είναι ανάλογη με το τετράγωνο της αμοιβαίας επαγωγής. Γι' αυτό μια μεταβολή στην αμοιβαία επαγωγή θα αλλάξει τον Συντελεστή Ισχύος του αντιστροφέα και την δυναμική του συστήματος. Επίσης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-29(β) για μεγαλύτερο φορτίο ο Συντελεστής Ισχύος γίνεται καλύτερος. Ακόμα η απόδοση του συστήματος αυξάνεται με την αύξηση της αμοιβαίας επαγωγής όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-29(α). Αν ανατρέξουμε στην εξίσωση της πρωτεύουσας χωρητικότητας παρατηρούμε ότι η τελευταία αλλάζει με την αμοιβαία επαγωγή και συνεπώς αλλάζει η συχνότητα συντονισμού.

Πίνακας 2: Διάφορες Μαθηματικές Εξισώσεις για Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης [14], [15]

Compensation topology	Primary capacitance	Theoretical efficiency	Transferred impedance
Series-Series	$\frac{C_2 L_2}{L_1}$	$\frac{\omega^2 M^2 R_L}{((R_2 + R_L)^2) R_1 + (\omega^2 M^2)(R_2 + R_L)}$	$(R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})) + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_L + j(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega})}$
Series-Parallel	$\frac{C_2 L_2^2}{L_1 L_2 - M^2}$	$\frac{\omega^2 L^2 R_L}{R_L \omega^2 + R_2 \omega^2 L_2^2 + R_2 R_L^2 + \frac{R_1 R_2^2 L^2}{M^2} + \frac{R_1 L_2^4 \omega^2}{M^2}}$	$(R_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})) + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + \frac{R_L}{1 + j R_L C_2 \omega} + j L_2 \omega}$
Parallel-Series	$\frac{C_2 L_2}{\frac{M^4}{L_1 C_2 L_2 R_L} + L_1}$	$\frac{\omega^2 M^2 R_L}{((R_2 + R_L)^2) R_1 + (\omega^2 M^2)(R_2 + R_L)}$	$\frac{1}{R_1 + j L_1 \omega + \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_L + j(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega}))} + j C_1 \omega}$
Parallel-Parallel	$\frac{(L_1 L_2 - M^2) C_2 L_2^2}{\frac{M^4 C_2 R_L}{L_2} + (L_1 L_2 - M^2)^2}$	$\frac{\omega^2 L^2 R_L}{R_L \omega^2 + R_2 \omega^2 L_2^2 + R_2 R_L^2 + \frac{R_1 R_2^2 L^2}{M^2} + \frac{R_1 L_2^4 \omega^2}{M^2}}$	$\frac{1}{R_1 + j L_1 \omega + \frac{1}{\frac{\omega^2 M^2 (1 + j R_L C_2 \omega)}{(R_L + (R_2 + j L_2 \omega)(1 + j R_L C_2 \omega))} + j C_1 \omega}}$

C. Παράλληλα-Σειρά (Parallel-Series_P-S)

Η μεταφερόμενη εμπέδηση στην τοπολογία P-S και S-S είναι η ίδια. Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η υψηλή απόδοση και ο υψηλός Συντελεστής Ισχύος σε σχετικά μικρή αμοιβαία επαγωγή και σχετικά μεγάλο εύρος διατίμησης του φορτίου. Ένα κύριο μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι χρειάζεται μια πηγή ρεύματος ως είσοδο για να αποφευχθεί οποιαδήποτε στιγμιαία αλλαγή στην τάση. Για να λυθεί

αυτό το πρόβλημα προστίθεται ένα πηνίο για να δημιουργηθεί μια LCL δεξαμενή συντονισμού. Αυτή η διαμόρφωση ονομάζεται η P-S τεχνική συντονισμού [14].

D. Παράλληλα-Παράλληλα (Parallel-Parallel_P-P)

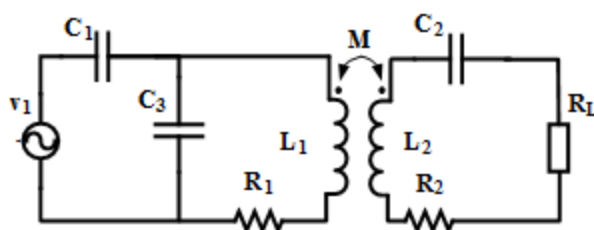
Στην τοπολογία αντιστάθμισης P-P η μεταφερόμενη εμπέδηση στο πρωτεύον είναι η ίδια με αυτή της S-P αντιστάθμισης. Αυτή η διαμόρφωση δεν έχει μελετηθεί ευρέως επειδή έχει μειονεκτήματα όπως χαμηλό Συντελεστή Ισχύος, μεγάλη τάση φορτίου του παράλληλου δευτερεύον και απαιτήσεις μεγάλης πηγής ρεύματος του παράλληλου πρωτεύοντος.

Η τοπολογία S-S απαιτεί την λιγότερη ποσότητα χαλκού από όλες τις άλλες τοπολογίες κάτι που είναι ένα απευθείας μέτρο εξοικονόμησης κόστους. Οι τοπολογίες S-S και S-P είναι κατάλληλες για μεγάλες ισχύεις από οικονομικής πλευράς. Επίσης οι τοπολογίες P-S και P-P συνήθως χρησιμοποιούνται για μεγάλης ισχύς πηγής ρεύματος οδηγούμενα καλώδια τα οποία εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις όπως συμβαίνει στην Δυναμική Φόρτιση [14].

Επιπρόσθετα Δίκτυα Αντιστάθμισης

a) Συνδυασμός Σειρά-Παράλληλα

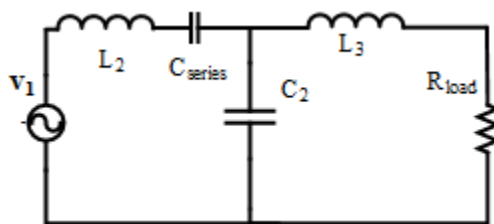
Ένα σύστημα Επαγόμενης Μεταφοράς Ισχύος απαιτεί τέλεια ευθυγράμμιση των πηνίων για να μεταφερθεί ισχύς με υψηλή απόδοση. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της κακής ευθυγράμμισης χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός τοπολογιών, ο **Σειρά-Παράλληλα-Σειρά** όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-30. Το πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι η ισχύς εξόδου παραμένει σταθερή για μεγάλη κακή ευθυγράμμιση [14].



Εικόνα 2-30: Τοπολογία Σειρά-Παράλληλα-Σειρά [14]

b) LCL- Αντιστάθμιση

Μία LCL αντιστάθμιση με ένα επιπλέον πηνίο και πυκνωτή φαίνεται στην Εικόνα 2-31. Αυτή η τοπολογία διαμορφώνεται από την προσθήκη ενός επιπλέον πηνίου στο παράλληλο δίκτυο συντονισμού. Έχει ως είσοδο μια πηγή ρεύματος η οποία μπορεί εύκολα να ελεγχθεί από ένα μετατροπέα πλήρους γέφυρας για μεταβολές στον συντελεστή σύζευξης και στις καταστάσεις φορτίου. Επίσης η διατίμηση της φαινόμενης ισχύος είναι μειωμένη. Το δευτερεύον μέρος μιας αντιστάθμισης LCL μπορεί να είναι είτε παράλληλη είτε εν σειρά αντιστάθμιση. Η παράλληλη αντιστάθμιση χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της ευρωστίας της σε μεταβολές φορτίου. Το μειονέκτημα της παράλληλης αντιστάθμισης είναι στην μεταφερόμενη εμπέδηση στο πρωτεύον η οποία αποτελείται από πραγματικό και φανταστικό μέρος του φορτίου. Για τον λόγο αυτό υπάρχει κάποιο επιπλέον ρεύμα το οποίο ρέει στο πρωτεύον το οποίο δεν συνεισφέρει στο πραγματικό μέρος του φορτίου. Επίσης, απαιτείται ένας μεγάλος επαγωγέας συνεχούς ρεύματος για να εξασφαλιστεί η συνεχής αγωγιμότητα μέσω του ανορθωτή κάτι που αυξάνει το κόστος και τις απώλειες του συστήματος. Η εν Σειρά αντιστάθμιση του δευτερεύοντος απαιτεί ένα μεγάλο πυκνωτή της γέφυρας του ανορθωτή για την εξασφάλιση της συνεχούς αγωγιμότητας και η τάση που αναπτύσσεται στο pick-up πηνίο παίρνει μεγάλες τιμές σε μεγάλα επίπεδα ισχύος [14].

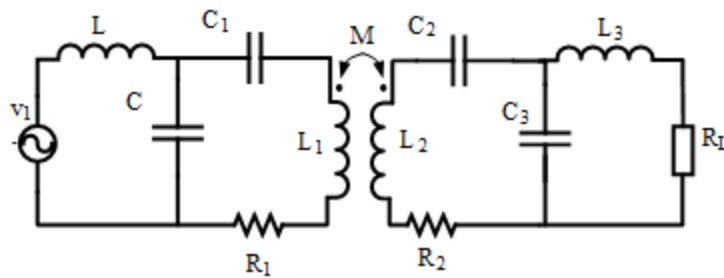


Εικόνα 2-31: LCL Αντιστάθμιση [14]

c) LCC Αντιστάθμιση

Η τοπολογία LCL απαιτεί δύο πανομοιότυπα πηνία γι' αυτό και το μέγεθος του πηνίου είναι μεγάλο. Έτσι για να μειωθεί το μέγεθος και το κόστος του συστήματος χρησιμοποιούνται LCC τοπολογίες. Ακόμα το LCC pickur μπορεί να αντισταθμίσει την άεργο ισχύ στην δευτερεύουσα πλευρά για να επιτευχθεί μοναδιαίος συντελεστής ισχύος. Άλλα πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας είναι ανεξαρτησία από τον συντελεστή σύζευξης και τις διάφορες καταστάσεις του φορτίου και εξασφαλισμένο

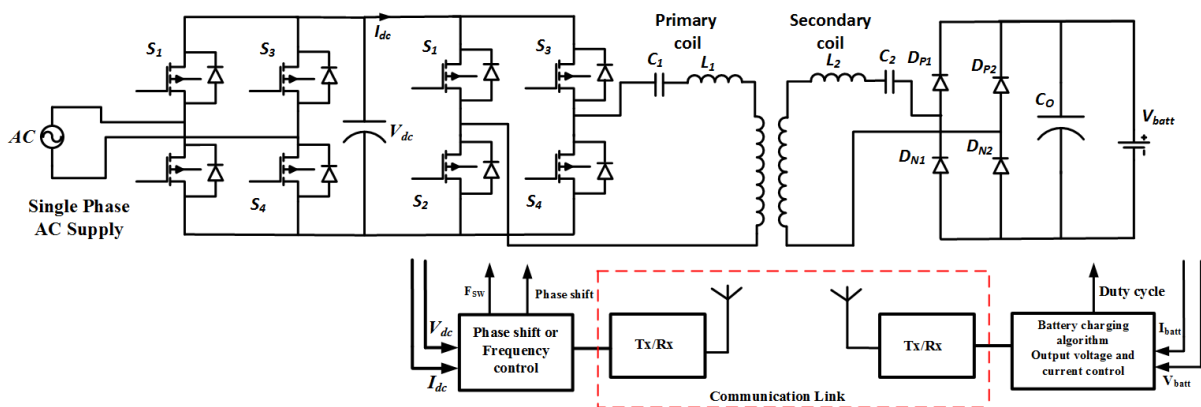
μηδενικής τάσης ανοιγόκλειμα (Zero Voltage Switching-ZVS) των MOSFETs. Στην βιβλιογραφία η double-sided LCC αντιστάθμιση (Εικόνα 2-32) είναι η πιο δημοφιλής αφού μπορεί να μειώσει την συμφόρτιση ρεύματος στον αντιστροφέα, έχει μεγάλη ανοχή σε κακή ευθυγράμμιση και έχει χαρακτηριστικά που καθιστούν την λειτουργία της ανεξάρτητη από το φορτίο [14].



Εικόνα 2-32: LCC-LCC αντιστάθμιση [14]

2.2.3: Ηλεκτρονικά Ισχύος

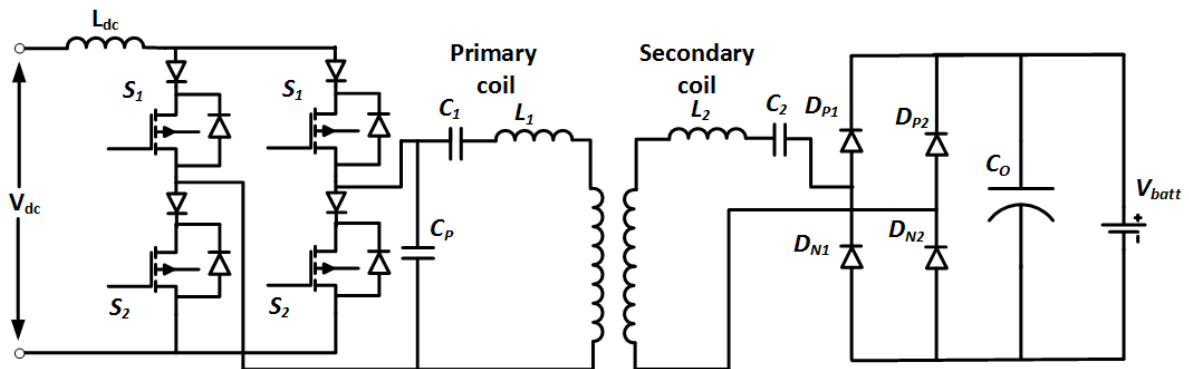
Τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν ένα καίριο ρόλο στην ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Η επίδοση του αντιστροφέα ισχύος είναι κρίσιμη για την μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Η Εικόνα 2-33 παρουσιάζει διάφορα στάδια ηλεκτρονικών ισχύος για την ασύρματη φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος. Το σύστημα είναι το ίδιο με αυτό της στατικής ασύρματης φόρτισης όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως.



Εικόνα 2-33: Ηλεκτρονικά Ισχύος για την Ασύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων [14]

Αποτελείται από ένα ανορθωτή ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο του παροχέα ηλεκτρικής ενέργειας και ο οποίος έκτος από την μετατροπή του AC σε DC διορθώνει τον Συντελεστή Ισχύος του συστήματος ασύρματης φόρτισης. Το δεύτερο στάδιο είναι ένας

αντιστροφέας πλήρους γέφυρας ο οποίος μετατρέπει την dc τάση σε υψίσυχνους διπολικούς παλμούς τάσης με ρυθμιζόμενο duty cycle οι οποίοι οδηγούνται στο δίκτυο αντιστάθμισης. Η δευτερεύουσα πλευρά αποτελείται από ένα δίκτυο αντιστάθμισης και ένα ανορθωτή ο οποίος μετατρέπει την υψίσυχη εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή τάση. Μετά την ανόρθωση τοποθετείται προαιρετικά ένας dc-dc μετατροπέας για περαιτέρω ρύθμιση της τάσης. Η πρωταρχική λειτουργία είναι η φόρτιση της μπαταρίας υπό σταθερή τάση ή υπό σταθερό ρεύμα ενώ η δευτερεύουσα λειτουργία είναι να ταιριάζει η εμπέδηση του φορτίου με την εμπέδηση της πηγής για βέλτιστη μεταφορά ισχύος [14]. Ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας μπορεί να είναι είτε τροφοδοτούμενος από τάση (voltage-fed) ή τροφοδοτούμενος από ρεύμα (current-fed) ανάλογα με την εφαρμογή και την πηγή εισόδου. Ένας τυπικός current-fed αντιστροφέας φαίνεται στην Εικόνα 2-34.



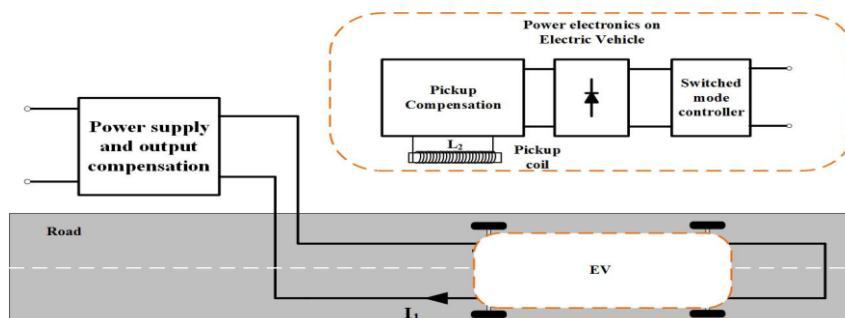
Εικόνα 2-34: Αντιστροφέας τροφοδοτούμενος από ρεύμα [14]

Για τον εκπομπό χρησιμοποιείται παράλληλη αντιστάθμιση επειδή έχει το πλεονέκτημα να κυκλοφορά στο σύστημα λιγότερο ρεύμα από τα ηλεκτρονικά ισχύος, αφού ο παράλληλος πυκνωτής διαμορφώνει ένα μονοπάτι χαμηλής εμπέδησης για το κυκλοφορούν ρεύμα. Γενικά οι αντιστροφείς τροφοδοτούμενοι από ρεύμα έχουν πλεονεκτήματα όπως χαμηλότερης έντασης-stress ρεύμα, προστασία από βραχυκύκλωμα και υψηλότερη αξιοπιστία. Όμως απαιτούν ένα μεγάλο dc πηνίο το οποίο αυξάνει το μέγεθος και το κόστος του συστήματος.

Όπως προαναφέρθηκε και στην στατική φόρτιση ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής ισχύος ο φορτιστής μπορεί να είναι είτε μονόπλευρος ή αμφίπλευρος. Ο μονόπλευρος φορτιστής μεταφέρει ενέργεια μόνο από μια κατεύθυνση προς την άλλη, από την πλευρά του δικτύου προς το όχημα (Grid to Vehicle-G2V) ενώ ο αμφίπλευρος μεταφέρει ενέργεια και προς τις δύο κατευθύνσεις (Grid to Vehicle-G2V και Vehicle to Grid-V2G).

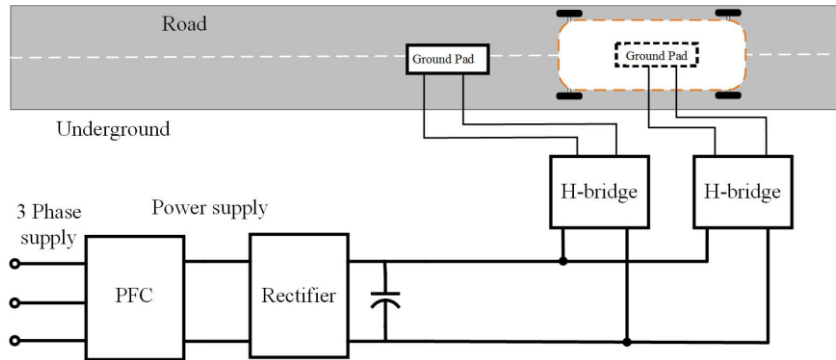
Αρχιτεκτονική Παροχής Ισχύος για Δυναμική Ασύρματη Φόρτιση

Αφού η δυναμική ασύρματη φόρτιση επιτυγχάνει την φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος εν κινήσει αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του μεγέθους της μπαταρίας κάτι που μειώνει το κόστος του ηλεκτρικού οχήματος και την αύξηση της συνολικής αυτονομίας του ηλεκτρικού οχήματος. Μια πρόκληση της δυναμικής ασύρματης φόρτισης είναι ο λίγος χρόνος αλληλεπίδρασης ενός εν κινήσει πηνίου δέκτη με μια αλληλουχία πηνίων πομπού οδοστρώματος κάτι που οδηγεί στην ανάγκη χρησιμοποίησης ηλεκτρονικών ισχύος μεγάλης ισχύος και σε υψηλή ανοχή κακής ευθυγράμμισης για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση του συστήματος. Η Δυναμική Ασύρματη Φόρτιση (Dynamic Wireless Charging-DWC) μπορεί να εφαρμοστεί με δύο μεθόδους: Η πρώτη χρησιμοποιεί ένα μονό μακρύ καλώδιο στο δρόμο-εκπομπός (εκατοντάδων μέτρων) και η δεύτερη πολλαπλά μικρά τμηματικά πηνία απλωμένα στο δρόμο για τα οποία επιλέγεται το κατάλληλο βήμα το οποίο είναι ίσο με τον λόγο του μήκους του πηνίου προς το εύρος τμήματος. Ακολούθως ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο με ένα πηνίο-δέκτη προσαρτημένο στο αμάξωμα του χρησιμοποιείται για να παραλάβει το υψηλής συχνότητας ac κύμα από τα πρωτεύοντα πηνία. Το προσλαμβανόμενο ac σήμα μετά την ανόρθωση είναι μια ομαλή συνεχής τάση για το μακρύ καλώδιο ενώ για την τμηματοποιημένη διαδρομή μία παλλόμενη dc κυματομορφή. Πάντως για κάθε προσέγγιση η ανορθωμένη dc τάση οδηγείται σε ένα dc-dc μετατροπέα ο οποίος ελέγχει την φόρτιση της μπαταρίας. Σε ένα σύστημα μακράς τροχιάς μία μόνο πηγή ισχύος οδηγεί την όλη διαδρομή διατηρώντας σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα σε όλο το καλώδιο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-35 [14], [16].



