



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μαγνητικά υλικά για την ασύρματη φόρτιση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πρίντζιος Π. Νικόλαος

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μαγνητικά υλικά για την ασύρματη φόρτιση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πρίντζιος Π. Νικόλαος

Επιβλέπων : Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Νοεμβρίου 2023.

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

.....
Ιωάννης Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Χριστοδούλου
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2023

.....
Νικόλαος Π. Πρίντζιος

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

Copyright © Νικόλαος Πρίντζιος, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη μαγνητικών υλικών για την εφαρμογή της ασύρματης φόρτισης. Για αυτόν το σκοπό προσομοιώθηκε μέσω του λογισμικού Ansys Maxwell μία διάταξη ώστε να πραγματοποιηθεί μαγνητοστατική ανάλυση σε διάφορες καταστάσεις. Αρχικά, γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή της στατικής ασύρματης φόρτισης, της δυναμικής ασύρματης φόρτισης και της σχεδόν δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Περιγράφονται τα εμπόδια, όπως ο σχεδιασμός των πηνίων των μπλοκ ισχύος, η συχνότητα, οι περιορισμοί του επιπέδου ισχύος, η κακή ευθυγράμμιση και οι πιθανές λύσεις. Στη συνέχεια, γίνεται ειδική εξέταση της δυναμικής ασύρματης φόρτισης και πιο συγκεκριμένα των υπάρχουσών τοπολογιών ζεύξης, αντιστάθμισης και συστημάτων ελέγχου για τον προσδιορισμό της αποτελεσματικότητάς τους στην επίτευξη των επιθυμητών στόχων ελέγχου. Στόχος της έρευνας ήταν η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της μελέτης, εξετάστηκαν διάφορα σενάρια χρήσης υλικών πυρήνα, με έμφαση στον πυρήνα τύπου Finemet FT3M, σε πυρήνες φερριτή όπως ο TDK-PC45, καθώς και σε πυρήνες νανοσωματιδίων σιδήρου. Η ανάλυση επέτρεψε την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τη μαγνητική απόκριση του συστήματος, καθώς και τις απώλειες πυρήνα που σχετίζονται με τη χρήση αυτών των υλικών. Το αποτέλεσμα αυτής της έρευνας είναι η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ενέργειας που είναι αποτελεσματικότερα, αποδοτικότερα και οικονομικά βιώσιμα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν τις κατευθυντήριες γραμμές που αναπτύχθηκαν για μελλοντικούς σχεδιασμούς συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτρικά οχήματα, ασύρματη μεταφορά ενέργειας, κυκλικός συζεύκτης, μαγνητικός πυρήνας, Ansys Maxwell

Abstract

The aim of this thesis is the study of magnetic materials for the application of wireless charging. For this purpose, a device was simulated through Ansys Maxwell software to perform magnetostatic analysis in different states. First, a detailed description of static wireless charging, dynamic wireless charging and near dynamic wireless charging is given. The obstacles such as power block coil design, frequency, power level constraints, misalignment and possible solutions are described. Then, a specific examination of dynamic wireless charging and more specifically existing coupling, compensation and control topologies is made to determine their effectiveness in achieving the desired control objectives. The objective of the research was to optimize the operation of the wireless power transmission system. During the study, several core material usage scenarios were considered, with emphasis on Finemet FT3M type core, ferrite cores such as TDK-PC45, and iron nanoparticle cores. The analysis allowed conclusions to be drawn regarding the magnetic response of the system, as well as the core losses associated with the use of these materials. The result of this research is the development of advanced wireless power transfer systems that are more efficient, effective, and economically viable. The simulation results confirm the guidelines developed for future wireless power transmission system designs.

Key Words:

Electric vehicles, wireless power transfer, circular coupler, magnetic core, Ansys Maxwell

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας αυτήν τη διπλωματική εργασία, έχω την ευκαιρία να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς όλους όσους με υποστήριξαν και με καθοδήγησαν στο ταξίδι αυτής της εκπαιδευτικής προσπάθειας. Αυτή η διπλωματική αντιπροσωπεύει πολλούς μήνες σκληρής δουλειάς και αφοσίωσης, και η υποστήριξη που έλαβα ήταν κρίσιμη.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την εμπιστοσύνη που έδειξε σε αυτό το έργο και τη συμβουλή του καθόλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Τατιάνα Δαματοπούλου για την καθοδήγηση, την πολύτιμη βοήθεια και την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που πάντα με υποστήριξε και που μοιράστηκε τις χαρές και τις ανησυχίες μαζί μου. Χωρίς τη στήριξή τους, αυτή η προσπάθεια δεν θα ήταν δυνατή.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Λέξεις κλειδιά	5
Abstract	7
Key Words:	7
Ευχαριστίες	9
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή	15
1.1 Είδη ασύρματης μεταφοράς ενέργειας	16
1.2 Βασικές αρχές της επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας	17
Κεφάλαιο 2 ^ο : Συστήματα φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα.....	19
2.1 Αγωγή φόρτιση για ηλεκτρικά οχήματα.....	19
2.2 Επαγωγική φόρτιση ή ασύρματη φόρτιση.....	21
2.3 Μέθοδοι ασύρματης φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα.....	24
2.3.1 Ασύρματη φόρτιση με χρήση ασύρματης τεχνολογίας κοντινού πεδίου	24
2.3.2 Ασύρματη φόρτιση με χρήση ασύρματων τεχνολογιών μακρινού πεδίου	27
2.4 Τεχνολογίες ασύρματης φόρτισης και η εφαρμογή τους.....	29
2.4.1 Στατική ασύρματη φόρτιση	29
2.4.2 Δυναμική ασύρματη φόρτιση	32
2.4.3 Σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση.....	38
Κεφάλαιο 3 ^ο : Ανάλυση των τοπολογιών και των μεθόδων ελέγχου στη δυναμική ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων	40
3.1 Μαγνητικοί συζεύκτες για δυναμική ασύρματη φόρτιση.....	41
3.1.1 Διαμορφώσεις ζεύξης	41
3.1.2 Σύνοψη των ρόλων των μαγνητικών ζεύξεων στους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης.....	43
3.2 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για δυναμική ασύρματη φόρτιση	43
3.2.1 Μετατροπείς πρωτεύουσας πλευράς.....	45
3.2.2 Μετατροπείς δευτερεύουσας πλευράς.....	46
3.2.3 Περίληψη των ρόλων των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος στους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης	46
3.3 Τοπολογίες αντιστάθμισης για δυναμική ασύρματη φόρτιση	47
3.4 Στόχοι ελέγχου, εφαρμογές και επικοινωνίες στη δυναμική ασύρματη φόρτιση.....	52
3.4.1 Στόχοι ελέγχου και συστήματα εφαρμογής	53

3.4.2	Επικοινωνίες στους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης	54
3.4.3	Σύνοψη των ρόλων των συστημάτων εφαρμογής και των επικοινωνιών σχετικά με τους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης.....	54
Κεφάλαιο 4 ^ο : Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων: εμπόδια και πιθανές λύσεις.....		56
4.1	Σχεδιασμός πηνίου για μπλοκ ισχύος για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων	57
4.1.1	Συχνότητα λειτουργίας και επίπεδα ισχύος	60
4.1.2	Ευθυγράμμιση μεταξύ των μπλοκ ισχύος και της τοπολογίας αντιστάθμισης.....	62
4.2	Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων: πρότυπα και εφαρμογές.....	65
4.3	Οικονομική ανάλυση του ασύρματου δικτύου φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα	66
4.3.1	Οικονομική σκοπιμότητα της στατικής ασύρματης φόρτισης	67
4.3.2	Οικονομική σκοπιμότητα του δυναμικού συστήματος ασύρματης φόρτισης	69
4.3.3	Οικονομική σκοπιμότητα της σχεδόν δυναμικής ασύρματης φόρτισης.....	70
4.4	Βιωσιμότητα και κοινωνικές επιπτώσεις των συστημάτων ασύρματης φόρτισης.....	71
4.4.1	Ενεργειακός και περιβαλλοντικός απολογισμός.....	71
4.4.2	Οικονομική και πολιτική ανάλυση	71
4.4.3	Υγεία και ασφάλεια	72
4.5	Σύνδεση του ηλεκτρικού οχήματος με το δίκτυο μέσω φόρτισης.....	74
Κεφάλαιο 5 ^ο : Μαγνητικός πυρήνας στην ασύρματη μετάδοση ενέργειας.....		76
5.1	Απώλειες και πάχος πυρήνα	77
5.2	Η προτεινόμενη δομή του πυρήνα	78
5.3	Υλικά που είναι κατάλληλα για μαγνητικός πυρήνας στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας	79
5.3.1	Φερρίτης TDK-PC45	79
5.3.2	Finemet FT3M	82
5.3.3	Νανοδομικά σιδήρου.....	84
Κεφάλαιο 6 ^ο : Πειραματικό μέρος.....		86
6.1	Δημιουργία νέας προσομοίωσης.....	86
6.2	Σχεδίαση Διάταξης.....	90
6.2.1	Θωράκιση αλουμινίου πρωτεύοντος.....	91
6.2.2	Μαγνητικό Υλικό Πρωτεύοντος.....	92
6.2.3	Τύλιγμα Πρωτεύοντος	93
6.2.4	Δευτερεύον συζεύκτη	94
6.3	Ορισμός Υλικών	95
6.4	Ορισμός οριακών συνθηκών.....	103

6.5 Ορισμός παραμέτρων της ανάλυσης.....	105
6.6 Επεξεργασία, απεικόνιση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων	111
Κεφάλαιο 7 ^ο : Συμπεράσματα και επεκτάσεις.....	123
7.1 Συμπεράσματα	123
7.2 Επεκτάσεις	124
Αναφορές	126

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Καθώς οι τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ενέργειας που χρησιμοποιούν επαγωγική σύζευξη εξελίσσονται, αναπτύσσεται μια ποικιλία εφαρμογών, όπως τα κινητά ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, η αυτοκινητοβιομηχανία, οι βιοϊατρικές συσκευές και τα βιομηχανικά συστήματα. Αν και οι τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ενέργειας παρέχουν στο κοινό ευκολία και ασφάλεια που δεν θα μπορούσε να παρέχει η ενσύρματη σύνδεση ρεύματος, υπάρχει ένας άλλος πιθανός κίνδυνος που προκύπτει από το σύστημα ως μορφή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ακριβώς όπως η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή είναι ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια του ηλεκτρονικού συστήματος, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αποτελεί σημαντικό μέτρο ασφάλειας για το ανθρώπινο σώμα αλλά και για άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Έτσι, κάθε χώρα υιοθέτησε κανονισμούς για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από ηλεκτρονικά προϊόντα και η κατευθυντήρια γραμμή της διεθνούς επιτροπής για την προστασία από μη ιονίζουσες ακτινοβολίες χρησιμοποιείται συχνά σε πολλές χώρες ως κανονισμός. Καθώς χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερες εφαρμογές με τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον γίνεται πιο σοβαρό και είναι απαραίτητη η μεγάλη προσπάθεια για τη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων από το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο [1].

Τα ηλεκτρικά οχήματα γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή ως εναλλακτική λύση στα βενζινοκίνητα με σκοπό τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και τον μετριασμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις από τα βενζινοκίνητα με τη χρήση πολύ αποδοτικών ηλεκτροκινητήρων, συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας υψηλής τάσης και ηλεκτροκίνητου συστήματος κίνησης [2]. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η περιορισμένη αυτονομία τους, λόγω της συνήθως χαμηλής πυκνότητας ενέργειας και ισχύος τους, η οποία εμποδίζει την εμπορική τους εφαρμογή σε ευρεία κλίμακα.

Οι διάφορες μέθοδοι φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι η αγωγή φόρτιση και η επαγωγική φόρτιση, γνωστή και ως ασύρματη φόρτιση. Μεταξύ των διαφόρων προτεινόμενων μεθόδων βελτίωσης, η ενσύρματη ταχεία φόρτιση και η ασύρματη μεταφορά ενέργειας έχουν σημειώσει μεγάλη πρόοδο. Οι βασικές προκλήσεις στις μεθόδους αγωγικής φόρτισης είναι ο χρόνος φόρτισης, η τοποθεσία εντός της εμβέλειας ενός ηλεκτρικού οχήματος, η πιθανή κυκλοφοριακή συμφόρηση και ο χρόνος αναμονής στον σταθμό φόρτισης [3]. Η τεχνολογία ασύρματης φόρτισης έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει τον περιορισμό

των υποδομών φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα. Πλεονεκτήματα της ασύρματης φόρτισης περιλαμβάνουν την ασφάλεια και την ευκολία της φόρτισης ενώ το όχημα βρίσκεται σε ηρεμία ή σε κίνηση.

1.1 Είδη ασύρματης μεταφοράς ενέργειας

Η ασύρματη φόρτιση επιτρέπει την αυτόματη φόρτιση των οχημάτων, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσω τριών διαφορετικών τρόπων: 1) στατική φόρτιση 2) σχεδόν δυναμική φόρτιση και 3) δυναμική φόρτιση. Τα πλεονεκτήματα της στατικής φόρτισης περιλαμβάνουν την εξάλειψη του κινδύνου ηλεκτροπληξίας λόγω καλωδίων και τη δυνατότητα εγκατάστασης σε βολικές τοποθεσίες, όπως γκαράζ σπιτιών ή χώρους στάθμευσης [5]. Το σύστημα σχεδόν δυναμικής φόρτισης παρέχει φόρτιση στα ηλεκτρικά οχήματα καθώς αυτά σταματούν για μικρά χρονικά διαστήματα, όπως στα φανάρια, γεγονός που παρατείνει την εμβέλεια του οχήματος κατά τη διάρκεια της διαδρομής και μειώνει τις ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας του οχήματος. Το σύστημα δυναμικής φόρτισης παρέχει ενέργεια συνεχώς στο ηλεκτρικό όχημα κατά τη διάρκεια της διαδρομής μέσω καθορισμένων λωρίδων φόρτισης στο δρόμο, αυξάνοντας επίσης την αυτονομία οδήγησης και μειώνοντας το μέγεθος της μπαταρίας του [3]. Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας με φόρτιση επιπέδου 2 (230 V EP) με ισχύ 7,2 kW έχει επιτευχθεί μέσω συστημάτων ασύρματης φόρτισης με απόδοση έως και 88,5% [6]. Οι τεχνικές δυσκολίες που σχετίζονται με την υποδομή φόρτισης περιλαμβάνουν το σχεδιασμό, την υλοποίηση, τη λειτουργικότητα και τη συντήρησή της. Η ανάπτυξη αποτελεσματικών και αξιόπιστων υποδομών φόρτισης σε μικρές αποστάσεις θα υποστηρίξει μια απεριόριστη εμβέλεια για τα ηλεκτρικά οχήματα.

Στις μέρες μας, ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος ασύρματης φόρτισης είναι η συντονισμένη χωρητική μεταφορά ενέργειας που χρησιμοποιείται για δυναμική φόρτιση σε ειδικές λωρίδες και η συντονισμένη επαγωγική μεταφορά ενέργειας που χρησιμοποιείται τόσο στην στατική ασύρματη φόρτιση όσο και στην δυναμική ασύρματη φόρτιση. Η τεχνολογία επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας αναπτύσσεται εδώ και πολλά χρόνια με επιτυχώς εμπορευματοποιημένα προϊόντα σε χαμηλό επίπεδο ισχύος. Υπάρχουν πολλά στάδια ανάπτυξης ασύρματης φόρτισης του μαγνητικού ζεύκτη, ο οποίος είναι ένας μετασχηματιστής με απόσταση λίγων εκατοστών μεταξύ πομπού και δέκτη. Το επίπεδο ισχύος και το διάκενο αέρα έχουν βελτιωθεί με τη χρήση καλύτερων τεχνικών αντιστάθμισης [3]. Σήμερα, το αγωγίμο σύστημα φόρτισης βρίσκεται στο στάδιο της σταθερότητάς του και έχουν αναπτυχθεί διάφορα εμπορικά προϊόντα και πρότυπα.

Η παρούσα εργασία καλύπτει διάφορες πτυχές της ασύρματης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών και των τρόπων ασύρματης φόρτισης με την εισαγωγή ορισμένων βασικών εξισώσεων, των εμποδίων και των προκλήσεων, των προτύπων, της οικονομικής ανάλυσης, της βιωσιμότητας και των κοινωνικών επιπτώσεων. Τέλος, γίνεται σύγκριση μέσω προσομοίωσης της αποτελεσματικότητας της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας με διαφορετικά υλικά για πυρήνες.

Η συγκεκριμένη εργασία χωρίζεται σε επτά κεφάλαια. Η ανασκόπηση των αγώγιμων συστημάτων φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα και οι διάφορες μέθοδοι ασύρματης φόρτισης περιγράφονται στο 2^ο και 3^ο κεφάλαιο αντίστοιχα. Η ασύρματη φόρτιση, τα εμπόδια και οι πιθανές λύσεις συζητούνται στο 4^ο κεφάλαιο. Στην ενότητα 4.2, εξετάζονται τα πρότυπα των συστημάτων ασύρματης φόρτισης. Οι ενότητες 4.3 και 4.4 εξετάζουν την οικονομική ανάλυση της ασύρματης φόρτισης και τις κοινωνικές επιπτώσεις, τη βιωσιμότητα και τα θέματα ασφάλειας, αντίστοιχα. Οι εφαρμογές οχήματος στο δίκτυο της ασύρματης φόρτισης συζητούνται στην ενότητα 4.5. Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο ρόλο του μαγνητικού πυρήνα στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας και στις διάφορες παραμέτρους που τον επηρεάζουν. Στο 6^ο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε προσομοίωση ενός κυκλικού συζεύκτη στο πρόγραμμα Ansys Maxwell και εξετάζεται η απόδοση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας με διαφορετικά υλικά ως μαγνητικούς πυρήνες. Τέλος, στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

1.2 Βασικές αρχές της επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας

Η επαγωγική μεταφορά ενέργειας διέπεται από δύο βασικούς νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού, όπου ένα ρεύμα υψηλής συχνότητας που διαρρέει ένα πρωτεύον πηνίο (ή πηνίο εκπομπής) (I_{pri}) δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητας σύμφωνα με το νόμο του Ampere, και αυτή η σύζευξη ροής σε ένα ή περισσότερα δευτερεύοντα πηνία (ή πηνία λήψης) που βρίσκονται κοντά τους προκαλεί τάσεις σε αυτά σύμφωνα με το νόμο του Faraday [4]. Η ισχύς εξόδου στην επαγωγική μεταφορά ενέργειας μπορεί να εκφραστεί ως εξής

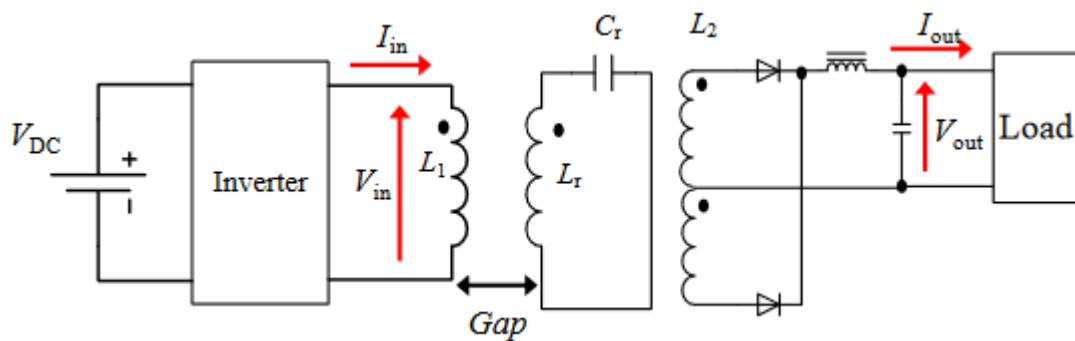
$$P_{out} = \omega L_P I_{pri}^2 k^2 Q_{sl} = S_{pri} k^2 Q_{sl} \quad (1)$$

όπου $\omega = 2\pi f_s$ είναι η γωνιακή συχνότητα του I_{pri} με f_s τη συχνότητά του, L_P είναι η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος πηνίου, k είναι ο συντελεστής σύζευξης μεταξύ των πηνίων

επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας, Q_{sl} είναι ο συντελεστής ποιότητας του φορτισμένου δευτερεύοντος πηνίου, που ορίζεται ως ο λόγος της άεργου ισχύος του προς την ενεργό ισχύ που αποδίδεται στο φορτίο, στη συχνότητα συντονισμού και $S_{pri} = \omega L_p I_{pri}^2$ δείχνει τα VA του πρωτεύοντος πηνίου. Η σχέση σε όρους S_{pri} και Q_{sl} είναι απλούστερη στην ερμηνεία, καθώς είναι κανονικοποιημένη σε σχέση με τις διάφορες σχέσεις επαγωγής και τις προδιαγραφές φορτίου.

Η εξίσωση (1) είναι επίσης σημαντική από την άποψη του ελέγχου των συστημάτων επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας. Η ποσότητα S_{pri} καθορίζεται από τη διαμόρφωση της πρωτεύουσας πλευράς, το Q_{sl} εξαρτάται από το σχεδιασμό της δευτερεύουσας πλευράς και η σύζευξη k αποφασίζεται από το σχεδιασμό του μαγνητικού ζεύκτη και το περιβάλλον ευθυγράμμισης. Ως εκ τούτου, τα συστήματα ελέγχου της πρωτεύουσας πλευράς επικεντρώνονται στη ρύθμιση του S_{pri} , ενώ οι μέθοδοι ελέγχου της δευτερεύουσας πλευράς επικεντρώνονται στον έλεγχο του Q_{sl} με βάση τις απαιτήσεις φορτίου έναντι των μεταβολών στη σύζευξη.

Στο σχήμα 1.1, παρουσιάζεται το μοντέλο κυκλώματος αναφοράς του συστήματος ασύρματης μεταφοράς ενέργειας μικρής χωρητικότητας. Αυτό αποτελείται από ένα κύκλωμα συντονισμού, V_{DC} τροφοδοσίας συνεχούς ρεύματος, έναν αντιστροφέα, ένα πρωτεύον πηνίο L_1 , το δευτερεύον πηνίο L_2 . Το κύκλωμα συντονισμού δημιουργείται στον πυκνωτή συντονισμού C_r και στο πηνίο συντονισμού L_r . Και, στο L_2 δευτερεύον πηνίο, εφαρμόζεται η μέθοδος κεντρικής στρόφιγγας του ανορθωτή δύο διόδων και του φίλτρου LC [8].



Σχήμα 1.1: Μοντέλο συστήματος μεταφοράς ισχύος χωρίς επαφή μικρής χωρητικότητας.

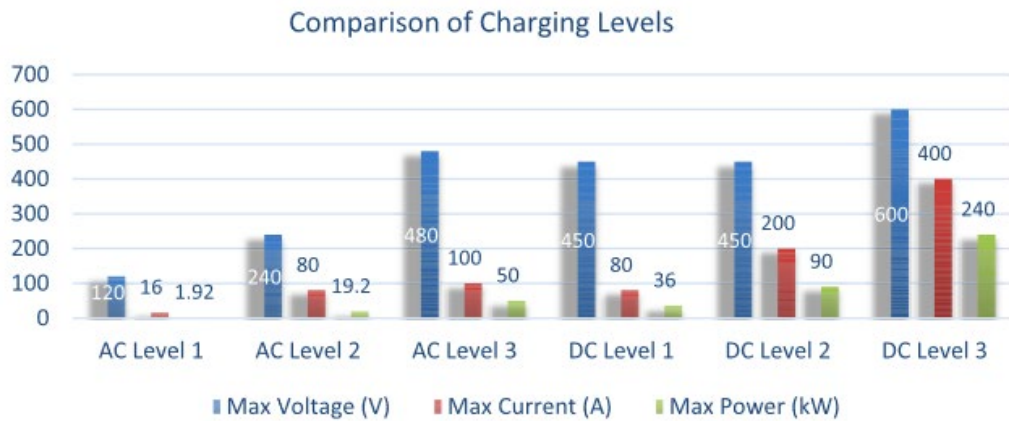
Κεφάλαιο 2^ο: Συστήματα φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα

Καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων παίζει το σύστημα φόρτισής τους. Σε σύγκριση με τα οχήματα με βενζινοκινητήρα, τα ηλεκτρικά οχήματα απαιτούν περισσότερο χρόνο για τον ανεφοδιασμό και έχουν μικρότερη εμβέλεια ειδικών υποδοχών φόρτισης και λιγότερους σταθμούς φόρτισης. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα ανεφοδιασμού απαιτείται ένας φορτιστής ηλεκτρικού οχήματος με υψηλή ισχύ και υψηλή απόδοση. Ένας γρήγορος φορτιστής μπορεί να φορτίσει τη μπαταρία πολύ γρήγορα, επιτυγχάνοντας περίπου 50% φόρτιση σε 3 λεπτά και έως 80% σε 15 λεπτά. Ωστόσο, οι τεχνικές ταχείας φόρτισης έχουν ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της μπαταρίας υψηλής τάσης. Ανάλογα με την ισχύ και το κόστος του μετατροπέα του φορτιστή, απαιτείται ο αλγόριθμος ελέγχου, ο οποίος χρησιμοποιεί διάφορους μικροελεγκτές και επεξεργαστές σήματος με ειδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Ένας βέλτιστος συνδυασμός ρεύματος/τάσης μπορεί να βελτιώσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της αργής φόρτισης, πρέπει να υπάρχουν γρήγοροι φορτιστές. Ο αγωγίμος φορτιστής πλησιάζει προς την τελειοποίηση του και έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένα πρότυπα [9]. Η επαγωγική φόρτιση εξακολουθεί να αναδύεται και ενδεχομένως να ενισχύει την αγωγήμη φόρτιση.

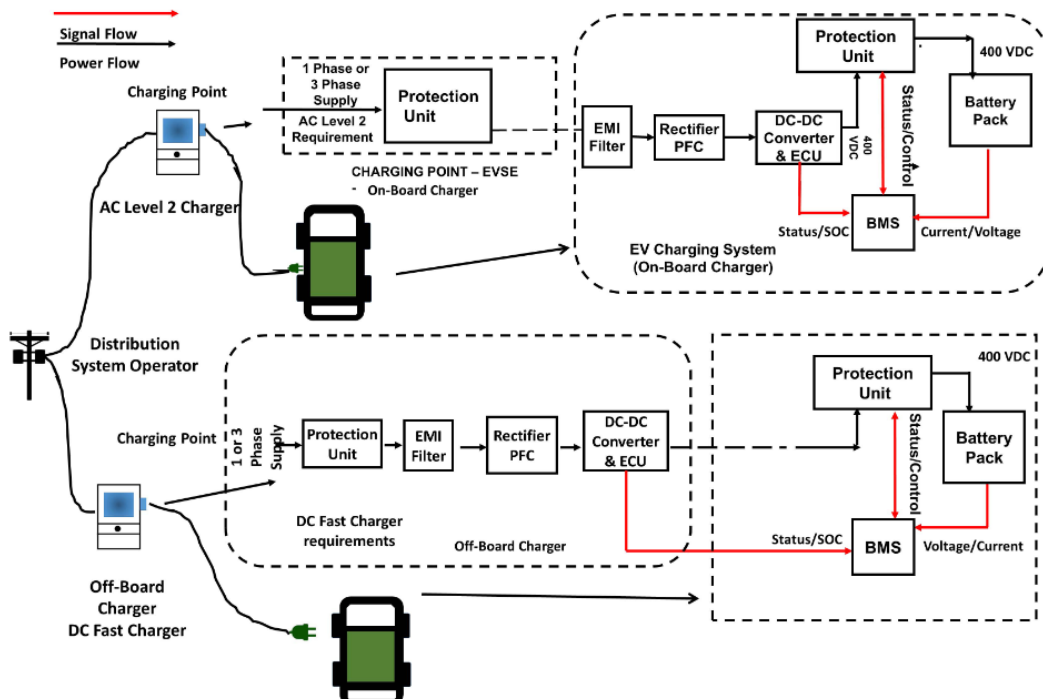
2.1 Αγωγήμη φόρτιση για ηλεκτρικά οχήματα

Ένας αγωγίμος φορτιστής περιλαμβάνει μια απλή σύνδεση μεταξύ του ηλεκτρικού δικτύου και του ηλεκτρικού οχήματος. Αποτελείται από ανορθωτή ΕΡ-ΣΡ και μετατροπείς ΣΡ-ΣΡ ή απευθείας από μετατροπέα ΕΡ χαμηλής συχνότητας σε ΕΡ υψηλής συχνότητας με διόρθωση συντελεστή ισχύος. Οι αγωγίμοι φορτιστές ταξινομούνται σε ενσωματωμένους και μη ενσωματωμένους. Στους φορτιστές επί του οχήματος, οι ανορθωτές και οι ελεγκτές ρεύματος της μπαταρίας βρίσκονται εντός του οχήματος, ενώ οι ανορθωτές και οι ελεγκτές ρεύματος της μπαταρίας βρίσκονται εκτός του οχήματος για τους φορτιστές εκτός του οχήματος. Οι αγωγίμοι φορτιστές ταξινομούνται με βάση το επίπεδο μεταφοράς ισχύος. Ο φορτιστής επιπέδου 1 εναλλασσόμενου ρεύματος είναι <2 kW, ο φορτιστής επιπέδου 2 εναλλασσόμενου ρεύματος είναι 4-20 kW και το επίπεδο 3 συνεχούς ρεύματος έχει ισχύ μεγαλύτερη από 20-120 kW [5]. Οι σύγχρονοι φορτιστές που βρίσκονται υπό εξέλιξη παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1. Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ διαφόρων μοντέλων ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων εμβέλειας για 1 ώρα φόρτισης,

το χρόνο πλήρους φόρτισης και τον τύπο φόρτισης που διατίθεται για το μοντέλο. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται οι τύποι αγωγίμων φορτιστών ηλεκτρικού οχήματος με τις ηλεκτρολογικές προδιαγραφές τους. Δεδομένου ότι η αγωγή ασύρματη φόρτιση δεν έχει σημασία για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Η αποδοτικότητα του συστήματος εξαρτάται από μετατροπείς πολύ υψηλής συχνότητας. Το σχήμα 2.2 συγκρίνει σχηματικά τη φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος επιπέδου 2 και τη γρήγορη φόρτιση συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 2.1: Γραφική σύγκριση μεταξύ όλων των πιθανών επιπέδων φόρτισης.



Σχήμα 2.2: Σχηματική σύγκριση μεταξύ του φορτιστή επιπέδου 2 και του φορτιστή ταχείας φόρτισης συνεχούς ρεύματος.

Model	Driving Distance/ Hour of Charging	Battery Energy Size	EV Type	Type of Charging	Full Charge Time (Hr)	Max Charge rate	References
Porsche Panamera S E-Hybrid	10	9 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	10hr/ 2.5	3 kW	[35]
Audi A3 e-tron	11	9 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	8hr/ 2.5hr	3.3 kW	[36]
Cadillac ELR	11	16.5 kWh	PHEV	Level 1 /Level2	12.5 hr -18hr / 5hr	3.3 kW	[37]
Chevy Spark EV	11	19.44 kWh	100% Electric	Level 1/Level 2/ DC fast charging	20hr /7hr/ 20min	3.3 kW	[38]
Chevy Volt	11	18.4 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	13hr/ 4.5hr	3.3 kW	
Ford C-Max Energi	11	7.6 kWh	PHEV	Level 2	2.5 hr.	3.3 kW	[39]
Ford Fusion Energi	11	7.6 kWh	PHEV	Level 1/Level2	7/2.5hr	3.3 kW	
Mercedes S550 Plug-in Hybrid	11	8 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	2hr /4hr-5hr	3.3 kW	[40]
Mercedes C350 Plug-in Hybrid	11	6.2 kWh	PHEV	Level 2	2hr	3.3 kW	[41]
Smart Electric Drive	11	17 kWh	100% Electric	Level 2	2.5hr	7.2 kW	[42]
Toyota Prius Plug-In	11	9 kWh	PHEV	Level 1/Level 2	5.5/2	3.3 kW	[43]
Mitsubishi i-MiEV	11	16 kWh	100% Electric	Level 2 (16A, 10A, 8A) Level 3	6hr, 8hr, 10hr/ 30 min	3.6/2.4/1.92 kW	[44]
Nissan LEAF	11 / 22	24 kWh	100% Electric	Level 1/Level 2/Level 3	22hr , 8hr , 30 min	3.3 kW / 6.6 kW	[45]
Porsche Cayenne S E-Hybrid	12 / 24	11 kWh	PHEV	Level 2	3hr /(90 min)	3.6 kW / 7.2 kW	[46]
Volkswagen e-Golf	12 / 24	36.6 kWh	100% Electric	Level 1/ Level 2/DC fast	24hr/9hr/ 30 min(80%)	3.6 kW / 7.2 kW	[47]
Ford Focus Electric	22	23 kWh	100% Electric	Level 1/ Level 2	20hr /3hr - 4hr	6.6 kW	[48]
Fiat 500e	22	24 kWh	100% Electric	Level 2	4 hr	6.6 kW	[49]
Kia Soul EV	22	27 kWh	100% Electric	Level 1/Level 2/Level 3	24hr/4hr-5hr/43 min	6.6 kW	[50]
Honda Accord Plug-In Hybrid	22	7 kWh	PHEV	Level 2	3hr	6.6 kW	[51]
Honda Clarity Electric	25	25 kWh	100% Electric	Level 1, Level 2 and DC fast charging	19hr (Level 1), 3 (Level 2) and 30 min (80%)(DC fast)	NA	[52]
BMW i3	25	24 kWh	100% Electric	Level 1, Level 2 and DC fast charging	22hr, 8hr, 30 min	7.4 kW	[53]
Mercedes B-Class Electric	29	28 kWh	100% Electric	Level 2	2hr	10 kW	[52]
Tesla Model S	29 / 58/255	85 kWh	100% Electric	Level 1/Level 2 / Supercharger		11.5 kW / 17.2 kW/120kW	[53]

Πίνακας 2.1: Διάφορα μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων με το επίπεδο φόρτισης και τη χωρητικότητα της μπαταρίας τους

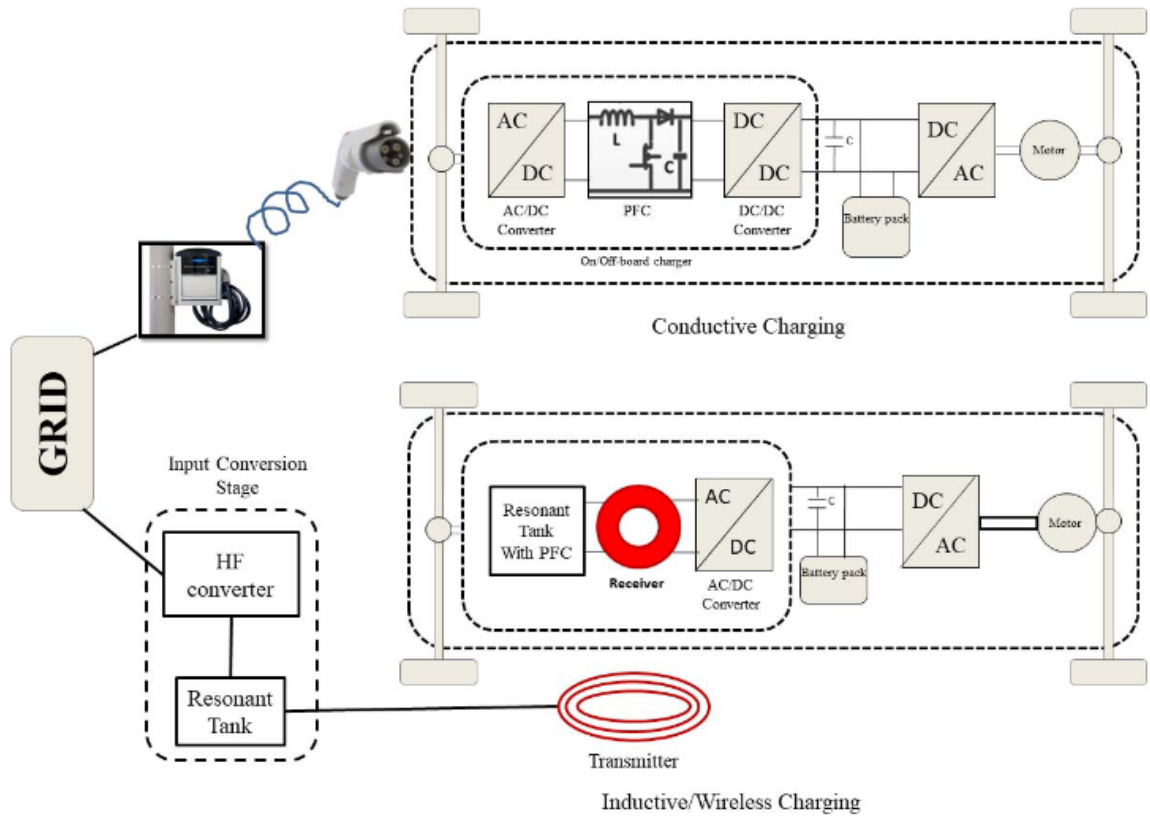
2.2 Επαγωγική φόρτιση ή ασύρματη φόρτιση

Στην επαγωγική φόρτιση ή ασύρματη φόρτιση, δεν υπάρχει φυσική σύνδεση μεταξύ της παροχής ρεύματος και του ηλεκτρικού οχήματος. Προς το παρόν, η επαγωγική φόρτιση ονομάζεται ασύρματη φόρτιση και μεταφέρει ενέργεια σε απόσταση εκατοστών. Με μικρά ηλεκτρονικά συστήματα, η ενέργεια μπορεί εύκολα να μεταφερθεί μέχρι και μέτρα αλλά με την αύξηση του επιπέδου ισχύος, η φόρτιση από απόσταση αποδεικνύεται πρόκληση. Το σύστημα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας ταξινομείται με μεθόδους όπως επαγωγική μεταφορά ενέργειας, συζευγμένος μαγνητικός συντονισμός, μεταφορά με σύζευξη μόνιμου μαγνήτη και λείζερ και μικροκύματα ή ραδιοκύματα. Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης της ασύρματης φόρτισης είναι η στατική ασύρματη φόρτιση, η δυναμική ασύρματη φόρτιση και η σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση [3]. Για τη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος, δεν μπορούμε να διακρίνουμε την πιο αποτελεσματική μέθοδο ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.

Ο συζευγμένος μαγνητικός συντονισμός είναι πολύ αποτελεσματικός για ασύρματη μεταφορά ενέργειας χαμηλής ή μεσαίας ισχύος, η επαγωγική μεταφορά ενέργειας είναι καλύτερη για μεταφορά ισχύος υψηλής τάσης, καθώς δεν εμπλέκεται κύκλωμα συντονισμού [12].

Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν δυσκολίες στην τυποποίηση αυτών των τεχνικών ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Το πλεονέκτημα της επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας είναι ότι δεν υπάρχει μεταλλική επαφή μεταξύ αρσενικού και θηλυκού μέρους, συνεπώς αποφεύγεται η δημιουργία σπινθήρων, με απόδοση μεταφοράς στο 85%-96%. Με την αύξηση του διακένου αέρα, η απόδοση μεταφοράς ισχύος μειώνεται. Το σχήμα 2.3 δείχνει ένα συγκριτικό σχήμα ενός φορτιστή που τοποθετείται στο όχημα και ενός ασύρματου φορτιστή. Για ασύρματης μεταφορά ενέργειας υψηλής ισχύος, είναι απαραίτητο να διατηρείται απόσταση μεταξύ του δευτερεύοντος μπλοκ στο εσωτερικό του οχήματος και του πρωτεύοντος μπλοκ στο έδαφος για την απόσταση από το έδαφος και την αποφυγή θέρμανσης. Ο συντελεστής μαγνητικής σύζευξης καθορίζει το βαθμό κλειστής σύζευξης μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος. Για τη μεταφορά υψηλής ισχύος, η τιμή του συντελεστή σύζευξης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη [3].

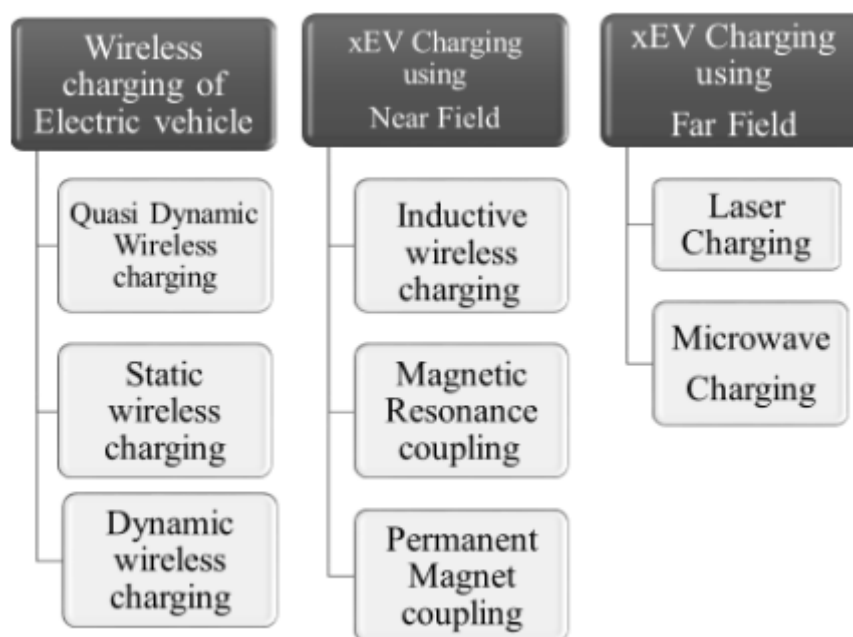
Ο στατικός ασύρματος γρήγορος φορτιστής για την εφαρμογή πορ οχημάτων γενικής χρήσης με επίπεδο ισχύος άνω των 20 kW βρίσκεται υπό τυποποίηση. Σε μια περίπτωση, η δυναμική ασύρματη φόρτιση ή το έργο OLEV (Online Electric Vehicle) που ξεκίνησε στο KAIST το 2009, ανέπτυξε και εμπορευματοποίησε τον ασύρματο φορτιστή πολύ υψηλότερης ισχύος. Το έργο OLEV υλοποίησε υψηλή απόδοση μεταφοράς ισχύος σε υψηλή συχνότητα 20 kHz με απόδοση 83% για 60 kW χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο διάκενο αέρα 20 cm και πλευρική ανοχή 24 cm [13]. Το έργο OLEV στο KAIST έχει μειώσει δραματικά το κόστος εμπορικής αξιοποίησης του OLEV κατά το ένα τρίτο εκείνου του έργου PATH (Partner for advanced transit and highways). Το έργο OLEV πέμπτης γενιάς υιοθέτησε μια γραμμή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος τύπου S για δυναμική ασύρματη φόρτιση, με μεταφορά ισχύος 22 kW σε διάκενο αέρα 20 cm και πλευρική ανοχή 30 cm. Η έρευνα για τους σιδηροδρόμους στην Κορέα έχει αναπτύξει δυναμική ασύρματη φόρτιση για ένα πολύ γρήγορο τρένο και έχει επιτύχει απόδοση μεταφοράς ισχύος 83% για τη μέγιστη μεταφορά ισχύος 820 kW, σε απόσταση διάκενου αέρα 5 cm. Μια δυναμική ασύρματη φόρτιση έχει αναπτυχθεί και λειτουργεί σε μια διαδρομή λεωφορείου 10 km για το λεωφορείο με αριθμό 16 στη Μάλαγα της Ισπανίας από τον Δεκέμβριο του 2014 [3].



Σχήμα 2.3: Σύγκριση μεταξύ αγώγιμων και επαγωγικών συστημάτων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

2.3 Μέθοδοι ασύρματης φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα

Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση της ασύρματης φόρτισης. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται από μια συσκευή κεραίας από ένα κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο χωρίζονται σε δύο περιοχές: 1) μη ακτινοβολούμενη περιοχή ή κοντινό πεδίο και 2) ακτινοβολούμενη περιοχή ή μακρινό πεδίο. Στην παρούσα ενότητα, συζητούνται μόνο οι μέθοδοι ασύρματης μεταφοράς ενέργειας για την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος.



Σχήμα 2.4: Τύποι ασύρματης φόρτισης και διαφορετικές μέθοδοι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

2.3.1 Ασύρματη φόρτιση με χρήση ασύρματης τεχνολογίας κοντινού πεδίου

Κοντινό πεδίο σημαίνει ότι η ενέργεια παραμένει σε μια μικρή περιοχή του πομπού. Ο πομπός δεν εκπέμπει ενέργεια εάν δεν υπάρχει απόσταση από τον δέκτη. Η εμβέλεια αυτών των πεδίων είναι πολύ μικρή και εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του πομπού και του δέκτη. Στην περιοχή κοντινού πεδίου, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι χωριστά, επομένως η ισχύς μπορεί να μεταφερθεί μέσω του ηλεκτρικού πεδίου με ηλεκτρόδια και μέσω του μαγνητικού πεδίου με πηνία. Η ισχύς μειώνεται κατά τον συντελεστή $(1/r^3)$, με την αύξηση της απόστασης (r), και η ενέργεια παραμένει σε μικρή απόσταση μεταξύ του πομπού και του δέκτη [3]. Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να μεταδώσει

ισχύ σε πολύ μικρότερη απόσταση λόγω του πολύ υψηλού ρυθμού εξασθένησης, αλλά η ασύρματη μεταφορά ενέργειας μαγνητικού πεδίου μπορεί να μεταδώσει ισχύ σε απόσταση μεγαλύτερη από την ηλεκτρική λόγω της ικανότητας ότι το μαγνητικό πεδίο μπορεί να διαπεράσει τον τοίχο, τα έπιπλα, και τους ανθρώπους.

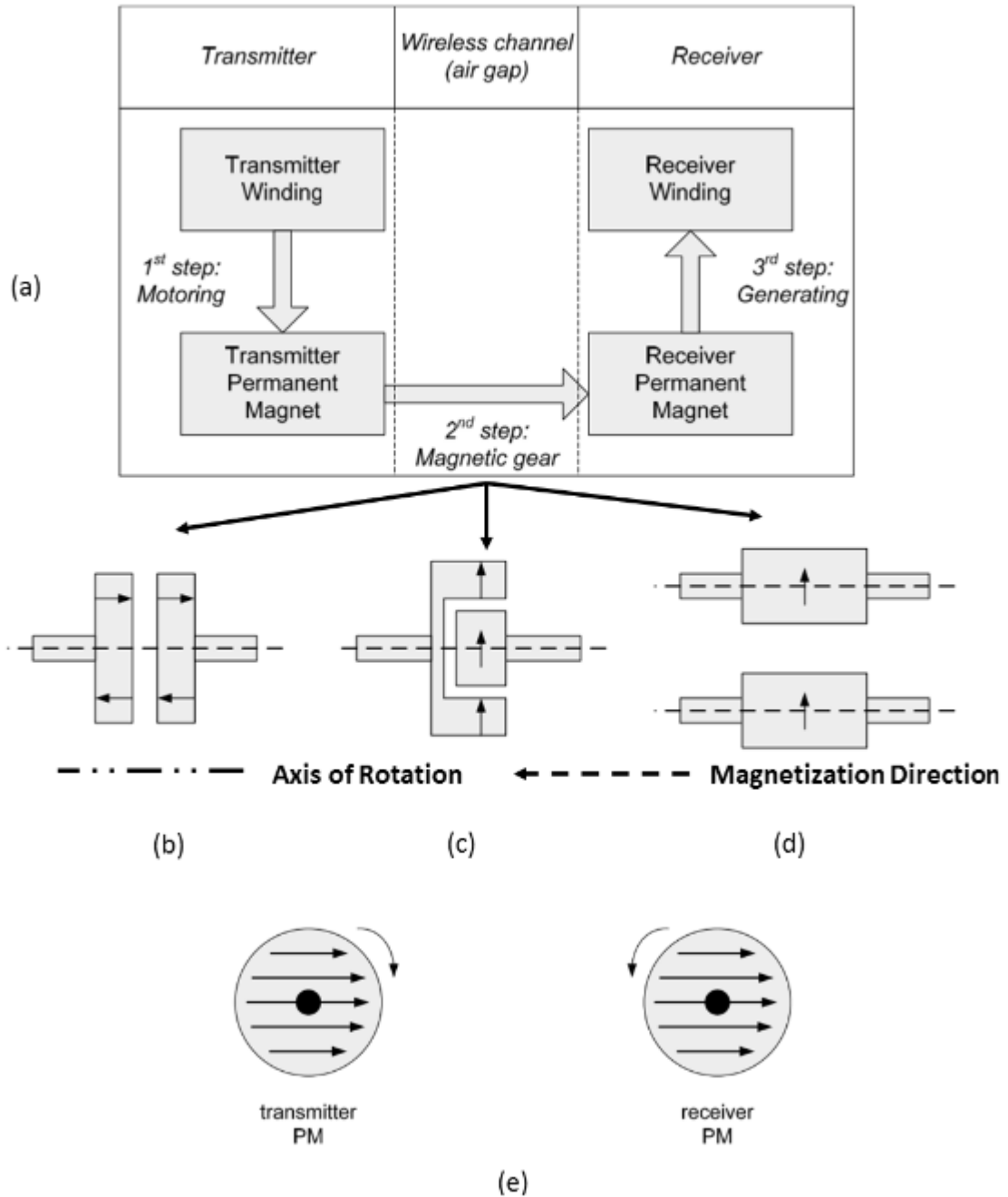
1) Ασύρματη φόρτιση με βάση την επαγωγική μεταφορά ενέργειας: Η ασύρματη φόρτιση με βάση την επαγωγική μεταφορά ενέργειας χρησιμοποιεί την αρχή της μαγνητικής επαγωγής για τη μετάδοση ισχύος χωρίς μέσο [7]. Βασίζεται στο νόμο του Lenz και στο νόμο του Faraday, όπου ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα σε έναν αγωγό δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον αγωγό και ένας δευτερεύων βρόχος (δέκτης) λαμβάνει τάση που παράγεται λόγω της χρονικά μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής. Ο δέκτης συνδέεται με το φορτίο το οποίο κλείνει το κύκλωμα για να μεταφέρει την ισχύ χωρίς καλώδια. Το 1819, ο Oersted είχε ανακαλύψει την έννοια της δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου γύρω από τον ρευματοφόρο αγωγό και αποτέλεσε την αρχή του ηλεκτρομαγνητισμού. Ο νόμος του Ampere, ο νόμος του Faraday και ο νόμος των Biot-Savart ήταν τα αποτελέσματα της ιδιότητας του μαγνητικού πεδίου. Με την εισαγωγή της εξίσωσης του Maxwell το 1864, αναπτύχθηκε η σχέση μεταξύ ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Αργότερα, το 1873, ο Maxwell συνδύασε τη μελέτη του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού στο βιβλίο του "A Treatise on Electricity and Magnetism" [3].

Πρόκειται για ορισμένες βασικές επιστημονικές εφευρέσεις που οδήγησαν στην αντίληψη ότι ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός προέρχονται από τις ίδιες δυνάμεις και δημιούργησαν μια σύγχρονη θεωρητική βάση του ηλεκτρομαγνητισμού και την αρχή της ασύρματης μετάδοσης του ηλεκτρισμού. Το 1888, ο Hertz είχε μεταδώσει τον ηλεκτρισμό μέσω ενός ελάχιστου διάκενου χρησιμοποιώντας έναν ταλαντωτή συνδέοντάς τον με πηνία επαγωγής. Το 1894, οι Leblanc και Hutin κατοχύρωσαν ουσιαστικά την πατέντα για τη βελτίωση της ηλεκτρικής πρόσφυσης ενός οχήματος με χρήση ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Το 1971, ο Otto, από το Πανεπιστήμιο του Auckland, ανέπτυξε ένα μικρό λεωφορείο τρόλεϊ βασισμένο στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας και κατοχύρωσε την πατέντα του. Την ίδια εποχή στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ ξεκίνησε το πρόγραμμα PATH. Το 1982, το PATH πραγματοποίησε ένα επιτυχημένο πείραμα λειτουργίας ενός ηλεκτρικού οχήματος σε συχνότητα 400 Hz για 50-100 mm διάκενο αέρα με απόδοση 60%. Στη δεκαετία του 1990, η Groupe PSA (ανεπίσημα PSA- γνωστή ως PSA Peugeot Citroën από το 1991 έως το 2016) διεύθυνε ένα σύστημα με την ονομασία Tulip (Transport Urban, Individual et Public) στη Γαλλία και η εταιρεία Wampfler στη Γερμανία καθιέρωσε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας. Το 2009, η εταιρεία Showa Aircraft Company στην Ιαπωνία ανέπτυξε

το σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας ισχύος 30 kW για ηλεκτρικά οχήματα σε συχνότητα 22 kHz για ένα κατά προσέγγιση διάκενο αέρα 14 cm με συνολική απόδοση 92% [14]. Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία απαιτεί ελάχιστη ισχύ, επομένως τα ηλεκτρονικά στοιχεία, όπως ένα σύστημα RFID (Radio Frequency Identification), μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Ωστόσο, για εφαρμογές όπως η λειτουργία συσκευών, μπορεί να απαιτείται υψηλό επίπεδο ισχύος. Το σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας αναβαθμίζεται μόνο με συντονισμό και ονομάζεται συζευγμένος μαγνητικός συντονισμός, δηλαδή σύζευξη σε συντονισμό.

