



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Σ. Μουργελάς

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Απρίλιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Σ. Μουργελάς

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Απριλίου 2014.

.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Γεωργιάκης Παύλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2014

.....
Γεώργιος Σ. Μουργελάς

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

Copyright © Γεώργιος Μουργελάς, 2014.
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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μαγνητοστατική ανάλυση ενός σταθμού επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς και η μελέτη της διάταξης ελέγχου του σταθμού αυτού.

Στο Κεφάλαιο 1, πραγματοποιείται μια γενική περιγραφή των μεθόδων ασύρματης φόρτισης, ενώ μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται στην επαγωγική φόρτιση για ηλεκτρικά οχήματα.

Στο Κεφάλαιο 2, εξετάστηκε η επίδραση της διαστασιολόγησης ενός σταθμού επαγωγικής φόρτισης δομής «I» στην ισχύ που μπορεί να μεταφερθεί στο όχημα λόγω μεταβολής της επαγόμενης μαγνητικής ροής. Η μαγνητοστατική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Ansys. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής δίνεται ένα παράδειγμα σταθμού επαγωγικής φόρτισης και εξετάζεται η επίδραση της ορθής και πλευρικής μετατόπισης του οχήματος ως προς το σταθμό όσον αφορά στη μεταφερόμενη προς το όχημα ισχύ.

Στο Κεφάλαιο 3 μελετήθηκε και σχεδιάστηκε ένας σταθμός επαγωγικής φόρτισης χαμηλής ισχύος, καθώς και η διάταξη ελέγχου του. Πραγματοποιήθηκε στο Ansys μαγνητοστατική ανάλυση μίας διάταξης τύπου «I» για εφαρμογές χαμηλής ισχύος, της οποίας οι τιμές για τις αυτεπαγωγές και την αμοιβαία επαγωγή χρησιμοποιήθηκαν στο κύκλωμα του ελέγχου. Η διάταξη ελέγχου του σταθμού αποτελείται από αντιστροφέα υψηλής διακοπτικής συχνότητας –με είσοδο dc τάση που προκύπτει από ανόρθωση της τάσης του δικτύου- μετασχηματιστή μεγάλου διακένου, κύκλωμα συντονισμού και ανορθωτή της τάσης εξόδου του δευτερεύοντος για τροφοδότηση της μπαταρίας του αυτοκινήτου. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού Simulink του matlab.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Επαγωγική φόρτιση, ηλεκτρικό αυτοκίνητο, Ansys, High-Frequency αντιστροφέας, κύκλωμα συντονισμού,

ABSTRACT

The scope of this diploma thesis is the magnetostatic study of an inductive charging station for electrical vehicles, as well as the study of a control system for this station

In chapter 1, an overall description of the methods of wireless charging is given, with greater emphasis on the inductive charging for electric vehicles

In chapter 2, the effect of dimensioning of an “I” type structure inductive charging station in the power that can be transferred to the vehicle due to the change of the induced magnetic flux is examined. The magnetostatic analysis was accomplished with the software Ansys. Based on the results of this analysis I, an example of inductive charging station is given and the effect of straight and lateral displacement of the vehicle relative to the station with respect to the transferred power to the vehicle is examined.

In chapter 3, a low power inductive charging station was studied and designed, as well as its control circuit. The magnetostatic analysis of an “I” type structure for low power applications was performed in Ansys , whose values for the inductances and mutual inductance were used in the control circuit The device consists of a high – frequency inverter, whose input is the rectified grid voltage- a large gap transformer, a resonant primary and secondary circuit and a rectifier, which powers the vehicle. The simulations were performed using the Simulink software of matlab. The study was carried out in the third chapter

KEYWORDS

Inductive charging, electric vehicle, Ansys, High-Frequency inverter, resonant circuit

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή ΕΜΠ και ιδιαίτερα τους κυρίους Ιωάννη Καρακίτσιο και Ευάγγελο Καρφόπουλο, υποψήφιους διδάκτορες. Ακόμα, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την οικονομική και ηθική στήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ευχαριστίες, τέλος, αποδίδονται σε όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου που στήριξαν αυτήν την προσπάθεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1	Επαγωγική Μεταφορά Ενέργειας	14
1.1	Εισαγωγή	14
1.2	Ασύρματη Μεταφορά Ενέργειας	14
1.2.1	Ιστορική Αναδρομή	14
1.2.2	Κατάταξη συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ισχύος	15
1.3	Επαγωγική ζεύξη	20
1.3.1	Αρχή λειτουργίας	20
1.3.2	Ηλεκτρική ταλάντωση - Συντονισμός	23
1.3.3	Τοπολογίες Αντιστάθμισης	26
1.3.4	Εφαρμογές	30
1.4	Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων	32
1.4.1	Κατασκευή	32
1.4.1.1	Είδος καλωδίων	32
1.4.1.1.1	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τυλίγματος	34
1.4.1.2	Πυρήνας	36
1.4.2	Διατάξεις για την επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων	37
1.4.3	Standards (Πρότυπα)	41
Κεφάλαιο 2	Μαγνητική Ανάλυση Διάταξης με το λογισμικό Ansys	44
2.1	Εισαγωγή	44
2.2	Χρήση του Ansys για μαγνητοστατική μελέτη	45
2.2.1	Κατασκευή γεωμετρίας	45
2.2.2	Επιλογή υλικών	51
2.2.3	Ορισμός φοράς ρεύματος και χαρακτηριστικά τυλιγμάτων	52
2.2.4	Ορισμός οριακών συνθηκών	54
2.2.5	Κατασκευή πλέγματος	54
2.2.6	Καθορισμός των παραμέτρων της ανάλυσης	55
2.2.7	Ορισμός μεγεθών για τα οποία πραγματοποιείται ανάλυση	56
2.2.8	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	56
2.3	Μαγνητοστατική μελέτη της διάταξης "I"	58
2.3.1	Αρχική διάταξη	58
2.3.2	Εξάρτηση μαγνητικής ροής από τις διαστάσεις του πρωτεύοντος	62
2.3.2.1	Πλάτος βασικής πλάκας	62
2.3.2.2	Πάχος βασικής πλάκας	65
2.3.2.3	Μήκος βασικής πλάκας	66
2.3.2.4	Πλάτος πλάκας πόλου	68
2.3.2.5	Πάχος πόλου	69
2.3.2.6	Πάχος πλάκας πόλου	70
2.3.2.7	Ύψος πόλου	71

2.3.2.8	Μήκος πόλου	72
2.3.3	Παράδειγμα χρήσης της δομής "I" για εφαρμογή υψηλής ισχύος	74
2.3.3.1	Επιλογή διαστάσεων για το πρωτεύον	75
	Εξάρτηση μαγνητικής ροής από τις διαστάσεις του	
2.3.3.2	δευτερεύοντος	77
2.3.3.2.1	Πλάτος pick-up	77
2.3.3.2.2	Μήκος pick-up	78
2.3.3.2.3	Πάχος pick-up	79
2.3.3.3	Επιλογή διαστάσεων pick-up	80
2.3.3.4	Επιλογή αριθμού ελιγμάτων στο πρωτεύον και στο δευτερεύον	81
2.3.3.5	Μετατόπιση του pick - up στους άξονες	82
Κεφάλαιο 3	Μελέτη διάταξης ελέγχου για σταθμό επαγωγικής φόρτισης	85
3.1	Εισαγωγή	85
3.2	Αντιστροφεία	85
3.2.1	Είδος διακοπών	86
3.2.2	PID ελεγκτής	87
3.2.3	Λειτουργία και έλεγχος αντιστροφεία	88
3.3	Κύκλωμα LCL πρωτεύοντος δευτερεύοντος	91
3.3.1	Ανάλυση πρωτεύοντος	92
3.3.2	Ανάλυση δευτερεύοντος	93
3.3.3	Μεταφερόμενη ισχύς κυκλώματος	93
3.4	Ανορθωτής	94
3.5	Προσομοίωση διάταξης ελέγχου σταθμού επαγωγικής φόρτισης	97
3.5.1	Περιγραφή της διάταξης που σχεδιάστηκε στο ansys	97
3.5.2	Προσομοίωση διάταξης στο Simulink	99
3.5.4	Τροφοδοσία φορτίου σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος	100
Κεφάλαιο 4	Συμπεράσματα και επεκτάσεις	104
4.1	Συμπεράσματα και σύνοψη	104
4.2	Επεκτάσεις	105
Βιβλιογραφία		106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πιο δημοφιλείς τεχνικές ασύρματης μεταφοράς ενέργειας. Η μελέτη εξειδικεύεται στη συνέχεια στην επαγωγική μεταφορά ενέργειας. Παρουσιάζονται διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Το κεφάλαιο κλείνει με τη μελέτη επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Παρουσιάζονται γενικές αρχές υλοποίησης μιας τέτοιας διάταξης, συγκεκριμένες διατάξεις που έχουν αναπτυχθεί και η πρόοδος όσον αφορά την προτυποποίηση στο συγκεκριμένο τομέα.

1.2 ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ασύρματη μεταφορά ισχύος (AMI)- wireless power transfer (WPT) ή contact-less power transfer (CPT)- είναι η διαδικασία κατά την οποία μεταφέρεται ισχύς από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε ένα άλλο, χωρίς τη χρήση οποιασδήποτε κατασκευασμένης από τον άνθρωπο αγωγίμης σύνδεσης. Με κίνητρα τη μείωση κόστους λόγω απωλειών στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, την εξοικονόμηση πόρων από την κατασκευή και συντήρηση αγωγών και πυλώνων, την παροχή ισχύος σε φορτία που ήταν αδύνατον να "φτάσει" με τις συμβατικές μεθόδους, αλλά και τη διευκόλυνση της καθημερινότητάς μας- απαλλάσσοντάς μας από τα καλώδια των συσκευών- η AMI έχει γίνει στις μέρες μας πρόσφορο πεδίο έρευνας. Η ιδέα, εν τούτοις, δεν είναι καθόλου καινούρια. Έχει τις ρίζες της στα τέλη του 19ου αιώνα και στα πειράματα του Tesla, με αποκορύφωμα την κατασκευή του περίφημου πύργου του Wardenclyffe, ύψους 57 μέτρων [1], που αποσκοπούσε στην ασύρματη ενεργειακή σύνδεση Ευρώπης- Αμερικής.

Οι απόπειρες του Tesla δεν είχαν κάποιο άμεσο αποτέλεσμα, έδωσαν όμως τεράστια ώθηση στην ανάπτυξη της ασύρματης μεταφοράς πληροφορίας (ραδιόφωνο, internet). Τα τηλεπικοινωνιακά σήματα διασκορπίζονται και φτάνουν στους δέκτες εξασθενημένα. Αυτό δεν ενδιαφέρει εφ' όσον η πληροφορία διατηρείται ακέραια. Δεν παύουν, όμως να μεταφέρουν και ένα ποσό ενέργειας. Έτσι ήταν η σειρά αυτού του κλάδου να δώσει έμπνευση, ώστε να ξανά ξεκινήσει η μελέτη της ασύρματης μεταφοράς ενέργειας μετά τη λήξη του Β' παγκοσμίου πολέμου, βασισμένη πάντα στην πρωτοποριακή εργασία του Tesla.

Στην πραγματικότητα η ασύρματη μεταφορά (είτε ισχύος, είτε πληροφορίας) βασίζεται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Μόνο που στην περίπτωση της ισχύος ενδιαφέρει ο λόγος λαμβανόμενη προς εκπεμπόμενη ισχύος, ενώ στην περίπτωση της πληροφορίας ο λόγος σήμα προς θόρυβο.

Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά σε σημαντικούς σταθμούς της προσπάθειας να μεταφερθεί ασύρματα ηλεκτρική ισχύς.[1]

1820: Ο Andre-Marie Ampere αναπτύσσει το νόμο του Ampere, δείχνοντας ότι το ηλεκτρικό ρεύμα παράγει μαγνητικό πεδίο.

1831: Ο Michael Faraday αναπτύσσει το νόμο επαγωγής του Faraday, περιγράφοντας την ηλεκτρομαγνητική δύναμη που επάγεται σ' έναν αγωγό από μία χρονομεταβλητή μαγνητική ροή.

1836: Ο Nicholas Callan εφαρμόζει τα προηγούμενα για να κατασκευάσει τον πρώτο μετασχηματιστή.

1864: Ο James Clark Maxwell συνθέτει τις παραπάνω παρατηρήσεις, καθώς και τις εξισώσεις του ηλεκτρισμού, του μαγνητισμού και της οπτικής σε μια ενοποιημένη ηλεκτρομαγνητική θεωρία, μοντελοποιώντας μαθηματικά τη συμπεριφορά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

1893: Ο Nikola Tesla φωτίζει ασύρματα φωσφορίζουσες λάμπες δικής του κατασκευής σε μια επίδειξη στο Σικάγο.

1894: Οι Hutin και LeBlanc υποστηρίζουν ότι η επαγωγική μεταφορά ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί, λαμβάνοντας πατέντα για την περιγραφή ενός τέτοιου συστήματος στα 3 KHz.

1894: Ο Tesla φωτίζει ασύρματα λάμπες πυρακτώσεως χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της συντονισμένης επαγωγικής ζεύξης

1904: Σε παγκόσμιο διαγωνισμό στο St Louis προσφέρεται έπαθλο για επιτυχημένη προσπάθεια ασύρματης τροφοδότησης σε μηχανή αερόπλοιου ισχύος 75 W από απόσταση 30 m.

1961: Ο William Brown δημοσιεύει ένα άρθρο εξερευνώντας τη δυνατότητα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας με μικροκύματα.

1964: Ο Brown, σε μια επίδειξη τροφοδοτεί ένα μοντέλο ελικοπτέρου αποκλειστικά με δέσμη μικροκυμάτων.

1968: Ο Peter Glaser προτείνει ασύρματη μεταφορά ηλιακής ενέργειας, που συλλέχτηκε στο διάστημα (Δορυφόρος ηλιακής ισχύος)

1971: Ο καθηγητής Don Otto κατασκευάζει ένα μικρό τρόλεϊ τροφοδοτούμενο με επαγωγή στο πανεπιστήμιο Auckland της Νέας Ζηλανδίας.

1988: Στο ίδιο πανεπιστήμιο κατασκευάζεται αναστροφέας με καινοτόμα υλικά που οδήγησε τους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι είναι εφικτή η χρήση στη πράξη της συντονισμένης επαγωγικής ζεύξης.

1996: Η Auckland Uniservices αναπτύσσει σύστημα φόρτισης ηλεκτρικού λεωφορείου (30-60kW) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της συντονισμένης επαγωγικής ζεύξης.

2001: Η ίδια τεχνολογία αξιοποιείται από τη Splashpower (Ηνωμένο βασίλειο) για την ανάπτυξη πλαισίου ασύρματης φόρτισης ποικίλων ηλεκτρονικών συσκευών (τηλέφωνο, i-pod, κλπ)

2005: Ο καθηγητής John Boys και η ομάδα του κατασκευάζει στο εργαστήριο δρόμο με σύστημα φόρτισης συντονισμένης επαγωγικής ζεύξης που επιτρέπει τη φόρτιση οχημάτων κατά την κίνησή τους.

2007: Ερευνητική ομάδα στο MIT τροφοδοτεί ασύρματα με χρήση της παραπάνω τεχνολογίας μία λάμπα 60 W σε απόσταση 2 μέτρων, με απόδοση 40%.

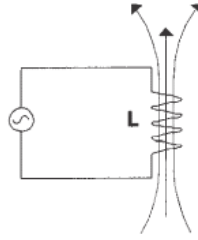
2008: Η Bombardier προσφέρει ένα σύστημα φόρτισης τραμ, με την ονομασία PRIMOVE

2009: Προτείνεται ένα απλό ηλεκτρικό μοντέλο συντονισμού για τη μεταφορά ισχύος που εφαρμόζεται σε ιατρικά εμφυτεύματα.

2010: Η Haier Group παρουσιάζει τη πρώτη εντελώς ασύρματη Lcd τηλεόραση, εφαρμόζοντας συντονισμένη επαγωγική ζεύξη.

1.2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

Η πρώτη κατηγοριοποίηση που θα γίνει αφορά το είδος του πεδίου το οποίο χρησιμοποιεί κάθε σύστημα προκειμένου να μεταφέρει ενέργεια. Έτσι, για ένα κύκλωμα που διαθέτει πηγή εναλλασσόμενης τάσης, μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω είδη πεδίων που δημιουργούνται: α) πεδίο λόγω αντίδρασης (reactive field) και ακτινοβολόν πεδίο (radiative field)[2] Για να γίνει κατανοητός ο διαχωρισμός θα χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω παραδείγματα: (εικόνα 1.2)



Εικόνα 1.1: Επαγωγέας δημιουργεί πεδίο λόγω αντίδρασης που αποθηκεύει ενέργεια [3]

Το παραπάνω κύκλωμα (εικόνα 1.1) περιλαμβάνει μια εναλλασσόμενη πηγή τάσης σε σειρά με ένα ιδανικό πηνίο. Καθώς ρέει ρεύμα από το πηνίο δημιουργείται μαγνητικό πεδίο, όπως φαίνεται στο σχήμα. Εφόσον το πηνίο είναι ιδανικό το κύκλωμα δεν εμφανίζει απώλειες, παρά μόνο μια διαφορά φάσης κατά 90° μεταξύ τάσης και ρεύματος. Αυτή η διαφορά φάσης μοντελοποιείται από την επαγωγική αντίδραση του πηνίου

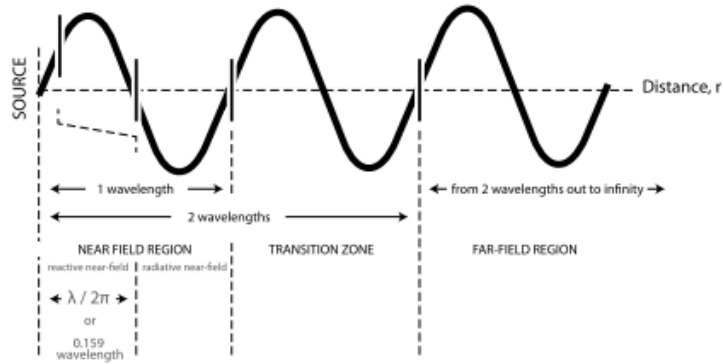
$$Z = j * \omega * L \quad (1.1)$$

εξ'ού και το όνομα που παίρνει το πεδίο[2]. Το πεδίο λοιπόν "αποθηκεύει ενέργεια" -η οποία μεταφέρεται διαδοχικά από το κύκλωμα στο πεδίο και τούμπαλιν- εκτός αν μέσα στο πεδίο βρεθεί ένα αντίστοιχο κύκλωμα, οπότε και υπάρχει μεταφορά ενέργειας από το ένα κύκλωμα στο άλλο (π.χ. Μετασχηματιστής). Από την άλλη, λόγω επιταχυνόμενης μεταφοράς φορτίων, δημιουργείται το ακτινοβολόν πεδίο. Τα παρακάτω κυκλώματα ακτινοβολούν συνεχώς ενέργεια υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων-ανεξάρτητα αν υπάρχει κοντά ένα φορτίο, όπως στην πρώτη περίπτωση-προκειμένου να συντηρήσουν αυτή τη επιτάχυνση. (Πρόκειται για τις δύο βασικές κεραίες που χρησιμοποιούνται στο far field. Τη βροχοειδή και τη διπολική κεραία μήκους $\lambda/2$)[3] (εικόνα 1.2)



Εικόνα 1.2: Τα δύο βασικότερα είδη κεραίας του far field, βροχοειδής και διπολική[3]

Στα κυκλώματα που κατασκευάζονται τα δύο είδη πεδίων συνυπάρχουν. Το μεν πεδίο λόγω αντίδρασης φθίνει κατά ένα παράγοντα $1/R^2$, όπου R η απόσταση από την πηγή, ενώ το ακτινοβολόν κατά τον παράγοντα $1/R$ [2]. Έτσι, κοντά στην πηγή κυριαρχεί η συνιστώσα του πρώτου, ενώ όσο απομακρυνόμαστε υπάρχει επί της ουσίας μόνο το δεύτερο. Θεωρείται ότι το πεδίο λόγω αντίδρασης εκτείνεται μέχρι την απόσταση $\lambda/2\pi$, όπου λ το μήκος του κύματος, ενώ κυριαρχεί το ακτινοβολόν από την απόσταση 2λ και μετά. Λόγω των παραπάνω, τα δύο πεδία ονομάζονται και reactive near field ή near field (εγγύς πεδίο) και far field (μακρινό πεδίο). Την ενδιάμεση απόσταση καλύπτουν το ακτινοβολόν εγγύς πεδίο, από $\lambda/2\pi$ μέχρι λ , όπου αρχίζει και γίνεται αισθητή η συνιστώσα του ακτινοβολόντος πεδίου, και μια μεταβατική ζώνη όπου συνυπάρχουν και τα δύο πεδία, ενώ αρχίζει να κυριαρχεί το ακτινοβολόν. Αυτή η ζώνη συμβατικά αναφέρεται ως mid field (μέσο πεδίο) [2].



Εικόνα 1.3: Διαχωρισμός των πεδίων ανάλογα με το μήκος κύματος[2]

Οι παραπάνω εκφράσεις $\lambda/2\pi$ και 2λ που οριοθετούν το near field (από εδώ και στο εξής εννοείται near reactive field) και το far field παίρνουν διαφορετικές τιμές ανάλογα με τη συχνότητα. Έτσι για τα 50Hz (όπου το μέγιστο μήκος κύματος είναι $\lambda=c/f= 3*10^8/50=6.000\text{km}$) το near field εκτείνεται ως τα $\lambda/2\pi=955\text{km}$ περίπου, συνεπώς όλες οι αλληλεπιδράσεις λαμβάνουν χώρα εντός αυτού του πεδίου. Με τον ίδιο τρόπο βρίσκουμε ότι στα 100 MHz το όριο για το near field είναι 0,5 μέτρα, ενώ στα $5*10^{14}\text{Hz}$ το όριο είναι $0,1\mu\text{m}$. Βέβαια για τις συχνότητες 100MHz και $5*10^{14}\text{Hz}$ εκμεταλλευόμαστε κυρίως το far field πεδίο αφού τα 100MHz είναι συχνότητα κατάλληλη για μεταφορά ραδιοφωνικών σημάτων, ενώ η συχνότητα $5*10^{14}\text{Hz}$ (οπτική συχνότητα) χαρακτηρίζει ένα λαμπτήρα που ακτινοβολεί[3].

Τελικά, ο διαχωρισμός στα πεδία που έγινε αρχικά, γίνεται φανερό ότι μετατρέπεται πρωτίστως σε διαχωρισμό στην απόσταση από την πηγή στην οποία πραγματοποιείται η μεταφορά της ενέργειας. Δευτερευόντως, για κάθε περίπτωση γίνεται χρήση διαφορετικής περιοχής του φάσματος συχνοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο δημοφιλείς τεχνικές για κάθε περίπτωση.

Far field

Έχουν μελετηθεί στο παρελθόν οι εξής τεχνικές: α) μεταφορά ισχύος με μικροκύματα και β) μεταφορά ισχύος με δέσμες laser. Και στις δύο περιπτώσεις οι πηγές εκπέμπουν συνεχώς στις συχνότητες που αντιστοιχούν στα μικροκύματα και στο laser. Οι συχνότητες αυτές εξυπηρετούν στο να μη διασκορπίζονται τα κύματα και να περιορίζονται οι απώλειες ισχύος. Κατασκευαστικά πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις [4]:

$$R > \frac{2*D^2}{\lambda} \quad (1.2)$$

$$R \gg D \quad (1.3)$$

Όπου R η απόσταση από την πηγή, D η μέγιστη διάσταση της κεραίας πομπού και λ το μήκος κύματος.

Το πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι η ικανότητά τους να διαχειρίζονται σημαντικά ποσά ισχύος. Στα αρνητικά τους είναι:

A) Σημαντικές απώλειες ισχύος, λόγω συνεχούς εκπομπής, ακόμα και αν δεν υπάρχει φορτίο, και απορρόφησης μέρους της ισχύος από το μέσο διάδοσης.

B) Υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής - ακριβός εξοπλισμός. (Για μεγάλες αποστάσεις, οι κεραίες πρέπει να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, προκειμένου να υπάρχει υψηλή κατευθυντικότητα, και

διαστάσεις της τάξης των εκατοντάδων μέτρων) [1]

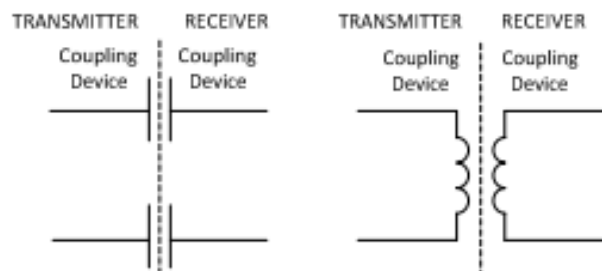
Όσον αφορά τις δέσμες laser, ο συντελεστής απόδοσης γίνεται ακόμα μικρότερος, λόγω της χαμηλής απόδοσης των φωτοβολταϊκών που αναλαμβάνουν να μετατρέψουν τις δέσμες που φτάνουν. Τα μικροκύματα από την άλλη έχουν σοβαρές επιδράσεις στους οργανισμούς. Ως εκ τούτου, οι χρήσεις και των δύο μεθόδων είναι αρκετά περιορισμένες. Ενδεικτικά θα αναφερθούν κάποιες.

1ον: Δορυφόροι ηλιακής ισχύος: Πρόκειται για "κινητούς" σταθμούς παραγωγής στη γεωστατική τροχιά της γης. Αποτελούνται από τρία στάδια. Φωτοβολταϊκά πλαίσια ή ηλιακές γεννήτριες τοποθετημένες στο δορυφόρο, που μετατρέπουν την ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια. Μετατροπείς των σημάτων σε μικροκύματα, τα οποία στέλνονται στην επιφάνεια της γης και, τέλος, κεραίες - δέκτες στην επιφάνεια της γης (διαστάσεων μεγάλου μεγέθους) που αναλαμβάνουν τη συλλογή των σημάτων και τη μετατροπή τους εκ νέου σε ηλεκτρική ενέργεια. [1]

2ον: Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε αγροτικές- αραιοκατοικημένες περιοχές, όπου είναι δύσκολη η σύνδεση με το δίκτυο. [1]

Near field

Όπως είδαμε προηγουμένως, το εγγύς πεδίο έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει και να μεταφέρει ενέργεια. Η αποθήκευση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί, ανάλογα με τη διάταξη, είτε στο ηλεκτρικό ή στο μαγνητικό πεδίο. Όσον αφορά το μαγνητικό πεδίο, η διάταξη περιλαμβάνει δύο κοινώς συζευγμένα πηνία- όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται επαγωγική ζεύξη (inductive coupling) ή μαγνητική ζεύξη. Η πιο κοινή εφαρμογή της είναι στους μετασχηματιστές, όπου μεταφέρεται ισχύς ανάμεσα σε δύο μονωμένα ηλεκτρικώς πηνία. Η αντίστοιχή της για το ηλεκτρικό πεδίο είναι η χωρητική (capacitive coupling) ή ηλεκτρική ζεύξη. Όπως φαίνεται από το όνομα η διάταξη αυτή χρησιμοποιεί πυκνωτές. Οι δύο διατάξεις φαίνονται παρακάτω.(εικόνα 1.4)



Εικόνα 1.4: διατάξεις χωρητικής και επαγωγικής ζεύξης [5]

Η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στο ηλεκτρικό και στο μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα δίνεται από τις σχέσεις [5]:

$$W_e = \frac{\epsilon_0 * E^2}{2} (1.4)$$

$$W_m = \frac{\mu_0 * H^2}{2} (1.5)$$

E,H: ένταση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα, ϵ_0 : ηλεκτρική επιτρεπτότητα, μ_0 : μαγνητική διαπερατότητα

Όταν το μέσο είναι ο αέρας.

$$\epsilon_0 = 8.854 * 10^{-12} \text{F/m}, \mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{H/m}$$

Παρατηρούμε ότι η διαφορά στις παραπάνω τιμές είναι της τάξης του 10^5 . Συνεπώς, η επαγωγική ζεύξη μπορεί να χειριστεί πολύ μεγαλύτερα ποσά ισχύος και γι' αυτό επιλέγεται ως τεχνολογία για ασύρματη μεταφορά ισχύος σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος, όπως π.χ. η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Εν τούτοις, η χωρητική ζεύξη έχει βρει χρήση σε εφαρμογές πολύ μικρής ισχύος ή ειδικές εφαρμογές, λόγω των παρακάτω πλεονεκτημάτων:

- Α) χαμηλές απώλειες, σε σύγκριση με αυτές που εμφανίζονται στα τυλίγματα των πηνίων
- Β) δεν υπάρχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το πεδίο συγκεντρώνεται σχεδόν αποκλειστικά μεταξύ των πλακών των πυκνωτών, κάτι που δεν κατορθώνεται σε ανάλογο βαθμό για την επαγωγική ζεύξη
- Γ) δεν προκαλούνται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
- Δ) διατηρείται η δυνατότητα ασύρματης μεταφοράς, ακόμα και δια μέσω μεταλλικού αντικειμένου, κάτι που είναι αδύνατο για το μαγνητικό πεδίο
- Ε) προκύπτουν σημαντικά οικονομικότερες διατάξεις.[5]

Εκτός από τις μεθόδους που αξιοποιούν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, υπάρχουν και άλλες, όπως π.χ. η ιδέα του Tesla να αξιοποιήσει τον αγωγίμο φλοιό της γης και την αγωγή ιονόσφαιρα σαν ένα κύκλωμα μεταφοράς [1]. Μελετάται ακόμα η χρήση ηχητικών και υπερηχητικών κυμάτων που θα μεταφέρουν ενέργεια, η οποία θα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα με τη βοήθεια πιεζοηλεκτρικών στοιχείων [6].

Εν κατακλείδι, όλες οι μέθοδοι έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο αναγκαίος συμβιβασμός μεταξύ επιπέδων ισχύος και απωλειών αναδεικνύει την επαγωγική ζεύξη ως κυρίαρχη, για αυτό και θα μελετηθεί εκτενέστερα παρακάτω, ενώ οι υπόλοιπες έχουν περιοριστεί σε ειδικές εφαρμογές. Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας (1.1) που συνοψίζει τα χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου [3].

Χαρακτηριστικά Πεδίου	Far Field		Near Field	
	laser	Μικροκύματα	Inductive Coupling	Capacitive Coupling
Ενέργεια	Ακτινοβολεί ενέργεια		Αποθηκεύει ενέργεια -μεταφέρει ενέργεια με επαγωγική ή χωρητική ζεύξη.	
Διάρκεια ζωής	Ακτινοβολεί μέχρι να απορροφηθεί		Σβήνει όταν η πηγή είναι απενεργοποιημένη.	
Αλληλεπίδραση	Μέτρηση του πεδίου ή μεταφορά ενέργειας δεν προκαλεί καμία μεταβολή στην πηγή		Μέτρηση του πεδίου ή μεταφορά ενέργειας προκαλεί μεταβολές σε ρεύματα τάσεις του κυκλώματος –πομπού.	
Σχήμα πεδίου	Σφαιρικά κύματα. Σε μακρινές αποστάσεις επίπεδα κύματα		Εξαρτάται αποκλειστικά από την πηγή	
Κυματική αντίσταση	Εξαρτάται αποκλειστικά από το μέσο διάδοσης		Εξαρτάται από την πηγή και το μέσο διάδοσης	
H/M ακτινοβολία		Σοβαρές επιδράσεις σε οργανισμούς	Παρατηρείται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	Δεν υπάρχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
Μεταφερόμενη Ισχύς	Μεταφορά τεράστιων ποσών ισχύος		Διαχειρίζεται μεγάλα ποσά ισχύος	Διαχειρίζεται πολύ μικρά ποσά ισχύος
Απόδοση	Μικρός συντελεστής απόδοσης		Υψηλές απώλειες	Ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες
	Ιδιαίτερα χαμηλός συντελεστής απόδοσης, λόγω της χαμηλής απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων που χρησιμοποιούν για τη λειτουργίας τους.			
Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές			Παρατηρούνται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές	Δεν παρατηρούνται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
Μέσο διάδοσης			Αδύνατη η ασύρματη μεταφορά μέσω μεταλλικού αντικειμένου	Δυνατότητα ασύρματης μεταφοράς μέσω μεταλλικού αντικειμένου
Κόστος Κατασκευής	Υψηλό αρχικό κόστος κατασκευής -ακριβός εξοπλισμός			Ιδιαίτερα οικονομικές διατάξεις
Εφαρμογές	1.Δορυφόροι ηλιακής ισχύος 2.Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε αγροτικές-αυτοκατοικημένες περιοχές		Εφαρμογές μεγάλης Ισχύος: Π.χ επαγωγική φόρτιση σε ηλεκτρικά οχήματα.	Εφαρμογές πολύ μικρής ισχύος.

1.3 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΖΕΥΞΗ

1.3.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Για να γίνει κατανοητή η αρχή λειτουργίας της επαγωγικής ζεύξης θα εξεταστεί αρχικά η αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής αξιοποιεί τους νόμους των Ampere και Faraday οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω στην ολοκληρωτική τους μορφή [7]:

Νόμος Ampere (νόμος διαρρεύματος):

$$\oint_l \vec{H} d\vec{r} = \int_s dI + \frac{d}{dt} \int_s \vec{D} d\vec{S} \quad (1.6)$$

Ο νόμος αυτός συνδέει το ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα κλειστό βρόχο με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται. Είναι επί της ουσίας ο νόμος που συνδέει ηλεκτρισμό με μαγνητισμό.

Νόμος Faraday (νόμος επαγωγής):

$$\oint_l \vec{E} d\vec{r} = -\frac{d}{dt} \int_s \vec{B} d\vec{S} \quad (1.7)$$

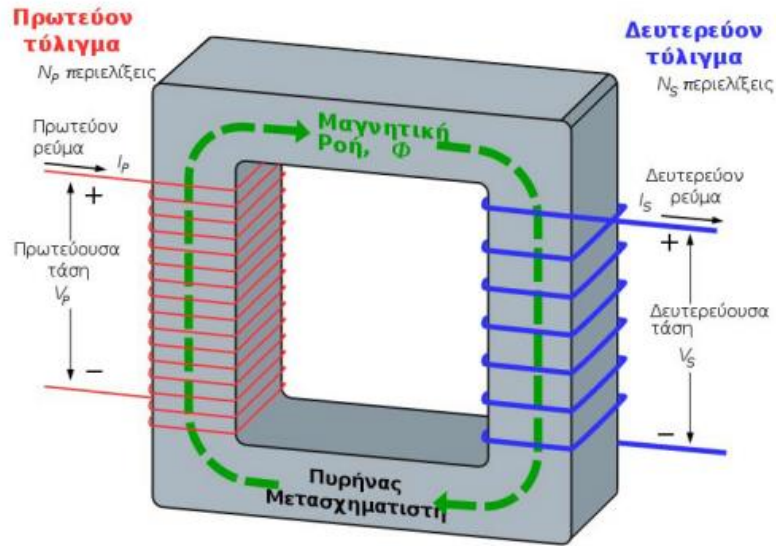
Ο νόμος αυτός δηλώνει ότι η ΗΕΔ (ηλεκτρεγερτική δύναμη) σε έναν βρόχο είναι ίση με την αρνητική χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής Φ

$$(\Phi = \int_s \vec{B} d\vec{S}) \quad (1.8)$$

που διέρχεται από επιφάνεια τερματιζόμενη στο βρόχο. Για ένα τύλιγμα με N ελίγματα ο νόμος Faraday γίνεται: $e = d\lambda/dt$, όπου $\lambda = N \cdot \Phi$ (λ : πεπλεγμένη με το τύλιγμα ροή), δηλαδή η επαγόμενη ΗΕΔ σε ένα ηλεκτρικό τύλιγμα είναι ίση με το ρυθμό μεταβολής της πεπλεγμένης με το τύλιγμα μαγνητικής ροής. Ο νόμος του Ampere γίνεται

$$\oint_l \vec{H} d\vec{r} = NI \quad (1.9)$$

,δηλαδή η ένταση του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των ελιγμάτων [8]. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνονται τα παραπάνω: (εικόνα 1.5)



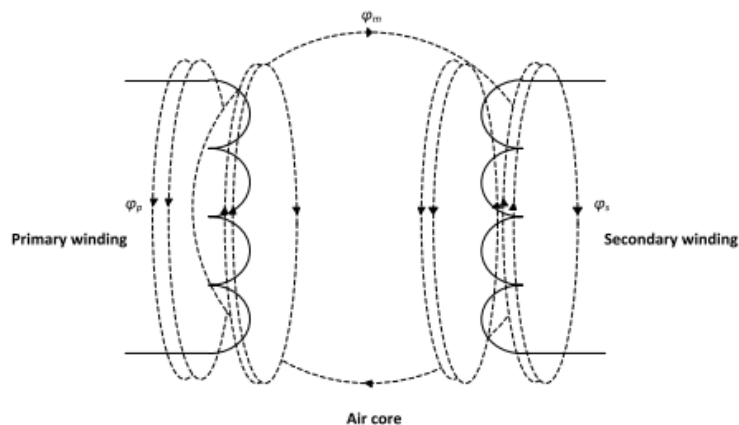
Εικόνα 1.5: Μετασχηματιστής [9]

Όπως φαίνεται, το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον τύλιγμα δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Η μαγνητική ροή ακολουθεί μια διαδρομή μέσω ενός σιδηρομαγνητικού πυρήνα προκειμένου να επάγει τάση ανάλογη με τον αριθμό ελιγμάτων του δευτερεύοντος τυλίγματος. Για κάθε υλικό, η μαγνητική αντίσταση που συναντά η μαγνητική ροή είναι:

$$R_{\sigma} = \frac{l}{\mu_0 * \mu_r * A} [8], (1.10)$$

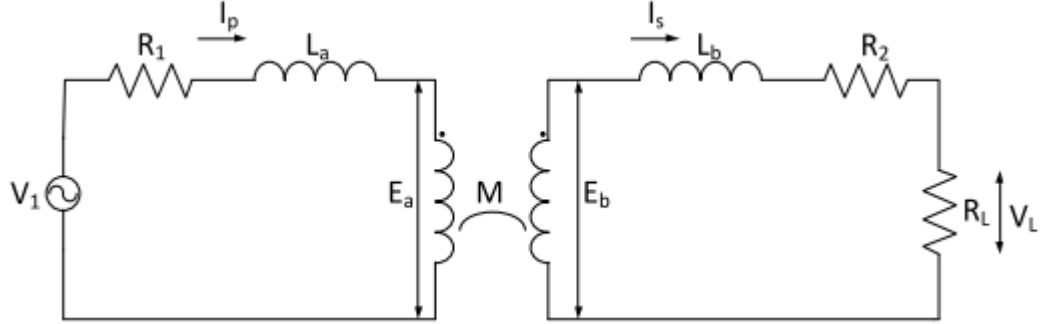
όπου l το μήκος της διαδρομής, A η διατομή του πυρήνα, μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού/αέρα και μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Για αυτό το λόγο κατασκευάζονται μετασχηματιστές με πυρήνες με πολύ μεγάλη τιμή μ_r (σιδηρομαγνητικά υλικά).

Σε ασύρματες εφαρμογές, εντούτοις, δεν είναι δυνατόν να υπάρχει σιδηρομαγνητικός πυρήνας μεταξύ των τυλιγμάτων. Έχουμε πυρήνα από αέρα, με σιδηρομαγνητικό υλικό μόνο στο εσωτερικό των τυλιγμάτων. Όπως γίνεται αντιληπτό η μαγνητική αντίσταση παίρνει πολύ μεγάλες τιμές, ενώ η απόδοση της διάταξης υφίσταται δραματική μείωση. Τότε, μέρος μόνο της μαγνητικής ροής συνδέει το πρωτεύον με το δευτερεύον (πεπλεγμένη ροή), ενώ η υπόλοιπη εμφανίζεται σαν διαρροή ροής στο πρωτεύον και στο δευτερεύον [10]. (εικόνα 1.6)



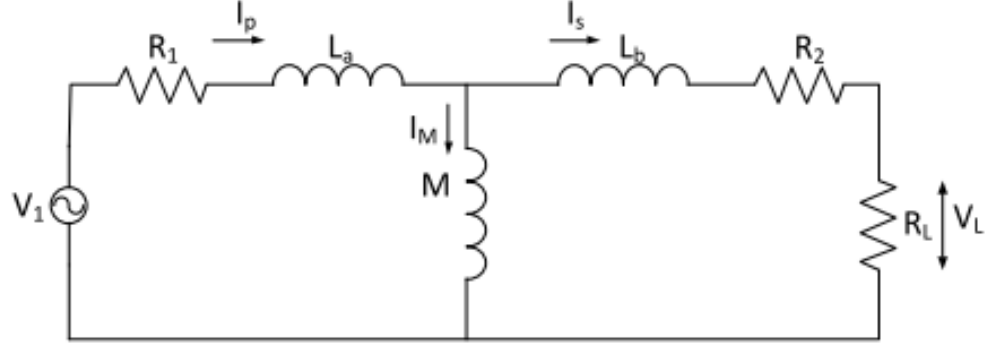
Εικόνα 1.6: Πεπλεγμένη ροή και διαρροές ροής σε μετασχηματιστή με πυρήνα αέρα [10]

Η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος έχει ως αποτέλεσμα μία αυτεπαγωγή σε σειρά L_a και στην αμοιβαία επαγωγή M . Αντίστοιχα για την αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος (L_b, M). Με L_a και L_b μοντελοποιούνται οι διαρροές, ενώ η ζεύξη επιτυγχάνεται μέσω της M . Θεωρώντας I_p και I_s τα ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα και R_L το φορτίο έχουμε για την παραπάνω περιγραφή την κυκλωματική αναπαράσταση: (εικόνα 1.7)



Εικόνα 1.7: Κύκλωμα μετασχηματιστή [10]

Ή, ισοδυνάμως, σύμφωνα με τη θεωρία συζευγμένων επαγωγέων: (εικόνα 1.8)



Εικόνα 1.8: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή [10]

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση όπως φαίνεται από την πηγή είναι:

$$Z_{eq} = R_1 + j\omega L_a + Z_p \quad (1.11)$$

όπου $Z_p = j\omega M / (j\omega L_b + R_2 + R_L)$, ή κατόπιν απλοποιήσεων

$$Z_p = j\omega M + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + R_L + j\omega(L_b + M)} \quad (1.12)$$

Προκύπτει τώρα το $I_p = V_1 / Z_{eq}$ και με διαιρέτη ρεύματος προκύπτει

$$I_s = I_p \frac{j\omega M}{R_2 + R_L + j\omega(L_b + M)} \quad (1.13)$$

άρα ο λόγος των ρευμάτων είναι

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{j\omega M}{R_2 + R_L + j\omega(L_b + M)} \quad (1.14)$$

ενώ ο συντελεστής απόδοσης είναι

$$\eta = \frac{I_s^2 * RL}{I_s^2 * RL + I_s^2 * R2 + I_p^2 * R1} \quad (1.15)$$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις το ρεύμα του δευτερεύοντος εξαρτάται τόσο από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή, όσο και από τη συχνότητα λειτουργίας. Ο λόγος των ρευμάτων αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας, μέχρι μια συχνότητα όπου επέρχεται κορεσμός. Με την υπόθεση ότι $\omega M \gg R2 + RL$, ο λόγος των ρευμάτων γίνεται

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{M}{Lb + M} \quad (1.16)$$

Οι συχνότητες στις οποίες επιτυγχάνεται κορεσμός είναι της τάξεως των δεκάδων kHz. Αυτό σημαίνει ότι για να λειτουργήσει αποδοτικά η παραπάνω διάταξη απαιτείται συχνότητα λειτουργίας ίση ή μεγαλύτερη από αυτή του κορεσμού. Ακόμα και έτσι, όμως ο λόγος των ρευμάτων παραμένει πολύ κάτω από τη μονάδα, και ως εκ τούτου ο συντελεστής απόδοσης πολύ χαμηλός [10]. Κι αν αυτό δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα σε εφαρμογές πολύ μικρής ισχύος ή σε εφαρμογές, όπου η απόσταση μεταξύ των τυλιγμάτων είναι πολύ μικρή (π.χ. ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες), σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος και σε εφαρμογές με σχετικά μεγάλη απόσταση-ακόμα και λίγα εκατοστά- μεταξύ των τυλιγμάτων (π.χ. ηλεκτρικά αυτοκίνητα) καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο ασύρματης μεταφοράς ενέργειας απαγορευτική.

Η εφαρμογή, όμως, του ηλεκτρικού συντονισμού κατά κύριο λόγο σε συνδυασμό με προσεκτική επιλογή των υλικών κατασκευής και βελτιώσεις στο σχεδιασμό της διάταξης μπορεί να ανεβάσει την απόδοση σε πολύ υψηλά επίπεδα. Παρ' όλα αυτά η επαγωγική ζεύξη (χωρίς συντονισμό) βρίσκει εφαρμογή σε διατάξεις μικρής ισχύος, λόγω της απλότητας στη σχεδίαση και κατασκευή και διότι είναι πολύ πιο οικονομική. Έχει επιπλέον το πλεονέκτημα της ρύθμισης του επιπέδου της τάσης στο δευτερεύον (μετασχηματιστές).