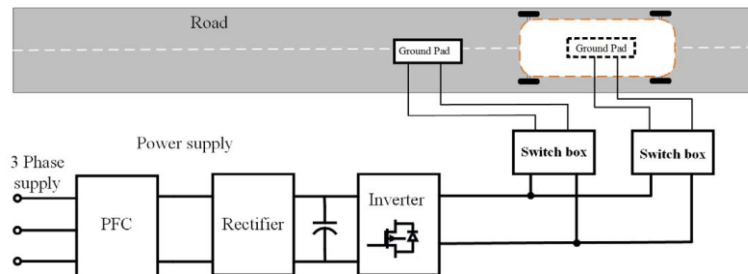
Εικόνα 2-35: Μέθοδος μακράς τροχιάς με κεντρική παροχή ισχύος [14]

Για την τμηματοποιημένη DWC προτείνονται διάφορες μέθοδοι: Μία μέθοδος είναι το κάθε τμηματικό πηνίο να οδηγείται από ένα ξεχωριστό H-bridge αντιστροφέα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-36.



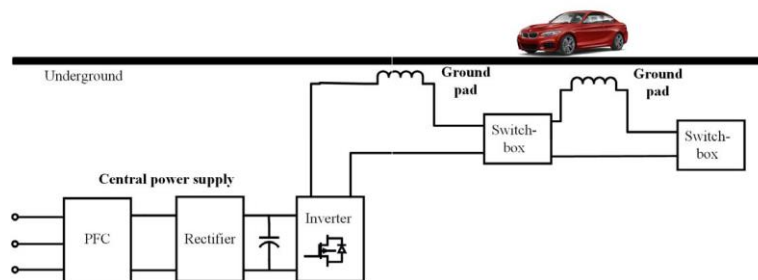
Εικόνα 2-36: Τμηματικά πηνία οδηγημένα από ένα ξεχωριστό για το καθένα H-bridge αντιστροφέα[14]

Μια άλλη προσέγγιση είναι και πάλι η κεντρική παροχή ισχύος και η σύνδεση ενός ενιαίου αντιστροφέα υψηλής ισχύος ο οποίος οδηγεί τα τμηματικά πηνία του οδοστρώματος και κάθε πηνίο ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται από ένα διακόπτη ON/OFF όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-37 [14], [16]. Αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα να χρησιμοποιούνται λιγότερα ηλεκτρονικά, μικρότερο κόστος εγκατάστασης, λιγότερες απώλειες ισχύος καθώς κάθε τμήμα ενεργοποιείται σε διαφορετικό χρόνο. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι χαμηλότερη αξιοπιστία και μεγάλες απώλειες στο καλώδιο ισχύος που συνδέει τα τμηματικά πηνία.



Εικόνα 2-37: Τμηματικά πηνία δρόμου οδηγημένα από ένα ενιαίο αντιστροφέα και διακόπτες ON/OFF [14]

Μια παραλλαγή της πιο πάνω μεθόδου είναι η εν σειρά σύνδεση των πηνίων του οδοστρώματος μαζί με τους διακόπτες όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-38.



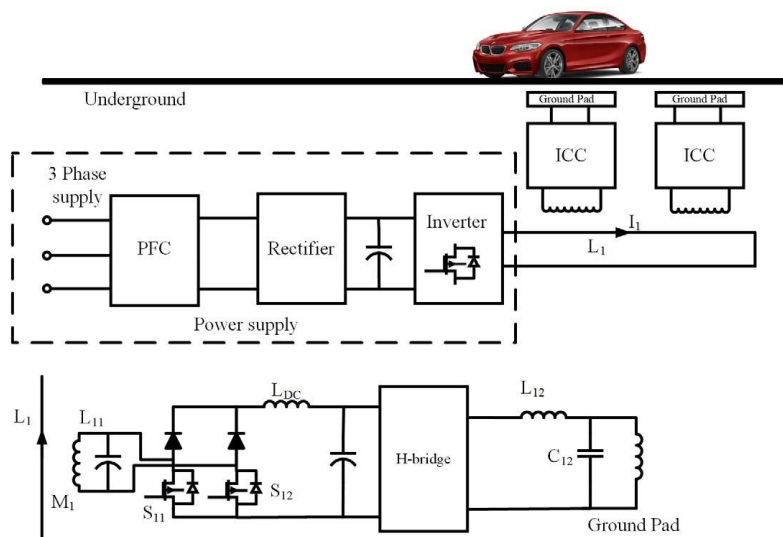
Εικόνα 2-38: Εν σειρά συνδεδεμένα πηνία οδοστρώματος με διακόπτες [14]

Γενικά ένα σύστημα μακράς τροχιάς έχει το πρόβλημα της απαίτησης εξαρτημάτων υψηλής ισχύος, ολόκληρη η διαδρομή ενεργοποιείται κάτι που έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες

απώλειες ισχύος, μειώνεται η αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα του συστήματος και γίνεται ευαίσθητο το σύστημα σε μεταβολές παραμέτρων. Αντίθετα στην τμηματοποιημένη DWC διαφορετικά τμήματα ενεργοποιούνται κάθε φορά σε διαφορετικούς χρόνους καθώς το όχημα φορτίζεται καθώς περνά πάνω από τα πηνία κάτι που μειώνει τις απώλειες ισχύος και την ισχύ του μετατροπέα. Επίσης βελτιώνεται η αξιοπιστία γιατί ακόμα κι αν ένα τμήμα χαλάσει, ένα άλλο τμήμα μπορεί να παρέχει ισχύ και το σύστημα έχει χαμηλότερη ευαισθησία σε μεταβολές παραμέτρων. Τα προβλήματα αυτής της κατηγορίας DWC είναι η συχνή συντήρηση, υψηλό αρχικό κόστος και πολύπλοκο έλεγχο.

Ακόμα μια μέθοδος της τμηματοποιημένης DWC είναι το σύστημα διπλής σύζευξης όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-39, το οποίο είναι ικανό να μειώνει τις απώλειες στην ράγα ισχύος (power rail). Αποτελείται από μια υψηλής σχετικά συχνότητας ράγα ισχύος ενσωματωμένη κάτω από το δρόμο και η οποία είναι ικανή να παρέχει ισχύ στο κύκλωμα ενδιάμεσου ζεύκτη (Intermediary Coupler Circuit-ICC) σε μια επιλεγμένη τοποθεσία. Η είσοδος του ενδιάμεσου ζεύκτη είναι συνδεδεμένη σε ένα ελεγχόμενο ανορθωτή ο οποίος μετατρέπει την υψηλής συχνότητας ac τάση σε dc τάση. Η ανορθωμένη dc τάση τροφοδοτείται σε ένα H-bridge αντιστροφέα ο οποίος ελέγχει το πηνίο εδάφους (ground pad). Ο κεντρικός ελεγκτής ελέγχει επιλεγμένα ground pad σύμφωνα με την παρουσία κάποιου οχήματος [14]. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προτάθηκε γιατί όταν θα εκπονηθεί κάποιο πρότυπο για την δυναμική φόρτιση και πιο συγκεκριμένα για την συχνότητα λειτουργίας του συστήματος (όπως έγινε και για την στατική φόρτιση SAE J-2954 που θέτει ως συχνότητα λειτουργίας τα 85 kHz) να μπορεί το σύστημα να πληρή τις προδιαγραφές του προτύπου. Πιο συγκεκριμένα, τώρα όλα τα πρωτότυπα δυναμικής φόρτισης έχουν ως συχνότητα λειτουργίας τα 20 kHz και για να λειτουργούν στα 85 kHz έχουν κάποιες προκλήσεις. Μία πρόκληση είναι ότι η ισχύς που πρέπει να παρέχουν τα συστήματα φόρτισης είναι της τάξης των εκατοντάδων kVA ή περισσότερα λόγω της υψηλής ισχύος που απορροφούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Όμως επί του παρόντος δεν υπάρχουν ημιαγωγίμοι διακόπτες που να μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά σε αυτό το επίπεδο ισχύος και σε τόσο υψηλές συχνότητες: τα IGBTs μπορούν να διαχειριστούν υψηλές ισχύς μόνο σε χαμηλές συχνότητες ενώ οι SiC διακόπτες μπορούν να διαχειριστούν υψηλές συχνότητες μόνο σε χαμηλότερες ισχύς. Μία άλλη πρόκληση είναι ότι η υψηλή συχνότητα λειτουργίας σημαίνει ότι για ένα δεδομένο ρεύμα στη ράγα ισχύος, η απαιτούμενη τάση για να οδηγηθεί η ράγα αυξάνεται. Για να αντιμετωπισθούν οι πιο πάνω προκλήσεις, όπως προαναφέρθηκε,

προτάθηκε το σύστημα διπλής σύζευξης το οποίο έχει το πλεονέκτημα να λειτουργεί ταυτόχρονα σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες: η παροχή ισχύος είναι ικανή να επιτυγχάνει σύζευξη υψηλής ισχύος με αποδοτικό τρόπο με τους ενδιάμεσους ζεύκτες σε χαμηλή σχετικά συχνότητα λειτουργίας (20kHz), ενώ η πραγματική μεταφορά ισχύος στο όχημα πραγματοποιείται σε μία πολύ υψηλότερη συχνότητα (85kHz) κάτι που έχει πλεονεκτήματα όπως μειωμένη διαρροή μαγνητικού πεδίου (άρα καλύτερη απόδοση) και μικρότερο και ελαφρύτερο δευτερεύον υποσύστημα στο όχημα. Έτσι τώρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα IGBTs στον αντιστροφέα της ράγας ισχύος και τα SiC MOSFETs στον H-bridge αντιστροφέα του ICC. Επιπλέον η χαμηλότερη συχνότητα λειτουργίας της παροχής ισχύος επιτρέπει την χρήση μακρύτερων ραγών χωρίς την χρήση εν σειρά αντιστάθμισης η οποία είναι ακριβή και πολύπλοκη στην συναρμολόγηση και την εγκατάσταση [16]. Ακόμα ένα πλεονέκτημα είναι η απομόνωση μεταξύ πηνίου εδάφους (ground pad) και παροχής ισχύος. Επίσης μπορούν να ενεργοποιηθούν τμήματα του οδοστρώματος σε παλμούς για την μεταφορά ισχύος σε ένα κινούμενο όχημα σε κύμα (ενεργοποιείται το επόμενο πηνίο πριν απενεργοποιηθεί το παρόν πηνίο) καθώς το όχημα ταξιδεύει κατά μήκος της ράγας και ως εκ τούτου ελαχιστοποιείται το διαρρέομενο μαγνητικό πεδίο. Τα μειονεκτήματα είναι υψηλό κόστος για τα ηλεκτρονικά ισχύος και χαμηλότερη αξιοπιστία λόγω της κεντρικής μονάδας παροχής ισχύος για ολόκληρο το σύστημα.



Εικόνα 2-39: Σύστημα διπλής σύζευξης[14]

2.2.4: Έλεγχος

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τον έλεγχο της ροής ισχύος και την διατήρηση της κατάστασης φόρτισης (State of Charge-SOC) της μπαταρίας. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να ταξινομηθούν σε **έλεγχο πρωτεύουσας πλευράς**, **έλεγχο δευτερεύουσας πλευράς** και **έλεγχο διπλής πλευράς**(πρωτεύουσας και δευτερεύουσας) [17]. Στον έλεγχο πρωτεύουσας πλευράς η πληροφορία για την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας εκπέμπεται από την δευτερεύουσα πλευρά στην πρωτεύουσα από ένα σύνδεσμο επικοινωνίας. Ο έλεγχος δευτερεύουσας πλευράς απαιτεί ανόρθωση με ενεργά στοιχεία και χρησιμοποιείται σε μια εφαρμογή όπου πολλαπλά πηνία παραλαβής (pick-up coils) είναι συνδεδεμένα. Στον έλεγχο διπλής πλευράς ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας και οι ενεργοί ανορθωτές ελέγχονται όλοι ταυτόχρονα για να ελέγχουν την ροή ισχύος στην μπαταρία. Ένα πρωτότυπο μοντέλο φασιθέτη αναπτύχθηκε στο [17] για να υπάρχει μια ομοιότητα με μια γραμμή μεταφοράς ισχύος. Αυτή η τεχνική ελέγχου ήταν ικανή να ελέγχει την άεργο ισχύ χρησιμοποιώντας μια μέθοδο ελέγχου τάσης και δεν απαιτεί κάποιον ενεργό έλεγχο στο δευτερεύον του συστήματος. Παρόλα αυτά ο έλεγχος είναι περίπλοκος και χρειάζεται κάποιος πίνακας αναζήτησης για να τον υλοποιήσει κάποιος. Τυπικά ο έλεγχος πρωτεύουσας πλευράς έχει το πλεονέκτημα της ελάχιστης αλληλεπίδρασης με τα ηλεκτρονικά δευτερεύουσας πλευράς. Επομένως, ένα όχημα θα έχει ηλεκτρονικά ισχύος χαμηλότερης ισχύος κάτι το οποίο έχει οικονομικά οφέλη. Στον Πίνακα 2 που ακολουθεί παρουσιάζεται μια λεπτομερής σύγκριση των διάφορων τεχνικών ελέγχου.

Πίνακας 2: Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τεχνικών ελέγχου για την DWPT[14]

Στρατηγική Ελέγχου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Έλεγχος Πρωτεύουσας Πλευράς	-Έλεγχος σταθερού ρεύματος για τον εκπομπό -Ο έλεγχος είναι ανεξάρτητος του φορτίου -Δεν χρειάζεται επικοινωνία μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος	-Η απόδοση του συστήματος είναι χαμηλή αφού ο έλεγχος πρωτεύουσας πλευράς είναι ανεξάρτητος του φορτίου
Έλεγχος δευτερεύουσας πλευράς	- Έλεγχος σταθερού ρεύματος -Μπορεί να εφαρμοστεί έλεγχος μέγιστης απόδοσης	-Ελεγχόμενα ηλεκτρονικά ισχύος στην δευτερεύουσα πλευρά
Έλεγχος διπλής πλευράς με επικοινωνία κλειστού βρόγχου	-Μπορεί να επιτευχθεί ο επιθυμητός έλεγχος ισχύος και ο έλεγχος μέγιστης απόδοσης -Μπορεί να επιτευχθεί αμφίδρομη ροή ισχύος	-Απαιτείται ασφαλής ασύρματη επικοινωνία μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος -Η καθυστέρηση στην επικοινωνία πρέπει να είναι ελάχιστη
Έλεγχος διπλής πλευράς χωρίς επικοινωνία κλειστού βρόγχου	-Ανεξάρτητος έλεγχος πρωτεύοντος και δευτερεύοντος -Μπορεί να εφαρμοστεί ο επιθυμητός έλεγχος ισχύος και μέγιστης απόδοσης	- Η σύγκρουση μεταξύ του πρωτογενούς και δευτερεύοντος ελέγχου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ευστάθειας

Για την DWPT, ιδανικά ο ανεξάρτητος έλεγχος του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι η καταλληλότερη μορφή ελέγχου. Όμως η σύγκρουση μεταξύ του πρωτογενούς και δευτερεύοντος ελέγχου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ευστάθειας. Ο έλεγχος διπλής πλευράς με επικοινωνία κλειστού βρόχου είναι η πιο ευσταθής μέθοδος ελέγχου αλλά για την DWPT η καθυστέρηση της επικοινωνίας μπορεί να προκαλέσει καθυστέρηση στον έλεγχο και θέματα ευστάθειας. Οι γενικές μέθοδοι επικοινωνίας χρήζουν περισσότερης έρευνας για τη μείωση του λανθάνοντος χρόνου [14].

2.2.5: Μαγνητικός συζευκτής

Ο συζευκτής είναι το πιο σημαντικό εξάρτημα ενός συστήματος ασύρματης μεταφοράς ισχύος. Όπως και στην στατική φόρτιση έτσι και στη δυναμική αποτελείται από ένα πηνίο πομπό και ένα πηνίο δέκτη τα οποία είναι διαχωρισμένα από ένα διάκενο αέρος. Τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των μαγνητικών συζευκτών είναι ο υψηλός συντελεστής σύζευξης k , ο υψηλός συντελεστής ποιότητας Q και η υψηλή ανοχή στην κακή ευθυγράμμιση [17] , [18]. Για να αυξηθεί ο συντελεστής σύζευξης χρησιμοποιούνται μπάρες φερρίτη ή πλάκες φερρίτη συμπεριλαμβανομένου ενός υλικού μόνωσης μεταξύ του φερρίτη και των αγωγών των πηνίων. Η αύξηση των μπαρών φερρίτη μπορεί να βελτιώσει την αυτεπαγωγή, τον συντελεστή ποιότητας και την αμοιβαία επαγωγή του μαγνητικού συζευκτή, όμως αυξάνει τις απώλειες πυρήνα καθώς επίσης και τις απώλειες χαλκού του συστήματος λόγω της τροποποίησης του πεδίου στους αγωγούς.

Η απόδοση των συζευγμένων επαγωγέων επηρεάζεται από το γινόμενο kQ , το γινόμενο των συντελεστών μαγνήτισης της σύζευξης και τον συντελεστή ποιότητας των επαγωγέων [18] τα οποία με την σειρά τους προσδιορίζονται από την γεωμετρία, το υλικό των πυρίνων και την απόσταση ανάμεσα στους επαγωγείς. Ο συντελεστής ποιότητας Q του επαγωγέα είναι ο γεωμετρικός μέσος όρος του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος συντελεστή ποιότητας και δίνεται από:

$$Q = \sqrt{Q_1 Q_2} \quad \text{όπου} \quad Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1} \quad \text{και} \quad Q_2 = \frac{\omega L_2}{R_2} \quad (2.10)$$

Για την επίτευξη υψηλού Q , οι επαγωγείς πρέπει να σχεδιασμένοι να έχουν υψηλή αυτεπαγωγή και χαμηλή αντίσταση σειράς λειτουργώντας σε υψηλή συχνότητα. Όμως η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας περιορίζεται περίπου στα $85 \pm 3,7$ kHz σύμφωνα με το

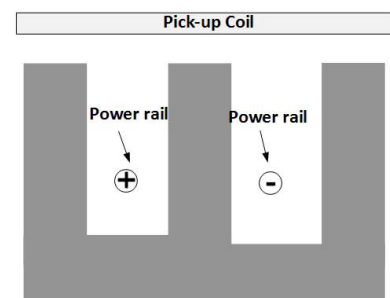
πρότυπο SAE J2594/1. Η αυτεπαγωγή του πηνίου είναι ανάλογη του τετραγώνου των σπυρών του πηνίου, της επιτρεπτότητας του χρησιμοποιημένου μαγνητικού υλικού, της γεωμετρίας του μονοπατιού της μαγνητικής ροής η οποία έχει επιφάνεια εγκάρσιας διατομής A και του μέσου μήκους l του μονοπατιού[14]:

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (2.11)$$

Ράγα Ισχύος και πηνίο λήψης για την Δυναμική Ασύρματη Μεταφορά Ισχύος (DWPT)

Η φόρτιση ενός οχήματος εν κινήσει ή αλλιώς DWPT μπορεί να επιτευχθεί έχοντας σαν εκπομπό είτε πολλά τμηματικά πηνία είτε μια μακρά ράγα ισχύος όπως αναφέρθηκε εκτενώς και πιο πάνω. Στην μέθοδο με τα πολλά τμηματικά πηνία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μαγνητικοί συζευκτές οι μαγνητικοί συζευκτές που χρησιμοποιήθηκαν για την στατική ασύρματη φόρτιση. Το 2011 το Oak Ridge National Laboratory (ORNL) εκτόνησαν μια εργασία πάνω στην τμηματοποιημένη DWPT η οποία χρησιμοποιούσε πολλά κυκλικά πηνία σε μια σειριακή διαδρομή έχοντας ένα συντελεστή βήματος 0,7 [14].

Μια άλλη μέθοδος στην οποία πρωτοπόρησε το Korean Advance Institute of Science & Technology (KAIST) ήταν η κατασκευή μιας μακράς ράγας ισχύος κάτω ή πάνω από το οδόστρωμα [13], [19]. Η ράγα ισχύος τροφοδοτείται όλη την ώρα κατά την λειτουργία ανεξάρτητα από την παρουσία ηλεκτρικού οχήματος ή όχι και αποτελείται από δύο καλώδια χωρίς οποιοδήποτε μαγνητικό υλικό. Λόγω της απουσίας μαγνητικού υλικού η πλευρική ανοχή κακής ευθυγράμμισης του συστήματος είναι κακή. Η απόδοση της ράγας ισχύος αυξήθηκε με την προσθήκη μαγνητικού υλικού διαφορετικών σχημάτων όπως τύπου E, τύπου W, τύπου U, τύπου S, εξαιρετικά λεπτού τύπου S και διατμηματικού τύπου X [13], [19]. Το 2009, το KAIST δοκίμασε το πρώτης γενιάς (1G) πρωτότυπο OLEV (On-line Electric Vehicle) με μαγνητικό υλικό ράγας ισχύος τύπου E για μια εφαρμογή ενός οχήματος γκολφ όπως φαίνεται και στις Εικόνες 2-40 και 2-41. Είχε ένα μηχανικά ελεγχόμενο πηνίο λήψης (pick-up coil) για να ευθυγραμμίζεται με την ράγα παροχής ισχύος με ένα διάκενο αέρος της τάξης του 1 cm.



