



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

---

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕ  
ΔΥΟ ΠΟΛΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ  
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

---

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΝΘΟΠΟΥΛΟΣ Μ. ΑΝΔΡΕΑΣ

Επίβλεψη: Χατζηαργυρίου Νικόλαος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

**ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΕ ΔΥΟ  
ΠΟΛΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ  
ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΝΘΟΠΟΥΛΟΣ Μ. ΑΝΔΡΕΑΣ

Επίβλεψη: Χατζηαργυρίου Νικόλαος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την ..... Μαρτίου 2017.

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

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

.....  
Γεωργιλιάκης  
Πάυλος  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2017

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

Copyright© Μανθόπουλος Μ. Ανδρέας, 2017

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 το συγγραφέα.

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

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η μελέτη και η σύγκριση μεταξύ συζευκτών δύο πόλων στην στατική επαγωγική φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Το σύνολο της μαγνητοστατικής ανάλυσης των διατάξεων έλαβε χώρα στο υπολογιστικό πρόγραμμα Maxwell, το οποίο και παρουσιάστηκε λειτουργικά. Αρχικά μελετήθηκε η πιο απλή διάταξη δύο πόλων (η DD διάταξη) ως προς την ικανότητα επίτευξης ισχύος σε διάφορα διάκενα, αλλά και την ανοχή της σε οριζόντια μετατόπιση. Εξετάσθηκαν τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος, καθώς και τρία διαφορετικά μεγέθη για τη συγκεκριμένη διάταξη. Πραγματοποιήθηκε, επίσης, σύγκριση με μία διάταξη δύο πόλων που χρησιμοποιεί ένα επιπλέον Q πηνίο (DDQ διάταξη), με την ίδια μεθοδολογία, αποσκοπώντας στην ανάλυση της συνεισφοράς του επιπλέον πηνίου στο δευτερεύον στοιχείο της διάταξης. Στη συνέχεια, προχωρήσαμε στη σύγκρισή των διατάξεων αυτών με μία νέα BP διάταξη, με χαρακτηριστικό την επικάλυψη των πηνίων της στο δευτερεύον, εξάγοντας συμπεράσματα για την συμπεριφορά τους, τόσο ως προς την απόδοση ισχύος, όσο και στην ανοχή σε μετατόπιση, αλλά και την εξοικονόμηση υλικών. Συγκρίθηκε επίσης η συμπεριφορά των διατάξεων δύο πόλων με την πιο κλασική και αντιπροσωπευτική διάταξη ενός πόλου: την κυκλική διάταξη. Ειδικότερα εξετάσθηκε μία κυκλική διάταξη με ράβδους φερρίτη, καθώς και η δυνατότητα συνδυασμού της διάταξης αυτής με τον DD συζεύκτη. Τέλος, εξετάσθηκε η λειτουργία των συζευκτών DDQ και BP με τον κυκλικό συζεύκτη στη θέση του πρωτεύοντος.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Επαγωγική φόρτιση, ηλεκτρικό όχημα, Ansoft Maxwell, διάκενο, μετατόπιση, DD συζεύκτης, DDQ συζεύκτης, BP συζεύκτης, κυκλικός συζεύκτης.



## ABSTRACT

The scope of this thesis is built is to study two-pole couplers in static inductive charging of electric vehicles. The magnetostatic analysis of the studied pads took place at Maxwell computer software. To begin with, the simplest pad of two poles (DD pad) has been studied concerning its ability of power transfer at different air gaps, and its tolerance to horizontal misalignment. Three different power levels and three different sizes for that particular pad have been examined. The DD pad has been compared to a pad of two poles using an additional coil (DDQ pad), aiming to analyze the contribution of the additional coil in the secondary coupler. In addition, a BP with two identical, partially overlapped and mutually decoupled coils has also been studied and compared with the rest of the pads. Conclusions are drawn on the behavior of the two-pole pads regarding both their power transfer ability and their tolerance in misalignment. Their power transfer ability has also been studied according to the use of Litz wire and ferrite material. Also, we compared the behavior of the two-pole devices with the most classic and representative one pole pad: the circular pad. Particularly, a circular pad with ferrite rods has been compared with the examined two pole pads, while also investigating whether the circular pad can effectively operate with a DD pad. Finally, the operation between a primary circular pad and a DDQ or a BP pad as a secondary has been studied, in order to observe the tolerance in misalignment and the power transfer ability among the different pads.

## KEYWORDS

Inductive charging, electric vehicle, Ansoft Maxwell, air gap, misalignment, DD coupler, DDQ coupler, BP coupler, circular coupler





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κύριο Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθώς και τον κύριο Γιάννη Καρακίτσιο, για την εμπιστοσύνη και την πολύτιμη καθοδήγηση τους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμη ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αγάπη και την στήριξη, που μου παρέχουν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών και ολόκληρης της ζωής μου.



## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ .....	5
ABSTRACT .....	7
KEYWORDS .....	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	9
<b>1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Εισαγωγή</b> .....	<b>15</b>
1.1 Γενική εισαγωγή .....	15
1.2 Ηλεκτρικό αυτοκίνητο .....	15
1.3 Κατηγορίες ισχύος φόρτισης .....	16
1.4 Επαγωγική φόρτιση .....	17
1.5 Τύποι στατικών μαγνητικών συζευκτών .....	19
1.6 Διατάξεις μονής όψεως .....	21
1.6.1 Κυκλική διάταξη .....	21
1.6.2 DD διάταξη .....	22
1.6.3 DDQ διάταξη .....	23
1.6.4 BP διάταξη .....	24
1.7 Τύποι δυναμικών μαγνητικών συζευκτών .....	25
1.8 Τεχνικές συντονισμού .....	28
1.9 Τεχνικές ελέγχου .....	29
1.10 Υπολογισμός ισχύος .....	30
<b>2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Ansoft Maxwell</b> .....	<b>33</b>
2.1 Εισαγωγή .....	33
2.2 Αρχικοποίηση προγράμματος .....	33
2.3 Σχεδιασμός διάταξης .....	37
2.3.1 Φερρίτες πρωτεύοντος .....	39
2.3.2 Τυλίγματα πρωτεύοντος .....	42
2.3.3 Φερρίτες δευτερεύοντος .....	46
2.3.4 Τυλίγματα δευτερεύοντος .....	48
2.3.5 Θωράκιση αλουμινίου .....	48
2.4 Ορισμός υλικών .....	50
2.5 Ορισμός οριακών συνθηκών .....	52
2.6 Ορισμός ρευμάτων .....	53
2.7 Παραμετροποίηση ανάλυσης .....	57
2.8 Απεικόνιση αποτελεσμάτων .....	58

<b>3° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Διάταξη DD</b> .....	61
3.1 Περιγραφή με στόχο την κατασκευή.....	61
3.2 Μεταβολές διακένου .....	63
3.3 Ανοχή στην μετατόπιση .....	65
3.4 Μέγεθος διάταξης.....	68
3.4.1 Μικρότερη DD διάταξη .....	68
3.4.2 Μεγαλύτερη DD διάταξη.....	71
<b>4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Διάταξη DDQ</b> .....	77
4.1 Περιγραφή της DDQ διάταξης.....	77
4.2 Μεταβολές διακένου .....	79
4.3 Ανοχή στην μετατόπιση .....	80
4.4 Μέγεθος διάταξης.....	83
4.4.1 Μικρότερη DDQ διάταξη.....	84
4.4.2 Μεγαλύτερη DDQ διάταξη.....	87
<b>5° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Διάταξη BP</b> .....	93
5.1 Περιγραφή της BP διάταξης.....	93
5.2 Μεταβολές διακένου .....	95
5.3 Ανοχή στην μετατόπιση .....	97
5.4 Μέγεθος διάταξης.....	100
5.4.1 Μικρότερη BP διάταξη .....	101
5.4.2 Μεγαλύτερη BP διάταξη .....	104
5.5 Σύγκριση μεταξύ της BP διάταξης και των υπόλοιπων διατάξεων δύο πόλων... .....	110
<b>6° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Σύγκριση με κυκλική</b> .....	113
6.1 Περιγραφή της κυκλική διάταξης φερριτών.....	113
6.2 Συμπεριφορά ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης με δύο κυκλικές διατάξεις σε πρωτεύον – δευτερεύον .....	114
6.3 Διαλειτουργικότητα μεταξύ κυκλικής και DD διάταξης.....	117
6.4 Διάταξη CP-DDQ.....	119
6.5 Διάταξη CP-BP.....	121
<b>7° ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Συμπεράσματα και επεκτάσεις</b> .....	125
7.1 Συμπεράσματα.....	125
7.2 Επεκτάσεις.....	126
ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	127
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	131





# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Εισαγωγή

## 1.1 Γενική εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα ακολουθήσει μία εισαγωγή σε γενικούς όρους και ορισμούς, όπως είναι, το ηλεκτρικό όχημα, η ασύρματη φόρτισή τους, διαφόρων τεχνικών ελέγχου και συντονισμού, καθώς και μία εισαγωγή στα είδη των διατάξεων.

## 1.2 Ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Το **Ηλεκτρικό Όχημα (HO)** χρησιμοποιεί την ηλεκτρική ενέργεια, που αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενες συστοιχίες συσσωρευτών. Τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες, αντί των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Τα HO είναι συνήθως αυτοκίνητα, ελαφριά φορτηγά, ποδήλατα, ηλεκτρικά μηχανικά δίκυκλα, μικρά οχήματα γκολφ, ανυψωτικά και παρόμοια. Τα HO ήταν μεταξύ των οχημάτων που εμφανίστηκαν από τις πρώτες μέρες της αυτοκίνησης και έχουν υψηλότερο συντελεστή ενεργειακής απόδοσης, από όλα τα οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 1.2-1: Ηλεκτρικό αυτοκίνητο.

Τα HO αναμένεται να αποτελέσουν τα οχήματα της πόλης του μέλλοντος. Στις μέρες μας υπάρχουν πολλοί κατασταλτικοί παράγοντες, όπως η αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση και η ολοένα μεγαλύτερη επιβολή φόρων στα συμβατικά καύσιμα λόγω εξαντλήσεώς τους. Επίσης, η προοπτική μείωσης του κόστους παραγωγής των HO ενισχύει

την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης [1]. Επιπλέον, στα πλεονεκτήματα ενός ΗΟ συγκαταλέγονται οι χαμηλοί ρύποι και θόρυβοι, η σταθερή ροπή, που χρησιμοποιείται σε όλο το εύρος των στροφών, χωρίς την καταπόνηση του ηλεκτροκινητήρα και, τέλος, το χαμηλό κόστος συντήρησης σε βάθος χρόνου έναντι ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 1.2-2: Ηλεκτροκίνηση VS Καύσιμο

Σε αντίθεση, ένα ΗΟ θα πρέπει να ξεπεράσει τα ολίγα μειονεκτήματα που εμφανίζει. Μειονεκτήματά του θεωρούνται οι υψηλές δαπάνες κατασκευής, που το καθιστούν ακριβότερο, και η περιορισμένη αυτονομία και διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους.

### 1.3 Κατηγορίες ισχύος φόρτισης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αύξηση των πωλήσεων ενός ΗΟ είναι να γνωρίζει ο πελάτης την επάρκεια υποδομών φόρτισης. Αυτό αναφέρεται στο πλήθος των κέντρων φόρτισης, αλλά και την τοποθεσία της εγκατάστασης και κυρίως τον απαιτούμενο χρόνο πλήρους φόρτισης του οχήματος. Βάσει όμως, των σημερινών τεχνολογιών ο απαιτούμενος αυτός χρόνος δεν μπορεί να συγκριθεί ακόμα, με τον αντίστοιχο της ανατροφοδότησης ενός βενζινοκίνητου οχήματος.

Το επίπεδο ισχύος φόρτισης είναι η κύρια παράμετρος που έχει επιρροή στο χρόνο φόρτισης, το κόστος, τον απαιτούμενο εξοπλισμό και την επίδραση της διάταξης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Για τους λόγους αυτούς, τα διεθνές πρότυπα στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη αναφέρονται σε αυτή την παράμετρο για την ταξινόμηση των κατηγοριών φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος [2].

Στην Ευρώπη, ειδικότερα, τα διεθνής πρότυπα παρέχουν μια κατηγοριοποίηση του τύπου του φορτιστή, σε συνάρτηση της ονομαστικής ισχύος του και του χρόνου επαναφόρτισης, ορίζοντας τρεις κατηγορίες που διακρίνονται σε [2]:

- Κανονικής ισχύος ή αργής φόρτισης, με ονομαστική ισχύ κατώτερη από 3,7 kW.
- Μεσαίας ισχύος, με ονομαστική ισχύ από 3,7 έως 22 kW.
- Υψηλής ισχύος ή ταχείας φόρτισης, με ονομαστική ισχύ ανώτερη από 22 kW.

Πιο συγκεκριμένα, σε ένα σπίτι μας δίνεται η δυνατότητα να φορτίσουμε το ΗΟ με μία παροχή έως 3.7kW. Αυτό έχει ως συνέπεια, να απαιτούνται προσεγγιστικά 7 ώρες περίπου για την φόρτιση. Όπως γίνεται αντιληπτό, για να μειωθεί αυτός ο χρόνος



προσεγγιστικά στο μισό, έχουν αναπτυχθεί διατάξεις από 3,7kW έως και 22kW. Αναγνωρίζοντας ότι υπάρχει ανάγκη για άμεση αναπλήρωση της ηλεκτρικής ενέργειας, που να επιτρέπει την επαναφόρτιση της μπαταρίας του ΗΟ μέσα σε ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα, αναπτύχθηκε η ταχεία φόρτιση (άνω των 22kW), επιτρέποντας την πλήρη φόρτιση και σε λιγότερο από 30 λεπτά.

## 1.4 Επαγωγική φόρτιση

Μία ακμάζουσα τεχνολογία φόρτισης είναι η επαγωγική φόρτιση. Η επαγωγική φόρτιση μπορεί να διαβαθμιστεί και εκείνη στις τρεις κατηγορίες μεταφερόμενης ισχύος, αλλά η μεγάλη διαφορά της είναι ότι επιτυγχάνεται ασύρματα. Το όχημα αρχίζει να φορτίζει όταν τοποθετηθεί επάνω από μία διάταξη και με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η οποιαδήποτε ανάμειξη του οδηγού με καλώδια και συστήματα μεταφοράς υψηλής ισχύος. Επίσης, η συγκεκριμένη διάταξη είναι, ως επί των πλείστων, υπόγεια, με αποτέλεσμα να μην εκτίθεται σε αντίξοες συνθήκες είτε περιβάλλοντος είτε ανθρώπινες.



Σχήμα 1.4-1: Στατική επαγωγική φόρτιση

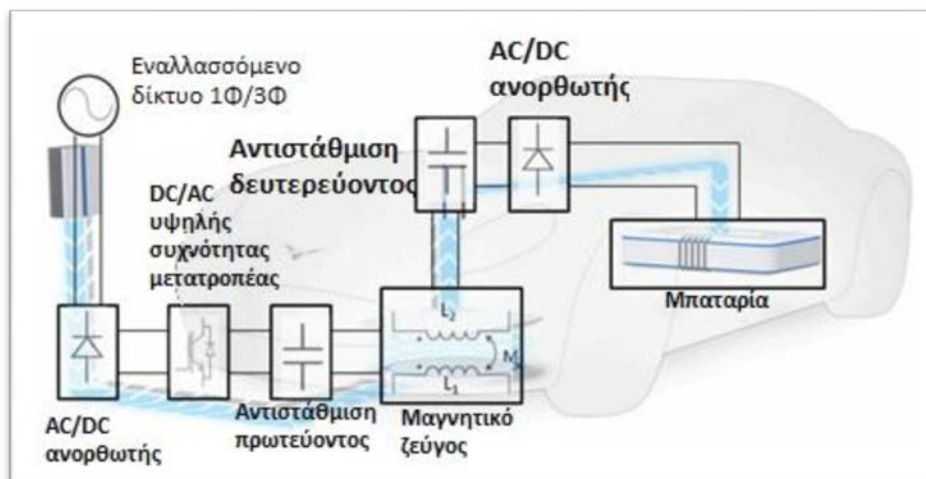


Σχήμα 1.4-2: Δυναμική επαγωγική φόρτιση

Με την εφαρμογή επαγωγικής φόρτισης δίνεται η δυνατότητα να αντιμετωπιστούν προβλήματα, όπως το υψηλό κόστος των μπαταριών, καθώς και η περιορισμένη αυτονομία ενός ΗΟ. Διακρίνονται δύο κατηγορίες επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων: η στατική φόρτιση, όπου ένα ΗΟ σταθμεύει πάνω από ένα φορτιστή με στόχο την ασύρματη μεταφορά ενέργειας (Σχήμα 1.4-1) και η δυναμική επαγωγική φόρτιση, όπου το όχημα έχει τη δυνατότητα να φορτίζει την μπαταρία του ενώ κινείται στο δρόμο (Σχήμα 1.4-2). Βάσει αυτού, ένα ΗΟ είναι πλέον σε θέση να φορτιστεί σε διάφορα σημεία ενός ταξιδιού, με αποτέλεσμα να εξαλείφεται η ανάγκη για συχνές στάσεις σε σταθμούς φόρτισης. Μελέτες επίσης, έχουν δείξει, ότι με την χρήση επαγωγικών συστημάτων η μάζα της μπαταρίας

μπορεί να μειωθεί, έως και 17,3%, που έχει ως συνέπεια τη μείωση του κόστους της μπαταρίας, έως και 58% [2].

Για την κατανόηση, της γενικής έννοιας της επαγωγικής φόρτισης παρουσιάζεται το Σχήμα 1.4-3. Αρχικά, η ισχύς AC που παρέχεται από το δίκτυο μετατρέπεται σε μία πηγή συνεχούς ρεύματος με έναν AC to DC ανορθωτή. Εν συνεχεία, η ισχύς DC μετατρέπεται σε ένα εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας για την οδήγηση του πηνίου εκπομπής, μέσω ενός δικτύου αντιστάθμισης. Η διόρθωση στον συντελεστή ισχύος (PFC), είναι αναγκαία για τον AC to DC ανορθωτή [4], ενώ ένας υψηλής συχνότητας μετασχηματιστής μπορεί να παρεμβάλλεται, μεταξύ του μετατροπέα DC-AC και της πλευράς του πρωτεύοντος πηνίου, για μεγαλύτερη ασφάλεια και προστασία [4][5]. Η υψηλή συχνότητα ρεύματος στο πηνίο μετάδοσης παράγει ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει μία εναλλασσόμενη τάση στο πηνίο λήψης. Η ισχύς εξόδου μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη χρήση ενός κατάλληλου δικτύου αντιστάθμισης για το δευτερεύον του συστήματος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4-3. Τέλος, η ισχύς AC μετατρέπεται σε DC τάση με σκοπό την παροχή συνεχούς ρεύματος στην μπαταρία του οχήματος.



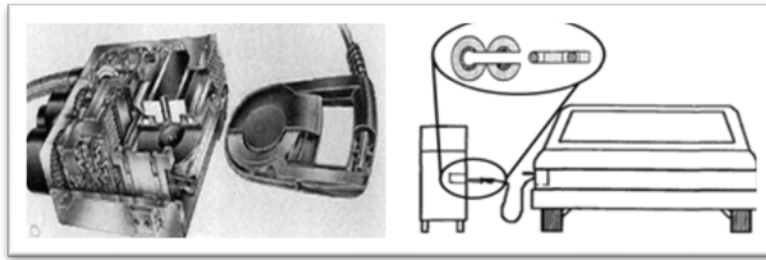
Σχήμα 1.4-3: Σύστημα επαγωγικής φόρτισης

Ως εκ τούτου, ένα τυπικό επαγωγικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τα ακόλουθα μέρη:

- Μαγνητική σύζευξη πηνίου μετάδοσης και λήψης
- Δίκτυο αντιστάθμισης, για το πρωτεύον και δευτερεύον του συστήματος
- Ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος μαζί με τα συστήματα ελέγχου που απαιτούνται για τη λειτουργία τους

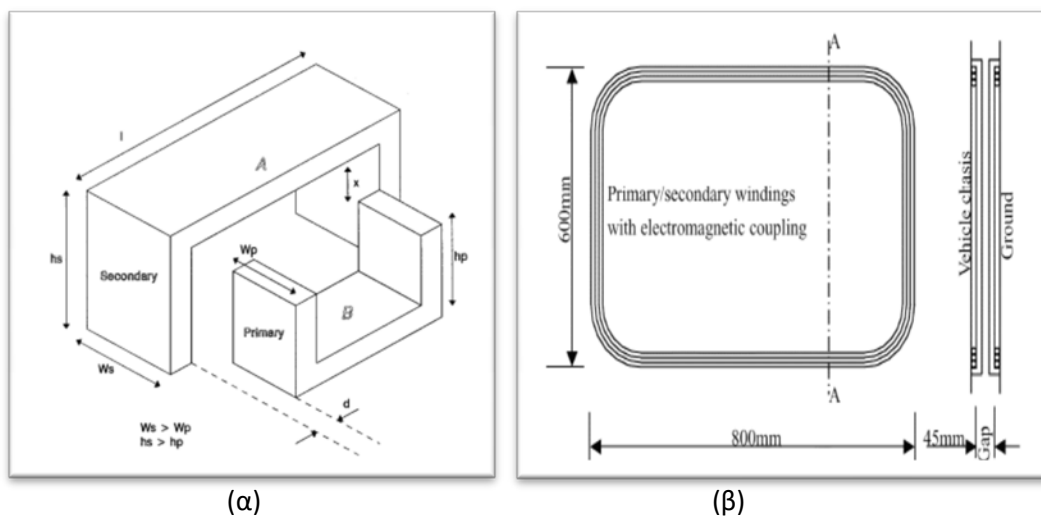
## 1.5 Τύποι στατικών μαγνητικών συζευκτών

Οι επαγωγικοί συζεύκτες που δημιουργήθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του '90 [6][7], απαιτούσαν ένα ειδικό σύστημα plug-in, για να εισαχθεί μέσα ο φορτιστής, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5-1, με αποτέλεσμα να μην θεωρούνταν ασύρματοι. Άλλα παραδείγματα της πρώιμης μετάδοσης ενέργειας μέσω επαγωγικών συστημάτων (Σχήμα 1.5-2α) περιλαμβάνουν συζεύκτες παρόμοιους με ένα απλό πυρήνα μετασχηματιστή [8]. Συνήθως, όμως, αυτό το είδος του σχεδιασμού θα μπορούσε να μεταφέρει ισχύ μέσα από ένα πολύ μικρό διάκενο.

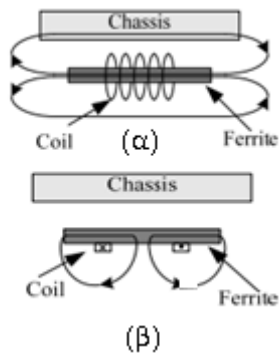


Σχήμα 1.5-1: Μαγνητική σύζευξη με εισαγωγή δευτερεύοντος στο πρωτεύων [6][7]

Μια διαφορετική σχεδίαση του συζεύκτη, παρόμοια με αυτούς που αναπτύσσονται σήμερα προτείνεται στο [9]. Ωστόσο, πηνία χωρίς φερρίτη, όπως αυτά που παρουσιάζονται στο [9] είναι πολύ ευαίσθητα στα γύρω σιδηρομαγνητικά αντικείμενα. Όταν ένα τέτοιο πηνίο είναι συνδεδεμένο με ένα αυτοκίνητο, η μαγνητική ροή, θα διέλθει μέσα από το σασί προκαλώντας υψηλή απώλεια δινορρευμάτων, καθώς και μια σημαντική αλλαγή στις παραμέτρους του πηνίου. Για να γίνει πιο πρακτική η φόρτιση ενός ΗΟ χρησιμοποιείται συνήθως φερρίτης στο σχεδιασμό, με σκοπό την ενίσχυση και την καθοδήγηση της μαγνητικής ροής [4].



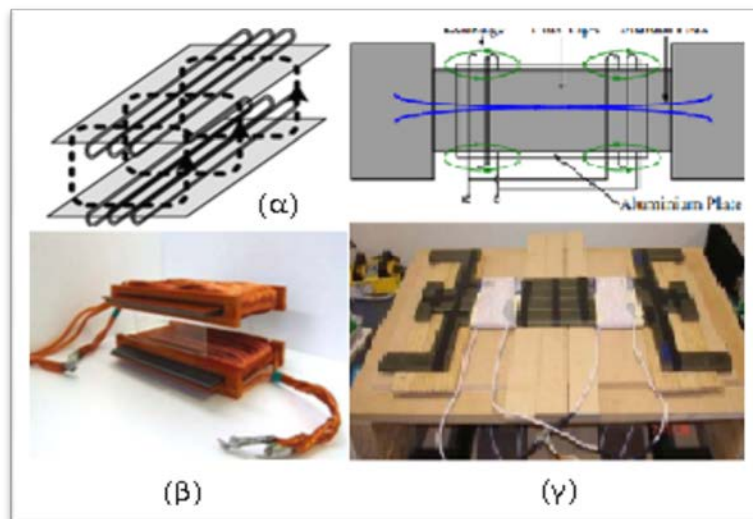
Σχήμα 1.5-2: (α) απλός πυρήνας μετασχηματιστή [8], (β) συζεύκτης χωρίς φερρίτη [9]



Σχήμα 1.5-3: Μαγνητική ροή (α) διπλής και (β) μονής όψεως

Μαγνητικοί συζεύκτες που περιλαμβάνουν φερρίτη στο σχεδιασμό, μπορεί να χαρακτηριστούν ως “διπλής όψεως” (Σχήμα 1.5-3α) ή “μονής όψεως” (Σχήμα 1.5-3β), σύμφωνα με την περιοχή διανομής της μαγνητικής ροής [4]. Τυπικά παραδείγματα διπλής όψεως περιλαμβάνουν, ένα σωληνοειδές πηνίο, τυλιγμένο σε πλάκα φερρίτη παραγωγής υψηλών μαγνητικών ροών και στις δύο πλευρές του [10][11][12][13]. Μόνο μία από αυτές τις ροές απαιτείται, ενώ η άλλη, θα μπορούσε να προκαλέσει ζημίες στο σασί του ΗΟ. Επομένως, μια θωράκιση αλουμινίου συνήθως προστίθεται προκειμένου να καταστείλει το ανεπιθύμητο τμήμα της μαγνητικής ροής, η οποία έχει ωστόσο προκαλέσει μεγάλες μαγνητικές απώλειες [4].

Βελτιώσεις σε τέτοια συστήματα υπάρχουν [14]. Ορισμένες από αυτές περιλαμβάνουν πιο πολύπλοκα σχέδια [15], όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5-4γ, όμως οι μαγνητικές απώλειες, θα μπορούσαν να είναι 10% · σημαντικά περισσότερες από τις απώλειες 2-4%, που είναι συνήθως επιθυμητές [16]. Οι διπλής όψεως συζεύκτες παράγουν επίσης, μια ισχυρή οριζόντια ροή έξω από τη διάταξη, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5-4α, η οποία είναι ιδιαίτερα δύσκολο να περιοριστεί με αποτέλεσμα οι διαρροές του πεδίου [16] να μην ενθαρρύνουν τη χρήση διπλής όψεως συζευκτών σε επαγωγικά συστήματα ισχύος. Από την άλλη πλευρά, στον μονής όψεως συζεύκτη, η ροή υπάρχει σε μόνο μία πλευρά του συζεύκτη. Επιπλέον, η ροή διαρροής στο πίσω μέρος των εν λόγω συζευκτών περιορίζεται σημαντικά, απαιτώντας πολύ λιγότερα από μια προσπάθεια θωράκισης.

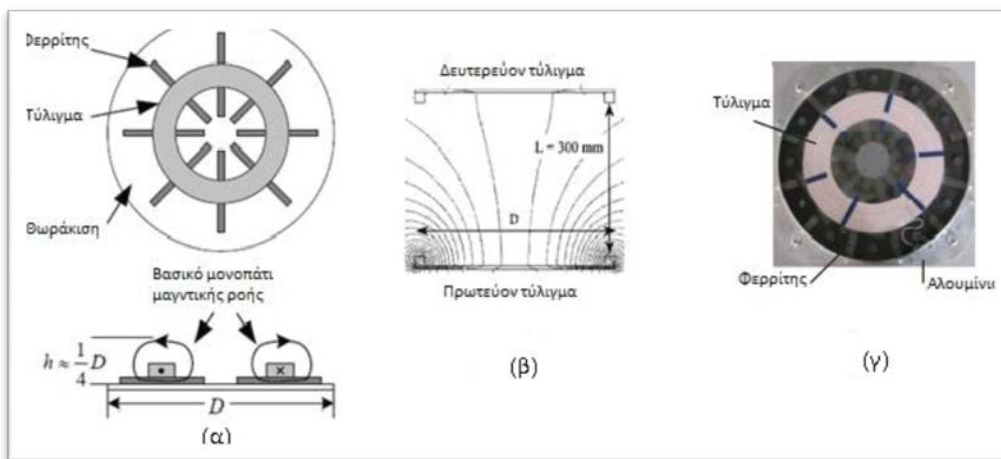


Σχήμα 1.5-4: Διπλής όψεως συζεύκτες (α)[12], (β)[14], (γ)[15]

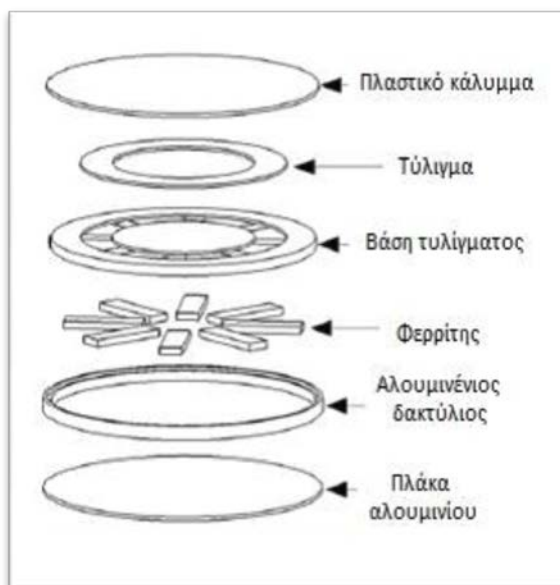
## 1.6 Διατάξεις μονής όψεως

### 1.6.1 Κυκλική διάταξη

Ένας τυπικός μονής όψεως συζεύκτης είναι η κυκλική διάταξη [17][18], που αποτελείται από ένα κυκλικό πηνίο (συνήθως καλώδιο Litz) πάνω από ένα στρώμα φερρίτης. Το ενσωματωμένο σύστημα [17], (παρόμοια με αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.6-1β) περιλαμβάνει δύο ίδιους συζεύκτες (rads) στο πρωτεύον και το δευτερεύον, ο καθένας με διάμετρο 400mm, λειτουργεί σε 100kHz και είναι σε θέση να μεταφέρει 1kW πάνω από ένα διάκενο αέρα 300 χιλιοστά.



Σχήμα 1.6-1: (α) Κυκλική διάταξη [19], (β) Τομή κυκλικής διάταξης [17], (γ) Πιο περίπλοκη κυκλική διάταξη [16][19]



Σχήμα 1.6-2:Κυκλικό rad [19]

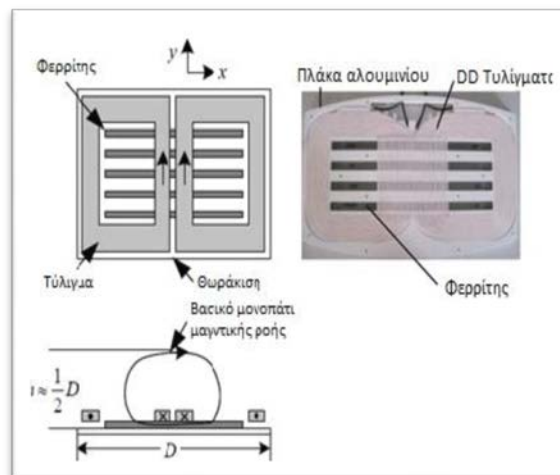
Ωστόσο, το συγκεκριμένο σχέδιο θεωρείται επιρρεπές σε κακή ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο πηνίων. Σε μια προσπάθεια να βελτιστοποιηθεί η σχεδίαση των κυκλικών συζευκτών, παρουσιάζονται πιο πολύπλοκα σχέδια που προτείνονται στο [19], που οδηγεί σε ένα σύστημα παρόμοιο με το διπλανό. Το σύστημα αυτό λειτουργεί σε 20kHz, μεταφέροντας 2kW ισχύς πάνω από ένα διάκενο αέρα 220 χιλιοστών, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει πλευρικές ανοχές  $\pm 150$  χιλιοστά. Η απόδοση του συγκεκριμένου σχεδιασμού ήταν πάνω από 85%, ενώ η μείωση του πεδίου επιτυγχάνεται σε αυτό το σχέδιο με την

επέκταση του φερρίτη πέρα από το πηνίο, για να συλλάβει, κατ' ουσία, την επιστροφή της ροής, ενώ περιλαμβάνει και ένα δαχτυλίδι από αλουμίνιο, για να βοηθήσει στη διαμόρφωση της ροής και να την κατευθύνει προς το απέναντι pad [16].

Τα πλεονεκτήματα των κυκλικών pads είναι ότι το όχημα μπορεί να τα προσεγγιστεί από οποιαδήποτε κατεύθυνση και οι εκπομπές είναι σχετικά χαμηλές, για μια δεδομένη μεταφορά ισχύος. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την ισχύ και το μέγεθος, που απαιτείται από την αυτοκινητοβιομηχανία, η παραγωγή ενέργειας από αυτά τα σχέδια σε ένα μεγάλο διάκενο αέρα είναι αρκετά χαμηλή, ενώ η ανοχή στην μετατόπιση δεν είναι, τόσο καλή, όσο η επιθυμητή (αν η μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι ίση με περίπου το  $\pm 40\%$  της διαμέτρου του pad τότε η ισχύς μηδενίζεται).

### 1.6.2 DD διάταξη

Ένας άλλος τύπος συζεύκτη μονής όψευς είναι το Double-D pad (ή DDP), που προτάθηκε από το Πανεπιστήμιο του Όκλαντ [20] και απεικονίζεται στο Σχήμα 1.6-3. Ενώ το ύψος της μαγνητικής ροής ενός κυκλικού pad είναι περίπου το  $1/4$  της διαμέτρου του, το αντίστοιχο ύψος της ροής για ένα pad DD είναι περίπου  $1/2$  του μήκους του [4][16]. Ως εκ τούτου, συγκρίνοντας ένα ζεύγος κυκλικών και DD συζευκτών έχουν σχεδόν πανομοιότυπες περιοχές και επαγωγικά πηνία [16][20], αποδεικνύοντας ότι το σύστημα DD είναι πολύ πιο ανεκτικό σε μετατοπίσεις, ενώ είναι σε θέση να μεταφέρει μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος.

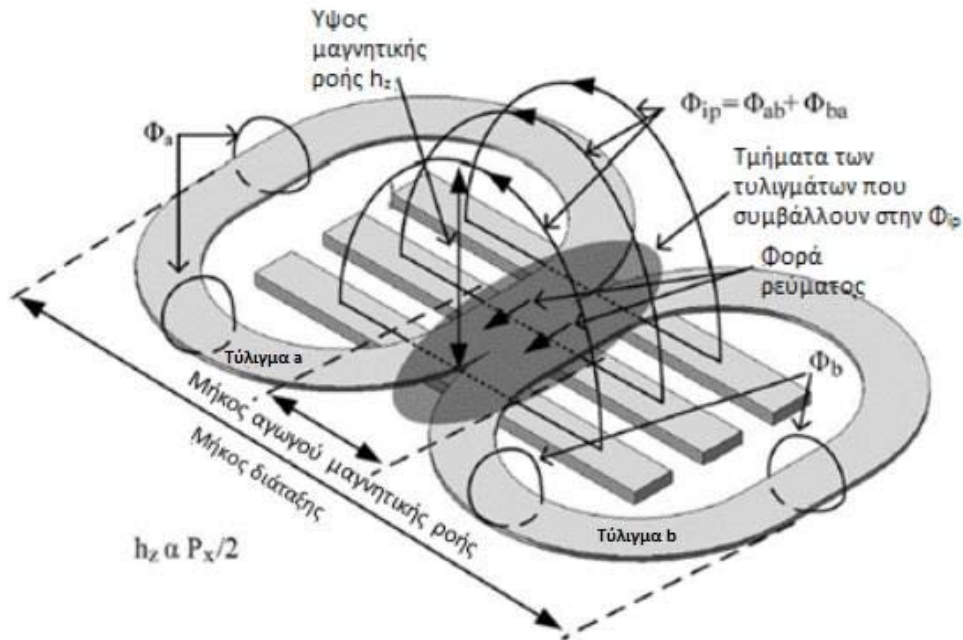


Σχήμα 1.6-3: DD pad[6][16]

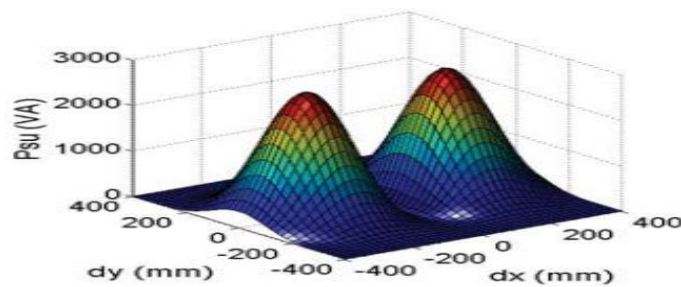
Λαμβάνοντας υπόψη τη λειτουργικότητα μεταξύ του κυκλικού pad και του συστήματος DD, αποδεικνύεται ότι μια κυκλική διάταξη ως πρωτεύον μπορεί να αποδώσει αποτελεσματικά ισχύ, σε ένα δευτερεύον σύστημα DD. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση



υπάρχουν δύο περιοχές μεταφοράς ισχύος, αλλά όχι όταν τα δύο συστήματα, είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένα (Σχήμα 1.6-5). Απαιτώντας μια τέτοια μετατόπιση σε λειτουργία, θα μπορούσε να εγείρει ορισμένα ζητήματα σχετικά με την πιθανή διαρροή μαγνητικής ροής ή τις επιπτώσεις θέρμανσης που προκύπτουν [16].



Σχήμα 1.6-4: DD rad αναλυτικό [6]

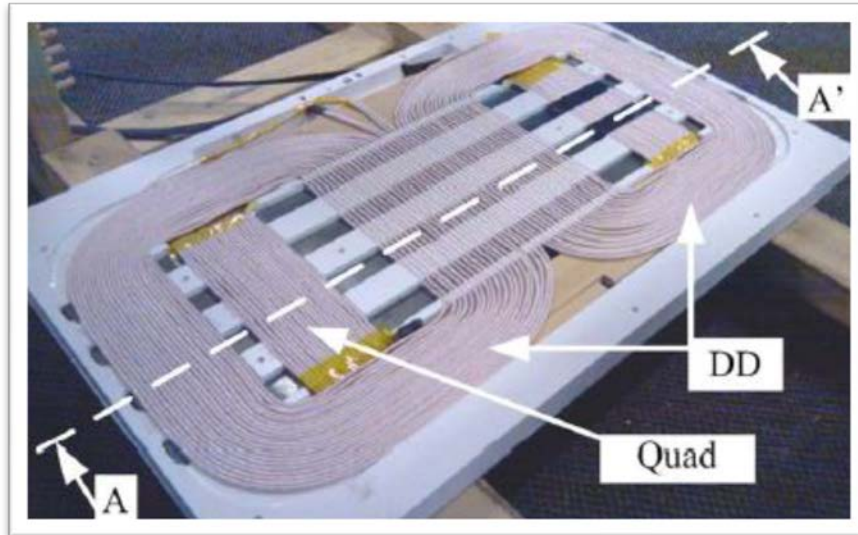


Σχήμα 1.6-5: Ισχύς εξόδου DD rad με πρωτεύον ένα κυκλικό [16]

### 1.6.3 DDQ διάταξη

Για να αποφευχθούν τέτοιου είδους θέματα, καθώς και για την αύξηση της ανοχής στο x-άξονα, ένα επιπλέον τετράγωνο πηνίο ονομαζόμενο Q πηνίο θα μπορούσε να εγκατασταθεί στο rad της DD Σχήμα 1.6-6, που οδηγεί σε ένα σχέδιο, που ονομάζεται διάταξη DDQ [20][21][22]. Το rad DDQ επιτρέπει μια ζώνη ισχύος, η οποία είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη, ανεξάρτητα από το αν το rad εδάφους είναι κυκλικό ή πολωμένο,

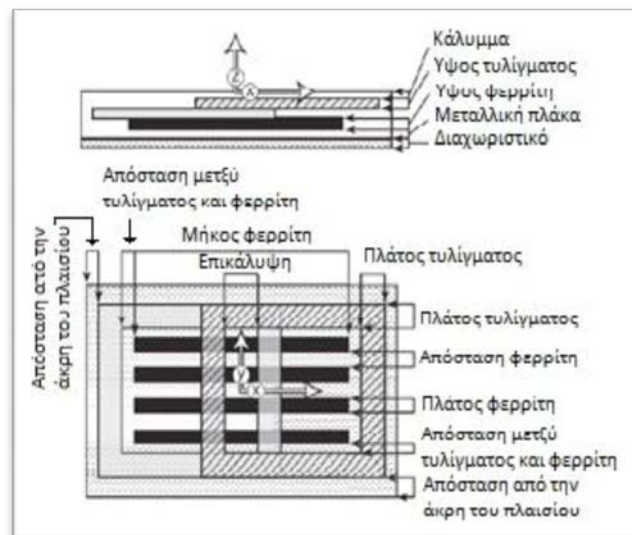
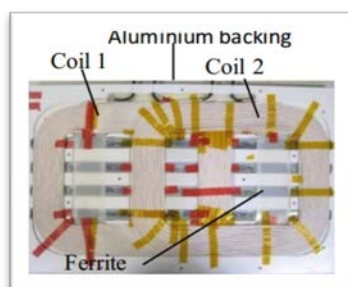
σε σύγκριση με τη ζώνη ισχύος, σε περίπτωση κυκλική με κυκλική ή DD με DD [16]. Ωστόσο, λόγω του πρόσθετου πηνίου Q στην πλευρά του δέκτη, το rad DDQ χρησιμοποιεί σχεδόν τον διπλάσιο χαλκό, σε σύγκριση με την κυκλική [20].



Σχήμα 1.6-6: DDQ pad δέκτη [20]

#### 1.6.4 BP διάταξη

Μια παρόμοια απόδοση μπορεί να επιτευχθεί, με τη χρήση ενός διαφορετικού είδους rad, διπολικού (ή BP rad) [21][22], χρησιμοποιώντας, όμως, 20-30% λιγότερο χαλκό (Σχήμα 1.6-7).



Σχήμα 1.6-7: BP διάταξη[16][21]

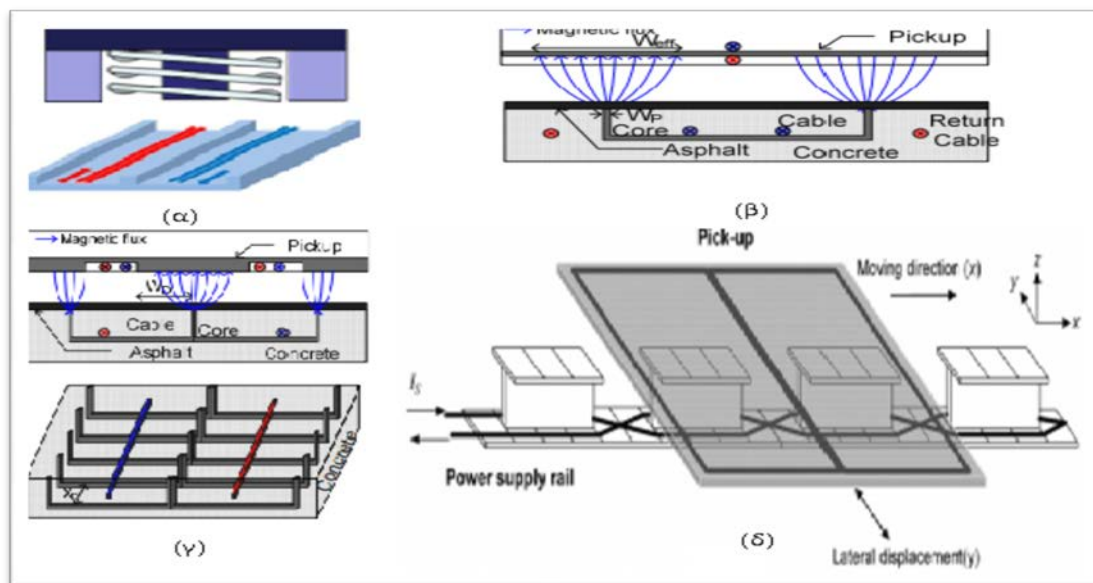


Ο σχεδιασμός ενός BP rad (BBP) αποτελείται από δύο πανομοιότυπα, μερικώς επικαλυπτόμενα και αμοιβαία αποσυνδεδεμένα πηνία, με την πλευρά των πηνίων να κάθετα στον φερρίτη (παράλληλες λωρίδες φερρίτη που εκτείνονται κατά μήκος του rad), που ακολουθείται από μια πλάκα αλουμινίου, ενώ η άλλη πλευρά του βλέπει προς τον πομπό [23].

Μελέτη [23] σχετική με την τροποποίηση της δομή του φερρίτη, τόσο για το BPP, όσο και για το DDQP δείχνει ότι η παραδοσιακή δομή φερρίτη που αποτελείται από σειρές φερρίτη, που εκτείνονται κατά μήκος του rad, παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση κατανάλωσης υλικού μεταξύ των δομών.

## 1.7 Τύποι δυναμικών μαγνητικών συζευκτών

Πολλά σχέδια, έχουν προταθεί όσον αφορά τους σταθμούς φόρτισης, για τη δυναμική επαγωγική φόρτιση, ή συστήματα On-line electric vehicle (OLEV) [24]. Οι μαγνητικές συνιστώσες, σε ένα δυναμικό σύστημα φόρτισης, είναι παρόμοιες με το στατικό: μπορούν να περιλαμβάνουν ένα πρωτεύον μαγνητικό συζευκτήρα (συνήθως θαμμένο κάτω από το δρόμο) και ένα δευτερεύον pick-up πηνίο, που τοποθετείται πάνω στο ΗΟ.



Σχήμα 1.7-1: (Α) Ε-τύπου, (Β) Εξαιρετικά λεπτό U-τύπου, (γ) Εξαιρετικά λεπτό W-τύπου και (δ) I-τύπου σύστημα μεταφοράς επαγωγική ισχύος

Υπάρχουν, κυρίως, δύο είδη πρωτεύοντος στη δυναμική φόρτιση: η ενιαία και η τμηματική διάταξη.

Στην ενιαία διάταξη το πρωτεύον είναι ένας μακρύς συζεύκτης, το όνομα του οποίου καθορίζεται από το σχηματισμό των φερριτών.

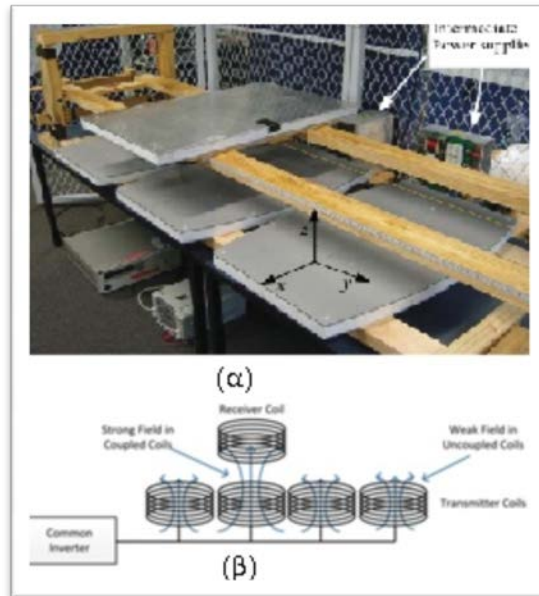
Ο συζεύκτης E-τύπου (Σχήμα 1.7-1α) μπορεί να μεταφέρει 3kW στο όχημα, με 80% συνολική απόδοση του συστήματος, μέσα από ένα διάκενο 1cm [25].

Για να αυξηθεί το διάκενο αναπτύχθηκε μια επίπεδη και πολύ λεπτή ράγα, που είναι γνωστή ως U-τύπου IPTM (Inductive Power Transfer Module), με πλάτος 140cm (Σχήμα 1.7-1β). Αυτό το σύστημα, μπορεί να μεταφέρει 52kW με δέκα pick-ups, 5,2kW το καθένα τους, μέσα από ένα διάκενο 17 εκατοστών, ενώ επιτυγχάνει μέγιστη απόδοση μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος στο 72% [25].

Προκειμένου να μειωθεί η ποσότητα του φερρίτη, ένα νέο σχέδιο εισήχθη: το W-τύπου συζεύκτη (Σχήμα 1.7-1γ), το οποίο περιλαμβάνει μια διπλή σιδηροτροχιά κατασκευασμένη από δύο μονότροχα κατά μήκος του οδοστρώματος. Για την αύξηση της ισχύος από το W-τύπου διπλής σιδηροτροχιάς της IPTM, ένα multiwinding pickup W-τύπου αναπτύχθηκε, για να παρέχει 15kW ανά pickup μέσα από ένα διάκενο 20cm. Η μέγιστη αποδοτικότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος W-τύπου ήταν 74% [25].

