



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ισχύος για
προηγμένες οχηματικές επικοινωνίες.

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Θεόφιλος Χρυσικός
Διδάσκων – Επιστημονικός Συνεργάτης

Λαμία 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ισχύος για
προηγμένες οχηματικές επικοινωνίες

ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Θεόφιλος Χρυσικός
Διδάσκων – Επιστημονικός Συνεργάτης

Λαμία 2022



UNIVERSITY OF
THESSALY

SCHOOL OF SCIENCE

DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & TELECOMMUNICATIONS

Wireless power transfer technologies on smart
smart vehicular communication

ANTONOPOULOS VASILEIOS

FINAL THESIS

ADVISOR

Theofilos Chrysikos
Tutor

Lamia 2022

«Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ.), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: ...7.../...7.../2022.....

Ο Δηλών

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία αναφέρεται στους τρόπους ασύρματης μεταφοράς ισχύος με έμφαση στις τεχνικές που αφορούν προηγμένες οχηματικές επικοινωνίες. Η ασύρματη φόρτιση όπως και γενικότερα η ασύρματη μεταφορά ενέργειας είναι τεχνολογίες που αποτελούν πολύ μεγάλο και σημαντικό κεφάλαιο, το οποίο, θα επιφέρει θετικά αποτελέσματα στην ανθρωπότητα. Ήδη υπάρχει εξέλιξη στον τομέα αυτό, ωστόσο η ιδέα αυτή είναι καινοτόμα και τα περιθώρια βελτίωσης ποικίλα. Στην εργασία παρουσιάζονται το ιστορικό πλαίσιο πίσω από την ασύρματη μεταφορά ισχύος, η βασική λειτουργία, τα προβλήματα καθώς και ένα καινοτόμο σενάριο εργασίας βασισμένο σε μεθόδους σχεδιασμού ενός συστήματος ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.

ABSTRACT

This thesis investigates the various methods of wireless power transfer with emphasis on the techniques referring to advanced vehicular communications. Wireless charging as well as wireless power transfer in general are technologies that hold great significance, and they are bound to have a positive impact on mankind. There is already innovative work in this area, however the overall concept is still novel and there is still great room for improvement. In this thesis we present the historical context concerning wireless power transfer, the fundamentals of the functionality, the main challenges and problems, as well as a novel case study based on specific methods of wireless power transfer design.

Table of Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	I
ABSTRACT	III
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....</u>	<u>2</u>
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.2) ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	5
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.3) ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ EV	9
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ.....</u>	<u>15</u>
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.2) ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ WPT.....	19
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.3) ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ WPT ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	21
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.4) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ.....	27
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (NFC) ΓΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (WPT)</u>	<u>28</u>
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ	28
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.2) ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΚΟΝΤΙΝΟΥ ΠΕΔΙΟΥ NFC ΚΑΙ RFID	30
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.3) ΒΑΣΙΚΗ ΑΡΧΗ ΤΟΥ NFC	31
(ΕΝΟΤΗΤΑ 3.3.Α) ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΠΗΝΙΟΥ	32
(ΕΝΟΤΗΤΑ 3.3.Β) ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ (WPT).....	34
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.4) ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΡΕΥΜΑΤΩΝ EDDY : Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΦΕΡΡΙΤΗ ΣΤΟ NFC.....	38
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.5) ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ NFC	41
(ΕΝΟΤΗΤΑ 3.5.Α) ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	43
(ΕΝΟΤΗΤΑ 3.5.Β) ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	43
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.6) ΕΤΙΚΕΤΕΣ NFC (NFC TAGS).....	44
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.7) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ	46
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</u>	<u>48</u>
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ	48
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.2) ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	48
(ΥΠΟΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.3) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	50
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</u>	<u>54</u>
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</u>	<u>55</u>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Θεωρητικό Πλαίσιο

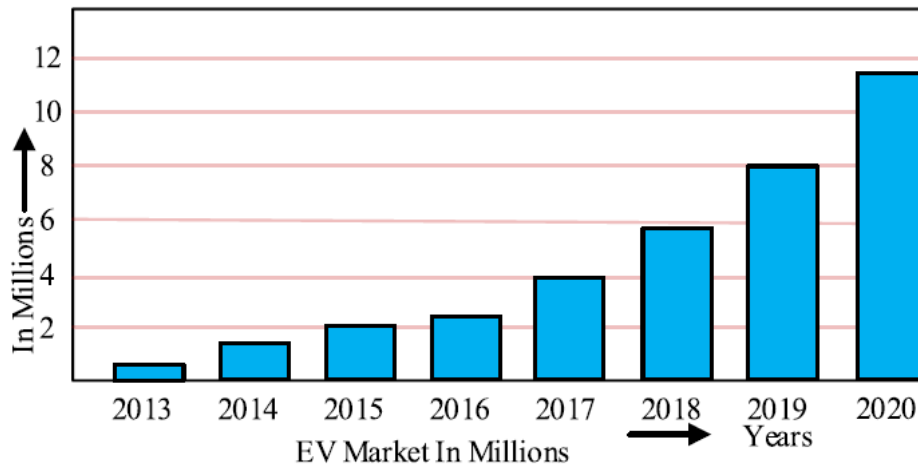
Η μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη οχημάτων με βάση τον κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE) στο σύστημα μεταφορών οδηγεί στην απελευθέρωση επιβλαβών αναθυμιάσεων στην ατμόσφαιρα η οποία οδηγεί σε υπερθέρμανση του πλανήτη και κλιματική αλλαγή, που είναι το κύριο μέλημα της παγκόσμιας κοινότητας. Ως εκ τούτου, για να μειωθεί η εξάρτηση από πηγές ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα και να μειωθούν οι επιβλαβείς επιπτώσεις τους στην ατμόσφαιρα, υπάρχει ανάγκη για εναλλακτικές λύσεις, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα.

Ας θεωρήσουμε ένα μελλοντικό σενάριο στο οποίο ένα ηλεκτρικό όχημα (EV) χωρίς οδηγό χρειάζεται ένα αυτόματο σύστημα φόρτισης χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Από αυτή την άποψη, υπάρχει η απαίτηση για πλήρως αυτοματοποιημένη, γρήγορη, ασφαλή, οικονομικά αποδοτική και αξιόπιστη υποδομή φόρτισης που παρέχει ένα κερδοφόρο επιχειρηματικό μοντέλο με γρήγορη υιοθέτηση από τα ηλεκτρικά συστήματα μεταφορών. Αυτές οι ιδιότητες μπορούν να επιτευχθούν μέσω ασύρματων συστημάτων φόρτισης. Η ασύρματη μεταφορά ισχύος (WPT) είναι μια φουτουριστική τεχνολογία με το πλεονέκτημα της ευελιξίας, ευκολίας, ασφάλειας και την δυνατότητα πλήρους αυτοματοποίησης.

(Υποκεφάλαιο 1.1) Εισαγωγή

Υπάρχει μια αυξανόμενη ζήτηση για ασφαλή ηλεκτρικά οχήματα που δεν βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με τις παγκόσμιες προοπτικές για το 2021, παρά την πανδημία, τα ηλεκτρικά οχήματα που έχουν ταξινομηθεί παγκοσμίως είναι 3 εκατομμύρια, 41% περισσότερα από ό,τι για το προηγούμενο έτος, το μερίδιο άνω του 60% ανήκει στα BEV (Battery Electric Vehicles), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1 [1.1]. Αυτή η εικόνα παρουσιάζει σαφή απόκλιση από τους ρυθμούς προόδου της περιόδου 2013-2020. Στα τέλη του 2020 τα ηλεκτρικά οχήματα στο δρόμο έφτασαν τα 10 εκατομμύρια.

Σήμερα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε ηλεκτρικά οχήματα. Η χωρητικότητα της μπαταρίας περιορίζει την αυτονομία. Η προσθήκη περισσότερων μπαταριών θα αυξήσει την αυτονομία, αλλά αυξάνει περαιτέρω το βάρος και το κόστος του οχήματος.



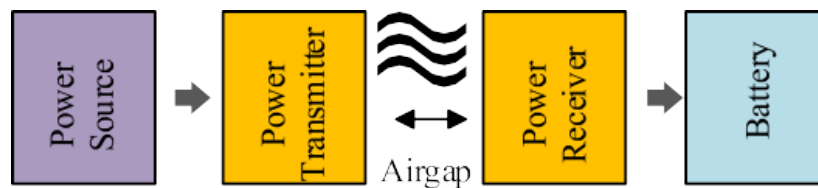
Εικόνα 1.
Εξέλιξη στην αγορά EV [1.1]

Τα διαθέσιμα συστήματα γρήγορης φόρτισης είναι δαπανηρά και πολύπλοκα στον έλεγχο. Ωστόσο, ο χρόνος φόρτισης της μπαταρίας είναι περισσότερος από τον χρόνο που χρειάζεται για να ανεφοδιαστεί ένα αυτοκίνητο με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Μια άλλη λύση που προτείνεται βασίζεται στη χρήση «σταθμών ανταλλαγής», όπου οι εξαντλημένες μπαταρίες EV ανταλλάσσονται με πλήρως φορτισμένες μπαταρίες [1.2]. Για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων, τα συστήματα φόρτισης παίζουν τον κύριο ρόλο. Η επί του παρόντος διαθέσιμη τεχνολογία για τη φόρτιση μπαταριών EV αποτελείται από μεθόδους φόρτισης plug-in (αγώγιμη φόρτιση ή ενσύρματη φόρτιση) και ασύρματη φόρτιση (ανέπαφη φόρτιση).

Μία από τις κύριες ανησυχίες με την αγώγιμη φόρτιση είναι τα καλώδια υψηλής ισχύος, που συνδέονται με το EV. Μπορεί να προκύψουν κίνδυνοι λόγω κατεστραμμένων καλωδίων ή λανθασμένου χειρισμού. Επιπλέον, οι μέθοδοι αγώγιμης φόρτισης είναι επιρρεπείς σε βανδαλισμούς και κλοπές. Μια εναλλακτική νέα τεχνολογία είναι το WPT, που εισήχθη από τον Nicola Tesla τον 19ο αιώνα. Με τον καιρό αυτή η τεχνολογία αναπτύχθηκε και έγινε ανταγωνιστική λύση για συστήματα ενσύρματης φόρτισης. Αυτή η τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει τη διασύνδεση του plug-in, με πομπούς και δέκτες, επιτρέποντας την παροχή ρεύματος χωρίς επαφή, με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών ή στατικών κυμάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 2. Στα συστήματα WPT ο δέκτης μεταφέρει ισχύ στις μπαταρίες ή το σύστημα κίνησης μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Επιπλέον, το σύστημα ασύρματης φόρτισης είναι σε θέση να λειτουργεί χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Είναι επίσης ασφαλές επειδή δεν υπάρχουν καλώδια στο σύστημα. Οι κίνδυνοι

που προκαλούνται από τη χρήση καλωδίων μπορούν να αποφευχθούν. Αυτό το πλεονέκτημα καθιστά την ασύρματη τεχνολογία κατάλληλη για ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας. Την καθιστά επίσης πλήρως αυτοματοποιημένη υποδομή φόρτισης στο ηλεκτρικό σύστημα μεταφοράς. Το βασικό μειονέκτημα του συστήματος ασύρματης φόρτισης είναι ο χρόνος φόρτισής του. Αυτό μπορεί να επιλυθεί με διάφορες αλλαγές στο σύστημα.

Μια άλλη ανησυχία για το WPT είναι η διαρροή ακτινοβολίας EMF (Electric & magnetic fields) σε υψηλότερες συχνότητες. Αυτή η ακτινοβολία περιορίζεται με τη χρήση κατάλληλης θωράκισης.



Εικόνα 2.
Βασική δομή WPT [1.1]

Η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να γίνει με 3 τρόπους: 1) Στατική ασύρματη φόρτιση (SWC). 2) Δυναμική ασύρματη φόρτιση (DWC). και 3) Δυναμική/Στατική ασύρματη φόρτιση (QDWC). Το SWC είναι μια μέθοδος φόρτισης του EV σε θέση ακινητοποίησης. Η τεχνολογία SWC ωριμάζει σταδιακά [1.3]. Λόγω των περιορισμών στη χωρητικότητα της μπαταρίας, τα ηλεκτρικά οχήματα χρειάζονται περισσότερους κύκλους φόρτισης για να διανύσουν μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με DWC [1.4]. Σε DWC επιθέματα εκπομπής τοποθετούνται σε ένα μικρό τμήμα του οδοστρώματος και επιθέματα λήψης τοποθετούνται στο πλαίσιο EV για να παρέχουν μια ευκαιρία φόρτισης εν κινήσει.

Κατά την εφαρμογή του συστήματος DWC, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ταχύτητα του οχήματος. Μια εναλλακτική μέθοδος είναι ένα δυναμικό-στατικό σύστημα ασύρματης φόρτισης, το οποίο παίρνει ορισμένα πλεονεκτήματα από το DWC. Απαιτεί μικρότερη επένδυση σε σύγκριση με το DWC. Η λειτουργία QWC παρέχει φόρτιση στα EV καθώς βρίσκονται σε στάση ή ενώ κινούνται αργά για μικρά χρονικά διαστήματα. Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για ηλεκτρικά οχήματα δημόσιας συγκοινωνίας ώστε φορτίζουν όταν σταματούν σε στάσεις λεωφορείων, στάσεις ταξί και φωτεινούς σηματοδότες. Σε αυτήν την μέθοδο η μπαταρία δεν φορτίζεται πλήρως [1.5].

Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος WPT είναι:

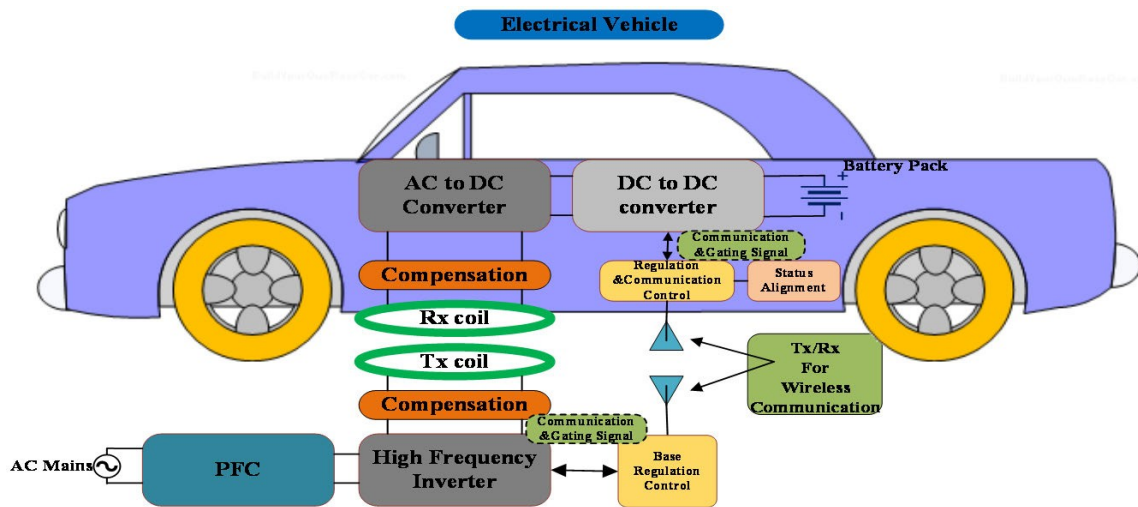
- Το σύστημα WPT μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικές κατηγορίες όσον αφορά το εύρος ισχύος μετάδοσης.
 1. WPT εύρους χαμηλής ισχύος: <1 kW
 2. WPT μεσαίου εύρους: 1- 100 kW
 3. WPT εύρους υψηλής ισχύος >100 kW.
- Στο σύστημα WPT η ισχύς μπορεί να μεταφερθεί μονοκατευθυντικά (G2V) και αμφίδρομα (όχημα στο δίκτυο και αντίστροφα). Η εφαρμογή V2G στην αγώγιμη φόρτιση είναι πιο περίπλοκη από την ασύρματη φόρτιση. Από όχημα σε όχημα (η φόρτιση V2V είναι δυνατή όταν είναι ακίνητο ή κινείται)
- Μπορούμε να μεταφέρουμε ισχύ από μικρές αλλά και μεγάλες αποστάσεις δηλαδή από αρκετά cm μέχρι χιλιόμετρα.
- Η μεταφορά ισχύος μπορεί να γίνει με διάφορα μέσα.
- Το μέσο μετάδοσης ισχύος επηρεάζει την απόδοση του συστήματος. Σημαντικές απώλειες σημειώνονται ανάλογα το μέσο

(Υποκεφάλαιο 1.2) Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη περίοδος σχετίζεται με τους Maxwell και Hertz. Το 1873 ο Maxwell παρουσίασε την εξίσωση για τη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε ελεύθερο χώρο. Γύρω στο 1885-1889, ο Hertz με μια σειρά πειραμάτων επιβεβαίωσε τις προβλέψεις του Maxwell και την παρουσία ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η δεύτερη περίοδος συνδέθηκε κυρίως με τον Nicola Tesla, τον δημιουργό του Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC) και των πολυφασικών συστημάτων, ο οποίος ήθελε να μεταφέρει ενέργεια σε οποιοδήποτε σημείο της γης χρησιμοποιώντας τη γη και την ατμόσφαιρά της ως αγωγό [1.6]. Το έτος 1896, ο Tesla μετέδιδε σήματα μικροκυμάτων σε απόσταση 48 χιλιομέτρων και μεταξύ 1891 και 1904 και διεξήγαγε πολυάριθμες έρευνες για την ηλεκτρομαγνητική και ηλεκτροστατική μετάδοση ενέργειας [1.7].

Σύμφωνα με τον Brown et al, την τρίτη περίοδο, η ιστορία του WPT ξεκίνησε την περίοδο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Εκείνη την εποχή οι ερευνητές χρησιμοποιούσαν κυρτούς ανακλαστήρες για να συγκεντρώσουν την ενέργεια σε μια μικρή περιοχή. Στη μελέτη του, ο Brown επικεντρώθηκε στην ενέργεια, η οποία συσσωρεύεται χρησιμοποιώντας ηλιακές κυψέλες τοποθετημένες σε δορυφόρους και στη συνέχεια μεταδίδεται στη γη με

ακτινοβολία, όπου αυτή η ακτινοβολουμένη ενέργεια μετατρέπεται σε συνεχές ρεύμα (DC) [1.6], [1.8]. Η Εικόνα 3 δείχνει τη γενική παρουσίαση του συστήματος φόρτισης WPT για EV.



Εικόνα 3.

Γενική παρουσίαση του συστήματος φόρτισης WPT για EV [1.1]

Η ιστορία της εμπορευματοποίησης της στατικής φόρτισης ξεκίνησε μεταξύ 1997 και 1998 από τη γερμανική εταιρεία Conductix-Wamplerg. Τα πρώτα EV που φόρτιζαν με τεχνολογία φόρτισης με βάση την επαγωγική μεταφορά ισχύος (IPT) παρουσιάστηκαν στην περιοχή Rotorua στη Νέα Ζηλανδία και από το 2002 τα πρώτα ασύρματα φορτισμένα λεωφορεία κυκλοφορούσαν στην Γένοβα και του Τορίνο. Πέτυχαν 90% απόδοση σε διάκενο αέρα 40 mm με ισχύ 60 kW [1.9], [1.10]. Το Εθνικό Εργαστήριο Oak Ridge (ORNL) στις ΗΠΑ εργάστηκε σε μοντέλα στατικής και δυναμικής φόρτισης. Παρουσίασε εάν μονοφασικό σύστημα SWC 100 kW, που επιτυγχάνει απόδοση κοντά στο 97% για διάκενο 12.7 cm. Σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται ένας μόνο πομπός και δέκτης [1.11],[1.12]. Η ORNL έχει επίσης ενσωματώσει το σύστημα ασύρματης φόρτισής της σε διάφορα EV με ισχύ 6,6 kW και έχει επιτύχει από άκρο σε άκρο απόδοση 85% [1.13]. Το Halo (HaloIPT) της Qualcomm σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Auckland (AU) παρουσίασε νέα μαγνητικά επιθέματα που ονομάζονται «Double D» ή DD pads, τα οποία είναι πιο αποτελεσματικά και ανεκτικά στην κακή ευθυγράμμιση από τα κυκλικά και τα ορθογώνια pads. Το Halo της Qualcomm αποκτήθηκε από τη WiTricity το 2019 [1.14], [1.15]. Η HEVOPower, εταιρεία με έδρα τη Νέα Υόρκη εργάζεται για την εφαρμογή συστημάτων SWC και δυναμικής φόρτισης για EV. Το Ινστιτούτο Fraunhofer στη Γερμανία σχεδίασε ένα δοκιμαστικό μοντέλο χρησιμοποιώντας διακόπτες SiC MOSFET για ένα σύστημα φόρτισης WPT 22 kW. Η απόδοση επιτεύχθηκε περίπου 96% (dc-to-dc) [1.16].