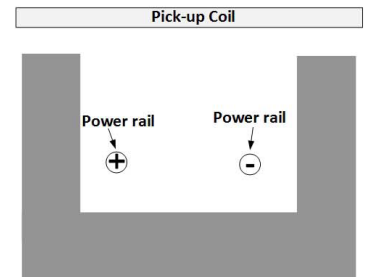
Εικόνα 2-43: Μαγνητικό υλικό ράγας ισχύος τύπου E [14]

Εικόνα 2-40: 1ης γενιάς OLEV όχημα γκολφ [19]

Το 2^{ης} γενιάς (2G) OLEV χρησιμοποίησε μαγνητικό υλικό ράγας ισχύος τύπου U, είχε διάκενο αέρος 17cm και απόδοση 72% όπως φαίνεται και στις Εικόνες 2-42 και 2-43. Τα πλεονεκτήματα του μαγνητικού υλικού τύπου U είναι υψηλότερη απόδοση για μεγαλύτερο διάκενο αέρος, χαμηλότερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο επειδή η επιστροφή του καλωδίου είναι δίπλα στην αναχώρηση και έτσι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της αναχώρησης αλληλοαναιρείται με αυτό της επιστροφής [13], [19].



Εικόνα 2-42: 2ης γενιάς OLEV λεωφορείο στο KAIST Munji Campus με τέσσερις ράγες ισχύος των 60 m η καθεμιά [19]

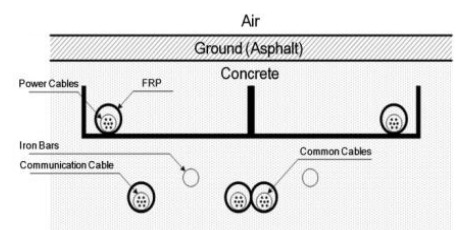


Εικόνα 4-43: Μαγνητικό υλικό ράγας ισχύος τύπου U [14]

Το 3^{ης} γενιάς (3G) OLEV, Εικόνα 2-44, χρησιμοποίησε μαγνητικό υλικό ράγας ισχύος τύπου W και pick-up coil τύπου I. Το μαγνητικό υλικό ράγας ισχύος τύπου W έχει το πλεονέκτημα συγκρινόμενο με το τύπου U της μειωμένης μαγνητικής αντίστασης κατά τρεις φορές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς εξόδου του συστήματος για κάθε pick-up να είναι βελτιωμένη από 6 σε 15 kW. Άλλα πλεονεκτήματα είναι ο ψηλός συντελεστής σύζευξης, καμία απαίτηση θωράκισης αλουμινίου και μειωμένο πάχος της ράγας παροχής ισχύος στα 70 cm. Η συνολική απόδοση του συστήματος βελτιώνεται στο 83% σε διάκενο αέρα 20 cm [13], [14], [19].



Εικόνα 2-44: 3ης γενιάς OLEV τρένο σε δρόμο 2,2 km στο Seoul Grand Park όπου 375m ήταν στρωμένα με ράγες παροχής ισχύος των 24m [19]

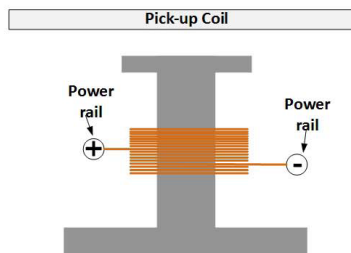


Εικόνα 2-45: Άποψη διατομής ράγας παροχής ισχύος μαγνητικού υλικού τύπου W [19]

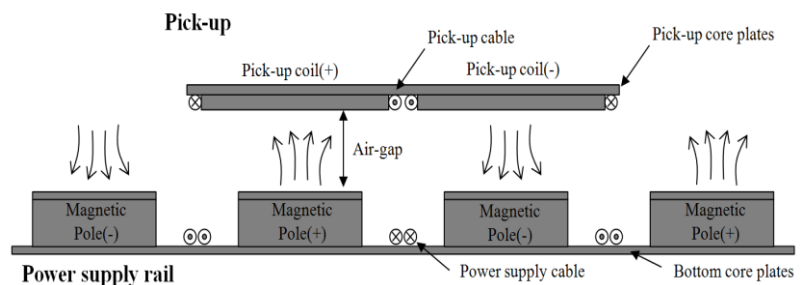
Προκειμένου να μειωθεί το κόστος και ο χρόνος κατασκευής της ράγας παροχής ισχύος χρησιμοποιήθηκε μαγνητικό υλικό ράγας ισχύος τύπου I στο 4^{ης} γενιάς 4G OLEV, Εικόνα 2-46 και 2-47. Το κύριο πλεονέκτημα της κατασκευής τύπου I είναι η μείωση του κόστους του συστήματος κατά 20% σε σύγκριση με την κατασκευή τύπου W. Επιπλέον, η ράγα παροχής ισχύος είναι διατεταγμένη ώστε να εναλλάσσει τις θέσεις της για να σχηματίσει αντίθετης πολικότητας μαγνητικούς πόλους κατά μήκος του δρόμου για την μείωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-48. Ακόμα το πάχος της ράγας ισχύος μειώθηκε στα 10cm ενώ η ισχύς εξόδου αυξήθηκε στα 25kW ανά pick-up[13], [14], [19].



Εικόνα 2-46: 4G OLEV λεωφορείο στο KAIST Munji Campus[19]



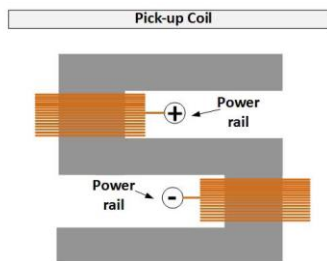
Εικόνα 2-47:: Μαγνητικό υλικό ράγας ισχύος τύπου I [14]



Εικόνα 2-48: Κατασκευή τύπου I για την ράγα ισχύος και διπλό επίπεδο πηνίο συλλογής[19]

Για τη μείωση του κόστους, προτείνεται η εξαιρετικά λεπτή ράγα τύπου S όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-49 και 2-50. Συγκρινόμενη με την κανονική ράγα τύπου S το πλάτος του μαγνητικού πυρήνα έχει μειωθεί από τα 10cm στα 4cm και το διαρρεόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει μειωθεί λόγω του μικρότερου πλάτους. Η εξαιρετικά λεπτή ράγα τύπου S έχει πολλαπλά τυλίγματα για να ρυθμίζει το επίπεδο ισχύος αλλάζοντας ένα αριθμό τυλιγμάτων και ρεύματος μέσω του πηνίου. Επιπλέον, η κατασκευή τύπου S

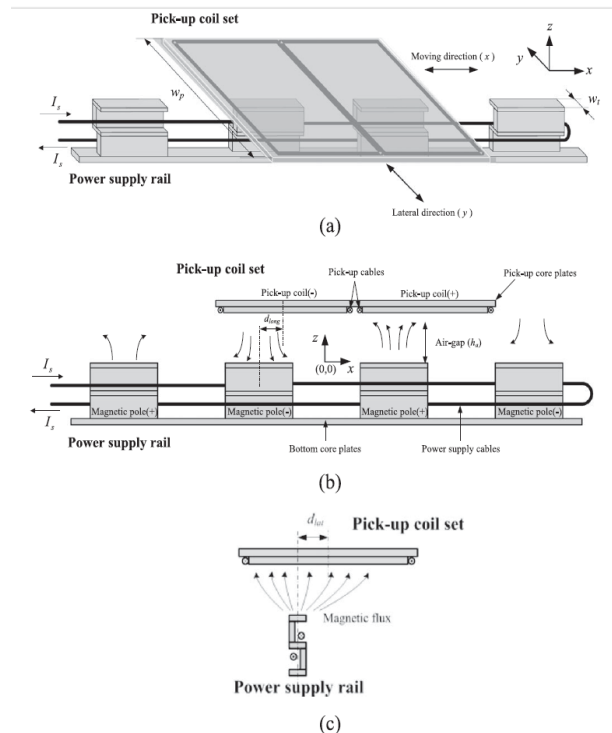
διευκολύνει την αναδίπλωση, Εικόνα 2-51, πράγμα που σημαίνει ότι η σύνδεση των καλωδίων τροφοδοσίας δεν είναι πλέον απαραίτητη μετά την ανάπτυξη. Ο αντίκτυπος της ανάπτυξης των μονάδων τροφοδοσίας τύπου S στην επιφάνεια των δρόμων είναι πλέον ελάχιστος, κάτι που ευτυχώς δεν αλλάζει τις υπάρχουσες συνθήκες λειτουργίας του δρόμου [13], [14], [19].



Εικόνα 2-49: Εξαιρετικά λεπτή ράγα τύπου S [14]



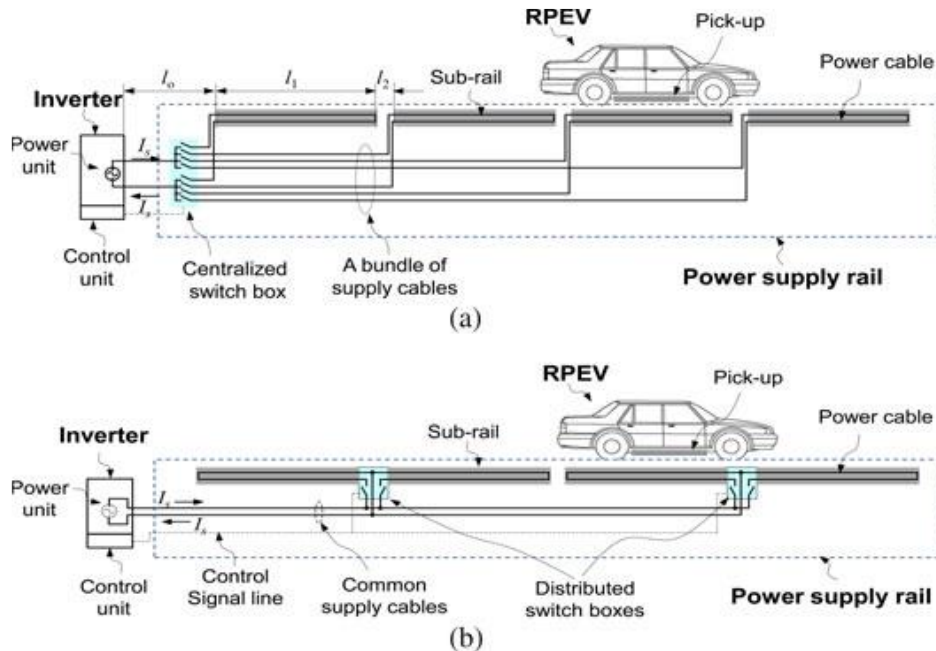
Εικόνα 2-51: Αναδίπλωση εξαιρετικά λεπτής ράγας τύπου S [13]



Εικόνα 2-50: Εξαιρετικά λεπτή ράγα τύπου S (a) Bird's eye view (b) Πλάγια Όψη (c) Πρόσοψη [13]

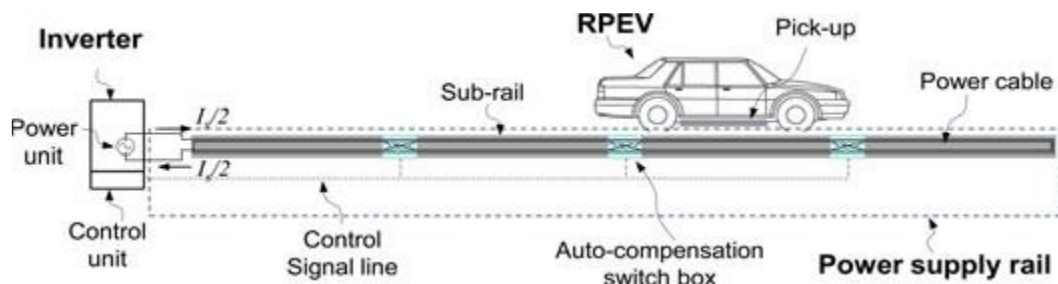
Σε μια προσπάθεια να μειωθούν η σπατάλη ενέργειας και το διαρρέον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο προτάθηκε η *τμηματοποιημένη ράγα παροχής ισχύος* [14], [20], Εικόνα 2-52(a). Αποτελείται από πολλές ράγες μικρότερου μεγέθους από πριν (μικροράγες) οι οποίες ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται μέσω ενός κιβωτίου διακοπών. Ωστόσο απαιτούνται πολλά καλώδια ισχύος από την κεντρική παροχή ισχύος στις μικροράγες και μόνο μια μικροράγα μπορεί να ενεργοποιηθεί από τον αντιστροφέα κάθε φορά. Για την μείωση των πολλών καλωδίων προτάθηκε η *ράγα τροφοδοσίας κατανεμημένης μεταγωγής* [14], [20], Εικόνα 2-52(b). Το σύστημα αποτελείται από μερικές μικροράγες, ένα ζεύγος κοινών καλωδίων τροφοδοσίας και πολλαπλούς διακόπτες που βρίσκονται ανάμεσα σε δύο μικροράγες, τα οποία ελέγχονται από τη μονάδα ελέγχου. Με την κατανεμημένη μεταγωγή της ράγας ισχύος, οι απώλειες καλωδίων μειώνονται σε όλο το μήκος. Ακόμα κι έτσι,

απαιτείται ένα κοινό καλώδιο τροφοδοσίας που αυξάνει το κόστος κατασκευής. Επίσης όπως και στην *τμηματοποιημένη ράγα παροχής ισχύος* μόνο μια μικροράγα μπορεί να ενεργοποιηθεί κάθε φορά.



Εικόνα 2-52: (α) Τμηματοποιημένη ράγα παροχής ισχύος, (β) Ράγα τροφοδοσίας κατανομής μεταγωγής [20]

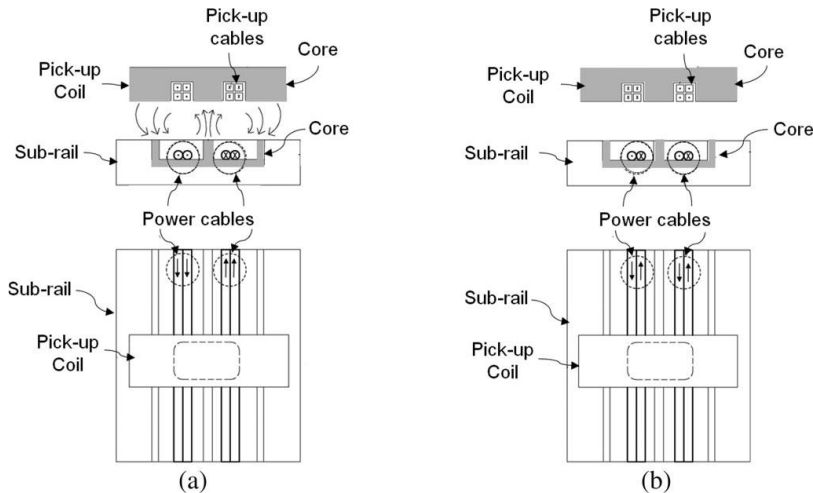
Για να ξεπεραστούν τα πιο πάνω προβλήματα μια νέα εγκάρσια ράγα παροχής ρεύματος (X-rail) προτείνεται [20]. Η προτεινόμενη διάταξη αποτελείται από τμηματικές μικροράγες, κιβώτια διακόπτη αυτόματης αντιστάθμισης, γραμμές σήματος ελέγχου και άλλα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-53. Ειδικότερα η μικροράγα αποτελείται από συνεστραμμένα καλώδια τροφοδοσίας, πυρήνα και χάλκινα δικτυώματα.



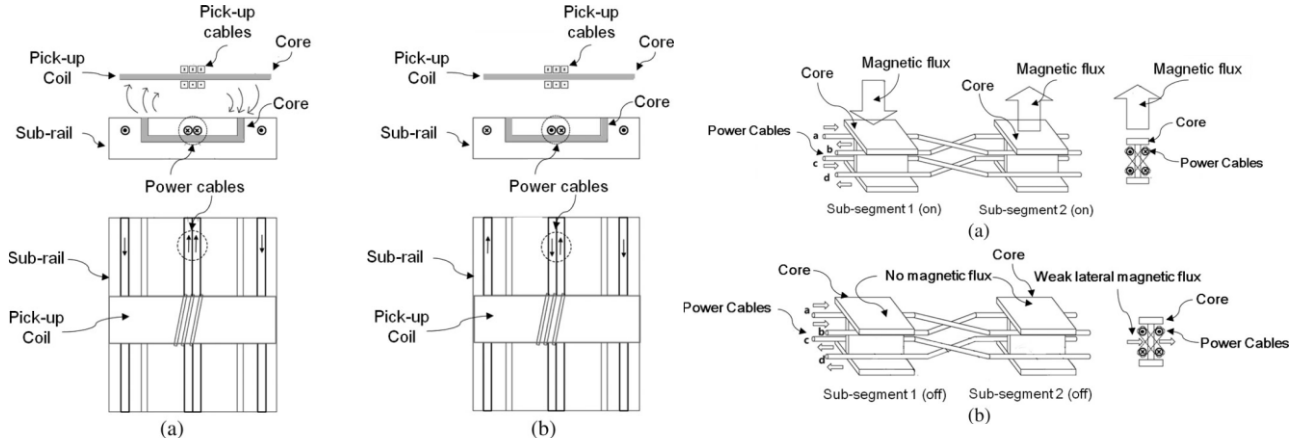
Εικόνα 2-53: Προτεινόμενη νέα εγκάρσια ράγα παροχής ρεύματος (X-rail) [20]

Η αρχή λειτουργίας της X-rail κατασκευής φαίνεται στην Εικόνα 2-54. Η διατομή και η άνω όψη της διπλής ράγας σε λειτουργία ενεργοποίησης φαίνονται στο Εικόνα 2-54(α), όπου οι τρέχουσες κατευθύνσεις των καλωδίων σε μια δέσμη είναι οι ίδιες. Έτσι, δημιουργείται κατάλληλη μαγνητική ροή και διέρχεται μέσω του pick-up, ενώ μικρή μαγνητική ροή

δημιουργείται όταν οι τρέχουσες κατευθύνσεις των καλωδίων σε μια δέσμη είναι αντίθετες, όπως φαίνεται στο Εικόνα 2-54(b). Έτσι, ονομάζεται λειτουργία σιωπής. Επιπλέον, η προτεινόμενη ράγα X μπορεί επίσης να υλοποιηθεί για τη ράγα μονής τροφοδοσίας τύπου U και τη ράγα τροφοδοσίας τύπου I, όπως φαίνεται στις Εικόνες 2-55 και 2-56.



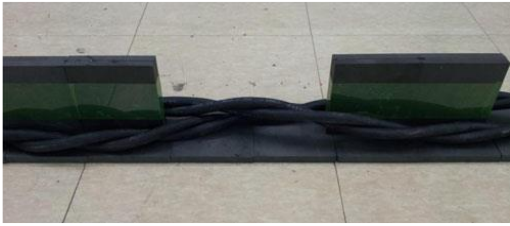
Εικόνα 2-54: Προτεινόμενη X-rail για διπλή ράγα τύπου W σε λειτουργίες ενεργοποίησης και σιωπής: όψη διατομής (πάνω) και επίπεδη όψη (κάτω). (a) Λειτουργία ενεργοποίησης. (b) Λειτουργία σιωπής. [20]



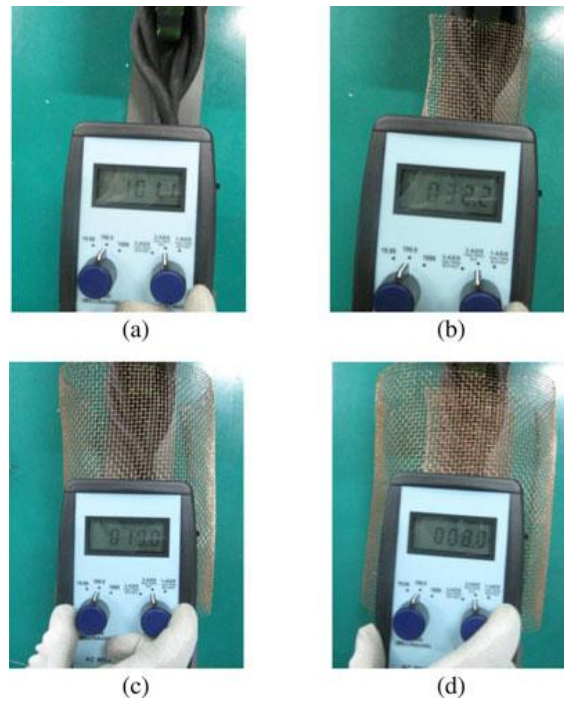
Εικόνα 2-55: Προτεινόμενη X-rail για μονή ράγα τύπου U σε λειτουργίες ενεργοποίησης και σιωπής: όψη διατομής (πάνω) και επίπεδη όψη (κάτω). (a) Λειτουργία ενεργοποίησης. (b) Λειτουργία σιωπής [20].

Εικόνα 2-56: Προτεινόμενη X-rail για ράγα τροφοδοσίας τύπου I σε λειτουργίες ενεργοποίησης και σιωπής: προοπτική όψη (αριστερά) και όψη διατομής (δεξιά). (a) Λειτουργία ενεργοποίησης. (b) Λειτουργία σιωπής. [20]

Για την αποτελεσματική μείωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (EMF) χρησιμοποιούνται συνεστραμμένα καλώδια και δικτυώματα χαλκού στη λειτουργία σιωπής στα cross point (σημεία διασταύρωσης) όπως φαίνεται και στις Εικόνες 2-57, 2-58 αντίστοιχα.