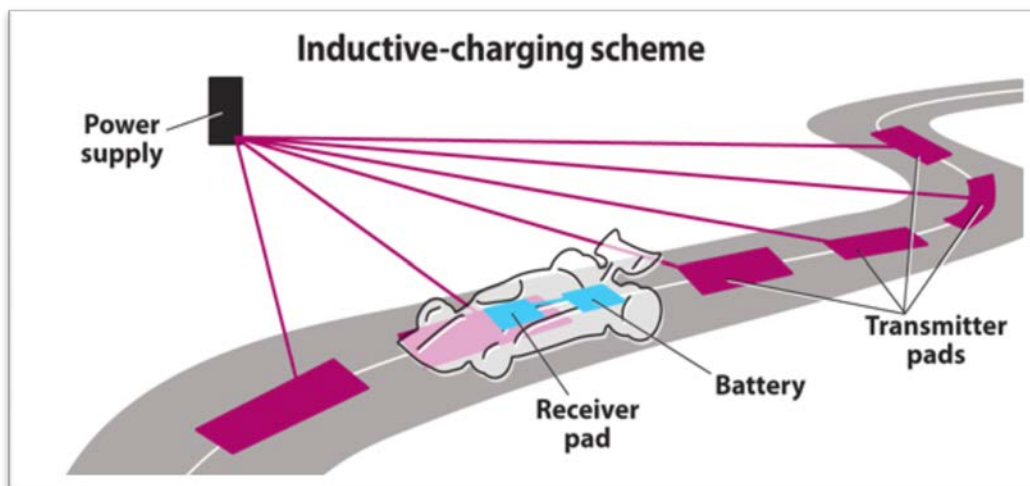
Ένα νέο επαγωγικό σύστημα μεταφοράς ισχύος, όπως ονομάζεται I-τύπου λόγω του σχήματος των πυρήνων στον πρωτεύον συζεύκτη (Σχήμα 1.7-1δ), εισάγεται στο [25][26][27]. Χρησιμοποιώντας μια νέα δομή πυρήνα, ένα επαγωγικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με μία στενή σιδηροτροχιά πλάτους 10cm, ένα μεγάλο διάκενο 20 εκατοστών, και μία μεγάλη πλευρική μετατόπιση περίπου 24 εκατοστά υλοποιήθηκε. Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να μεταφέρει μια μέγιστη ισχύ εξόδου στα 35kW, ενώ η μέγιστη απόδοση του 74% μπορεί να επιτευχθεί στα 27kW [27]. Η εναλλακτική πολικότητα των πόλων είναι ιδανική, προκειμένου, να μειωθεί το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το πρωτεύον πηνίο, ενώ μία νέα αρχιτεκτονική για την περαιτέρω μείωση του μαγνητικού πεδίου εισάγεται στο [28], με τη χρήση επιπλέον πηνίων στο pick-up, καθώς και ειδικότερες διαμορφώσεις των πηνίων του pick-up και των συνδέσεων του ανορθωτή.

Το κυριότερο πρόβλημα σχεδιασμού στην ενιαία διάταξη είναι ότι το πηνίο του δευτερεύοντος καλύπτει μόνο ένα μικρό μέρος του κομματιού, το οποίο κάνει τον συντελεστή σύζευξης πολύ μικρό, με αποτέλεσμα να προκύπτουν θέματα αποτελεσματικότητας ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI: electromagnetic interference) [4]. Για τη μείωση αυτών των θεμάτων, το rad είναι δομημένο από τα τμήματα [29][30], τα οποία είναι ενεργοποιημένα σε περίπτωση που ένα όχημα είναι πάνω του. Παρά το γεγονός ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο πάνω από τα ανενεργά τμήματα μειώνεται σημαντικά, υπάρχει πάντα ένα ρεύμα υψηλής συχνότητας, που ρέει μέσω των κοινών καλωδίων τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα την χαμηλότερη απόδοση του συστήματος [4].



Σχήμα 1.7-2: (α) σχεδιασμός μιας διαδρομής ενός σταθμού με πολλαπλά pads[16], (β) διαδρομή σταθμού με ένα κοινό μετατροπέα οδήγησης σε όλα τα pads[32].

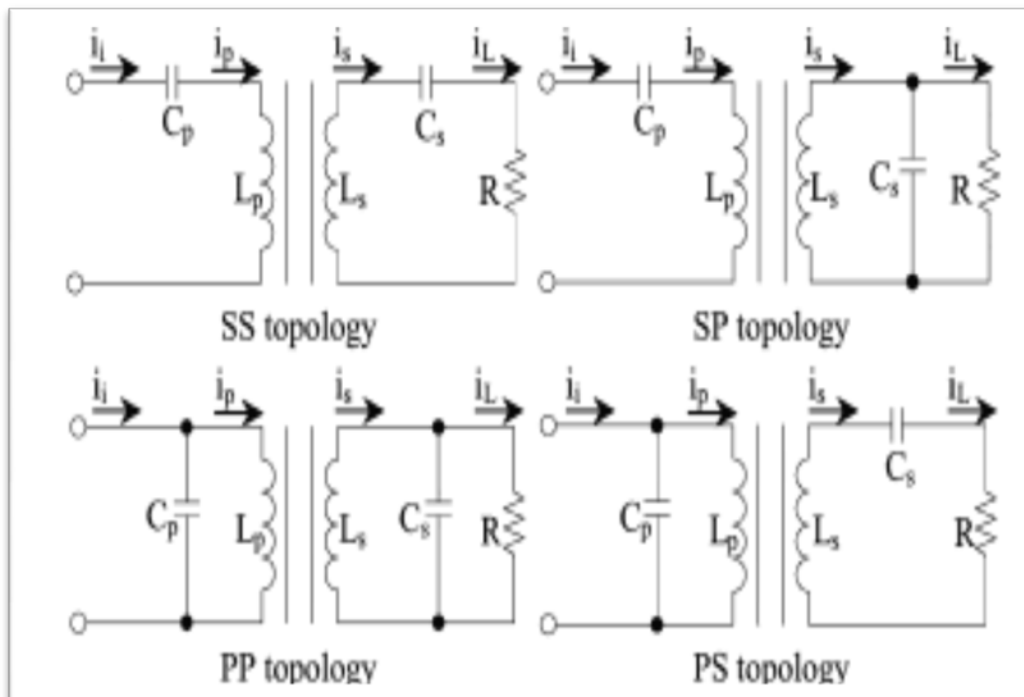
Το δεύτερο είδος πρωτεύοντος στα δυναμικά συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος (ή αλλιώς η τμηματική διάταξη), αποτελείται από πολλά μικρά "τμήματα" παρόμοια με τα pads των στατικών φορτιστών [16][31][32]. Στην περίπτωση αυτή, κάθε pad οδηγείται από έναν ανεξάρτητο μετατροπέα ισχύος και μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο, όταν ένα όχημα περνά από πάνω του. Αν και η αποτελεσματικότητα και η απόδοση EMI, θα μπορούσε να είναι, τόσο καλή, όσο με αυτή σε στατική φόρτιση. Το κόστος για την κατασκευή ενός τέτοιου μετατροπέα ισχύος, για κάθε pad, είναι δυσβάσταχτο. Μία μέθοδος διπλής σύζευξης έχει προταθεί [31], έτσι ώστε δύο πρωτεύοντα pads, να μπορούν να κινούνται από τον ίδιο μετατροπέα, ενώ μια νέα τεχνική, για να οδηγήσει ακόμα περισσότερα pads, με ένα μόνο μετατροπέα εισάγεται στο [32]. Το σύστημα που προτείνεται στο Σχήμα 1.7-2β ενισχύει το πεδίο σε ένα pad, μόνο στην περίπτωση που ένα όχημα περνά από πάνω διατηρώντας ένα χαμηλό ρεύμα, στο υπόλοιπο των ανενεργών πηνίων.



## 1.8 Τεχνικές συντονισμού

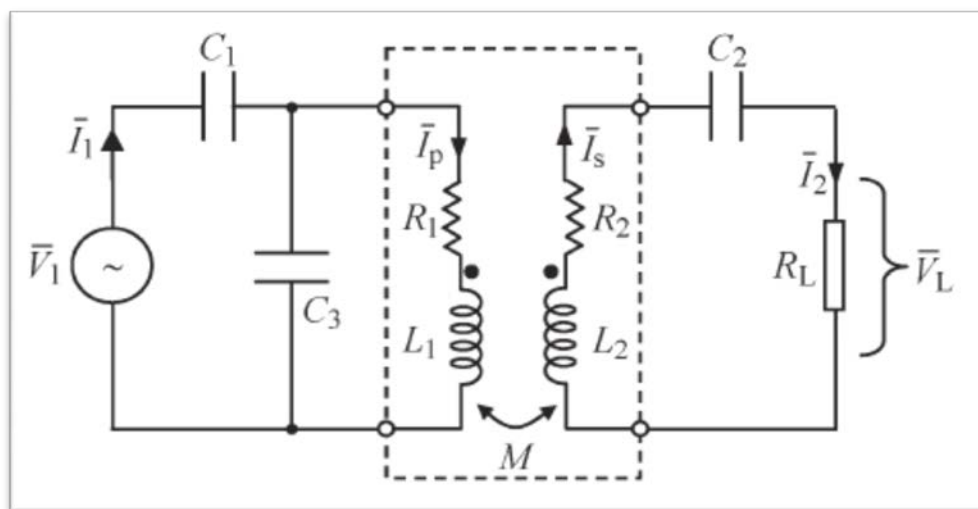
Σε ένα επαγωγικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος τα pads, είναι συζευγμένα με μια μεγάλη διαρροή αυτεπαγωγής. Ως εκ τούτου, ένα δίκτυο αντιστάθμισης πυκνωτών είναι απαραίτητο, για να μειωθεί η άεργος ισχύς στο δευτερεύον πηνίο και στην πλευρά παροχής από το δίκτυο. Ανάλογα με τον τρόπο, που οι πυκνωτές συνδέονται με τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα πηνία, μπορούν να υπάρχουν τέσσερις βασικές τοπολογίες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.8-1: σειρά-σειρά (SS), σειρά-παράλληλα (SP), παράλληλα-παράλληλα (PP), παράλληλα-σειρά (PS).

Ο πυκνωτής συντονισμού στο δευτερεύον επιλέγεται συνήθως ώστε να αντιστοιχεί στη συχνότητα συντονισμού με την αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος. Για τη μείωση της μεταφερόμενης άεργου ισχύος στην πλευρά του πρωτεύοντος, ο πυκνωτής στην πλευρά του πρωτεύοντος επιλέγεται συνήθως ώστε να κάνει την τάση και το ρεύμα εισόδου συμφασικά. Η μέθοδος αυτή καλείται μέθοδος μηδενικής φάσης γωνίας (ZPA: Zero Phase Angle) [4]. Σωστά επιλεγμένες τιμές για κάθε μία από τις τοπολογίες μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [9]. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η τιμή του πρωτεύοντος πυκνωτή, στην περίπτωση της αντιστάθμισης SS δεν εξαρτάται από τη σύζευξη ή τις συνθήκες φορτίου. Από την άλλη πλευρά, για την αντιστάθμιση SP η τιμή του πυκνωτή στο πρωτεύον εξαρτάται από την σύζευξη, ενώ για το PS και PP, η τιμή του πυκνωτή εξαρτάται, τόσο από τη σύζευξη, όσο και από τις συνθήκες φορτίου [4].



Σχήμα 1.8-1: Τοπολογίες πυκνωτών [9].

Μια νέα τεχνολογία αντιστάθμισης παρουσιάζεται στο [34] που ονομάζεται SPS (Σχήμα 1.8-2), η οποία συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των SS και PS τοπολογιών. Η συγκεκριμένη τοπολογία είναι κατάλληλη για φόρτιση σε συνθήκες, όπου μπορεί να προκύψει ιδιαίτερα μεγάλη μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.



Σχήμα 1.8-2:SPS τοπολογία [34]

## 1.9 Τεχνικές ελέγχου

Προκειμένου να ελεγχθεί η ροή ισχύος σε ένα επαγωγικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, υπάρχουν τρεις κύριες επιλογές:

- Έλεγχος στην πλευρά του δευτερεύοντος
- Έλεγχος στην πλευρά του πρωτεύοντος
- Έλεγχος και στο πρωτεύον και στο δευτερεύον

Έλεγχος στην πλευρά του δευτερεύοντος προκύπτει συνήθως σε περίπτωση, που ένα απλό rad στο πρωτεύον χρησιμοποιείται, για να μεταβιβάσει την ισχύ σε περισσότερα από ένα pick-up, ενώ η συχνότητα του παραμένει σταθερή [16]. Ένας συνδυασμός πηνιού-πυκνωτή-πηνίου στην πλευρά του δευτερεύοντος προτείνεται στην αναφορά [35] με στόχο τη ρύθμιση της ροής ισχύος και για να διατηρηθεί μια σταθερή τάση εξόδου. Ένα άλλο σχέδιο που συνδυάζει μία παράλληλη συντονισμένη δεξαμενή με έναν ειδικού τύπου μετατροπέα (tristate boost converter) προτείνεται στο [36]. Σε αυτό το συγκεκριμένο σχέδιο ο έλεγχος του άεργου ρεύματος, μπορεί να προσαρμόσει κατάλληλα την αυτεπαγωγή ή την χωρητικότητα, για να επιτευχθεί η βέλτιστη μεταφορά ισχύος.

Αν και ο έλεγχος στο πρωτεύον από μόνος του, δεν είναι επιθυμητό να εφαρμόζεται σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης με περισσότερα του ενός pickur, δεδομένου ότι οποιαδήποτε αλλαγή στην πρωτεύουσα πλευρά, θα επηρεάσει ταυτόχρονα την μεταφορά

ισχύος σε όλα τα δευτερεύον, υπάρχει μια τάση, να χρησιμοποιείται για εφαρμογές φόρτισης, όπου υπάρχει μία παροχή, για κάθε συζευγμένο φορτίο [16]. Σε περίπτωση που υιοθετηθεί ένα σύστημα ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος, στην πλευρά του δευτερεύοντος απαιτούνται ένας απλός ανορθωτής και το φίλτρο. Η τεχνική ελέγχου, μπορεί να περιλαμβάνει ένα σταθερό ρεύμα στο πρωτεύον [27] ή τεχνικές που περιλαμβάνουν τον έλεγχο της τάσης του πρωτεύοντος πυκνωτή αντιστάθμισης, με στόχο τη μεταβολή της μεταφοράς ισχύος στο pick-up [37].

Ένα στοιχείο ελέγχου συχνότητας στο πρωτεύον έχει χρησιμοποιηθεί σε ορισμένα σχέδια [38], όπου η συχνότητα δεν είναι σταθερή, αλλά αλλάζει ανάλογα με την κακή ευθυγράμμιση ή τις μεταβολές διακένου. Η μέγιστη αποδοτικότητα μπορεί, να επιτευχθεί με την προσαρμογή της συχνότητας, έτσι ώστε η διαφορά φάσης μεταξύ, της τάσης τροφοδοσίας και του ρεύματος, να είναι πάντα μηδέν .

## 1.10 Υπολογισμός ισχύος

Σε ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, η ισχύς εξόδου προσδιορίζεται, σε όρους της τάσης ανοικτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ) και του ρεύματος βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ), και του παράγοντα συντονισμού του δέκτη ( $Q$ ), που καθορίζεται από το φορτίο εξόδου και των αλλαγών του ελεγκτή [23][40][41].

$$P_o = V_{oc} * I_{sc} * Q = S_u * Q = Q * 2 * \pi * f * I_1^2 * M^2 / L_2$$

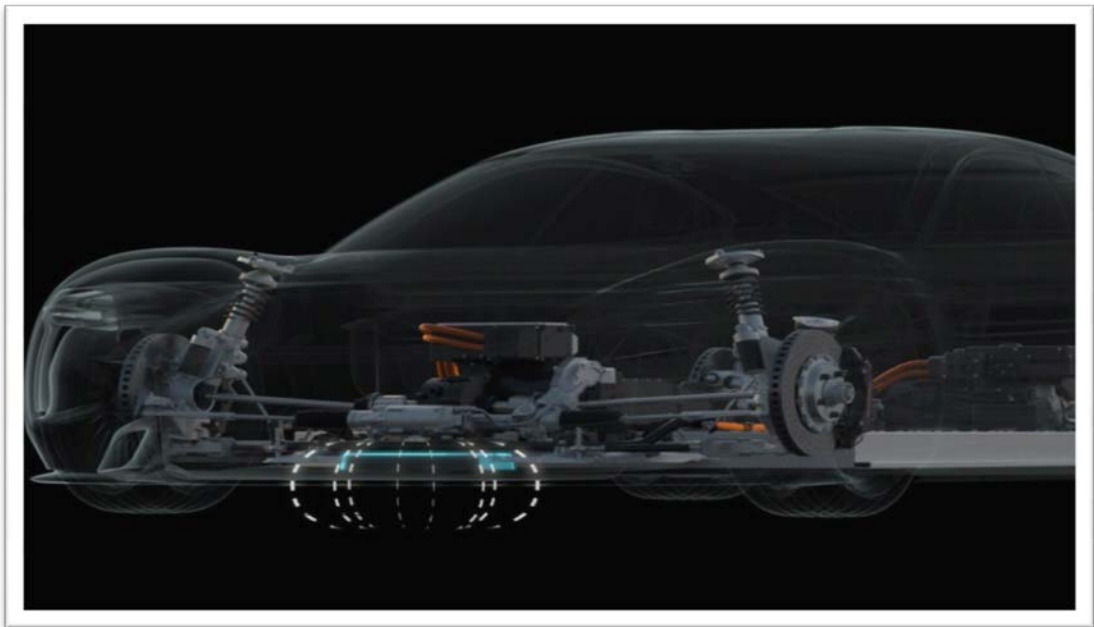
Όπου:

$V_{oc} = j * \omega * M * I_1$ , όπου  $M$  είναι η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ του πομπού και του δέκτη (pickup) και  $I_1$  είναι το ρεύμα του πομπού.

$I_{sc} = (M/L_2) * I_1$ , όπου  $L_2$  είναι η αλληλεπαγωγή του δέκτη.

$S_u$  είναι τα VA του δέκτη (pickup).

Η έξοδος μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση του παράγοντα συντονισμού  $Q$ , του πρωτεύοντος ρεύματος  $I_1$ , της συχνότητας του συστήματος  $\omega$  ή με τη βελτίωση της μαγνητικής σχεδίασης  $M^2/L_2$ . Πρακτικά το  $Q$  μπορεί να αυξηθεί μόνο μέχρι ένα μέγιστο περίπου 10, σύμφωνα με την μελέτη [23]. Τα  $I_1$  και  $\omega$ , επίσης περιορίζονται από τη διαθεσιμότητα και το κόστος και τις ιδιότητες των ηλεκτρονικών ισχύος και του καλωδίου Litz. Ως εκ τούτου, ένας τρόπος, για να αυξηθεί η παραγωγή ισχύος, είναι η βελτίωση της μαγνητικής διάταξης και πιο συγκεκριμένα η βελτίωση του όρου  $M^2/L_2$ .







## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Ansoft Maxwell

### 2.1 Εισαγωγή

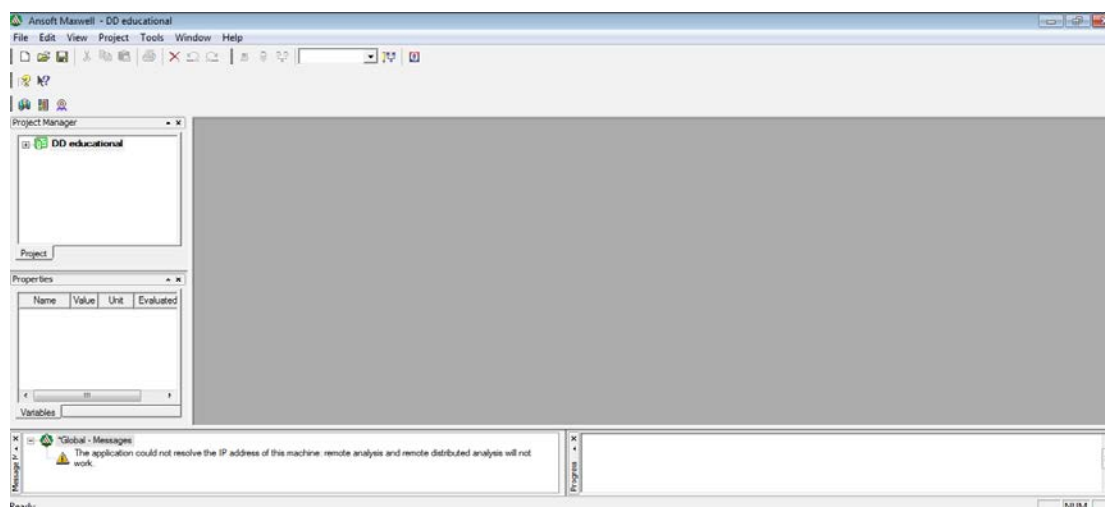
Για την μαγνητική σχεδίαση των διατάξεων που θα μελετηθούν στην συνέχεια της διπλωματικής, χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα Ansoft Maxwell. Το Ansoft Maxwell είναι ένα εργαλείο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, για την προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Χρησιμοποιείται κυρίως για εργασίες μηχανικών, που αφορούν το σχεδιασμό και την ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρομηχανικών συσκευών, συμπεριλαμβανομένων των κινητήρων, μετασχηματιστών, αισθητήρων και πηνίων. Το Ansoft Maxwell ενσωματώνει την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, για την επίλυση στατικών, στο πεδίο της συχνότητας και χρονικά μεταβαλλόμενων ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων [42].

Για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία σχεδιασμού και επίλυσης ενός ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος, θα παρουσιαστεί βήμα προς βήμα η διαδικασία, που πρέπει να ακολουθηθεί, για το σχεδιασμό και την επίλυση μίας διάταξης DD, ώστε να κατανοηθεί και το υπολογιστικό εργαλείο, που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις.

### 2.2 Αρχικοποίηση προγράμματος

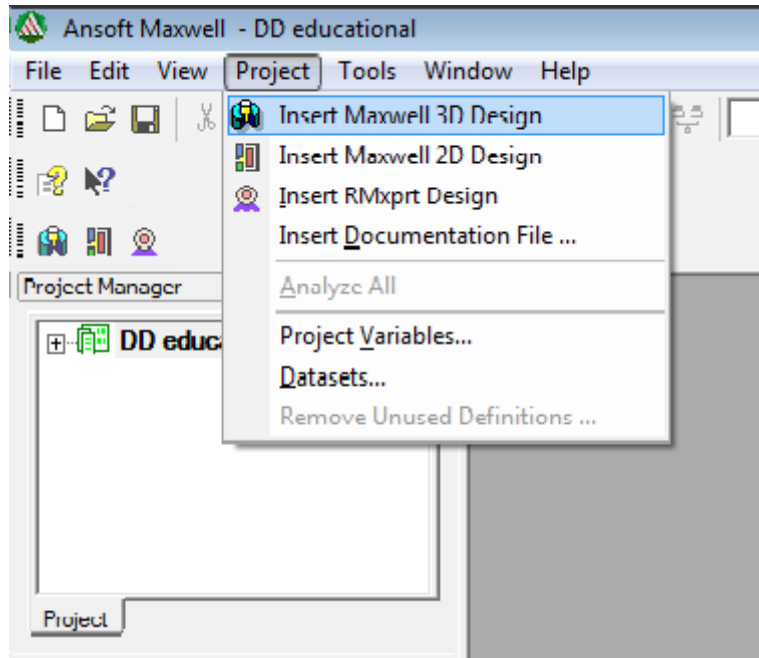
Ανοίγοντας κάποιος το πρόγραμμα αντικρίζει το παρακάτω προγραμματιστικό περιβάλλον.



Σχήμα 2.2-1: Αρχικό περιβάλλον προγράμματος

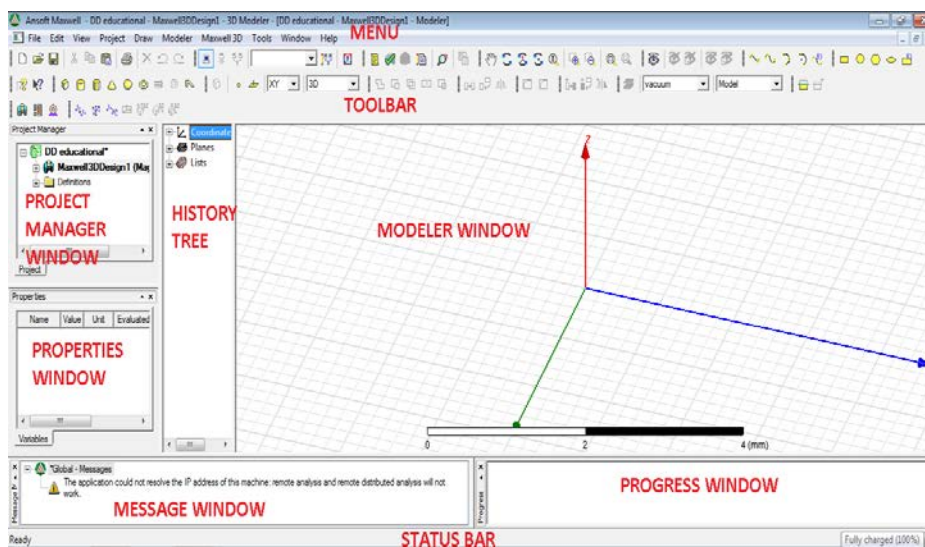
Εν συνεχεία, για την επίλυση ενός προβλήματος καλούμαστε να διαλέξουμε, όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 2.2-2, την γεωμετρία του προβλήματος. Ειδικότερα ακολουθούμε:

- Project>Insert Maxwell 3D Design



Σχήμα 2.2-2: Δημιουργία νέου project

Με αυτό το βήμα μας εμφανίζεται το πλήρες περιβάλλον του προγράμματος, που έχουμε στην διάθεσή μας Σχήμα 2.2-3.



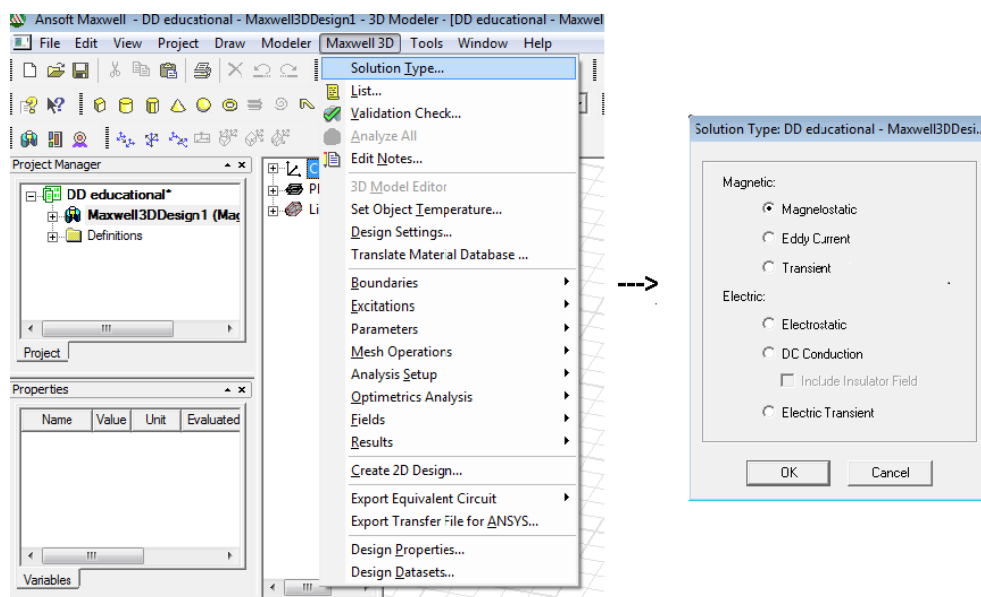
Σχήμα 2.2-3: Πλήρες περιβάλλον προγράμματος

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2-3, το πρόγραμμα είναι χωρισμένο σε επιμέρους περιοχές που το καθιστά εύκολο ως προς την χρήση:

- **MENU:** περιλαμβάνει όλες τις διαθέσιμες εντολές.
- **TOOLBAR:** περιέχει γραφικά σύμβολα, που χρησιμοποιούνται περισσότερο και μας δίνει την δυνατότητα να το εξατομικεύσουμε ανάλογα με τις ανάγκες μας.
- **PROJECT MANAGER WINDOW:** εδώ εμφανίζονται τα κύρια στάδια της σχεδίασης.
- **PROPERTIES WINDOW:** επιλέγοντας ένα στοιχείο, μας δίνει την δυνατότητα να δούμε και να αλλάξουμε τις ιδιότητές του.
- **HISTORY TREE:** εμφανίζει επιγραμματικά τα σχεδιασμένα κομμάτια.
- **MODELER WINDOW:** εμφανίζει γραφικά τα σχεδιασμένα κομμάτια.
- **MESSAGE WINDOW:** εμφανίζει μηνύματα, που αφορούν πληροφορίες, προειδοποιήσεις και σφάλματα, κατά την διαδικασία της επίλυσης.
- **PROGRESS WINDOW:** εμφανίζει την τρέχουσα πρόοδο, κατά την επίλυση του προβλήματος.
- **STATUS BAR:** περιέχει χρήσιμες πληροφορίες, για την καθοδήγηση του χρήστη στην διαδικασία του σχεδιασμού (τρέχουσα κατάσταση ή αναμενόμενη είσοδο από τον χρήστη).

Έχοντας εισάγει πλέον ένα πεδίο επίλυσης τρισδιάστατης γεωμετρίας, καλούμαστε να επιλέξουμε τον τύπο της λύσης, ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα, που θέλουμε να επιλύσουμε κάθε φορά. Για τον σχεδιασμό της συγκεκριμένης διάταξης, επιλέγουμε την μαγνητοστατική λύση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2-4:

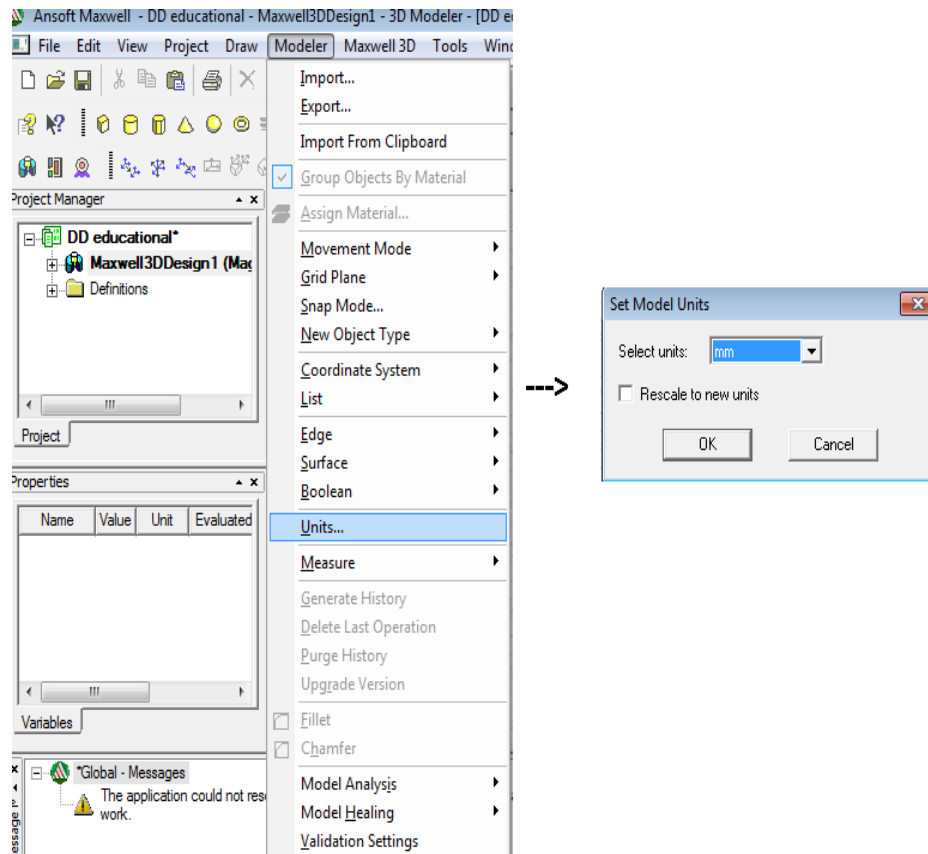
- Maxwell 3D>Solution Type>Magnetostatic



Σχήμα 2.2-4:Επιλογή τύπου λύσης

Στο πρόγραμμα συνήθως, κατά προεπιλογή, είναι επιλεγμένες για μονάδες μέτρησης τα mm. Παρόλα αυτά καλό είναι, να γίνεται κάθε φορά, κατά την αρχικοποίηση ένας έλεγχος, για την αποφυγή λάθους. Για να δούμε τις μονάδες μέτρησης, ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2-5:

- Modeler>Units>mm



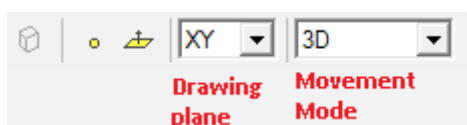
Σχήμα 2.2-5: Μονάδες μέτρησης

Τα κύρια στάδια τώρα, που πρέπει να ακολουθηθούν μετά την αρχικοποίηση του προγράμματος, για μία επιτυχή μελέτη μίας μαγνητοστατικής ανάλυσης, είναι τα ακόλουθα:

- Σχεδιασμός διάταξης
- Ορισμός υλικών
- Ορισμός οριακών συνθηκών
- Ορισμός ρευμάτων
- Παραμετροποίηση ανάλυσης
- Απεικόνιση αποτελεσμάτων

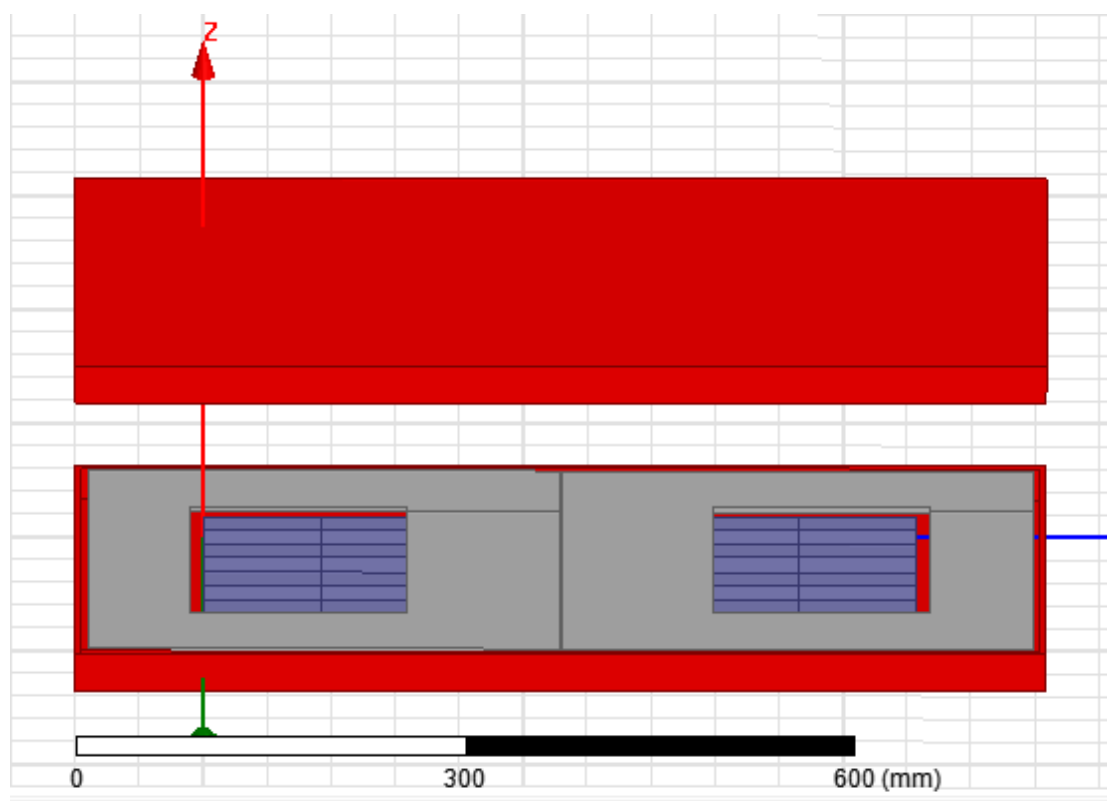
## 2.3 Σχεδιασμός διάταξης

Αρχικά σε αυτό το στάδιο, όπως και προηγουμένως με τις μονάδες μέτρησης, είναι καλό να σιγουρευτούμε, ότι στο Drawing plane, έχει επιλεγθεί το XY και στο Movement Mode το 3D Σχήμα 2.3-1, ώστε να συνεχίσουμε με το σχεδιασμό της διάταξης.



Σχήμα 2.3-1: Drawing plane και Movement Mode

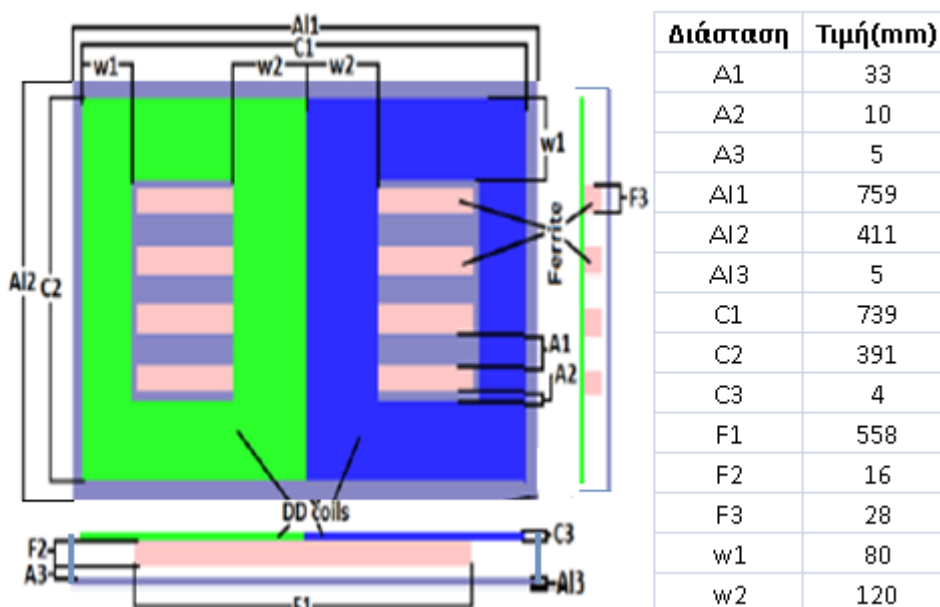
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η διάταξη, στην οποία θα εξηγήσουμε την λειτουργία του προγράμματος είναι η DD διάταξη Σχήμα 2.3-2.



Σχήμα 2.3-2: Διάταξη DD στο Maxwell

Για την μελέτη και τον σχεδιασμό της παραπάνω διάταξης, λήφθηκαν πληροφορίες από τις αναφορές [20][23]. Περαιτέρω ανάλυση, για την λήψη των μεγεθών (Σχήμα 2.3-3),

που χρειάστηκαν για τον σχεδιασμό και την μελέτη της διάταξης ακολουθεί και στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 2.3-3: Αναλυτικό σχήμα DD διάταξης [23]

Στην παρούσα διπλωματική, για την καλύτερη σύγκριση μεταξύ των διατάξεων διατηρήθηκαν σταθεροί οι όροι  $I_1=23A$ ,  $\omega=20KHz$  και  $Q_{max}=6$ . Άρα το μόνο στοιχείο που επηρέαζε την μελέτη μας, ήταν καθαρά η μαγνητική σχεδίαση που ακολουθήθηκε.

Από το Σχήμα 2.3-3 εξάγουμε, ότι η εξωτερική διάσταση του κάθε συζεύκτη μας, χωρίς την προστασία αλουμινίου είναι  $391*739mm$ . Αυτή είναι και η διάσταση των δυο πηνίων του εν σειρά, τόσο στο πρωτεύον, όσο και στο δευτερεύον. Το κάθε ένα πηνίο είναι  $391*369*4mm$  με ένα άνοιγμα στην μέση. Η διαφορά που παρατηρείται του  $1mm$  στο μήκος των δύο πηνίων πάρηκε για την επιτυχή προσομοίωση, καθώς τα δύο αγώγιμα υλικά δεν μπορούν να εφάπτονται στο πρόγραμμα, γιατί προκύπτει σύγκυση στην φορά των ρευμάτων τους. Για τον σχεδιασμό των πηνίων δεν προσομοιώθηκε η χρήση του καλωδίου Litz, γιατί αυτό θα καθιστούσε τις προσομοιώσεις εξαιρετικά χρονοβόρες. Αντίθετα, τα πηνία μοντελοποιήθηκαν από το τμήμα του αγωγού, που τα διαπερνά.

Στην συνέχεια, έχουμε τους φερρίτες, που αποτελούνται από ράβδους φερριτών διαστάσεως  $93*16*28mm$ . Ο σχηματισμός των φερριτών είναι  $4*6$  και το σύνολο των ράβδων από φερρίτη απέχει μεταξύ τους  $33mm$ , ενώ από το πηνίο απέχει  $10mm$  περιμετρικά. Επίσης, η εξωτερική προστασία αποτελείται από αλουμίνιο και σχεδιάστηκε να έχει πάχος  $5mm$  και να απέχει από τα πηνία (εξωτερικό κομμάτι διάταξης) επίσης  $5mm$ .

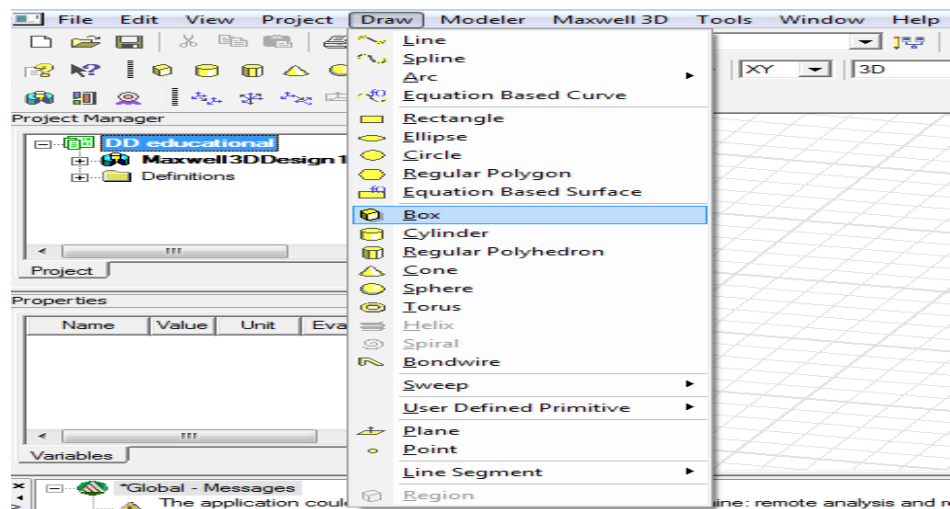
Στις αναφορές [20][23] ορίζεται ένα ρεύμα λειτουργίας ίσο με  $23A$  και για το πρωτεύον, αλλά και για το δευτερεύον. Τα ελλείγματα τους τώρα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που δίνονται στην αναφορά [20] είναι  $20$ , εκ των οποίων κάθε ένα είναι

4mm σε διάμετρο και έχει 800 μικρότερα καλώδια διαμέτρου 0,1mm, δίνοντας μια συνολική επιφάνεια διατομής των 6.36 mm<sup>2</sup> [20].

### 2.3.1 Φερρίτες πρωτεύοντος

Για τον σχεδιασμό αρχικά της γεωμετρίας των φερριτών ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία (η κάθε μπάρα φερρίτη θα σχεδιαστεί ξεχωριστά):

- Draw>box



Σχήμα 2.3-4: Draw box

- Εμφανίζεται στο Status Bar μία γραμμή με τις τρεις συντεταγμένες. Οι συγκεκριμένες είναι οι συντεταγμένες αναφοράς.



Σχήμα 2.3-5:Status Bar συντεταγμένων αναφοράς

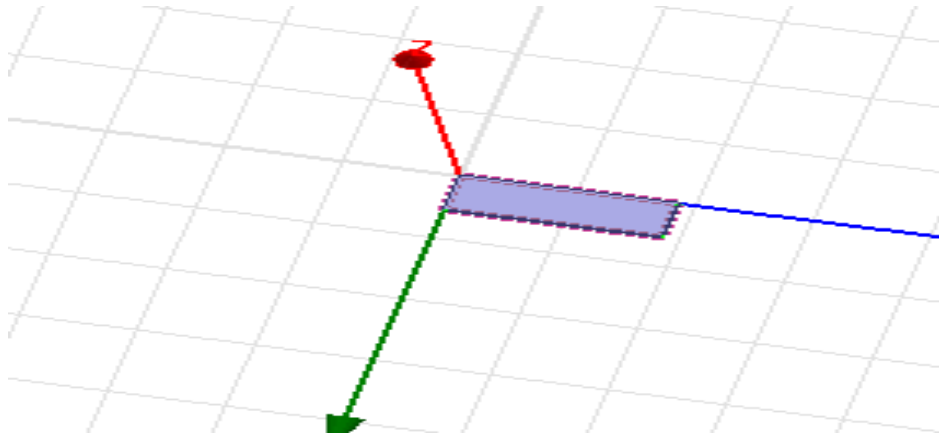
- Tab για ορισμό X>Tab για ορισμό Y>Tab για ορισμό Z
- Όταν τις ορίσουμε πατάμε Enter.
- Εμφανίζεται πάλι στο Status Bar μία γραμμή, με τις τρεις συντεταγμένες. Αυτές όμως είναι οι μετατοπίσεις τους dX, dY, dZ αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3-6:Status Bar συντεταγμένων μετατόπισης

- Tab για ορισμό dX>Tab για ορισμό dY>Tab για ορισμό dZ
- Όταν τις ορίσουμε πατάμε Enter.
- Με το προηγούμενο βήμα ολοκληρώνεται ο σχεδιασμός της γεωμετρίας της πρώτης ράβδου φερρίτη και μας εμφανίζεται γραφικά στο Modeler Window Σχήμα 2.3-7 .

Να αναφέρουμε, ότι στο Modeler Window, για την μετακίνηση των αξόνων και της γεωμετρίας επιλέγουμε το γαντάκι από το Tools Bar, ενώ για την αλλαγή της πλευράς θέασης πατάμε Alt κάνουμε κλικ και κουνάμε το ποντίκι μας.

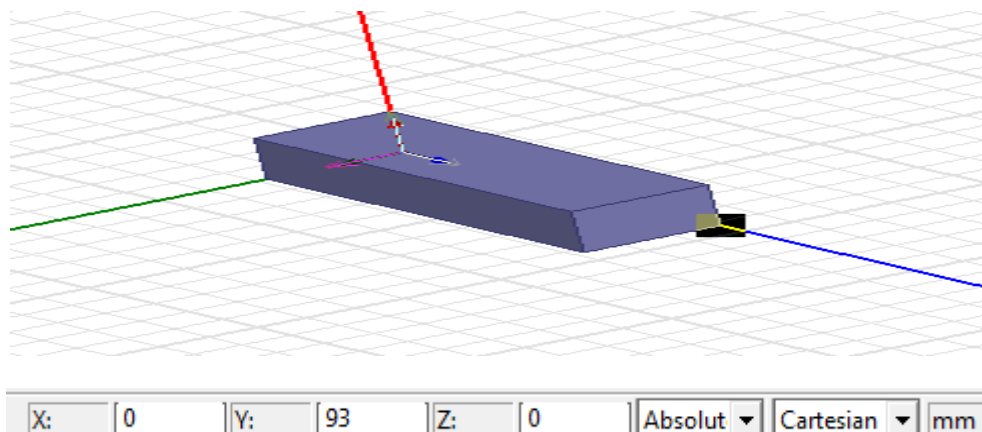


Σχήμα2.3-7: Modeler Window γραφική απεικόνιση μπάρας φερρίτη

Στην συνέχεια, όπως γίνεται αντιληπτό καλούμαστε, να σχεδιάσουμε 4\*6=32 στο σύνολο τέτοιες ράβδους έχοντας σχεδιάσει ήδη την πρώτη. Ο σχεδιασμός τους όμως, ακολουθεί την παραπάνω διαδικασία με μόνη διαφορά, ότι κάθε φορά αλλάζει το αρχικό σημείο αναφοράς.

Για την αλλαγή του σημείου αναφοράς υπάρχουν δύο τρόποι:

1. Ο πρώτος είναι γυρίζοντας κατάλληλα την γωνία θέασης, να κάνουμε κλικ το σημείο αναφοράς που επιθυμούμε.



Σχήμα 2.3-8: Επιλογή σημείου αναφοράς



2. Ο δεύτερος είναι , να ακολουθήσουμε την κλασική διαδικασία, έχοντας υπολογίσει το σημείο αναφοράς και να το περάσουμε από μόνοι μας στο πρόγραμμα.