2) Ασύρματη φόρτιση βασισμένη σε συζευγμένο μαγνητικό συντονισμό: Ο μαγνητικός συντονισμός αναπτύχθηκε από το MIT των ΗΠΑ και αποτελείται από πηνία εκπομπής και λήψης και χωρητικότητες για σκοπούς αντιστάθμισης και διόρθωση συντελεστή ισχύος, δημιουργώντας τελικά μια κατάσταση συντονισμού για μέγιστη μεταφορά ισχύος. Στη Νότια Κορέα, το OLEV λειτουργεί με βάση τη σύζευξη με συντονισμό και χρησιμοποιεί τη δυναμική ασύρματη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Το OLEV συγκαταλέγεται μεταξύ των 50 κορυφαίων εφευρέσεων του 2010 παγκοσμίως. Η εμπορευματοποίηση του OLEV βρίσκεται σε εξέλιξη. Οι παγκόσμιες αυτοκινητοβιομηχανίες, όπως η Tesla, η Toyota, η Nissan κ.ο.κ., χρησιμοποιούν σύζευξη μαγνητικού συντονισμού για ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Η τεχνολογία συζευγμένου μαγνητικού συντονισμού ακολουθεί τη θεωρία των συζευγμένων λειτουργιών, η οποία μπορεί να μεταφέρει ισχύ σε σημαντική απόσταση [15].

3) Ασύρματη φόρτιση βασισμένη σε σύζευξη μόνιμου μαγνήτη: όπου ένας μόνιμος μαγνήτης (μόνιμοι μαγνήτες νεοδυμίου) λειτουργεί ως μαγνητικός συζεύκτης [18]. Ο μόνιμος μαγνητισμένος δρομέας της πρωτεύουσας πλευράς περιστρέφει τον δευτερεύοντα δρομέα με την ίδια ταχύτητα, γνωστή ως σύγχρονη ταχύτητα. Υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα σε αυτό το σύστημα λόγω των δονήσεων και του θορύβου πολλών μηχανικών εξαρτημάτων. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα με αυτό το σύστημα είναι τα ζητήματα ευθυγράμμισης και συντήρησης. Για την εφαρμογή φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος, η μέθοδος αυτή δεν είναι κατάλληλη λόγω του μεγάλου συστήματος, της χαμηλής απόδοσης, της μηχανικής περιστροφής κ.λπ. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής ισχύος, ο μηχανισμός ασύρματης μεταφοράς ενέργειας και η εφαρμογή του και τρεις τύποι μαγνητικού γранаζιού. Το σχήμα 2.5(ε) δείχνει τον προσανατολισμό του μαγνητικού γранаζιού. Η μεταφορά με σύζευξη μόνιμου μαγνήτη απαιτεί μόνιμο μαγνήτη μεγάλου μεγέθους για υψηλή μεταφορά ισχύος. Στις περισσότερες από τις μεθόδους ασύρματης φόρτισης, η κακή ευθυγράμμιση αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, αλλά στην περίπτωση της ασύρματης φόρτισης με σύζευξη μόνιμου μαγνήτη, η κακή ευθυγράμμιση δεν αποτελεί μεγάλο ζήτημα.



Σχήμα 2.5: α) Ροή ισχύος. (β) Αξονικά μαγνητισμένοι δρομείς. (γ) Ακτινικά μαγνητισμένοι δρομείς. (δ) Παράλληλοι άξονες περιστροφής (διακεκομμένες γραμμές) με ακτινικά μαγνητισμένους δρομείς. (ε) Προσανατολισμός μαγνητικού γριναζιού που χρησιμοποιείται για το σύστημα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.

2.3.2 Ασύρματη φόρτιση με χρήση ασύρματων τεχνολογιών μακρινού πεδίου

Η τεχνολογία απομακρυσμένου πεδίου περιλαμβάνει τρία σημαντικά βήματα επεξεργασίας: 1) μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ραδιοσυχνότητα, μικροκύματα ή

λείζερ, 2) μετάδοση της μετατρεπόμενης ενέργειας σε άλλη μέσω του χώρου και 3) συλλογή της ενέργειας στον προορισμό και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι τεχνολογιών μεταφοράς ενέργειας σε μακρινό πεδίο: 1) μικροκύματα ή ραδιοκύματα και 2) λείζερ. Στη συνέχεια, γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική επισκόπηση για τις τεχνολογίες αυτές για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας [3].

1) Ασύρματη φόρτιση με χρήση μικροκυμάτων και ραδιοκυμάτων: Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας με χρήση της τεχνολογίας μακρινών πεδίων είναι η παλαιότερη μέθοδος, επειδή, αρχικά, αναπτύχθηκε για ασύρματη επικοινωνία. Το 1904, ο Nikola Tesla ήταν ο πρώτος που μετέφερε ενέργεια χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα στα 150 kHz. Το 1964, ο Brown εφηύρε και οδήγησε ένα ασύρματο ελικόπτερο χωρίς μπαταρία, χρησιμοποιώντας μάγνητρο 2,45 GHz. Ο Dickinson πραγματοποίησε μέγιστη μεταφορά ενέργειας με παραβολική κεραία και κλύστρο για απόσταση 1,6 km σε συχνότητα 2,45 GHz και ισχύ μετάδοσης 450 kW στο Goldstone των ΗΠΑ. Μετά τη δεκαετία του 1980, η ανάπτυξη της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας ενισχύθηκε στην έρευνα για τον δορυφόρο ηλιακής ενέργειας στην Ιαπωνία [3]. Λόγω της κατευθυνόμενης συμπεριφοράς των μικροκυμάτων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ακτινοβολία ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Η τεχνολογία μακρινών πεδίων περιλαμβάνει ένα λείζερ για τη μετάδοση πολύ υψηλής ισχύος σε μια εστιασμένη θέση.

2) Ασύρματη φόρτιση με χρήση λείζερ: Η τεχνολογία λείζερ μπορεί να μεταδώσει ενέργεια σε σημαντική απόσταση, αλλά με περιορισμένη αποτελεσματικότητα. Η φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος δεν είναι πολύ εφικτή με τη χρήση λείζερ. Δεδομένου ότι ο μηχανισμός μεταφοράς ισχύος με τη χρήση λείζερ είναι επίσης ένα πολύπλοκο φαινόμενο, όπου η ισχύς μπορεί να μεταφερθεί με τη μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος σε δέσμη λείζερ, η δέσμη εστιάζεται στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Καθώς η μεταφερόμενη ισχύς έχει τη μορφή δέσμης λείζερ στο άκρο του δέκτη, ως εκ τούτου είναι γνωστή ως ακτινοβολία ισχύος. Το φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για το λείζερ είναι πιο κοντά στην ορατή περιοχή του φάσματος. Για την εφαρμογή αυτή χρησιμοποιούνται εξαιρετικοί φωτοβολταϊκοί μετατροπείς ισχύος λείζερ, οι οποίοι είναι βελτιστοποιημένοι για τη μετατροπή μονοχρωματικού φωτός [3]. Απαιτούνται ακραίες προφυλάξεις για την αύξηση της απόδοσης, τυχόν αστοχία της κατεύθυνσης της δέσμης λείζερ θα μπορούσε να προκαλέσει κίνδυνο για τη ζωή και απώλεια ενέργειας.

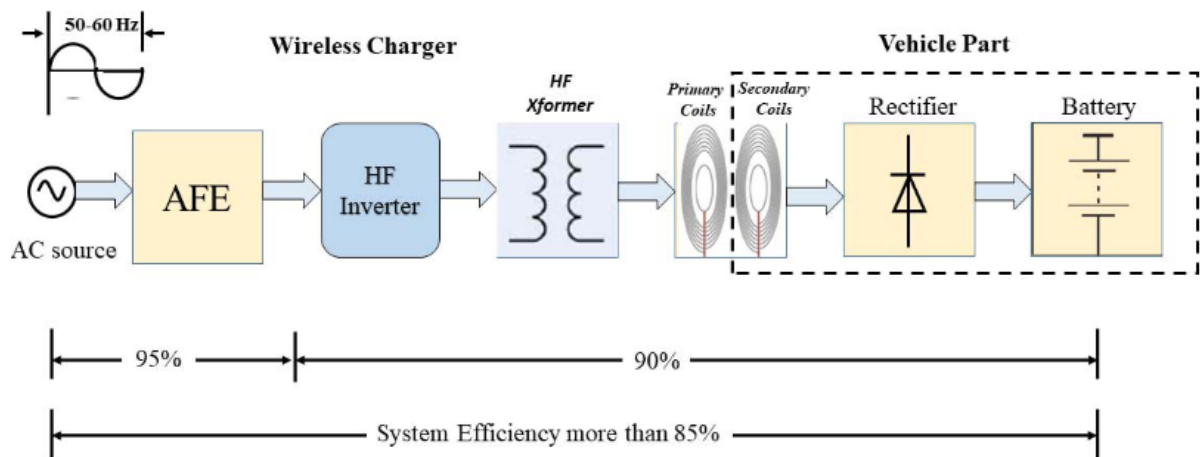
2.4 Τεχνολογίες ασύρματης φόρτισης και η εφαρμογή τους

Η στατική ασύρματη φόρτιση φορτίζει το όχημα όταν το όχημα είναι ακίνητο [9]. Η δυναμική ασύρματη φόρτιση, γνωστή και ως δυναμική φόρτιση κατά τη διαδρομή, φορτίζει το όχημα όταν αυτό βρίσκεται σε κίνηση [3]. Η σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση που ονομάζεται επίσης ως στατική φόρτιση κατά τη διαδρομή είναι ουσιαστικά επωφελής για τα οχήματα που σταματούν σε τακτά χρονικά διαστήματα, όπως σε φωτεινούς σηματοδότες, στάσεις λεωφορείων ή πιάτσες ταξί. Για παράδειγμα, στην περίπτωση λεωφορείων που σταματούν σε στάση λεωφορείου, αρχίζουν να φορτίζουν ασύρματα μέσω τεχνολογίας υπόγειας εφαρμογής [11]. Κυρίως η μέθοδος ασύρματης μεταφοράς ενέργειας που χρησιμοποιείται για την ασύρματη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Οι τρόποι στατικής, σχεδόν δυναμικής και δυναμικής ασύρματης φόρτισης αναλύονται ως εξής.

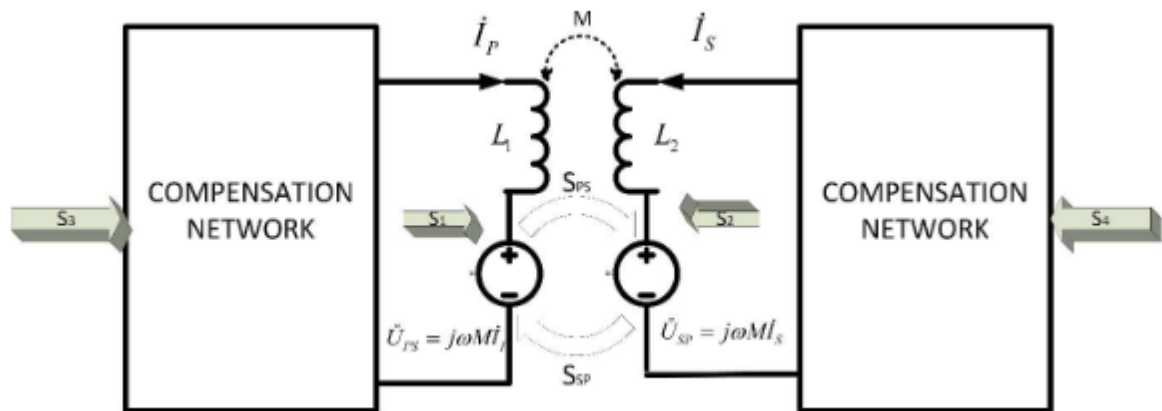
2.4.1 Στατική ασύρματη φόρτιση

Η στατική ασύρματη φόρτιση έχει αρχίσει να αναπτύσσεται, καθώς η SAE (Society of automotive engineers) έχει αναπτύξει το πρότυπο SAE 2954 για κατευθυντήριες γραμμές προδιαγραφών σε επίπεδο βιομηχανίας. Η αποδοτικότητα της μεταφοράς ισχύος είναι πιο αποτελεσματική στη στατική ασύρματη φόρτιση, καθώς η ευθυγράμμιση είναι ενισχυμένη. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα του συστήματος επαγωγικού συντονισμού στατικής ασύρματης φόρτισης. Το σχήμα 2.6 εξηγεί τα στάδια μετατροπής, τις κατανομές απόδοσης και τη συνολική απόδοση. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση, κάθε στάδιο μετατροπής πρέπει επίσης να βελτιωθεί [2]. Η απόδοση που εμφανίζεται στο διάγραμμα δεν είναι συγκεκριμένη. Ένα σύστημα ασύρματης φόρτισης αποτελείται από διάφορα στάδια και κάθε στάδιο έχει την απόδοση και την πολυπλοκότητά του. Εάν η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος είναι EP, το οποίο πρέπει να μετατραπεί σε ΣΡ, χρησιμοποιείται μετατροπέας front-end με διόρθωση συντελεστή ισχύος. Η επαγωγική μεταφορά ισχύος απαιτεί εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας για την αποτελεσματική μεταφορά ισχύος. Ως εκ τούτου, ο μετατροπέας ΣΡ-EP μετατρέπει το ΣΡ με δίκτυο αντιστάθμισης σε EP υψηλής συχνότητας. Μεταξύ του μετατροπέα και του πρωτεύοντος πηνίου παρεμβάλλεται ένας απομονωμένος μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας για την προστασία από αστοχία απομόνωσης του πρωτεύοντος τυλίγματος. Αυτό το εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας παράγει ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με το νόμο του Ampere. Αυτό το μαγνητικό πεδίο

συνδέεται με το δευτερεύον πηνίο για να παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας στο δευτερεύον πηνίο σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Για τη βελτίωση της απόδοσης, το δευτερεύον δίκτυο αντιστάθμισης χρησιμοποιείται για την επίτευξη της κατάστασης συντονισμού. Τέλος, η εναλλασσόμενη ισχύς ανορθώνεται με τη χρήση ενός εξαιρετικά αποδοτικού ανορθωτή για τη φόρτιση της μπαταρίας [3].



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ενός συστήματος ασύρματης φόρτισης.



Σχήμα 2.7: Απλοποιημένο διάγραμμα του συστήματος ασύρματης μεταφοράς ενέργειας δύο πηνίων.

Τα κύρια μέρη για το σύστημα ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος είναι: 1) τα διαχωρισμένα και ευλύγιστα συνδεδεμένα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα πηνία, τα οποία αποτελούνται από δομή θωράκισης φερρίτη, 2) το δίκτυο αντιστάθμισης και 3) οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος.

1) Θεμελιώδης αρχή της ασύρματης φόρτισης: Η σύζευξη μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου γίνεται μέσω του αέρα ως πυρήνα. Η απλή ανάλυση της

ασύρματης φόρτισης με ξεχωριστό δίκτυο αντιστάθμισης του πηνίου παρουσιάζεται στο σχήμα 2.7, αμελώντας την αντίσταση του πηνίου και τις μαγνητικές απώλειες. Από τα L_P και L_S , μπορούμε να πάρουμε την ανταλλασσόμενη μιγαδική ισχύ ως εξής [3].

Φαινόμενη ισχύς που ανταλλάσσεται από το πρωτεύον στο δευτερεύον του συστήματος δύο σπειρών είναι

$$S_{PS} = -\dot{U}_{PS} \dot{I}_S^* = -j\omega M \dot{I}_P \dot{I}_S^* = \omega M I_P I_S \sin \varphi_{PS} - j\omega \cos \varphi_{PS} \quad (2)$$

Φαινόμενη ισχύς που ανταλλάσσεται από το δευτερεύον στο πρωτεύον του συστήματος δύο σπειρών είναι

$$S_{SP} = -\dot{U}_{SP} \dot{I}_P^* = -j\omega M \dot{I}_S \dot{I}_P^* = -\omega M I_P I_S \sin \varphi_{PS} - j\omega M I_P I_S \cos \varphi_{PS} \quad (3)$$

Η μεταφορά ενεργού ισχύος από την πλευρά πομπού στην πλευρά του δέκτη μπορεί να εκφραστεί ως

$$P_{PS} = \omega M I_P I_S \sin \varphi_{PS} \quad (4)$$

Ως εκ τούτου, η συνολική άεργος ισχύς (Q) που εισέρχεται στο σύστημα μεταξύ των δύο πηνίων είναι

$$Q = \omega (L_P I_P^2 + L_S I_S^2 + 2M I_P I_S \sin \varphi_{PS}). \quad (5)$$

Μεγιστοποιώντας την απόδοση του μετασχηματιστή, ο λόγος ενεργού ισχύος (P_{PS}) και άεργου ισχύος (Q) πρόκειται να μεγιστοποιηθεί ως εξής:

$$\frac{|P_{PS}|}{Q} = \left| \frac{\omega M I_P I_S \sin \varphi_{PS}}{\omega L_P I_P^2 + \omega L_S I_S^2 + 2\omega M I_P I_S \sin \varphi_{PS}} \right|. \quad (6)$$

Η μέγιστη τιμή του $f(\varphi_{PS})$ μπορεί να επιτευχθεί με την επίλυση της ακόλουθης εξίσωσης:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi_{PS}} f(\varphi_{PS}) = 0 \frac{\partial^2 y}{\partial^2 \varphi_{PS}} f(\varphi_{PS}) < 0. \quad (7)$$

Δεδομένου ότι πρόκειται για τον κλασικό μετασχηματιστή, το k είναι κοντά στο 1, εάν το \dot{I}_S είναι ρεύμα που προκαλείται από το \dot{I}_P και όταν η τιμή του x είναι κοντά στο 1, το $\cos \varphi_{PS}$ είναι σχεδόν ίσο με 1. Υπάρχει διαφορά φάσης 180° μεταξύ του \dot{I}_P και του \dot{I}_S . Στην περίπτωση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, το $k \approx 0$. Η μέγιστη τιμή του $f(\varphi_{PS}t)$ είναι στο $\sin \varphi_{PS} = 1$, επομένως η ασύρματη μεταφορά ενέργειας μεγιστοποιείται. Αντί για 180° , υπάρχει διαφορά φάσης 90° μεταξύ \dot{I}_P και \dot{I}_S . Επομένως, η διαφορά μεταξύ σφιχτά συζευγμένης και χαλαρά συζευγμένης είναι ορατή. Ο σχεδιασμός του δικτύου αντιστάθμισης εξαρτάται από τον βαθμό σύζευξης. Αν θεωρήσουμε σύζευξη σειράς-σειράς, υπάρχουν δύο τρόποι σχεδιασμού του πυκνωτή συντονισμού. Για ασύρματη μεταφορά ενέργειας με στενή σύζευξη, $k > 0,5$, το $f(\varphi_{PS})$ πρέπει να αυξηθεί για να επιτευχθεί υψηλή συχνότητα. Στην περίπτωση συντονισμού με αυτεπαγωγή του πηνίου $\varphi_{PS} = \pi/2$ και το $f(\varphi_{PS})$ είναι χαμηλό,

το οποίο δεν συνιστάται, καθώς αυξάνονται οι μαγνητικές απώλειες. Εάν υπάρχει αντιστάθμιση συντονισμού με αυτεπαγωγή διαρροής ο μετασχηματιστής λειτουργεί ως κλασικός και υπάρχει αύξηση του $f(\varphi_{PS})$, αλλά το συνολικό σύστημα δεν λειτουργεί σε κατάσταση συντονισμού. Σε χαλαρή σύζευξη, δηλαδή ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος όταν $k < 0,5$ για κατάσταση συντονισμού, ο πυκνωτής απαιτεί συντονισμό με αυτεπαγωγή ώστε να μπορεί να μεταφερθεί η μέγιστη ισχύς. Εδώ, η ενέργεια αποθηκεύεται στο διάκενο αέρα μεταξύ πομπού και δέκτη και η απώλεια χαλκού είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος αγωγής. Για μέγιστη μεταφορά ισχύος, το επαγόμενο ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο I_S πρέπει να υστερεί έναντι του πρωτεύοντος επαγόμενου ρεύματος I_P κατά 90° . Το \dot{U}_{PS} και το \dot{I}_S πρέπει να είναι συγχρονισμένα, δεδομένου ότι το \dot{U}_{PS} και το \dot{I}_P υστερούν κατά 90° στο πηνίο λήψης. Στη δευτερεύουσα πλευρά, παρατηρείται η αμιγώς ωμική συμπεριφορά. Εντωμεταξύ, η φαινόμενη ισχύς S_3 στην πρωτεύουσα πλευρά πρέπει να μειωθεί [3].

Όταν $\cos \varphi_{PS} = 0$, η μιγαδική ισχύς (\dot{S}_1) είναι

$$\dot{S}_1 = j\omega L_p I_p^2 + \omega M L_p I_S \quad (8)$$

Η μέγιστη απόδοση είναι $n_{MAX} = \frac{k^2 Q_p Q_S}{(1 + (1 + k^2 Q_p Q_S)^{\frac{1}{2}})^2}$ (9), η οποία επιτυγχάνεται σε

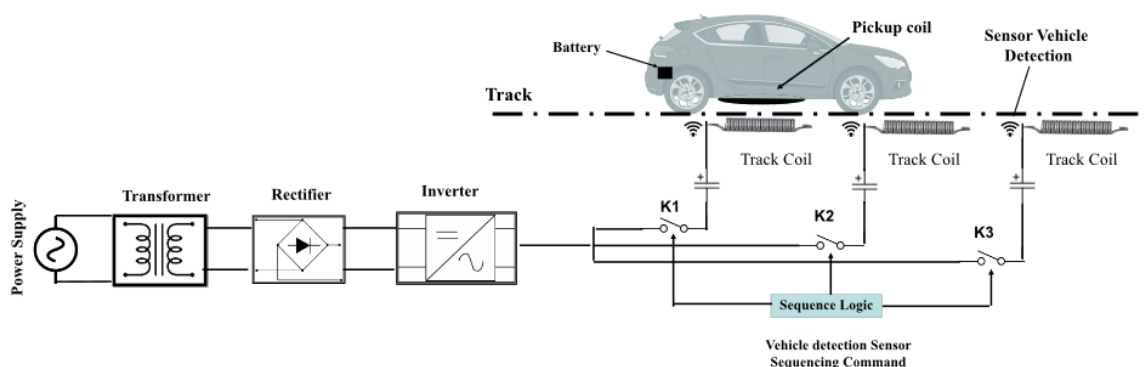
$$\alpha_{nmax} = \sqrt{1 + k^2 Q_p Q_S}$$

Για τη στατική ασύρματη φόρτιση, ο συντελεστής σύζευξης μεταξύ των πηνίων είναι περίπου 0,1-0,25, εάν και τα δύο πηνία έχουν συντελεστή ποιότητας περίπου 300 και η απόδοση με θεωρητικό υπολογισμό περίπου 96,7%.

2.4.2 Δυναμική ασύρματη φόρτιση

Η δυναμική ασύρματη φόρτιση φορτίζει το ηλεκτρικό όχημα κατά την οδήγηση. Δεν χρειάζεται να σταματήσει για φόρτιση. Η ανάπτυξη της δυναμικής ασύρματης φόρτισης καθοδηγείται από μια ερευνητική ομάδα στο KAIST από το 2009. Πολλά σημαντικά προβλήματα έχουν επιλυθεί από αυτό το έργο, όπως η συνεχής μεταφορά ενέργειας, ο ελεγχόμενος από ρεύμα υψηλής συχνότητας αντιστροφείας και τα διαφορετικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου [18]. Η δυναμική ασύρματη φόρτιση εξουδετερώνει τα περισσότερα από τα προβλήματα του ηλεκτρικού οχήματος, όπως το άγχος για την αυτονομία, το μέγεθος της μπαταρίας και το κόστος της μπαταρίας. Τα υπάρχοντα μοντέλα δυναμικής ασύρματης φόρτισης βασίζονται στην επαγωγική μέθοδο ασύρματης

μεταφοράς ενέργειας [9]. Αυτή η τεχνολογία βασίζεται στη μαγνητική σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των πηνίων που είναι εγκατεστημένα κάτω από το οδόστρωμα και τροφοδοτούνται με Δρεύμα υψηλής συχνότητας που δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, και ενός πηνίου λήψης που προσαρμόζεται στο ηλεκτρικό όχημα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα της δυναμικής ασύρματης φόρτισης.

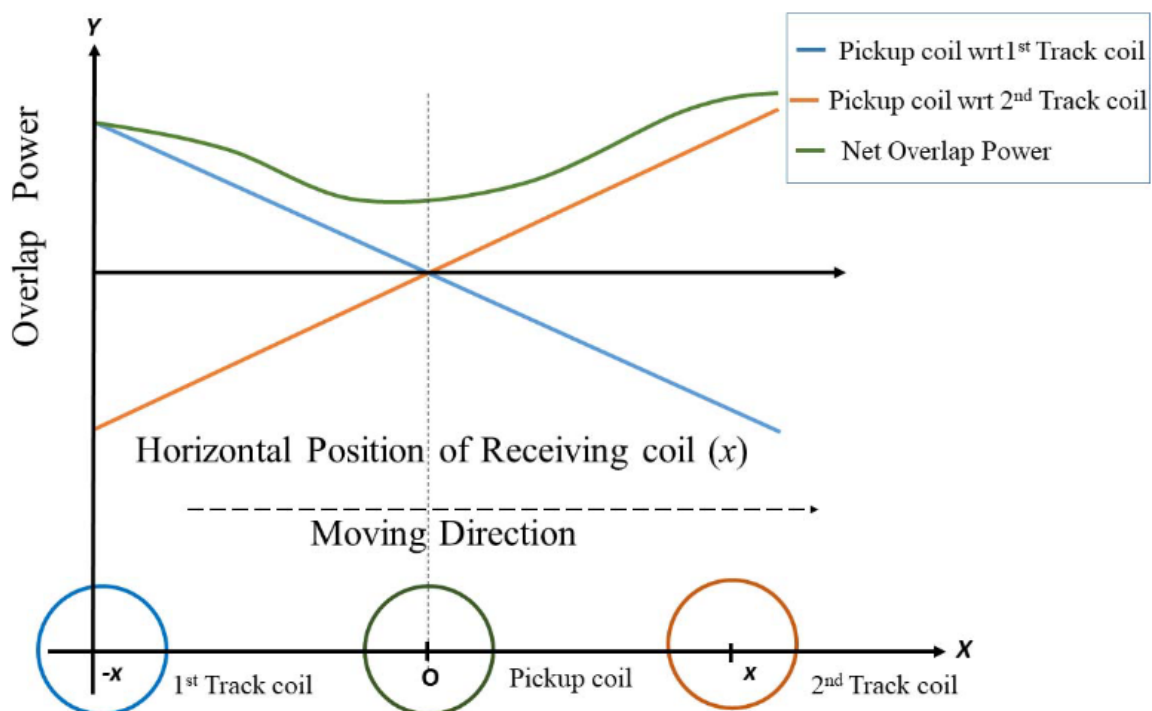


Σχήμα 2.8. Διάγραμμα της δυναμικής ασύρματης φόρτισης.

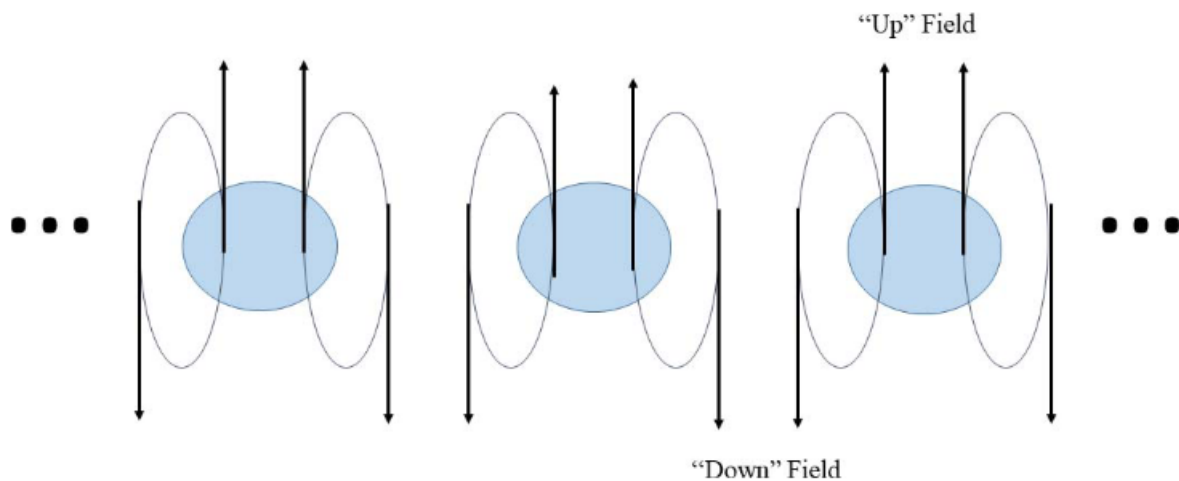
Τα πηνία στο οδόστρωμα αποτελούν μια διαδρομή που μεταφέρει συνεχώς ισχύ στο πηνίο του συλλέκτη. Η ισχύς που λαμβάνεται από αυτό το πηνίο, αφού υποστεί κατάλληλη επεξεργασία, φορτίζει την μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος. Έχουν επίσης αναπτυχθεί ασύρματα συστήματα χαμηλής ισχύος για τη μεταφορά ισχύος σε μια συσκευή με ενσωματωμένο πηνίο λήψης και πάνω από μια επιφάνεια που περιέχει ένα πηνίο πομπού και πολλούς συντονιστές, αλλά αυτά τα συστήματα δεν είναι κατάλληλα για τα ηλεκτρικά οχήματα, δεδομένου ότι κινούνται κατά μήκος μιας διαδρομής [9]. Υπάρχουν δύο τύποι διαδρομής που έχουν σχεδιαστεί για τα συστήματα δυναμικής ασύρματης φόρτισης: εκτεταμένη και συσσωρευμένη που διαφοροποιούνται με βάση το σχήμα. Μια εκτεταμένη διαδρομή αποτελείται από ένα πηνίο πομπού, του οποίου η διάσταση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από το πηνίο του συλλέκτη, αντίθετα μια συσσωρευμένη διαδρομή δημιουργείται από μια σειρά πηνίων με διαστάσεις συγκρίσιμες με το πηνίο του συλλέκτη. Η έρευνα για τις εκτεταμένες διαδρομές οδήγησε στην ανάπτυξη του πρωτοτύπου OLEV από το KAIST, ενώ η έρευνα για τις συσσωρευμένες διαδρομές ξεκίνησε από μια ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου του Auckland [17]. Για την συσσωρευμένη διαδρομή, μόνο ένα τμήμα της διαδρομής έχει το πηνίο πομπού το οποίο είναι συνδεδεμένο και συνεπώς παρέχει ισχύ στο πηνίο του δέκτη. Αυτή η λύση τροφοδοσίας, που συνήθως ονομάζεται τμηματοποίηση, είναι χρήσιμη τόσο για την αύξηση της απόδοσης της δυναμικής ασύρματης φόρτισης όσο και για

την αποφυγή της ακτινοβολίας των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων από τα μη συζευγμένα τμήματα της διαδρομής.

Η δυναμική ασύρματη φόρτιση εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης του οχήματος. Λόγω της αλλαγής της θέσης του δευτερεύοντος πηνίου, η ροή μεταβάλλεται επίσης. Υπάρχει διακύμανση της μεταφοράς ισχύος. Όταν το πηνίο διαδρομής και ο συλλέκτης είναι πλήρως ευθυγραμμισμένα, η μεταφορά ισχύος είναι 100%. Όταν η κίνηση συνεχίζεται, το πηνίο της λήψης κινείται προς ένα άλλο πηνίο διαδρομής σε ενδιάμεση θέση η απόδοση μειώνεται στο 50%. Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το γράφημα που δείχνει τη διακύμανση της μεταφοράς ισχύος με τη μεταβολή της θέσης των πηνίων διαδρομής [10]. Η πράσινη γραμμή είναι η καθαρή ισχύς που μεταφέρεται στο ηλεκτρικό όχημα. Η πορτοκαλί και η μπλε γραμμή καταδεικνύουν τη θέση των πηνίων λήψης σε σχέση με το πηνίο διαδρομής 1 και το πηνίο διαδρομής 2, αντίστοιχα. Ο άξονας x αναπαριστά τη θέση του δευτερεύοντος πηνίου όσον αφορά το πρωτεύον πηνίο 1 και το πρωτεύον πηνίο 2. Η μεταφορά ισχύος θα είναι μέγιστη σε τέλεια ευθυγράμμιση του πηνίου διαδρομής και του πηνίου του συλλέκτη και η μεταφορά ισχύος μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση. Ο λόγος για την παραπάνω μεταβολή της μεταφοράς ισχύος οφείλεται στο γεγονός ότι όλα τα πρωτεύοντα πηνία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά και φάση. Ως εκ τούτου, το ρεύμα διέγερσης ρέει και από τα δύο πηνία. Δημιουργείται μια πηγή μαγνητικών πεδίων, τα οποία επιστρέφουν μέσω του αέρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10.



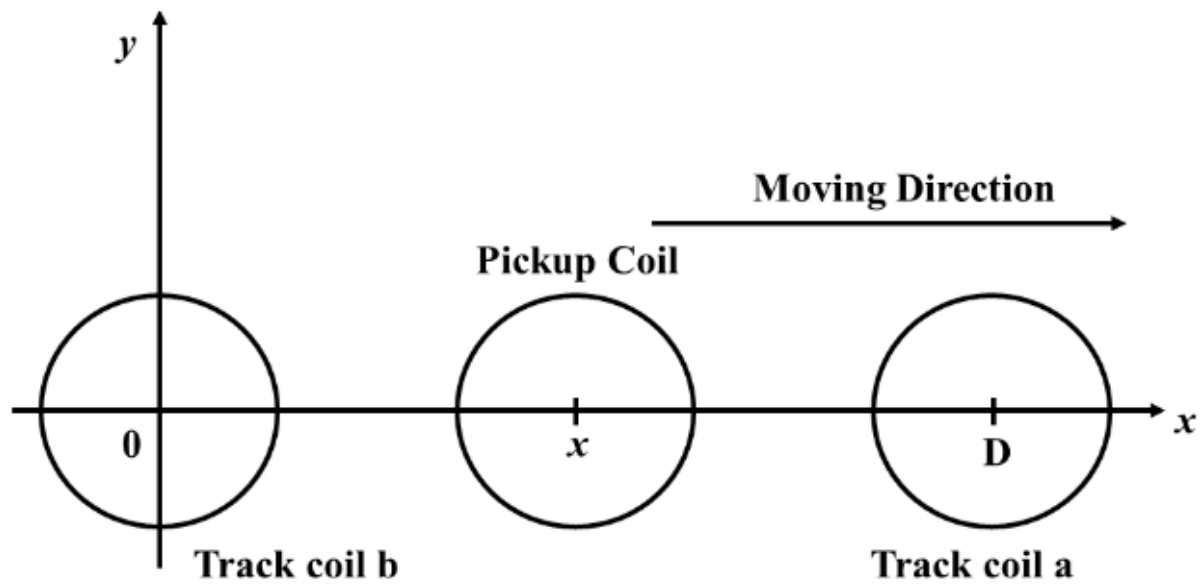
Σχήμα 2.9: Μεταφερόμενη ισχύς από το πρωτεύον στο δευτερεύον πηνίο.



Σχήμα 2.10: Αναστροφή του μαγνητικού πεδίου που εμφανίζει το πηνίο του συλλέκτη σε κίνηση.

Η δυναμική ασύρματη φόρτιση αντιμετωπίζει διάφορες δυσκολίες όπως και η στατική ασύρματη φόρτιση, αλλά το πιο δύσκολο πρόβλημα είναι η ανάπτυξή της, λόγω της τεράστιας επένδυσης για την εγκατάστασή της. Η απαίτηση ξεχωριστής λωρίδας για την ασύρματη φόρτιση περιορίζει την εφαρμογή της σε πόλεις με μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση. Οι ακόλουθες εξηγήσεις μπορούν να αποσαφηνίσουν την έννοια της εξάρτησης της ταχύτητας του οχήματος από τη μετάδοση ισχύος [3].

1) Λειτουργικές πτυχές της δυναμικής μεταφοράς ισχύος: Στο σύστημα δυναμικής ασύρματης φόρτισης, ενώ το ηλεκτρικό όχημα βρίσκεται σε κίνηση, τα πηνία του συλλέκτη αλληλεπιδρούν με τα πηνία της διαδρομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Για την αύξηση της απόδοσης και της ικανότητας μεταφοράς ισχύος, και τα δύο πηνία αντισταθμίζονται. Για την κατανόηση της θεμελιώδους έννοιας της στατικής ασύρματης φόρτισης, που συζητήθηκε προηγουμένως στην παρούσα εργασία, προέκυψε η έκφραση της μέγιστης εφικτής απόδοσης της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας για τη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος. Η ίδια έκφραση μπορεί να ακολουθηθεί και για την δυναμική ασύρματη φόρτιση, αλλά δεδομένου ότι υπάρχει αλλαγή συντελεστή στην απόσταση των πρωτευόντων και δευτερευόντων τυλιγμάτων, κατά συνέπεια υπάρχει μια μικρή διαφορά στη μελέτη. Για την ανάλυση της μεταβολής της απόστασης των τυλιγμάτων όσον αφορά το χρόνο για την μέγιστη μεταφορά ισχύος πρέπει να ληφθεί υπόψη η ακόλουθη παραδοχή. Η ακόλουθη ανάλυση δείχνει την εξάρτηση της ενέργειας που μεταφέρεται σε δεδομένο χρόνο για δυναμική ασύρματη φόρτιση.



Σχήμα 2.11: Άνω όψη της μετακίνησης του πηνίου του συλλέκτη κατά μήκος μιας εκτεταμένης διαδρομής.

Ο σχεδιασμός της διαδρομής δυναμικής ασύρματης φόρτισης πραγματοποιείται με βάση τις ακόλουθες υποθέσεις [3].

1) Τα πηνία τροχιάς εγκαθίστανται σε σταθερή απόσταση D . Η τιμή του D είναι τέτοια ώστε να μην υπάρχει παρεμβολή μεταξύ διαδοχικών πηνίων διαδρομής.

2) Τα πηνία διαδρομής τροφοδοτούνται με ημιτονοειδές ρεύμα i_t που έχει σταθερό μέγεθος I_t .

3) Το ηλεκτρικό όχημα πρέπει να κινείται σε ευθεία γραμμή όπως έχει οριστεί στην διαδρομή. Αυτή η υπόθεση μπορεί να αφαιρεθεί αργότερα καθώς βελτιώνεται η έρευνα.

4) Το ηλεκτρικό όχημα πρέπει να κινείται με σταθερή ταχύτητα U .

5) Η απόσταση που διανύει το ηλεκτρικό όχημα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου τροφοδοσίας είναι πολύ μικρότερη από το D .

6) Τα πηνία της τροχιάς και τα πηνία του συλλέκτη είναι ίσα και του ίδιου τύπου πυρήνα.

Σύμφωνα με την υπόθεση 1), η τάση που επάγεται στο πηνίο του συλλέκτη όταν ο συλλέκτης κινείται μεταξύ των δύο πηνίων διαδρομής είναι

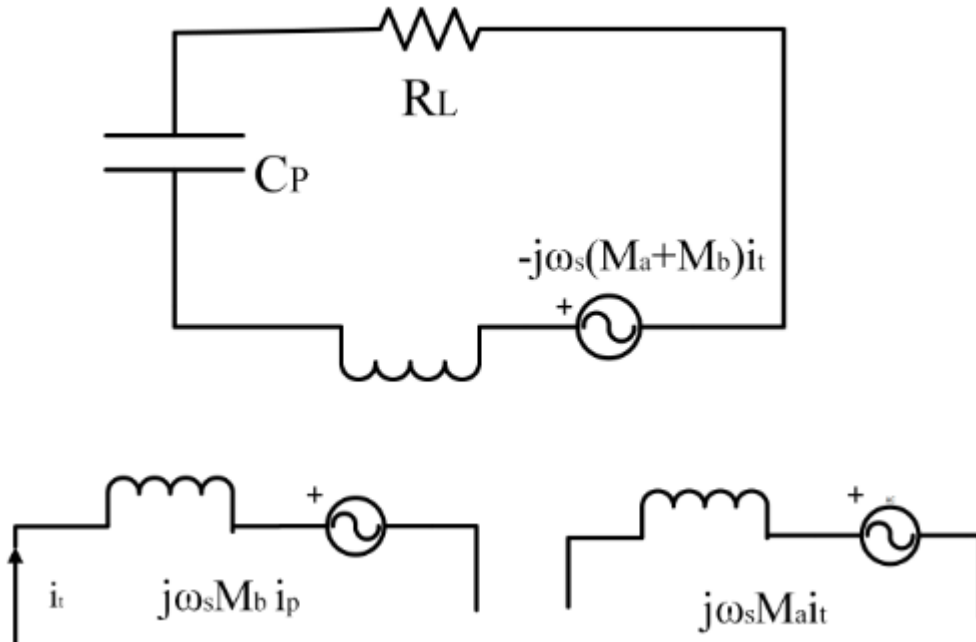
$$v_p = -\frac{d\lambda_b}{dt} - \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (10)$$

όπου η σύνδεση ροής που προέρχεται από το πηνίο διαδρομής πίσω από το πηνίο του συλλέκτη (πηνίο β) και η σύνδεση ροής που προέρχεται από το πηνίο διαδρομής μπροστά από αυτό (πηνίο α). Σύμφωνα με την υπόθεση 2, η (10) μπορεί να είναι να γραφεί ως

$$v_p = -[M_b(x) + M_a(x)] \frac{di_T}{dt} - \frac{d[M_b(x) + M_a(x)]}{dt} i_T. \quad (11)$$

Σύμφωνα με τις υποθέσεις 1) έως 3), ο πρώτος όρος της (2) έχει ημιτονοειδή κυματομορφή με μέγιστο μέγεθος V-I, που δίνεται από τη σχέση

$$V_1 = \omega_s I_T [M_b(x) + M_a(x)]. \quad (12)$$



Σχήμα 2.12: Ισοδύναμο διάγραμμα συστήματος δυναμικής ασύρματης φόρτισης

Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται το ισοδύναμο διάγραμμα κυκλώματος του πηνίου διαδρομής και του πηνίου συλλέκτη. Στο σχήμα 2.12, ο πυκνωτής C_p επιλέγεται να συντονίζεται με το L_p στη γωνιακή συχνότητα τροφοδοσίας. Η αντίσταση R_L αντιπροσωπεύει την αντίσταση της μπαταρίας που αναφέρεται στους ακροδέκτες του πηνίου λήψης και είναι το ισοδύναμο φορτίο της μπαταρίας. Ο κλάδος σειράς $L_p C_p$ συντονίζεται για οποιαδήποτε θέση x του πηνίου συλλέκτη, έτσι ώστε η τάση στον κλάδο να είναι μηδενική και το μέγιστο μέγεθος του του ρεύματος που διαρρέει το R_L είναι

$$I_p = \frac{V_1}{R_L} = \frac{\omega_s I_T [M_b(x) + M_a(x)]}{R_L}. \quad (13)$$

Σύμφωνα με την υπόθεση 5, η μεταβολή των αμοιβαίων επαγωγών λόγω της κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος σε μία περίοδο του ρεύματος τροφοδοσίας του πηνίου διαδρομής μπορεί να μη ληφθεί υπόψη και η μέση ισχύς που μεταφέρεται στο R_L κατά την περίοδο είναι

$$P_L = \frac{1}{2} I_p^2 R_L = \frac{1}{2} \frac{\omega_s^2 I_T^2 [M_b(x) + M_a(x)]^2}{R_L}. \quad (14)$$

Έστω T_D ο χρόνος που χρειάζεται το ηλεκτρικό όχημα για να καλύψει την απόσταση

D. Η ενέργεια που μεταφέρεται στο R_L κατά τη διάρκεια του T_D δίνεται από τη σχέση

$$E = \int_0^{T_D} P_L(t) dt. \quad (15)$$

Για την υπόθεση 4, είναι

$$dt = \frac{1}{U} dx. \quad (16)$$

Η εξίσωση (7) μπορεί να εκφραστεί ως εξής

$$E = \frac{1}{U} \int_0^{x(0)+D} P_L(x) dx. \quad (17)$$

όπου $x(0)$ είναι η θέση του ηλεκτρικού οχήματος κατά μήκος του άξονα x στο $t = 0$.

Χρησιμοποιώντας τις (6) και (9), η (17) μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής

$$E = \frac{1}{U} K \int_0^{x(0)+D} [M_b(x) + M_a(x)]^2 dx \quad (18)$$

όπου το K δίνεται στην (19) και λαμβάνει υπόψη το ρεύμα τροφοδοσίας των πηνίων διαδρομής και το ισοδύναμο φορτίο της μπαταρίας

$$K = \frac{1}{2} \frac{\omega_s^2 L_T^2}{R_L}. \quad (19)$$

Σύμφωνα με την υπόθεση 6, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για το αμοιβαίες επαγωγές:

$$M_a(x) = M(-x), M_b(x) = M_b(-x) \quad (20)$$

$$M_a(x) = M_b(x - D) \quad (21)$$

και η (10) μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής

$$E = \frac{1}{U} K \int_0^D [M_b(x) + M_a(x)]^2 dx. \quad (22)$$

Σύμφωνα με την (22), η ασύρματη ενέργεια που μεταφέρεται από το πηνίο της διαδρομής στο πηνίο του συλλέκτη είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας του ηλεκτρικού οχήματος. Ωστόσο, η συνολική ενέργεια που μεταφέρεται σε ένα χρονικό διάστημα δεν εξαρτάται από την ταχύτητα του ηλεκτρικού οχήματος. Εάν η δυναμική ασύρματη φόρτιση αναπτύσσεται σε ορισμένη διαδρομή, ο αριθμός των πηνίων διαδρομής που αλληλεπιδρούν με το πηνίο λήψης σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα είναι ευθέως ανάλογος της ταχύτητας του ηλεκτρικού οχήματος [3].

2.4.3 Σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση

Η σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων θα είναι εύκολα εφικτή όταν τόσο η στατική όσο και η δυναμική ασύρματη φόρτιση θα είναι διαθέσιμες παντού. Η σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση έχει οριστεί ως η φόρτιση του οχήματος όταν κινείται αργά ή σε θέση στάσης και αναχώρησης. Πρόκειται ουσιαστικά για το σχεδιασμό

ενός τέτοιου συστήματος που είναι ένας αυτόματος ανιχνευτής για την κατάσταση της φόρτισης. Εάν υπάρχει διαθέσιμη δυναμική φόρτιση, μπορεί να ξεκινήσει τη φόρτιση ασύρματα στη δυναμική διαδρομή, αλλά εάν η δυναμική διαδρομή δεν είναι διαθέσιμη, το ίδιο σύστημα διαχειρίζεται αυτόματα τη φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος σε σταθερή θέση. Αυτό το σύστημα όχι μόνο θα λάβει τα πλεονεκτήματα της δυναμική ασύρματη φόρτιση, αλλά και θα απλοποιήσει την πολυπλοκότητα του ελέγχου, σημαντική μείωση του κόστους του συστήματος υποδομής και αύξηση της ευθυγράμμισης του συστήματος. Η εφαρμογή της σχεδόν δυναμικής ασύρματης φόρτιση σε σηματοδότες κυκλοφορίας θα μπορούσε να είναι πολύ επωφελής, όπου κάθε λωρίδα στάσης θα εγκατασταθεί με πρωτογενή μπλοκ ισχύος, κάθε μπλοκ ισχύος θα μπορούσε να είναι ελεγκτής με μεμονωμένο μετατροπέα ή λίγα μπλοκ με ενιαίο μετατροπέα. Η ενεργοποίηση και η απενεργοποίηση των μπλοκ θα μπορούσε να ελέγχεται με ελεγκτή συνδεδεμένο με ελεγκτές φωτεινών σηματοδοτών.

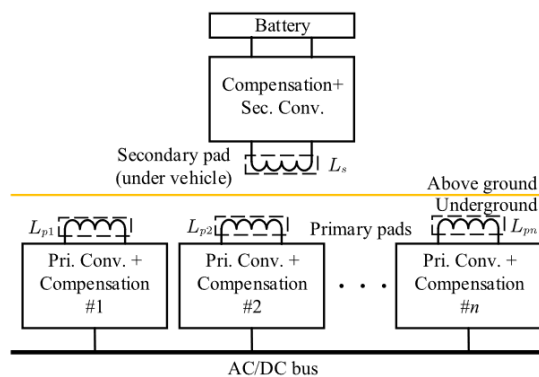
Επιτεύχθηκαν πολύ σημαντικά αποτελέσματα για την εφαρμογή της. Αυτή η μέθοδος φόρτισης θα ήταν πολύ χρήσιμη στα συστήματα λεωφορείων. Δεδομένου ότι τα λεωφορεία σταματούν σε τακτικές αποστάσεις, επομένως σε στάσεις λεωφορείων, τα πηνία στατικής φόρτισης μπορούν να στερεωθούν μέσα στο δρόμο. Το σύστημα του KAIST OLEV περιγράφεται στον ιστότοπο και στα βίντεό του ως δυναμική φόρτιση σε χαμηλά επίπεδα ισχύος κατά τη διάρκεια της οδήγησης και φόρτιση υψηλής ισχύος στις στάσεις λεωφορείων, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως σχεδόν δυναμική φόρτιση [3].

Κεφάλαιο 3^ο: Ανάλυση των τοπολογιών και των μεθόδων ελέγχου στη δυναμική ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Για να αντιμετωπιστεί η αλλαγή της σύζευξη λόγω της κίνησης του οχήματος, χρησιμοποιούνται συνήθως πολλαπλά μπλοκ σε ένα σύστημα δυναμικής ασύρματης φόρτισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1, με πολλαπλά πρωτεύοντα πηνία και ένα δευτερεύον πηνίο. Αυτός ο σχηματισμός είναι πιο συνηθισμένος λόγω των περιορισμών βάρους και μεγέθους των οχημάτων. Στη δυναμική ασύρματη φόρτιση, το I_{pri} παράγεται μέσω των μετατροπέων front-end και των βαθμίδων αντιστροφεία και η επαγόμενη τάση της δευτερεύουσας πλευράς οδηγεί την ισχύ στην πλευρά του φορτίου. Το πρωτεύον σύστημα είναι συνήθως ενσωματωμένο στο οδόστρωμα ή στα υπόγεια συστήματα, ενώ τα οχήματα περιλαμβάνουν τα δευτερεύοντα συστήματα. Συνήθως χρησιμοποιούνται αντισταθμίσεις συντονισμού και στις δύο πλευρές για να μειωθούν οι τάσεις των ηλεκτρονικών ισχύος και να επιτευχθεί ευκολότερη ομαλή μεταγωγή [4].

Η αλλαγή στη σύζευξη στη δυναμική ασύρματη φόρτιση παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες ελέγχου, οι οποίες συνήθως απαιτούν την επίτευξη των ακόλουθων στόχων για καλύτερο έλεγχο:

- 1) σχεδιασμοί ζεύξης που ελαχιστοποιούν τη διακύμανση της σύνδεσης ροής με το δευτερεύον,
- 2) τοπολογίες αντιστάθμισης για τη μείωση των επιπτώσεων της αλλαγής της σύζευξης,
- 3) επιλογή της παραμέτρου ελέγχου για την επίτευξη της επιθυμητής ροής ισχύος με ελάχιστες διακυμάνσεις ελέγχου παρόλες τις αλλαγές στη ζεύξη,
- 4) προσεκτική εξέταση των καθυστερήσεων επικοινωνίας στο εύρος ζώνης ελέγχου.



Σχήμα 3.1: Τυπικό σύστημα δυναμικής ασύρματης φόρτισης για εφαρμογές φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος.

3.1 Μαγνητικοί συζεύκτες για δυναμική ασύρματη φόρτιση

Οι μαγνητικοί ζεύκτες στα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας σχεδιάζονται μέσω βελτιστοποίησης των διατάξεων και των διατάξεων ευθυγράμμισης για την επίτευξη υψηλής απόδοσης. Για τα σταθερά συστήματα, οι υψηλότεροι συντελεστές σύζευξης και οι υψηλότεροι συντελεστές ενδογενούς ποιότητας των πηνίων οδηγούν σε υψηλότερες αποδόσεις [16]. Ωστόσο, τα συστήματα δυναμικής ασύρματης φόρτισης χρησιμοποιούν επιπλέον διαφορετικές μορφές διατάξεων ράγας πολλαπλών πόλων ή μπλοκ στα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα υποσυστήματα για την επίτευξη χαμηλότερων διακυμάνσεων στην αμοιβαία επαγωγή και στα χαρακτηριστικά μεταφοράς ισχύος. Σύμφωνα με την σχέση (1), η απόδοση ελέγχου βελτιώνεται όταν η διάταξη ζεύξης παρέχει ένα πιο ομοιόμορφο πεδίο αμοιβαίας επαγωγής.