Εικόνα 2-57:Συνεστραμμένα καλώδια που χρησιμοποιούνται στο προτεινόμενη X-rail κατασκευή για την περαιτέρω μείωση του EMF. [20]

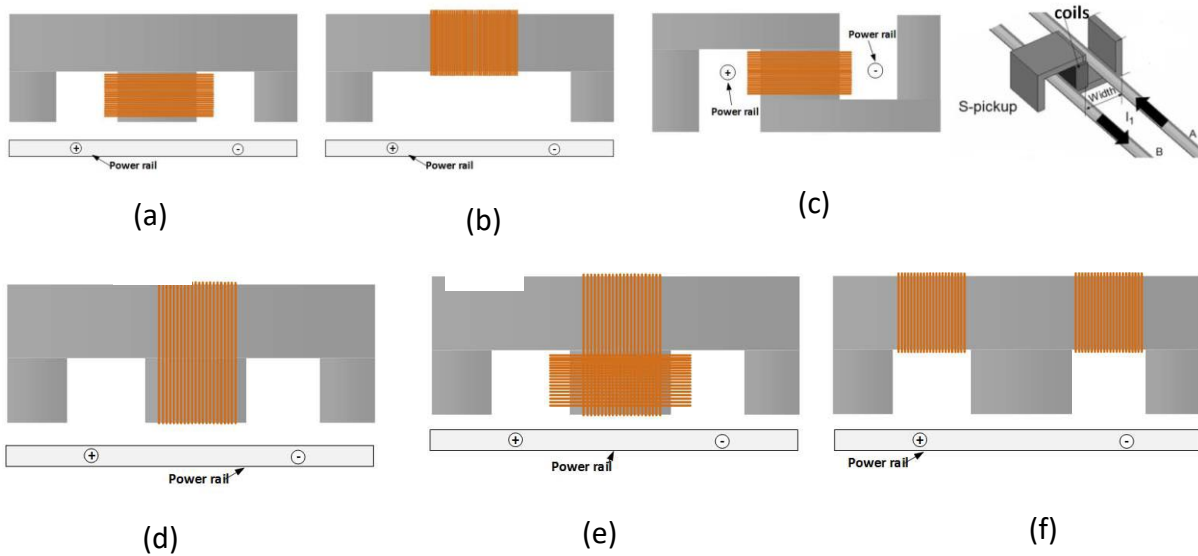


Εικόνα 2-58:Αποτελέσματα μέτρησης EMF με χρήση χάλκινων δικτυωμάτων για περαιτέρω μείωση στο cross point. (a) Χωρίς χάλκινο δικτύωμα. (b) Χάλκινο δικτύωμα μικρής διαμέτρου. (c) Χάλκινο δικτύωμα μεγάλης διαμέτρου. (d) Διπλά χάλκινα δικτυώματα. [20]

Καταληκτικά η X-rail κατασκευή, που προτάθηκε πρόσφατα για τα RPEV, βρέθηκε να είναι αρκετά αποδοτική μειώνοντας στο μισό τη χρήση του καλωδίου τροφοδοσίας. Αυτή η X-rail κατασκευή μας δίνει τη δυνατότητα να ενεργοποιούμε πολλά RPEV ταυτόχρονα και ανεξάρτητα, κάτι που είναι το μοναδικό πλεονέκτημα που δεν επιτεύχθηκε ποτέ από τις προηγούμενες τμηματικές ράγες ισχύος. Επιπλέον, το EMF για τη λειτουργία σιωπής είναι πολύ χαμηλό λόγω των προτεινόμενων συνεστραμμένων καλωδίων τροφοδοσίας και διπλών χάλκινων δικτυωμάτων. Ως εκ τούτου, είναι αρκετά ασφαλές για πεζούς και αυτοκίνητα πάνω από τη ράγα ισχύος τύπου I.

Η Εικόνα 2-59 απεικονίζει διάφορα συστήματα παραλαβής που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Τα πιο συχνά αναφερόμενα συστήματα pick-up είναι τα E- και U-types, τα οποία λόγω της άμεσα διαθέσιμης δομής του μαγνητικού πυρήνα είναι σχετικά φθηνά στην κατασκευή. Για να βελτιωθεί η πυκνότητα ισχύος, προτείνεται ένα pickup τύπου S το οποίο έχει δύο φορές υψηλότερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος από τους τύπους U ή E για την ίδια περιεκτικότητα σε φερρίτη. Όμως, ακόμα, το pickup τύπου S δεν χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως λόγω της περίπλοκης μαγνητικής δομής του και επειδή απαιτεί σημαντική τροποποίηση στην υποδομή υποστήριξης. Για τα προαναφερθέντα συστήματα pick-up, η πλευρική κακή ευθυγράμμιση μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ή καθόλου απόδοση ισχύος

γι' αυτό και στην βιβλιογραφία προτείνεται ένα τετραγωνισμένο pickup. Σε ένα τετραγωνισμένο σύστημα παραλαβής, χρησιμοποιείται ένα τυπικό pickup τύπου E που έχει ένα πρόσθετο πηνίο όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-59(e) και (f). Το πρόσθετο πηνίο είναι τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο ώστε να συλλαμβάνει τη ροή κατά την κακή ευθυγράμμιση. Η έξοδος του πρόσθετου πηνίου συνδέεται με τον ανορθωτή ή στην κύρια έξοδο. Το τετραγωνισμένο pickup είναι πιο αποτελεσματικό για πλευρική κακή ευθυγράμμιση, ωστόσο, για διαμήκη ή για ταυτόχρονη πλευρική και διαμήκη κακή ευθυγράμμιση δεν είναι τόσο αποτελεσματικό [20].



Εικόνα 2-59:(a) E-type pickup. (b) U-type pickup. (c) S-type pickup. (d) Flat pickup wound on flat E-core. (e) Quadrature pickup design 1. (f) Quadrature pick-up design[14]

2.3: Υποδομές και Κόστος

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα-EVs, όπως όλες οι αναδυόμενες τεχνολογίες, ελέγχονται εξονυχιστικά για την αναλογία κόστους προς απόδοση. Για περισσότερα από 100 χρόνια, η τεχνολογία καταπνίγεται από τους περιορισμούς και το υπερβολικό κόστος της μπαταρίας. Με τις σύγχρονες μπαταρίες των EVs που κοστίζουν αρκετές εκατοντάδες £/kWh και η τυπική χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 40 kWh+ (Βάσει ενός Nissan Leaf), το ποσοστό στο οποίο η μπαταρία αυξάνει την τιμή ενός EV είναι εύκολα εμφανές. Όπως αναφέρθηκε, η WPT έχει αποδειχθεί ότι μειώνει το μέγεθος της μπαταρίας που απαιτείται, κάτι που με τη σειρά του θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τις τιμές των EV — αλλά ποιο είναι το κόστος των συστημάτων WPT; Είναι δύσκολο να προσδιοριστεί καθώς η τεχνολογία είναι σχετικά νέα και πολλά συστήματα διαφέρουν ως προς την επιλεγμένη προσέγγιση. Η πιο δαπανηρή επιλογή στη WPT είναι η δυναμική φόρτιση, καθώς συνεπάγεται όχι μόνο το κόστος του συστήματος αλλά και υψηλό κόστος εγκατάστασης. Στο [19], περιγράφεται λεπτομερώς το κόστος εγκατάστασης μιας ράγας τύπου W και I-τύπου. Το εν λόγω άρθρο αναφέρει συνολικό κόστος 1,07 εκατ. \$/χλμ και 0,85 εκατ. \$/χλμ, αντίστοιχα. Στο [21], η εκτίμηση είναι έως και 2,4 εκατομμύρια \$/λωρίδα/μίλι. Λαμβάνοντας υπόψη το μήκος του κατάλληλου οδοστρώματος στις ανεπτυγμένες χώρες (στο [21], αναφέρεται ότι υπάρχουν 2,6 εκατομμύρια μίλια ασφαλτοστρωμένων δρόμων στις ΗΠΑ), το κόστος μόνο για τη συνολική ηλεκτροδότηση είναι συγκλονιστικό. Ωστόσο, με τη χρήση OLEV(OnLine Electric Vehicle), δεν θα χρειαζόταν να αναβαθμιστεί κάθε δρόμος, καθώς το EV θα εξακολουθούσε να έχει ένα μέσο πρόωσης εκτός των αναβαθμισμένων οδικών αρτηριών. Αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι εάν το 1% των αστικών δρόμων ήταν ηλεκτρικά, τα περισσότερα οχήματα θα μπορούσαν να επιτύχουν τον στόχο των 300 μιλίων ανά φόρτιση που ταιριάζει με τα τυπικά οχήματα ICE(Internal Combustion Engine). Λόγω του κόστους και των πρώτων υλών που απαιτούνται, η δυναμική φόρτιση δεν θα μπορέσει ποτέ να εφαρμοστεί παγκοσμίως. Ωστόσο, υπάρχει ακόμα μια σημαντική ευκαιρία για την τεχνολογία. Εάν εφαρμοστεί σωστά, η τεχνολογία θα μπορούσε να πετύχει την απεριόριστη εμβέλεια για τα EV εντός των περιοχών της πόλης και πιθανώς στις συνδέσεις μεταξύ των πόλεων.

Η στατική φόρτιση είναι διαφορετικό θέμα. Ο ρόλος της στατικής φόρτισης είναι να κάνει τη φόρτιση ευκολότερη και ασφαλέστερη. Ένα σύστημα 3,3 kW -παρόμοιο με το επίπεδο 1- που φορτίζει από ρεύμα χωρίς βύσμα μπορεί να κοστίζει περίπου \$2000. Πρόκειται για μια

σημαντική αύξηση του κόστους από τους τυπικούς φορτιστές PEV, αλλά η τεχνολογία μόλις αρχίζει να γίνεται πιο εμπορική και καθώς η ζήτηση αυξάνεται, αναμένεται να γίνει πιο ανταγωνιστική. Σε γενικές γραμμές, το ζήτημα της εμπορευματοποίησης των ηλεκτρικών οχημάτων και των συναφών τεχνολογιών τους βρίσκεται σε αδιέξοδο εδώ και δεκαετίες. Η απορρόφηση των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτείται ως κίνητρο για τη δημιουργία περισσότερων υποδομών και μέσων φόρτισης, αλλά στο ίδιο πνεύμα, η υποδομή και τα μέσα είναι που πρέπει να γίνουν ευρύτερα διαθέσιμα για να καταστεί δυνατή η μεγαλύτερη απορρόφηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Με την κυβερνητική νομοθεσία και το αυξανόμενο ενδιαφέρον για την τεχνολογία, ο ρυθμός ηλεκτροδότησης των δρόμων μπορεί να αυξηθεί [3].

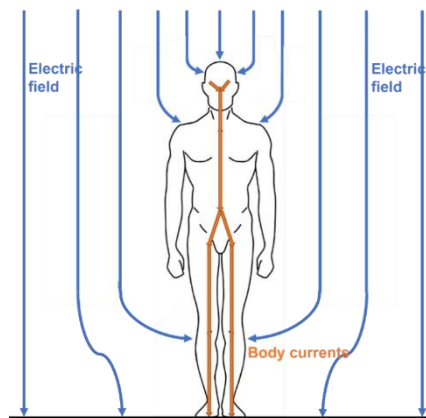
Προστασία επιβατών από ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο

3.1: Επίδραση των Η/Μ πεδίων σε ζώντες οργανισμούς

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο υπάρχει παντού γύρω μας και είναι είτε φυσικής είτε ανθρωπογενής προέλευσης. Αποτελείται από το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο. Ηλεκτρικό πεδίο έχουμε όπου υπάρχει διαφορά δυναμικού και μαγνητικό πεδίο έχουμε όπου υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα. Μια κρίσιμη παράμετρος του ηλεκτρομαγνητικού (Η/Μ) πεδίου είναι η συχνότητά του f και το αντίστοιχο μήκος κύματος, λ , που συνδέονται με τη σχέση $c = \lambda f$, όπου c η ταχύτητα του φωτός [22].

Τα φυσικής προέλευσης Η/Μ πεδία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει το στατικό ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο της Γης. Το ηλεκτρικό πεδίο οφείλεται στο αρνητικό φορτίο της επιφάνειας της Γης και η έντασή του στο φυσικό περιβάλλον κυμαίνεται από 100 έως 500 V/m. Το μαγνητικό πεδίο μειώνεται από τους μαγνητικούς πόλους προς τον μαγνητικό ισημερινό. Στην δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται τα ραδιοκύματα που δημιουργούνται από κοσμικές πηγές (Ήλιος, γαλαξίες και άλλες), η τοπική συσσώρευση ηλεκτρικών φορτίων στην ατμόσφαιρα που σχετίζονται με τις εκκενώσεις των κεραυνών, καθώς επίσης και οι ταλαντώσεις στην ιονόσφαιρα της Γης. Τα Η/Μ πεδία που οφείλονται στον άνθρωπο χωρίζονται και αυτά σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιέχει εκείνες που παράγουν στατικά ή οίονει στατικά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, καθώς και τα εναλλασσόμενα πεδία εξαιρετικά χαμηλών (2-8 Hz έως 50-60 Hz), χαμηλών (3 kHz-30 kHz) και μεσαίων (30-300 kHz) συχνοτήτων. Στις κατηγορίες αυτές υπάγονται οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, ο εξοπλισμός μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, οι γραμμές μεταφοράς συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος βιομηχανικής συχνότητας, οι σταθμοί φόρτισης και τα συστήματα ισχύος ηλεκτρικών οχημάτων, κλπ.. Στην δεύτερη ομάδα συγκαταλέγονται οι πηγές που δημιουργούν Η/Μ πεδία υψηλής συχνότητας (10 MHz - 300 GHz). Οι συχνότητες από 300 MHz ως 300 GHz αποτελούν τα μικροκύματα (πομποί ραδιοφώνου και τηλεόρασης, σταθμοί ραντάρ, τηλεπικοινωνιακά και δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών, συστήματα τοποθεσίας και πλοήγησης κλπ.). Όλες αυτές οι κατηγορίες συχνοτήτων συνιστούν μη-ιοντίζουσες ακτινοβολίες, ενώ συχνότητες αρκετά πάνω από αυτές συνιστούν ιοντίζουσες ακτινοβολίες [22].

Τα ηλεκτρικά πεδία χαμηλής συχνότητας επιδρούν στο ανθρώπινο σώμα επηρεάζοντας την κατανομή των ηλεκτρικών φορτίων στην επιφάνειά του σώματος, δημιουργούν ηλεκτρικές τάσεις μέσα στο σώμα οι οποίες με την σειρά τους δημιουργούν ρεύματα από το σώμα προς το έδαφος όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-1. Τα μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας προκαλούν και αυτά ρεύματα μέσα στο σώμα τα οποία όταν είναι μεγάλα μπορούν να προκαλέσουν διέγερση των νεύρων και των μυών ή να επηρεάσουν άλλες βιολογικές διεργασίες, αλλά είναι πολύ μικρά σε σχέση με τα ρεύματα που προκαλούν ηλεκτροπληξία [22].



Εικόνα 3-1: Τα ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στο ανθρώπινο σώμα τα οποία επάγονται από το ηλεκτρικό πεδίο συχνότητας ισχύος[22].

Οι έρευνες που πραγματοποιούν Διεθνείς Οργανισμοί όπως είναι ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας(ΠΟΥ) σχετικά με τα Η/Μ πεδία συμπεριλαμβάνουν και τα χαμηλής συχνότητας Η/Μ πεδία. Το 1996 ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) ξεκίνησε ένα μεγάλο επιστημονικό έργο [23] με συμμετοχή ερευνητών από διάφορους κλάδους και χώρες έχοντας ως στόχο τη μελέτη των πιθανών επιπτώσεων στην υγεία του ανθρώπου από πολλές και διαφορετικές πηγές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και ανακοίνωσε ότι δεν υπάρχουν ακόμη επαρκείς ενδείξεις για τις συνέπειες στην υγεία από την έκθεση σε χαμηλά πεδία επισημαίνοντας ότι απαιτείται περαιτέρω έρευνα που αφορά τις βιολογικές επιπτώσεις της μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

3.2: Πρόσφατα πρότυπα μέγιστου Η/Μ πεδίου

Η κάθε χώρα ορίζει τα δικά της όρια για την έκθεση του κοινού σε Η/Μ πεδία τα οποία στην πλειονότητα τους βασίζονται σε πρότυπα που ορίζει η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP), η οποία είναι μια μη-κυβερνητική οργάνωση, επίσημα αναγνωρισμένη από τον ΠΟΥ. Η ICNIRP αφού αξιολογήσει επιστημονικά αποτελέσματα που προκύπτουν παγκοσμίως εκδίδει οδηγίες οι οποίες συνιστούν ανώτατα όρια έκθεσης. Αυτές οι οδηγίες επανεξετάζονται και τροποποιούνται καταλλήλως -αν είναι απαραίτητο- σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα και παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3-1 που ακολουθεί.

Πίνακας 3-1: Σύνοψη των ορίων έκθεσης σε Η/Μ πεδία του ICNIRP[22]

	Συχνότητα ισχύος στην Ευρώπη		Συχνότητα σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας		Συχνότητα φούρνου μικροκυμάτων
Συχνότητα	50 Hz	50 Hz	900 MHz	1.8 GHz	2.45 GHz
	Ηλεκτρικό πεδίο (V/m)	Μαγνητικό πεδίο (μT)	Πυκνότητα ισχύος (W/m ²)	Πυκνότητα ισχύος (W/m ²)	Πυκνότητα ισχύος (W/m ²)
Όρια έκθεσης για το κοινό	5000	200	4.5	9	10
Όρια έκθεσης για τους εργαζόμενους	10000	1000	22.5	45	

Όπως φαίνεται και στον πιο πάνω πίνακα τα όρια έκθεσης για τους εργαζόμενους είναι πιο ψηλά γιατί οι εργαζόμενοι γνωρίζουν τους κινδύνους και λαμβάνουν τις κατάλληλες προφυλάξεις. Αντίθετα το ευρύ κοινό το οποίο αποτελείται από άτομα διαφόρων ηλικιών και ευπαθών ομάδων δεν γνωρίζει πολλές φορές ότι εκτίθεται σε Η/Μ πεδία και ούτε ξέρει πως να προφυλαχθεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν πρέπει να περιμένουμε από το ευρύ κοινό να λαμβάνει προφυλάξεις για την ελαχιστοποίηση ή την αποφυγή της έκθεσης σε τέτοια πεδία [22].

Όπως προαναφέρθηκε όταν το ανθρώπινο σώμα εκτίθεται σε Η/Μ πεδία επάγονται σ' αυτό ηλεκτρικά ρεύματα ασυσχέτιστα με τα φυσιολογικά ρεύματα του σώματος. Γι' αυτό και η ICNIRP καθόρισε οδηγίες για τις χαμηλές συχνότητες οι οποίες διασφαλίζουν ότι η ένταση των ρευμάτων που οφείλονται στα Η/Μ πεδία είναι χαμηλότερη από την ένταση των

φυσιολογικών ρευμάτων. Όμως αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές καθορίστηκαν για τον μέσο πληθυσμό και δεν προστατεύουν τις ευαίσθητες ομάδες όπως ανθρώπους με εμφυτευμένες ιατρικές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως οι καρδιακοί βηματοδότες, από παρεμβολές. Γι' αυτό οι κατασκευαστές και οι κλινικοί ιατροί θα πρέπει να δίνουν συμβουλές σχετικά με τα επίπεδα έκθεσης που πρέπει να αποφεύγονται.

Ο ΠΟΥ στο διεθνές του έργο για τα Η/Μ πεδία προσπαθεί να βοηθήσει τις Εθνικές Αρχές να σταθμίσουν τα πλεονεκτήματα με τα μειονεκτήματα των τεχνολογιών που εκπέμπουν Η/Μ πεδία εκδίδοντας τις εξής συστάσεις για προστατευτικά μέτρα όταν απαιτείται:

- Αυστηρή τήρηση των υφιστάμενων εθνικών ή διεθνών προτύπων ασφάλειας. Αυτά τα πρότυπα έχουν ως βάση τις σημερινές επιστημονικές γνώσεις και αναπτύσσονται για να προστατεύουν τον πληθυσμό με μεγάλο συντελεστή ασφάλειας.
- Εφαρμογή απλών προστατευτικών μέτρων. Η δημιουργία φρακτών γύρω από τις πηγές ισχυρού Η/Μ πεδίου βοηθά στην αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης σε περιοχές όπου μπορεί να σημειωθεί υπέρβαση των ορίων έκθεσης.
- Διαβούλευση με τοπικές αρχές και κοινό για τη χωροθέτηση νέων γραμμών μεταφοράς και σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας. Κατά τη λήψη τέτοιων αποφάσεων απαιτείται να ληφθούν υπόψη η αισθητική του χώρου και οι ευαισθησίες του κοινού.
- Ένα σύστημα πληροφόρησης και επικοινωνίας μεταξύ επιστημόνων, κυβερνήσεων, βιομηχανιών και κοινού για θέματα υγείας, μπορεί να συμβάλει στη ευαισθητοποίηση στην έκθεση σε Η/Μ πεδία, μειώνοντας τυχόν δυσπιστίες και φόβους.

3.3: Επιδράσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων σε όργανα και ιστούς

Μέχρι σήμερα για να διερευνηθεί η βιολογική επίδραση των Η/Μ πεδίων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) και των μικροκυμάτων σε όργανα και ιστούς έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες. Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν οι επιδράσεις των πεδίων χαμηλών συχνοτήτων (ELF) σε κύρια συστήματα οργάνων.