1.3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ – ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ

Έστω ότι έχουμε το παρακάτω κύκλωμα, που περιλαμβάνει πηνίο και πυκνωτή (κύκλωμα Thomson, εικόνα 1.9). Ο πυκνωτής είναι αρχικά φορτισμένος με τάση V_{c0} και σχηματίζεται μεταξύ των οπλισμών του ηλεκτρικό πεδίο με ενέργεια

$$E_{el} = \frac{C * V_{c0}^2}{2} \quad (1.17)$$

Μαγνητικό πεδίο προς το παρόν δεν υφίσταται. Στη συνέχεια, ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω του πηνίου, το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και έτσι παράγεται στο πηνίο μαγνητικό πεδίο. Τώρα η ηλεκτρική ενέργεια είναι

$$E_{el} = \frac{C * V^2}{2} \quad (1.18)$$

ενώ η μαγνητική

$$E_{magn} = \frac{L * i^2}{2} \quad (1.19)$$

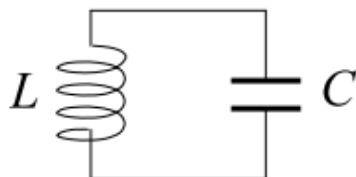
Όπως φαίνεται, κατά την εκφόρτιση του πυκνωτή μειώνεται η ηλεκτρική ενέργεια, ενώ αυξάνεται η μαγνητική. Αυτό συνεχίζεται έως ότου η ηλεκτρική ενέργεια μηδενιστεί. Τότε η μαγνητική ενέργεια θα είναι

$$E_{magn} = \frac{L * i_{o2}^2}{2} \quad (1.20)$$

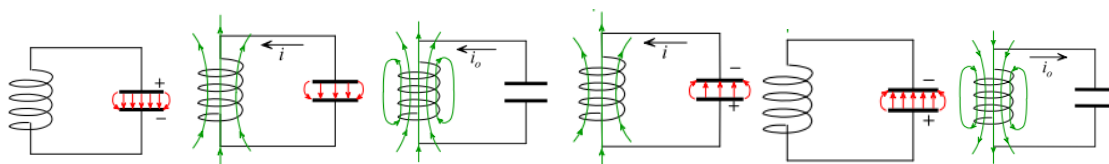
Το κύκλωμα, το οποίο εξακολουθεί να διαρρέεται από ρεύμα, οδηγεί τον πυκνωτή σε φόρτιση

αντίθετης πολικότητας από την αρχική. Τώρα είναι η ηλεκτρική ενέργεια αυτή που αυξάνεται, σε βάρος της μαγνητικής. Έτσι, έχουμε και πάλι την ηλεκτρική ενέργεια να δίνεται από τη σχέση (1.18) (όχι μέγιστη τιμή) και τη μαγνητική από τη σχέση (1.19) (όχι μέγιστη)

Η διαδικασία εξακολουθεί έως ότου όλη η ενέργεια να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται κατά την αντίθετη φορά, όπως φαίνεται και στο σχήμα.[11] (εικόνα 1.10)



Εικόνα 1.9: Κύκλωμα Thomson[11]



Εικόνα 1.10: Φάσεις ηλεκτρικής ταλάντωσης [11]

Το φαινόμενο που περιεγράφηκε είναι ο ορισμός της ηλεκτρικής ταλάντωσης, περιοδικής μετατροπής, δηλαδή, ηλεκτρικής σε μαγνητική ενέργεια και αντίστροφα. Η αντιστοιχία του με τη μηχανική ταλάντωση είναι απόλυτη. Για την ακρίβεια, ο παρακάτω πίνακας [12] δείχνει την αντιστοίχιση κάθε στοιχείου ή μεγέθους που παίρνει μέρος στο φαινόμενο με ένα σύστημα ελατηρίου – μάζας. Με βάση αυτήν την αντιστοίχιση, όλες οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη μηχανική ταλάντωση προσαρμόζονται πολύ εύκολα και στην ηλεκτρική.

Σύστημα Μάζας - Ελατηρίου	Κύκλωμα $L - C$
Απομάκρυνση x	Φορτίο q
Ταχύτητα v	Ένταση Ρεύματος i
Πλάτος Ταλάντωσης A	Μέγιστο φορτίο Q
Μέγιστη Ταχύτητα $v_{max} = \omega A$	Μέγιστη Ένταση Ρεύματος $I = \omega Q$
Δυναμική Ενέργεια ταλάντωσης $U = \frac{1}{2}Dx^2$	Ενέργεια Ηλεκτρικού Πεδιου του Πυκνωτή $U_E = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$
Κινητική Ενέργεια Ταλάντωσης $K = \frac{1}{2}mv^2$	Ενέργεια Μαγνητικού Πεδιου στο πηνίο $U_B = \frac{1}{2}Li^2$
Σταθερά k του ελατηρίου	Αντιστροφο της χωρητικότητας $\frac{1}{C}$
Μάζα m του σώματος	Συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνιού L
Περίοδος $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	Περίοδος $T = 2\pi\sqrt{LC}$

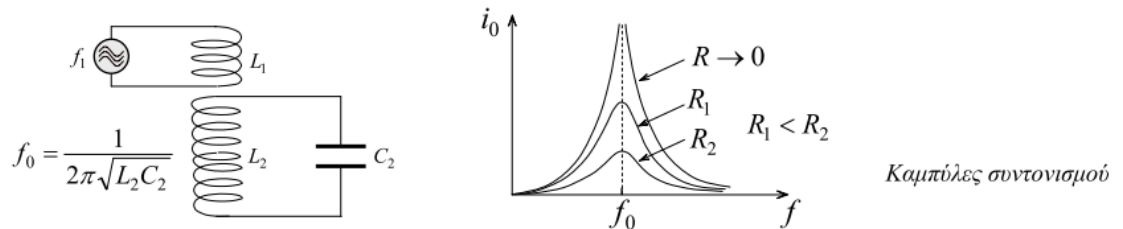
Πίνακας 1.2 [12]

Η παραπάνω ηλεκτρική ταλάντωση είναι ελεύθερη. Δίνεται, δηλαδή, μια αρχική διέγερση (εδώ, αρχική φόρτιση του πυκνωτή) και από εκεί και πέρα το σύστημα εξακολουθεί να ταλαντώνεται από μόνο του με συχνότητα

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [11] \quad (1.21)$$

Αυτή είναι η φυσική συχνότητα, ή ιδιοσυχνότητα του συστήματος και είναι προφανές ότι εξαρτάται μόνο από τα φυσικά του χαρακτηριστικά. Το κύκλωμα Thomson υποτέθηκε χωρίς απώλειες. Στην πράξη, όμως, υπάρχουν απώλειες, που οφείλονται κυρίως στην αντίσταση του σύρματος και σε πεδιακές απώλειες. Όλες οι απώλειες μοντελοποιούνται με μια ωμική αντίσταση, η οποία τοποθετείται συνήθως σε σειρά με το πηνίο. Σε αυτήν την περίπτωση, η ελεύθερη ταλάντωση είναι φθίνουσα, δηλαδή το πλάτος της μειώνεται (το άθροισμα της ηλεκτρικής και μαγνητικής ενέργειας δεν είναι πια σταθερό αλλά μειώνεται).

Προκειμένου να παραμείνει η ταλάντωση αμείωτη είναι αναγκαίο να παρέχεται συνεχώς ενέργεια (στην περίπτωση μας αυτό θα γίνει με μία πηγή τάσης). Τότε η ταλάντωση παραμένει αμείωτη, όμως το πλάτος της εξαρτάται από τη συχνότητα της πηγής ενέργειας. Πέρα από την συνεχή παροχή ενέργειας πρέπει να βρεθεί και ο βέλτιστος τρόπος με τον οποίο αυτή θα πραγματοποιηθεί. Ας φανταστούμε το μηχανικό ανάλογο μιας κούνιας. Ο γονιός παρέχει ενέργεια στην κούνια συνεχώς, αλλά με τη συχνότητα που του επιτάσσει η ίδια η κούνια. Άρα λοιπόν ο βέλτιστος τρόπος είναι η παροχή ενέργειας με συχνότητα ίση με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος. Αυτό το φαινόμενο λέγεται συντονισμός. Σε κύκλωμα χωρίς απώλειες το πλάτος στο συντονισμό γίνεται άπειρο. Το παρακάτω κύκλωμα Thomson τροφοδοτείται μέσω επαγωγής από κύκλωμα με πηγή και πηνίο. Προκειμένου να αποδώσει το μέγιστο δυνατό πλάτος πρέπει η πηγή να έχει συχνότητα ίση με την ιδιοσυχνότητα του κυκλώματος Thomson. [11]



Εικόνα 1.11: Κύκλωμα Thomson που τροφοδοτείται από επαγωγή και καμπύλες συντονισμού για διάφορες τιμές αντιστάσεων [11]

Για το βέλτιστο αποτέλεσμα, γίνεται και το ίδιο το πρωτεύον ένα κύκλωμα Thomson, που συντονίζεται. Πρέπει, λοιπόν οι φυσικές συχνότητες πρωτεύοντος και δευτερεύοντος να είναι ίδιες, κάτι που μπορεί να γίνει ιδιαίτερα δύσκολο κατά την κατασκευή. Στα ηλεκτρικά κυκλώματα ο συντονισμός επιτυγχάνεται με αντιστάθμιση. Ο όρος προέρχεται από την προσπάθεια στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας να μηδενιστεί η άεργος ισχύς, προσθέτοντας πυκνωτές κατάλληλης χωρητικότητας στο κύκλωμα. Ακριβώς το ίδιο γίνεται και εδώ. Πραγματικά, στο συντονισμό, η τάση και το ρεύμα έχουν μηδενική διαφορά φάσης. Στο πρωτεύον, ο στόχος της αντιστάθμισης είναι η επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, μηδενίζοντας την άεργο ισχύ, ενώ στο δευτερεύον η μεγιστοποίηση της ποσότητας ισχύος που θα μεταφερθεί- όπως περιγράφηκε.

Υπάρχουν τέσσερις τοπολογίες αντιστάθμισης (σειρά – σειρά(SS), σειρά – παράλληλα(SP), παράλληλα – σειρά(PS) και παράλληλα – παράλληλα(PP)) οι οποίες θα παρουσιαστούν αναλυτικά πιο κάτω.

Προκειμένου να γίνει ο διαχωρισμός μεταξύ συντονισμού και απλής επαγωγικής ζεύξης

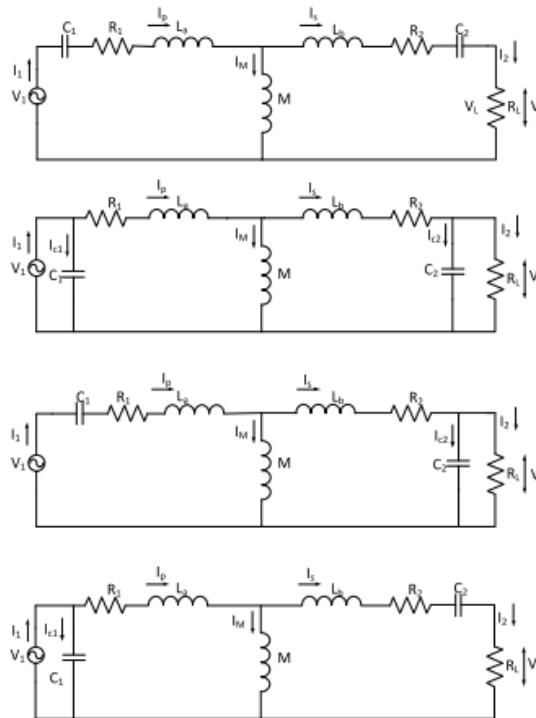
χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία οι όροι magnetic resonance coupling (μαγνητική ζεύξη συντονισμού) ή η εμπορική ονομασία witricity (wireless electricity) και electromagnetic induction ή magnetic induction ((ηλεκτρο)μαγνητική επαγωγή) αντίστοιχα. Λόγω των πλεονεκτημάτων του συντονισμού και συνεπώς της ευρείας καθιέρωσής του, για την περιγραφή του χρησιμοποιούνται ακόμα οι πιο γενικοί όροι inductive coupling/charging (επαγωγική ζεύξη/φόρτιση) ή και wireless coupling/ charging (ασύρματη ζεύξη/φόρτιση)

Τα κύρια πλεονεκτήματα του συντονισμού είναι [13]:

- Μεταφορά ενέργειας σε μεγαλύτερη απόσταση. Ικανοποιητική απόδοση επιτυγχάνεται, όταν η απόσταση είναι έως και δύο φορές όσο το μέγεθος των πηνίων.
- Μικρότερη ευαισθησία όταν παρεμβάλλονται αντικείμενα
- Μικρότερη ευαισθησία σε μεταβολή της θέσης του δευτερεύοντος

1.3.3 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα, υπάρχουν τέσσερις τοπολογίες αντιστάθμισης, ανάλογα με τον τρόπο συνδεσμολογίας του πυκνωτή αντιστάθμισης στο πρωτεύον και στο δευτερεύον, σε σειρά ή παράλληλα. Όσον αφορά τη μέθοδο επιλογής των πυκνωτών ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία: Πρώτα επιλέγεται ο πυκνωτής του δευτερεύοντος, ώστε να αντισταθμίζει, τόσο την αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος, όσο και τη αλληλεπαγωγή. Κατόπιν, επιλέγεται ο πυκνωτής του πρωτεύοντος. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως στόχοι επίτευξης η αντιστάθμιση της αυτεπαγωγής του πρωτεύοντος ή η αντιστάθμιση της επαγωγής ολόκληρου του κυκλώματος, το οποίο και προτιμάται καθώς συντελεί στην επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο. Παρακάτω φαίνονται οι τέσσερις τοπολογίες SS, PP, SP και PS αντίστοιχα: (εικόνα 1.21)



Εικόνα 1.12: Τοπολογίες Αντιστάθμισης SS, PP, SP, PS [10]

Εφ'όσον ο πυκνωτής του δευτερεύοντος πρόκειται να αντισταθμίζει τις M και L_b θα έχει την τιμή

$$C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 (L_b + M)} \quad (1.22)$$

εάν υποθέσουμε γνωστή τη συχνότητα συντονισμού. Με γνωστό το C_2 υπολογίζεται η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος και η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης του πρωτεύοντος. Να σημειωθούν τα εξής: α) το δευτερεύον είναι αντισταθμισμένο, άρα μακροσκοπικά φαίνεται σαν μια ωμική αντίσταση, β) Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση σε κατάσταση συντονισμού θα ισούται με το πραγματικό μέρος της τιμής της εφ'όσον όλο το κύκλωμα θα είναι αντισταθμισμένο. Οπότε, για τον υπολογισμό της αντικαθιστούμε στη σχέση που την υπολογίζει το ω με ω_0 και κρατάμε μόνο το πραγματικό της μέρος. Οι τιμές για την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση και τον πυκνωτή αντιστάθμισης του πρωτεύοντος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. [10] (πίνακας 1.3) Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης του δευτερεύοντος είναι ίδια και για τις τέσσερις τοπολογίες.

Topology	Equivalent circuit impedance (Z_{eq})	Primary compensation capacitance (C_1)
SS type	$Z_{eq(ss)} = \left(\frac{M^2 \omega^2}{j\omega(L_b + M) - \frac{j}{\omega C_2} + R_2 + R_L} \right) + j\omega(L_a + M) - \frac{j}{\omega C_1} + R_1$	$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 (L_a + M)}$
SP type	$Z_{eq(sp)} = \left(\frac{M^2 \omega^2}{j\omega(L_b + M) + R_2 + \frac{R_L}{1 + jR_L C_2 \omega}} \right) + j\omega(L_a + M) - \frac{j}{\omega C_1} + R_1$	$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 ((L_a + M) - (M^2 / (L_b + M)))}$
PS type	$Z_{eq(ps)} = \frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{R_1 + j\omega L_a + \frac{1}{j\omega M + \frac{1}{R_2 + R_L + j(\omega L_b - \frac{1}{\omega C_2})}}}}$	$C_1 = \frac{(L_a + M)}{\left(\frac{\omega_0^2 M^2}{R_L} \right)^2 + \omega_0^2 (L_a + M)^2}$
PP type	$Z_{eq(pp)} = \frac{1}{j\omega C_1 + \frac{1}{R_1 + j\omega L_a + \frac{1}{j\omega M + \frac{1}{j\omega L_b + R_2 + \frac{1}{j\omega C_2 + \frac{1}{R_L}}}}}}$	$C_1 = \frac{(L_a + M) - (M^2 / (L_b + M))}{\left(\frac{M^2 R_L}{(L_b + M)^2} \right)^2 + \omega_0^2 \left((L_a + M) - \frac{M^2}{(L_b + M)} \right)^2}$

Πίνακας 1.3 [10]

Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν υπό την προϋπόθεση ότι η συχνότητα συντονισμού είναι γνωστή. Στην πραγματικότητα, η επιλογή της κατάλληλης συχνότητας στην οποία πρέπει να συντονιστεί το σύστημα είναι μια διαδικασία πολλές φορές αρκετά περίπλοκη και απαιτεί τα παρακάτω βήματα [10]:
 Α) Μεταβάλλεται η συχνότητα μέσα σε ένα εύρος, αλλάζοντας παράλληλα τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, προκειμένου να υπάρχει πάντα συντονισμός σε όλες τις συχνότητες
 Β) Μοντελοποιείται το φορτίο σαν ωμική αντίσταση και υπολογίζεται ως $R = V^2 / P$
 Γ) Για μια συγκεκριμένη τιμή αντίστασης επιλέγεται η συχνότητα στην οποία η απόδοση γίνεται μέγιστη. Αυτό το σημείο θέλει προσοχή καθώς υπάρχει κορεσμός στην απόδοση μετά από μια ορισμένη συχνότητα. Επιλέγεται ως βέλτιστο το σημείο, όπου η παράγωγος του συντελεστή απόδοσης ως προς τη συχνότητα μηδενίζεται.

Εν κατακλείδι, η συχνότητα συντονισμού προκύπτει από συμβιβασμό της συχνότητας η οποία επιλέχθηκε με την παραπάνω διαδικασία, της συχνότητας στην οποία μπορούν να λειτουργήσουν τα

ηλεκτρονικά ισχύος και φυσικά του κόστους.

Όσον αφορά την επιλογή της καταλληλότερης τοπολογίας, πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός καθώς κάθε μια έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, βασισμένα στα χαρακτηριστικά της καθεμίας όπως παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. (πίνακας 1.4)

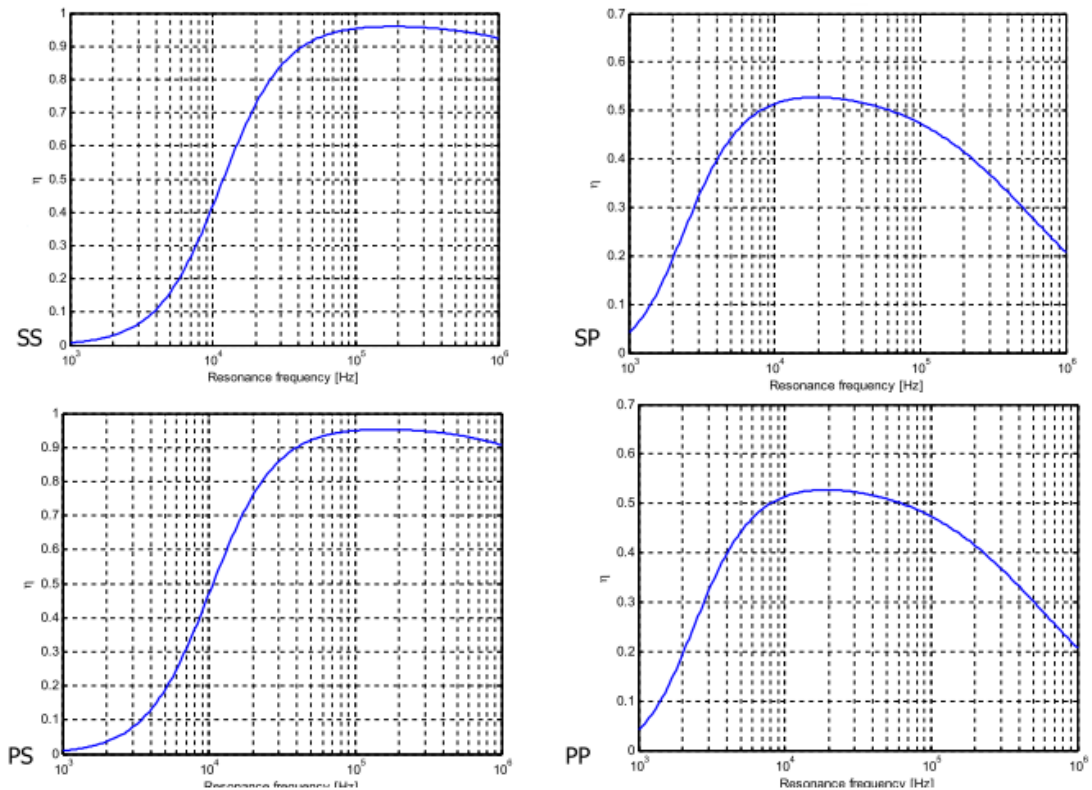
	SS	SP	PS	PP
Εξάρτηση της αντιστάθμισης πρωτεύοντος από το φορτίο	Δεν εξαρτάται	Δεν εξαρτάται	εξαρτάται	εξαρτάται
Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος σε συντονισμό	ελάχιστη	ελάχιστη	Μέγιστη	μέγιστη
AC πηγή για τη μεταφορά μέγιστης ισχύος	Πηγή τάσης	Πηγή τάσης	Πηγή υψηλής τάσης/ πηγή ρεύματος	Πηγή υψηλής τάσης/ πηγή ρεύματος
Μέγιστο σημείο συντελεστή απόδοσης	υψηλότερο	Χαμηλότερο	υψηλότερο	χαμηλότερο
Ανοχή της απόδοσης σε μεταβολή συχνότητας	χαμηλότερη	Υψηλότερη	χαμηλότερη	Υψηλότερη
Ανοχή του συντελεστή ισχύος σε μεταβολή συχνότητας	υψηλότερη	Χαμηλότερη	υψηλότερη	χαμηλότερη

Πίνακας 1.4 [10]

Όταν η αντιστάθμιση του πρωτεύοντος είναι σε σειρά το κύκλωμα μετατρέπεται από χωρητικό στις χαμηλές συχνότητες σε επαγωγικό στις υψηλές. Φυσικά, στο συντονισμό δεν είναι ούτε επαγωγικό ούτε χωρητικό. Εκεί η σύνθετη αντίσταση παίρνει την ελάχιστη τιμή της. Επίσης η αντιστάθμιση πρωτεύοντος είναι ανεξάρτητη του φορτίου, κάτι που είναι σημαντικό όταν υπάρχουν μεταβλητά φορτία. Γενικά, για την επιλογή μεταξύ των δύο τοπολογιών με αντιστάθμιση σειράς στο πρωτεύον λαμβάνονται υπ' όψη τα εξής: Η τοπολογία SP μεταφέρει μεγάλα ποσά ισχύος με χαμηλή τάση και

υψηλά ρεύματα, ενώ η SS χρειάζεται υψηλές τάσεις, αφού τα ρεύματα δεν μπορούν να πάρουν υψηλές τιμές σε χαμηλές τάσεις. Όταν μεταβάλλεται η συχνότητα προτιμάται SS τοπολογία καθώς ο συντελεστής ισχύος δεν επηρεάζεται. Ακόμα, παρουσιάζει υψηλότερο συντελεστή απόδοσης στη βέλτιστη συχνότητα συντονισμού και σε πολύ κοντινές στη βέλτιστη συχνότητες συντονισμού. Σε πιο απομακρυσμένες σε σχέση με τη βέλτιστη συχνότητες συντονισμού, εν τούτοις η SP έχει καλύτερη απόδοση.

Από την άλλη στην εγκάρσια αντιστάθμιση στο πρωτεύον, το κύκλωμα μετατρέπεται από επαγωγικό σε χωρητικό, με τη σύνθετη αντίσταση να παίρνει τη μέγιστη τιμή της στο συντονισμό. Επιλογή εγκάρσιας αντιστάθμισης πρωτεύοντος πρέπει να γίνεται μόνο όταν τα φορτία είναι σταθερά. Για την επιλογή των δύο τοπολογιών της κατηγορίας (PS και PP) γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις: Η τοπολογία PS έχει καλύτερη απόδοση από την PP για τη βέλτιστη συχνότητα συντονισμού ή συχνότητες συντονισμού πολύ κοντά της. Η PP πλεονεκτεί σε πιο απομακρυσμένες σε σχέση με τη βέλτιστη συχνότητες συντονισμού. Ακόμα η PP παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή σε μεταβολές συχνότητας όσον αφορά το συντελεστή ισχύος. [10] Η συσχέτιση του συντελεστή ισχύος με τη συχνότητα συντονισμού φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. (εικόνα 1.13)



Εικόνα 1.13: Συντελεστής απόδοσης για κάθε τοπολογία συναρτήσει της συχνότητας συντονισμού [14]

Στην πράξη, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να υπάρχει αποσυντονισμός από διάφορους παράγοντες όπως φυσική αλλοίωση των τυλιγμάτων, παρουσία υλικών με υψηλή επιτρεπτότητα ή και λάθος επιλογή των χωρητικοτήτων. Υπάρχουν δύο απλοί τρόποι με τους οποίους μπορούμε να επιτύχουμε συντονισμό. [10]

Α) Εξετάζοντας το ρεύμα ή την τάση του πρωτεύοντος. Αν η αντιστάθμιση πρωτεύοντος είναι σε σειρά, είδαμε ότι η σύνθετη αντίσταση γίνεται ελάχιστη και άρα το ρεύμα μέγιστο. Με σάρωση συχνοτήτων σε ένα εύρος βλέπουμε που γίνεται μέγιστο το ρεύμα και στη συχνότητα αυτή πραγματοποιείται

συντονισμός. Σε περίπτωση σταδίου περιορισμού ρεύματος (π.χ. για το ρεύμα εξόδου αναστροφέα) το ρεύμα θα παραμείνει σταθερό σε ένα εύρος συχνοτήτων. Επιλέγεται η χαμηλότερη συχνότητα από αυτές που έχουν μέγιστο ρεύμα. Όταν η αντιστάθμιση πρωτεύοντος είναι εγκάρσια, η σύνθετη αντίσταση μεγιστοποιείται στο συντονισμό. Λόγω ότι έχουμε πηγές ρεύματος παρατηρούμε σε μια σάρωση συχνοτήτων πότε θα πάρει η τάση την ελάχιστη τιμή της.

Β) Εξετάζοντας το συντελεστή ισχύος. Η πιο απλά διαπιστώνοντας με μια σάρωση συχνοτήτων πότε οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του πρωτεύοντος είναι σε φάση, όπως θα έπρεπε σε λειτουργία σε συντονισμό.

1.3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η ασύρματη – επαγωγική παροχή ισχύος μπορεί να εφαρμοστεί σε πληθώρα εφαρμογών. Υπάρχει δυνατότητα ασύρματης φόρτισης ή απευθείας ασύρματης τροφοδοσίας [15] – συνήθως σε εφαρμογές πολύ μικρής ισχύος/ οικιακές εφαρμογές. Ακολουθεί μια ενδεικτική κατηγοριοποίηση των εφαρμογών, ανάλογα με τη χρήση τους [15]. Έτσι έχουμε:

Καταναλωτικές εφαρμογές:

- *Φόρτιση φορητών συσκευών (κινητά, φορητοί υπολογιστές, χειριστήρια παιχνιδιών), ενώ είναι σε χρήση/κίνηση.
- *Απευθείας ασύρματη τροφοδοσία οικιακών συσκευών, όπως τηλεόραση, ηλεκτρικές κορνίζες, ηχεία κ.α. Τα πλεονεκτήματα είναι οικονομικά (εξαλείφεται η χρήση καλωδίων) και αισθητικά.
- *Απευθείας ασύρματη τροφοδοσία των περιφερειακών του Η/Υ (ποντίκι, μικρόφωνο κ.λ.π.)



Εικόνα 1.14: Ασύρματη τροφοδοσία τηλεόρασης / ασύρματη φόρτιση κινητού τηλεφώνου [16]

Βιομηχανικές εφαρμογές:

- *Απευθείας ασύρματη τροφοδοσία (αλλά και εγκαθίδρυση επικοινωνιακού καναλιού) προς μηχανήματα με κινητά μέρη (π.χ. ρομπότ)
- *Ασύρματη τροφοδοσία σε δυσπρόσιτα περιβάλλοντα (υποθαλάσσια, ορυχεία κ.λ.π.), όπου δεν μπορούν να τοποθετηθούν καλώδια, ή αυτά έχουν πολύ ακριβές μονώσεις.
- *Ασύρματη τροφοδοσία αισθητήρων, με αποτέλεσμα οικονομικό όφελος από τη χρήση ακριβών μπαταριών.
- *Ασύρματη φόρτιση φορητών μηχανών, αυτόματων οχημάτων και ασύρματων εργαλείων.

Μεταφορικές εφαρμογές:

- *Ασύρματη φόρτιση οχημάτων ειδικής χρήσης (βιομηχανικά, αμαξίδια γκολφ)

*Ασύρματη φόρτιση υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων δημόσιας και ιδιωτικής χρήσης. Τα κυριότερα από τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής.

A) Διευκόλυνση του χρήστη. Δεν υπάρχουν καλώδια, καθιστώντας το προϊόν πιο ελκυστικό.

B) Ασφαλής φόρτιση χωρίς κινδύνους ηλεκτροπληξίας, ακόμα και σε επικίνδυνες καιρικές συνθήκες (π.χ. βροχή).

Γ) Καθώς η τάση είναι η φόρτιση κατά την κίνηση, με ασύρματους φορτιστές- «πρωτεύοντα»- φυτεμένους στους δρόμους, η ασύρματη φόρτιση θα συντελέσει σε πολύ μεγαλύτερη αυτονομία με μικρότερες μπαταρίες.



Εικόνα 1.15: Ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Ιατρικές εφαρμογές:

*Ασύρματη φόρτιση της μπαταρίας σε ιατρικά εμφυτεύματα, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη νέας εγχείρησης για αντικατάσταση της μπαταρίας (π.χ. βηματοδότες).



Εικόνα 1.16: Ασύρματη φόρτιση ιατρικών εμφυτευμάτων

Στρατιωτικές εφαρμογές:

*Ασύρματη φόρτιση φορητών συσκευών, αισθητήρων και μη επανδρωμένων οχημάτων και αεροσκαφών.



Εικόνα 1.17: Ασύρματη φόρτιση στρατιωτικού εξοπλισμού

Θεωρώντας ότι η χαμηλή ισχύς έχει εύρος ως τα 50 W, ενώ η υψηλή ξεκινά από τα 50W και φτάνει ως αρκετά kW, κατασκευάζεται ο παρακάτω πίνακας που συνοψίζει αυτά που αναφέρθηκαν. (πίνακας 1.5)

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	ΕΙΔΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ				ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ			ΙΣΧΥΣ	
	Καταναλωτής	Βιομηχανία	Μεταφορές	Στρατός	Ιατρικά	Αστυνομική φύλαξη	Αστυνομική προφύλαξη	Υψηλής ισχύος	Χαμηλής ισχύος
Φορητές ηλεκτρονικές συσκευές	✓					✓			✓
Οικιακές συσκευές Αισθητήρες	✓						✓		✓
Υβριδικά/ ηλεκτρικά οχήματα		✓	✓	✓		✓	✓	✓	
Ιατρικά εμφυτεύματα					✓	✓			✓
Φορητές μηχανές/ εργαλεία		✓		✓		✓	✓	✓	✓
Μηχανές σε οπρόσιτα περιβάλλοντα		✓		✓			✓	✓	

Πίνακας 1.5

1.4 ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

1.4.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

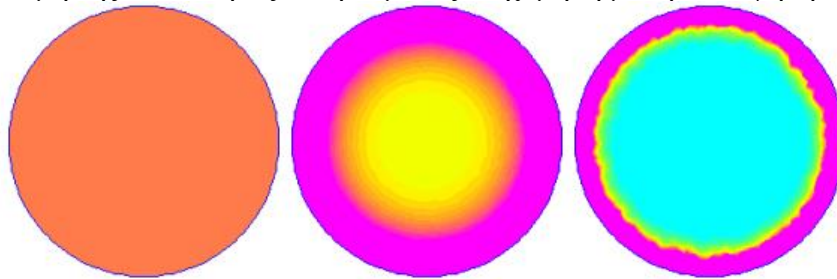
Πολύ σημαντική είναι η σωστή επιλογή των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών της διάταξης. Με τον όρο κατασκευαστικά χαρακτηριστικά εννοούμε 1^{ον}: το είδος των καλωδίων που θα χρησιμοποιηθεί στα τυλίγματα και η γεωμετρία τους 2^{ον}: το υλικό των πλακών στις οποίες θα τοποθετηθούν τα τυλίγματα, ώστε να υποβοηθήσουν τον πυρήνα αέρα. Όλα τα παραπάνω επιδρούν στη απόδοση της διάταξης.

1.4.1.1 ΕΙΔΟΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

Είδαμε στα παραπάνω πως για να λειτουργήσει ικανοποιητικά μια διάταξη επαγωγικής ζεύξης πρέπει να λειτουργεί σε συχνότητα δεκάδων χιλιάδων Hz. Για τη λειτουργία σε συντονισμό οι συχνότητες αυξάνονται περαιτέρω. Σε υψηλές συχνότητες εμφανίζεται το επιδερμικό φαινόμενο[17]. Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η πυκνότητα του ρεύματος παρουσιάζει ανομοιογένεια, ώστε να γίνεται μεγάλη στο φλοιό και μικρή στο εσωτερικό του αγωγού. Έχει άμεση εξάρτηση από τη συχνότητα. Όσο αυξάνει η συχνότητα γίνεται πιο αισθητό. Το βάθος στο οποίο η πυκνότητα του ρεύματος πέφτει στο 1/e της πυκνότητας στην επιφάνεια δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu r}} \quad (1.23)$$

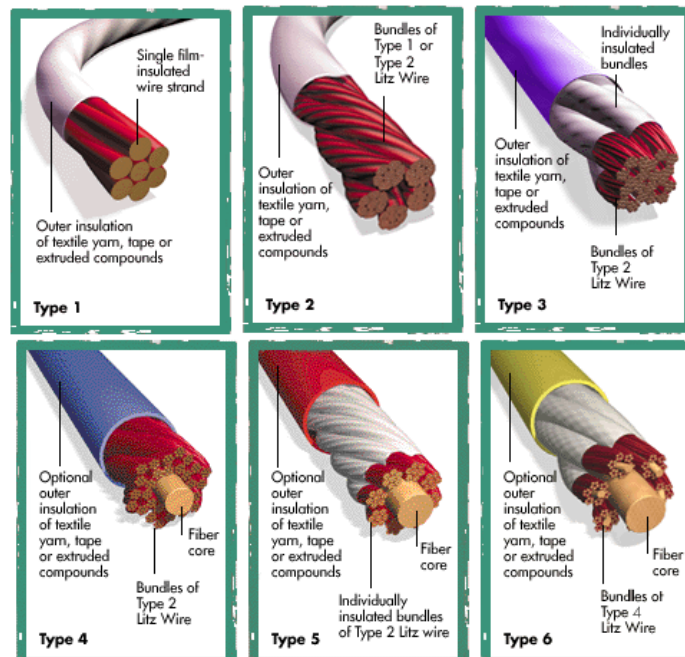
όπου ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού. Φαίνεται από την παραπάνω σχέση ότι καθώς αυξάνεται η συχνότητα το βάθος μικραίνει πλησιάζοντας στην επιφάνεια. Στην παρακάτω εικόνα (1.18) φαίνεται η κατανομή της πυκνότητας του ρεύματος σε χαμηλή μέση και υψηλή συχνότητα.

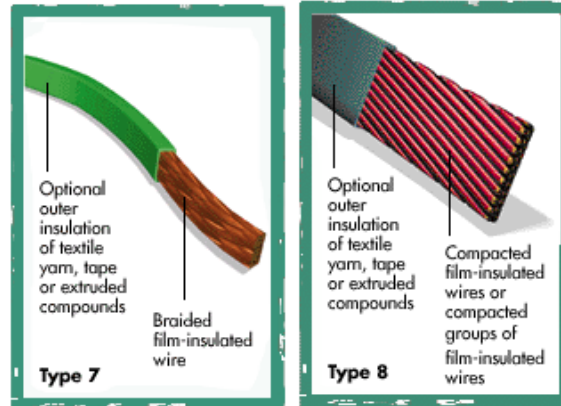


Εικόνα 1.18: Κατανομή της πυκνότητας ρεύματος σε χαμηλή μέση και υψηλή συχνότητα [17]

Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δραματική αύξηση της ac αντίστασης των αγωγών, ιδιαίτερα όταν αυτοί τοποθετούνται παράλληλα ο ένας δίπλα στον άλλο όπως τα ελίγματα ενός τυλίγματος, με φυσικό επακόλουθο τη μείωση της απόδοσης. Το πρόβλημα περιορίζεται με τη χρήση ενός ειδικού τύπου καλωδίου, του καλωδίου Litz.

Το καλώδιο Litz περιέχει πολλά λεπτά σύρματα, το καθένα από τα οποία είναι μονωμένο. Τα σύρματα έχουν μικρότερο διάμετρο από το βάθος στο οποίο εμφανίζεται το επιδερμικό φαινόμενο, ενώ παράλληλα είναι συνεστραμμένα, ώστε να περνάει το καθένα τόσο από το κέντρο του καλωδίου, όσο και από την επιφάνειά του, εξασφαλίζοντας ότι από όλα θα περάσει το ίδιο ρεύμα. Σε σύγκριση με τα συνήθη καλώδια το καλώδιο Litz παρουσιάζει πολύ μικρότερη ac αντίσταση στις υψηλές συχνότητες.

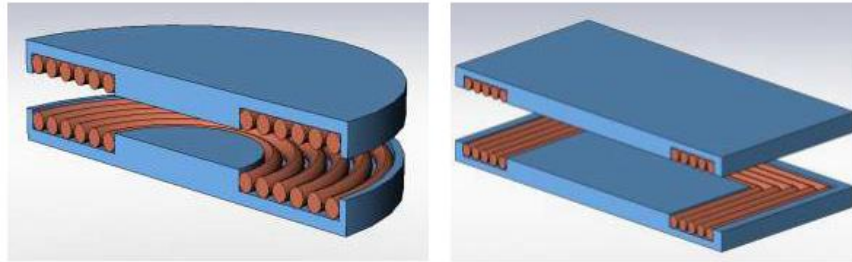




Εικόνα 1.19: Τύποι καλωδίων Litz [18]

1.4.1.1.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορα σχήματα, εκ των οποίων επικρατέστερα είναι τα κυκλικά, τα τετραγωνικά/ ορθογωνικά, τα τριγωνικά και ελικοειδή όλων των παραπάνω σχημάτων. Εν γένει υπάρχει ο διαχωρισμός στις εξής κατηγορίες: κυκλικά (circular) και γωνιακά (angular)[19] (εικόνα 1.20), κυριότερος εκπρόσωπος των οποίων είναι τα ορθογωνικά.



Εικόνα 1.20: Κυκλικά και ορθογωνικά τυλίγματα με σιδηρομαγνητικό πυρήνα [20]

Η κυριότερη διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών είναι ότι στα μεν κυκλικά η μεταφορά ενέργειας πραγματοποιείται στο κέντρο του τυλίγματος, σε αντίθεση με τα γωνιακά, τα οποία μεταφέρουν ισχύ από τις γωνίες. Τα κυκλικά τυλίγματα πλεονεκτούν από άποψη απόδοσης, καθώς παρουσιάζουν τη μικρότερη δυνατή ακτινοβολία. Τα ορθογωνικά υστερούν σε αυτόν τον τομέα, έχουν όμως ανοχή σε έλλειψη ευθυγράμμισης, χωρίς να επηρεάζεται ιδιαίτερα η απόδοσή τους κάτι που φαίνεται χρήσιμο σε εφαρμογές, όπως π.χ. φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

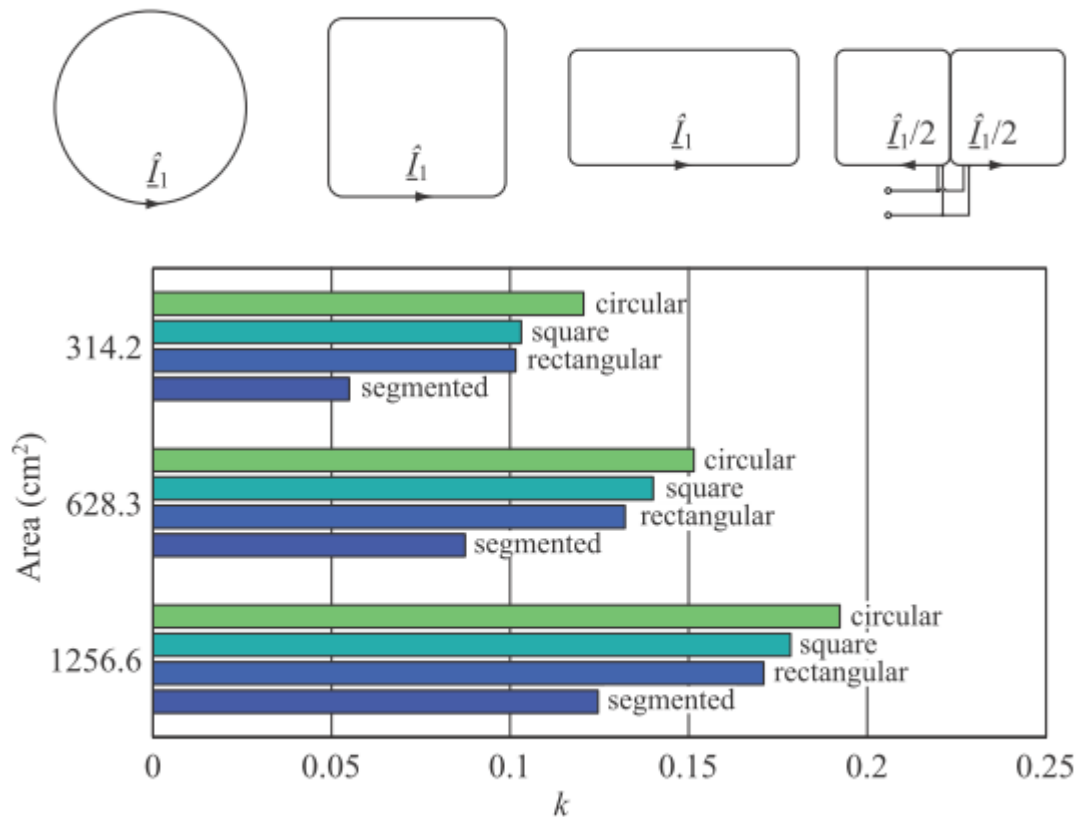
Σήμερα οι αυτοκινητοβιομηχανίες που έχουν προχωρήσει σε κατασκευή ηλεκτρικών αυτοκινήτων με δυνατότητα ασύρματης φόρτισης είναι μοιρασμένες ανάμεσα στα δύο παραπάνω είδη τυλιγμάτων.

Ενδεικτικά παρατίθενται τα αποτελέσματα μιας προσομοίωσης [21] που δείχνουν την εξάρτηση του συντελεστή ζεύξης (ο συντελεστής ζεύξης είναι ένας παράγοντας που δείχνει το ποσοστό της αμοιβαίας επαγωγής ως προς τις αυτεπαγωγές του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Δίνεται από τη σχέση

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_a \cdot L_b}} \quad (1.24)$$

και σχετίζεται άμεσα με το συντελεστή απόδοσης) από το σχήμα του τυλίγματος για δεδομένο μέγεθος αγωγών. Τα σχήματα είναι κυκλικό τετραγωνικό, ορθογωνικό και κατατμημένο ορθογωνικό (εικόνα

1.21)



Εικόνα 1.21: Σύγκριση σχημάτων τυλιγμάτων για δεδομένο μέγεθος [21]

Έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία και τυλίγματα με πιο πολύπλοκα σχήματα. Δεν μπορεί να βγει ένα γενικό συμπέρασμα καθώς μεταβάλλονται πολλές παράμετροι. Για κάθε νέα διάταξη γίνεται σύγκριση με μια επικρατούσα. Φαίνεται, πάντως, πως το σχήμα αυτό καθαυτό έχει μικρή επίδραση σε σχέση με τους υπόλοιπους παράγοντες.

Άλλα αποτελέσματα που δείχνουν να έχουν μεγαλύτερη επίδραση είναι τα παρακάτω:

- Μείωση της εσωτερικής ακτίνας του τυλίγματος οδηγεί σε αύξηση της τιμής του συντελεστή ζεύξης
- Ο συντελεστής ζεύξης παίρνει τη μέγιστη δυνατή τιμή του, σε συγκεκριμένο μέγεθος του τυλίγματος – πομπού, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος του τυλίγματος – συλλέκτη.
- Όσο μεγαλύτερη η απόσταση του πρωτεύοντος με το δευτερεύον, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η διαφορά στα μεγέθη των τυλιγμάτων.

Ο συντελεστής ποιότητας Q είναι ένας παράγοντας που προσεγγίζεται από τη σχέση

$$Q \approx \frac{\omega_0 * L}{R_{ac}} \quad (1.25)$$

Δε σχετίζεται με τη μαγνητική ζεύξη, όπως ο k αλλά σχετίζεται και αυτός με το συντελεστή απόδοσης (στην πραγματικότητα ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται από το γινόμενο kQ), καθώς συσχετίζει την επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων με την αντίστασή τους. Βλέπουμε ακόμα ότι μεγαλώνει με την αύξηση της συχνότητας παρά το γεγονός ότι οι R_{ac} απώλειες γίνονται μεγαλύτερες. Για δεδομένο μέγεθος τυλιγμάτων, λεπτότερο καλώδιο οδηγεί σε περισσότερα ελλείγματα. Δεδομένου ότι η επαγωγική

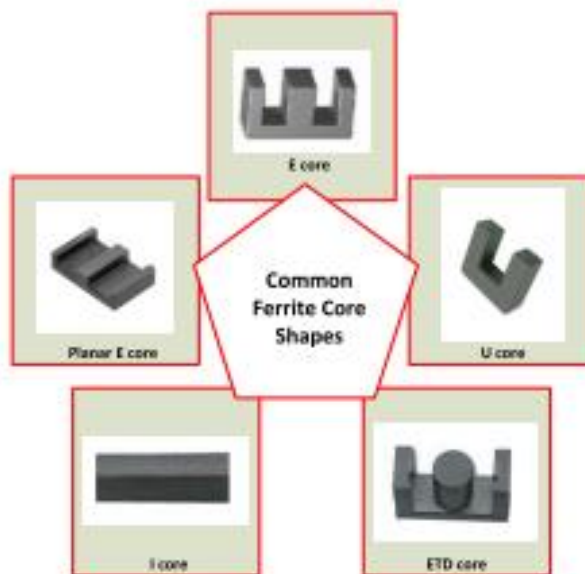
αντίδραση είναι ανάλογη του τετραγώνου των ελιγμάτων, ενώ η αντίσταση ac ανάλογη του κύβου τους, αυτή η διαδικασία (αύξηση του αριθμού ελιγμάτων για δεδομένο μέγεθος τυλίγματος) οδηγεί σε μείωση του συντελεστή ποιότητας ανάλογη με τον αντίστροφο του αριθμού των ελιγμάτων.