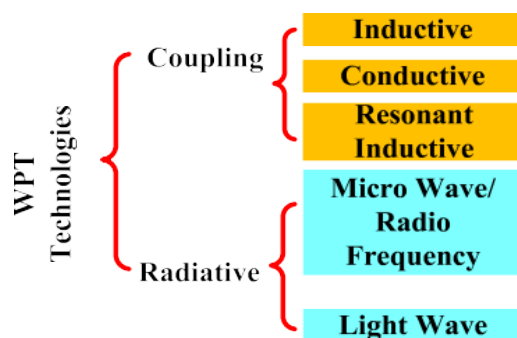
Η WiTricity είναι μια από τις κορυφαίες εταιρείες στην παραγωγή ασύρματων φορτιστών. Προσέφεραν στατικούς ασύρματους φορτιστές έως και 3,6-11 kW και μπορούν να κλιμακωθούν περαιτέρω έως και 22 kW. Ένας μετατροπέας ισχύος που βασίζεται σε SiC MOSFET έδειξε απόδοση δικτύου σε μπαταρία μεγαλύτερη από 91% και ισχυρίστηκε 98% απόδοση πηνίου-πηνίου [1.17], [1.18]. Η εταιρεία Momentum Dynamics με έδρα τις ΗΠΑ έχει αναπτύξει το σύστημα SWC 3,3 kW για διάκενο 24 cm και ανέφερε απόδοση 92%. Επιπλέον, αναβάθμισαν αυτό το σύστημα φόρτισης στα 7,2 kW και 10 kW, τα οποία μπορούν να φορτίσουν το Chevrolet Volt σε περίπου 1 ώρα [1.4]. Η Momentum Dynamics έχει χρησιμοποιήσει έναν ασύρματο φορτιστή 200 kW με απόδοση μεταφοράς μεγαλύτερη από 90% για διάκενο αέρα 30 cm [1.19]. Εγκατέστησαν επιτυχώς μια υποδομή ασύρματης φόρτισης με ικανότητα μεταφοράς ισχύος 200 kW για το Link transit που αποτελείται από 10 λεωφορεία. Η εταιρεία Toshiba ανέπτυξε ένα κλιμακωτό παράλληλο σύστημα WPT 44 kW με ανοχή κακής ευθυγράμμισης +/- 10 cm για ηλεκτρικά λεωφορεία και συμμορφώθηκε με τις συστάσεις της Διεθνούς Επιτροπής για την Προστασία από Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP) [1.20]. Μερικές από τις πρόσφατες εξελίξεις από τα Ινστιτούτα /Ερευνητικά κέντρα φαίνονται στον Πίνακα 1.

Λειτουργεία	Ινστιτούτο	Συχνότητα	Αποτελεσματικότητα	Ενέργεια	Διάκενο (mm)	Έτος
ΜΚΙΤ	ETH Zurich [1.21]	85kHz	96.50%	50 kW	52	2015
	Bombarier Primov [1.22]	TBA	-	-	10 - 30	2015-17
	Conductix Wampler Wc Torino [1.9]	20kHz	90%	60 kW	400	2013
	Momentum Dynamics [1.23,1.24]	TBA	>90%	3.3-10 kW	24	2015-17
	HEVO power [1.10]	85kHz	90%	10 kW	300	2017-18
	Toshiba [1.25]	85kHz	-	44 kW	100	2017
	INTIS [1.25]	TBA	TBA	11-30 kW	110-130	2013-18
	ORNL [1.11,1.12]	-	95%	50 kW	15	2018
		-	97%	120 kW	5	2018
	WAVE [1.26]	TBA	-	50,250 kW	TBA	2012-19
	WiTricity Corporation [1.17,1.26,1.27]	>85kHz	>90%	3.6-11 kW	100-200	2009-19
	Toshiba [1.28]	-	-	7 kW	160	2014
	Fraunhofer Institute Germany [1.16]	100kHz	97%	22 kW	135	2015
	KAIST Uni [1.29]	90kHz	95%	3.3 kW	200	2016
	KAIST Uni [1.28,1.30]	20kHz	72-80%	3 Kw	100	2010-14
20kHz		74-83%	3.3 kW	120-200		
Δυναμική	ORNL [1.31,1.32]	22kHz	93%	20-30 kW	162	2016
	Bombardier [1.33]	20kHz	90%	200 kW	60	2010
	WAVE [1.26]	20kHz	90%	50 kW	152-254	2011
	Utah State Uni [1.31,1.34]	20kHz	86%	25 kW	-	2016
	Uni of Auckland [1.35]	12.9kHz	85%	20-30 kW	500	-
	North Carolina State Uni [1.36]	100kHz	77-90%	0.3 kW	170	
	KRRI [1.37]	60kHz	82.70%	812 kW	50	2012
	KAIST [1.38]	20-60kHz	72-88%	3-27 kW	10-200	2009-16
	INTIS [1.39]	-	90%	30-60 kW	150	2013

Πίνακας 1.
Μονάδες για μαγνητικές ιδιότητες

(Υποκεφάλαιο 1.3) Μέθοδοι ασύρματης φόρτισης για EV

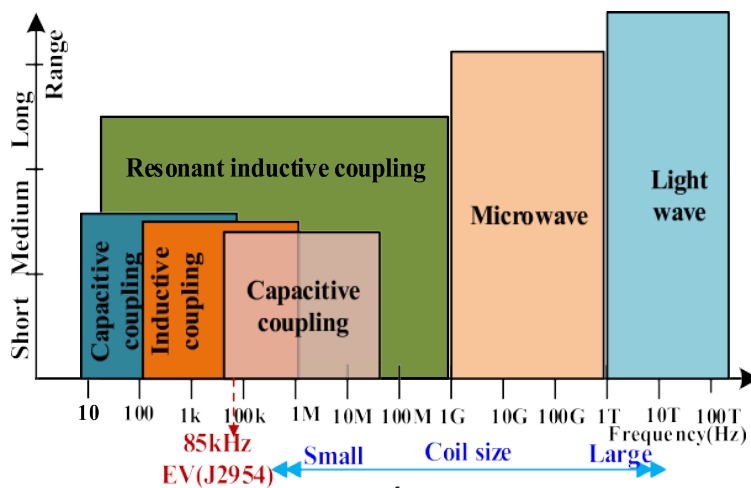
Υπάρχουν πολλές διαθέσιμες μέθοδοι για το WPT. Εξαρτώνται από την τεχνολογία που χρησιμοποιεί και μεταφέρει το επίπεδο συχνότητας. Σύμφωνα με αυτό κατηγοριοποιούνται σε δύο τύπους. 1) Σύζευξη (Κοντινό πεδίο), 2) Ακτινοβολία (Μακρινό πεδίο). Το σύστημα σύζευξης κατηγοριοποιείται περαιτέρω σε μαγνητικό και ηλεκτρικό τύπο ακτινοβολίας που κατηγοριοποιείται σε δύο τύπους τύπου μικροκυμάτων και λέιζερ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4.

Κατηγοριοποίηση μεθόδων WPT [1.1]

Οι μέθοδοι WPT και το εύρος λειτουργίας του διακένου αέρα τους σύμφωνα με τη συχνότητα φαίνεται στην Εικόνα 5. Τα μεγέθη του πομπού και του δέκτη αυξάνονται με τη συχνότητα. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων σύζευξης και ακτινοβολίας περιγράφονται στον Πίνακα 2.



Εικόνα 5.

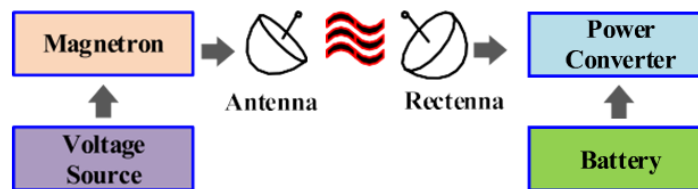
Εύρος λειτουργίας και συχνότητα διαφορετικών μεθόδων WPT [1.1]

Τύπος WPT		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Κοντινό πεδίο	Capacitive	<ul style="list-style-type: none"> • Προσφέρει Μέση μεταφορά ισχύος • Δυνατότητα μεταφοράς ισχύος μέσω μεταλλικών αντικειμένων • Φθινό λόγω του ότι βασίζεται σε πλάκες αλουμινίου • Κατάλληλο για διάκενο αέρα έως 10 cm • Δεν χρειάζεται θωράκιση 	<ul style="list-style-type: none"> • Οι δυνατότητες μεταφοράς ισχύος εξαρτώνται από το κενό μεταξύ πομπού και δέκτη • Αποτελεσματικότητα περίπου 70-80%
	Inductive	<ul style="list-style-type: none"> • Η υλοποίηση είναι απλή • Παρέχεται γαλβανική μόνωση Απλός έλεγχος • Υψηλή αποτελεσματικότητα σε χαμηλό διάκενο αέρα • Δυνατότητα δικατευθυντικής μεταφοράς ισχύος 	<ul style="list-style-type: none"> • Μικρό διάκενο αέρα • Απαιτείται θωράκιση EMI • Θέρμανση με παρουσία μεταλλικών αντικειμένων • Απαιτείται ακριβής ευθυγράμμιση
	Resonance	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή μεταφορά ισχύος • Εμπορευματοποιημένη τεχνολογία για τα EV • Δυνατότητα μεταφοράς ισχύος σε κακές συνθήκες • Παρέχει γαλβανική μόνωση • Δυνατότητα δικατευθυντικής μεταφοράς ισχύος 	<ul style="list-style-type: none"> • Το κόστος αυξάνεται με την ισχύ • Εξαιρετικά ευαίσθητο σε αντικείμενα ανάμεσα στα πηνία ζεύξης • Απαιτείται θωράκιση EMI
Μακρινό πεδίο	Micro Wave	<ul style="list-style-type: none"> • Η ισχύς μπορεί να μεταφερθεί έως και αρκετά χιλιόμετρα • Δυναμική μεταφορά ισχύος (εν κινήσει) • Μπορεί να μεταφέρει έως κιλοβάτ ισχύος • Συμβατό με υπάρχοντα συστήματα τηλεπικοινωνιών 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλή απόδοση σε σύγκριση με το CWPT και το IWPT • Πολύ δύσκολο να εφαρμοστεί • Μονοκατευθυντική ροή ισχύος • Επικίνδυνο για τον άνθρωπο όταν εκτίθεται σε δέσμη μικροκυμάτων • Το μέγεθος της κεραίας αυξάνεται με την ισχύ
	Optical	<ul style="list-style-type: none"> • Αποτελεσματικό σε διάκενο χιλιομέτρων • Δυναμική μεταφορά ισχύος (εν κινήσει) • Μπορεί να μεταφέρει κιλοβάτ ισχύος • Μέγεθος πομπού μικρότερο από MPT 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλή απόδοση (περίπου 20% εξαρτάται από το διάκενο αέρα) • Μονοκατευθυντική ροή ισχύος • Δύσκολο να λειτουργήσει • Δεν επιτρέπονται εμπόδια στη δέσμη φωτός • Επικίνδυνο για τον άνθρωπο όταν εκτίθεται σε ακτινοβολία

Πίνακας 2.

Πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μεθόδων σύζευξης και ακτινοβολίας

1) Μεταφορά Ισχύος Μικροκυμάτων (MPT) Το MPT είναι μια τεχνολογία WPT που βασίζεται σε μικροκύματα σε ένα μακρινό πλαίσιο [1.40], [1.41]. Αυτή η μέθοδος μπορεί επίσης να λειτουργήσει στην περιοχή Ραδιοσυχνοτήτων (RF) με μικρές ρυθμίσεις. Μια γεννήτρια DC υψηλής τάσης τροφοδοτεί magnetron (ταλαντωτή με βάση το κενό), η οποία παράγει σήμα μικροκυμάτων. Το παραγόμενο σήμα μικροκυμάτων αποστέλλεται μέσω της κεραίας, αυτό το σήμα λαμβάνεται από την κεραία λήψης. Αυτή η κεραία λήψης αναφέρεται επίσης ως rectenna. Η rectenna αποτελείται τόσο από δέκτη όσο και από ανορθωτή που μετατρέπει το σήμα σε μορφή DC για φόρτιση της μπαταρίας όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.

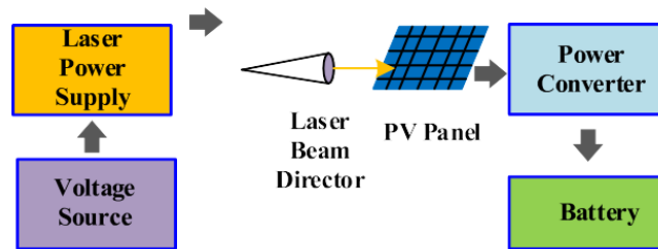


Εικόνα 6.
 Το μπλοκ διάγραμμα του MPT [1.1]

2) Οπτικο WPT

Η οπτική μετάδοση ισχύος με βάση WPT ή λέιζερ ακτινοβολείται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ωστόσο, είναι σε THz και έτσι υπάρχει ως φως. Σύμφωνα με αυτή την τεχνική, ο πομπός αποτελείται από δίοδο λέιζερ που παράγει μια δέσμη φωτός με ιδιαίτερη ισχύ και μήκος κύματος. Το Beam Director χρησιμεύει για τη ρύθμιση της διόδου λέιζερ για τον έλεγχο της κατεύθυνσης της δέσμης φωτός. Η δευτερεύουσα πλευρά αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό (PV) στοιχείο και ανορθωτή. Η φωτοβολταϊκή κυψέλη λαμβάνει δέσμη φωτός που μετατρέπεται σε σήμα ισχύος. Το σήμα ισχύος μετατρέπεται σε σήμα συνεχούς ρεύματος από τον ανορθωτή. Το σήμα DC χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ενός φορτίου ή μιας μπαταρίας. Η Εικόνα 7 παρουσιάζει το μπλοκ διάγραμμα του οπτικού WPT. Στην ιδανική περίπτωση, ένα σύστημα δέσμης ισχύος λέιζερ υψηλής έντασης (HILPB) έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει ισχύ σε οποιοδήποτε σημείο. Στο σύστημα HILPB, για την αποτελεσματική μετατροπή της ισχύος λέιζερ σε ηλεκτρική ενέργεια, ο σχεδιασμός των Φ/Β κυψελών παίζει σημαντικό ρόλο. Για αυτό, η δυναμική της

ισχύος λέιζερ, όπως το μήκος κύματος, η θερμοκρασία και τα υλικά των φωτοβολταϊκών κυψελών θα πρέπει να αναλυθούν προσεκτικά [1.42]. Η τεχνολογία λέιζερ για EV χρειάζεται ακόμη έρευνα.



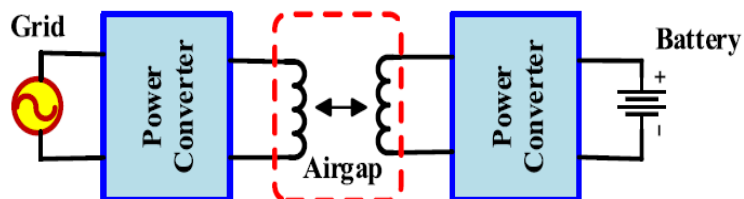
Εικόνα 7.

Το μπλοκ διάγραμμα του οπτικού WPT [1.1]

3) Επαγωγικό WPT (Inductive WPT)

Η θεωρία λειτουργίας του συστήματος IWPT βασίζεται στην παραδοσιακή λειτουργία μετασχηματιστή. Στην κύρια πλευρά, σύμφωνα με το νόμο του Ampere, ένα Εναλλασσόμενο Ρεύμα (AC) αναπτύσσει ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό (πρωτεύων πλευρικός συζεύκτης). Η ανεπτυγμένη χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική επιφάνεια συνδέεται με τον μαγνητικό συζεύκτη στη δευτερεύουσα πλευρά. Το Συνδεδεμένο Πηνίο προκαλεί μια τάση στο δευτερεύον πηνίο από τον νόμο του Faraday.

Η Εικόνα 8 δείχνει το μπλοκ διάγραμμα του συστήματος IWPT. Αυτή η επαγόμενη τάση μετατρέπεται σε σήμα ισχύος συνεχούς ρεύματος από τον ανορθωτή. Αυτή η ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση της μπαταρίας.

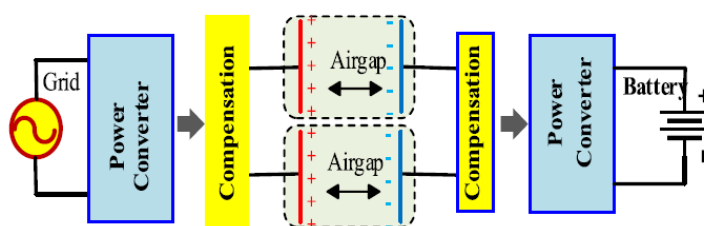


Εικόνα 8.

Το μπλοκ διάγραμμα του IWPT [1.1]

4) CAPACITIVE WPT

Είναι συστήματα που βασίζονται σε ηλεκτροστατικά συστήματα που αναφέρονται επίσης ως συστήματα χωρητικότητας WPT (CWPT). Το CWPT χρησιμοποιεί δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες η μία απέναντι από την άλλη και ενεργούν ως πομπός και δέκτης για να σχηματίσουν έναν ισοδύναμο πυκνωτή για μετάδοση ισχύος με τη μορφή ηλεκτροστατικής ενέργειας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 9. Το σύστημα CWPT μπορεί να μεταφέρει ισχύ μέσω του μεταλλικού μέσου. Σε σύγκριση με το IWPT, το σύστημα CWPT ισχύει τόσο για συστήματα χαμηλού ρεύματος όσο και για συστήματα υψηλής τάσης. Πρόσθετοι επαγωγείς προστέθηκαν σε πλάκες πυκνωτών σε κάθε πλευρά για μείωση της σύνθετης αντίστασης. Αυτό ονομάζεται επίσης επαγωγική αντιστάθμιση και αυξάνει την απόδοση μεταφοράς ισχύος. Η τάση εξόδου στη δευτερεύουσα πλευρά μεταβάλλεται σε συνεχές ρεύμα (DC) από ένα κύκλωμα ανόρθωσης, για να τροφοδοτήσει τη συστοιχία μπαταρίας. Επιπλέον, έχει πλεονεκτήματα όπως χαμηλό βάρος και μικρότερο κόστος από τα συστήματα IWPT.

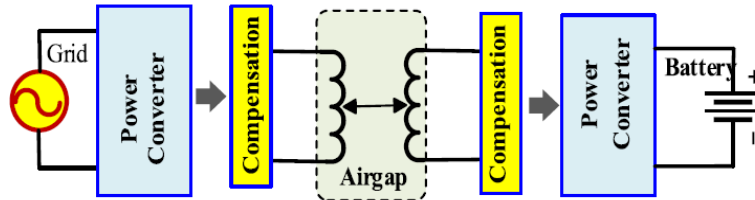


Εικόνα 9.

Το μπλοκ διάγραμμα του CWPT [1.1]

5) WPT Μαγνητικού Συντονισμού Το Resonant Inductive WPT (RIPT) είναι βελτιωμένο μοντέλο του παραδοσιακού IWPT, όσον αφορά την ικανότητα μεταφοράς ισχύος, το σχεδιασμό και τα πηνία ζεύξης. Η Εικόνα 10 απεικονίζει το βασικό μοντέλο του συστήματος RIPT για τη φόρτιση της μπαταρίας. Παρόμοια με το άλλο σύστημα WPT, η υπάρχουσα τάση δικτύου μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας (HFAC) με τη χρήση μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος. Το σήμα HFAC παραδίδεται στο πηνίο του συζεύκτη. Το δευτερεύον πηνίο συζεύκτη παράγει τάση από συνδεδεμένα μαγνητικά άκρα. Η παραγόμενη τάση μετατρέπεται σε συνεχές ρεύμα για την τροφοδοσία της μπαταρίας μέσω μετατροπών ηλεκτρικής ισχύος. Σε

σύγκριση με το σύστημα IWPT, τα δίκτυα αντιστάθμισης (πυκνωτές/επαγωγείς ή και τα δύο) προστέθηκαν σε σειρά ή/και παράλληλους σχηματισμούς τόσο στον πομπό όσο και στην πλευρά λήψης των πηνίων για να σχηματίσουν την κατάσταση συντονισμού. Αυτό βοηθά στη βελτίωση της απόδοσης μειώνοντας τις πρόσθετες απώλειες.



Εικόνα 10.

Το μπλοκ διάγραμμα του επαγωγικού RIPT [1.1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ασύρματη μεταφορά ενέργειας σε ηλεκτρικά οχήματα.

Η τεχνολογία Wireless Power Transfer (WPT) μπορεί να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από έναν πομπό σε έναν δέκτη ασύρματα. Λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της, η τεχνολογία WPT είναι ικανοποιητικότερη και καταλληλότερη λύση για πολλές εφαρμογές συγκριτικά με την μεταφορά ενέργειας με την χρήση καλωδίων.

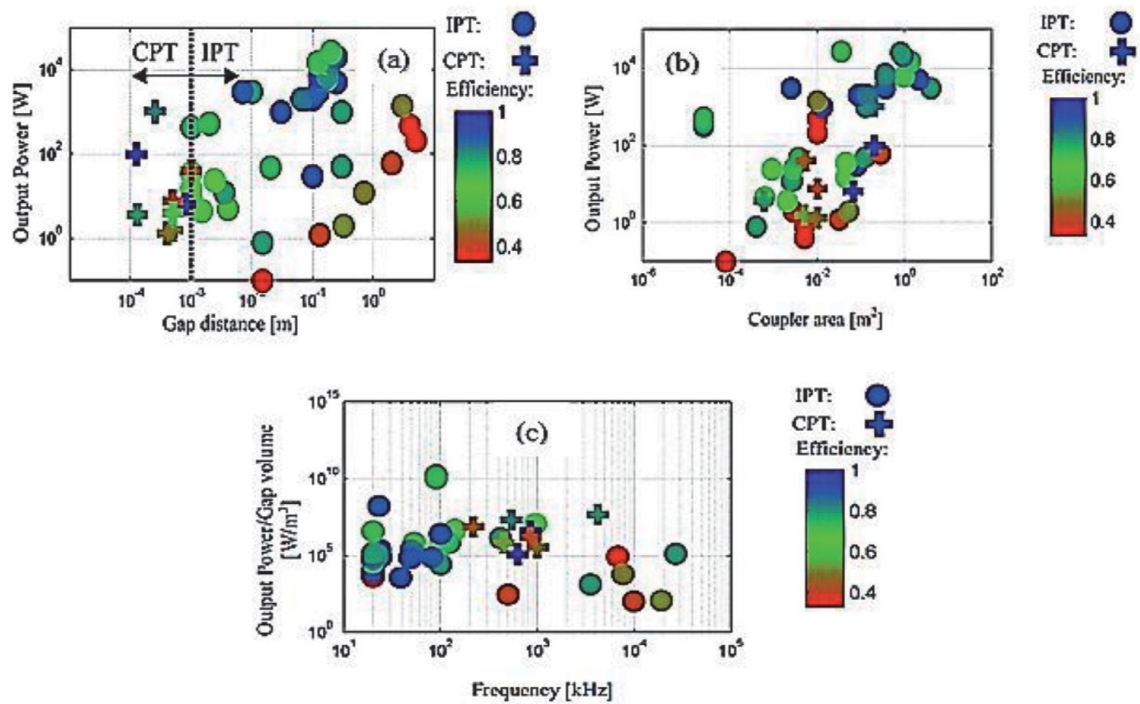
Με την χρήση WPT θα εξαλειφθεί η ενόχληση των καλωδίων και θα βελτιωθούν οι μηχανισμοί μεταφοράς ισχύος. Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία αυτή απέκτησε μεγάλη προσοχή στην φόρτιση των ενσωματωμένων μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα (E.V.). Αρκετές διαδεχόμενες εταιρίες αυτοκινήτων προσπαθούν να υιοθετήσουν την τεχνολογία WPT καθώς και να την βελτιώσουν. Επομένως, το WPT μπορεί να επιτευχθεί μέσω της επαγωγικής σύζευξης μεταξύ δύο πηνίων που ονομάζονται πηνίο πομπού και δέκτη. Στις εφαρμογές φόρτισης EV, τα πηνία πομπού βρίσκονται κάτω από το δρόμο και τα πηνία δέκτη είναι εγκατεστημένα στο EV. Το επαγωγικό WPT εφαρμόζεται γενικά σε εφαρμογές μεταφοράς μεσαίας - υψηλής ισχύος, όπως η φόρτιση EV, επειδή επιτυγχάνει καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Σε αυτό το κεφάλαιο, συζητούνται και δοκιμάζονται διάφορες τεχνολογίες WPT σε εφαρμογές ασύρματης φόρτισης EV. Επιπλέον, παρέχονται εκτενείς πληροφορίες για την ανάπτυξη μιας προηγμένης τεχνολογίας WPT που μπορεί να μεταφέρει τη μέγιστη ισχύ επιτυγχάνοντας μέγιστη απόδοση [2.1].