Νευρικό σύστημα

Εκτενής έρευνα έχει πραγματοποιηθεί σχετικά με τις επιδράσεις των παλμικών και ημιτονοειδών πεδίων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας στην ηλεκτρική δραστηριότητα του νευρικού συστήματος. Έχει αποδειχθεί ότι μόνο τα ημιτονοειδή ηλεκτρικά πεδία υψηλής έντασης ή παλμικά μαγνητικά πεδία μεγάλης συχνότητας προκαλούν σημαντική πυκνότητα ρεύματος στον ιστό (περίπου 0,1-1,0 A/m² ή υψηλότερη) ικανή να αλλάξει τη διέγερση των νευρώνων και τη μετάδοση της νευρικής ώσης στη σύναψη ή να δημιουργήσει νευρομυϊκή διέγερση [22].

Σε μια μελέτη όταν η συχνότητα του Η/Μ πεδίου ήταν παραπλήσια με την ενδογενή συχνότητα ενεργοποίησης των νευρώνων παρατηρήθηκε χαμηλότερο κατώφλι για την επαγωγή οπτικών φωσφαινίων και για την επίδραση στην ηλεκτρική δραστηριότητα των νευρώνων (pacemakers) των θαλάσσιων λαγών “Aplysia”. Αυτά τα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν μόνο για εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες (ELF). Σε άλλες πρόσφατες μελέτες εθελοντές συμμετείχαν σε πειράματα με ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 60 Hz των οποίων οι εντάσεις ήταν παραπλήσιες με αυτών των γραμμών υψηλής τάσης χωρίς να παρατηρηθούν σταθερές επιδράσεις στα ηλεκτροεγκεφαλογράφηματά τους (EEG). Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν μικρές αλλαγές στην αντίδραση των εθελοντών και στον καρδιακό τους ρυθμό που ήταν εντός φυσιολογικών ορίων [22].

Σύστημα όρασης του ανθρώπου

Εδώ και ένα αιώνα είναι γνωστό το εξής οπτικό φαινόμενο: Όταν ο άνθρωπος εκτίθεται σε Η/Μ πεδία χαμηλής συχνότητας αρκετές φορές αναφέρονται φωτοψίες ή φωσφαίνια. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τους επιστήμονες, χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία με παλμικές ή ημιτονοειδείς κυματομορφές με ρυθμό μεταβολής πάνω από 1,3 T/sec και συχνότητα κάτω των 100 Hz παράγουν φωσφαίνια. Για τα ημιτονοειδή πεδία έχουμε ότι

απαιτείται συχνότητα των 20 Hz, ενώ η πυκνότητα ροής των 8 mT είναι αρκετή για την πιθανή παραγωγή των μαγνητοφωσφαινίων. Ακόμα τα μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) με πυκνότητα ροής 5 έως 10 φορές μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την παραγωγή φωσφαινίων προκαλούν αλλαγές στα οπτικά προκλητά δυναμικά (VEP). Όταν ηλεκτρόδια τοποθετούνται επαφτομενικά με το μέτωπο κοντά στα μάτια παράγονται ηλεκτροφωσφαίνια τα οποία δημιουργούνται στον αμφιβληστροειδή χιτώνα εξαιτίας των επαγόμενων ρεύματων σε αυτήν την περιοχή και προκαλούν οπτικές αποκρίσεις παρόμοιες με αυτές που προκύπτουν από τη φωτεινή διέγερση [22].

Ενδοκρινικό σύστημα

Τα αποτελέσματα των μελετών που πραγματοποιήθηκαν για την επίδραση των Η/Μ πεδίων (ELF) στο ενδοκρινικό σύστημα είναι αντικρουόμενα. Αναφέρονται αυξήσεις, μειώσεις ή σταθερότητα στις συγκεντρώσεις των στεροειδών ορμονών στο πλάσμα του αίματος. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε πθήκους τους οποίους εξέθεσαν σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 60 Hz παρόμοια με τα πεδία που συναντούμε κοντά σε γραμμές υψηλής τάσης και παρατηρήθηκε μείωση στις συγκεντρώσεις των νευροδιαβιβαστών χωρίς να παρατηρηθεί κάποια αλλαγή στη φυσιολογία του σώματος ή την συμπεριφορά των πθήκων.

Έγιναν αρκετές μελέτες σχετικά με την επίδραση των Η/Μ πεδίων (ELF) στην επίφυση οι οποίες κατέδειξαν ότι η αύξηση της ορμόνης μελατονίνης κατά τις νυκτερινές ώρες ελαττώνεται. Αυτό παρατηρήθηκε μετά από 2-3 βδομάδες έκθεσης σε ηλεκτρικά πεδία με εντάσεις που υπερβαίνουν τα 1,7 kV/m στον αέρα. Όμως αν τερματιστεί η έκθεση εντός 3 ημερών τα επίπεδα μελατονίνης επανέρχονται στα φυσιολογικά επίπεδα. Παρόμοια αν εκθέσουμε τα τρωκτικά σε στατικό μαγνητικό πεδίο των 0,05 mT, το οποίο είναι συνεχώς ενεργοποιημένο και απενεργοποιημένο με κύκλους των 5 λεπτών για 1 ώρα, ξεκινώντας 3,5 ώρες μετά τη δύση του ήλιου παρατηρείται παρόμοια επίδραση στην μελατονίνη. Η μελατονίνη επιδρά στον πολλαπλασιασμό των κυττάρων και είναι υπεύθυνη για καρκινοστατικές δράσεις χωρίς όμως να υπάρχουν ποσοτικές πληροφορίες για τις τιμές κατωφλίου για τα πεδία που προκαλούν την αλλαγή της συγκέντρωσης της. Τέλος δεν ξέρουμε αν η μεταβολή της μελατονίνης από τα Η/Μ πεδία (ELF) είναι δευτερογενής στα πλαίσια των επιπτώσεων των πεδίων στο νευρικό σύστημα [22].

Ανοσοποιητικό σύστημα

Σχετικά με την επίδραση Η/Μ πεδίων (ELF) στο ανοσοποιητικό σύστημα τα in-vivo πειράματα σε πειραματόζωα έδειξαν την απουσία σημαντικών επιπτώσεων στη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος. Επίσης πραγματοποιήθηκε μια μελέτη ημιτονοειδούς ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου συχνότητας 60 Hz με εντάσεις συγκρίσιμες με εκείνες των πεδίων κοντά σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης και δεν παρατηρήθηκαν επιπτώσεις στην φυσιολογική λειτουργία των περιφερικών λεμφοκυττάρων ανθρώπου και σκύλου που ελήφθησαν από δότες. Τα κύτταρα αυτά ήταν είτε φυσιολογικά ή είχαν μολυνθεί με ειδικά αντιγόνα [22].

Αιμοποιητικό και καρδιαγγειακό σύστημα

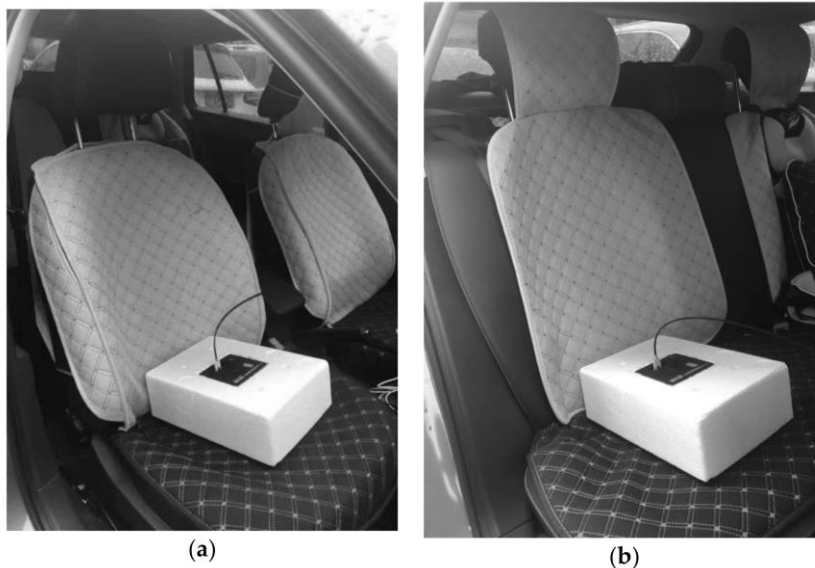
Το κατώφλι των πεδίων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) για την πρόκληση σημαντικών καρδιαγγειακών και αιματολογικών αλλοιώσεων είναι υψηλό. Πιο συγκεκριμένα η έκθεση σε ηλεκτρικά πεδία συχνότητας 60 Hz με ένταση 100 kV/m δεν μετέβαλαν τους καρδιαγγειακούς δείκτες. Επίσης η έκθεση του ανθρώπου σε ηλεκτρικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας έντασης έως 200 kV/m και μαγνητικά πεδία έως 5 mT δεν έδειξαν, μόνιμες αιματολογικές ή καρδιαγγειακές επιδράσεις [22].

Καρκινογένεση στα πειραματόζωα

Σημαντικό ενδιαφέρον έχει προκύψει σχετικά με την παράλληλη δράση των Η/Μ πεδίων μαζί με άλλους καρκινογόνους παράγοντες και το ρόλο των πεδίων αυτών στη έναρξη της καρκινογένεσης. Η ομάδα των McLean et al. σε μια πρόσφατη μελέτη κατέδειξε ότι ένα μαγνητικό πεδίο 60 Hz δρα ως συνπροαγωγέας του καρκίνου. Όμως θα χρειαστούν πρόσθετες μελέτες για την τεκμηρίωση αυτών των ευρημάτων. Σε ένα άλλο πείραμα η ερευνητική ομάδα Benishvilli et al. παρείχαν νιτρομεθυλουρία σε αρουραίους και στη συνέχεια τους εξέθεσαν είτε σε στατικό πεδίο 0,2 G είτε σε μαγνητικό πεδίο 50 Hz για 0,5 ή 3 ώρες την ημέρα για χρονικό διάστημα έως και δύο χρόνια. Προέκυψε ότι το εναλλασσόμενο πεδίο είναι πιο δραστικό από το στατικό αφού ανακαλύφθηκε αυξημένη επίπτωση και αυξημένο αριθμό μαστικών όγκων στις ομάδες που εκτέθηκαν στα μαγνητικά πεδία. Επίσης οι αρουραίοι που εκτέθηκαν μόνο στο πεδίο των 50Hz παρουσιάσθηκε σ' αυτούς αυξημένη απόκριση όγκου [22].

3.4: Θωράκιση έναντι ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου

Η έκθεση στο μαγνητικό πεδίο (MF) εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) στα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) έχει προκαλέσει την ανησυχία του κοινού για την ανθρώπινη υγεία. Έχουν γίνει πολλές μελέτες που αξιολογούν τις τιμές μαγνητικού πεδίου σε αυτά τα οχήματα. Ωστόσο, δεν έχει υπάρξει αναφορά για τη χρονική διακύμανση του μαγνητικού πεδίου στην καμπίνα. Το 2019 διεξήχθη η πρώτη μελέτη σχετικά με τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση των μαγνητικών πεδίων μέσα στα ηλεκτρικά οχήματα [24]. Στη μελέτη, μετρήθηκε η πυκνότητα μαγνητικής ροής (B) σε τρία κοινά οχήματα σε διάστημα δύο ετών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα μπροστινά και πίσω καθίσματα κατά τη λειτουργία επιτάχυνσης και οδήγησης με σταθερή ταχύτητα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-2.



Εικόνα 3-2: Τοποθέτηση των ανιχνευτών εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) μαγνητικού πεδίου (MF) στα δεξιά μπροστινά (a) και πίσω (b) καθίσματα [24]

Διαπιστώθηκε ότι τα πλάτη των μαγνητικών πεδίων και τα φασματικά στοιχεία τους μπορούσαν να τροποποιηθούν αντικαθιστώντας εξαρτήματα, ενώ οι τακτικοί έλεγχοι ή η συντήρηση δεν επηρέασαν τις τιμές του B μέσα στο όχημα. Αυτή η παρατήρηση υπογραμμίζει την ανάγκη τακτικής παρακολούθησης των μαγνητικών πεδίων ELF μέσα στα ηλεκτρικά οχήματα, ειδικά μετά από μεγάλες επισκευές ή ατυχήματα, για την προστασία των χρηστών αυτοκινήτων από πιθανή υπερβολική έκθεση σε μαγνητικά πεδία ELF. Αυτά τα αποτελέσματα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στις ενημερώσεις των προτύπων μέτρησης. Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου ELF θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη σε σχετικές επιδημιολογικές μελέτες.

Στο [25] αξιολογείται το μαγνητικό πεδίο μέσα σε οκτώ διαφορετικά EV (συμπεριλαμβανομένων τύπων μπαταρίας, υβριδικού, plug-in υβριδικού και κυψελών καυσίμου) με διαφορετικές τεχνολογίες κινητήρα (συνεχούς ρεύματος, σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών και επαγωγής) για συχνότητες έως και 10 MHz. Τρία οχήματα με συμβατικά κινητήρια σύνολα ερευνήθηκαν επίσης για σύγκριση. Περιγράφεται το πρωτόκολλο μέτρησης και τα αποτελέσματα της εκστρατείας μέτρησης και προσδιορίζονται διάφορες πηγές μαγνητικού πεδίου. Τα αποτελέσματα για τα μετρημένα EVs έδειξαν ότι η έκθεση έφτασε το 20% των επιπέδων αναφοράς του ICNIRP 2010 για την έκθεση του κοινού κοντά στην μπαταρία και κοντά στα πόδια κατά την εκκίνηση του οχήματος, αλλά ήταν μικρότερη από 2% στο ύψος του κεφαλιού για την θέση συνοδηγού. Επίσης ελήφθησαν μέγιστες εκθέσεις της τάξης του 10% των επιπέδων αναφοράς του ICNIRP 2010 για τα αυτοκίνητα με συμβατικά συστήματα μετάδοσης κίνησης.

Σε μια άλλη μελέτη διεξήχθησαν μετρήσεις των πεδίων σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα των οποίων πεδίων οι τιμές ήταν πολύ χαμηλές σε σχέση τα όρια έκθεσης. Η ICNIRP και η IEEE δημοσίευσαν τα αποτελέσματα που συγκρίνουν τα επίπεδα του μαγνητικού πεδίου στα ηλεκτρικά οχήματα με τα αντίστοιχα των βενζινοκίνητων οχημάτων. Οι μετρήσεις έγιναν σε 14 οχήματα (6 βενζινοκίνητα και 8 ηλεκτρικά διαφόρων τύπων) κατασκευασμένα μεταξύ Ιανουαρίου 2000 και Απριλίου 2009. Τα οχήματα οδηγήθηκαν σε δοκιμαστική διαδρομή 16,3 χλμ. με δειγματοληψία κάθε 4 s. Ο μέσος όρος των μετρήσεων για τα επτά από τα οκτώ ηλεκτρικά οχήματα ήταν 0,095μT ενώ των συμβατικών ήταν 0,051μT, όλες οι τιμές πολύ μικρότερες από τα όρια που θέτει το IEEE και η ICNIRP [22].

Με την σταδιακή μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση υπάρχει εκτεταμένη δημόσια ανησυχία για τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (EMF) που δημιουργούνται από ηλεκτρικά οχήματα και η ανάγκη για εξέταση της βιολογικής συνάφειας τέτοιων συστημάτων γίνεται όλο και πιο σημαντική. Ειδικότερα, είναι απαραίτητο να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα μαγνητικά πεδία (MF), επειδή βιολογικές μελέτες υποδεικνύουν ότι το μαγνητικό και όχι το ηλεκτρικό πεδίο επιδρά στους ζωντανούς οργανισμούς. Στο [26] παρουσιάζεται μια ανασκόπηση του παρατηρούμενου EMF στα ηλεκτρικά οχήματα (EV) και των πιθανών βιολογικών επιπτώσεων μαζί με την έρευνα σχετικά με τις μετρήσεις και την ανάλυση των μαγνητικών πεδίων που συναντώνται στα δημόσια οχήματα που κινούνται με συνεχή και εναλλασσόμενο ρεύμα. Τα μέγιστα μεγέθη

μαγνητικού πεδίου εντός των ηλεκτρικών οχημάτων κυμαίνονταν από μερικά μT έως $120 \mu\text{T}$. Για το ευρύτερο κοινό, αυτό το εύρος εκθέσεων σε συστήματα ηλεκτρικών μεταφορών προσωπικής κλίμακας είναι συγκρίσιμο σε μέγεθος με εκθέσεις από άλλες πηγές στο περιβάλλον διαβίωσης. Ωστόσο, η έκθεση στο μαγνητικό πεδίο των ηλεκτρικών οχημάτων είναι εντελώς διαφορετική από την έκθεση στο μαγνητικό πεδίο των κοινών γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, χαρακτηρίζεται από το πολύπλοκο φάσμα συχνοτήτων και συγκεκριμένες κυματομορφές. Οι μετρήσεις που ελήφθησαν επέτρεψαν τον χαρακτηρισμό συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του μαγνητικού πεδίου που θα μπορούσαν να έχουν βιολογική επίδραση: όπως το ευρύ φάσμα συχνοτήτων, η υπέρθεση, η αλληλεπίδραση με το στατικό πεδίο και άλλα. Η προσεκτική χαρτογράφηση των μαγνητικών πεδίων μέσα στο όχημα σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας οδήγησε στη δυνατότητα αναγνώρισης των κύριων πηγών των μαγνητικών πεδίων. Αυτές οι πληροφορίες θα μπορούσαν να είναι σημαντικές τόσο για πιθανές μειώσεις όσο και για ζητήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας.

Σε μια εργασία ερευνήθηκε η χρήση νέων υλικών αμαξώματος στα ηλεκτρικά οχήματα μεγαλύτερης σκληρότητας, μικρότερου βάρους και καλύτερης απόδοσης της θωράκισης (όπως κράματα αλουμινίου, μη μαγνητικός χάλυβας και permalloy) [22]. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε η κατανομή του πεδίου που επάγεται στον κορμό και στο κεντρικό νευρικό σύστημα (ΚΝΣ) του οδηγού. Προέκυψε ότι οι μέγιστες τιμές της έντασης του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου (πεδίο E) και της επαγόμενης πυκνότητας ρεύματος (πεδίο J) στον κορμό του οδηγού φτάνουν μόνο το 2,27 % και το 67 % των ορίων της ICNIRP, ενώ οι μέγιστες τιμές του πεδίου E και του πεδίου J στο ΚΝΣ του οδηγού φτάνουν μόνο το 0,29 % και το 0,62 % των ορίων της ICNIRP αντίστοιχα. Συμπεραίνεται ότι το υλικό του αμαξώματος του ηλεκτρικού οχήματος με υψηλότερη ειδική αντίσταση και μαγνητική διαπερατότητα είναι πιο ασφαλές για το σώμα του οδηγού.

Μια άλλη εργασία [27] εξετάζει πρόσφατες δραστηριότητες τυποποίησης και επιστημονικές μελέτες που σχετίζονται με την αξιολόγηση της ανθρώπινης έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (EMF). Συνοψίζονται οι διαφορές στα πρότυπα ανθρώπινης έκθεσης και αξιολόγησης των καταναλωτικών προϊόντων και των ιατρικών εφαρμογών. Αρχικά, εξετάζεται η μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος και οι διηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών. Στη συνέχεια, εξηγείται η λογική των τρεχόντων προτύπων έκθεσης από την άποψη του EMF και η διαδικασία τυποποίησης για τη συμμόρφωση του προϊόντος με βάση

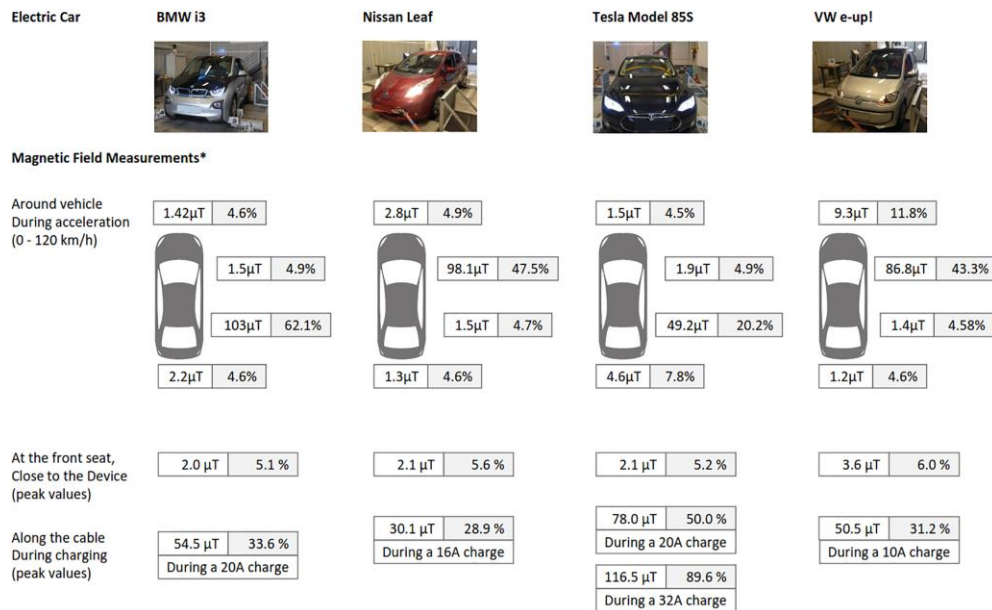
αυτά τα πρότυπα έκθεσης. Επανεξετάζεται η αξιολόγηση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, ως παράδειγμα αναδύομενων ασύρματων συσκευών, και τα περιβαλλοντικά EMF στην καθημερινή μας ζωή. Εξετάζεται επίσης η ασφάλεια σε συστήματα μαγνητικού συντονισμού, όπου η έκθεση σε EMF είναι πολύ μεγαλύτερη από ό,τι σε τυπικές καταναλωτικές συσκευές. Τέλος, συνοψίζονται οι μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και οι ερευνητικές ανάγκες για την ασφάλεια από τα EMF.