1.4.1.2 ΠΥΡΗΝΑΣ

Είδαμε πιο πάνω έναν πυρήνα, κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό με μεγάλη επιτρεπτότητα, ο οποίος παρείχε στη μαγνητική ροή ένα μονοπάτι χαμηλής μαγνητικής αντίστασης από το πρωτεύον στο δευτερεύον (εικόνα 1.5) Ο πυρήνας κατασκευάζεται στους μετασχηματιστές κυρίως από σίδηρο. Στις διατάξεις που μας ενδιαφέρουν, ο πυρήνας είναι αέρας. Εν τούτοις, μπορεί να τοποθετηθεί ένα μικρό μέρος σιδηρομαγνητικού πυρήνα στα τυλίγματα (όπως φαίνεται στην εικόνα 1.16) προκειμένου να «κατευθύνει» τη μαγνητική ροή και να μειώσει τις διαρροές [21]. Από τα σιδηρομαγνητικά υλικά, καταλληλότεροι είναι οι φερρίτες(ferrites). Οι φερρίτες είναι οξείδια του σιδήρου με πιο γνωστό το ορυκτό μαγνητίτη (Fe_3O_4). Οι φερρίτες πλεονεκτούν, διότι έχουν καλή συμπεριφορά στις υψηλές συχνότητες, ανθεκτικότητα σε υπερθέρμανση (προκαλείται κυρίως λόγω των δινορευμάτων) και ανθεκτικότητα σε διάβρωση [10]. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πυρήνων από φερρίτη, οι πιο κοινοί εκ των οποίων είναι

- Τύπου E
- Τύπου E επίπεδοι
- Τύπου I
- Τύπου U
- Τύπου ETD

και παίρνουν την ονομασία τους από το σχήμα τους.



Εικόνα 1.22: Τα πιο κοινά σχήματα πυρήνων από φερρίτη[10]

Η επιλογή του καταλληλότερου τύπου φερρίτη έχει να κάνει με διάφορους παράγοντες, όπως το ποσό της ενέργειας που πρέπει να μεταφερθεί και η συχνότητα συντονισμού η οποία έχει επιλεγεί [10]. Οι φερρίτες συντίθεται προκειμένου να έχουμε τελικά μια συγκεκριμένη γεωμετρία για τα τυλίγματα.

Υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης πυρήνα φερρίτη στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον ή και στα δύο.

1.4.2 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες διατάξεις που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία για επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Αρχικά παρουσιάζονται τέσσερις διατάξεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (εικόνες (1.23), (1.25), (1.26), (1.27)). Οι διατάξεις αυτές έχουν υλοποιηθεί πειραματικά. Εν συνεχεία παρουσιάζονται τρεις βιομηχανικές εφαρμογές (εικόνες (1.28), (1.29), (1.30))

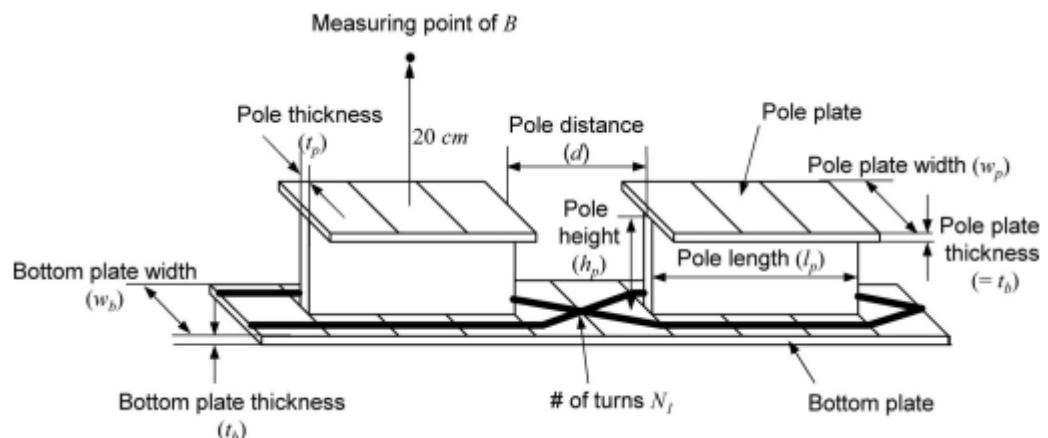
Διατάξεις στη βιβλιογραφία με πειραματικές εφαρμογές

(A)

Η πρώτη διάταξη [22] περιλαμβάνει μια στενή λωρίδα παροχής ισχύος πλάτους 10 cm και μαγνητικούς πόλους εναλλασσόμενης πολικότητας κατά μήκος του δρόμου. Οι πόλοι συνδέονται μεταξύ τους με πυρήνες φερρίτη. Η διάταξη, λόγω του χαρακτηριστικού της σχήματος (εικόνα 1.24) ονομάζεται διάταξη τύπου I. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρωτεύοντος της συγκεκριμένης διάταξης είναι τα ακόλουθα:

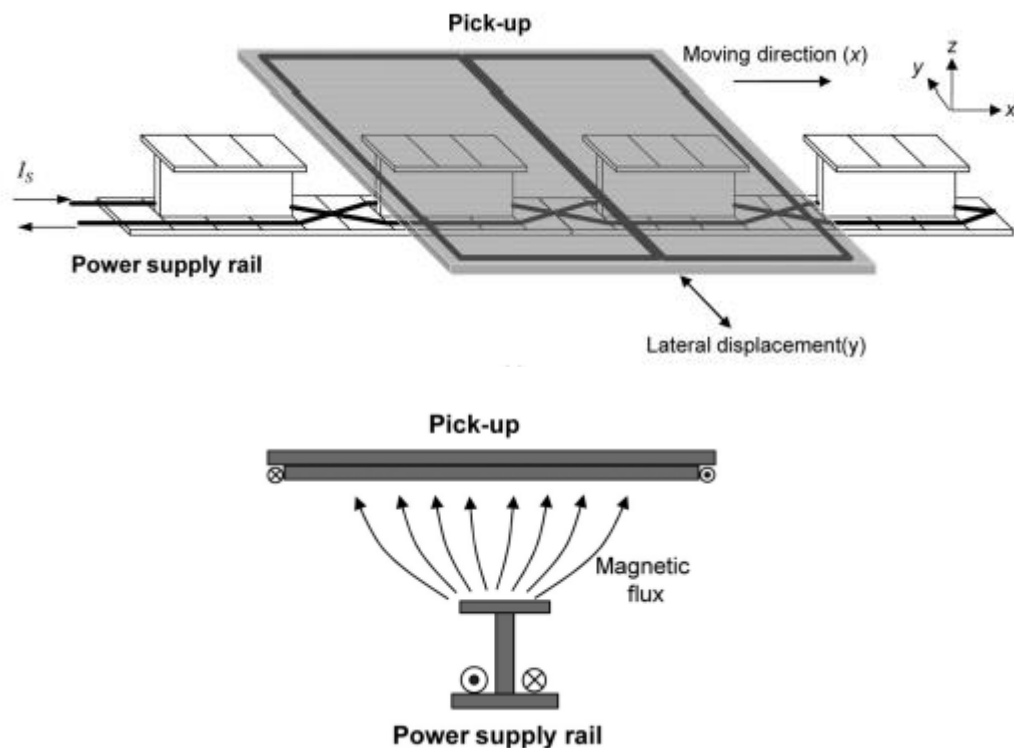
Απόσταση μεταξύ των πόλων (d)	20cm
Μήκος πόλου (l_p)	30cm
Πάχος πόλου (t_p)	2cm
Πλάτος «πιάτου» πόλου (w_p)	7cm
Πλάτος βάσης πόλου (w_b)	10cm
Πάχος βάσης πόλου (t_b)	1cm
Αριθμός ελιγμάτων (N_1)	4

Πίνακας 1.6



Εικόνα 1.23: Διάταξη επαγωγικής φόρτισης[22]

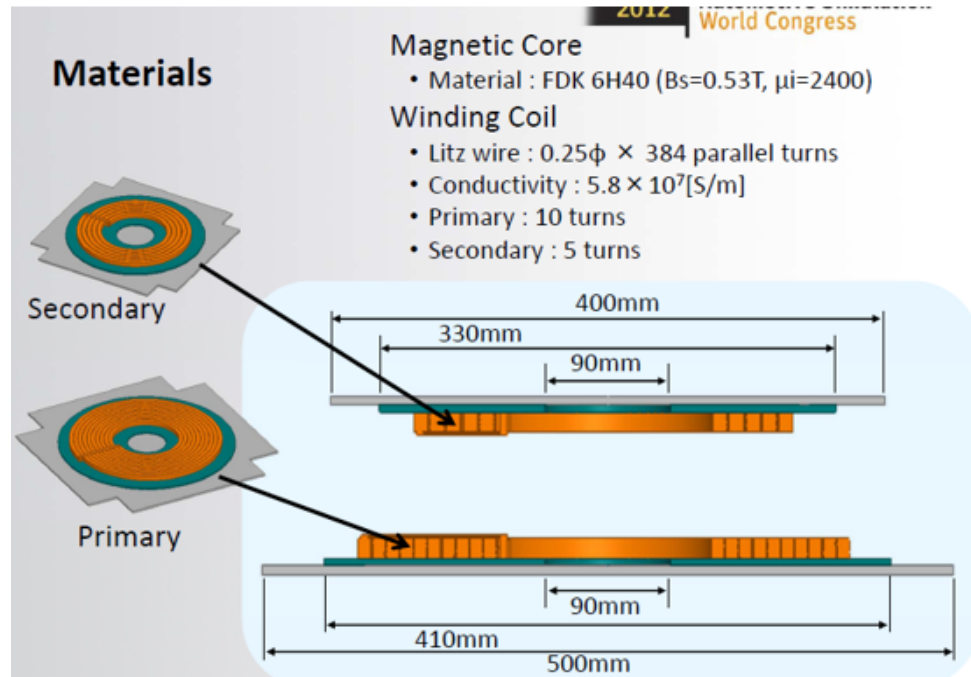
Όσον αφορά το δευτερεύον (pick-up) θα έχει πλάτος 80 και μήκος 100cm. Το διάκενο αέρα μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα είναι στα 20 cm, ενώ η πλευρική μετατόπιση φτάνει τα 24 cm. Η διάταξη παρέχει μέγιστη ισχύ 35 kW, με μέγιστη απόδοση 74% στα 27 kW. Η συγκεκριμένη διάταξη αντιμετωπίζει αποτελεσματικά το πρόβλημα τόσο του ισχυρού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται εις βάρος των πεζών στη γύρω περιοχή (λόγω ακύρωσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από την αντίθετη πολικότητα γειτονικών πόλων), όσο και της πλευρικής μετατόπισης που αυξάνεται σημαντικά, δίνοντας τη δυνατότητα για πιο ελεύθερη οδήγηση. Παρακάτω (εικόνα 1.24) φαίνεται συνολικά η διάταξη, καθώς και η κατεύθυνση της μαγνητικής ροής από το πρωτεύον στο δευτερεύον.



Εικόνα 1.24: Διάταξη επαγωγικής φόρτισης[22] και κατεύθυνση μαγνητικής ροής

(B)

Μια άλλη διάταξη που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία είναι αυτή της εικόνας 1.25.[23] Στην εικόνα φαίνονται τόσο οι διαστάσεις όσο και το υλικό των πυρήνων, ο τύπος των καλωδίων και ο αριθμός των ελιγμάτων στο πρωτεύον και το δευτερεύον.

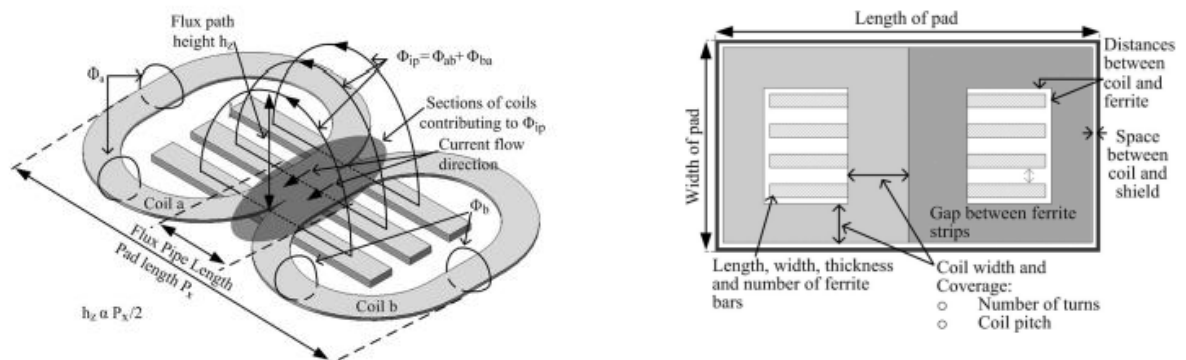


Εικόνα 1.25: Διάταξη επαγωγικής φόρτισης[23]- Γεωμετρία, διαστάσεις, κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Η διάταξη αποδίδει 20kW σε συχνότητα 20kHz με τάση 400V.

(Γ)

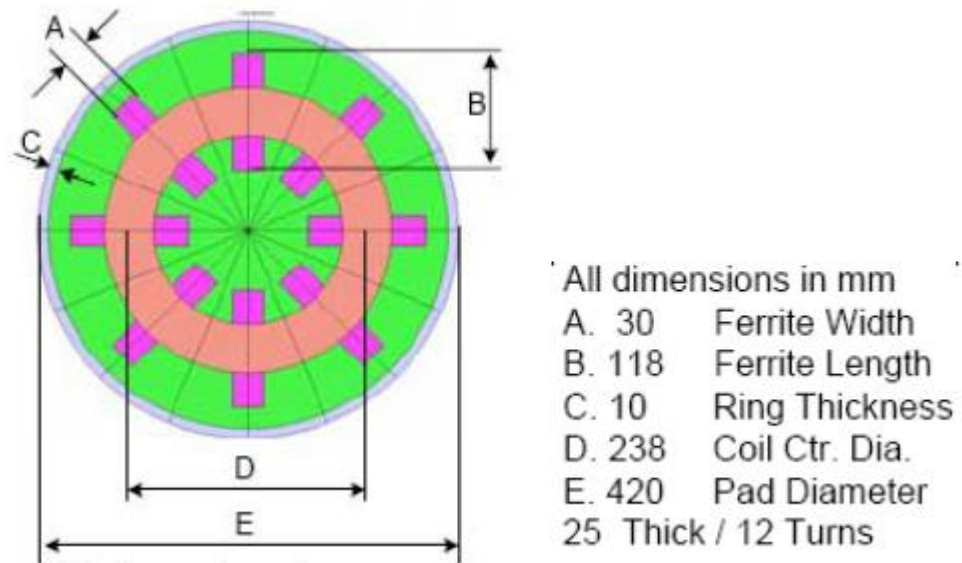
Υπάρχει ακόμα αναφορά στη βιβλιογραφία σε μια διάταξη – παραλλαγή της κυκλικής που ονομάζεται double d (DD) [24], παρέχοντας μια ζώνη φόρτισης 5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη κυκλική γεωμετρία. Ενδεικτικά, όσον αφορά τις διαστάσεις, αναφέρεται ότι μια διάταξη DD 0,3l τ.μ. παρέχει ισχύ 2kW σε μία περιοχή 540x800 mm με διάκενο αέρα στα 200mm.



Εικόνα 1.26: Διάταξη επαγωγικής φόρτισης[24] Γεωμετρία και κατεύθυνση μαγνητικής ροής

(Δ)

Μια άλλη διάταξη παρουσιάζεται πιο κάτω, μαζί με τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά[25]. Πρόκειται για μια διάταξη οικιακής χρήσης, που παίρνει τη συχνότητα του δικτύου και την μετατρέπει σε συχνότητα εύρους 5-50 kHz. Η τάση λειτουργίας είναι αυτή του δικτύου (230 V). Η διάταξη μεταφέρει ισχύ 2kW.

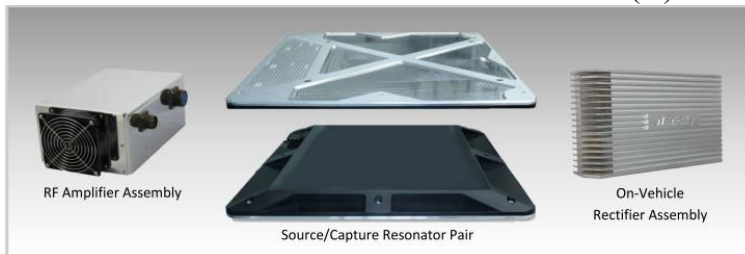


Εικόνα 1.27: Διάταξη επαγωγικής φόρτισης[25] Γεωμετρία και διαστάσεις

Η γεωμετρία της διάταξης είναι ίδια τόσο για το πρωτεύον, όσο και για το δευτερεύον, με την περισσότερη μαγνητική ροή να περιέχεται στην κυλινδρική περιοχή που δημιουργείται με βάσεις το πρωτεύον και το δευτερεύον.

Βιομηχανικές εφαρμογές

(A).



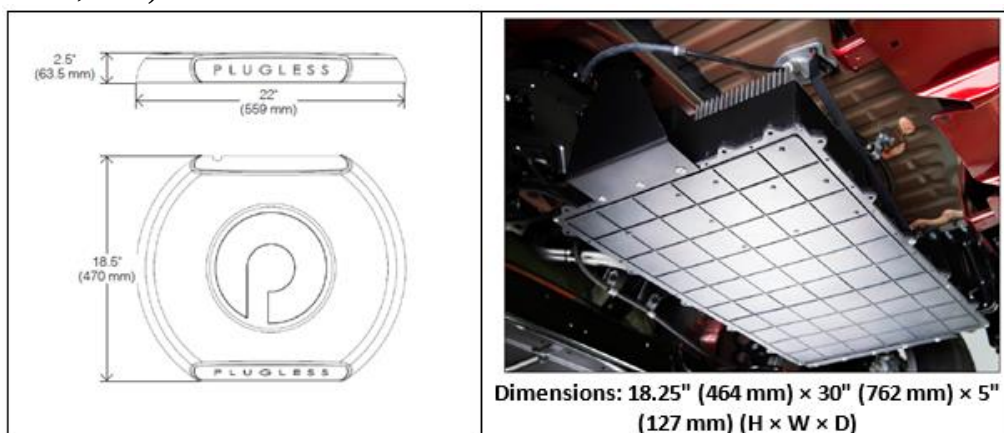
Attribute	Specifications
Operating Frequency	145 kHz, nominal
Lateral Positional Tolerance	±20 cm in vehicle side to side axis ±10 cm in vehicle bumper to bumper axis
Output Power	DC: 300 watts-3.3 kilowatts, continuously variable
Output voltage	DC: 350 VDC- 400 VDC at 3.3 kW, 18 cm resonator-resonator distance
Physical Dimensions	
Source Module Enclosure	50 cm x 50 cm x 3.75 cm; 12.5 kg
Capture Module Enclosure	50 cm x 50 cm x 3.75 cm; 12.5 kg
RF Amplifier Assembly	22 cm x 33 cm x 13 cm; 4.2 kg
On-Vehicle Rectifier Assembly	20 cm x 28 cm x 7 cm; 3.6 kg

Εικόνα 1.28: εφαρμογή επαγωγικής φόρτισης witricity, διαστάσεις και τεχνικά χαρακτηριστικά[26]

Η διάταξη αυτή (εικόνα 1.28) είναι μια βιομηχανική εφαρμογή της εταιρίας witricity για ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος. Η γεωμετρία του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι τετραγωνική (50cm x 50 cm x 3.5 cm) ενώ αποδίδει έως 3300 W, με dc τάση εισόδου 350 -400V. Η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας είναι 145 kHz. Το διάκενο μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ορίζεται στα 18 cm.

(B)

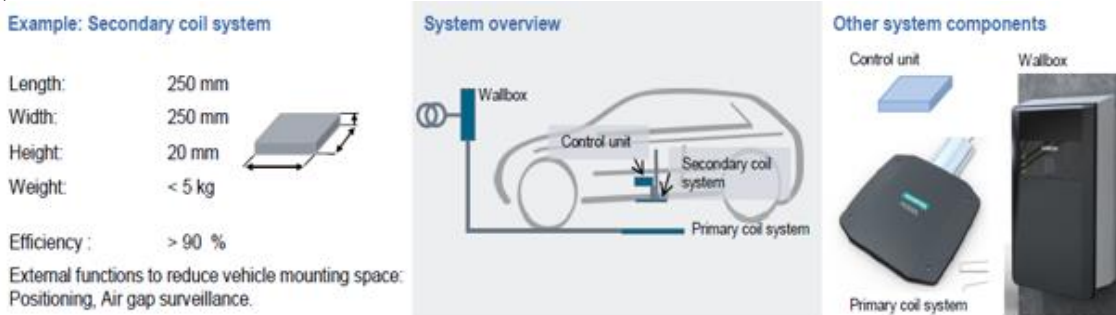
Η επόμενη εφαρμογή (εικόνα 1.29) είναι προϊόν της εταιρίας enatran. Το πρωτεύον έχει σχεδόν κυκλική γεωμετρία (ωοειδές σχήμα), ενώ το δευτερεύον ορθογωνική. Στη μεγάλη διάσταση του πρωτεύοντος η διάμετρος είναι 55,9 cm ενώ στη μικρή 47 cm. Οι διαστάσεις του δευτερεύοντος είναι (46,4 x 76,2 x 12,7 cm)



Εικόνα 1.29: Εφαρμογή ασύρματης φόρτισης enatran (3,3kW), διαστάσεις

(Γ)

Τέλος παρουσιάζεται η εφαρμογή της εταιρίας siemens (εικόνα 1.30) η οποία αποδίδει 3000W με συντελεστή απόδοσης μεγαλύτερο από 90 %. Οι διαστάσεις του δευτερεύοντος δίνονται ως (25 x 25 x 2 cm)



Εικόνα 1.30: Εφαρμογή ασύρματης φόρτισης siemens (3kW), διαστάσεις

1.4.3 STANDARDS (ΠΡΟΤΥΠΑ)

Η ανάγκη για προτυποποίηση στις διατάξεις επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι μεγάλη, καθώς θα αποτελέσει την ώθηση στη μαζική παραγωγή των εφαρμογών αυτής της τεχνολογίας

από τις εταιρίες κατασκευής τέτοιων διατάξεων σε συνεργασία με τις αυτοκινητοβιομηχανίες και τη διάθεσή τους στην αγορά. Ενέχει βεβαίως ο κίνδυνος της υπερ-προτυποποίησης, όπου δε θα αφήνεται χώρος για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη σε μια τεχνολογία που είναι ακόμα μακριά από το να τελειοποιηθεί. Αυτός ο κίνδυνος προς το παρόν δεν είναι ορατός, ενώ είναι αναγκαίο να υπάρξουν συγκεκριμένες κατευθύνσεις σε πτυχές των εφαρμογών επαγωγικής φόρτισης.

Σήμερα, είναι σε εξέλιξη η συζήτηση για το πρότυπο SAE J2954 με τίτλο “ **Wireless charging of electric vehicles and plug-in hybrid vehicles**”, που ξεκίνησε το 2010 και αναμένεται να δημοσιευτεί το 2014. Συμμετέχοντες σε αυτή τη διαδικασία είναι εταιρίες που ασχολούνται με επαγωγική φόρτιση, εταιρίες υποδομών, αυτοκινητοβιομηχανίες, και βιομηχανίες κατασκευής λεωφορείων, πανεπιστήμια και άλλοι οργανισμοί. Τα θέματα που τίθενται είναι συνοπτικά τα ακόλουθα[27]:

- Καθορισμός ενός ελάχιστου βαθμού απόδοσης για τη φόρτιση, λαμβάνοντας υπ’ όψη και τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα από τις βιομηχανίες.
- Ανάπτυξη κριτηρίων ασφαλείας, πάλι σε συνεργασία με άλλους οργανισμούς.
- Ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου για τον έλεγχο τόσο της απόδοσης όσο και της ασφάλειας.
- Δημιουργία –με τη συνεισφορά των εταιριών στον τομέα της επαγωγικής φόρτισης- ενός πίνακα με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες.
- Ανάπτυξη κοινής διασύνδεσης στην ασύρματη φόρτιση με στόχο τη διαλειτουργικότητα.
- Ανάπτυξη πρωτοκόλλου και καθορισμός τρόπου επικοινωνίας.

Πιο συγκεκριμένα, θα περιλαμβάνονται θέματα όπως κατηγοριοποίηση των τύπων φόρτισης, εναρμονισμός με την ενσύρματη φόρτιση σε θέματα επικοινωνίας και λογισμικού, θέση του οχήματος και του φορτιστή στο όχημα, καθώς και της μονάδας φόρτισης. Ακόμα, στον τομέα της ασφάλειας, θα περιέχονται ζητήματα επιπέδου του μαγνητικού πεδίου, ρυθμός και επίπεδα φόρτισης της μπαταρίας, έλεγχος θερμοκρασίας, αλλά και προστασία από ηλεκτρικό σοκ.

Κάποιες από τις παραπάνω πτυχές περιέχονται στο ήδη υπάρχον SAE 1773 (2009) με τίτλο “**Electric Vehicle Inductive Coupled Charging**”, που αναφέρεται σε συγκεκριμένο υλικό και λογισμικό, βασισμένα σε ένα σχέδιο και μια τεχνολογία. Παρέχει κάποιες γενικές πληροφορίες για την ασύρματη φόρτιση, ενώ η επικοινωνία μεταξύ οχήματος και σταθμού είναι αμφίδρομη και γίνεται μέσω ραδιοσυχνοτήτων ή υπερύθρων[28].

Διεξάγεται ακόμα το φόρουμ ασύρματης φόρτισης στη Γερμανία με τίτλο “**Wireless charging of electric vehicles**” [27] με στόχο να τεθούν οι προδιαγραφές από το DKE (οργανισμός προτυποποίησης με εμβέλεια εντός της Γερμανίας) για την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Τέλος, υπάρχει το πρότυπο IEC 61980 –τιτλοφορούμενο “**Part1-General Requirements**”, με την πρώτη έκδοσή του να δημοσιεύεται το 2000, ενώ στην παρούσα φάση βρίσκεται υπό επανεξέταση. Το πρώτο προσχέδιο με τίτλο “**Part 2.3: The indirect connection of electric road vehicle to low voltage a.c. supply system through inductive coupling system**”[29] έγινε το 1993 μετά από το TC 69 συνέδριο της Φλωρεντίας το 1992, όπου αποφασίστηκε να δημιουργηθεί ένα προσχέδιο για τη φόρτιση. Το συγκεκριμένο προσχέδιο περιλάμβανε περιγραφή συγκεκριμένου συστήματος ασύρματης φόρτισης, βασισμένο στο J1773. Το 1994 αποφασίστηκε ότι έπρεπε να ξαναγραφτεί υπό τη μορφή προτύπου IEC. Εν τούτοις, θεωρήθηκε ότι σε εκείνη τη φάση η υπερπροτυποποίηση έβλαπτε την τεχνολογική εξέλιξη και έτσι εκδόθηκε το 1996 ένα κείμενο που περιέγραφε γενικές απαιτήσεις για την επαγωγική φόρτιση και το 1997 ήρθε μια συμφωνία στην ίδια κατεύθυνση, χωρίς όμως να

περιορίζεται μόνο στη ασύρματη φόρτιση με χειροκίνητη σύνδεση όπως το προηγούμενο κείμενο. Για τα ασφαλή για την υγεία των έμβιων όντων όρια υπήρξε αναφορά στο πρότυπο IEC 61851-22, ενώ για θέματα παρεμβολών υπάρχει αναφορά στα πρότυπα IEC 61000-3-2 και CISPR για υψηλές και χαμηλές συχνότητες αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πλήθος των προβλημάτων για τα οποία διαθέτουμε λύσεις σε κλειστή και περιεκτική μορφή είναι περιορισμένο. Έτσι, στις περισσότερες εφαρμογές υπάρχει ένα κοινό σύστημα διαφορικών ή και ολοκληρωτικών εξισώσεων που περιγράφει το πρόβλημα (π.χ εξισώσεις Maxwell), τη στιγμή που δεν υπάρχει η δυνατότητα αντίστοιχης κομψής λύσης. Έτσι συνήθως καταφεύγουμε σε αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες να μεν είναι προσεγγιστικές, στην πράξη όμως αποδεικνύονται πολύ πιο ακριβείς από τις αναλυτικές λύσεις σε απλοποιημένες εκδοχές της γεωμετρίας, για την οποία απαιτούμε λύση, αλλά και σαφώς πιο οικονομικές από τη διεξαγωγή πειράματος.

Κάποιες από τις αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται είναι: μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, μέθοδος οριακών στοιχείων και μικτή μέθοδος (πεπερασμένων- οριακών) [30]. Σήμερα οι εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών δίνουν τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων με αριθμητικές μεθόδους, ενώ έχει αναπτυχθεί πληθώρα εμπορικών λογισμικών για αυτό το σκοπό. Ένα από αυτά τα λογισμικά είναι το ansys, το οποίο ξεκίνησε ως εργαλείο για μηχανολόγους και πολιτικούς μηχανικούς, χρησιμοποιούμενο κυρίως στις βιομηχανίες κατασκευών, αεροναυπηγικής, ναυπηγικής, αυτοκινήτων, κατασκευής βιομηχανικού εξοπλισμού, ενώ τα τελευταία χρόνια έχει διεισδύσει και σε τομείς του ηλεκτρολόγου μηχανικού, στη βιομηχανία της ενέργειας και της ηλεκτρονικής.

Το ansys χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η ιδέα αυτής της μεθόδου είναι αρκετά απλή. Το αρχικά μεγάλο και πολύπλοκο πρόβλημα τεμαχίζεται σε πολύ μικρότερες περιοχές. Για παράδειγμα, για ένα πρόβλημα μαγνητοστατικής το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό $\mathbf{A}$, η λύση του προβλήματος από την οποία προκύπτουν και τα ζητούμενα μεγέθη, όπως η ένταση του μαγνητικού πεδίου ή η πυκνότητα μαγνητικής ροής προσεγγίζεται με πολύ απλούστερες συναρτήσεις. Στην απλούστερη περίπτωση (δισδιάστατου προβλήματος) ο χώρος του προβλήματος διαιρείται σε τριγωνικά στοιχεία (χωρίς να σημαίνει αυτό ότι δεν υπάρχουν στοιχεία διαφορετικού σχήματος π.χ. τετραπλευρικά), των οποίων οι κορυφές ονομάζονται κόμβοι, και θεωρείται ότι το διανυσματικό δυναμικό μεταβάλλεται γραμμικά σε αυτήν την περιοχή (τριγωνικά στοιχεία πρώτης τάξης). Όσο πιο μικρά είναι τα τριγωνικά στοιχεία- όσο πιο μικρό είναι το πλέγμα που δημιουργείται- τόσο η προσέγγιση της πραγματικής λύσης είναι ακριβέστερη. Έτσι το αρχικό σύστημα των λίγων διαφορικών εξισώσεων μετατρέπεται σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με χιλιάδες ή δεκάδες χιλιάδες αγνώστους (που όμως μπορούν να λυθούν από υπολογιστή και μάλιστα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα). Η ίδια μέθοδος εφαρμόζεται με την ίδια επιτυχία – αν και με μεγαλύτερη πολυπλοκότητα- και σε προβλήματα 3 διαστάσεων.

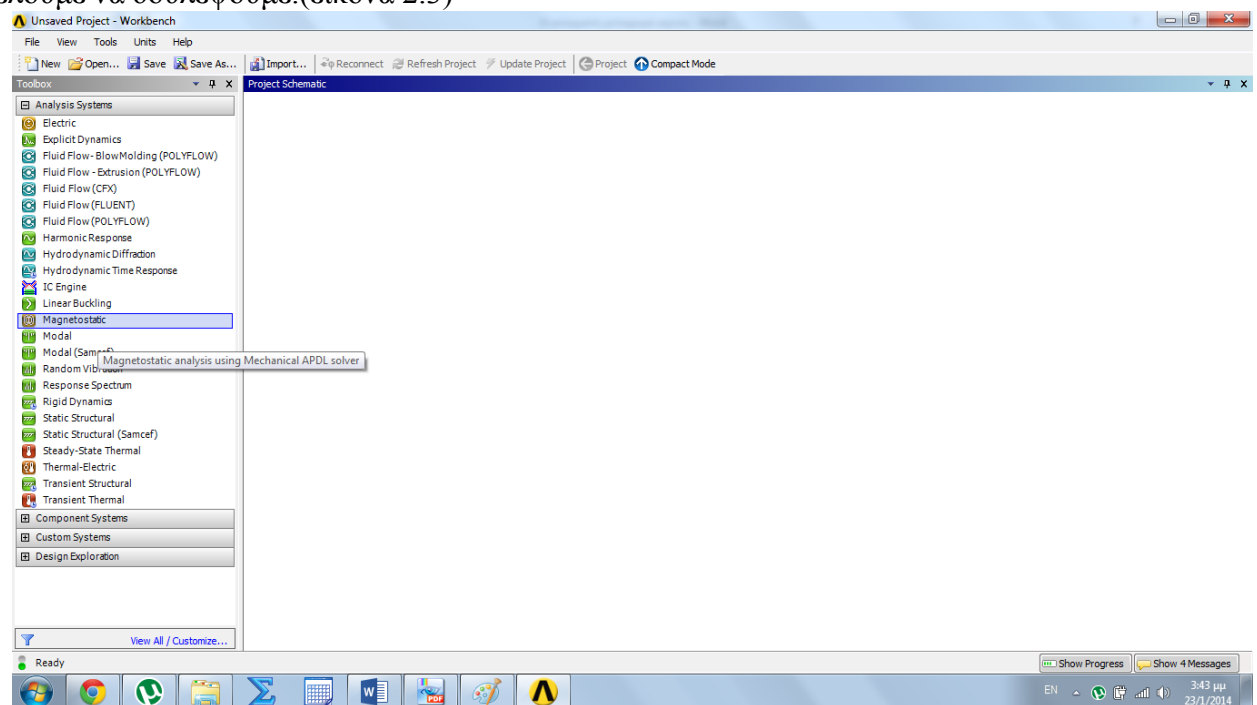
Το ansys περιλαμβάνει 3 στάδια: την προδιεργασία, τη λύση και τη μεταδιεργασία. Τα βήματα που θα ακολουθηθούν περιλαμβάνουν: σχεδιάζουμε τη γεωμετρία, ορίζουμε τα φυσικά χαρακτηριστικά και καθορίζουμε τα χαρακτηριστικά του πλέγματος στο πρώτο στάδιο. Στο δεύτερο πραγματοποιείται η επίλυση, αφού έχουμε ορίσει τις οριακές συνθήκες και τον τύπο της ανάλυσης (π.χ. μαγνητοστατική) ενώ στο τρίτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και με γραφικό τρόπο, αφού πρώτα

έχει επαληθευτεί η ορθότητά τους. Ακολουθεί ένα παράδειγμα χρήσης του ansys, στο οποίο παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα για την επίτευξη λύσης. Στη συνέχεια μελετάται το πώς οι αλλαγές στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μιας ηλεκτρομαγνητικής διάταξης επαγωγικής φόρτισης τύπου “I” επιδρούν στη μεταφερόμενη ισχύ με τη του ansys. Με βάση το τελευταίο διαστασιολογείται μια τέτοια διάταξη για ένα παράδειγμα χρήσης της δομής «I» για φόρτιση υψηλής ισχύος (27 kW)

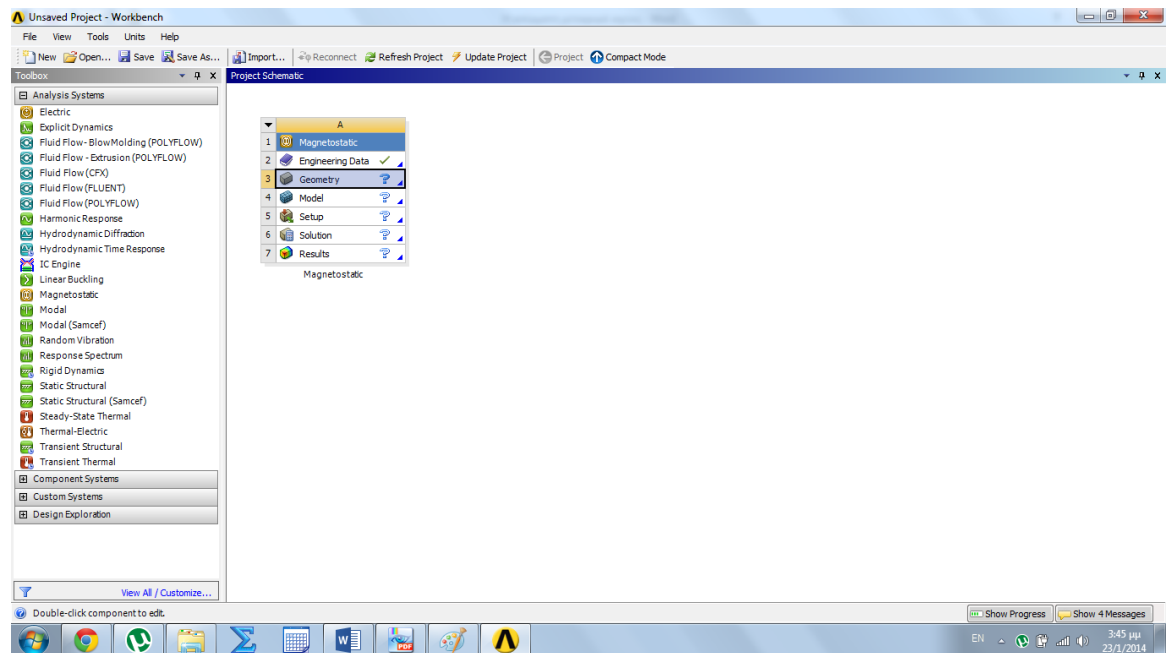
2.2 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ANSYS ΓΙΑ ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

2.2.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

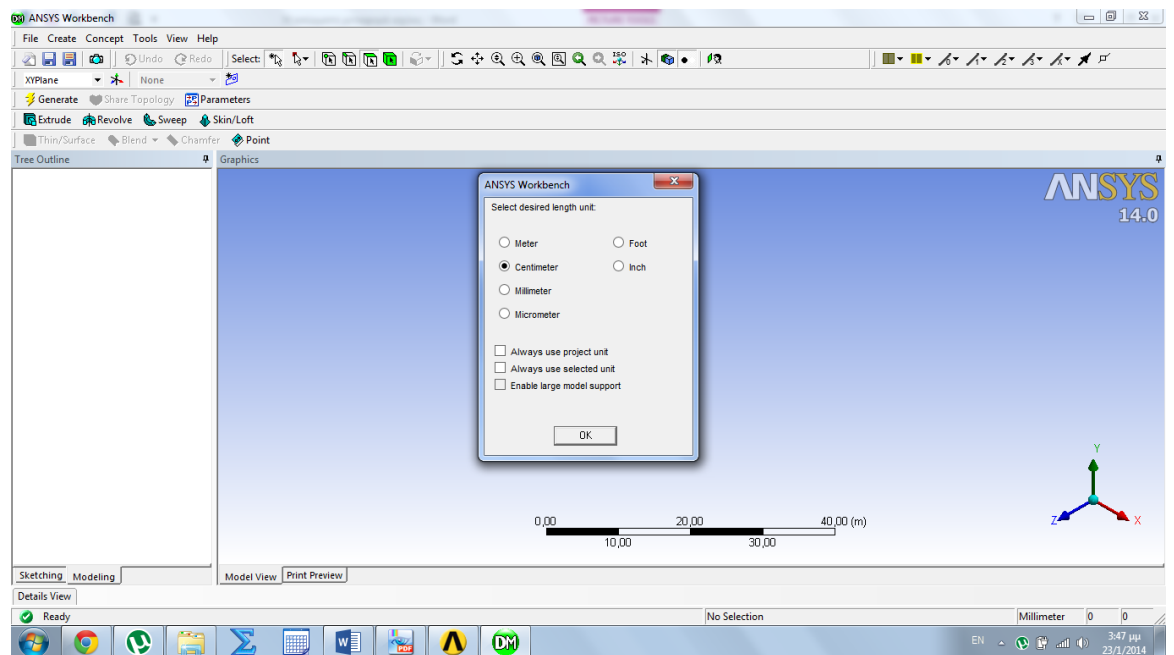
Φαίνεται στις παρακάτω εικόνες το αρχικό περιβάλλον εργασίας από το οποίο επιλέγουμε τη μαγνητοστατική ανάλυση. Κατόπιν επιλέγουμε την επιλογή “Geometry” (εικόνα 2.2), όπου και θα σχεδιάσουμε τη γεωμετρία της διάταξης μας, αφού πρώτα επιλέξουμε τις μονάδες με τις οποίες θέλουμε να δουλέψουμε.(εικόνα 2.3)



Εικόνα 2.1: Αρχικό περιβάλλον εργασίας και επιλογή μαγνητοστατικής ανάλυσης



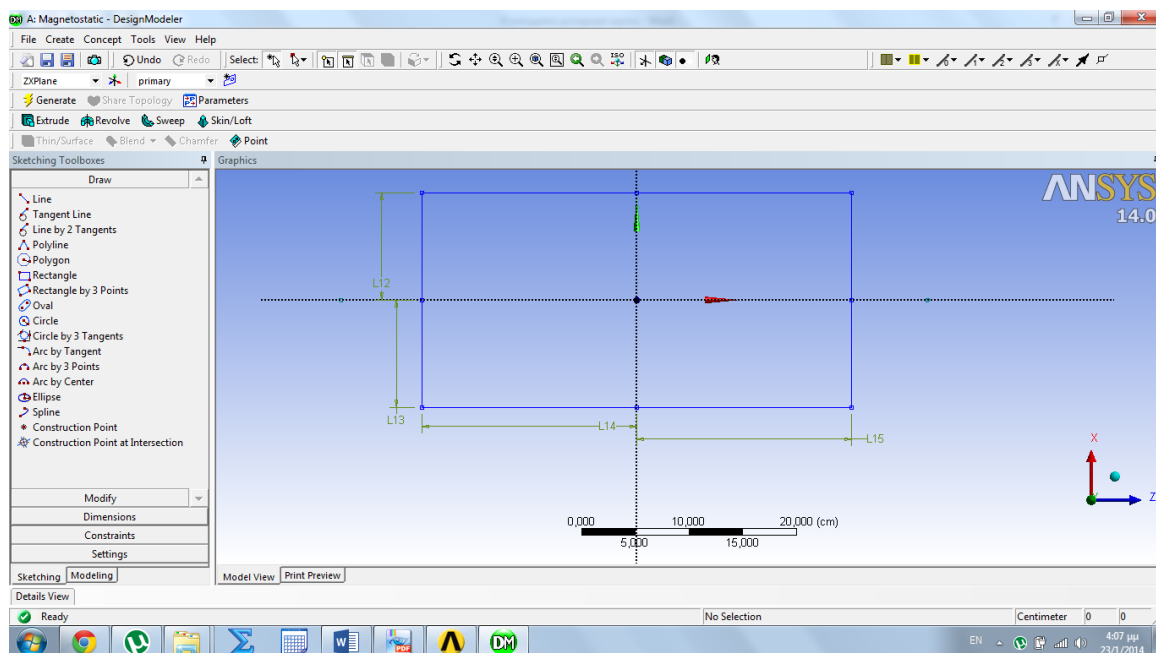
Εικόνα 2.2: Είσοδος στο περιβάλλον κατασκευής γεωμετρίας



Εικόνα 2.3: Επιλογή μονάδων μήκους

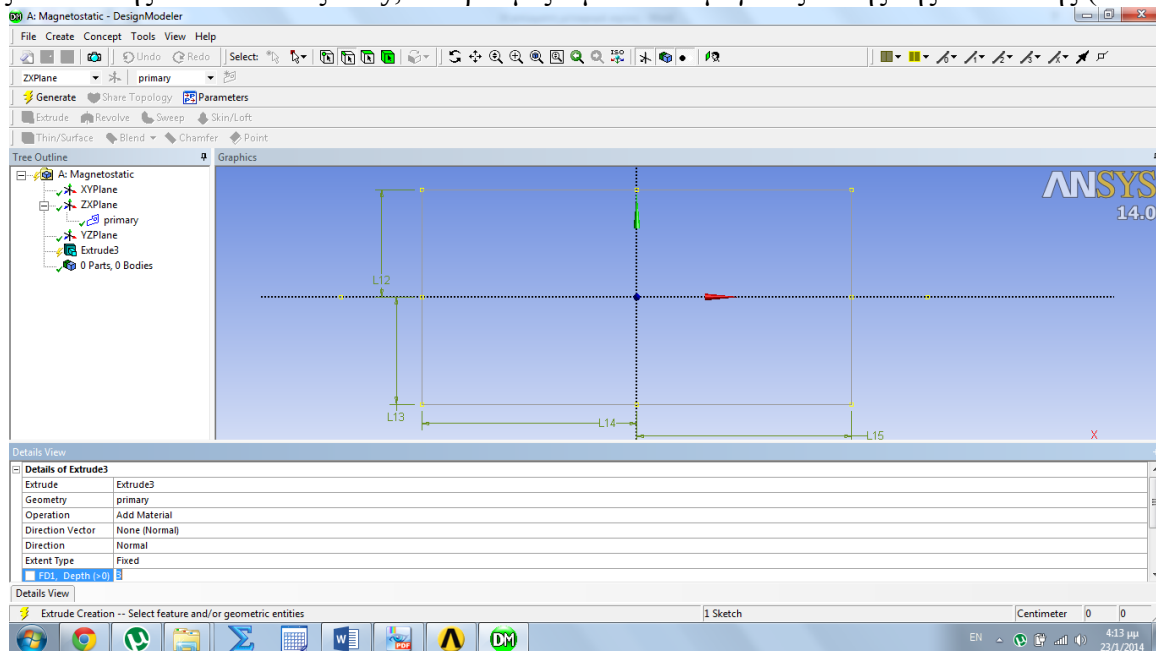
Σαν παράδειγμα θα σχεδιαστεί μια διάταξη αποτελούμενη από δύο επίπεδες ορθογωνικές πλάκες (θα αναπαραστήσουν πρωτεύον και δευτερεύον μιας απλής διάταξης επαγωγικής φόρτισης) και έναν αγωγό γύρω από το πρωτεύον.

Στο επίπεδο xz και στην επιλογή “sketching” κατασκευάζουμε ένα ορθογώνιο (εικόνα 2.4). Κατόπιν προσθέτουμε τις διαστάσεις από την επιλογή “dimensions”. Η επιλογή αυτή δίνει τη δυνατότητα μεταβολής των διαστάσεων μεταβάλλοντας μόνο την τιμή τους.