(Υποκεφάλαιο 2.1) Εισαγωγή

Η ασύρματη μεταφορά ισχύος (WPT) είναι μία από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την ασύρματη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από έναν πομπό σε έναν δέκτη. Το WPT είναι μια ελκυστική λύση για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές λόγω των τεράστιων πλεονεκτημάτων του σε σχέση με τις ενσύρματες συνδέσεις. Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν την απουσία ταλαιπωρίας μεταφοράς καλωδίων, την εύκολη φόρτιση και την ομαλή μετάδοση ισχύος ακόμη και σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Η ιδέα της ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT) εισήχθη για πρώτη φορά στα τέλη του 19ου αιώνα από τον Nicola Tesla. Κατασκεύασε μια ασύρματη λάμπα φωτισμού που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη ηλεκτρικού φορτίου ασύρματα [2.2]. Ο Tesla χρησιμοποίησε

δύο μεταλλικές πλάκες που ήταν στενά τοποθετημένες μεταξύ τους. Δυναμικά Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC) υψηλής συχνότητας πέρασαν μεταξύ αυτών των δύο πλακών και ο λαμπτήρας ενεργοποιήθηκε. Ωστόσο, ορισμένα από τα προβλήματα εμφανίστηκαν κατά τη χρήση της τεχνολογίας WPT. Ένα από τα κύρια ζητήματα είναι ότι η ελάχιστη πυκνότητα ισχύος και η χαμηλή απόδοση μεταφοράς επηρεάζονται όταν αυξάνονται οι αποστάσεις. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση της τεχνολογίας WPT γίνεται πολύ αργή. Ως εκ τούτου, η τεχνολογία WPT έχει βελτιωθεί και χρησιμοποιεί πηνία «ισχυρής σύζευξης» όταν η απόσταση αυξάνεται περισσότερο από 2 μέτρα κατά την ασύρματη φόρτιση [2.3].

Οι δυο σημαντικές τεχνολογίες WPT είναι η επαγωγική μεταφορά ισχύος (IPT) και η χωρητική μεταφορά ισχύος (CPT). Το CPT εφαρμόζεται μόνο σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος με πολύ μικρά διάκενα αέρα, ενώ το IPT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλα κενά αέρα γύρω στα πολλά μέτρα και η ισχύς εξόδου του είναι πολύ μεγαλύτερη από το CPT. Η Εικόνα 11 παρουσιάζει την σύγκριση μεταξύ CPT και IPT. Η Εικόνα 11α δείχνει την ικανότητα μεταφοράς ισχύος έναντι της απόστασης διάκενου με τιμές απόδοσης. Επιπλέον, το σχήμα δείχνει ότι τόσο το IPT όσο και το CPT μπορούν να επιτύχουν απόδοση $\geq 90\%$ σε επίπεδα ισχύος κιλοβάτ στις αντίστοιχες περιοχές κενών. Η Εικόνα 11β παρουσιάζει την επιφάνεια πομπού/δέκτη σε σχέση με την ισχύ παροχής με αποτελεσματικότητα. Η περιοχή του συζευκτής είναι η περιοχή διατομής μέσω της οποίας μαγνητικά ή ηλεκτρικά πεδία μεταφέρουν ενέργεια. Η εικόνα 11γ απεικονίζει την πυκνότητα εξόδου (ισχύς εξόδου διαιρεμένη με τον όγκο του διάκενου) σε σχέση με τη συχνότητα [2.4]. Η τεχνολογία WPT μπορεί να βρει εφαρμογές στην τηλεόραση, τους φορτιστές τηλεφώνων, την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, ιατρικές συσκευές, βηματοδότες, αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων, αισθητήρες, ρομποτική και χρησιμοποιείται σε βάθος στην ασύρματη φόρτιση για EV [2.5]-[2.12].



Εικόνα 11.
Σύγκριση μεταξύ CPT και IPT [2.1]

Στις μεταφορές ισχύος CPT και IPT, η αντίστοιχη ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν ενιαίο όγκο χώρου υπολογίζεται ως εξής:

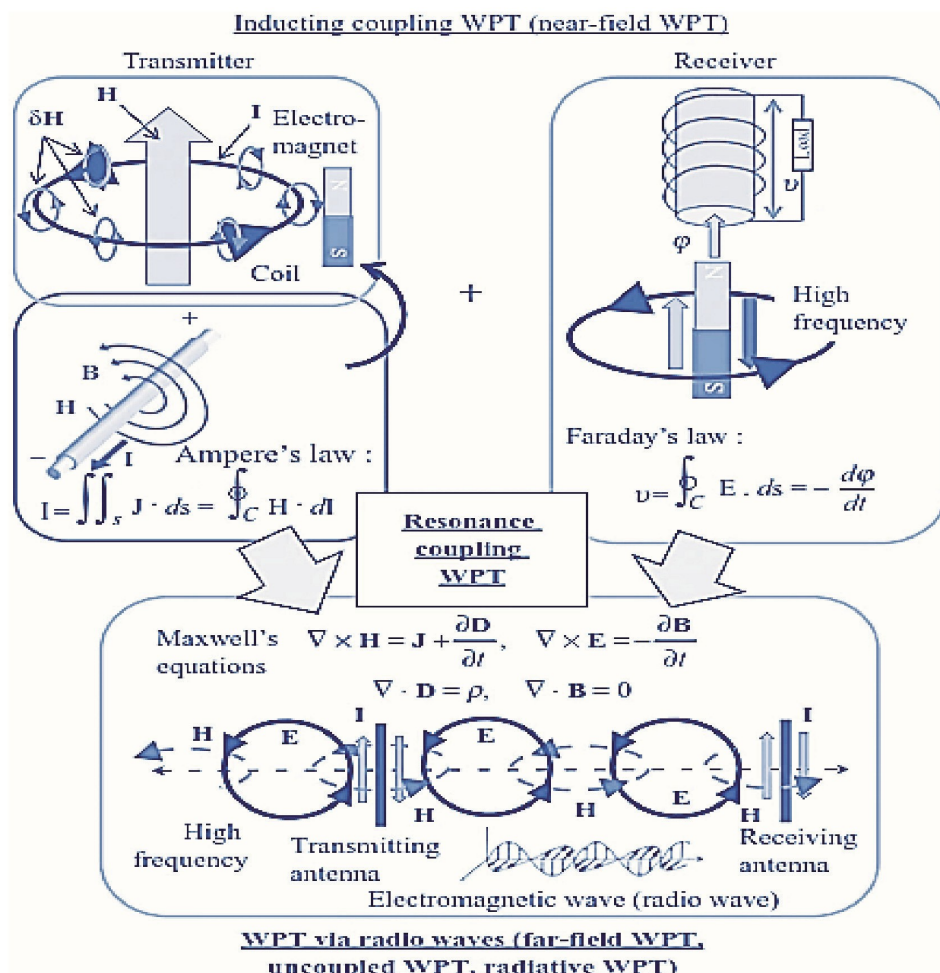
$$W_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 \quad (2.1)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \quad (2.2)$$

Όπου E και H είναι η ένταση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων και, ε_0 και μ_0 είναι η επιτρεπτότητα και διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου.

Η υγεία, η ασφάλεια και ο οικονομικός αντίκτυπος είναι τα κρίσιμα σημεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σε οποιαδήποτε τεχνολογία του WPT για τη φόρτιση EV ή σε άλλες εφαρμογές.

Η WPT φόρτιση έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να κάνει τη διαδικασία φόρτισης αυτοματοποιημένη, κατάλληλη και ασφαλής για τους χρήστες και η μεγάλης κλίμακας εισαγωγή της υποδομής φόρτισης WPT μπορεί να συμβάλει στη μείωση του μεγέθους της μπαταρίας και με τη σειρά της να κάνει τα EV περισσότερο προοδευτικά. Οι επιστήμονες πρότειναν πρόσφατα μια μέθοδο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που δεν βασίζεται στη σύζευξη μετασχηματιστή. Αποκαλύπτεται ότι η μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας σε μια περιοχή που περιλαμβάνει μια μέθοδο συντονισμού μαγνητικού πεδίου είναι δυνατή με την υιοθέτηση αυτής της μεθόδου [2.13]. Ο νόμος του Ampere, ο νόμος του Faraday, οι εξισώσεις του Maxwell, το WPT επαγωγικής σύζευξης, το WPT με σύζευξη συντονισμού και το WPT μέσω ραδιοκυμάτων είναι η κύρια θεωρία που μπορεί να περιγράψει τη λειτουργικότητα των τεχνολογιών WPT. Η Εικόνα 12 δείχνει αυτή τη σχέση μεταξύ αυτών των θεωριών.

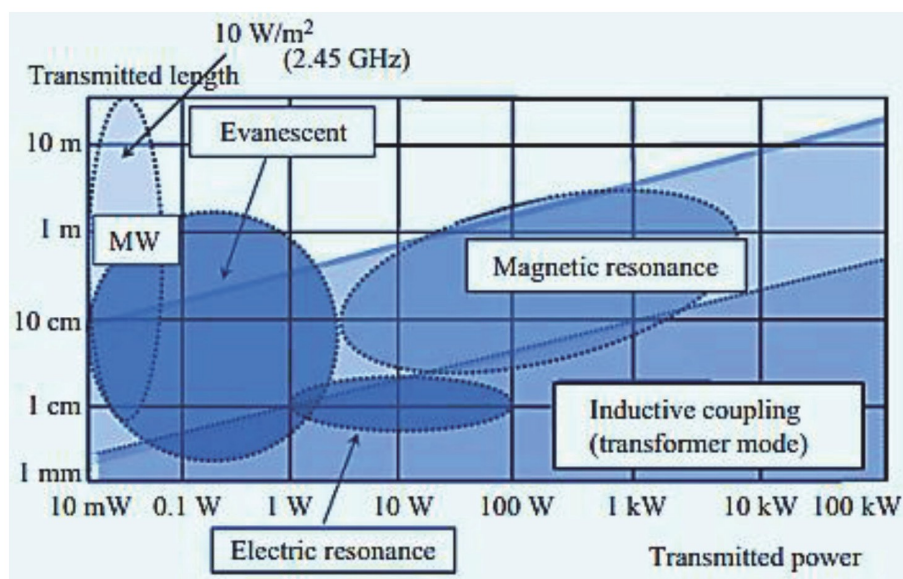


Εικόνα 12.

Σχέση μεταξύ του νόμου του Ampere, του νόμου του Faraday, των εξισώσεων του Maxwell, του WPT επαγωγικής σύζευξης, του WPT σύζευξης συντονισμού και του WPT μέσω ραδιοκυμάτων [2.1]

(Υποκεφάλαιο 2.2) Βασική θεωρία συστήματος WPT

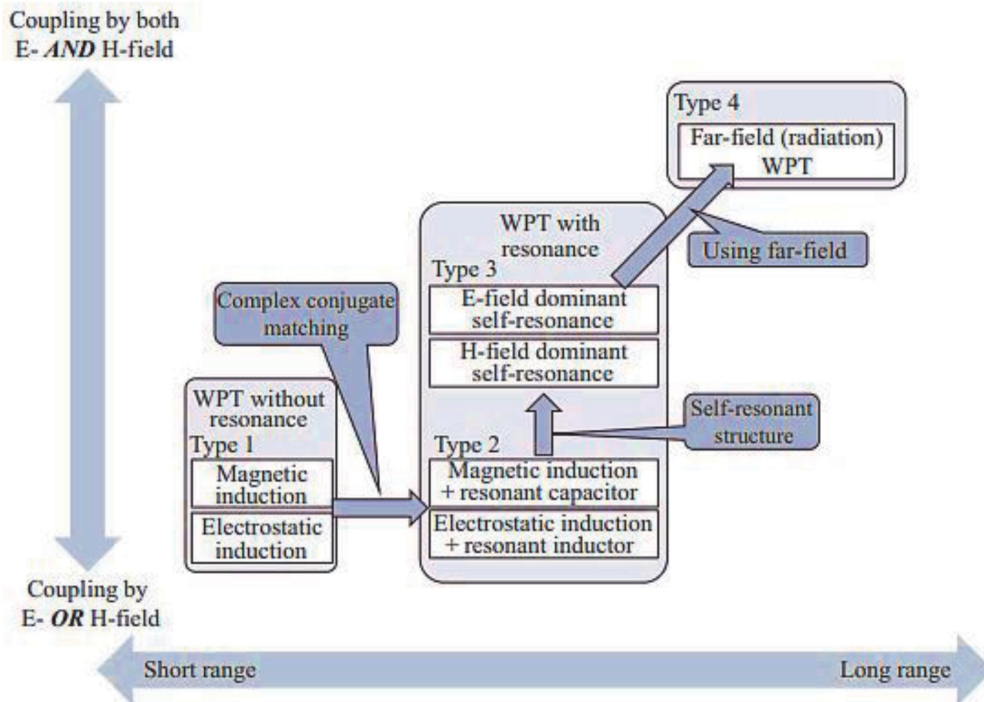
Όταν η ηλεκτρική ενέργεια AC ή DC μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια υψηλής συχνότητας χρησιμοποιώντας έναν μετατροπέα υψηλής συχνότητας, η συσκευή ασύρματης τροφοδοσίας (Tx.) απελευθερώνει ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας συσκευής μετάδοσης στο χώρο. Μετά το σύστημα λήψης (Rx.) μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ σε συνεχές ρεύμα στην ηλεκτρική συσκευή παραλήπτη. Η αποτελεσματικότητα της μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας, η ιατρική και περιβαλλοντική επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και η βελτίωση της εύκολης φόρτισης υψηλής ταχύτητας, η ασφάλεια και η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας είναι βασικά όρια που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν το WPT έχει σχεδιαστεί για EV. Τα συστήματα WPT ταξινομούνται ως μέθοδοι μικροκυμάτων, παροδικών κυμάτων, μαγνητικού συντονισμού, ηλεκτρικού συντονισμού ή ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η Εικόνα 13 δείχνει τη σχέση μεταξύ μεταδιδόμενης ισχύος και εκπεμπόμενου μήκους αυτών των μεθόδων για το WPT [2.13].



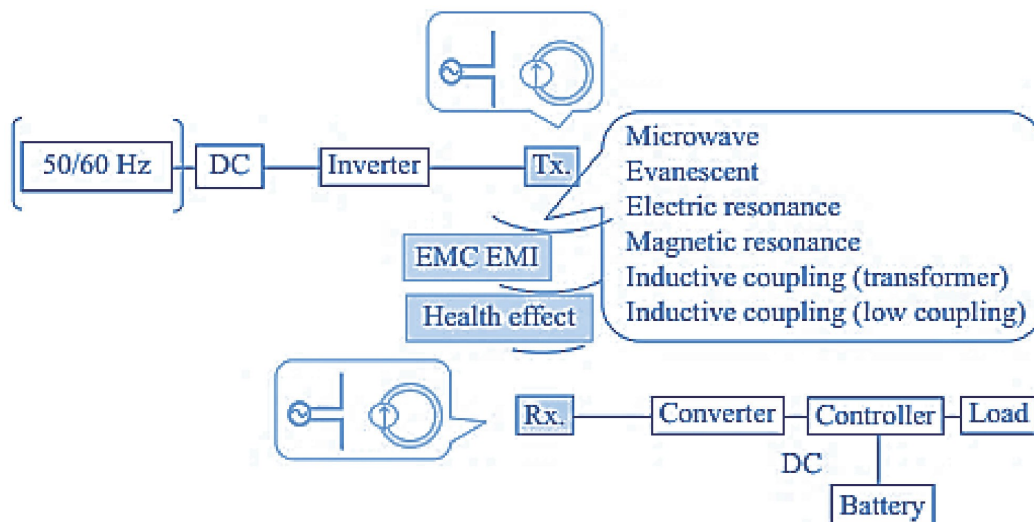
Εικόνα 13.

Μεταδιδόμενη ισχύς και μήκος μετάδοσης μεθόδων WPT χωρίς επαφή [2.1]

Επιπλέον, το WPT μπορεί να ταξινομηθεί στα είδη του Τύπου 1, Τύπου 2, Τύπου 3 και Τύπου 4 όπως φαίνεται στην Εικόνα 14. Ο Πίνακας 3 δείχνει τη σχέση Τύπου 1-4 από την άποψη του μηχανισμού σύζευξης, του μηχανισμού συντονισμού και του συστήματος μεταφοράς ισχύος. Η Εικόνα 15 δείχνει το γενικό διάγραμμα του ασύρματου συστήματος μεταφοράς ισχύος.



Εικόνα 14
Σχέση διαφορετικών ειδών WPT [2.1]



Εικόνα 15.
Γενικό διάγραμμα του ασύρματου συστήμα μεταφοράς ισχύος [2.1]

Τύπος		Μηχανισμός ζεύξης		Μηχανισμός συντονισμού	Μηχανισμός αντιστοίχισης σύνθετης αντίστασης (μηχανισμός τροφοδοσίας)	Σχηματισμός
		Πεδίο				
		Ε	Η			
1	Ηλεκτροστατική επαγωγή	Ναι	Όχι	Η αντιστάθμιση συντελεστή ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ως κύκλωμα συντονισμού	Μη ενεργή	
	Μαγνητική επαγωγή	Όχι	Ναι			
2	συζευγμένος συντονισμός με χρήση ηλεκτροστατικής επαγωγής	κυρίαρχο	Αμελητέο	Διακεκριμένη συσκευή αντίδρασης είναι απαραίτητη για αντήχηση	Σύμφωνα με την σύνθετη αντίσταση φορτίου ή την απόσταση μετάδοσης, η ενεργή παρακολούθηση από την παράμετρο κυκλώματος σε κύκλωμα αντιστοίχισης	
	συζευγμένος συντονισμός με χρήση μαγνητικής επαγωγής	Αμελητέο	Κυρίαρχο			
3	Σύζευξη συντονισμού με συζεύκτη αυτοσυντονισμού (κυρίαρχο πεδίο Ε)	Κυρίαρχο	Μικρό Όχι αμελητέο	Ο συζεύκτης λειτουργεί ως συντονιστής	αντίστασης ή συχνότητα μετάδοσης είναι απαραίτητη για την επίτευξη ταυτόχρονης συζυγούς αντιστοίχισης	
	Σύζευξη συντονισμού με συζεύκτη αυτοσυντονισμού (κυρίαρχο πεδίο Η)	Μικρό Όχι αμελητέο	Κυρίαρχο			
4	Τύπος μακρινού πεδίου (μικροκύματα WPT)	Σύζευξη σε μακρινό πεδίο. Ο λόγος του πεδίου Ε προς το πεδίο Η είναι 377		Οι κεραίες Tx και Rx συντονίζονται ανεξάρτητα	Οι κεραίες Tx/Rx ταιριάζουν με την πηγή/φορτίο ανεξάρτητα	

Πίνακας 3.

Μηχανισμός σύζευξης, μηχανισμός συντονισμού και μηχανισμός αντιστοίχισης σύνθετης αντίστασης για διάφορα είδη WPT

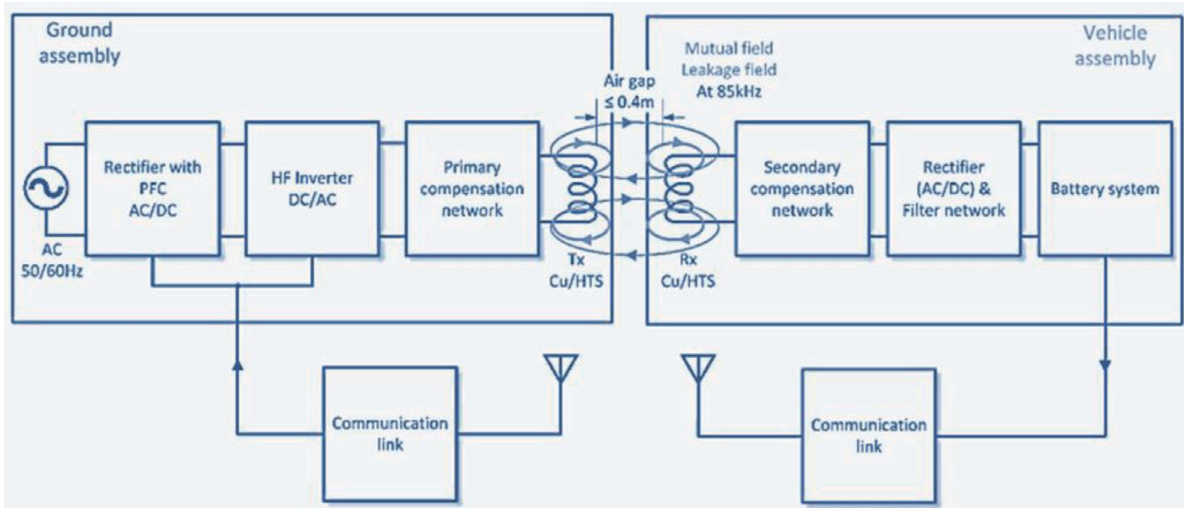
(Υποκεφάλαιο 2.3) Συστήματα WPT για φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Η Εικόνα 16 απεικονίζει τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος WPT για φόρτιση EV. Αποτελείται από δύο κύρια υποσυστήματα, το ένα από τα οποία υπάρχει κάτω από την επιφάνεια του δρόμου και το δεύτερο βρίσκεται στο κάτω μέρος του αμαξώματος του οχήματος [2.14]. Το πρώτο υποσύστημα περιλαμβάνει την πηγή ενέργειας, τον ανορθωτή και τον μετατροπέα υψηλής συχνότητας, το πρωτεύον δίκτυο αντιστάθμισης και το πρωτεύον/εκπομπής πηνίο (Tx).