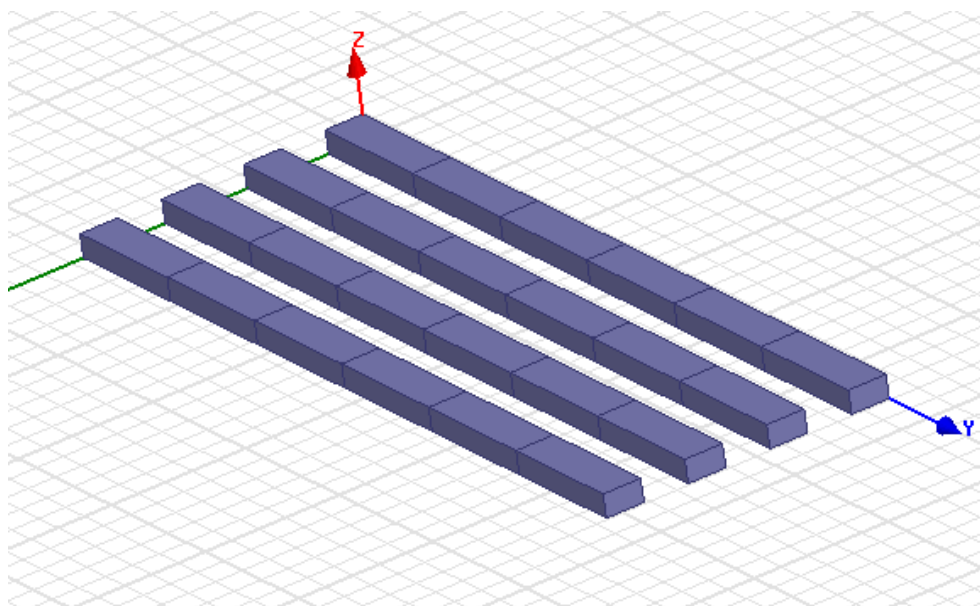
Και με τους δύο τρόπους, το αποτέλεσμα οφείλει να είναι το ίδιο. Βέβαια ο πρώτος τρόπος βολεύει, όταν έχουμε στην ίδια σειρά σχεδιάσει και άλλη ράβδο, ενώ ο δεύτερος βολεύει ,όταν θέλουμε να σχεδιάσουμε την πρώτη ράβδο, από την εκάστοτε σειρά ράβδων.

Ένα ακόμα σημείο, που πρέπει να υποπέσει στην προσοχή μας, είναι όταν πάμε να σχεδιάσουμε την πρώτη ράβδο της δεύτερης σειράς. Όπως είπαμε ακολουθώντας τον δεύτερο τρόπο, πρέπει να τηρήσουμε την απόσταση, που πρέπει να έχουν μεταξύ τους κάθε σειρά από ράβδους, που είναι στα 33mm. Άρα το σημείο αναφοράς, αυτή την στιγμή θα είναι το 28mm (πάχος 1<sup>ης</sup> σειράς ράβδων)+33mm (διάκενο σειρών)=61mm .



Σχήμα 2.3-9: Σημείο αναφοράς πρώτης ράβδου δεύτερης σειράς

Με το πέρας της συνολικής διαδικασίας, έχοντας δηλαδή σχεδιάσει και τις 33 ράβδους από φερρίτη στο Modeler Window θα έχουμε, την εξής γεωμετρική διάταξη:



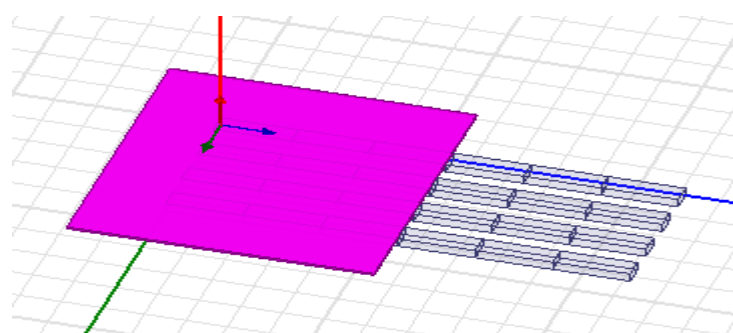
Σχήμα 2.3-10: Γεωμετρία φερριτών πρωτεύοντος

### 2.3.2 Τυλίγματα πρωτεύοντος

Ακολουθώντας τώρα παρόμοια διαδικασία με προηγουμένως, καλούμαστε να δημιουργήσουμε τα τυλίγματα του πρωτεύοντος. Το σημείο αναφοράς του εκάστοτε πηνίου, αυτή την φορά είναι υπολογισμένα, έτσι ώστε όταν τοποθετηθούν τα δύο πηνία, να είναι κεντραρισμένα με την διάταξη των φερριτών. Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, το κάθε κουτί θα είναι  $391*369*4\text{mm}$  με μία τρύπα  $231*169*4\text{mm}$ , έτσι ώστε στην εσωτερική πλευρά του κάθε πηνίου, να έχουμε μία επιφάνεια  $120\text{mm}$ , ενώ περιμετρικά μια  $80\text{mm}$ . Ο λόγος που στο μεσαίο τμήμα του πηνίου τα καλώδια καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο είναι βάσει μελέτης [20]. Ειδικότερα όταν τα καλώδια τοποθετούνται το ένα μετά το άλλο διατηρώντας ένα σταθερό βήμα τοποθέτησης μεταξύ τους, τότε το κενό που σχηματίζουν ανάμεσά τους ενισχύει την μαγνητική ροή από τον συζεύκτη. Περισσότερες και αναλυτικότερες πληροφορίες, για τις διαστάσεις περιέχονται στο Σχήμα 2.3-3.

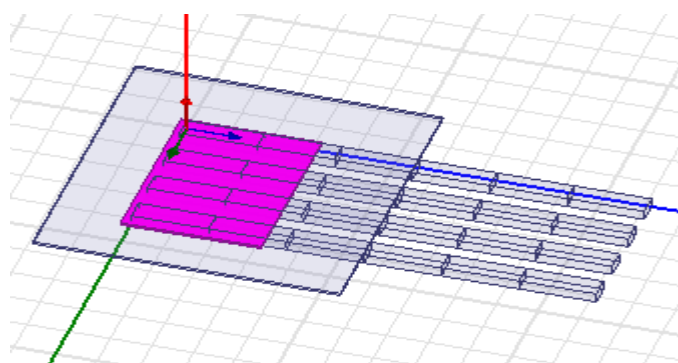
Για την υλοποίηση του σχεδιασμού ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

- Αρχικά σχεδιάζουμε ένα Box  $391*369*4\text{mm}$  με σημείο αναφοράς το  $-90/-90/16$ .



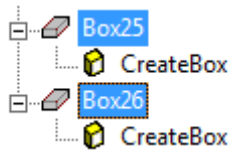
Σχήμα 2.3-11: Box 25

- Στη συνέχεια σχεδιάζουμε ένα δεύτερο Box  $231*169*4\text{mm}$  με σημείο αναφοράς το  $-10/-10/16$ .



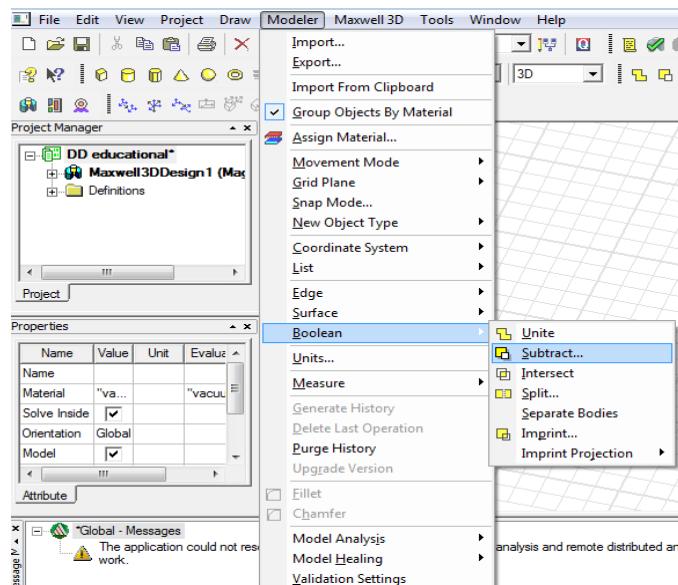
Σχήμα 2.3-12: Box 26

- Για την δημιουργία τώρα της τρύπας και έχοντας σχεδιάσει τα δύο παραπάνω γεωμετρικά σχήματα, πρέπει να αφαιρέσουμε το Box26 από το Box25. Για την υλοποίησή του, υπάρχει μία ειδική εντολή στο πρόγραμμα που ονομάζεται Subtract. Άρα :
  - Στο History Tree επιλέγουμε το Box25 πατάμε και κρατάμε το Ctrl και επιλέγουμε και το Box26.



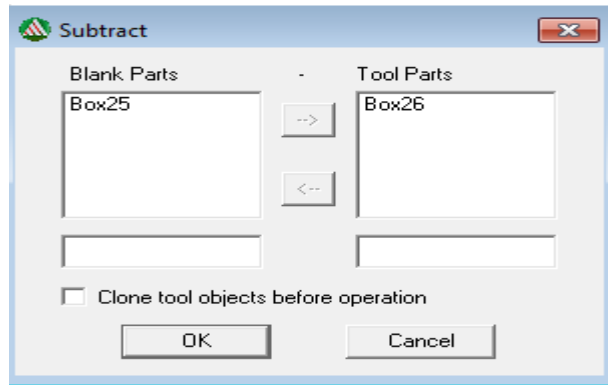
Σχήμα 2.3-13: Επιλογή από το History Tree

- Στη συνέχεια Modeler>Boolean>Subtract



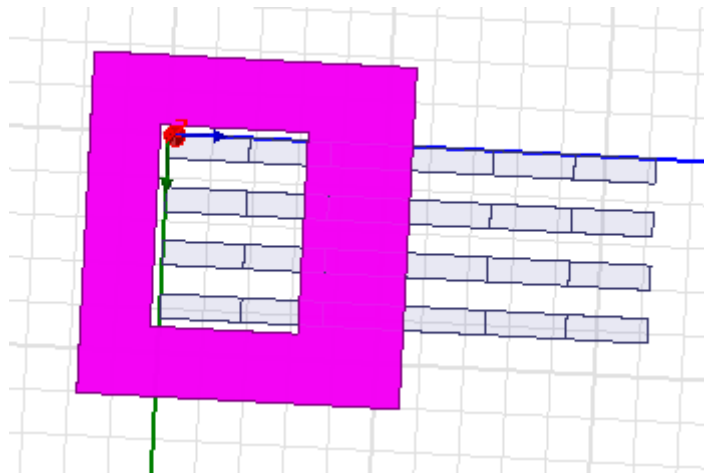
Σχήμα 2.3-14: Άνοιγμα της τρύπας

Οπότε μας εμφανίζεται το παράθυρο που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3-15.



Σχήμα 2.3-15: Παράθυρο εντολής Subtract

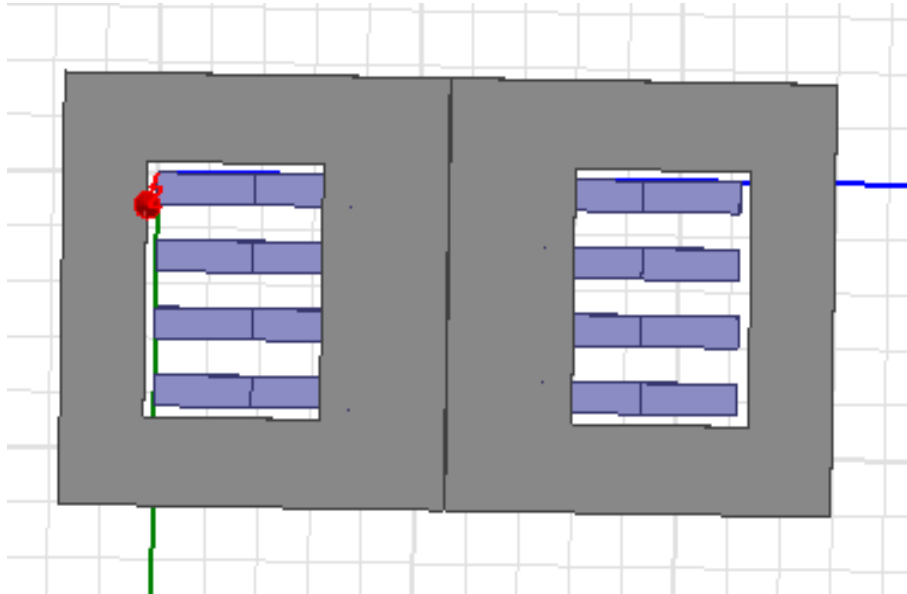
Όπου στο Tool Parts επιλέγουμε το Box26, που θέλουμε να αφαιρέσουμε από το Box25 και πατάμε το OK. Έτσι παίρνουμε το ζητούμενο αποτέλεσμα του Σχήματος 2.3-16.



Σχήμα 2.3-16: Τελικό αποτέλεσμα αριστερού τυλίγματος

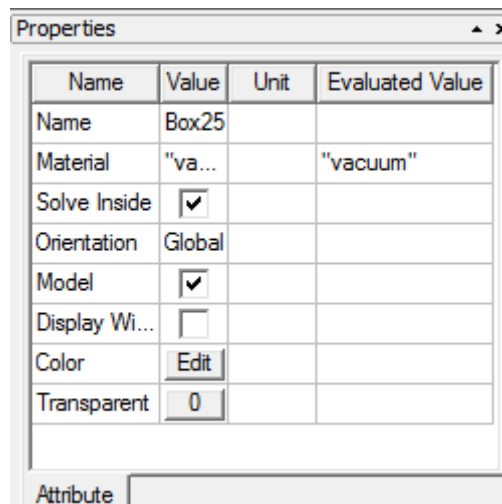
Παρόλα αυτά, για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού του τυλίγματος του πρωτεύοντος, πρέπει να δημιουργήσουμε και το δεξιό τύλιγμα. Η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί είναι ακριβώς η ίδια. Το μόνο που αλλάζει κατά τον σχεδιασμό, είναι τα σημεία αναφοράς των δύο νέων κουτιών που θα δημιουργηθούν.

Το πρώτο κουτί θα έχει ως σημείο αναφοράς το  $-90/280/16\text{mm}$ , ενώ το δεύτερο θα έχει το  $-10/400/16\text{mm}$ . Οι διαστάσεις τους παραμένουν σταθερές και είναι αντίστοιχα  $391*369*4\text{mm}$  και  $231*169*4\text{mm}$ . Δημιουργώντας τα Box27 και Box28, ακολουθούμε την διαδικασία του Subtract και καταλήγουμε στο τελικό Σχήμα 2.3-17 .



Σχήμα 2.3-17: Τελικό σχέδιο τυλίγματος πρωτεύοντος

Μετά το σχεδιασμό οποιασδήποτε διάταξης, μας δίνεται η δυνατότητα να την μορφοποιήσουμε με διάφορους τρόπους. Αυτό καθίσταται πολύ απλό, καθώς επιλέγοντας ένα στοιχείο ή ταυτόχρονα και περισσότερα στο Properties Window (Σχήμα 2.3-18) εμφανίζονται οι ιδιότητές του, όπου και μπορούμε να αλλάξουμε το όνομά του, το χρώμα του, την διαφάνειά του, καθώς και το υλικό του, που θα δούμε στην συνέχεια.

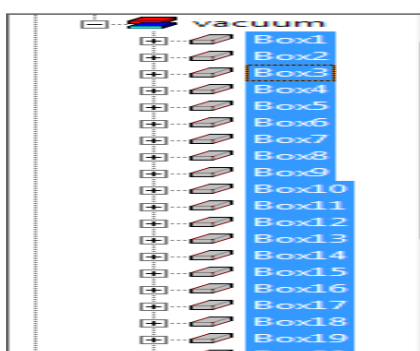


Σχήμα 2.3-18: Properties Window

### 2.3.3 Φερρίτες δευτερεύοντος

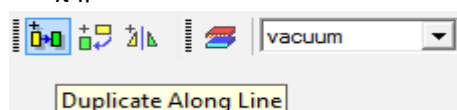
Σε αυτό το σημείο, για τον σχεδιασμό των φερριτών στο δευτερεύον, έχουμε την δυνατότητα να κινηθούμε με δύο εναλλακτικούς τρόπους, που μπορούν να μας δώσουν το ίδιο αποτέλεσμα. Οι δύο τρόποι είναι οι ακόλουθοι:

- Ο πρώτος τρόπος είναι να ακολουθήσουμε την αντίστοιχη διαδικασία, που ακολουθήσαμε στον σχεδιασμό της διάταξης του πρωτεύοντος. Σε αυτή την περίπτωση το μόνο που θα αλλάξει κατά την σχεδίαση, είναι τα σημεία αναφοράς και ειδικότερα θα έχουμε μεταβολή των σημείων μόνο ως προς τον άξονα Z. Για παράδειγμα, το πρώτο σημείο αναφοράς, που επιλέχθηκε προηγουμένως, ήταν η αρχή των αξόνων (0/0/0). Τώρα όμως, όλοι οι φερρίτες θα είναι σε μία απόσταση 224mm, που προκύπτει από το ύψος των φερριτών πρωτεύοντος, του τυλίγματος πρωτεύοντος, του διακένου και του τυλίγματος δευτερεύοντος. Άρα σαν άθροισμα αντίστοιχα είναι  $16+4+200+4=224\text{mm}$ , όπως προαναφέρθηκε. Οπότε ακολουθεί σχεδιασμός κάθε ράβδου φερρίτη ( $28*93*16\text{mm}$ ) ξεχωριστά, όπως πριν στο ύψος στον Z 224mm.
- Ο δεύτερος τρόπος αποτελεί μία πιο γρήγορη εναλλακτική λύση και βασίζεται στο γεγονός, ότι μόνη διαφορά στο σύνολο των φερριτών, που θέλουμε να σχεδιάσουμε, είναι μία μεταβολή στον Z. Το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα να αντιγράψουμε ένα σύνολο γεωμετριών και να το μεταφέρουμε, σε όποιο σημείο επιθυμούμε μεταβάλλοντας το και κατά dX και dY αλλά και κατά dZ. Τα βήματα που πρέπει να γίνουν είναι τα ακόλουθα:
  - Αρχικά στο History Tree επιλέγουμε τις γεωμετρίες, για αντιγραφή δηλαδή τους 24(4\*6) φερρίτες του πρωτεύοντος Σχήμα 2.3-19 .



Σχήμα 2.3-19:Επιλογή εικοσιτεσσάρων γεωμετριών

- Στην συνέχεια, επιλέγουμε από το Tools Bar την εντολή Duplicate Along Line Σχήμα 2.3-20.



Σχήμα2.3-20: Εντολή Duplicate Along Line

- Θέτουμε ένα σημείο αναφοράς (για ευκολία το 0/0/0).

X:	0	Y:	0	Z:	0	Absolut	Cartesian	mm
----	---	----	---	----	---	---------	-----------	----

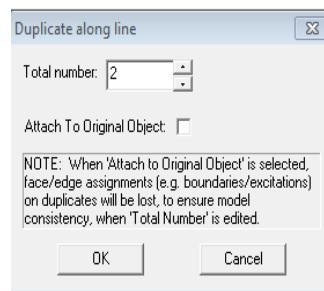
Σχήμα 2.3-21: Σημείο αναφοράς

- Ακολουθως, εφαρμόζουμε την μετατόπιση που θέλουμε ως προς Z.

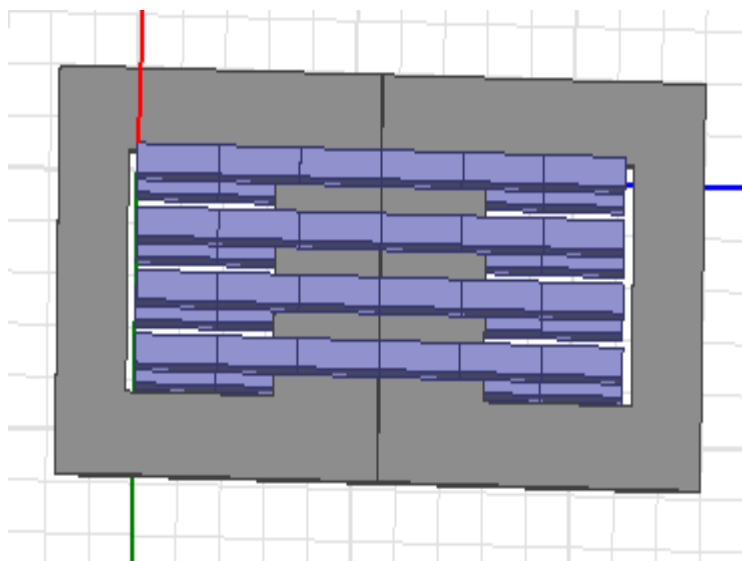
dX:	0	dY:	0	dZ:	224	Relative	Cartesian	mm
-----	---	-----	---	-----	-----	----------	-----------	----

Σχήμα 2.3-22: Μετατόπιση στον Z κατά 44mm

- Και τέλος επιλέγοντας στο παράθυρο που αναδύεται Σχήμα 2.3-23, ότι επιθυμούμε δύο αντιγράφα, καθώς το ήδη υπάρχον θέλουμε, να το διατηρήσουμε προκύπτει ο σχεδιασμός των φερριτών δευτερεύοντος στο Σχήμα 2.3-24.



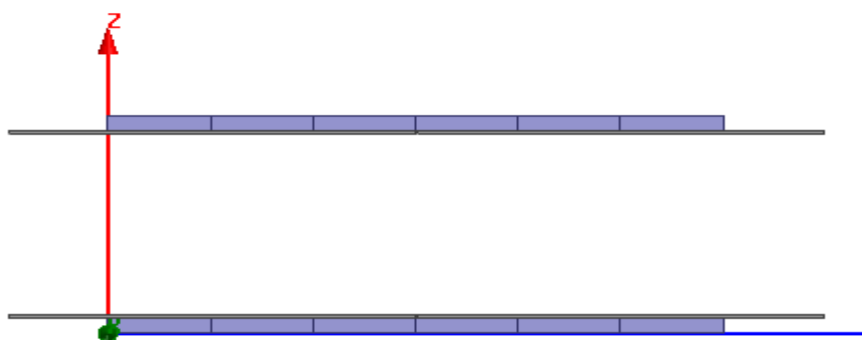
Σχήμα 2.3-23: Επιλογή αντιγράφων



Σχήμα 2.3-24: Τελικός σχηματισμός φερριτών δευτερεύοντος

### 2.3.4 Τυλίγματα δευτερεύοντος

Τα τυλίγματα του δευτερεύοντος τώρα, μπορούν επίσης να σχεδιαστούν με δύο τρόπους, είτε ακολουθώντας την διαδικασία, που ακολουθήσαμε στα τυλίγματα του πρωτεύοντος, είτε με την εντολή Duplicate Along Line, όπως εξηγήθηκε πρωτύτερα. Στην πρώτη περίπτωση, θα αλλάξει μόνο το σημείο αναφοράς, ως προς τον Z κατά 204mm(4mm πάχος τυλιγμάτων πρωτεύοντος + 200mm το διάκενο), ενώ στην δεύτερη περίπτωση η αντιγραφή θα γίνει με  $dZ=204\text{mm}$ . Και στις δύο διαδικασίες το τελικό σχέδιο, που θα προκύψει, εμφανίζεται στο Σχήμα 2.3-25.



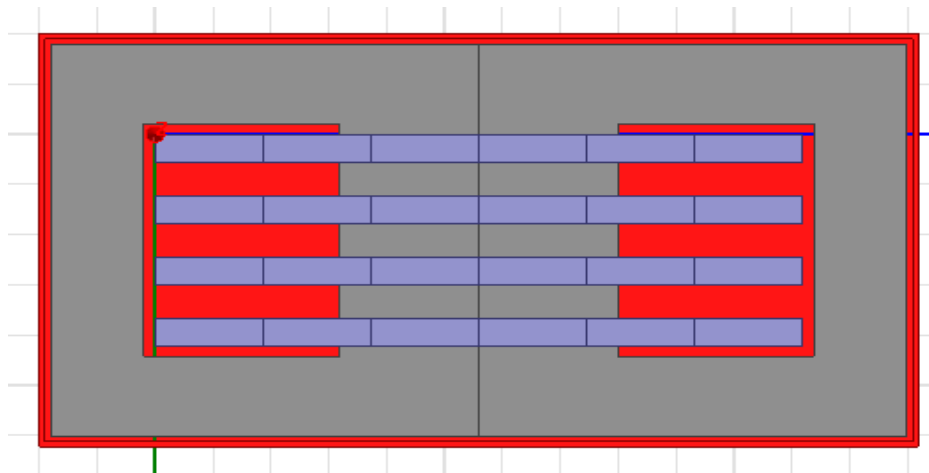
Σχήμα 2.3-25: Γεωμετρία με το πέρας του σχεδιασμού τυλιγμάτων και φερριτών

### 2.3.5 Θωράκιση αλουμινίου

Μετά το πέρας του σχεδιασμού της γεωμετρίας των τυλιγμάτων και των φερριτών, σειρά έχει ο σχεδιασμός μίας θωράκισης αλουμινίου, σε κάθε  $\text{rad}$ , με σκοπό την μείωση των απωλειών και τη σωστή κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Όπως αναφέρθηκε, το πάχος της θωράκισης είναι 5mm, ενώ απέχει επίσης 5mm, από όλα τα σημεία της γεωμετρίας του Σχήματος 2.3-25, που έχει εξωτερικές διαστάσεις  $391*739*20\text{mm}$ . Άρα, για τον σχεδιασμό της θωράκισης θα ακολουθήσουμε την διαδικασία με τον σχεδιασμό δύο κουτιών και στην συνέχεια θα εφαρμόσουμε την εντολή Subtract, έτσι ώστε να μας μείνει η ζητούμενη θωράκιση. Τα βήματα είναι τα εξής:

- Αρχικά σχεδιάζουμε ένα κουτί με θέση αναφοράς το  $-100/-100/-10$  και διαστάσεις  $411*759*30\text{mm}$ .
- Έπειτα σχεδιάζουμε ένα δεύτερο κουτί, με θέση αναφοράς το  $-95/-95/-5$  και διαστάσεις  $401*749*25\text{mm}$ .
- Ακολουθεί η εντολή Subtract, που αφαιρούμε από το πρώτο το δεύτερο και προκύπτει η πρώτη θωράκιση αλουμινίου (Σχήμα 2.3-26).

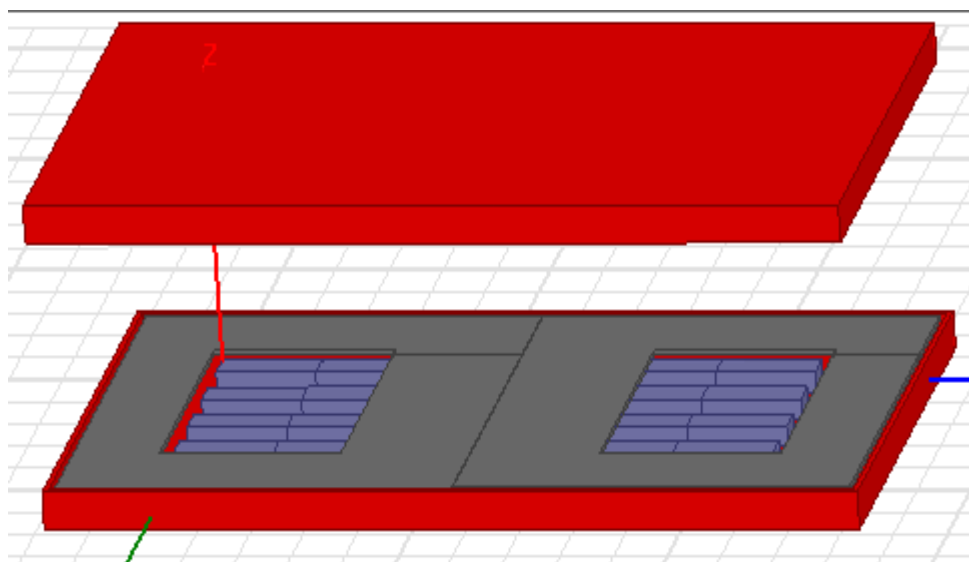




Σχήμα 2.3-26: Ασπίδα αλουμινίου πρωτεύοντος

- Στην συνέχεια σχεδιάζουμε ένα κουτί, με θέση αναφοράς το  $-100/-100/220$  και διαστάσεις  $411*759*30\text{mm}$ .
- Έπειτα σχεδιάζουμε ένα δεύτερο κουτί, με θέση αναφοράς το  $-95/-95/220$  και διαστάσεις  $401*749*25\text{mm}$ .
- Ακολουθεί η εντολή Subtract, που αφαιρούμε από το πρώτο το δεύτερο και προκύπτει και η δεύτερη θωράκιση.

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, έχουμε το Σχήμα 2.3-27, όπου έχουμε σχεδιάσει όλες τις απαιτούμενες γεωμετρίες και μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε.

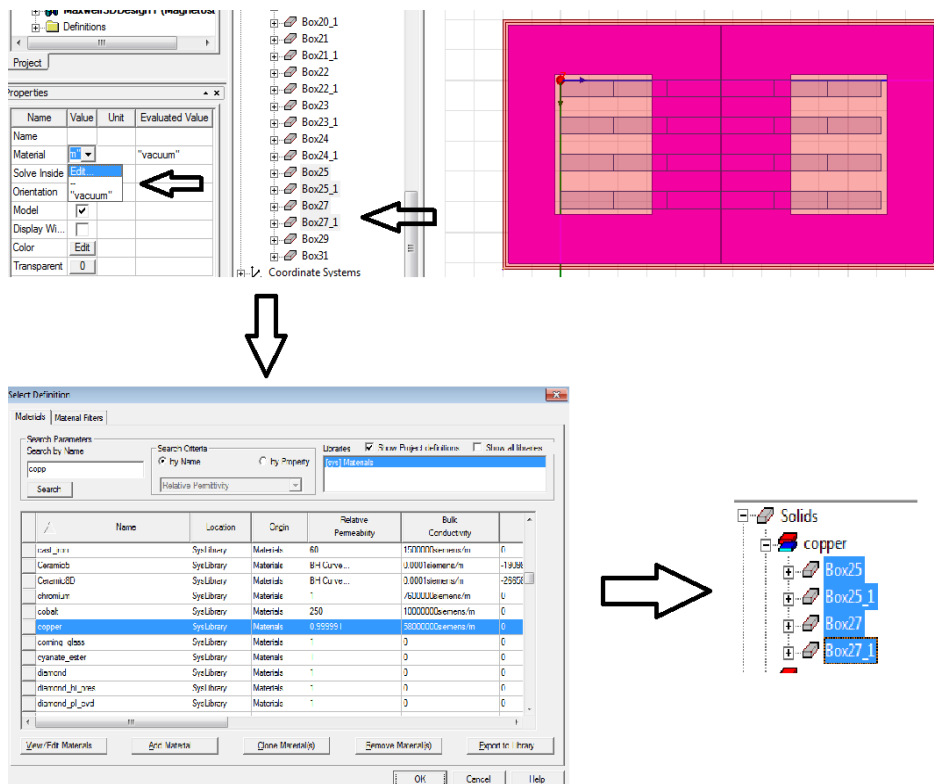


Σχήμα 2.3-27: Τελική γεωμετρία διάταξης

## 2.4 Ορισμός υλικών

Για τον ορισμό των υλικών, θα πρέπει να επιλέγουμε κάθε φορά τις γεωμετρίες, που θέλουμε να ορίσουμε κατά ομάδες:

- Επιλέγουμε αρχικά στο History Tree τις τέσσερις γεωμετρίες, που αντιστοιχούν στα πηνία μας (δεν μας επηρεάζει αν επιλέξουμε ταυτόχρονα και του πρωτεύοντος, αλλά και του δευτερεύοντος) και στην συνέχεια, από το Properties Window Σχήμα 2.4-1, διαλέγουμε το edit στο material και επιλέγουμε το Corpper με αγωγιμότητα  $5,8 \cdot 10^7 \text{ S/m}$  [4].



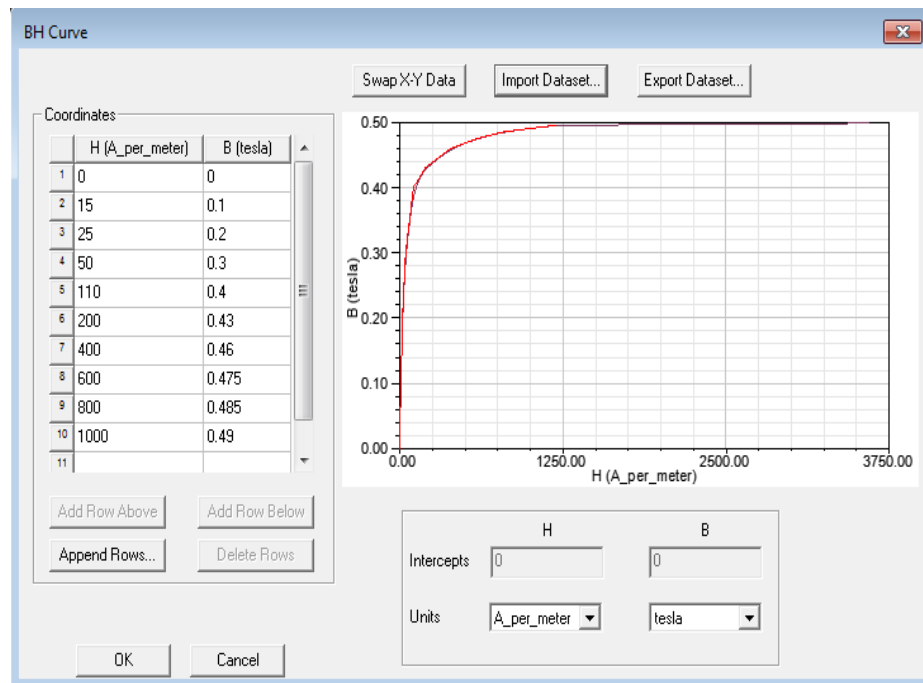
Σχήμα 2.4-1: Ακολουθία βημάτων ορισμού υλικού τυλιγμάτων

- Παρόμοια διαδικασία ακολουθούμε για τον ορισμό του αλουμινίου. Η μόνη διαφορά έγκειται στην κατάλληλη επιλογή υλικού.

Name	Location	Origin	Relative Permeability	Bulk Conductivity	
air	SysLibrary	Materials	1.00000004	0	0
Al2_O3_ceramic	SysLibrary	Materials	1	0	0
Al_N	SysLibrary	Materials	1	0	0
Alnico5	SysLibrary	Materials	BH Curve...	2128000siemens/m	-64000
Alnico9	SysLibrary	Materials	BH Curve...	2000000siemens/m	-11936
alumina_92pct	SysLibrary	Materials	1	0	0
alumina_96pct	SysLibrary	Materials	1	0	0
aluminum	SysLibrary	Materials	1.000021	38000000siemens/m	0
aluminum_EC	SysLibrary	Materials	1.000021	36000000siemens/m	0
aluminum_no2_EC	SysLibrary	Materials	1.000021	33000000siemens/m	0
Arlon 25FR (tm)	SysLibrary	Materials	1	0	0

Σχήμα 2.4-2: Επιλογή αλουμινίου

- Τέλος οι γεωμετρίες, που απέμειναν, είναι οι ράβδοι φερριτών. Για τον ορισμό του υλικού αυτή την φορά, δεν επιλέγουμε ένα από την λίστα. Βάσει της αναφοράς [23], οι ράβδοι φερρίτη, που κατασκευάσαμε αποτελούνται από το υλικό N87 που είναι εμπορικά διαθέσιμο από την EPCOS-TDK. Οι συγκεκριμένοι φερρίτες είναι μη γραμμικοί και ακολουθούν τη μη γραμμική καμπύλη BH-Curve, του Σχήματος 2.4-3. Έτσι, θα πρέπει να εισάγουμε τις τιμές της καμπύλης στο υλικό. Για να γίνει αυτό, επιλέγουμε από τη λίστα υλικών το «Ferrite» και πατάμε «View/Edit Materials». Στο νέο παράθυρο επιλέγουμε το «Relative Permeability», στο «Type» βάζουμε «Non Linear» και πατάμε το «BH Curve» στην διπλανή στήλη (Σχήμα 2.4-4). Στον πίνακα που εμφανίζεται, πρέπει να περάσουμε τις τιμές της καμπύλης, ώστε να σχεδιαστεί. Για την ολοκλήρωση του ορισμού κλείνουμε όλα τα παράθυρα πατώντας OK.



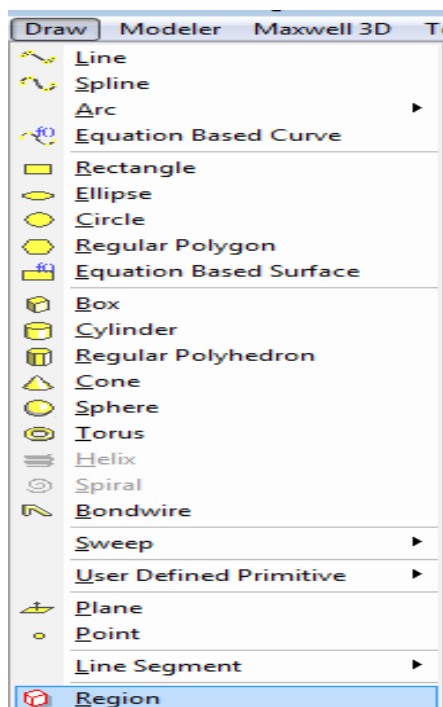
Σχήμα 2.4-3: BH-Curve φερρίτη N87



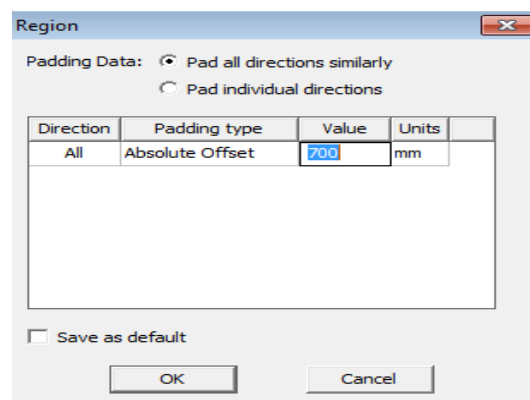
Σχήμα 2.4-4: Ακολουθία βημάτων ορισμού τύπου φερρίτη

## 2.5 Ορισμός οριακών συνθηκών

Καθώς, έχουμε ορίσει πλέον και τα υλικά στις γεωμετρίες μας, το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα σχεδιασμού μιας περιοχής (Region), μέσα στην οποία υπάρχει η διάταξη προς μελέτη. Εξ' ορισμού η μαγνητική ροή ορίζεται παράλληλα στις επιφάνειες της Region, επομένως δεν χρειάζονται να οριστούν άλλες οριακές συνθήκες. Για την μείωση του χρόνου προσομοίωσης, η περιοχή αυτή σχεδιάστηκε να απέχει κατά απόλυτη τιμή 700mm, από κάθε σημείο της εσωτερικής γεωμετρίας. Για τον σχεδιασμό της, επιλέγουμε Draw και στην συνέχεια Region. Έτσι εμφανίζεται ένα παράθυρο (Σχήμα 2.5-1), στο οποίο επιλέγουμε «Pad all directions similarly» και στην συνέχεια με «absolute offset» βάζουμε τα 700mm που επιθυμούμε.



Σχήμα 2.5-2: Σχεδιασμός Region



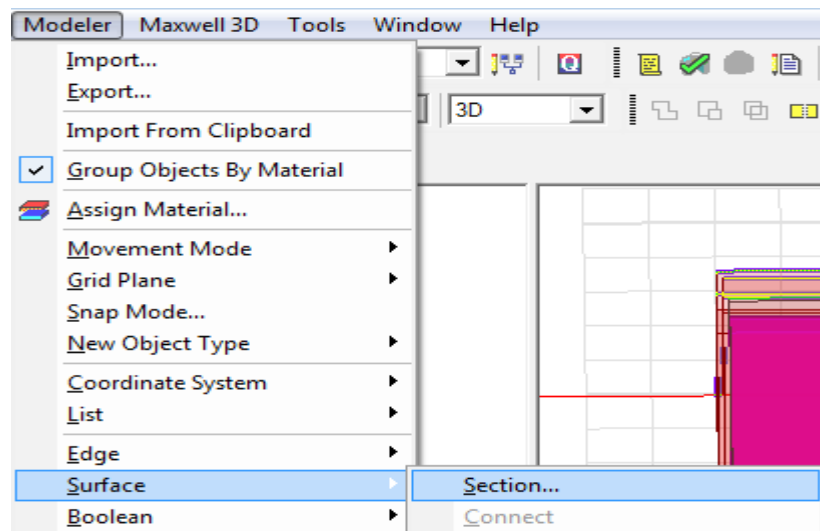
Σχήμα 2.5-1: Ορισμός διαστάσεων Region

Μετά τον σχεδιασμό του Region, πρέπει να ορίσουμε κατάλληλα και το υλικό του. Το υλικό του, δεν είναι τίποτα άλλο από τον κοινό αέρα. Άρα ακολουθούμε την διαδικασία Material>Edit>Air.

## 2.6 Ορισμός ρευμάτων

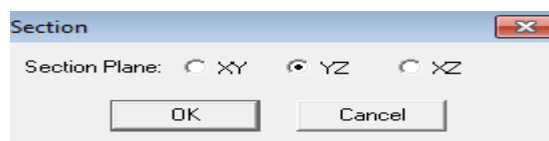
Στην συνέχεια, καλούμαστε να ορίσουμε τα ρεύματα στα πηνία, τόσο του πρωτεύοντος, όσο και του δευτερεύοντος με κατάλληλη φορά. Για να ορίσουμε το ρεύμα σε έναν αγωγό στο Maxwell, αρκεί να ορίσουμε μία επιφάνεια ως διατομή του αγωγού, μέσα στην οποία ορίζεται το διερχόμενο το ρεύμα. Η διαδικασία, που πρέπει να πράξουμε είναι η ακόλουθη:

- Επιλέγοντας το αριστερό πηνίο του πρωτεύοντος πατάμε Modeler>Surface>Section.



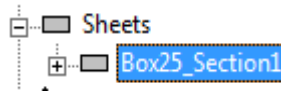
Σχήμα 2.6-1: Δημιουργία ενός Section

- Στο παράθυρο που αναδύεται, επιλέγουμε για Section Plane το YZ και πατάμε OK.

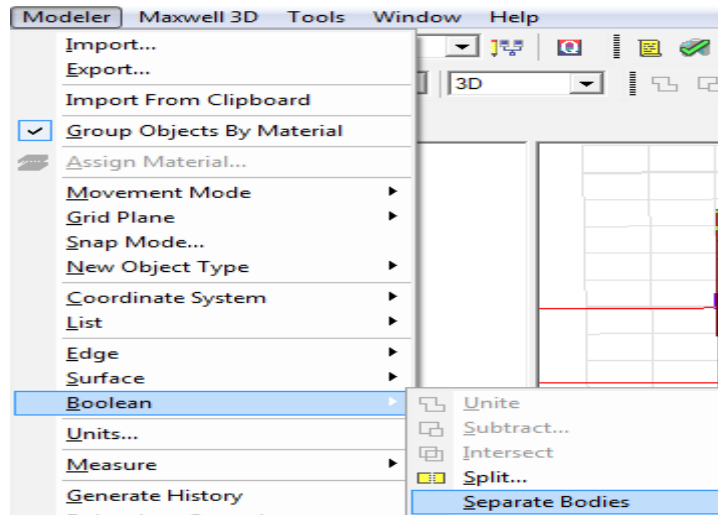


Σχήμα 2.6-2: Επιλογή Section Plane

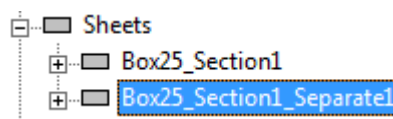
- Στην συνέχεια έχοντας επιλεχθεί, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6-3, το Section πατάμε Modeler>Boolean>Separate Bodies (Σχήμα 2.6-4) και μας εμφανίζει δύο Sections, που διαγράφουμε το ένα από τα δύο με delete, αφού το επιλέξουμε Σχήμα 2.6-5.



Σχήμα 2.6-3: Επιλογή Section

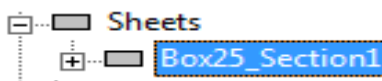


Σχήμα 2.6-4: Εντολή Separate Bodies

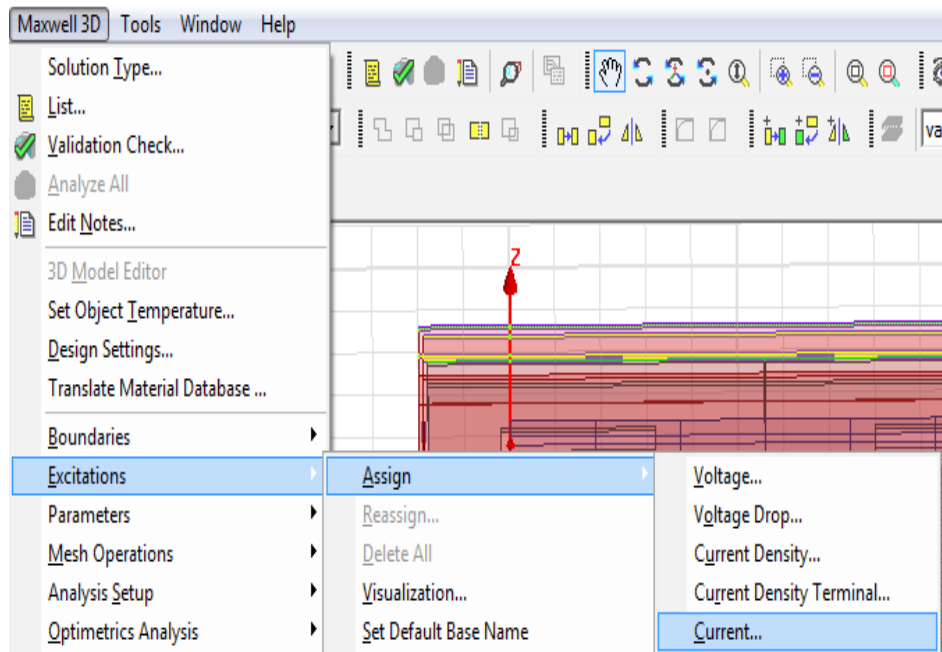


Σχήμα 2.6-5: Επιλογή ενός Section για διαγραφή

- ο Επιλέγουμε το Section, που αφήσαμε τώρα και πατάμε Maxwell 3D>Excitations>Assign>Current Σχήμα 2.6-7.

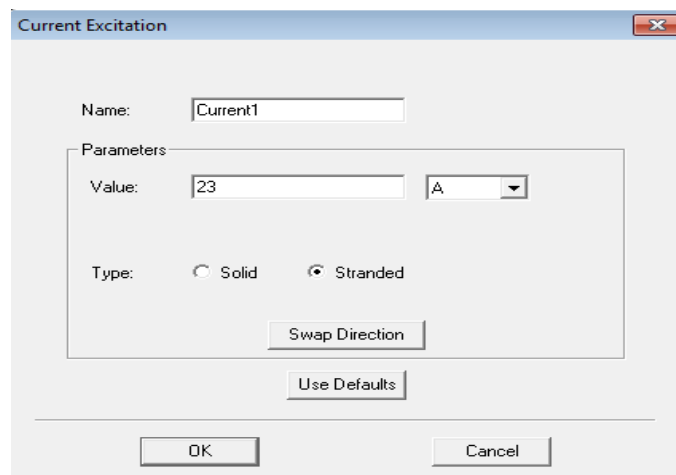


Σχήμα 2.6-6: Επιλογή εναπομένοντα Section



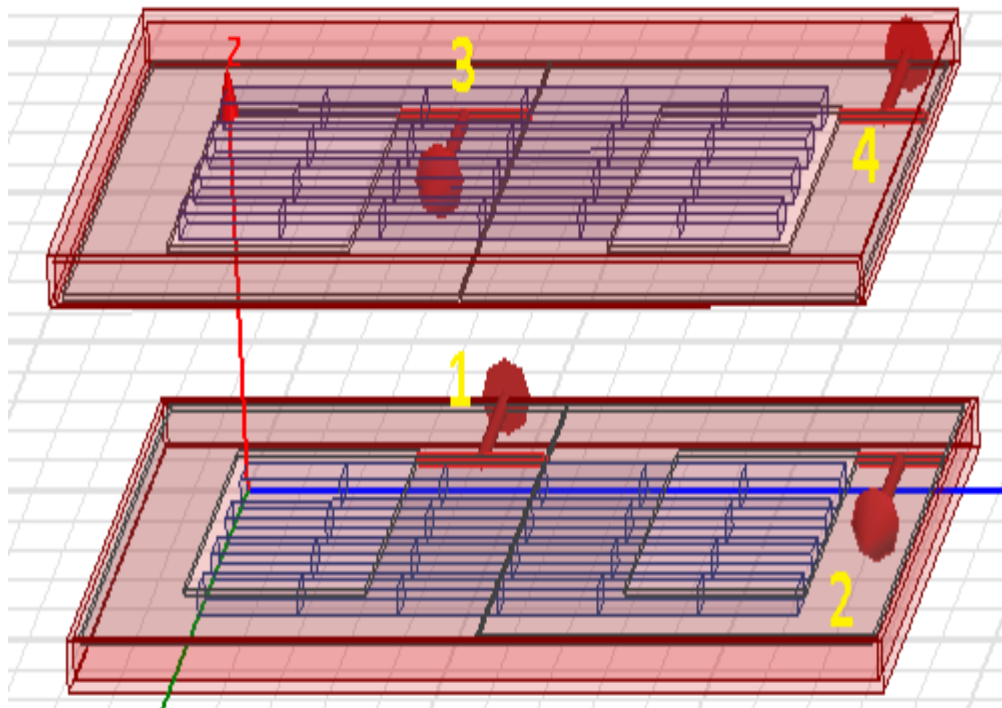
Σχήμα 2.6-7:Ορισμός ρεύματος

- Στο παράθυρο, που αναδύεται Σχήμα 2.6-8 συμπληρώνουμε 23A και επιλέγουμε Stranded. Έχουμε την δυνατότητα με το κουμπί Swap Direction, να αλλάξουμε την φορά του ρεύματος, αλλά και να μετονομάσουμε το ρεύμα.