3.1.1 Διαμορφώσεις ζεύξης

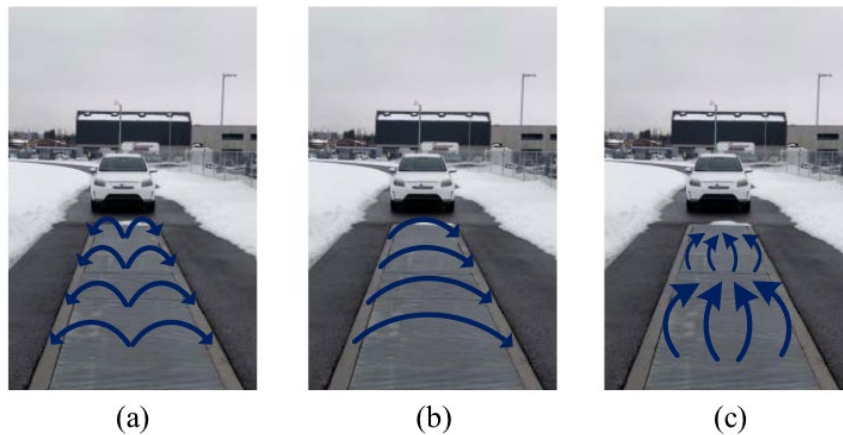
Σε γενικές γραμμές, οι διαμορφώσεις των ζεύξεων μπορούν να ταξινομηθούν σε κατασκευές τύπου γραμμής με εναλλασσόμενους σχηματισμούς πόλων στον δρόμο και σε συστήματα με πολλαπλά ξεχωριστά μπλοκ στο πρωτεύον. Οι ζεύκτες τύπου γραμμής χρησιμοποιούνται συνήθως στην πρωτεύουσα πλευρά. Τα πρωτογενή συστήματα τύπου πολλαπλών μπλοκ χρησιμοποιούν διαφορετικά σχήματα πηνίων κατά μήκος του οδοστρώματος για να δημιουργήσουν παρόμοια μοτίβα ροής [4]. Οι δευτερεύουσες πλευρές αποτελούνται ως επί το πλείστον από ένα μόνο μπλοκ, με το μικρότερο δυνατό μέγεθος, σύμφωνα με την προτίμηση των κατασκευαστών OEM (Original Equipment Manufacturer), αλλά σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πολλαπλά μπλοκ στη δευτερεύουσα πλευρά για να πιάσουν τη ροή της μεταβατικής περιοχής [20]. Οι ξεχωριστοί ζεύκτες τύπου μπλοκ απαιτούν ελέγχους κατανομής, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση του κατάλληλου μπλοκ με βάση τη θέση του οχήματος. Η κριτική ανάλυση των ζεύξεων δείχνει ότι παράγονται τρεις διαφορετικοί τύποι σχημάτων ροής ως εξής.

1) Καταρράκτης διπλής όψης: Παραγωγή βόρειου και νότιου πόλου με κάθετο προσανατολισμό.

2) Ροή μονής όψης B-N απέναντι από το δρόμο: Παραγωγή βόρειων και νότιων πόλων προσανατολισμένων οριζόντια απέναντι από το δρόμο.

3) Ροή μονής όψης B-N κατά μήκος του δρόμου: Παραγωγή βόρειων και νότιων πόλων προσανατολισμένων οριζόντια κατά μήκος του δρόμου.

Μια απεικόνιση αυτών των σχημάτων στο δρόμο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2, ως επίστρωση σε μια πίστα δοκιμών δυναμικής ασύρματης φόρτισης, και οι λεπτομέρειες των ζεύξεων τύπου γραμμής και των ζεύξεων τύπου μπλοκ που βοηθούν στην επίτευξη αυτών των σχημάτων παρατίθενται στον πίνακα 3.1. Μεταξύ αυτών, οι εναλλασσόμενοι σχηματισμοί πόλων κατά μήκος του δρόμου με μπλοκ DD είναι καλύτεροι όσον αφορά τη συμβατότητα με τα σταθερά πρότυπα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, παρόλο που έχουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις σύζευξης. Για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών σύζευξης, μερικές εργασίες χρησιμοποιούν κατασκευές πολλαπλών πλεγμάτων όπως DDQ και τροποποιημένες κατασκευές όπως διασταυρωμένα DD και επικαλυμμένα DD μπλοκ [4].



Σχήμα 3.2: Διαγράμματα ροής που δημιουργούνται από ζεύκτες κατά μήκος του δρόμου. (a) Τύπος καταρράκτη διπλής όψης. (b) Τύπος μονής όψης B-N στην απέναντι πλευρά του δρόμου. (c) Τύπος μονής όψης B-N κατά μήκος του δρόμου.

Flux pattern	Couplers	Flux continuity along road
Double sided waterfall with N-S poles arranged vertically	<ul style="list-style-type: none"> Rails: E-type [60], W-type [2], π-type [52] Pads: Circular [47], Rectangular [18], Cylindrical [27] 	Good, with coupling dips during pad-to-pad transition
Single-sided N-S poles across road	<ul style="list-style-type: none"> Rails: U-type [64] Pads: DD [80], Bipolar [57] (when directed perpendicular to road) 	Good, with coupling dips during pad-to-pad transition
Single-sided alternate N-S poles along road	<ul style="list-style-type: none"> Rails: I-type [37], S-type [38], n-type [26] Pads: DD [80], Bipolar [57] (when directed along the road) 	<ul style="list-style-type: none"> Poor, zero coupling during transition regions Multi-coil secondaries or modified structures required for flat coupling profile [21], [30], [44]

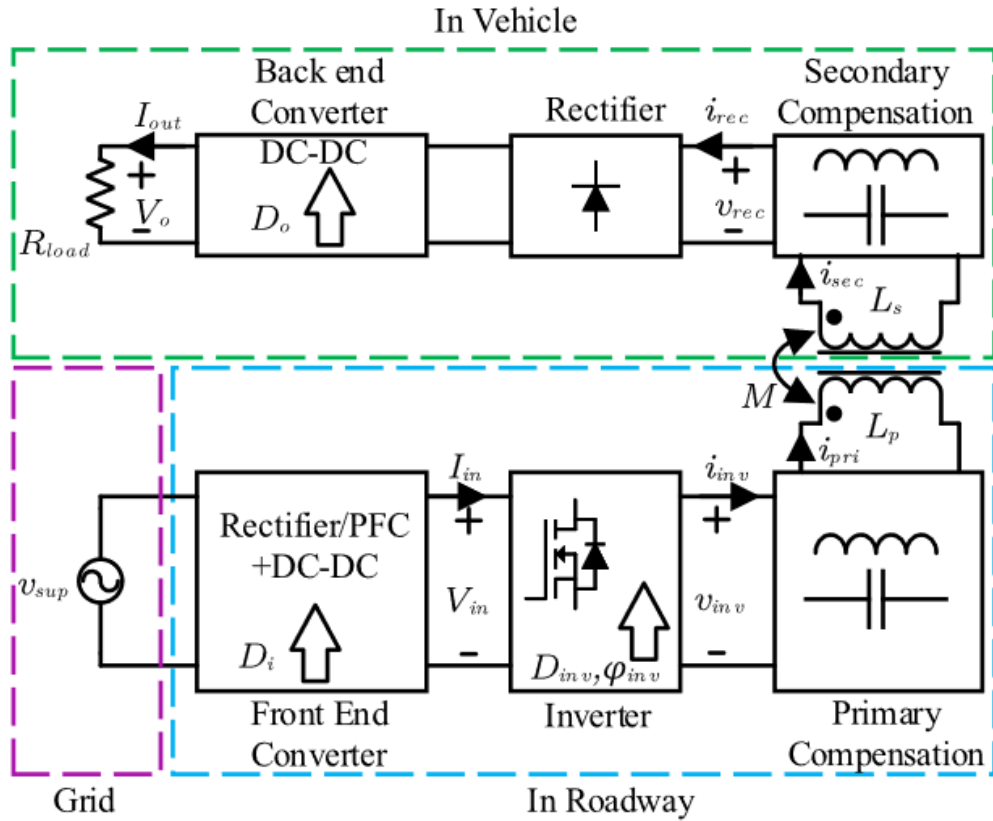
Πίνακας 3.1: Πρότυπα ροής που λαμβάνονται από τυπικούς μαγνητικούς ζεύκτες σε δυναμική ασύρματη φόρτιση και σύγκριση των χαρακτηριστικών τους.

3.1.2 Σύνοψη των ρόλων των μαγνητικών ζεύξεων στους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης

Οι μαγνητικοί ζεύκτες καθορίζουν το προφίλ ζεύξης κατά μήκος του οδοστρώματος, το οποίο κατηγοριοποιήθηκε σε τρία χαρακτηριστικά μέσω της κριτικής ανάλυσης των διαφόρων τοπολογιών. Η σύζευξη τείνει να είναι αρκετά σταθερή όταν τα πρωτογενή και δευτερογενή μπλοκ είναι ως επί το πλείστον ευθυγραμμισμένα, ενώ μετά από μία ορισμένη παραμόρφωση, η σύζευξη πέφτει εκθετικά. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη με το σχεδιασμό του πηνίου είναι ο ρυθμός μεταβολής της σύζευξης καθώς και η απόσταση μεταξύ των γειτονικών πρωτογενών μπλοκ για να καθοριστεί πόσο επικαλύπτονται τα χαρακτηριστικά των παραγόντων σύζευξης. Εάν ένας από τους στόχους είναι η διατήρηση σταθερής ισχύος στο όχημα, τότε ο ρυθμός μεταβολής της σύζευξης και η επικάλυψη μεταξύ των χαρακτηριστικών της σύζευξης καθορίζουν τις προδιαγραφές εύρους ζώνης ελέγχου. Λαμβάνοντας υπόψη τη συμβατότητα με διάφορα άλλα συστήματα δυναμικής ασύρματης φόρτισης, αλλά και με σταθερά συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας, ο εναλλασσόμενος πόλος κατά μήκος του διαγράμματος ροής δρόμου κρίνεται ως ο πλέον κατάλληλος. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο πρέπει να φροντίζει για τις περιοχές μηδενικής σύζευξης κατά τη διάρκεια των περιοχών μετάβασης του μπλοκ [4].

3.2 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για δυναμική ασύρματη φόρτιση

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος που απαιτούνται σε ένα τυπικό σύστημα δυναμικής ασύρματης φόρτισης δικτύου-οχήματος περιλαμβάνουν τέσσερα στάδια μετατροπής, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Αυτά περιλαμβάνουν μετατροπείς front-end και αντιστροφείς υψηλής συχνότητας στην πρωτεύουσα πλευρά και ανορθωτές και μετατροπείς back-end ΣΡ-ΣΡ στη δευτερεύουσα πλευρά. Τα στάδια μετατροπής, οι τοπολογίες που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα στάδια και οι χειρισμοί ελέγχου που παρέχουν παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ενός συστήματος δυναμικής ασύρματης φόρτισης με τα διάφορα στάδια και τις χρήσιμες διατάξεις ελέγχου.

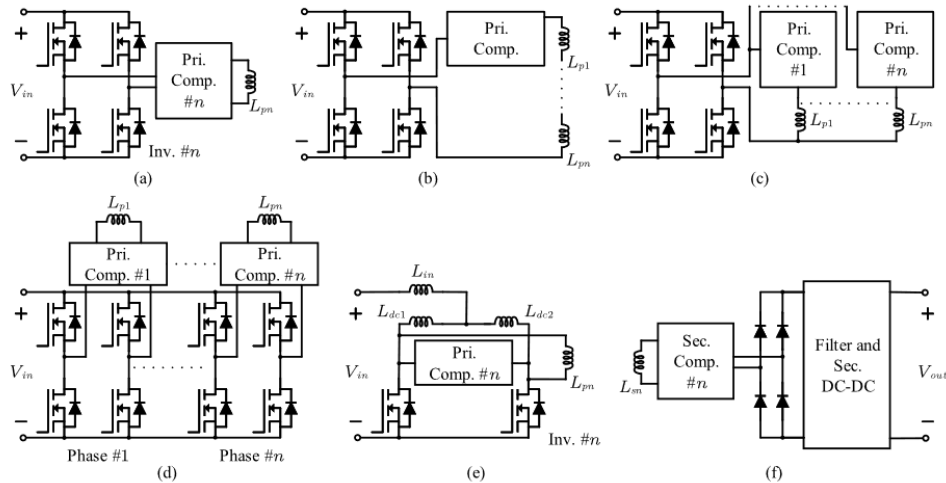
Converter stage	Topologies	Control handles
Front-end converter	<ul style="list-style-type: none"> Rectifier/Power factor correction (PFC) [60] PFC + buck or boost converter [37], [53] 	<ul style="list-style-type: none"> Duty ratio of PFC Duty ratio of buck or boost converter
Inverter	<ul style="list-style-type: none"> Single-phase [65] Multi-phase [46] Class EF [58] 	<ul style="list-style-type: none"> Duty ratio of switches Phase-shift among half-bridge legs Switching frequency
Rectifier	<ul style="list-style-type: none"> Full-bridge diode rectifier [37] Full-bridge synchronous rectifier [53] 	No controls
Back-end converter	<ul style="list-style-type: none"> Buck converter [55] Boost converter [77] Buck-boost converter [33] 	Duty ratio

Πίνακας 3.2: Στάδια μετατροπέα στη δυναμική ασύρματη φόρτιση και οι χειρισμοί ελέγχου που συνδέονται με αυτά

3.2.1 Μετατροπείς πρωτεύουσας πλευράς

Μεταξύ των βασικών μετατροπέων, οι μετατροπείς front-end περιλαμβάνουν συνήθως ανορθωτές στην πλευρά του δικτύου, μετατροπείς διόρθωσης συντελεστή ισχύος και πρόσθετα στάδια μετατροπέων ΣΡ-ΣΡ. Οι μετατροπείς ΣΡ-ΣΡ μπορεί να είναι απλοί μετατροπείς υποβιβασμού, ανύψωσης ή ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης, μεταξύ των οποίων ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης είναι συνηθισμένος. Οι έλεγχοι από τους μετατροπείς front-end ΣΡ-ΣΡ βοηθούν στη λειτουργία των βαθμίδων δυναμικής ασύρματης φόρτισης σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, βοηθώντας στην ομαλή εναλλαγή τους [21].

Οι κύριες διατάξεις αντιστροφών στην δυναμική ασύρματη φόρτιση περιλαμβάνουν μονοφασικούς, τριφασικούς ή πολυφασικούς αντιστροφείς με τροφοδοσία τάσης [22] αντιστροφείς push-pull με τροφοδοσία ρεύματος και κατασκευές κατηγορίας EF, οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4. Αυτοί οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται σε συστήματα δυναμικής ασύρματης φόρτισης για την τροφοδοσία ενός ή περισσότερων πηνίων και παρέχουν διαφορετικούς τρόπους ελέγχου της ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των κατάλληλων μπλοκ. Διαθέτουν επίσης διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας υλοποίησης. Λεπτομέρειες σχετικά με αυτά παρέχονται στον πίνακα 3.3. Όλες τους προσφέρουν συνήθως έλεγχο του συντελεστή ισχύος, ενώ οι διατάξεις πλήρους γέφυρας και οι πολυφασικές διατάξεις προσφέρουν επίσης έλεγχο στη μετατόπιση φάσης.



Σχήμα 3.4: Τυπικές διατάξεις αντιστροφέα και ανορθωτή που χρησιμοποιούνται σε δυναμική ασύρματη φόρτιση. (a) Μονοφασικός αντιστροφέας που τροφοδοτεί ένα πηνίο. (b) Μονοφασικός αντιστροφέας που τροφοδοτεί πολλαπλά πηνία σε σειρά. (c) Μονοφασικός αντιστροφέας που τροφοδοτεί πολλαπλά πηνία παράλληλα. (d) Πολυφασικός (ή με πολλά άκρα) αντιστροφέας. (e) Αντιστροφέας με τροφοδοσία ρεύματος push-pull. (f) Ανορθωτής γέφυρας δίοδων για κάθε πηνίο με μονό/πολλαπλό δευτερεύον με μετατροπείς ΣΡ-ΣΡ.

Topology	Segmentation controls	System complexity
Single-phase inverter, driving single coil <ul style="list-style-type: none"> • Voltage-fed full-bridge [41], [65] • Current-fed push-pull [17] 	Detection based open-loop or closed-loop segmentation control	Simplest implementation, but requires many devices and communication between inverters
Single-phase full-bridge inverter, driving multiple coils <ul style="list-style-type: none"> • Coils in parallel [27], [28] • Coils in series [40], [57] 	<ul style="list-style-type: none"> • Coils and their compensations in parallel can be used for automatic segmentation control [27], [28] • Other configurations require open-loop or closed-loop detection schemes 	Lower inverter and device count than single coil drive configuration, but higher complexity of controls
Multi-phase bridge inverter, driving multiple coils [46], [50], [60], [78]	Phase switching based on coil positions	Lowest device count and communication requirements, but complex in terms of achieving soft-switching

Πίνακας 3.3: Τοπολογίες μετατροπέα και πηνίου σε δυναμική ασύρματη φόρτιση και η συμβολή τους στους χειρισμούς

3.2.2 Μετατροπείς δευτερεύουσας πλευράς

Οι ανορθωτές διόδων κυριαρχούν στις λύσεις για τους μετατροπείς της δευτερεύουσας πλευράς, ενώ πολλές εργασίες επιδιώκουν να διατηρήσουν τη δευτερεύουσα πλευρά όσο το δυνατόν απλούστερη. Η χρήση της σύγχρονης ανόρθωσης είναι περιορισμένη, καθώς βελτιώνει μόνο την απόδοση, ενώ δεν παρέχει πλεονεκτήματα στον έλεγχο [23]. Πολλά ελεγχόμενα από τη δευτερεύουσα πλευρά συστήματα δυναμικής ασύρματης φόρτισης χρησιμοποιούν έναν επιπλέον μετατροπέα ΣΡ-ΣΡ μετά τον ανορθωτή [24]. Αυτοί περιλαμβάνουν συνήθως μετατροπείς υποβιβασμού ή ανύψωσης-υποβιβασμού για ανορθωτές που λειτουργούν με ρεύμα (όπως με αντιστάθμιση δευτερεύοντος σε σειρά ή LCCL) και μετατροπείς ανύψωσης ή ανύψωσης-υποβιβασμού για ανορθωτές που λειτουργούν με τάση (όπως με παράλληλη αντιστάθμιση δευτερεύοντος). Συχνά χρησιμοποιούνται πολλαπλά στάδια ανόρθωσης με πηνία τύπου DDQ ή πολλαπλά δευτερεύοντα μπλοκ, αλλά δεν είναι συνηθισμένα, καθώς αυξάνουν τον όγκο του οχήματος [4].

3.2.3 Περίληψη των ρόλων των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος στους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης

Οι μετατροπείς καθορίζουν τη λειτουργία των χειρισμών στο σύστημα δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Οι εκφράσεις που αφορούν τις διάφορες δυνατότητες ελέγχου και τις παραμέτρους του κυκλώματος ελέγχου παρατίθενται στον πίνακα 3.4, δείχνοντας πώς επηρεάζουν τους χειρισμούς. Ως μετατροπέας front-end ΣΡ-ΣΡ θεωρείται ένας μετατροπέας υποβιβασμού. Οι έλεγχοι του βαθμού απόδοσης (D_o και D_i) είναι κοινοί για τους μετατροπείς front και back-end, ενώ τα συστήματα δυναμικής ασύρματης φόρτισης χωρίς αυτά τα στάδια

χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον ελέγχους μετατόπισης φάσης αντιστροφεία. Οι αλλαγές του βαθμού απόδοσης και της συχνότητας του αντιστροφεία συνήθως αποφεύγονται, καθώς οδηγούν σε υψηλότερες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Ωστόσο, ο έλεγχος μετατόπισης φάσης του αντιστροφεία μπορεί επίσης να οδηγήσει σε υψηλότερες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές εκτός από υψηλότερες απώλειες, μέσω της απώλειας της ομαλής μεταγωγής σε ορισμένα σημεία λειτουργίας. Έτσι, η ύπαρξη των ελέγχων στους μετατροπείς front- ή back-end βοηθά στη λειτουργία του συστήματος με υψηλή απόδοση και χαμηλή ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή. Ωστόσο, οι μετατροπείς απαιτούνται να έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν την ενεργοποίηση ή την απενεργοποίηση των κατάλληλων πηνίων ανάλογα με τη θέση του οχήματος [4].

Control handle	Topology	Control Relations
Inverter phase shift (ϕ_{inv})	Voltage-fed inverter	$V_{inv} = \frac{2\sqrt{2}V_{in}}{\pi} \sin\left(\frac{\phi_{inv}}{2}\right)$
	Current-fed inverter	$V_{inv} = \frac{\pi V_{in}}{2\sqrt{2} \sin\left(\frac{\phi_{inv}}{2}\right)}$
Front-end buck converter duty ratio (D_i)	Voltage-fed inverter	$V_{inv} = \frac{2\sqrt{2}V_s D_i}{\pi}$
	Current-fed inverter	$V_{inv} = \frac{\pi V_s D_i}{2\sqrt{2}}$
Back-end converter duty ratio (D_o)	C-filter + buck	$R_e = \frac{8R_{load}}{\pi^2 D_o^2}$
	C-filter + buck-boost	$R_e = \frac{8R_{load}(1-D_o)^2}{\pi^2 D_o^2}$
	LC-filter + boost	$R_e = \frac{\pi^2 R_{load}(1-D_o)^2}{8}$
	LC-filter + buck-boost	$R_e = \frac{\pi^2 R_{load}(1-D_o)^2}{8D_o^2}$

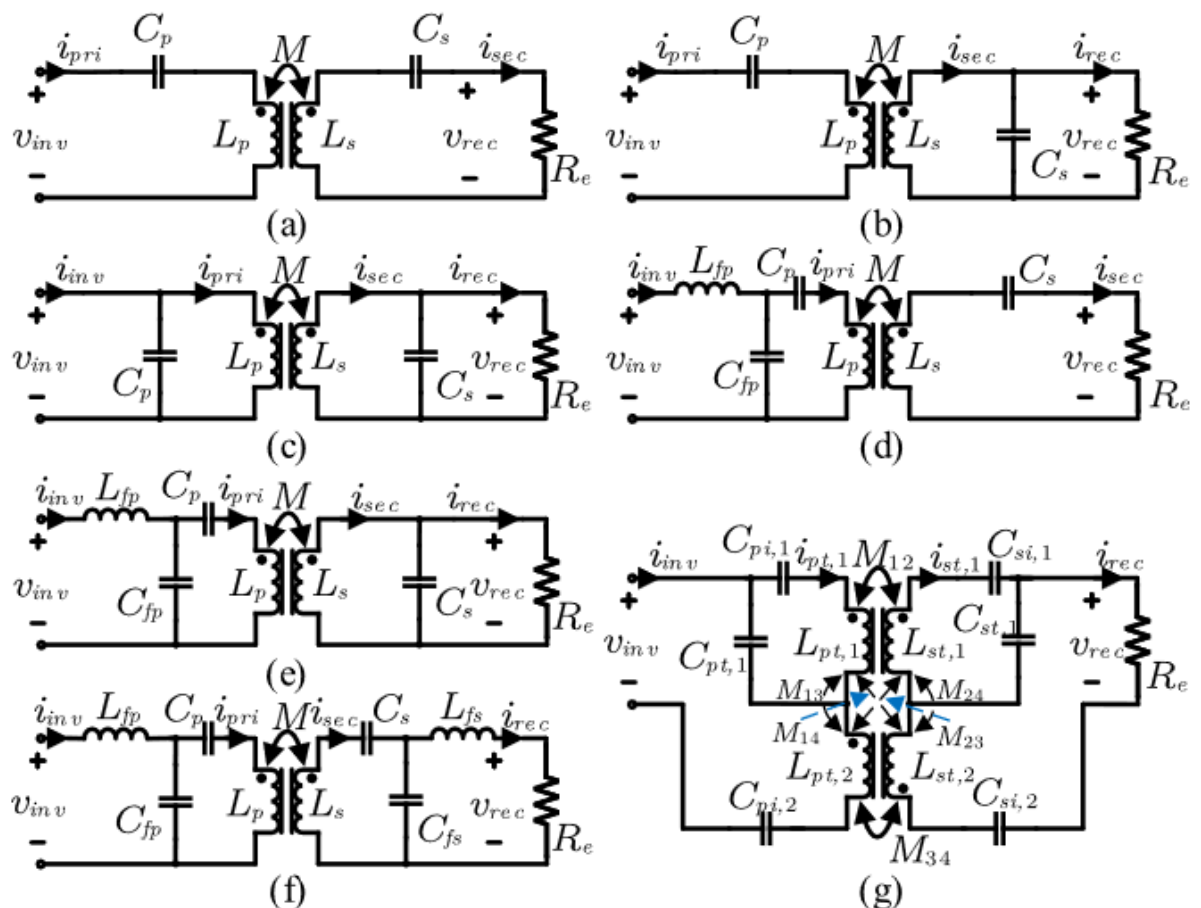
Πίνακας 3.4: Σχέσεις μεταξύ των ενεργειών ελέγχου και των μεγεθών του κυκλώματος δυναμικής ασύρματης φόρτισης

3.3 Τοπολογίες αντιστάθμισης για δυναμική ασύρματη φόρτιση

Τα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος χρησιμοποιούν δίκτυα αντιστάθμισης συντονισμού για την αντιστάθμιση των απαιτήσεων άεργου ισχύος του πηνίου. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος με μειωμένες καταπονήσεις της συσκευής. Τα δίκτυα αντιστάθμισης καθορίζουν επίσης τα χαρακτηριστικά εξόδου σταθερής τάσης ή σταθερού ρεύματος και τη συμπεριφορά ομαλής μεταγωγής των διακοπών. Ως εκ τούτου, τα

δίκτυα αντιστάθμισης επιλέγονται με βάση τη συχνότητα λειτουργίας, τις απαιτήσεις που εξαρτώνται από το φορτίο των μεγεθών εξόδου και των ρευμάτων πηνίου και τις απαιτήσεις ομαλής μεταγωγής των διακοπών.

Οι τοπολογίες αντιστάθμισης στα διαθέσιμα σχέδια δυναμικής ασύρματης φόρτισης περιλαμβάνουν τοπολογίες LC δεύτερης τάξης και τοπολογίες μεγαλύτερης τάξης. Η λεπτομερής μελέτη αυτών των τοπολογιών δείχνει ότι αυτές μπορούν να γενικευτούν σε μερικές διαφορετικές κατηγορίες αντιστάθμισης, οι οποίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5. Σημαντικά χαρακτηριστικά ελέγχου, μεταγωγής μηδενικής τάσης και διασυνδεσιμότητας αυτών των δικτύων παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5, τα οποία καθορίζουν το ρόλο τους στους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Μεταξύ των αντισταθμίσεων ανώτερης τάξης, η τοπολογία CCC-T λειτουργεί ως αντιστάθμιση σειράς-σειράς, η τοπολογία LSP-S [23] λειτουργεί ως αντιστάθμιση LCCL-S και η τοπολογία LCC-LCC λειτουργεί παρόμοια με αντιστάθμιση σειράς-παράλληλης.



Σχήμα 3.5: Διαφορετικά χαρακτηριστικά αντιστάθμισης στη δυναμική ασύρματη φόρτιση.

(a) SS. (b) SP. (c) PP. (d) LCCL-S. (e) LCCL-P. (f) LCCL-LCCL. (g) Υβρίδιο σειράς.

Topology	Control characteristics		
	System Behavior	ZVS Capability	Interoperability
Series-Series (SS) (shown in Fig. 5(a)) [37]	<ul style="list-style-type: none"> Constant current output at resonance High current at no load and poor coupling 	Simple	Good - can be operated with other compensations
Series-Parallel (SP) [65]	<ul style="list-style-type: none"> Helps in automatic on/off of proper pads with slight topology modifications [27] Higher variation in power with coupling 	Difficult, due to capacitive reflected impedance	Good - can be operated with other compensations
Parallel-Parallel (PP) [30]	<ul style="list-style-type: none"> Better for low-inductance systems High variation in power with coupling, higher switch voltage stress 	Difficult, due to current-fed inverter	Good - can be operated with other compensations
LCCL-Series (LCCL-S) [22]	<ul style="list-style-type: none"> Constant primary coil current at resonance, low power fluctuation [22], [41] and good filtering of primary pad currents Higher compensation network volume 	Simple	Good - can be operated with other compensations
LCCL-Parallel (LCCL-P) [31]	<ul style="list-style-type: none"> Constant primary coil current at resonance Higher power fluctuations than LCCL-S 	Difficult, due to capacitive reflected impedance	Good - can be operated with other compensations
LCCL-LCCL [20]	<ul style="list-style-type: none"> Good control over primary pad current, low power fluctuations and good filtering of both pad currents Higher compensation network than all of the above 	Simple	Good - can be operated with other compensations
Series hybrid (SH) [80]	<ul style="list-style-type: none"> Very low power variation with coupling - combines advantages of SS and LCCL-LCCL topologies Complicated compensation tank design 	Simple	Poor - only works with specifically coupled DD pads on both sides
Re-configurable [17], [40], [48], [52], [57]	<ul style="list-style-type: none"> Offer circuit-based control of primary current, segmentation, soft-switching and circuit operation modes Complicated hardware than closed-loop systems 	<ul style="list-style-type: none"> Typically depends on the basic compensation topology Configurable primary capacitor array provides better ZVS operation [17] 	Poor - often require specific topologies for proper functionality

Πίνακας 3.5: Σημαντικές αντισταθμίσεις στη δυναμική ασύρματη φόρτιση και τα χαρακτηριστικά τους που αφορούν τους ελέγχους

Εκτός από την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών εξόδου, οι τοπολογίες αντιστάθμισης τροποποιούν τις τιμές μόνιμης κατάστασης του συντελεστή ποιότητας του δευτερεύοντος (Q_{sl}), της ανακλώμενης σύνθετης αντίστασης (Z_r) και του ρεύματος του πρωτεύοντος (I_{pri}). Για τις τυπικές χαρακτηριστικές αντισταθμίσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 3.5, οι εκφράσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 3.6. Για τις εκφράσεις των τοπολογιών υψηλότερης τάξης, χρησιμοποιείται το γενικευμένο μοντέλο T. Το μοντέλο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6. Οι εκφράσεις, V_{inv} και I_{inv} δηλώνουν την τάση και το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3 [4]. Για τη γενικευμένη ανάλυση, ο λόγος των συχνοτήτων προς τις συχνότητες συντονισμού (F_p, F_s), οι συντελεστές α και β για το μοντέλο T και οι χαρακτηριστικές αντιστάσεις (Z_{op}, Z_{os}) μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$F_p = \omega \sqrt{L_p C_p}, \quad F_s = \omega \sqrt{L_s C_s} \quad (22)$$

$$\alpha_p = \omega^2 L_{fp} C_{fp}, \quad \alpha_s = \omega^2 L_{fs} C_{fs} \quad (23)$$

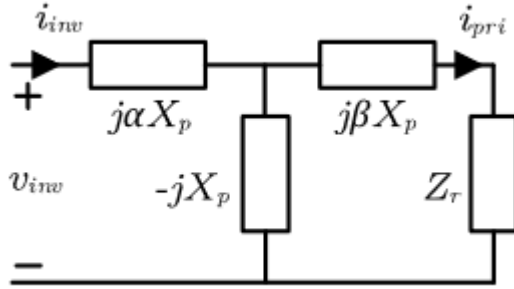
$$\beta_p = \omega^2 L_p C_{fp} - \frac{C_{fp}}{C_p}, \quad \beta_s = \omega^2 L_s C_{fs} - \frac{C_{fs}}{s} \quad (24)$$

$$Z_{op} = \sqrt{\frac{L_p}{C_p}}, Z_{os} = \sqrt{\frac{L_s}{C_s}}. \quad (25)$$

Από αυτές τις εκφράσεις, οι πράξεις συντονισμού προκύπτουν με

$$\text{Πρωτεύον: } F_p = 1, \alpha_p = \beta_p = 1 \quad (26)$$

$$\text{Δευτερεύον: } F_s = 1, \alpha_s = \beta_s = 1 \quad (27)$$



Σχήμα 3.6: Γενικευμένο διάγραμμα αντισταθμίσεων τύπου T.

Χωρίς απώλεια της γενικότητας, για τις εκφράσεις του πίνακα 3.6, χρησιμοποιείται η προσέγγιση της θεμελιώδους αρμονικής και οι δευτερεύουσες πλευρές θεωρούνται ότι λειτουργούν σε συντονισμό, κάτι που είναι τυπικό για τους σχεδιασμούς. Οι επιπτώσεις των συνθηκών μη συντονισμού, ωστόσο, μπορούν να ληφθούν υπόψη μέσω των γενικευμένων σχέσεων (22)-(25).

Για την υβριδική τοπολογία σειράς, η οποία σχεδιάζεται συνήθως με τμήματα LCCL και σειράς που λειτουργούν σε συντονισμό. Σε αυτή την τοπολογία, ο λόγος μεταξύ της αυτεπαγωγής του δικτύου LCCL και του γεωμετρικού μέσου της αυτεπαγωγής του DD μπλοκ είναι σημαντικός για τον προσδιορισμό του προφίλ ροής ισχύος με σύζευξη [4]. Οι εκφράσεις αυτές λαμβάνονται ως εξής

$$P_{out,sh} = \frac{V_{inv}^2 R_e}{\omega^2 \left(\frac{L_{pt,2}(LCL) L_{st,2}(LCL)}{M_{12}} + M_{34} \right)^2} \quad (28)$$

$$m = \sqrt{\frac{L_{pt,2}(LCL) L_{st,2}(LCL)}{L_{pt,1} L_{pt,2} L_{st,1} L_{st,2}}} \quad (29)$$

Γενικά, οι αντισταθμίσεις υψηλότερης τάξης παρέχουν καλύτερο έλεγχο του πρωτεύοντος ρεύματος, το οποίο συνήθως ρυθμίζεται σταθερά στους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Ωστόσο, αυξάνουν την πολυπλοκότητα της αντιστάθμισης. Οι βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης, εκτός από τις υβριδικές τοπολογίες, είναι επίσης συμβατές μεταξύ τους. Οι υβριδικές τοπολογίες αντιστάθμισης βοηθούν στο συνδυασμό των πλεονεκτημάτων των αντισταθμίσεων LC και υψηλότερης τάξης. Ωστόσο, δεν είναι συνήθως συμβατές με

άλλες τοπολογίες. Δεδομένου ότι η υβριδική δομή σειράς παρέχει καλύτερες επιδόσεις σε σύγκριση με την παράλληλη υβριδική, η τελευταία δεν παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5 και στον πίνακα 3.5 [4].

Επιπλέον, υπάρχουν μερικές αναδιαμορφώσιμες τοπολογίες, οι οποίες παρέχουν κάποιους κυκλωματικούς ελέγχους των τρόπων λειτουργίας. Ωστόσο, τα βασικά χαρακτηριστικά ελέγχου καθορίζονται από τα βασικά χαρακτηριστικά αντιστάθμισης, τα οποία εμπίπτουν στα προαναφερθέντα. Είναι ανεπαρκείς από την άποψη της διασύνδεσης, λόγω των ειδικών λειτουργιών τους.

Οι εκφράσεις του πίνακα 3.6 και οι σχέσεις (28) και (29) καταδεικνύουν ότι οι τοπολογίες αντιστάθμισης τροποποιούν τη σχέση μεταξύ της αμοιβαίας επαγωγής και της ισχύς εξόδου. Στους μετατροπείς με τροφοδοσία τάσης, οι τοπολογίες σειράς και τύπου T στην πλευρά του πρωτεύοντος προσφέρουν καλύτερα σχέδια για λειτουργία μεταγωγής μηδενικής τάσης σε μεγάλο εύρος φορτίου και για τον έλεγχο των ρευμάτων του πρωτεύοντος πηνίου. Ωστόσο, απαιτείται η σύγκριση των επιδόσεων αυτών των τοπολογιών για έναν ενιαίο σχεδιασμό συστήματος, ώστε να κριθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους στη ροή ισχύος ελέγχου.

Topology	Q_{sl}	Z_r	$ I_{pri} $
SS	$\frac{\omega L_s}{R_e}$	$\frac{k^2 \omega^2 L_p L_s}{R_e}$	$\frac{V_{inv}}{F_p Z_{op} \sqrt{Q_{sl}^2 + \left(1 - \frac{1}{F_p^2}\right)^2}}$
SP	$\frac{R_e}{\omega L_s}$	$k^2 \omega^2 L_p C_s R_e - j k^2 \omega L_p$	$\frac{V_{inv}}{F_p Z_{op} \sqrt{k^4 Q_{sl}^2 + \left(1 - \frac{1}{F_p^2} - k^2\right)^2}}$
PP	$\frac{R_e}{\omega L_s}$	$k^2 \omega^2 L_p C_s R_e - j k^2 \omega L_p$	$\frac{V_{inv}}{F_p Z_{op} \sqrt{k^4 Q_{sl}^2 + (1 - k^2)^2}}$
LCCL-S	$\frac{\omega L_s}{R_e}$	$\frac{k^2 \omega^2 L_p L_s}{R_e}$	$\frac{V_{inv}}{\sqrt{Z_r (1 - \alpha_p)^2 + \frac{(\alpha_p + \beta_p - \alpha_p \beta_p)^2}{\omega^2 C_{fp}^2}}}$
LCCL-P	$\frac{R_e}{\omega L_s}$	$\underbrace{k^2 \omega^2 L_p C_s R_e}_{\Re(Z_r)} - j \underbrace{k^2 \omega L_p}_{\Im(Z_r)}$	$\frac{V_{inv}}{\sqrt{\Re(Z_r) (1 - \alpha_p)^2 + \left(\Im(Z_r) + \frac{\alpha_p + \beta_p - \alpha_p \beta_p}{\omega C_{fp}}\right)^2}}$
LCCL-LCCL	$\frac{L_s R_e}{\omega L_{fs}^2}$	$\frac{k^2 \omega^2 L_p L_s C_{fs} R_e}{L_{fs}}$	$\frac{V_{inv}}{\sqrt{Z_r (1 - \alpha_p)^2 + \frac{(\alpha_p + \beta_p - \alpha_p \beta_p)^2}{\omega^2 C_{fp}^2}}}$

Πίνακας 3.6: Εκφράσεις για τις εξεταζόμενες τοπολογίες αντιστάθμισης

3.4 Στόχοι ελέγχου, εφαρμογές και επικοινωνίες στη δυναμική ασύρματη φόρτιση

Ενώ οι τοπολογίες του ζεύκτη, του μετατροπέα και της αντιστάθμισης καθορίζουν τη σταθερή λειτουργία ενός συστήματος δυναμικής ασύρματης φόρτισης, οι έλεγχοι είναι απαραίτητοι για τη διατήρηση της επιθυμητής απόδοσης παρουσία μεταβολών στο φορτίο, τη ζεύξη και άλλες παραμέτρους του συστήματος. Ενώ ο έλεγχος της ροής ισχύος είναι ο κύριος στόχος στα συστήματα δυναμικής ασύρματης φόρτισης, οι άλλοι υποστηρικτικοί στόχοι περιλαμβάνουν τους ελέγχους κατανομής, τη λειτουργία μεταγωγής μηδενικής τάσης και αντιστάθμισης, οι οποίοι βοηθούν σε διάφορες σημαντικές παραμέτρους λειτουργίας των συστημάτων δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Οι είσοδοι ελέγχου που χρησιμοποιούνται συνήθως στη δυναμική ασύρματη φόρτιση επισημαίνονται στο σχήμα 3.3. Ενώ διατίθενται τόσο υλοποιήσεις ανοικτού όσο και κλειστού βρόχου για τους ελέγχους ροής ισχύος και κατανομής, όπως φαίνεται στον πίνακα 3.7, η λειτουργία μεταγωγής μηδενικής τάσης και οι έλεγχοι εναλλαγής λειτουργίας γίνονται συνήθως σε ανοικτό βρόχο [4].

Control objective	Implementation type	Methods	Stability	Complexity	Communications
Power flow	Open-loop	<ul style="list-style-type: none"> • Large secondary pads and <i>LCCL-LCCL</i> compensation [20] • Optimized <i>LCCL-S</i> compensation with lagging primary phase [22] • Crossed DD primary pads with double-coil excitation [21] • <i>n</i>-type rail and DDQ secondary [26] • <i>CCC-T</i> topology operated above resonance [42] • Class EF inverter and Class D rectifier • Hybrid compensations on both sides with DD pads [80], [81] 	Poor	High	Typically not required
	Closed-loop	<ul style="list-style-type: none"> • Primary side control [16], [36], [38], [53], [65] • Secondary side control [16], [18], [29]–[32], [46], [55], [56], [60], [61], [77] • Dual side control [18], [46], [55], [56], [61], [77] 	High	<ul style="list-style-type: none"> • High for dual side control • Low for primary or secondary side control 	<ul style="list-style-type: none"> • Not required for secondary side control • Required for primary or dual side control
Segmentation	Open-loop	<ul style="list-style-type: none"> • Reflexive field containment [27] • Circuit based Autotuning [28] • Constant current driven through paralleled <i>LCCL</i> compensated coils [40] 	Poor	High	Typically not required
	Closed-loop	<ul style="list-style-type: none"> • Primary side detection [31], [43], [45], [50], [55], [77] • Secondary side controls [33], [62], [63] 	High	<ul style="list-style-type: none"> • Mostly high • Typically impractical for secondary side 	Required

Πίνακας 3.7: Έλεγχοι ανοικτού και κλειστού βρόχου της ροής ισχύος και της τμηματοποίησης στη δυναμική ασύρματη φόρτιση και σχετική σύγκριση τους

3.4.1 Στόχοι ελέγχου και συστήματα εφαρμογής

1) Έλεγχος ροής ισχύος: Η διατήρηση του ελέγχου της ροής ισχύος ανεξάρτητα από την κακή ευθυγράμμιση και την ταχύτητα των οχημάτων είναι ο βασικός στόχος ελέγχου σε κάθε σύστημα δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Καθορίζεται από την εξίσωση ισχύος στην σχέση (1). Οι προσεγγίσεις ανοικτού βρόχου χρησιμοποιούν μεθόδους βασισμένες σε κυκλώματα για τον έλεγχο της ροής ισχύος, με αποτέλεσμα συχνά να δημιουργείται πολύπλοκο υλικό. Οι έλεγχοι κλειστού βρόχου παρέχουν υψηλότερη σταθερότητα με απλούστερους σχεδιασμούς κυκλωμάτων ισχύος, αλλά προσθέτουν πολυπλοκότητα στη σχεδίαση του κυκλώματος ελέγχου [4]. Επιπλέον, οι υλοποιήσεις ελέγχου κλειστού βρόχου με βάση την πρωτεύουσα και τη διπλή πλευρά είναι ευαίσθητα στις επιδράσεις της επικοινωνίας, οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν προσεκτικά για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό τους.

2) Έλεγχος τμηματοποίησης: Ο σημαντικότερος στόχος υποστηρικτικού ελέγχου σε ένα σύστημα δυναμικής ασύρματης φόρτισης είναι ο έλεγχος τμηματοποίησης, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση των κατάλληλων μπλοκ με βάση τη θέση του οχήματος για τη διατήρηση του επιθυμητού προφίλ ροής ισχύος [22]. Αυτό βοηθά επίσης στη διαχείριση του πεδίου διαρροής και στη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος, κρατώντας τα αχρησιμοποίητα τμήματα του συστήματος απενεργοποιημένα. Οι διάφορες μέθοδοι ελέγχου τμημάτων ανοικτού και κλειστού βρόχου συνοψίζονται επίσης στον πίνακα 3.7, μαζί με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Αυτό περιλαμβάνει μεθόδους που βασίζονται σε κυκλώματα καθώς και μεθόδους κλειστού βρόχου που βασίζονται σε πρόσθετα συστήματα ανίχνευσης [24]. Η ανίχνευση είναι επίσης δυνατή με το βασικό υλικό του συστήματος, το οποίο λειτουργεί καλύτερα για τη διασυνδεσιμότητα και τον έλεγχο τμηματοποίησης χωρίς πρόσθετο, περίπλοκο υλικό. Ο έλεγχος τμηματοποίησης αφορά κυρίως τις πρωτεύουσες πλευρές, ενώ σε λίγες περιπτώσεις υπάρχει έλεγχος τμηματοποίησης της δευτερεύουσας πλευράς, ο οποίος μπορεί να είναι εφικτός μόνο για μεγάλα οχήματα [20].

3) Έλεγχοι λειτουργίας μεταγωγής μηδενικής τάσης και αντιστάθμισης: Αυτές είναι πρόσθετες μορφές υποστηρικτικών στόχων ελέγχου που βοηθούν στην αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Ο έλεγχος μεταγωγής μηδενικής τάσης επιτρέπει στο σύστημα να λειτουργεί με μεταγωγή μηδενική τάση υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, οδηγώντας σε χαμηλότερη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και υψηλότερη λειτουργική απόδοση. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται μέσω του σχεδιασμού των πρωτογενών δικτύων αντιστάθμισης με ελαφρώς υψηλότερο συντονισμό μέσω της κατάλληλης επιλογής

των F_p , α_p και β_p στις (2)-(4) ή μέσω διακοπτόμενων δικτύων αντιστάθμισης για τη διατήρησή του σε όλες τις συνθήκες [4].

3.4.2 Επικοινωνίες στους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης

Οι επικοινωνίες είναι απαραίτητες για την αξιόπιστη λειτουργία των συστημάτων δυναμικής ασύρματης φόρτισης, οι οποίες περιλαμβάνουν ανάγκες όπως ο συγχρονισμός μετατροπέων και μπλοκ, η ανίχνευση και η πιστοποίηση της ταυτότητας των οχημάτων και, σε ορισμένες περιπτώσεις, η ανταλλαγή πληροφοριών ανατροφοδότησης της ροής ισχύος μεταξύ του οδοστρώματος και των οχημάτων. Ενώ η πρώτη μπορεί να υλοποιηθεί μέσω ενσύρματης σύνδεσης, οι άλλες απαιτούν ασύρματες επικοινωνίες μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

Οι επικοινωνίες αποτελούν σημαντικό μέρος του βρόχου ελέγχου δυναμικής ασύρματης φόρτισης για συστήματα με ελέγχους κλειστού βρόχου πρωτογενούς και διπλής πλευράς [21], καθώς οι ανατροφοδοτήσεις από το όχημα είναι ακριβέστερες από τις εκτιμώμενες τιμές από την πρωτογενή πλευρά. Ωστόσο, η εξάρτηση από τις επικοινωνίες είναι μια πιθανή περιοχή ανησυχίας για αυτά τα συστήματα, καθώς η καθυστέρηση επικοινωνίας μπορεί να περιορίσει το εύρος ζώνης ελέγχου σε αυτά τα συστήματα. Η αξιοπιστία, η ταχύτητα και η κρυπτογράφηση είναι μερικοί βασικοί τομείς που έχουν σημασία για την επιλογή των επικοινωνιών σε ένα σύστημα δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Ωστόσο, μόνο τα ελεγχόμενα από τη δευτερεύουσα πλευρά συστήματα δεν απαιτούν εξάρτηση από δεδομένα ανατροφοδότησης μέσω ασύρματης επικοινωνίας, κάτι που μπορεί να είναι επωφελές.

3.4.3 Σύνοψη των ρόλων των συστημάτων εφαρμογής και των επικοινωνιών σχετικά με τους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης

Για να συνοψίσουμε τη σημασία των συστημάτων ελέγχου στους ελέγχους δυναμικής ασύρματης φόρτισης, οι υλοποιήσεις ελέγχου κλειστού βρόχου με απλούστερο υλικό και καλά σχεδιασμένες επικοινωνίες είναι καλύτερες για τον σχεδιασμό διασυνδεδεμένων συστημάτων δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Οι έλεγχοι δευτερεύουσας πλευράς είναι προτιμότεροι καθώς αποφεύγουν την εξάρτηση από τις καθυστερήσεις επικοινωνίας. Ωστόσο, οι πιο συνηθισμένοι έλεγχοι πρωτογενούς ή διπλής πλευράς πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις επιπτώσεις της καθυστέρησης επικοινωνίας στην επιλογή εύρους ζώνης ελέγχου.

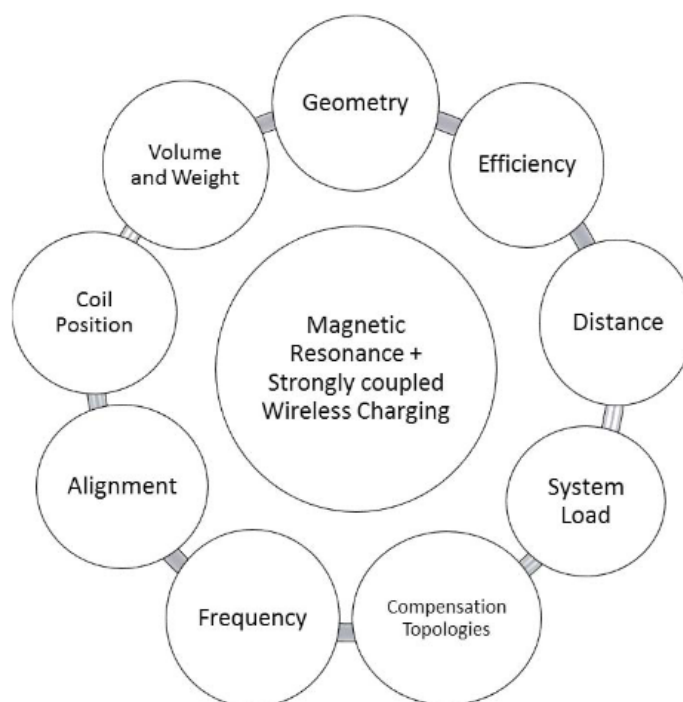
Κατά το σχεδιασμό ελεγκτών, είναι συνήθως χρήσιμο να βρεθούν οι συναρτήσεις μεταφοράς ανοικτού βρόχου των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος μέσω ανάλυσης μικρού

σήματος, έτσι ώστε να μπορούν να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά ευστάθειας στο πεδίο της συχνότητας. Ωστόσο, με τα πολλαπλά μπλοκ και τη μεταβλητή σύζευξη που υπάρχουν στα συστήματα δυναμικής ασύρματης φόρτισης, η μοντελοποίηση μικρού σήματος οδηγεί συχνά σε πολύ περίπλοκα μαθηματικά, τα οποία παρέχουν πολύ λίγη κατανόηση στο σχεδιασμό του συστήματος [4]. Επιπλέον, καθώς οι συναρτήσεις μεταφοράς και οι θέσεις μηδενικών και πόλων είναι συγκεκριμένες για κάθε παράμετρο, σπάνια λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή τοπολογιών για τη σχεδίαση ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος.

Ωστόσο, τα μοντέλα μικρού σήματος μπορούν να είναι χρήσιμα για την κατανόηση της ευστάθειας του συστήματος ενόψει της αλλαγής της ζεύξης, όπως παρατηρείται στη δυναμική ασύρματη φόρτιση. Μια άλλη σημαντική παρατήρηση, στην ίδια κατεύθυνση, θα είναι η εξέταση των επιπτώσεων της ταχύτητας του οχήματος στην απόδοση ευστάθειας, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί σχεδιασμός βρόχου ελέγχου για φόρτιση οχημάτων υψηλής ταχύτητας στον αυτοκινητόδρομο.