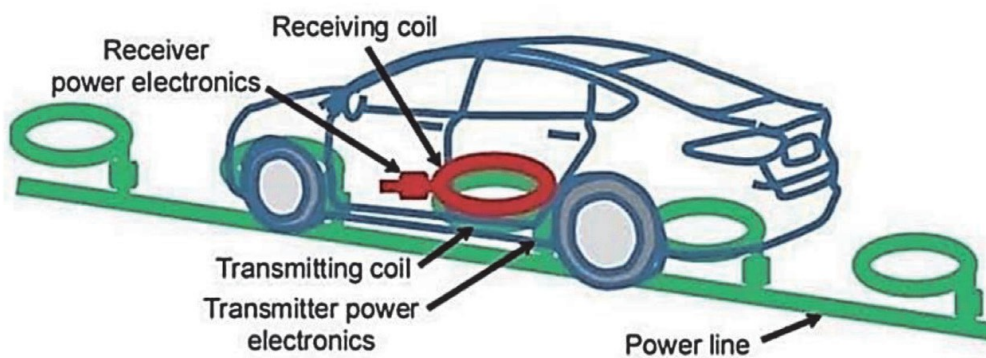
Το ενσωματωμένο υποσύστημα στα ηλεκτρικά οχήματα, έχει το δευτερεύον/λήψης πηνίο (Rx) και το δευτερεύον δίκτυο αντιστάθμισης συνθέτει ένα κύκλωμα συντονισμού που τροφοδοτεί έναν ανορθωτή υψηλής συχνότητας, το φίλτρο και την μπαταρία. Τα δυο υποσυστήματα χωρίζονται από ένα διάκενο αέρα. Η απόσταση μεταξύ των δύο συστημάτων εξαρτάται από τον τύπο του οχήματος, την απόσταση από το έδαφος και τις συνθήκες του δρόμου, όπως το πάχος του οδοστρώματος. Συνήθως το διάκενο αέρα είναι μικρότερο από 0,4 m. Επιπλέον, και τα δύο υποσυστήματα μοιράζονται πληροφορίες μέσω μιας σύνδεσης επικοινωνίας.

Το σύστημα που δίνεται στην Εικόνα 16 περιλαμβάνει:

- Το δίκτυο διανομής στο δρόμο έχει εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής συχνότητας για διάφορα φορτία [2.15],[2.16].
- Ανορθωτή και διορθωτή συντελεστή ισχύος (Power Factor Correction).
- Ο μετατροπέας υψηλής συχνότητας μετατρέπει την ισχύ DC σε AC υψηλής συχνότητας στην κύρια πλευρά. Στη δευτερεύουσα πλευρά, η ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής συχνότητας διορθώνεται σε ισχύ συνεχούς ρεύματος και φιλτράρεται για να δημιουργήσει ένα ρεύμα χωρίς κυματισμό που μπορεί να φορτίσει την μπαταρία των EV. Η συχνότητα συντονισμού των τοπολογιών αντιστάθμισης και των πηνίων καθορίζει την απαιτούμενη συχνότητα μεταγωγής των μετατροπέων. Οι συχνότητες συντονισμού που χρησιμοποιούνται συνήθως για WPT φορτιστές EV είναι εντός ενός εύρους 20-100 kHz [2.17].
- Τα δίκτυα αντιστάθμισης βρίσκονται μεταξύ του μετατροπέα υψηλής συχνότητας και του πρωτεύοντος πηνίου στο συγκρότημα δρόμου (GA), ενώ μεταξύ του δευτερεύοντος πηνίου και του ανορθωτή στο συγκρότημα του οχήματος (VA). Ο Πίνακας 4 συνοψίζει αυτά τα δίκτυα και την αποτελεσματικότητά τους. Η απόδοση μεταφοράς ισχύος με αμοιβαίες σχέσεις επαγωγής για τις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης SS, SP, PS και PP δίνονται στην Εικόνα 17. Μια βέλτιστη λειτουργία επιλογής της τοπολογίας αντιστάθμισης με βάση τα οικονομικά του συστήματος προτείνεται στο [2.18]. Συμπεραίνει ότι τα δίκτυα αντιστάθμισης SS και SP είναι οι πιο κατάλληλες τοπολογίες για συστήματα WPT υψηλής ισχύος. Επιπλέον, η αντιστάθμιση SS χρειάζεται λιγότερο χαλκό από τα άλλα δίκτυα αντιστάθμισης.



(a)

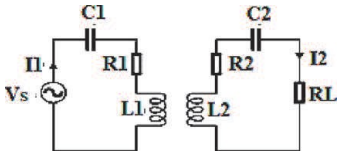
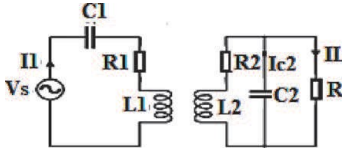
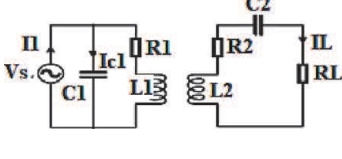
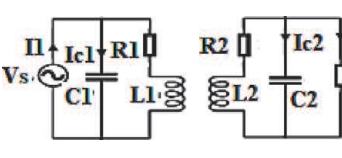


(b)

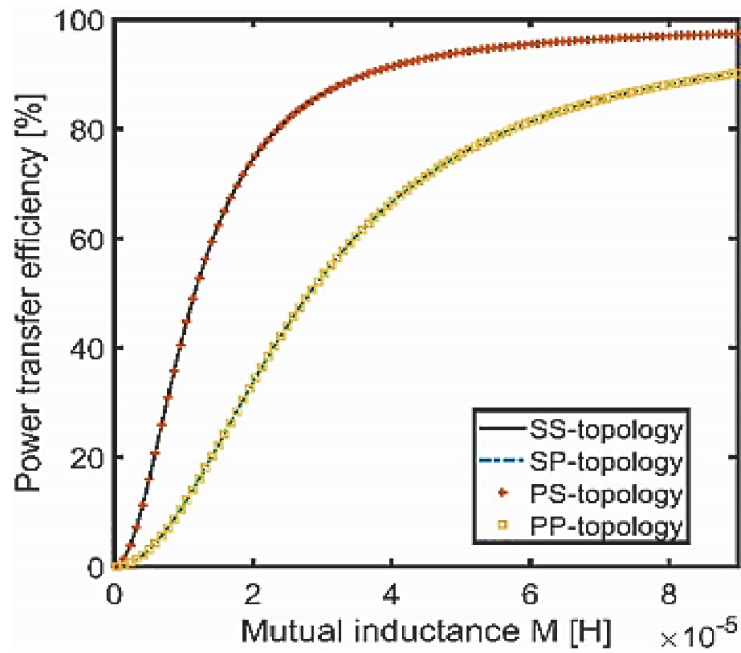
Εικόνα 16.

(a) Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος WPT για (b) σύστημα φόρτισης EV [2.1]

- Σύνδεσμοι επικοινωνίας. Εξίσου σημαντική για το σύστημα μεταφοράς ισχύος είναι η σύνδεση επικοινωνίας μεταξύ GA και VA. Περιέχει επίσης την επικοινωνία με τη σύνδεση δικτύου GA για τη διαχείριση της ζήτησης του.

Τοπολογία	Κύκλωμα	Αποδοτικότητα μεταφοράς ισχύος σε αντήχηση $\eta = P_{out}/P_{in}$
SS		$\frac{R_L}{R_2 + R_L + R_1 \left(\frac{R_2 + R_L}{\omega M} \right)^2}$
SP		$\frac{R_L}{R_2 + R_L + \frac{R_2 R_L^2}{(\omega L_2)^2} + \frac{R_1 R_2^2}{(\omega M)^2} + \frac{R_1 \left(L_2 \omega^2 + \frac{R_L R_2}{\omega^2 L_2} \right)^2}{(\omega M)^2}}$
PS		$\frac{R_L}{R_2 + R_L + R_1 \left(\frac{R_2 + R_L}{\omega M} \right)^2}$
PP		$\frac{R_L}{R_2 + R_L + \frac{R_2 R_L^2}{(\omega L_2)^2} + \frac{R_1 R_2}{(\omega M)^2} + \frac{R_1 \left(L_2 \omega^2 + \frac{R_L R_2}{\omega^2 L_2} \right)^2}{(\omega M)^2}}$
$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ M: αμοιβαία επαγωγή ω: συχνότητα συντονισμού		

Πίνακας 4.
Τοπολογίες αντιστάθμισης SS, SP, PS, PP

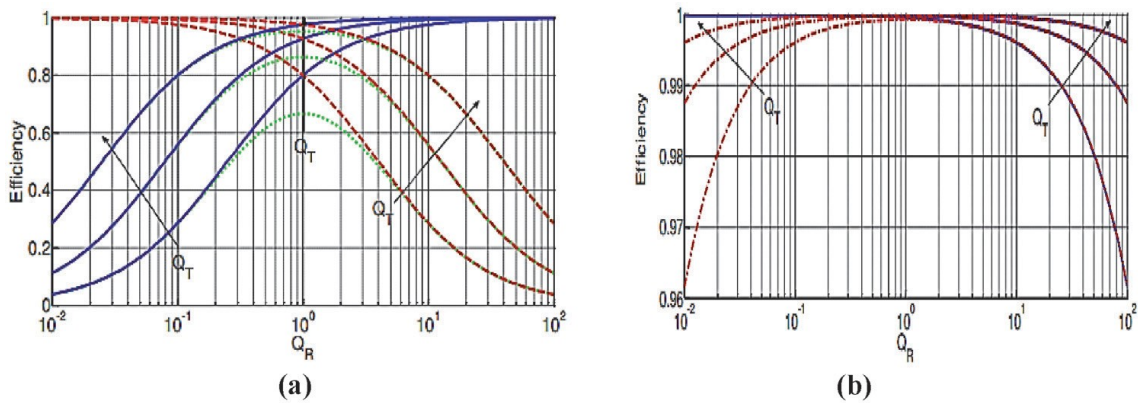


Εικόνα 17.

Χαρακτηριστικά απόδοσης μεταφοράς ισχύος υπό μεταβαλλόμενη αμοιβαία επαγωγή [2.1]

- Τα βασικά στοιχεία του συστήματος WPT είναι δύο συζευγμένα πηνία που επιτρέπουν τη μεταφορά ισχύος μέσω μαγνητικού πεδίου [2.19]. Ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσω του πρωτεύοντος πηνίου και παράγει ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο γύρω του. Στην εγγύτητα του πρωτεύοντος πηνίου, το δευτερεύον πηνίο παρεμποδίζει το μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει μια τάση. Η τιμή της επαγόμενης τάσης εξαρτάται από το μήκος του διάκενου αέρα μεταξύ αυτών των πηνίων, τον αριθμό των στροφών και την τιμή $d\varphi/dt$, όπου φ είναι η μαγνητική ροή. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι σχεδίασης πηνίου στο WPT, όπως Circular, pipe/flat solenoid, Bipolar, Tripolar, Zigzag, DD and DDQ [2.20]-[2.26].

Η αποδοτικότητα συντονισμού WPT με τοπολογία SS και SP και επαγωγικού WPT σε σχέση με το Q_R για διαφορετικές τιμές του Q_T παρουσιάζεται στην Εικόνα 18a, ενώ η αποδοτικότητα συντονισμού WPTS με τοπολογία PS και PP δίνεται στην Εικόνα 18b.



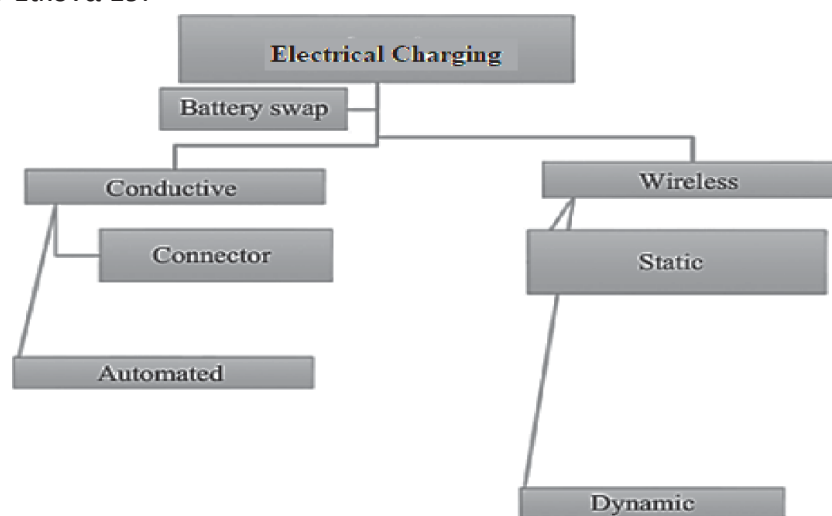
Εικόνα 18.
Αποδοτικότητα συντονιστικών WPTS με τοπολογία SS, SP, PS και PP [2.1]

$$Q_{T,R} = \frac{\omega L_{1,2}}{R_{1,2}} \quad (2.3)$$

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

Όπου $Q_{T,R}$: Συντελεστής ποιότητας εκπομπής και λήψης, αντίστοιχα και k : Συντελεστής σύζευξης.

Τα L_1 και L_2 είναι οι αυτεπαγωγές των πηνίων εκπομπής και λήψης, το M είναι η αμοιβαία επαγωγή τους και τα R_1 και R_2 είναι οι αντιστάσεις των πηνίων. Για την φόρτιση ή την μεταφορά ενέργειας στην ηλεκτρική συσκευή αποθήκευσης του οχήματος, καθιερώνονται και τυποποιούνται πολλές μέθοδοι ηλεκτρικής φόρτισης. Αυτές οι μέθοδοι δίνονται στην Εικόνα 19.



Εικόνα 19.
Ταξινόμηση των τρόπων φορτιστής των EV [2.1]

Επιπλέον, υπάρχουν πολλές άλλες μέθοδοι ηλεκτρικής φόρτισης που κάνουν χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [2.27],[2.28].

(Υποκεφάλαιο 2.4) Συμπέρασμα

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται διάφορες τεχνολογίες WPT και εξηγείται η σημασία του WPT. Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία WPT κερδίζει τεράστια προσοχή λόγω των πλεονεκτημάτων της. Τα συστήματα WPT ταξινομούνται ως μέθοδοι μικροκυμάτων, παροδικών κυμάτων, μαγνητικού συντονισμού, ηλεκτρικού συντονισμού ή ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Επιπλέον, επισημαίνονται επίσης οι πιθανές εφαρμογές ασύρματης φόρτισης EV και διάφορες τεχνικές σύζευξης συζητούνται σε αυτό το κεφάλαιο. Η επαγωγική σύζευξη, η σύζευξη μαγνητικού συντονισμού και οι μέθοδοι ηλεκτρομαγνητική επαγωγής είναι οι κύριες τεχνικές ασύρματης φόρτισης EV. Το κεφάλαιο παρείχε επίσης λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την κατασκευή και τη διαμόρφωση του συστήματος ασύρματης φόρτισης που βασίζεται στη σύζευξη μαγνητικού συντονισμού. Αυτό το κεφάλαιο πραγματεύεται τη βασική επισκόπηση του παρόντος και του μελλοντικού σεναρίου των ηλεκτρικών οχημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

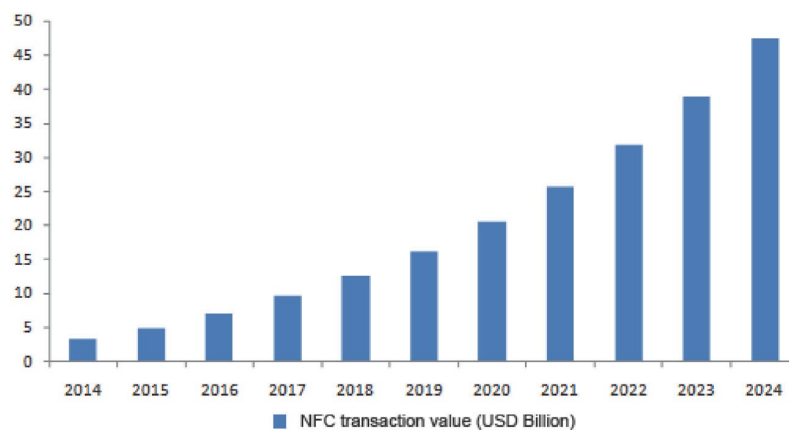
Επικοινωνίες κοντινού πεδίου (NFC) για ασύρματη μεταφορά ενέργειας (WPT)

Η ασύρματη μεταφορά ισχύος (WPT) έχει γίνει η εναλλακτική λύση στις τρέχουσες ηλεκτρονικές συσκευές που βασίζονται σε ογκώδεις μπαταρίες για την παροχή ενέργειας. Η τεχνολογία Near Field Communication (NFC) χρησιμοποιείται εκτενώς για ασύρματη μεταφορά ισχύος, όπου οι συσκευές επικοινωνούν μέσω επαγωγικής σύζευξης, μέσω επαγόμενων μαγνητικών πεδίων μεταξύ των πηνίων εκπομπής και λήψης (κεραίες βρόχου). Λεπτά φύλλα NFC από μαλακά μαγνητικά υλικά εισάγονται μεταξύ κεραιών και μεταλλικής θήκης ασύρματων gadget, όπως κινητά τηλέφωνα ή tablet, για τη μείωση της υποβάθμισης του κέρδους της κεραίας και της απόδοσης ακτινοβολίας λόγω της δημιουργίας ρευμάτων eddy (Δινορεύματα). Για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα της ασύρματης μεταφοράς ισχύος, μαγνητικά υλικά με εξαιρετικές ιδιότητες όπως υψηλή διαπερατότητα, χαμηλή μαγνητική απώλεια και υψηλή ειδική αντίσταση είναι ιδιαίτερα επιθυμητά. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρέχουμε μια επισκόπηση της τρέχουσας κατάστασης της τέχνης, της πρόσφατης προόδου και των μελλοντικών κατευθύνσεων στην ασύρματη μεταφορά ισχύος με βάση το NFC [3.1].

(Υποκεφάλαιο 3.1) Εισαγωγή

Στις αρχές του 21ου αιώνα, μια αναδυόμενη τεχνολογία γνωστή ως επικοινωνία κοντινού πεδίου (NFC) τυποποιήθηκε το 2004 η οποία άλλαξε σταδιακά την αγορά ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης και διευκόλυνε τις ηλεκτρονικές συναλλαγές, τις πληρωμές μέσω κινητού τηλεφώνου, τη μεταφορά δεδομένων κ.λπ. Το NFC αναφέρθηκε για πρώτη φορά από κοινοπραξία της Sony και της NXP Semiconductors το 2002 [3.2]. Από τότε, το NFC έχει γίνει μια δημοφιλής και εξελισσόμενη τεχνολογία την τελευταία δεκαετία και ενσωματώνεται σε όλο και περισσότερες πτυχές της καθημερινότητάς μας από ποτέ. Το Nokia 6131 ήταν η πρώτη συσκευή με δυνατότητα NFC που κυκλοφόρησε το 2006 [3.3], [3.4]. Το 2011, Το M-Biblio του Πανεπιστημίου του Μπρίστολ ξεκίνησε το NFC που επέτρεπε με κωδικούς QR για τους φοιτητές να χρησιμοποιούν πόρους της βιβλιοθήκης [3.4]. Η Samsung παρουσίασε το πρώτο τηλέφωνο Android (Samsung NEXUS S) με δυνατότητα NFC το 2010 [3.3]. Το 2011, κυκλοφόρησε η λειτουργία PayPass για την χρεωστική Master Card RIM (Research in Motion/Black-Berry Limited).

Μερικές από τις πρώτες εφαρμογές που κυκλοφόρησαν είναι οι ετικέτες Samsung TecTile Programmable NFC το 2012, οι έξυπνες ετικέτες Xperia της Sony, το NFC enable Smart Objects το 2011, το NFriendConnector [3.5], το Wallet το 2011 και η κοινοπραξία της Google At&T, της Verizon και της T-mobile το 2012 για χρήση κινητών πορτοφολιών [3.6]. Η λειτουργικότητα με δυνατότητα NFC έχει προστεθεί σε όλα τα νέα προϊόντα της Apple ξεκινώντας από το iPhone XS (Apple Pay). Ο Πίνακας 5 δείχνει την εξέλιξη της αύξησης της χρήσης NFC το 2018–2019 [3.7]. Από το 2010 και μετά, νέες ενδιαφέρουσες εφαρμογές NFC λανσαρίστηκαν κάθε χρόνο στον τομέα της επικοινωνίας από κολοσσούς τεχνολογίας όπως η Google, η Apple, η Samsung, η NXP, κ.λπ. Στην βιομηχανία εισαγάγουν συνεχώς νέες προόδους και βελτιωμένες τεχνολογίες σε συσκευές με δυνατότητα NFC, οι οποίες ανέβασαν την παγκόσμια αγορά στα 4,80 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2015 και αναμένεται να φτάσουν τα 47,42 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2024. Η Εικόνα 20 δείχνει την προβλεπόμενη αξία συναλλαγών NFC από το 2014 έως το 2024 [3.8].