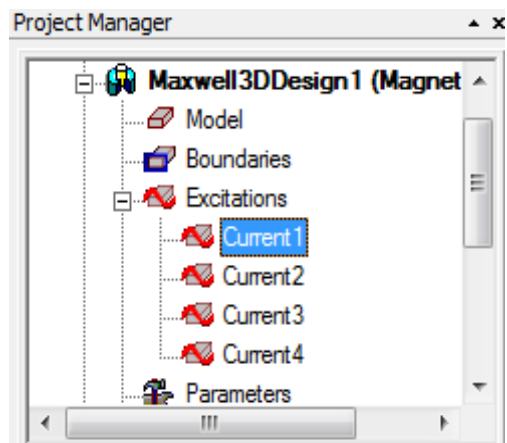


Σχήμα 2.6-8:Παραμετροποίηση ρεύματος

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία και για τα άλλα τρία πηνία, ολοκληρώνουμε τον ορισμό των ρευμάτων. Στο μόνο που πρέπει να δοθεί προσοχή, είναι η φορά των ρευμάτων, έτσι ώστε ανάμεσα στα δύο pads, η φορά της μαγνητικής ροής να έχει την ίδια κατεύθυνση. Η φορά των ρευμάτων απεικονίζεται και στο ακόλουθο Σχήμα 2.6-9 και για να την δούμε, επιλέγουμε στο Project Manager Windows τα Excitations (Σχήμα 2.6-10).



Σχήμα 2.6-9: Φορά ρευμάτων



Σχήμα 2.6-10: Επιλογή απεικόνισης ρεύματος

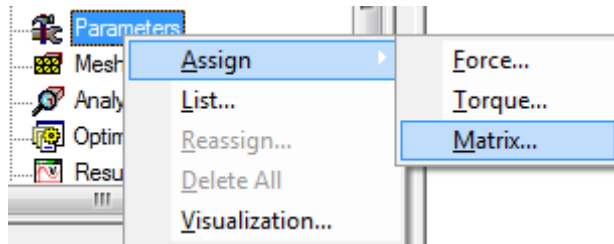


## 2.7 Παραμετροποίηση ανάλυσης

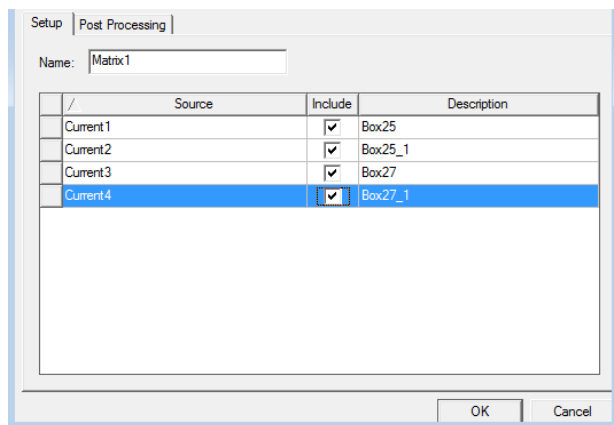
Το σύνολο της διαδικασίας και η μελέτη, που προσπαθούμε να εφαρμόσουμε έχοντας σαν εργαλείο το συγκεκριμένο πρόγραμμα, έχει ως απώτερο σκοπό τον υπολογισμό της ισχύος, που επιτυγχάνει κάθε διάταξη, καθώς και παραλλαγές της. Για τον υπολογισμό της ισχύος, οι τιμές των μεγεθών που μας είναι απαραίτητες είναι η αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων, τόσο του πρωτεύοντος (L1), όσο και του δευτερεύοντος (L2), καθώς και η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των δύο τυλιγμάτων (M).

Το πρόγραμμα λοιπόν, μας δίνει την δυνατότητα να υπολογίσουμε αυτά τα μεγέθη με την χρήση ενός πίνακα Matrix (δεξί κλικ στο Parameters του History Tree -Σχήμα 2.7-1), στον οποίο αφού πρώτα επιλέξουμε όλα τα ενδιαφερόμενα μεγέθη (Σχήμα 2.7-2), στην συνέχεια, πρέπει να ομαδοποιήσουμε τα τυλίγματα στο πρωτεύον σε ένα γκρουπ και τα τυλίγματα του δευτερεύοντος σε ένα δεύτερο. Παράλληλα με την ομαδοποίησή τους καλούμαστε να επιλέξουμε και τον αριθμό των τυλιγμάτων, που επιθυμούμε στο καθένα τους (Σχήμα 2.7-3).

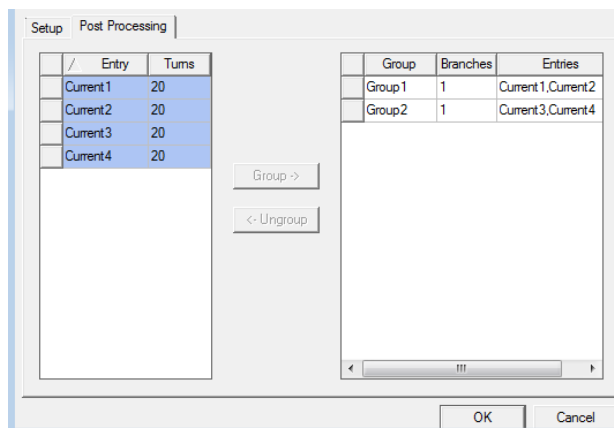
Εν συνεχεία, πρέπει να ορίσουμε τις παραμέτρους της ανάλυσης. Για να γίνει αυτό, επιλέγουμε από το History Tree Analysis>Add Solution Setup (Σχήμα 2.7-4). Έχουμε την δυνατότητα να αφήσουμε τις προεπιλογές ως έχουν, αλλά αυτό που πρέπει να αλλάξουμε σίγουρα, είναι το Maximum Number of Passes από 10



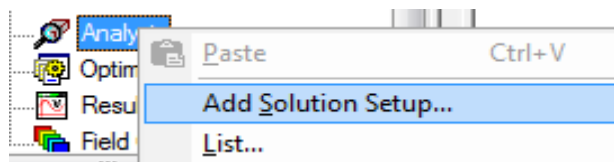
Σχήμα 2.7-1: Δημιουργία πίνακα



Σχήμα 2.7-2: Επιλογή στοιχείων

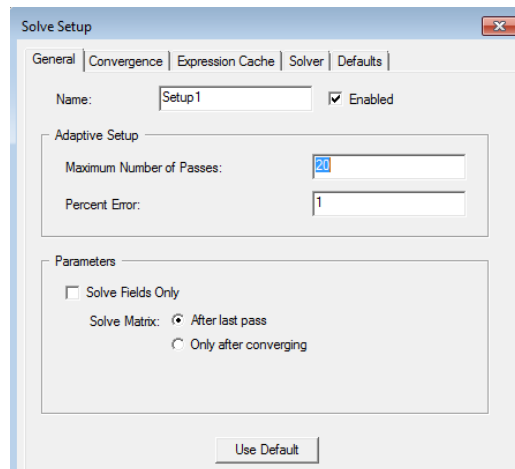


Σχήμα 2.7-3: Ομαδοποίηση και ορισμός αριθμού τυλιγμάτων



Σχήμα 2.7-4: Ορισμός τύπου λύσεως

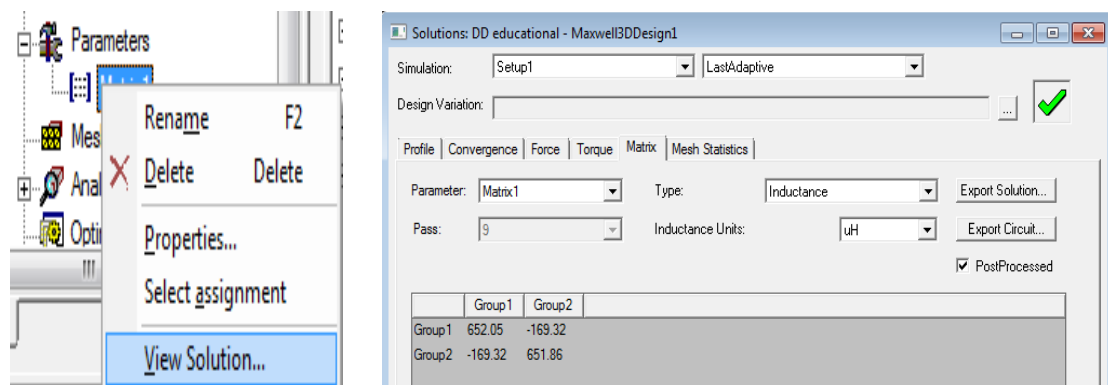
σε 20, ώστε να δώσουμε στο πρόγραμμα την δυνατότητα για καλύτερη ακρίβεια Σχήμα2.7-5α.



Σχήμα2.7-5: Ορισμός Maximum Number of Passes

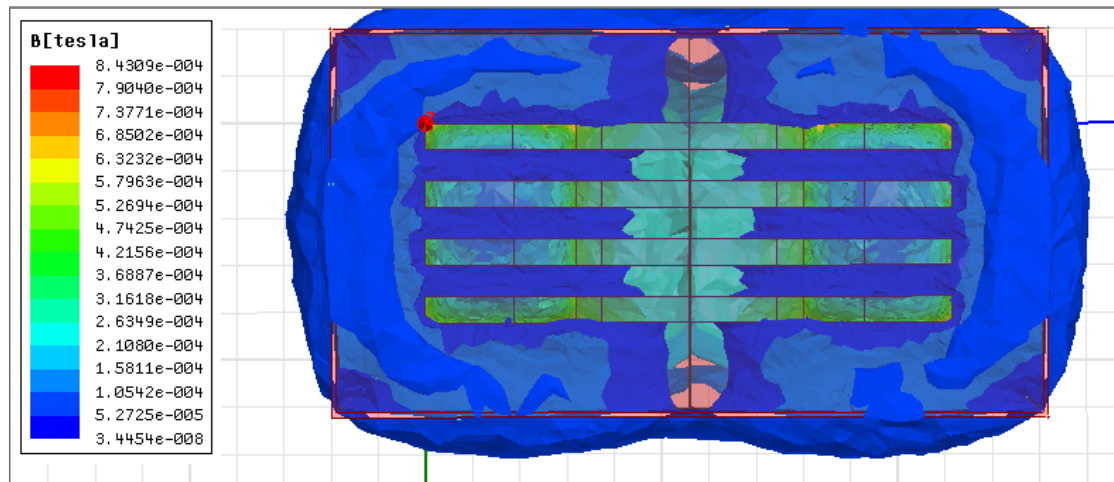
## 2.8 Απεικόνιση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το τελικό στάδιο, έχοντας ολοκληρώσει πλέον όλα τα απαιτούμενα βήματα, για την επίλυση του προβλήματος, μένει μόνο η παρουσίασή τους. Όπως αναφέραμε τα μεγέθη που επιθυμούμε να εξάγουμε, για τον υπολογισμό της ισχύος, είναι οι αυτεπαγωγές στα τυλίγματα και η αμοιβαία επαγωγή και γι' αυτό τον λόγο, έχουμε δημιουργήσει τον πίνακα Matrix. Για την προβολή του πίνακα πατάμε Parameters>Matrix>View Solution και στο παράθυρο, που αναδύεται, πρέπει να επιλέξουμε Post Processed και για μονάδες mH Σχήμα 2.8-1.

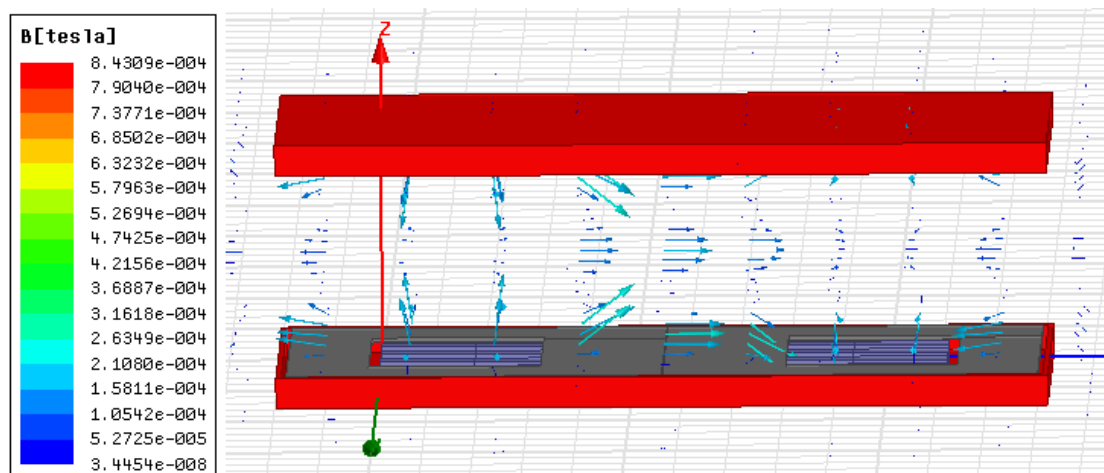


Σχήμα 2.8-1: Απεικόνιση μεγεθών για υπολογισμό ισχύος

Γενικά το πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα να απεικονίσουμε και άλλα μεγέθη, όπως την κατεύθυνση και το μέγεθος του ρεύματος, που διαρρέει τα τυλίγματα, την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 2.8-3), καθώς και την έντασή του στον χώρο (Σχήμα 2.8-2).



Σχήμα 2.8-2: Ένταση μαγνητικού πεδίου



Σχήμα 2.8-3: Κατεύθυνση μαγνητικής ροής

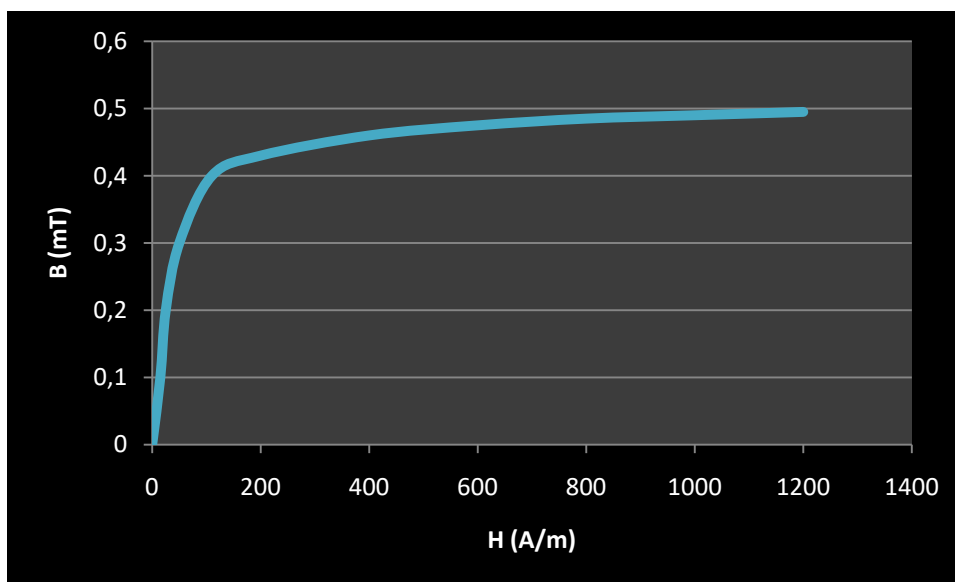


### 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Διάταξη DD

Σε αυτή την ενότητα σκοπός μας είναι να αναλύσουμε την λειτουργία μια διάταξης DD σε βασικές μεταβολές διακένου και μετατόπισης, καθώς και να μελετήσουμε με ποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η διάταξη επιτυγχάνει τα επιθυμητά επίπεδα ισχύος. Για την υλοποίηση του στόχου, τα βασικά μεγέθη μιας τέτοιας διάταξης πάρθηκαν από προηγούμενες μελέτες [20][23].

#### 3.1 Περιγραφή με στόχο την κατασκευή

Αρχικά τα βασικά γεωμετρικά μεγέθη μίας τέτοιας διάταξης αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο στο Σχήμα 2.3-3, για μία διάταξη μεγέθους 391\*739mm [23]. Οι φερρίτες της διάταξης αποτελούν ράβδους μεγέθους 28\*93\*16mm ονομαζόμενοι N87, με ένα διάκενο (κατακόρυφο) μεταξύ τους στα 33mm, που επιλέχθηκε, γιατί είναι οριακά μεγαλύτερο από το πάχος του φερρίτη και διευκολύνεται ως εκ τούτου η μαγνητική ροή. Οι συγκεκριμένη φερρίτες παρουσιάζουν την B-H καμπύλη του Σχήματος 3.1-1. Επίσης μελετήθηκε στο [20] η βέλτιστη διάταξη, που θα μπορούσαν να έχουν τέτοιες ράβδοι από φερρίτες και κατάληξαν σε ένα σχηματισμό 4X6 ράβδων, με αποτέλεσμα το συνολικό μήκος των φερριτών σε σειρά να είναι 558mm.



Σχήμα 3.1-1: BH-Curve φερρίτη N87

Τα τυλίγματα τώρα σχεδιάστηκαν και κύριο σημείο της σχεδίασης, που επηρέαζε την ισχύ εξόδου, ήταν η επικάλυψη του κέντρου. Έχοντας λάβει υπόψη αρκετά κατασκευαστικά ζητήματα επιλέχθηκε μία επικάλυψη των φερριτών σε ποσοστό 43% [23], που

μεταφράζεται σε 120mm κεντρική επικάλυψη για κάθε ένα πηνίο. Περιμετρικά τα πηνία είχαν ένα πλάτος 80mm, που προκύπτει από το ελάχιστο αναγκαίο πλάτος, για να περιέχουν τις 20 στροφές ενός καλωδίου (Litz) 4mm διαμέτρου [20] και απέχουν 10mm από τους φερρίτες. Επίσης για τις ανάγκες της προσομοίωσης ανάμεσα στα δύο τυλίγματα κάθε rad, αφήσαμε ένα διάκενο 1mm για τον ορισμό των ρευμάτων.

Η θωράκιση αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε δημιουργήθηκε με ένα πάχος 5mm προσεγγιστικά, καθώς έτσι κι αλλιώς το αλουμίνιο είναι φτηνό σαν υλικό και δεν θα αύξανε το κόστος κατασκευής της διάταξης. Η τοποθέτησή του έγινε 5mm από τα άκρα των τυλιγμάτων, καθώς επίσης δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση, αλλά οφείλει να εξασφαλίζει επαρκή χώρο για την διασύνδεσή του.

Όπως γίνεται αντιληπτό η διάταξη, που περιγράφηκε αφορά και το πρωτεύον και το δευτερεύον σε πλήρη ευθυγράμμιση μεταξύ τους για τις αρχικές μετρήσεις. Το ρεύμα που διαπερνάει τα τυλίγματα ορίστηκε ίσο με 23A, που επιτυγχάνει μία πυκνότητα ρεύματος κατάλληλη για τον περιορισμό των απωλειών χαλκού [20]. Η φορά του ρεύματος στο κέντρο των δυο πηνίων του πρωτεύοντος πρέπει να είναι ίδια και αντίθετη από την κοινή φορά ρεύματος των πηνίων του δευτερεύοντος, για την μεγαλύτερη δυνατή ισχύ εξόδου.

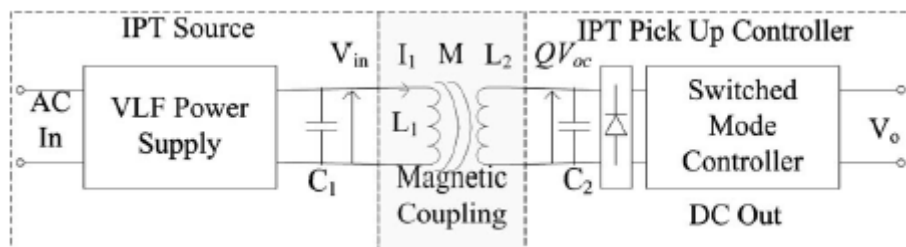
Υπενθυμίζουμε, ότι ο τύπος της ισχύος εξόδου (Σχήμα 3.1-1) είναι:

$$P_o = V_{oc} * I_{sc} * Q = S_u * Q$$

Και τελικά προκύπτει:

$$P_o = Q * 2 * \pi * \omega * I_1^2 * M^2 / L_2$$

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται στην αναφορά [20], η συχνότητα ορίστηκε στα 20kHz. Στην παρούσα διπλωματική επιλέγεται ένας ανώτατος συντελεστής ίσος με 6 σύμφωνα με την αναφορά [20]. Ο προσδιορισμός του ακριβή συντελεστή Q σε κάθε περίπτωση μετατόπισης θα αναλυθεί στη συνέχεια.



Σχήμα 3.1-2: Κύρια συστατικά συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος [20]

Άρα συμπεραίνουμε ότι η ισχύς εξόδου με τις παραδοχές που κάναμε εξαρτάται αποκλειστικά από τον λόγο του τετραγώνου της αμοιβαίας επαγωγής προς την αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος.

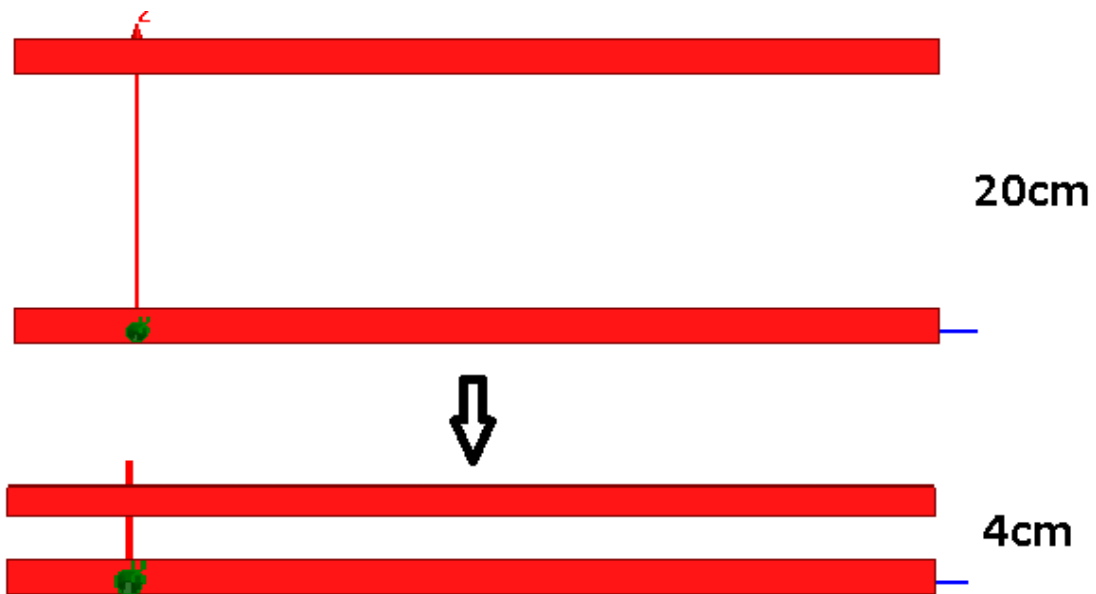
Στην παρούσα διπλωματική στόχος είναι η σύγκριση των διατάξεων μεταξύ τους, σε βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως το διάκενο, η ανοχή στην μετατόπιση και το μέγεθος της διάταξης. Εξετάσθηκε η ικανότητα ισχύος της κάθε διάταξης σχετικά με τρία επίπεδα ισχύος 3.6kW, 7.2kW, 30kW, τα οποία επιλέχθηκαν βάσει των πρότυπων κατηγοριών φόρτισης, που περιγράφτηκαν στην εισαγωγή. Για την κατηγορία της απλής φόρτισης (έως 3,7KW) επιλέχθηκαν τα 3,6kW, ενώ για την κατηγορία της ταχείας φόρτισης (κατώτερο επιτρεπτό όριο: 22kW) εξετάστηκε ένα επίπεδο ισχύος της τάξεως των 30kW. Εξετάσθηκε επίσης και ένα ενδιάμεσο επίπεδο φόρτισης, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που περιγράφεται στην εισαγωγή, ίσο με 7,2kW.

### 3.2 Μεταβολές διακένου

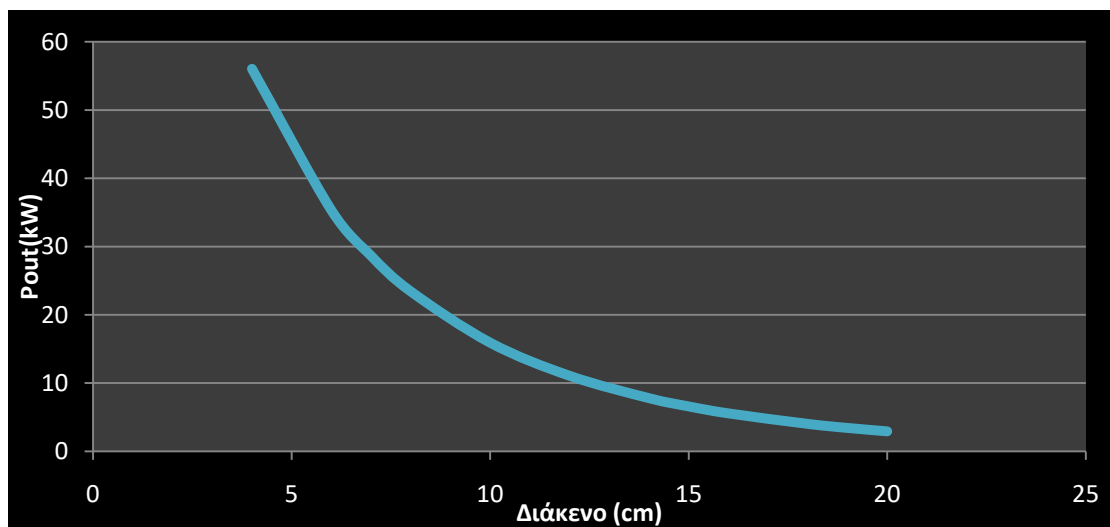
Σε αυτή την ενότητα, σκοπός είναι να ελέγξουμε την ικανότητα παραγωγής ισχύος της διάταξης σε διάφορες αποστάσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Το διάκενο είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για τις διατάξεις μας, καθώς η απόσταση του εδάφους από το πάτωμα ενός οχήματος, πρέπει να είναι εντός κάποιων πλαισίων. Βέβαια υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής μηχανισμού, με τον οποίο το δευτερεύον από την πλευρά του οχήματος να πλησιάζει το πρωτεύον του εδάφους, για την επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής ισχύος.

Παράλληλα με τις μεταβολές του διακένου, είχαμε ως στόχο να διαπιστώσουμε σε ποιες αποστάσεις η κάθε διάταξη επιτυγχάνει τα επιθυμητά επίπεδα ισχύος (3.6kW, 7.2kW και 30kW). Η ακρίβεια που δόθηκε στις μετρήσεις μας ήταν της τάξεως του 1cm. Επίσης επιλέχθηκαν οι τιμές των διακένων, που ήταν κατά απόλυτη τιμή πλησιέστερα στα επιθυμητά επίπεδα ισχύος.

Παρακάτω παρουσιάζουμε διαγραμματικά τα επίπεδα ισχύος (Σχήμα 3.2-2), που επιτεύχθηκαν για κάθε διάκενο από 4cm έως 20cm (Σχήμα 3.2-1). Η μελέτη κάτω από 4cm δεν κρίθηκε απαραίτητη, καθώς είχαμε πετύχει και τα τρία επίπεδα ισχύος.



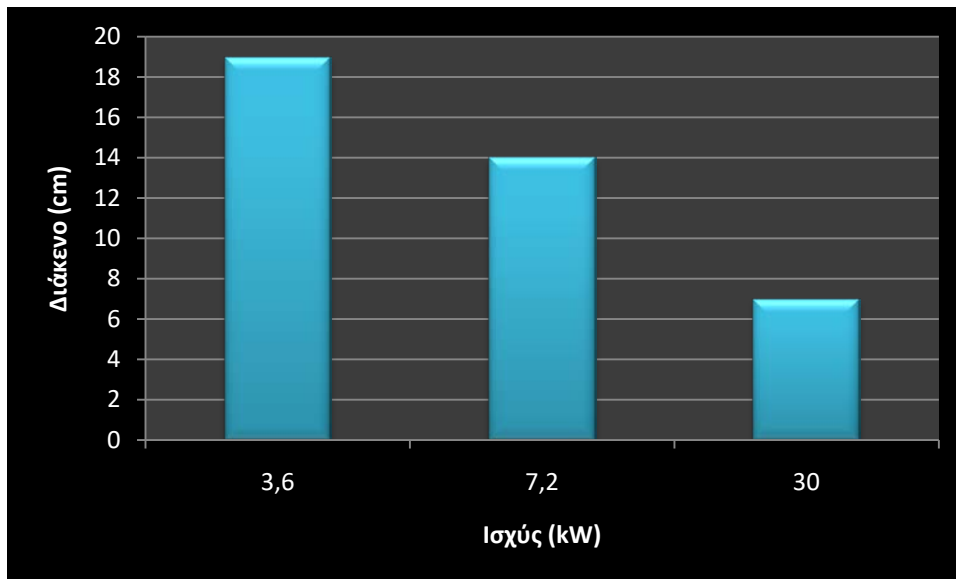
Σχήμα 3.2-1: Γεωμετρική μεταβολή στο διάκενο από 20cm σε 4cm



Σχήμα 3.2-2: Διάκενα επίτευξης ισχύος

Είναι φανερό στο Σχήμα 3.2-2, ότι όσο μειώνεται η απόσταση του πρωτεύοντος με το δευτερεύον, έχουμε και μία αύξηση της ισχύος. Επίσης, από το διάγραμμα συμπεραίνουμε, ότι τα 3,6kW μία διάταξη DD τα επιτυγχάνει σε 19cm, τα 7,2kW στα 14cm, ενώ τέλος τα 30kW στα 7cm.

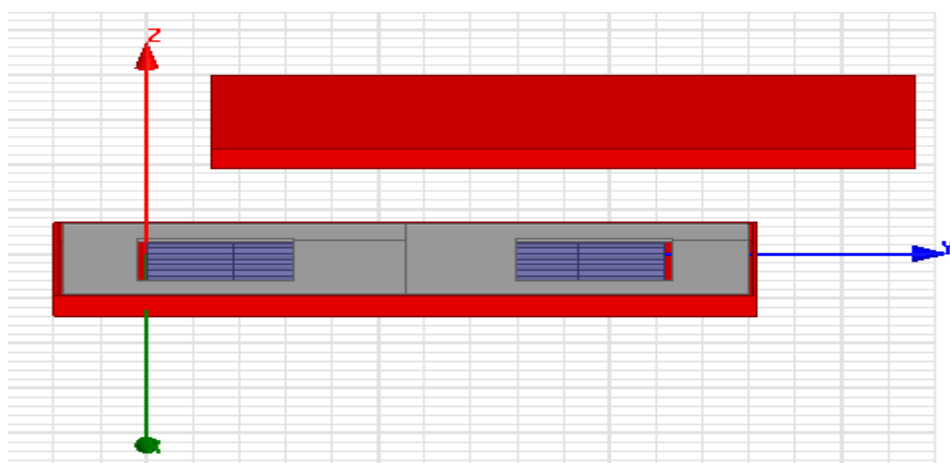




Σχήμα 3.2-3: Διάκενα επίτευξης επιλεγμένων επιπέδων ισχύος DD διάταξης

### 3.3 Ανοχή στην μετατόπιση

Έχοντας πλέον υπολογίσει τα διάκενα, στα οποία η DD διάταξη επιτυγχάνει τα τρία βασικά επίπεδα ισχύος στόχος μας τώρα, είναι η μελέτη σε αυτά τα τρία επίπεδα της μέγιστης ανοχής σε μετατόπιση. Η μετατόπιση αυτή μελετήθηκε ως προς τον άξονα Y, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3-1.

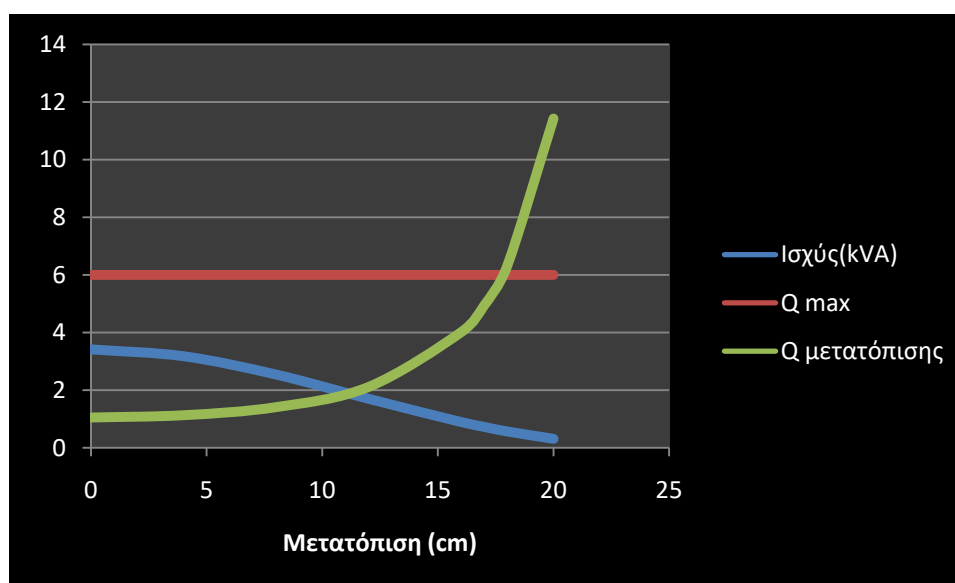


Σχήμα 3.3-1: Μετατόπιση ως προς Y

Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιήθηκε το κύκλωμα συντονισμού που περιγράφεται στην αναφορά [20]. Πιο συγκεκριμένα, το κύκλωμα συντονισμού θεωρείται ότι είναι ρυθμισμένο κατάλληλα, ώστε να κρατάει την ισχύ σταθερή στην έξοδο και ίση με 3,6kW ή 7,2kW ή 30kW αντίστοιχα. Για να το πετύχει αυτό μεταβάλλει κατάλληλα, ανάλογα με την έξοδο σε kVA, τον παράγοντα συντονισμού Q από 1 έως 6. Για μηδενική μετατόπιση

θεωρείται μία τιμή ίση με 1 για το συντελεστή Q. Όταν η μετατόπιση γίνει τέτοια, ώστε ο παράγοντας συντονισμού να έχει πάρει τη μέγιστη τιμή του, τότε η μετατόπιση αυτή είναι η μέγιστη ανεκτή που μπορεί να έχει η διάταξη για την ομαλή λειτουργία της και την διατήρηση σταθερής ισχύος.

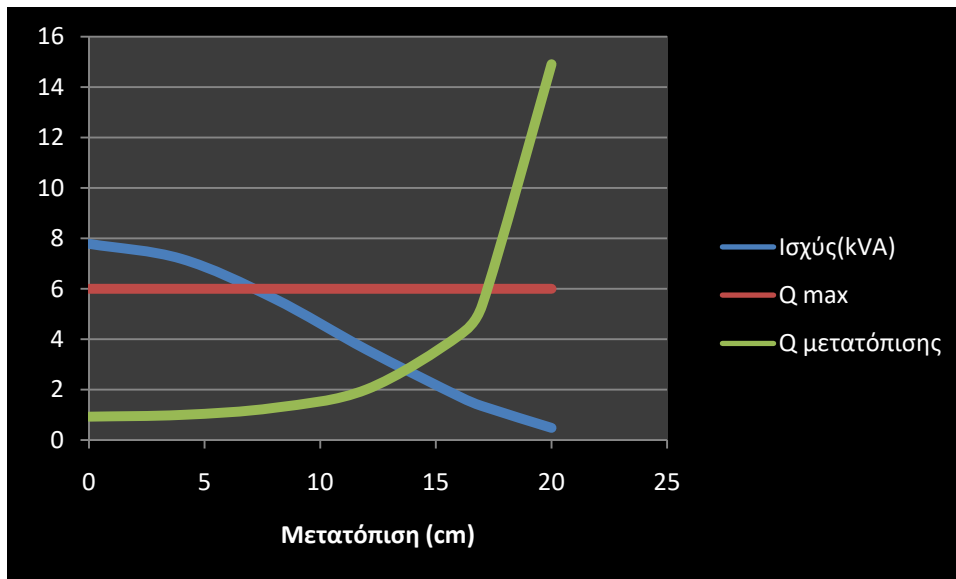
Παρακάτω παρουσιάζουμε στο Σχήμα 3.3-2 την ισχύ της διάταξης σε kVA αλλά και τον παράγοντα συντονισμού, που είναι αναγκαίος για την διατήρηση των 3,6kW σε κάθε μετατόπιση. Για να επιτύχουμε τη μεταφορά ισχύος ίση με 3.6kW αρκεί ένα διάκενο ίσο με 19cm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2-2.



Σχήμα 3.3-2: Ανοχή στην μετατόπιση με  $Q_{max}=6$  στα 3,6kW

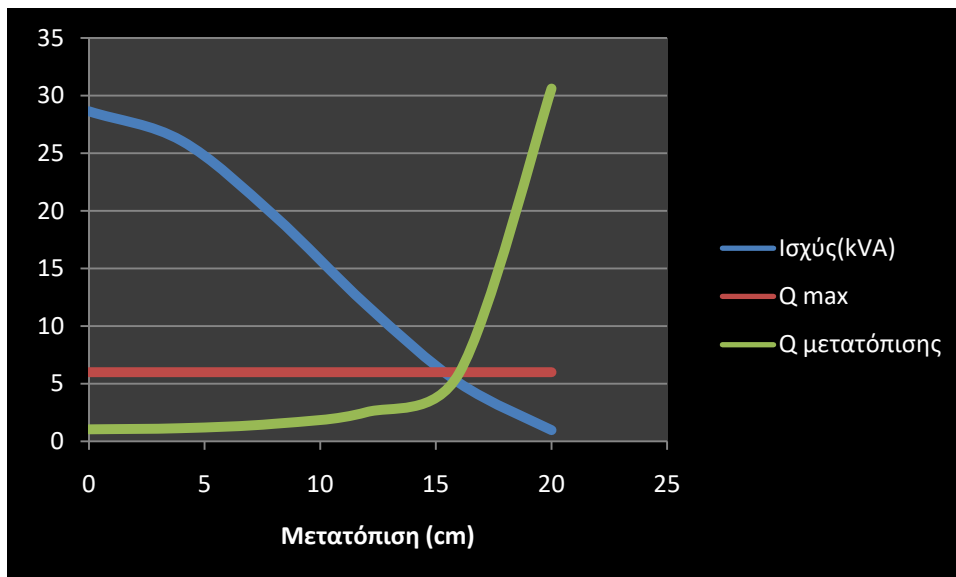
Όπως είναι λογικό στο σημείο που έχουμε την τομή του μέγιστου Q με το τρέχων Q μετατόπισης, βρίσκεται η μέγιστη ανοχή που παρουσιάζει η διάταξη στην πλευρική μετατόπιση ως προς τον άξονα Y. Πιο συγκεκριμένα στο διάγραμμα του Σχήματος 3.3-2 παρατηρούμε ότι μία μέγιστη μετατόπιση ίση με 17cm είναι δυνατή για την επίτευξη ισχύος ίσης με 3.6kW.

Για την επίτευξη μεταφοράς ισχύος ίσης με 7.2kW αρκεί ένα διάκενο ίσο με 14cm όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2-2. Στη συνέχεια παρουσιάζεται (Σχήμα 3.3-3) η ισχύς της διάταξης σε kVA, αλλά και ο παράγοντας συντονισμού, που είναι αναγκαίος για την διατήρηση των 7,2kW σε κάθε μετατόπιση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούμε ότι η μέγιστη ανεκτή μετατόπιση είναι ίση με 17cm.



Σχήμα 3.3-3:Ανοχή στην μετατόπιση στα 7,2kW

Και τέλος η ανοχή στην μετατόπιση στα 30kW (για ένα διάκενο ίσο με 7cm) με τον εκάστοτε παράγοντα συντονισμού δίνεται σύμφωνα με το Σχήμα 3.3-4. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούμε ότι η μέγιστη ανεκτή μετατόπιση είναι ίση με 16cm.



Σχήμα 3.3-4: Ανοχή στην μετατόπιση στα 30kW

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η ανοχή στη μετατόπιση δε φαίνεται να επηρεάζεται έντονα από το διάκενο και το μέγεθος της ισχύος εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι η διάταξη των 3,6kW εμφανίζει μέγιστη ανοχή μετατόπισης 17cm, η διάταξη των 7,2kW επίσης 17cm, ενώ η διάταξη των 30kW 16cm.

### 3.4 Μέγεθος διάταξης

Στη συνέχεια της μελέτης μας στόχος είναι να μελετήσουμε την συμπεριφορά μίας διάταξης DD, με διαφορετικό μέγεθος. Για την επίτευξη του στόχου μας διαλέξαμε να μελετήσουμε άλλες δυο διατάξεις, εκ των οποίων η μία να είναι προσεγγιστικά μιάμιση φορά μικρότερη και η άλλη μιάμιση φορά μεγαλύτερη της αρχικής σχεδίασης.

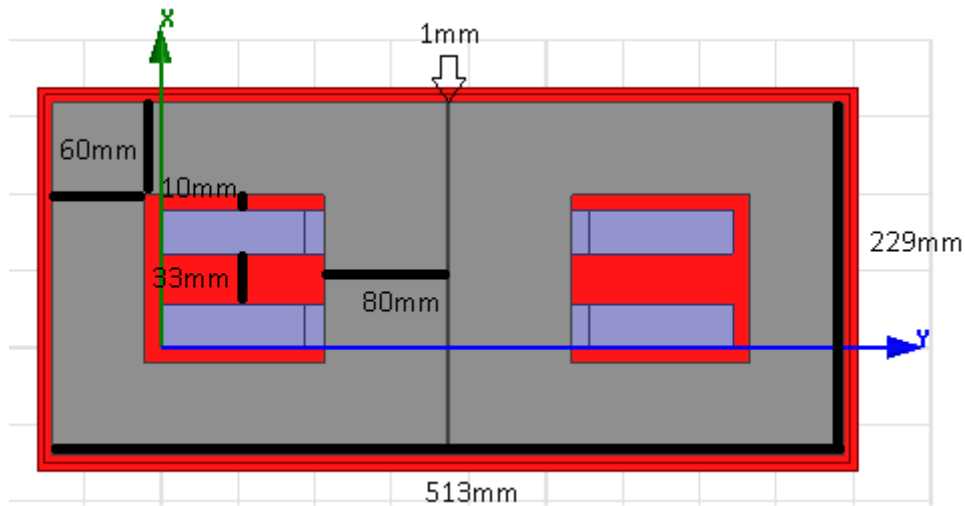
Και στις δύο νέες διατάξεις τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα και η φορά τους διατηρήθηκαν σταθερά, όπως και η συχνότητα του ηλεκτρικού κυκλώματος και ο μέγιστος παράγοντας συντονισμού. Με αυτό τον τρόπο ο υπολογισμός της ισχύος εξακολούθησε να εξαρτάται αποκλειστικά από την αμοιβαία επαγωγή και την αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος. Επιπλέον, διατηρήσαμε το υλικό των φερριτών (ράβδοι N87) και των τυλιγμάτων (καλώδιο Litz), αλλά όχι όπως είναι φυσικό την ποσότητά τους.

#### 3.4.1 Μικρότερη DD διάταξη

Για τον σχεδιασμό της μικρότερης από την αρχική διάταξη, καταλήξαμε σε μία με διαστάσεις 229\*513mm. Σχεδιάσαμε αρχικά τα τυλίγματα με απώτερο σκοπό, την διατήρηση του ποσοστού επικάλυψης(43%) [20] στο κέντρο των τυλιγμάτων ως προς το φερρίτη. Οι φερρίτες που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν σε μία διάταξη 2\*4 με ράβδους ίδιων διαστάσεων με την αρχική διάταξη και διάκενο μεταξύ τους πάλι στα 33mm. Άρα στην εσωτερική πλευρά κάθε τυλίγματος είχαμε ένα πάχος στα 80mm, με διάκενο ανάμεσα στα τυλίγματα 1mm. Περιμετρικά τα τυλίγματα είχαν πάχος 60mm, ώστε να εφαρμοστεί η χρήση του καλωδίου Litz 15 στροφών.

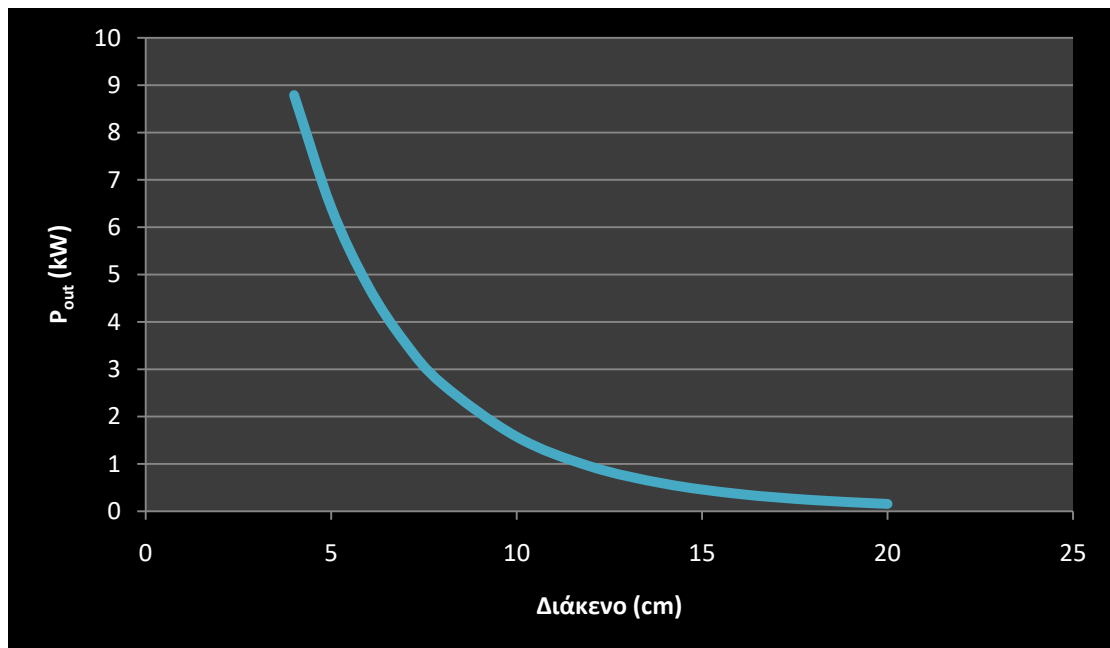
Όλα τα άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης, όπως το πάχος και το διάκενο από τα τυλίγματα της θωράκισης αλουμινίου, το διάκενο των φερριτών από τα τυλίγματα και τα ύψη των φερριτών, των τυλιγμάτων και της θωράκισης διατηρήθηκαν σταθερά με την αρχική διάταξη.

Έχοντας πλέον σχεδιάσει στο Σχήμα 3.4-1 μία μικρότερη DD διάταξη θα εφαρμόσουμε την ίδια μελέτη σε ότι αφορά τα επίπεδα ισχύος ανάλογα με το διάκενο, αλλά και τον έλεγχο στις ανοχές των μετατοπίσεων για τα τρία κύρια επίπεδα ισχύος.