Εικόνα 2.4: Κατασκευή πλάκας-προτεύνοντος

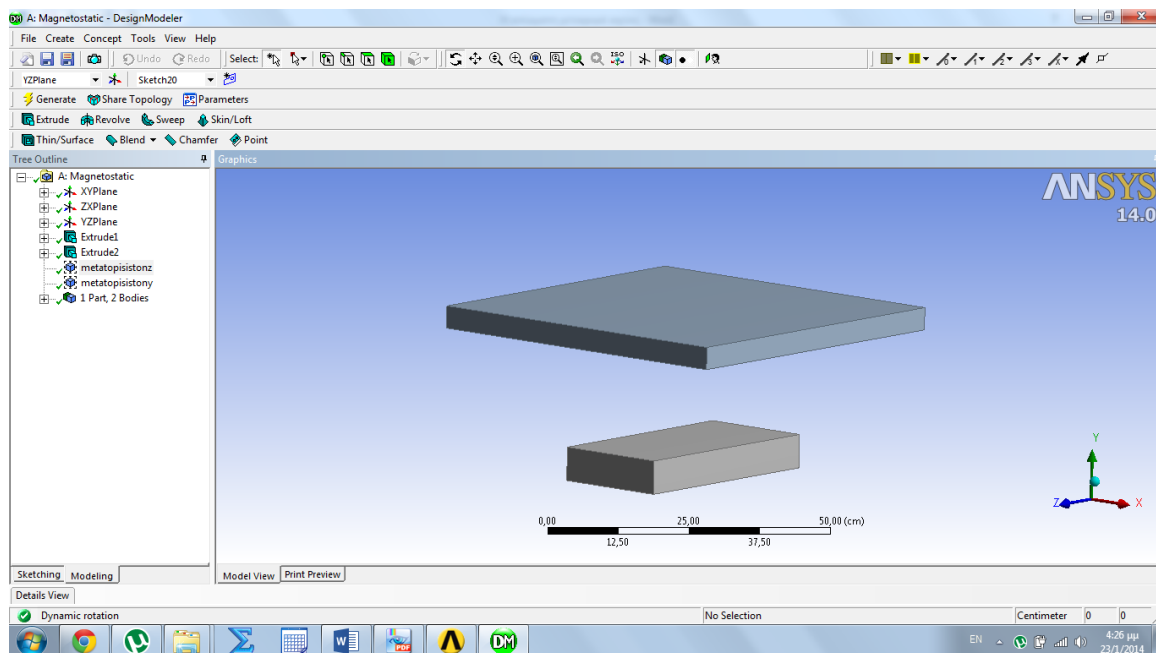
Η σχεδίαση γίνεται πρώτα σε δύο διαστάσεις και κατόπιν επεκτείνεται στην τρίτη. Συγκεκριμένα, από το “Modelling” επιλέγοντας το “Extrude” το σχέδιό μας αποκτά «βάθος» στην κατεύθυνση της τρίτης διάστασης- εδώ στον άξονα y, ενώ ρυθμίζουμε και το μέγεθος αυτής της διάστασης (εικόνα 2.5)



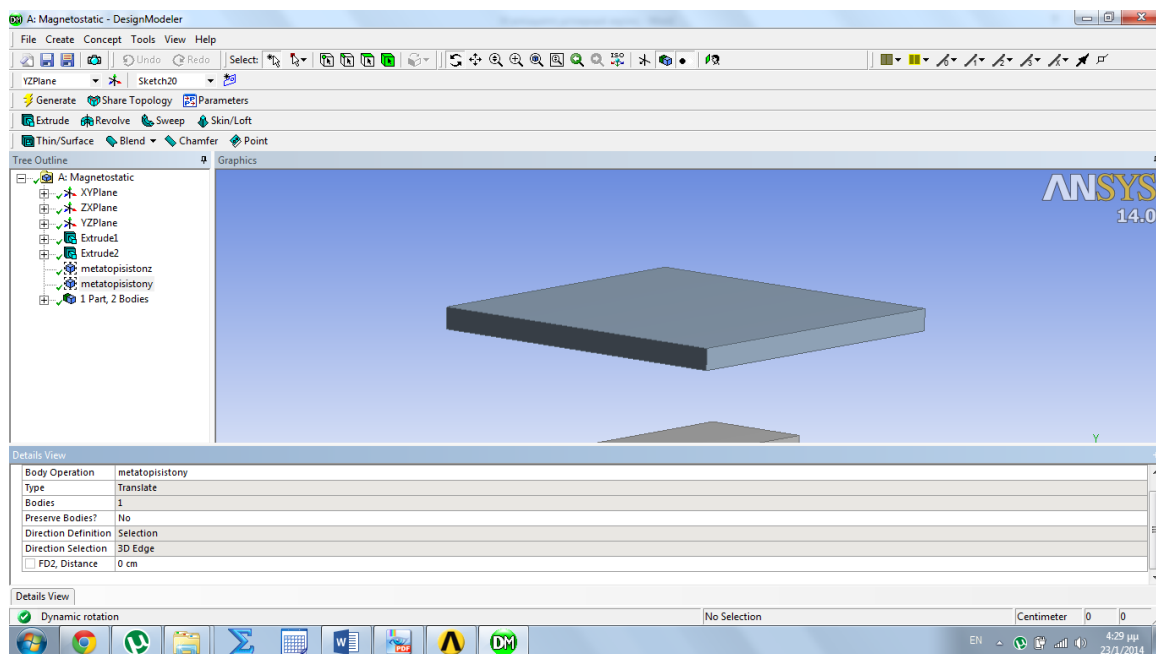
Εικόνα 2.5: Κατασκευή πλάκας πρωτεύοντος

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία κατασκευάζουμε ένα ορθογώνιο στον άξονα xy (εικόνα 2.6) και το επεκτείνουμε αντίστοιχα στον άξονα z. Προκειμένου να ευθυγραμμιστεί η πλάκα του δευτερεύοντος με το πρωτεύον θα χρειαστεί να μετακινήσουμε το σώμα στην κατεύθυνση z. Γενικά, για να μετακινήσουμε ένα σώμα θα εισάγουμε μια επιλογή body operation, όπου θα επιλέξουμε το σώμα που μας ενδιαφέρει, με τύπο “translate”, ενώ θα επιλέξουμε να μη διατηρηθεί και το αρχικό

σώμα κατά τη μεταφορά. (εικόνα 2.7) Η επιλογή της κατεύθυνσης μετακίνησης γίνεται είτε με επιλογή μιας ακμής ή με βάση τις συντεταγμένες. Θα εισάγουμε ακόμα ένα body operation για μετακίνηση στον άξονα y.



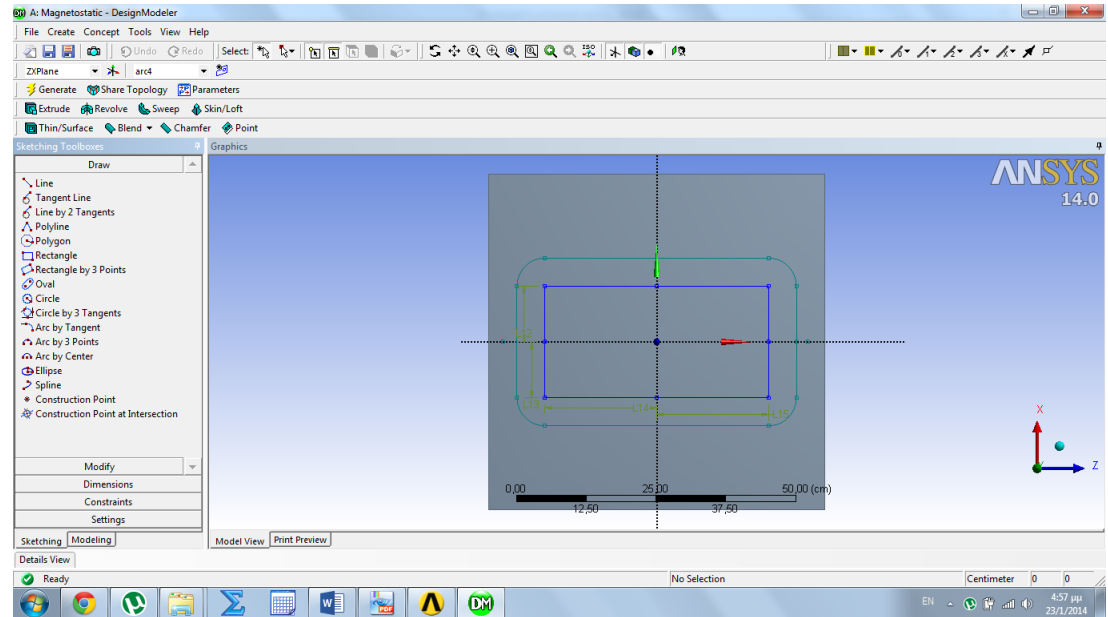
Εικόνα 2.6: Κατασκευή πλάκας δευτερεύοντος



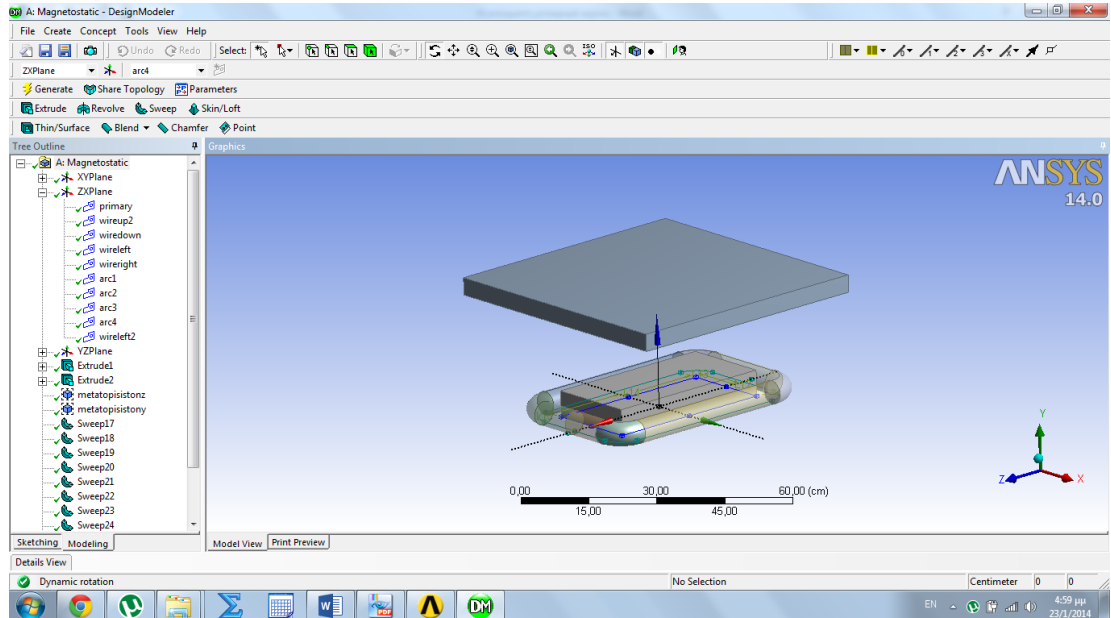
Εικόνα 2.7: Μετακίνηση σώματος (πλάκας δευτερεύοντος)

Μια άλλη μέθοδος δημιουργίας τρισδιάστατου σώματος είναι ο εξής: με την επιλογή “sweep” επιλέγουμε ένα μονοπάτι. Ακόμα, επιλέγουμε ένα σχήμα (ή μια επιφάνεια) το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως «προφίλ», το οποίο θα «προχωρήσει» κατά μήκος του μονοπατιού δημιουργώντας το τρισδιάστατο σώμα μας. Με αυτό τον τρόπο θα κατασκευάσουμε τον αγωγό μας. Για λόγους που θα φανούν

παρακάτω το μονοπάτι που φτιάξαμε το χωρίσαμε σε επί μέρους τμήματα, και κατασκευάσαμε αντίστοιχα σώματα, καθένα εκ των οποίων χρησιμοποίησε ως μονοπάτι την κυκλική επιφάνεια- βάση του αμέσως προηγούμενως κατασκευασμένου σώματος, ενώ το προφίλ του αρχικού μονοπατιού είναι κύκλος με κέντρο πάνω στο μονοπάτι και κάθετος σε αυτό. (εικόνες 2.8 – 2.9)



Εικόνα 2.8: Κατασκευή πρωτεύοντος τυλίγματος



Εικόνα 2.9: Κατασκευή πρωτεύοντος τυλίγματος

Η επιλογή για την ακτίνα του κύκλου- προφίλ γίνεται με το εξής σκεπτικό: Θεωρούμε ότι η διάταξη μας θα λειτουργεί στα 20 kHz και με ρεύμα 200 A στο πρωτεύον. Από τον κατάλογο των εμπορικά διαθέσιμων κυκλικών καλωδίων Iitz [31] επιλέγουμε το καλώδιο 3/0 της κατηγορίας 20-50 kHz, τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται παρακάτω (πίνακας 2.1)

Equivalent AWG	Circular Mil Area	Number of Wires	AWG of Wire	Film Coating ¹	Construction Type	Outer Insulation ²	Nominal OD	Nominal LBS./1000 FT.	Direct Current Resistance OHM/1000 FT ^A	Construction
3/0	171000	6840	36	S	5	SNB	.870	682.000	.069	12(5X3X38/36)

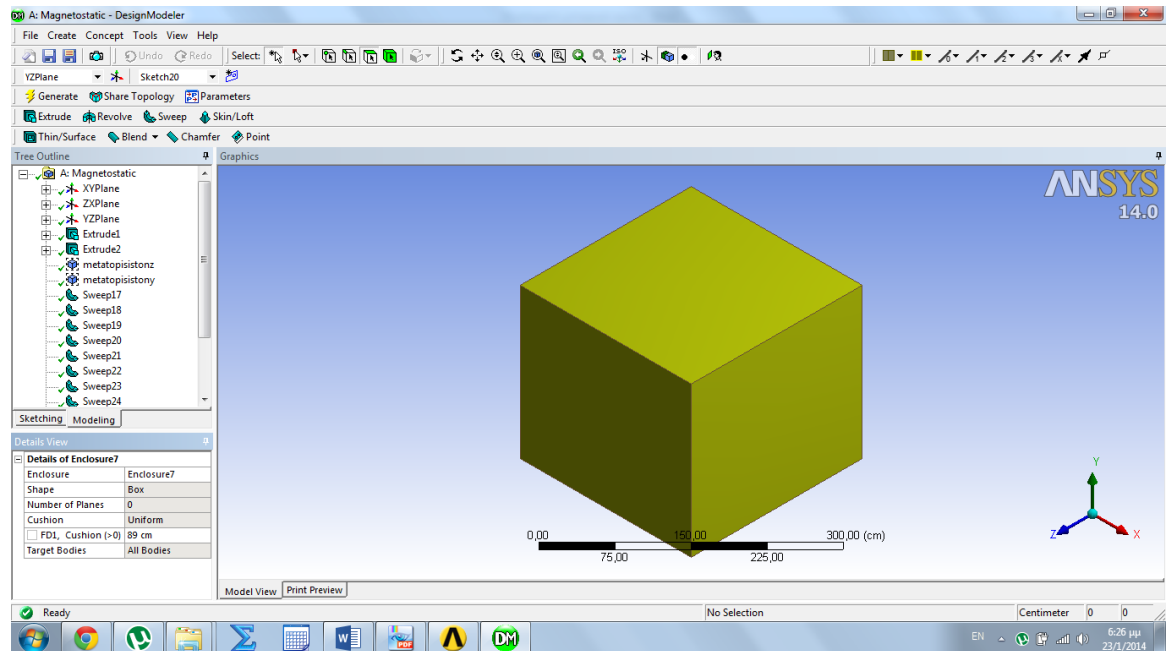
Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά καλωδίου litz 3/0[31]

Ο συγκεκριμένος τύπος καλωδίου επελέγη με τον εξής συλλογισμό: όλα τα καλώδια, κατάλληλα για αυτές της συχνότητες στην κατηγορία “AWG of Wire” έχουν τιμή 36. Για αυτήν την τιμή έχουμε τα χαρακτηριστικά του σύρματος [32]. (πίνακας 2.2)

AWG gauge	Conductor Diameter Inches	Conductor Diameter mm	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper	Breaking force Soft Annealed Cu 37000 PSI
36	0.005	0.127	414.8	1360	0.21	0.035	1100 kHz	0.72 lbs

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά σύρματος με AWG 36[32]

Βλέπουμε ότι κάθε σύρμα έχει μέγιστη ικανότητα διέλευσης ρεύματος 0,035 A. Οπότε για ρεύμα 200 A που θέλουμε να περνάει από το πρωτεύον θέλουμε καλώδιο με $200/0,035 = 5715$ σύρματα (είδαμε ότι τα καλώδια litz αποτελούνται από συνεστραμμένα καλώδια). Ο αμέσως επόμενος αριθμός συρμάτων στο καλώδιο στη συγκεκριμένη κατηγορία (20-50 kHz) είναι τα 6840 σύρματα, δηλαδή το καλώδιο 3/0, το οποίο και επελέγη. Στον πρώτο πίνακα δίνεται –σε ίντσες– η διάμετρος του συγκεκριμένου καλωδίου (0,87 ίντσες). Οπότε το εμβαδό της διατομής του καλωδίου δίνεται ως $\pi \cdot r^2$, δηλαδή $\pi \cdot 0,435^2 = 0,594$ τετραγωνικές ίντσες ή αλλιώς $3,833 \text{ cm}^2$. Θεωρώντας ότι τα τυλίγματα του πρωτεύοντος θα είναι 6, το εμβαδό της διατομής του τυλίγματος θα προκύψει ως $6 \cdot 3,833 \text{ cm}^2 = 23 \text{ cm}^2$. Συνεπώς ο κύκλος προφίλ θα έχει ακτίνα $r = 2,71 \text{ cm}$. Η κατασκευή της γεωμετρίας ολοκληρώνεται με την επιλογή “enclosure” (εικόνα 2.10), με την οποία εισάγεται ένας χώρος- γεωμετρίας και διαστάσεων δικής μας επιλογής- στον οποίο αφ’ ενός θα εφαρμόσουμε τις οριακές μας συνθήκες, αφ’ ετέρου θα περιλαμβάνει το υλικό μεταξύ των σωμάτων- εν προκειμένω αέρα.

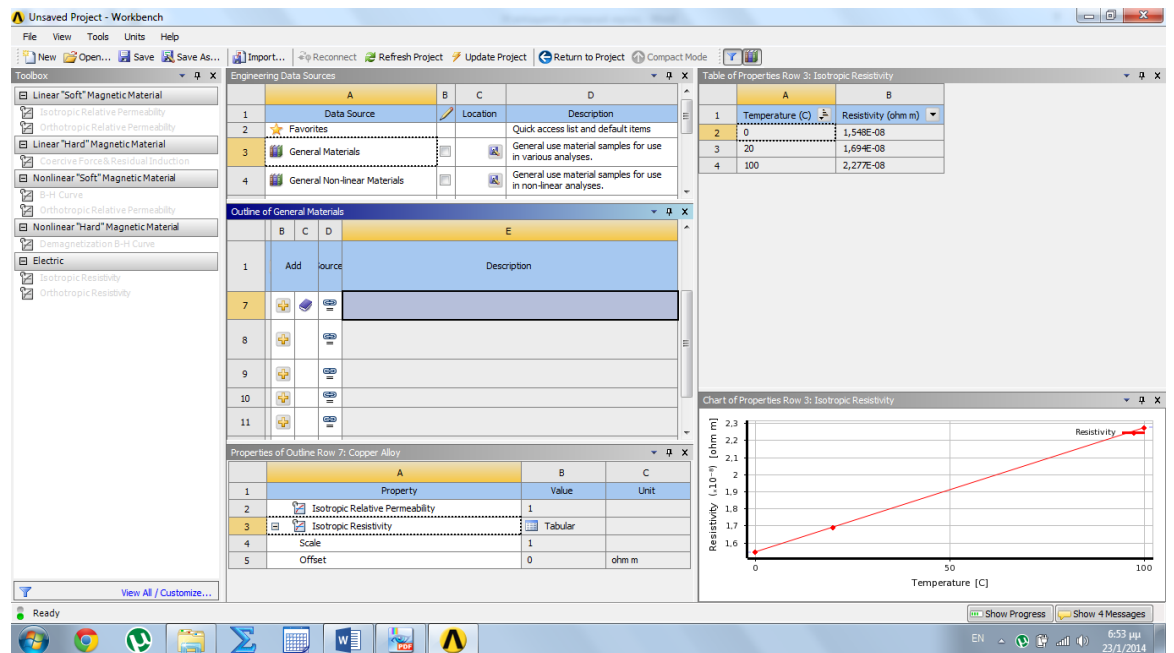


Εικόνα 2.10: Κατασκευή enclosure

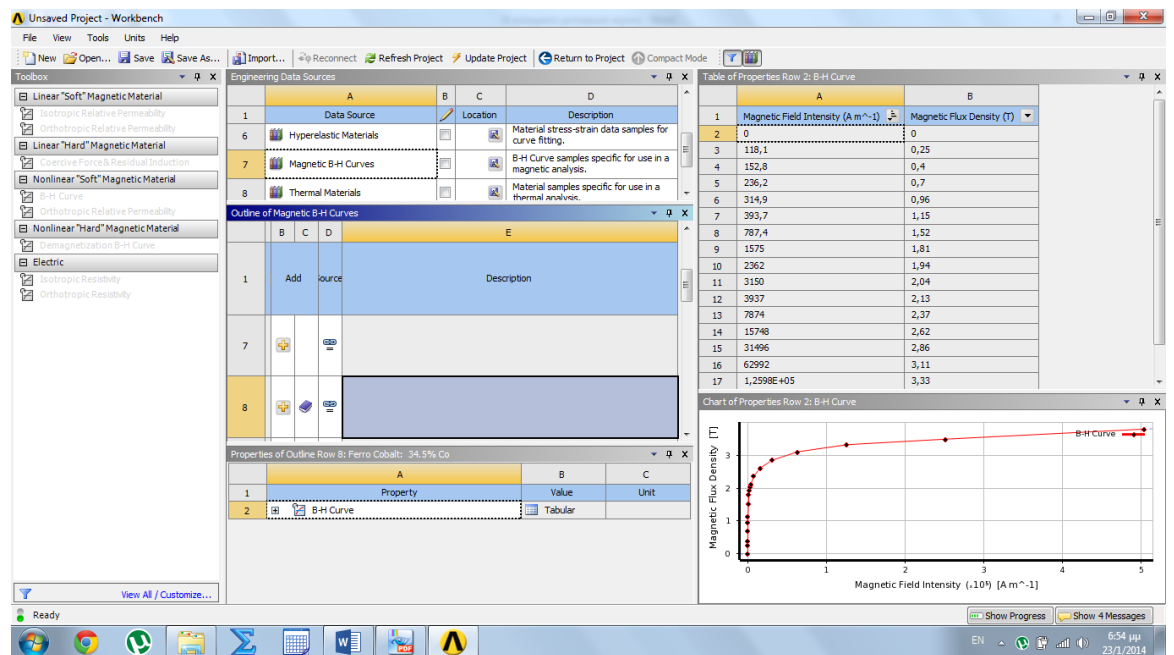
Προκειμένου να προχωρήσουμε στη λύση θα χρειαστεί όλα τα σώματα που κατασκευάσαμε να τα ενοποιήσουμε σε ένα “part”.

2.2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΩΝ

Αυτό που μένει να κάνουμε είναι να ορίσουμε τα χαρακτηριστικά της διάταξης μας. Όσον αφορά τα υλικά που θα χρησιμοποιήσουμε, θα επιλεγεί χαλκός για το καλώδιο (εικόνα 2.11) και κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό για τις πλάκες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Επιστρέφοντας στο αρχικό menu θα συναντήσουμε την επιλογή “engineering data”. Εκεί, και με την επιλογή “engineering data sources” θα δούμε μια σειρά κατηγοριών υλικών. Από την κατηγορία “general materials” θα εισάγουμε το χαλκό, ενώ από την κατηγορία “magnetic B-H curves” θα εισάγουμε το σιδηρομαγνητικό μας υλικό (εδώ το Ferro Cobalt 34,5% Co). (εικόνα 2.12)



Εικόνα 2.11: Επιλογή υλικού (χαλκός)



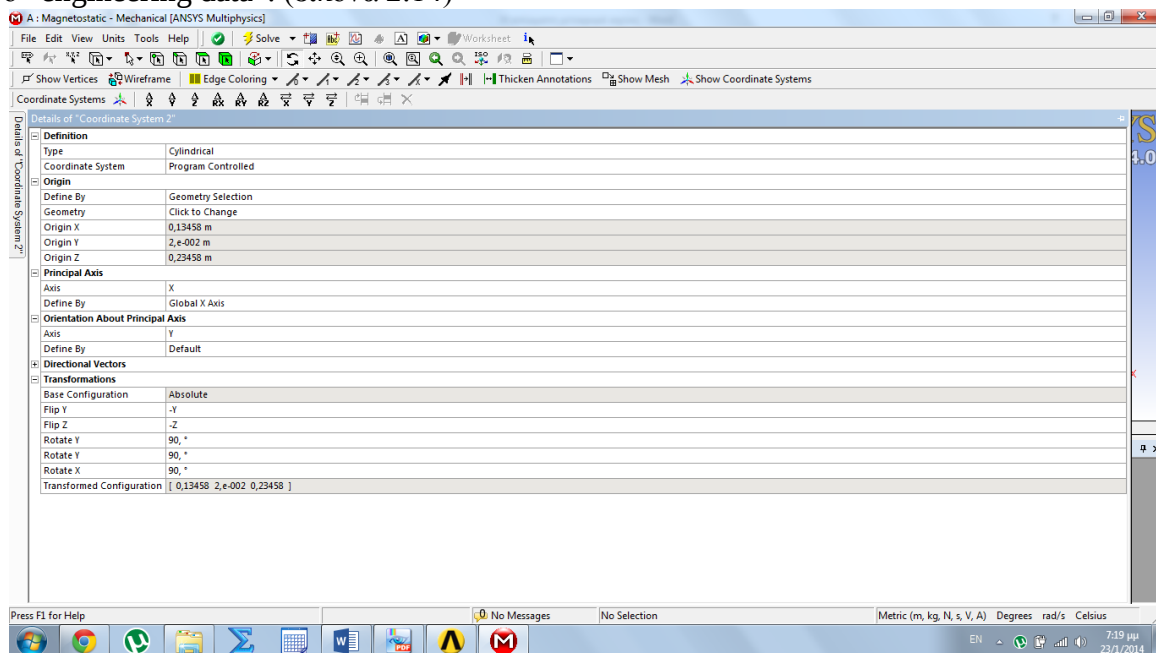
Εικόνα 2.12: Επιλογή υλικού (φερρίτης)

Κατόπιν, επιστρέφουμε στο αρχικό menu ξανά και επιλέγουμε “model”.

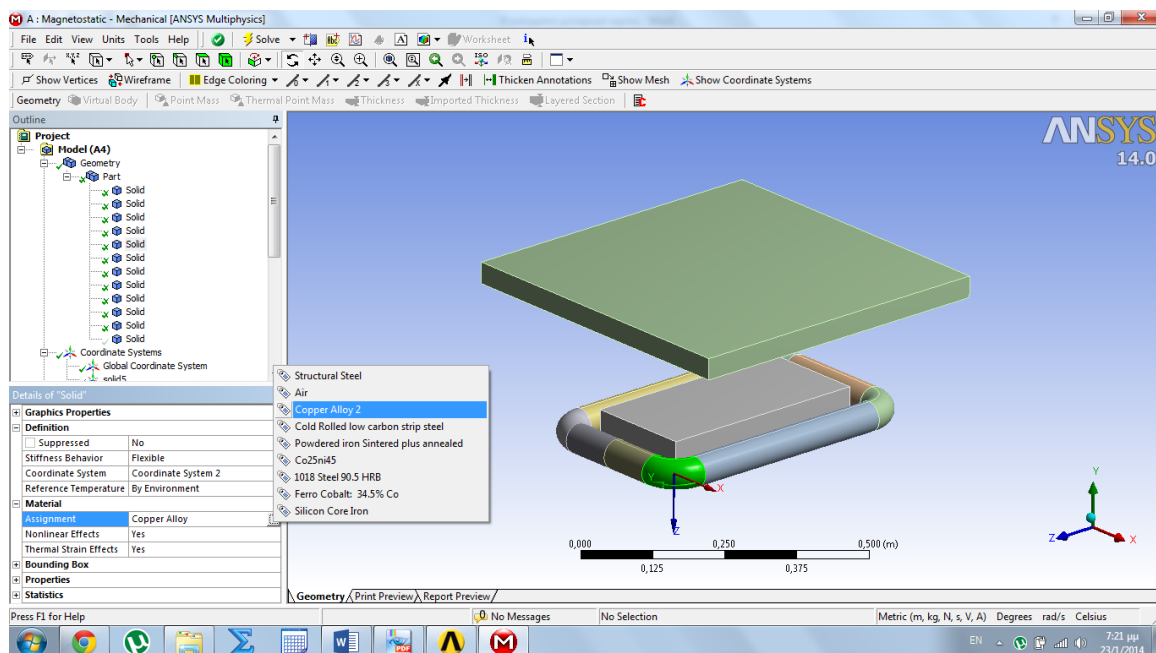
2.2.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ

Στην επιλογή “magnetostatic” θα εισάγουμε έναν αγωγό (“source conductor”) επιλέγοντας όλα τα σώματα τα οποία αποτελούν τον αγωγό μας. Να σημειωθεί ότι το ansys λόγω επιλογής των

κατασκευαστών του δίνει κατεύθυνση στο ρεύμα προς τα θετικά του άξονα y. Για το λόγο αυτό δημιουργούμε καινούρια συστήματα συντεταγμένων στην επιλογή “coordinate systems” του “model” (εικόνα 2.13). Μπορούμε να έχουμε καρτεσιανές, κυλινδρικές, σφαιρικές, ελλειπτικές ή τοροειδείς συντεταγμένες, καθώς επίσης να αλλάξουμε τη φορά των διανυσμάτων ή να τα περιστρέψουμε. Επεξεργαζόμενοι τις λεπτομέρειες κάθε ξεχωριστού σώματος μπορούμε να εφαρμόσουμε το σύστημα συντεταγμένων που θέλουμε (συγκεκριμένα για τον αγωγό τα θετικά y πρέπει να ταυτίζεται με την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος που επιθυμούμε), αλλά και να αλλάξουμε το υλικό του σώματος, επιλέγοντας από τις προεπιλογές του ansys (structural steel, air) και από τα υλικά που έχουμε εισάγει από το “engineering data”. (εικόνα 2.14)

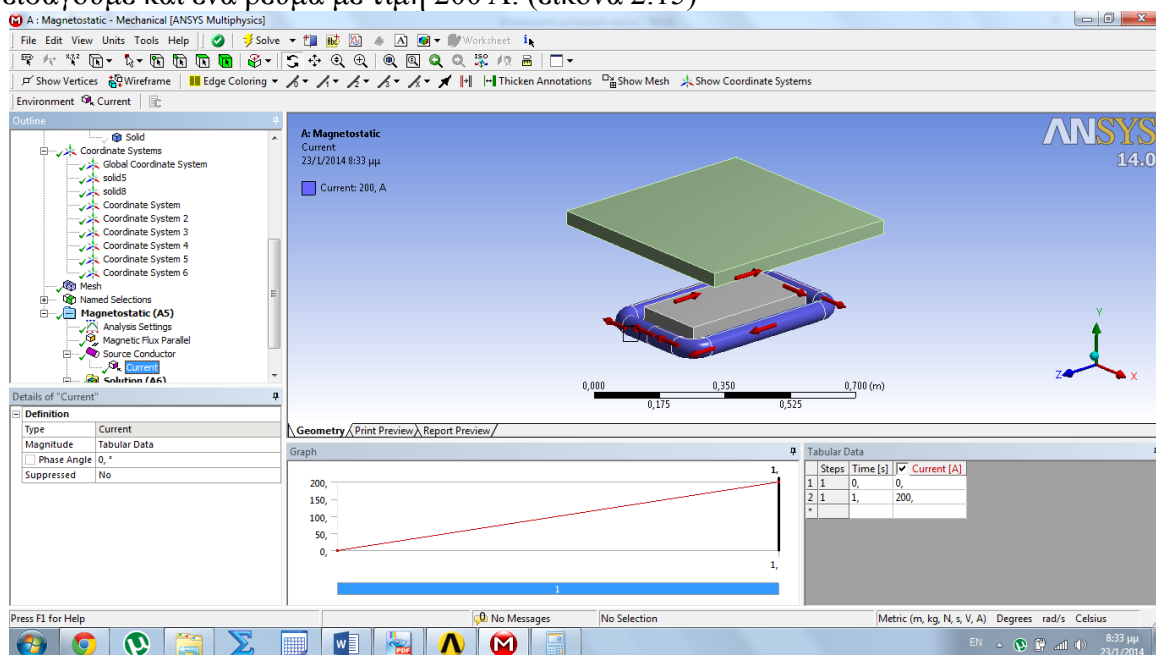


Εικόνα 2.13: Εισαγωγή νέου συστήματος συντεταγμένων



Εικόνα 2.14: Εφαρμογή στο σώμα του επιθυμητού υλικού και συστήματος συντεταγμένων

Το σύρμα του καλωδίου litz που επιλέξαμε έχει διάμετρο 0,127mm, δηλαδή ακτίνα 0,0127/2 cm. Η επιφάνεια της διατομής του είναι λοιπόν $\pi \cdot (0,0127/2)^2 \text{cm}^2$. Κάθε καλώδιο έχει 6840 σύρματα, ενώ έχουμε 6 ελίγματα, συνεπώς η καθαρά αγωγίμη επιφάνεια έχει διατομή που καλύπτει επιφάνεια ίση με $6 \cdot 6840 \cdot \pi \cdot (0,0127/2)^2 \text{cm}^2 = 5,1988 \text{cm}^2 = 5,1988 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$. Την τιμή αυτή θα βάλουμε στην επιλογή “conducting area” στις λεπτομέρειες του αγωγού, αφού πρώτα έχουμε επιλέξει “stranded” ως τύπο αγωγού (δηλαδή ο αγωγός δεν είναι ενιαίο σώμα αλλά αποτελείται από κλώνους, ενώ η διατομή του αγωγίμου μέρους είναι μικρότερη από τη διατομή του τυλίγματος, λόγω του όγκου που καταλαμβάνουν οι μονώσεις. Τέλος, στην επιλογή “number of coils” θα έχουμε 6 ελίγματα. Στον αγωγό αυτό εισάγουμε και ένα ρεύμα με τιμή 200 A. (εικόνα 2.15)



Εικόνα 2.15: Εισαγωγή τιμής ρεύματος στον αγωγό

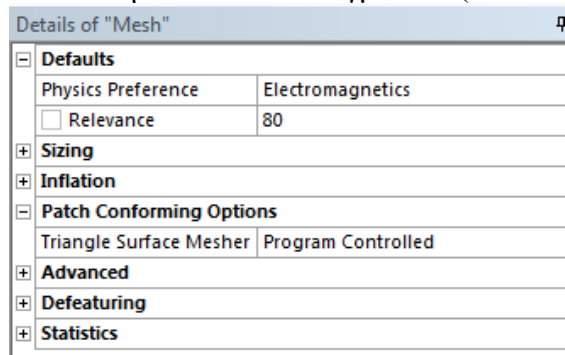
2.2.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Στην επιλογή “magnetostatic” εισάγουμε “magnetic flux parallel” την οποία και εφαρμόζουμε σε όλες τις έδρες του κύβου που προέκυψε από τη δημιουργία του “enclosure”. Πρόκειται επί της ουσίας για τις οριακές μας συνθήκες, οι οποίες αναγκάζουν τη μαγνητική ροή να ρέει παράλληλα σε αυτές τις επιφάνειες.

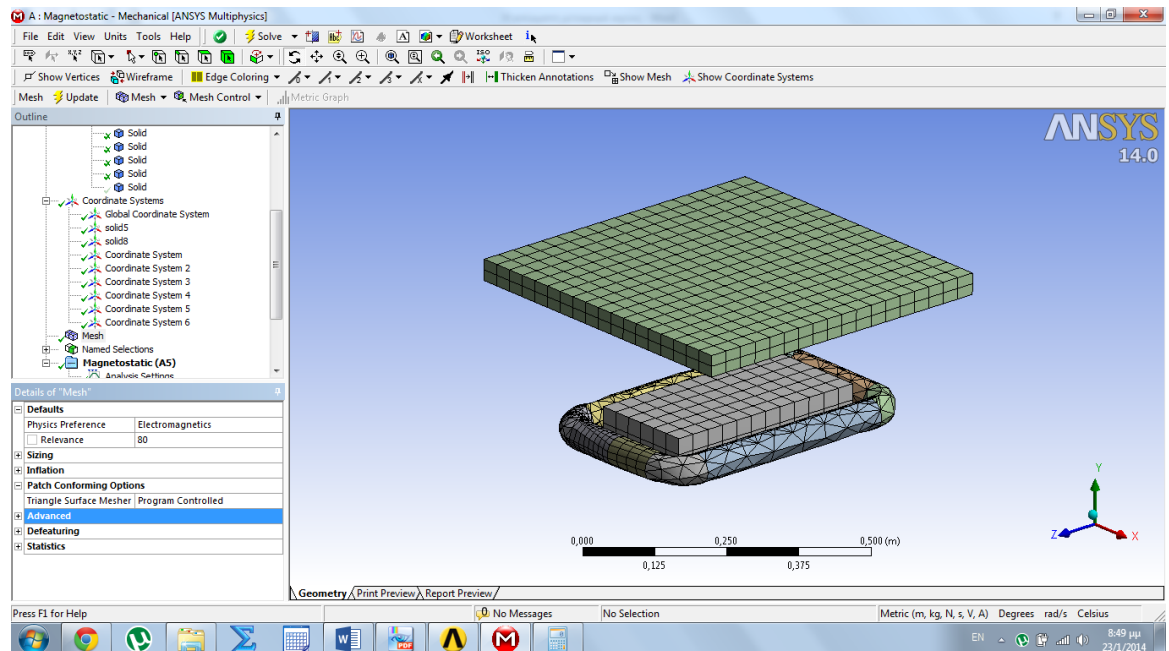
2.2.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Κάνοντας δεξί κλικ στο “part” του “geometry” εμφανίζεται η επιλογή “generate mesh” η οποία δημιουργεί ένα πλέγμα κόμβων που συνθέτουν πεπερασμένα στοιχεία. Το πλέγμα που δημιουργείται δεν είναι συνήθως επαρκές για πιο πολύπλοκες γεωμετρίες, για αυτό και υπάρχει πληθώρα επιλογών που μπορούν να ρυθμίσουν το είδος και το μέγεθος των στοιχείων σε κάθε ξεχωριστό σώμα. Υπάρχει η επιλογή , κατ’ αρχάς να ορίσουμε μόνοι μας το μέγεθος του στοιχείου κάθε ξεχωριστού σώματος εισάγοντας ένα “body sizing” στην επιλογή mesh. Μπορούμε ακόμα να ρυθμίσουμε το πόσο πυκνό θέλουμε το πλέγμα να είναι μεταβάλλοντας την τιμή της επιλογής relevance, με μεγαλύτερες τιμές του

relevance να οδηγούν στην κατασκευή πιο πυκνών πλεγμάτων. (εικόνα 2.16)



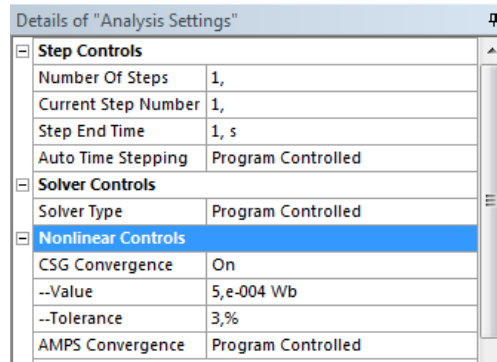
Εικόνα 2.16: Εισαγωγή τιμής relevance στο πλέγμα



Εικόνα 2.17: Η διάταξη με το πλέγμα της

2.2.6 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Κατ' αρχάς θα πρέπει να ορίσουμε τα μεγέθη για τα οποία θα προκύπτει λύση. Για το μη γραμμικό πρόβλημα, από την επιλογή “magnetostatic”-“analysis settings”- “CSG convergence” – on, μπορούμε να ορίσουμε τόσο την τιμή της διαφοράς της παρούσας επανάληψης από την προηγούμενη για την οποία θα θεωρήσουμε ότι η λύση μας συγκλίνει (για μη γραμμική ανάλυση απαιτείται επαναληπτική μέθοδος), όσο και το ποσοστό της ανοχής αυτής της τιμής. (εικόνα 2.18) Βεβαίως, όσο μεγαλύτερη ακρίβεια απαιτούμε, τόσο αυξάνει ο χρόνος επίλυσης λόγω αυξημένης υπολογιστικής επεξεργασία.



Εικόνα 2.18: Εισαγωγή επιθυμητής τιμής σύγκλισης και ποσοστού ανοχής της

2.2.7 ΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΟΠΟΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Πρώτα, λοιπόν, θα πρέπει- μέσω της επιλογής “model”- “construction geometry” να ορίσουμε μια επιφάνεια που ταυτίζεται με την επιφάνεια του δευτερεύοντος και με συντεταγμένες με τον άξονα z κάθετο στην επιφάνεια. Με δεξί κλικ στην επιλογή solution επιλέγουμε τα μεγέθη για τα οποία απαιτούμε λύση. Επιλέγουμε τα:

- a) inductance Θα προκύψουν λύσεις για την αυτεπαγωγή του τυλίγματος. Σε περίπτωση ύπαρξης δύο τυλιγμάτων θα περιμέναμε λύσεις τόσο για τις αυτεπαγωγές, όσο και την αμοιβαία επαγωγή,
- b) current density, επιλέγοντας τα σώματα τα οποία συνθέτουν το τύλιγμα,
- c) directional magnetic flux density. Επιλέγοντας στο “scoping method” στις λεπτομέρειες “surface” και βάζοντας την επιφάνεια την οποία κατασκευάσαμε για το σώμα του δευτερεύοντος, και με προσανατολισμό οποιοδήποτε άξονα- εδώ μας ενδιαφέρει ο y’y- παίρνουμε πληροφορίες για το διανυσματικό πεδίο $\mathbf{B}$ σε αυτήν την κατεύθυνση.

Τέλος εισάγουμε ένα δικό μας μέγεθος. Εισάγοντας “user defined result” και με τις επιλογές για το προηγούμενο μέγεθος, γράφουμε στη φόρμα “expression” BVECTORS και καθορίζουμε σε μονάδες τις μονάδες πυκνότητας μαγνητικής ροής (Tesla). Παίρνουμε ως αποτέλεσμα τις τιμές για το πεδίο $\mathbf{B}$ και το πρόγραμμα υπολογίζει αριθμητικά το ολοκλήρωμα

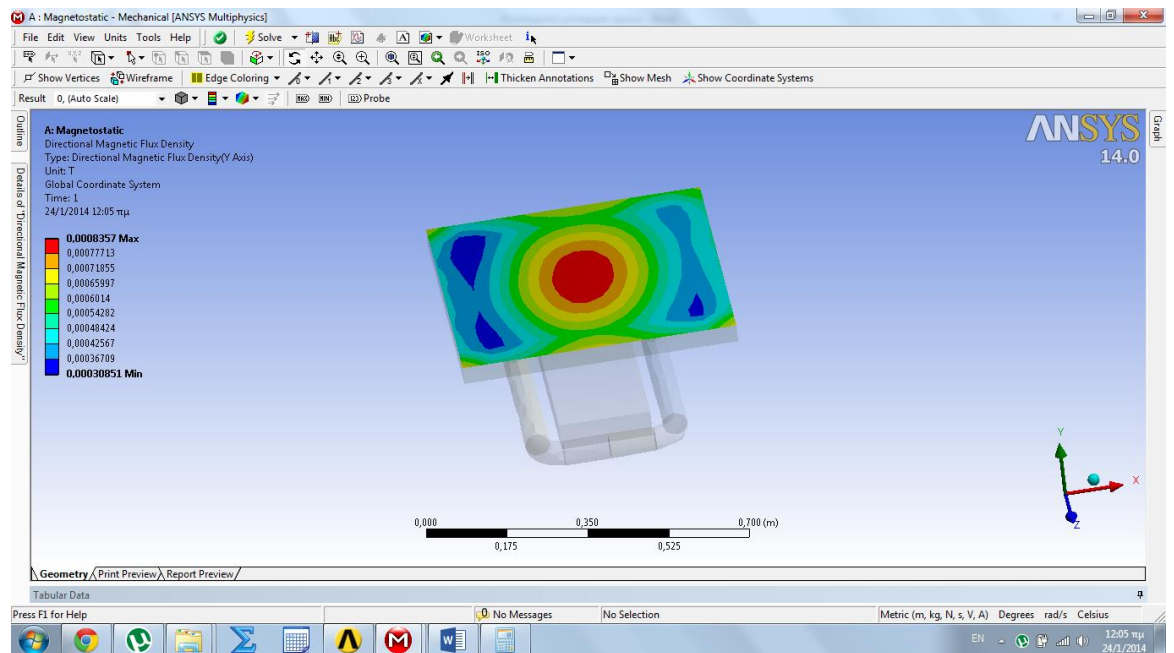
$$\Phi = \oint_S \bar{\mathbf{B}} * d\bar{\mathbf{A}} \quad (2.1)$$

και άρα παίρνουμε την τιμή της μαγνητικής ροής που διέρχεται από την επιφάνεια του δευτερεύοντος.