Εικόνα 20.

Εξέλιξη των αξιών των συναλλαγών NFC μεταξύ των ετών 2014 και 2024 [3.1]

Area	Growth (2018–2019)
NFC interactions	27%
NFC activators	22%
NFC reach	50%
No. of interactions per active NFC object	6%

Πίνακας 5.

Εξέλιξη αύξησης χρήσης NFC από το 2018 έως το 2019

(Υποκεφάλαιο 3.2) Μαγνητισμός επικοινωνίας κοντινού πεδίου NFC και RFID

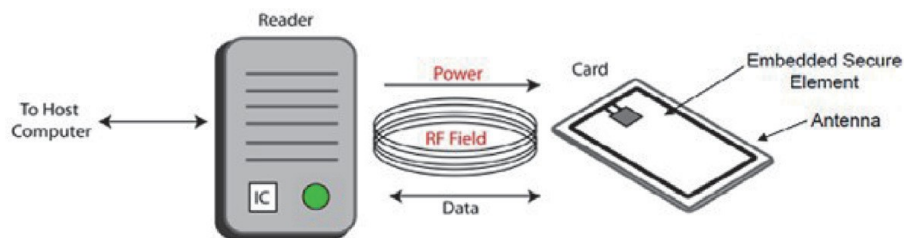
Το NFC ενεργοποιεί ένα υποσύνολο της τεχνολογίας ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (RFID) που λειτουργεί σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων με τρεις διαφορετικές ζώνες — χαμηλές, υψηλές και υπερυψηλές συχνότητες. Η κύρια διαφορά μεταξύ των τεχνολογιών NFC και RFID είναι το εύρος λειτουργίας τους. Το RFID λειτουργεί σε μέτρα εμβέλειας, ενώ το NFC λειτουργεί συνήθως στα τρία έως πέντε εκατοστά. Όλα τα RFID λειτουργούν με βάση την ίδια αρχή της μονόδρομης μεταφοράς δεδομένων από την ετικέτα στον δέκτη και δεν υπάρχει μεταφορά ισχύος αντίστροφα [3.9], [3.10]. Το RFID είναι μια από τις παλαιότερες τεχνολογίες που κάνει χρήση μαγνητικής επικοινωνίας near field. Το 1960, ένα ηλεκτρονικό σύστημα επιτήρησης ειδών (EAS) ήταν η πρώτη εμπορική εφαρμογή της RFID, η οποία χρησιμοποίησε ετικέτα 1 bit και χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση της παρουσίας ή της απουσίας της ετικέτας.

Μεταξύ 1970 και 1980, διεξήχθη περισσότερη εργασία σε συστήματα RFID χρησιμοποιώντας συστήματα μικροκυμάτων και επαγωγικών συστημάτων και, στα τέλη της δεκαετίας του 1970, η μείωση μεγέθους των RFID επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας λογικά κυκλώματα συμπληρωματικών ημιαγωγών οξειδίου μετάλλου (CMOS) χαμηλής ισχύος. Στην δεκαετία του 1990, τα ηλεκτρονικά συστήματα εισπραξης διοδίων ήταν η πρώτη επιτυχημένη εφαρμογή της τεχνολογίας RFID παγκοσμίως [3.11]. Επί του παρόντος, το RFID χρησιμοποιείται σε διάφορους εμπορικούς τομείς όπως το αυτοκίνητο, η γεωργία, οι μεταφορές, το ιατρικό σύστημα, οι κάρτες πληρωμών, η παρακολούθηση, η εφαρμογή αναγνώρισης και οι αλληλεπιδράσεις μικρής εμβέλειας στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) [3.12], [3.13].

Ωστόσο, οι επικοινωνίες που απαιτούν αρχικοποίηση και στα δύο άκρα (π.χ. Peer-to-peer επικοινωνίες όπως συζητείται παρακάτω) δεν μπορούν να υποστηριχθούν από την τεχνολογία RFID. Το NFC είναι μια εξαιρετική λύση σε αυτό το μειονέκτημα του RFID, το οποίο υποστηρίζει επίσης επικοινωνίες peer-to-peer. Το NFC είναι μια τεχνολογία επικοινωνίας μικρής εμβέλειας προς μία κατεύθυνση που παρέχει ασφαλή επικοινωνία μεταξύ συσκευών σε κοντινή περιοχή. Η επικοινωνία κοντινού πεδίου, είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει σε δύο συσκευές σε κοντινή απόσταση να ανταλλάσσουν με ασφάλεια δεδομένα ασύρματα. Το NFC είναι μια τεχνολογία ασύρματης συνδεσιμότητας μικρής

εμβέλειας (< 10 cm) που λειτουργεί σε εύρος υψηλής συχνότητας (HF) με χαμηλό εύρος ζώνης ραδιοκυμάτων, κυρίως στα 13,56 MHz [3.14].

Το NFC αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία - μια κεραία, έναν αναγνώστη και μια ετικέτα. Ένας αναγνώστης (πομπός) στέλνει ένα σήμα στην τυπική συχνότητα NFC των 13,56 MHz και η κεραία ετικέτας λαμβάνει και επεξεργάζεται το σήμα με την ερώτηση και απαντά με τις ζητούμενες πληροφορίες πίσω στον αναγνώστη που στη συνέχεια ερμηνεύονται και αποθηκεύονται ως δεδομένα, μεταξύ ελάχιστων εκατοστών στα 13,56 MHz [3.15], [3.16]. Η Εικόνα 21 δείχνει την μεταφορά δεδομένων μεταξύ αναγνώστη και ετικέτας (card) στα 13.56 MHz βασισμένη στην τεχνολογία NFC [3.17]. Από το 2004 και μετά, το NFC έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές. Οι συναλλαγές πληρωμής Nokia, Apple/Google/Samsung, ασύρματη μετάδοση ενέργειας/δεδομένων και ασύρματη εισαγωγή κάρτας κλειδιού είναι μερικά δημοφιλή παραδείγματα αυτής της τεχνολογίας [3.18]. Αν και η ετικέτα NFC είναι παθητική στη φύση, το NFC μπορεί να μεταφέρει δεδομένα και με τους δύο τρόπους. Η τεχνολογία NFC υποστηρίζει ποικίλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, οι τρεις τυπικοί ρυθμοί είναι: 106, 212 και 424 Kbps [3.19]. Υπάρχει και άλλος ρυθμός 848 Kbps, αλλά δεν συνάδει με τα πρότυπα NFC.

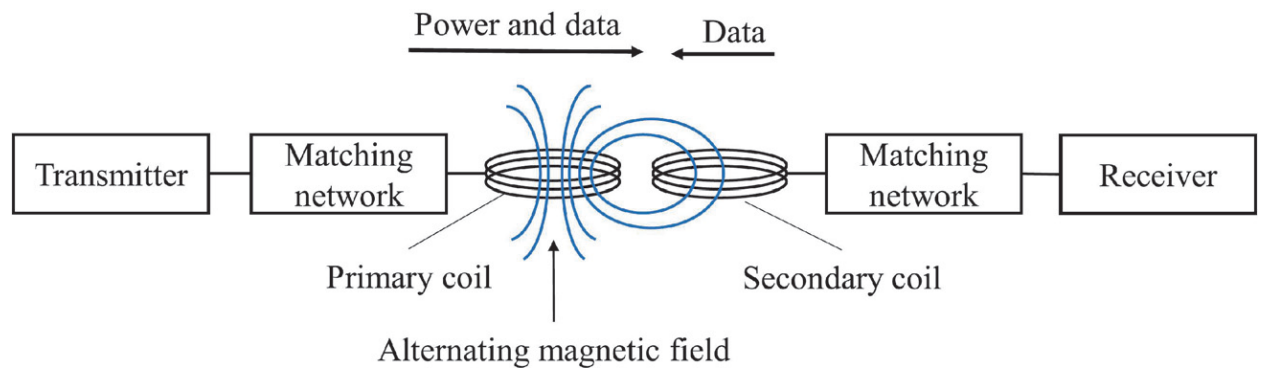


Εικόνα 21.

Ανέπαφη μεταφορά δεδομένων/σήματος μεταξύ αναγνώστη και ετικέτας στα 13,56 MHz με χρήση τεχνολογίας NFC [3.1]

(Υποκεφάλαιο 3.3) Βασική αρχή του NFC

Το NFC λειτουργεί με βάση την αρχή της μαγνητικής επικοινωνίας κοντινού πεδίου. Αυτή η αρχή της επαγωγικής σύζευξης εφαρμόζεται σε όλες τις επικοινωνίες που βασίζονται στον μαγνητισμό κοντινού πεδίου μεταξύ των συσκευών εκπομπής και λήψης. Η Εικόνα 22 δείχνει απλοποιημένη έννοια της επαγωγικής σύζευξης.

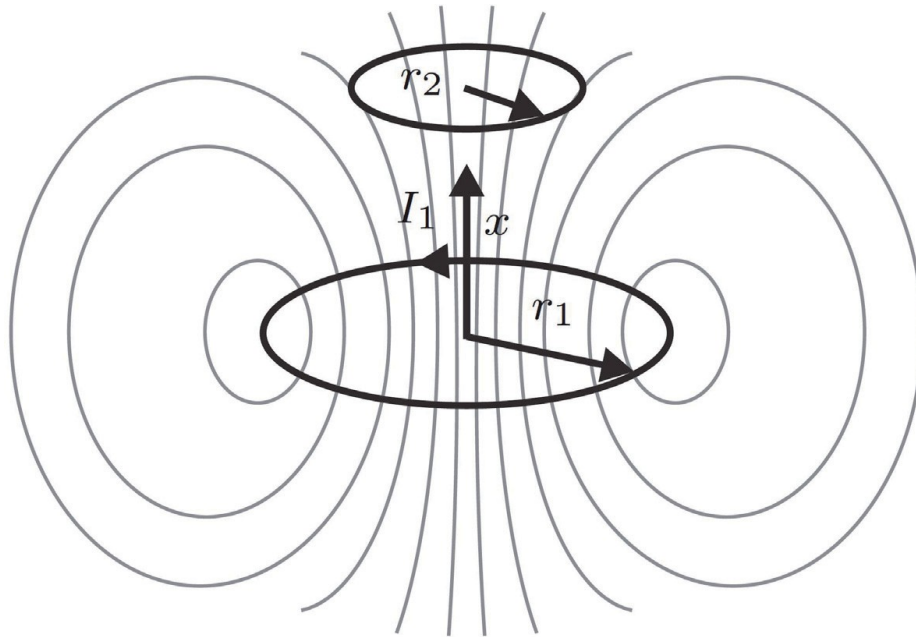


Εικόνα 22.
Επαγωγική σύζευξη μεταξύ των πηνίων πομπού και δέκτη [3.1]

Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday όταν ένα πρωτεύον πηνίο δημιουργεί εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, ένα δευτερεύον πηνίο που τοποθετείται κοντά στο πρωτεύον πηνίο λειτουργεί ως συζευγμένο επαγωγικά με το πρωτεύον πηνίο και δημιουργεί επαγόμενο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτή είναι η βασική αρχή για την ασύρματη μεταφορά ισχύος μεταξύ των συσκευών στην περιοχή κοντινού πεδίου. Η παραπάνω αρχή εφαρμόζεται επίσης σε συστήματα RFID που βασίζονται στην επαγωγική σύζευξη. Υπάρχουν κάποιες διαφορές σε άλλα στοιχεία, όπως το σύστημα δικτύου και τα πρωτόκολλα μεταξύ NFC και γενικών συστημάτων RFID.

(Ενότητα 3.3.α) Σύστημα επαγωγικού πηνίου

Το επαγωγικό συζευγμένο σύστημα NFC μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας εκφράσεις αυτοεπαγωγής, αμοιβαίας επαγωγής και αντιστάσεων [3.20]. Μια γενικευμένη αναλυτική έκφραση για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής πηνίου κυκλικού ή ορθογώνιου σχήματος επεξηγείται παρακάτω. Η Εικόνα 23 παρουσιάζει μια αναπαράσταση κυκλικού πηνίου μονής στροφής ενώ απεικονίζει το μοτίβο μαγνητικού πεδίου που περιβάλλει δύο κυκλικά πηνία [3.21].



Εικόνα 23.

Απεικόνιση συστήματος δύο μαγνητικών επαγωγικών πηνίων (πρωτεύον και δευτερεύον) [3.1]

Η επαγωγή L_0 για ένα κυκλικό πηνίο μονής στροφής μπορεί να δοθεί από την Εξ. (1) όπως φαίνεται παρακάτω [3.22]:

$$L_0 = \mu_0 r \ln \left(\frac{2r}{d} \right) \quad (3.1)$$

όπου μ_0 είναι η διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου, r είναι η ακτίνα του πηνίου και d είναι η διάμετρος του σύρματος. Η αυτεπαγωγή του πηνίου μονής στροφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής του πηνίου πολλαπλών στροφών, L δίνεται από την Εξ. (3.2):

$$L = N^2 L_0 \quad (3.2)$$

$$L = N^2 \mu_0 r \ln \left(\frac{2r}{d} \right) \quad (3.3)$$

όπου N είναι ο αριθμός των σπειρών. Αυτή η εξίσωση παρέχει την κατάλληλη προσέγγιση για έναν κυλινδρικό επαγωγέα, αλλά για την περίπτωση του σπειροειδούς επαγωγέα παρέχει γενικές μελέτες παραμέτρων. Μια λεπτομερής μελέτη για τον υπολογισμό της επαγωγής των σπειροειδών επαγωγέων παρέχεται από τους S. Alturi et al. (2004) [3.23].

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο είναι η αμοιβαία επαγωγή δύο συζευγμένων πηνίων. Η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των δύο πηνίων δίνεται από την Εξ. (3.4).

$$M = \frac{\mu\pi N_1 N_2 r_1^2 r_2^2}{2\sqrt{(r_1^2 + x^2)^3}} \quad (3.4)$$

όπου, N_1 και N_2 είναι ο αριθμός των στροφών στο πρώτο και το δεύτερο πηνίο, αντίστοιχα, r_1 και r_2 είναι η ακτίνα του πρώτου και του δεύτερου πηνίου, αντίστοιχα, x είναι ο αξονικός διαχωρισμός και μ είναι η διαπερατότητα. Η Εξ. (3.4) ισχύει μόνο για $r_2 < r_1 \ll x$ δηλ. το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα I_1 στο πρώτο πηνίο θα πρέπει να είναι ομοιογενές στην αμοιβαία οριοθετημένη περιοχή του 2ου πηνίου. Ο αναλυτικός υπολογισμός για την αμοιβαία επαγωγή για κυλινδρικά πηνία παρουσιάζεται στο [3.24]. Επίσης, ο συντελεστής σύζευξης μεταξύ 2 πηνίων δίνεται στην Εξ. (3.5):

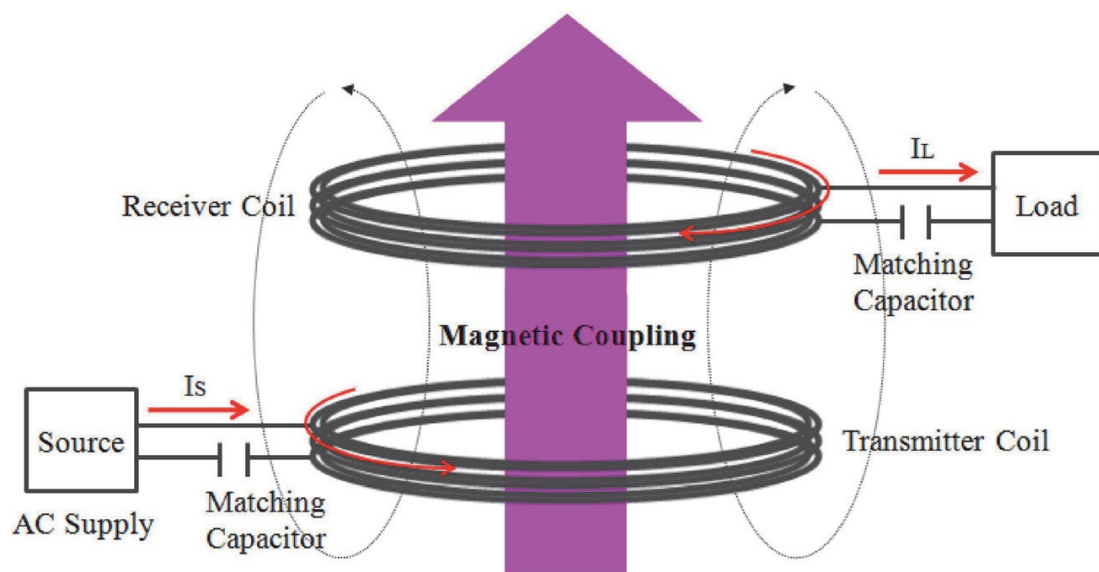
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3.5)$$

όπου k είναι συντελεστής σύζευξης και βρίσκεται μεταξύ 0 και 1, L_1 και L_2 είναι η αυτεπαγωγή του πρώτου και του δεύτερου πηνίου, αντίστοιχα. Στην περίπτωση σύνθετων γεωμετριών, μπορούν να εφαρμοστούν αριθμητικές μέθοδοι για τον υπολογισμό επαγωγικότητας σύνθετων συστημάτων πηνίων [3.25].

(Ενότητα 3.3.β) Απόδοση ασύρματης μεταφοράς ισχύος (WPT)

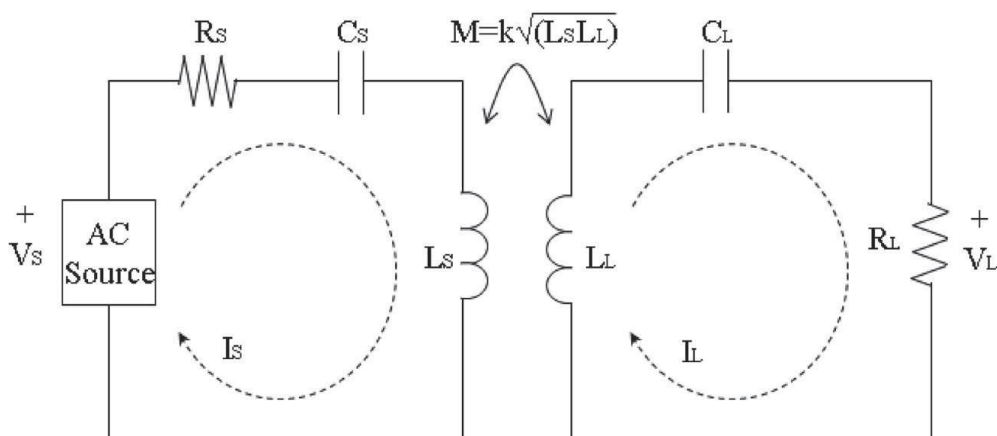
Η απόδοση μεταφοράς ισχύος μεταξύ των κεραιών βρόχου για το σύστημα NFC εκφράζεται ως η αξία που εξαρτάται από την επαγωγική σύζευξη. Καθώς το NFC λειτουργεί σε μικρή απόσταση μεταξύ των κεραιών πομπού και δέκτη, η απόδοσή του εξαρτάται από τη σύζευξη μεταξύ των κεραιών για ασύρματη μεταφορά ισχύος [3.26]. Η Εικόνα 24 δείχνει σχηματικά δύο αμοιβαίες μαγνητικές συνδεδεμένες κεραίες πηνίου για το σύστημα WPT [3.28]. Για να βελτιωθεί η απόδοση ισχύος, απαιτείται προσαρμογή σύνθετης αντίστασης και στις δύο κεραίες πηνίου (δέκτη και πομπό). Σε περίπτωση μαγνητικής σύζευξης μεταξύ κεραιών πηνίου δέκτη και πομπού, δημιουργούνται ρεύματα eddy (δινορεύματα) λόγω εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Αυτό προκαλεί μια μετατόπιση των κορυφών συντονισμού της σύνθετης αντίστασης εισόδου, η οποία μετατοπίζει τη συχνότητα

συντονισμού της μέγιστης μεταφοράς ισχύος. Η εισαγωγή ενός μαλακού μαγνητικού φύλλου φερρίτη υψηλής διαπερατότητας μεταξύ της κεραίας του πηνίου και του μεταλλικού αγωγού μετατοπίζει τη συχνότητα πίσω στην αρχική συχνότητα συντονισμού [3.27]. Όταν και τα δύο κυκλώματα συντονίζονται στην μέγιστη συχνότητα, επιτυγχάνεται η μέγιστη μεταφορά ισχύος. Η Εικόνα 25 απεικονίζει το μοντέλο απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος ασύρματων συστημάτων μεταφοράς ισχύος [3.27].



Εικόνα 24.

Σχέδιο αμοιβαίων μαγνητικών συζευγμένων πηνίων για ασύρματα συστήματα μεταφοράς ισχύος [3.1]



Εικόνα 25.