Κεφάλαιο 4^ο: Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων: εμπόδια και πιθανές λύσεις

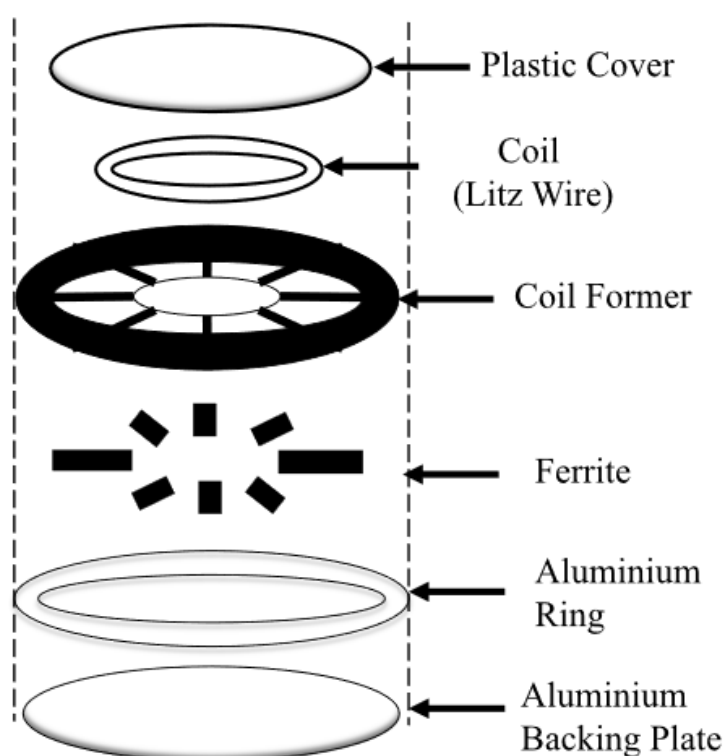
Το πλεονέκτημα της ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων έναντι της φόρτισης μέσω επαφής είναι η ευκολία και η γαλβανική απομόνωση για τους χρήστες. Αντί για προσεκτική φόρτιση και εκφόρτιση, η μπαταρία των οχημάτων μπορεί να γεμίζει συχνά ενώ σταθμεύουν σε διάφορα σημεία φόρτισης, όπως στο σπίτι, στη δουλειά, κατά τη διάρκεια αγορών ή στο φανάρι, εξαλείφοντας τα καλώδια. Ακόμα, η δυναμική ασύρματη φόρτιση μπορεί να εξαλείψει την υποδομή ταχείας φόρτισης μέσω της κατασκευής λωρίδας φόρτισης στους αυτοκινητόδρομους που επιτρέπει τη φόρτιση κατά την οδήγηση. Σε σύγκριση με την ενσύρματη φόρτιση, η ασύρματη φόρτιση περιλαμβάνει σχετικά χαμηλή απόδοση και πυκνότητα ισχύος, κόστος, μέγεθος και πολυπλοκότητα κατασκευής. Η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων έχει προκλήσεις που πρέπει να εξεταστούν προκειμένου να μεταφερθεί αποτελεσματικά η ισχύς. Η ασύρματη φόρτιση απαιτεί μετατροπή ενέργειας και περιορίζει την αποδοτικότητα στη μετατροπή και τη μεταφορά επομένως, απαιτεί βελτιστοποίηση και βελτίωση της αποδοτικότητας της μεταφοράς. Όλοι αυτοί οι παράγοντες αποτελούν πρόκληση για τις βιομηχανίες να αντικαταστήσουν την αγωγίμη φόρτιση με ασύρματη φόρτιση. Κάθε παράγοντας αποτελεί σημαντική ερευνητική παράμετρο για την ανάπτυξη ασύρματων φορτιστών [3].



Σχήμα 4.1: Παράγοντες που επηρεάζουν την ασύρματη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

4.1 Σχεδιασμός πηνίου για μπλοκ ισχύος για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Τα πηνία του πλάνου είναι δύο τύπων, πολωμένα μπλοκ και μη πολωμένα μπλοκ, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.1. Τα πολωμένα μπλοκ είναι πολλαπλά μπλοκ πηνίων, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν τόσο την παράλληλη όσο και την κάθετη ροή [3]. Τα μη πολωμένα μπλοκ είναι μπλοκ ενός πηνίου (συμπεριλαμβανομένων των κυκλικών μπλοκ και των ορθογώνιων μπλοκ), τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν μόνο την κάθετη συνιστώσα της ροής.

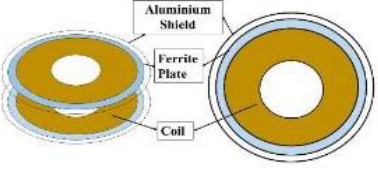
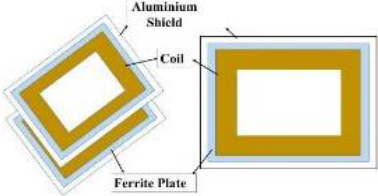
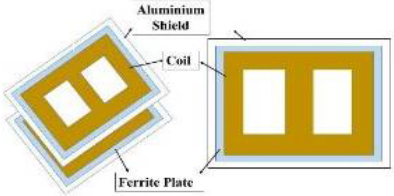
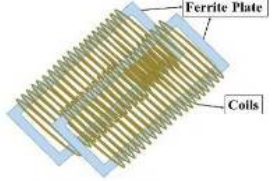
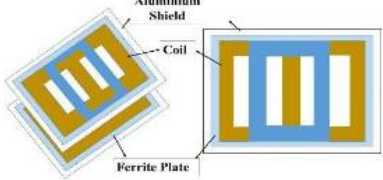
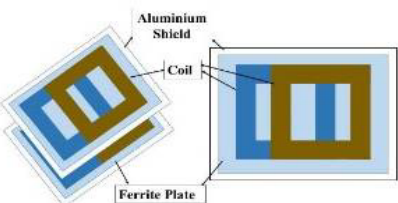


Σχήμα 4.2. Αναλυτική εικόνα του μπλοκ ισχύος.

Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η αναλυτική εικόνα του μπλοκ ισχύος που χρησιμοποιείται για ασύρματη φόρτιση. Το πλαστικό κάλυμμα είναι για προστασία, το πηνίο και ο σχηματιστής πηνίου είναι για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου, ο φερρίτης είναι για την ευθυγράμμιση του μαγνητικού πεδίου, ο δακτύλιος αλουμινίου χρησιμοποιείται για τη στήριξη του μπλοκ ισχύος, και η πλάκα στήριξης αλουμινίου είναι για τη στήριξη ολόκληρου του συστήματος. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται για να είναι ελαφρύ. Μετά από σύγκριση της σύνδεσης ροής με κυκλικά και ορθογώνια πηνία βγήκε το συμπέρασμα ότι το κυκλικό πηνίο παρουσιάζει καλύτερο αποτέλεσμα από το ορθογώνιο.

Το πρόβλημα του κυκλικού πηνίου ενώ αυξάνεται το διάκενο αέρα, δηλαδή ένα

περιορισμένο διάκενο αέρα, είναι πιθανό για τη μέγιστη μεταφορά ισχύος. Μια αύξηση του διακένου αέρα κατά ένα απαιτεί τετραπλάσια αύξηση της διαμέτρου των πηνίων, δεδομένου ότι ο λόγος διαμέτρου μπλοκ προς πρωτογενή πορεία ροής είναι 1:4 [7]. Για να ξεπεραστεί ο περιορισμός του κυκλικού πηνίου, έχουν αναπτυχθεί διάφορα άλλα σχήματα πηνίων, όπως πηνίο DD, πηνίο DDQ και σωληνοειδές [13]. Ο πίνακας 4.1 δείχνει μια πολύ ευρεία ιδέα των σχημάτων των μπλοκ ισχύος. Κάθε τύπος πηνίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στατική, δυναμική και σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση, αλλά η απόδοση θα διαφέρει ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής, την ένταση της παραγόμενης ροής και τη βέλτιστη ευθυγράμμιση. Το κυκλικό πηνίο δεν είναι κατάλληλο για δυναμική ασύρματη φόρτιση, καθώς το προφίλ μηδενικής ισχύος βρίσκεται σε 38% οριζόντια μετατόπιση του μπλοκ ισχύος [3]. Για την αποφυγή της μηδενικής μετατόπισης σχεδιάστηκε ένας νέος πολωμένος μονόπλευρος ζεύκτης που έχει συνδυασμό κυκλικής σχεδίασης και σχεδίασης σωλήνα ροής και ονομάστηκε DD πηνίο. Το DD πηνίο έχει διπλάσιο ύψος διαδρομής ροής σε σύγκριση με το κυκλικό. Το πηνίο DD έχει μηδενική ροή στο προφίλ ισχύος του άξονα x, επομένως προστέθηκε ένα χωρικό τετραγωνικό πηνίο, τώρα είναι το πηνίο DDQ το οποίο είναι πιο αποδοτικό από το προηγούμενο.

Type	Shape	Features
Polarized Pad Circular		<ul style="list-style-type: none"> It has lower coupling than other types of similarly sized coil geometries over identical air gaps and misalignments. CP have same tolerance to misalignment in all directions, i.e. non-directional. Circular geometry is still the most widely used for static EV charging applications [126] It was established in [121] and [10] that regardless of how optimized the design is, CPs exhibit a null in their mutual coupling profile when offset horizontally by approximately 40% of the pad diameter. This magnetic null occurs due to a phenomenon known as flux cancellation.
Polarized Rectangular Pad		<ul style="list-style-type: none"> It increases the flux area, edge flux leakage can be reduced. Mostly used by dynamic wireless charging track coil. [4] [55], [118], [127] Better tolerance to alignment in lateral direction, light weight and compact. [26] Easier to design as compared to spiral. [128] Rectangular coil is having larger cost effective value and better capability of transferring power.[55]
Non-Polarized Pad Double-D coil (DD) Coil		<ul style="list-style-type: none"> DDP generates a single-sided flux path, with extremely low leakage flux emanating out of the back, which allows for the addition of aluminum shielding without affecting the efficiency by a significant amount [10]. It also has a higher tolerance to misalignment in a horizontal direction compared with the NPP. The height of the flux path is the same as the H-shaped pad. Higher tolerance exists only along the width of the pad, due to coupling null when the horizontal offset is ~34% of the pad length,[129]. It generates only the parallel component of the flux, which makes this pad noninteroperable with NPPs.
Non-Polarized Pad Solenoid		<ul style="list-style-type: none"> Smaller, Lighter, more tolerance of misalignment [9] [130],[131]. The solenoid is lighter, smaller and therefore simpler to be mounted in the underneath of the car hence [132] G. Lempidis et al have used solenoid in combination with DD coil.
Non-Polarized Pad Double-D Quadrature coil		<ul style="list-style-type: none"> Addition of a quadrature coil to the DDP to form the DDQP. This pad can couple and generate both the horizontal and vertical components of the flux and have higher tolerance to misalignments in both the lateral and horizontal directions. Similar advantages are obtained with the BP with a lesser amount of copper than the DDQP. Requires two synchronized inverters if used as primary pad, and two synchronized rectifiers for secondary pad.
Non-Polarized Pad Bi-Polar (BP) coil		<ul style="list-style-type: none"> Both the DDQP and BP are interoperable with other types of pads. Greater tolerance to misalignment and ability to interoperate with other pad types. Requires two synchronized inverters if used as primary pad, and two synchronized rectifiers for secondary pad. They are also sensitive to angular misalignments, and coupling can drop over 13% with a growing angular misalignment up to 30° [133]. They also require a location or flux sensor and complicated control strategy [129]. This, in turn, increases the overall cost and complexity of the charger. For static charging of personal EVs, the driver can park his/her vehicle within an acceptable misalignment.

Πίνακας 4.1: Συγκριτική επισκόπηση των οργανωτικών επιτευγμάτων της ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

4.1.1 Συχνότητα λειτουργίας και επίπεδα ισχύος

Η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων απαιτεί την τροποποίηση δύο σημαντικών παραγόντων, ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητά της, καθώς και το κενό αέρα. Η τροποποίηση της συχνότητας λειτουργίας θα μπορούσε να καταστήσει το σύστημα πιο συμπαγές και πιο αποδοτικό. Με την αύξηση της συχνότητας της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, η αποδοτικότητα αυξάνεται, αλλά υπάρχει ένα όριο σε κάθε επίπεδο ισχύος. Και οι δύο παράγοντες σχετίζονται μεταξύ τους. Μέχρι πρόσφατα, δεν έχει αναπτυχθεί κάποιο πρότυπο που θα μπορούσε να επιτύχει βελτιστοποιημένη απόδοση. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται ορισμένα μοντέλα διαφόρων εταιρειών και πανεπιστημίων που δείχνουν τα μέγιστα επίπεδα ισχύος στα οποία το όχημα φορτίζεται.

Διάφορα πανεπιστήμια, ερευνητικοί οργανισμοί και βιομηχανίες, που εργάζονται σε διάφορα έργα ασύρματης φόρτισης, έχουν διάφορα στάδια προόδου. Κάθε ίδρυμα σκοπεύει να σχεδιάσει ένα τέτοιο σύστημα που θα μπορούσε να καθιερωθεί. Στο σύστημα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, η υψηλή απόδοση πραγματοποιείται με την αύξηση της συχνότητας περίπου κατά 1 MHz [14]. Εδώ, ο $T_Q = \omega M/R_0$ είναι ο συντελεστής ποιότητας μεταφοράς, M είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ πομπού και δέκτη, ω είναι η συχνότητα συντονισμού και R_0 είναι η ισοδύναμη αντίσταση. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση, το T_Q πρέπει να είναι μεγάλο. Υπάρχουν τρεις τρόποι για τη μεγιστοποίηση του T_Q : 1) μεγιστοποίηση της συχνότητας κίνησης, 2) αύξηση της αμοιβαίας επαγωγής και 3) μείωση της ισοδύναμης αντίστασης. Καθώς η συχνότητα συντονισμού δίνεται από τη σχέση $\omega = 1/\sqrt{LC}$, όπου L είναι η αυτεπαγωγή και C είναι η χωρητικότητα. Υπάρχουν δύο τρόποι μείωσης της συχνότητας συντονισμού, με την αύξηση της επαγωγής ή και με την αύξηση της χωρητικότητας. Εάν αυξήσουμε τη συχνότητα πολύ υψηλά, εμφανίζεται πρόβλημα μεταγωγής κατά τη στιγμή της μετατροπής. Λόγω του χαμηλού συντελεστή σύζευξης, το σύστημα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας περιορίζει τη λειτουργία σε υψηλή συχνότητα [10]. Ο πίνακας 4.3 παρουσιάζει διάφορες εφαρμογές της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας σε διάφορες συχνότητες. Κάθε συχνότητα είναι σταθερή για την εφαρμογή της. Στην περίπτωση της τυποποίησης, καθορίζονται επίσης συχνότητες στις οποίες το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει με τη μέγιστη αποδοτικότητά του.

Name	Frequency	Efficiency	Distance WPT	Year	Power	References
KAIST	20 kHz	71% to 85%	1 cm to 20 cm	2013	60 kW (OLEV buses)	[134]
	20 kHz	80%	15 cm	2014	5 kW -15 kW	[135]
	20 kHz	71%	20 cm	2015	22 kW	[68]
	20 kHz	74%	20 cm		27 kW	[5]
ORNL	NA	90%	25.4 cm	2016	20 kW	[136]
KRRI	60 kHz	82.7%	5 cm	2012	818 kW	[69]
WAVE	23.4	92%	17.8 cm	2014	50 kW	[137]
Qualcomm Halo	20 kHz	NA	NA	2012	7 kW	[138]
Fraunhofer	100 kHz	97%	13.5 cm		22 kW	[108]
Showa Aircraft Co	22 kHz	92%	15 cm	2009	30 kW	[91]
UM Dearborn	80 kHz	96%	20 cm	2014	7.7 kW (Medium Power)	[116]
	95 kHz	95.3%	15 cm	2015	6 kW	[113]
	1 MHz	95%	15 cm	2015	3.3 kW	[15]
WiTricity Human body Simulation	13.56 MHz	NA	5 cm – 200 cm	2007	60 W	[85]
NYU	85 kHz	91%	21 cm	2015	25 kW	[139][140]
Conductix Wampfler	20 kHz	90%	4 cm	NA	120 kW	[141]
WiTricity Electric vehicle	NA	90%	18 cm	2015	3.3 kW	[64]
INTIS	35 kHz	90%	15 cm	2011<	30 kW	[5]
Conductix-Wampfler' WC Torino, Italy	NA	90%	4 cm	2013	60 kW	[142]
Utah State University (WAVE)	NA	>90%	15 cm	2012	25 kW – 50 kW	[16]
Tokohu University	360 kHz	75%	0 cm – 200 cm	2012	15 W – 18 W	[143]
Saitama University	50 kHz	94%	7 cm	2011	1.5 W- 3.0 W	[144]
University of Auckland	20 kHz	NA	20 cm	2011	2 kW	[121]
	20 KHz	NA	10 cm – 25 cm	2013	2 kW -7 kW	[10]
	85 kHz	91.3%	10 cm	2015	1 kW	[112]
ETH Zurich	1 MHz	96.5%	52 mm	2015	5 kW	[145]
	85 kHz	95.8%	10 cm-20 cm		50 kW	[8]
Setsunan University	1.20-2.45 GHz	20% - 98%	5 cm – 25 cm	NA	NA	[146]
PATH	20 kHz	60%	7.5 cm	NA	60 kW	[91]

Πίνακας 4.2: Εφαρμογές σε διάφορες συχνότητες.

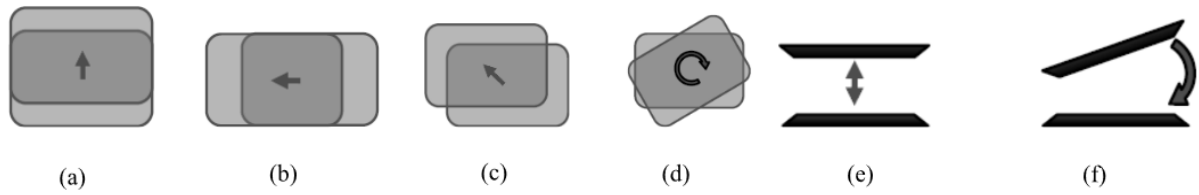
Industrial Application	Frequency band (GHz)		
	2.45	5.8	0.9
WPT to Moving/Flying Target	✓	✓	
Point-to-Point WPT	✓	✓	
Wireless Charging for EV	✓	✓	
2D (Surface) WPT	✓	✓	
Microwave Buildings	✓		
WPT in a Metal Pipe	✓		
Wireless Charger of Mobile Devices	✓		
Solar Power Satellite		✓	
Wireless Powered Sensor Network			✓

Πίνακας 4.3: Σχήματα για στατική και δυναμική ασύρματη φόρτιση.

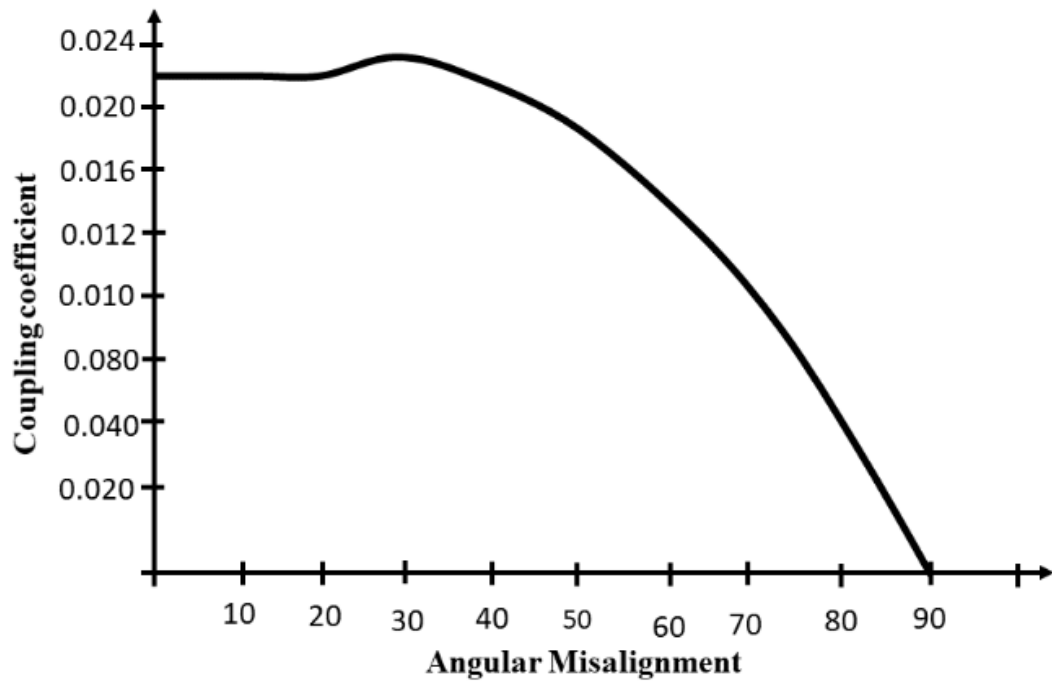
4.1.2 Ευθυγράμμιση μεταξύ των μπλοκ ισχύος και της τοπολογίας αντιστάθμισης

Για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, τα πηνία πομπού και δέκτη πρέπει να ευθυγραμμιστούν. Μία από τις βασικές δυσκολίες για την υλοποίηση της επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας είναι η κακή ευθυγράμμιση μεταξύ των πηνίων εκπομπής και λήψης. Η απόκλιση μπορεί να είναι πλάγια, κάθετη, περιστροφική και υπό γωνία. Λόγω της κακής ευθυγράμμισης των πηνίων, υπάρχουν διάφορα προβλήματα με τη διαρροή της μαγνητικής ροής που αυξάνεται και την αμοιβαία επαγωγή που μειώνεται και οδηγεί σε κακή προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης. Η κακή ευθυγράμμιση των πηνίων είναι ένα φυσικό πρόβλημα των επαγωγικά συνδεδεμένων ζεύξεων και η επίδρασή του στην απόδοση της μεταφοράς είναι πολύπλοκη. Η μέγιστη απόδοση δίνεται από τη σχέση $n_{max} = 1/(1 + 2/(k\sqrt{Q_P Q_S}))$, όπου ο συντελεστής σύζευξης δίνεται από τη σχέση $k = M/\sqrt{L_P L_S}$ και ο συντελεστής ποιότητας των πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίων δίνεται από τη σχέση $Q_S = (\omega L_S)/R_S$ και $Q_P = (\omega L_P)/R_P$. Από τις παραπάνω σχέσεις μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι η μέγιστη επιτεύξιμη απόδοση μεταφοράς ισχύος μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση των συντελεστών ποιότητας και του συντελεστή σύζευξης.

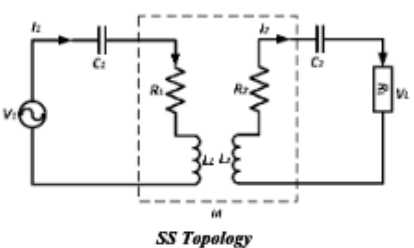
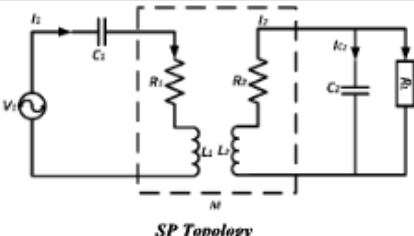
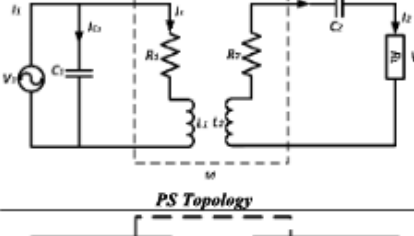
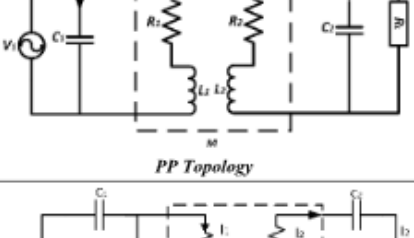
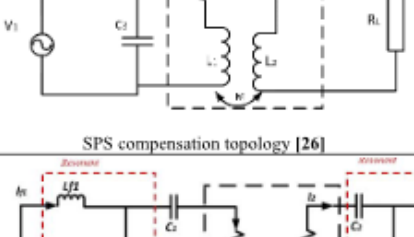
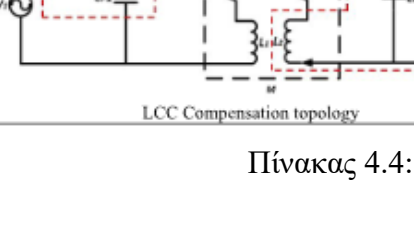
Υπάρχουν τρεις κύριες λύσεις που προτείνονται για την αύξηση της απόδοσης μεταφοράς ισχύος και του συντελεστή ποιότητας. Πρώτον, η τέλεια ευθυγράμμιση του πηνίου οδηγεί σε υψηλότερη σύζευξη που φαίνεται από τον υψηλό συντελεστή σύζευξης. Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι θέσεις κακής ευθυγράμμισης. Το σχήμα 4.4 δείχνει τη μεταβολή του συντελεστή σύζευξης και της γωνιακής κακής ευθυγράμμισης. Δεύτερον, οι συμβατικές τοπολογίες του μαγνητικού πυρήνα, όπως τύπου E, τύπου U και τύπου rot, έχουν υψηλή κακή ευθυγράμμιση και υψηλή ισχύ λειτουργίας για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων. Τρίτον, οι τοπολογίες αντιστάθμισης, λόγω του μεγάλου διακένου αέρα μεταξύ των πηνίων η διαρροή ροής είναι πολύ υψηλή, με αποτέλεσμα πολύ χαμηλή αμοιβαία επαγωγή και επαγωγή μαγνήτισης. Απαιτείται ένα δίκτυο αντιστάθμισης για τον σχηματισμό κυκλώματος συντονισμού, την αντιστάθμιση της επαγωγής και τη μεγιστοποίηση της μεταφοράς ισχύος [3]. Η τοπολογία αντιστάθμισης βοηθά στην απόκτηση σταθερού ρεύματος και σταθερής τάσης εξόδου για την επίτευξη καλύτερης δυνατότητας ελέγχου με αυξημένη απόδοση. Ο πίνακας 4.4 παρουσιάζει μια σύντομη σύγκριση των τοπολογιών αντιστάθμισης. Οι τοπολογίες που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4, έχουν σημαντικά βελτιωμένη ευθυγράμμιση και μειωμένη ισχύ εξόδου.



Σχήμα 4.3: Θέσεις κακής ευθυγράμμισης. (α) άξονας y. (β) άξονας x. (γ) xy. (δ) Περιστροφική. (ε) Κάθετη. (στ) Υπό γωνία.



Σχήμα 4.4: Μεταβολή του συντελεστή σύζευξης (k) όσον αφορά τη μεταβολή της γωνιακής κακή ευθυγράμμιση.

Topology	Specification
 <p style="text-align: center;">SS Topology</p>	<p style="text-align: center;">Total Impedance</p> $\bar{Z}_{Total}(SS) = \left(R_1 + j(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}) \right) + \frac{\omega^2 M^2}{\left(R_2 + R_L + j \left(L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega} \right) \right)}$ <ul style="list-style-type: none"> • S/S compensation is designed to have a constant-current output as well as constant voltage output • Operating frequency is unique for constant current operation as follows. $\omega = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ • Operating frequency is not unique for constant voltage operation
 <p style="text-align: center;">SP Topology</p>	<p style="text-align: center;">Total Impedance</p> $\bar{Z}_{Total}(SP) = \left(R_1 + j(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}) \right) + \frac{\omega^2 M^2}{\left(R_2 + jL_2\omega + \left(\frac{R_L}{1 + jR_L C_2\omega} \right) \right)}$ <ul style="list-style-type: none"> • SS and SP are more economically suitable for high power transmission • SS and SP compensation topologies are more suitable for variable load conditions since the resonance is guaranteed
 <p style="text-align: center;">PS Topology</p>	<p style="text-align: center;">Total Impedance</p> $\bar{Z}_{Total}(PS) = \frac{1}{\left(R_1 + jL_1\omega \right) + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_L + j \left(L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega} \right)} + jC_1\omega}$
 <p style="text-align: center;">PP Topology</p>	<p style="text-align: center;">Total Impedance</p> $\bar{Z}_{Total}(PP) = \frac{1}{\frac{1}{\left(R_1 + jL_1\omega \right) + \frac{\omega^2 M^2 (1 + jR_L C_2\omega)}{\left(R_L + (R_2 + jL_2\omega)(1 + jR_L C_2\omega) \right)}} + jC_1\omega}$ <ul style="list-style-type: none"> • Parallel-parallel (PP) topologies for both the transmitter and receiver have higher impedance and can be driven more easily than SS topologies. A novel receiver circuit topology for a cordless EV charger is proposed in [156]
 <p style="text-align: center;">SPS compensation topology [26]</p>	<p style="text-align: center;">Total Impedance</p> $Z_{Total}(SPS) = \frac{\bar{Z}_{11}}{1 + Z_{11}jC_2\omega_p}$ where, $\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_r$ <ul style="list-style-type: none"> • It is the combination of SS and PS topology. • Keeping K=1, system act as PS topology • Lower the value of Kc higher the possible rated misalignment rated power. • It can tolerate very high misalignment.
 <p style="text-align: center;">LCC Compensation topology</p>	<ul style="list-style-type: none"> • LCC topology was proposed by researchers from the University of Michigan, Dearborn (UM-Dearborn) [27] • $P = \frac{8k\sqrt{L_1 L_2} V_w V_{out}}{\pi^2 \omega L_{f1} L_{f2}}$ where $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$ • Vin is the input voltage of the inverter stage • Vout is the battery pack voltage

Πίνακας 4.4: Σύγκριση τοπολογιών αντιστάθμισης.

Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζεται η τοπολογία SPS, που αποτελεί το συνδυασμό της τοπολογίας SS και PS. Η ιδέα πίσω από αυτήν είναι μια τοπολογία σειράς και μια παράλληλη τοπολογία που παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά προς την κακή ευθυγράμμιση. Ως εκ τούτου, συνδυάστηκαν δύο τοπολογίες για να σχηματίσουν μια νέα τοπολογία που

περιλαμβάνει και τις δύο επιδράσεις, οι οποίες μείωσαν την κακή ευθυγράμμιση, άρα βελτίωσαν την απόδοση. Αυτή η τοπολογία μειώνει την επίδραση της αλλαγής της τιμής του συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής λόγω της κακής ευθυγράμμισης. Η κακή ευθυγράμμιση μπορεί να μειωθεί με δύο κύριες προσεγγίσεις. Η μία είναι με χειροκίνητη ευθυγράμμιση των δύο πηνίων και η άλλη με ηλεκτρικό χειρισμό, όπως συντονισμός ή τροποποίηση των τοπολογιών αντιστάθμισης. Ωστόσο, αυτό εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πρόκληση για την υιοθέτηση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.

Η μεταφορά ισχύος στο φορτίο με πυρήνα αέρα δίνεται από την ακόλουθη έκφραση $P_2 = (M^2 \omega_0 Q_S / L_2) I_p^2$ [3], όπου P_2 είναι η ενεργός ισχύς του φορτίου, ω_0 είναι ο παλμός συντονισμού λειτουργίας, M είναι η τιμή της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων, Q_S είναι ο δευτερεύων συντελεστής ποιότητας και I_p είναι το ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος.

4.2 Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων: πρότυπα και εφαρμογές

Καθώς η ασύρματη φόρτιση γίνεται πρωτοπόρα στον τομέα της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, απαιτείται τυποποίηση για την αξιόπιστη εμπορική διάθεση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας υψηλής τάσης και ισχύος για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Η τυποποίηση περιλαμβάνει τα κριτήρια ασφαλείας, την αποδοτικότητα, τα όρια ηλεκτρομαγνητισμού και τους στόχους διασυνδεσιμότητας, μαζί με τη ρύθμιση δοκιμών για την επίτευξη ασύρματης φόρτισης. Η καθολικότητα είναι μια πολύ σημαντική απαίτηση για τα ηλεκτρικά οχήματα, η οποία είναι δυνατή μετά την τυποποίηση. Οι πελάτες δεν χρειάζεται να ανησυχούν για τον συμβατό σταθμό φόρτισης του. Το πρότυπο IEC-61980-1 περιλαμβάνει το συνολικό σύστημα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας από το δίκτυο τροφοδοσίας έως τα ηλεκτρικά οχήματα που φορτίζουν τη μπαταρία ή οποιονδήποτε εξοπλισμό του ίδιου στην τυπική τροφοδοσία 1000-V EP ή 1500-V ΣΡ. Όλα αυτά αντιμετωπίζονται από την SAE στο πρότυπό της SAE TIR J2954. Αυτό είναι το πρώτο πρότυπο που αναπτύχθηκε από την SAE στον τομέα της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας για μια εφαρμογή φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος. Το πρότυπο αυτό έχει αναπτυχθεί ειδικά για τη στατική ασύρματη φόρτιση. Η ζώνη συχνοτήτων, η διαλειτουργικότητα, η ασφάλεια, οι ορισμοί των πηνίων και τα όρια ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας/ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από το SAE TIR J2954 επιτρέπουν σε κάθε συντονισμένο όχημα να φορτίζει ασύρματα από τον ασύρματο οικιακό φορτιστή, το γραφείο ή έναν εμπορικό φορτιστή, με την ίδια δυνατότητα φόρτισης. Ο πίνακας 4.5 παρουσιάζει τα βασικά πρότυπα για την ασύρματη φόρτιση [3].

Standard Developer	Standard Name	Published/Update Date	Description	Status
IEC	IEC 61980-1 Ed.1.0-NEW ADDITION	2015-07-01	Electric Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems - Part 1: General Requirements	Active
IEC	IEC 61980-1 Ed.2.0	2020-03-30	Electric Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems - Part 1: General Requirements	ACD
IEC	IEC 61980-1/AMD 1 Ed. 1.0 [157]	2015-07-24	Electric Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems - Part 1: General Requirements	ACD
IEC	IEC 61980-1:2015/COR1:2017 [158]	2017-01-25	Electric Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems - Part 1: General Requirements	Valid
IEC	IEC 61980-1/COR1 [159]	2017-01-01	Electric Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems - Part 1: General Requirements	Active
IEC	Draft IEC/TS 61980-2 Ed. 1.0 [160]	Will be published in 2017	Electric Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems - Part 2: Specific Requirements for Communication Between Electric Road Vehicle (EV) and Infrastructure Concerning Wireless Power Transfer (WPT) Systems	WIP
IEC	Draft IEC/TS 61980-3 Ed. 1.0 [160]	2015-08-28	Electric Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems - Part 3: Specific Requirements for the Magnetic Field Power Transfer Systems	Draft, Valid
SAE	J2954 SAE [161]	WIP	Wireless Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles	WIP
SAE	J2954_201605 [162]	2016-05-26	Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Alignment Methodology	Issued
SAE	J1773_201406 [163]	2014-06-05	SAE Electric Vehicle Inductively Coupled Charging (STABILIZED Jun 2014)	Stabilized
SAE	J2847-6 [164]	2015-08-05	Communication between Wireless charged vehicles and wireless EV chargers	Issued
SAE	J 2931-6 [165]	2015-8-27	Signaling communication for Wirelessly Charged Electric Vehicle	Issued
UL	Subject 2750 [166]	NA	Outline of Investigation, for Electric Vehicle Wireless Charging	Draft Released
IEEE	IEEE Standard C95.1 [160]	2006-04-19	Restrict the Frequency Electric Field and Magnetic Field Exposure to Outside Human	Active - Approved

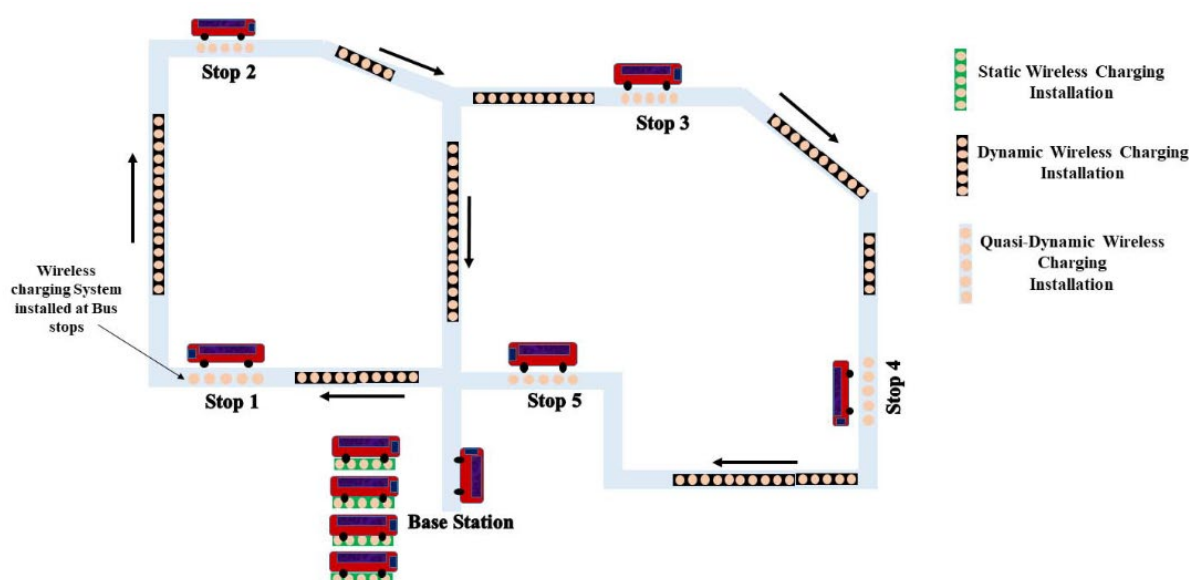
Πίνακας 4.5: Κατάλογος προτύπων για ασύρματη φόρτιση.

4.3 Οικονομική ανάλυση του ασύρματου δικτύου φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα

Η αρχική επένδυση του ηλεκτρικού οχήματος περιλαμβάνει το κόστος του οχήματος και την υποδομή φόρτισης, χωρίζοντας το κόστος του οχήματος σε μπαταρία, εξαρτήματα του οχήματος, σύστημα ισχύος και εξαρτήματα φόρτισης. Για την ανάλυση των συστημάτων ασύρματης φόρτισης, λαμβάνονται υπόψη μόνο η μπαταρία και τα εξαρτήματα φόρτισης. Εδώ, εξετάζουμε μια διαδρομή λειτουργίας υπηρεσιών για τα ηλεκτρικά οχήματα προκειμένου να αναλύσουμε τα συστήματα ασύρματης φόρτισης. Το συνολικό κόστος του ηλεκτρικού οχήματος για τη φόρτιση τύπου s (στατική, σχεδόν δυναμική και δυναμική ασύρματη φόρτιση) περιλαμβάνει το κόστος αποθήκευσης και το κόστος εγκατάστασης της

μονάδας φόρτισης για τον καθορισμό μιας ελάχιστης επένδυσης για την κάλυψη της απαίτησης φόρτισης για το ηλεκτρικό όχημα.

Στο σχήμα 4.5, παρουσιάζονται και οι τρεις τρόποι ασύρματης φόρτισης, είναι σαφώς ορατό ότι η λωρίδα φόρτισης για δυναμική ασύρματη φόρτιση απαιτεί τον υψηλότερο αριθμό υποδομών, αλλά αρκεί πολύ μικρή μπαταρία. Για τη στατική ασύρματη φόρτιση, απαιτείται βαριά μπαταρία μεγάλου μεγέθους για την πραγματοποίηση ολόκληρης της διαδρομής, δεδομένου ότι δεν υπάρχει φόρτιση ενδιάμεσα. Στην περίπτωση της σχεδόν δυναμικής φόρτισης, σε κάθε στάση λεωφορείου έχουν εγκατασταθεί συστήματα φόρτισης και απαιτείται μικρότερο μέγεθος μπαταρίας. Στην παρούσα ενότητα, λαμβάνοντας υπόψη αυτούς τους παράγοντες, παρουσιάζεται μια σύντομη ανάλυση [3].



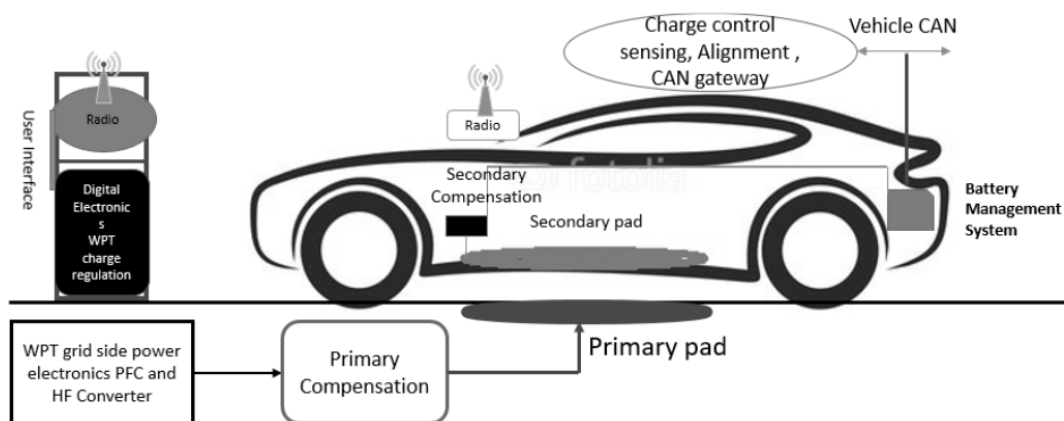
Σχήμα 4.5: Ενδεικτική παρουσίαση της εγκατάστασης στατικής, δυναμικής και σχεδόν δυναμικής ασύρματης φόρτισης για οικονομική ανάλυση.

4.3.1 Οικονομική σκοπιμότητα της στατικής ασύρματης φόρτισης

Ο στατικός ασύρματος φορτιστής είναι η πιο υιοθετημένη μορφή ασύρματης φόρτισης για την υπάρχουσα τεχνολογία ηλεκτρικών οχημάτων. Το Πανεπιστήμιο KAIST της Νότιας Κορέας ανέπτυξε ένα σύστημα το οποίο μπορεί να μεταδίδει ενέργεια σε εμβέλεια έως και 5 m χρησιμοποιώντας το σύστημα συντονισμού πηνίου διπόλου. Το Εθνικό Εργαστήριο Oakridge των ΗΠΑ έχει επίσης έχει αναπτύξει και δοκιμάσει διάφορα πρωτότυπα για την ανάπτυξη στατικών και σχεδόν δυναμικών ασύρματων φορτιστών. Πολλές άλλες εταιρείες και βιομηχανίες, όπως η Tesla, η Nissan, η Qualcomm και η WiTricity, εργάζονται σε αυτόν

τον τομέα για να εξασφαλίσουν την εμπορικά βιώσιμη ανάπτυξη της ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων [3]. Παρόλα αυτά, οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές και η λανθασμένη ευθυγράμμιση των πηνίων αποτελούν πρόκληση για τη μελλοντική υιοθέτησή του στον εμπορικό χώρο. Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση της ανάπτυξης στατικού ασύρματου φορτιστή σε κάποιο σταθερό σημείο. Η τροφοδοσία από την πλευρά του δικτύου είναι συνδεδεμένη σε μετατροπέα υψηλής συχνότητας. Αυτή η παροχή υψηλής συχνότητας τροφοδοτείται στο πρωτεύον μπλοκ. Και τα δύο πηνία (πρωτεύον και δευτερεύον) συνδέονται με μαγνητικό συντονισμό.

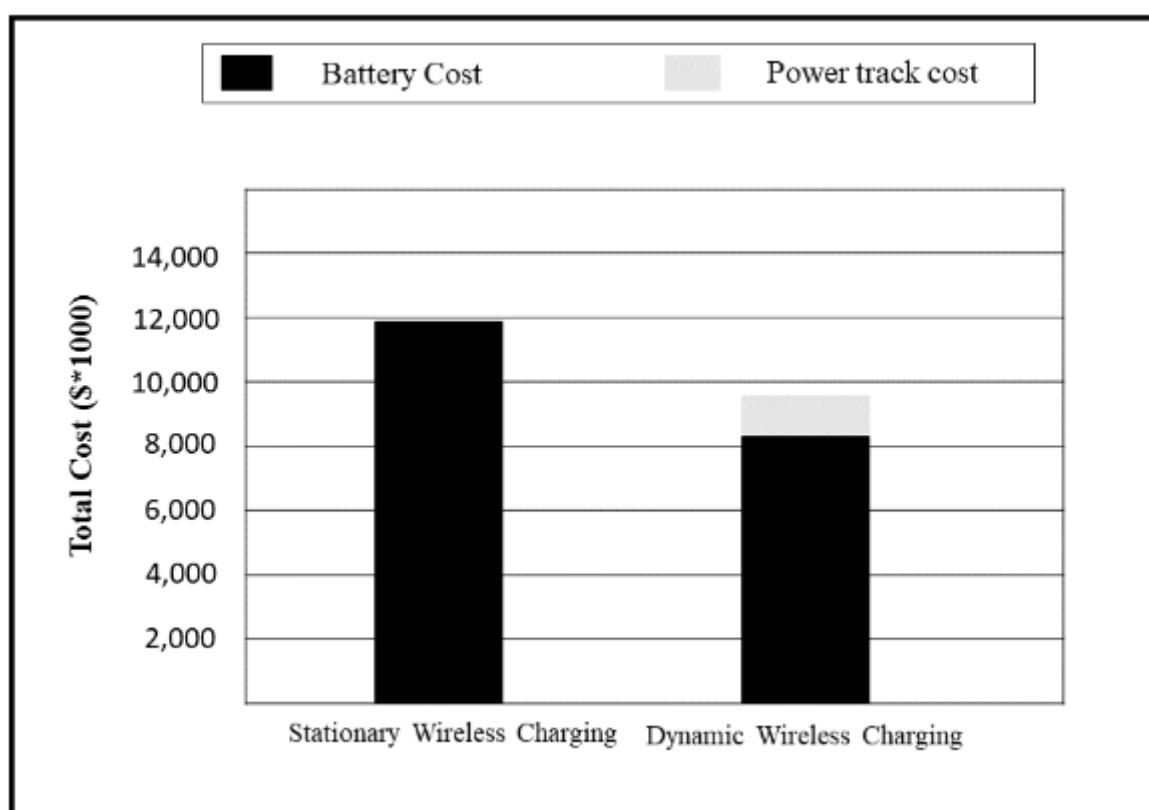
Η πλευρά του φορτίου διαθέτει επίσης έναν μετατροπέα EP-ΣΡ για την απευθείας τροφοδοσία της μπαταρίας. Η μπαταρία διαθέτει ένα σύστημα διαχείρισης μπαταρίας, το οποίο ελέγχει την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, την κατάσταση της υγείας της. Το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας συνδέεται με το δίκτυο περιοχής ελεγκτή οχήματος, το οποίο ελέγχει την ανίχνευση του οχήματος και μέσω ραδιοσημάτων, το όχημα συνδέεται με τον πόλο ρύθμισης ασύρματης φόρτισης. Εναλλακτικά, εάν το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας του οχήματος δεν επιτρέπει την αποστολή ισχύος απευθείας στη μπαταρία, πρέπει να χρησιμοποιηθεί άλλος μετατροπέας ΣΡ-ΣΡ. Ολόκληρο το σύστημα ανάπτυξης στατικής ασύρματης φόρτισης δεν χρειάζεται χειριστή. Δεν υπάρχει καμία ανθρώπινη παρέμβαση, όλη η φόρτιση επί πληρωμή θα μπορούσε να γίνει αυτόματα δυνατή με ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου συνδεδεμένο με το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας και το δίκτυο περιοχής ελεγκτή οχήματος. Η εμπορική βιωσιμότητα της ασύρματης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι δυνατή μόνο εάν, από οικονομική άποψη, παρέχει περισσότερες διευκολύνσεις σε χαμηλότερη τιμή.



Σχήμα 4.6: Ανάπτυξη στατικής ασύρματης φόρτισης με σύστημα αυτόματου ελέγχου.

4.3.2 Οικονομική σκοπιμότητα του δυναμικού συστήματος ασύρματης φόρτισης

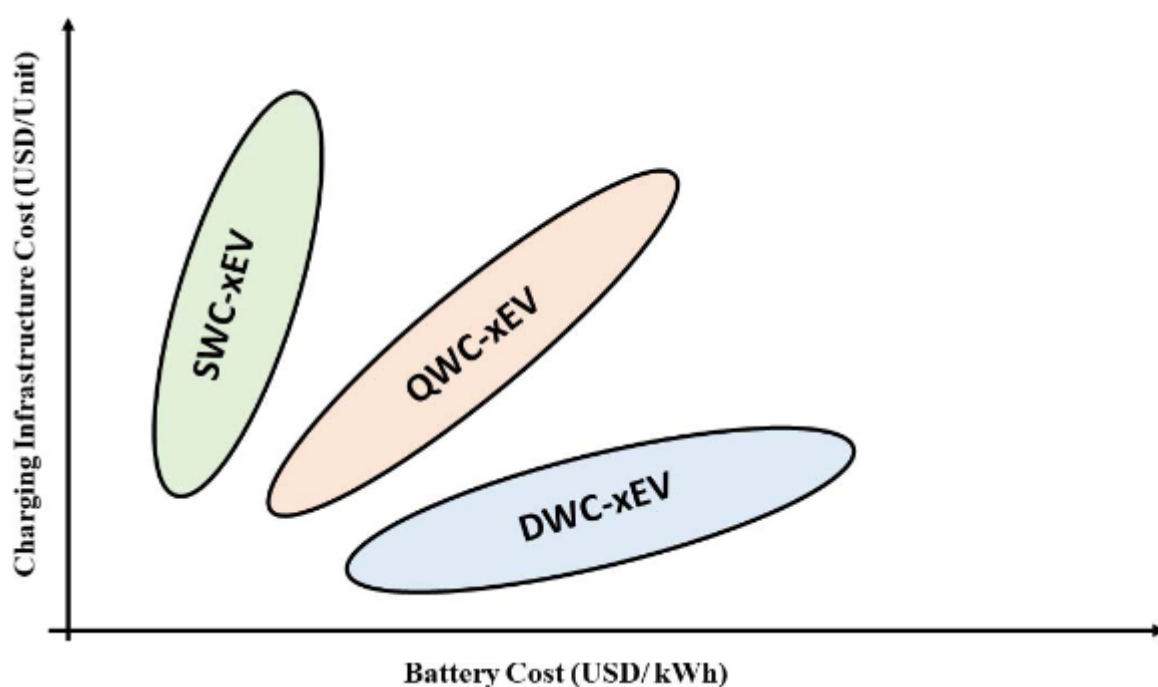
Το σύστημα δυναμικής ασύρματης φόρτισης έχει επίσης διάφορα πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνικών φόρτισης. Η δυναμική ασύρματη φόρτιση είναι πολύ εφικτή σε αυτοκινητόδρομους, ιδρύματα μεγάλης έκτασης, βιομηχανίες κ.λπ., επειδή απαιτεί μεγάλη έκταση για την εγκατάσταση λωρίδων φόρτισης. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα βενζινοκίνητα οχήματα είναι το άγχος της αυτονομίας, το οποίο μπορεί να μειωθεί εάν η δυναμική ασύρματη φόρτιση εγκατασταθεί σε αυτοκινητόδρομους. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7, συγκρίνεται το κόστος του συστήματος στατικής και δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Η σύγκριση αυτή γίνεται με βάση το γεγονός ότι είχαν λειτουργήσει 18 λεωφορεία για δέκα χρόνια. Υπήρξε διαφορά 2.462.268 δολάρια ΗΠΑ για το συνολικό κόστος λειτουργίας μεταξύ στατικής και δυναμικής ασύρματης φόρτισης, το οποίο είναι 20,8% μείωση στην εφαρμογή της δυναμικής ασύρματης φόρτισης. Η δυναμική ασύρματη φόρτιση απαιτεί ένα τεράστιο ποσό για την εγκατάσταση διαδρομής, αλλά αυτό οφειλόταν στο τεράστιο κόστος της μπαταρίας που χρησιμοποιείται στη στατική ασύρματη φόρτιση [3].



Σχήμα 4.7: Σύγκριση της συνολικής επένδυσης για την εγκατάσταση και λειτουργία της στατικής και δυναμικής ασύρματης φόρτισης για δέκα έτη.

4.3.3 Οικονομική σκοπιμότητα της σχεδόν δυναμικής ασύρματης φόρτισης

Η σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση φορτίζει τη μπαταρία σε σταθερή θέση μόνο στις στάσεις λεωφορείων, χρησιμοποιώντας την παραμονή λίγων λεπτών για τη φόρτιση της μπαταρίας. Η ανάγκη για σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση εξελίσσεται με την απαίτηση βελτιστοποίησης της υποδομής φόρτισης και του κόστους της μπαταρίας. Η σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση φορτίζει το όχημα χρησιμοποιώντας σύστημα γρήγορης ασύρματης φόρτισης στις στάσεις για λίγα λεπτά, έτσι ώστε το λεωφορείο να φορτίζει περισσότερο από ό,τι καταναλώνει για να τροφοδοτήσει την κίνηση προς την επόμενη στάση. Το Ηνωμένο Βασίλειο έχει ξεκινήσει να δοκιμάζει τους σχεδόν δυναμικούς φορτιστές και την εμπορική τους βιωσιμότητα στους δρόμους. Παρόλα αυτά, το σύστημα πρέπει να αναπτυχθεί πλήρως για να υιοθετηθεί στους αυτοκινητόδρομους. Διάφορα τμήματα έρευνας και ανάπτυξης εργάζονται προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης του συστήματος. Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η βελτιστοποιημένη σύγκριση του κόστους για την εγκατάσταση στατικής, δυναμικής και σχεδόν δυναμικής ασύρματης φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα, όπου η σχεδόν δυναμική ασύρματη φόρτιση εμφανίζεται στο ενδιάμεσο τμήμα [3].



Σχήμα 4.8: Ποιοτική ανάλυση των οικονομικών πλεονεκτημάτων των ηλεκτρικών οχημάτων.

4.4 Βιωσιμότητα και κοινωνικές επιπτώσεις των συστημάτων ασύρματης φόρτισης

Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας είναι πιο εφαρμόσιμη για την ασύρματη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Σήμερα, το σημαντικότερο πρόβλημα για το περιβάλλον είναι τα οχήματα με βενζινοκινητήρες και πετρελαιοκινητήρες και τα τεράστια μηχανήματα που λειτουργούν με ντίζελ. Η ακόλουθη ενότητα διαλευκάνει τις αμφιβολίες που σχετίζονται με ορισμένες περιβαλλοντικές, οικονομικές και υγειονομικές ανησυχίες.