2.2.8 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

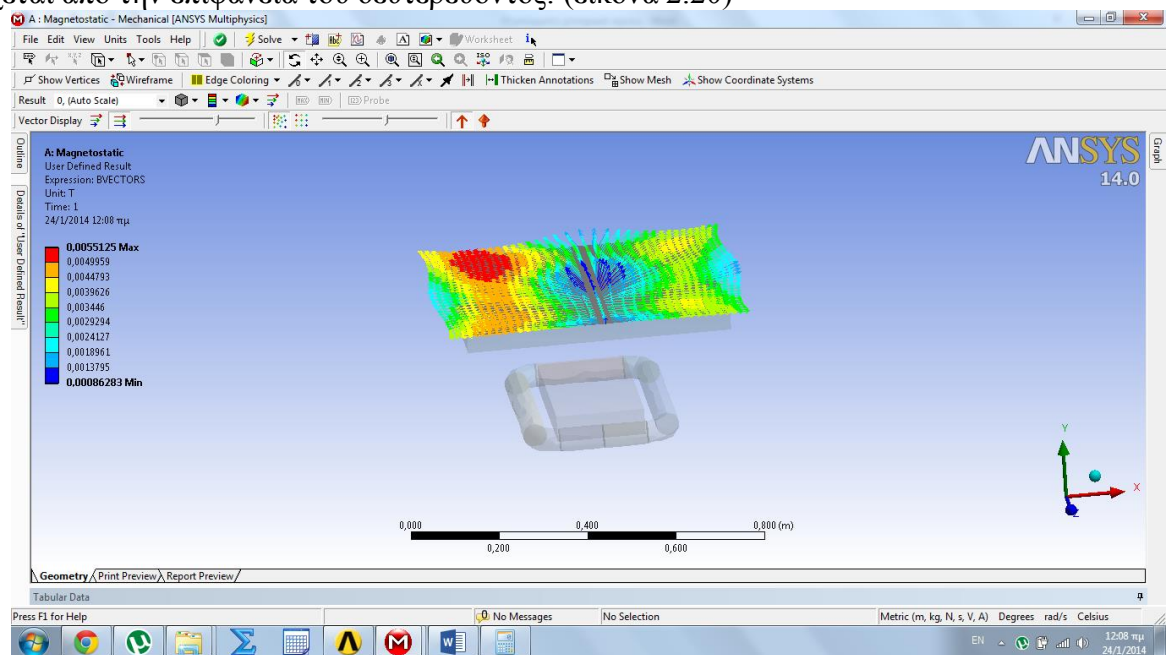
Τέλος το πρόγραμμα αξιολογεί τα αποτελέσματα και τα παρουσιάζει στο χρήστη τόσο σε μορφή πινάκων που περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα, όσο και σε γραφική αναπαράσταση. Έτσι έχουμε:

- A) για το πεδίο $\mathbf{B}$ στην κατεύθυνση του άξονα y’y στην επιφάνεια του δευτερεύοντος: (εικόνα 2.19)



Εικόνα 2.19: Γραφική αναπαράσταση πεδίου B κάθετο στην επιφάνεια του δευτερεύοντος

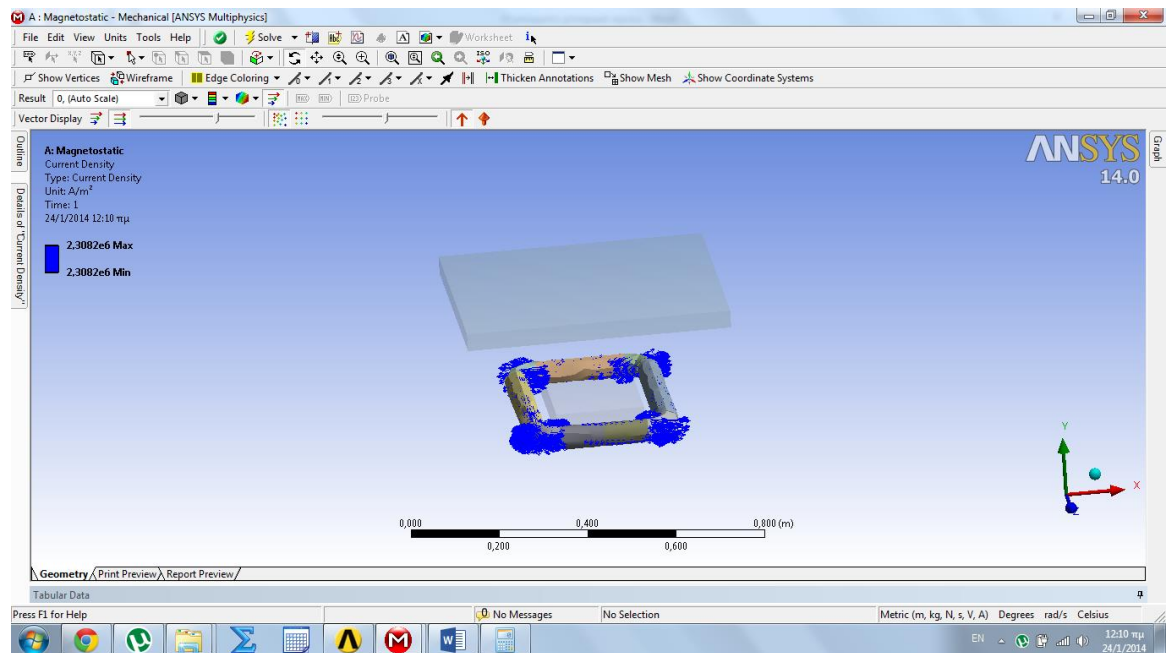
Β) Για το πεδίο **B** στην επιφάνεια του δευτερεύοντος από το οποίο προκύπτει η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια του δευτερεύοντος: (εικόνα 2.20)



Εικόνα 2.20: Γραφική αναπαράσταση διανύσματος B στην επιφάνεια του δευτερεύοντος

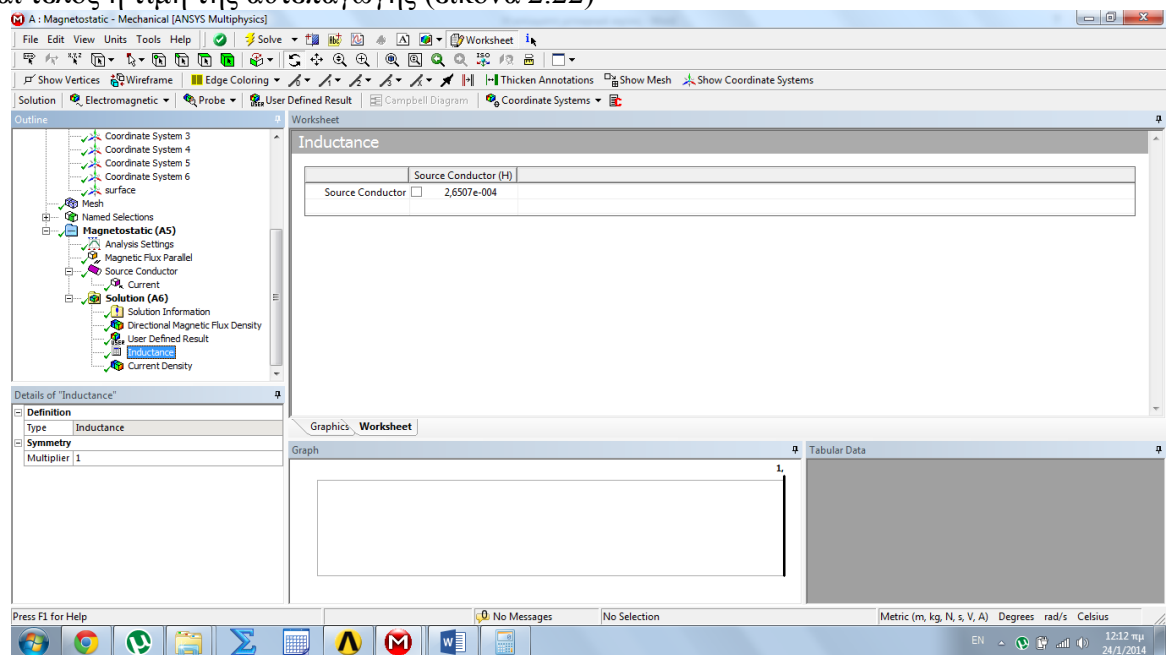
Από αυτή τη λύση προκύπτει και η τιμή της μαγνητικής ροής.

Γ) Για την πυκνότητα ρεύματος στο τύλιγμα (εικόνα 2.21)



Εικόνα 2.21: Γραφική αναπαράσταση πυκνότητας ρεύματος στο τύλιγμα του πρωτεύοντος

Δ) Και τέλος η τιμή της αυτεπαγωγής (εικόνα 2.22)



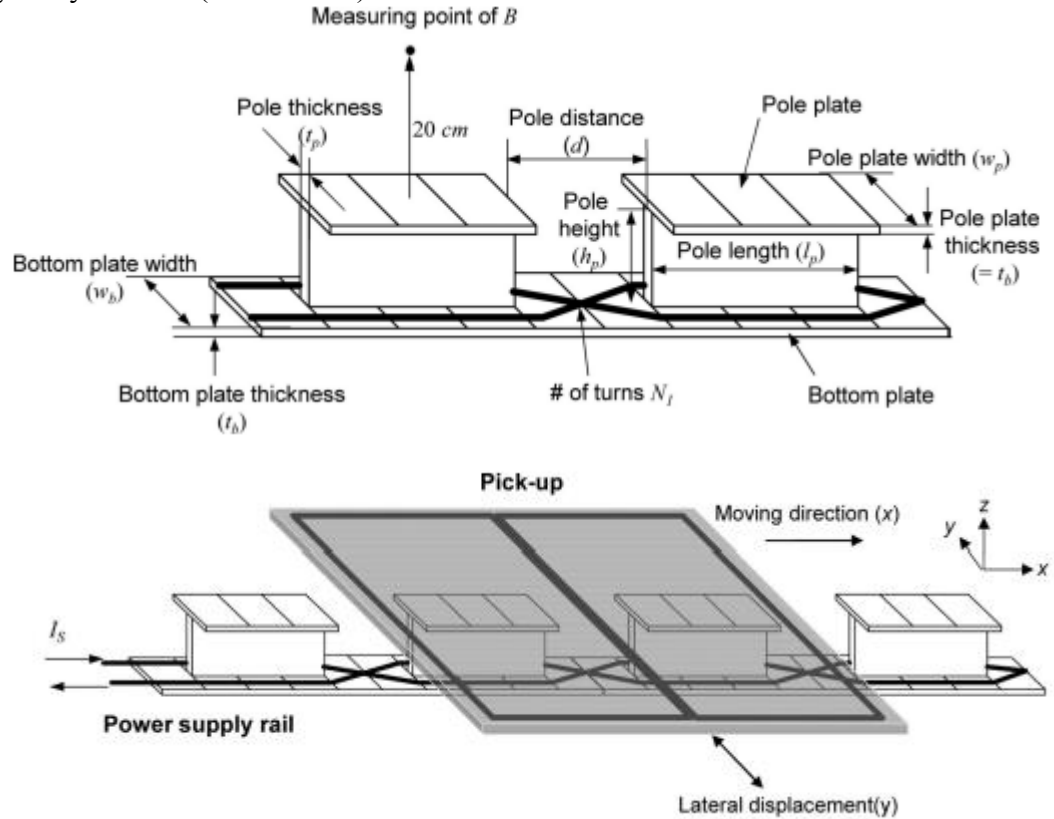
Εικόνα 2.22: Τιμή αυτεπαγωγής τυλίγματος πρωτεύοντος

2.3 ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ «Ι»

2.3.1 ΑΡΧΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Σαν βάση για τη μελέτη μας χρησιμοποιήθηκε η πρώτη διάταξη που περιεγράφηκε [22] στην ενότητα «Διατάξεις επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων» του πρώτου μέρους και η οποία

παρουσιάζεται ξανά εδώ. (εικόνα 2.23)



Εικόνα 2.23: Διάταξη τύπου «I» [22]

Η διάταξη αυτή είναι σχεδιασμένη για να μεταφέρει ισχύ δυναμικά, δηλαδή με το ηλεκτρικό όχημα να βρίσκεται σε κίνηση. Η διάταξη περιλαμβάνει, όπως είδαμε παραπάνω, πόλους αντίθετης πολικότητας εναλλάξ, ενώ και το pick-up είναι χωρισμένο σε δύο μέρη. Θα μελετηθεί ένα τέτοιο σύστημα, για στατική φόρτιση, και ως εκ τούτου με έναν πόλο και κατ' επέκταση με μονό pick-up. Ξεκινώντας από τις διαστάσεις που δίνονται στο [22] (και που αναφέρονται ξανά για ευκολία πιο κάτω) θα προσπαθήσουμε να δούμε πως η αλλαγή κάθε μίας από αυτές – τόσο στο πρωτεύον όσο και στο pick-up – επιδρά στην τάση που επάγεται στο pick-up και που δίνεται από τη σχέση

$$|V_o| = N_2 * \omega s * \Phi_m \quad (2.2)$$

όπου V_o η τάση ανοικτοκύκλωσης στο δευτερεύον, N_2 ο αριθμός των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος, ωs η συχνότητα λειτουργίας και Φ_m η μαγνητική ροή που περνάει στο δευτερεύον. Συνεπώς η μέγιστη ισχύς που δύναται να μεταφερθεί είναι:

$$Po = \frac{V_o^2}{R} \quad (2.3)$$

για ένα δεδομένο φορτίο αντίστασης R .

Οι προσομοιώσεις που έγιναν, εξετάζουν την εξάρτηση της μαγνητικής ροής που περνάει στο δευτερεύον από την εκάστοτε διάσταση. Οι διαστάσεις του pick-up θα είναι αρχικά ίσες με το ένα από τα δύο μέρη του δευτερεύοντος που προτείνεται στο [22]. Αρχικά λοιπόν θα έχουμε σύμφωνα και με τον παρακάτω πίνακα: (πίνακας 2.3)

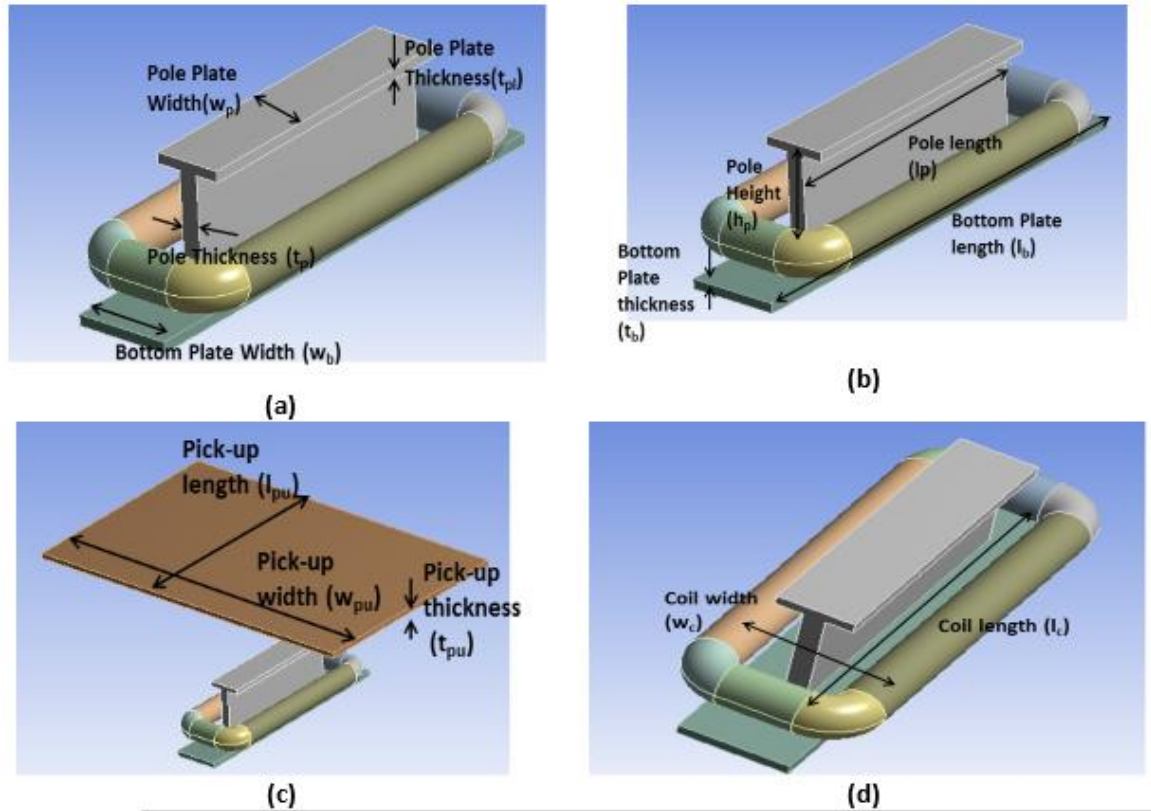
Μήκος πόλου (l_p)	30cm
-----------------------	------

Πάχος πόλου (tp)	2cm
Πλάτος πλάκας πόλου (wp)	7cm
Πάχος πλάκας πόλου (tpl)	1cm
Ύψος πόλου (hp)	10cm
Μήκος βασικής πλάκας (lb)	50cm
Πλάτος βασικής πλάκας (wb)	10cm
Πάχος βασικής πλάκας (tb)	1cm
Μήκος pick-up (lpu)	50cm
Πλάτος pick-up (wpu)	80cm
Πάχος pick-up (tpu)	1cm
Μήκος τυλίγματος (lc)	40cm
Πλάτος τυλίγματος (wc)	13cm

Πίνακας 2.3: Αρχικές διαστάσεις διάταξης τύπου I

Η αρχική διάταξη αναφέρεται πιθανότατα σε εγκατάσταση του δευτερεύοντος σε ηλεκτρικό λεωφορείο. Τέλος, όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για απόσταση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος (air gap) ίση με 20 cm. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι αυτή η απόσταση προτείνεται στη διάταξη στην οποία βασιζόμαστε, αλλά και διότι είναι μια ρεαλιστική προσέγγιση για ένα IX πόλης. Στην πραγματικότητα η απόσταση αυτή γίνεται μικρότερη, λόγω του ότι το τύλιγμα του δευτερεύοντος- που δεν περιλαμβάνεται στις προσομοιώσεις μας- τοποθετείται στο κάτω μέρος του pick up. Θα προκύψει περίπου ίση με 15 cm. Παρ' ότι αυτή η απόσταση φαντάζει η πιθανότερη, θα εξεταστεί το πώς επιδρούν διάφορες τιμές του air gap στη μεταφερόμενη ισχύ, σε έναν τελευταίο κύκλο προσομοιώσεων.

Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό ansys. Η διάταξη που θα μελετηθεί φαίνεται στις παρακάτω εικόνες: (εικόνα 2.23) οι δύο πρώτες επικεντρώνουν στον πόλο (πρωτεύον). Η τρίτη στο pick up (δευτερεύον), ενώ η τέταρτη στο τύλιγμα του πρωτεύοντος.

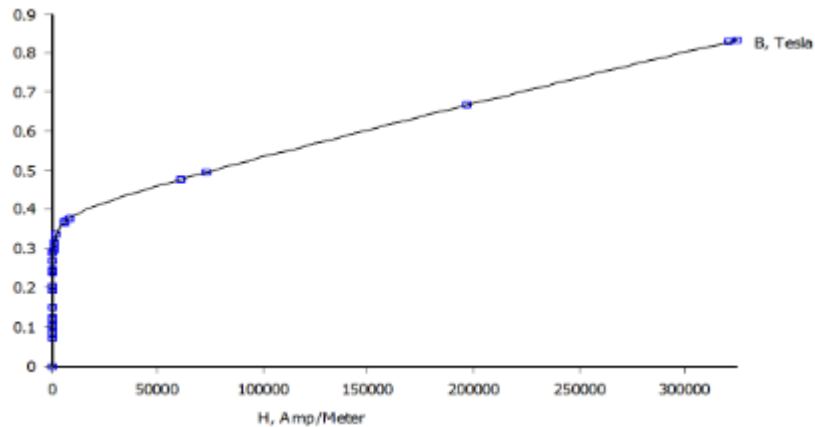


Εικόνα 2.24: Διάταξη τύπου I

Όπως είδαμε και πιο πάνω, η αρχική διάταξη λειτουργεί σε συχνότητα 20 kHz. Με βάση αυτή τη συχνότητα επιλέγουμε τον τύπο των καλωδίων litz που θα χρησιμοποιήσουμε, ακολουθώντας τη διαδικασία που περιεγράφηκε προηγουμένως.

Η αρχική διάταξη περιλαμβάνει 4 ελίγματα στο πρωτεύον, οπότε το εμβαδό της διατομής τυλίγματος θα ισούται με $4 \times 3,833 = 15,333 \text{ cm}^2$. Βέβαια, έχουν πραγματοποιηθεί και προσομοιώσεις στο Ansys, προκειμένου να εξετάσουμε πώς ο αριθμός των τυλιγμάτων επιδρά στις παραμέτρους που μελετάμε, για 6 και 8 ελίγματα με εμβαδό τυλίγματος 23 και $30,67 \text{ cm}^2$ αντίστοιχα. Η ακτίνα που προκύπτει για τα παραπάνω εμβαδά τυλίγματος είναι προσεγγιστικά 2,21 cm 2,71 cm και 3,13 cm αντίστοιχα. Η αγωγίμη περιοχή θα έχει διατομή ίση με 3,4641, 5,1988, και $6,9283 \text{ cm}^2$ αντίστοιχα.

Όσον αφορά το είδος του φερρίτη που θα χρησιμοποιηθεί, έχουμε πάρει από το πρόγραμμα Femm 4,2 το εμπορικά διαθέσιμο υλικό "Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)" με χαρακτηριστική καμπύλη (καμπύλη B-H) που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα: (εικόνα 2.25)

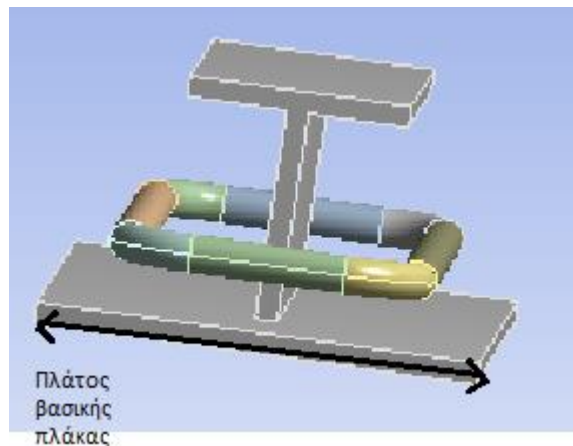


Εικόνα 2.25: Καμπύλη B-H Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)

2.3.2 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ

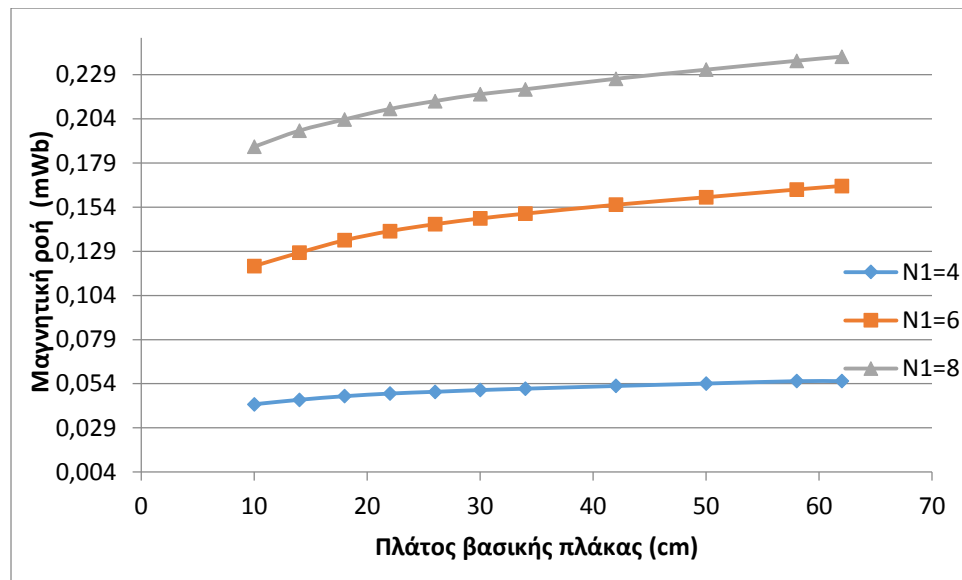
2.3.2.1 ΠΛΑΤΟΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Ο πρώτος κύκλος προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκε αφορά το πλάτος της βασικής πλάκας (εικόνα 2.26).



Εικόνα 2.26: Πλάτος βασικής πλάκας

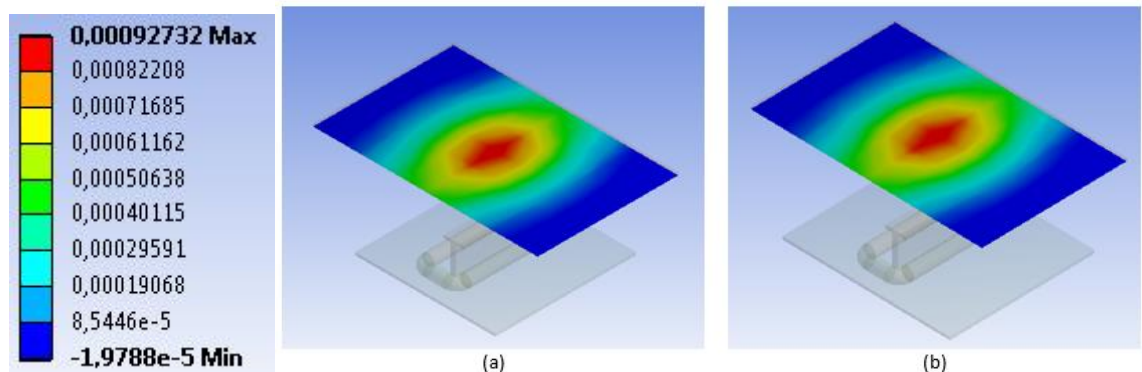
Για διάφορες τιμές του πλάτους της πλάκας εξετάζεται η μαγνητική ροή η οποία περνάει από την επιφάνεια του pick-up. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν και για πρωτεύον τύλιγμα με αριθμό ελιγμάτων 4,6 και 8 αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα. (εικόνα 2.27)



Εικόνα 2.27: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πλάτους βασικής πλάκας

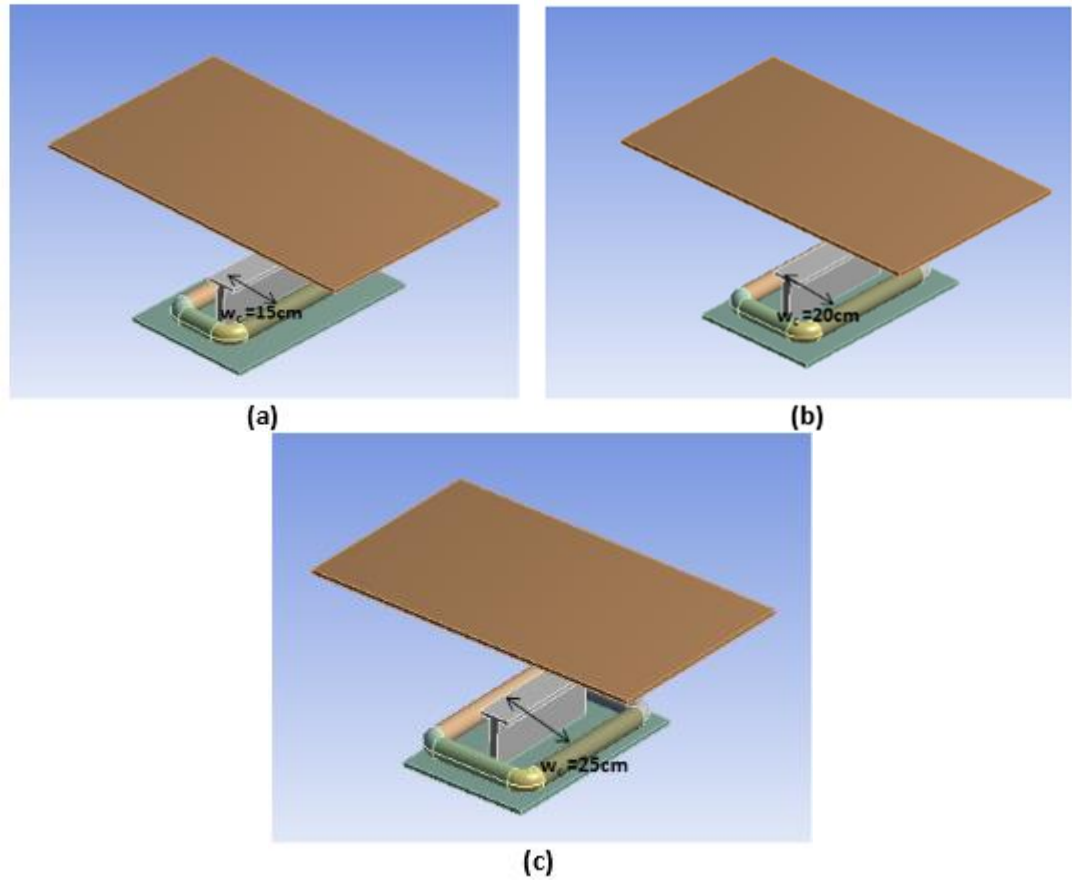
Όπως φαίνεται και παραπάνω, η μαγνητική ροή που περνάει από την επιφάνεια του pick-up εξαρτάται από το πλάτος της βασικής πλάκας του πρωτεύοντος. Για την ακρίβεια όσο αυξάνει το πλάτος τόσο μεγαλύτερη η τιμή της μαγνητικής ροής. Αυτή η αυξητική εξάρτηση γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται ο αριθμός των ελιγμάτων του τυλίγματος.

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής (B) στο pick-up, όπως προέκυψε από τη λύση του προβλήματος στο ansys. Οι διατάξεις που ακολουθούν έχουν αριθμό ελιγμάτων ίσο με 4 και πλάτος ίσο με 50 (a) και 58 (b) cm. (Οι τιμές σε Tesla) (εικόνα 2.28)



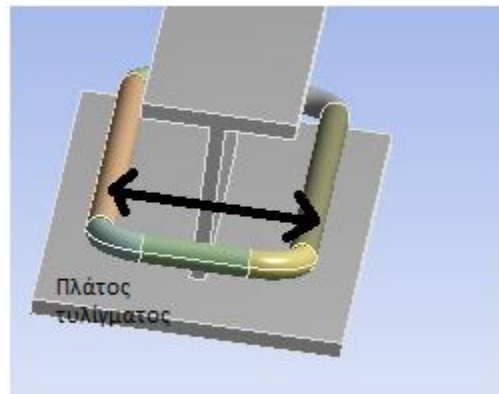
Εικόνα 2.28: Τιμή B για διάταξη 4 ελιγμάτων και πλάτος βασικής πλάκας 50(a) και 58(b) cm

Ακόμα, αναφέρεται στη βιβλιογραφία η πιθανά θετική επίδραση που έχει στη μαγνητική ζεύξη η αύξηση της περιοχής που εσωκλείεται από το πρωτεύον τύλιγμα, σε συνδυασμό με μεγαλύτερο pick-up. Η δυνατότητα για αύξηση της διάστασης του πρωτεύοντος τυλίγματος προκύπτει από το αυξημένο εμβαδό της βασικής πλάκας, ως αποτέλεσμα της αύξησης του πλάτους της, που εξετάστηκε στις πιο πάνω προσομοιώσεις.



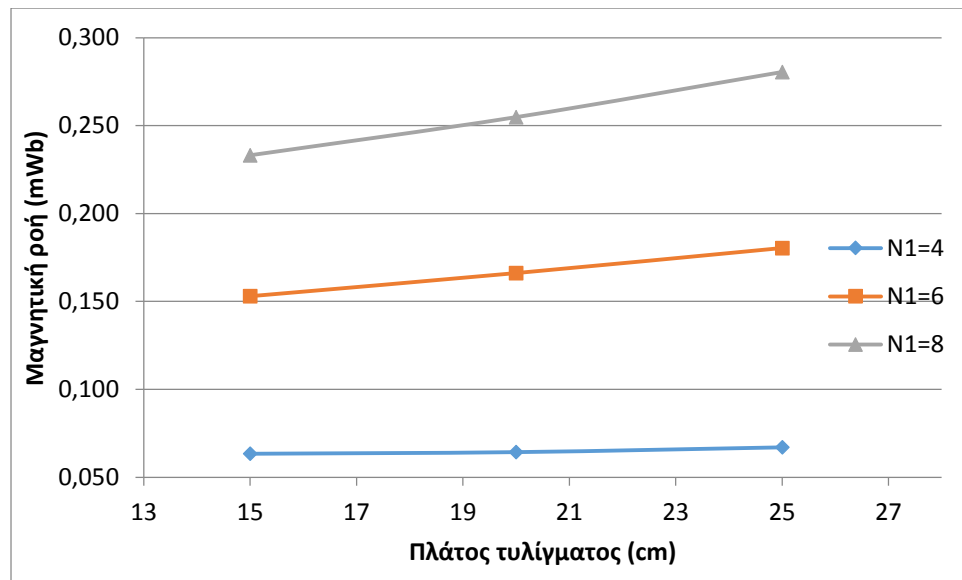
Εικόνα 2.29: Διάταξη με δεδομένο πλάτος βασικής πλάκας (30cm) και πλάτος τυλίγματος 15(a), 20(b), 25(c) cm

Αυτό επιβεβαιώνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, όπου έχουν γίνει προσομοιώσεις για διάφορες τιμές πλάτους του τυλίγματος (εικόνα 2.30) στο πρωτεύον.



Εικόνα 2.30: Πλάτος τυλίγματος

Φαίνεται η μαγνητική ροή που περνάει από την επιφάνεια του pick-up συναρτήσει του πλάτους του τυλίγματος.(εικόνα 2.31)

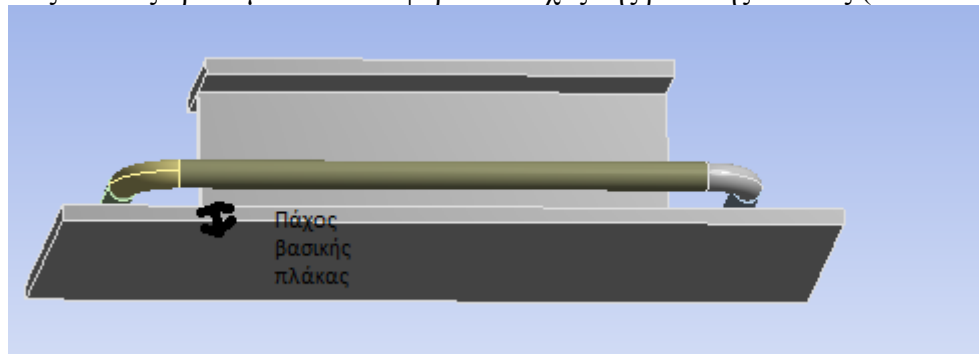


Εικόνα 2.31: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πλάτους τυλίγματος

Όπως και προηγουμένως η αύξηση του πλάτους του τυλίγματος επιδρά περισσότερο θετικά, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ελιγμάτων.

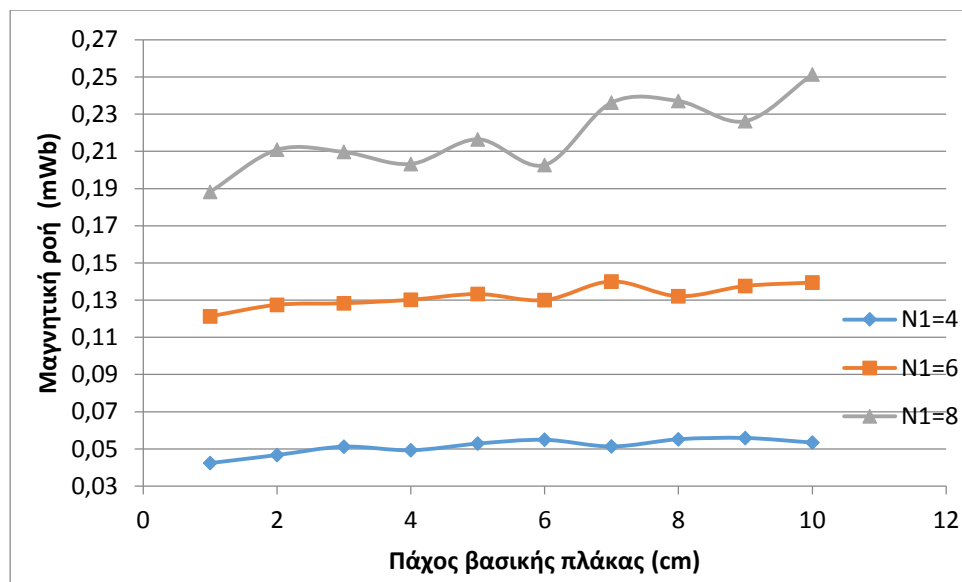
2.3.2.2 ΠΑΧΟΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Ο επόμενος κύκλος προσομοιώσεων αφορά το πάχος της βασικής πλάκας. (εικόνα 2.32)



Εικόνα 2.32: Πάχος βασικής πλάκας

Εξετάζεται η εξάρτηση της μαγνητικής ροής από τις διάφορες τιμές πάχους και πάλι για αριθμό ελιγμάτων ίσο με 4, 6 και 8. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα. (εικόνα 2.33)

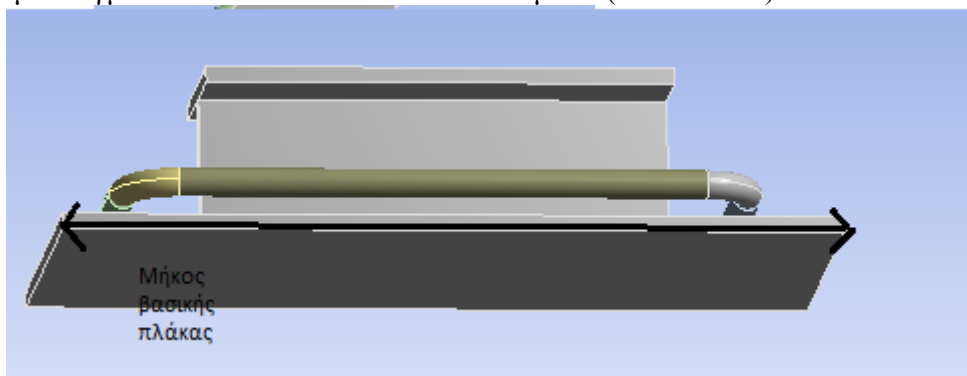


Εικόνα 2.33: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πάχους βασικής πλάκας

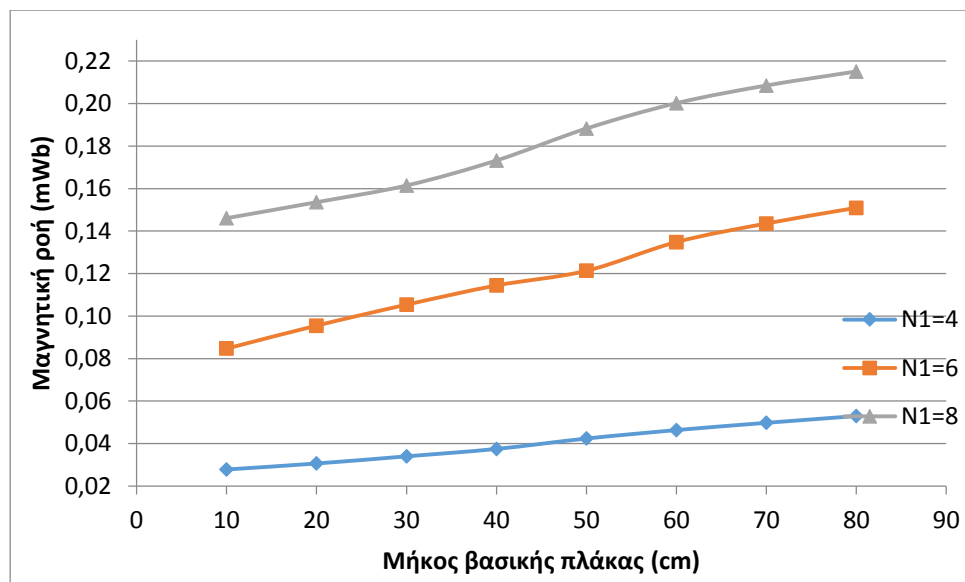
Όπως φαίνεται, ελάχιστη εξάρτηση υπάρχει μεταξύ του πάχους της βασικής πλάκας και της μαγνητικής ροής. Για την ακρίβεια, για αριθμό ελιγμάτων ίσο με 4 και 6 η γραφική παράσταση προκύπτει ευθεία με σχεδόν μηδενική κλίση. Μια ελαφρά αύξηση στη μαγνητική ροή εμφανίζεται στα 8 ελίγματα, παρουσιάζοντας βέβαια διακυμάνσεις.

2.3.2.3 ΜΗΚΟΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ

Σε αντίθεση με το πάχος της βασικής πλάκας, το αντίστοιχο μήκος (εικόνα 2.34) επιδρά στη μαγνητική ροή και μάλιστα –όπως θα δούμε και παρακάτω υπάρχει μια πρακτικά γραμμική συσχέτιση– για κάθε αριθμό ελιγμάτων. Ακολουθούν τα αποτελέσματα (εικόνα 2.35)

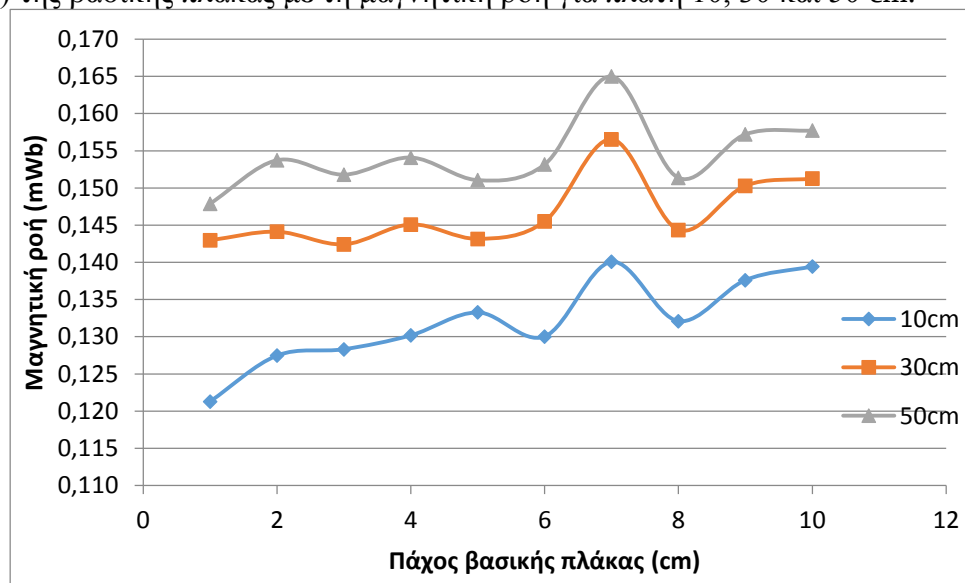


Εικόνα 2.34: Μήκος βασικής πλάκας

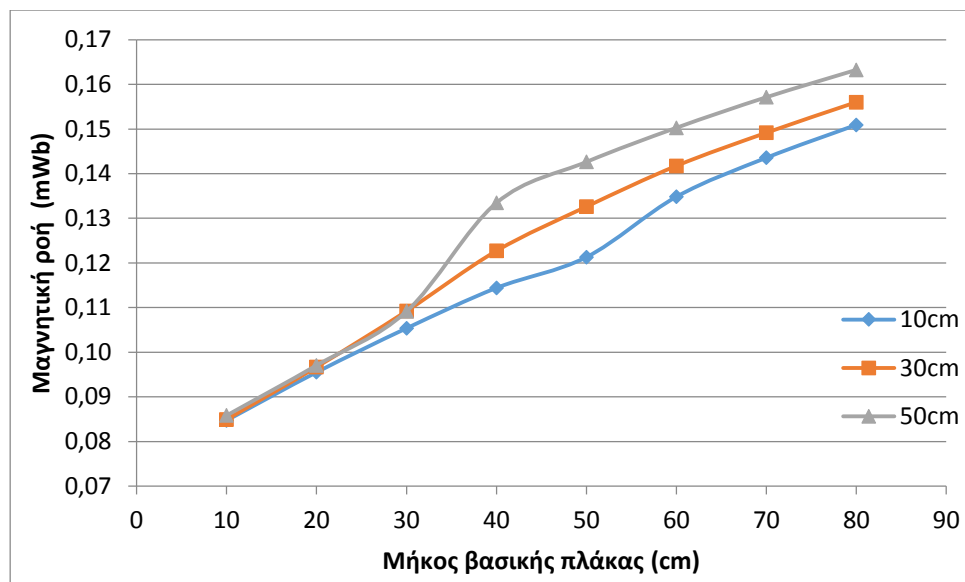


Εικόνα 2.35: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του μήκους βασικής πλάκας

Οι προσομοιώσεις σχετικά με το πάχος και το μήκος της βασικής πλάκας πραγματοποιήθηκαν για συγκεκριμένο πλάτος βασικής πλάκας (10 cm- το πλάτος που έχει η αρχική διάταξη). Θα ήταν ενδιαφέρον να βλέπαμε αν οι παραπάνω εξαρτήσεις εξακολουθούν να υφίστανται για διάφορες τιμές του πλάτους βασικής πλάκας. Οι προσομοιώσεις που ακολουθούν έχουν γίνει για πρωτεύον τύλιγμα με έξι ελίγματα. Ακολουθούν τα διαγράμματα που συσχετίζουν το πάχος (εικόνα 2.36) και το μήκος (εικόνα 2.37) της βασικής πλάκας με τη μαγνητική ροή για πλάτη 10, 30 και 50 cm.



Εικόνα 2.36: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πάχους βασικής πλάκας για 6 ελίγματα και πλάτη βασικής πλάκας 10, 30 και 50 cm.



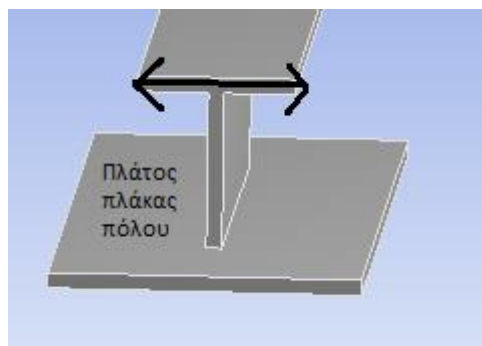
Εικόνα 2.37: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του μήκους βασικής πλάκας για 6 ελίγματα και πλάτη βασικής πλάκας 10, 30 και 50 cm

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα δύο αυτά διαγράμματα είναι τα εξής: για το μεν πάχος βλέπουμε ότι –όπως είναι και λογικό σύμφωνα και με τις προσομοιώσεις που έγιναν για το πλάτος της βάσης- όσο αυξάνεται η τιμή του πλάτους επιτυγχάνονται μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής ροής. Εν τούτοις, σημαντική αύξηση για δεδομένο πλάτος δεν παρουσιάζεται, σε συμφωνία με αυτά που είδαμε και παραπάνω. Οι διακυμάνσεις για τις οποίες μιλήσαμε εκφράζονται με ένα peak στα 7 cm. Προφανώς το πάχος αυτό προκύπτει ως το βέλτιστο, χωρίς πάντως η τιμή να διαφέρει σημαντικά από τις υπόλοιπες.