Απλοποιημένο μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος ασύρματων συστημάτων μεταφοράς ισχύος [3.1]

Η συχνότητα συντονισμού ω για την κεραία πηνίου δίνεται από:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} = \frac{1}{\sqrt{L_L C_L}} \quad (3.6)$$

Βάσει του νόμου της τάσης Kirchhoff και του παραπάνω διαγράμματος κυκλώματος, το V_s μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [3.29]:

$$\begin{bmatrix} j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s & j\omega M \\ j\omega M & j\omega L_L + \frac{1}{j\omega C_L} + R_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Από την Εξ. (7), το V_s μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [3.30]:

$$V_s = I_s \left(R_s + j\omega L_s + \left(\frac{1}{j\omega C_s} \right) \right) - I_L (j\omega M) \quad (3.8)$$

$$0 = I_L \left(j\omega L_L + \left(\frac{1}{j\omega C_L} \right) + R_L \right) - I_s (j\omega M) \quad (3.9)$$

Χρησιμοποιώντας τις Εξ. (3.8) και (3.9) έχουμε:

$$I_L = I_s \left(\frac{j\omega M}{j\omega L_L + \left(\frac{1}{j\omega C_L} + R_L \right)} \right) \quad (3.10)$$

Αντικαθιστώντας την Εξ. (3.10) στην Εξ (3.8) έχουμε:

$$V_s = I_s \left(R_s + j\omega L_s + \left(\frac{1}{j\omega C_s} \right) \right) - I_s \left(\frac{j\omega M}{j\omega L_L + \left(\frac{1}{j\omega C_L} + R_L \right)} \right) (j\omega M) \quad (3.11)$$

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου υπολογίζεται με βάση το μοντέλο απλοποιημένου ισοδύναμου κυκλώματος. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου δίνεται από την σχέση [3.27]:

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} = \frac{((j\omega C_s)R_s + 1 - \omega^2 L_s C_s)((j\omega C_L)R_L + 1 - \omega^2 L_L C_L) - \omega^4 M^2 C_s C_L}{j\omega C_s(j\omega C_L)R_L + 1 - \omega^2 L_L C_L} \quad (3.12)$$

Η απόδοση μεταφοράς ισχύος δίνεται από το λόγο της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_L^2 R_L}{I_s^2 Z_s} \quad (3.13)$$

Για σύστημα σύζευξης συντονισμού, υποθέτουμε $C = C_s = C_L$. Αντικαθιστώντας την Εξ. (3.10)–(3.12) στην Εξ. (3.13), η αποτελεσματική απόδοση ισχύος υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = \left(\frac{j\omega M}{j\omega L_L + \left(\frac{1}{j\omega C_L} + R_L \right)} \right)^2 \frac{R_L}{\left(\left(R_s + j\omega L_s + \left(\frac{1}{j\omega C_s} \right) + \left(\frac{\omega^2 M^2}{j\omega L_L + \left(\frac{1}{j\omega C_L} + R_L \right)} \right) \right) \right)} \quad (3.14)$$

όπου M είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των κεραιών L_s και L_L είναι η αγωγιμότητα των πηνίων πομπού και δέκτη, R_s και R_L είναι ταιριαστός πυκνωτής για πηνία πομπού και δέκτη, R_s και R_L είναι η εσωτερική αντίσταση και η αντίσταση φορτίου στα πηνία και V_s και V_L είναι οι τάσεις πηγής και φορτίου. Η μεταφερόμενη ισχύς είναι μέγιστη στην συχνότητα συντονισμού όταν το ρεύμα φορτίου στο κύκλωμα γίνεται μέγιστο, σε μια δεδομένη συχνότητα συντονισμού. Η εξ. (3.15) περιγράφει την προϋπόθεση για τη μέγιστη απόδοση μεταφοράς ισχύος [3.30]:

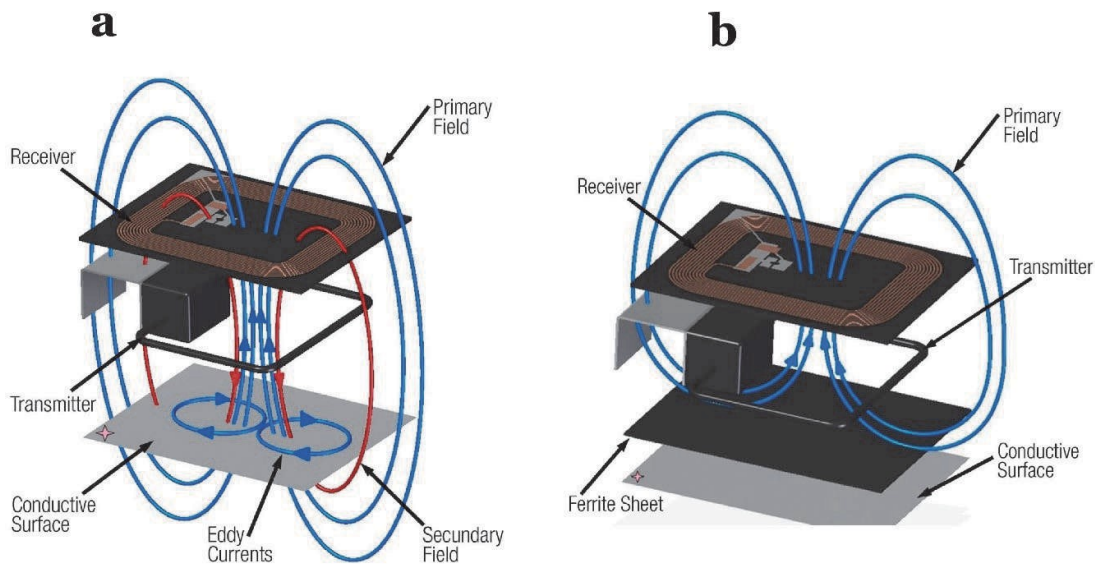
$$M^2 = \frac{R_L^2}{\omega_0^2} \quad (3.15)$$

Η απόδοση ασύρματης μεταφοράς ισχύος με χρήση επαγωγικής σύζευξης μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 90% εντός περιορισμένου εύρους μετάδοσης. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, μέθοδοι όπως η σύζευξη μαγνητικού συντονισμού για WPT έχουν μελετηθεί ευρέως από ερευνητές για την αύξηση της απόδοσης της μετάδοσης ισχύος με μεγαλύτερη εμβέλεια απόστασης. Τα συστήματα πηνίου δύο βρόχων και τεσσάρων βρόχων μελετήθηκαν για σύστημα WPT που βασίζεται σε σύζευξη μαγνητικού συντονισμού [3.31].

Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση μεταφοράς ισχύος, έχουν γίνει αρκετές μελέτες όπως ο χειρισμός σύζευξης βρόχου σε πηνίο [3.30], η αυτόματη προσαρμογή σύνθετης αντίστασης [3.32], ο προσαρμοστικός συντονισμός συχνότητας [3.33], και βελτίωση της WPT για μελλοντικά φορητά ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης χρησιμοποιώντας σύστημα μεγάλου πηνίου πομπού [3.34]. Υπάρχουν μελέτες, οι οποίες επικεντρώθηκαν στην κακή ευθυγράμμιση μεταξύ πηνίου δέκτη και πομπού για εφαρμογές όπως το ασύρματο σύστημα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EV) [3.35] και το ασύρματο σύστημα φόρτισης κινητών τηλεφώνων [3.36], [3.37]. Με την ταχεία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης, παρατηρείται σημαντική αύξηση στις εφαρμογές της τεχνολογίας ασύρματης μεταφοράς ενέργειας που βασίζεται σε NFC.

(Υποκεφάλαιο 3.4) Πρόκληση ρευμάτων eddy : ο ρόλος των υλικών από φερρίτη στο NFC

Καθώς η τεχνολογία NFC βασίζεται στην παραγόμενη αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των κεραίων πηνίου εκπομπής και λήψης, η ποσότητα της μαγνητικής ροής μεταξύ τους θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί για να προκαλέσει περισσότερο ρεύμα, αυξάνοντας έτσι το εύρος μετάδοσης δεδομένων. Ωστόσο, με την τοποθέτηση μιας ετικέτας NFC σε μια μεταλλική επιφάνεια, η αποτελεσματικότητα της μετάδοσης δεδομένων μειώνεται σε μεγάλο βαθμό λόγω της δημιουργίας ρευμάτων eddy (δινορεύματα) εντός της μεταλλικής επιφάνειας [3.38]. Προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση και η εμβέλεια, αλλά και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες λόγω των ρευμάτων eddy, ένα μαλακό μαγνητικό φύλλο φερρίτη απαιτείται να τοποθετηθεί μεταξύ της μεταλλικής θήκης και της κεραίας. Η Εικόνα 26(α) επεξηγεί πώς δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο στην επικοινωνία NFC λόγω της κοντινής αγώγιμης επιφάνειας και η Εικόνα 26(β) δείχνει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται όταν η περιοχή NFC θωρακίζεται με ένα φύλλο φερρίτη από μια αγώγιμη επιφάνεια [3.39].



Εικόνα 26.

- (α) Δινορεύματα που δημιουργούνται στην περιοχή επικοινωνίας NFC λόγω της αγωγίμης πλάκας σε κοντινή απόσταση
 (β) μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στην περιοχή επικοινωνίας NFC με ενσωματωμένη θωράκιση φύλλου φερρίτη [3.1]

Τα φαινόμενα θωράκισης λόγω της εισαγωγής φύλλου φερρίτη είναι φανερά. Για να είναι επιδεκτικά σε NFC, τα φύλλα φερρίτη θα πρέπει να έχουν υψηλή διαπερατότητα και χαμηλή μαγνητική απώλεια για να συγκεντρώνουν τη μαγνητική ροή που δημιουργείται μεταξύ των πηνίων εκπομπής και λήψης (κεραίες) [3.38]-[3.40]. Οι φερρίτες Ni-Zn και οι φερρίτες Mn-Zn είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μαλακά μαγνητικά υλικά για την παρασκευή αυτών των φύλλων φερρίτη NFC σε υψηλές συχνότητες. Οι φερρίτες Ni-Zn έχουν παρουσιάσει υψηλότερο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας έως και 100 MHz σε σύγκριση με τους φερρίτες Mn-Zn (μερικά MHz), γεγονός που περιορίζει τη χρήση φερριτών Mn-Zn σε συσκευές NFC. Οι φερρίτες Mn-Zn έχουν χρησιμοποιηθεί σε μίνι μετατροπείς dc-dc και επαγωγείς ισχύος λόγω του υψηλού κορεσμού, επαγωγής και των χαμηλών απωλειών [3.41].

Για εφαρμογές NFC, οι φερρίτες Ni-Zn προσφέρουν τις κατάλληλες ιδιότητες λόγω της υψηλής αντίστασης, της υψηλής διαπερατότητας, της χαμηλής μαγνητικής απώλειας, της υψηλής συχνότητας λειτουργίας και της χημικής σταθερότητας. Η διαπερατότητα και η χαμηλή μαγνητική απώλεια των φύλλων φερρίτη Ni-Zn βοηθούν στην συγκέντρωση περισσότερης μαγνητικής ροής και στην μείωση των ρευμάτων eddy, μέσω μαγνητικής θωράκισης [3.41], [3.42]. Για τη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων NFC, η χρήση μαγνητικών φύλλων υψηλής διαπερατότητας και χαμηλής απώλειας είναι ιδιαίτερα επιθυμητή.

Οι ιδιότητες μαγνητικής διαπερατότητας και απώλειας των φερριτών Ni-Zn μπορούν να προσαρμοστούν κάνοντας στρατηγικές αλλαγές στην κρυσταλλογραφία, την μορφολογία και την μικροδομή του υλικού. Η σχέση μεταξύ της μιγαδικής σχετικής διαπερατότητας και της συχνότητας ονομάζεται διασπορά διαπερατότητας. Η εξαρτώμενη από την συχνότητα σχετική διαπερατότητα δίνεται από την Εξ. (3.16) [3.43]:

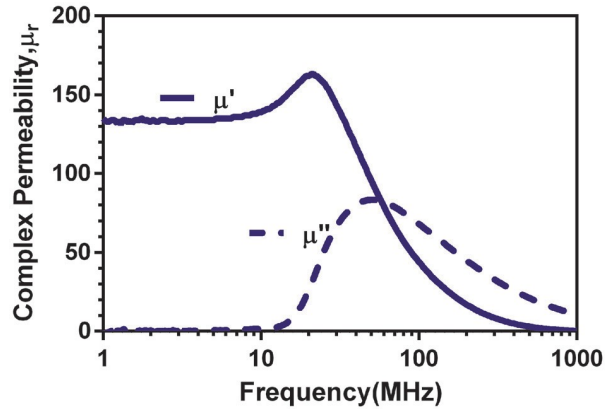
$$\mu_r = \mu' - j\mu'' \quad (3.16)$$

Όπου μ_r είναι ο λόγος της διαπερατότητας του υλικού προς αυτόν του ελεύθερου χώρου (μ_0), μ' και μ'' είναι τα πραγματικά και φανταστικά μέρη της σχετικής διαπερατότητας, αντίστοιχα. Η εφαπτομένη μαγνητικής απώλειας είναι η αναλογία μεταξύ των πραγματικών και των φανταστικών μερών και δίνεται από την Εξ. (3.17):

$$\tan \delta_m = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (3.17)$$

Η Εικόνα 27 δείχνει ένα τυπικό φάσματα σχετικής διαπερατότητας του εύκαμπτου φύλλου φερρίτη [3.44]. Για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση μετάδοσης σήματος μεταξύ συσκευών NFC και να μειωθεί το εύρος μετάδοσης, η σχετική διαπερατότητα (μ') πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 100 και η εφαπτομένη μαγνητικής απώλειας ($\tan \delta_m$) θα πρέπει να είναι μικρότερη από 0,05 στην τυποποιημένη συχνότητα λειτουργίας NFC των 13,56 MHz [3.38]. Και τα δυο μ' και μ'' των υλικών φερρίτη επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την σύνθεση, την μικροδομή και την μορφολογία [3.45].

Το κλειδί για την επίτευξη φερριτών υψηλής απόδοσης για τις στοχευμένες εφαρμογές NFC είναι η προσαρμογή και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της διαδικασίας σύνθεσης τους. Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τρόποι σύνθεσης φερριτών Ni-Zn, όπως η μέθοδος sol-gel, η μέθοδος πρόδρομων κιτρικών, η υδροθερμική σύνθεση και οι μέθοδοι σύνθεσης στερεάς κατάστασης [3.41].



Εικόνα 27.

Μια τυπική αναπαράσταση της σχετικής διαπερατότητας έναντι της συχνότητας ενός φύλλου φερρίτη [3.1]

(Υποκεφάλαιο 3.5) Τρόποι επικοινωνίας NFC

Οι συσκευές NFC μπορούν να επικοινωνούν σε μία από τις δύο λειτουργίες: ενεργητική και παθητική λειτουργία. Αυτές οι λειτουργίες καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο δύο συσκευές με δυνατότητα NFC συνομιλούν μεταξύ τους. Η διάκριση μεταξύ των τρόπων λειτουργίας εξαρτάται από το εάν μια συσκευή παράγει το δικό της πεδίο ραδιοσυχνότητας ή χρησιμοποιεί ενέργεια από άλλη συσκευή. Στην επικοινωνία, ο εκκινητής είναι η συσκευή που ξεκινά την επικοινωνία και ο στόχος είναι η συσκευή που λαμβάνει το σήμα από τον εκκινητή. Οι κύριες διαφορές μεταξύ των κύριων ιδιοτήτων των παθητικών τεχνολογιών (NFC, Chipless RFID και UHF RFID) και των ενεργών τεχνολογιών (Bluetooth και Zigbee) συνοψίζονται στον Πίνακα 6 [3.46]-[3.48].

Χαρακτηριστικό	NFC	Bluetooth	UHF RFID	Chipless RFID	Zigbee
Εύρος Ανάγνωσης	1-2 cm	10-100 m	Εως 15 m με ετικέτες inlay με ευαισθησία ανάγνωσης 2 dBm, 3 m για αισθητήρες UHF με ευαισθησία ανάγνωσης -9 dBm	<50 cm για κωδικοποιημένη συχνότητα και 2-3 m για χρονική κωδικοποίηση UWB	10-100 m
Χωρητικότητα μνήμης	<64 Kbytes	Αρκετά Kbytes. Εξαρτάται από τον μικροελεγκτή	<64 Kbytes	<40 bytes	250-400 Kbytes
Πηγή ενέργειας	Παθητική ή ημιπαθητική	Ενεργητική	Παθητική ή ημιπαθητική	Παθητική	Ενεργητική
Κόστος	Χαμηλό	Χαμηλό	Χαμηλό	Μέτριο	Χαμηλό
Ασφάλεια	Υψηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Χρόνος εγκατάστασης	Λιγότερο από 0.1s	Περίπου 6 s	Λιγότερο από 0.1 s	-	Περίπου 0.5 s
Επανεγγραψιμο ID	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι
Συγκομιδή ενέργειας	Περίπου 10 mW	Όχι	Ελάχιστα μW	Όχι	Όχι
Κόστος αναγνώστη	Χαμηλό	Χαμηλό	Υψηλό	Υψηλό	Χαμηλό
Φάσμα	13.56 MHz	2.4 GHz	433 MHz, 860 - 960 MHz	2.4 - 5.8 GHz	2.4 GHz (Παγκοσμίως), 915 MHz (ως Z-Κύματα στις Η.Π.Α.) και 868 MHz (Ευρώπη)
Εφαρμογή	Εύκολη, ανθρωποκεντρική	Μέτρια, με επίκεντρο τα δεδομένα	Εύκολη, με επίκεντρο τα δεδομένα και τον άνθρωπο	Εύκολη, με επίκεντρο τα δεδομένα και τον άνθρωπο	Εύκολη, με επίκεντρο τα δεδομένα

Πίνακας 6.
Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών ασύρματων τεχνολογιών

(Ενότητα 3.5.α) Ενεργητική λειτουργία

Στην ενεργητική λειτουργία, και οι δύο συσκευές NFC (εκκινήτης και στόχος) στέλνουν και λαμβάνουν σήματα δεδομένων ενεργά χρησιμοποιώντας εναλλασσόμενο πεδίο RF. Και οι δύο συσκευές NFC τροφοδοτούνται και δεν απαιτείται η αποστολή ενέργειας στον στόχο για την εκτέλεση της εργασίας. Παραδείγματα αποτελούν οι συσκευές όπως το smartphone ή μια αυτοτροφοδοτούμενη ετικέτα. Σε ενεργητική λειτουργία, τα δεδομένα αποστέλλονται μεταξύ δύο συσκευών χρησιμοποιώντας διαμόρφωση μετατόπισης πλάτους (ASK), δηλαδή, το βασικό σήμα RF (13,56 MHz) διαμορφώνεται με δεδομένα χρησιμοποιώντας τεχνικές κωδικοποίησης (Κωδικοποίηση Miller και Manchester). Οι ρυθμοί μεταφοράς δεδομένων είναι υψηλότεροι σε αυτήν την λειτουργία και μπορεί να λειτουργήσει καλά σε μεγαλύτερες αποστάσεις [3.49], [3.50].

(Ενότητα 3.5.β) Παθητική λειτουργία

Στην παθητική λειτουργία, ο εκκινήτης στέλνει το πεδίο RF για να τροφοδοτήσει τον στόχο. Με τη σειρά του ο στόχος χρησιμοποίησε το πεδίο RF και στέλνει πίσω τα αποθηκευμένα δεδομένα μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται load modulation (κωδικοποίηση Manchester) [3.51]. Είναι η πιο κοινή λειτουργία για NFC, καθώς δεν απαιτεί μπαταρία και είναι λιγότερο ακριβή [3.52]. Τρεις διαφορετικοί συνδυασμοί επικοινωνιών είναι δυνατοί όταν δύο συσκευές NFC επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα: ενεργητική-ενεργητική, ενεργητική-παθητική και παθητική- ενεργητική, όπως βλέπουμε στον Πίνακα 7 [3.52]:

Συσκευή 1	Συσκευή 2	Δημιουργία Πεδίου RF
Ενεργητική	Ενεργητική	Το πεδίο RF δημιουργείται και από τις 2 συσκευές
Ενεργητική	Παθητική	Το πεδίο RF δημιουργείται μόνο από την συσκευή 1
Παθητική	Ενεργητική	Το πεδίο RF δημιουργείται μόνο από την συσκευή 2

Πίνακας 7.

Διάφορες πιθανές ρυθμίσεις επικοινωνίας μεταξύ δύο συσκευών NFC

Στην περίπτωση της ενεργητικής και παθητικής λειτουργίας, οι συσκευές NFC εκτελούν διαφορετική λειτουργία κατά την επικοινωνία. Αυτό σημαίνει ότι η συσκευή NFC 1 (εκκινήτης) πρέπει να στείλει σήμα πρώτα στην συσκευή NFC 2 (στόχος) για να λάβει την απάντηση από την συσκευή 2 (στόχος). Δεν είναι δυνατό για την συσκευή NFC 2 (Στόχος) να στείλει δεδομένα στην συσκευή 1 χωρίς να λάβει κάποιο αρχικό σήμα.

(Υποκεφάλαιο 3.6) Ετικέτες NFC (NFC Tags)

Σε ένα σύστημα NFC, υπάρχει πάντα ένα στοιχείο που λειτουργεί ως υποδοχέας σε παθητική λειτουργία, όπως η ετικέτα NFC. Η ετικέτα NFC, γνωστή και ως έξυπνη ετικέτα ή ετικέτα πληροφοριών, είναι ένα μικρό, τυπωμένο κύκλωμα που λειτουργεί ως ένα κομμάτι μνήμης αποθήκευσης μαζί με ένα ράδιο-τσιπ συνδεδεμένο σε μια κεραία [3.19]. Λειτουργεί σε παθητική λειτουργία, κατά την οποία δεν έχει δική του πηγή ενέργειας αλλά χρησιμοποιεί ισχύ από την συσκευή NFC που επικοινωνεί μαζί της μέσω μαγνητικής επαγωγής. Οι ετικέτες NFC έχουν μερικές ίντσες απόστασης λειτουργίας, η συσκευή NFC πρέπει να είναι πολύ κοντά για να διαβάσει την ετικέτα. Χρησιμοποιούνται ετικέτες NFC για μια ποικιλία εφαρμογών στην καθημερινή μας ζωή, όπως πληρωμές, εκκίνηση ιστοσελίδες, εικονικές κάρτες επισκεπτών, κλειδωμα/ξεκλειδωμα θυρών, κοινή χρήση φωτογραφιών, βίντεο και άλλων πληροφοριών κλπ. Για την διασφάλιση της διαλειτουργικότητας, έχει καθιερωθεί μια ταξινόμηση για τις ετικέτες από το NFC-Forum που παρέχει τις απαραίτητες προδιαγραφές μεταξύ των διαφόρων παρόχων ετικετών και των κατασκευαστών συσκευών. Επί του παρόντος, υπάρχουν πέντε διαφορετικοί τύποι ετικετών NFC, ανάλογα με τη χωρητικότητα αποθήκευσης, τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων και την ικανότητα ανάγνωσης/εγγραφής [3.2]:

- **Ετικέτες NFC τύπου 1**

Οι ετικέτες τύπου 1 βασίζονται στο πρότυπο ISO14443A με μνήμη 96 byte, επεκτάσιμη έως 2 Kbyte. Ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι 106 Kbps και οι ετικέτες NFC τύπου 1 έχουν δυνατότητα ανάγνωσης/επανεγγραφής.