4.4.1 Ενεργειακός και περιβαλλοντικός απολογισμός

Υπάρχουν δύο βήματα για την κατανόηση του ρόλου της ασύρματης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στην προστασία του περιβάλλοντος. Αν εξετάσουμε όλα τα συστήματα που μπορούν να κινηθούν με ηλεκτρική ενέργεια, το πρώτο είναι η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας αντί για βενζινοκινητήρες ή κινητήρες ντίζελ. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των ηλεκτρικών μηχανών είναι ότι δεν ρυπαίνουν άμεσα το περιβάλλον. Ωστόσο, τα ηλεκτρικά μηχανήματα έχουν το πρόβλημα της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η ασύρματη μεταφορά ενέργειας θα οδηγεί τον εν λόγω εξοπλισμό ασύρματα ή, εάν χρησιμοποιείται η μπαταρία για την κίνηση του μηχανήματος, χρησιμοποιώντας ασύρματη μεταφορά ενέργειας που μπορεί να φορτιστεί εύκολα. Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας μειώνει τη χρήση της μπαταρίας με την ασύρματη κίνηση του εξοπλισμού, μειώνοντας έτσι το φορτίο του συστήματος.

Συγκρίνοντας την τεχνολογική ωριμότητα μεταξύ της φόρτισης με πρίζα ή της μεταφοράς ισχύος και της ασύρματης φόρτισης ή της ασύρματης μεταφοράς ισχύος, υπάρχει μεγάλη διαφορά στο εύρος της μεταφοράς ισχύος. Παρόλα αυτά, είναι ορατό ότι η ασύρματη μεταφορά ενέργειας είναι πολύ πιο βολική, ασφαλής και βιώσιμη. Στο μέλλον, η μετάδοση ισχύος έως και μέτρα θα ενισχύσει τη βιώσιμη μετακίνηση με μείωση της χρήσης καλωδίων καθώς και μπαταριών [3].

4.4.2 Οικονομική και πολιτική ανάλυση

Η τεχνολογία ασύρματης μεταφοράς ενέργειας ανταγωνίζεται τις άλλες τεχνολογίες με τρία βασικά συστατικά στοιχεία του κύκλου ζωής του προϊόντος της, όπως: 1) υποδομή φόρτισης, 2) μπαταρία και 3) κόστος ενέργειας φάσης [3]. Συγκρίνοντας το κόστος ενός ενσύρματου φορτιστή ηλεκτρικού οχήματος και ενός ασύρματου φορτιστή, δύο μαγνητικοί

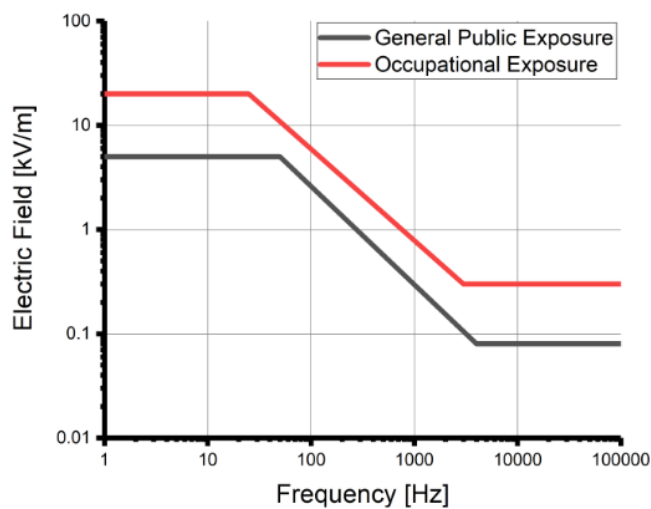
σύνδεσμοι είναι το μόνο επιπλέον εξάρτημα που χρησιμοποιείται στο σύστημα ασύρματης φόρτισης. Αυτό θα αυξήσει περίπου 400 δολάρια ΗΠΑ σε πρόσθετο κόστος υλικών για τον φορτιστή των 8 kW [19]. Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή λόγω της επιπλέον ευκολίας της μεγάλης διάρκειας ζωής του φορτιστή. Τα ασύρματα λεωφορεία μπορούν να μειώσουν το κόστος καυσίμων κατά 90000 δολάρια ΗΠΑ, δηλαδή έως και 80% κατά τη διάρκεια ζωής του οχήματος, σε σύγκριση με ένα λεωφορείο ντίζελ [15]. Εάν συγκρίνουμε το κόστος συντήρησης του ασύρματου συστήματος φόρτισης με αυτό του ενσύρματου, λόγω του τμήματος μη επαφής μεταξύ του πομπού και του δέκτη, θα μειωθεί όλη η συντήρηση του βύσματος. Από οικονομική άποψη, το σημαντικότερο ζήτημα με την ασύρματη φόρτιση είναι η μπαταρία. Εάν οι σταθμοί φόρτισης θα είναι επαρκείς σε αριθμό, η απαίτηση για μπαταρία επί του οχήματος θα είναι μικρότερη και το αντίστροφο. Η ασύρματη φόρτιση αποτελείται από δύο συναρτήσεις κόστους. Η πρώτη είναι η συνάρτηση κόστους μπαταρίας και η άλλη είναι η συνάρτηση κόστους πομπού. Η συνάρτηση πομπού αποτελείται από δύο κόστη: 1) το σταθερό κόστος αποτελείται από το κόστος του αντιστροφέα και τη χρέωση εργασίας για τη σύνδεση με το δίκτυο και 2) μεταβλητό κόστος που εξαρτάται από το μήκος του πομπού.

4.4.3 Υγεία και ασφάλεια

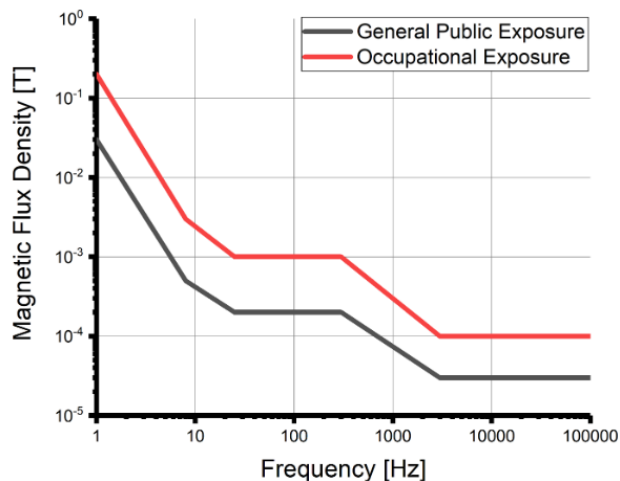
Το πρώτο ερώτημα σχετικά με την ανάπτυξη της ασύρματης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι "εάν είναι ασφαλές για την υγεία". Αυτό οφείλεται μόνο στο φόβο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται κατά την ασύρματη μετάδοση ισχύος. Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας είναι πολύ πιο ασφαλής από τις ακτινοβολίες των κινητών τηλεφώνων. Προτείνεται ένας μεταγωγέας φάσης για τη θωράκιση, αφού για να μειωθεί η διαρροή μαγνητικής ροής, χρησιμοποιείται διπλό πηνίο θωράκισης και τέσσερις πυκνωτές. Αυτό το διπλό πηνίο θωράκισης εκπέμπει το αντίθετο πεδίο το οποίο ακυρώνει τη ροή διαρροής. Η IEEE και η ICNIRP θέτουν περιορισμούς για την ένταση και τη συχνότητα και έναν άλλο παράγοντα των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών και του πεδίου που χρησιμοποιούνται στις ασύρματες εφαρμογές [3].

Η ανάλυση αυτού του προτύπου είναι να παρέχει όρια έκθεσης για την προστασία από τις διαπιστωμένες αρνητικές ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για την ανθρώπινη υγεία που προκαλούνται από την έκθεση σε ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία ραδιοσυχνοτήτων στην περιοχή συχνοτήτων 3 kHz-300 GHz [3]. Οι ερευνητές προσπαθούν να αναπτύξουν μια ασπίδα για τη θωράκιση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Η επιπλέον έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες οδηγεί σε διάφορα προβλήματα υγείας.

Στα σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζεται το επίπεδο αναφοράς για την επαγγελματική έκθεση και την έκθεση του γενικού πληθυσμού για ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, αντίστοιχα. Το επίπεδο αναφοράς υπολογίζεται για τη συνθήκη της μέγιστης σύζευξης του πεδίου στο εκτεθειμένο άτομο και λαμβάνει υπόψη δύο διαφορετικές επιδράσεις την επίδραση στο κεντρικό νευρικό σύστημα (ο βασικός περιορισμός για το κεντρικό νευρικό σύστημα στα 50 Hz είναι $33 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$) και την επίδραση στο περιφερειακό νευρικό σύστημα ($60 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{T}^{-1}$). Βασικό επίπεδο αναφοράς ηλεκτρικού πεδίου για επαγγελματική έκθεση είναι μεταξύ 25 Hz και 10 MHz.



Σχήμα 4.9: Επίπεδο αναφοράς για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.



Σχήμα 4.10: Επίπεδο αναφοράς για έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

4.5 Σύνδεση του ηλεκτρικού οχήματος με το δίκτυο μέσω φόρτισης

Η ζήτηση για φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων είναι μία από τις σημαντικότερες αναδυόμενες προκλήσεις για το υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρόκληση αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω τοπολογιών οχήματος στο δίκτυο. Τα ηλεκτρικά οχήματα που παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια εφαρμογή γνωστή ως εφαρμογές οχήματος στο δίκτυο. Βασικές απαιτήσεις για την ενσωμάτωση οχήματος στο δίκτυο είναι η ευελιξία, η αυτόματη και αμφίδρομη φόρτιση και εκφόρτιση. Η ασύρματη φόρτιση μπορεί να εκπληρώσει τις περισσότερες από τις παραπάνω απαιτήσεις .

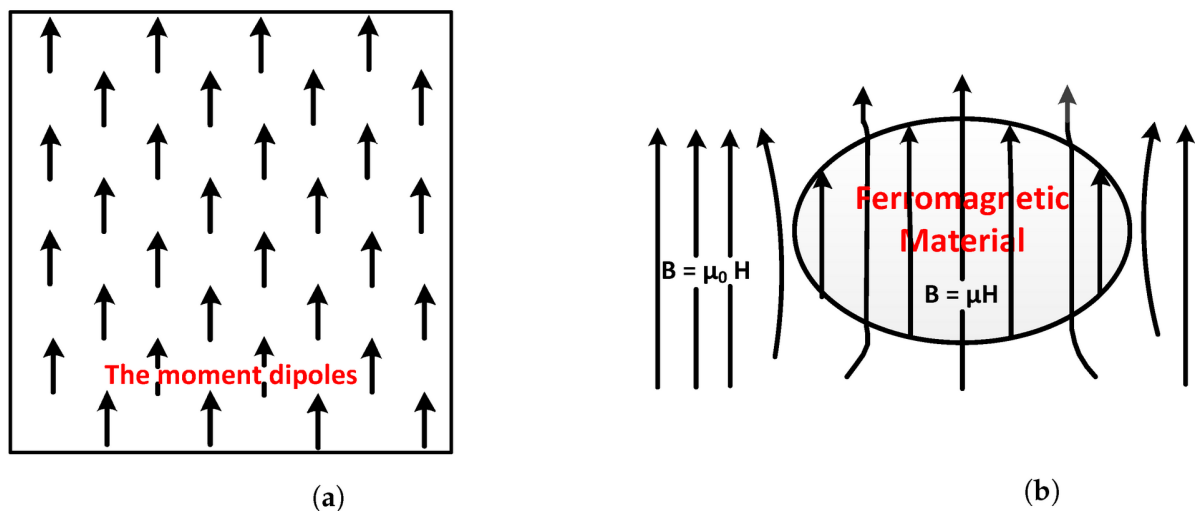
Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν δυνητικά να αντικαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα μέσω του εξηλεκτρισμού των μεταφορών. Η εφαρμογή οχήματος στο δίκτυο μπορεί να ωφελήσει το τοπικό μικροδίκτυο, καθώς και να ενσωματωθεί εύκολα με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [3]. Η ηλεκτρική ενέργεια μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα, αλλά η μπαταρία χρησιμοποιείται για αποθήκευση. Κατά την τελευταία δεκαετία, γίνονται αρκετές προσπάθειες για τη βελτίωση της μετατροπής και της χρήσης της ενέργειας για τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα στον τομέα της ηλεκτροκίνησης των μεταφορών και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, στο μέλλον θα αυξηθεί η εισαγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και των ηλεκτρικών οχημάτων στις μεταφορές [25].

Ωστόσο, η εγκατάσταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδίως των αιολικών και ηλιακών συστημάτων, προκαλεί προβλήματα σταθερότητας και ποιότητας ισχύος στο κύριο δίκτυο, λόγω της στοχαστικής φύσης των περιβαλλοντικών συνθηκών. Επίσης, η μεγάλης κλίμακας εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων (υβριδικών ή αμιγώς βασισμένων σε μπαταρίες) παρουσιάζει μεγάλες προκλήσεις για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [26]. Η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την αντιστάθμιση της απαιτούμενης ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί ιδανική λύση για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [25]. Επιπλέον, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της σταθερότητας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος του, κάτι που είναι γνωστό στις μέρες μας από τις εφαρμογές οχήματος στο δίκτυο. Αυτό το είδος ενσωμάτωσης μεταξύ ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου απαιτεί ευέλικτο, αυτόματο, απλό, ασφαλές και αξιόπιστο σύστημα φόρτισης και εκφόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα. Η απλότητα του σχεδιασμού, η υψηλή απόδοση, η ευελιξία χαμηλού κόστους και οι αυτόματες μέθοδοι φόρτισης και εκφόρτισης είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την έρευνα.

Η ασύρματη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί πολύ εύκολα να παρέχει αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων και του δικτύου λόγω αυτοματισμού. Η ασύρματη φόρτιση ή η ασύρματη σύνδεση μπορεί να παρέχει συνδεσιμότητα έως και 65%, ενώ η ενσύρματη σύνδεση παρέχει μόνο το 10% της επιτυχούς αλληλεπίδρασης [26]. Η ασύρματη φόρτιση μπορεί να αυτοματοποιηθεί με τη χρήση ορισμένων συσκευών ασύρματης επικοινωνίας, οι οποίες μπορούν να ανιχνεύσουν αυτόματα την κατάσταση και να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις οχήματος στο δίκτυο. Στο μέλλον, με την εισαγωγή της ασύρματης φόρτισης, η αλληλεπίδραση του δικτύου με ένα όχημα θα μπορούσε να αυξηθεί και η επιπλέον ενέργεια από το όχημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί όταν απαιτείται και το αντίστροφο.

Κεφάλαιο 5^ο: Μαγνητικός πυρήνας στην ασύρματη μετάδοση ενέργειας

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά χρησιμοποιούνται ως μαγνητικοί πυρήνες σε ηλεκτρικές μηχανές, καθώς έχουν καλά χαρακτηριστικά μαγνήτισης κάτω από ορισμένα όρια (κορεσμού και θερμοκρασίας). Όταν εφαρμόζεται ένταση μαγνητικού πεδίου H (A/m) σε αυτά τα υλικά, αυτά τείνουν να συγκεντρώνουν μαγνητικό πεδίο B (T) στο εσωτερικό τους και οι διπολικές ροπές τείνουν να ευθυγραμμιστούν όπως στο σχήμα 5.1. Επιπλέον, η μαγνητική ροή Φ (Wb/m²) στο εσωτερικό του υλικού είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική $B = \mu_0 H$ για τον ελεύθερο χώρο και $B = \mu H$ για το εσωτερικό σιδηρομαγνητικού υλικού όταν $\mu \gg \mu_0$, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1. Παρόλο που ο μαγνητικός πυρήνας υψηλής διαπερατότητας μπορεί να μειώσει τη διαδρομή αντίστασης και να προσανατολίσει το μαγνητικό πεδίο, θα εισάγει νέους παράγοντες όπως η απώλεια πυρήνα και θα αυξήσει τη μάζα του φορτιστή [27].



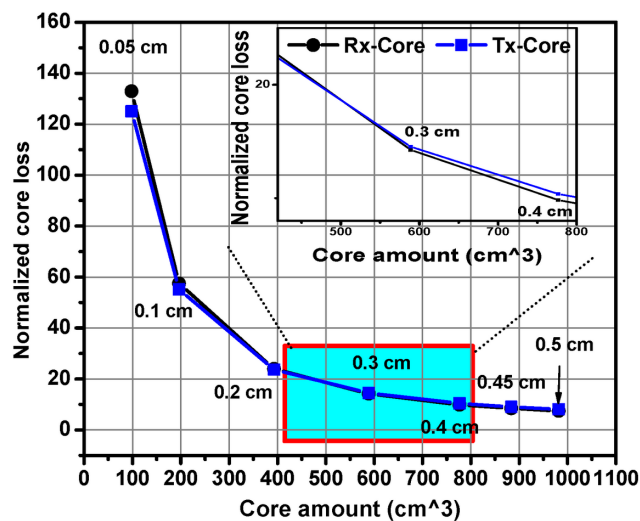
Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικού υλικού. (α) Δίπολα ροπής. (β) Ροή εντός και εκτός του υλικού.

5.1 Απώλειες και πάχος πυρήνα

Οι απώλειες πυρήνα γενικά αποτελούνται από δύο τύπους απωλειών: τις απώλειες δινορευμάτων και τις απώλειες υστέρησης. Η απώλεια πυρήνα, σύμφωνα με τον τύπο Steinmetz που εκφράζεται στην εξίσωση (30), εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας f και την πυκνότητα μαγνητικής ροής B :

$$P_{CV} = C_m f^\alpha B_{max}^\beta \text{ (kW/m}^3\text{)} \quad (30)$$

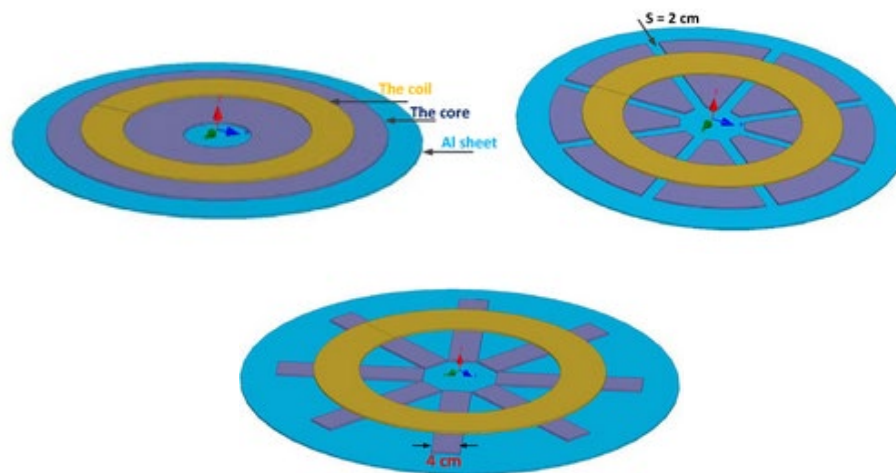
όπου C_m , α και β είναι συντελεστές που μπορούν να εξαχθούν από τα φύλλα δεδομένων του κατασκευαστή για τις καμπύλες (B - P_{CV}) για ένα συγκεκριμένο υλικό. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται οι απώλειες πυρήνα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος σε σχέση με το βάρος του πυρήνα όταν το πάχος του πυρήνα μεταβάλλεται από 0,05 έως 0,5 cm [27]. Από το σχήμα 5.2 μπορούμε να αποδείξουμε ότι όσο ελαφρύτερος είναι ο πυρήνας, τόσο υψηλότερες είναι οι απώλειες πυρήνα. Η σημασία αυτής της ανάλυσης αποκάλυψε ότι ο ελαφρύτες πυρήνας μπορεί να μειώσει το κόστος παραγωγής και την κατανάλωση ενέργειας του αυτοκινήτου, ειδικά για τον πυρήνα που τοποθετείται στο αυτοκίνητο. Ωστόσο, ο ελαφρύτερος πυρήνας μπορεί να μειώσει την απόδοση του συστήματος λόγω της υψηλότερης απώλειας πυρήνα. Από αυτή την άποψη, η δομή του πυρήνα πρέπει να αποτελεί συμβιβασμό μεταξύ της απώλειας πυρήνα και του βάρους του πυρήνα. Το σχήμα δείχνει επίσης ότι το βέλτιστο πάχος πυρήνα είναι 0,3 cm όταν οι απώλειες πυρήνα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι περίπου παρόμοιες.



Σχήμα 5.2: Απώλειες πυρήνων πρωτεύοντος (Tx) και δευτερεύοντος (Rx) σε σχέση με το πάχος του πυρήνα

5.2 Η προτεινόμενη δομή του πυρήνα

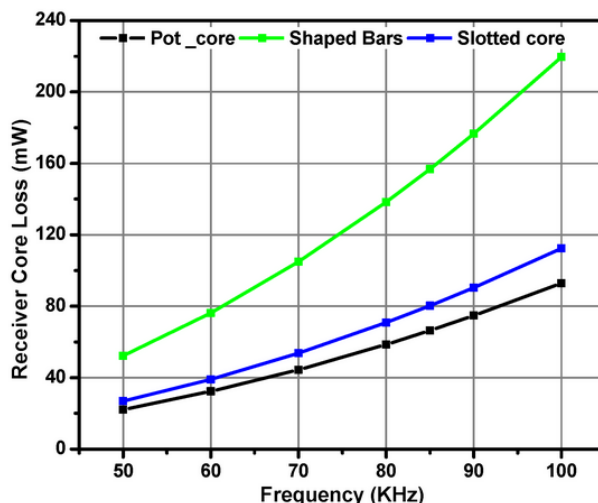
Εκτός από τον τύπο του υλικού του μαγνητικού πυρήνα, το σχήμα του πυρήνα είναι επίσης ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του πυρήνα. Τυπικές δομές πυρήνων είναι ο πυρήνας rot, ο πυρήνας με σχισμές και οι διαμορφωμένοι ράβδοι, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3 [27]. Οι επίπεδοι πυρήνες είναι οι πιο συνηθισμένες δομές, ενώ οι ακτινικοί και οι λωρίδες πυρήνες είναι ελαφρύτερες δομές των επίπεδων τύπων. Επιπλέον, σε ορισμένες εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις ΗΜΣ, η ενεργή θωράκιση, η αντιδραστική θωράκιση συντονισμού και η παθητική θωράκιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό για να ενισχυθεί η ικανότητα ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης του συστήματος στο μέγιστο βαθμό.



Σχήμα 5.3: Διάφορες δομές πυρήνων. α) πυρήνας rot β) πυρήνας με σχισμές γ) διαμορφωμένες ράβδοι.

Παρά το γεγονός ότι ο πυρήνας με τις διαμορφωμένες ράβδους έχει υψηλές απώλειες πυρήνα (σχήμα 5.4) και υψηλή διαρροή μαγνητικής ροής, ήταν ο ελαφρύτερος, δεδομένου ότι ο πυρήνας δευτερεύοντος εγκαθίσταται απευθείας στο κάτω μέρος του αυτοκινήτου, το βάρος είναι κρίσιμος παράγοντας κατά το σχεδιασμό του ασύρματου φορτιστή για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων. Ως εκ τούτου, συνιστάται ιδιαίτερα ο προτεινόμενος βέλτιστος σχεδιασμός πυρήνα με βάση έναν πυρήνα από διαμορφωμένες ράβδους. Η βελτιστοποίηση είχε στόχο τη μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνητικού πυρήνα δευτερεύοντος και την έκανε όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη. Επομένως, η ποσότητα του μαγνητικού πυρήνα πρέπει να αυξηθεί στο κέντρο των πηνίων περιέλιξης για να

κατασταλεί η διαρροή μαγνητικής ροής και, ως εκ τούτου, να μειωθούν οι απώλειες πυρήνα. Ο βέλτιστος σχεδιασμός της δομής του πυρήνα είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ του βάρους του πυρήνα και της απώλειας πυρήνα [27].



Σχήμα 5.4: Απώλειες πυρήνα δευτερεύοντος ως προς τη συχνότητα.

5.3 Υλικά που είναι κατάλληλα για μαγνητικός πυρήνας στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας

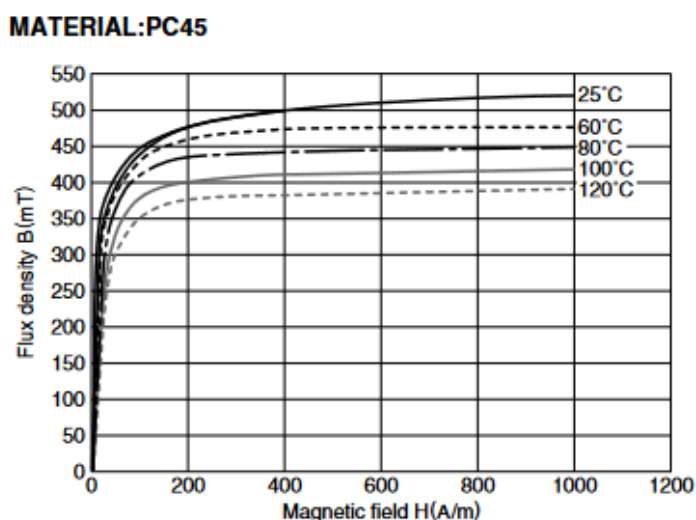
Στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται αναφορά στα υλικά που συγκρίνονται στην εν λόγω διπλωματική ως πυρήνες στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Το TDK-PC45 είναι ένας τύπος φερρίτης, το Finemet FT3M ανήκει στην κατηγορία των νανοκρυσταλλικών μαγνητικών υλικών και τα νανοσωματίδια σιδήρου που είναι μικρά σωματίδια σιδήρου σε μορφή νανοκρυστάλλων.

5.3.1 Φερρίτης TDK-PC45

Ο φερρίτης είναι ένα κεραμικό υλικό με μαγνητικές ιδιότητες που είναι χρήσιμες σε πολλούς τύπους ηλεκτρονικών συσκευών. Οι φερρίτες είναι σκληροί, εύθραυστοι, περιέχουν σίδηρο, είναι γενικά γκριζοί ή μαύροι και πολυκρυσταλλικοί, δηλαδή αποτελούνται από μεγάλο αριθμό μικρών κρυστάλλων. Αποτελούνται από οξείδιο του σιδήρου και ένα ή περισσότερα άλλα μέταλλα σε χημικό συνδυασμό. Ένας φερρίτης σχηματίζεται από την

αντίδραση του οξειδίου του σιδήρου (οξείδιο του σιδήρου ή σκουριά) με οποιοδήποτε από έναν αριθμό άλλων μετάλλων, όπως το μαγνήσιο, το αλουμίνιο, το βάριο, το μαγγάνιο, ο χαλκός, το νικέλιο, το κοβάλτιο ή ακόμη και ο ίδιος ο σίδηρος.

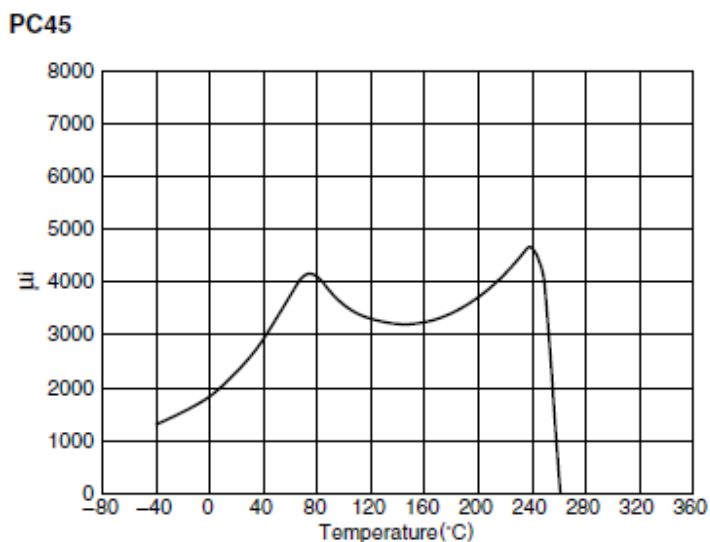
Οι σημαντικότερες ιδιότητες των φερριτών περιλαμβάνουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και υψηλή ηλεκτρική αντίσταση. Η υψηλή διαπερατότητα στα μαγνητικά πεδία είναι ιδιαίτερα επιθυμητή σε συσκευές όπως οι κεραίες. Η υψηλή αντίσταση στον ηλεκτρισμό είναι επιθυμητή στους πυρήνες των μετασχηματιστών για τη μείωση των δινορευμάτων. Οι φερρίτες ενός τύπου που είναι γνωστός ως φερρίτες τετραγωνικού βρόχου μπορούν να μαγνητιστούν σε μία από τις δύο κατευθύνσεις από ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή η ιδιότητα τους καθιστά χρήσιμους στους πυρήνες μνήμης των ψηφιακών υπολογιστών, καθώς επιτρέπει σε έναν μικροσκοπικό δακτύλιο φερρίτη να αποθηκεύει δυαδικά ψηφία πληροφοριών. Ένας άλλος τύπος μνήμης υπολογιστών μπορεί να κατασκευαστεί από ορισμένους μονοκρυσταλλικούς φερρίτες στους οποίους οι μικροσκοπικοί μαγνητικοί τομείς που ονομάζονται φυσαλίδες μπορούν να χειραγωγούνται μεμονωμένα. Ορισμένοι φερρίτες απορροφούν ενέργεια μικροκυμάτων μόνο προς μία κατεύθυνση ή προσανατολισμό- για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε οδηγούς μικροκυματικών κυμάτων [28].



Σχημα 5.5 : Καμπύλη μαγνήτισης φερρίτη TDK-PC45 [29].

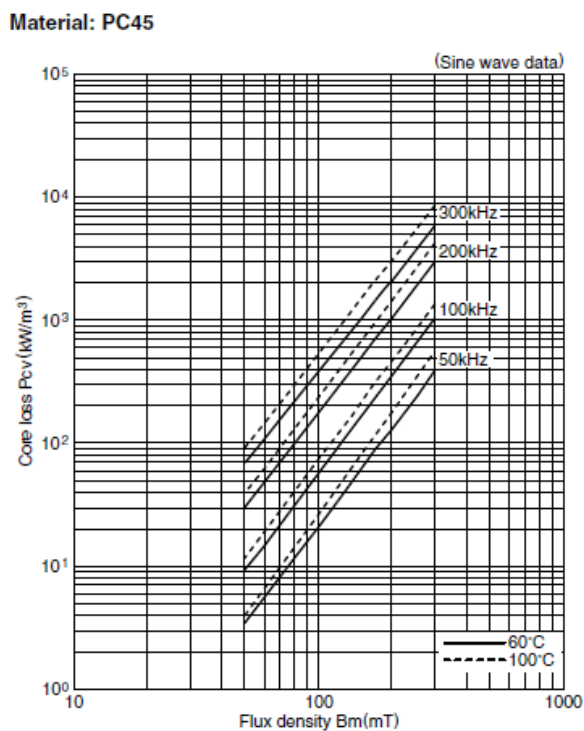
Η μαγνητική διαπερατότητα του φερρίτη μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Η διαπερατότητα του φερρίτη συνήθως αυξάνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Αφού φτάσει σε ένα τοπικό μέγιστο σε μια ορισμένη θερμοκρασία, η διαπερατότητα των μαγνητικών υλικών εξαφανίζεται (γίνεται ίση με τη διαπερατότητα του αέρα, $\mu = 1$) καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται περαιτέρω. Η θερμοκρασία στην οποία η μαγνητική ιδιότητα εξαφανίζεται από τα μαγνητικά υλικά ονομάζεται θερμοκρασία Curie. Η θερμοκρασία Curie

του φερρίτη λαμβάνεται συνήθως από τη θερμοκρασία κατά την οποία το μ_i γίνεται 1 σε μια γραμμή, η οποία προκύπτει από τη σύνδεση ενός σημείου όπου τα χαρακτηριστικά της θερμοκρασίας του μ_i πέφτουν από ένα τοπικό μέγιστο μ_{imax} σε ένα σημείο του 80 % της μ_{imax} με ένα σημείο του 20 % του μ_{imax} [30].



Σχημα 5.6: Καμπύλη μεταβολή μαγνητικής διαπερατότητας ως προς τη θερμοκρασία του φερρίτη TDK-PC45 [29].

Τα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας χρησιμοποιούν φερρίτη ως ένα από τα σιδηρομαγνητικά υλικά για τη βελτίωση της μαγνητικής σύζευξης. Αυτό συμβαίνει επειδή οι φερρίτες έχουν χαρακτηριστικά, όπως υψηλή συχνότητα, υψηλή μαγνητική διαπερατότητα και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Ο φερρίτης είναι μια παθητική διάταξη που φιλτράρει την ενέργεια θορύβου υψηλής συχνότητας σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Γίνεται ανθεκτικός στο προβλεπόμενο εύρος συχνοτήτων και διαχέει την ενέργεια θορύβου με τη μορφή θερμότητας. Τα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας που διαθέτουν φερρίτες καταστéλλουν τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μεταξύ της κεραίας και του μεταλλικού περιβλήματος. Η μαγνητική ροή διατηρείται μεταξύ των πηνίων πομπού & δέκτη για την ενίσχυση της απόδοσης φόρτισης. Ως εκ τούτου, οι φερρίτες αποτρέπουν τη διαρροή μαγνητικής ενέργειας στο μεταλλικό περίβλημα. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά μπορούν επίσης να λειτουργήσουν σε θερμοκρασία δωματίου με υψηλή απόδοση φόρτισης [31].



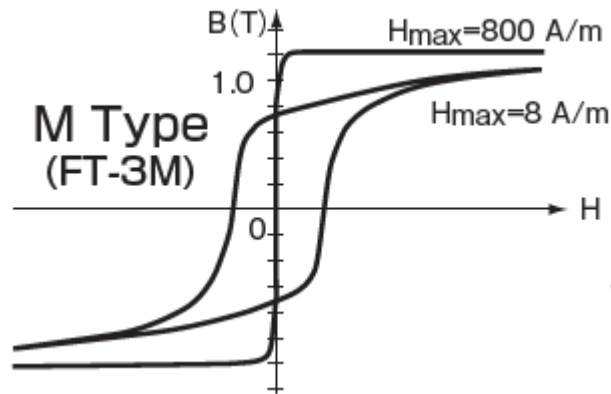
Σχήμα 5.7: Απώλειες πυρήνα για τον φερρίτη TDK-PC45.

5.3.2 Finemet FT3M

Το πρώτο νανοκρυσταλλικό μαλακό μαγνητικό υλικό στον κόσμο που αναπτύχθηκε από την Hitachi Metals, Ltd. Το προγενέστερο υλικό του Finemet είναι άμορφο μέταλλο που λαμβάνεται με ταχεία απόσβεση του λιωμένου μετάλλου, αποτελούμενο από Fe, Si, B και μικρές ποσότητες Cu και Nb. Εφαρμόζοντας θερμική επεξεργασία στο κράμα σε υψηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία κρυστάλλωσής του, το κράμα αυτό σχηματίζει νανοκρυσταλλική δομή (μέγεθος κόκκων περίπου 10 νανομέτρων). Διαθέτει τόσο υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού όσο και υψηλή διαπερατότητα. Το Finemet έχει υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής κορεσμού (πάνω από 1T) συγκρίσιμη με το άμορφο μέταλλο με βάση τον Fe και υψηλή διαπερατότητα (πάνω από 10.000 στα 100kHz) συγκρίσιμη με το άμορφο μέταλλο με βάση τον Co. Διαθέτει τα πλεονεκτήματα τόσο των άμορφων μετάλλων με βάση τον Fe όσο και των άμορφων μετάλλων με βάση τον Co.

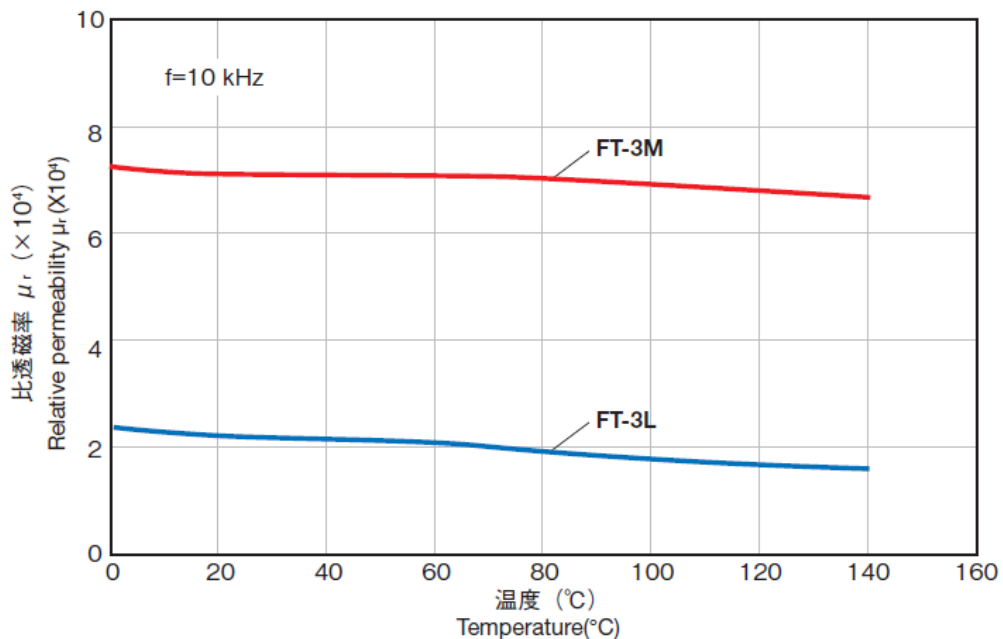
Το Finemet έχει πολύ υψηλή θερμοκρασία Curie (570°C), η οποία έχει ως αποτέλεσμα μικρή μεταβολή της διαπερατότητας (λιγότερο από $\pm 10\%$) σε εύρος θερμοκρασιών από -40 έως $+150^{\circ}\text{C}$. Επηρεάζεται λιγότερο από μηχανικές καταπονήσεις και πολύ χαμηλή εκπομπή ακουστικού θορύβου. Η διαπερατότητα και η απώλεια πυρήνα του Finemet επηρεάζονται

ελάχιστα από μηχανικές καταπονήσεις λόγω της σχεδόν μηδενικής μαγνητοσυστολής (λιγότερο από 10^{-6}). Επιπλέον, η χαμηλή μαγνητοσυστολή του μειώνει σημαντικά την εκπομπή ακουστικού θορύβου όταν η τάση και το ρεύμα που εφαρμόζεται στο στον πυρήνα σε ακουστική περιοχή συχνοτήτων [32].

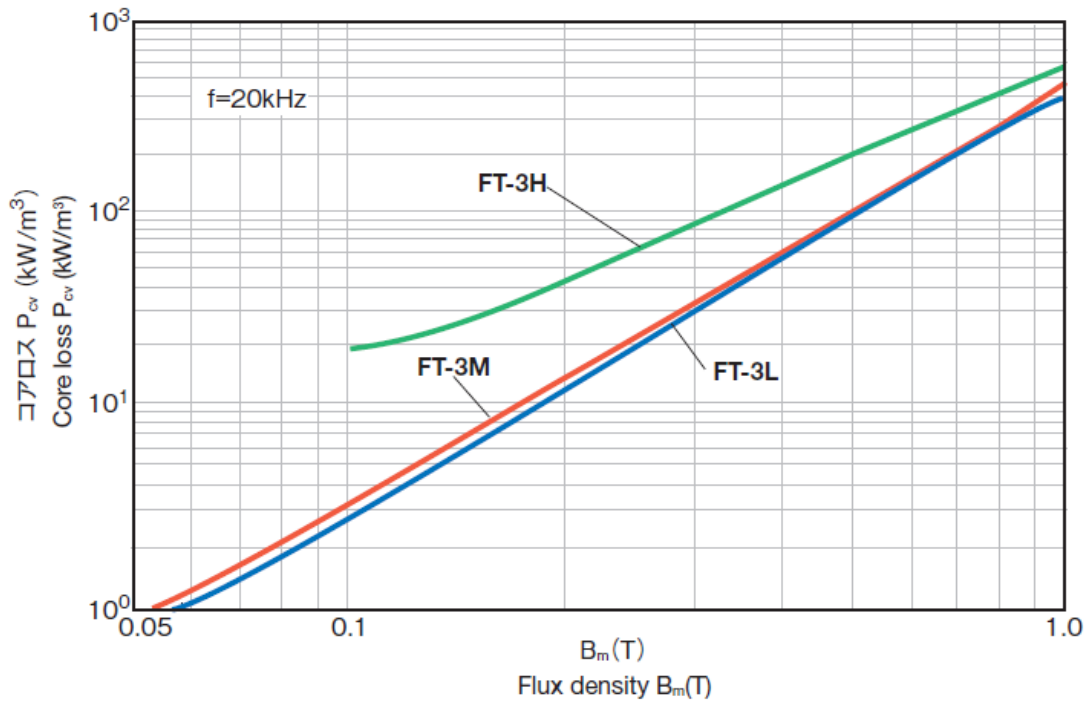


Σχήμα 5.8: Βρόχος υστέρησης Finemet FT3M [33].

Το παρακάτω γράφημα (σχήμα 5.9) δείχνει την εξάρτηση της σχετικής διαπερατότητας από τη θερμοκρασία στα 10kHz για το Finemet FT-3M. Η μεταβολή της σχετικής διαπερατότητας είναι πολύ μικρή σε εύρος θερμοκρασιών από 0°C έως 150°C, "η οποία είναι εντός $\pm 10\%$ της μέσης τιμής". Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται οι απώλειες πυρήνα για συχνότητα 20 kHz για μια σειρά μέγιστων εφαρμοζόμενων πυκνοτήτων ροής [33].



Σχήμα 5.9: Καμπύλη μεταβολή σχετικής διαπερατότητας ως προς τη θερμοκρασία του Finemet FT3M.



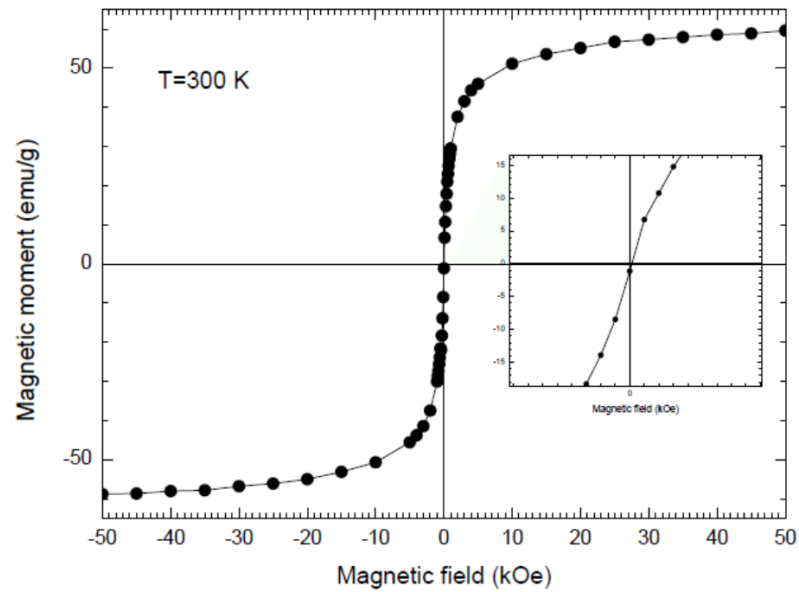
Σχήμα 5.10: Απώλειες πυρήνα Finemet FT3M για διάφορες τιμές μαγνητικού πεδίου.

5.3.3 Νανοδοματίδια σιδήρου

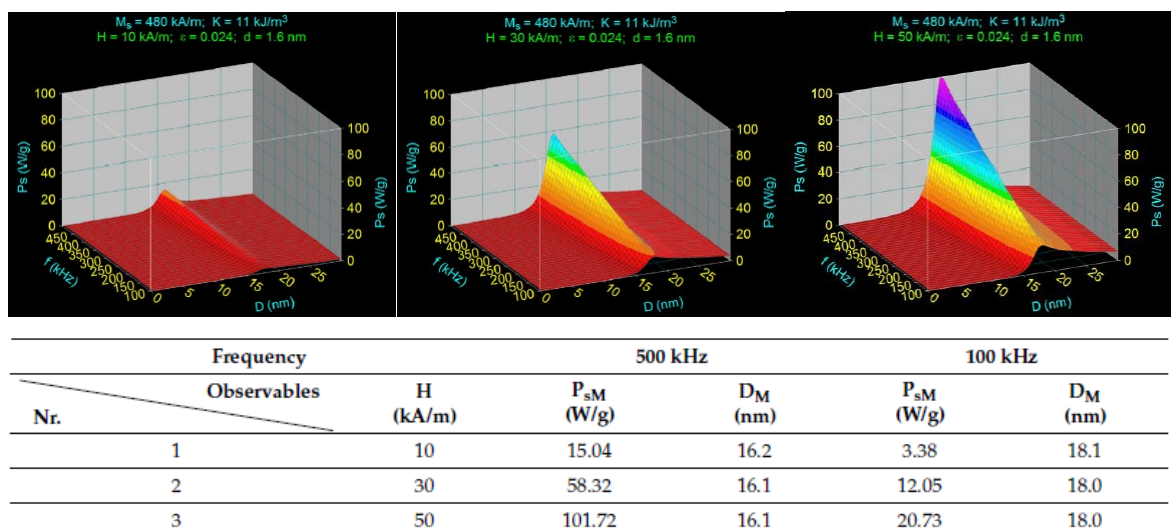
Τα νανοδοματίδια σιδήρου είναι τα μικρότερα σωματίδια μετάλλου σιδήρου με μεγάλη επιφάνεια, υψηλή αντιδραστικότητα και είναι μη τοξικά. Τα νανοδοματίδια σιδήρου έχουν εξαιρετική σταθερότητα διαστάσεων και διαθέτουν επίσης υψηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεγάλη επιφάνεια και είναι ιδιαίτερα μαγνητικά. Επίσης, μπορούν να οξειδωθούν αμέσως όταν εκτεθούν σε νερό ή αέρα και παράγουν ελεύθερα ιόντα Fe. Υπάρχουν πολυάριθμες εφαρμογές τους, αλλά η πιο ελπιδοφόρα περιλαμβάνει το ρόλο τους στη χορήγηση φαρμάκων [34].

Μεταξύ των μαγνητικών υλικών, τα νανοδοματίδια οξειδίου του σιδήρου είναι πολλά υποσχόμενα νανοϋλικά λόγω της μεγάλης βιοσυμβατότητάς τους. Αν και είναι γνωστά πολυάριθμα οξείδια του σιδήρου, ο όρος "οξείδια του σιδήρου" αναφέρεται συνήθως σε τρεις τύπους: Fe_3O_4 (μαγνητίτης), $\alpha-Fe_2O_3$ (αιματίτης) και $\gamma-Fe_2O_3$ (μαγκεμίτης). Μεταξύ όλων των οξειδίων του σιδήρου, το Fe_3O_4 έχει προσελκύσει μεγαλύτερη προσοχή λόγω των ανώτερων μαγνητικών ιδιοτήτων του, της ηλεκτρονικής αγωγιμότητας και της βιοσυμβατότητάς του. Οι μαγνητικές ιδιότητες του Fe_3O_4 μπορούν να εξηγηθούν από την κρυσταλλική δομή του [35]. Από την καμπύλη μαγνήτισης στο σχήμα 5.11 φαίνεται ότι νανοδοματίδια Fe_3O_4 εμφανίζουν υπερπαραμαγνητική συμπεριφορά, καθώς η καμπύλη

μαγνήτισης διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Αυτό σημαίνει ότι όταν το εξωτερικό πεδίο είναι μηδέν, η μαγνήτιση είναι επίσης μηδενική. Η μαγνήτιση κορεσμού που μετρήθηκε στους 300 K είναι 60 emu/g [36]. Στο σχήμα 5.12 παρουσιάζονται οι απώλειες των νανοσωματιδίων Fe_3O_4 για 100 kHz και 500 kHz αντίστοιχα, για τρεις περιπτώσεις έντασης μαγνητικού πεδίου [37].



Σχήμα 5.11: Καμπύλη μαγνήτισης νανοσωματιδίων Fe_3O_4 .



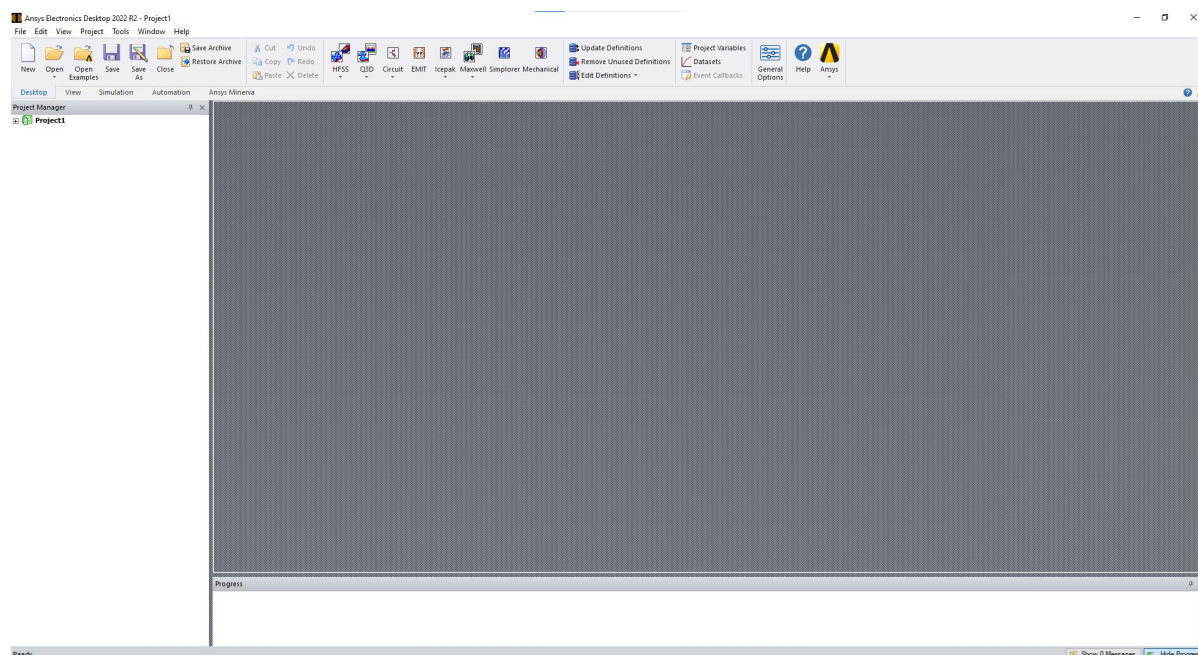
Σχήμα 5.12: Απώλειες νανοσωματιδίων Fe_3O_4 .

Κεφάλαιο 6^ο: Πειραματικό μέρος

Κατά τη διάρκεια του πειραματικού μέρους χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ANSYS Maxwell, το οποίο επιτρέπει την μαγνητοστατική ανάλυση της διάταξης που σχεδιάσαμε. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method -FEM) για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική τεχνική που διαμορφώνει το πρόβλημα σε μικρά υποπροβλήματα (πεπερασμένα στοιχεία) και επιλύει κάθε υποπρόβλημα χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Η μέθοδος FEM είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής μοντελοποίησης καθώς επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση πολύπλοκων δομών και υλικών, όπως μετασχηματιστές, αισθητήρες, και ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα.

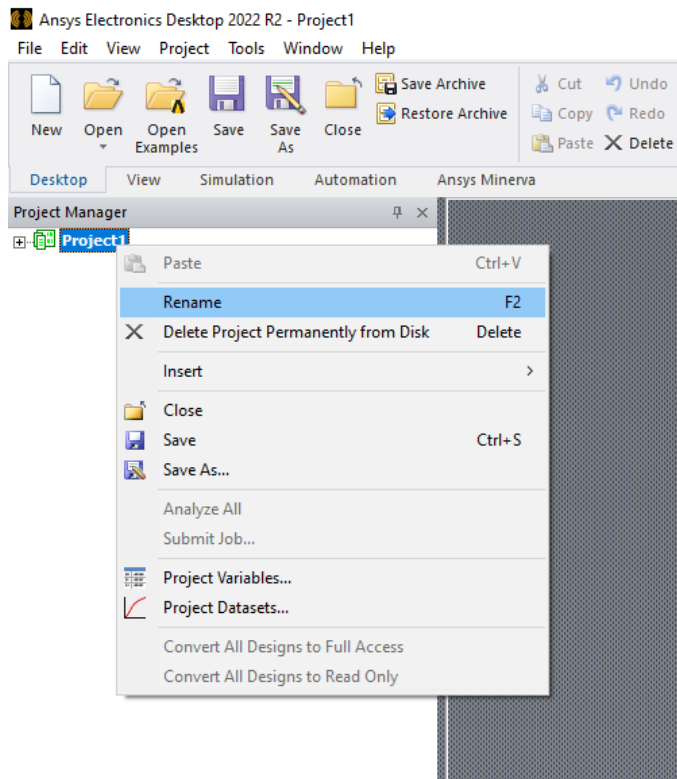
6.1 Δημιουργία νέας προσομοίωσης

Κατά την εκκίνηση του προγράμματος, εμφανίζεται το παρακάτω περιβάλλον (Σχήμα 6.1).