Επιπλέον σε μια εργασία [28] μελετάται η συμπεριφορά των θωρακισμένων καλωδίων υψηλής τάσης και χαμηλής συχνότητας για τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιώντας αναλυτικές μεθόδους. Αρχικά παρουσιάζεται η βασική θεωρία για τους τρόπους λειτουργίας και τη μοντελοποίηση των καλωδίων. Γίνονται μετρήσεις και αριθμητικές προσομοιώσεις για την επαλήθευση των μοντέλων. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος διερευνάται χρησιμοποιώντας τα μοντέλα προσομοίωσης. Μια παραμετρική μελέτη προσδιορίζει την επίδραση παραμέτρων όπως το ύψος και η απόσταση των καλωδίων και παρέχει πληροφορίες για μια διάταξη με ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Τα μαγνητικά πεδία για διαφορετικές ρυθμίσεις καλωδίων υπολογίζονται και συγκρίνονται με τιμές από τα πρότυπα προστασίας της δημόσιας υγείας.

Οι θωρακίσεις χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μείωση των αγώγιμων και ακτινοβολούμενων εκπομπών σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης αυτοκινήτων. Όσον αφορά τη θωράκιση καλωδίου, οι μη ιδανικές παράμετροι λόγω της δομής της καθορίζουν την κατανομή ρεύματος μεταξύ της θωράκισης και του εδάφους. Αυτά τα ρεύματα είναι καθοριστικά για τις εκπομπές μαγνητικού πεδίου. Είναι σημαντικό να ποσοτικοποιηθεί η κατανομή ρεύματος μεταξύ της θωράκισης και του εδάφους λόγω των αυστηρών απαιτήσεων για εκπομπές πεδίου χαμηλού επιπέδου. Η γεωμετρική διάταξη των καλωδίων σε σχέση με άλλα εξαρτήματα και το έδαφος παίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση των ρευμάτων θωράκισης και γείωσης. Στο άρθρο [29] παρουσιάζεται μια αναλυτική προσέγγιση για την επίτευξη ρευμάτων θωράκισης και γείωσης ως συνάρτηση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό του συστήματος ηλεκτροκίνησης.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για δημόσιες και ιδιωτικές μεταφορές και αντιπροσωπεύουν πιθανές πηγές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (ElectroMagnetic Interference-EMI). Οι πιθανές επιπτώσεις για ασθενείς με καρδιακές εμφυτεύσιμες ηλεκτρονικές συσκευές (Cardiac Implantable Electronic Devices-CIED) όπως οι βηματοδότες μπορεί να έχουν σαν αποτέλεσμα την δυσλειτουργία της συσκευής. Η μελέτη

[30] σχεδιάστηκε για να αξιολογήσει τον κίνδυνο της EMI των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στη λειτουργία των CIED. Εκατόν οκτώ διαδοχικοί ασθενείς με CIED που παρουσιάστηκαν για παρακολούθηση ρουτίνας μεταξύ Μαΐου 2014 και Ιανουαρίου 2015 εντάχθηκαν στη μελέτη. Οι συμμετέχοντες εκτέθηκαν σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τα τέσσερα πιο κοινά ηλεκτρικά αυτοκίνητα (Nissan Leaf, Tesla Model S, BMW i3, VW eUp) κατά τη δοκιμαστική οδήγηση στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας Αυτοκινήτων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Μονάχου όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-3.



Εικόνα 3-3: Ένταση μαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής. *Τιμές που εμφανίζονται ως μέγιστη ένταση πεδίου και ως ποσοστό (κανονικοποιημένο κατά συχνότητα) της μέγιστης συνιστώμενης έκθεσης από το ICNIRP [30]

Καταγράφηκαν οι τυχόν ανωμαλίες στη λειτουργία του CIED (π.χ. υπεραίσθηση με αναστολή βηματοδότησης, ακατάλληλη θεραπεία ή αλλαγή τρόπου λειτουργίας) κατά την οδήγηση ή τη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Οι αξιολόγηση έγινε με τη λήψη του ηλεκτροκαρδιογραφήματος των ασθενών και την παρακολούθηση της συσκευής. Δεν παρατηρήθηκε καμία αλλαγή στη λειτουργία ή τον προγραμματισμό της συσκευής. Το μεγαλύτερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που ανιχνεύθηκε ήταν κατά μήκος του καλωδίου φόρτισης κατά τη διάρκεια φόρτισης υψηλού ρεύματος (116,5 μT). Η ένταση πεδίου στην καμπίνα ήταν χαμηλότερη (2,1–3,6 μT). Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία όμως δεν επηρέασαν τη λειτουργία ή τον προγραμματισμό του CIED. Η οδήγηση και η φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων φαίνεται να είναι ασφαλής για ασθενείς με CIED.

Τα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων τους. Ωστόσο, η έκθεση του ανθρώπου σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (EMF) προκαλεί σοβαρή ανησυχία για τα συστήματα υψηλής ισχύος. Στο άρθρο [31], διερευνώνται οι τεχνικές θωράκισης, συμπεριλαμβανομένων των μαγνητικών, μεταλλικών και θωρακίσεων συντονισμού αέργου ρεύματος. Λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση και σύγκριση της αποτελεσματικότητας της θωράκισης, του βάρους του φορτιστή και της απόδοσης του συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η θωράκιση συντονισμού αέργου ρεύματος έχει χαμηλό επίπεδο EMF με καλή απόδοση συστήματος και αποδεκτό βάρος φορτιστή. Επιπλέον, κατασκευάστηκαν φορτιστές WPT 5 kW με διάκενο αέρα 15 cm για την επικύρωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διαρροής (EMF) που επηρεάζει άλλες ηλεκτρονικές συσκευές ή το ανθρώπινο σώμα δημιουργείται αναπόφευκτα από τα πηνία ενός συστήματος WPT και οι απαιτήσεις σχετικά με την καταστολή του EMF διαρροής αυξάνονται. Στην εργασία [32], προτείνεται μια νέα τριφασική γραμμή ισχύος σε ένα σύστημα WPT για τη μείωση της διαρροής EMF. Η προτεινόμενη δομή χρησιμοποιεί έξι γραμμές ισχύος για τη μείωση της διαρροής μαγνητικής ροής. Αυτή η δομή συγκρίνεται με τις συμβατικές κατασκευές γραμμών ισχύος για τα συστήματα WPT σε σχέση με την επαγόμενη τάση και την κατανομή του μαγνητικού πεδίου. Παρουσιάζονται επίσης αναλυτικές λύσεις του EMF για τις προτεινόμενες και συμβατικές κατασκευές ηλεκτροφόρων γραμμών. Αυτές οι λύσεις στη συνέχεια συγκρίνονται με αριθμητικές λύσεις χρησιμοποιώντας τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και αποδεικνύεται καλή συσχέτιση. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης δείχνουν ότι η προτεινόμενη γραμμή ισχύος μπορεί να μειώσει σημαντικά το μαγνητικό πεδίο διαρροής από ένα σύστημα WPT. Για επαλήθευση, υλοποιούνται οι προτεινόμενες και οι συμβατικές γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας και μετρούνται τα EMF. Παρουσιάζεται μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Το άρθρο [33] εξετάζει τα όρια έκθεσης και την ασφάλεια των εκπομπών ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (EMF) ενδιάμεσης συχνότητας (IF) για εφαρμογές ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (WEVC). Παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των ορίων έκθεσης στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που προσδιορίζονται στις διεθνείς οδηγίες. Παρέχεται μια επισκόπηση των τεχνολογιών θωράκισης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου,

συμπεριλαμβανομένων των προτεινόμενων γεωμετριών, υλικών και επιδόσεων των μεθόδων που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Τα διαθέσιμα εργαστηριακά αποτελέσματα των εκπομπών EMF συνοψίζονται λαμβάνοντας υπόψη αρκετές μελέτες ασύρματης μεταφοράς ισχύος σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Οι πιθανές τεχνικές μείωσης EMF συζητούνται με πρακτικές θωράκισης και μελέτες του Oak Ridge National Laboratory-ORNL. Επίσης, οι μέθοδοι ανίχνευσης ζωντανών αντικειμένων (Living Object Detection-LOD) και ανίχνευσης ξένων αντικειμένων (Foreign Object Detection-FOD) εξετάζονται από άποψη ασφάλειας.

Η μελέτη [34] διερευνά τις εκπομπές ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (EMF) ενός ασύρματου συστήματος φόρτισης Double-D (DD) 100 kW. Προτείνεται μια τεχνική θωράκισης για την καταστολή των εκπομπών μαγνητικού πεδίου κάτω από τα όρια που έχει θέσει η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP). Το πρότυπο διαρροής που παράγεται από το πηνίο DD είναι διαφορετικό από τα μονοπολικά (κυκλικά, ορθογώνια, κ.λπ.) πηνία και οι παραδοσιακές θωρακίσεις αλουμινίου που βασίζονται σε δινορεύματα δεν είναι αποτελεσματικές στην καταστολή αυτού του πεδίου διαρροής. Επομένως, μια μεθοδικά σχεδιασμένη μαγνητική θωράκιση θα μπορούσε να είναι πιο αποτελεσματική. Αυτή η μελέτη προτείνει μια τεχνική θωράκισης για πηνία DD χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό θωράκισης αλουμινίου και μαγνητικής θωράκισης χαμηλής μαγνητικής αντίστασης για την καταστολή των εκπομπών μαγνητικού πεδίου. Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης αξιολογείται μέσω μοντέλων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) και ελέγχεται πειραματικά. Μελετάται η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μαγνητικής θωράκισης και τα όρια της συμβατικής θωράκισης αλουμινίου. Ένα πρωτότυπο σύστημα ασύρματης φόρτισης πηνίου DD 11 kW χρησιμοποιείται για την πειραματική επιβεβαίωση της προτεινόμενης τεχνικής θωράκισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η θωράκιση αλουμινίου αυξάνει τις εκπομπές των πηνίων DD κατά 25% και η προτεινόμενη μαγνητική θωράκιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καταστολή της εκπομπής κατά 60%.

Το Society of Automotive Engineers (SAE) Recommended Practice (RP) J2954 (Νοέμβριος 2017) δημοσιεύθηκε πρόσφατα για την τυποποίηση της τεχνολογίας ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) για την επαναφόρτιση της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού οχήματος (EV). Το SAE J2954 RP καθορίζει κριτήρια διαλειτουργικότητας, ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), ασφάλειας ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (EMF) κ.λπ. Ο στόχος αυτής της μελέτης [35] ήταν να

προβλέπει τη συμπεριφορά του μαγνητικού πεδίου εντός και εκτός ενός EV κατά την ασύρματη φόρτιση χρησιμοποιώντας τα κριτήρια σχεδιασμού της SAE RP J2954. Αναλύοντας τις χειρότερες διαμορφώσεις των πηνίων WPT και του αμαξώματος EV με ένα εξελιγμένο εργαλείο λογισμικού που βασίζεται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) που λαμβάνει υπόψη την ανάκλαση πεδίου και τη διάθλαση του μεταλλικού κελύφους EV, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν αριθμητικά τα επίπεδα μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τη χειρότερη διαμόρφωση — ένα μικρό αυτοκίνητο πόλης με σύστημα WPT κατηγορίας 2 7,7 kVA με πηνία WPT με μέγιστη αποδεκτή απόσταση από το έδαφος και μετατόπιση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το επίπεδο αναφοράς (Reference Level-RL) των κατευθυντήριων γραμμών της Διεθνούς Επιτροπής για την Προστασία από Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP) όσον αφορά την πυκνότητα μαγνητικής ροής σημειώθηκε υπέρβαση κάτω και δίπλα από το EV. Για να μετριαστεί το μαγνητικό πεδίο, τα ρεύματα που διέρρεαν μέσω των πηνίων WPT μεταβλήθηκαν χρησιμοποιώντας την αντιστάθμιση επαγωγέα-πυκνωτή-πυκνωτή (LCC) αντί της παραδοσιακής αντιστάθμισης σειράς-σειράς (SS). Το αντίστοιχο υπολογιζόμενο πεδίο ήταν συμβατό με το ICNIRP RL του 2010 και παρουσίαζε περιορισμένη υπέρβαση του ICNIRP RL του 1998. Τέλος, διερευνήθηκε η επίδραση του πλάτους του αμαξώματος στη συμπεριφορά του μαγνητικού πεδίου υιοθετώντας τη μέγιστη μετατόπιση, αποδεικνύοντας ότι η εκπομπή μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον αυξήθηκε όσο αυξανόταν η απόσταση από το έδαφος και καθώς μειώθηκε το πλάτος του αμαξώματος.

Τα νανοκρυσταλλικά κράματα χρησιμοποιούνται σταδιακά ως υλικά θωράκισης σε συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) με υψηλή πυκνότητα ισχύος. Στο άρθρο [36], οι ιδιότητες συστήματος του WPT χρησιμοποιώντας φερρίτη και τέσσερις τύπους νανοκρυσταλλικών πυρήνων προσομοιώνονται με ανάλυση 3-D πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Με βάση αυτό, ένα νέο προστατευτικό «μαξιλαράκι» που αποτελείται από νανοκρυσταλλικό κράμα και φερρίτη έχει σχεδιαστεί για να βελτιώσει τις ιδιότητες του συστήματος WPT. Τα συστήματα WPT συγκρίνονται προκαταρκτικά με το 3-D FEA όταν τα διαφορετικά νανοκρυσταλλικά κράματα χρησιμοποιούνται στο νέο προστατευτικό μαξιλαράκι. Το πειραματικό σύστημα WPT για 85 kHz και 1,5 kW με διάκενο αέρα 24 cm μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου έχει κατασκευαστεί για την επικύρωση της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί

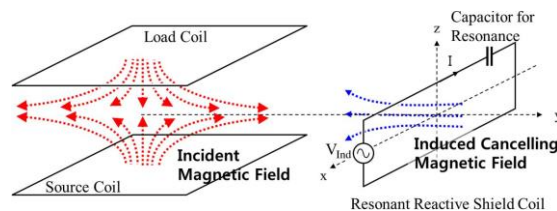
σημαντικά μεγαλύτερη θωράκιση για το νέο «μαξιλαράκι» με μια ελαφρά μείωση της απόδοσης μετάδοσης σε σχέση τον συμβατικό πυρήνα φερρίτη.

Στο άρθρο [37] έχει διεξαχθεί αριθμητική δοσιμετρία (μέτρηση H/M πεδίου) σε σχέση με ένα σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος βάσει συντονισμού (ResonanceBased Wireless Power Transfer-RBWPT) για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων (EVs). Το σύστημα RBWPT που λειτουργεί σε συχνότητα 13,56 MHz με μεταφερόμενη ισχύ 5,3 kW είναι τοποθετημένο κάτω από το κέντρο του αμαξώματος του οχήματος. Ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης (SAR) σε ανατομικά ανθρώπινα μοντέλα Duke και Ella με και χωρίς ιατρικό εμφύτευμα αξιολογείται χρησιμοποιώντας τέσσερα σενάρια έκθεσης (δηλαδή μοντέλα Duke και Ella που κάθονται στο EV χωρίς εμφύτευμα, το μοντέλο Ella: Με νευροδιεγέρτη InterStim εμφύτευμα, εμφύτευση προσθετικού ισχίου ή εμφύτευση καρδιακού βηματοδότη). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αλλαγή στην απορρόφηση ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων (RF) συμβαίνει όταν αγωγίμα εμφυτεύματα τοποθετούνται στο κοντινό πεδίο μιας πηγής ραδιοσυχνοτήτων. Προβλέπεται από την ICNIRP μεγαλύτερη τιμή του SAR κοντά στα εμφυτεύματα. Ο μέγιστος μέσος όρος SAR για 10 g ιστών υπερβαίνει την τυπική οριακή τιμή που ορίζουν οι διεθνείς οδηγίες, εκτός από τον βηματοδότη χωρίς μόλυβδο, ο οποίος συμμορφώνεται με τα προβλεπόμενα όρια. Ωστόσο, η αύξηση της θερμοκρασίας δεν υπερβαίνει ποτέ το όριο τοπικής αύξησης θερμοκρασίας των 2 °C. Η συμμόρφωση με τα συνιστώμενα όρια του SAR της ICNIRP στο χειρότερο σενάριο έκθεσης είναι πιθανό να περιορίσει τη μεταφερόμενη ισχύ.

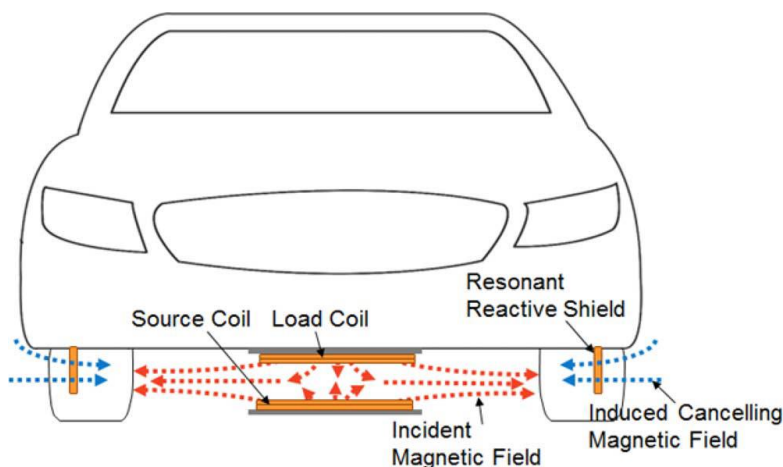
Στο άρθρο [38] για την αξιολόγηση της ασφάλειας της ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης ενός συστήματος ασύρματης φόρτισης μαγνητικού συντονισμού σε ηλεκτρικά οχήματα στο ανθρώπινο κεντρικό νευρικό σύστημα, το λογισμικό COMSOL Multiphysics χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετικά υλικά και πάχη, ένα μοντέλο συστήματος ασύρματης φόρτισης μαγνητικού συντονισμού και ένα μοντέλο ανθρώπινου σώματος. Εξετάζονται τρία μοντέλα ηλεκτρικών αυτοκινήτων, το πρώτο ηλεκτρικό όχημα ήταν κατασκευασμένο από ανθρακονήματα (CFRP), το αμάξωμα του δεύτερου ήταν από κράμα αλουμινίου και του τρίτου από χάλυβα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Η θωράκιση διαφορετικού πάχους προσομοιώνεται και αναλύεται. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι τα οχήματα από ανθρακονήματα CFRP, κράματος αλουμινίου και χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα μπορούν να θωρακίσουν αποτελεσματικά τους ανθρώπους από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η επίδραση

θωράκισης του αμαξώματος αυτοκινήτου CFRP και κράματος αλουμινίου βελτιώνεται με την αύξηση του πάχους και η επίδραση θωράκισης του αμαξώματος αυτοκινήτου από χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα χειροτερεύει με την αύξηση του πάχους. Υπό τις χειρότερες συνθήκες θωράκισης, η μέγιστη ισχύς μαγνητικής επαγωγής και η ένταση ηλεκτρικού πεδίου στο κεφάλι του ανθρώπου είναι αντίστοιχα $0,9 \mu\text{T}$ και $0,18 \text{ V/m}$, το επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης στο ανθρώπινο κεφάλι είναι μικρότερο από το όριο δημόσιας έκθεσης των $27 \mu\text{T}$ και $2,97 \text{ V/m}$ που ορίστηκε από τη Διεθνή Επιτροπή για την Προστασία από τις Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα ασύρματης φόρτισης μαγνητικού συντονισμού ενός ηλεκτρικού οχήματος δεν θα βλάψει το ανθρώπινο κεντρικό νευρικό σύστημα στο όχημα.

Στην εργασία [39], προτείνεται η ιδέα και η μεθοδολογία σχεδιασμού μιας διάταξης συντονισμού αντίδρασης πηνίου για τη μείωση της διαρροής μαγνητικού πεδίου από συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT). Χρησιμοποιώντας συντονισμό LC, η θωράκιση μπορεί να δημιουργήσει ένα ακυρωτικό μαγνητικό πεδίο για να μειώσει το προσπίπτον μαγνητικό πεδίο από τα πηνία WPT μειώνοντας έτσι αποτελεσματικά το συνολικό μαγνητικό πεδίο χωρίς να καταναλώνει πρόσθετη ισχύ όπως φαίνεται και στις Εικόνες 3-4 και 3-5.



Εικόνα 3-4: Ιδέα της συντονισμένης θωράκισης για το σύστημα WPT [39].



Εικόνα 3-5: Γενική δομή του συστήματος ασύρματης φόρτισης για ηλεκτρικό όχημα και μηχανισμός καταστολής του μαγνητικού πεδίου διαρροής στο πλαίσιο του οχήματος με τη χρήση της θωράκισης συντονισμού [39].