- **Ετικέτες NFC τύπου 2**

Όπως οι ετικέτες Τύπου 1, οι ετικέτες Τύπου 2 βασίζονται επίσης στο πρότυπο ISO 14443A. Έχουν μνήμη 48 byte, επεκτάσιμη έως 2 Kbyte. Ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων είναι 106 Kbps και οι ετικέτες NFC τύπου 2 έχουν δυνατότητα ανάγνωσης/επανεγγραφής.

- **Ετικέτες NFC τύπου 3**

Οι ετικέτες τύπου 3 είναι ιαπωνικό πρότυπο Sony FeliCa (JIS X 6319-4). Έχει περισσότερη μνήμη και μεγαλύτερη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων σε σύγκριση με τις ετικέτες τύπου 1 & 2. Η μνήμη είναι 2 Kbyte, επεκτάσιμη έως 1 Mbyte με ρυθμό μεταφοράς 212 Kbps.

- **Ετικέτες NFC τύπου 4**

Οι ετικέτες τύπου 4 λειτουργούν και στις δύο επικοινωνίες ISO 14443 A και B. Κατασκευάζονται είτε σε λειτουργίες ανάγνωσης μόνο είτε ανάγνωσης/επαναγραφής. Σε αντίθεση με άλλες ετικέτες, ο χρήστης δεν μπορεί να αποφασίσει τη λειτουργία. Η μνήμη είναι έως και 32 Kbyte και οι ρυθμοί μετάδοσης είναι υψηλοί. Μεταξύ 106 και 424 Kbps.

- **Ετικέτες NFC τύπου 5**

Το NFC-Forum κυκλοφόρησε ετικέτες τύπου 5 πρόσφατα, το 2015, που είναι η νεότερη ετικέτα NFC. Βασίζεται στο ISO 15693. Έχει εύρος εργασίας έως 1,5 m που επιτρέπει την επικοινωνία με ετικέτες RFID.

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που καθορίζουν τον τύπο της ετικέτας NFC που χρησιμοποιείται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως ο τύπος της εφαρμογής, οι απαιτήσεις μνήμης και ρυθμού μετάδοσης, απόσταση εργασίας και κόστος κ.λπ. Ο Πίνακας 8 συνοψίζει τα διάφορα χαρακτηριστικά, όπως πρότυπα, μνήμη, ρυθμός μετάδοσης δεδομένων των πέντε τύπων ετικετών NFC μαζί με τις τυπικές χρήσεις τους.

Εκτός από αυτούς τους πέντε τύπους ετικετών, υπάρχουν ετικέτες NFC τύπου 6 που βασίζονται στα πρότυπα ISO 15693-3 και χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση μηνυμάτων NDEF ή εφαρμογών που εστιάζονται σε κάρτες αναγνώρισης [3.53]. Έχουν χωρητικότητα μνήμης 8 Kbyte και ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων 26,48 Kbps. Η νέα τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που εμφανίστηκε πρόσφατα αξιοποιήθηκε για την ανάπτυξη νέου τύπου ετικετών (π.χ. γραμμωτοί κώδικες NFC της Κονιο) [3.54]. Τα νέα υλικά και οι τεχνολογίες εκτύπωσης μπορούν να ανοίξουν ατελείωτες ευκαιρίες στον τομέα των επικοινωνιών NFC. Την τελευταία δεκαετία, παρατηρείται δραματική αύξηση στα έξυπνα τηλέφωνα και τα tablet που διαθέτουν λειτουργία NFC.

Τύπος	Πρότυπο	Χωρητικότητα	Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων	Δυνατότητα δεδομένων	Διαθέσιμα προϊόντα αγοράς
Type 1	ISO 14443 A	96 bytes, επεκτάσιμη σε 2 Kbytes	106 Kbps	Read-Write Read only	Innovision Topaz, Broadcom, BCM20203
Type 2	ISO 14443 A	48 bytes, επεκτάσιμη σε 2 Kbytes	106 Kbps	Read-Write Read Only	NXP MIFARE Ultralight, NTAG203, NTAG 210 κ.α.
Type 3	JIS X 6319-4	2 Kbytes, επεκτάσιμη σε 1 Mbytes	212 Kbps, 424 Kbps	Read-Write Read Only	Sony FeliCa
Type 4	ISO 14443 A & B	Έως 32 Kbytes	106 to 424 Kbps	Read-Write Read Only (Factory Manufactured)	NXP DESFire, NXP SmartMX-JCOP
Type 5	ISO 15693	Έως 64 Kbytes	26.48 Kbps	Read-Write Read Only	NXP ICODE Series

Πίνακας 8.
Σύνοψη πέντε διαφορετικών τύπων ετικετών NFC

(Υποκεφάλαιο 3.7) Συμπέρασμα και μελλοντικές κατευθύνσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο, πραγματοποιήσαμε μια επισκόπηση της τεχνολογίας NFC, συμπεριλαμβανομένων των τρεχουσών χρήσεων της. Το NFC είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία και βρίσκει εφαρμογές σε κάθε πτυχή της καθημερινής ζωής. Την τελευταία δεκαετία, υπήρξε έκρηξη και στα δύο μέτωπα, στις εφαρμογές της αγοράς και στην έρευνα. Τα επόμενα χρόνια αναμένεται περαιτέρω ανάπτυξη. Υπάρχει συνεχής έρευνα για να γίνει η τεχνολογία NFC πιο προσιτή, εύκολη στη χρήση, καθώς και πιο συμπαγής σε μέγεθος. Υπάρχει έντονη επιθυμία να βελτιωθεί η απόδοση και οι ρυθμοί ασύρματης μεταφοράς ενέργειας αυτών των συσκευών NFC. Η έρευνα νέων υλικών σε συνδυασμό με την εξελισσόμενη τρισδιάστατη εκτύπωση θα μπορούσε να οδηγήσει σε νέους τύπους ετικετών NFC, συσκευών και εφαρμογών. Επί του παρόντος, οι περισσότερες εφαρμογές NFC περιλαμβάνουν τη χρήση κινητών τηλεφώνων και την ανταλλαγή ευαίσθητων προσωπικών οικονομικών και άλλων δεδομένων κατά τη διάρκεια των μεταβιβάσεων.

Οι περισσότεροι χρήστες έχουν επίσης τεράστιο όγκο άλλων σημαντικών δεδομένων. Το γεγονός αυτό εγείρει ανησυχίες σχετικά με το απόρρητο και την ασφάλεια, όπως ανεπιθύμητα μηνύματα, ανεπιθύμητο περιεχόμενο σε τηλέφωνα και ούτω καθεξής. Το απόρρητο των χρηστών θα πρέπει να έχει κορυφαία προτεραιότητα καθώς η τεχνολογία NFC επεκτείνεται σε νέους δρόμους. Συνολικά, το NFC είναι μια συναρπαστική νέα τεχνολογία που θα παρουσιάσει μια μεγάλη ποικιλία νέων εφαρμογών μαζί με ανανεωμένες προκλήσεις τα επόμενα χρόνια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

ΙΣΧΥΟΣ: ΣΕΝΑΡΙΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

(Υποκεφάλαιο 4.1) Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε καινοτόμους υπολογισμούς που συγκροτούν ένα σενάριο εργασίας βασισμένο σε μία μέθοδο προσδιορισμού πραγματικού συντελεστή απόδοσης ισχύος για ασύρματη φόρτιση που παρουσιάστηκε στο [4.1]. Θεωρητικοί υπολογισμοί, σενάριο προσομοίωσης και τελικές πραγματικές τιμές για πεπερασμένη κατασκευή πρότυπου μοντέλου ασύρματης μεταφοράς ισχύος παρουσιάστηκαν σε αυτήν την εργασία. Παρόλα αυτά, η εργασία δεν περιείχε αναλυτικούς υπολογισμούς για όλα τα εμπλεκόμενα μεγέθη, ούτε εξηγούσε τις αποκλίσεις ανάμεσα στις αρχικές θεωρητικές προδιαγραφές.

Η συμβολή της παρούσης πτυχιακής εργασίας έγκειται στην ανάδειξη αυτών των αποκλίσεων μέσω υπολογισμών, και η διερεύνηση για τα όρια της μέγιστης επιτεύξιμης τιμής του συντελεστή απόδοσης για δεδομένα όρια συχνότητας λειτουργίας του συστήματος. Όλα αυτά έχουν υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένα πεπερασμένα όρια της εμπλεκόμενης γεωμετρίας, σύμφωνα πάντα με τις προδιαγραφές της αρχικής καινοτόμου εργασίας [4.1].

(Υποκεφάλαιο 4.2) Σενάριο εργασίας

Η τιμή του συντελεστή ποιότητας για το πρωτεύων κύκλωμα στην τοπολογία SS (Σε σειρά-Σε Σειρά) [4.1] δίνεται από τον εξής τύπο:

$$Q_p = \frac{L_1 R_L}{\omega M^2} \quad (4.1)$$

Για το δευτερεύων η τιμή του συντελεστή ποιότητας κύκλωμα δίνεται από:

$$Q_s = \frac{\omega L_2}{R_L} \quad (4.2)$$

Η ισοδύναμη αντίσταση του φορτίου δίνεται από:

$$R_L = \frac{V_{Load}^2}{P_{Load}} \quad (4.3)$$

οπού P_{Load} είναι η ισχύς που πρέπει να μεταφερθεί και V_{Load} η επιθυμητή τάση φορτίου.

Γνωρίζοντας πως όταν η απολυτή τιμή του $\ln \frac{Q_p}{Q_s}$ είναι ελάχιστη το design είναι το ιδανικό, ένας νέος συντελεστής σχεδίασης K_D ορίζεται. Ο παράγοντας αυτός παίρνει τιμές από 0 έως 1 και δίνεται από τον τύπο [4.2]:

$$K_D = \frac{1}{\left[1 + \left| \ln \frac{Q_p}{Q_s} \right| \right] \left[1 + \left| \ln \frac{f_{max}}{f_{op}} \right| \right]} \quad (4.4)$$

όπου f_{op} είναι η βέλτιστη συχνότητα συντονισμού για κάθε συνδυασμό στροφών και f_{max} είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη συχνότητα.

Παράμετροι	SS	SP	PS	PP
N_1	6	7	1	1
N_2	4	1	6	1
S_1 (mm ²)	94	94	600	620
S_2 (mm ²)	100	350	110	575
L_1 (μH)	109	145.5	3	2.99
L_2 (μH)	50.7	3.22	106.8	3.05
M (μH)	11.88	3.46	2.97	0.49
Μάζα χαλκού (Kg)	34.6	36.2	45	43
F_{op} (kHz)	18	18	11	12
K_ω	18	20	17	16.4
η (%)	98	98	98	98
P_L (kW)	200	200	199	200
V_L (V)	500	500	498	500
V_{C1} (V)	4590	5800	540	540
V_{C2} (V)	2296	500	2960	500
I_p (A)	370	370	2412	2400
I_s (A)	400	1467	400	2220
I_1 (A)	370	370	370	370
I_2 (A)	400	400	398	400
C_1 (μF)	0.7121	0.5842	66.7	59.2
C_2 (μF)	1.5329	25.7	1.927	58.3
I_{C1} (A)	370	370	2380	2408
I_{C2} (A)	400	1412	400	2185
Q_p	8.5	11	6.1	6.7
Q_s	4.6	3.6	5.95	5.5
K_D	0.57	0.42	0.61	0.55

Πίνακας 9.
Βελτιστοποιημένος σχεδιασμός για ICPT 200 kW.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός είναι αυτός που έχει ο υψηλότερος παράγοντας K_D (πλησιέστερος στο ένα). Αυτός ο συντελεστής θα ήταν ένα εάν οι πρωτεύοντες και δευτερεύοντες παράγοντες ποιότητας είναι ίσοι και η συχνότητα λειτουργίας είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη συχνότητα (μέγιστη απόδοση). Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά με αυτόν τον ιδανικό συνδυασμό, τόσο χαμηλότερος είναι ο συντελεστής σχεδίασης.

(Υποκεφάλαιο 4.3) Υπολογισμοί

Βασισμένοι στον πίνακα 9 από την πηγή [4.1] υπολογίζουμε το f_{max} για το ICPT σύστημα 200 kW.

- Για SS ($K_d=0.57$, $Q_p=8.5$, $Q_s=4.6$, $f_{op}=18$):

$$0.57 = \frac{1}{\left[1 + \left|\ln \frac{8.5}{4.6}\right|\right] \left[1 + \left|\ln \frac{f_{max}}{18}\right|\right]}$$

Θέτω το $\ln \frac{f_{max}}{18}$ με u και υπολογίζω ότι $u = \frac{0.08}{0.92}$

Το f_{max} υπολογίζεται ως $f_{max} = e^{\frac{0.08}{0.92}} * 18 \Rightarrow f_{max} = 19.63$ KHz.

Παρόμοια υπολογίζω τα f_{max} για τις τοπολογίες SP PS PP με τις τιμές από τον πίνακα 9:

- Για SP ($K_d=0.42$, $Q_p=11$, $Q_s=3.6$, $f_{op}=18$):

$$0.42 = \frac{1}{\left[1 + \left|\ln \frac{11}{3.6}\right|\right] \left[1 + \left|\ln \frac{f_{max}}{18}\right|\right]}$$

$$u = \frac{0.11}{0.89}$$

Το f_{max} υπολογίζεται ως $f_{max} = e^{\frac{0.11}{0.89}} * 18 \Rightarrow f_{max} = 20.37$ KHz.

- Για PS ($K_d=0.61$, $Q_p=6.1$, $Q_s=5.95$, $f_{op}=11$):

$$0.61 = \frac{1}{\left[1 + \left| \ln \frac{6.1}{5.95} \right| \right] \left[1 + \left| \ln \frac{f_{max}}{11} \right| \right]}$$

$$u = \frac{0.375}{0.625}$$

Το f_{max} υπολογίζεται ως $f_{max} = e^{\frac{0.375}{0.625}} * 11 \Rightarrow f_{max} = 20.04$ KHz.

- Για PP ($K_d=0.55$, $Q_p=6.7$, $Q_s=5.5$, $f_{op}=12$):

$$0.55 = \frac{1}{\left[1 + \left| \ln \frac{6.7}{5.5} \right| \right] \left[1 + \left| \ln \frac{f_{max}}{12} \right| \right]}$$

$$u = \frac{0.34}{0.66}$$

Το f_{max} υπολογίζεται ως $f_{max} = e^{\frac{0.34}{0.66}} * 12 \Rightarrow f_{max} = 20.09$ KHz.

Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης αντίστασης γνωρίζουμε από τον πίνακα 9 ότι στα πλαίσια της υλοποίησης έχουμε:

$$P_{Load} = 200kW \text{ και } V_{Load} = 500 \text{ Volt}$$

Οπότε:

$$R_L = \frac{500^2}{200 * 10^3} \Rightarrow R_L = 1.25 \Omega$$

Αυτός είναι ένας υπολογισμός που δίνεται για πρώτη φορά από την τρέχουσα πτυχιακή εργασία και δεν διευκρινίζεται σε κανένα από τα σενάρια (θεωρητικό, προσομοίωση, υλοποίηση) της αρχικής εργασίας.

Για την τοπολογία SS η σχέση για τον υπολογισμό του Q_p είναι η εξής:

$$Q_p = \frac{L_1 R_L}{\omega M^2}$$

Από τον πίνακα 9 έχω ότι $Q_p = 8.5 \Omega$, $L_1 = 109 \mu H$, $R_L = 1.25 \Omega$, $f_0 = 18 KHz$.

Συνεπώς έχουμε για την αμοιβαία επαγωγή τους εξής υπολογισμούς:

$$8.5 = \frac{109 * 10^{-6} * 1.25}{(2 * \pi * 18 * 10^3) M^2}$$

$$M = \sqrt{\frac{136.5 * 10^{-9}}{960.84}} = 11.92 \mu H$$

Και αυτός ο υπολογισμός δίνεται για πρώτη φορά από την τρέχουσα πτυχιακή εργασία και δεν διευκρινίζεται σε κανένα από τα σενάρια (θεωρητικό, προσομοίωση, υλοποίηση) της αρχικής εργασίας, στην οποία μάλιστα δεν διευκρινίζεται εάν η αμοιβαία επαγωγή υπολογίζεται από τον θεωρητικό της τύπο ή από τον προσεγγιστικό τύπο για τον υπολογισμό του εμβαδού της πεπερασμένης γεωμετρίας που παρατίθεται στο παράρτημα της [4.1].

Ο τύπος της απόδοσης για τις τοπολογίες SS,PS δίνεται από την σχέση [4.1]-[4.3]:

$$\eta = \frac{R_L}{(R_L + R_2) \left(1 + R_1 \frac{(R_2 + R_L)}{\omega_0^2 M^2} \right)}$$

Οπότε για $R_L = 1.25 \Omega$, $R_1 = 0.4 \Omega$, $R_2 = 0.02 \Omega$, $f_0 = 18 KHz$, έχουμε:

$$\eta = \frac{1.25}{(1.25 + 0.02) \left(1 + 0.4 \frac{(0.02 + 1.25)}{(2 * \pi * 18 * 10^3)^2 (11.92 * 10^{-6})^2} \right)}$$

$$\eta = \frac{0.984}{\left(1 + \frac{0.508}{(2 * \pi * 18 * 10^3)^2 (11.92 * 10^{-6})^2} \right)}$$

$$\eta = 0.77 \text{ αρα } 77\%$$

Παρομοίως και για $f_0 = 19.8 \text{ KHz}$ έχουμε:

$$\eta = \frac{1.25}{(1.25 + 0.02) \left(1 + 0.4 \frac{(0.02 + 1.25)}{(2 * \pi * 19.8 * 10^3)^2 (11.92 * 10^{-6})^2} \right)}$$

$$\eta = \frac{0.984}{\left(1 + \frac{0.508}{(2 * \pi * 19.8 * 10^3)^2 (11.92 * 10^{-6})^2} \right)}$$

$$\eta = 0.80 \text{ αρα } 80\%$$

Σε αυτούς τους υπολογισμούς αναδεικνύουμε την σημασία στις πραγματικές τιμές των εμπλεκόμενων παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης της συχνότητας, ως προς την πραγματική τιμή του συντελεστή απόδοσης. Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία διότι οι θεωρητικές προδιαγραφές σε αυτό το σενάριο εργασίας προσδιορίζουν έναν συντελεστή απόδοσης σχεδόν ιδανικό (95%) ενώ η προσομοίωση ρίχνει με την τιμή στο 91.3% αλλά παρόλα αυτά διατηρεί υψηλή την περιοχή των τιμών (>90%). Με τους υπολογισμούς αποδεικνύουμε γιατί η πραγματική προκύπτουσα τιμή είναι αρκετά χαμηλότερη και παραθέτουμε τους ορθολογικούς υπολογισμούς για την τεκμηρίωση αυτής της τιμής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα

Πλέον, είναι φανερό πως μπορούμε να αντιληφθούμε την σημασία αυτής της τεχνολογίας και να αξιοποιήσουμε αφού αδιαμφισβήτητα μπορεί να θεωρεί ως κάτι το αξιόπιστο, αποδοτικό αλλά και φιλικό προς το περιβάλλον, ακριβώς όπως το είχε φανταστεί ο Nikola Tesla και οι πρωτεργάτες της ιδέας αυτής. Κυρίο μέλημα ήταν η εξάλειψη οποιουδήποτε φυσικού μέσου διασύνδεσης και αυτό έχει ήδη επιτευχθεί σε αρκετά μεγάλο βαθμό.

Παρόλο που η τεχνολογία αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί απολυτά ολοκληρωμένη, το μέλλον φαντάζει γόνιμο καθώς τα προβλήματα θα διευθετηθούν τα επόμενα χρόνια και η ασύρματη μεταφορά ισχύος, θα θεμελιωθεί σίγουρα στην καθημερινότητα μας. Τις επόμενες δεκαετίες θα υπάρχει σταδιακή αύξηση στην εφαρμογή ασύρματης μεταφοράς ισχύος, τόσο σε έξυπνες οχηματικές επικοινωνίες, όσο και σε κάθε ανθρώπινη εγκατάσταση που η τροφοδοσία είναι απαραίτητη. Αυτή η μετάβαση είναι σίγουρα κάτι που θα αλλάξει ριζικά και θα βελτιώσει τις ζωές όλων μας.

Στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας, αναδείξαμε την σημασία των ορθολογικών υπολογισμών έναντι ιδεαλιστικών θεωρητικών παραδοχών για την συγκεκριμενοποίηση των πραγματικών τιμών του συντελεστή απόδοσης που αποτελεί την πλέον σημαντική παράμετρο για την ασύρματη μεταφορά ισχύος. Επίσης, παραθέσαμε τον ορθολογικό υπολογισμό της αμοιβαίας επαγωγής, που δείχνει και την σημασία του υπολογισμού του εμβαδού της εμπλεκόμενης γεωμετρίας, κάτι που ιδίως στις οχηματικές επικοινωνίες, όπου οι επιφάνειες είναι περιορισμένες λόγω της ευρύτερης διάστασης ενός έξυπνου αυτοκινήτου, έχει πολύ μεγαλύτερη σημασία.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles—A Review. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9552904>
- [1.2] H.-Y. Mak, Y. Rong, and Z.-J. M. Shen, "Infrastructure planning for electric vehicles with battery swapping," *Manage. Sci.*, vol. 59, no. 7, pp. 1557–1575, 2013.
- [1.3] V. Etacheri, R. Marom, R. Elazari, G. Salitra, and D. Aurbach, "Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: A review," *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, no. 9, pp. 3243–3262, Aug. 2011.
- [1.4] T. M. Fisher, K. B. Farley, Y. Gao, H. Bai, and Z. T. Tse, "Electric vehicle wireless charging technology: A state-of-the-art review of magnetic coupling systems," *Wireless Power Transf.*, vol. 1, no. 2, pp. 87–96, 2014.
- [1.5] K. Barry. Electric Buses Test Wireless Charging in Germany. Accessed: Feb. 13, 2021. [Online]. Available: <https://www.wired.com/2013/03/wireless-charging-bus-Germany>
- [1.6] W. C. Brown, "The history of wireless power transmission," *Sol. Energy*, vol. 56, no. 1, pp. 3-21, Jan. 1996.
- [1.7] N. Tesla, "Apparatus for transmitting electrical energy," U.S. Patent 1 119 732 A, Dec. 1, 1914
- [1.8] S. C. Nambiar, "Design of a wireless power transfer system using electrically coupled loop antennas," M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Virginia Polytech. Inst. State Univ., 2015. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10919/54003>
- [1.9] Conductix-Wamper. Inductive Power Transfer IPT-Charge. Accessed: Jan. 1, 2021. [Online]. Available: https://www.conductix.us/en/products/inductive-power-transfer-iptr/inductive-power-transfer-iptr-charge?parent_id=5798
- [1.10] A. Brecher, D. Arthur, and U.S. Department of Transportation and Volpe National Transportation Systems Center. (2014). Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications. Accessed: Jan. 1, 2021. [Online]. Available: https://www.transit.dot.gov/sites/fta.dot.gov/files/FTA_Report_No._0060.pdf
- [1.11] V. P. Galigekere, J. Pries, O. C. Onar, G.-J. Su, S. Anwar, R. Wiles, L. Seiber, and J. Wilkins, "Design and implementation of an optimized 100 kW stationary wireless charging system for EV battery recharging," in *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Exposit. (ECCE)*, Sep. 2018, pp. 3587-3592.