Σχήμα 3.4-1: Μικρότερος DD συζεύκτης από τον αρχικό

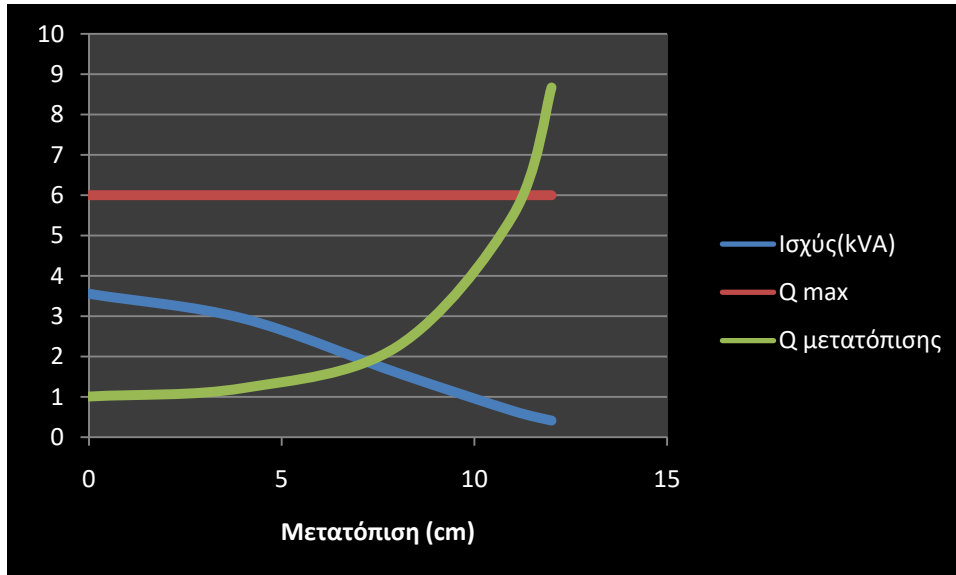
Για τις μεταβολές του διακένου ασχοληθήκαμε πάλι, για αποστάσεις από 20cm έως 4cm και τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο Σχήμα 3.4-2.



Σχήμα 3.4-2: Διάκενα επίτευξης ισχύος μικρότερης

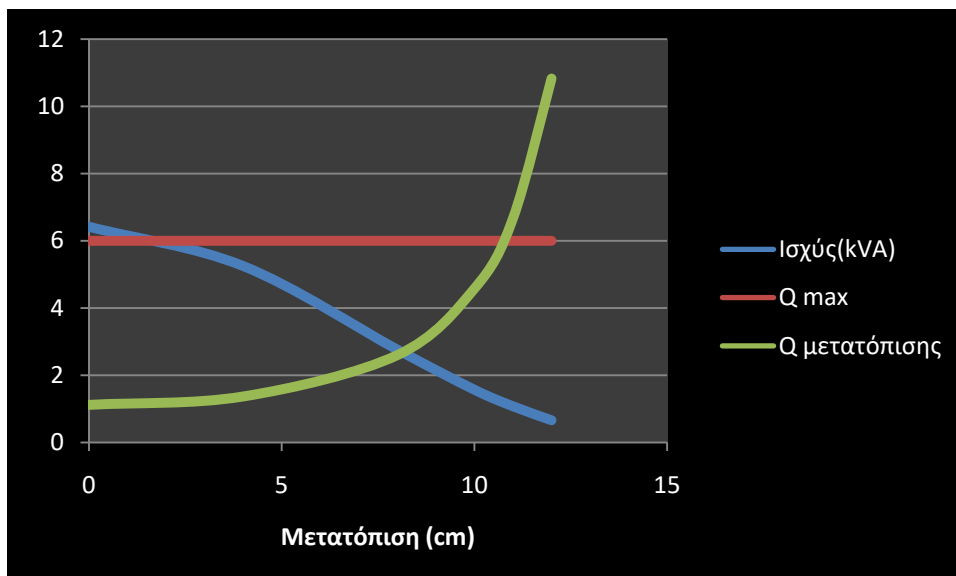
Όπως γίνεται αντιληπτό μία DD διάταξη τέτοιου μεγέθους αδυνατεί να επιτύχει τα μεγάλα επίπεδα ισχύος των 30kW που απαιτούνται για τη γρήγορη φόρτιση. Παρόλα αυτά η μεταφορά ισχύος 3,6kW επιτυγχάνεται σε διάκενο 7cm και 7,2kW σε ένα διάκενο 5cm.

Την ανοχή στην μετατόπιση τώρα, μπορούμε να την μελετήσουμε στα δύο αυτά επίπεδα ισχύος. Άρα για τα 3,6kW παρατηρούμε στο Σχήμα 3.4-3 μία ανοχή της τάξεως των 11cm, φανερά μειωμένη κατά 5cm από την ανοχή της αρχικής μας διάταξης.



Σχήμα 3.4-3: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 3,6kW

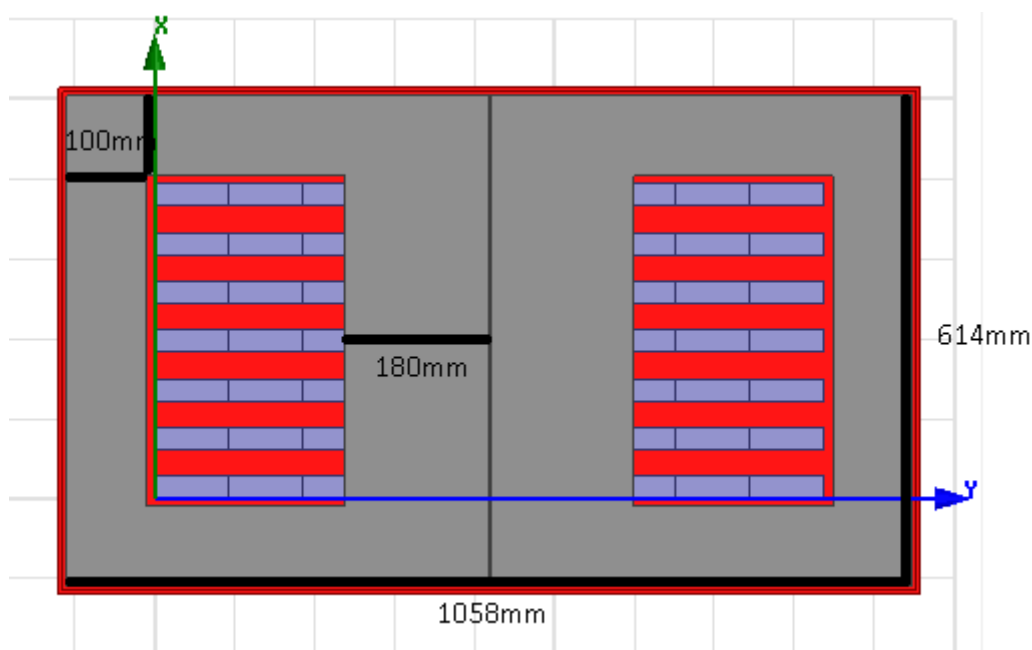
Την ίδια ακριβώς επίδραση, από την μείωση του μεγέθους της διάταξης παρατηρούμε και στο Σχήμα 3.4-4, όπου στα 7,2kW, έχουμε μία ανοχή στην μετατόπιση 10cm, μειωμένη κατά 6cm από την ανοχή της αρχικής μας διάταξης.



Σχήμα 3.4-4: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 7,2kW

### 3.4.2 Μεγαλύτερη DD διάταξη

Για τον σχεδιασμό της μεγαλύτερης DD διάταξης καταλήξαμε σε μία διάταξη μεγέθους 614\*1058mm. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, που ακολουθήσαμε και στον σχεδιασμό της μικρότερης διάταξης, καταλήξαμε στην επιλογή μιας διάταξης από φερρίτες με σχηματισμό 7\*9. Τα τυλίγματα του καθενός rad, για την διατήρηση της κεντρικής επικάλυψης, σχεδιάστηκαν με ένα πάχος στο κέντρο ίσο με 180mm, ενώ περιμετρικά είχαν 100mm πάχος για την εφαρμογή καλωδίου 25 στροφών.



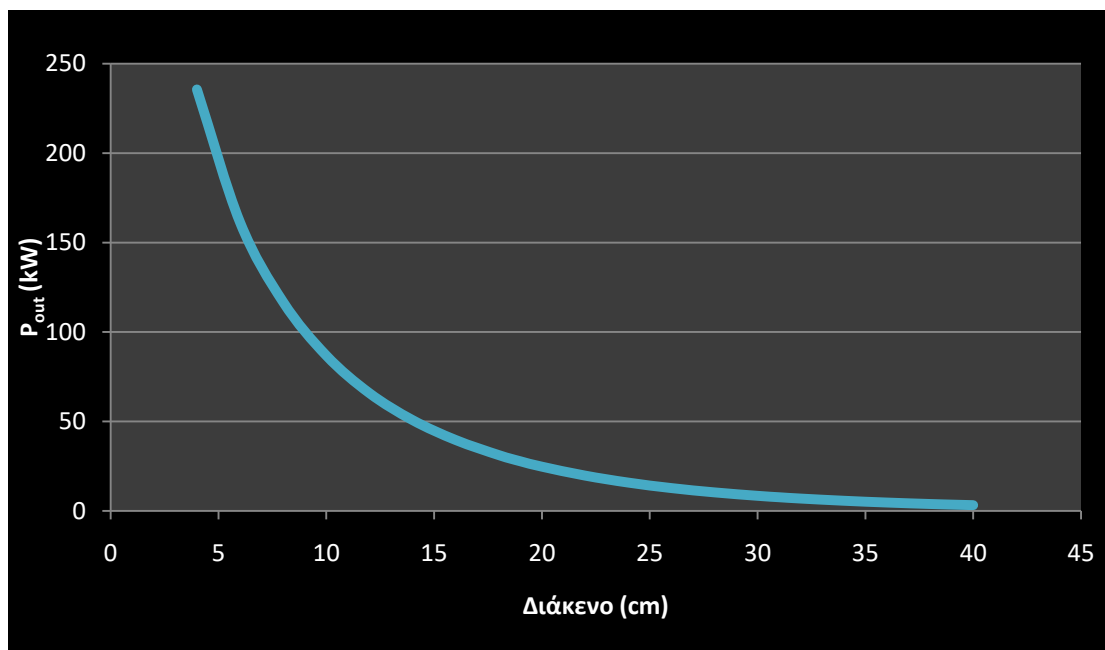
Σχήμα 3.4-5: Μεγαλύτερος DD συζεύκτης από τον αρχικό

Έχοντας πλέον σχεδιάσει στο Σχήμα 3.4-5 μία μεγαλύτερη DD διάταξη από την αρχική, θα εφαρμόσουμε την ίδια μελέτη, σε ότι αφορά τα επίπεδα ισχύος ανάλογα με το διάκενο, αλλά και τον έλεγχο στις ανοχές των μετατοπίσεων για τα τρία κύρια επίπεδα ισχύος.

Για τις μεταβολές του διακένου, αυτή την φορά η μελέτη μας έγινε σε ένα πιο ευρύ φάσμα αποστάσεων, καθώς, λόγω του μεγέθους της διάταξης, η ισχύς στην έξοδο για μικρά διάκενα ήταν πολύ μεγάλη. Άρα ακολουθήσαμε προσομοιώσεις, για διάκενα από 4cm μέχρι και τα 40cm, με τα αποτελέσματα να απεικονίζονται στο Σχήμα 3.4-6 .

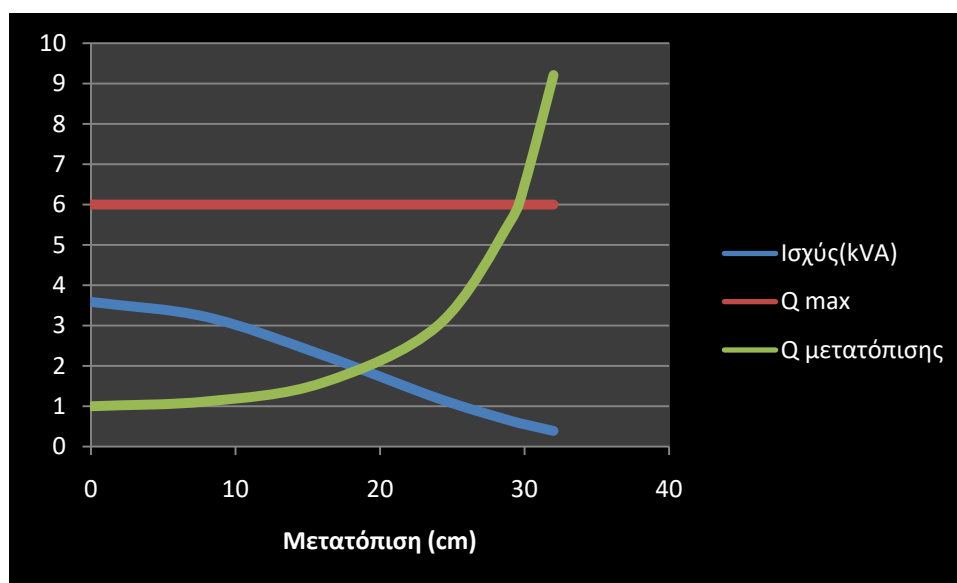
Όπως παρατηρούμε για πολύ μικρά διάκενα η ισχύς είναι υπερβολικά μεγάλη, για παράδειγμα στα 4cm έχουμε μία έξοδο της τάξεως των 235,554kW. Γενικά μπορούμε, όπως είναι φυσικό να επιτύχουμε και τα τρία επίπεδα τάσης και πιο συγκεκριμένα τα 3,6kW στα 39cm, τα 7,2kW στα 32cm και τα 30kW στα 18cm. Παρατηρούμε ότι αυτά τα διάκενα είναι

φυσιολογικά για ένα μέσο όχημα, βέβαια πρέπει να αναλογιστούμε και το ολικό μέγεθος της διάταξης που σε κάποιες περιπτώσεις την καθιστά απαγορευτική.



Σχήμα 3.4-6: Διάκενα επίτευξης ισχύος μεγαλύτερης

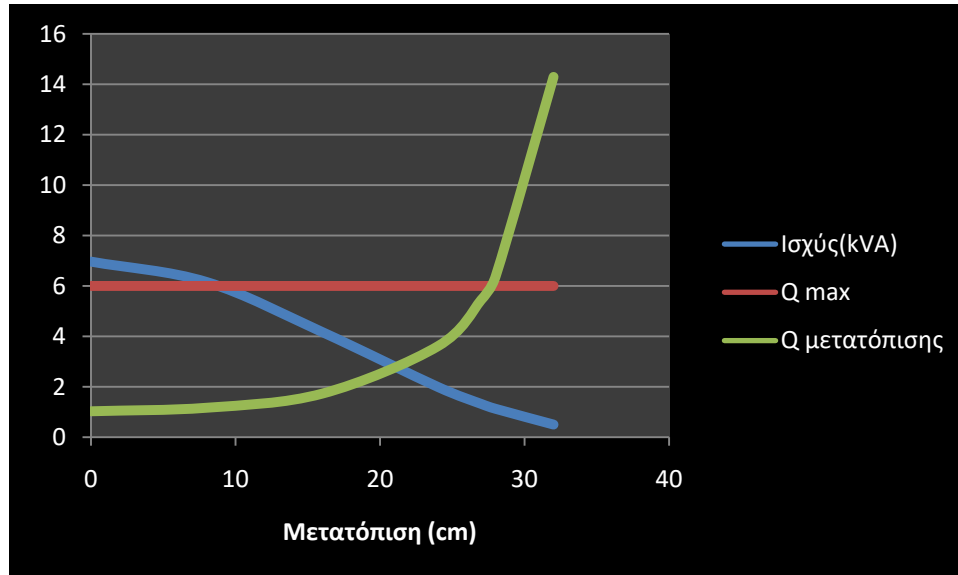
Στη συνέχεια μελετήσαμε την ανοχή στη μετατόπιση, για τα τρία κύρια επίπεδα ισχύος. Αρχικά έχουμε τα 3,6kW (Σχήμα 3.4-7), όπου και παρατηρούμε μία αξιοσημείωτα μεγαλύτερη ανοχή στη μετατόπιση, από την αρχική διάταξη. Εμφανίζει ανοχή στα 29cm, που σε σχέση με τα 17cm της αρχικής, είναι σχεδόν διπλάσια.



Σχήμα 3.4-7: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 3,6kW

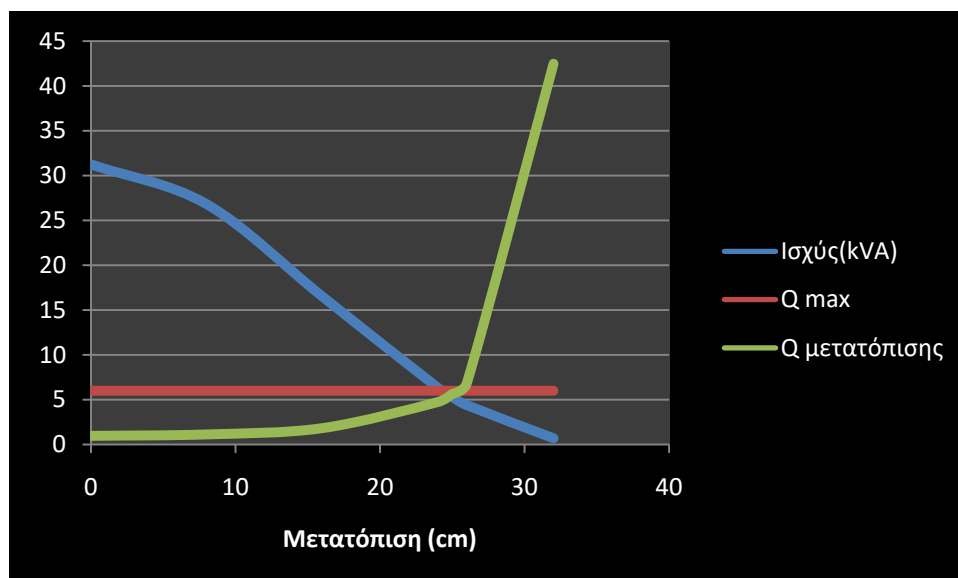


Στα 7,2kW με τα 32cm διάκενο Σχήμα 3.4-8, η ανοχή στην μετατόπιση είναι ίση με 27cm. Εξακολουθεί, επομένως, να είναι ανώτερη της αρχικής διάταξης, καθώς είναι αυξημένη κατά 10cm.



Σχήμα 3.4-8: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 7,2kW

Την ίδια ακριβώς επίδραση από την αύξηση του μεγέθους της διάταξης παρατηρούμε και στο Σχήμα 3.4-9, όπου στα 30kW έχουμε μία ανοχή στην μετατόπιση 25cm, αυξημένη κατά 9cm από την ανοχή της αρχικής μας διάταξης.



Σχήμα 3.4-9: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 30kW

Τα αποτελέσματα για όλες τις διατάξεις φαίνονται στον Πίνακα 1:

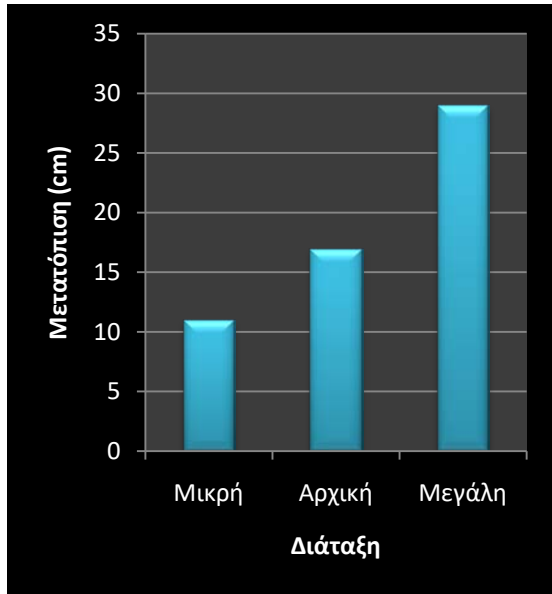
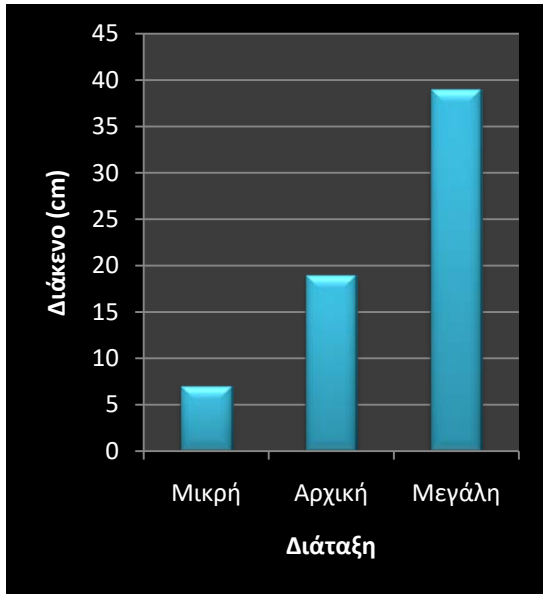
Πίνακας 1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα DD διάταξης

Διάταξη	Αριθμός ράβδων φερρίτη	Όγκος τυλιγμάτων (cm <sup>3</sup> )	Ισχύς	Ανοχή σε μετατόπιση(cm)	Διάκενο (cm)
Μικρή	16	735,2	3.6kW	11	7
			7.2kW	10	5
			30kW	-	-
Αρχική	48	1684	3.6kW	17	19
			7.2kW	17	14
			30kW	16	7
Μεγάλη	126	3545,6	3.6kW	29	39
			7.2kW	27	32
			30kW	25	18

Όπως είναι εύλογο, όσο μικρότερο είναι το διάκενο σε μία διάταξη, τόσο μεγαλύτερη και η ισχύς που δύναται να μεταφέρει (Σχήμα 3.4.10-3.4.12). Μία αύξηση του διακένου για τη μεταφορά δεδομένης ισχύος είναι δυνατό να επιτευχθεί, αυξάνοντας τις διαστάσεις της διάταξης. Για παράδειγμα για την επίτευξη μίας ισχύος ίσης με 7.2kW, είναι φανερό στο Σχήμα 3.4.11 ότι μία μικρή διάταξη απαιτεί ένα διάκενο 5cm, μία ενδιάμεση ένα διάκενο 14cm, ενώ μία ακόμα μεγαλύτερη διάταξη καταφέρνει να επιτύχει την ίδια μεταφορά ισχύος, αυξάνοντας σημαντικά το διάκενο σε 32cm. Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και για τα υπόλοιπα εξεταζόμενα επίπεδα ισχύος (Σχήμα 3.4.10 και Σχήμα 3.4.12).

Εκτός από την αύξηση του διακένου μία μεγαλύτερου μεγέθους διάταξη επιτυγχάνει επίσης και μία αύξηση στην ανοχή ως προς τη μετατόπιση. Για παράδειγμα, για τη μεταφορά μίας ισχύος ίσης με 30kW (Σχήμα 3.4.12) μία ενδιάμεση διάταξη έχει μία ανοχή σε μετατόπιση ίση με 16cm ενώ μία μεγάλη διάταξη έχει μία σημαντικά αυξημένη ανοχή σε μετατόπιση ίση με 25cm. Συνοπτικά, η ανοχή σε μετατόπιση που παρουσιάζει μια διάταξη DD, είναι περίπου 20-27% του μήκους της (Υ άξονας στο Σχήμα 3.3-1).

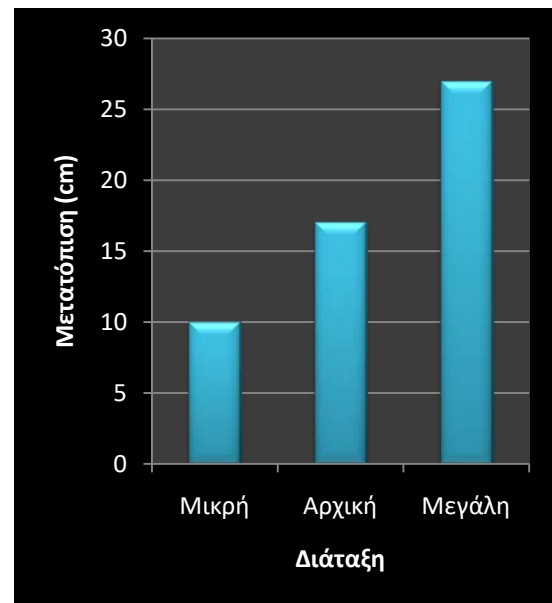
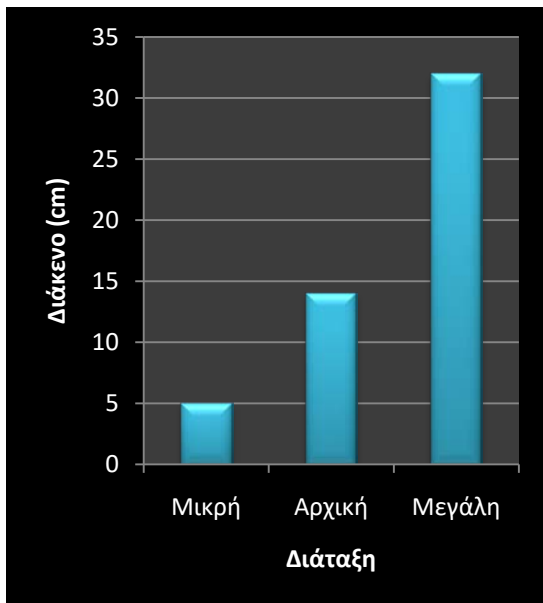
Πρέπει να αναφερθεί, βέβαια ότι για την αύξηση του διακένου οδηγούμαστε και σε μία αύξηση στο μέγεθος της διάταξης, η οποία απαιτεί και σημαντική αύξηση του απαιτούμενου φερρίτη και του απαιτούμενου καλωδίου Litz. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε στον Πίνακα 1 ότι για την κατασκευή μία μεγαλύτερης διάταξης απαιτείται 262% περισσότερος φερρίτης και 211% περισσότερο καλώδιο Litz.



(α)

(β)

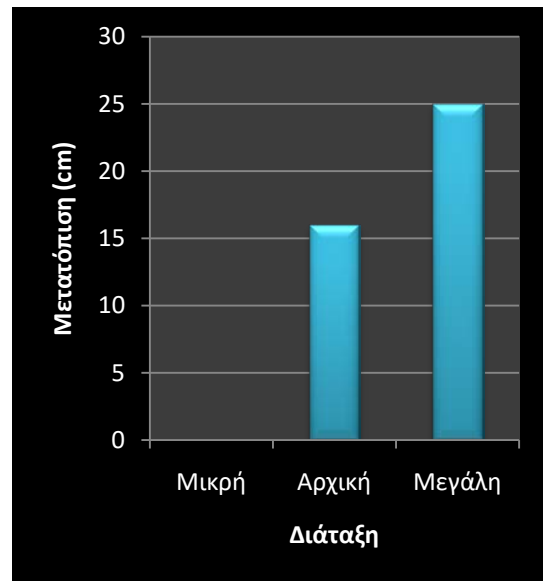
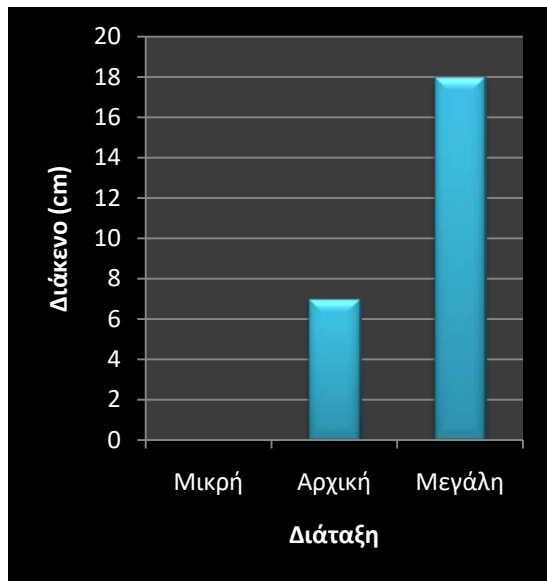
Σχήμα 3.4-10: (α) διάκενο και (β) ανοχή σε μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 3.6kW.



(α)

(β)

Σχήμα 3.4-11: (α) διάκενο και (β) ανοχή σε μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 7.2kW.



(α)

(β)

Σχήμα 3.4-12: (α) διάκενο και (β) ανοχή σε μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 30kW.

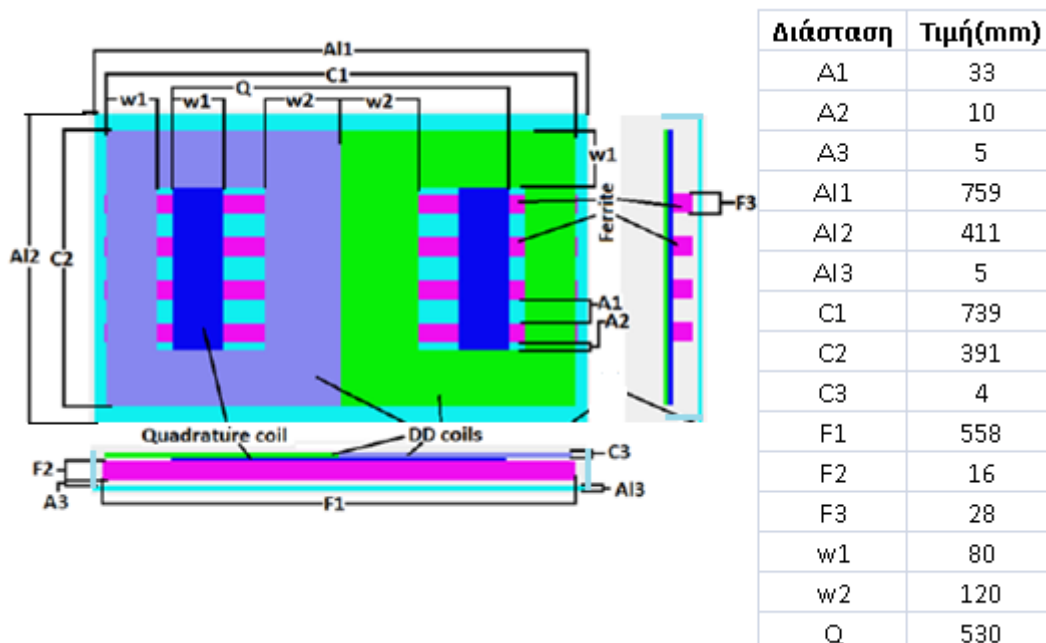
## 4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Διάταξη DDQ

Σε αυτή την ενότητα σκοπός μας είναι να αναλύσουμε την λειτουργία μια διάταξης DDQ σε βασικές μεταβολές διακένου και μετατόπισης, καθώς και να μελετήσουμε με ποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά η διάταξη επιτυγχάνει τα επιθυμητά επίπεδα ισχύος. Παράλληλα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μίας διάταξης DDQ με της DD διάταξης. Για την υλοποίηση του στόχου τα βασικά μεγέθη μιας τέτοιας διάταξης χρησιμοποιήθηκαν σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες [20][22][23].

### 4.1 Περιγραφή της DDQ διάταξης

Έχοντας σχεδιάσει μία διάταξη, όπως η DD, προκύπτει η ανάγκη για μία βελτίωση της συμπεριφοράς μιας τέτοιας διάταξης σε οριζόντιες μετατοπίσεις ως προς τον άξονα Y. Η ανοχή στην μετατόπιση λοιπόν, μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά, εάν προσθέταμε ένα δεύτερο πηνίο στην πλευρά του δέκτη ικανό να συλλάβει μόνο την κάθετη μαγνητική ροή.

Προσθέτοντας στο δευτερεύον τώρα αυτό το έξτρα πηνίο, όπως είναι αναμενόμενο αυξήθηκε το πάχος του δευτερεύοντος κατά 5mm. Αναλυτικά οι διαστάσεις της καινούριας πλέον διάταξης του δευτερεύοντος παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1-1 :

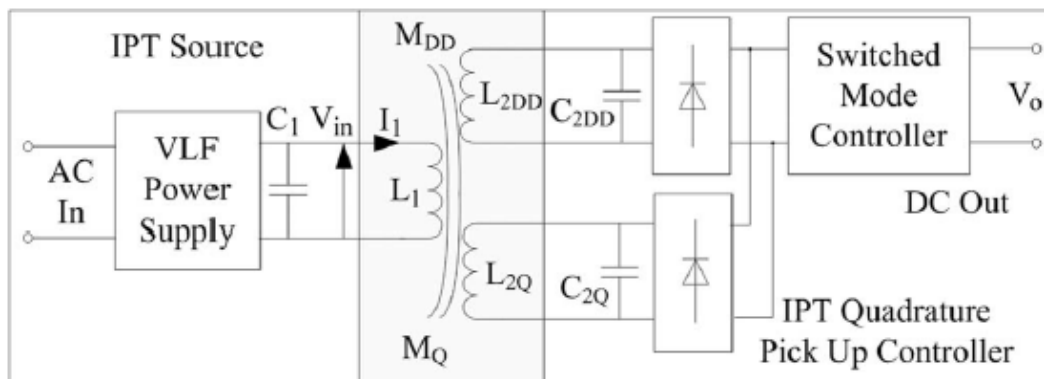


Σχήμα 4.1-1: Αναλυτικό σχήμα δέκτη DDQ διάταξης [23]

Παρατηρούμε ότι, το Q πηνίο είναι διαστάσεων 391\*530mm [23], τοποθετήθηκε στο κέντρο της διάταξης και αποτελείται από 20 σπείρες καλωδίου, όπως και τα άλλα τέσσερα πηνία. Άρα περιμετρικά το πηνίο έχει ένα πάχος 80mm και ένα ύψος στα 4mm. Και εδώ για την επιτυχή ολοκλήρωση των προσομοιώσεων αφήσαμε 1mm διάκενο ανάμεσα στα πηνία, για να μπορέσουμε να ορίσουμε τα ρεύματα και τις φορές τους. Το ρεύμα του Q πηνίου είναι επίσης 23A, ενώ η φορά του, όπως ορίζεται στο Maxwell, δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην ισχύ εξόδου.

Ακόμα η θωράκιση αλουμινίου, όπως είναι εύλογο, αυξήθηκε μόνο σε ύψος και αυτή κατά 5mm. Γενικά στόχος μας ήταν να μην μεταβάλουμε τον αριθμό και την διάταξη των φερριτών, ώστε να είμαστε σε θέση να προχωρήσουμε σε μία σύγκριση μεταξύ των διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν.

Το κύκλωμα ελέγχου μίας τέτοιας διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1-2:

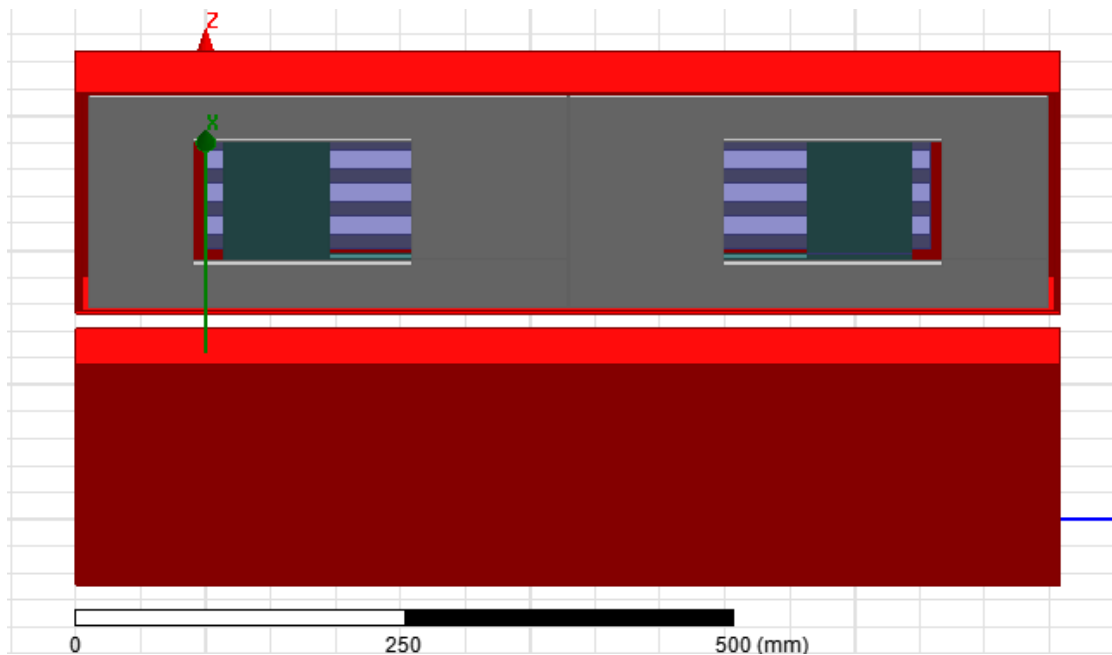


Σχήμα 4.1-2: Κύκλωμα ελέγχου DDQ διάταξης [20]

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1-2, ο υπολογισμός της ισχύος γίνεται ξεχωριστά στα DD πηνία και στο Q πηνίο, αλλά η συνολική ισχύς εξόδου είναι το άθροισμά τους. Ο υπολογισμός της ισχύος γίνεται με τον καθιερωμένο τύπο:

$$P_o = Q * 2 * \pi * \omega * I_1^2 * M^2 / L_2$$

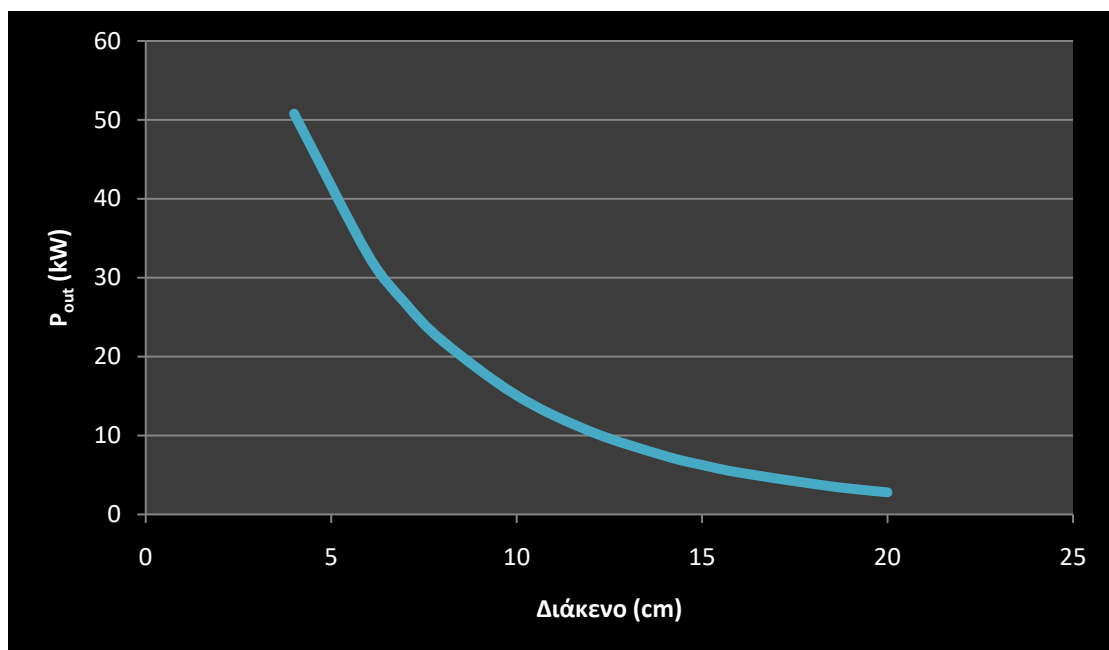
Στην συνέχεια παρουσιάζουμε την σχεδίαση, που κάναμε στο πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε, για την DDQ διάταξη με τον DD συζεύκτη στο πρωτεύον και τον DDQ συζεύκτη στο δευτερεύον βάση των παραπάνω παραδοχών:



Σχήμα 4.1-3: Σχεδιασμός DDQ διάταξης στο Maxwell

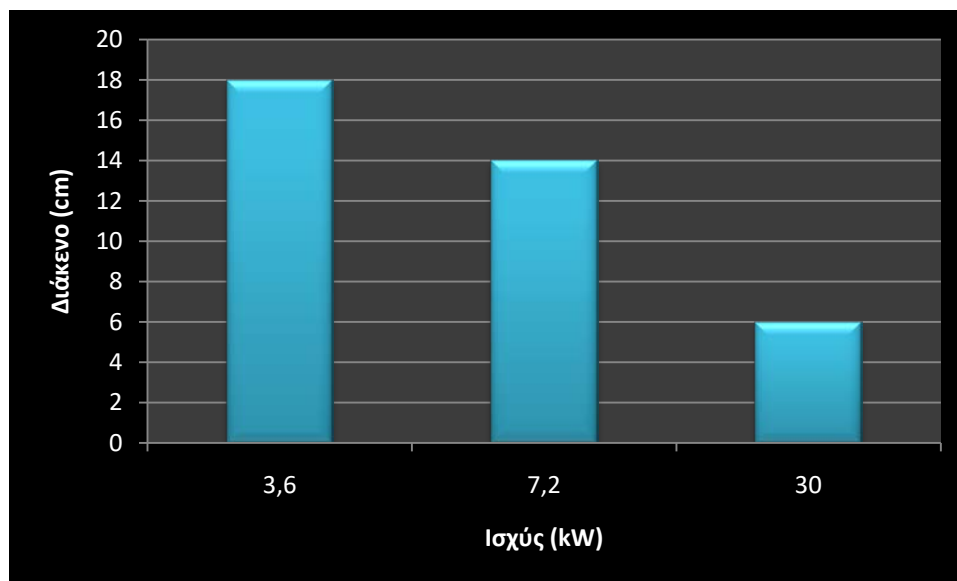
## 4.2 Μεταβολές διακένου

Πρώτο βήμα της μελέτης ήταν να προσομοιώσουμε διάφορα διάκενα, με στόχο να δούμε αν έχουμε μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με την DD μετά την εφαρμογή του έξτρα πηνίου. Ακολούθησε μελέτη για διάκενα 4cm-20cm (Σχήμα 4.2-1).



Σχήμα 4.2-1: Διάκενα επίτευξης ισχύος DDQ

Επειδή η μελέτη για το διάκενο έγινε σε πλήρες ευθυγράμμιση του πρωτεύοντος με το δευτερεύον, στην ισχύ εξόδου είχαμε συνεισφορά μόνο από το DD πηνίο του δευτερεύοντος, ενώ το Q πηνίο έβγαζε μηδενική ισχύ. Άρα, βάσει της ισχύος εξόδου παρατηρήσαμε ότι σε σχέση με την κλασική DD διάταξη η ισχύς παραμένει σχεδόν σταθερή και τα κύρια επίπεδα ισχύος επιτυγχάνονται σε διάκενα με απόκλιση μόλις ενός εκατοστού σε σχέση με την DD διάταξη. Επιγραμματικά είχαμε τα 3,6kW στα 18cm, τα 7,2kW στα 14cm και τα 30kW στα 6cm (Σχήμα 4.2-2).



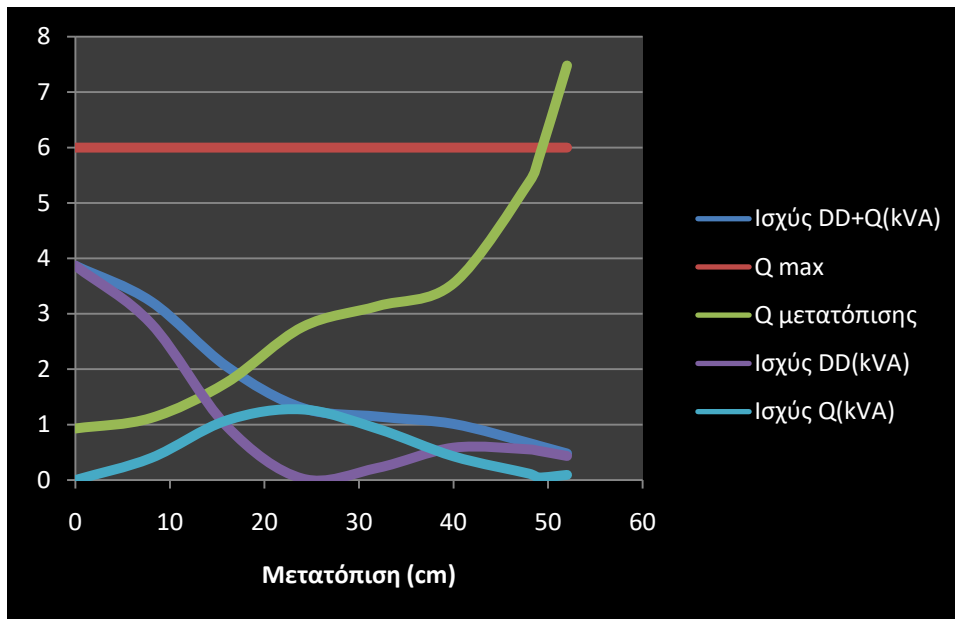
Σχήμα 4.2-2: Διάκενα επίτευξης επιλεγμένων επιπέδων ισχύος DDQ διάταξης

### 4.3 Ανοχή στην μετατόπιση

Για την μελέτη των ανοχών σε οριζόντια μετατόπιση ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, όπως και με την DD διάταξη, δηλαδή διατηρώντας ένα μέγιστο παράγοντα συντονισμού ίσο με 6. Η μόνη διαφορά είναι ότι στην συγκεκριμένη διάταξη η ισχύς προκύπτει ως άθροισμα δύο ισχύων (από το Q πηνίο και το συνδυασμό των DD πηνίων), οπότε στα διαγράμματα θα παρουσιάσουμε και τις δύο αυτές ισχύς, καθώς κρίθηκε ενδιαφέρον. Η μελέτη φυσικά έγινε στα τρία κύρια επίπεδα ισχύος και στα διάκενα στα οποία επιτεύχθηκαν όπως είδαμε προηγουμένως.

Αρχικά για τα 3,6kW με διάκενο 18cm παρουσιάζουμε το Σχήμα 4.3-1.



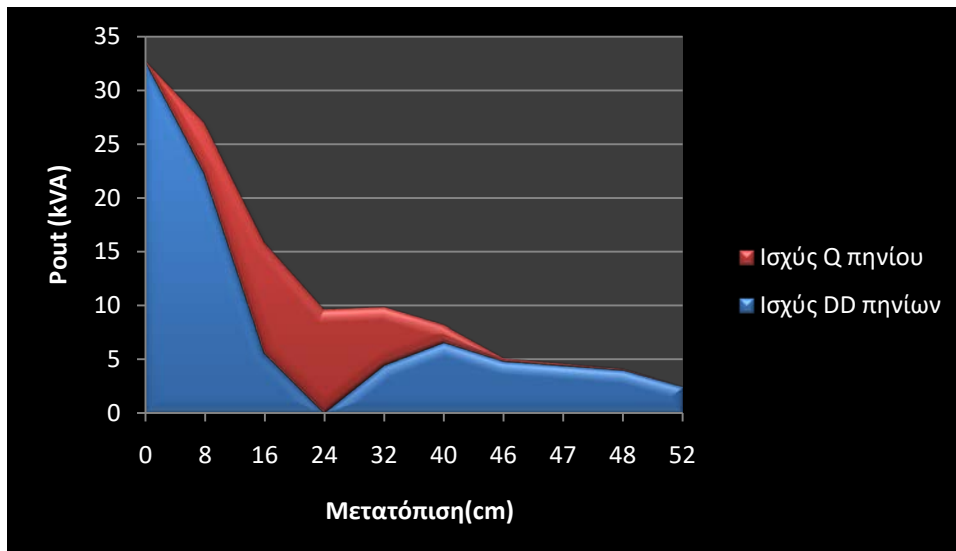


Σχήμα 4.3-1: Ανοχή στην μετατόπιση με  $Q_{\max}=6$  στα 3,6kW

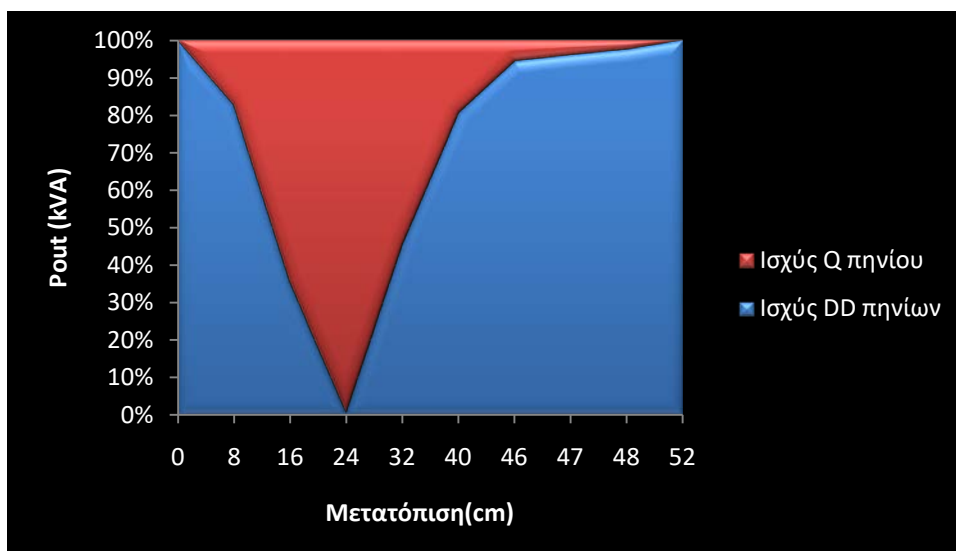
Παρατηρούμε μία σαφώς ανώτερη συμπεριφορά σε οριζόντιες μετατοπίσεις, καθώς εκεί που μία DD διάταξη παρουσίαζε ανοχή της τάξεως των 17cm, τώρα με την προσθήκη του έξτρα πηνίου και την καινούρια διάταξη που κατασκευάστηκε έχουμε μία ανοχή στα 49cm, που είναι σχεδόν τριπλάσια.