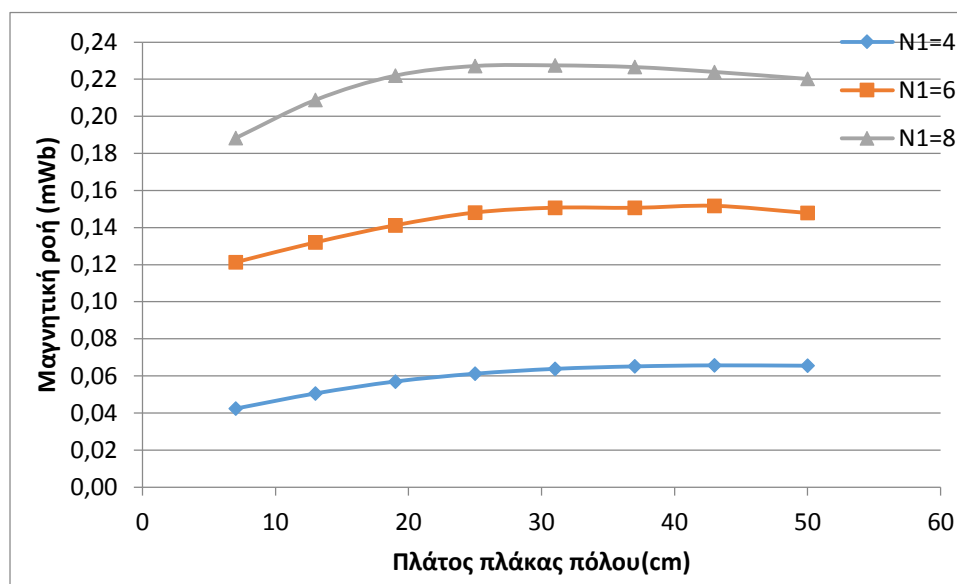
Για το δε πλάτος, αξιοσημείωτο είναι πως για μήκη βάσης πόλου μέχρι και 30 cm υπάρχει η γραμμική αύξηση που φάνηκε προηγουμένως, χωρίς όμως να επιδρούν καθόλου οι διαφορετικές τιμές που έχουν τα πλάτη. Εν συνεχεία, και για μήκη μεγαλύτερα από 30 cm, αυξάνει γραμμικά η μαγνητική ροή με την αύξηση του μήκους, αλλά για μεγαλύτερα πλάτη η τιμή της μαγνητικής ροής είναι μεγαλύτερη.

2.3.2.4 ΠΛΑΤΟΣ ΠΛΑΚΑΣ ΠΟΛΟΥ

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του πλάτους της πλάκας του πόλου (εικόνα 2.38) στη μαγνητική ροή που περνάει στην επιφάνεια του pick-up. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν περιλαμβάνουν λύσεις για αριθμό ελιγμάτων στο πρωτεύον τύλιγμα ίσο με 4, 6 και 8. Ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα. (εικόνα 2.39)



Εικόνα 2.38: Πλάτος πλάκας πόλου

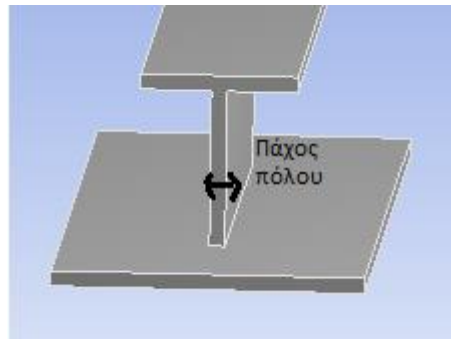


Εικόνα 2.39: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πλάτους πλάκας πόλου

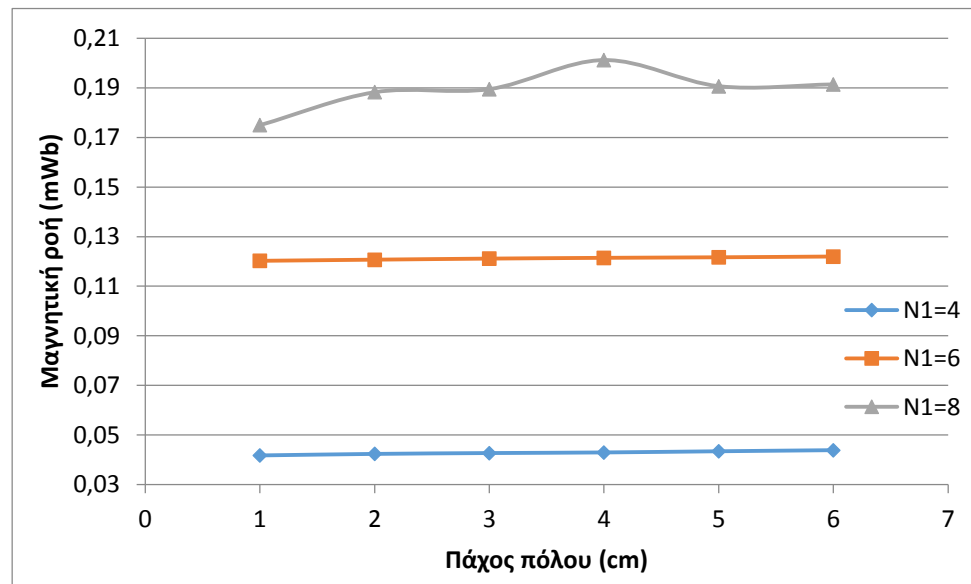
Και στις τρεις καμπύλες παρατηρείται αύξηση της μαγνητικής ροής μέχρι το πλάτος να φτάσει τα 30cm. Πάνω από αυτή την τιμή η αύξηση του πλάτους πρακτικά δεν επιδρά στη μαγνητική ροή. Όπως σε όλες τις προσομοιώσεις, οι λύσεις δείχνουν ότι οι καμπύλες που αναφέρονται σε μεγαλύτερο αριθμό ελίσμάτων είναι μετατοπισμένες προς μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής ροής.

2.3.2.5 ΠΑΧΟΣ ΠΟΛΟΥ

Όσον αφορά το πάχος του πόλου (εικόνα 2.40), θα διαπιστώσουμε παρακάτω (εικόνα 2.41) ότι σε προσομοιώσεις με 4 και 6 ελίσματα στο πρωτεύον, προέκυψαν λύσεις στις οποίες η μαγνητική ροή παραμένει σταθερή ανεξάρτητα της τιμής του πάχους πόλου. Μια μικρή εξάρτηση μεταξύ των 2 μεγεθών παρατηρήθηκε στα 8 ελίσματα, όπου η μαγνητική ροή εμφανίζει ένα peak σε πάχος πόλου ίσο με 4 cm. Ωστόσο, η διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες τιμές της μαγνητικής ροής δεν είναι σημαντική.



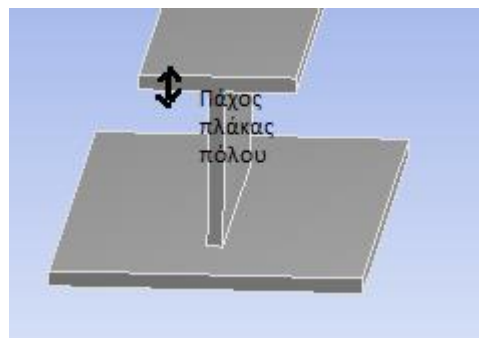
Εικόνα 2.40: Πάχος πόλου



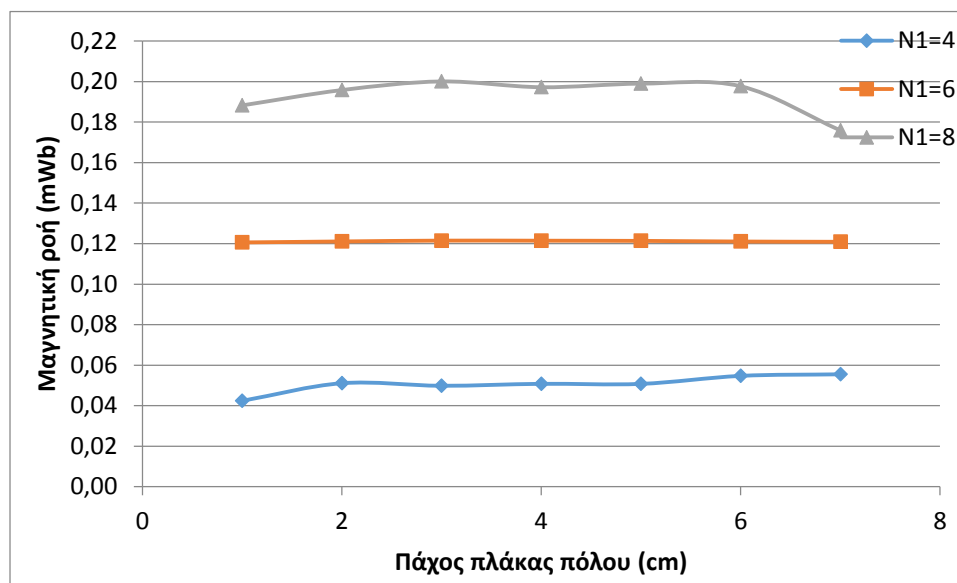
Εικόνα 2.41: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πάχους πόλου

2.3.2.6 ΠΑΧΟΣ ΠΛΑΚΑΣ ΠΟΛΟΥ

Το πάχος της πλάκας πόλου (εικόνα 2.42) φαίνεται να επιδρά πολύ λίγο στη μαγνητική ροή. Πιο συγκεκριμένα, στα 4 ελίσματα, η αύξηση του πάχους οδηγεί σε μια πολύ ελαφρά αύξηση της μαγνητικής ροής. Στα έξι ελίσματα η μαγνητική ροή παραμένει πρακτικά σταθερή. Στα οκτώ ελίσματα παρατηρείται σταθερή μαγνητική ροή μέχρι το πάχος να φτάσει τα 6 cm. Από εκεί και πέρα η μαγνητική ροή παρουσιάζει μείωση. Το παρακάτω διάγραμμα συνοψίζει τις πληροφορίες που δόθηκαν πιο πάνω.(εικόνα 2.43)

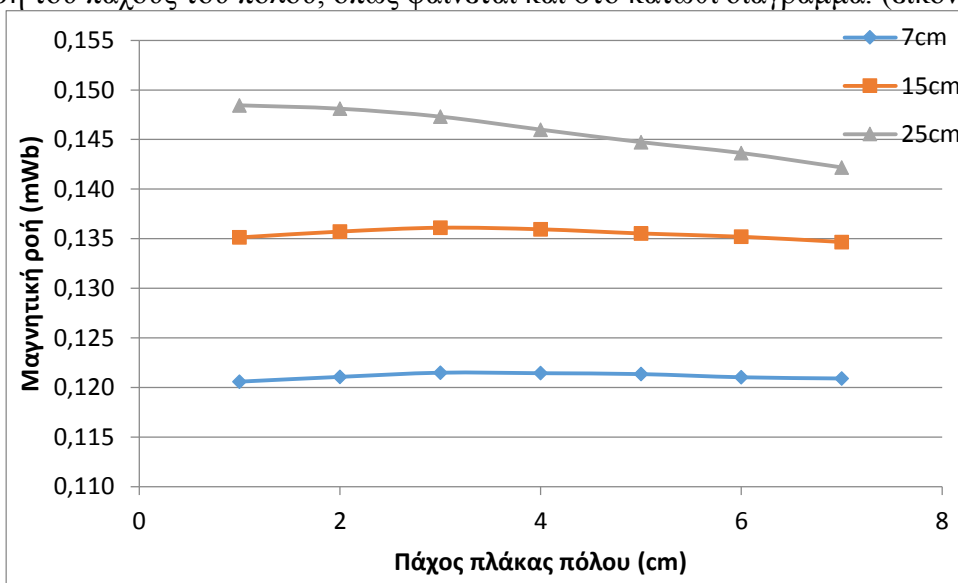


Εικόνα 2.42: Πάχος πλάκας πόλου



Εικόνα 2.43: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πάχους πλάκας πόλου

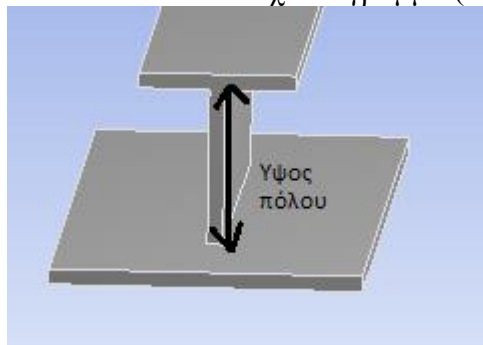
Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν, μεταβάλλοντας μόνο το πάχος της πλάκας πόλου και τον αριθμό ελιγμάτων. Θα είχε ενδιαφέρον να δούμε τη μεταβολή της μαγνητικής ροής, καθώς μεταβάλλεται το πάχος του πόλου, αλλά και το πλάτος της πλάκας του πόλου (του οποίου μεγέθους την επίδραση είδαμε πιο πάνω). Για τις ανάγκες αυτής της προσομοίωσης κρατάμε τον αριθμό των ελιγμάτων σταθερό και ίσο με 6. Για πλάτος πλάκας πόλου 7 και 15 cm η αύξηση του πάχους πόλου φαίνεται να μην επηρεάζει τη μαγνητική ροή. Αντίθετα, για πλάτος 25 cm η μαγνητική ροή μειώνεται με την αύξηση του πάχους του πόλου, όπως φαίνεται και στο κάτωθι διάγραμμα. (εικόνα 2.44)



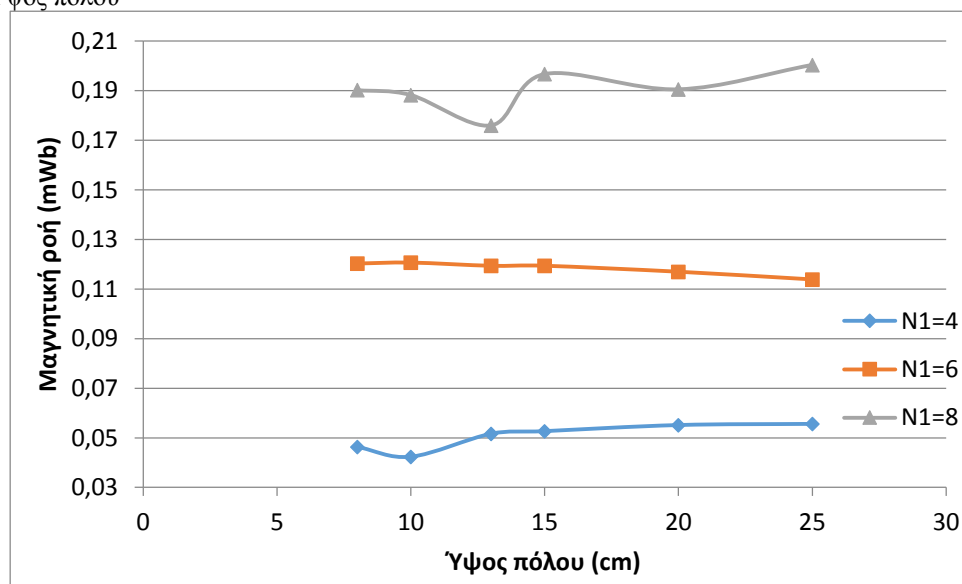
Εικόνα 2.44: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πάχους πλάκας πόλου για 6 ελίγματα και πλάτη πλάκας πόλου 7, 15 και 25 cm

2.3.2.7 ΥΨΟΣ ΠΟΛΟΥ

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν με διαφορετικά ύψη πόλου (το ύψος πόλου φαίνεται στην εικόνα 2.45) βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα. Στην περίπτωση των 4 ελίσμάτων παρατηρείται μια ελαφρά αύξηση της μαγνητικής ροής που διέρχεται από την επιφάνεια του δευτερεύοντος. Στα έξι ελίσματα έχουμε μια μικρή μείωση για μεγάλες τιμές του ύψους του πόλου, ενώ στα 8 ελίσματα υπάρχει ένα ελάχιστο στα 13 cm του ύψους πόλου. Οι διαφορές πάντως στις τιμές είναι αμελητέες και ως εκ τούτου εξάγεται το συμπέρασμα ότι η διάσταση αυτή δεν επιδρά ουσιαστικά στη μαγνητική ροή που διέρχεται από το δευτερεύον. Ακολουθεί το αντίστοιχο διάγραμμα (εικόνα 2.46):



Εικόνα 2.45: Ύψος πόλου

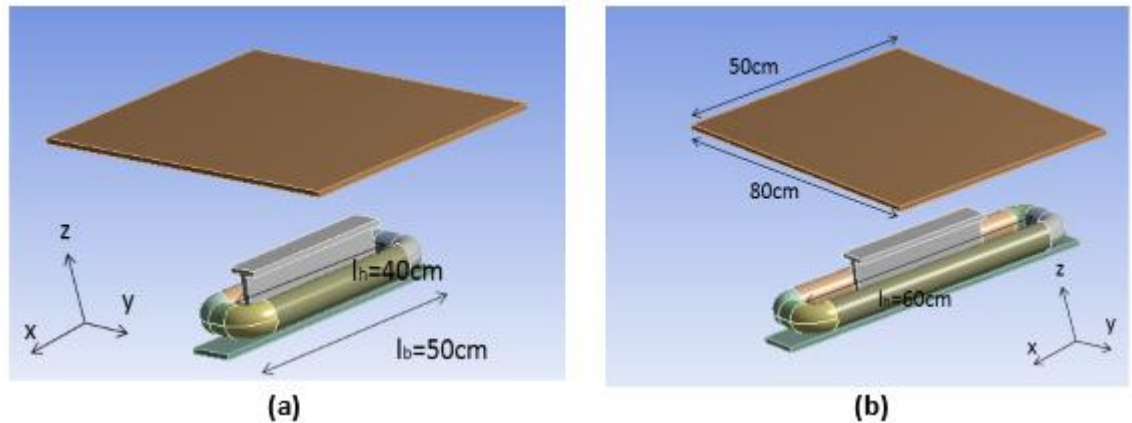


Εικόνα 2.46: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του ύψους πόλου

2.3.2.8 ΜΗΚΟΣ ΠΟΛΟΥ

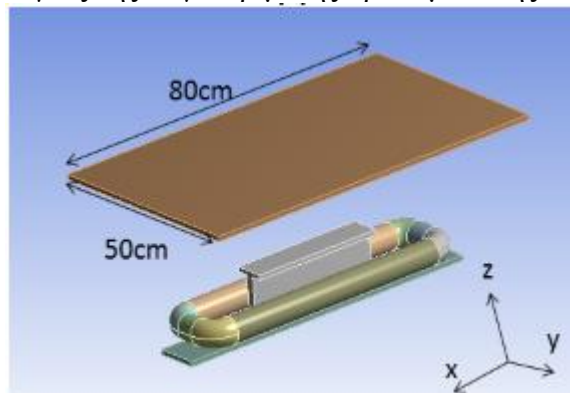
Το τελευταίο μέγεθος που θα εξεταστεί στη διάταξη του πρωτεύοντος είναι το μήκος πόλου. Σε αυτόν τον κύκλο των προσομοιώσεων θα μεταβάλλουμε το μήκος του πόλου. Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση στη μεταφερόμενη ισχύ αυτής της μεταβολής, θα χρειαστεί να μεταβάλλουμε και 2 άλλες διαστάσεις άμεσα εξαρτώμενες από το μήκος πόλου: το μήκος της βάσης του πόλου, αλλά και το μήκος του τυλίγματος. Θα θεωρήσουμε ότι οι τιμές για το μήκος πόλου θα παίρνουν τιμές από 10 μέχρι και 50 cm (δηλαδή μέχρι και 20 cm περισσότερα από την αρχική διάταξη). Θα χρειαστεί, επομένως, να θέσουμε το μήκος τυλίγματος στα 60 cm (από 40 cm στην αρχική διάταξη) και το μήκος βάσης πόλου στα 70 cm (από 50 cm στην αρχική διάταξη). Στις παρακάτω εικόνες (εικόνα 2.47 (a,b)) φαίνεται τόσο η αρχική διάταξη (a), όσο και η διάταξη με τις αλλαγές που περιεγράφηκαν πιο

πάνω για να εξυπηρετήσουν της ανάγκες τις προσομοιώσής μας (b)



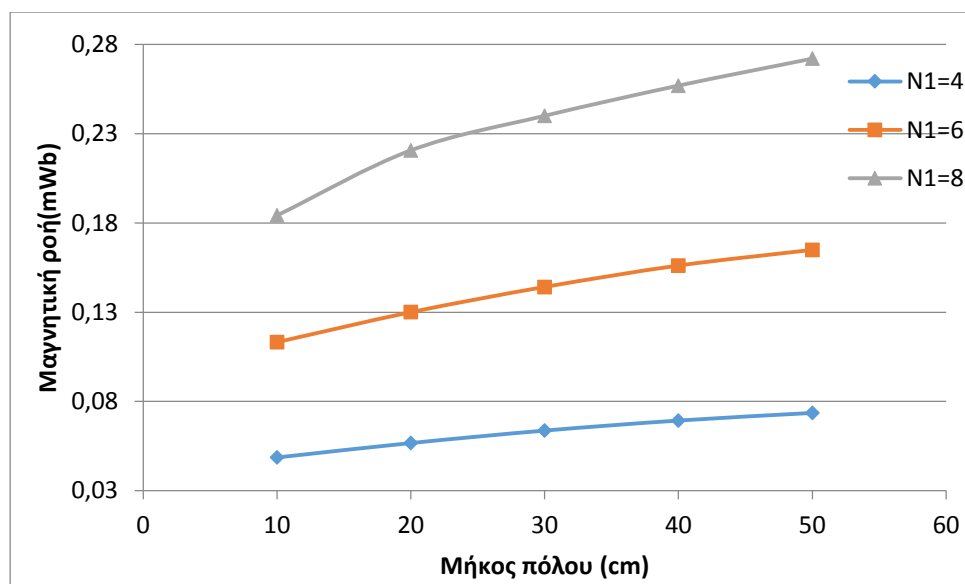
Εικόνα 2.47: (a) Αρχική διάταξη και (b) προσαρμοσμένη για τις ανάγκες των προσομοιώσεων με μεταβλητό μήκος πόλου

Όπως φαίνεται στη δεύτερη εικόνα, οι παραπάνω αλλαγές «αναγκάζουν» το τύλιγμα να εκτείνεται κυρίως στον άξονα x , τη στιγμή που το pick up εκτείνεται κυρίως στον άξονα y . Προκειμένου να εκμεταλλευτούμε τη νέα γεωμετρία θα περιστρέψουμε το δευτερεύον, ώστε η μεγαλύτερη του διάσταση να είναι στον άξονα y , όπως φαίνεται στην εικόνα 2.48. Να σημειωθεί ότι αυτή η αλλαγή στο pick up γίνεται για τις ανάγκες της συγκεκριμένης προσομοίωσης.



Εικόνα 2.48: Διάταξη με προσαρμοσμένο pick up για τις ανάγκες της προσομοίωσης

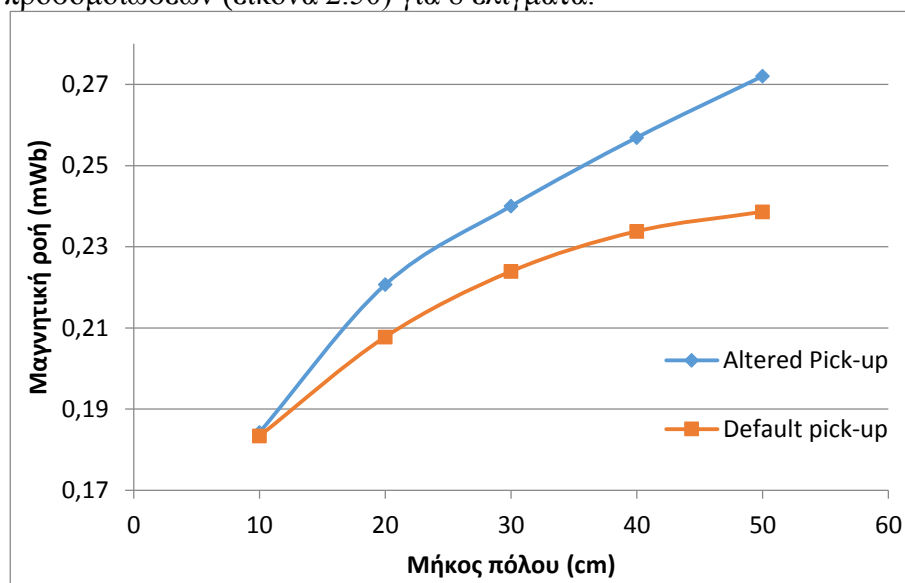
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για μήκη πόλου από 10 έως 50 cm για τη νέα γεωμετρία του τυλίγματος, της βάσης πόλου, αλλά και του pick up παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 2.49) για 4, 6 και 8 ελίγματα στο τύλιγμα του πρωτεύοντος.



Εικόνα 2.49: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του μήκους πόλου

Το διάγραμμα δείχνει τη θετική επίδραση που έχει στη μαγνητική ροή η αύξηση του μήκους του πόλου. Ακόμα η αύξηση της μαγνητικής ροής γίνεται ακόμα πιο έντονα με την αύξηση του μήκους στα 6 ελίγματα σε σχέση με τα 4 και ακόμα πιο έντονα στα 8.

Το καινούριο pick up που χρησιμοποιήθηκε σε αυτόν τον κύκλο προσομοιώσεων είχε όντως θετική επίδραση στη μαγνητική ροή σε σχέση με το αρχικό, όπως φαίνεται και στα παρακάτω αποτελέσματα προσομοιώσεων (εικόνα 2.50) για 8 ελίγματα:



Εικόνα 2.50: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του μήκους πόλου για αρχικό και προσαρμοσμένο pick up στα 8 ελίγματα

2.3.3 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ «I» ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΥΨΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Έχοντας μελετήσει την επίδραση των διαφόρων διαστάσεων στη μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια του Pick-up, και επομένως και της ισχύος που αποδίδεται στο pick-up, είμαστε σε θέση να ερευνήσουμε μία συγκεκριμένη εφαρμογή της διάταξης “T” για τη δημιουργία μίας διάταξης που θα δύναται να μεταφέρει μία υψηλή ισχύ στο όχημα.

Η αρχική διάταξη “T” πάνω στην οποία βασίστηκε η μελέτη μας [22] αναφέρεται σε ασύρματη φόρτιση καθώς το όχημα κινείται. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιθυμούμε την κατασκευή μίας διάταξης για στατική ασύρματη φόρτιση, επομένως, δεν είναι αναγκαίο πια το μικρό πλάτος στη διάταξη του πρωτεύοντος, αλλά και το μεγάλο pick- up –που είναι αναγκαία στη δυναμική φόρτιση. Θα προσπαθήσουμε εν τούτοις να μεταφέρεται η μέγιστη ισχύς με τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον, χωρίς όμως την αυστηρότητα των παραπάνω περιορισμών.

2.3.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ

Ειδικότερα για το πρωτεύον καταλήξαμε σε μια διάταξη τύπου I, της οποίας τα χαρακτηριστικά διαμορφώθηκαν εν πολλοίς ως αποτέλεσμα των παραπάνω προσομοιώσεων, λαμβάνοντας υπ’ όψη όμως και τις εμπορικά διαθέσιμες διατάξεις- κάποιες εκ των οποίων παρουσιάστηκαν στην παράγραφο «Διατάξεις επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων» του πρώτου μέρους.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι αισθητή αύξηση της μαγνητικής ροής έχουμε από την αύξηση των παρακάτω μεγεθών:

- Πλάτος βασικής πλάκας (για αριθμό ελιγμάτων $N=6$, ή $N=8$. Στα τέσσερα ελίγματα η αύξηση της μαγνητικής ροής είναι ανεπαίσθητη).
- Πλάτος τυλίγματος
- Μήκος βασικής πλάκας
- Μήκος πόλου
- Πλάτος πλάκας πόλου (πιο μικρή αύξηση της ροής σε σχέση με τα προηγούμενα μεγέθη)

Τα μεγέθη που συνεισφέρουν λίγο έως καθόλου στην αύξηση της μαγνητικής ροής καθώς αυξάνονται είναι:

- Πάχος βασικής πλάκας
- Πάχος πόλου (μικρή συνεισφορά)
- Πάχος πλάκας πόλου
- Ύψος πόλου

Γενικά, για κάθε μεταβολή μεγέθους παρατηρήθηκε αύξηση της μαγνητικής ροής για περισσότερα ελίγματα στο τύλιγμα του πρωτεύοντος

Δίνονται στον πίνακα 2.4 συνοπτικά οι βασικές διαστάσεις αυτών των διατάξεων για το πρωτεύον και το δευτερεύον.

ΔΙΑΤΑΞΗ	Διαστάσεις πρωτεύοντος	Διαστάσεις δευτερεύοντος
---------	---------------------------	-----------------------------

Εικόνα 1.25 [23]	Μέγιστη διάσταση: 50 cm	Μέγιστη διάσταση: 40 cm
Εικόνα 1.26 (DD)[24]	0,31m ²	54 x 80 cm
Εικόνα 1.27 [25]	Διάμετρος: 42 cm	Διάμετρος 42 cm
Εικόνα 1.28 (witricity)	50 x 50 x 3,75 cm	50 x 50 x 3,75 cm
Εικόνα 1.29 (evatran)	Μέγιστή διάσταση: 55,9 cm	46,4 x 76,2 x 12,7 cm
Εικόνα 1.30 (siemens)	-	25 x 25 x 2 cm

Πίνακας 2.4

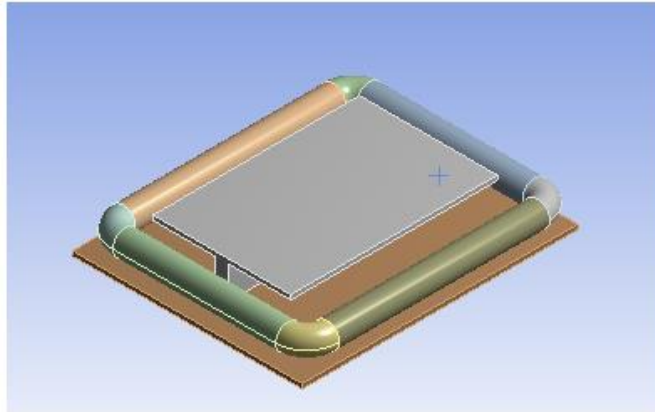
Έτσι, αλλάξαμε τις διαστάσεις των οποίων η αύξηση προκαλούσε αύξηση της μαγνητικής ροής, φροντίζοντας να είναι κοντά στην πραγματικότητα των βιομηχανικών εφαρμογών. Σταθερά έμειναν τα μεγέθη: πάχος βασικής πλάκας και πάχος πλάκας πόλου, ενώ για το ύψος πόλου υπήρχε αύξηση, αφού η μαγνητική ροή έμενε σταθερή για οποιαδήποτε μεταβολή του. Μια μικρή αύξηση είχε το πάχος πόλου. Όλα τα υπόλοιπα μεγέθη – που είπαμε και πιο πάνω ότι επιδρούσαν αισθητά στην αύξηση της μαγνητικής ροής- αυξήθηκαν σημαντικά. Την αύξηση του μήκους βασικής πλάκας ακολούθησε αύξηση και του μήκος του τυλίγματος. Αντίστοιχα για το πλάτος βασικής πλάκας. Το πλάτος βασικής πλάκας και το πλάτος τυλίγματος είχαν την πιο μεγάλη αύξηση, καθώς υπήρχαν πολλά περιθώρια μέχρι τα «όρια» που έβαλαν οι παρουσιασθείσες διατάξεις- λόγω του ότι ξεκινήσαμε από μια διάταξη με πολύ μικρό πλάτος.

Οι διαστάσεις του πρωτεύοντος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα: (2.5)

Μήκος πόλου (lp)	45 cm
Πάχος πόλου (tp)	3 cm
Πλάτος πλάκας πόλου (wpl)	20 cm
Πάχος πλάκας πόλου (tpl)	1 cm
Ύψος πόλου (hp)	7 cm
Μήκος βασικής πλάκας (lb)	60 cm
Πλάτος βασικής πλάκας (wb)	50 cm
Πάχος βασικής πλάκας (tb)	1 cm
Μήκος τυλίγματος (lc)	54 cm
Πλάτος τυλίγματος (wc)	44 cm

Πίνακας 2.5: Τελικές διαστάσεις πρωτεύοντος

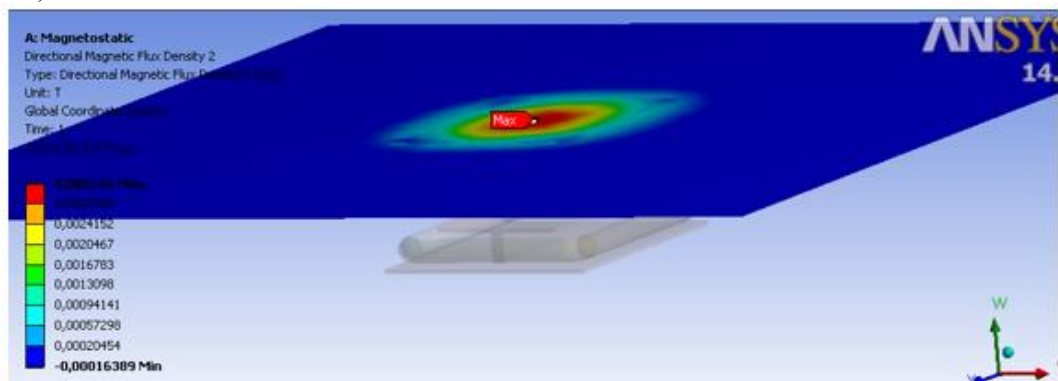
Ακολουθεί η εικόνα (2.51)για το πρωτεύον από το πρόγραμμα ansys.



Εικόνα 2.51: Τελική διάταξη πρωτεύοντος

2.3.3.2 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΑΠΟ ΤΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ

Με δεδομένες τις τελικές διαστάσεις του πρωτεύοντος θα προσπαθήσουμε να βελτιστοποιήσουμε τη λύση του προβλήματός μας μεταβάλλοντας τις διαστάσεις του δευτερεύοντος. Αναφερόμαστε στο μήκος, το πλάτος και το πάχος του pick up. Και εδώ οι προσομοιώσεις θα λαμβάνουν υπ' όψη μια απόσταση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ίση με 20 cm. Για αυτήν την τιμή η πυκνότητα μαγνητικής ροής B στο επίπεδο αυτού του ύψους θα προκύπτει σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα. (εικόνα 2.52)

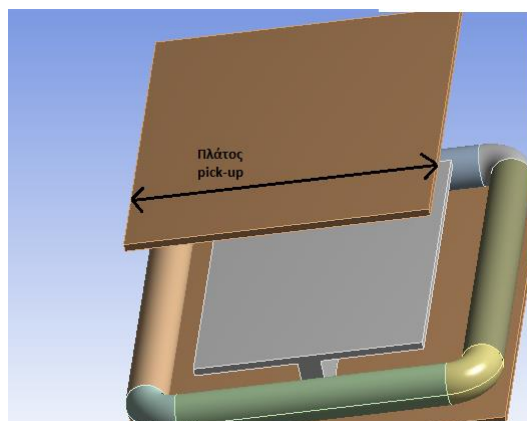


Εικόνα 2.52: B στο επίπεδο όπου το ύψος είναι 20 cm

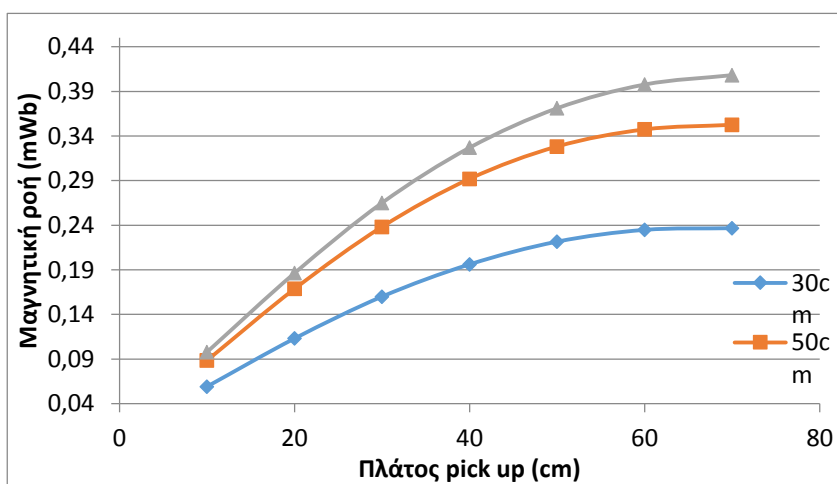
Το μεγαλύτερο μέρος της μαγνητικής ροής συγκεντρώνεται πάνω από το πρωτεύον, ενώ η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής είναι ακριβώς πάνω από το κέντρο του πρωτεύοντος.

2.3.3.2.1 ΠΛΑΤΟΣ PICK-UP

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διάφορες τιμές του πλάτους του pick up παρουσιάζονται στο επόμενο διάγραμμα. (εικόνα 2.54) Οι προσομοιώσεις έγιναν για μήκη 30, 50 και 70 cm.



Εικόνα 2.53: Πλάτος pick-up

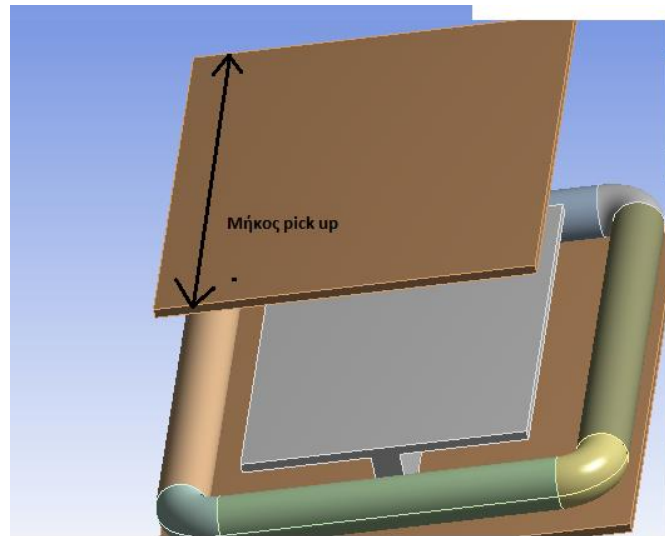


Εικόνα 2.54: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πλάτους pick up

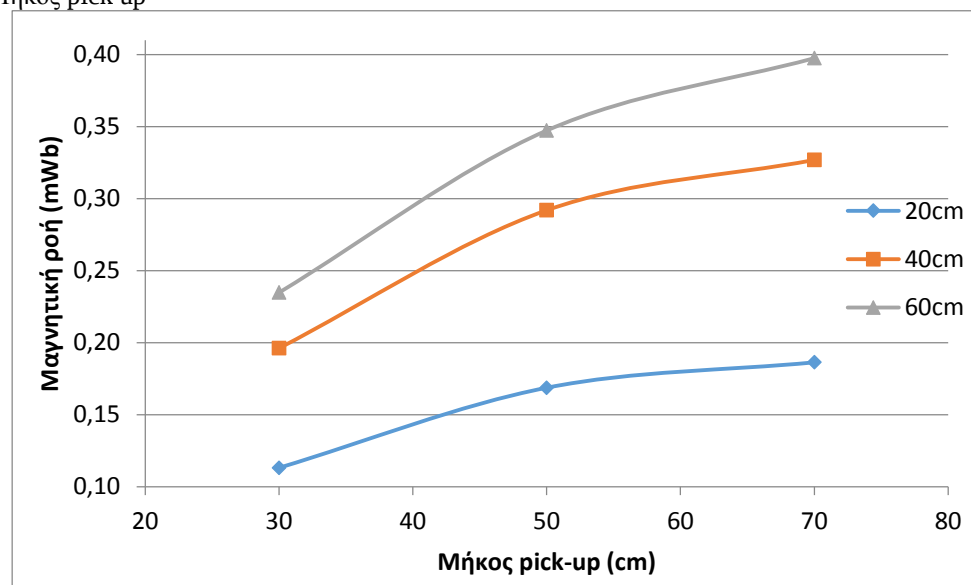
Από το διάγραμμα είναι εμφανή τα εξής: α) η τιμή της μαγνητικής ροής αυξάνει με την αύξηση του πλάτους του pick up μέχρι τα 60 cm, από όπου και παραμένει σχεδόν σταθερή και β) επιτυγχάνονται υψηλότερες τιμές μαγνητικής ροής για μεγαλύτερα μήκη του pick up (με μεγαλύτερη διαφορά πάντως από τα 30 στα 50 cm παρά από τα 50 στα 70 cm).

2.3.3.2. ΜΗΚΟΣ PICK-UP

Αντίστοιχες προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν και για το μήκος (εικόνα 2.55). Για πλάτη 20, 40 και 60 cm βλέπουμε ότι η μαγνητική ροή αυξάνεται για μεγαλύτερα μήκη, πολύ πιο αργά όμως για τιμές πάνω από τα 50 cm. Όπως είναι λογικό και από την προηγούμενη σειρά προσομοιώσεων, για μεγαλύτερα πλάτη πετυχαίνουμε μεγαλύτερες τιμές μαγνητικής ροής



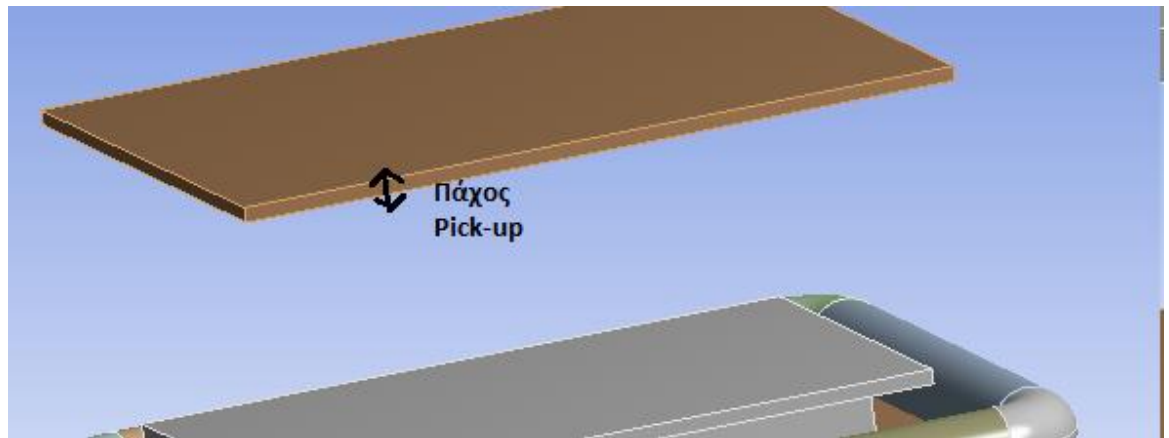
Εικόνα 2.55: Μήκος pick up



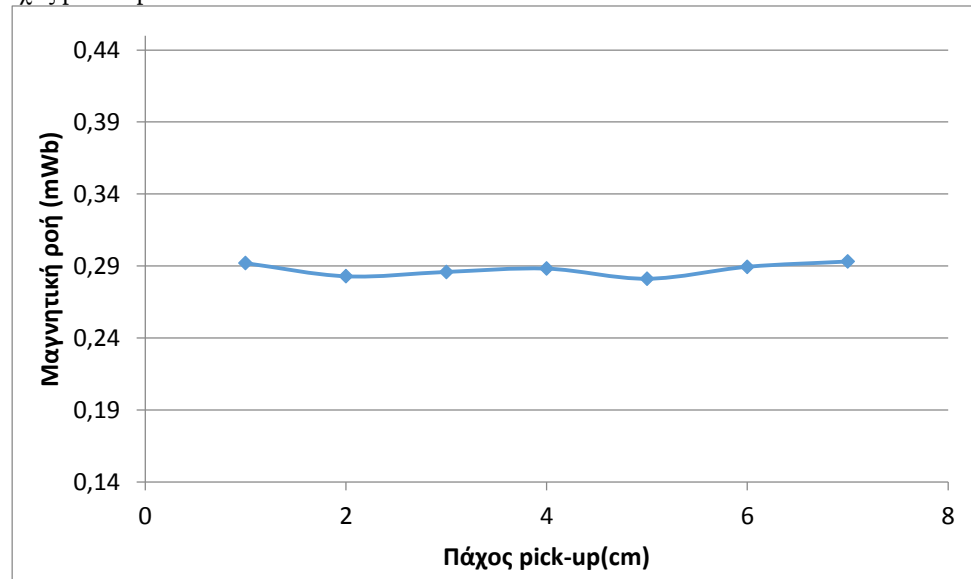
Εικόνα 2.56: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του μήκους pick up

2.3.3.2.3 ΠΑΧΟΣ PICK UP

Το πάχος του pick up (εικόνα 2.57) προέκυψε από τις προσομοιώσεις να μην επιδρά ουσιαστικά στη μαγνητική ροή η οποία παραμένει σταθερή παρά την αύξησή του.(εικόνα 2.58)



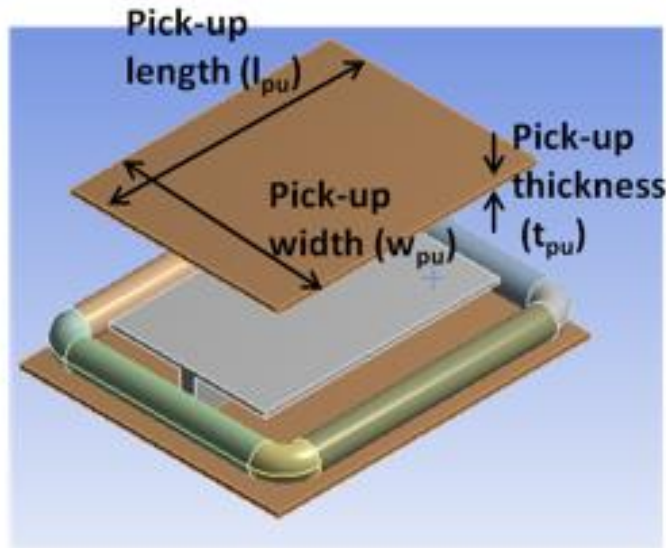
Εικόνα 2.57: Πάχος pick-up



Εικόνα 2.58: Γράφημα μαγνητικής ροής συναρτήσει του πάχους pick up

2.3.3.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ PICK-UP

Σύμφωνα και με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως, το πλάτος δεν έχει νόημα να υπερβεί τα 60 cm και το μήκος τα 50 cm. Λαμβάνοντας υπ' όψη και τις εμπορικά διαθέσιμες διατάξεις καταλήξαμε σε ένα μήκος 50 cm και πλάτος 40 cm, μικρότερο από το θεωρητικά βέλτιστο, για να μπορεί να προσαρμοστεί στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Όσον αφορά το πάχος, το ότι δεν επιδρά στη μαγνητική ροή που διαπερνά το δευτερεύον, υποδεικνύει ως βέλτιστη επιλογή την ελάχιστη, δηλαδή 1 cm. Η τελική μορφή του pick up φαίνεται στην εικόνα 2.59.