- [1.12] J. Pries, V. P. N. Galigekere, O. C. Onar, and G.-J. Su, "A 50-kW three-phase wireless power transfer system using bipolar windings and series resonant networks for rotating magnetic fields," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 35, no. 5, pp. 4500-4517, May 2020.
- [1.13] O. C. Onar, S. L. Campbell, L. E. Seiber, C. P. White, and M. Chinthavali, "A high-power wireless charging system development and integration for a Toyota RAV4 electric vehicle," in *Proc. IEEE Transp. Electrific. Conf. Expo (ITEC)*, Jun. 2016, pp. 1-8.
- [1.14] J. Boys and G. Covic, "Inductive power transfer systems (IPT) fact sheet: No. 1-basic concepts," Qualcomm, USA, Tech. Rep. 1, 2013.
- [1.15] QualcommHalo. (2011). First Electric Vehicle Wireless Charging Trial Announced for London. [Online]. Available: <http://www.qualcomm.com/media/releases/2011/11/10/fifirstelectric-vehiclewireless-chargingtrial-announced-london>
- [1.16] J. Tritschler, S. Reichert, and B. Goeldi, "A practical investigation of a high power, bidirectional charging system for electric vehicles," in *Proc. 16th Eur. Conf. Power Electron. Appl.*, Aug. 2014, pp. 1-7.
- [1.17] WiTricity Electric Vehicle Charger. [Online]. Available: [WiTricity Electric Vehicle Charger](#)
- [1.18] D. Bateman et al., "Electric road systems: A solution for the future," TRL Publications, TRL Acad. Rep. PPR875, 2018.
- [1.19] M. Dynamics. Fully Automated Inductive Charging for All Types of Electric Buses. Accessed: Nov. 18, 2020. [Online]. Available: <https://www.tesc.psu.edu/assets/docs/momentum-dynamics-wirelessvehicle-charging.pdf>
- [1.20] M. Suzuki, K. Ogawa, F. Moritsuka, T. Shijo, H. Ishihara, Y. Kanekiyo, K. Ogura, S. Obayashi, and M. Ishida, "Design method for low radiated emission of 85 kHz band 44 kW rapid charger for electric bus," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)*, Mar. 2017, pp. 3695-3701.
- [1.21] R. Bosshard and J.W. Kolar, "Multi-objective optimization of 50 kW/85 kHz IPT system for public transport," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 4, no. 4, pp. 1370-1382, Dec. 2016
- [1.22] A. Vesco, *Handbook of Research on Social, Economic, and Environmental Sustainability in the Development of Smart Cities*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2015.

- [1.23] D. Herron, "Wireless electric car charging demo on Chevy Volt could enable 24/7 electric trucks," Torque News, 2012. Accessed: Feb. 10, 2021.
- [1.24] Wireless Charging in Action. Accessed: Nov. 19, 2020. [Online]. Available: <https://momentumdynamics.com/>
- [1.25] (2017). Electric Bus with Toshiba's Wireless Charger Cuts CO2 Emissions by up to 60% in Field Testing. [Online]. Available: http://www.toshiba.co.jp/about/press/2017_03/pr1702.htm
- [1.26] M. Kesler, "Highly resonant wireless power transfer: Safe, efficient, and over distance," Microsoft Word, Witricity Corp., White Paper 20161218.docx, 2013, pp. 1-32.
- [1.27] (2019). DRIVE 11 Evaluation System: Wireless charging for EV & PHEV Platforms. [Online]. Available: https://witricity.com/wpcontent/uploads/2019/11/DRIVE_11_20191104-1.pdf
- [1.28] S. Li and C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 3, no. 1, pp. 4-17, Mar. 2015.
- [1.29] S. Moon and G.-W. Moon, "Wireless power transfer system with an asymmetric four-coil resonator for electric vehicle battery chargers," IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 10, pp. 6844-6854, Oct. 2016.
- [1.30] C. Qiu, K. T. Chau, C. Liu, and C. C. Chan, "Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging," in Proc. World Electr. Vehicle Symp. Exhib. (EVS27), Nov. 2013, pp. 1-9.
- [1.31] I. Villar, A. Garcia-Bediaga, U. Iruretagoyena, R. Arregi, and P. Estevez, "Design and experimental validation of a 50 kW IPT for railway traction applications," in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), Sep. 2018, pp. 1177-1183.
- [1.32] R. Walli. ORNL Surges Forward With 20-Kilowatt Wireless Charging for Vehicles. Accessed: Feb. 27, 2016. [Online]. Available: <https://www.ornl.gov/news/ornl-surges-forward-20-kilowatt-wirelesscharging-vehicles>
- [1.33] Primove. Accessed: Sep. 25, 2020. [Online]. Available: <http://primove.bombardier.com/>
- [1.34] R. Tavakoli and Z. Pantic, "Analysis, design, and demonstration of a 25-kW dynamic wireless charging system for roadway electric vehicles," IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 6, no. 3, pp. 1378-1393, Sep. 2018.

- [1.35] G. A. Covic and J. T. Boys, "Modern trends in inductive power transfer for transportation applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 1, no. 1, pp. 2841, Mar. 2013.
- [1.36] K. Lee, Z. Pantic, and S. M. Lukic, "Reactive field containment in dynamic inductive power transfer systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4592-4602, Sep. 2014.
- [1.37] J. H. Kim, B.-S. Lee, J.-H. Lee, S.-H. Lee, C.-B. Park, S.-M. Jung, S.-G. Lee, K.-P. Yi, and J. Baek, "Development of 1-MW inductive power transfer system for a high-speed train," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 6242-6250, Oct. 2015.
- [1.38] 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. Topics Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 18-36, Mar. 2015.
- [1.39] INTIS. Accessed: Oct. 5, 2020. [Online]. Available: <http://www.intis.de/intis/mobility.html>
- [1.40] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, and E. Hossain, "Dynamic spectrum access in cognitive radio networks with RF energy harvesting," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 102-110, Jun. 2014.
- [1.41] Z. Popovic, "Cut the cord: Low-power far-field wireless powering," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 14, no. 2, pp. 55-62, Mar. 2013.
- [1.42] K. Jin and W. Zhou, "Wireless laser power transmission: A review of recent progress," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 4, pp. 3842-3859, Apr. 2019.
- [2.1] Wireless Power Charging in Electrical Vehicles. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/chapters/75267>
- [2.2] Tesla N. Apparatus for Transmitting Electrical Energy. New York, USA Patent 1119732; 1914.
- [2.3] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, Joannopoulos J, Fisher P, Soljacic M. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances. *Science* 2007;317(5834):83-6.
- [2.4] Dai J, Ludois DC. A Survey of Wireless Power Transfer and a Critical Comparison of Inductive and Capacitive Coupling for Small Gap Application. *IEEE Trans Power Electron* 2015;30(11):6017-29.
- [2.5] Kim J, Son H-c, Kim D-h, Park Y-j. Optimal Design of a Wireless Power Transfer System with Multiple Self-Resonators for an LED TV. *IEEE Trans Consum Electron* 2012;58(3):775-80.
- [2.6] Moon J, Hwang H, Jo B, Kwon C-K, Kim T-G, Kim S-W. Design and Implementation of a high-efficiency 6.78MHz resonant wireless power transfer system with a 5W fully integrated power receiver. *IET*

Power Electron 2017;10(5):577–8.

- [2.7] Yengi Y., Khan S. A., and Küçük K., Design and performance analysis of information centric network for Internet of Things, 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Antalya, 2017, pp. 1–4.
- [2.8] Agrawal K, Jegadeesan R, Guo Y-X, Thakor NV. Wireless Power Transfer Strategies for Implantable Bioelectronics: methodological Review. IEEE Rev Biomed Eng 2017;10:1–28.
- [2.9] Erdoğan H., Küçük., Khan S. A., Endüstriyel IoT Bulut Uygulamaları için Düşük Maliyetli Modbus/MQTT Ağ Geçidi Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi . Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2020, (7) (1), 170–183.
- [2.10] Trevisan R, Costanzo A. A UHF Near-Field Link for Passive Sensing in Industrial Wireless Power Transfer Systems. IEEE Trans Microw Theory Tech 2016;64(5):1634–43.
- [2.11] M, Masamura T. The wireless power transfer systems using the Class E push-pull inverter for industrial robots. In: IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Taipei, Taiwan; 2017.
- [2.12] Li S, Mi CC. Wireless power transfer for electric vehicle applications. Journal Emerg Sel Top Power Electron 2015;3 (1):4–17. Shinohara N. Wireless Power Transfer. Stevenage: IET; 2018.
- [2.13] Shinohara N. Wireless Power Transfer. Stevenage: IET; 2018.
- [2.14] Society of Automotive Engineers (SAE). J2954 - Wireless Power Transfer for Light Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology, SAE international, Warrendale, USA; 2016.
- [2.15] Nassim I, Basa Arsoy A, & Çakır B. (2018). Load Profile-Based Power Loss Estimation for Distribution Networks. *Electrica*, 18(2), 275–283.
- [2.16] Nassim I, Basa A, Çakır B. A Simple Method to Estimate Power Losses in Distribution Networks. In Proceedings of the 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, 30 November–2 December 2017.
- [2.17] Vilathgamuwa D, Sampath J. Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Vehicles (EVs) - Present and Future Trends. In: Rajakaruna S, Gosh A, Shahnia F, editors. Plug In Electric Vehicles in Smart Grids Integration. Techniques Singapore: Springer Science+Business Media Singapore; 2015. p. 33–61.
- [2.18] Sallán J, Villa JL, Lombart A, Sanz JF. Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge. IEEE Trans Ind Electron 2009;56(6):2140–9.
- [2.19] Nassim I, and K Yahya. Simulink model of transformer differential protection using phase angle difference based algorithm", *Inter. J. of Power Electronics and Drive Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 1088–1098, 2020.

- [2.20] Budhia M, Covic GA, Boys JT. Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems. *IEEE Trans Power Electron* 2011;26(11): 3096–108.
- [2.21] Nagatsuka Y, Ebara N, Kaneko Y, Abe S, Yasuda T. Compact Contactless Power Transfer System for Electric Vehicles. In: *International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -, Hokkaido, Japan; 2010.
- [2.22] Zaheer A, Kacprzak D, Covic GA. ABipolar Receiver Pad in a Lumped IPT System for Electric Vehicle Charging Applications. In: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, USA; 2012.
- [2.23] Kim S, Covic GA, Boys JT. Comparison of Tripolar and Circular Pads for IPT Charging Systems. *IEEE Trans Power Electron* 2018;33(7): 6093–103.
- [2.24] Alam MM, Mekhilef S, Seyedmahmoudian M, Horan B. Dynamic Charging of Electric Vehicle with Negligible Power Transfer Fluctuation. *Energies* 2017;10(701).
- [2.25] Budhia M, Boys JT, Covic GA, Huang C-Y. Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems. *IEEE Trans Ind Electron* 2013;60(1): 318–28.
- [2.26] Machura P, Li Q. A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;104:209–234. doi:10.1016/j.rser.2019.01.027
- [2.27] K. Yahya, M. Z. Bilgin, T. Erfidan, and B. Cakir, “Improving the performance of the MPPT for thermoelectric generator system by using Kalman filter,” in *Proc. 5th Int. Conf. Electr. Electron. Eng. (ICEEE)*, Istanbul, Turkey, May 2018, pp. 129–132, doi: 10.1109/ICEEE2.2018.8391315.
- [2.28] Yahya K, Bilgin MZ, Erfidan T. Practical implementation of maximum power tracking based short-current pulse method for thermoelectric generators systems. *J Power Electron* 2018;18(4):1201–10
- [3.1] Near-Field Communications for WPT: An overview. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/350390533_Near-Field_Communications_NFC_for_Wireless_Power_Transfer_WPT_An_Overview
- [3.2] Coskun, V., B. Ozdenizci, and K.J.W. p.c. Ok, A survey on near field communication (NFC) technology. 2013.71(3): p. 2259–2294.
- [3.3] Blog, T. The Evolution of Near Field Communication. Available from: <https://www.techpats.com/evolution-near-field-communication-nfc>
- [3.4] Bae, K.-J., et al., The ubiquitous library for the blind and physically handicapped: A case study of the LG Sangnam Library, Korea. 2007. 33(3): p. 210–219.
- [3.5] Exchange, T. innovative examples of NFC technology. January 22, 2013; Available from: <https://exchange.telstra.com.au/6-innovative-examples-of-nfc-technology/>
- [3.6] Hamblen, M. A short history of NFC. 2012; Available from:

<https://www.computerworld.com/article/2493888/a-short-history-of-nfc.html>

- [3.7] Bite, B. NFC Usage and Statistics for 2020. November 13, 2020; Available from: <https://www.bluebite.com/nfc/the-state-of-nfc-in-2020>
- [3.8] Report, M.A., The exponential growth of mobile internet application and advancement of 3G and 4G networks is anticipated to drive the market. October, 2016.
- [3.9] Want, R.J.I.p.c., An introduction to RFID technology. 2006. 5(1): p. 25–33.
- [3.10] Kim, H.-J., et al., Review of near-field wireless power and communication for biomedical applications. 2017. 5: p. 21264–21285.
- [3.11] Landt, J.J.I.p., The history of RFID. 2005. 24(4): p. 8–11.
- [3.12] Atzori, L., A. Iera, and G. Morabito, The Internet of Things: A survey Comput. Netw. 2010.
- [3.13] ZARE, M.Y., RFID: a bibliographic literature review with future research directions. 2014.
- [3.14] Arcese, G., et al., Near field communication: Technology and market trends. 2014. 2(3): p. 143–163.
- [3.15] Coskun, V., K. Ok, and B. Ozdenizci, Near field communication (NFC): From theory to practice. 2011: John Wiley & Sons.
- [3.16] Suparta, W.J.J.o.C.S., Application of near field communication technology for mobile airline ticketing. 2012. 8(8): p. 1235.
- [3.17] Sabella, R.R. Near Field Communication. Available from: <https://www.dummies.com/category/articles/electronics-33543/>
- [3.18] Moon, W.Y. and S.D. Kim. A payment mediation platform for heterogeneous FinTech schemes. in 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). 2016. IEEE.
- [3.19] Curran, K., et al., Near Field Communication. 2012. 2(3).
- [3.20] Huang, H.-P., C.-S. Chen, and T.-Y. Chen. Mobile diagnosis based on RFID for food safety. in 2006 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. 2006. IEEE.
- [3.21] Reinhold, C., et al., Efficient antenna design of inductive coupled RFID-systems with high power demand. 2007. 2(6): p. 14–23.
- [3.22] Finkenzeller, K., RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication. 2010: John Wiley &

sons.

- [3.23] Atluri, S. and M. Ghovanloo. Design of a wideband power-efficient inductive wireless link for implantable biomedical devices using multiple carriers. in Conference Proceedings. 2nd International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, 2005. 2005. IEEE.
- [3.24] Hannakam, L.J.A.f.E., Berechnung der gegeninduktivität achsenparalleler zylinderspulen. 1967. 51(3): p. 141–154.
- [3.25] Yee, K.J.I.T.o.a. and propagation, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. 1966. 14(3):p. 302–307.
- [3.26] Warnick, K.F., et al., Optimizing power transfer efficiency and bandwidth for near field communication systems. 2012. 61(2): p. 927–933.
- [3.27] Kong, S., et al. Analytical expressions for maximum transferred power in wireless power transfer systems. in 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2011. IEEE.
- [3.28] Shen, F., et al. Circuit analysis of wireless power transfer by “coupled magnetic resonance”. in IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2009). 2009. IET.
- [3.29] Liu, X., et al., Analysis of efficiency improvement in wireless power transfer system. 2017. 11(2): p. 302–309.
- [3.30] Agcal, A., S. Ozcira, and N. Bekiroglu, Wireless power transfer by using magnetically coupled resonators, in Journal of Wireless Power Transfer: Fundamentals and Technologies. 2016. p. 49–66.
- [3.31] Dang, Z., Magnetic resonance coupled wireless power transfer systems. 2013, University of Alabama Libraries.
- [3.32] Beh, T.C., et al., Automated impedance matching system for robust wireless power transfer via magnetic resonance coupling 2021. 60(9): p. 3689-6398
- [3.33] Sample, P., D.T. Meyer, and J.R.J. I.T.o.i.e. Smith, Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer. 2010. 58 (2): 544–554.
- [3.34] Hoang, H, et al., An adaptive technique to improve wireless power transfer for consumer electronics. 2012. 58 (2): p. 327–332.
- [3.35] Moon, S. and G.-W.J.I.T.o.P.E. Moon, Wireless power transfer system with an asymmetric four-coil resonator for electric vehicle battery chargers. 2015. 31 (10): p. 6844–

6854.

- [3.36] Zhong, W., C.K. Lee, and S.R.J.I.t.o. i.e. Hui, General analysis on the use of Tesla's resonators in domino forms for wireless power transfer. 2011. 60(1): p. 261–270.
- [3.37] Huang, M., Y. Lu, and R.P.J.I.T.o.P. E. Martins, A reconfigurable bidirectional wireless power transceiver for battery-to-battery wireless charging. 2018. 34(8): p. 7745–7753.
- [3.38] Lee, W., et al., A simple wireless power charging antenna system: Evaluation of ferrite sheet. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017. 53(7): p. 1–5.
- [3.39] Victoria, J., et al., Improving the Efficiency of NFC Systems Through Optimizing the Sintered Ferrite Sheet Thickness Selection. 2020. 62(4): p. 1504–1514. Lee, B., et al., NFC antenna design for low-permeability ferromagnetic material. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2014. 13: p. 59–62.
- [3.40] Lee, B., et al., NFC antenna design for low-permeability ferromagnetic material. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2014. 13: p. 59–62.
- [3.41] Tsutaoka, T., Frequency dispersion of complex permeability in Mn–Zn and Ni–Zn spinel ferrites and their composite materials. *Journal of Applied Physics*, 2003. 93(5): p. 2789–2796.
- [3.42] Wu, X., et al., Influence of particle size on the magnetic spectrum of NiCuZn ferrites for electromagnetic shielding applications. *Journal of Magnetism Magnetic Materials*, 2016. 401: p. 1093–1096.
- [3.43] Kumar, S., T. Shinde, and P. Vasambekar, Engineering High Permeability: Mn–Zn and Ni–Zn Ferrites. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2015. 12(4): p. 851–859.
- [3.44] Lathiya, P., M. Kreuzer, and J. Wang, RF complex permeability spectra of Ni–Cu–Zn ferrites prepared under different applied hydraulic pressures and durations for wireless power transfer (WPT) applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020. 499: p. 166273.
- [3.45] Lathiya, P. and J. Wang, Effects of the Sintering Temperature on RF Complex Permeability of NiCuCoZn Ferrites for Near-Field Communication Applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019. 55(2): p. 1–4.
- [3.46] Lazaro, A., et al., NFC Sensors Based on Energy Harvesting for IoT Applications, in *Recent Wireless Power Transfer Technologies*. 2019, IntechOpen.
- [3.47] Cao, Z., et al., Near-field communication sensors. 2019. 19(18): p. 3947.

- [3.48] Coskun, V., B. Ozdenizci, and K.J.S.Ok, The survey on near field communication. 2015. 15(6): p. 13348– 13405.
- [3.49] Mareli, M., et al. Experimental evaluation of NFC reliability between an RFID tag and a smartphone. in 2013 Africon. 2013. IEEE.
- [3.50] Paus, A.J.C.f.C.S., Near field communication in cell phones. 2007. 24(8).
- [3.51] SERIALIO.COM. The NFC Forum Standard. 1996–2020; Available from: <https://serialio.com/support/what-is-near-field-communication-nfc/>
- [3.52] Haselsteiner, E. and K. Breitfuß. Security in near field communication (NFC). in Workshop on RFID security. 2006. sn.
- [3.53] McHugh, S. and K.J.S.L.o.E.T.i.L. Yarmey, Near field communication: recent developments and library implications. 2014. 1(1): p. 1–93.
- [3.54] Verimatrix. Inside Secure NFC SOLUTIONS NOW KOVIO RF Near-Field Communications (NFC) for Wireless Power Transfer (WPT): An Overview DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.96345> BARCODE READY REVOLUTIONARY “PRINTED SILICON” TAGS ENABLE ITEM-LEVEL INTERACTION BETWEEN CONSUMERS AND BRANDS. 2012.
- [4.1] Sallán, J., Villa, J. L., Llombart, A., & Sanz, J. F. (2009). Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(6), 2140-2149.
- [4.2] O. H. Stielau and G. A. Covic, “Design of loosely coupled inductive power transfer systems,” in Proc. Int. Conf. Power Syst., Dec. 2000, pp. 85–90.
- [4.3] H. W. Sams, Handbook of Electronic Tables and Formulas, 6th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Mar. 1986.