Αξίζει να δούμε λίγο πιο προσεκτικά το γράφημα, καθώς απεικονίζονται οι ισχύς κάθε πηνίου ξεχωριστά. Παρατηρούμε ότι στην πλήρη ευθυγράμμιση έχουμε το σύνολο της ισχύος εξόδου από τα πηνία της DD και ενώ μεγαλώνει η οριζόντια μετατόπιση του δευτερεύοντος τόσο μικραίνει και η ισχύς από τα DD πηνία. Αυτό το γεγονός όμως έρχεται και το υπερκαλύπτει το Q πηνίο, που ενώ στην αρχή δίνει μηδενική έξοδο, όσο μεγαλώνει η μετατόπιση μεγαλώνει και η συνεισφορά του. Όλα αυτά συμβαίνουν μέχρι να φτάσουμε σε ένα σημείο, στο οποίο η συνεισφορά της DD μηδενίζεται και το σύνολο της ισχύος προέρχεται από το Q πηνίο. Το γεγονός αυτό πραγματοποιείται σε μία οριζόντια μετατόπιση 24cm. Από εκεί και ύστερα το Q πηνίο αρχίζει να μειώνει την ισχύ του, ενώ τα πηνία της DD αυξάνουν την ισχύ τους αλλά σε επίπεδα που δεν μπορούν να διατηρήσουν το σύνολο της διάταξης σε επιθυμητά πλαίσια ισχύος. Ο παράγοντας συντονισμού φτάνει στα όριά του και η ισχύς μπορεί να διατηρηθεί σταθερή μέχρι μία οριζόντια μετατόπιση της τάξεως των 49cm.

Για να διαπιστώσουμε ακόμα πιο εύκολα την συμπεριφορά των πηνίων στις αλλαγές της οριζόντιας μετατόπισης παρουσιάζουμε δύο διαγράμματα, εκ των οποίων το Σχήμα 4.3-2 δείχνει την συμπεριφορά των πηνίων σε kVA, ενώ το Σχήμα 4.3-3 μας δείχνει το ποσοστό σε κάθε μετατόπιση της συνεισφοράς του κάθε πηνίου στην συνολική ισχύ εξόδου της διάταξης.

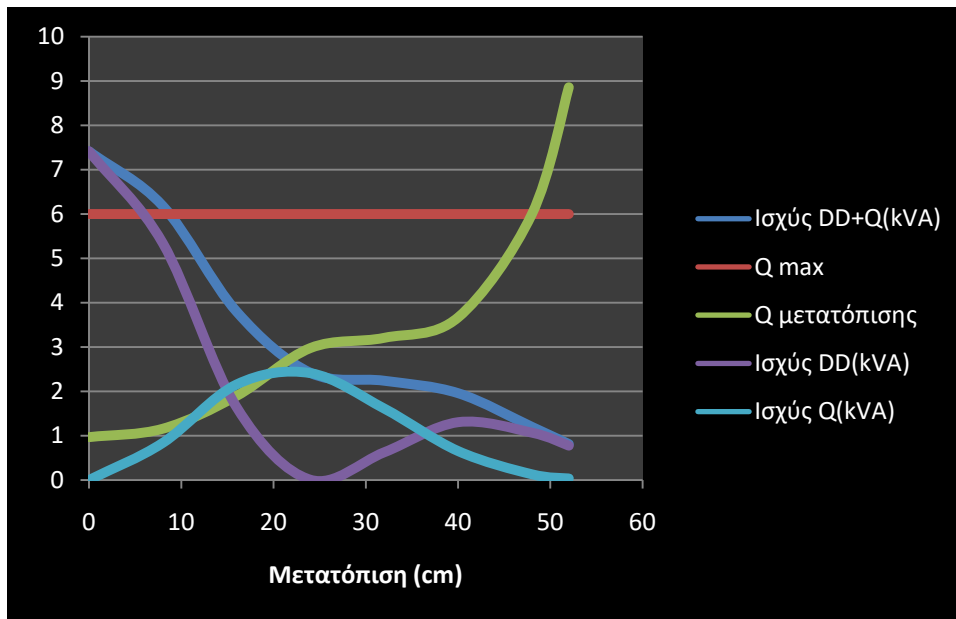


Σχήμα 4.3-2: Ισχύς εκάστοτε πηνίου σε μεταβολές μετατοπίσεων

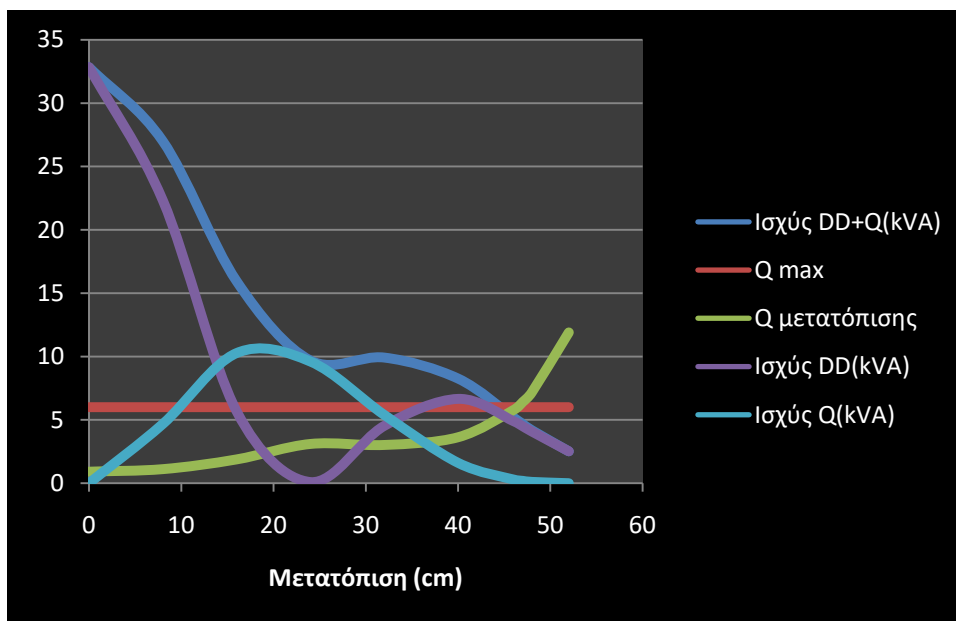


Σχήμα 4.3-3: Ποσοστό ισχύος εκάστοτε πηνίου επί της συνολικής

Την ίδια ακριβώς συμπεριφορά, σε όλα τα επιμέρους μεγέθη, εμφανίζει η διάταξη και στα άλλα δύο επίπεδα ισχύος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα 7,2kW που δίνουν μία μέγιστη οριζόντια μετατόπιση ίση με 48cm (Σχήμα 4.3-4) και τα 30kW, που εμφανίζουν μέγιστη ανοχή στα 46cm (Σχήμα 4.3-5). Παρατηρήσαμε επίσης, ότι το σημείο αλλαγής συμπεριφοράς και μηδενισμού της προσφοράς των πηνίων της DD παρέμεινε σταθερό στα 24cm. Αξίζει να σημειωθεί, ότι και στην περίπτωση της DDQ διάταξης, η ανεκτικότητα στη μετατόπιση δε φαίνεται να εξαρτάται από το επίπεδο της μεταφερόμενης ισχύος και το διάκενο. Πιο συγκεκριμένα για τη μεταφορά ισχύος ίσης με 3.6kW, 7.2kW ή 30kW (και αντίστοιχα διάκενο 18, 14, 6cm) η ανεκτικότητα στη μετατόπιση κυμαίνεται μεταξύ 46 και 49cm.



Σχήμα 4.3-4: Ανοχή στην μετατόπιση στα 7,2kW



Σχήμα 4.3-5: Ανοχή στην μετατόπιση στα 30kW

#### 4.4 Μέγεθος διάταξης

Στη συνέχεια της μελέτης μας στόχος είναι να μελετήσουμε τη συμπεριφορά μίας διάταξης DDQ με διαφοροποιημένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Για την επίτευξη του στόχου μας διαλέξαμε να μελετήσουμε άλλες δυο διατάξεις, εκ των οποίων η μία να είναι

προσεγγιστικά μιάμιση φορά μικρότερη και η άλλη μιάμιση φορά μεγαλύτερη της αρχικής σχεδίασης.

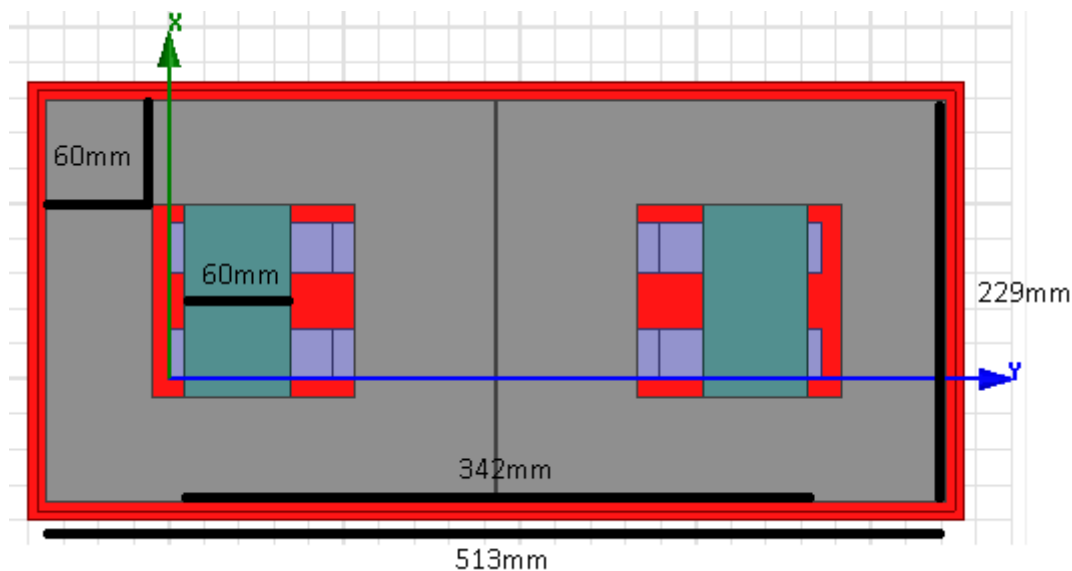
Η μελέτη βασίστηκε στις διαφοροποιήσεις, που έγιναν πάνω στην DD διάταξη και σύμφωνα με τις αλλαγές που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μόνη διαφορά πλέον, είναι η προσθήκη του έξτρα πηνίου στο δευτερεύον της διάταξης.

#### 4.4.1 Μικρότερη DDQ διάταξη

Για τον σχεδιασμό της μικρότερης διάταξης τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως το ολικό μέγεθος (229\*513mm) διατηρήθηκαν σταθερά, σε σχέση με της DD διάταξης χάριν της συγκρίσεως. Η μόνη αλλαγή που εμφανίστηκε είναι το πηνίο Q στο δευτερεύον, το οποίο σχεδιάστηκε βάσει αναλογιών, που είχε σε σχέση με τα DD πηνία στην κανονική τους διάσταση λόγω ελλείψεως αναφορών.

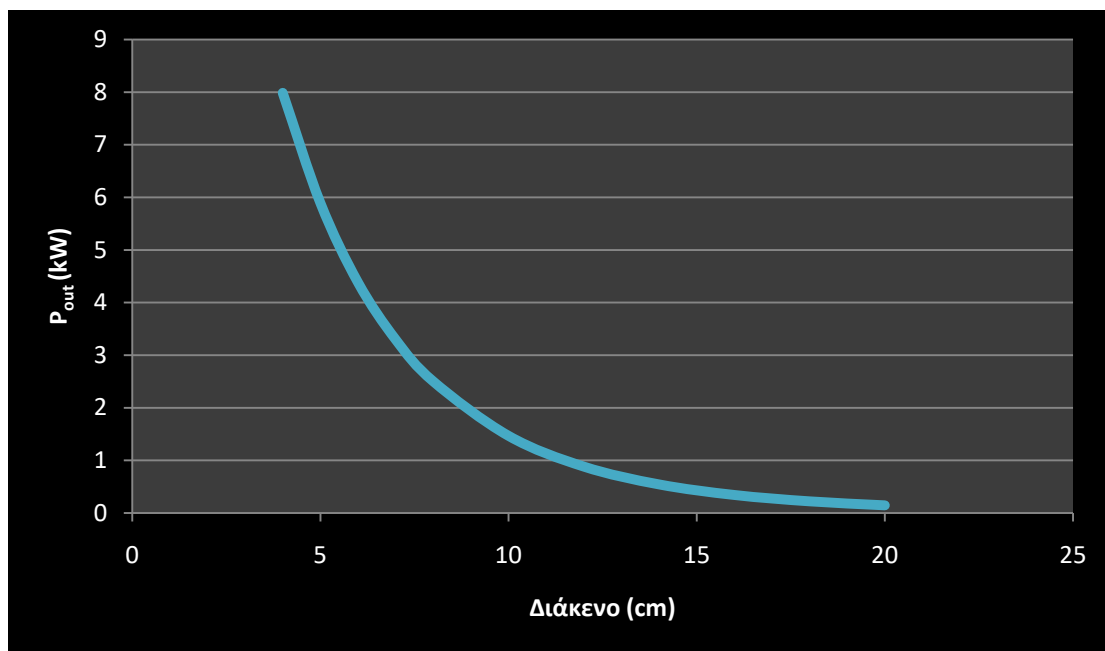
Ειδικότερα το πάχος του Q πηνίου επιλέχθηκε περιμετρικά στα 60mm, καθώς επιθυμούσαμε να εφαρμόσουμε καλώδιο 15στροφών. Άρα, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται στις αναφορές [20][22][23] το Q πηνίο κατασκευάστηκε ίσο με 229\*342mm.

Έχοντας πλέον σχεδιάσει στο Σχήμα 4.4-1 μία μικρότερη DDQ διάταξη, θα εφαρμόσουμε την ίδια μελέτη, σε ότι αναφορά τα επίπεδα ισχύος ανάλογα με το διάκενο, αλλά και τον έλεγχο στις ανοχές των μετατοπίσεων για τα τρία κύρια επίπεδα ισχύος.



Σχήμα 4.4-1: Μικρότερος DDQ συζεύκτης από τον αρχικό

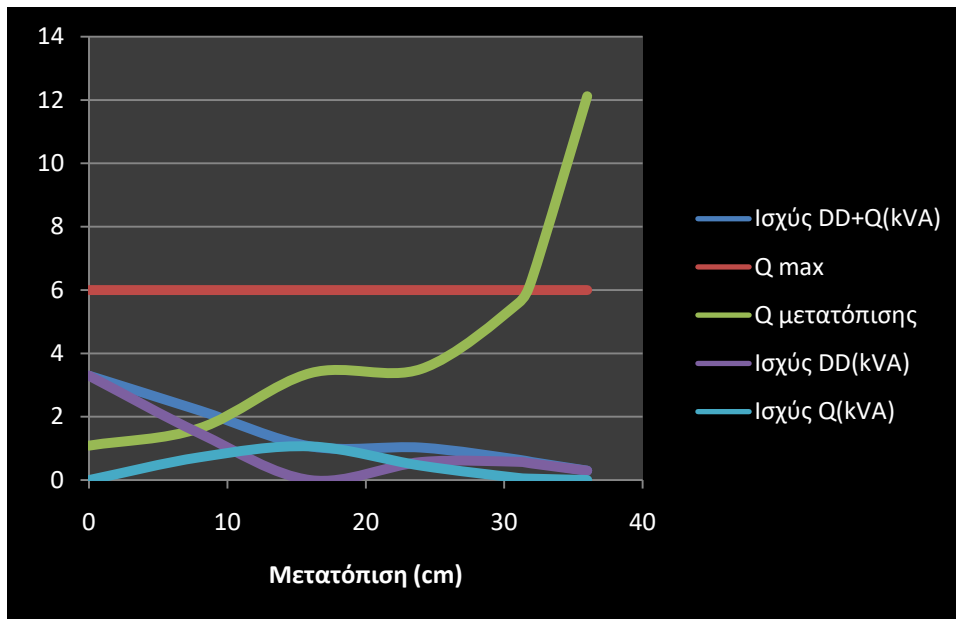
Για το διάκενο μελετήθηκαν αποστάσεις από 20cm έως 4 cm και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4-2.



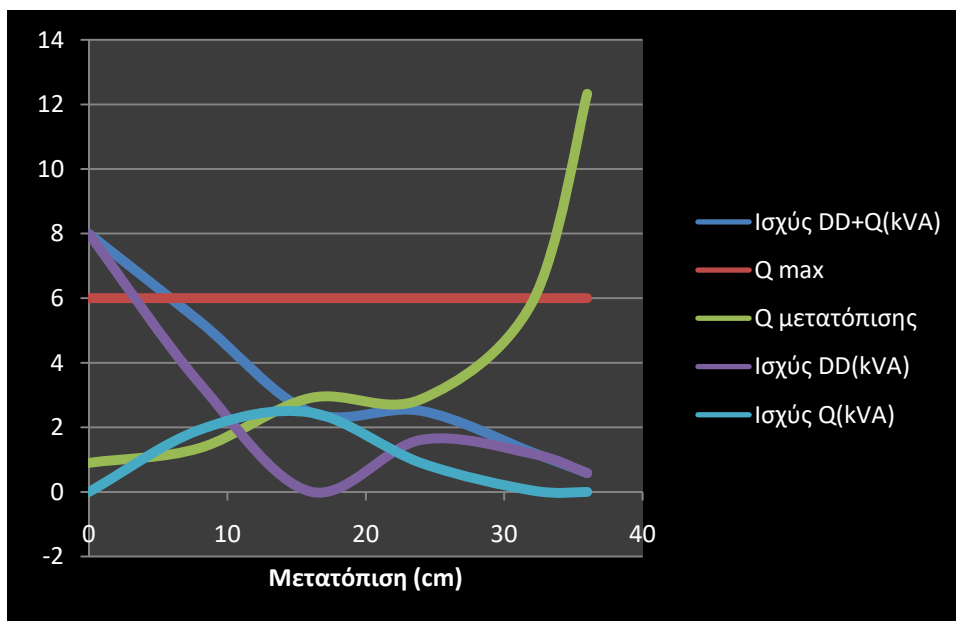
Σχήμα 4.4-2: Διάκενα επίτευξης ισχύος μικρότερης DDQ

Παρατηρούμε ότι, όπως και στην DD διάταξη, το μέγεθος της διάταξης την καθιστά ανίκανη να παράξει ισχύ γρήγορης φόρτισης (30kW). Ακόμα, όπως και στο αρχικό μέγεθος, η επίτευξη της ισχύος δεν επηρεάζεται από το έξτρα πηνίο που τοποθετήσαμε, για μηδενική μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Πιο συγκεκριμένα τα 3,6kW τα επιτυγχάνει στα 7cm, όπως και η DD διάταξη, ενώ τα 7,2kW τα επιτυγχάνει στα 4cm, μόλις ένα εκατοστό λιγότερο σε σχέση με την DD διάταξη.

Την ανοχή στη μετατόπιση τώρα μπορούμε να την μελετήσουμε στα δύο αυτά επίπεδα ισχύος. Άρα για τα 3,6kW παρατηρούμε στο Σχήμα 4.4-3, μία ανοχή της τάξεως των 31cm, ενώ για τα 7,2kW παρατηρούμε στο Σχήμα 4.4-4, μία παραπλήσια ανοχή σε μετατόπιση ίση με 32cm. Και για αυτή τη διάταξη παρατηρούμε ότι η ανοχή στη μετατόπιση δε φαίνεται να εξαρτάται από το διάκενο και το επίπεδο ισχύος.



Σχήμα 4.4-3: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 3,6kW



Σχήμα 4.4-4: Ανοχή μικρότερης στην μετατόπιση στα 7,2kW

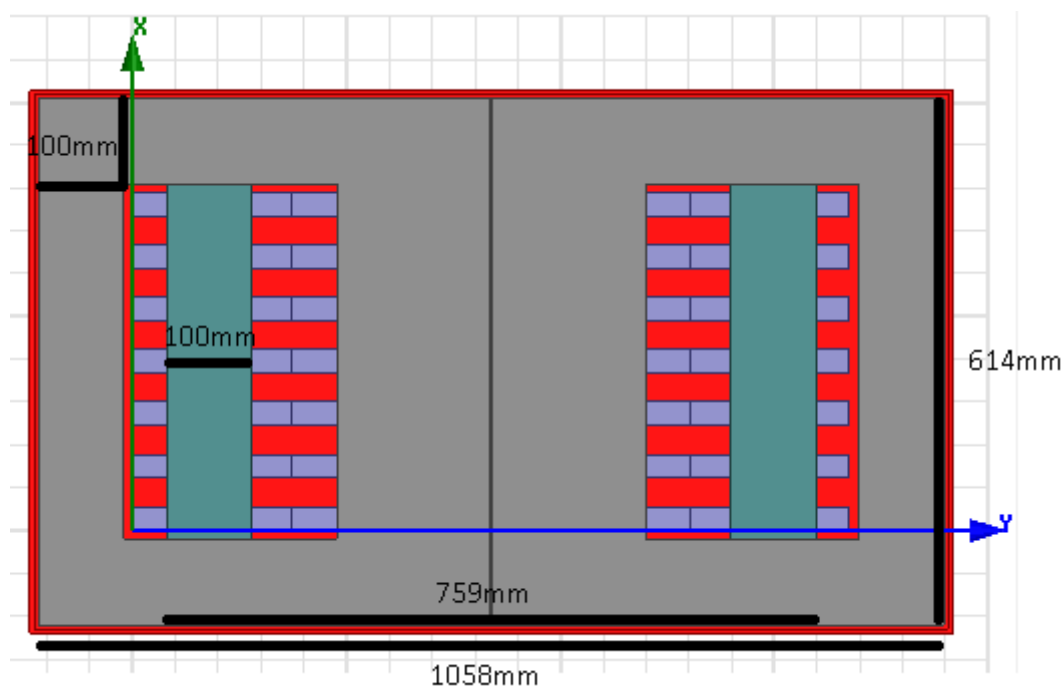
Σε αυτό το μέγεθος η διάταξη DDQ έχει πάλι τριπλάσια ανοχή στην μετατόπιση σε σύγκριση πάντα με την DD διάταξη. Επίσης παρατηρούμε ότι, με την μεταβολή στο μέγεθος της διάταξης μεταφέρθηκε και το σημείο μηδενισμού της ισχύος της DD και μεγιστοποίησης της ισχύος από το Q πηνίο στα 16cm, σε σχέση με τα 24cm που εμφανιζόταν στο αρχικό μέγεθος.

#### 4.4.2 Μεγαλύτερη DDQ διάταξη

Τελευταίο βήμα και για αυτή την διάταξη είναι ο σχεδιασμός μίας νέας, με μέγεθος περίπου μιάμισης φορές μεγαλύτερο από το αρχικό. Και εδώ βασιστήκαμε στο σχεδιασμό που κάναμε στο προηγούμενο κεφάλαιο και ειδικότερα για την μεγαλύτερη διάταξη DD (614\*1058mm) και απλά προσθέσαμε το Q πηνίο, αφού πρώτα το σχεδιάσαμε κατάλληλα.

Άρα διατηρήσαμε το πάχος περιμετρικά στο Q πηνίο στα 100mm, εφόσον αυτό επηρεάζεται άμεσα από τις στροφές του καλωδίου που τοποθετήσαμε και οι οποίες ορίστηκαν ίσες με 25. Για τον σχεδιασμό του Q πηνίου ακολουθήσαμε στην συνέχεια την ίδια διαδικασία, όπως και προηγουμένως, και βάση αναλογιών καταλήξαμε σε ένα μέγεθος πηνίου 614\*759mm.

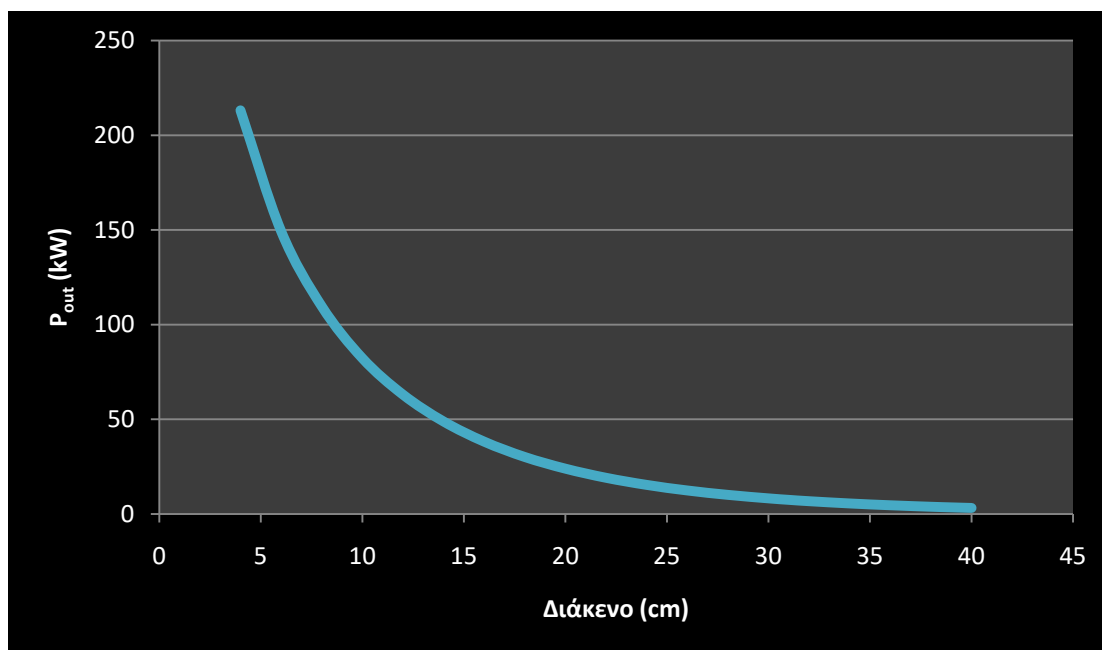
Έχοντας πλέον σχεδιάσει στο Σχήμα 4.4-5 μία μεγαλύτερη DDQ διάταξη, θα εφαρμόσουμε την ίδια μελέτη σε ότι αναφορά τα επίπεδα ισχύος ανάλογα με το διάκενο, αλλά και τον έλεγχο στις ανοχές των μετατοπίσεων για τα τρία κύρια επίπεδα ισχύος.



Σχήμα 4.4-5: Μεγαλύτερος DDQ συζεύκτης από τον αρχικό

Για το διάκενο τώρα μελετήθηκαν αποστάσεις, από 4cm έως 40cm και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4-6. Όπως παρατηρούμε η συμπεριφορά της διάταξης είναι η αναμενόμενη βάσει αυτών που εξάγαμε νωρίτερα για τα άλλα δύο μεγέθη DDQ διατάξεων. Δηλαδή το Q πηνίο δεν επηρεάζει την ισχύ εξόδου σχεδόν καθόλου αναφορικά με το διάκενο, καθώς η ισχύς επιτυγχάνεται σε διάκενα που αποκλίνουν μόλις ένα εκατοστό σε σχέση με την DD μεγάλη διάταξη. Ειδικότερα τα 3,6kW επιτυγχάνονται

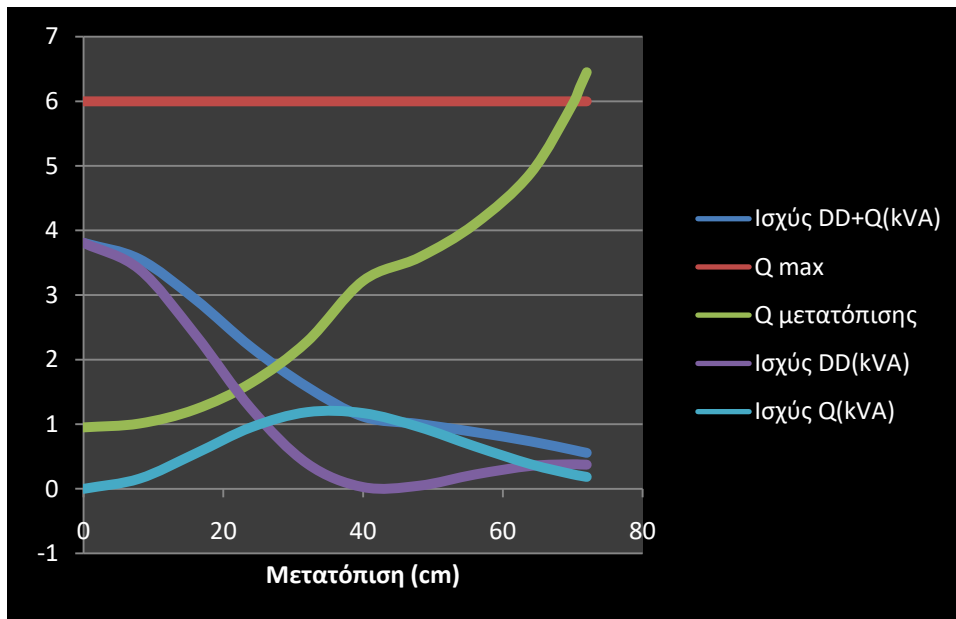
στην DDQ διάταξη στα 38cm, σε σχέση με τα 39cm στην αντίστοιχη DD διάταξη. Επίσης τα 7,2kW τα συναντούμε στα 31cm και τα 30kW της γρήγορης φόρτισης στα 18cm.



Σχήμα 4.4-6: Διάκενα επίτευξης ισχύος μεγαλύτερης DDQ

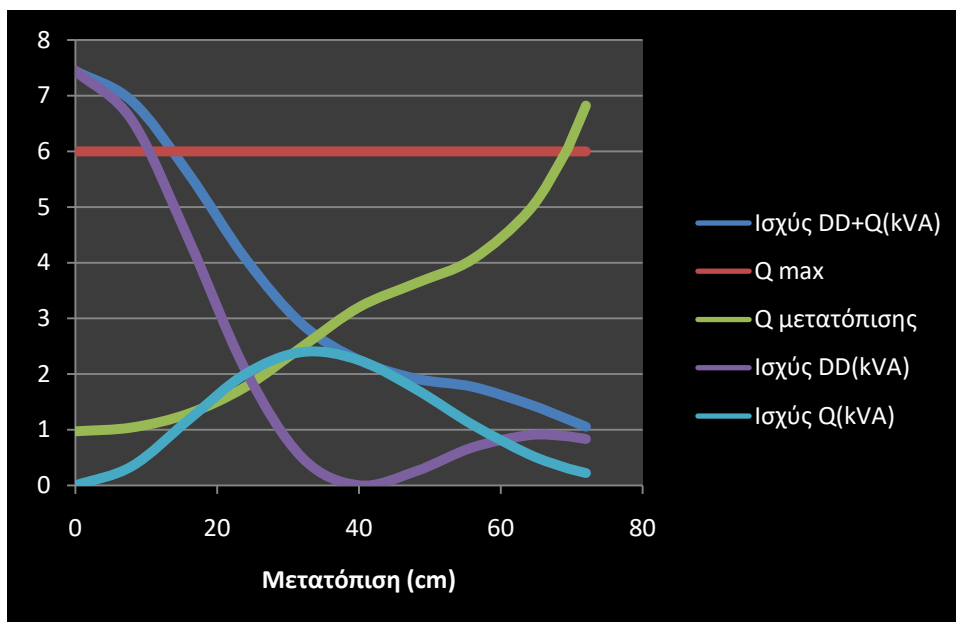
Στην συνέχεια μελετήσαμε την ανοχή στην μετατόπιση, για τα τρία κύρια επίπεδα ισχύος. Αρχικά έχουμε τα 3,6kW (Σχήμα 4.4-7), όπου και παρατηρούμε μία αξιοσημείωτη μεγαλύτερη ανοχή στην μετατόπιση, από την αρχική DDQ διάταξη. Εμφανίζει ανοχή σε οριζόντια μετατόπιση στα 70cm, σε σχέση με τα 49cm της αρχικής. Επίσης και το σημείο μηδενισμού της ισχύος της DD και της μεγιστοποίησης της ισχύος του Q πηνίου μεταφέρθηκε και αυτή την φορά αυξήθηκε, από τα 24cm της αρχικής DDQ στα 40cm.





Σχήμα 4.4-7: Ανοχή μεγαλύτερης στην μετατόπιση στα 3,6kW

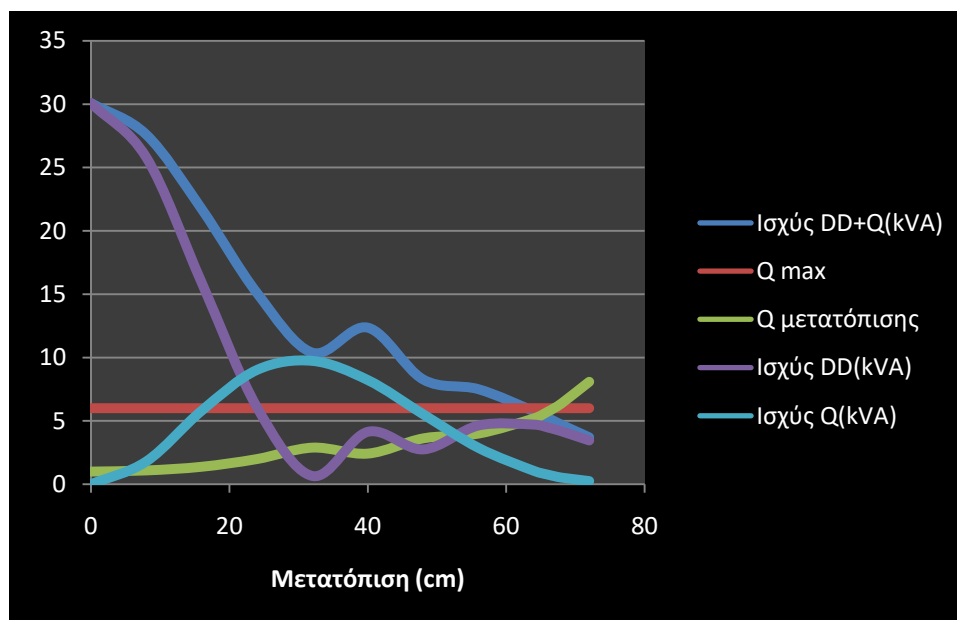
Στα 7,2kW με τα 31cm διάκενο (Σχήμα 4.4-8), η ανοχή στην μετατόπιση εξακολουθεί να είναι ανώτερη της αρχικής DDQ διάταξης, καθώς είναι αυξημένη κατά 21cm. Σε σύγκριση πάλι με την DD μεγάλη διάταξη παρατηρούμε μία αύξηση της ανοχής από 27cm στα 69cm.



Σχήμα 4.4-8: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 7,2kW

Την ίδια ακριβώς επίδραση από την αύξηση του μεγέθους της διάταξης παρατηρούμε και στο Σχήμα 4.4-9, όπου στα 30kW έχουμε μία ανοχή στην μετατόπιση 66cm, αυξημένη

κατά 20cm από την ανοχή της αρχικής μας DDQ διάταξης. Σε σχέση με την DD μεγάλη διάταξη τώρα η DDQ στο ίδιο διάκενο (18cm) είναι σε θέση να μεταφέρει σταθερή ισχύ εξόδου κατά 31cm περισσότερα σε οριζόντια μετατόπιση.



Σχήμα 4.4-9: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 30kW

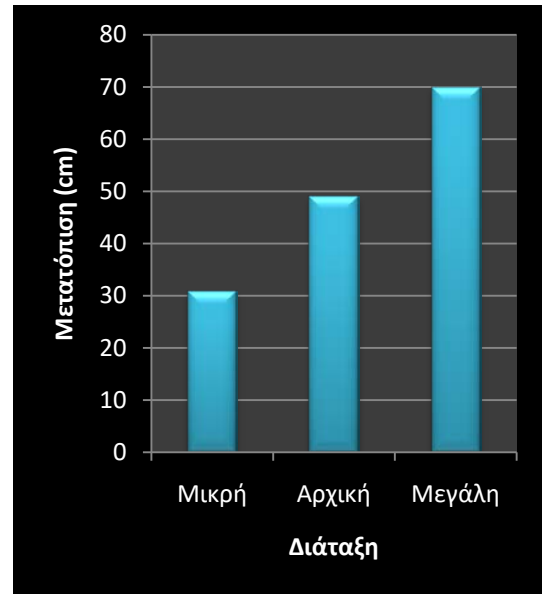
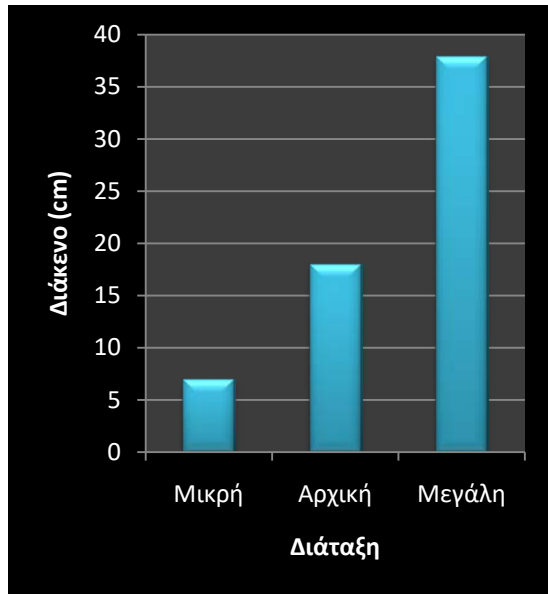
Σε αυτό το σημείο έχοντας πλέον ολοκληρώσει τις προσομοιώσεις και την μελέτη, για τις διατάξεις DD και DDQ για τρία διαφορετικά μεγέθη και για τα τρία κύρια επίπεδα ισχύος, μπορούμε να εξάγουμε έναν πιο ολοκληρωμένο σχολιασμό.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για όλες τις διατάξεις φαίνονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα DDQ διάταξης

Διάταξη	Αριθμός ράβδων φερρίτη	Όγκος τυλιγμάτων (cm <sup>3</sup> )	Ισχύς	Ανοχή σε μετατόπιση(cm)	Διάκενο (cm)
Μικρή	16	957,6	3.6kW	31	7
			7.2kW	32	4
			30kW	-	-
Αρχική	48	2045,6	3.6kW	49	18
			7.2kW	48	14
			30kW	46	6
Μεγάλη	126	4484	3.6kW	70	38
			7.2kW	69	31
			30kW	66	18

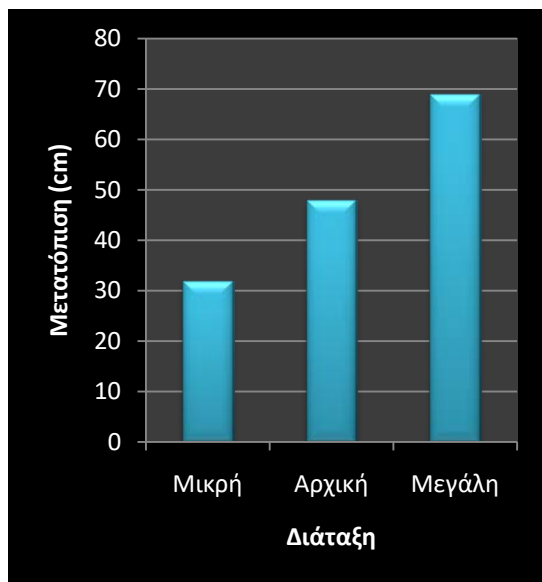
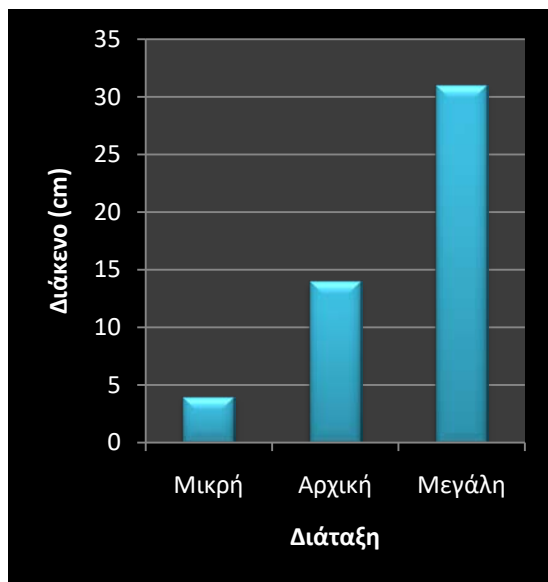
Συνοπτικά για την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους για την μεταφορά συγκεκριμένης ισχύος παρουσιάζονται τα ακόλουθα σχήματα:



(α)

(β)

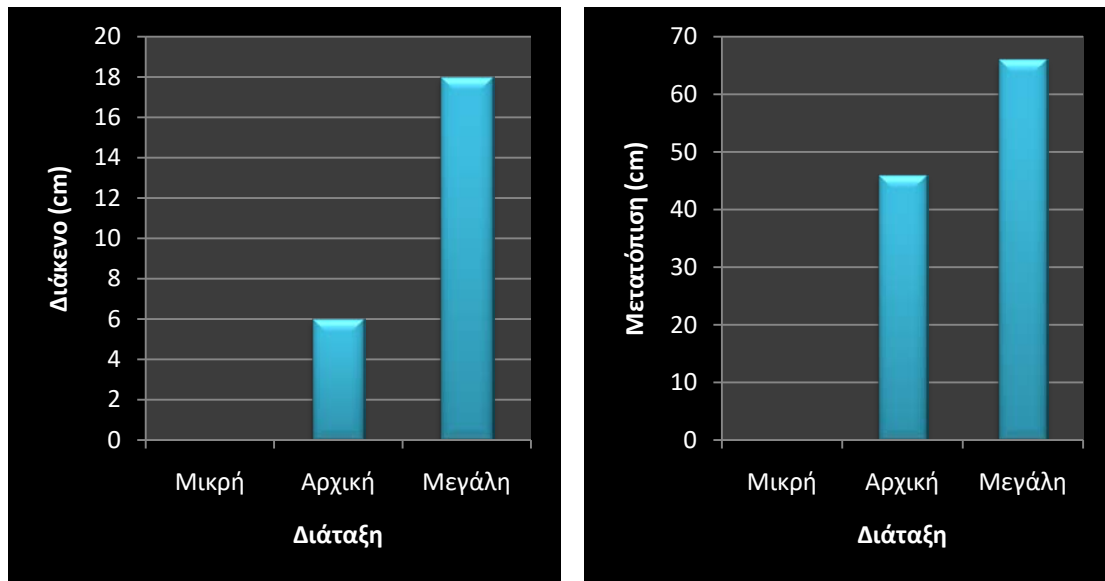
Σχήμα 4.4-10: (α) διάκενο και (β) ανοχή σε μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 3.6kW



(α)

(β)

Σχήμα 4.4-11: (α) διάκενο και (β) ανοχή σε μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 7.2kW.



(α)

(β)

Σχήμα 4.4-12: (α) διάκενο και (β) ανοχή σε μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 30kW.

Μία αύξηση του διακένου για τη μεταφορά δεδομένης ισχύος είναι δυνατό να επιτευχθεί, αυξάνοντας τις διαστάσεις της διάταξης. Για παράδειγμα για την επίτευξη μίας ισχύος ίσης με 7.2kW, είναι φανερό στο Σχήμα 4.4-11 ότι μία μικρή διάταξη απαιτεί ένα διάκενο 4cm, μία ενδιάμεση ένα διάκενο 14cm, ενώ μία ακόμα μεγαλύτερη διάταξη καταφέρνει να επιτύχει την ίδια μεταφορά ισχύος, αυξάνοντας σημαντικά το διάκενο σε 31cm. Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και για τα υπόλοιπα εξεταζόμενα επίπεδα ισχύος (Σχήμα 4.4-10 και Σχήμα 4.4-12).

Εκτός από την αύξηση του διακένου μία μεγαλύτερου μεγέθους διάταξη επιτυγχάνει επίσης και μία αύξηση στην ανοχή ως προς τη μετατόπιση. Για παράδειγμα για τη μεταφορά μίας ισχύος ίσης με 30kW (Σχήμα 4.4-12) μία ενδιάμεση διάταξη έχει μία ανοχή σε μετατόπιση ίση με 46cm, ενώ μία μεγάλη διάταξη έχει μία σημαντικά αυξημένη ανοχή σε μετατόπιση ίση με 66cm. Συνοπτικά, η ανοχή σε μετατόπιση που παρουσιάζει μια διάταξη DDQ, είναι περίπου 60-66% του μήκους της (Υ άξονας στο Σχήμα 3.3-1).

Προσθέτοντας στο δευτερεύον ένα έξτρα πηνίο Q, έχει ως μοναδικό αποτέλεσμα την αύξηση της ανοχής σε μετατοπίσεις και όχι την αύξηση της ισχύος σε απόλυτη ευθυγράμμιση.

Στην οριζόντια μετατόπιση τώρα, με αυτό το έξτρα πηνίο κατορθώνουμε να πετύχουμε ανοχές της τάξεως του 60-66% του συνολικού μήκους της διάταξης, σε σύγκριση με το 20-27%, που είχε μία απλή DD διάταξη. Στις περισσότερες εφαρμογές της DDQ διάταξης δηλαδή είχαμε τριπλάσια ανοχή στην μετατόπιση σε σύγκριση με την DD διάταξη. Τέλος δεν πρέπει να ξεχνάμε όμως, ότι με την εφαρμογή του έξτρα πηνίου, αυξάνουμε τη χρήση του καλωδίου Litz. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι για μία διάταξη ενδιάμεσου μεγέθους, στην περίπτωση της κατασκευής DD απαιτείται ένας όγκος τυλιγμάτων ίσος με 1684cm<sup>3</sup>, ενώ η προσθήκη ενός επιπλέον Q πηνίου απαιτεί 21,5% περισσότερο όγκο τυλιγμάτων.

## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Διάταξη BP

Η διάταξη BP χρησιμοποιεί δύο επικαλυπτόμενα πηνία. Σε αυτή την ενότητα σκοπός μας είναι να αναλύσουμε την λειτουργία μια διάταξης BP σε βασικές μεταβολές διακένου και μετατόπισης, καθώς και να μελετήσουμε με ποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά η διάταξη επιτυγχάνει τα επιθυμητά επίπεδα ισχύος. Παράλληλα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα μίας διάταξης BP με τις DD και DDQ διατάξεις. Για την υλοποίηση του στόχου τα βασικά μεγέθη μιας τέτοιας διάταξης εξήχθησαν από την αναφορά [23].

### 5.1 Περιγραφή της BP διάταξης

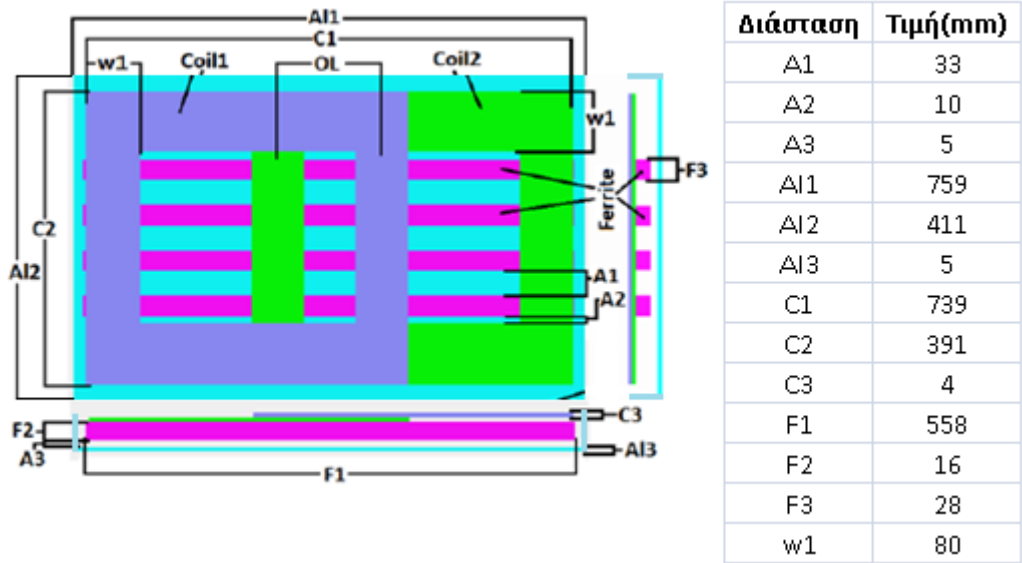
Ο σχεδιασμός ενός BP συζεύκτη αποτελείται από δύο πανομοιότυπα μερικώς επικαλυπτόμενα και αμοιβαία αποσυνδεδεμένα πηνία (Σχήμα 5.1-1). Τα πηνία αυτά τοποθετούνται πάνω σε μία διάταξη φερριτών. Η διάταξη των φερριτών, που χρησιμοποιήθηκε, είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που είχαμε στις δύο προηγούμενες διατάξεις και η επιλογή αυτή έγινε για χάρη της σύγκρισής τους.