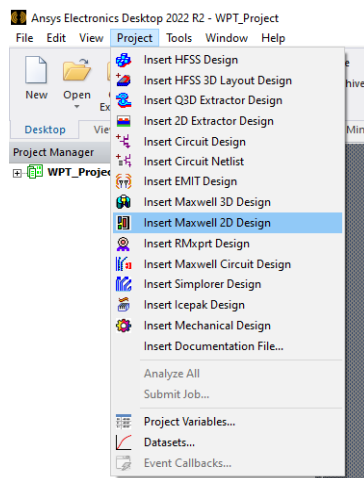
Σχήμα 6.1: Περιβάλλον του λογισμικού ANSYS Maxwell.

Στη συνέχεια μετονομάζουμε το πρόβλημα από Project1 σε WPT_Project, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2.



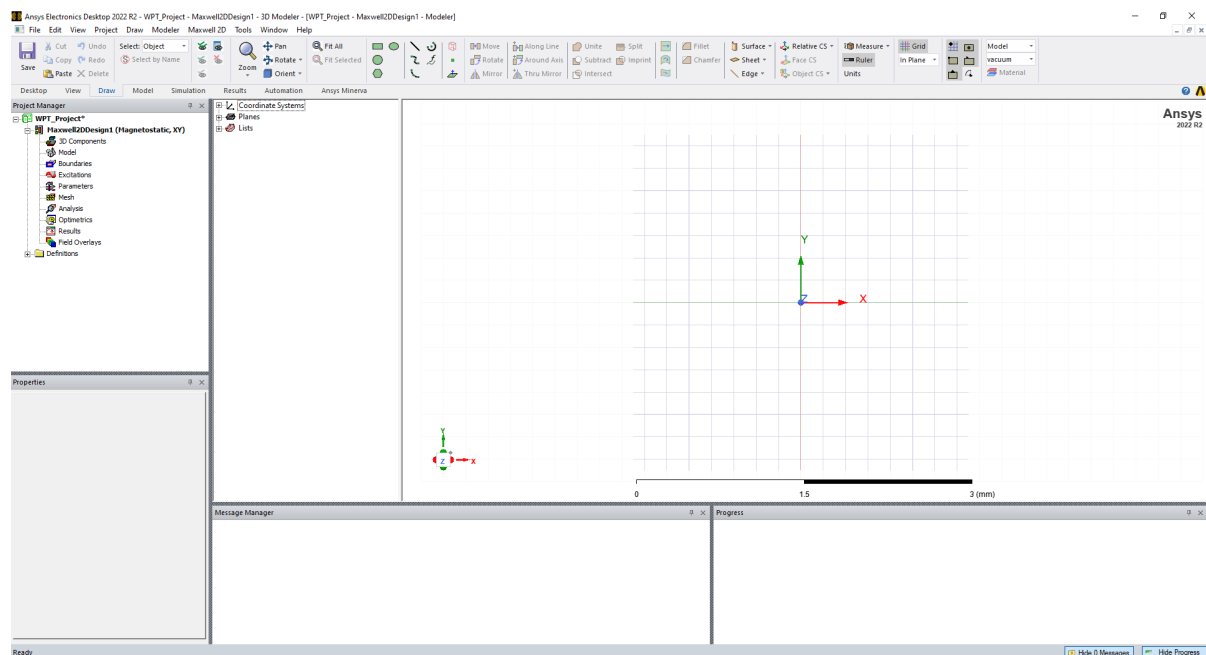
Σχήμα 6.2: Αλλαγή ονόματος του προβλήματος.

Η διάταξη στην εν λόγω διπλωματική θα μελετηθεί στις δύο διαστάσεις, οπότε επιλέγουμε **Project** → **Insert Maxwell 2D Design** (σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3: Εισαγωγή νέας δισδιάστατης διάταξης.

Υστερα από το προηγούμενο βήμα διαμορφώνεται το τελικό περιβάλλον όπου θα γίνει η σχεδίαση της διάταξης (σχήμα 6.4).

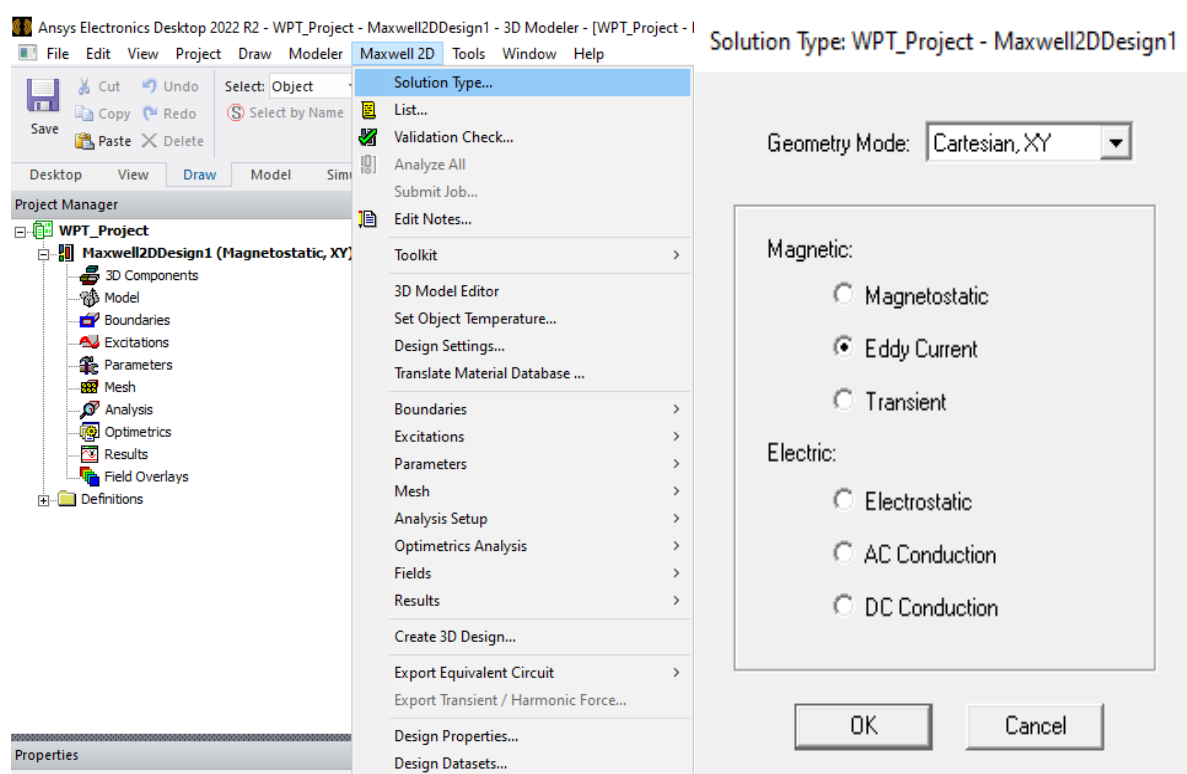


Σχήμα 6.4: Περιβάλλον 2D σχεδίασης.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι το περιβάλλον του σχεδιαστικού προγράμματος χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές. Τέρμα πάνω βρίσκεται η γραμμή εντολών, στην οποία περιέχονται όλες οι εντολές που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε. Ακριβώς από κάτω είναι η γραμμή εργαλείων (Toolbar) που περιλαμβάνει τα πιο συχνά χρησιμοποιημένα σύμβολα στη σχεδίαση. Στο κέντρο βρίσκεται το παράθυρο που καταλαμβάνει και τον περισσότερο χώρο, το οποίο είναι το παράθυρο σχεδίασης (Modeler Window). Ακριβώς αριστερά από το παράθυρο σχεδίασης είναι το δέντρο ιστορικού (History Tree), όπου φαίνονται επιγραμματικά τα σχεδιαστικά κομμάτια. Πάνω αριστερά είναι το παράθυρο διαχείρισης του σχεδίου (Project Manager Window), που περιέχει όλα τα στάδια της διαδικασίας μοντελοποίησης. Ακριβώς από κάτω είναι το παράθυρο ιδιοτήτων (Property Window) που περιέχει τις ιδιότητες των μερών των διατάξεων που δημιουργήθηκαν εφόσον επιλεγούν τα μέρη. Τέλος, το κάτω μέρος αποτελείται από τρία μέρη, το παράθυρο μηνυμάτων (Message Window) που βρίσκεται αριστερά, το παράθυρο εξέλιξης (Progress Window) που βρίσκεται δεξιά και η μπάρα κατάστασης (Status Bar) που βρίσκεται τέρμα κάτω. Το παράθυρο μηνυμάτων εμφανίζει μηνύματα προς τον χρήστη, τα οποία είναι παρατηρήσεις και σφάλματα που εντοπίζονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το παράθυρο εξέλιξης

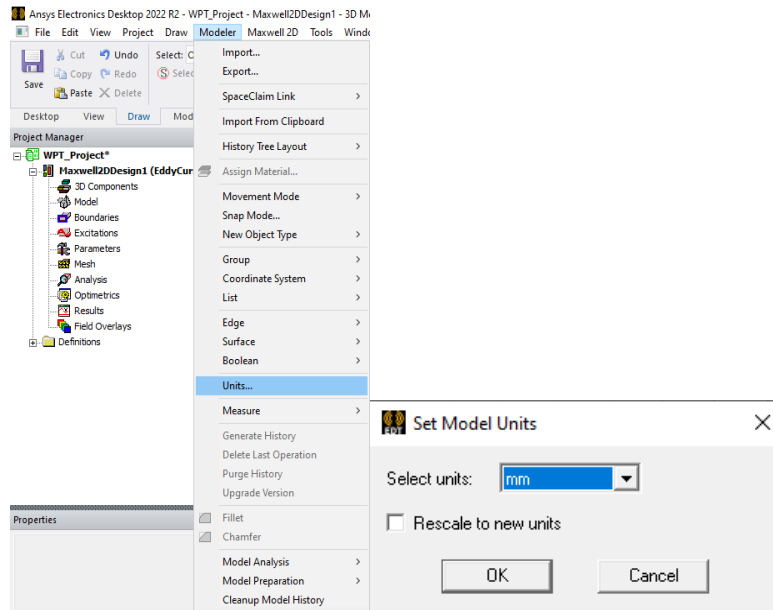
παρουσιάζει την πρόοδο της προσομοίωσης. Η μπάρα κατάστασης έχει βοηθητικό ρόλο για τον χρήστη.

Για την συνέχεια της προσομοίωσης θα πρέπει να αρχικοποιήσουμε το πρόγραμμα. Ύστερα από την επιλογή της δισδιάστατης διάταξης, πρέπει να επιλέξουμε τον τύπο επίλυσης του προβλήματος. Το πρόγραμμα μας δίνει διάφορους τύπους λύσεων όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5, όμως εμείς στην εν λόγω διπλωματική ασχολούμαστε με λύση επαγωγικών ρευμάτων. Επομένως, επιλέγουμε **Maxwell 2D** → **Solution Type** → **Eddy Current**.



Σχήμα 6.5: Επιλογή του τύπου λύσης.

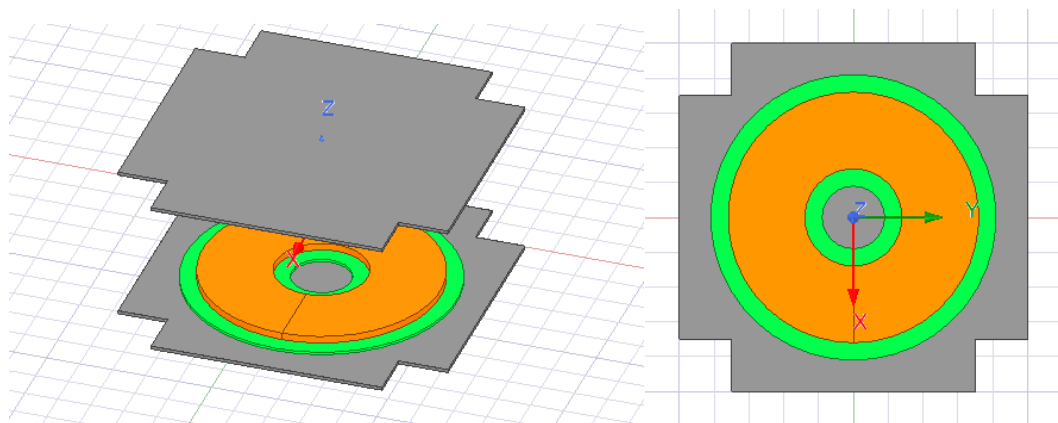
Το τελευταίο βήμα πριν αρχίζουμε να σχεδιάζουμε την διάταξη είναι να ορίσουμε μια κοινή μονάδα μέτρησης για την αποφυγή λαθών. Ο ορισμός αυτός γίνεται με τα βήματα **Modeler** → **Units** → **mm** όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6.



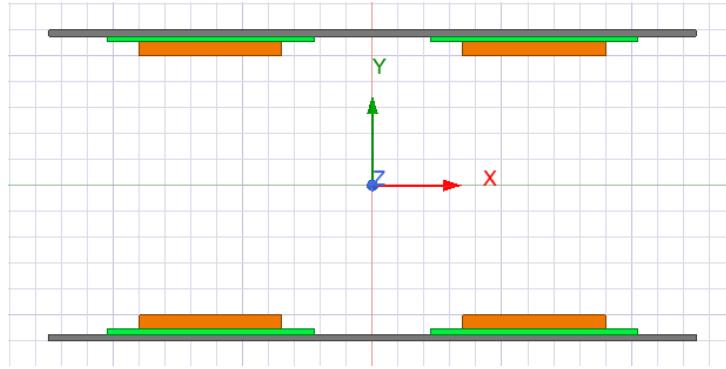
Σχήμα 6.6: Ορισμός κοινής μονάδας μέτρησης.

6.2 Σχεδίαση Διάταξης

Η διάταξη που θέλουμε να σχεδιάσουμε βασίζεται στο τρισδιάστατο σχήμα 6.6. Αυτή η διάταξη παρουσιάστηκε στο διαδικτυακό σεμινάριο [38] από την εταιρία ANSYS. Η δική μας προσομοίωση θα είναι δισδιάστατη, καθώς επιτυγχάνουμε μειωμένο χρόνο εκτέλεσης της προσομοίωσης παίρνοντας τα ίδια αποτελέσματα. Η τελική μορφή που θα έχει η διάταξη μας φαίνεται στο σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.6: Τρισδιάστατη διάταξη

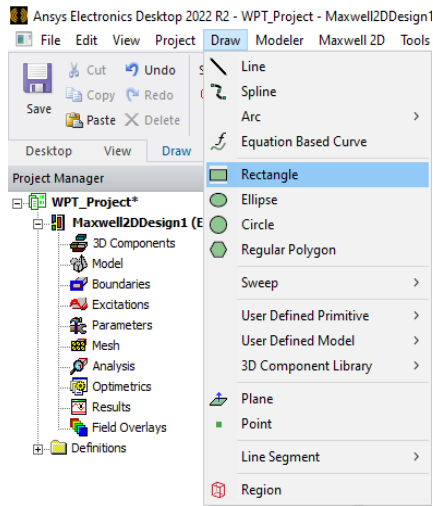


Σχήμα 6.7: Τελική μορφή διάταξης.

Ο συζεύκτης αποτελείται από ένα κυκλικό πρωτεύον και ένα πανομοιότυπο δευτερεύον. Κάθε ένα από τα δύο μέρη αποτελείται από τρία μέρη, την βάση αλουμινίου (γκρι χρώμα), το μαγνητικό υλικό (πράσινο χρώμα) και το πηνίο (πορτοκαλί χρώμα). Για το πρωτεύον επιλέγουμε ρεύμα λειτουργίας ίσο με 100 A και συχνότητα λειτουργίας 100 kHz. Επίσης, τα ελίγματα είναι 10 και το καθένα έχει διάμετρο 11 mm, οπότε το συνολικό μήκος του πηνίου θα είναι $10 \cdot 11 = 110$ mm. Το μήκος του σύρματος litz που χρησιμοποιείται είναι 7.822 m και αποτελείται από 384 κλώνους. Κάθε κλώνος έχει ακτίνα 0.125 mm. Οπότε, και με την αγωγιμότητα του αλουμινίου ($\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m) υπολογίζουμε την DC αντίσταση των πηνίων ($R_{dc} = 7.15$ m Ω). Πρέπει να ελέγξουμε την αντοχή του σύρματος ως προς τα 100 A. Βρίσκουμε την πυκνότητα ρεύματος $J = I/A$, όπου I είναι το ρεύμα 100 A και A είναι το εμβαδόν του σύρματος litz. Για να βρούμε το συνολικό εμβαδόν του σύρματος litz βρίσκουμε το εμβαδόν του ενός κλώνου (0.0490873856 mm²) και πολλαπλασιάζουμε με 384 (18.809985984 mm²), που είναι το σύνολο των κλώνων. Άρα, η πυκνότητα ρεύματος είναι $J = 100/18.809985984 \approx 5.31$ A/mm², η οποία είναι οριακά εντός ορίων (όρια 3-5 A/mm²).

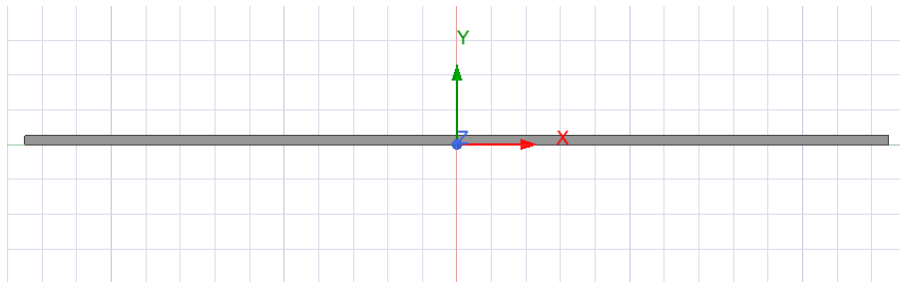
6.2.1 Θωράκιση αλουμινίου πρωτεύοντος

Αρχικά, θα κατασκευάσουμε το πρωτεύον και στη συνέχεια θα φτιάξουμε το δευτερεύον με τη μέθοδο του κατοπτρισμού αφού είναι πανομοιότυπα. Για να κατασκευάσουμε τον αλουμινένιο δίσκο στην βάση του πρωτεύοντος ακολουθούμε την διαδικασία **Draw** → **Rectangle** και βάζουμε τα σημεία που φαίνονται στο σχήμα 6.8.



X:	-250	Y:	0	Z:	0	Absolut	Cartesian	mm
dX:	500	dY:	5	dZ:	0	Relative	Cartesian	mm

Σχήμα 6.8: Εισαγωγή δίσκου αλουμινίου.



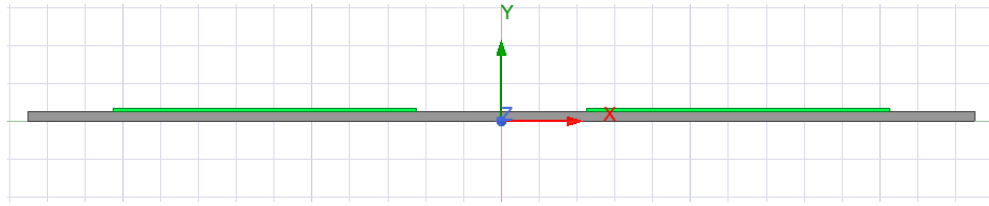
Σχήμα 6.9: Αλουμινένιος δίσκος.

6.2.2 Μαγνητικό Υλικό Πρωτεύοντος

Ύστερα από την δημιουργία του δίσκου αλουμινίου θα σχεδιάσουμε το μαγνητικό υλικό. Για την σχεδίαση επιλέγουμε πάλι **Draw** → **Rectangle** όπως στο σχήμα 6.8, αλλά αυτή τη φορά βάζουμε τις διαστάσεις του σχήματος 6.10.

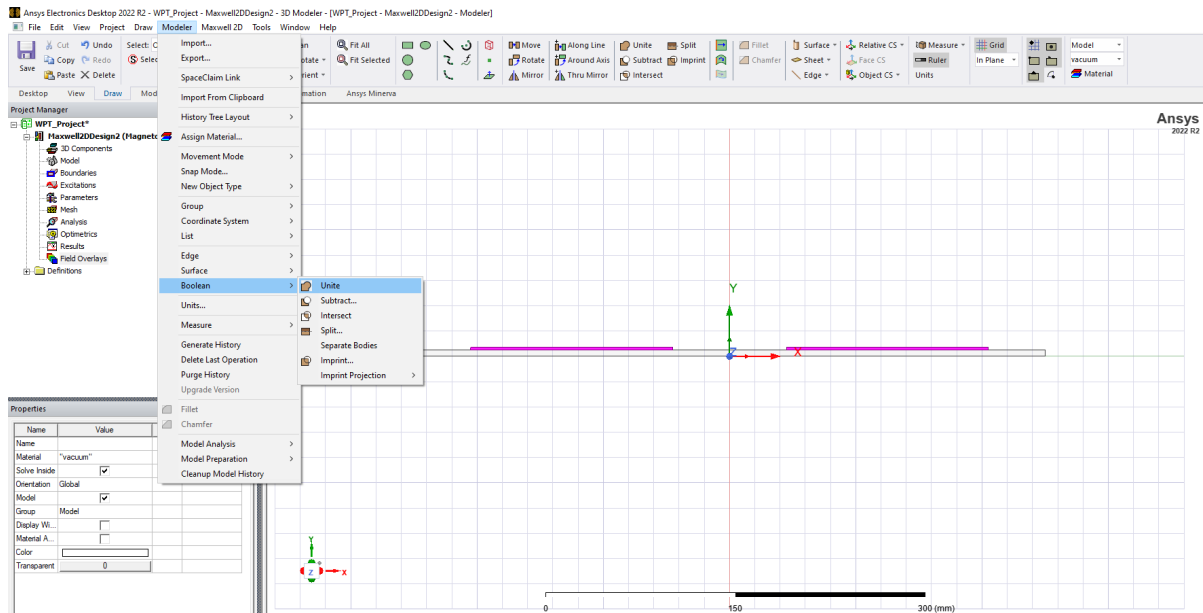
X:	-205	Y:	5	Z:	0	Absolut	Cartesian	mm
dX:	160	dY:	2	dZ:	0	Relative	Cartesian	mm
X:	45	Y:	5	Z:	0	Absolut	Cartesian	mm
dX:	160	dY:	2	dZ:	0	Relative	Cartesian	mm

Σχήμα 6.10: Διαστάσεις του μαγνητικού υλικού.



Σχήμα 6.11: Εισαγωγή μαγνητικού υλικού.

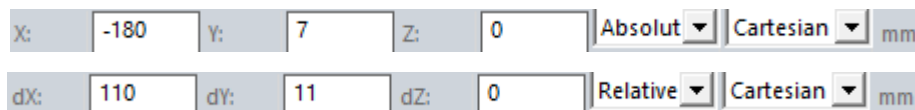
Φτιάξαμε δύο διαφορετικά τμήματα μαγνητικού υλικού οπότε θα πρέπει να τα ενώσουμε σε ένα. Για να το κάνουμε αυτό επιλέγουμε τα δύο μέρη που φτιάξαμε και ακολουθούμε τα βήματα **Modeler** → **Boolean** → **Unite** όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.12.

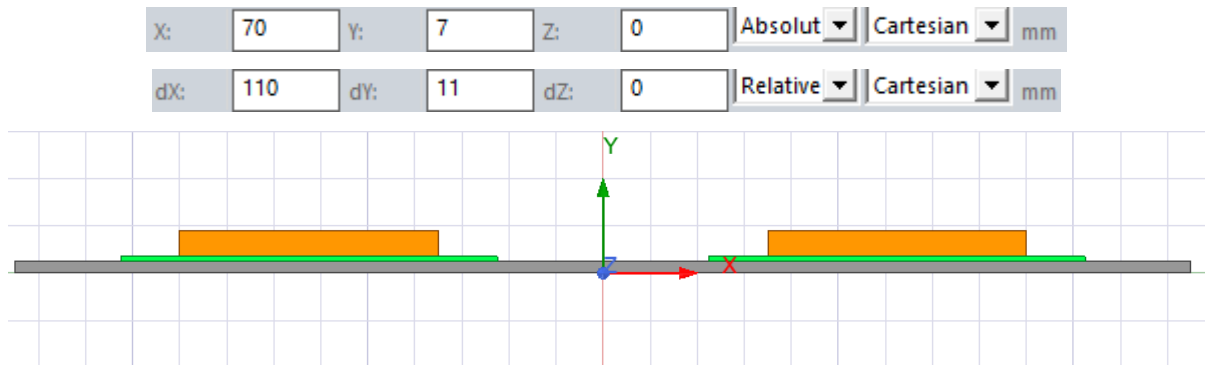


Σχήμα 6.12: Ένωση των τμημάτων του μαγνητικού υλικού.

6.2.3 Τύλιγμα Πρωτεύοντος

Τώρα θα σχεδιάσουμε πάνω από το μαγνητικό υλικό το τύλιγμα του πρωτεύοντος. Θα ακολουθήσουμε την ίδια διαδικασία με προηγουμένως (σχήμα 6.8). Όπως και το μαγνητικό υλικό έτσι και το τύλιγμα θα το φτιάξουμε σε δύο μέρη και μετά θα τα ενώσουμε.

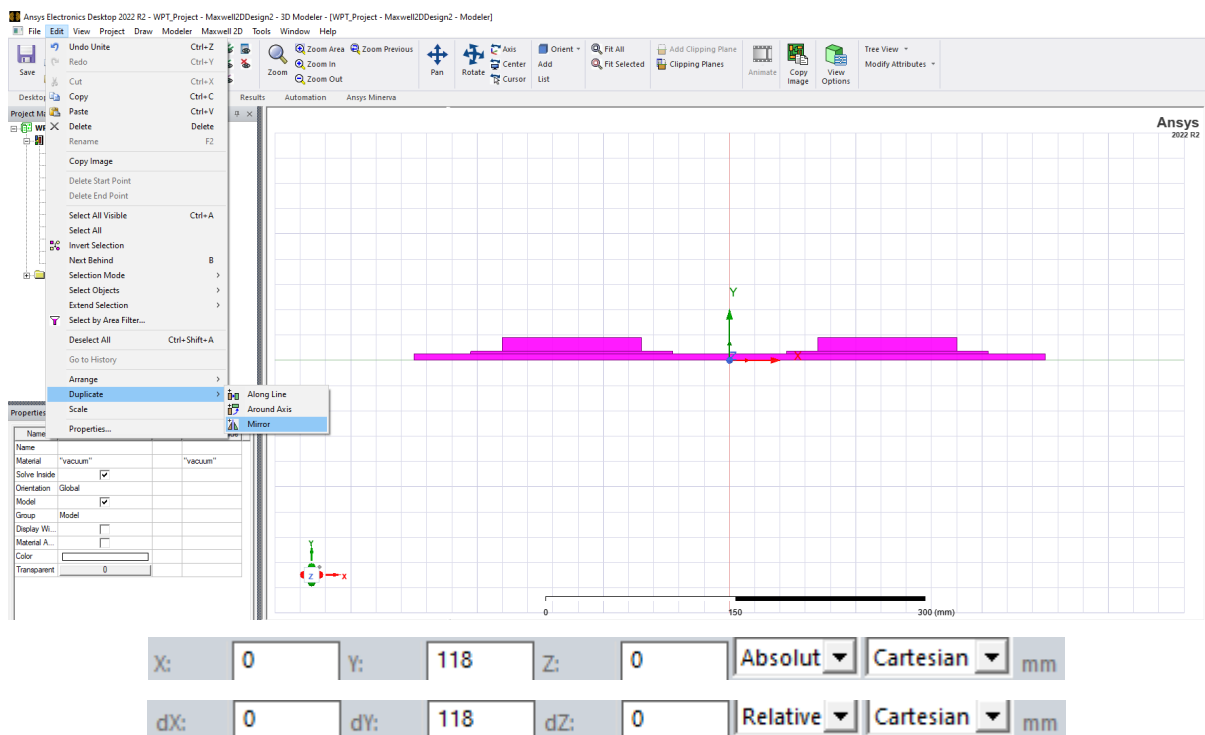


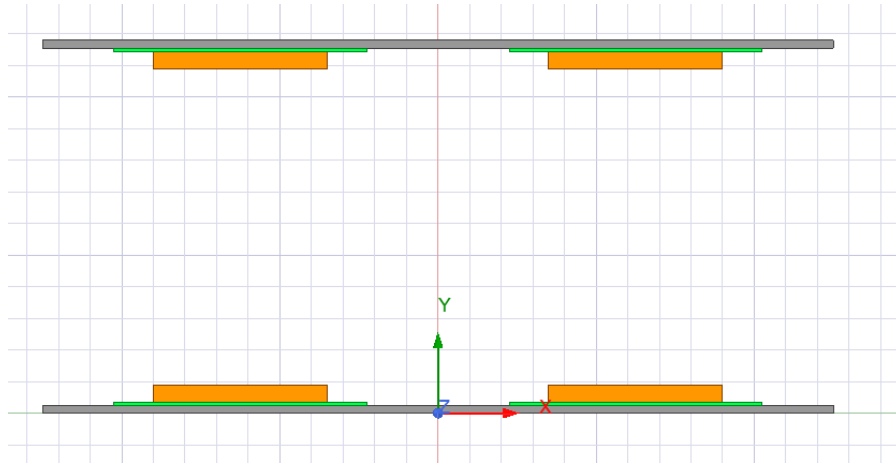


Σχήμα 6.13: Εισαγωγή πρωτεύοντος.

6.2.4 Δευτερεύον συζεύκτη

Για την δημιουργία του δευτερεύοντος θα χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο του κατοπτρισμού του πρωτεύοντος. Το διάκενο, δηλαδή η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ πρωτεύον και δευτερεύον, είναι ίση με 200mm (στον κατοπτρισμό χρησιμοποιήσαμε απόσταση 240mm αφού το ύψος του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι 20 mm). Οπότε, για να σχεδιάσουμε το δευτερεύον επιλέγουμε όλα τα μέρη του πρωτεύον και ακολουθούμε τα βήματα **Edit** → **Duplicate** → **Mirror** και εισάγουμε το αρχικό σημείο που ξεκινάει ο κατοπτρισμός και στη συνέχεια το σημείο που τερματίζει όπως φαίνεται στο σχήμα 6.14.

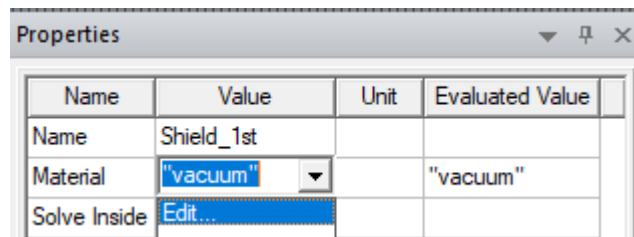




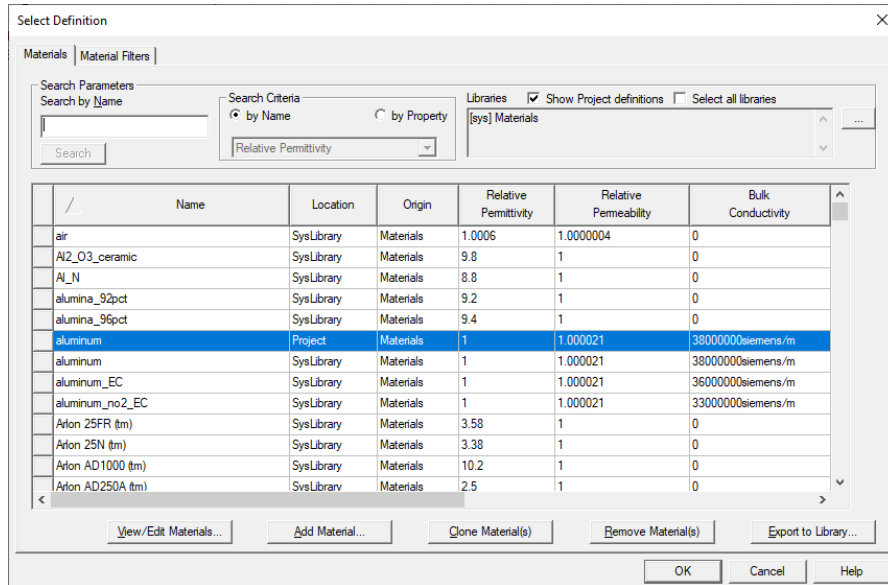
Σχήμα 6.14: Δημιουργία δευτερεύοντος με κατοπτρισμό του πρωτεύοντος.

6.3 Ορισμός Υλικών

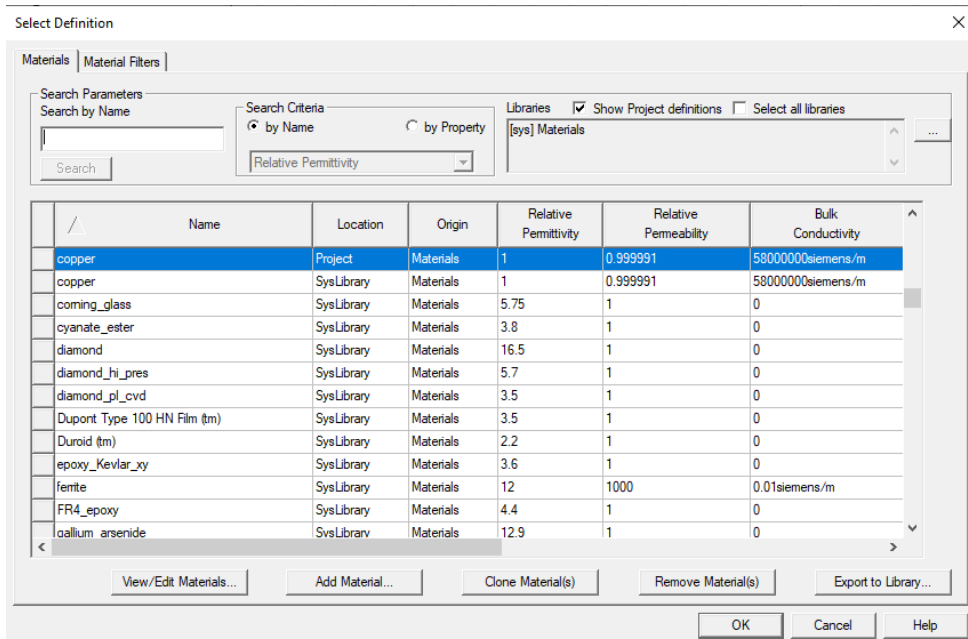
Σε αυτό το βήμα θα ορίσουμε το υλικό κάθε γεωμετρίας που σχεδιάσαμε. Για να το κάνουμε αυτό επιλέγουμε κάθε φορά την γεωμετρία που θέλουμε να ορίσουμε και πηγαίνοντας στο παράθυρο ιδιοτήτων στην επιλογή material κάνουμε κλικ στο **Edit**, και στη συνέχεια επιλέγουμε το υλικό όπως φαίνεται στο σχήμα 6.15. Οπότε, για την θωράκιση επιλέγουμε αλουμίνιο (aluminum) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.16 και με την ίδια διαδικασία για το τύλιγμα επιλέγουμε χαλκό (copper) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.17.



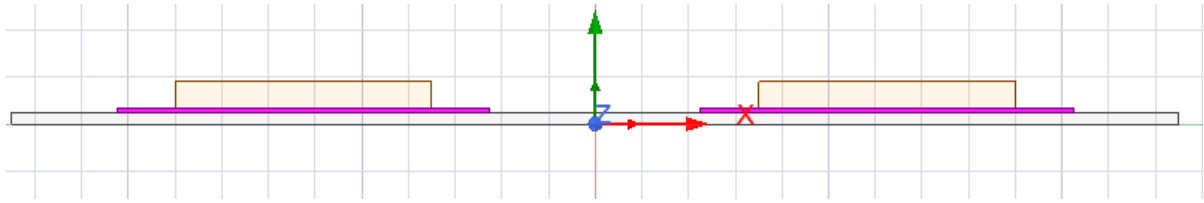
Σχήμα 6.15: Επιλογή υλικού.



Σχήμα 6.16: Επιλογή υλικού για την θωράκιση.

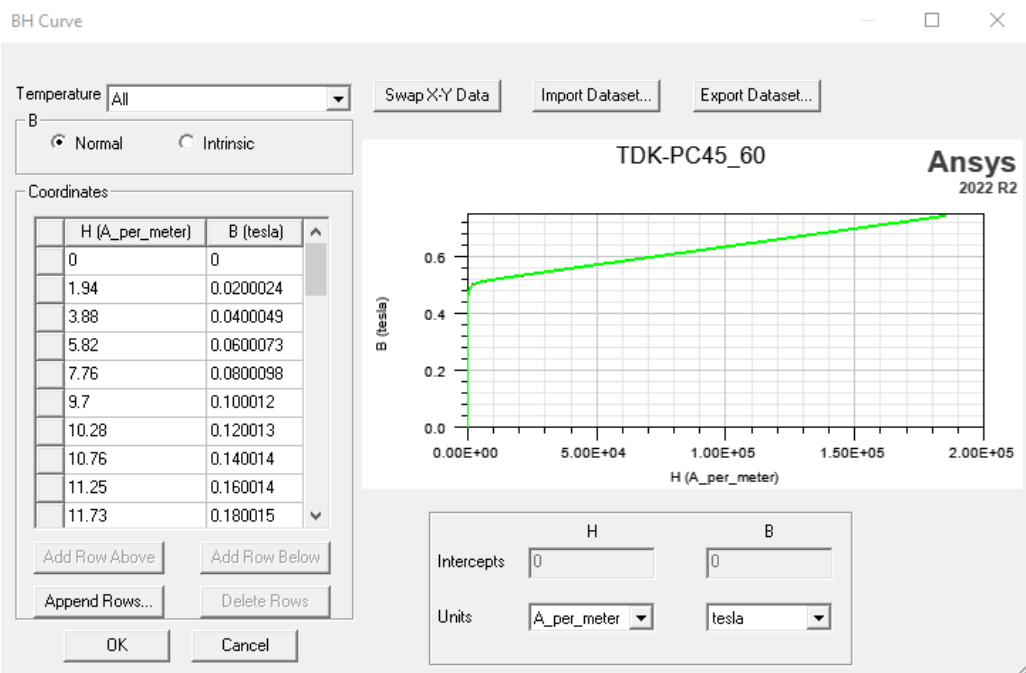
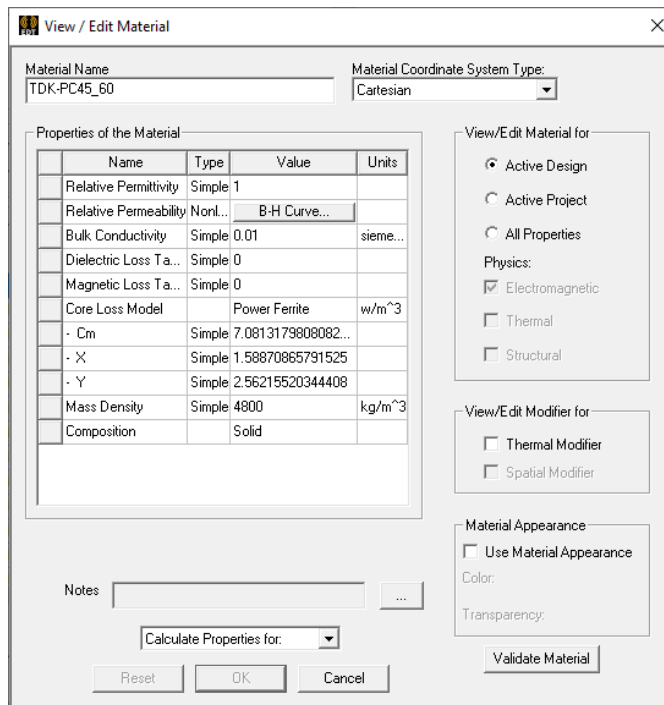


Σχήμα 6.17: Επιλογή υλικού για το τύλιγμα.

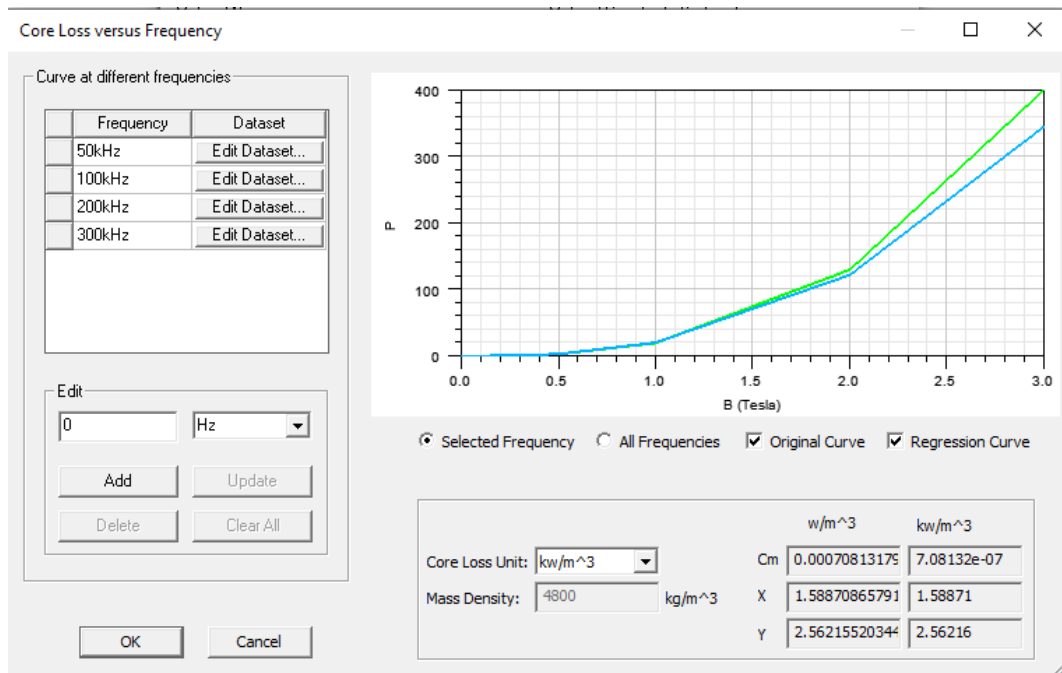


Σχήμα 6.18: Επιλογή μαγνητικού υλικού

Στη συνέχεια θα ορίσουμε τα μαγνητικά υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω. Δεν θα το κάνουμε με τον ίδιο τρόπο όπως πριν, καθώς τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε είναι μη γραμμικά και δεν περιέχονται στην βιβλιοθήκη του προγράμματος. Αρχικά, θα ορίσουμε τον φερρίτη TDK-PC45. Ακολουθούμε τα βήματα με πριν όμως αυτή την φορά δεν επιλέγουμε κάποιο υλικό αλλά κάνουμε κλικ στο **Add Material**. Μετά επιλέγουμε το όνομα του υλικού, **Relative Permittivity** βάζουμε 1, στο **Relative Permeability** επιλέγουμε τύπο **Nonlinear** και στη συνέχεια βάζουμε τις τιμές της καμπύλης B-H όπως φαίνεται στο σχήμα 6.19 και το **Bulk Conductivity** είναι 0.01. Ύστερα, ορίζουμε τις απώλειες πυρήνα του υλικού επιλέγοντας **Core Loss Model**→**Power Ferrite** και **Calculate Properties for:**→**Core Loss versus Frequency** βάζουμε τις τιμές της καμπύλης B-P από το φύλλο δεδομένων του φερρίτη TDK-PC45 για διάφορες συχνότητες όπως φαίνεται στο σχήμα 6.20. Βάζοντας όλες τις καμπύλες B-P για τις διάφορες συχνότητες το λογισμικό Ansys Maxwell υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια τους συντελεστές Cm (συντελεστής απωλειών υστέρησης), X (συντελεστής απωλειών ρεύματος στροβιλισμού) και Y (συντελεστής απωλειών υψηλής συχνότητας) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.20. Τέλος συμπληρώνουμε την πυκνότητα μάζας (Mass Density) που είναι 4800 kg/m^3 όπως φαίνεται στο σχήμα 6.19.

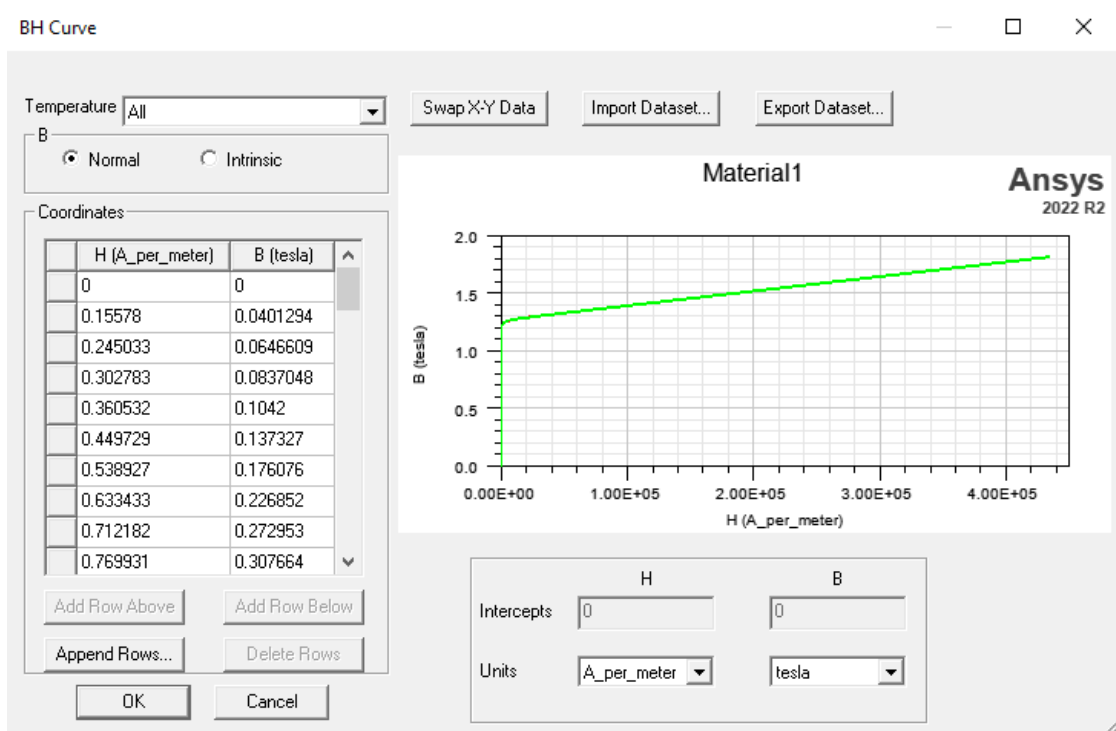
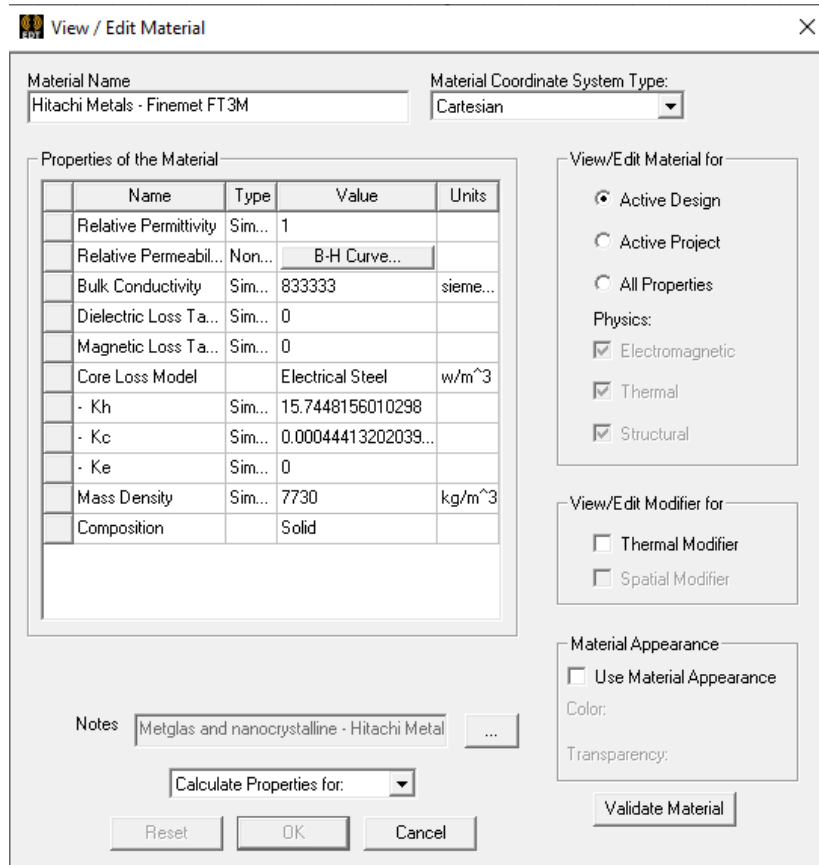


Σχήμα 6.19: Ορισμός φερρίτη TDK-PC45.

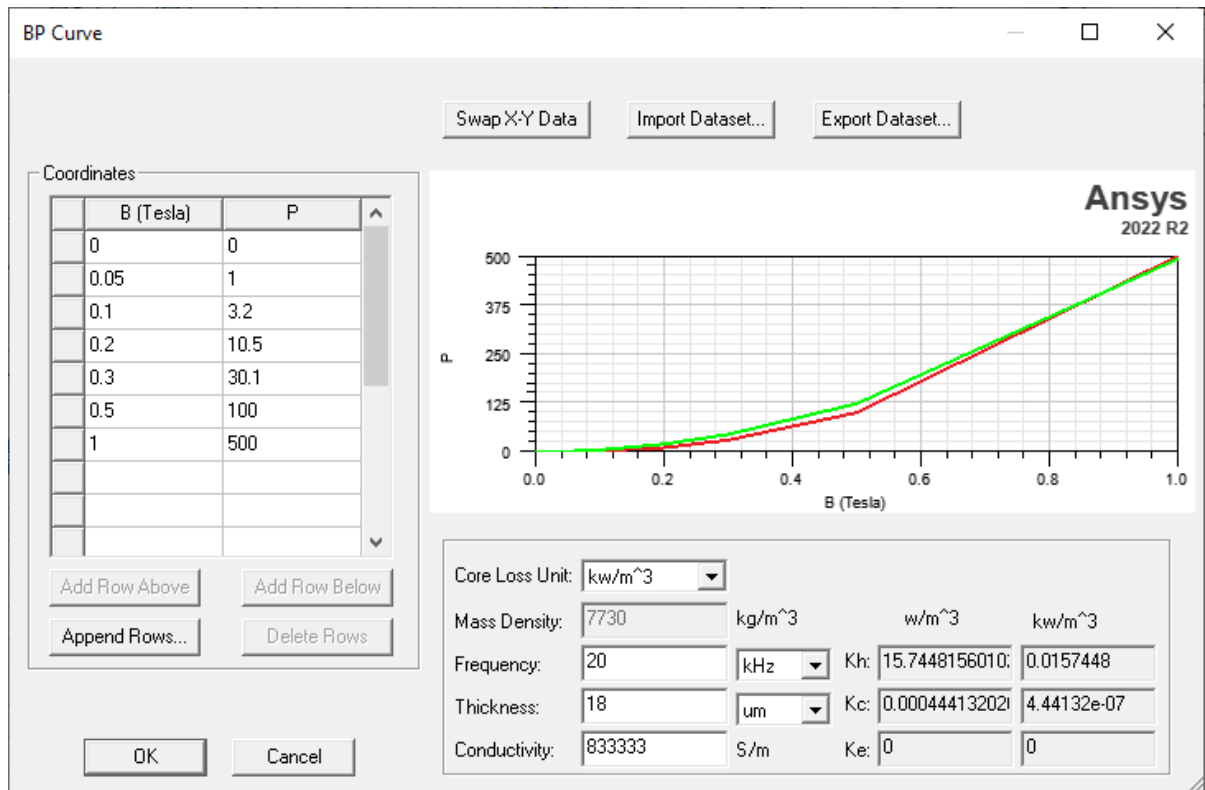


Σχήμα 6.20: Ορισμός απωλειών πυρήνα του φερρίτη TDK-PC45.