Η αποτελεσματικότητα θωράκισης της διάταξης και η επίδρασή της στην απόδοση WPT αναλύονται με προσομοίωση και μετρήσεις. Για πρακτική εφαρμογή σε ασύρματα φορτισμένα ηλεκτρικά οχήματα, προτείνεται και εφαρμόζεται επίσης ένα σύστημα αυτόματου συντονισμού για την θωράκιση συντονισμού. Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης συντονισμού επαληθεύεται από πειράματα σε έναν ηλεκτρικό λεωφορείο ασύρματης φόρτισης.

Τα εξωτερικά πεδία κοντά σε συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) ηλεκτρικών οχημάτων (EV) που απαιτούν υψηλή ισχύ ενδέχεται να υπερβαίνουν τα όρια των διεθνών οδηγιών ασφαλείας. Η εργασία [40] παρουσιάζει δοσιμετρικά αποτελέσματα ενός συστήματος WPT 85 kHz για EVs. Έχει σχεδιαστεί ένα σύστημα WPT για τη φόρτιση του EV και η δοσιμετρία για το σύστημα αξιολογείται για διάφορα σενάρια έκθεσης: ένα ανθρώπινο σώμα μπροστά από το σύστημα WPT χωρίς θωράκιση, με θωράκιση, με ευθυγράμμιση και κακή ευθυγράμμιση μεταξύ πομπού και δέκτη και με μια μεταλλική πλάκα στο δάπεδο του οχήματος. Οι ελάχιστες αποστάσεις πρόσβασης από τον άνθρωπο εξετάστηκαν για τις διαφορετικές τιμές ηλεκτρικής ισχύος φόρτισης. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής διερευνάται επίσης με τα όρια των διεθνών κατευθυντήριων γραμμών ασφαλείας και τα δοσιμετρικά αποτελέσματα.

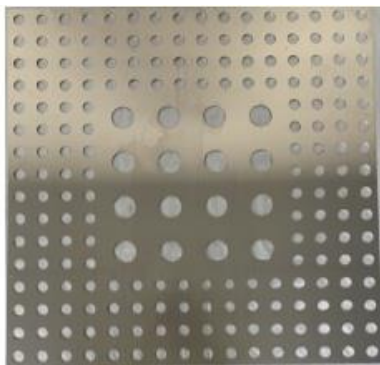
Τα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος (Inductive Power Transfer-IPT) υψηλής ισχύος για τη φόρτιση ελαφρών και βαρέων ηλεκτρικών οχημάτων δημιουργούν ανησυχίες για την ασφάλεια εάν εγκατασταθούν σε μη ελεγχόμενο περιβάλλον. Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Έργου EMPIR-16ENG08 MICEV, διεξήχθη μια ευρεία πειραματική και αριθμητική μελέτη [41] για την αξιολόγηση της έκθεσης του κοινού σε εκτρεπόμενα μαγνητικά πεδία IPT για δύο διαφορετικά σενάρια έκθεσης: (1) για ένα σύστημα μοντέλου IPT που προέρχεται από το πρότυπο SAE J2954 που λειτουργεί στα 85 kHz για ένα ελαφρύ ηλεκτρικό όχημα σε συνδυασμό με το μοντέλο ενός ρεαλιστικού μοντέλου αμαξώματος και (2) για ένα σύστημα μοντέλου IPT με μέγιστη ονομαστική ισχύ 50 kW στα 27,8 kHz για ένα πραγματικό μικρό λεωφορείο που αναπαρήχθη με ορισμένες απλοποιήσεις σε δύο διαφορετικά εργαλεία προσομοίωσης 3D πεπερασμένων στοιχείων (FEM) (λογισμικό Opera 3D και CST) . Πραγματοποιήθηκε μια ad hoc έρευνα μέτρησης στο σταθμό φόρτισης μικρών λεωφορείων για να επικυρωθούν οι προσομοιώσεις του πραγματικού σταθμού λεωφορείων τόσο για ευθυγραμμισμένα όσο και για κακώς ευθυγραμμισμένα πηνία IPT. Με βάση αυτή την προκαταρκτική μελέτη, επιλέχθηκε ένας παράγοντας ασφαλείας για να διασφαλιστεί

μια συντηρητική δοσιμετρική ανάλυση σε σχέση με τις προσεγγίσεις του μοντέλου. Όπως τονίστηκε σε αυτή τη μελέτη, **το αμάξωμα του οχήματος αποτελεί αποτελεσματική θωράκιση έναντι του μαγνητικού πεδίου και προκαλεί μείωση του πεδίου κατά τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους κοντά στα πηνία.** Με την εφαρμογή FEM, υπολογισμένης χωρικής κατανομής στο λογισμικό Sim4Life, αξιολογήθηκε η έκθεση τριών ανθρώπινων ανατομικών μοντέλων του εικονικού πληθυσμού (ένας ενήλικας, ένα παιδί και ένα νεογέννητο). Τα τρία μοντέλα τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές στάσεις και θέσεις και για τα δύο σενάρια έκθεσης. Για τα βασικά όρια περιορισμού, που καθορίζονται από τις ισχύουσες κατευθυντήριες γραμμές, δεν σημειώθηκε ποτέ υπέρβαση εντός των οχημάτων. Ωστόσο, οι βασικοί περιορισμοί ξεπεράστηκαν όταν ένας ενήλικας έσκυψε έξω από το μικρό λεωφορείο, δηλαδή κοντά στα πηνία, ή όταν ένα νεογέννητο τοποθετήθηκε στην ίδια θέση. Στο ελαφρύ αυτοκίνητο παρατηρήθηκαν οριακές τιμές. Στην περίπτωση του λεωφορείου, τα όρια που προέρχονται από τις οδηγίες του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) δεν ξεπερνιούνται ποτέ, ενώ οι βασικοί περιορισμοί που προέρχονται από τις κατευθυντήριες γραμμές της Διεθνούς Επιτροπής για την Προστασία από Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP) υπερβαίνουν έως και 12% για ενήλικα και έως 38% για ένα νεογέννητο. Αυτή η εργασία παρουσιάζει νέα δοσιμετρικά δεδομένα που δημιουργούνται σε ένα σύστημα IPT για βαρέα οχήματα και επιβεβαιώνει ορισμένα από τα δεδομένα της βιβλιογραφίας για ελαφρά οχήματα.

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων μεγάλου όγκου, μεγάλου βάρους και δύσκολης εγκατάστασης του συστήματος θωράκισης ενός πηνίου ασύρματης φόρτισης (Wireless Charging Coil-WCC) που είναι εγκατεστημένο εντός ενός ηλεκτρικού οχήματος (EV), προτείνεται μια νέα μέθοδος θωράκισης στην εργασία [42]. Από την άποψη της μηχανικής πρακτικής, σύμφωνα με την αρχή της παθητικής θωράκισης και σύμφωνα με την κατακόρυφη κατεύθυνση του WCC με θωράκιση σιδηρομαγνητικού υλικού, αυτή η νέα μέθοδος θωράκισης περιλαμβάνει μόνο έναν μεταλλικό δακτύλιο θωράκισης χαμηλής μαγνητικής διαπερατότητας που τοποθετείται γύρω από το πηνίο εκπομπής στην οριζόντια κατεύθυνση. Χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics, σχεδιάζονται το μοντέλο του EV, το μοντέλο WCC μαγνητικού συντονισμού (Magnetic Coupling Resonance-MCR) και το μοντέλο σώματος πεζού στο σημείο παρατήρησης. Υπολογίζεται η επίδραση του μεταλλικού δακτυλίου θωράκισης στην αυτεπαγωγή και την αμοιβαία επαγωγή του WCC. Αξιολογείται η ισχύς μαγνητικής

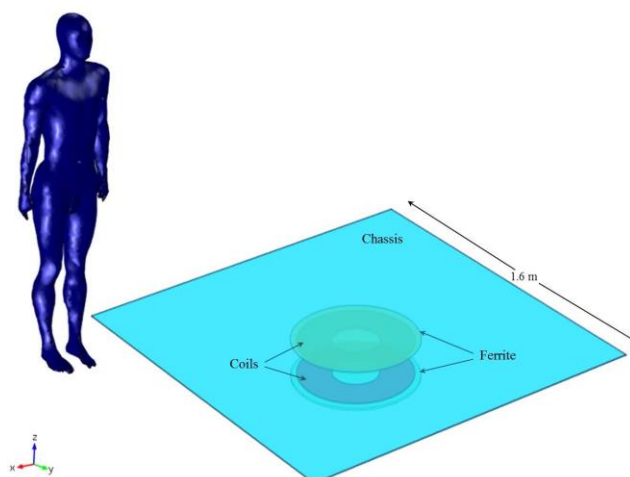
επαγωγής (B) και ηλεκτρικού πεδίου (E) του σώματος πεζού σε σημεία παρατήρησης πριν και μετά την προσθήκη μεταλλικής θωράκισης στην οριζόντια κατεύθυνση και αναλύεται η ασφάλεια ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης ενός σώματος πεζού σε αυτό το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον. Σε σύγκριση με τη μέθοδο θωράκισης της προσθήκης μόνο σιδηρομαγνητικού υλικού στην κατακόρυφη κατεύθυνση και μετά τη χρήση νέας θωράκισης, το μέγιστο B ενός ανθρώπινου κορμού μειώνεται κατά 43%, το μέγιστο E μειώνεται κατά 44%, το μέγιστο B του ανθρώπινου κεφαλιού μειώνεται κατά 44 %, και το μέγιστο E του ανθρώπινου κεφαλιού μειώθηκε κατά 39%. Μετά την προσθήκη του μεταλλικού δακτυλίου θωράκισης, το μέγιστο B και E του ανθρώπινου κορμού μειώθηκε από $8,56 \cdot 10^{-1}$ φορές και $2,28 \cdot 10^{-1}$ φορές του ορίου έκθεσης της Διεθνούς Επιτροπής για την Προστασία από Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP) σε $4,89 \cdot 10^{-1}$ φορές και $1,27 \cdot 10^{-1}$ φορές, αντίστοιχα, και το μέγιστο B και E του ανθρώπινου κεφαλιού μειώθηκε από $1,62 \cdot 10^{-3}$ φορές και $8,58 \cdot 10^{-4}$ φορές του ορίου έκθεσης ICNIRP σε $9,18 \cdot 10^{-4}$ και $5,25 \cdot 10^{-4}$ φορές, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η νέα μέθοδος θωράκισης μπορεί να μειώσει σημαντικά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του κεντρικού νευρικού συστήματος του κορμού και της κεφαλής του πεζού στο σημείο παρατήρησης. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου θωράκισης είναι αποδεδειγμένη και αυτή η εργασία παρέχει μια ασφαλή καθοδήγηση για τον μηχανικό σχεδιασμό των WCC.

Τα παραδοσιακά συστήματα ασύρματης φόρτισης χρησιμοποιούν μια συμπαγή μεταλλική πλάκα αλουμινίου για την προστασία από την ηλεκτρομαγνητική διαρροή. Αν και έχει καλή απόδοση θωράκισης, μειώνει αρκετά την απόδοση μετάδοσης των συστημάτων ασύρματης φόρτισης. Στο άρθρο [43], προτείνεται μια πλάκα αλουμινίου με οπές διαφορετικών διαμέτρων (Εικόνα 3-6) για την απόσβεση των δινορρευμάτων. Επομένως, χωρίς αλλαγή της μέγιστης έντασης μαγνητικής επαγωγής του θωρακισμένου μαγνητικού πεδίου, ελαχιστοποιείται η επίδραση της πλάκας αλουμινίου στις ηλεκτρικές παραμέτρους του συστήματος ασύρματης μεταφοράς ισχύος και βελτιώνεται η απόδοση μετάδοσης του συστήματος. Το λογισμικό Ansys Maxwell έχει χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της απόδοσης μεταφοράς και θωράκισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα επαληθεύουν ότι η βελτιστοποιημένη πλάκα αλουμινίου πλέγματος μπορεί να μειώσει τις παρεμβολές στην απόδοση μετάδοσης του συστήματος ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και να βελτιώσει περαιτέρω αποτελεσματικά το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον του συστήματος ταυτόχρονα.



Εικόνα 3-6: Πλάκα αλουμινίου με οπές διαφορετικών μεγεθών[43]

Η εργασία [44] παρουσιάζει μια αξιολόγηση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στα οποία εκτίθεται το ανθρώπινο σώμα λόγω του ασύρματου συστήματος επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, έτσι ώστε να μπορεί να εξεταστεί η συμμόρφωση αυτού του συστήματος φόρτισης με τα όρια έκθεσης του ανθρώπου σε αυτά τα πεδία. Χρησιμοποιείται ένα υψηλής ανάλυσης μοντέλο του ανθρώπινου σώματος το οποίο δημιουργήθηκε με τη μέθοδο απεικόνισης μαγνητικού συντονισμού όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-7, στο οποίο εκτιμήθηκαν τα επαγόμενα πεδία.



Εικόνα 3-7: Ανατομικό μοντέλο ολόκληρου σώματος και αντιπροσωπευτικό ασύρματο σύστημα επαγωγικής φόρτισης [44].

Η αριθμητική ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η αριθμητική μοντελοποίηση του συστήματος δίπλα σε ένα όρθιο ανθρώπινο μοντέλο δείχνει ότι τα όρια έκθεσης σε ΗΜ πεδία μπορούν να ικανοποιηθούν απόλυτα ακόμη και όταν το πηνίο του πομπού είναι πολύ κοντά στο σώμα. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη η χειρότερη διαμόρφωση για την αξιολόγηση της έκθεσης του συστήματος ασύρματης φόρτισης. Αυτή η εργασία

παρέχει μια χρήσιμη κατευθυντήρια γραμμή για τη βιομηχανία για την ανάπτυξη συστημάτων επαγωγικής φόρτισης σύμφωνα με τα πρότυπα ασφαλείας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Στο άρθρο [45], προτείνεται μια πειραματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό του ηλεκτρικού πεδίου εντός του ανθρωπίνου σώματος για την αξιολόγηση της έκθεσης του στα Η/Μ πεδία που οφείλονται στα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) χρησιμοποιώντας μετρημένα μαγνητικά δεδομένα κοντινού πεδίου. Κατασκευάζονται και χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις δύο συστήματα WPT: το ένα χωρίς πλακίδια φερρίτη και το άλλο με πλακίδια φερρίτη και μεταλλική πλάκα. Το πλάτος και η φάση του μαγνητικού κοντινού πεδίου στην περιοχή των συστημάτων WPT μετρούνται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας μαγνητόμετρα και ένα σύστημα μέτρησης κοντινού πεδίου. Η αριθμητική δοσिमетρία της ανθρώπινης έκθεσης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το μετρούμενο κοντινό πεδίο ως προσπίπτον πεδίο με τη μέθοδο της σύνθετης αντίστασης για να εξαχθεί η ένταση του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου μέσα σε αριθμητικά ανθρώπινα μοντέλα. Η επικύρωση της προτεινόμενης προσέγγισης αποδεικνύεται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων με αυτά που λαμβάνονται από αριθμητικές προσομοιώσεις. Επιπλέον, ο παράγοντας σύζευξης, ο οποίος αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ του προσπίπτοντος μαγνητικού πεδίου και του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο ανθρώπινο σώμα, σε διαφορετικές αποστάσεις προκύπτει για ρεαλιστικά σενάρια έκθεσης.

Για την αξιολόγηση της ασφάλειας ηλεκτρομαγνητικής έκθεσης πολλαπλών οχημάτων ασύρματης φόρτισης που φορτίζονται ταυτόχρονα και για τη διερεύνηση απλών, αποτελεσματικών μεθόδων ηλεκτρομαγνητικής προστασίας, σε αυτήν την εργασία [46], δημιουργήθηκαν μοντέλα αυτοκινήτου, μοντέλου ασύρματου φορτιστή και μοντέλα ανθρώπινου σώματος χρησιμοποιώντας το λογισμικό COMSOL Multiphysics. Αναλύονται η επίδραση των διαφορετικών σχετικών θέσεων δύο ασύρματων φορτιστών στη τιμή της μαγνητικής επαγωγής (B) στο χώρο προσομοίωσης όταν δύο αυτοκίνητα φορτίζονται ταυτόχρονα και η επίδραση διαφορετικών υλικών αμαξώματος του αυτοκινήτου στην τιμή της B που καταγράφεται στην επιφάνεια του σώματος του οδηγού και η ένταση του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου (E) εντός του σώματος του οδηγού. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η μέγιστη τιμή του B στο αυτοκίνητο όταν δύο ασύρματοι φορτιστές λειτουργούν ταυτόχρονα ήταν 1,30 φορές μεγαλύτερη από αυτή όταν λειτουργεί ένας μόνο ασύρματος φορτιστής. Η μέγιστη τιμή του B στο χώρο προσομοίωσης θα

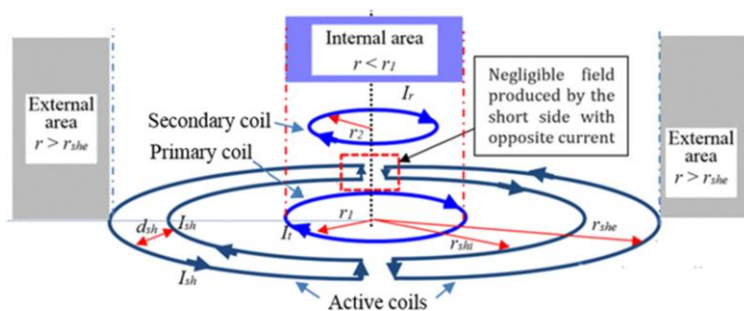
μπορούσε να μειωθεί κατά 24,23% μεταβάλλοντας την θέση των δύο ασύρματων φορτιστών. Η χρήση αμαξώματος αυτοκινήτου από κράμα αλουμινίου θα μπορούσε να μειώσει τη μέγιστη τιμή της B στην επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος του οδηγού μέσα στο αυτοκίνητο κατά 99,76%. Το B της επιφάνειας του σώματος του οδηγού στο αμάξωμα του αυτοκινήτου από κράμα αλουμινίου σε συνδυασμό με την τοποθέτηση τύπου σκακιάρας των δύο φορτιστών βρέθηκε κατά 42,86 % μικρότερο σε σχέση με μια τυχαία τοποθέτηση των δύο φορτιστών και το επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής έκθεσής του σώματος του οδηγού ήταν 1,33% του ορίου έκθεσης του κοινού της Διεθνούς Επιτροπής για την προστασία από τις μη ιονίζουσες ακτινοβολίες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέθοδος προστασίας είναι αποτελεσματική.

Στο άρθρο [47], προτείνεται ένας βελτιστοποιημένος σχεδιασμός θωράκισης για μείωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (EMF) από το σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT). Τρεις διαφορετικές περιπτώσεις σχεδιασμού θωράκισης εξετάζονται ως προς την ένταση του EMF και την αμοιβαία επαγωγή, η οποία σχετίζεται άμεσα με την απόδοση μεταφοράς ισχύος. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι όταν χρησιμοποιούνται τόσο φύλλα από φερρίτη όσο και αγώγιμα φύλλα ως θωράκιση των πηνίων πομπού και δέκτη, το μαγνητικό πεδίο διαρροής μπορεί να μειωθεί σημαντικά με αμελητέα αλλαγή στην αμοιβαία επαγωγή. Εξετάζονται επίσης το μέγεθος και το πάχος του αγώγιμου φύλλου στο πλάτος του πεδίου και στην αμοιβαία επαγωγή. Η έρευνα αυτή θα είναι χρήσιμη στους μηχανικούς που σχεδιάζουν σύγχρονα συστήματα WPT.

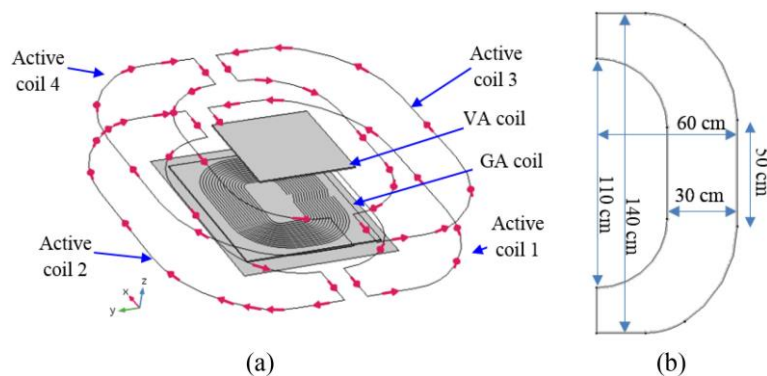
Στην εργασία [48], η επίδραση μη σιδηρομαγνητικού μετάλλου της θωράκισης στην απόδοση μεταφοράς ισχύος του συστήματος WPT μελετάται με μοντελοποίηση, προσομοίωση και πειραματική ανάλυση. Παράλληλα αναλύθηκε και η επίδραση σιδηρομαγνητικού υλικού θωράκισης στην απόδοση μεταφοράς ισχύος των συστημάτων WPT. Σχεδιάζεται μια δομή μεταλλικής θωράκισης διπλής στρώσης. Τα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι με την εφαρμογή της νέας μεθόδου θωράκισης μετάλλου διπλής στρώσης, η απόδοση μεταφοράς ισχύος του συστήματος αυξάνεται σημαντικά ενώ το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο των συστημάτων WPT μειώνεται δραματικά.