Εικόνα 2.59: Τελική μορφή pick up

2.3.3.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΡΙΘΜΟΥ ΕΛΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ

Οι προσομοιώσεις που έγιναν προκειμένου να καθοριστεί η τελική μορφή του πόλου έδειξαν καθαρά το πώς η αύξηση του αριθμού των ελιγμάτων στο τύλιγμα του πρωτεύοντος επιδρούσε θετικά στη μαγνητική ροή που περνούσε από το pick up, ανεξαρτήτως του μεγέθους το οποίο κάθε φορά μεταβαλλόταν. Με βάση αυτό θα έπρεπε να επιλέξουμε όσο γίνεται μεγαλύτερο αριθμό ελιγμάτων. Από την άλλη περισσότερα ελίγματα συνεπάγεται μεγαλύτερο μήκος litz καλωδίων και συνεπώς μεγαλύτερο κόστος. Ο συμβιβασμός των δύο αυτών στοιχείων, οδήγησε στην επιλογή της μεσαίας από τις τρεις τιμές για τις οποίες έγιναν οι προσομοιώσεις. Καταλήξαμε δηλαδή στα 6 ελίγματα για το τύλιγμα του πρωτεύοντος.

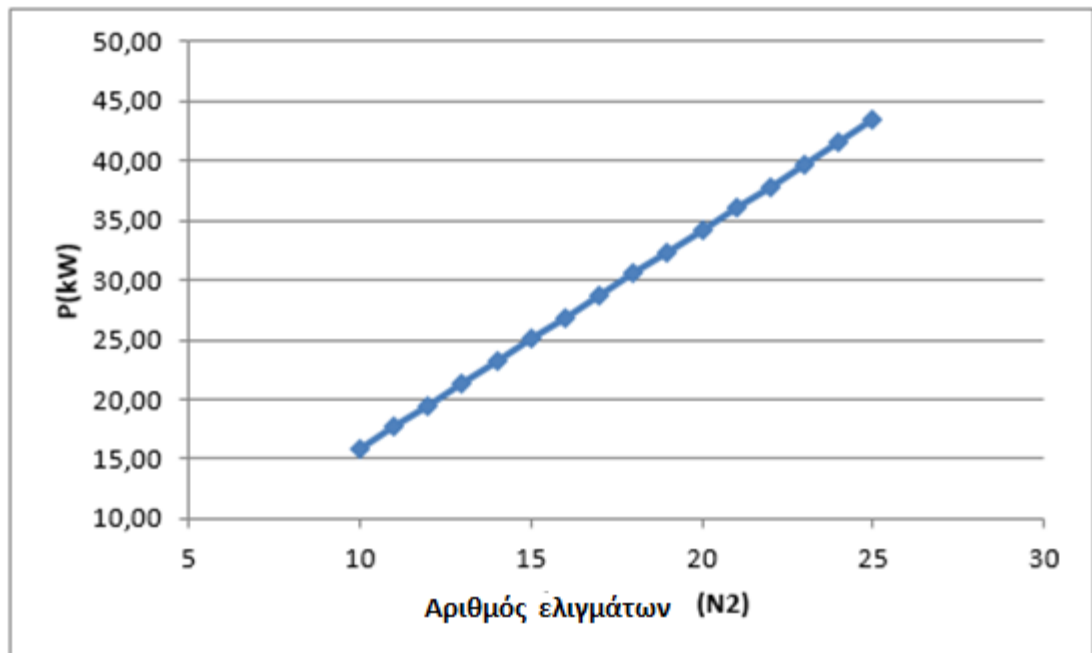
Όσον αφορά το δευτερεύον, η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε ως αφετηρία για την εργασία μας ορίζει το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να ρέει στα ελίγματα του δευτερεύοντος ως 50 A[22]. Λόγω εσωτερικής αντίστασης δημιουργείται μία πτώση τάσης $V_{drop} = 50$ V. Θα θεωρήσουμε το ίδιο σύστημα ελέγχου για τη διάταξη μας και θα πάρουμε τις ίδιες τιμές για το ρεύμα εξόδου και την πτώση τάσης. Οι προσομοιώσεις μας, για απόσταση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ίση με 20 cm, έδωσαν μαγνητική ροή στο pick up περίπου ίση με $2,92 \cdot 10^{-4}$ Wb. Με βάση τη σχέση (2.2)

$$|V_o| = N_2 \cdot \omega s \cdot \Phi_m \quad (2.2)$$

για την τάση εξόδου, η μόνη μεταβλητή που μένει να προσδιοριστεί είναι ο αριθμός των ελιγμάτων του δευτερεύοντος (η κυκλική συχνότητα είναι 2π20kHz). Χρησιμοποιώντας τις τιμές που αναφέρθηκαν προηγουμένως για την πτώση τάσης και το ρεύμα εξόδου, προκύπτει η ισχύς εξόδου ως :

$$P_o = (V_o - V_{drop}) \cdot I_o \quad (2.4)$$

Για διάφορες τιμές του αριθμού ελιγμάτων προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα για την ισχύ εξόδου.



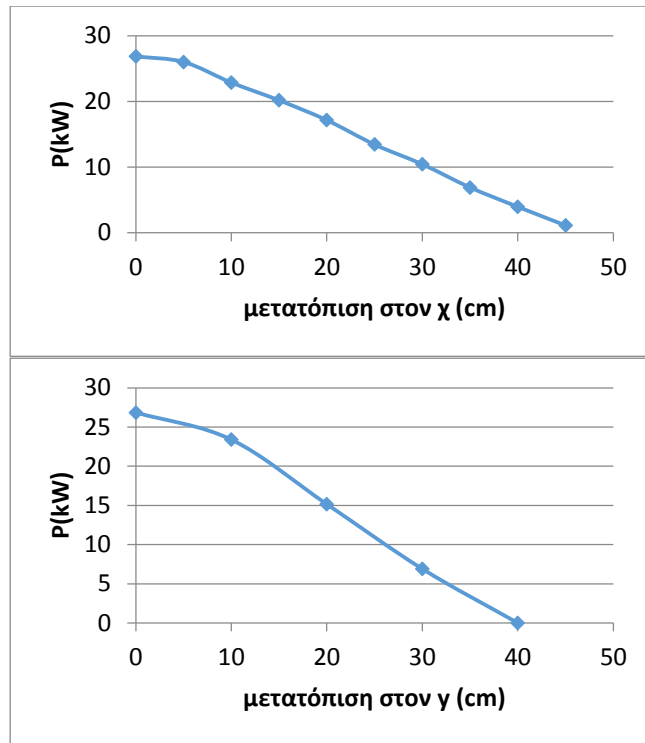
Εικόνα 2.60: Γράφημα μεταφερόμενης ισχύος συναρτήσει του αριθμού ελιγμάτων του δευτερεύοντος τυλίγματος

Όπως φαίνεται, η αύξηση των ελιγμάτων στο δευτερεύον οδηγεί σε αύξηση της ισχύος εξόδου και μάλιστα με μία σχέση γραμμική και με μεγάλη κλίση. Φαίνεται ότι για 16 ελίγματα η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι 27 kW. Συμβιβασμός γίνεται και εδώ καθώς μεγαλύτερος αριθμός ελιγμάτων οδηγεί σε αύξηση του κόστους (λόγω των καλωδίων litz), αλλά μεγαλύτερο ρόλο παίζει η αύξηση του βάρους του δευτερεύοντος αλλά και επί της ουσίας αύξηση των διαστάσεων.

2.3.3.5 ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΕΙΣ ΤΟΥ PICK-UP ΣΤΟΥΣ ΑΞΟΝΕΣ

Στη συνέχεια θα εξεταστεί, με βάση και τον αριθμό των ελιγμάτων που επελέγησαν, το κατά πόσο η ευθυγράμμιση, δηλαδή το κατά πόσο το pick up θα είναι ακριβώς πάνω από τον πόλο, επηρεάζει την ισχύ που μεταφέρεται. Θα αλλάζει η θέση του pick up τόσο στην κατεύθυνση του άξονα χ , όσο και στην κατεύθυνση του άξονα ψ , προσομοιώνοντας την ικανότητα του οχήματος να σταθμεύει σε θέση τέτοια πάνω από τον πόλο. (εικόνα 2.61) Αν και η απόσταση μεταξύ πρωτεύοντος και pick-up έχει καθοριστεί στα 20cm ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περίπτωση στην οποία η απόσταση αυτή είναι διαφορετική. Εξετάζουμε επομένως και τη μετατόπιση του pick up στον άξονα z (εικόνα 2.63)

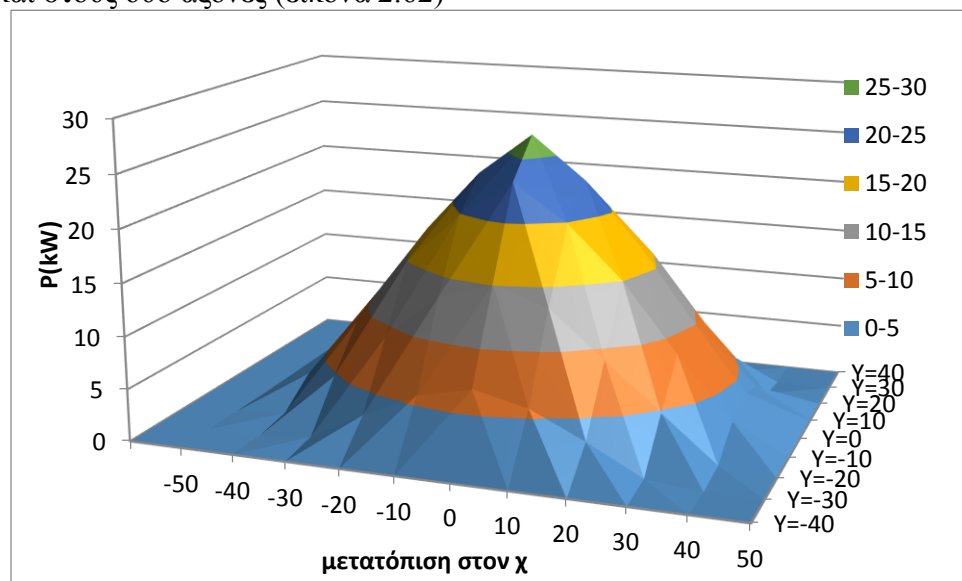
Τα ακόλουθα διαγράμματα δείχνουν τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων στους άξονες χ και ψ . Τα διαγράμματα δείχνουν μετατόπιση με θετική φορά στις δύο κατευθύνσεις. Προφανώς για αρνητική φορά θα προκύψουν ίδια αποτελέσματα και τα διαγράμματα συμμετρικά.



Εικόνα 2.61: Γράφημα μεταφερόμενης ισχύος συναρτήσει της μετατόπισης στους άξονες x, y

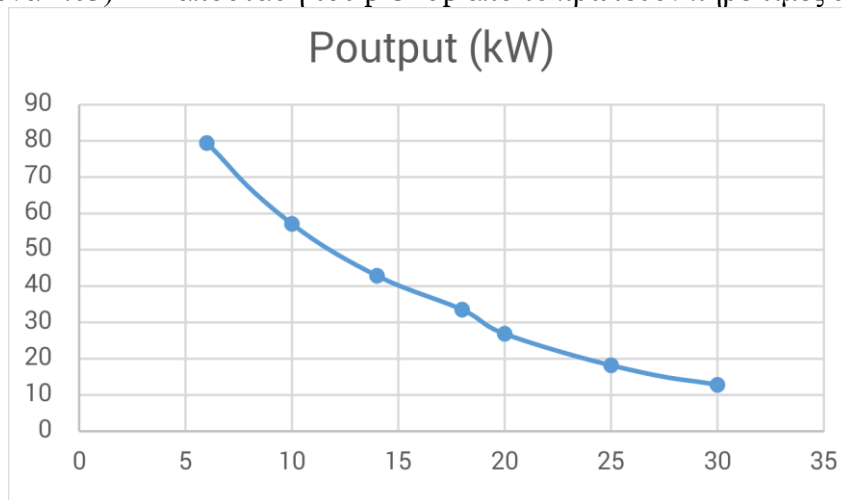
Ως προς τους δύο άξονες βλέπουμε ότι η μετατόπιση του pick up προκαλεί σχεδόν γραμμική μείωση της ισχύος που μεταφέρεται μέχρι πρακτικά να μηδενιστεί σε μια απόσταση 40 cm από την αρχική θέση στον άξονα ψ και λίγο πάνω από 40 cm στον άξονα x. Η προσομοίωση για την μετατόπιση στον άξονα ψ έγινε για μηδενική μετατόπιση στον άξονα x, και αντίστοιχα η προσομοίωση για τη μετατόπιση στον άξονα x έγινε με μηδενική μετατόπιση στον άξονα ψ.

Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπου υπάρχει μετατόπιση και στους δύο άξονες (εικόνα 2.62)



Εικόνα 2.62: Γράφημα μεταφερόμενης ισχύος συναρτήσει της μετατόπισης στους άξονες x και y ταυτόχρονα

Τέλος για τη μετατόπιση ως προς τον άξονα z προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα για την ισχύ εξόδου. (εικόνα 2.63) Η απόσταση του pick up από το πρωτεύον πήρε τιμές από 6 ως και 30 cm.

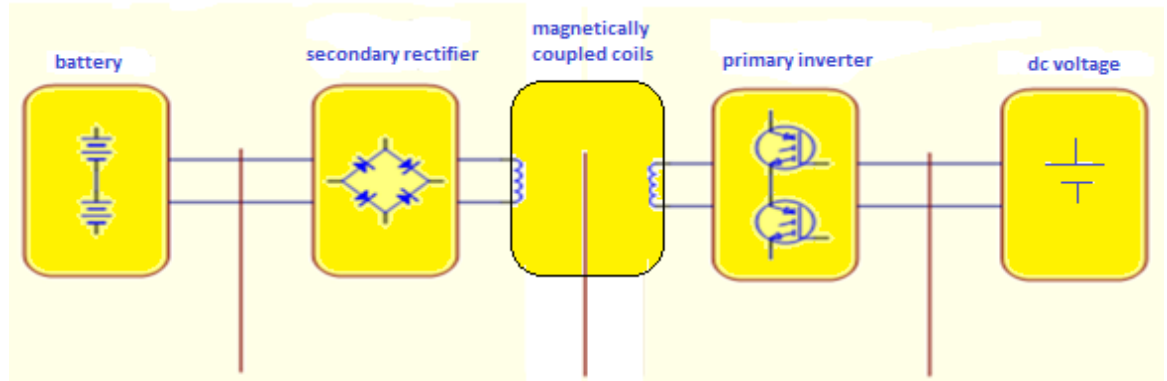


Εικόνα 2.63: Γράφημα μεταφερόμενης ισχύος συναρτήσει της μετατόπισης στον άξονα z

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΣΤΑΘΜΟ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα στάδια που περιλαμβάνει μια διάταξη επαγωγικής φόρτισης από την πηγή τάσης μέχρι το φορτίο φαίνονται στο μπλοκ διάγραμμα της εικόνας 3.1



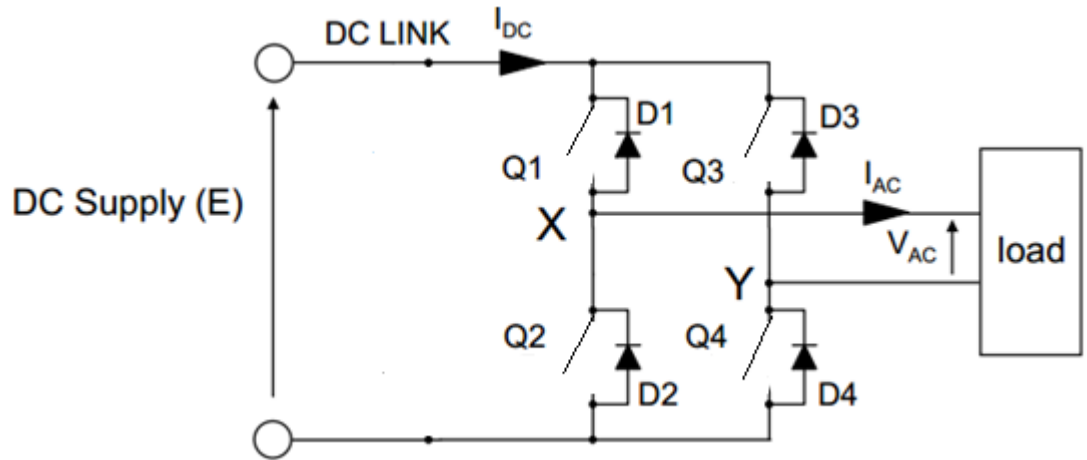
Εικόνα 3.1: Μπλοκ διάγραμμα επαγωγικής φόρτισης

Δηλαδή, η εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση που παίρνουμε από το δίκτυο ανορθώνεται και φιλτράρεται, ούτως ώστε να προκύψει dc τάση, επιθυμητής τιμής (dc voltage στο σχήμα της εικόνας 3.1). Η dc τάση που προέκυψε είναι η είσοδος ενός αντιστροφέα, ο οποίος παράγει εναλλασσόμενη τάση κατάλληλης συχνότητας (οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις επαγωγικής φόρτισης είναι – όπως είδαμε στο πρώτο κεφάλαιο- κοντά στις ραδιοφωνικές). Ο ανορθωτής και ο αντιστροφέας (primary inverter στην εικόνα 3.1) συνθέτουν έναν κυκλομετατροπέα υψηλών συχνοτήτων. Κατόπιν ισχύς μεταφέρεται μέσω δύο μαγνητικά συζευγμένων πηνίων (magnetically coupled coils) και τελικά η τάση του δευτερεύοντος ανορθώνεται μέσω ενός ανορθωτή (secondary rectifier στο σχήμα της εικόνας 3.1), ώστε να παρέχεται ισχύς στο φορτίο (μπαταρία) με dc τάση.

Στους μετατροπείς του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος θα επιβληθεί έλεγχος. Ο έλεγχος θα αποσκοπεί στη διατήρηση ενός σταθερού ρεύματος στην είσοδο και στην τροφοδοσία του φορτίου με μια επιθυμητή κάθε φορά ισχύ. Η λειτουργία των ελεγκτών θα αναλυθεί στα παρακάτω.

3.2 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ

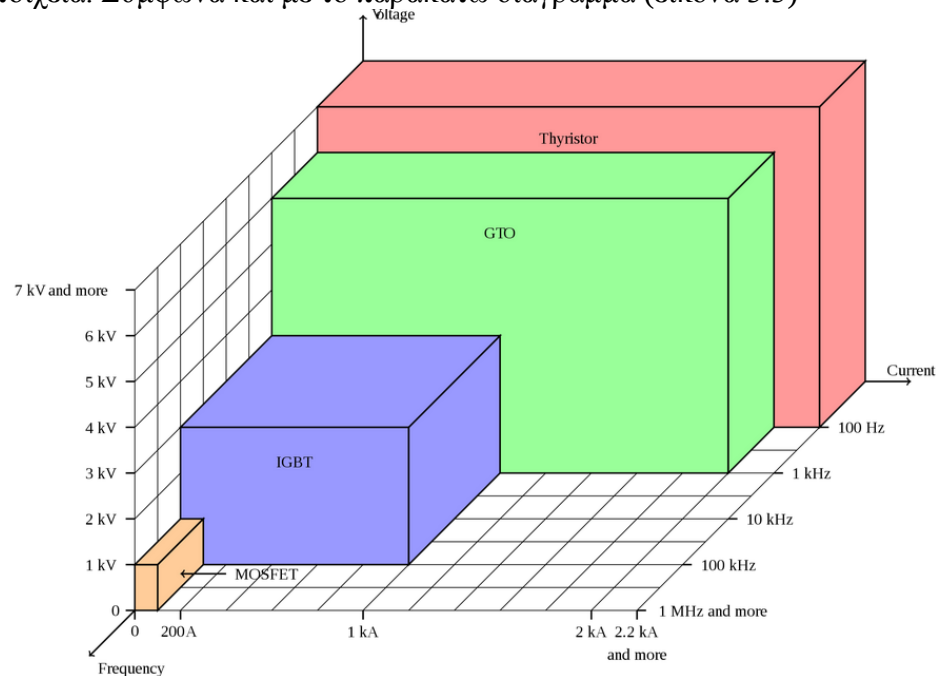
Ο αντιστροφέας είναι μια διάταξη που μετατρέπει την dc τάση σε εναλλασσόμενη επιθυμητής συχνότητας. Όπως φαίνεται και από το κύκλωμα, χρησιμοποιείται μονοφασική γέφυρα αντιστροφέα («H»- γέφυρα) [34]. (εικόνα 3.2)



Εικόνα 3.2: Αναστροφέας σε συνδεσμολογία Η-γέφυρας [34]

3.2.1 ΕΙΔΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ

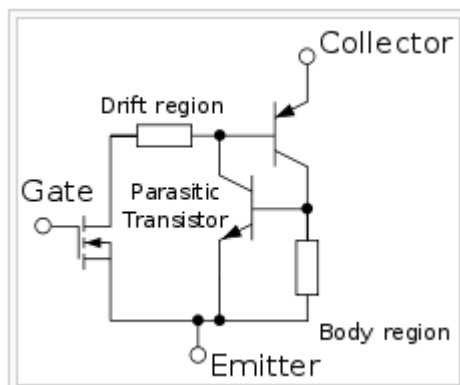
Όσον αφορά τους διακόπτες θα πρέπει να επιλέξουμε κάποιο από τα εμπορικά διαθέσιμα ημιαγωγικά στοιχεία. Σύμφωνα και με το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 3.3)



Εικόνα 3.3: Τάση, ρεύμα και συχνότητα λειτουργίας διάφορων ημιαγωγικών στοιχείων [35]

παρατηρούμε ότι το ημιαγωγικό στοιχείο που λειτουργεί σε αρκετά υψηλές συχνότητες (η συχνότητα λειτουργίας μας θα είναι στα 20 kHz), αλλά και με ικανότητα να λειτουργεί σε σχετικά μεγάλες τιμές ισχύος (εν προκειμένω θα δούμε και παρακάτω ότι θα έχουμε ρεύμα στο πρωτεύον ίσο με 50 A και στο δευτερεύον 200 A) είναι το IGBT.

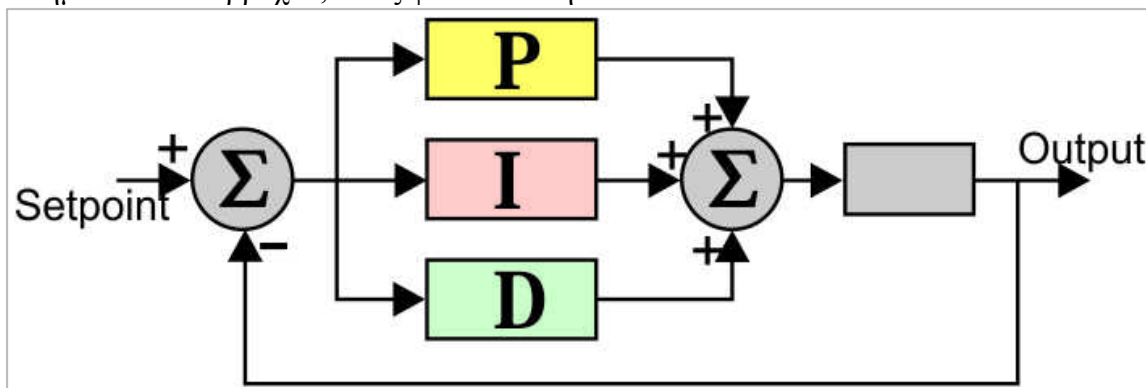
Το IGBT ελέγχεται από την πύλη (G) (εικόνα 3.4) (με θετικό παλμό στην πύλη το τρανζίστορ άγει και λειτουργεί ως κλειστός διακόπτης ενώ με μηδενικό ή αρνητικό παλμό το τρανζίστορ δεν άγει και λειτουργεί ως ανοικτός διακόπτης).



Εικόνα 3.4: Ισοδύναμο κύκλωμα igbt [38]

3.2.2 PID ΕΛΕΓΚΤΗΣ

Απαραίτητος για τη διάταξη ελέγχου του αντιστροφέα είναι ο PID ελεγκτής. Ο ελεγκτής PID είναι ένα σύστημα κλειστού βρόχου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5



Εικόνα 3.5: PID ελεγκτής[36]

Όπως φαίνεται, η μετρούμενη τιμή του μεγέθους που μας ενδιαφέρει αφαιρείται από την επιθυμητή τιμή- την οποία και έχουμε ορίσει- παράγοντας μια διαφορά που καλείται σφάλμα (error). Το σφάλμα, το ολοκλήρωμά του και η παράγωγός του –πολλαπλασιαζόμενα με τους αντίστοιχους συντελεστές/κέρδη –αθροίζονται, δίνοντας τη νέα έξοδο, η οποία με τη σειρά της αφαιρείται από την επιθυμητή τιμή, παράγοντας το νέο σφάλμα. Το σήμα εξόδου του ελεγκτή προκύπτει [37]:

$$u = Kp * e + Ki * \int e * dt + KD * \frac{de}{dt} \quad (3.1)$$

όπου Kp το αναλογικό κέρδος (proportional), Ki το ολοκληρωτικό (integral) και Kd το διαφορικό (differential).

Και στο πεδίο της συχνότητας:

$$Kp + \frac{Ki}{s} + KD * s = \frac{KD*s^2 + Kp*s + Ki}{s} \quad (3.2)$$

Κάθε όρος έχει διαφορετική επίδραση στο σφάλμα [37].

- **Αναλογικός όρος**

Αυξάνοντας τον αναλογικό όρο το σύστημα προσπαθεί να φτάσει την επιθυμητή τιμή ταχύτερα. Το σφάλμα μειώνεται αλλά δεν εξαλείφεται.

- **Ολοκληρωτικός όρος**

Ο ολοκληρωτικός όρος εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα, αλλά δημιουργεί ταλαντώσεις γύρω από την επιθυμητή τιμή μέχρι να έλθει το σύστημα σε ισορροπία.

- **Διαφορικός όρος**

Ο διαφορικός όρος συντελεί στην αύξηση της σταθερότητας του συστήματος

Στην πράξη, μπορούμε να έχουμε μόνο τον έναν όρο (P ελεγκτής), δύο όρους (PI ή PD ελεγκτές) ή και τους τρεις (PID ελεγκτής), ανάλογα με τις ανάγκες μας. Στην περίπτωση που μας αφορά θα έχουμε PI ελεγκτή. Οι τιμές για τον αναλογικό και τον ολοκληρωτικό όρο πρέπει να επιλεγούν προσεκτικά για να επιτευχθεί βέλτιστο αποτέλεσμα. Ο αναλογικός όρος απλά πολλαπλασιάζει το σφάλμα, ενώ ο ολοκληρωτικός το άθροισμα των σφαλμάτων, λαμβάνοντας υπ' όψη και την ιστορία του συστήματος.

3.2.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

. Η ρύθμιση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα γίνεται με τη διάταξη ελέγχου του πρωτεύοντος που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 3.6)

Εικόνα 3.6: Διάταξη ελέγχου για το πρωτεύον όπως σχεδιάστηκε στο simulink

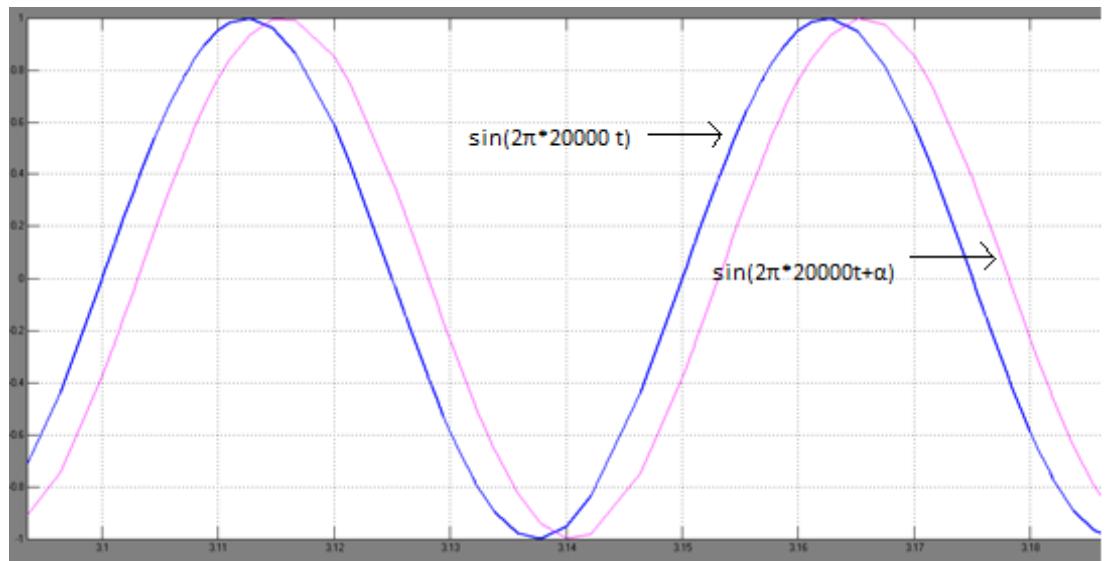
Η συχνότητα λειτουργίας καθορίζεται από την πριονωτή κυματομορφή που επιβάλλουμε. Κατόπιν, το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα του πρωτεύοντος μετριέται και συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή ρεύματος. Το παραγόμενο σφάλμα χρησιμοποιείται ως είσοδος σε έναν PI ελεγκτή η έξοδος του οποίου δίνει μία καθυστέρηση φάσης, έστω α . Η έξοδος του ελεγκτή περιορίζεται μεταξύ 0 και $-\pi$.

Για τον έλεγχο των διακοπών 1 και 4 συγκρίνουμε τα ημίτονα που δημιουργούνται:

A) από την πριονωτή κυματομορφή και

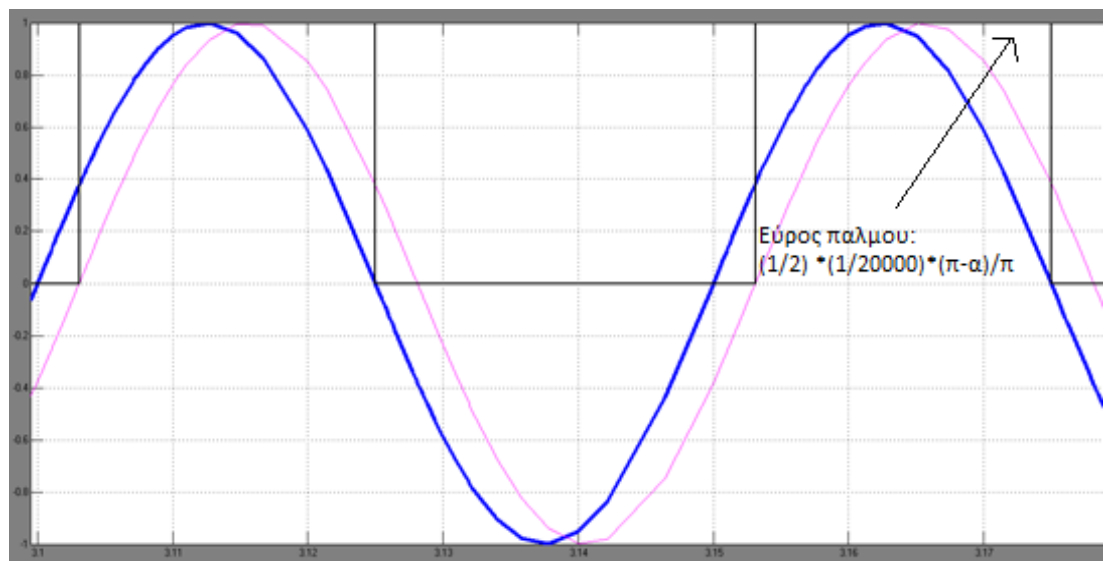
B) Από την πριονωτή κυματομορφή, αφότου σε αυτήν προσθέσουμε την καθυστέρηση φάσης α (ή αλλιώς την έξοδο του PI ελεγκτή).

Τα δύο αυτά ημίτονα φαίνονται στην εικόνα 3.7:



Εικόνα 3.7: Ημίτονα με διαφορά φάσης α

Όταν και τα δύο ημίτονα είναι θετικά δημιουργείται ένας θετικός παλμός, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση η παλμοσειρά έχει μηδενική τιμή. Η παλμοσειρά αυτή δίνεται στην εικόνα 3.8.

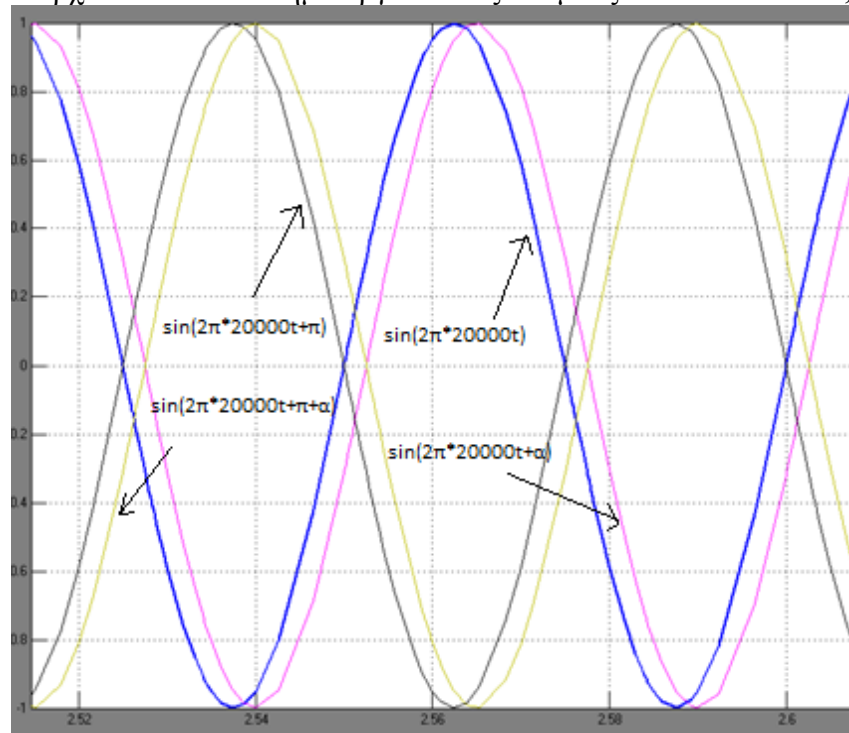


Εικόνα 3.8: Ημίτονα με διαφορά φάσης α και ο παλμός που δημιουργείται όταν είναι ταυτόχρονα θετικά

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και για τη δημιουργία παλμών που θα οδηγούν τα τρανζίστορ 2 και 3, με τη διαφορά τώρα ότι τα δύο ημίτονα που τελικά θα ελεγχθούν θα έχουν διαφορά φάσης π σε σχέση με τα δύο προηγούμενα.

Τα ημίτονα που συγκρίνονται αυτή τη φορά φαίνονται στην επόμενη εικόνα (εικόνα 3.9). Στην εικόνα φαίνονται και τα δύο αρχικά ημίτονα, προκειμένου να φανεί η διαφορά φάσης π που υπάρχει

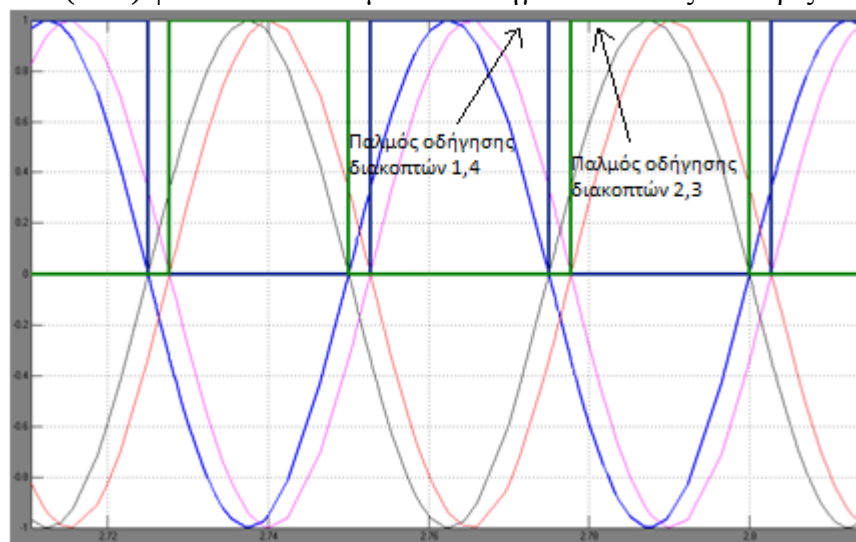
σε σχέση με τα δύο αρχικά- αυτά που δημιουργούν τους παλμούς των διακοπών 1,4.



Εικόνα 3.9: Ημίτονα που δημιουργούν τους παλμούς αγωγής των διακοπών του αντιστροφέα

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση τα δύο ημίτονα που δημιουργούνται συγκρίνονται και στην περίπτωση που είναι και τα δύο θετικά ο παλμός οδήγησης των τρανζίστορ είναι θετικός. Σε κάθε άλλη περίπτωση ο παλμός είναι ίσος με μηδέν. Η παλμοσειρά που δημιουργείται από τη διαδικασία που μόλις περιγράφηκε οδηγεί τους διακόπτες 2,3.

Στην επόμενη εικόνα (3.10) φαίνονται οι παλμοί που οδηγούν και τους τέσσερις διακόπτες.



Εικόνα 3.10: Παλμοσειρά που προκύπτει από τον έλεγχο του πρωτεύοντος για την οδήγηση των διακοπών του αντιστροφέα

Ανάλογα με το φορτίο που θα τροφοδοτηθεί, παράγεται από τον αντιστροφέα εναλλασσόμενη τάση, της οποίας η rms τιμή αυξομειώνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να διατηρείται το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα του πρωτεύοντος σταθερό, στην τιμή που του επιβάλλουμε.

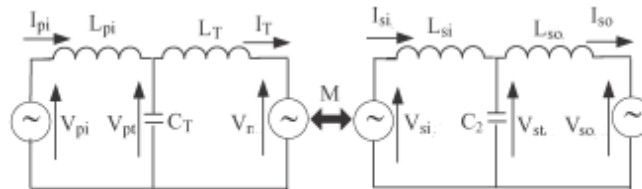
Η κατάσταση ταυτόχρονης αγωγής και των τεσσάρων τρανζίστορ –κατάσταση η οποία οδηγεί σε πιθανή καταστροφή των στοιχείων λόγω του βραχυκυκλώματος που προκαλείται και κατ' επέκταση του πολύ υψηλού ρεύματος που τα διαρρέει- αποτρέπεται, καθώς οι παλμοί είναι πάντα συμπληρωματικοί.

Η έξοδος του αντιστροφέα, όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια θα φιλτραριστεί, και θα κρατήσουμε μόνο την πρώτη αρμονική συνιστώσα που προκύπτει από την ανάλυση σε σειρά Fourier του τετραγωνικού παλμού- ένα καθαρό ημίτονο.

Ένας άλλος τρόπος να ρυθμίσουμε το πλάτος της τάσης θα ήταν με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμού (pwm), με αποτέλεσμα όμως περισσότερες απώλειες (διακοπτικές) [33].

3.3 ΚΥΚΛΩΜΑ LCL ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ – ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ

το κυρίως κύκλωμα – χωρίς τους μετατροπείς- αναπαρίσταται από το ισοδύναμο κύκλωμα τ. (εικόνα 3.11)



Εικόνα 3.11: Ισοδύναμο τ κυκλώματος συντονισμού πρωτεύοντος- δευτερεύοντος[33]

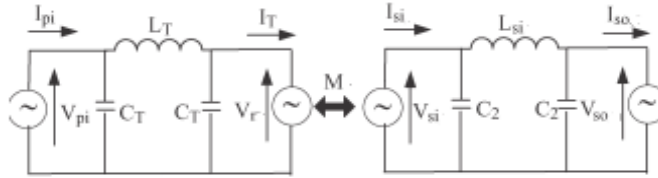
Η επαγόμενη στο δευτερεύον τάση δίνεται από τη σχέση

$$V_{si} = j * \omega * M * I_T \quad (3.3)$$

ενώ η τάση που αναπτύσσεται στο πρωτεύον λόγω της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι

$$V_r = j * \omega * M * I_{si} \quad (3.4)$$

Με δεδομένο ότι $L_{pi}=L_T$ και $L_{si}=L_{so}$, μπορούμε να παραστήσουμε το παραπάνω κύκλωμα (T-ισοδύναμο) με το π- ισοδύναμό του, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 3.12

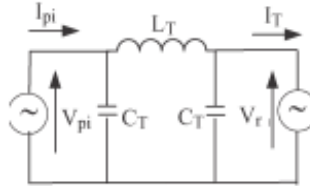


Εικόνα 3.12: Ισοδύναμο π κυκλώματος συντονισμού πρωτεύοντος- δευτερεύοντος[33]

3.3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ

Α) Το πρώτο πηνίο (L_{pi}) με τον εγκάρσιο πυκνωτή (C_T) στο ισοδύναμο τ κύκλωμα (εικόνα 3.11) συνθέτουν ένα βαθυπερατό φίλτρο δεύτερης τάξης, το οποίο θα αποκόψει τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες της εξόδου που θα προκύψει από τον αναστροφέα, δίνοντας στην έξοδο ένα καθαρό ημίτονο.

Β) Ο εγκάρσιος πυκνωτής παίρνει τέτοια τιμή, ούτως ώστε να αντισταθμίζει την αυτεπαγωγή του πηνίου L_T . Τα δύο στοιχεία αποτελούν από κοινού το κύκλωμα συντονισμού του πρωτεύοντος, που στόχο έχει – όπως αναλύθηκε στο πρώτο κεφάλαιο- την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη μεταφορά μέγιστης ισχύος. Προφανώς και το κύκλωμα συντονισμού του δευτερεύοντος πρέπει να είναι συντονισμένο στην ίδια συχνότητα, προκειμένου να υπάρχει μεταφορά μέγιστης ισχύος.



Εικόνα 3.13: Ισοδύναμο π πρωτεύοντος

Στην κατάσταση συντονισμού ισχύει η σχέση

$$\omega^2 = \frac{1}{L_T * C_T} \quad (3.5)$$

Από το π- ισοδύναμο εφαρμόζοντας νόμους ρευμάτων και τάσεων προκύπτουν

$$I_{pi} = V_{pi} * (j * \omega * C_T) + \frac{V_{pi} - V_r}{j * \omega * L_T} = j * V_{pi} * \left(\omega * C_T - \frac{1}{\omega * L_T} \right) + j * \frac{V_r}{\omega * L_T} \quad (3.6)$$

$$I_T = \frac{V_{pi} - V_r}{j * \omega * L_T} - j * \omega * C_T * V_r \quad (3.7)$$

Με δεδομένο το συντονισμό, ο όρος $\omega * C_T - 1/(\omega * L_T)$ θεωρείται αμελητέος, προκύπτει

$$I_{pi} = \frac{j * V_r}{\omega * L_T} \quad (3.8)$$

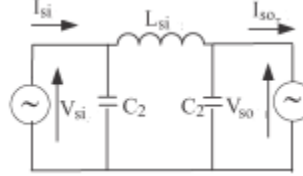
$$I_T = \frac{j * V_{pi}}{\omega * L_T} \quad (3.9)$$

3.3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ

Το κύκλωμα συντονισμού του δευτερεύοντος, δηλαδή το πηνίο L_{si} και ο πυκνωτής C_2 , είναι συντονισμένο στη συχνότητα ω , ίδια με τη συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο του πρωτεύοντος, ώστε

$$\omega^2 = \frac{1}{L_{si} * C_2} \quad (3.10)$$

Έτσι με κυκλωματική ανάλυση στο ισοδύναμο π του δευτερεύοντος προκύπτουν:



Εικόνα 3.14: ισοδύναμο π δευτερεύοντος

$$I_{si} = V_{si} * j * \omega * C_2 + \frac{V_{si} - V_{so}}{j * \omega * L_{si}} = V_{si} * j * \omega * \left(C_2 - \frac{1}{L_{si}} \right) + \frac{j * V_{so}}{\omega * L_{si}} \quad (3.11)$$

$$I_{so} = \frac{V_{si} - V_{so}}{j * \omega * L_{si}} - V_{so} * j * \omega * C_2 \quad (3.12)$$

Λόγω του συντονισμού, οι παραπάνω σχέσεις απλοποιούνται σε:

$$I_{si} = \frac{j * V_{so}}{\omega * L_{si}} \quad (3.13)$$

$$I_{so} = \frac{j V_{si}}{\omega * L_{si}} \quad (3.14)$$

3.3.3 ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

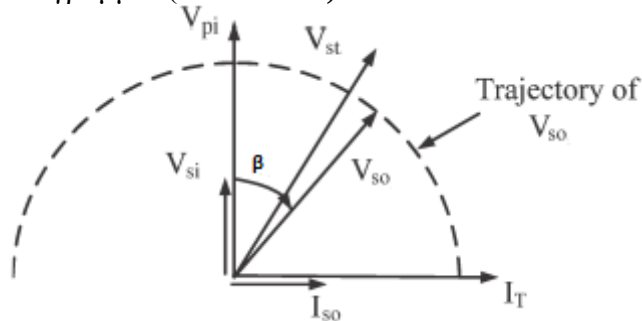
Αντικαθιστώντας στη σχέση 3.14 την επαγόμενη τάση (σχέση 3.3) και το ρεύμα I_T (σχέση 3.9) προκύπτει

$$I_{so} = \frac{j * V_{pi} * M}{\omega * L_{si} * L_T} \quad (3.15)$$

Από το τ-ισοδύναμο και εφαρμόζοντας νόμο τάσεων Kirchoff προκύπτει η τάση στα άκρα του πυκνωτή C_2 ως εξής

$$V_{st} = V_{si} + V_{so}. \quad (3.16)$$

Αν υποθέσουμε ότι η V_{so} έπεται της V_{si} (η οποία έχει γωνία 0°) κατά μια γωνία β ($V_{so} < -\beta$) τότε έχουμε το παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα: (εικόνα 3.15)



Εικόνα 3.15: Διανυσματικό διάγραμμα ρευμάτων/ τάσεων πρωτεύοντος- δευτερεύοντος[33]

Η ισχύς εξόδου προκύπτει ως

$$P_o = \text{Re} : \{V_{so} * (-I_{so})\} \quad (3.17)$$

(Το μείον προκύπτει από τη φορά του ρεύματος). Αντικαθιστώντας τις σχέσεις 3.9, 3.14 στην σχέση 3.17 προκύπτει:

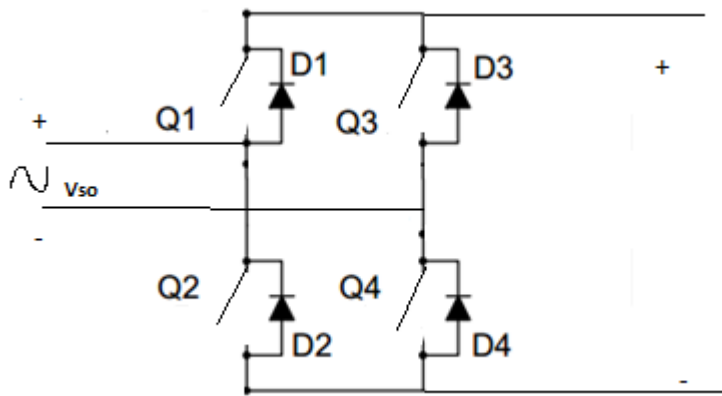
$$P_o = \text{Re} : \left\{ V_{so} * \frac{-M}{L_{si}} * \frac{V_{pi}}{\omega * LT} \right\} \quad (3.18)$$

Σύμφωνα και με το παραπάνω διανυσματικό διάγραμμα έχουμε:

$$P_o = -\frac{M}{L_{si}} * \frac{V_{pi}}{\omega * LT} * |V_{so}| * \sin(\beta) \quad (3.19)$$

Δηλαδή η μεταφερόμενη ισχύς προκύπτει ανάλογη του μέτρου της τάσης εισόδου V_{pi} , του μέτρου της τάσης εξόδου V_{so} , αλλά και του ημιτόνου της μεταξύ τους γωνίας.