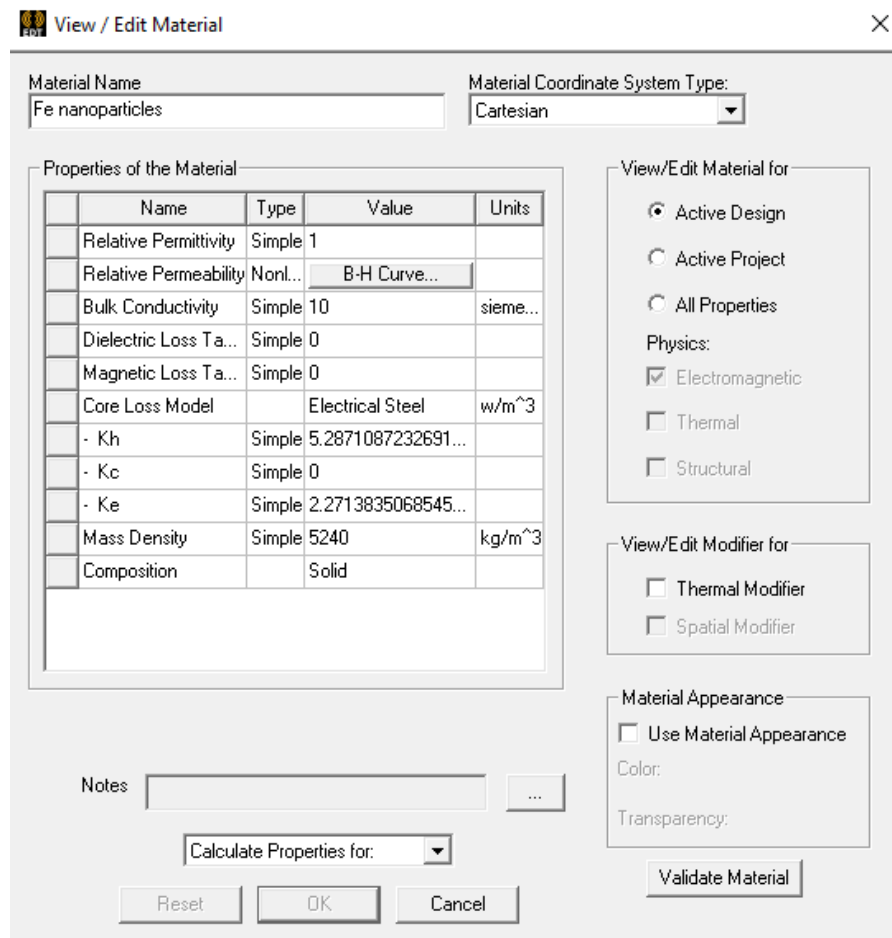
Ομοίως, θα ορίσουμε και τα άλλα υλικά όπως φαίνεται στα σχήματα 6.21 και 6.23. Η μόνη διαφορά είναι στον ορισμό των απωλειών. Αυτή τη φορά επιλέγουμε **Core Loss Model**→**Electrical Steel** και **Calculate Properties for:**→**Core Loss at One Frequency** και βάζουμε τις τιμές της καμπύλης B-P για 20 kHz που έχουμε από το φύλλο δεδομένων του Finemet FT3M [33]. Έτσι το πρόγραμμα με βάση αυτή τη καμπύλη υπολογίζει τους συντελεστές K_h (συντελεστής απωλειών υστέρησης), K_c (συντελεστής απωλειών πυρήνα) και K_e (συντελεστής απωλειών ρεύματος στροβιλισμού) όπως φαίνεται στο σχήμα 6.22. Με τον ίδιο τρόπο ορίζουμε και τις απώλειες των νανοσωματιδίων σιδήρου, αλλά αυτή τη φορά τοποθετούμε τις δύο καμπύλες που έχουμε [37] με **Calculate Properties for:**→**Core Loss versus Frequency** όπως φαίνεται στο σχήμα 6.24.

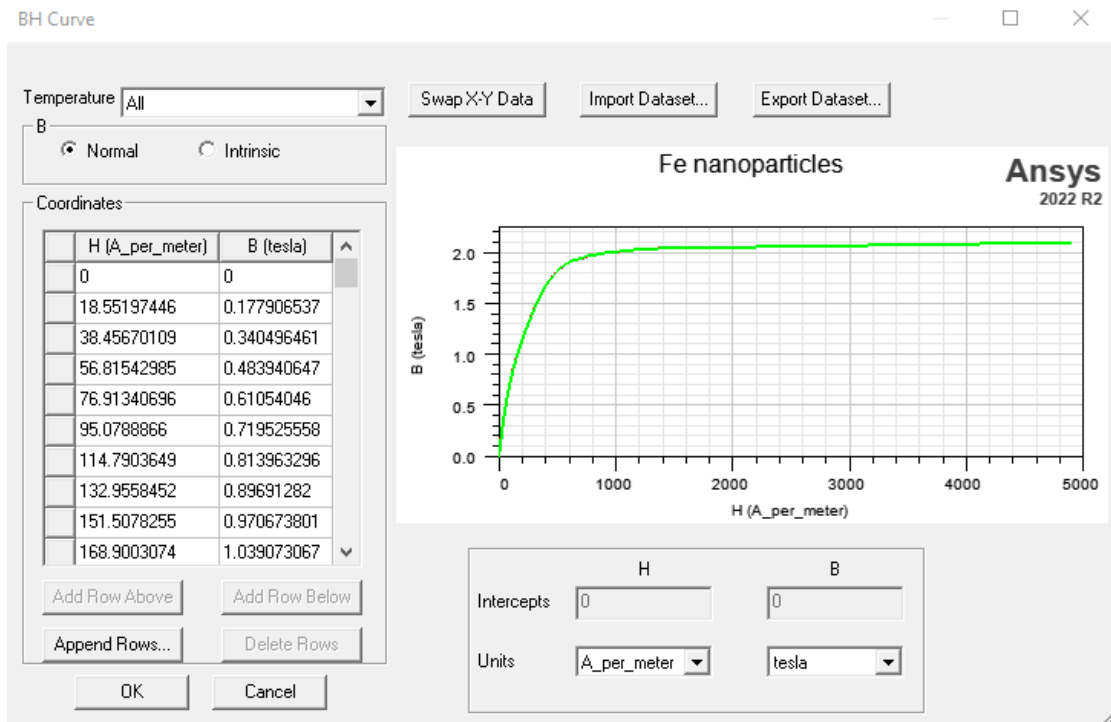


Σχήμα 6.21: Ορισμός Finemet FT3M.

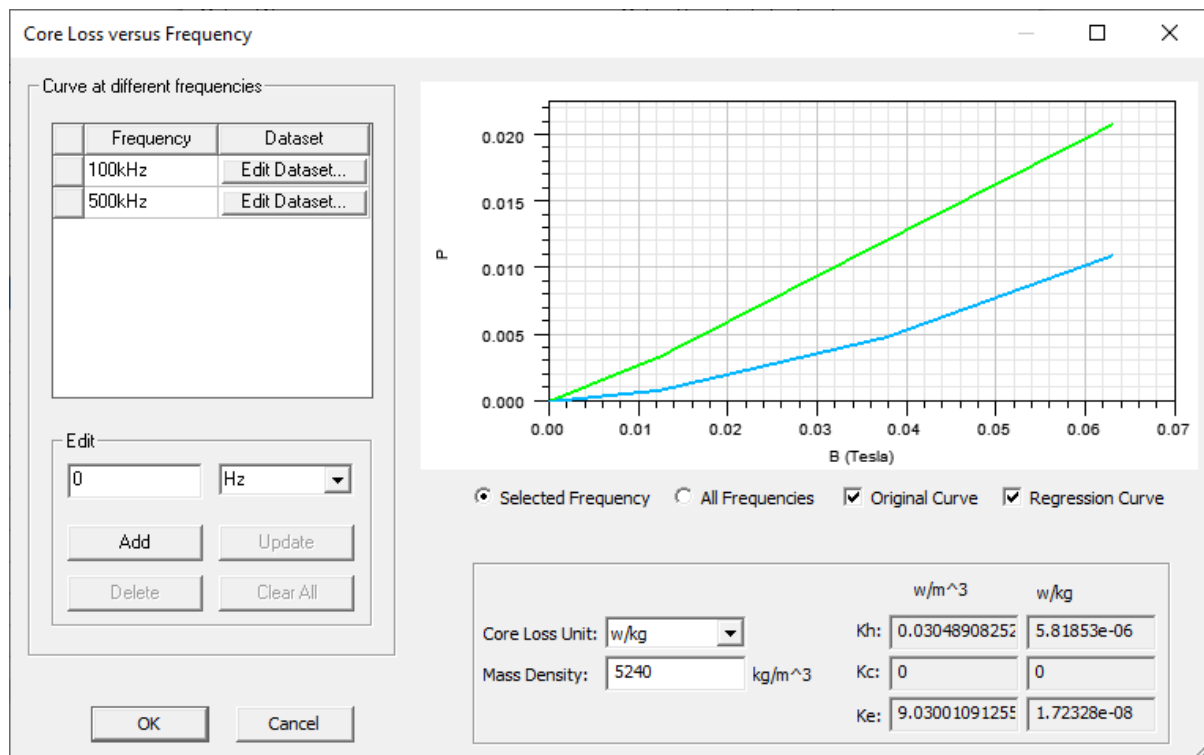


Σχήμα 6.22: Ορισμός απολειών πυρήνα του Finemet FT3M.





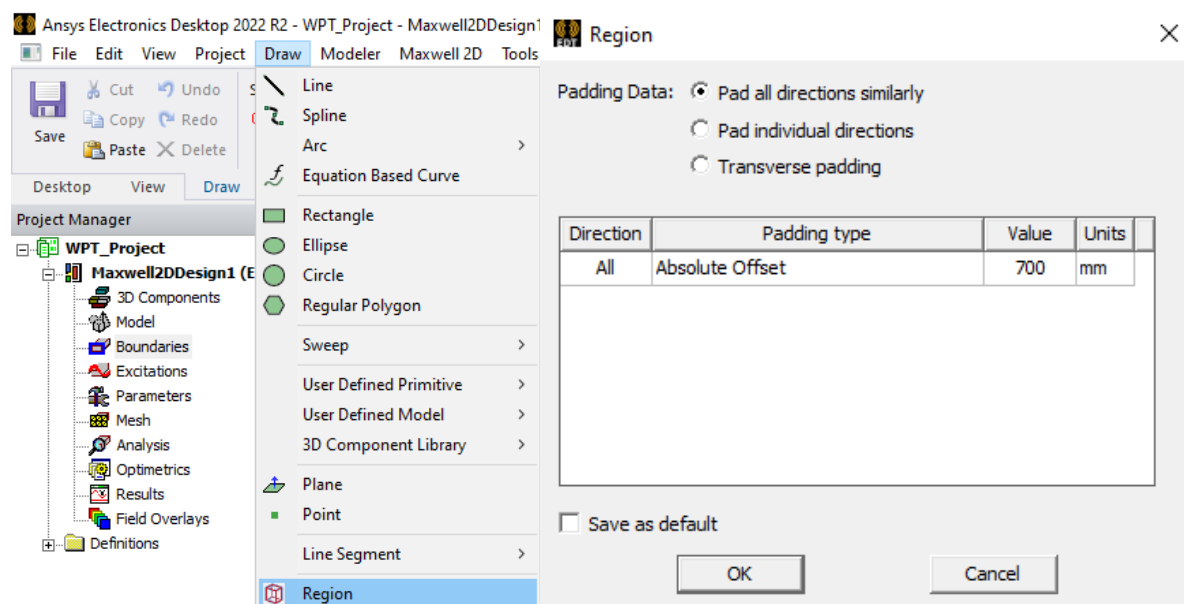
Σχήμα 6.23: Ορισμός νανοσωματιδίων σιδήρου.



Σχήμα 6.24: Ορισμός απωλειών πυρήνα των νανοσωματιδίων σιδήρου.

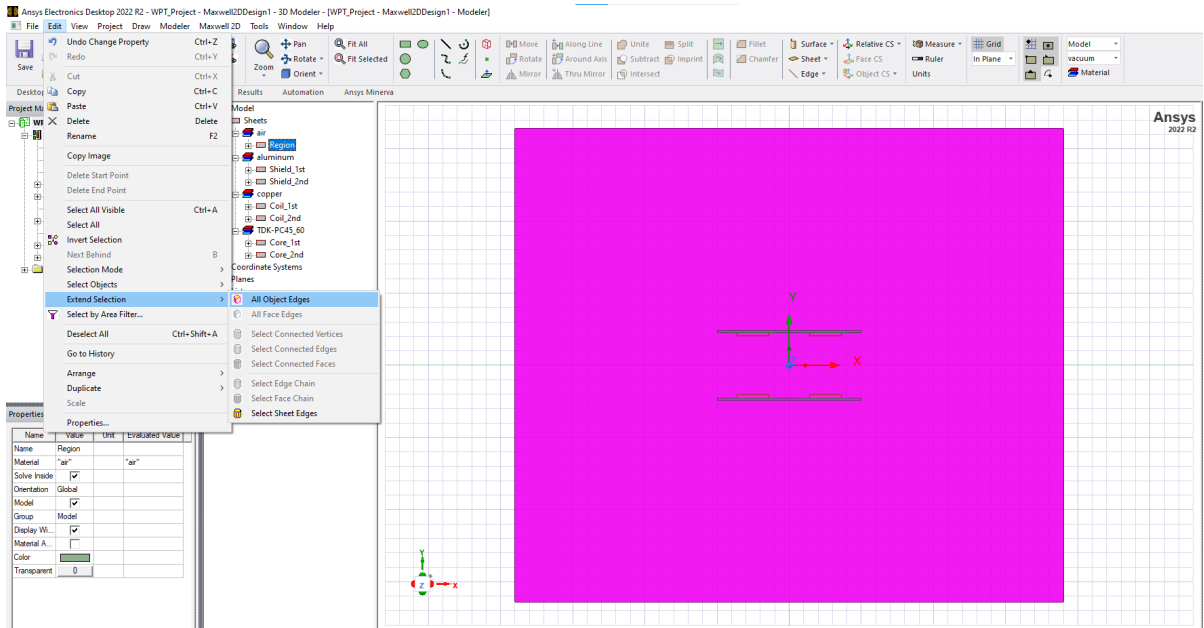
6.4 Ορισμός οριακών συνθηκών

Για την μαγνητοστατική ανάλυση που θα γίνει θα πρέπει να ορίσουμε τις οριακές συνθήκες της διάταξης. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα έχουμε την επιλογή **Region**, όπου δημιουργείται μία περιοχή μέσα στην οποία θα γίνει η ανάλυσή μας. Έτσι, το πρόγραμμα ορίζει αυτόματα τις απαραίτητες οριακές συνθήκες. Για τον σχεδιασμό αυτής της περιοχής ακολουθούμε τα βήματα **Draw** → **Region** και στη συνέχεια επιλέγουμε **Padding type** → **Absolute Offset** και βάζουμε την τιμή 700 mm όπως φαίνεται στο σχήμα 6.25. Η περιοχή που ορίσαμε δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη θα καθυστερεί πολύ τον χρόνο της προσομοίωσης, αλλά ούτε και πολύ μικρή γιατί μειώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τέλος, απομένει να οριστεί το υλικό της περιοχής, που είναι ο αέρας. Αυτό πραγματοποιείται όπως ορίσαμε και προηγουμένως τα υπόλοιπα υλικά, δηλαδή με τα βήματα **Material** → **Edit** → **Air**.

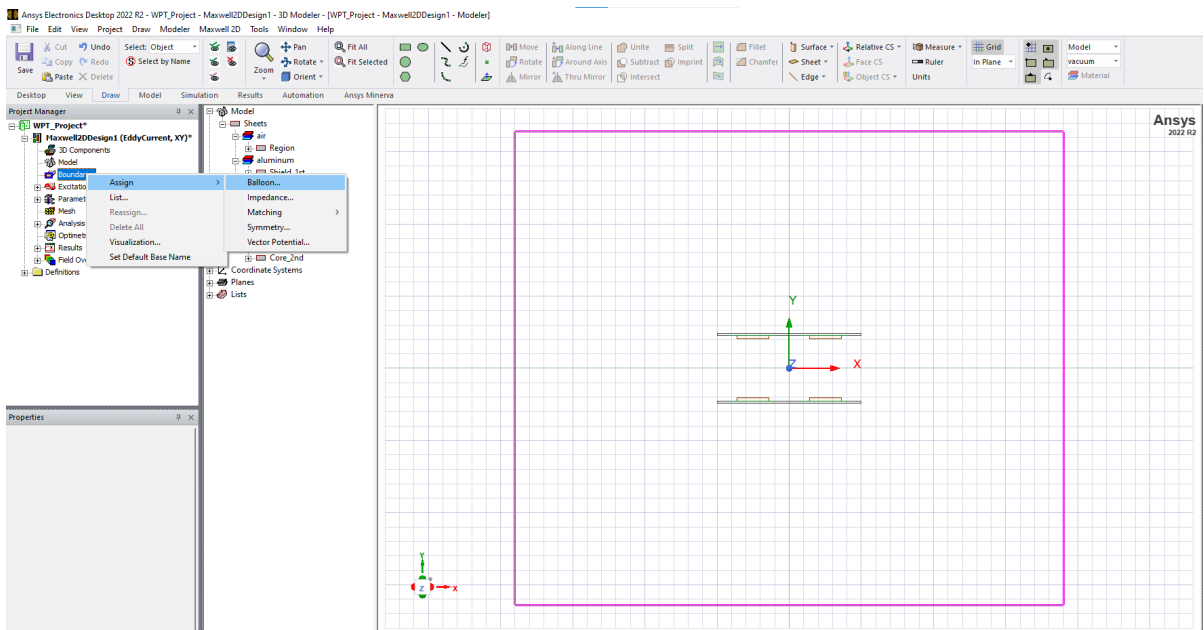


Σχήμα 6.25: Σχεδιασμός περιοχής (Region).

Για να έχουμε ακριβή ελέγχους της γεωμετρίας για τους υπολογισμούς μας θα ορίσουμε τα όρια **Balloon**. Για να το κάνουμε αυτό πρέπει να επιλέξουμε την περιοχή που ορίσαμε πριν και πατήσουμε **Edit** → **Extend Selection** → **All Object Edges** (Σχήμα 6.26). Στην συνέχεια επιλέγουμε από το Project Manager με δεξί κλικ το **Boundaries** → **Assign** → **Balloon** και στη συνέχεια πατάμε ok, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.27.



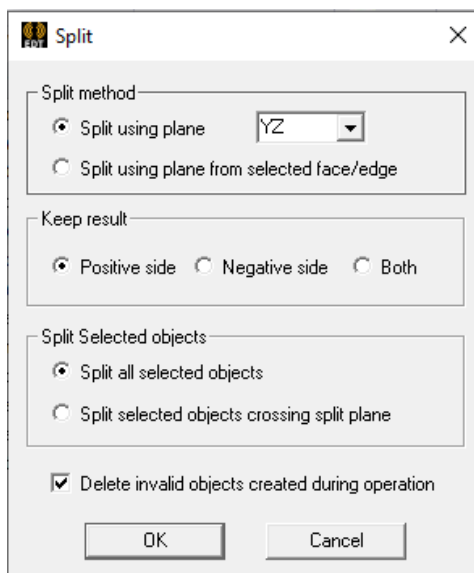
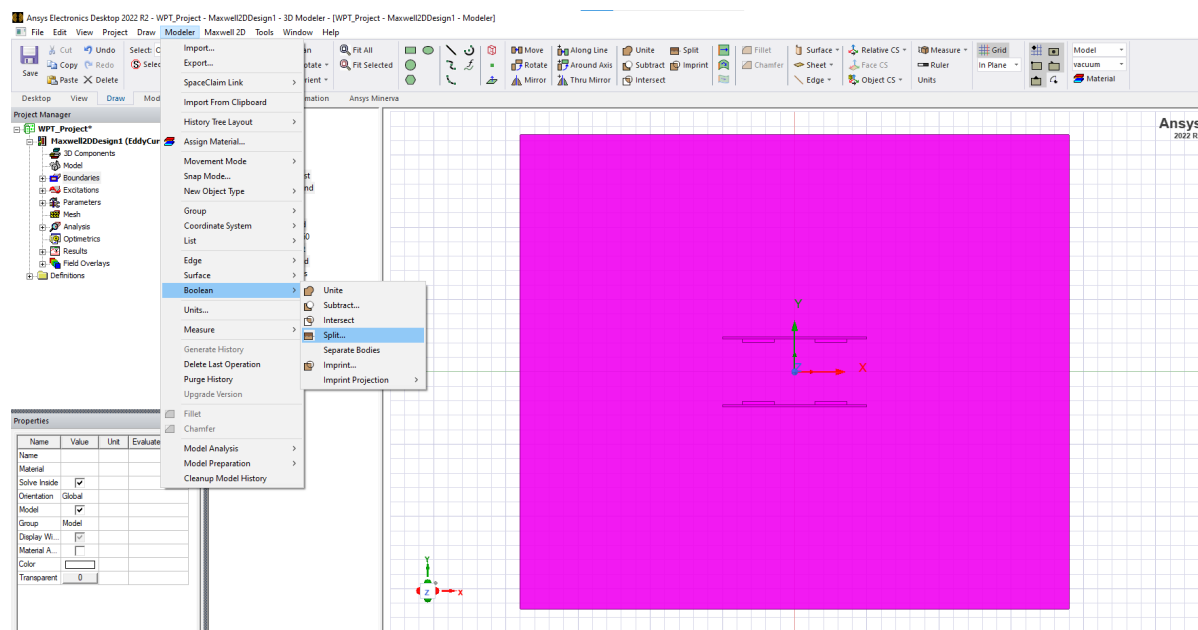
Σχήμα 6.26: Επιλογή των άκρων της περιοχής.



Σχήμα 6.27: Καθορισμός ορίων Balloon.

6.5 Ορισμός παραμέτρων της ανάλυσης

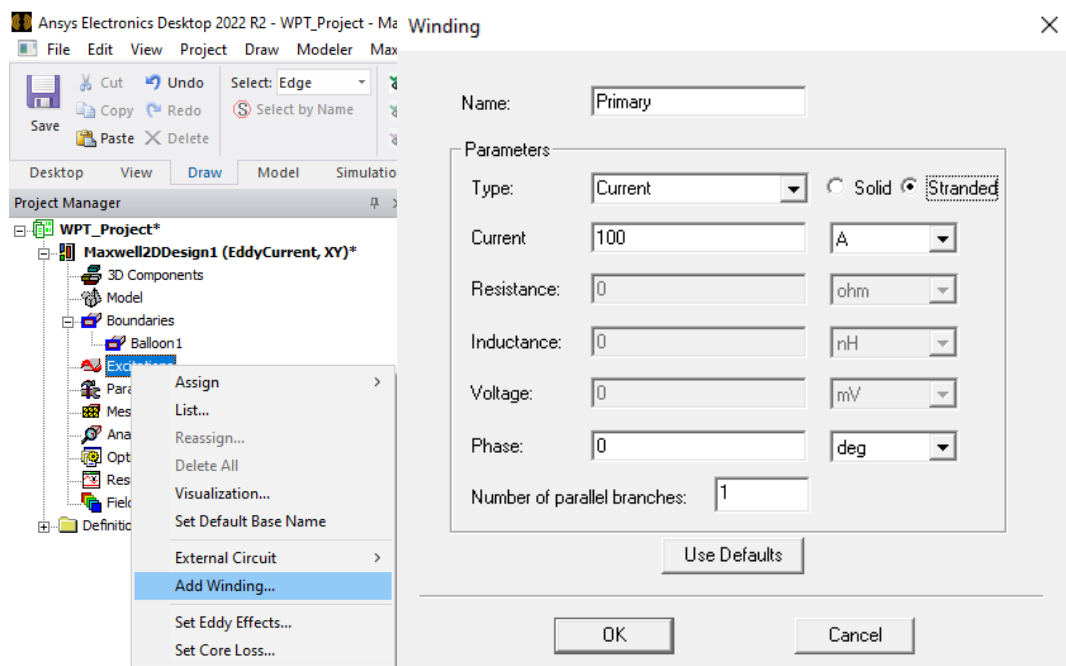
Αρχικά, θα χωρίσουμε την διάταξη στη μέση αφού είναι συμμετρική ώστε να «τρέχει» πιο γρήγορα η προσομοίωση. Για να το επιτύχουμε αυτό επιλέγουμε όλα τα μέρη της προσομοίωσης και πατάμε **Modeler** → **Boolean** → **Split** και ύστερα επιλέγουμε τον άξονα συμμετρίας για να γίνει ο διαχωρισμός, δηλαδή ως προς YZ όπως φαίνεται στο σχήμα 6.26.



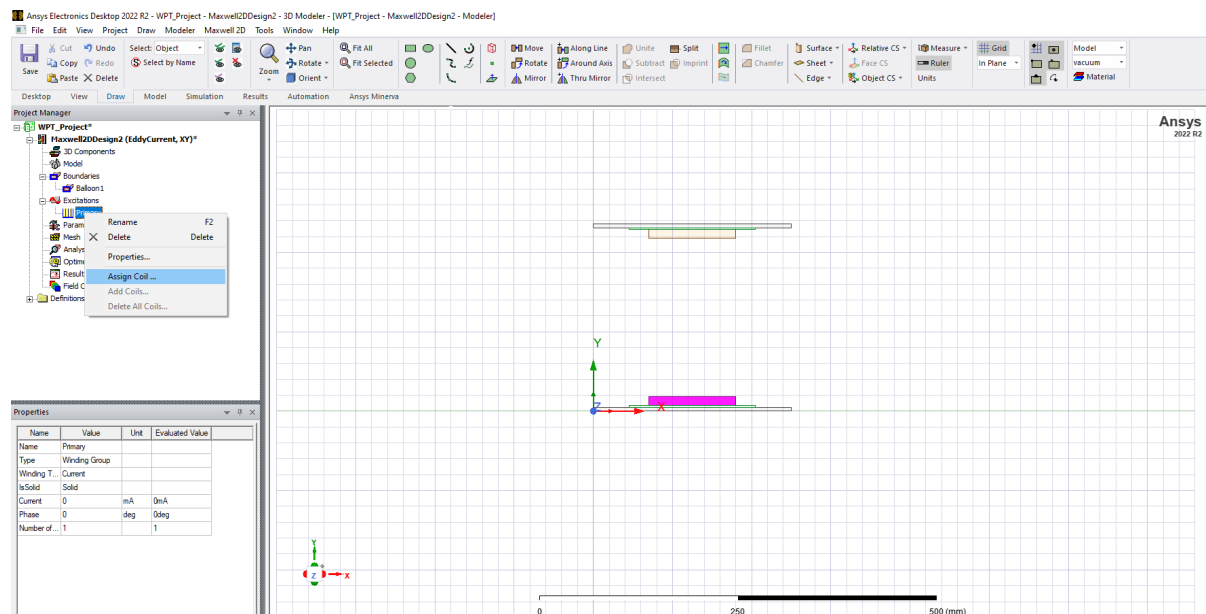
Σχήμα 6.26: Συμμετρικός διαχωρισμός της διάταξης.

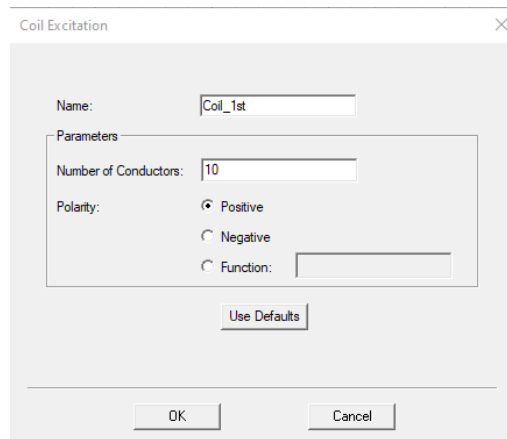
Για να προχωρήσουμε στην ανάλυση της διάταξης θα πρέπει να ορίσουμε το ρεύμα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τύλιγμα. Επειδή έχουμε δημιουργήσει δισδιάστατη προσομοίωση μπορούμε να προχωρήσουμε κατευθείαν στον ορισμό των ρευμάτων χωρίς να

κάνουμε οποιαδήποτε διατομή στο πηνίο. Επομένως, επιλέγουμε από το Project Manager με δεξί κλικ το **Excitation** → **Add Winding** και βάζουμε 100 A για το πρωτεύον τύλιγμα (σχήμα 6.27). Επίσης, επιλέγουμε τύπο Stranded αφού περισσότερα από ένα ελίγματα αποτελούν τον αγωγό. Στη συνέχεια, επιλέγοντας το πρωτεύον πηνίο, με δεξί κλικ στο Winding (Primary) που ορίσαμε πατάμε Assign Coil και καθορίζουμε τα ελίγματα του πηνίου όπως φαίνεται στο σχήμα 6.28. Οπότε, έχουμε ορίσει την τιμή που επιθυμούμε η οποία είναι ελίγματα*ρεύμα καθενός = $10 \cdot 100 = 1000$ A. Με τον ίδιο τρόπο ορίζουμε και το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα, η μόνη διαφορά είναι ότι βάζουμε διαφορά φάσης 90° όπως φαίνεται στο σχήμα 6.29.

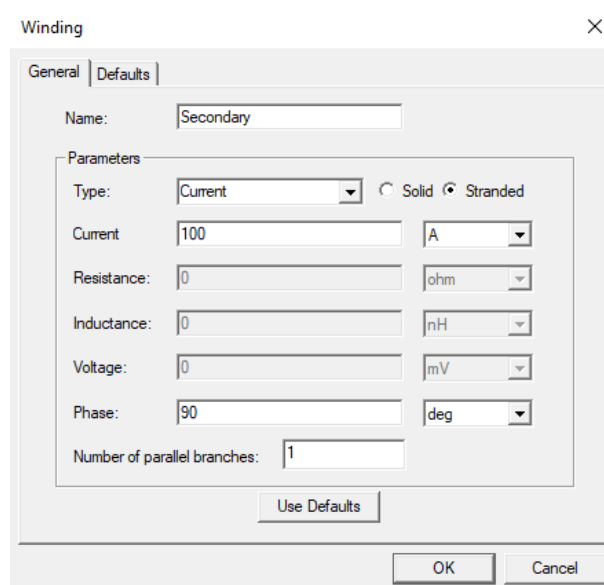


Σχήμα 6.27: Ορισμός ρεύματος πρωτεύοντος



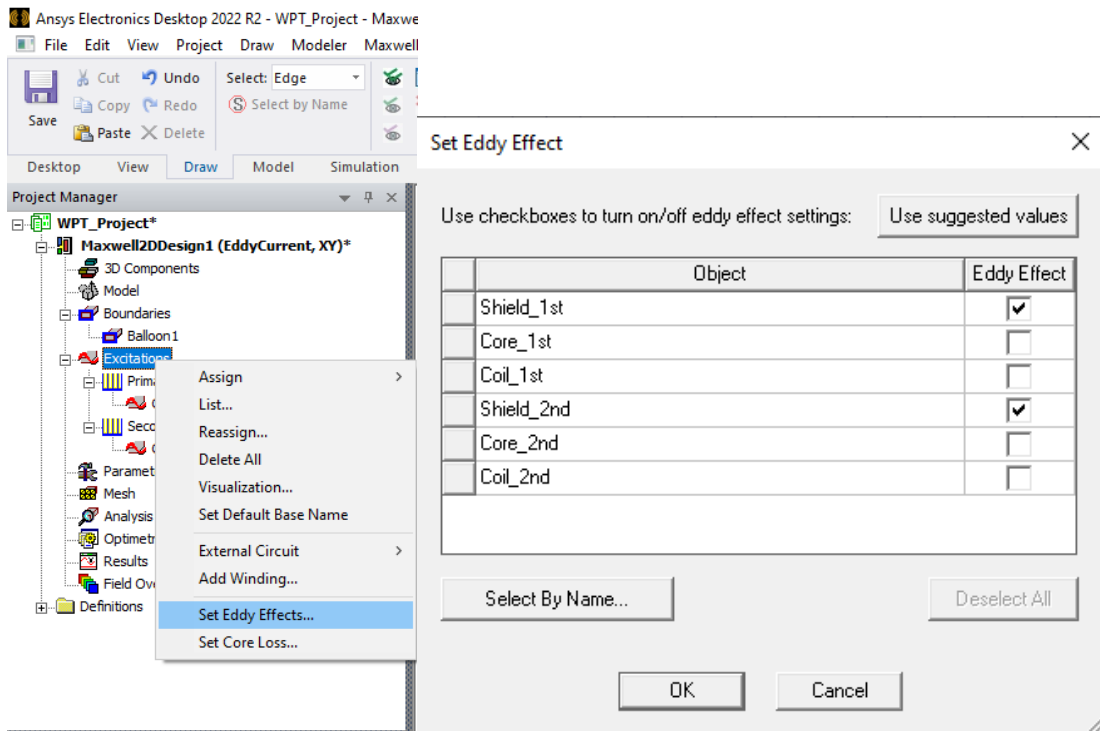


Σχήμα 6.28: Ορισμός ελιγμάτων πρωτεύοντος.



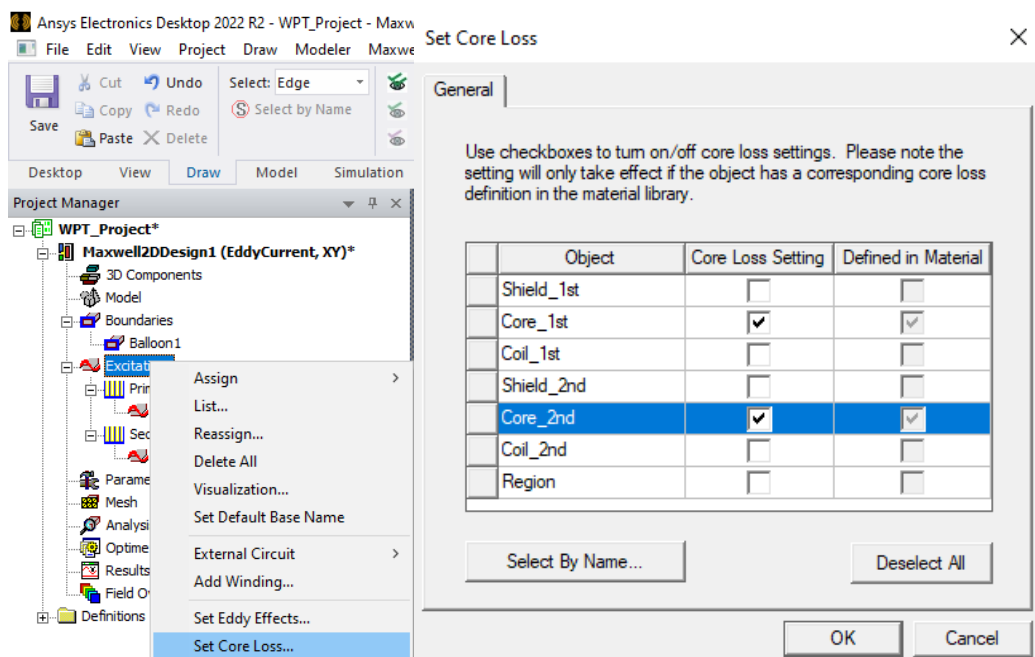
Σχήμα 6.29: Ορισμός ρεύματος δευτερεύοντος.

Αφού έχουμε ορίσει και στο πρωτεύον και στο δευτερεύον τα ρεύματα θα πρέπει να ορίσουμε και τις απώλειές τους, δηλαδή τις απώλειες στροβιλισμών και τις απώλειες πυρήνα. Οι απώλειες στροβιλισμών προκαλούνται από τις τροχιές των ηλεκτρομαγνητικών ρευμάτων σε αγωγούς ή μαγνητικά υλικά κατά τη διέλευση μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, στην περίπτωση μας απώλειες στροβιλισμού έχουμε μόνο στην θωράκιση αλουμινίου. Άρα, για να ορίσουμε αυτές τις απώλειες επιλέγουμε από το Project Manager με δεξί κλικ το **Excitation** → **Set Eddy Effects** και στη συνέχεια επιλέγουμε μόνο τις δύο θωρακίσεις και πατάμε ok, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.30.



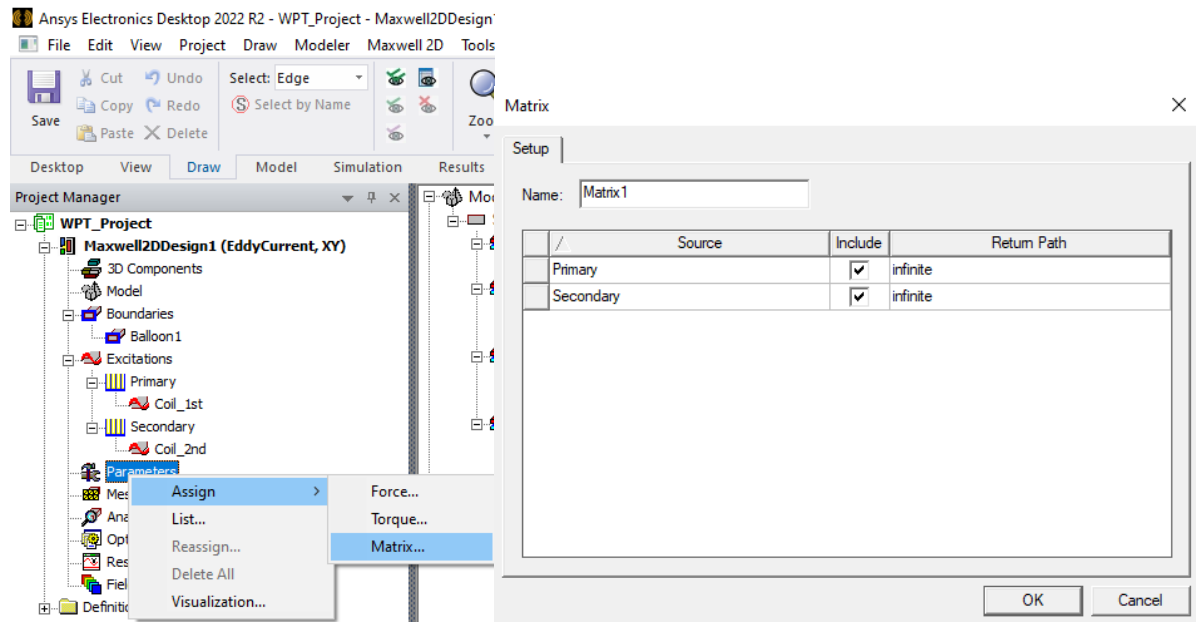
Σχήμα 6.30: Ορισμός απωλειών στροβιλισμών.

Οι απώλειες πυρήνα προκαλούνται σε έναν μαγνητικό πυρήνα κατά τη διέλευση του μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού ρεύματος. Οπότε, απώλειες πυρήνα θα έχουμε μόνο στο μαγνητικό υλικό της διάταξης. Για να ορίσουμε τις απώλειες πυρήνα επιλέγουμε από το Project Manager με δεξί κλικ το **Excitation** → **Set Core Loss** και στη συνέχεια επιλέγουμε μόνο τους δύο πυρήνες και πατάμε ok, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.31.



Σχήμα 6.31: Ορισμός απωλειών πυρήνα.

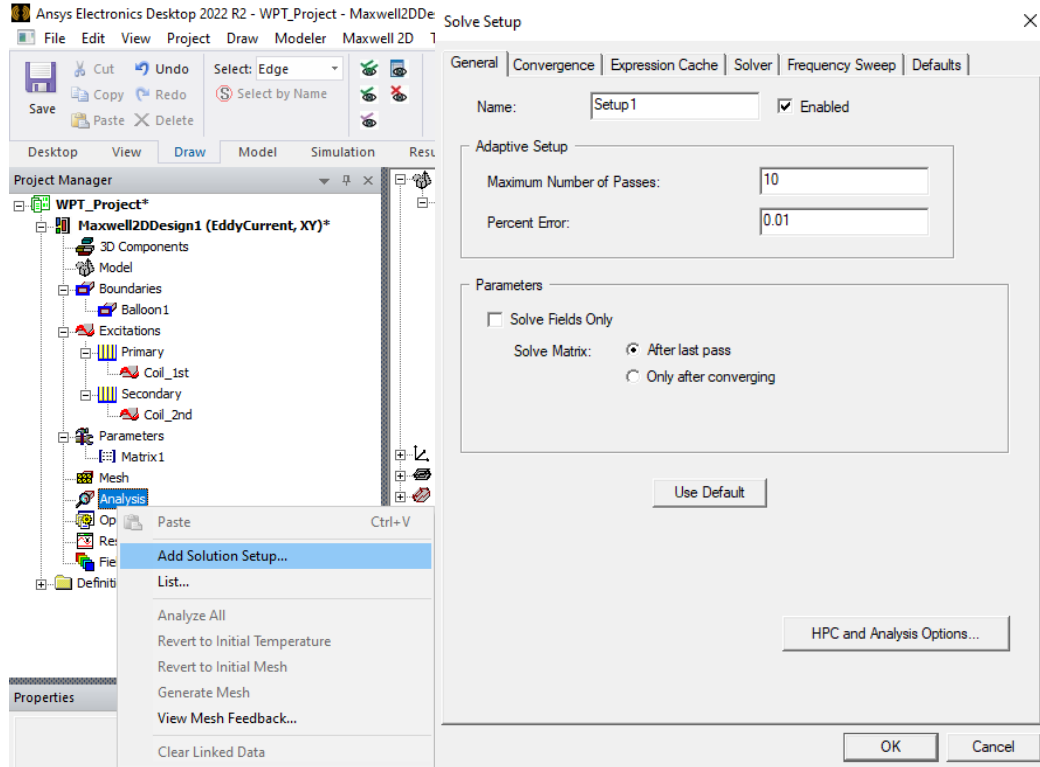
Έχοντας κάνει όλα τα παραπάνω, το μόνο που απομένει είναι να καθοριστούν οι τελικές παράμετροι της ανάλυσης. Άρα για να ορίσουμε τις αυτεπαγωγές πατάμε δεξί κλικ στο **Parameters** → **Assign** → **Matrix**, και στο παράθυρο που ανοίγει επιλέγουμε και τα δύο ρεύματα και μετά πατάμε οκ όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.32.



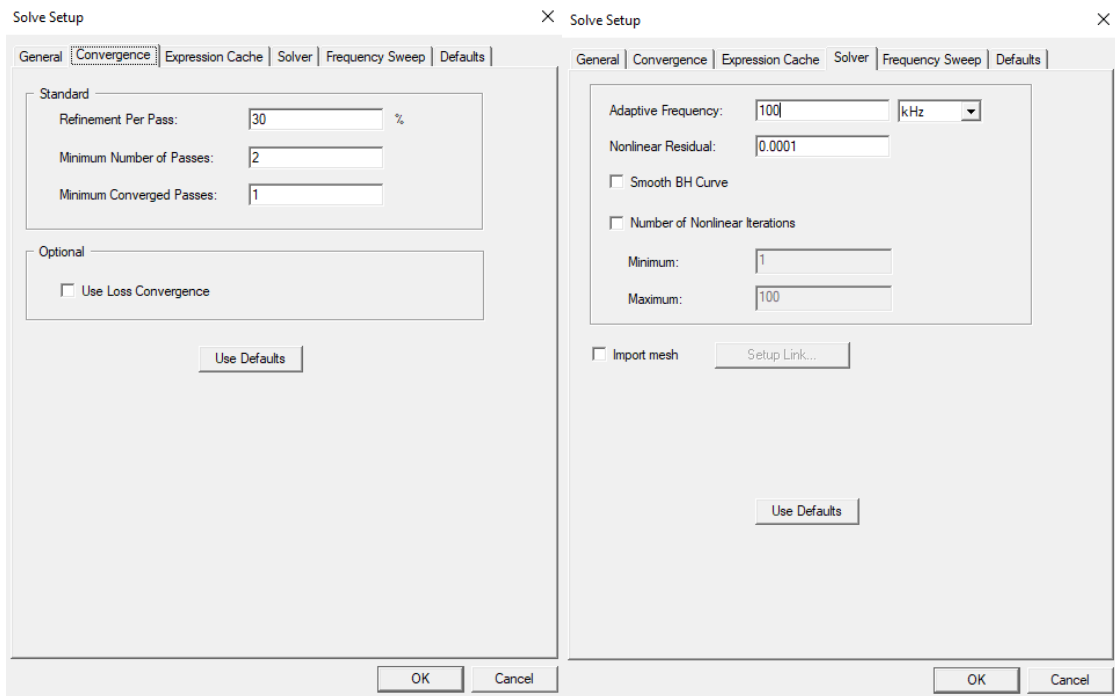
Σχήμα 6.32: Ορισμός πηνίων.

Ύστερα θα πρέπει να εισάγουμε τις επιλογές που αφορούν την εκτέλεση του προβλήματος και τις παραμέτρους της λύσης. Για να το υλοποιήσουμε επιλέγουμε από το Project Manager με δεξί κλικ το **Analysis** → **Add Solution Setup** και ανοίγει το παράθυρο που βλέπουμε στο σχήμα 6.33. Στο παράθυρο που αναδύεται επιλέγουμε **Maximum Number of Passes** 10 και **Percent Error** 0.01. Το λογισμικό ANSYS Maxwell υπολογίζει προσεγγιστική λύση και όχι ακριβή. Ο συντελεστής **Percent Error** δείχνει την σύγκλιση που θέλουμε να πετύχουμε, σε ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των λύσεων των τελευταίων επαναλήψεων. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε τόσο μικρή τιμή ώστε να έχουμε πολύ μεγάλη ακρίβεια. Επίσης, υλοποιήσαμε την προσομοίωση σε δύο διαστάσεις για να έχουμε μικρό χρόνο προσομοίωσης και μεγάλη ακρίβεια. Στην επόμενη καρτέλα **Convergence** δεν κάνουμε κάποια αλλαγή και αφήνουμε τις τιμές που έχει όπως φαίνεται στο σχήμα 6.34. Στην καρτέλα **Solver** αλλάζουμε την συχνότητα (σχήμα 6.34) και βάζουμε 100 kHz που είναι η συχνότητα που θέλουμε να υλοποιήσουμε την προσομοίωση. Τέλος, στην καρτέλα **Frequency Sweep** θα ορίσουμε το διάστημα συχνοτήτων που θέλουμε να γίνει η προσομοίωση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.35, επιλέγοντας το **add above** εμφανίζεται το γραμμικό βήμα που θα

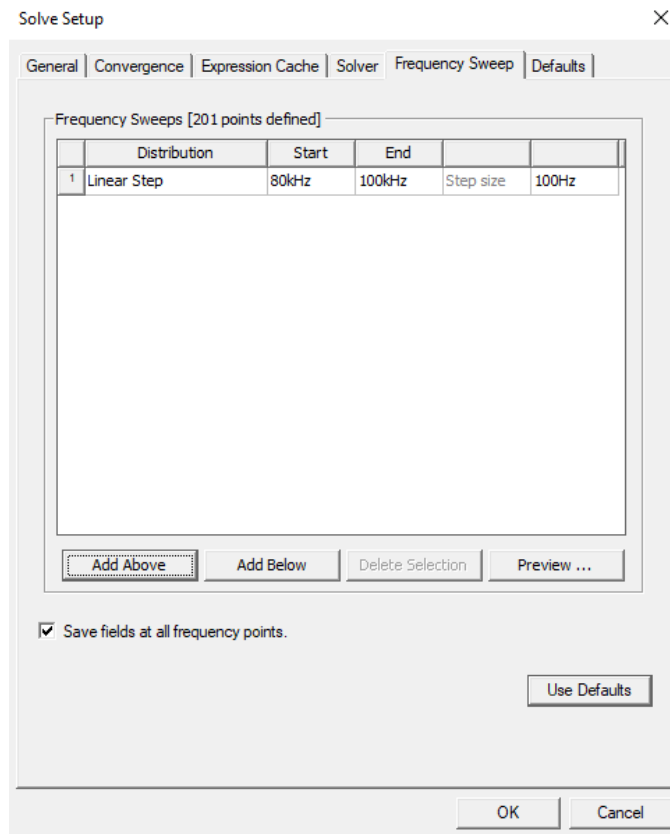
ακολουθήσει η προσομοίωση και επιλέγουμε να αρχίσει από τα 80 kHz μέχρι τα 100 kHz με βήμα 100 Hz.



Σχήμα 6.33: Παραμετροποίηση της λύσης.



Σχήμα 6.34: Παραμετροποίηση της λύσης.

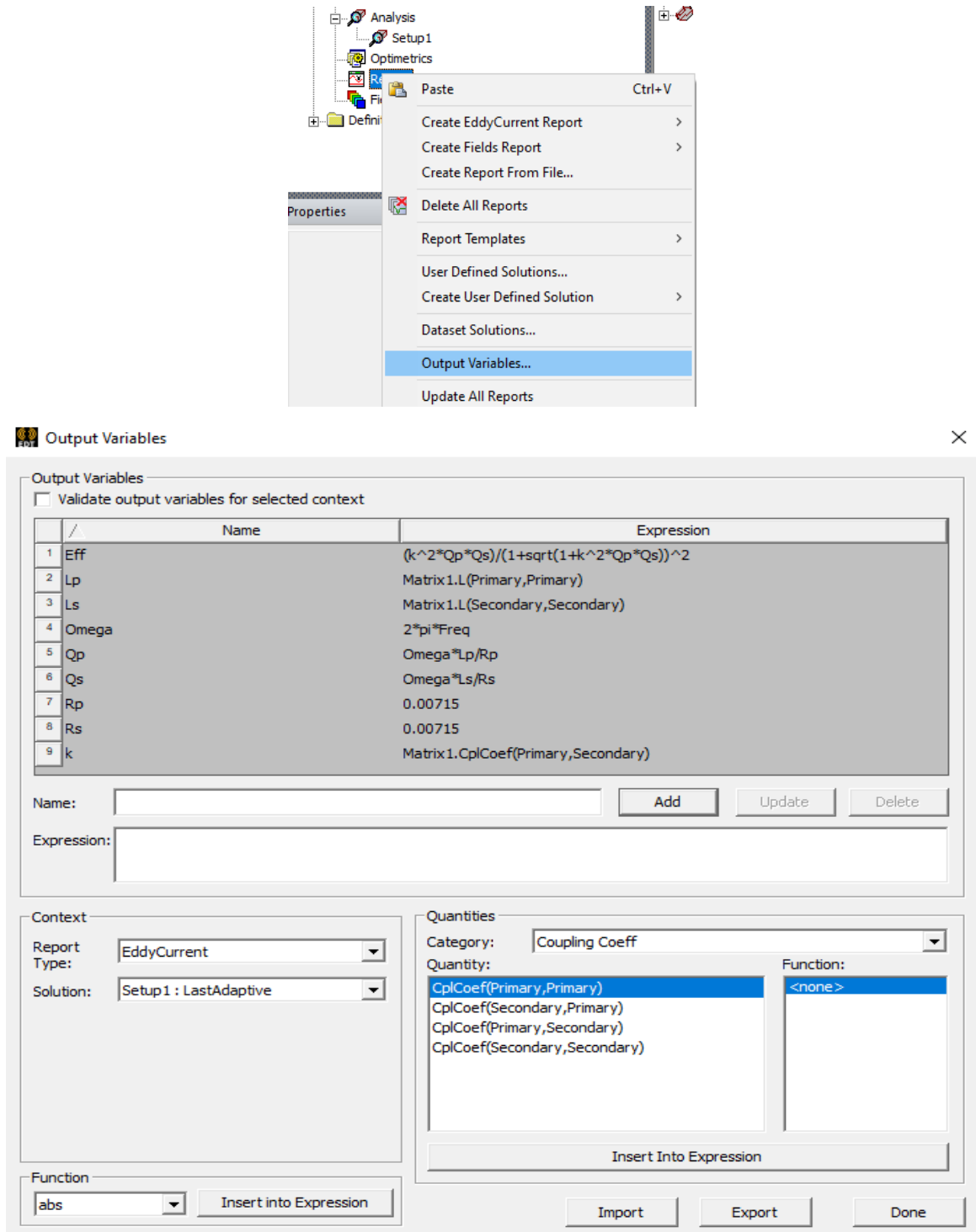


Σχήμα 6.35: Παραμετροποίηση της λύσης.

6.6 Επεξεργασία, απεικόνιση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων

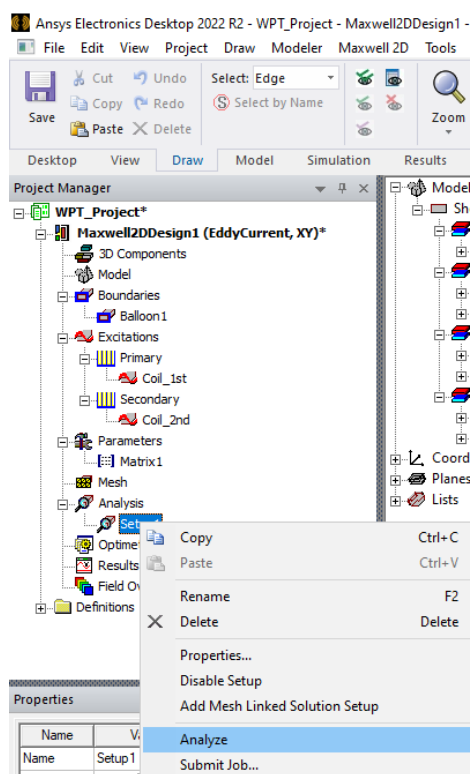
Η σύγκριση που θα πραγματοποιήσουμε μεταξύ των μαγνητικών υλικών θα γίνει ως προς απόδοση της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας και ως προς τις απώλειες πυρήνα. Το πρόγραμμα δεν μας δίνει την τιμή της αποτελεσματικότητας οπότε θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση 9 για να τη βρούμε. Θα φτιάξουμε την σχέση ως μεταβλητή εξόδου και θα την εισάγουμε στο πρόγραμμα. Για να το κάνουμε αυτό επιλέγουμε από το Project Manager με δεξί κλικ το **Results** → **Output Variables** και ανοίγει το παράθυρο που βλέπουμε στο σχήμα 6.36. Για να προσθέσουμε κάποια που δεν υπάρχει στο πρόγραμμα συμπληρώνουμε το όνομά της (name), γράφουμε τον τύπο της (expression) και πατάμε add. Αν ο τύπος της μεταβλητής υπάρχει στο πρόγραμμα τότε βρίσκουμε την κατηγορία του (category) και πατώντας κλικ μεταφέρεται στο expression και κάνοντας κλικ στο add το προσθέτουμε. Από την προσομοίωση παίρνουμε τις τιμές της αυτεπαγωγής πρωτεύοντος και δευτερεύοντος καθώς και τον συντελεστή σύζευξης k . Στη συνέχεια ορίζουμε το ω με τον τύπο του, στην ωμική αντίσταση των πηνίων βάζουμε την τιμή $7.15 \text{ m}\Omega$ και τους o συντελεστές ποιότητας του

πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου συναρτήσει των αυτεπαγωγών και των ωμικών αντιστάσεων τους. Επομένως, στη συνέχεια μπορούμε να ορίσουμε τον τύπο της αποτελεσματικότητας της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.