Ένας νέος σχεδιασμός θωράκισης ενεργού πηνίου προτείνεται στην εργασία [49] για τη μείωση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τα ρεύματα που ρέουν στα πηνία ενός συστήματος ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) για τη φόρτιση των μπαταριών ενός ηλεκτρικού οχήματος (EV). Η κύρια ιδέα είναι να διαιρεθεί ο παραδοσιακός ενεργός βρόχος

που χρησιμοποιείται για τη θωράκιση μιας πηγής σε δύο ξεχωριστά πηνία θωράκισης, ώστε να μην επηρεαστεί αρνητικά η απόδοση του WPT. Αυτή η ιδέα εφαρμόζεται για τη θωράκιση των πηνίων WPT και επομένως, στην προτεινόμενη σχεδίαση, υπάρχουν ενεργά πηνία τοποθετημένα στο έδαφος παράλληλα με το κύριο πηνίο του WPT και μερικά άλλα πάνω στο όχημα κάτω από το όχημα, σε επίπεδη θέση με το δευτερεύον πηνίο όπως φαίνεται και στις Εικόνες 3-8 και 3-9. Τα ρεύματα στα ενεργά πηνία βελτιστοποιούνται προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το μαγνητικό πεδίο στην πιο κρίσιμη ζώνη που είναι προσβάσιμη από τον άνθρωπο, δηλαδή στην περιοχή εκτός από το όχημα και μέσα στην καμπίνα του οχήματος.



Εικόνα 3-8: Απλοποιημένη διαμόρφωση του προτεινόμενου συστήματος ενεργής θωράκισης [49].



Εικόνα 3-9: (a) Διαμόρφωση και (b) διαστάσεις των ενεργών πηνίων θωράκισης [49].

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία

Η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων αν και έχει τις ρίζες της στα τέλη του 19^{ου} αιώνα με πρωτοπόρο τον Nicola Tesla έχει υποστεί σημαντική ανάπτυξη από την δεκαετία του '90 και μετά. Τα τελευταία χρόνια με την ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος έχει καταστεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία γιατί επιτυγχάνεται παράλληλα με την σύζευξη υψηλής ισχύος, λειτουργία σε υψηλές συχνότητες κάτι που έχει πλεονεκτήματα όπως μειωμένη διαρροή μαγνητικού πεδίου (άρα καλύτερη απόδοση) και μικρότερο και ελαφρύτερο δευτερεύον υποσύστημα στο όχημα. Όμως αυτή η σύζευξη υψηλής ισχύος δεν φθάνει μέχρι στιγμής τα επίπεδα ισχύος της ενσύρματης φόρτισης η οποία είναι και ο κύριος ανταγωνιστής της ασύρματης φόρτισης. Εταιρείες όπως η Tesla Motors έχουν κατασκευάσει ενσύρματους φορτιστές DC ρεύματος των οποίων τα επίπεδα ισχύος φθάνουν τα 250kW (Superchargers).

Τα πλεονεκτήματα της ασύρματης φόρτισης έναντι της ενσύρματης είναι η απλοποιημένη διαδικασία φόρτισης πιο εύχρηστη και πιο φιλική προς τον χρήστη, εξάλειψη κάθε είδους κινδύνου σχετικά με την χρήση καλωδίων, όπως χρήση φθαρμένων καλωδίων σε βροχερό και χιονισμένο περιβάλλον, απομονώνοντας ηλεκτρικά το όχημα από την παροχή τροφοδοσίας, η υπόγεια τοποθέτηση του πρωτεύοντος στο έδαφος η οποία αποτρέπει την έκθεσή του σε μη ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, αυξάνοντας τον χρόνο ζωής της υποδομής φόρτισης συμβάλλοντας παράλληλα στην αποφυγή βανδαλισμών των υποδομών φόρτισης όπως κλοπή του καλωδίου φόρτισης κλπ. Επίσης η ασύρματη φόρτιση είναι κατάλληλη και για άτομα με κινητικές δυσκολίες αφού ο οδηγός του ηλεκτρικού αυτοκινήτου δεν χρειάζεται να κατεβεί από το όχημα για να το φορτίσει. Τα μειονεκτήματα είναι όπως προαναφέρθηκε η όχι και τόσο υψηλή ισχύς φόρτισης με αποτέλεσμα, για την στατική επαγωγική φόρτιση, ο μεγαλύτερος χρόνος φόρτισης ο οποίος για την ενσύρματη φόρτιση DC ρεύματος να κυμαίνεται στα 30 λεπτά περίπου κάτι που ίσως είναι και ο πιο κρίσιμος παράγοντας για τους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων. Ακόμα ένα μειονέκτημα για την ασύρματη φόρτιση είναι το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Για την στατική φόρτιση τα πράγματα δεν είναι και τόσο άσχημα, ένα σύστημα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας 3,3

kW κοστίζει \$2000. Αυτή είναι μια σημαντική αύξηση του κόστους από τους τυπικούς φορτιστές PEV, αλλά η τεχνολογία μόλις αρχίζει να γίνεται εμπορική και καθώς η ζήτηση αυξάνεται, αναμένεται να γίνει πιο ανταγωνιστική. Όμως για την δυναμική φόρτιση το κόστος είναι πολύ υψηλό, κοστίζει περίπου στο 1 000 000 \$/χλμ. Λαμβάνοντας υπόψη το μήκος του κατάλληλου οδοστρώματος στις ανεπτυγμένες χώρες (υπάρχουν 2,6 εκατομμύρια μίλια ασφαλτοστρωμένων δρόμων στις ΗΠΑ), το κόστος μόνο για τη συνολική ηλεκτροδότηση είναι απαγορευτικό. Ωστόσο, με τη χρήση OLEV, δεν θα χρειαζόταν να αναβαθμιστεί κάθε δρόμος, καθώς το ηλεκτρικό όχημα θα εξακολουθούσε να έχει ένα μέσο πρόωσης με κινητήρα εκτός των οδικών αξόνων. Εάν το 1% των αστικών δρόμων ήταν ηλεκτρικά, τα περισσότερα οχήματα θα μπορούσαν να επιτύχουν τον στόχο των 300 μιλίων ανά φόρτιση που ταιριάζει με τα τυπικά οχήματα ICE (Internal Combustion Engine). Λόγω του κόστους και των πρώτων υλών που απαιτούνται, η δυναμική φόρτιση δεν θα μπορέσει ποτέ να κυκλοφορήσει παγκοσμίως. Εάν εφαρμοστεί σωστά αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να πετύχει την απεριόριστη εμβέλεια για τα EV εντός των περιοχών της πόλης και πιθανώς στις συνδέσεις μεταξύ των πόλεων. Είναι όμως προφανές ότι για να εφαρμοστεί σωστά πρέπει οι κυβερνήσεις να συνδράμουν οικονομικά, νομοθετικά και οργανωτικά τόσο για την εγκατάσταση όσο και για την λειτουργία της δυναμικής φόρτισης.

Ακόμα ένας ανταγωνιστής της ασύρματης φόρτισης είναι και η ολοένα βελτιωμένη τεχνολογία των μπαταριών. Για παράδειγμα, πρόσφατα η Toyota ανακοίνωσε ότι θα εξοπλίσει τα ηλεκτρικά και υβριδικά της οχήματα με μπαταρίες λιθίου στερεάς κατάστασης οι οποίες δίνουν στο όχημα αυτονομία 700km και φορτίζονται σε 10 λεπτά [50]. Αυτό καθιστά την δυναμική φόρτιση όχι και τόσο αναγκαία λόγω της μεγάλης αυτονομίας που θα έχουν τα ηλεκτρικά οχήματα. Επίσης τεχνολογίες μπαταριών όπως αυτή βάζουν σε δεύτερες σκέψεις τους ενδιαφερόμενους «παίκτες» της ηλεκτροκίνησης αφού είναι πολύ πιθανό η χρήση αυτών των μπαταριών να στοιχίζει λιγότερο από την εγκατάσταση και λειτουργία της ασύρματης φόρτισης (κυρίως της δυναμικής).

Στο Κεφάλαιο 3 η διπλωματική πραγματεύεται με την προστασία των επιβατών από το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Η έκθεση στο μαγνητικό πεδίο (MF) εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF) στα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) έχει προκαλέσει την ανησυχία του κοινού για την ανθρώπινη υγεία. Από τα άρθρα που μελετήθηκαν προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα. Καταρχάς έχει αποδειχθεί ότι το αμάξωμα του οχήματος αποτελεί αποτελεσματική θωράκιση έναντι του μαγνητικού πεδίου και προκαλεί μείωση του πεδίου

κατά τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους κοντά στα πηνία. Επίσης διαπιστώθηκε ότι τα πλάτη των μαγνητικών πεδίων και τα φασματικά στοιχεία τους μπορούσαν να τροποποιηθούν αντικαθιστώντας εξαρτήματα, ενώ οι τακτικοί έλεγχοι ή η συντήρηση δεν επηρέασαν τις τιμές του B μέσα στο όχημα. Αυτή η παρατήρηση υπογραμμίζει την ανάγκη τακτικής παρακολούθησης των μαγνητικών πεδίων ELF μέσα στα ηλεκτρικά οχήματα, ειδικά μετά από μεγάλες επισκευές ή ατυχήματα, για την προστασία των χρηστών ηλεκτρικών αυτοκινήτων από πιθανή υπερβολική έκθεση σε μαγνητικά πεδία ELF. Ακόμα για τους ασθενείς με καρδιακές εμφυτεύσιμες ηλεκτρονικές συσκευές (Cardiac Implantable Electronic Devices-CIED) όπως οι βηματοδότες αποδείχθηκε ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία όμως δεν επηρέασαν τη λειτουργία ή τον προγραμματισμό του CIED. Η οδήγηση και η φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων φαίνεται να είναι ασφαλής για ασθενείς με CIED. Παρόλα αυτά θα πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω οι διάφορες γεωμετρίες και τα υλικά θωράκισης τόσο στο πρωτεύον και δευτερεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή ασύρματης φόρτισης, όσο και στο τμήμα του ηλεκτρικού οχήματος, πάνω από το δευτερεύον του μετασχηματιστή ασύρματης φόρτισης. Γι' αυτό θα ήταν καλό να γίνει πιλοτική εφαρμογή αυτών των μελετών σε ηλεκτρικό όχημα κατά προτίμηση σε συμβατικό που έχει μετατραπεί σε ηλεκτρικό έτσι ώστε μελετηθούν πλείστες εφαρμογές σε συνθήκες πεδίου.

Βιβλιογραφία

- [1] Δ. Διατριβή and Ι. Καρακίτσιος, “ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ Συμβολή στην ανάπτυξη συστημάτων ασύρματης επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.”
- [2] “Chapter 11 Inductance and Magnetic Energy,” Boston, USA. Accessed: Mar. 14, 2023. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide11.pdf>
- [3] I. Okasili, A. Elkhateb, and T. Littler, “A Review of Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle Battery Charging with a Focus on Inductive Coupling,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 9. MDPI, May 01, 2022. doi: 10.3390/electronics11091355.
- [4] Z. Bi, T. Kan, C. C. Mi, Y. Zhang, Z. Zhao, and G. A. Keoleian, “A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility,” *Applied Energy*, vol. 179. Elsevier Ltd, pp. 413–425, Oct. 01, 2016. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.003.
- [5] W. Li, H. Zhao, J. Deng, S. Li, and C. C. Mi, “Comparison Study on SS and double-sided LCC compensation topologies for EV/PHEV Wireless Chargers,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 65, no. 6, pp. 4429–4439, Jun. 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2479938.
- [6] H. L. Li, A. P. Hu, and G. A. Covic, “A direct AC-AC converter for inductive power-transfer systems,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 27, no. 2, pp. 661–668, 2012, doi: 10.1109/TPEL.2011.2159397.
- [7] O. C. Onar *et al.*, “20-kW Bi-directional Wireless Power Transfer System with Energy Storage System Connectivity; 20-kW Bi-directional Wireless Power Transfer System with Energy Storage System Connectivity,” 2020. [Online]. Available: <http://energy.gov/downloads/doe-public-access-plan>
- [8] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, and D. Bronson, “A high efficiency 5 kW inductive charger for EVs using dual side control,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 8, no. 3, pp. 585–595, 2012, doi: 10.1109/TII.2012.2192283.

- [9] R. Bosshard, J. Muhlethaler, J. W. Kolar, and I. Stevanovic, "Optimized magnetic design for inductive power transfer coils," in *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2013, pp. 1812–1819. doi: 10.1109/APEC.2013.6520541.
- [10] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, 2011, doi: 10.1109/TPEL.2011.2143730.
- [11] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and C. Y. Huang, "Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 318–328, 2013, doi: 10.1109/TIE.2011.2179274.
- [12] A. Zaheer, D. Kacprzak, and G. A. Covic, "A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012*, 2012, pp. 283–290. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342811.
- [13] C. C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi, and C. T. Rim, "Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6533–6545, Oct. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2574993.
- [14] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, and P. T. Balsara, "Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 3–37, Dec. 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2780627.
- [15] K. Aditya and S. S. Williamson, "Design considerations for loosely coupled inductive power transfer (IPT) system for electric vehicle battery charging - A comprehensive review," in *2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo: Components, Systems, and Power Electronics - From Technology to Business and Public Policy, ITEC 2014*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2014. doi: 10.1109/itec.2014.6861764.
- [16] L. Chen, G. R. Nagendra, J. T. Boys, and G. A. Covic, "Double-coupled systems for IPT roadway applications," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 3, no. 1, pp. 37–49, Mar. 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2325943.
- [17] J. M. Miller, O. C. Onar, and M. Chinthavali, "Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 3, no. 1, pp. 147–162, Mar. 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2382569.

- [18] C. Sen Wang, O. H. Stielau, and G. A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 5, pp. 1308–1314, Oct. 2005. doi: 10.1109/TIE.2005.855672.
- [19] S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, and C. T. Rim, "Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 3, no. 1, pp. 18–36, Mar. 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2343674.
- [20] S. Choi, J. Huh, W. Y. Lee, S. W. Lee, and C. T. Rim, "New cross-segmented power supply rails for roadway-powered electric vehicles," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 28, no. 12, pp. 5832–5841, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2013.2247634.
- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers and IEEE Microwave Theory and Techniques Society., *Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2015 IEEE : date 13-15 May 2015*.
- [22] Τ. Επικοινωνιών, Η. Καί, Σ. Πληροφορική, and Τ. Β. Δαματούλου, "ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ."
- [23] "<https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/radiation-electromagnetic-fields>."
- [24] L. Yang *et al.*, "Long-term monitoring of extremely low frequency magnetic fields in electric vehicles," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 16, no. 19, Oct. 2019, doi: 10.3390/ijerph16193765.
- [25] A. Vassilev, A. Ferber, C. Wehrmann, O. Pinaud, M. Schilling, and A. R. Ruddle, "Magnetic field exposure assessment in electric vehicles," *IEEE Trans Electromagn Compat*, vol. 57, no. 1, pp. 35–43, Feb. 2015, doi: 10.1109/TEMC.2014.2359687.
- [26] Ptitsyna N. G., Ponzetto A., Kopytenko Yu. A., Ismagilov V. S., and Korobeinikov A. G., "Electric Vehicle Magnetic Fields and Their Biological Relevance," 2014.
- [27] A. Hirata *et al.*, "Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields: Review and Future Directions," *IEEE Trans Electromagn Compat*, vol. 63, no. 5, pp. 1619–1630, Oct. 2021, doi: 10.1109/TEMC.2021.3109249.

- [28] *Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), 2014 International Symposium on*. [publisher not identified], 2014.
- [29] M. S. Murthy and G. A. Rasek, "Analytical Determination of Current Distributions in Shielded HV Cables and Ground Systems of Electric Automotive Power Trains," *IEEE Trans Electromagn Compat*, vol. 61, no. 3, pp. 911–918, Jun. 2019, doi: 10.1109/TEMC.2018.2837121.
- [30] C. Lennerz *et al.*, "Patients with pacemakers or defibrillators do not need to worry about e-Cars: An observational study," *Technology and Health Care*, vol. 28, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.3233/THC-191891.
- [31] L. Tan, K. E. I. Elnail, M. Ju, and X. Huang, "Comparative analysis and design of the shielding techniques in WPT systems for charging EVs," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 11, 2019, doi: 10.3390/en12112115.
- [32] M. Kim, H. Kim, D. Kim, Y. Jeong, H. H. Park, and S. Ahn, "A Three-Phase Wireless-Power-Transfer System for Online Electric Vehicles with Reduction of Leakage Magnetic Fields," *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 63, no. 11, pp. 3806–3813, Nov. 2015, doi: 10.1109/TMTT.2015.2479627.
- [33] E. Asa, M. Mohammad, O. C. Onar, J. Pries, V. Galigekere, and G.-J. Su, "Review of Safety and Exposure Limits of Electromagnetic Fields (EMF) in Wireless Electric Vehicle Charging (WEVC) Applications." [Online]. Available: <http://energy.gov/downloads/doe-public-access-plan>
- [34] M. Mohammad *et al.*, "Design of an EMF Suppressing Magnetic Shield for a 100-kW DD-Coil Wireless Charging System for Electric Vehicles; Design of an EMF Suppressing Magnetic Shield for a 100-kW DD-Coil Wireless Charging System for Electric Vehicles," 2019. [Online]. Available: <http://energy.gov/downloads/doe-public-access-plan>
- [35] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, and M. Feliziani, "Magnetic field during wireless charging in an electric vehicle according to standard SAE J2954," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 9, May 2019, doi: 10.3390/en12091795.
- [36] W. Zhang, Q. Yang, Y. Li, Z. Lin, M. Yang, and M. Mi, "Comprehensive Analysis of Nanocrystalline Ribbon Cores in High-Power-Density Wireless Power Transfer Pads for Electric Vehicles," *IEEE Trans Magn*, vol. 58, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.1109/TMAG.2021.3092173.

- [37] I. A. Shah and H. Yoo, "Assessing Human Exposure with Medical Implants to Electromagnetic Fields from a Wireless Power Transmission System in an Electric Vehicle," *IEEE Trans Electromagn Compat*, vol. 62, no. 2, pp. 338–345, Apr. 2020, doi: 10.1109/TEMC.2019.2903844.
- [38] W. T. Mou and M. Lu, "Dosimetry Simulation Research on Electromagnetic Exposure of Wireless Charging Electric Vehicle to Human Central Nervous System," in *Proceedings of the 16th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Aug. 2021, pp. 609–614. doi: 10.1109/ICIEA51954.2021.9516297.
- [39] S. Kim, H. H. Park, J. Kim, J. Kim, and S. Ahn, "Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle," *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 62, no. 4, pp. 1057–1066, 2014, doi: 10.1109/TMTT.2014.2305404.
- [40] S. Park, "Evaluation of electromagnetic exposure during 85 kHz wireless power transfer for electric vehicles," *IEEE Trans Magn*, vol. 54, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1109/TMAG.2017.2748498.
- [41] I. Liorni *et al.*, "Assessment of exposure to electric vehicle inductive power transfer systems: Experimental measurements and numerical dosimetry," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 11, Jun. 2020, doi: 10.3390/su12114573.
- [42] W. Mou and M. Lu, "Research on Shielding and Electromagnetic Exposure Safety of an Electric Vehicle Wireless Charging Coil," 2021.
- [43] K. Wang, Z. Zuo, L. Sang, and X. Zhu, "Comprehensive Analysis for Electromagnetic Shielding Method Based on Mesh Aluminium Plate for Electric Vehicle Wireless Charging Systems," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 4, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15041546.
- [44] P. P. Ding, L. Bernard, L. Pichon, and A. Razek, "Evaluation of electromagnetic fields in human body exposed to wireless inductive charging system," *IEEE Trans Magn*, vol. 50, no. 2, pp. 1037–1040, 2014, doi: 10.1109/TMAG.2013.2284245.
- [45] J. Chakarothai, K. Wake, T. Arima, S. Watanabe, and T. Uno, "Exposure Evaluation of an Actual Wireless Power Transfer System for an Electric Vehicle with Near-Field Measurement," *IEEE*

Trans Microw Theory Tech, vol. 66, no. 3, pp. 1543–1552, Mar. 2018, doi: 10.1109/TMTT.2017.2748949.

- [46] W. Mou and M. Lu, “Research on Electric Vehicle Electromagnetic Protection Considering Radiation of Two Wireless Chargers,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 13, no. 6, Jun. 2022, doi: 10.3390/wevj13060095.
- [47] S. Ahn, C. Hwang, and H. H. Park, “Optimized shield design for reduction of EMF from wireless power transfer systems,” *IEICE Electronics Express*, vol. 11, no. 2, 2014, doi: 10.1587/elex.10.20130930.
- [48] J. Li, X. Huang, C. Chen, L. Tan, W. Wang, and J. Guo, “Effect of metal shielding on a wireless power transfer system,” *AIP Adv*, vol. 7, no. 5, May 2017, doi: 10.1063/1.4978463.
- [49] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, and M. Feliziani, “Magnetic Field Mitigation by Multicoil Active Shielding in Electric Vehicles Equipped with Wireless Power Charging System,” *IEEE Trans Electromagn Compat*, vol. 62, no. 4, pp. 1398–1405, Aug. 2020, doi: 10.1109/TEMC.2020.2988463.
- [50] “[https://www.toyota.ie/company/news/2021/solid-state-batteries.](https://www.toyota.ie/company/news/2021/solid-state-batteries)”
- [51] “[https://www.tesla.com/charging.](https://www.tesla.com/charging)”
- [52] S. Li and C. C. Mi, “Wireless power transfer for electric vehicle applications,” *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 3, no. 1, pp. 4–17, Mar. 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2319453.