Η επικάλυψη μεταξύ των δύο πηνίων έχει σχεδιαστεί έτσι, για να διασφαλίσει τη μηδενική (όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι πρακτικά δυνατόν) αμοιβαία σύζευξη μεταξύ τους. Αυτή η αμοιβαία αποσύνδεση μεταξύ των δύο πηνίων επιτρέπει στα πηνία της BP, να ελέγχονται ανεξάρτητα [23].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, σχεδιάζουμε το δευτερεύον της διάταξης, καθώς να υπενθυμίσουμε ότι το πρωτεύον είναι το DD rad που χρησιμοποιήθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια. Το συνολικό μέγεθος της διάταξης διατηρήθηκε σταθερό (391\*739mm), όπως και ο σχηματισμός των φερριτών N87 (4\*6). Βάσει αυτών, η θωράκιση αλουμινίου που προκύπτει, είναι η ίδια σε διαστάσεις με τη θωράκιση μίας DDQ διάταξης. Η φορά και η τιμή του ρεύματος και της συχνότητας διατηρήθηκαν σταθερά και εδώ.

Τα πηνία σχεδιάστηκαν με πάχος 80mm, εφόσον εφαρμόσαμε 20 στρόφες καλωδίου Litz. Άρα το μόνο ερώτημα ήταν η θέση τους και το μέγεθος καθενός πηνίου. Για να απαντηθεί αυτό στηριχθήκαμε στο ότι και τα δύο πηνία θα πρέπει να είναι απολύτως αποσυνδεδεμένα (ιδανικά) ή η σύζευξη θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή, για να θεωρείται ασήμαντη από πρακτική άποψη. Άρα η θέση στην οποία η ελάχιστη αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των δύο πηνίων επιτυγχάνεται, μπορεί επίσης να διασφαλίζεται με τον υπολογισμό της επικάλυψης (διάσταση OL στο Σχήμα 5.1-1) στη συγκεκριμένη θέση.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.1-1 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι διαστάσεις του BP συζεύκτη, πέρα από την επικάλυψη και το μέγεθος του κάθε πηνίου.

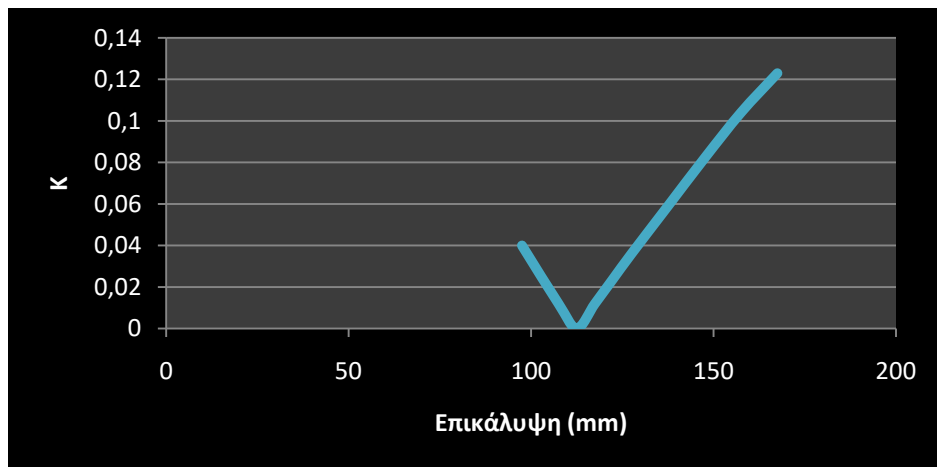


Σχήμα 5.1-1:Αναλυτικό σχήμα δέκτη BP διάταξης [23]

Για τον υπολογισμό της επικάλυψης σχεδιάζουμε το δευτερεύον μόνο του, με μία αρχική διαστασοποίηση (στην περίπτωσή μας η αρχική επικάλυψη διαλέχτηκε 167,5mm) και στην συνέχεια πραγματοποιείται μία πληθώρα προσομοιώσεων, για την εξακρίβωση της κατάλληλης επικάλυψης που μηδενίζει τον συντελεστή σύζευξης. Ο συντελεστής σύζευξης υπολογίζεται από τον τύπο:

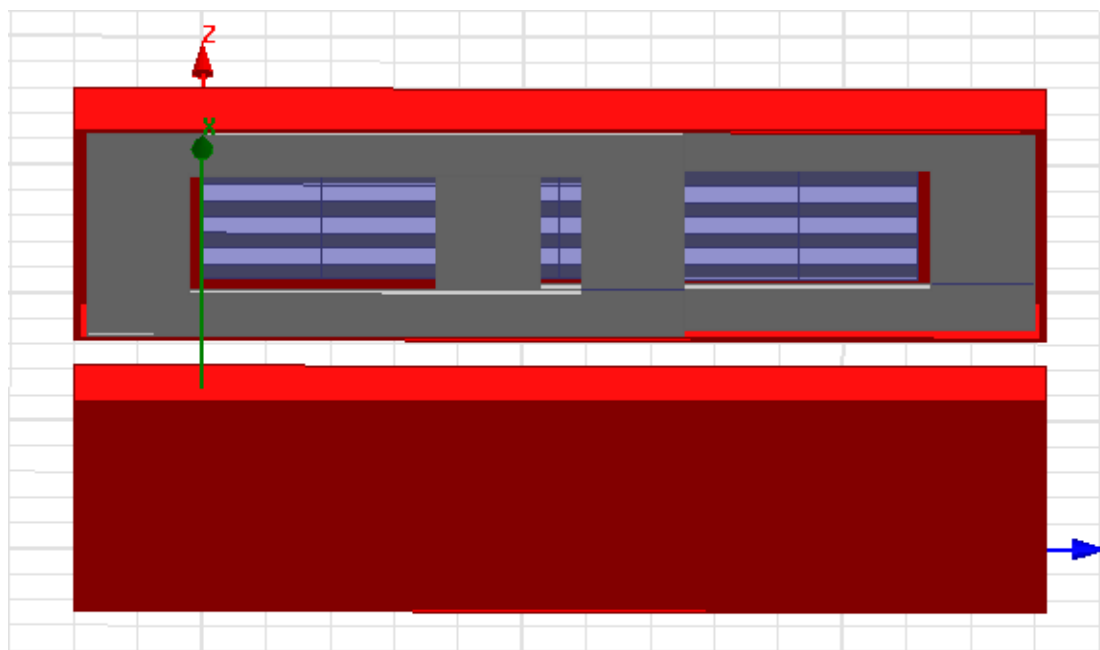
$$K = \frac{M}{\sqrt{L1} \times \sqrt{L2}}$$

Βάσει της μελέτης που έγινε (Σχήμα 5.1-2), καταλήξαμε σε μία επικάλυψη 112,5mm, στην οποία είχαμε σχεδόν μηδενικό συντελεστή.



Σχήμα 5.1-2: Επικάλυψη μηδενισμού συντελεστή σύζευξης

Έχοντας ολοκληρώσει και αυτόν τον υπολογισμό, έχουμε στη διάθεσή μας όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον σχεδιασμό της νέας διάταξης. Σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι βάσει του ποσού επικάλυψης, το κάθε πηνίο του BP rad προέκυψε 391\*465,75mm. Επίσης, για τον ορισμό των ρευμάτων στα δύο πηνία αφήσαμε το καθιερωμένο κενό ενός χιλιοστού ανάμεσά τους. Η BP διάταξη που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα, που χρησιμοποιήσαμε, και αποτελούταν από έναν DD συζεύκτη στο πρωτεύον και έναν BP συζεύκτη στο δευτερεύον της, απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1-3.



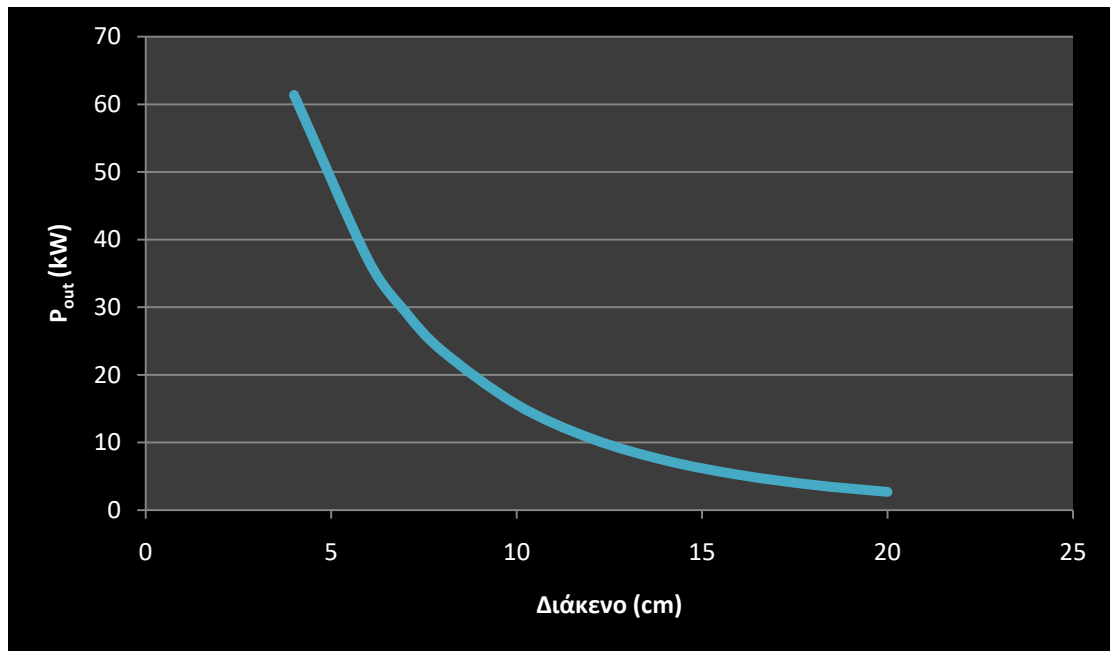
Σχήμα 5.1-3: Σχεδιασμός BP διάταξης στο Maxwell

Ο υπολογισμός της ισχύος και σε αυτή την διάταξη γίνεται με τον τύπο:

$$P_o = Q \cdot 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot I_1^2 \cdot M^2 / L_2$$

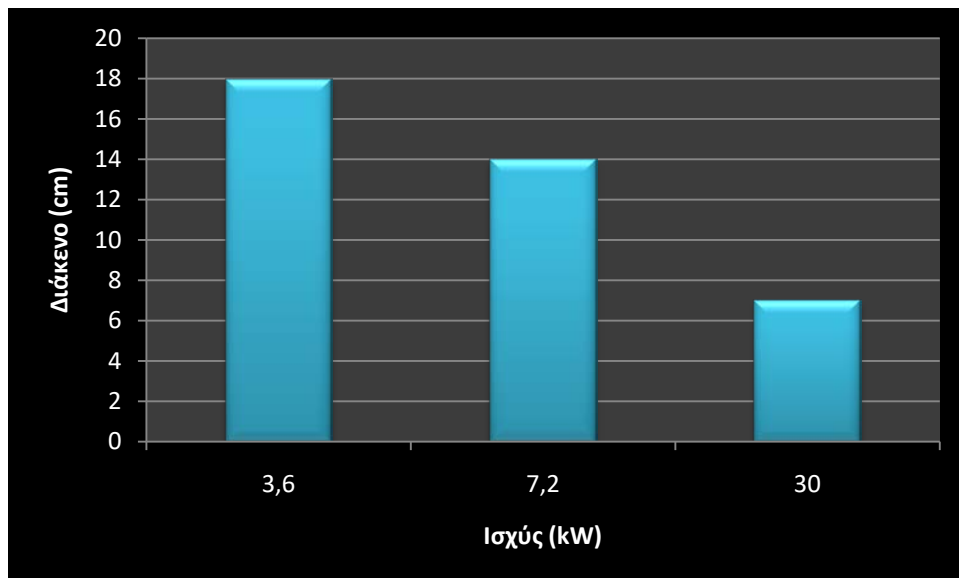
## 5.2 Μεταβολές διακένου

Το πρώτο βήμα, μετά τον σχεδιασμό της διάταξης στο πρόγραμμά μας, είναι ο υπολογισμός της ισχύος για διάκενα από 4cm έως 20cm με στόχο να διαπιστώσουμε την δύναμη ή την αδυναμία της νέας διάταξης στην επίτευξη μεγάλης ισχύος σε σχέση με τις προηγούμενες δύο. Οι υπολογισμοί απεικονίζονται στο Σχήμα 5.2-1. Να τονιστεί ότι, σε πλήρη ευθυγράμμιση του πρωτεύοντος με το δευτερεύον, και το αριστερό και το δεξί πηνίο είχαν ίση συνεισφορά στην συνολική ισχύ της διάταξης.



Σχήμα 5.2-1: Διάκενα επίτευξης ισχύος BP

Παρατηρούμε ότι, σε σχέση με μία DD διάταξη, η BP διάταξη δύναται να επιτυγχάνει τα τρία κύρια επίπεδα ισχύος στα ίδια διάκενα. Η μόνη αμελητέα απόκλιση είναι στα 3,6kW (18cm έναντι των 19cm της DD) (Σχήμα 5.2-2). Άρα οι διατάξεις DD, DDQ και BP δε διαφοροποιούνται στην ικανότητά τους να μεταφέρουν ισχύ όσον αφορά το διάκενο.



Σχήμα 5.2-2: Διάκενα επίτευξης επιλεγμένων επιπέδων ισχύος BP διάταξης

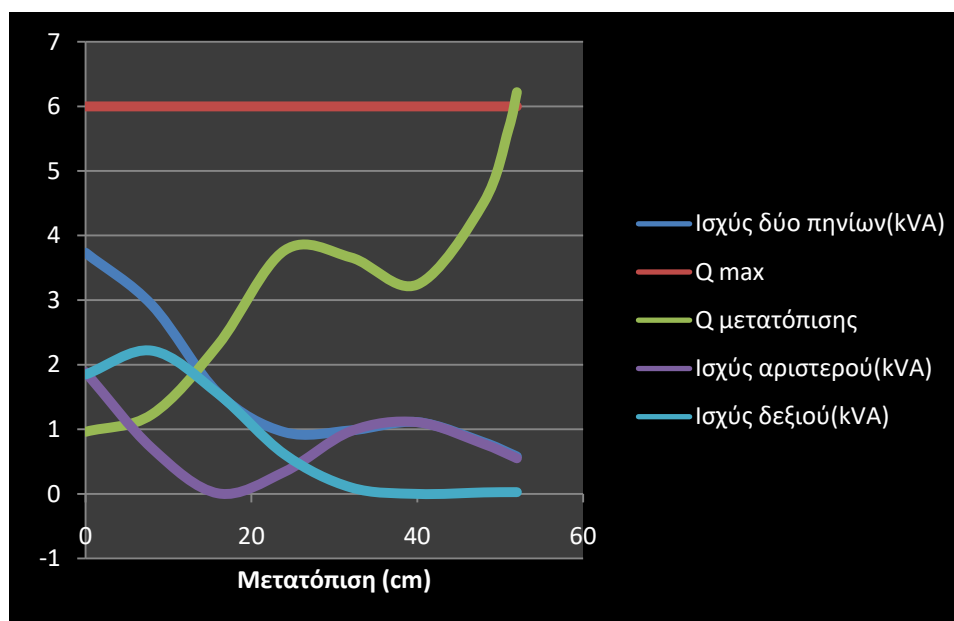


### 5.3 Ανοχή στην μετατόπιση

Αυτό που παίζει κύριο ρόλο στην εξαγωγή της καλύτερης διάταξης ανεξαρτήτου κόστους είναι η ανοχή που παρουσιάζουν στις οριζόντιες μετατοπίσεις, σημείο στο οποίο υπερτερεί μέχρι στιγμής η DDQ διάταξη.

Για την μελέτη των ανοχών σε οριζόντια μετατόπιση ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία, όπως και στις δύο προηγούμενες διατάξεις, δηλαδή διατηρώντας ένα μέγιστο παράγοντα συντονισμού ίσο με 6, είδαμε μέχρι πιο σημείο το σύστημα μπορεί να διατηρήσει σταθερή ισχύ. Η μόνη διαφορά είναι, ότι στην συγκεκριμένη διάταξη, η ισχύς προκύπτει ως άθροισμα των ισχύων του καθενός πηνίου του δευτερεύοντος, οπότε στα διαγράμματα θα παρουσιάσουμε και τις δύο αυτές ισχύς, καθώς κρίθηκε ενδιαφέρον. Η μελέτη φυσικά έγινε στα τρία κύρια επίπεδα ισχύος και στα διάκενα, στα οποία επιτεύχθηκαν από προηγουμένως.

Αρχικά παρουσιάζουμε στο (Σχήμα 5.3-1), την ανοχή στην μετατόπιση της διάταξής μας στο πρώτο επίπεδο ισχύος, δηλαδή στα 3,6kW και για ένα διάκενο 18cm.



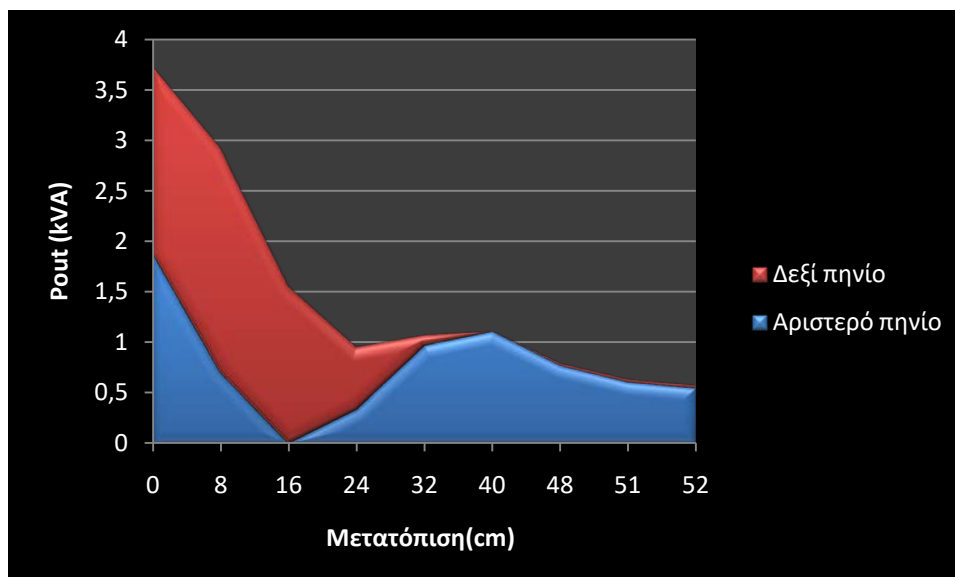
Σχήμα 5.3-1: Ανοχή στην μετατόπιση με  $Q_{\max}=6$  στα 3,6kW

Παρατηρούμε ότι, σε σχέση με την DDQ διάταξη, η BP είναι οριακά ανώτερη, καθώς εμφανίζει μία ανοχή της τάξεως των 51cm, σε αντιστοιχία με τα 49cm, που εμφάνισε η DDQ. Από την άλλη πλευρά και οι δύο αυτές διατάξεις είναι εμφανώς καλύτερες σε συμπεριφορά σε σχέση με την DD διάταξη (17cm).

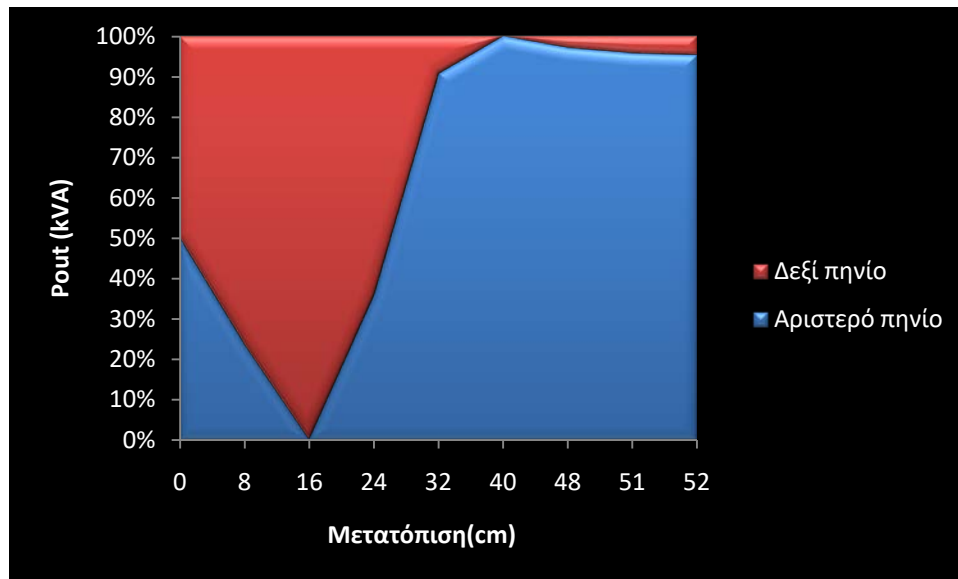
Σε αυτό το σημείο, αξίζει να παρατηρήσουμε και την συμπεριφορά του κάθε πηνίου του δευτερεύοντος ξεχωριστά. Αρχικά να τονιστεί, ότι όπως και στις προηγούμενες μελέτες

εξετάστηκε μόνο η οριζόντια μετατόπιση, ως προς τον άξονα Υ. Αρχικά σε πλήρη ευθυγράμμιση η συνεισφορά των πηνίων ήταν ισόποση. Αρχίζοντας όμως το δευτερεύον να κινείται προς τα δεξιά, τότε παρατηρούμε μία αύξηση της ισχύος του δεξιού πηνίου, με μία μείωση της ισχύος του αριστερού. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα μέχρι μία οριζόντια μετατόπιση ίση με 16cm. Σε αυτό το σημείο η ισχύς του αριστερού πηνίου μηδενίζεται. Έπειτα όμως συμβαίνει το αντίθετο, έχουμε μία αύξηση πλέον στο αριστερό πηνίο και μείωση στο δεξί, μέχρι που έχουμε τον πλήρη μηδενισμό της ισχύος του δεξιού σε απόσταση 40cm και τέλος την μεγιστοποίηση του παράγοντα συντονισμού, σε απόσταση 51cm, καθώς έχουμε συνεισφορά μόνο από το ένα πηνίο.

Για να διαπιστώσουμε ακόμα πιο εύκολα την συμπεριφορά των πηνίων στις αλλαγές της οριζόντιας μετατόπισης παρουσιάζουμε δύο διαγράμματα, εκ των οποίων το Σχήμα 5.3-2 δείχνει την συμπεριφορά των πηνίων σε kVA, ενώ το Σχήμα 5.3-3 μας δείχνει το ποσοστό σε κάθε μετατόπιση της συνεισφοράς του κάθε πηνίου στην συνολική ισχύ εξόδου της διάταξης.

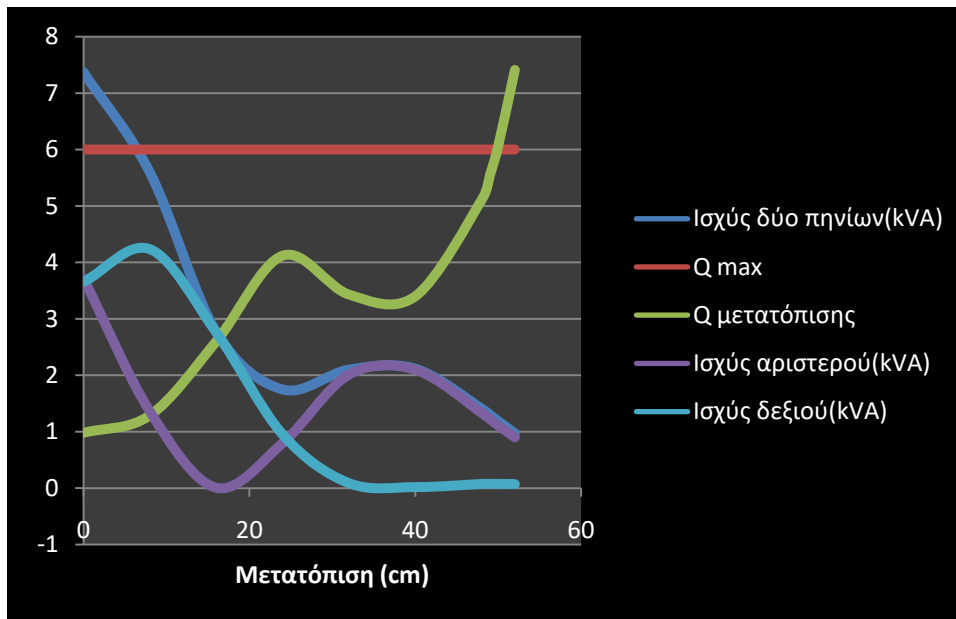


Σχήμα 5.3-2:Ισχύς εκάστοτε πηνίου σε μεταβολές μετατοπίσεων

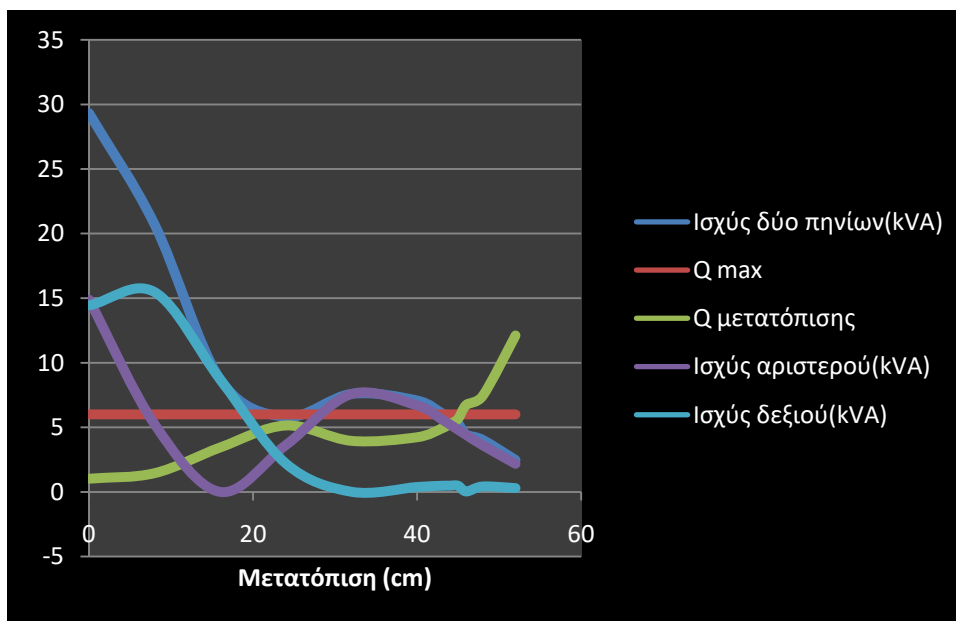


Σχήμα 5.3-3:Ποσοστό ισχύος εκάστοτε πηνίου επί της συνολικής

Την ίδια ακριβώς συμπεριφορά, σε όλα τα επιμέρους μεγέθη, εμφανίζει η διάταξη και στα άλλα δύο επίπεδα ισχύος. Δεν έχουμε καμιά αλλαγή, παρά μόνο την ελάχιστη μείωση αυτής της ανοχής στην μετατόπιση. Άλλωστε αυτό ήταν κάτι που αναμέναμε, αφού την ίδια συμπεριφορά είχαν και οι άλλες δύο διατάξεις όσο μεγάλωνε το επίπεδο ισχύος, που είναι αποτέλεσμα της μείωσης του διακένου. Στο Σχήμα 5.3-4 παρουσιάζεται η ανοχή στη μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 7,2kW σε ένα διάκενο 14cm, όπου φαίνεται ότι η μέγιστη ανεκτή οριζόντια μετατόπιση είναι ίση με 48cm. Σχετικά με τη μεταφορά ισχύος ίσης με 30kW σε ένα διάκενο ίσο με 7cm (Σχήμα 5.3-5), η μέγιστη ανοχή στη μετατόπιση είναι 46cm. Τέλος παρατηρήσαμε ότι, οι συνεισφορές των πηνίων στην εκάστοτε μετατόπιση δεν παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά, σε σχέση με το μικρότερο επίπεδο ισχύος που αναλύσαμε προηγουμένως.



Σχήμα 5.3-4: Ανοχή στην μετατόπιση στα 7,2kW



Σχήμα 5.3-5: Ανοχή στην μετατόπιση στα 30kW

#### 5.4 Μέγεθος διάταξης

Στην συνέχεια της μελέτης μας, στόχος ήταν να μελετήσουμε την συμπεριφορά μίας διάταξης DDQ με διαφοροποιημένο μέγεθος. Για την επίτευξη του στόχου μας διαλέξαμε να μελετήσουμε άλλες δυο διατάξεις, εκ των οποίων η μία να είναι προσεγγιστικά μιάμιση φορά μικρότερη και η άλλη μιάμιση φορά μεγαλύτερη της αρχικής σχεδίασης.

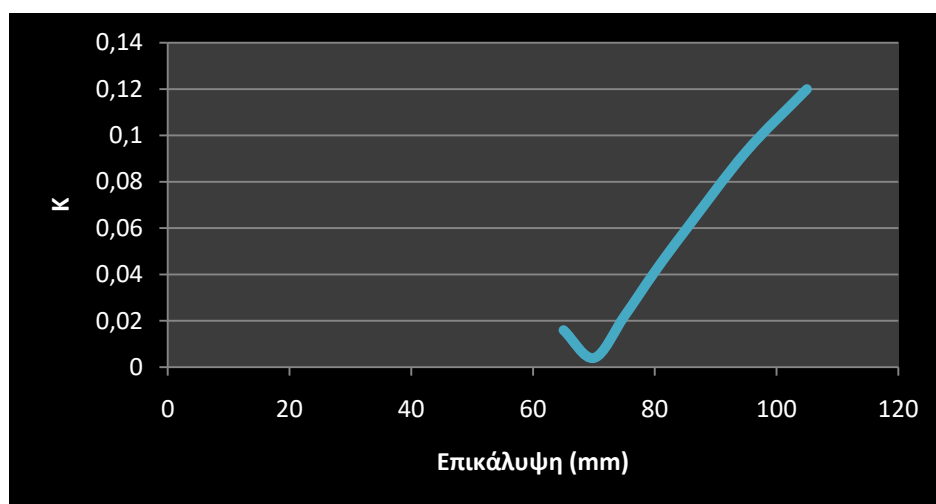
Στην μελέτη μας χρησιμοποιήσαμε τις αντίστοιχες διατάξεις DD, που σχεδιάσαμε στο τρίτο κεφάλαιο για το πρωτεύον. Για τον σχηματισμό του δευτερεύοντος τώρα, έχοντας διατηρήσει πάλι τις συνολικές διαστάσεις, καλούμαστε να σχεδιάσουμε τα δύο νέα πηνία για την BP διάταξη.

#### 5.4.1 Μικρότερη BP διάταξη

Έχοντας λοιπόν κρατήσει τις συνολικές διαστάσεις για μία διάταξη μικρότερη από την προηγούμενη (229\*513mm), πρέπει να προχωρήσουμε στο σχεδιασμό των πηνίων. Όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως ο αριθμός των φερριτών (4\*6 ράβδοι), το μέγεθος της θωράκισης αλουμινίου, τα ρεύματα και η συχνότητα, είναι όμοια με αυτά της DDQ διάταξης.

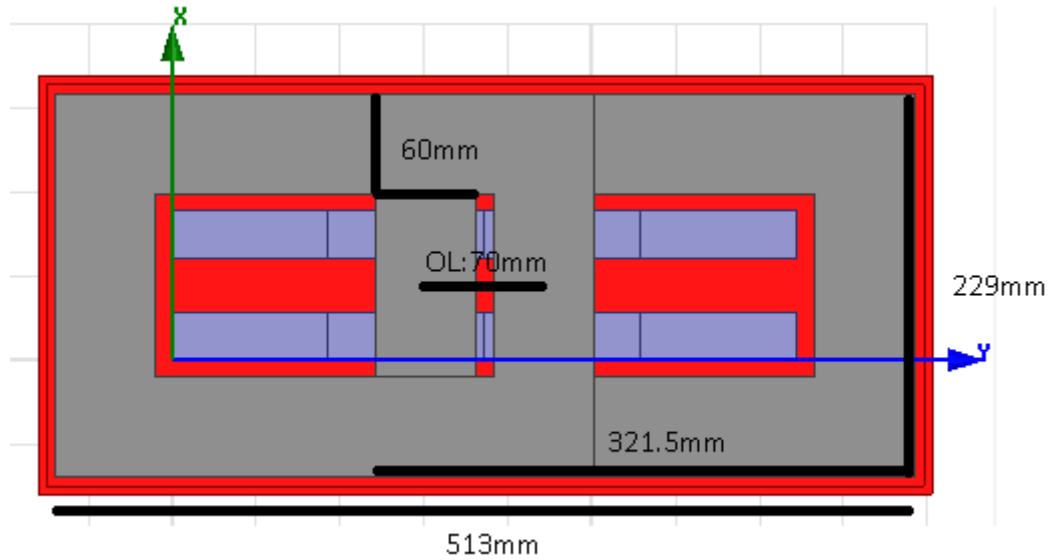
Η μόνη διαφορά είναι ο σχεδιασμός των τυλιγμάτων. Τα τυλίγματα βέβαια εξακολουθούν περιμετρικά να εμφανίζουν ένα πάχος 60mm (Σχήμα 5.4-2), καθώς οι στροφές καλωδίου διατηρήθηκαν σταθερές και ίσες με 15. Άρα το στοιχείο που πρέπει να προσδιοριστεί, για να συνεχιστεί η μελέτη, είναι η επικάλυψη (OL Σχήμα 5.1-1) μεταξύ των πηνίων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε, είναι η ίδια που είδαμε στο αρχικό μέγεθος μίας BP διάταξης. Δηλαδή επιλέξαμε μία αρχική διαστασοποίηση για την επικάλυψη. Η αρχική τιμή που θέσαμε, ήταν 105mm και στη συνέχεια τη μειώσαμε, για να πετύχουμε το σημείο μηδενισμού του συντελεστή σύζευξης. Στο Σχήμα 5.4-1 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή σύζευξης, για κάθε περίπτωση επικάλυψης και παρατηρούμε ο συντελεστής σύζευξης μηδενίζεται για μία επικάλυψη ίση με 70mm, η οποία είναι και η τελική επιλογή για την κατασκευή της διάταξης.



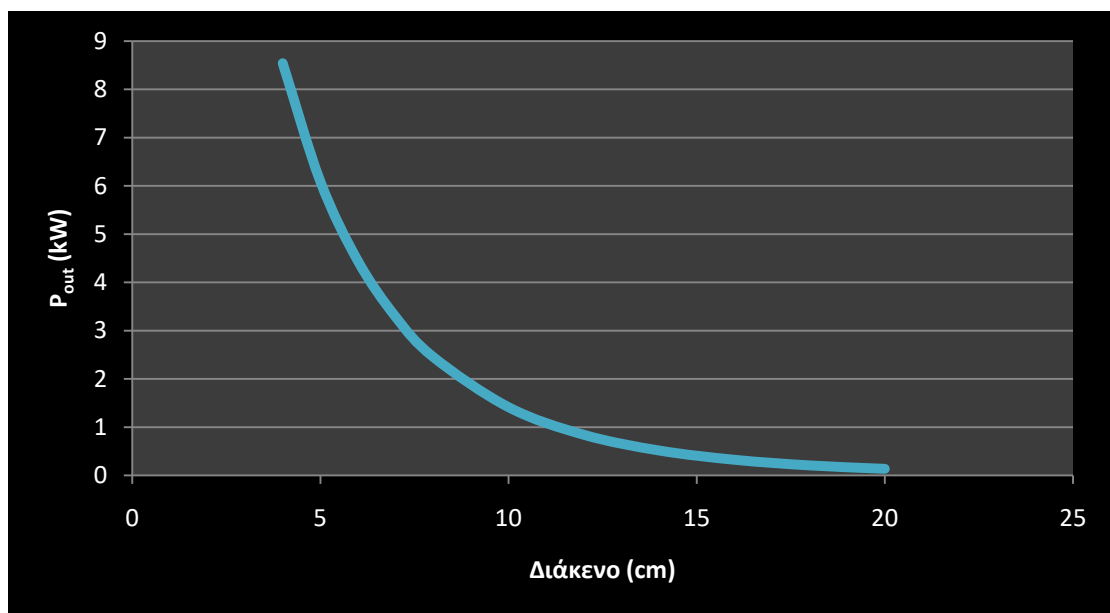
Σχήμα 5.4-1: Επικάλυψη μηδενισμού συντελεστή σύζευξης μικρότερης

Ολοκληρώνοντας και αυτό το βήμα, προκύπτει ότι το κάθε πηνίο θα είναι μεγέθους 229\*321,5mm. Άρα έχοντας όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για τον σχεδιασμό της διάταξης, προχωρήσαμε στο πρόγραμμα, όπου και την σχεδιάσαμε Σχήμα 5.4-2.



Σχήμα 5.4-2: Μικρότερος BP συζεύκτης από τον αρχικό

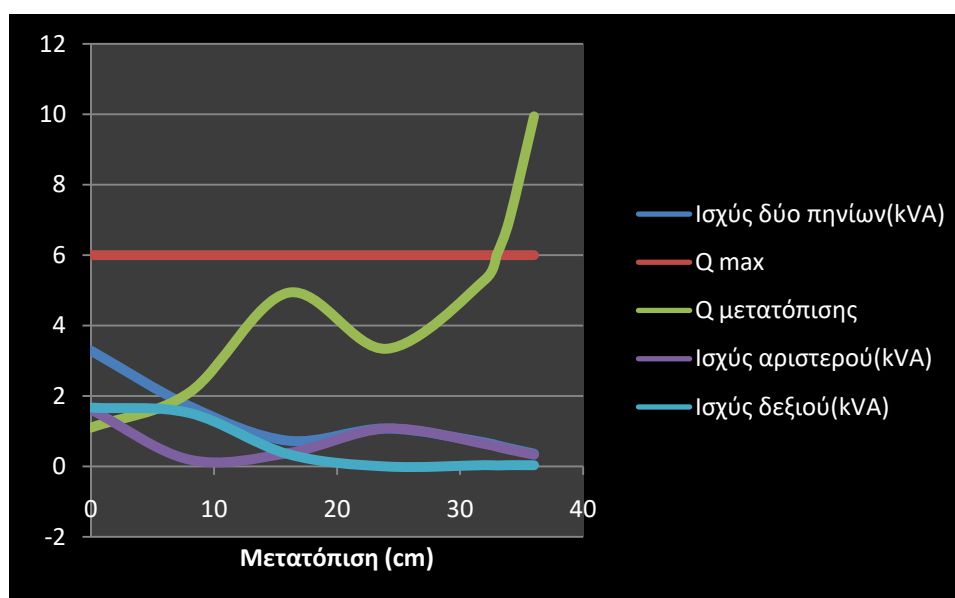
Στην συνέχεια της μελέτης μας θα εφαρμόσουμε ακριβώς την ίδια διαδικασία. Όπως και προηγουμένως, εξετάζοντας αρχικά την ικανότητα επίτευξης ισχύος της διάταξης ανάλογα της απόστασης του πρωτεύοντος από τον δευτερεύον (Σχήμα 5.4-3).



Σχήμα 5.4-3: Διάκενα επίτευξης ισχύος μικρότερης BP

Παρατηρούμε ότι, δεν έχουμε καμία αλλαγή σε ότι αφορά τη συμπεριφορά μίας διάταξης τέτοιου μεγέθους, σε σχέση με την αντίστοιχη DD διάταξη. Ειδικότερα εξακολουθούμε να μην μπορούμε να παράγουμε ιδιαίτερα μεγάλα επίπεδα ισχύος (30kW), που είναι απαραίτητα για σταθμούς γρήγορης φόρτισης, περιορίζοντας τη συνέχεια της μελέτης μας στα δύο μικρότερα επίπεδα ισχύος. Η διάταξη που σχεδιάσαμε εμφανίζει ακριβώς τα ίδια επίπεδα ισχύος στα ίδια διάκενα, όπως και η DD μικρότερη διάταξη, δηλαδή τα 3,6kW τα επιτυγχάνει στα 7cm, ενώ τα 7,2kW στα 5cm.

Τελευταίο βήμα μελέτης για τη συγκεκριμένη διάταξη είναι ο προσδιορισμός της ανοχής σε οριζόντιες μετατοπίσεις. Αρχικά εξετάσαμε την ανοχή της στα 3,6kW στο Σχήμα 5.4-4.

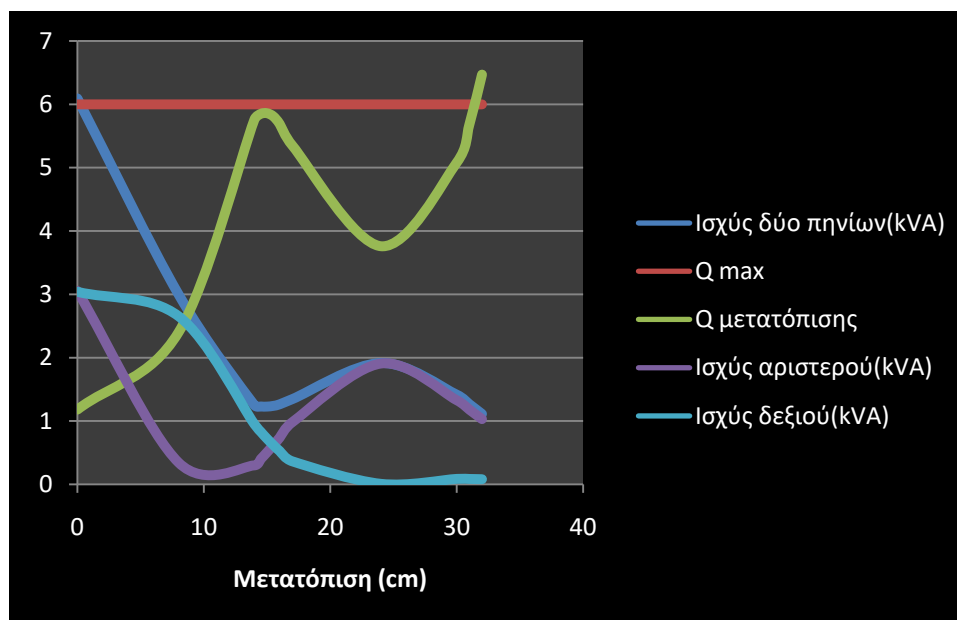


Σχήμα 5.4-4: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 3,6kW

Παρατηρήσαμε ότι, εμφανίζει μία μέγιστη ανοχή σε οριζόντιες αποκλίσεις της τάξεως των 32cm, η οποία είναι σχεδόν ίση με την ανοχή που εμφάνισε μία διάταξη DDQ τέτοιου μεγέθους. Επίσης η συγκεκριμένη ανοχή είναι διπλάσια από την ανοχή της κλασικής DD διάταξης. Η συμπεριφορά των δύο πηνίων δεν εμφανίζει κάποια αξιοσημείωτη αλλαγή σε σχέση με την προηγούμενη BP διάταξη.

Τα ίδια ακριβώς συμπεράσματα εξαγάγουμε και από την διάταξη των 7,2kW, με το διάκενο στα 5cm. Η συγκεκριμένη εμφανίζει μία μέγιστη μετατόπιση στα 31cm και απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4-5. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια της μελέτης διαπιστώθηκε μία μετατόπιση ίση με περίπου 16cm, όπου ο παράγοντας συντονισμού, λαμβάνει την τιμή 5,86 η οποία είναι πολύ κοντά στη μέγιστη ανεκτή Για τον λόγο αυτό επεκτείναμε την μελέτη στην γύρω περιοχή για να εξασφαλίσουμε ότι ο παράγοντας συντονισμού δεν ξεπερνάει σε κανένα σημείο γύρω από τα 16cm την μέγιστη τιμή του (6). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι η τιμή για το συντελεστή Q παραμένει

μικρότερη του 6 για τη συγκεκριμένη περιοχή. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο ότι, για 16cm περίπου, η ισχύς και των δύο πηνίων λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές. Ωστόσο για μεγαλύτερες μετατοπίσεις παρατηρείται μία αύξηση στην ισχύ του αριστερού πηνίου, οπότε μειώνεται και πάλι ο συντελεστής Q.



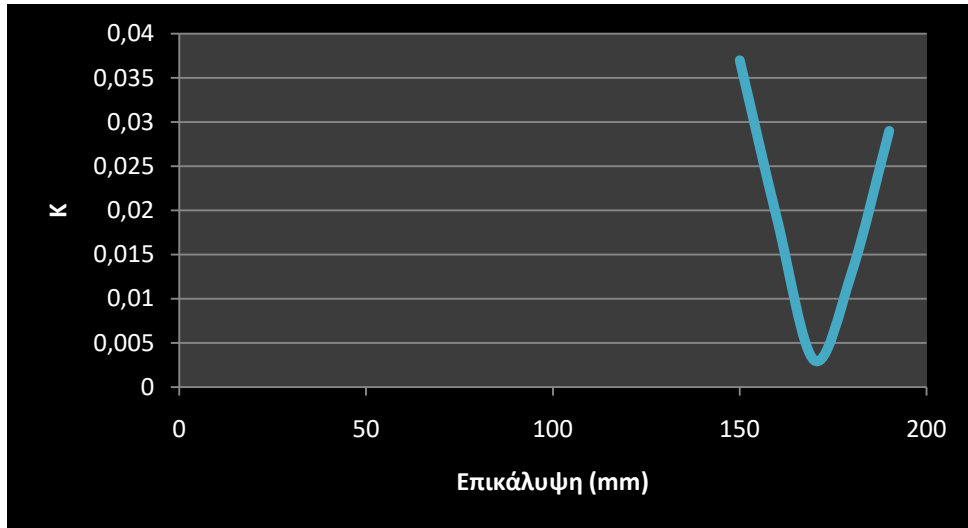
Σχήμα 5.4-5: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 7,2kW

#### 5.4.2 Μεγαλύτερη BP διάταξη

Τέλος, όπως και στις προηγούμενες δύο διατάξεις, σχεδιάσαμε μία BP διάταξη μιάμιση φορά μεγαλύτερη από την αρχική. Όπως και προηγουμένως, βασιστήκαμε στις διαστάσεις, που είχαν επιλεγθεί από την DD διάταξη (614\*1058mm) και όλα τα άλλα χαρακτηριστικά της διάταξης διατηρήθηκαν σταθερά, πέρα από τη θωράκιση αλουμινίου που ήταν η ίδια που χρησιμοποιήθηκε και στην DDQ διάταξη.

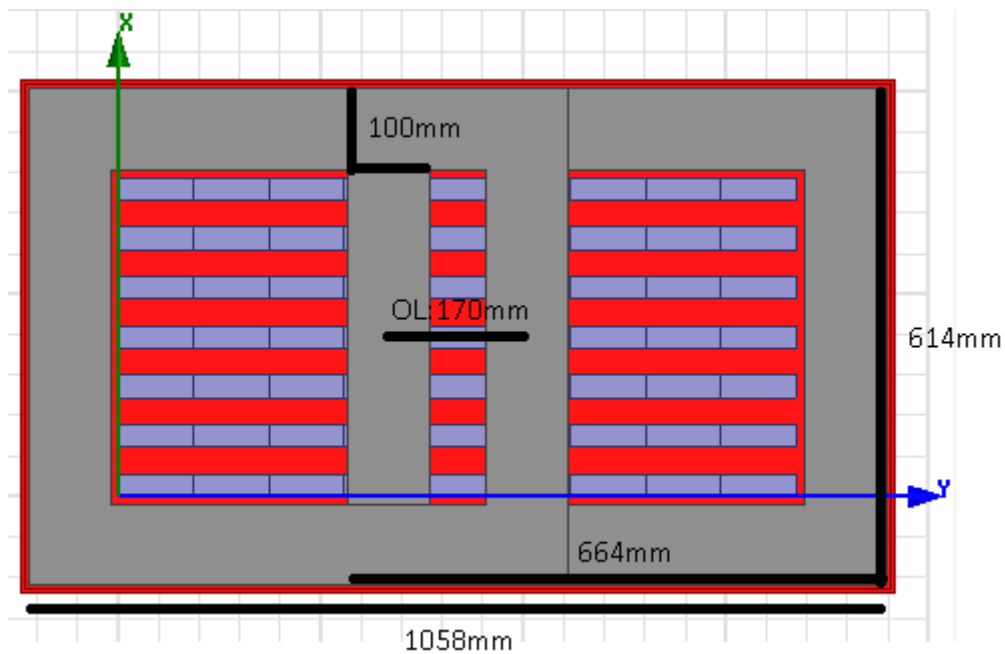
Άρα, η μόνη διαφοροποίηση αφορά στα πηνία. Αρχικά τα τυλίγματα είχαν ένα περιμετρικό πάχος ίσο με 100mm, για να εφαρμοστεί καλώδιο 25 στροφών. Στη συνέχεια εφαρμόσαμε την διαδικασία επιλογής της επικάλυψης, όπως και προηγουμένως, με μία αρχική διαστασοποίηση στα 170mm. Τα αποτελέσματα της μελέτης για τον μηδενισμό της σύζευξης φαίνονται στο Σχήμα 5.4-6, όπου φαίνεται ότι για μία επικάλυψη ίση με 170mm, ο συντελεστής σύζευξης παίρνει σχεδόν μηδενικές τιμές.