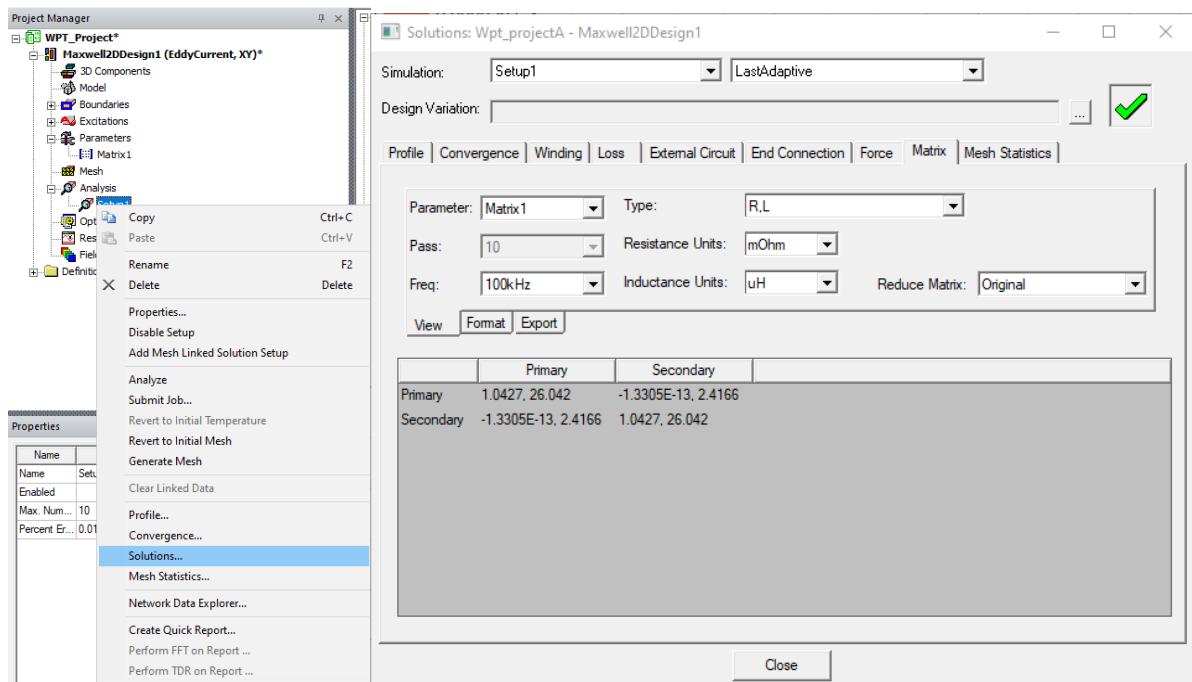
Σχήμα 6.36: Εισαγωγή μεταβλητών εξόδου.

Αφού ολοκληρώσαμε τα παραπάνω βήματα, το μόνο που απομένει είναι η εκτέλεση της προσομοίωσης και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των μεγεθών που υπολογίστηκαν. Πάλι από το Project Manager με δεξί κλικ στο **Analysis** → **Setup1** → **Analyse**, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.37. Μετά από αυτό αρχίζει να τρέχει η διαδικασία προσομοίωσης, η οποία διαρκεί από λίγα λεπτά έως κάποιες ώρες ανάλογα με τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν.

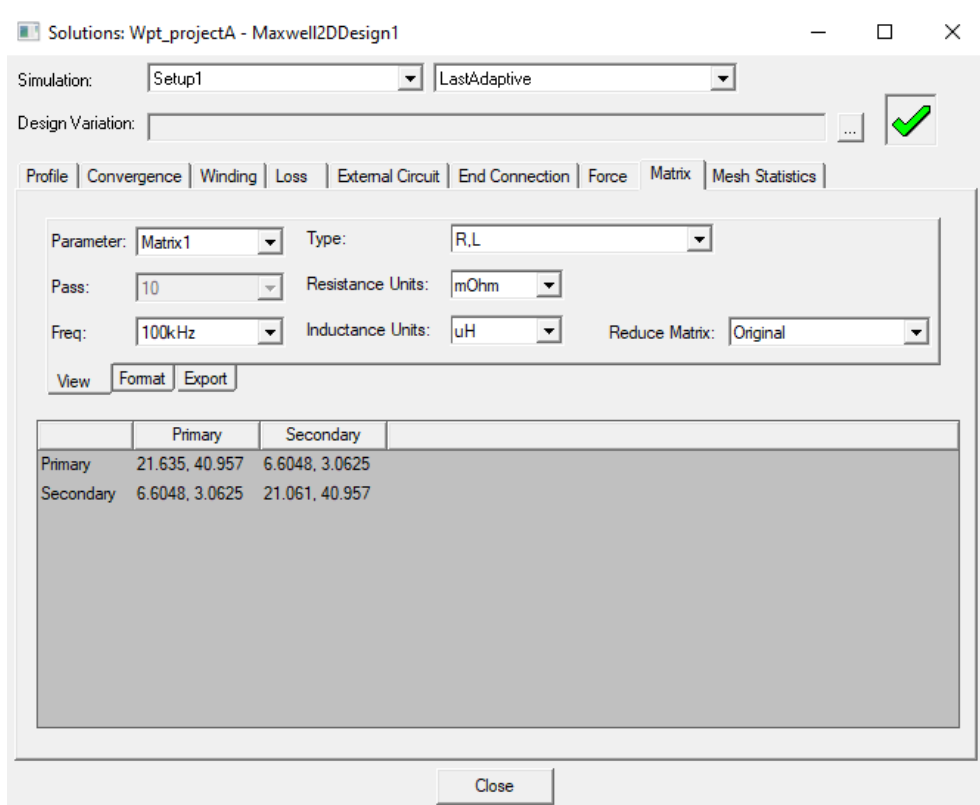


Σχήμα 6.37: Εκκίνηση προσομοίωσης.

Μετά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης της προσομοίωσης μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα είτε ως τιμές σε πίνακα τιμών είτε ως γραφικές απεικονίσεις. Πρώτα, θα δούμε τις αυτεπαγωγές και την αμοιβαία επαγωγή, από το Project Manager με δεξί κλικ στο **Setup**→**Solutions** βλέπουμε στο παράθυρο που αναδύεται τα αποτελέσματα (σχήμα 6.38). Στο σχήμα 6.38 είναι οι τιμές των αυτεπαγωγών και των αντιστάσεων του συστήματος χωρίς θωράκιση και κάποιο μαγνητικό υλικό, στη συνέχεια παραθέτουμε (σχήμα 6.39) τις τιμές με θωράκιση αλουμινίου και φερρίτη. Παρατηρούμε ότι όλα τα μεγέθη αυξάνονται στην δεύτερη περίπτωση. Αυτό είναι λογικό αφού ο φερρίτης αυξάνει την αυτεπαγωγή του συστήματος λόγω της υψηλής μαγνητικής αγωγιμότητάς του και η αντίσταση αυξάνεται λόγω της αντίστασης του αλουμινίου στην διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος.

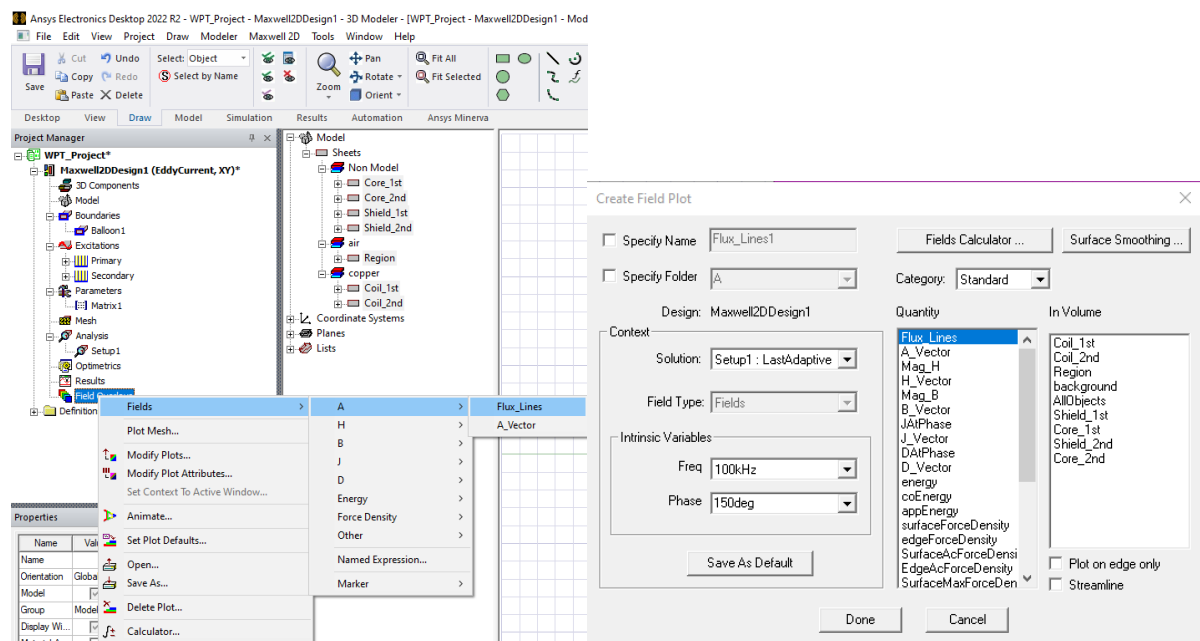


Σχήμα 6.38: Διαδικασία εμφάνισης τιμών αυτεπαγωγών και αντιστάσεων του συστήματος.



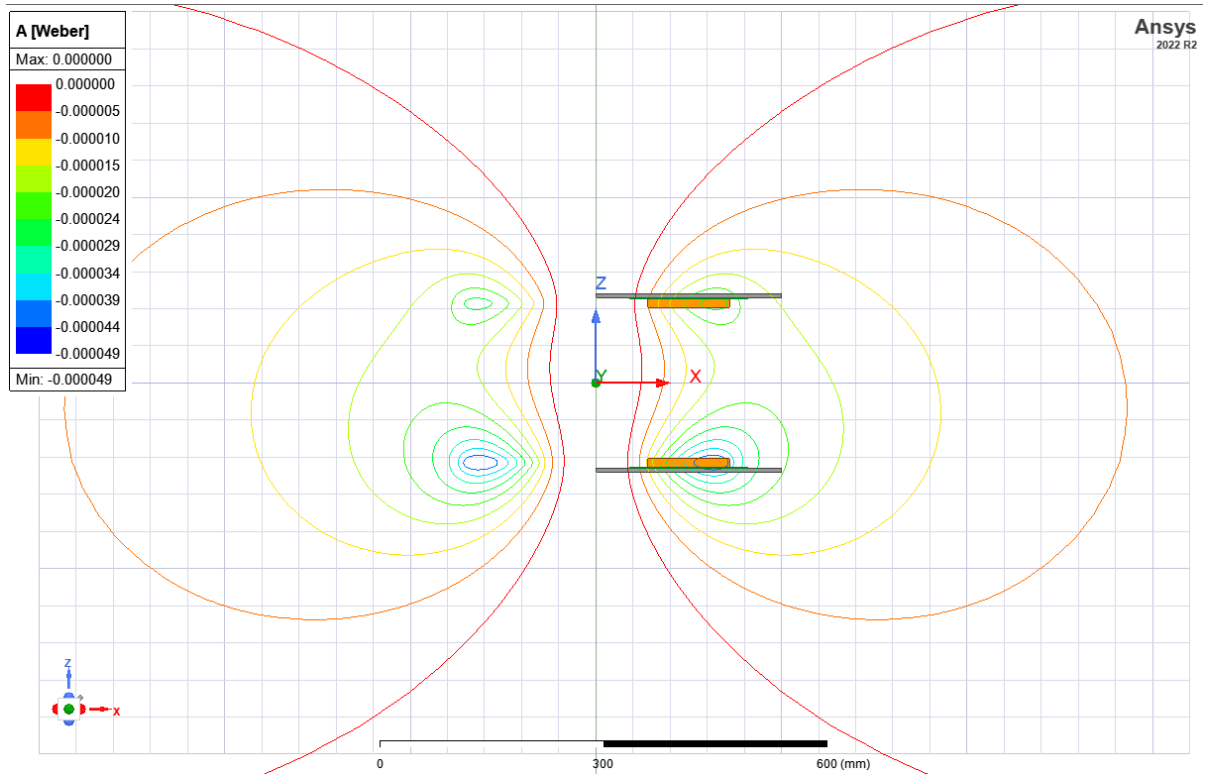
Σχήμα 6.39: Τιμές αυτεπαγωγών και αντιστάσεων του συστήματος ασύρματης μετάδοσης ενέργειας με θωράκιση αλουμινίου και φερρίτη.

Το ANSYS Maxwell μας δίνει τη δυνατότητα απεικόνισης των τιμών και αναπαράστασης των ρευμάτων και των μαγνητικών πεδίων που αναπτύσσονται στην διάταξη. Η αναπαράσταση της μαγνητικής ροής γίνεται από το Project Manager με δεξί κλικ στο **Field Overlays**→**Fields**→**A**→**Flux_Lines**, αφού έχουμε επιλέξει όλα τα μέρη της διάταξης, επιλέγοντας στο παράθυρο που εμφανίζεται συχνότητα 100kHz και φάση 150° (σχήμα 6.40).

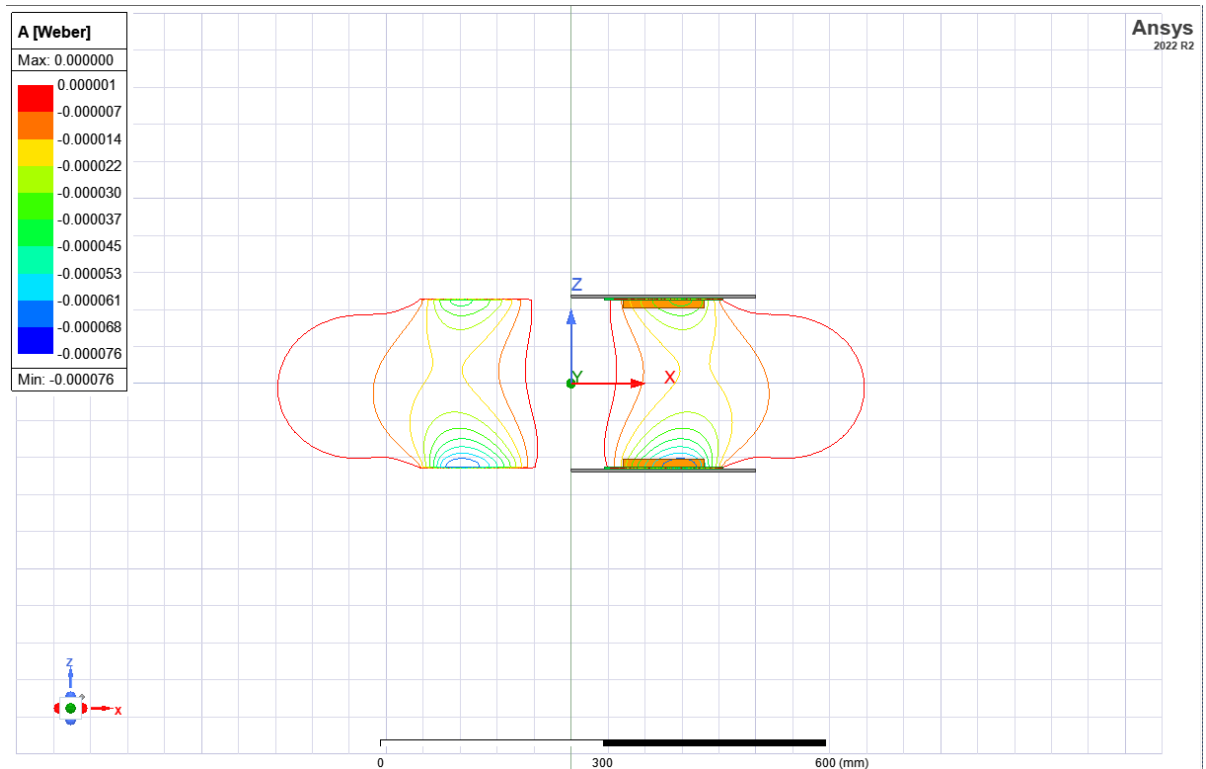


Σχήμα 6.40: Διαδικασία απεικόνισης μαγνητικών γραμμών.

Οπότε παίρνουμε τα αποτελέσματα των παρακάτω σχημάτων. Στο σχήμα 6.42 φαίνεται η μαγνητική ροή της διάταξης όταν έχουμε μόνο τα πηνία χωρίς θωράκιση και μαγνητικό υλικό, ενώ στο σχήμα 6.43 έχουμε ολοκληρωμένη τη διάταξη. Η εικόνα της μαγνητικής ροής που διακρίνουμε είναι φυσιολογική καθώς στην πρώτη περίπτωση το μαγνητικό πεδίο εξαπλώνεται σε όλο τον χώρο αφού δεν υπάρχει κάποιο μαγνητικό υλικό ως πυρήνας. Στην δεύτερη περίπτωση, όπου έχουμε μαγνητικό υλικό, η μαγνητική ροή περιορίζεται μεταξύ των δύο πηνίων καθώς το υλικό που χρησιμοποιείται έχει υψηλή μαγνητική αγωγιμότητα, που αυξάνει την μαγνητική ροή που διαπερνά το πηνίο.

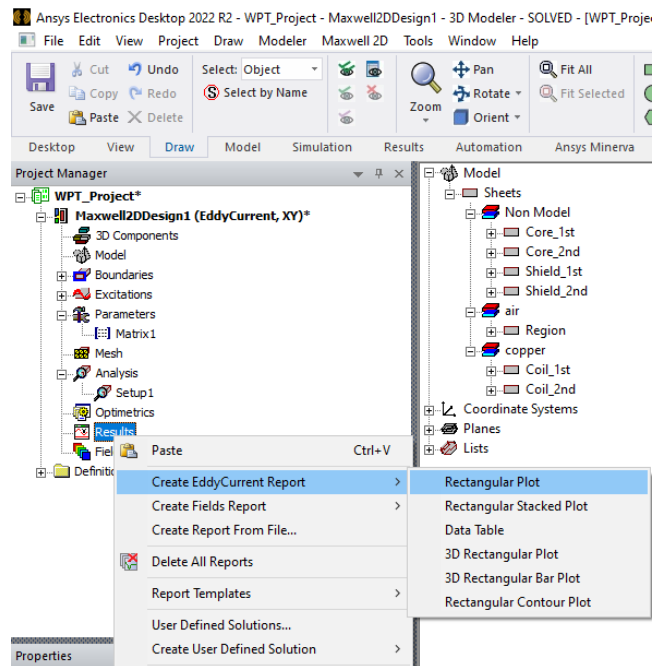


Σχήμα 6.41: Απεικόνιση μαγνητικής ροής χωρίς μαγνητικό πυρήνα.



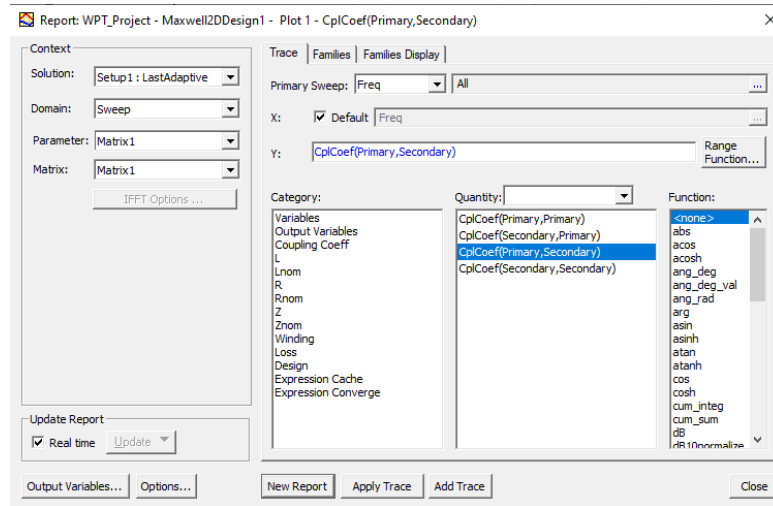
Σχήμα 6.42: Απεικόνιση μαγνητικής ροής με μαγνητικό πυρήνα.

Αρχικά, θα κάνουμε σύγκριση των πηνίων με μαγνητικά υλικά και θωράκιση αλουμινίου και των πηνίων μόνο με τον αέρα ως προς τον συντελεστή σύζευξης μέσω της γραφικής παράστασης. Οπότε από το Project Manager με δεξί κλικ στο **Results** → **Create Eddy Current Report** → **Rectangular Plot** όπως βλέπουμε στο σχήμα 6.43.

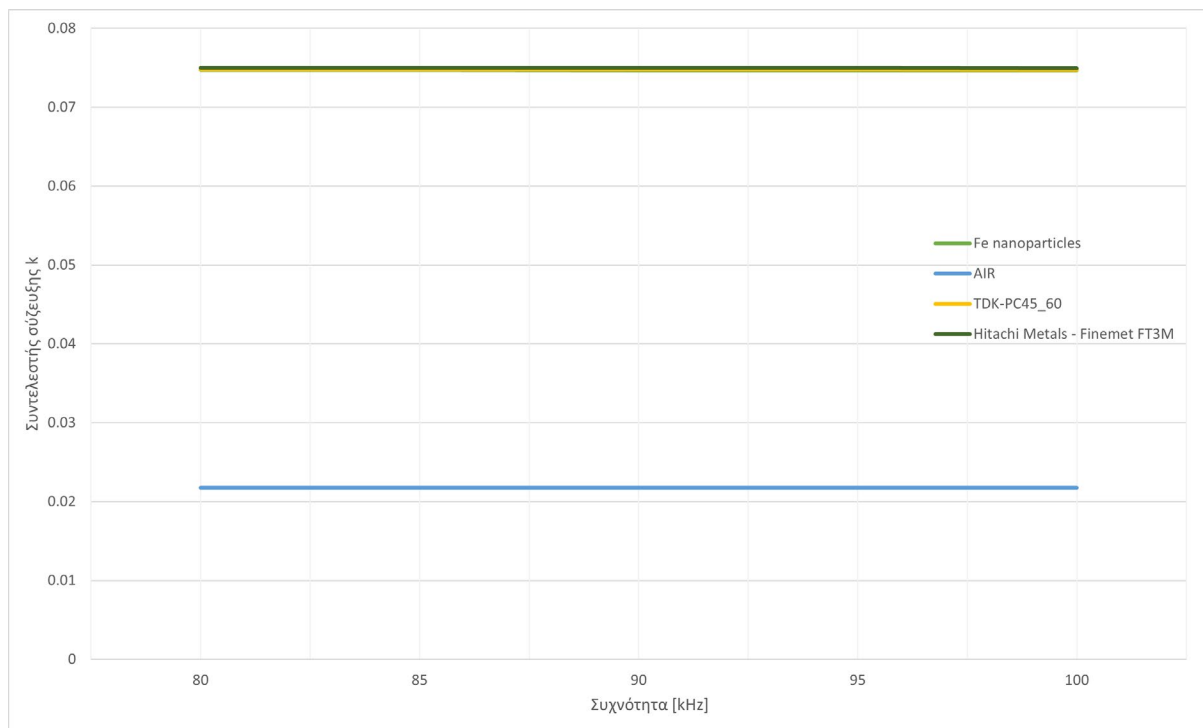


Σχήμα 6.43: Δημιουργία γραφικής παράστασης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Στην συνέχεια στο παράθυρο που αναδύεται επιλέγουμε ποια μεγέθη θέλουμε να παραστήσουμε γραφικά. Αφού θέλουμε να συγκρίνουμε τον συντελεστή σύζευξης για κάθε περίπτωση επιλέγουμε **Parameter** → **Matrix1** και **CplCoef(Primary,Secondary)**, που είναι ο συντελεστής σύζευξης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, και πατώντας **New Report** έχουμε την καμπύλη που θέλουμε (σχήμα 6.44). Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία για όλες τις φορές που εκτελούμε την προσομοίωση με διαφορετικό μαγνητικό υλικό. Αποθηκεύοντας κάθε φορά την γραφική παράσταση του συντελεστή σύζευξης ως προς τη συχνότητα για όλα τα υλικά παίρνουμε την τελική γραφική παράσταση που φαίνεται στο σχήμα 6.45.



Σχήμα 6.44: Δημιουργία γραφικής παράστασης του συντελεστή σύζευξης.

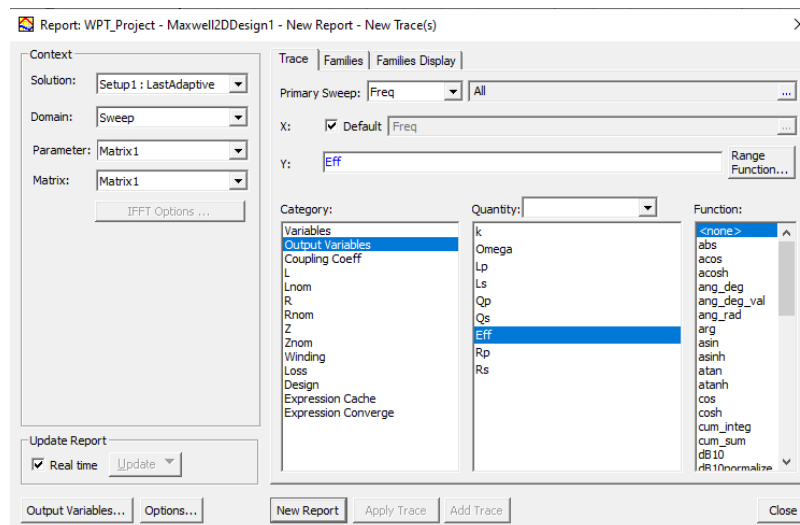


Σχήμα 6.45: Γραφική παράσταση του συντελεστή σύζευξης ως προς τη συχνότητα.

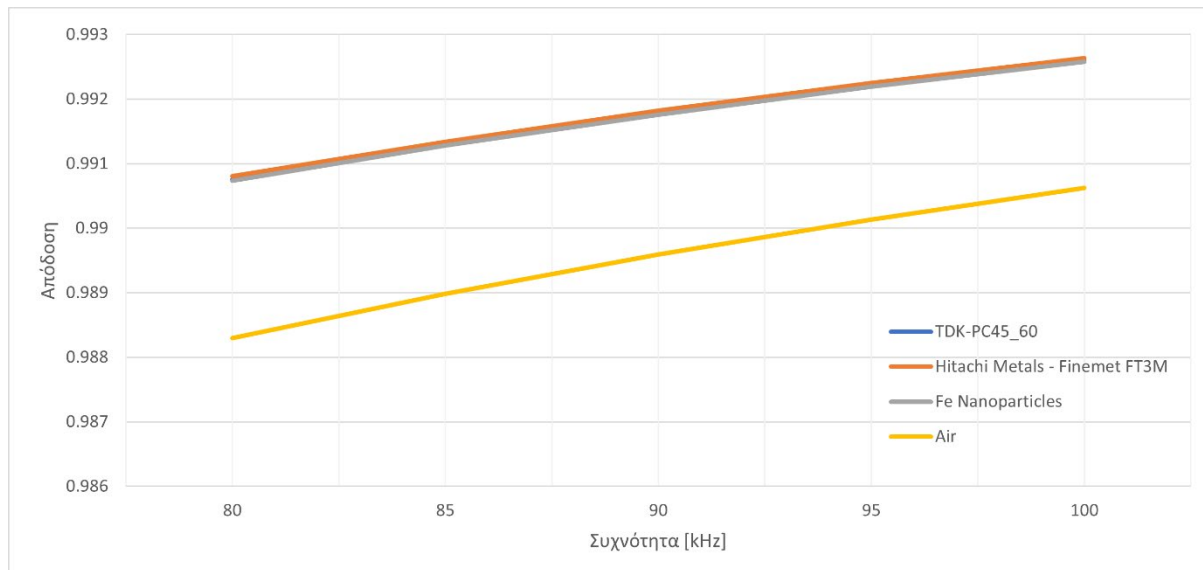
Από την γραφική παράσταση του συντελεστή σύζευξης παρατηρούμε ότι ο συντελεστής σύζευξης χωρίς θωράκιση αλουμινίου και κάποιο μαγνητικό υλικό είναι περίπου 0.022 ενώ όταν έχουμε θωράκιση αλουμινίου και μαγνητικό υλικό είναι σχεδόν 0.075. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς με την χρήση μαγνητικού υλικού ενισχύεται το μαγνητικό πεδίο και έχουμε αυξημένη μαγνητική σύζευξη μεταξύ των πηνίων, και επομένως μεγαλύτερο συντελεστή σύζευξης. Κάνοντας μεγέθυνση την γραφική παράσταση διακρίνουμε ότι τα νανοσωματίδια σιδήρου έχουν τον χαμηλότερο συντελεστή σύζευξης,

ακολουθεί ο φερριτής TDK-PC45 και τέλος είναι το Finemet FT3M. Η διαφορά είναι πολύ μικρή (περίπου 0.00025). Ακόμη, παρατηρούμε μία μικρή κλίση και στις τρεις γραφικές απεικονίσεις όσο αυξάνεται η συχνότητα (0,00002). Αυτή η μείωση του συντελεστή σύζευξης οφείλεται στις αυξημένες ηλεκτρομαγνητικές απώλειες που συναντάμε σε αυτές τις υψηλές συχνότητες.

Για να κάνουμε σύγκριση ως προς την απόδοση των μαγνητικών υλικών στην ασύρματη μετάδοση ενέργειας θα δημιουργήσουμε μια νέα γραφική παράσταση που θα περιέχει την αποτελεσματικότητα των υλικών που θα συγκρίνουμε καθώς και την αποτελεσματικότητα των πηνίων μόνο με τον αέρα. Άρα θα ακολουθούμε τα ίδια βήματα με πριν αλλά θα επιλέξουμε άλλο μέγεθος για να παραστήσουμε γραφικά. Αυτή τη φορά θα επιλέξουμε την αποτελεσματικότητα που είχαμε ορίσει ως μεταβλητή εξόδου, οπότε κάνουμε κλικ στο **Output Variables** → **Eff** όπως φαίνεται στο σχήμα 6.46. Επομένως, πατώντας **New Report** παίρνουμε την γραφική απεικόνιση της απόδοσης ως προς την συχνότητα. Πάλι ακολουθούμε την ίδια διαδικασία, αποθηκεύοντας κάθε φορά την γραφική παράσταση για όλες τις φορές που εκτελούμε την προσομοίωση με διαφορετικό μαγνητικό υλικό παίρνουμε την τελική γραφική παράσταση που φαίνεται στο σχήμα 6.47.



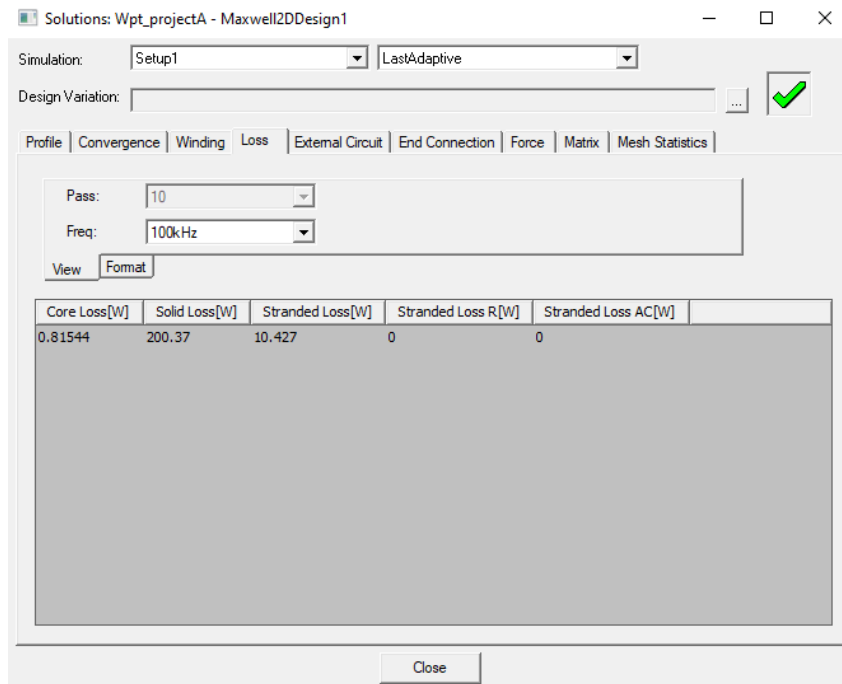
Σχήμα 6.46: Δημιουργία γραφικής παράστασης της αποτελεσματικότητας της ασύρματης μετάδοσης ενέργειας.



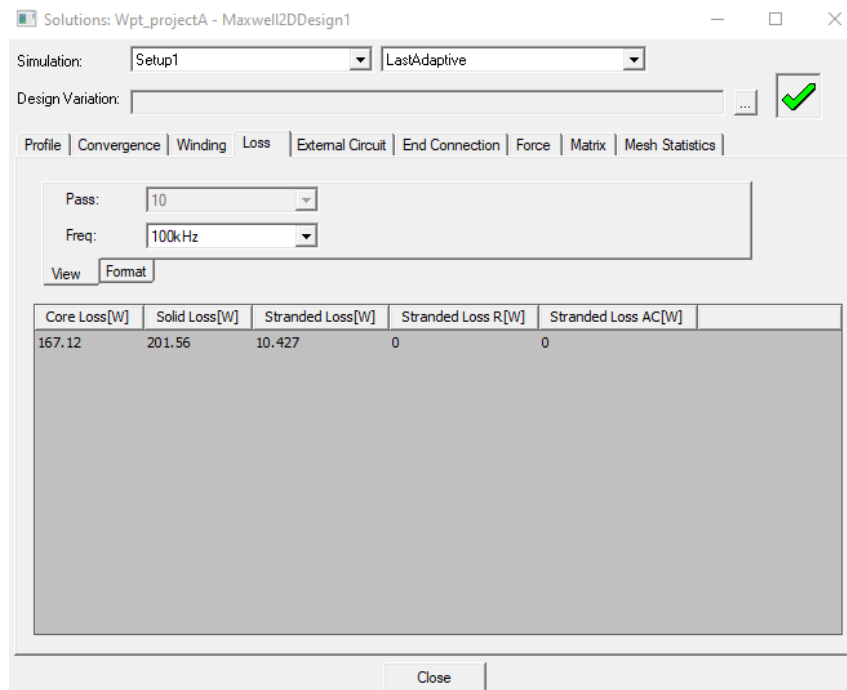
Σχήμα 6.47: Γραφική παράσταση της απόδοσης της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας ως προς τη συχνότητα.

Από την γραφική παράσταση της απόδοσης της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας παρατηρούμε ότι έχουμε μεγαλύτερη απόδοση με θωράκιση αλουμινίου και κάποιο μαγνητικό υλικό σε σχέση με μόνο τα πηνία. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς το μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μεγάλη μαγνητική αγωγιμότητα που επιτρέπει να κατευθύνουν το πεδίο πολύ αποτελεσματικά και να μειώνονται οι απώλειες στην μετάδοση ενέργειας, έτσι βελτιώνεται η απόδοση. Κάνοντας μεγέθυνση την γραφική παράσταση διακρίνουμε ότι την καλύτερη απόδοση έχει το Finemet FT3M, μετά είναι ο φερρίτης TDK-PC45 και τέλος είναι τα νανοσωματίδια σιδήρου, έχοντας πολύ μικρή διαφορά μεταξύ τους.

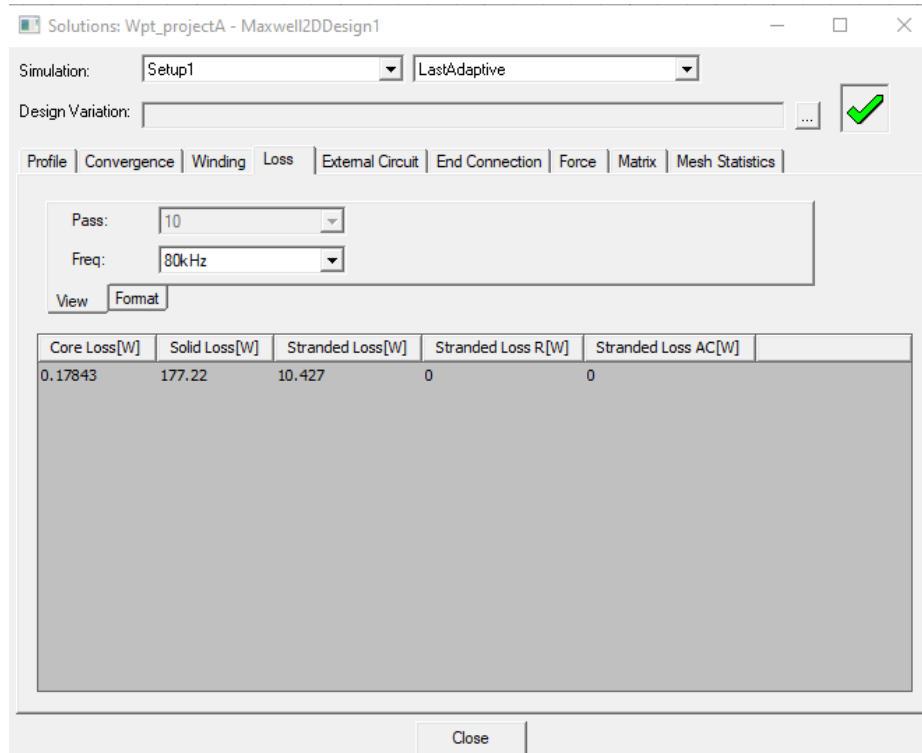
Τέλος, θα συγκρίνουμε τις απώλειες πυρήνα των μαγνητικών υλικών. Αυτό θα το κάνουμε με τον ίδιο τρόπο που βρήκαμε τις τιμές των αυτεπαγωγών προηγουμένως, πατώντας στο **Loss**. Επομένως, παίρνουμε τα αποτελέσματα των σχημάτων 6.48, 6.49 και 6.50. Παρατηρούμε ότι το Finemet FT3M έχει τις υψηλότερες απώλειες (162.12 W) από όλα τα υλικά, ενώ το TDK-PC45 (0.81544 W) μαζί με τα νανοσωματίδια σιδήρου έχουν αρκετά χαμηλότερες απώλειες από το Finemet. Τα νανοσωματίδια σιδήρου έχουν τις χαμηλότερες απώλειες από όλα τα υλικά (0.17843 W).



Σχήμα 6.48: Απώλειες πυρήνα φερρίτη TDK-PC45.



Σχήμα 6.49: Απώλειες πυρήνα Finemet FT3M.



Σχήμα 6.50: Απώλειες πυρήνα νανοσωματιδίων σιδήρου.

Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα και επεκτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Από την άποψη της βιωσιμότητας, το ασύρματο σύστημα φόρτισης είναι ασφαλέστερο, πιο αξιόπιστο, έχει μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και περισσότερα οφέλη για την ασφάλεια σε σχέση με τα ενσύρματα συστήματα φόρτισης. Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της ανάπτυξης υποδομών μεγάλης κλίμακας και οι επιδόσεις όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση, την ανθεκτικότητα και την αξιοπιστία πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά για την μελλοντική ανάπτυξη δυναμικής ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στον πραγματικό κόσμο. Η τεχνολογία ασύρματης μεταφοράς ενέργειας προσφέρει επίσης πιο ενεργή συνδεσιμότητα με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω της αμφίδρομης μεταφοράς ενέργειας οχήματος στο δίκτυο και δίκτυο στο όχημα, επιτρέποντας στα ηλεκτρικά οχήματα να γίνουν κινητές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας που θα συμβάλλουν στη ρύθμιση του δικτύου αποθηκεύοντας την πλεονάζουσα παραγωγή από ανεξέλεγκτες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Κατά την επόμενη δεκαετία, οι βελτιώσεις της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας σε αυτούς τους τομείς θα καθορίσουν πόσο σημαντικός θα είναι ο ρόλος της τεχνολογίας ασύρματης μεταφοράς ενέργειας στην προώθηση της ηλεκτροκίνησης των οχημάτων και στη βελτίωση της βιωσιμότητας της ηλεκτροκίνησης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στις πτυχές όλων των τεχνολογιών ασύρματης μεταφοράς ενέργειας για εφαρμογές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Σε αυτήν την εκτενή μελέτη σχετικά με την απόδοση των υλικών σε συστήματα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, καταλήξαμε σε αρκετά σημαντικά συμπεράσματα. Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να διερευνήσουμε την επίδραση διαφορετικών υλικών πυρήνα στη μαγνητική απόδοση των συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ενέργειας, καθώς και να αναδείξουμε τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν τη μελέτη.

Καταρχάς, παρατηρήσαμε ότι οι πειραματικές μας μετρήσεις έδειξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των υλικών πυρήνα. Συγκεκριμένα, στα 100 kHz, το Finemet FT3M είχε τις υψηλότερες απώλειες πυρήνα, ενώ τα νανοσωματίδια σιδήρου είχαν τις χαμηλότερες απώλειες πυρήνα. Οι απώλειες αυτές επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση των συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η απόδοση των συστημάτων ήταν πολύ κοντά για όλα τα μαγνητικά υλικά με πολύ μικρή διαφορά μεταξύ τους (0,005 %). Αυτά τα στοιχεία υπογραμμίζουν τη σημαντική επίδραση της σύνθεσης των υλικών στη μαγνητική απόδοση του συστήματος ασύρματης μεταφοράς ενέργειας.

Σε γενικές γραμμές, η μελέτη αυτή έχει βαθύτερες επιπτώσεις στον σχεδιασμό συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Επιτρέπει την επιλογή του κατάλληλου υλικού πυρήνα για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης και αποδοτικότητας στη μεταφορά ισχύος. Η επιλογή του υλικού πυρήνα είναι κρίσιμη για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας. Τα νανοσωματίδια σιδήρου παρουσίασαν τις καλύτερες επιδόσεις σε ό,τι αφορά τις απώλειες και την απόδοση. Αυτό ενδέχεται να τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές ασύρματης φόρτισης όπου η απόδοση είναι κρίσιμη. Αυτό μπορεί να έχει θετικές επιδράσεις σε μια σειρά εφαρμογών, όπως οι ασύρματοι φορτιστές, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και άλλα συστήματα που χρησιμοποιούν την ασύρματη μεταφορά ισχύος.

Τέλος, παρότι αυτή η μελέτη εξετάζει τις επιδόσεις των υλικών πυρήνα στα 100 kHz, αποτελεί ένα πολύτιμο βήμα προς την κατανόηση των επιδράσεων των υλικών στη μαγνητική απόδοση συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Μελλοντικές έρευνες μπορούν να διερευνήσουν τις επιδόσεις των υλικών σε ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων και να επεκτείνουν αυτήν την κατανόηση σε περισσότερες περιβαλλοντικές συνθήκες.

7.2 Επεκτάσεις

Για την επίτευξη βιώσιμης προοπτικής της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας υπάρχουν κάποια θέματα που μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω, τα οποία είναι:

- **Επιπρόσθετη Σύγκριση Υλικών:** Επέκταση της εργασίας για να περιλαμβάνει περισσότερα υλικά φερρίτη και μαγνητικά υλικά, με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου υλικού για διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει εξέταση της συμπεριφοράς των υλικών σε διαφορετικές συχνότητες, καθώς η απόκριση των υλικών μπορεί να διαφέρει σε υψηλές συχνότητες.
- **Περισσότερα Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά:** Εξέταση της επίδρασης διαφορετικών γεωμετρικών σχημάτων των πυρήνων στην απόδοση τους, π.χ., περισσότερες μορφές πυρήνων. Μελέτη για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των κυκλικών συζευκτών για τη μείωση της απώλειας ισχύος και την αύξηση της απόδοσης.
- **Εφαρμογές σε Άλλους Κλάδους:** Εξέταση της χρησιμότητας των αποτελεσμάτων σε άλλους τομείς όπως η ιατρική, οι επικοινωνίες και άλλες εφαρμογές. Παράλληλα θα μπορούσε να γίνει συνεργασία με εταιρείες που αναπτύσσουν συστήματα ασύρματης

μετάδοσης ενέργειας για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε πραγματικές συνθήκες.

Αναφορές

- [1] S. Ahn et al., "Reduction of electromagnetic field (EMF) of wireless power transfer system using quadruple coil for laptop applications," 2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications, Kyoto, Japan, 2012, pp. 65-68, doi: 10.1109/IMWS.2012.6215821.
- [2] J. M. Miller, O. C. Onar, and M. Chinthavali, "Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging," IEEE Trans. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 3, no. 1, pp. 147–162, Mar. 2015.
- [3] A. Ahmad, M. S. Alam and R. Chabaan, "A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 1, pp. 38-63, March 2018, doi: 10.1109/TTE.2017.2771619.
- [4] A. C. Bagchi, A. Kamineni, R. A. Zane and R. Carlson, "Review and Comparative Analysis of Topologies and Control Methods in Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 4, pp. 4947-4962, Aug. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3058968.
- [5] *SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler*. [Online]. Available: https://www.sae.org/standards/content/j1772_201710/, Oct. 2017, doi:10.4271/J1772_201710.
- [6] Mercedes S550 Plug-in Hybrid|PluginCars.Com. Accessed: Sep. 22, 2017. [Online]. Available: <http://www.pluginCars.com/mercedes-s550-plug-hybrid>.
- [7] S. Li, Z. Liu, H. Zhao, L. Zhu, C. Shuai, and Z. Chen, "Wireless power transfer by electric field resonance and its application in dynamic charging," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 10, pp. 6602–6612, Oct. 2016.
- [8] Hikita, M., Kozako, M., Imakiire, A., Yamane, A., Kojima, T., (Kyushu Institute of Technology), Imoto, Y., & Honda, K., (HEADS Co.,Ltd). "Maxwell-3D analysis of small capacity contactless power transfer system applied AGV". ANSYS Electronics Simulation Expo. 2014.
- [9] S. Lukic and Z. Pantic, "Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles," IEEE Electrific. Mag., vol. 1, no. 1, pp. 57–64, Sep. 2013.
- [10] J. M. Miller, P. T. Jones, J.-M. Li, and O. C. Onar, "ORNL experience and challenges facing dynamic wireless power charging of EV's," IEEE Circuits Syst. Mag., vol. 15, no. 2, pp. 40–53, May 2015.

- [11] A. A. S. Mohamed, C. R. Lashway, and O. Mohammed, "Modeling and feasibility analysis of quasi-dynamic WPT system for EV applications," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol. 3, no. 2, pp. 343–353, Jun. 2017.
- [12] C. C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi, and C. T. Rim, "Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 10, pp. 6533–6545, Oct. 2016.
- [13] J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C. T. Rim, "Narrowwidth inductive power transfer system for online electrical vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3666–3679, Dec. 2011.
- [14] N. Shinohara, "Wireless power transmission progress for electric vehicle in Japan," in *Proc. IEEE Radio Wireless Symp. (RWS)*, pp. 109–111, Jan. 2013.
- [15] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [16] S. Anthony. (2013). World's First Road-Powered Electric Vehicle Network Switches on in South Korea—ExtremeTech. Accessed: Aug. 12, 2017. [Online]. Available: <https://www.extremetech.com/extreme/163171-worlds-first-road-powered-electric-vehiclenetwork-switches-on-in-south-korea>.
- [17] J. Shin et al., "Design and implementation of shaped magneticresonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 3, pp. 1179–1192, Mar. 2014.
- [18] W. Li, "High efficiency wireless power transmission at low frequency using permanent magnet coupling," Ph.D. dissertation, Univ. British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2009. [Online]. Available: <https://circle.ubc.ca/handle/2429/12599>.
- [19] V. V. Kapranov, I. S. Matsak, V. Y. Tugaenko, A. V. Blank, and N. A. Suhareva, "Atmospheric turbulence effects on the performance of the laser wireless power transfer system," *Proc. SPIE, FreeSpace Laser Commun. Atmos. Propag. XXIX*, vol. 10096, p. 100961E, Feb. 2017.
- [20] Y. Huang, C. Liu, Y. Zhou, Y. Xiao, and S. Liu, "Power allocation for dynamic dual-pickup wireless charging system of electric vehicle," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 55, no. 7, pp. 1–6, Jul. 2019.
- [21] J. M. Miller, O. C. Onar, and M. Chinthavali, "Primary-side power flow control of wireless power transfer for electric vehicle charging," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 147–162, Mar. 2015.

- [22] X. Dai, J. Jiang, and J. Wu, "Charging area determining and power enhancement method for multiexcitation unit configuration of wirelessly dynamic charging EV system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 5, pp. 4086–4096, May 2019.
- [23] G. de Freitas Lima and R. B. Godoy, "Modeling and prototype of a dynamic wireless charging system using LSPS compensation topology," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 1, pp. 786–793, Jan. 2019.
- [24] D. Patil, J. Miller, B. Fahimi, P. T. Balsara, and V. Galigerkere, "A coil detection system for dynamic wireless charging of electric vehicle," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol. 5, no. 4, pp. 988–1003, Dec. 2019.
- [25] W. Wei, F. Liu, S. Mei, and Y. Hou, "Robust energy and reserve dispatch under variable renewable generation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 369–380, Jan. 2015.
- [26] P. Jain and T. Jain, "Impacts of G2V and V2G power on electricity demand profile," in *Proc. IEEE Int. Electr. Veh. Conf. (IEVC)*, pp. 1–8, Dec. 2014.
- [27] Elnail KEI, Huang X, Xiao C, Tan L, Haozhe X. Core Structure and Electromagnetic Field Evaluation in WPT Systems for Charging Electric Vehicles. *Energies*. 2018, 11(7):1734. <https://doi.org/10.3390/en11071734>
- [28] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "ferrite". *Encyclopedia Britannica*, 12 Aug. 2019.
- [29] TDK Corporation. "Ferrite for Switching Power Supplies." 2007.
- [30] ITO, Shinichiro. Basics of ferrite and noise countermeasures. TDK EMC Technology; TDK Corporation Magnetics Business Group: Tokyo, Japan, 2011.
- [31] Cosmo Ferrites. "Ferrite Tiles for Wireless Power Transfer Systems," n.d. <https://www.cosmoferrites.com/news-events/choosing-high-frequency-ferrite-tiles-for-wireless-power-transfer-systems>.
- [32] Hitachi Metals, Ltd. "FINEMET [Catalog]." Datasheet. FINEMET EMC Components., April 2016.
- [33] HITACHI. "FINEMET." Datasheet. Nanocrystalline Soft Magnetic Material. Hitachi Metals, n.d. 2014.
- [34] Batool, F., Iqbal, M.S., Khan, SUD. et al. Biologically synthesized iron nanoparticles (FeNPs) from Phoenix dactylifera have anti-bacterial activities. *Sci Rep* 11, 22132, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01374-4>.
- [35] Nguyen, M.D.; Tran, H.-V.; Xu, S.; Lee, T.R. Fe₃O₄ Nanoparticles: Structures, Synthesis, Magnetic Properties, Surface Functionalization, and Emerging Applications. *Appl. Sci*. 2021, <https://doi.org/10.3390/app112311301>.

- [36] Nalbandian, Lori & Patrikiadou, Eydokia & Zaspalis, Vassilis & Patrikidou, Anna & Hatzidaki, Eleana & Papandreou, Christos. (2015). Magnetic Nanoparticles in Medical Diagnostic Applications: Synthesis, Characterization and Proteins Conjugation. *Current Nanoscience*. 12. 1-1. 10.2174/1573413712666151210230002. 2015.
- [37] Caizer C, Caizer IS. Study on Maximum Specific Loss Power in Fe₃O₄ Nanoparticles Decorated with Biocompatible Gamma-Cyclodextrins for Cancer Therapy with Superparamagnetic Hyperthermia. *Int J Mol Sci*. 17;22(18):10071. Sep. 2021. doi: 10.3390/ijms221810071. PMID: 34576233; PMCID: PMC8470897.
- [38] Webinar. “Modeling Inductive-Based Wireless Power Transfer Using Ansys Maxwell,” <https://www.ansys.com/resource-center/webinar/modeling-inductive-based-wireless-power-transfer-using-ansys-maxwell>, Aug. 18, 2022.