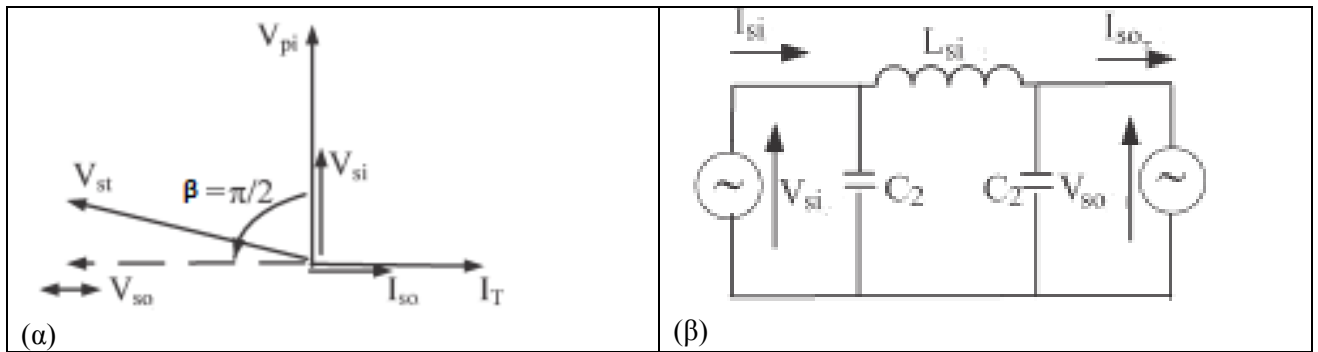
3.4 ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ



Εικόνα 3.16: Ανορθωτική διάταξη για τον έλεγχο του δευτερεύοντος

Οι διαπιστώσεις που μπορούν να εξαχθούν από την σχέση 3.19 είναι ότι η τιμή της ισχύος εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί τόσο από τα μέτρα των τάσεων εισόδου και εξόδου, όσο και από τη μεταξύ τους γωνία. Η μέγιστη ισχύς μεταφέρεται προφανώς για $\beta = \pi/2$ με την τάση εξόδου να προπορεύεται της τάσης εισόδου.

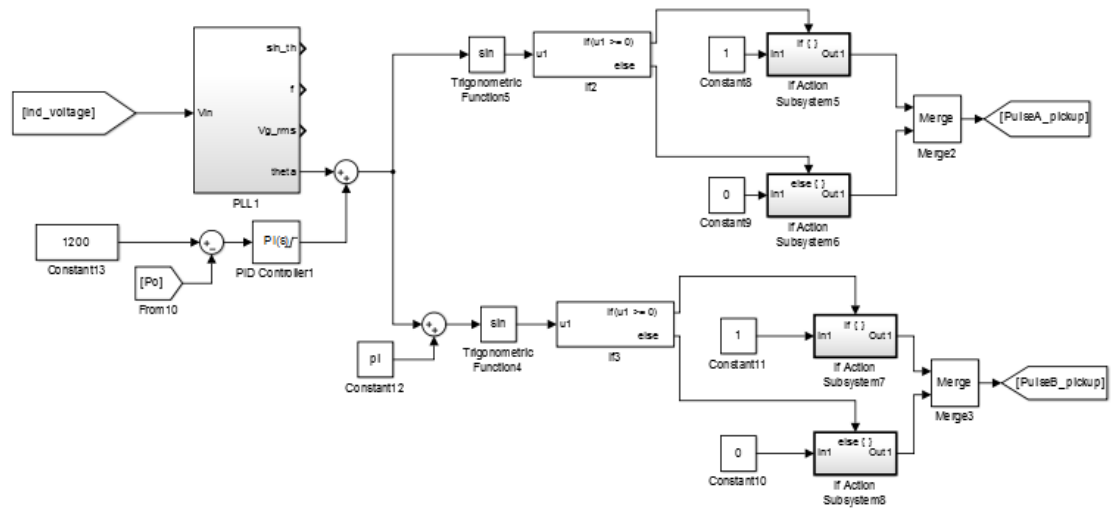
Η τάση εισόδου, όμως, χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του ρεύματος I_T . Οπότε η ρύθμιση της ισχύος μένει να ρυθμιστεί είτε από το πλάτος της τάσης εξόδου ή από τη γωνία β . Αν επιλεγεί ρύθμιση από το πλάτος της τάσης εξόδου, η γωνία β κρατιέται σταθερή στα $\pi/2$ (δηλαδή με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος) με την τάση εξόδου να προπορεύεται της τάσης εισόδου, όπως φαίνεται στο παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα. (εικόνα 3.17)



Εικόνα 3.17: (α) Διανυσματικό διάγραμμα στοιχείων πρωτεύοντος/ δευτερεύοντος για έλεγχο δευτερεύοντος με πλάτος V_{so} , και τη γωνία «κλειδωμένη» στις 90° , V_{so} προπορεύεται της V_{si} [33], (β) ισοδύναμο π δευτερεύοντος

Εδώ θα επιλεγεί ρύθμιση με βάση τη γωνία. Παρατηρούμε το εξής: Παρότι η ισχύς εξαρτάται από το ημίτονο της γωνίας μεταξύ τάσης εισόδου V_{pi} και τάσης εξόδου V_{so} , αυτή η γωνία είναι ίδια και μεταξύ επαγόμενης στο δευτερεύον τάσης V_{si} και τάσης εξόδου V_{so} , καθότι οι τάσεις V_{pi} και V_{si} είναι συμφασικές. Μπορούμε λοιπόν να ελέγξουμε την τιμή της μεταφερόμενης ισχύος, ελέγχοντας μόνο τα στοιχεία του δευτερεύοντος. Αντίστοιχα, είδαμε στην ενότητα για τον έλεγχο του πρωτεύοντος ότι πραγματοποιήθηκε μόνο με στοιχεία του πρωτεύοντος. Συνεπώς οι έλεγχοι για το πρωτεύον και το δευτερεύον θα είναι πλήρως απομονωμένοι.

Ακολουθεί η διάταξη ελέγχου για το δευτερεύον: (εικόνα 3.18). Και εδώ οι διακόπτες που θα χρησιμοποιηθούν είναι ημιαγώγιμα στοιχεία $igbt$, η περιγραφή των οποίων έχει γίνει προηγουμένως.

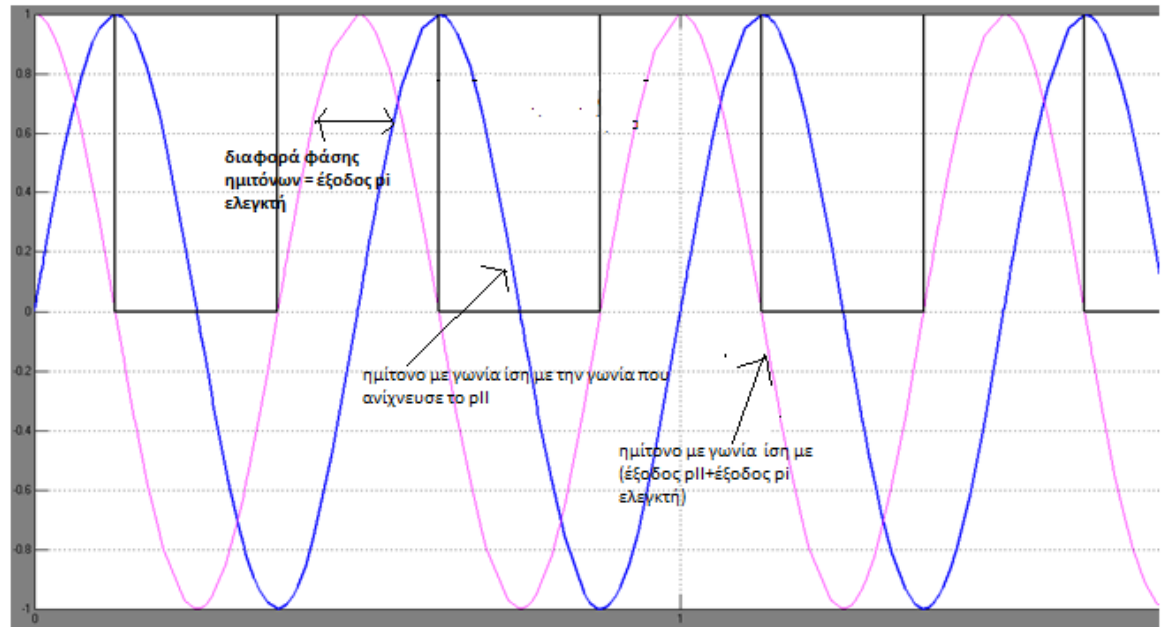


Εικόνα 3.18: Διάταξη ελέγχου για το δευτερεύον, όπως σχεδιάστηκε στο Simulink

Η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον χρησιμοποιείται ως είσοδος σε ένα PLL. Το PLL δίνει ως έξοδο τη φάση, έστω α , της επαγόμενης τάσης V_{si} .

Η ισχύς εξόδου μετριέται και συγκρίνεται κάθε φορά με μία επιθυμητή τιμή. Το σφάλμα εισέρχεται σε έναν PI ελεγκτή ο οποίος δίνει ως έξοδο μία καθυστέρηση φάσης, έστω ίση με β . Το ημίτονο που δημιουργείται προσθέτοντας την καθυστέρηση φάσης β στη φάση της επαγόμενης τάσης V_{si} , χρησιμοποιείται για την οδήγηση των διακοπών 1,4: Όταν το ημίτονο είναι θετικό ο παλμός είναι

θετικός, ενώ για αρνητικές τιμές του ημιτόνου ο παλμός είναι ίσο με το μηδέν (Εικόνα 3.19).



Εικόνα 3.19: Ημίτονα με διαφορά φάσης β και οι παλμοί που οδηγούν τους διακόπτες 1,4

Για την παλμοσειρά οδήγησης των διακοπών 2,3 χρησιμοποιείται μία παρόμοια διαδικασία. Ωστόσο σε αυτή την περίπτωση προσθέτουμε στο παραγόμενο ημίτονο μία φάση ίση με π , λόγω συμπληρωματικότητας αγωγής των διακοπών.

Το συγκεκριμένο σύστημα ελέγχου επιβάλλει, επομένως, μία συγκεκριμένη λειτουργία στον ανορθωτή έτσι ώστε η τάση V_{so} να έχει μία διαφορά φάσης β σε σχέση με τη τάση V_{si} . Από τη σχέση 3.19 φαίνεται ότι η γωνία αυτή β καθορίζει τη μεταφερόμενη ισχύ.

Η συνεχής τάση- μετά και την εξομάλυνση λόγω του πυκνωτή- τροφοδοτεί ένα φορτίο, μια ωμική αντίσταση που μοντελοποιεί την μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος.

3.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Τα στοιχεία του μπλοκ διαγράμματος της εικόνας 3.1, τα οποία αναλύθηκαν στις ενότητες 3.2,3.3 και 3.4 συντίθενται προκειμένου να προκύψει η διάταξη ελέγχου για σταθμό επαγωγικής φόρτισης για ηλεκτρικό όχημα

3.5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΠΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΤΗΚΕ ΣΤΟ ANSYS

Τα πηνία L_T , L_{si} , οι αυτεπαγωγές τους και η αμοιβαία τους επαγωγή μπορούν να αποτελέσουν

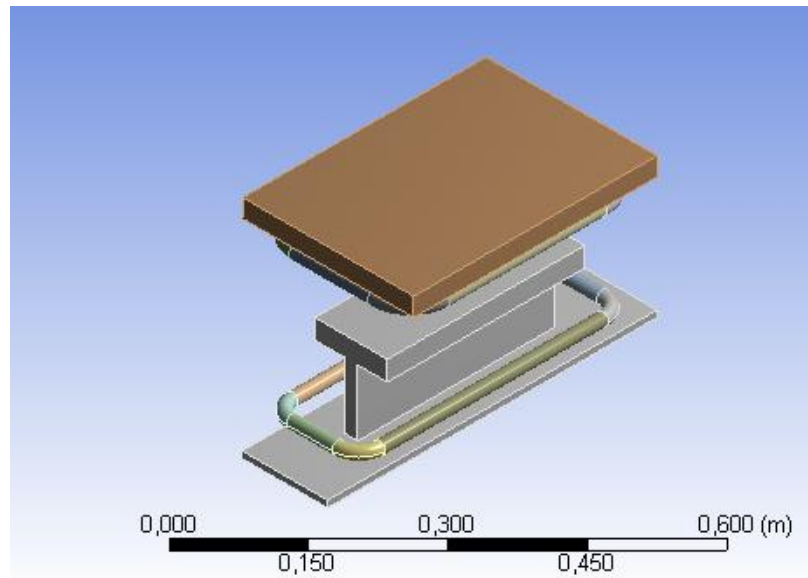
την κυκλωματική παράσταση μιας διάταξης φόρτισης τύπου I. Το κύκλωμα που παρουσιάζεται [33], για τιμές αυτεπαγωγών 28 και 14 μH για το πρωτεύον και το δευτερεύον αντίστοιχα και για αμοιβαία επαγωγή 2,85 μH αποδίδει μέγιστη ισχύ 1,5kW. Συνεπώς, σχεδιάζεται ηλεκτρομαγνητική διάταξη τύπου «I» στο ansys, η οποία είναι κατάλληλη για τον συγκεκριμένο έλεγχο.

Η διάταξη τύπου I η οποία κατασκευάστηκε στο ansys έχει τις παρακάτω διαστάσεις (πίνακας 3.1)

Μήκος πόλου (lp)	30cm
Πάχος πόλου (tp)	2cm
Πλάτος πλάκας πόλου (wp)	11cm
Πάχος πλάκας πόλου (tpl)	3cm
Ύψος πόλου (hp)	10cm
Μήκος βασικής πλάκας (lb)	50cm
Πλάτος βασικής πλάκας (wb)	13cm
Πάχος βασικής πλάκας (tb)	1cm
Μήκος pick-up (lpu)	37cm
Πλάτος pick-up (wpu)	26cm
Πάχος pick-up (tpu)	2,8cm
Μήκος τυλίγματος (lc)	40cm
Πλάτος τυλίγματος (wc)	13cm

Πίνακας 3.1: Διαστάσεις I διάταξης, με προσομοίωση στο ansys

και φαίνεται στην εικόνα 3.20:



Εικόνα 3.20: Διάταξη I- τύπου στο ansys

Το τύλιγμα του πρωτεύοντος θέλουμε να έχει σταθερό ρεύμα και ίσο με 50 A σε συχνότητα 20 kHz, ενώ το δευτερεύον τύλιγμα ρεύμα γύρω στα 200 A, σύμφωνα με τα στοιχεία που δόθηκαν στον πίνακα, αλλά και τις σχέσεις που προέκυψαν από την ανάλυση του ισοδύναμου π στην προηγούμενη παράγραφο. Για το λόγο αυτό, με τη διαδικασία και από τους πίνακες που παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο, επιλέγουμε για το πρωτεύον καλώδιο litz τύπου 4 για συχνότητες 20 έως 50 kHz, με τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

Equivalent AWG	Circular Mil Area	Number of Wires	AWG of Wire	Film Coating ¹	Construction Type	Outer Insulation ²	Nominal OD	Nominal LBS./1000 FT	Direct Current Resistance OHMS/1000 FT ^A	Construction
RECOMMENDED OPERATING FREQUENCY - 20 KHZ TO 50 KHZ										
4	45000	1800	36	S	2	DN	.322	156.420	.260	5X5X72/36

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά καλωδίου litz 4 [31]

Με το κάθε σύρμα του καλωδίου να έχει τις παρακάτω ιδιότητες (ισχύει και για το καλώδιο του δευτερεύοντος)

AWG gauge	Conductor Diameter Inches	Conductor Diameter mm	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper	Breaking force Soft Annealed Cu 37000 PSI
36	0.005	0.127	414.8	1360	0.21	0.035	1100 kHz	0.72 lbs

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά σύρματος με AWG 36[32]

Έτσι, και εφόσον στο τύλιγμα του πρωτεύοντος θα έχουμε 5 ελίγματα, η ακτίνα του τυλίγματος θα είναι 0,9144cm, ενώ η αγωγή διατομή του θα είναι 1,1395 cm². Για το δευτερεύον θα έχουμε καλώδιο litz τύπου 3/0 με τις διαστάσεις του πίνακα 3.4:

Equivalent AWG	Circular Mil Area	Number of Wires	AWG of Wire	Film Coating ¹	Construction Type	Outer Insulation ²	Nominal OD	Nominal LBS/1000 FT	Direct Current Resistance OHMS/1000 FT ^Δ	Construction
RECOMMENDED OPERATING FREQUENCY - 20 KHZ TO 50 KHZ										
3/0	171000	6840	36	S	5	SNB	.870	682.000	.069	12(5X3X38/36)

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά καλωδίου litz 3/0 [31]

Με το κάθε σύρμα του καλωδίου να είναι του ίδιου τύπου με το σύρμα του καλωδίου του πρωτεύοντος. Με δεδομένο ότι το δευτερεύον τυλίγμα θα περιλαμβάνει ένα έλιγμα, θα έχουμε ακτίνα τυλίγματος ίση με 1,1049 cm και αγωγή διατομή ίση με 0,866 cm².

Με αυτές τις ακτίνες τυλιγμάτων το διάκενο από την πλάκα του πόλου μέχρι το δευτερεύον τυλίγμα είναι στα 8,24 cm. Η λύση του προβλήματος έδωσε τις παρακάτω τιμές:

Αυτεπαγωγή πρωτεύοντος $L_1=29,167\mu\text{H}$

Αυτεπαγωγή δευτερεύοντος $L_2=13,939\mu\text{H}$

Αμοιβαία επαγωγή $M=2,7011\mu\text{H}$

3.5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΟ SIMULINK

Προκειμένου να προκύψει το ισοδύναμο π θεωρήσαμε $L_{pi}=L_T$ και $L_{si}=L_{so}$. Η τιμή για τον εγκάρσιο πυκνωτή στο πρωτεύον προκύπτει $C_T=1/(L_T*\omega^2)=2,1711\mu\text{F}$. Αντίστοιχα $C_2=4,543\mu\text{F}$. Η dc πηγή τροφοδοσίας έχει τιμή 180 V και ο πυκνωτής εξομάλυνσης στην έξοδο έχει τιμή 500 μF .

Οι τιμές φαίνονται συνοπτικά στον πίνακα 3.5:

V_{in}	180V
L_{pi}/L_T	29,167 μH
C_T	2,1711 μF
L_{si}/L_{so}	13,939 μH
C_2	4,543 μF
M	2,7011 μH
CL	500 μF

Πίνακας 3.5: Τιμές στοιχείων για προσομοίωση στο Simulink

Οι τιμές για τους όρους των PI ελεγκτών είναι :

PI πρωτεύοντος

- Αναλογικός όρος:0,001
- Ολοκληρωτικός όρος:10

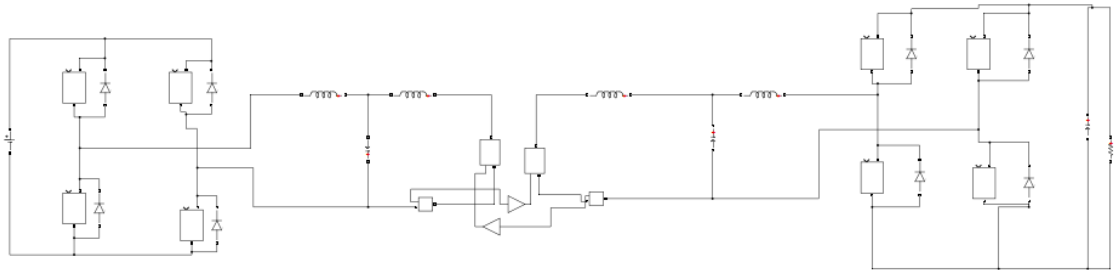
PI δευτερεύοντος

- Αναλογικός όρος:0,01
- Ολοκληρωτικός όρος:0,025

Οι τιμές για τους δύο ελεγκτές έχουν προσδιορισθεί με τη μέθοδο “trial and error”

Το ρεύμα ΙΤ επιδιώκουμε μέσω του ελέγχου του πρωτεύοντος να κρατάται ίσο με 50 Α.

Η διάταξη που σχεδιάστηκε στο Simulink φαίνεται στην εικόνα 3.21.



Εικόνα 3.21: Διάταξη σταθμού επαγωγικής φόρτισης, όπως σχεδιάστηκε στο Simulink

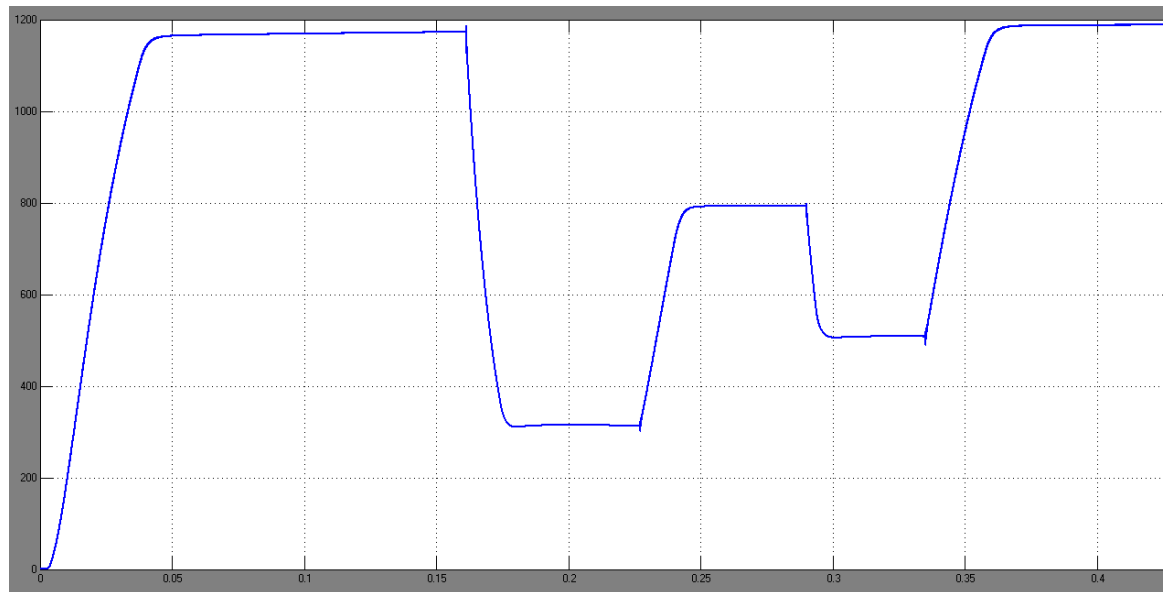
Στο Simulink υπάρχει η επιλογή της αμοιβαίας επαγωγής για την αναπαράσταση του κυκλώματος. Εν τούτοις παριστάνουμε την τάση που επάγεται στο δευτερεύον, αλλά και αυτή που αναπτύσσεται στο πρωτεύον λόγω της αμοιβαίας επαγωγής σαν δύο εξαρτημένες πηγές τάσης [39]- η μεν του πρωτεύοντος ελεγχόμενη από το ρεύμα του δευτερεύοντος, του δευτερεύοντος ελεγχόμενη από το ρεύμα του πρωτεύοντος.

Ο συγκεκριμένος τρόπος αναπαράστασης είναι απαραίτητος καθώς για τον έλεγχο του ανορθωτή είναι απαραίτητη η τάση στο δευτερεύον τύλιγμα.

3.5.3 ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΙΣΧΥΟΣ

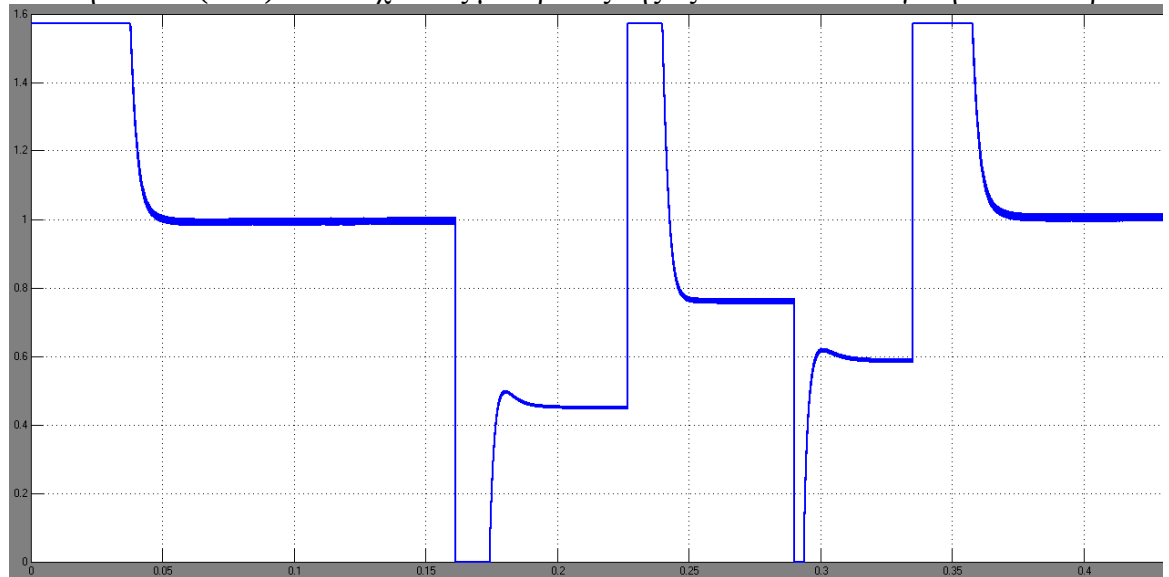
Πολλές φορές είναι αναγκαίο να προσαρμόσουμε το επίπεδο ισχύος που θα τροφοδοτήσει το φορτίο μας, ανάλογα και με τη ζήτηση ισχύος από άλλα φορτία της ίδιας γραμμής.

Σε αυτόν τον κύκλο προσομοιώσεων θα εξετάσουμε την ικανότητα της διάταξής μας να τροφοδοτεί ένα φορτίο 45 Ω σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Οι τιμές για την ισχύ είναι: 1200 W ως τα 0,161 s, 300 W ως τα 0,227 s, 800W ως τα 0,289 s, 500 W ως τα 0,335 s και ξανά 1200 W για τον υπόλοιπο χρόνο. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης φαίνονται στην εικόνα 3.22.



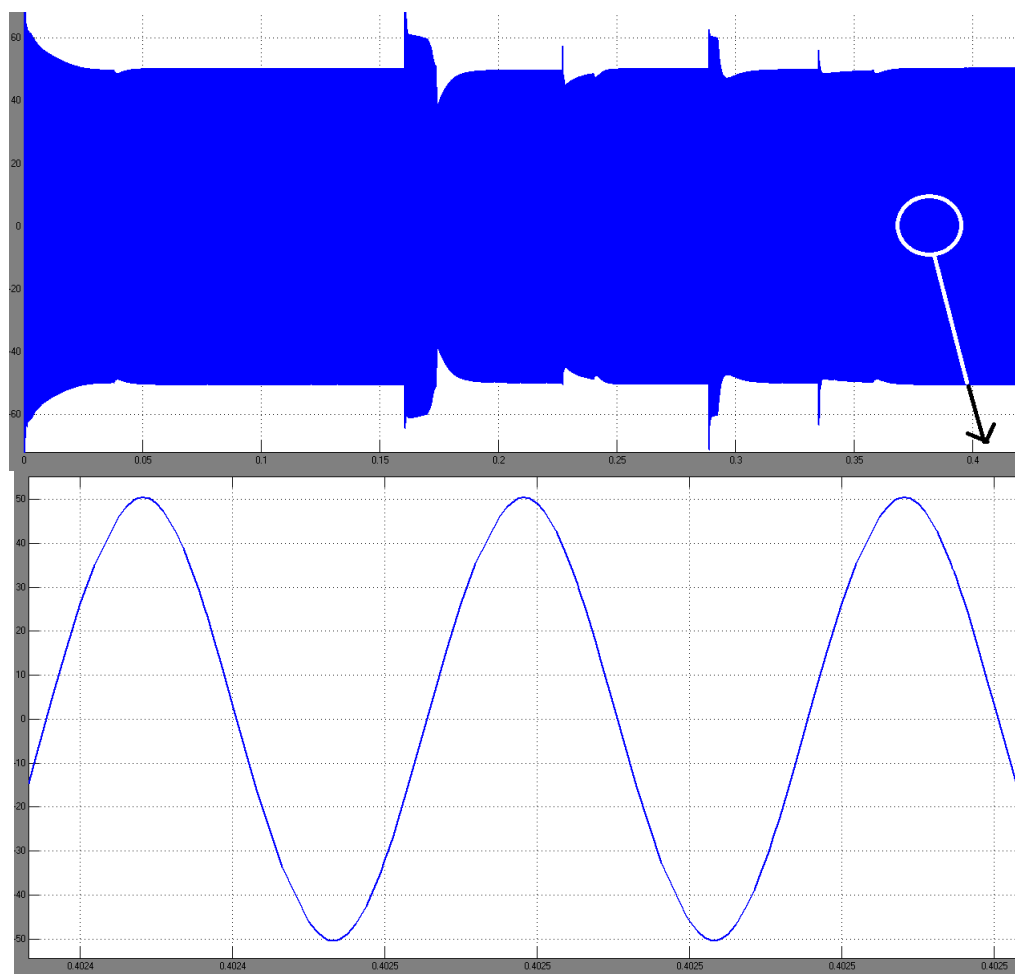
Εικόνα 3.22: Διάγραμμα ισχύος εξόδου συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές επιθυμητής ισχύος

Πραγματικά, η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο μπορεί να μεταβάλλεται. Σύμφωνα και με την ανάλυση που προηγήθηκε η ισχύς μεταβάλλεται ανάλογα με το ημίτονο της γωνίας μεταξύ της τάσης V_{so} και της τάσης V_{si} , και άρα ανάλογα με το ημίτονο της εξόδου του ελεγκτή του δευτερεύοντος. Ακολουθεί η εικόνα (3.23) που δείχνει τις μεταβολές της εξόδου του PI ελεγκτή του δευτερεύοντος



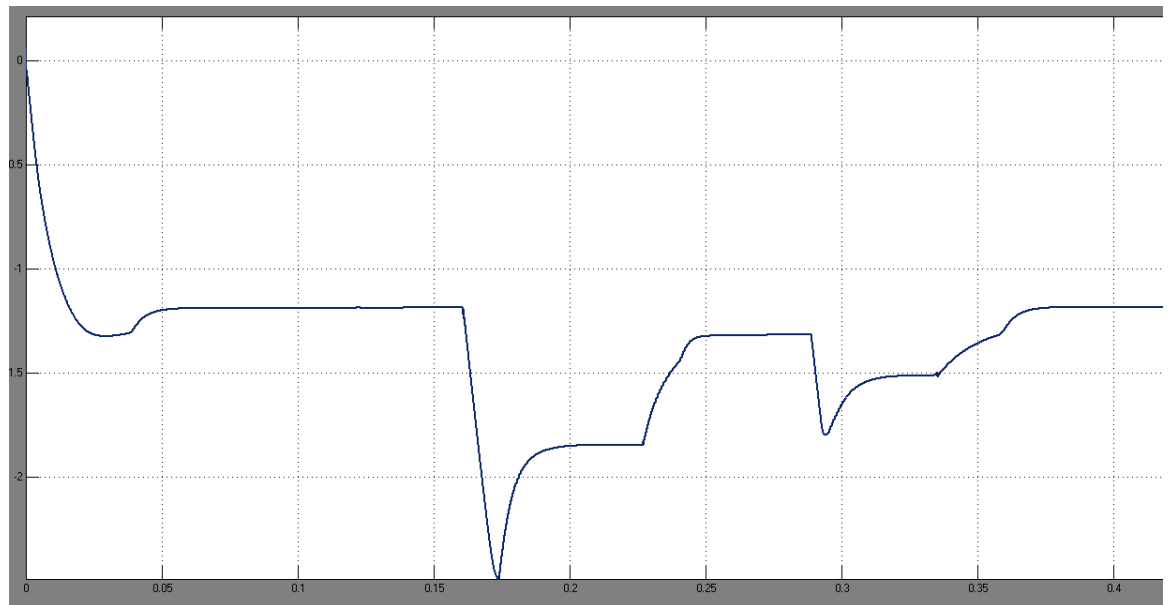
Εικόνα 3.23: Έξοδος u_2 ελεγκτή της διάταξης ελέγχου του δευτερεύοντος για τις παραπάνω τιμές επιθυμητής ισχύος

Για τις παραπάνω μεταβολές της ισχύος το ρεύμα του πρωτεύοντος θα κρατηθεί ίσο στα 50 A, σύμφωνα και με τον έλεγχο που επιβάλλουμε στο πρωτεύον. Το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα του πρωτεύοντος φαίνεται συναρτήσει του χρόνου στην επόμενη εικόνα (3.24).



Εικόνα 3.24: Ρεύμα πρωτεύοντος συναρτήσει του χρόνου

Προκειμένου να διατηρηθεί το ρεύμα του πρωτεύοντος σταθερό και ίσο με 50 A η έξοδος του π ι ελεγκτή που οδηγεί τους διακόπτες του αντιστροφέα του πρωτεύοντος διαμορφώνεται για κάθε επιθυμητή τιμή ισχύος σύμφωνα με την επόμενη εικόνα (εικόνα 3.25)



Εικόνα 3.25: Έξοδος p_i ελεγκτή ελέγχου πρωτεύοντος συναρτήσει του χρόνου

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανή τα εξής

- Ο έλεγχος δίνει τη δυνατότητα τροφοδοσίας ενός συγκεκριμένου φορτίου σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος. Πράγματι, και για τις τέσσερις τιμές επιθυμητής ισχύος είχαμε έξοδο πολύ κοντά σε αυτή που είχαμε θέσει
- Η γωνία /έξοδος του ελεγκτή σταθεροποιείται σε διαφορετική τιμή, για διαφορετική τιμή επιθυμητής ισχύος
- Για μεγαλύτερη τιμή επιθυμητής ισχύος η έξοδος μεγαλώνει, δεδομένου ότι η ισχύς είναι ανάλογη του ημιτόνου της εξόδου του ελεγκτή και ότι το ημίτονο είναι αύξουσα συνάρτηση στο διάστημα $[0, \pi/2]$
- Το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα του πρωτεύοντος διατηρείται σταθερό και ίσο με 50 A ανεξάρτητα από την επιθυμητή ισχύ εξόδου της διάταξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

4.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -ΣΥΝΟΨΗ

Η ασύρματη μεταφορά ισχύος –γνωστή εδώ και πάνω από έναν αιώνα- χρησιμοποιείται ή πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στο άμεσο μέλλον σε πληθώρα εφαρμογών και προσφέρεται ως εναλλακτική λύση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Τα πλεονεκτήματά της είναι κυρίως η ασφάλεια για το χρήστη, η ευκολία, καθώς και η δυνατότητα μείωσης του κόστους για μπαταρίες (και άρα του οχήματος) μέσω της δυναμικής φόρτισης σε κίνηση του οχήματος. Τα μειονεκτήματά της είναι η ακριβότερη σε σύγκριση με τη συμβατική φόρτιση υλοποίηση και ο χαμηλός βαθμός απόδοσης. Οι απώλειες ισχύος, εν τούτοις, μπορούν να μειωθούν δραστικά μέσω του ηλεκτρικού συντονισμού μεταξύ του κυκλώματος του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, χρησιμοποιώντας μια καλά σχεδιασμένη τοπολογία αντιστάθμισης. Σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης η γεωμετρία και τα υλικά της κατασκευής. Όσον αφορά την προτυποποίηση, βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο. Έχουν αναπτυχθεί κάποια πρότυπα, τα οποία όμως δεν περιέχουν αυστηρούς περιορισμούς, δίνοντας χώρο για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στο συγκεκριμένο τομέα.

Η ηλεκτρομαγνητική μελέτη μιας διάταξης στατικής φόρτισης τύπου «I» με τη βοήθεια του λογισμικού ansys έδειξε ότι η μεταφερόμενη ισχύς – ευθέως ανάλογης μαγνητικής ροής που διαπερνά το pick-up του δευτερεύοντος – επηρεάζεται από τις διαστάσεις της διάταξης. Περισσότερο φαίνεται να επηρεάζεται από το πλάτος βασικής πλάκας, το πλάτος τυλίγματος, το μήκος βασικής πλάκας και το μήκος πόλου. Σε μικρότερο βαθμό από το πλάτος πλάκας πόλου. Μικρή επίδραση έχει και η αύξηση του πάχους πόλου, ενώ σχεδόν αμελητέα είναι η επίδραση των: πάχους βασικής πλάκας, πάχους πλάκας πόλου, ύψους πόλου.

Ακόμα, αύξηση των ελιγμάτων του τυλίγματος του πρωτεύοντος προκαλεί αισθητή αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος, για κάθε μεταβολή των διαστάσεων, ενώ η ισχύς εξόδου είναι ευθέως ανάλογη του αριθμού ελιγμάτων του τυλίγματος του δευτερεύοντος.

Σε κάθε περίπτωση, η μέγιστη ισχύς μεταφέρεται όταν το pick-up είναι ακριβώς πάνω από τον πόλο γύρω από τον οποίο περιελίσσεται το τυλίγμα του πρωτεύοντος. Έστω και μικρή μετατόπιση του pick-up ως προς τους άξονες x, y προκαλεί σημαντική μείωση της μεταφερόμενης ισχύος, ενώ ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και για την απόσταση του pick-up από τον πόλο (μετατόπιση ως προς τον άξονα z).

Τα ευρήματα της μελέτης αυτής χρησιμοποιήθηκαν σε ένα παράδειγμα σχεδίασης ηλεκτρομαγνητικής διάταξης φόρτισης που θα μπορούσε να παρέχει ισχύ 27 kW.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε και μελετήθηκε μια διάταξη ελέγχου για σταθμό επαγωγικής φόρτισης. Με βάση τη μαγνητοστατική ανάλυση που προηγήθηκε φτιάξαμε μία διάταξη φόρτισης που παρέχει χαμηλή ισχύ στο όχημα στο Ansys, και με βάση τις τιμές για την αμοιβαία επαγωγή και τις αυτεπαγωγές σχεδιάσαμε το κύκλωμα. Με τη βοήθεια του ελέγχου κρατάται το ρεύμα σταθερό στο πρωτεύον ενώ η ισχύς εξόδου ελέγχεται μέσω της γωνίας της τάσης εξόδου. Διαπιστώθηκε ότι χάρη σε αυτόν τον έλεγχο η διάταξη είναι σε θέση να τροφοδοτεί φορτία σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος, με το ρεύμα του πρωτεύοντος να μένει σε κάθε περίπτωση σταθερό.

4.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Θέματα για περαιτέρω μελέτη θα μπορούσαν να είναι:

- Δεδομένης της ικανότητας διατήρησης σταθερού ρεύματος στο πρωτεύον, η μελέτη για τροφοδοσία πολλών pick- up ταυτόχρονα. Σε αυτήν την περίπτωση το πρωτεύον θα συνδέεται μαγνητικά με πολλά δευτερεύοντα (αντίστοιχες αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ του πρωτεύοντος και του κάθε δευτερεύοντος).
- Μελέτη εφαρμογής της διάταξης ελέγχου σε συστήματα vehicle-to-grid (αμφίδρομης μεταφοράς ισχύος. Για την περίπτωση αυτή, θα πρέπει να μελετήσουμε την ικανότητα λειτουργίας του αντιστροφέα του κυκλώματος του πρωτεύοντος ως ανορθωτή και αντίστοιχα του ανορθωτή του δευτερεύοντος ως αντιστροφέα. Ο π ελεγκτής στον έλεγχο του δευτερεύοντος σε αυτήν την περίπτωση παράγει αρνητική γωνία β , μεταξύ $-\pi/2$ και 0. Θα πρέπει επίσης το πρωτεύον να λειτουργεί ως δευτερεύον και το δευτερεύον ως πρωτεύον.
- Μελέτη της διάταξης τύπου «I» για δυναμική φόρτιση. Σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψη η κίνηση του οχήματος και συνεπώς το γεγονός ότι το πρωτεύον δεν θα βρίσκεται ακριβώς κάτω από το δευτερεύον αλλά διαρκώς μετατοπισμένο στον άξονα που είναι παράλληλος με το δρόμο με τιμή μετατόπισης εξαρτώμενη από το χρόνο

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Priyabrata Sahoo, Indira Gandhi Institute of Technology, 2011, **“Seminar report on wireless electricity (Witricity)”**
- [2] A. E. Umenei, Phd, 2011, **“Understanding low frequency non-radiative power transfer”**
- [3] Ron Schmitt, **“Understanding electromagnetic fields and antenna radiation takes (almost) no math”**
- [4] <http://www.antenna-theory.com/basics/fieldRegions.php>
- [5] Manuele Bertoluzzo , Mude Kishore Naik and Giuseppe Buja ,Department of Industrial Engineering, University of Padova, Italy, **“Preliminary investigation on contactless energy transfer for electric vehicle battery recharging”**
- [6] M. G. L. Roes, M. A. M. Hendrix and J. L. Duarte, Eindhoven University of Technology, Department of Electrical Engineering, **“Contactless Energy Transfer Through Air by Means of Ultrasound”**
- [7] Ι.Α. Βομβορίδης, **“Ηλεκτρομαγνητικά πεδία μέρος Α΄”**, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2009
- [8] Ι.Α. Τεγόπουλος, **“Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β΄ Μόνιμη Κατάσταση”**, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- [9] <http://el.wikipedia.org/wiki/Μετασχηματιστής>
- [10] Venugopal Prasanth, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2012, **“Wireless Power Transfer for E-mobility”**
- [11]http://skara.di.uoa.gr/communication_systems/transparency/antenna_chapter_1_2011_final.pdf
- [12] Μιχάλης Ε. Καραδημητρίου, Ηράκλειο Κρήτης, 2012, **“Πρόχειρες Σημειώσεις Φυσικής Γ Λυκείου Θετικής & Τεχνολογικής Κατεύθυνσης”**
- [13] Jun Zhao, Guizhi Xu, Chao Zhang, Wei Zhang, Xuan Li, **“A Contrastive Studies between Magnetic Coupling Resonance and Electromagnetic Induction in Wireless Energy Transmission”**
- [14] P. Bauer,Electrical Sustainable Energy, TU Delft, **“On-road Contactless Power Transfer- Drive Range Extension - A Case Study”**
- [15] <http://witricity.com/pages/application.html>
- [16] Dr. Morris Kesler, WiTricity Corporation, 2013, **“WiTricity Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance”**
- [17] Mikael Cederlof, KTH electrical engineering, 2012, master thesis, **“Inductive Charging of electrical vehicles System study”**
- [18] <http://www.osco.uk.com/products/cable/litz-wire>
- [19] <http://www.greenoptimistic.com/2012/12/13/automakers-investigating-two-approaches-to-inductive-charging/#.UgziFJKIuBB>
- [20] Swagat Chopra, Delft University of technology, 2011, Master of Science Thesis, **“Contactless Power Transfer For Electric Vehicle Charging Application”**
- [21] R. Bosshard, J. Mühlethaler, J. W. Kolar, I. Stevanovic, ETH, 2013 IEEE, **“Optimized Magnetic Design for Inductive Power Transfer Coils”**
- [22] J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, C. T. Rim, 2011, **“Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles”**
- [23] Zed (Zhangjun) Tang, Mark Christini, Takahiro Koga, 2012, Ansys.inc, **“Wireless Power Transfer using Maxwell and Simplorer”**
- [24] Mickel Budhia, John T. Boys, Grant A. Covic, Chang-Yu Huang, 2013, **“Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems”**

- [25] Chang-Yu Huang, John T. Boys, Grant A. Covic, Mickel Budhia, The University of Auckland, **“Practical Considerations for Designing IPT System for EV Battery Charging”**
- [26] data sheet **“WiT-3300 Deployment Kit”**
- [27] Jesse Schneider, 2012, **“SAE J2954 overview and Path Forward”**
- [28] Jesse Schneider, **“Wireless Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles” Plug-in Hybrid Vehicles”**
- [29] <http://etecmc10.vub.ac.be/publications/DPRmasterV2BP.pdf>
- [30] Μαρίνα Α. Τσιλή, Διδακτορική διατριβή, 2005, **“Ανάπτυξη μεικτών αριθμητικών τεχνικών πεπερασμένων στοιχείων-οριακών στοιχείων για τη σχεδίαση μετασχηματιστών ισχύος”**
- [31] http://www.litzwire.com/nepdfs/Round_Litz_Catalog.pdf
- [32] http://www.powerstream.com/Wire_Size.htm
- [33] Udaya K. Madawala, Senior Member, IEEE, and Duleepa J. Thrimawithana, Member, IEEE, 2011, **“A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems”**
- [34] [http://hermes.eee.nott.ac.uk/teaching/h5cpe2/Inverters%20\(with%20pics\).pdf](http://hermes.eee.nott.ac.uk/teaching/h5cpe2/Inverters%20(with%20pics).pdf)
- [35] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/24/Switches_domain.svg/2000px-Switches_domain.svg.png
- [36] http://pcbheaven.com/wikipages/PID_Theory/?p=0
- [37] <http://gun.teipir.gr/DSAELAB/Ergastiriakes/pidtutorial.pdf>
- [38] http://en.wikipedia.org/wiki/Insulated-gate_bipolar_transistor
- [39] Wei Zhang, Siu-Chung Wong, Chi K. Tse, and Qianhong Chen, Department of Electronic and Information Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China, 2012, **“Compensation Technique for Optimized Efficiency and Voltage Controllability of IPT Systems”**