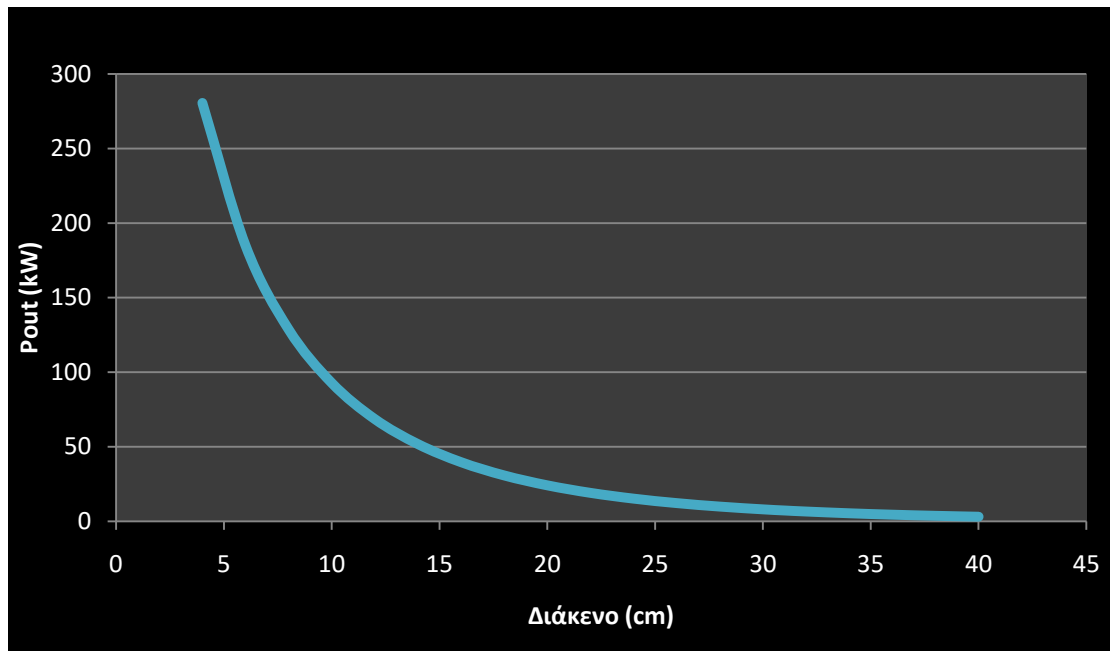
Σχήμα 5.4-6: Επικάλυψη μηδενισμού συντελεστή σύζευξης μεγαλύτερης

Έτσι, προκύπτει το κάθε πηνίο του δευτερεύοντος να έχει μέγεθος 614\*664mm. Έχοντας πλέον σχεδιάσει στο Σχήμα 5.4-7 μία μεγαλύτερη ΒΡ διάταξη, θα εφαρμόσουμε την ίδια μελέτη σε ότι αναφορά τα επίπεδα ισχύος ανάλογα με το διάκενο, αλλά και τον έλεγχο στις ανοχές των μετατοπίσεων για τα τρία κύρια επίπεδα ισχύος.



Σχήμα 5.4-7: Μεγαλύτερος ΒΡ συζεύκτης από τον αρχικό

Για το διάκενο μελετήθηκαν αποστάσεις από 4cm έως 40cm και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4-8.

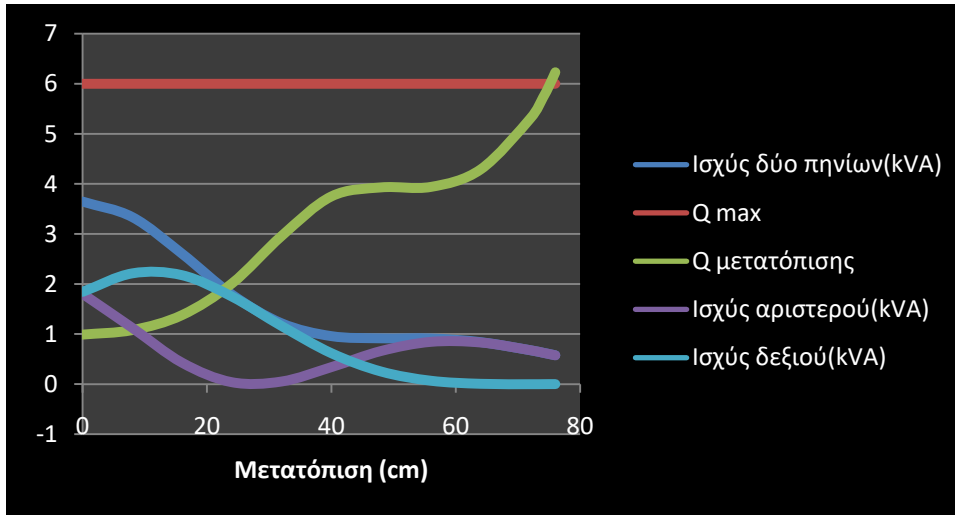


Σχήμα 5.4-8: Διάκενα επίτευξης ισχύος μεγαλύτερης BP

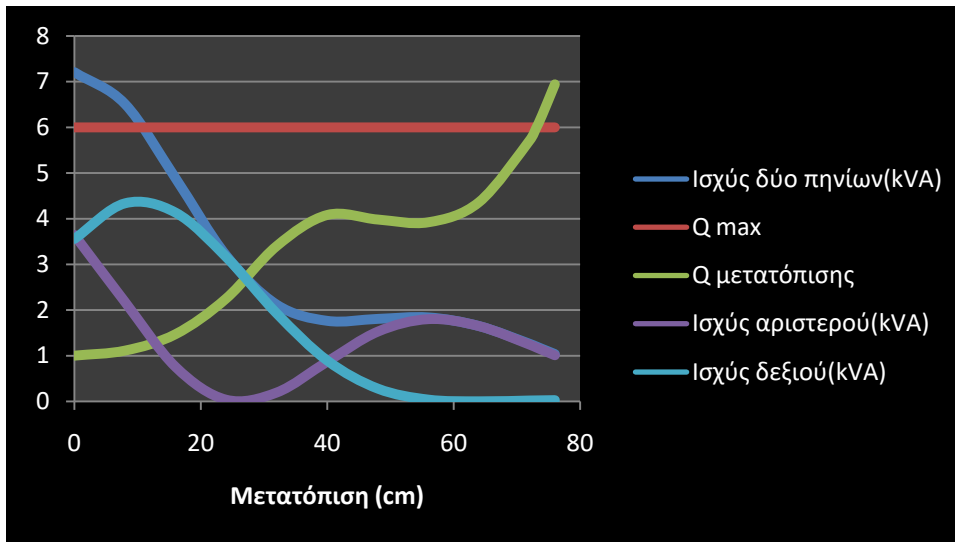
Όπως παρατηρούμε η συμπεριφορά της μεγαλύτερης, από της αρχικής διάταξης, είναι η αναμενόμενη βάσει των συμπερασμάτων που είχαμε για τα δύο προηγούμενα μεγέθη. Δηλαδή, η επίτευξη της επιθυμητής ισχύος πραγματοποιείται στις ίδιες αποστάσεις πρωτεύοντος από το δευτερεύον και πιο συγκεκριμένα τα 3,6kW, σε διάκενο ίσο με 38cm, τα 7,2kW στα 31cm, ενώ τέλος τα 30kW της γρήγορης φόρτισης επιτυγχάνονται στα 18cm.

Στη συνέχεια καλούμαστε να μελετήσουμε και σε αυτή τη διάταξη την ανοχή στη μετατόπιση, που παρουσιάζει σε κάθε ένα από τα τρία επίπεδα ισχύος. Σχετικά με την ανοχή στη μετατόπιση παρατηρούμε ότι, σε αυτό το μέγεθος της διάταξης μία διάταξη με δευτερεύον BP rad είναι ανώτερη ακόμα και από ένα DDQ rad. Πιο συγκεκριμένα, στα 3,6kW (Σχήμα 5.4-9) η BP διάταξη εμφανίζει μία ανοχή σε οριζόντια μετατόπιση της τάξεως των 75cm, σε σχέση με τα 70cm της DDQ.

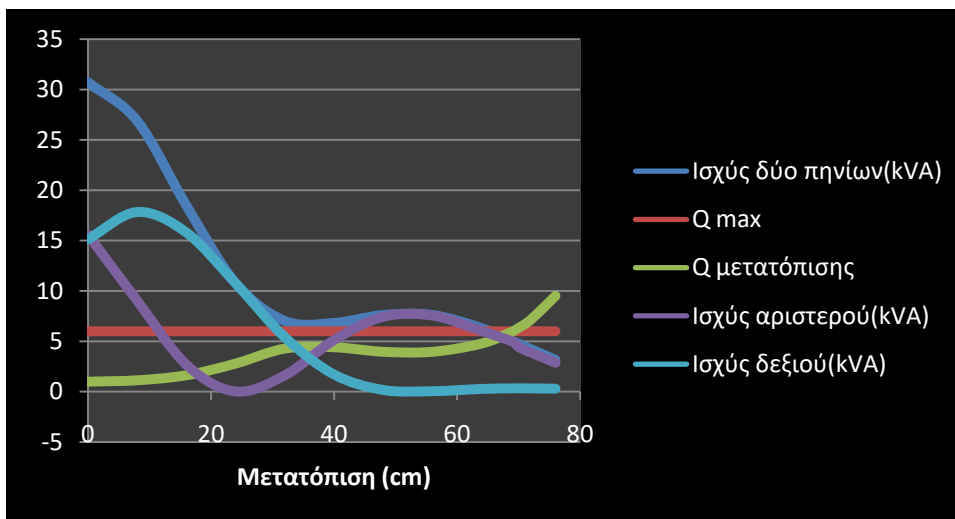
Την ίδια οριακά ανώτερη συμπεριφορά σε σχέση με την DDQ διάταξη εμφανίζει και στα άλλα δύο επίπεδα ισχύος. Ειδικότερα στα 7,2kW (Σχήμα 5.4-10), εμφανίζει την μεγιστοποίηση του παράγοντα συντονισμού και της οριζόντιας ανοχής στα 73cm, έναντι των 69cm της DDQ. Τέλος στα 30kW (Σχήμα 5.4-11) η μέγιστη μετατόπιση παρουσιάζεται στα 69cm, έναντι των 66cm της DDQ.



Σχήμα 5.4-9: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 3,6kW



Σχήμα 5.4-10: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 7,2kW



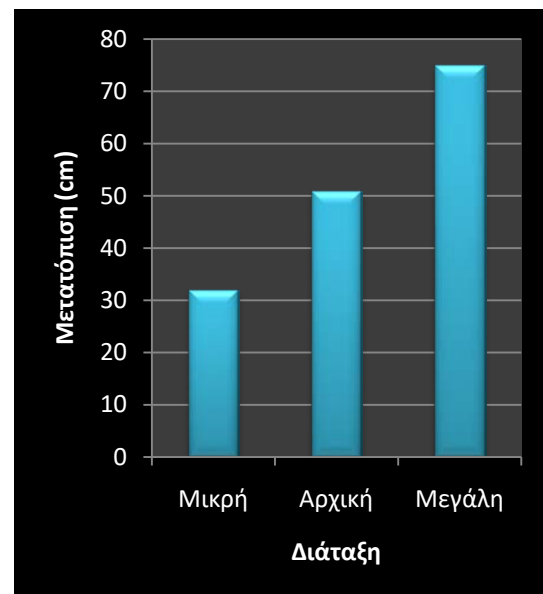
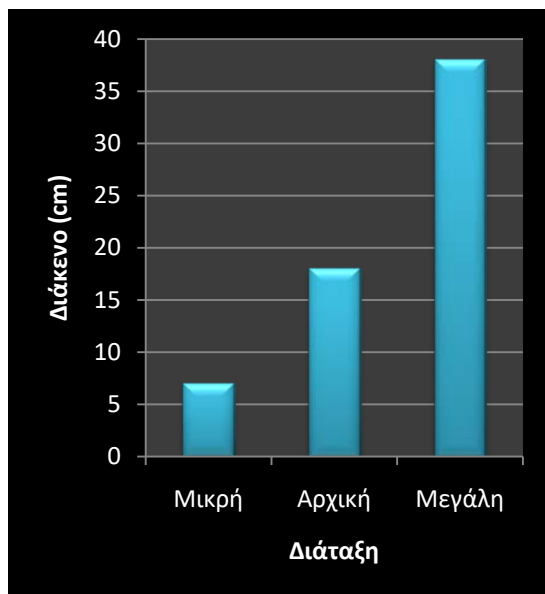
Σχήμα 5.4-11: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 30kW

Τα αποτελέσματα για όλες τις διατάξεις φαίνονται στον Πίνακα 3 .

Πίνακας 3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ΒΡ διάταξης

Διάταξη	Αριθμός ράβδων φερρίτη	Όγκος τυλιγμάτων (cm <sup>3</sup> )	Ισχύς	Ανοχή σε μετατόπιση (cm)	Διάκενο (cm)
Μικρή	16	780,8	3.6kW	32	7
			7.2kW	31	5
			30kW	-	-
Αρχική	48	1734	3.6kW	51	18
			7.2kW	49	14
			30kW	45	7
Μεγάλη	126	3497,6	3.6kW	75	38
			7.2kW	73	31
			30kW	69	18

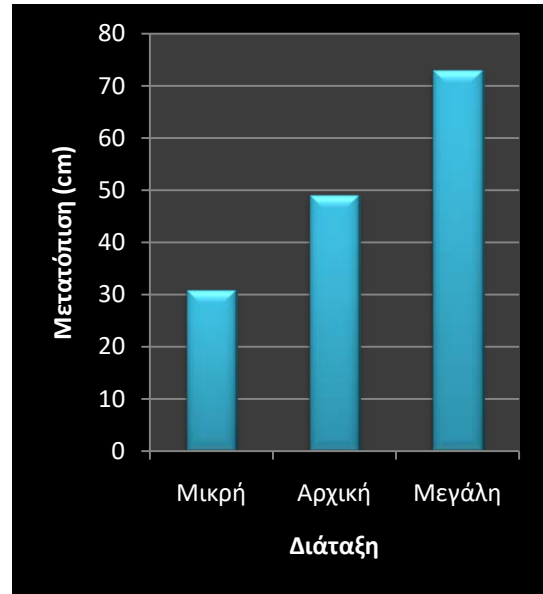
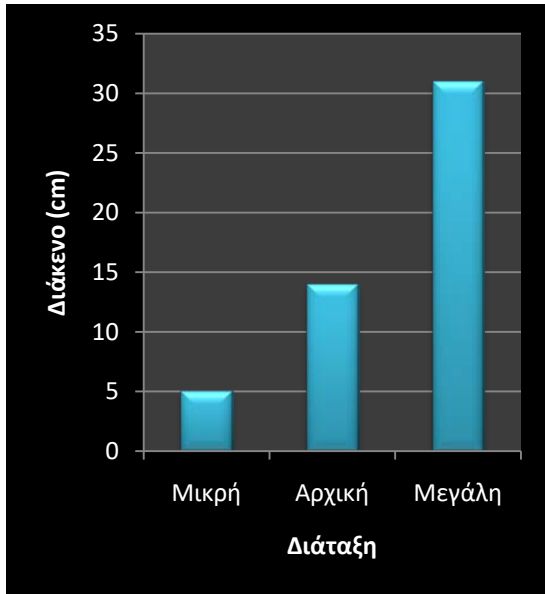
Συνοπτικά για την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους για την μεταφορά συγκεκριμένης ισχύος παρουσιάζονται τα ακόλουθα σχήματα:



(α)

(β)

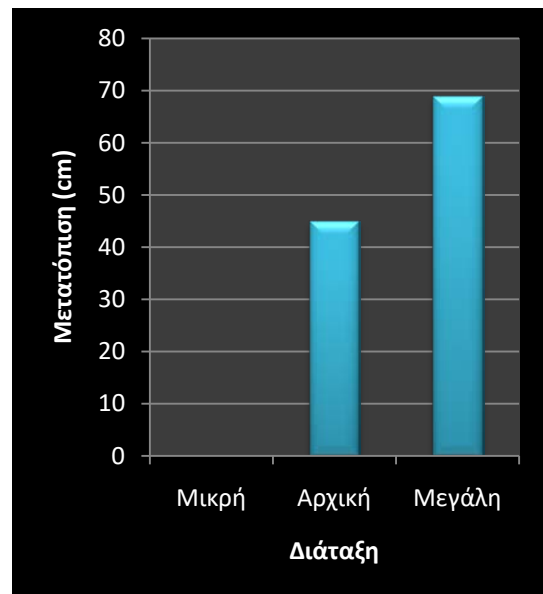
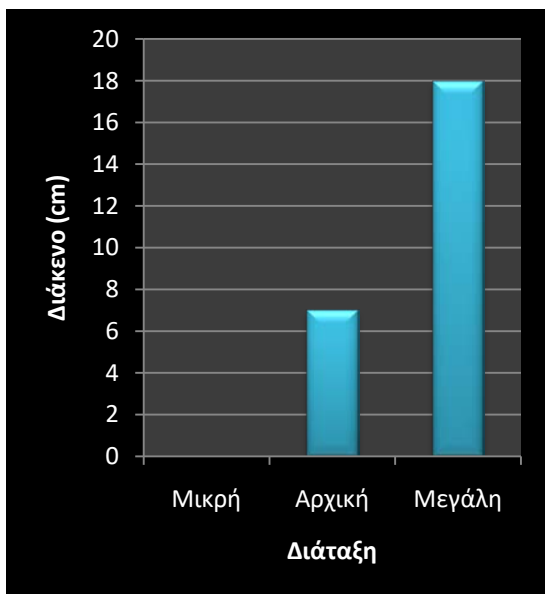
Σχήμα 5.4-12: (α) διάκενο και (β) ανοχή σε μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 3.6kW



(α)

(β)

Σχήμα 5.4-13: (α) διάκενο και (β) ανοχή σε μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 7,2kW



(α)

(β)

Σχήμα 5.4-14: (α) διάκενο και (β) ανοχή σε μετατόπιση για τη μεταφορά ισχύος 30kW

Παρόμοια με τις διατάξεις DD και DDQ, έτσι και για τη BP διάταξη, όσο μικρότερο είναι το διάκενο, τόσο μεγαλύτερη και η ισχύς που δύναται να μεταφέρει η διάταξη (Σχήμα 5.4.12-5.4.14). Μία αύξηση του διακένου για τη μεταφορά δεδομένης ισχύος είναι δυνατό να επιτευχθεί, αυξάνοντας τις διαστάσεις της διάταξης. Για παράδειγμα για την επίτευξη μίας ισχύος ίσης με 7.2kW, είναι φανερό στο Σχήμα 5.4-13, ότι μία μικρή διάταξη απαιτεί

ένα διάκενο 5cm, μία ενδιάμεση ένα διάκενο 14cm, ενώ μία ακόμα μεγαλύτερη διάταξη καταφέρνει να επιτύχει την ίδια μεταφορά ισχύος, αυξάνοντας σημαντικά το διάκενο σε 31cm. Ανάλογα αποτελέσματα παρατηρούνται και για τα υπόλοιπα εξεταζόμενα επίπεδα ισχύος (Σχήμα 5.4-12 και Σχήμα 5.4-14).

Εκτός από την αύξηση του διακένου μία μεγαλύτερου μεγέθους BP διάταξη επιτυγχάνει επίσης και μία αύξηση στην ανοχή ως προς τη μετατόπιση. Για παράδειγμα, για τη μεταφορά μίας ισχύος ίσης με 30kW (Σχήμα 5.4-14) μία ενδιάμεση διάταξη έχει μία ανοχή σε μετατόπιση ίση με 45cm, ενώ μία μεγάλη διάταξη έχει μία σημαντικά αυξημένη ανοχή σε μετατόπιση ίση με 69cm. Συνοπτικά, η ανοχή σε μετατόπιση που παρουσιάζει μια διάταξη BP, είναι περίπου 60-71% του μήκους της (Υ άξονας στο Σχήμα 3.3-1).

## 5.5 Σύγκριση μεταξύ της BP διάταξης και των υπόλοιπων διατάξεων δύο πόλων

Έχοντας πλέον ολοκληρώσει την μελέτη για τις διατάξεις DD, DDQ και BP, είμαστε σε θέση να προβούμε σε μία πιο ολοκληρωμένη σύγκριση μεταξύ τους.

Στην μελέτη που διεξαγάγαμε ως προς την ικανότητα καθεμιάς διάταξης να επιτυγχάνει μία συγκεκριμένη ισχύ σε ένα συγκεκριμένο διάκενο, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι και οι τρεις διατάξεις παράγουν παραπλήσια επίπεδα ισχύος για ίδια τιμή διακένου. Πιο συγκεκριμένα οι αποκλίσεις για το αναγκαίο διάκενο για την επίτευξη του ίδιου επιπέδου ισχύος, ήταν μόλις ενός εκατοστού, ποσότητα αμελητέα για να ξεχωρίσουμε μία διάταξη ως ανώτερη.

Ένα ακόμα σημείο που μπορούμε να εξάγουμε κύρια συμπεράσματα για την ικανότητα των διατάξεων να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές, είναι η ανοχή που εμφάνιζαν σε οριζόντιες μετατοπίσεις. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να πούμε με σιγουριά ότι η διάταξη που υστερεί σε αυτό το κομμάτι είναι η DD διάταξη, που εμφάνιζε μία ανοχή της τάξεως του 20-27% του συνολικού της μήκους. Έπειτα οι δυο ανώτερες διατάξεις, δηλαδή η DDQ και η BP είχαν πανομοιότυπη συμπεριφορά. Παρόλα ταύτα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η BP διάταξη για εφαρμογές μεγάλου μεγέθους είναι προτιμότερη. Για την ακρίβεια ενώ μία DDQ εμφάνιζε ανοχές της τάξης του 60-66% του συνολικού μεγέθους της, η BP διάταξη εμφάνιζε ανοχές της τάξης του 60-71%, με την διαφορά να προέρχεται από τις διατάξεις μεγάλου μεγέθους, που έδιναν το μεγαλύτερο ποσοστό του 71%.

Είναι γνωστό ότι πέρα από τις δυνατότητες που εμφανίζει κάθε διάταξη, ένας ζωτικός παράγοντας επιλογής είναι η ποσότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών. Ένας απλός τρόπος σύγκρισης για τα τυλίγματα είναι η παραγόμενη ισχύς ( $P_{su} - VA$ ), ως προς το κυβικό εκατοστό των τυλιγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Στον πίνακα που παρουσιάζουμε στη συνέχεια να τονίσουμε ότι, αναφέροντας μεσαία διάταξη εννοούμε τη διάταξη με μέγεθος 391\*739mm, μεγάλη αυτή με μέγεθος 614\*1058mm, ενώ μικρή αυτή με μέγεθος 229\*513mm. Επίσης ως διάκενο αναφοράς για όλες τις διατάξεις χρησιμοποιήσαμε τα 20cm.

Πίνακας 4: Μελέτη παραγόμενης ισχύος προς τυλίγματα

Διάταξη	Τυλίγματα ( $P_{su}(VA)/cm^3$ )
DD μικρή	0,2
DDQ μικρή	0,15
BP μικρή	0,18
DD μεσαία	1,73
DDQ μεσαία	1,38
BP μεσαία	1,55
DD μεγάλη	7
DDQ μεγάλη	5,33
BP μεγάλη	6,88

Όσο αναφορά τα τυλίγματα παρατηρούμε ένα αξιοσημείωτο γεγονός. Η DD διάταξη είναι αποδοτικότερη σε όλα τα μεγέθη (μικρή, μεσαία και μεγάλη διάταξη), ενώ τη χειρότερη δυνατή απόδοση παρουσιάζει η DDQ διάταξη. Πολύ καλά χαρακτηριστικά παρουσιάζει η BP διάταξη καθώς χρησιμοποιεί 18-28% λιγότερο τυλίγμα σε σχέση με την DDQ διάταξη.

Πρέπει να τονισθεί, ωστόσο, ότι ο Πίνακας 4 παρουσιάζει αποτελέσματα για μηδενική μετατόπιση. Σε περίπτωση που η ανοχή στη μετατόπιση είναι καθοριστικός παράγοντας για την κατασκευή της διάταξης, η περιεκτικότητα τυλίγματος δεν είναι ο μόνος παράγοντας που πρέπει να εξετασθεί. Πιο συγκεκριμένα, είναι φανερό στον Πίνακα 5 ότι η DD διάταξη ναι μεν χρησιμοποιεί λιγότερο τυλίγμα, αλλά έχει τη μικρότερη ανοχή στη μετατόπιση. Την ανοχή στη μετατόπιση καταφέρνει να την αυξήσει σημαντικά η DDQ διάταξη, ωστόσο απαιτεί πολύ μεγαλύτερη χρήση τυλίγματος. Μία ενδιαμέση κατάσταση παρουσιάζεται με την BP διάταξη, η οποία διατηρεί την ικανότητα της DDQ διάταξης ως προς τη μετατόπιση, αλλά μειώνει σημαντικά τη χρήση τυλίγματος.

Πίνακας 5: Σύγκριση διατάξεων μεσαίου μεγέθους δύο πόλων στα 7,2kW

Διάταξη	Τυλίγματα ( $P_{su}(VA)/cm^3$ )	Μέγιστη μετατόπιση (cm)
DD	4,28	17
DDQ	3,52	48
BP	4,15	49

Συνοψίζοντας, αν η ζητούμενη διάταξη πρόκειται να εφαρμοστεί σε συστήματα, που εξασφαλίζουν την πλήρη ευθυγράμμιση του συζεύκτη του οχήματος με τον συζεύκτη του φορτιστή, τότε η προτιμότερη διάταξη είναι η DD διάταξη. Αν όμως η εφαρμογή, στην οποία πρέπει να χρησιμοποιηθεί η διάταξη δεν εγγυάται την πλήρη ευθυγράμμιση, λαμβάνοντας υπόψη μας και τον παράγοντα της χρήσης των υλικών, τότε πρέπει να επιλεγεί η BP διάταξη, που εμφανίζει την ανώτερη ανοχή σε οριζόντιες μετατοπίσεις σε λογικά επίπεδα αύξησης υλικού χρησιμοποιήσεως.





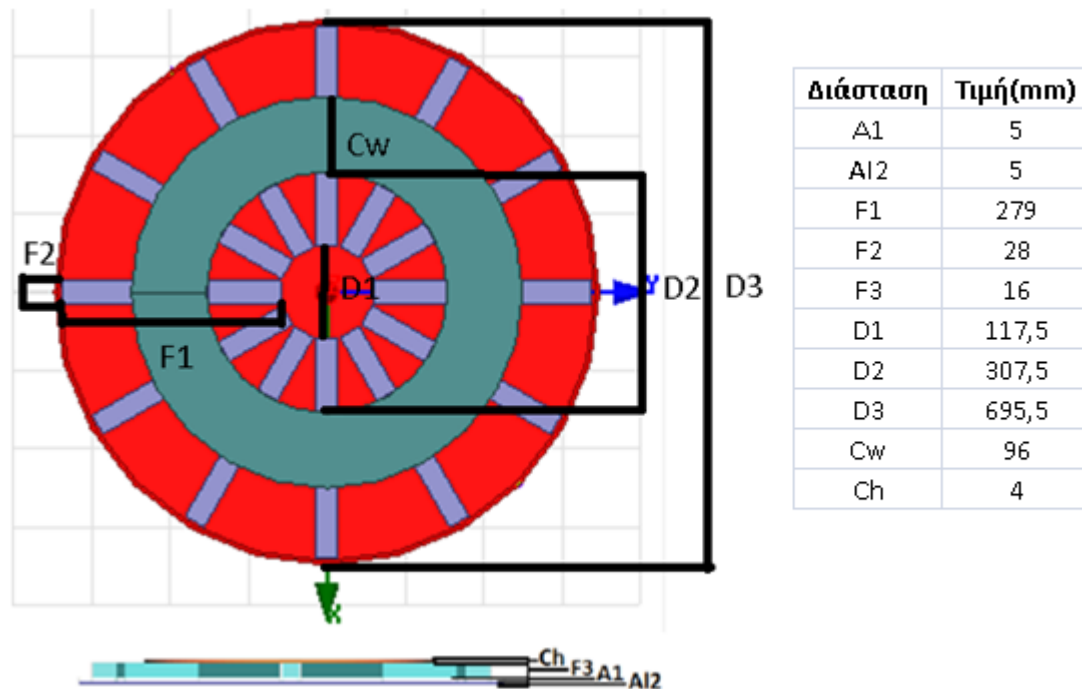
## 6ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Σύγκριση με κυκλική

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των διατάξεων δύο πόλων, που μελετήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, με την πιο αντιπροσωπευτική διάταξη ενός πόλου: την κυκλική διάταξη με ράβδους φερριτή [23].

Η κυκλική διάταξη εξετάζεται σε βασικές μεταβολές διακένου, καθώς και στην ανοχή της σε οριζόντια μετατόπιση και τα εξαγόμενα αποτελέσματα τα συγκρίνουμε με τις προηγούμενες διατάξεις που μελετήσαμε (DD, DDQ, BP).

### 6.1 Περιγραφή της κυκλική διάταξης φερριτών

Για τον σχεδιασμό του κυκλικού συζεύκτη βασιστήκαμε στην αναφορά [23], από την οποία λάβαμε και τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.1-1.



Σχήμα 6.1-1: Αναλυτικό σχήμα δέκτη CP διάταξης [23]

Όπως και στις προηγούμενες διατάξεις, η θωράκιση αλουμινίου είχε πάχος 5mm και απείχε εξίσου από όλα τα ακριανά σημεία των φερριτών 5mm.

Αναλυτικότερα για τον σχεδιασμό ενός κυκλικού rad αρχικά τοποθετήσαμε τους φερρίτες. Οι φερρίτες στο σύνολό τους σε αυτή την διάταξη ήταν περισσότεροι σε σχέση με τις προηγούμενες διατάξεις, καθώς μόνο στο ένα rad της κυκλικής χρειάζονταν 36 ράβδους φερρίτη N87, έναντι των 24 που χρειαζόντουσαν οι προηγούμενοι συζεύκτες. Η τοποθέτησή τους έγινε κυκλικά, με μία γωνία μεταξύ τους  $30^{\circ}$  και σε κάθε ράβδο φερριτών χρησιμοποιήθηκαν τρεις στην σειρά, από το οποίο προκύπτει και η διάσταση  $F1=3*93=279\text{mm}$ , που αναφέρεται στο Σχήμα 6.1-1. Η πρώτη ράβδος φερριτών τοποθετήθηκε σε μία απόσταση από το κέντρο της διάταξης ίσης με 58,75mm.

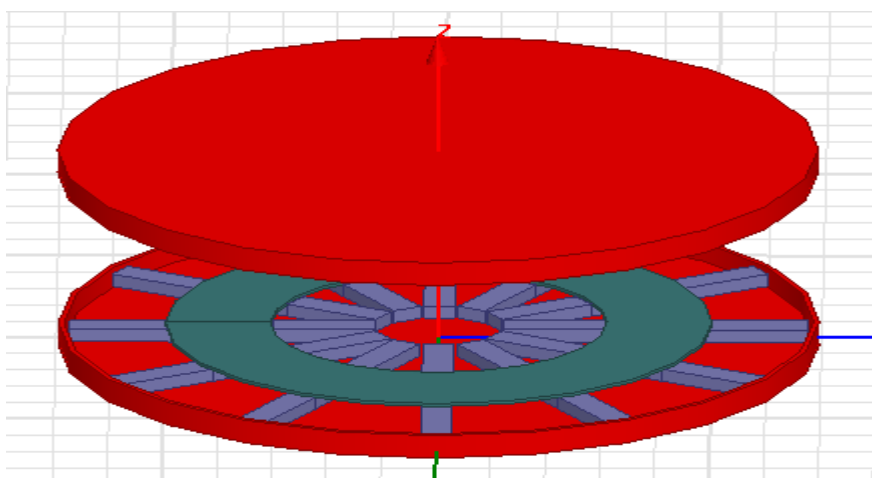
Στην συνέχεια, προχωρήσαμε στον σχεδιασμό των τυλιγμάτων. Τα τυλίγματα αυτή την φορά ήταν 24 στροφών ίδιου καλωδίου, με αποτέλεσμα να έχουν ένα πάχος στα 96mm. η τοποθέτηση τους έγινε βάσει της αναφοράς [23] και παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1-1, όπου φαίνεται και η εσωτερική διάμετρος, D2, του πηνίου ίση με 307,5mm.

Η φορά των ρευμάτων ήταν τέτοια, για να έχουμε ίδια φορά μαγνητικής ροής ανάμεσα στους δύο συζεύκτες και η τιμή του διατηρήθηκε στα 23A. Τέλος, η συχνότητα του ηλεκτρικού κυκλώματος διατηρήθηκε στα 20kHz και ο παράγοντας συντονισμού Q διατήρησε σαν μέγιστη τιμή του το 6. Βάσει όλων αυτών, ο υπολογισμός ισχύος εξακολουθεί να γίνεται μέσω του τύπου:

$$P_o = Q*2*\pi*\omega*I_1^2*M^2/L_2$$

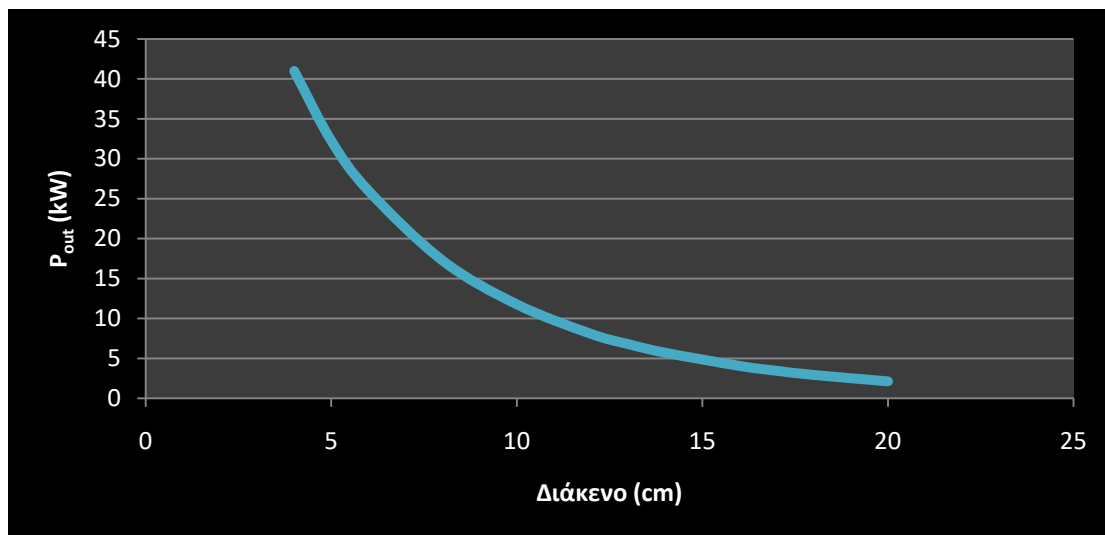
## 6.2 Συμπεριφορά ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης με δύο κυκλικές διατάξεις σε πρωτεύον – δευτερεύον

Έχοντας λοιπόν σχεδιάσει τον κυκλικό συζεύκτη, το πρώτο στάδιο της μελέτης μας θα είναι η συμπεριφορά του όταν χρησιμοποιείται και ως πρωτεύον και ως δευτερεύον. Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 6.2-1.



Σχήμα 6.2-1: Σχεδίαση CP-CP διάταξης στο Maxwell

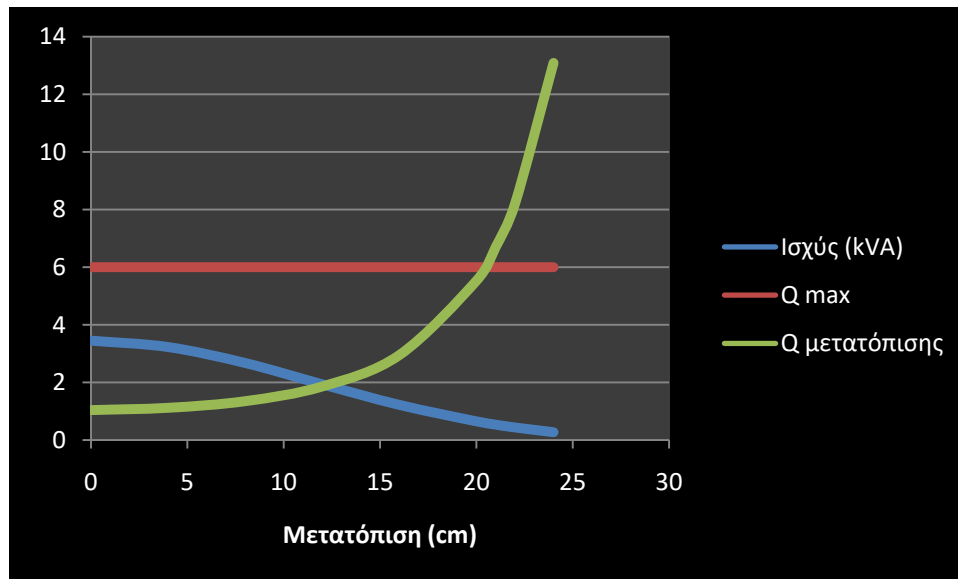
Η συμπεριφορά τώρα μιας τέτοιας διάταξης, θα μελετηθεί με βάση την ικανότητά της για την επίτευξη ισχύος σε διάφορα διάκενα και την ανοχή σε οριζόντιες μετατοπίσεις. Η μελέτη για τα διάκενα έγινε σε αποστάσεις από 4cm έως 20cm και παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2-2.



Σχήμα 6.2-2: Διάκενα επίτευξης ισχύος CP-CP

Παρατηρούμε ότι, η συγκεκριμένη κυκλική διάταξη που σχεδιάσαμε για την επίτευξη των κύριων επιπέδων ισχύος, χρειάζεται μία απόσταση μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος μικρότερη από τις προηγούμενες διατάξεις που μελετήθηκαν. Για την ακρίβεια για την επίτευξη των 3,6kW χρειάζεται ένα διάκενο ίσο με 17cm, έναντι των 19cm της DD διάταξης και των 18cm των DDQ και BP διατάξεων, έχοντας χρησιμοποιήσει μεγαλύτερο αριθμό ράβδων φερρίτη, αλλά και μικρότερη ποσότητα όγκου καλωδίου (Πίνακας 6). Την ίδια ακριβώς συμπεριφορά παρουσιάζει και στα άλλα δύο επίπεδα ισχύος. Στα 7,2kW χρειάζεται ένα διάκενο 13cm, ενώ τέλος στα 30kW χρειάζεται ένα διάκενο στα 5cm εμφανώς μικρότερο από τα 7cm της DD διάταξης.

Στη συνέχεια επεκτείνουμε τη μελέτη μας στην ανοχή της διάταξης σε οριζόντιες μετατοπίσεις,. Για τα 3,6kW η ανοχή στην μετατόπιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2-3.



Σχήμα 6.2-3: Ανοχή στην μετατόπιση στα 3,6kW

Από το διάγραμμα της ανοχής στη μετατόπιση μιας CP-CP διάταξης παρατηρούμε ότι, ο παράγοντας συντονισμού  $Q$  μεγιστοποιείται στα 20cm οριζόντιας μετατόπισης. Τα 20 αυτά εκατοστά, αποτελούν το 30% του συνολικού μήκους της διάταξης. Άρα, η συγκεκριμένη διάταξη είναι ανώτερη σε ότι αφορά την ανοχή της σε μετατόπιση σε σχέση με την DD διάταξη, η οποία παρουσιάζει μία ανοχή σε μετατόπιση ίση με το 23% του μήκους της για το αντίστοιχο επίπεδο ισχύος.

Πρέπει να τονισθεί ότι αν και η κυκλική διάταξη παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με την DD ως προς τη μετατόπιση, ωστόσο απαιτεί σημαντικά περισσότερο φερρίτη για την κατασκευή της. Πιο συγκεκριμένα, για τη μεταφορά μίας ισχύος ίσης με 3.6kW φαίνεται στον Πίνακα 6 ότι η κυκλική διάταξη αν και απαιτεί λιγότερο καλώδιο Litz σε σχέση με την DD, απαιτεί ωστόσο 50% περισσότερο φερρίτη.

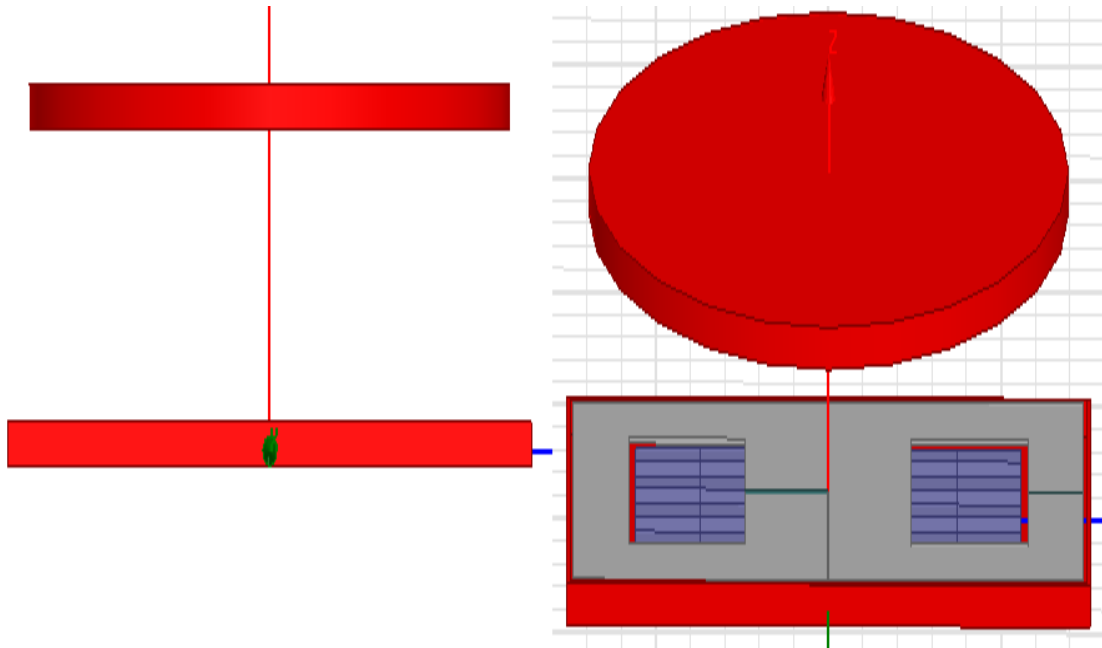
Βέβαια, η κυκλική διάταξη σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να επιτύχει τις ιδιαίτερα μεγάλες ανοχές μετατόπισης που εμφανίζουν οι διατάξεις DDQ και BP.

Πίνακας 6: Ανοχή σε μετατόπιση και διάκενο για την επίτευξη ισχύος ίσης με 3.6kW

Διάταξη	Διάκενο (cm)	Ανοχή σε μετατόπιση (cm)	Χρήση Φερρίτη (ράβδοι)	Χρήση Καλωδίου Litz (cm <sup>3</sup> )
Κυκλική – Κυκλική	17	20	72	972
DD - DD	19	17	48	1684
DD - DDQ	18	49	48	2045.6
DD - BP	18	51	48	1734

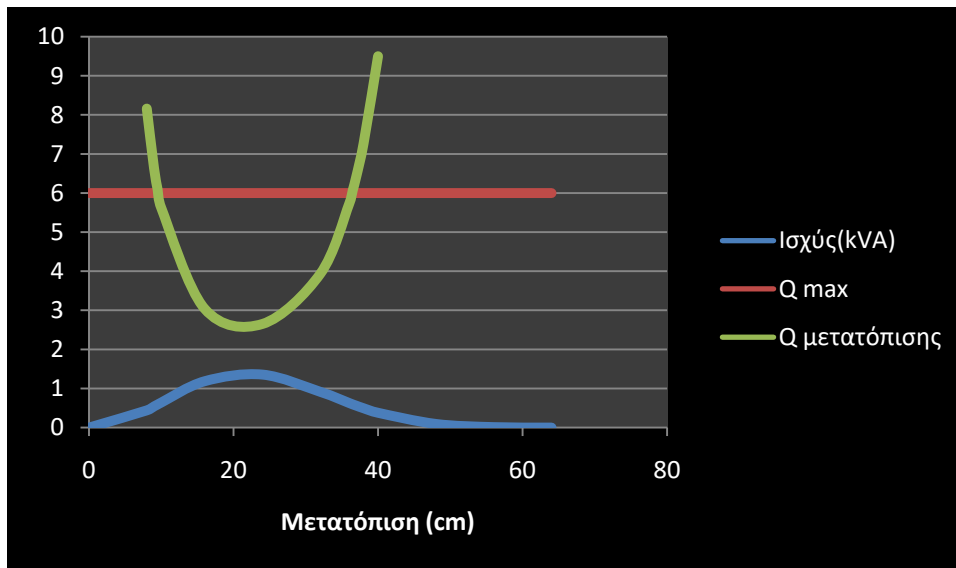
### 6.3 Διαλειτουργικότητα μεταξύ κυκλικής και DD διάταξης

Στη συνέχεια της μελέτης μας, προσπαθήσαμε να δούμε τη συμπεριφορά ενός κυκλικού συζεύκτη με συζεύκτη διαφορετικού σχήματος απέναντί του. Η πρώτη μας δοκιμή έγινε με έναν DD συζεύκτη στις αρχικές διαστάσεις με τις οποίες είχε σχεδιαστεί στο τρίτο κεφάλαιο (Σχήμα 6.3.1).



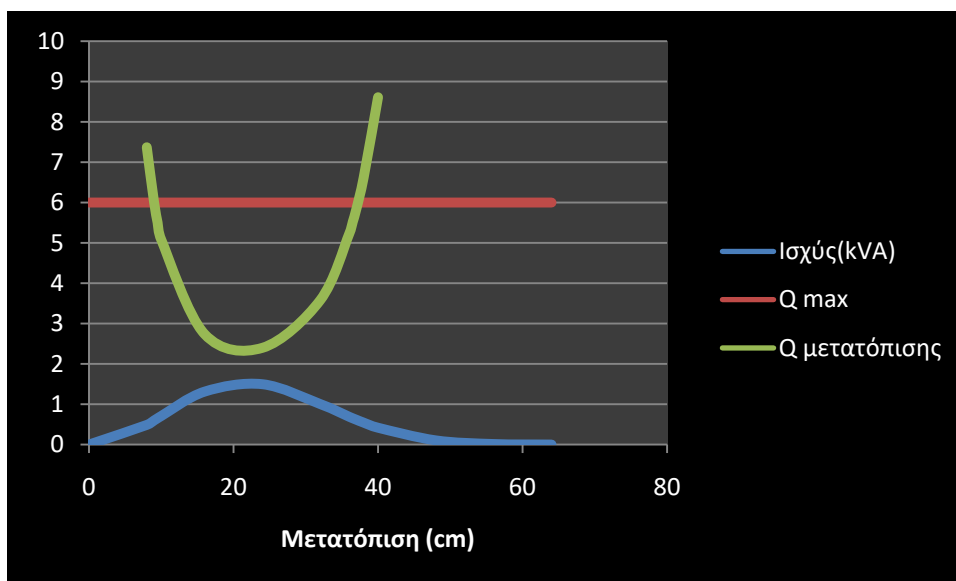
Σχήμα 6.3-1: Σχεδίαση DD-CP διάταξης στο Maxwell

Σχετικά με τη συμπεριφορά στα διάφορα διάκενα παρατηρήσαμε ότι, οι δυο συζεύκτες όταν είναι σε πλήρη ευθυγράμμιση μεταξύ τους παρουσιάζουν μηδενική ισχύ. Αμέσως επόμενο βήμα είναι να εξετάσουμε και τη συμπεριφορά του συστήματος για διαφορετικές οριζόντιες μετατοπίσεις. Όπως αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η DD διάταξη επιτυγχάνει τη μεταφορά ισχύος ίσης με 3.6kW σε ένα διάκενο ίσο με 19cm. Σε αυτό το διάκενο, η ανοχή σε οριζόντιες μετατοπίσεις μίας διάταξης με δευτερεύον τον DD συζεύκτη και πρωτεύον μία αντίστοιχη κυκλική διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3-2.



Σχήμα 6.3-2: Ανοχή σε μετατόπιση με διάκενο 19cm ενός συστήματος CP (πρωτεύον) –DD (δευτερεύον)

Ενώ η ανοχή σε οριζόντιες μετατοπίσεις μίας τέτοιας διάταξης με δευτερεύον τον κυκλικό συζεύκτη σε διάκενο 19cm, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.3-3.



Σχήμα 6.3-3: Ανοχή σε μετατόπιση με διάκενο 19cm ενός συστήματος DD (πρωτεύον)-CP (δευτερεύον)

Και για τα δύο συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας, που εξετάστηκαν (Σχήμα 6.3.2 και Σχήμα 6.3.3), η ικανότητα μεταφοράς ισχύος μεγιστοποιείται σε μία μη μηδενική μετατόπιση. Επομένως, η συμπεριφορά ενός τέτοιου συστήματος είναι διαφορετική από τα συστήματα με παρόμοια διάταξη σε πρωτεύον και δευτερεύον. Πιο συγκεκριμένα, τόσο ένα σύστημα με κυκλική διάταξη σε πρωτεύον και δευτερεύον, όσο

και ένα σύστημα με DD διάταξη σε πρωτεύον και μία διάταξη δύο πόλων (DD, DDQ ή BP) στο δευτερεύον η μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ισχύος παρατηρείται σε μηδενική μετατόπιση.

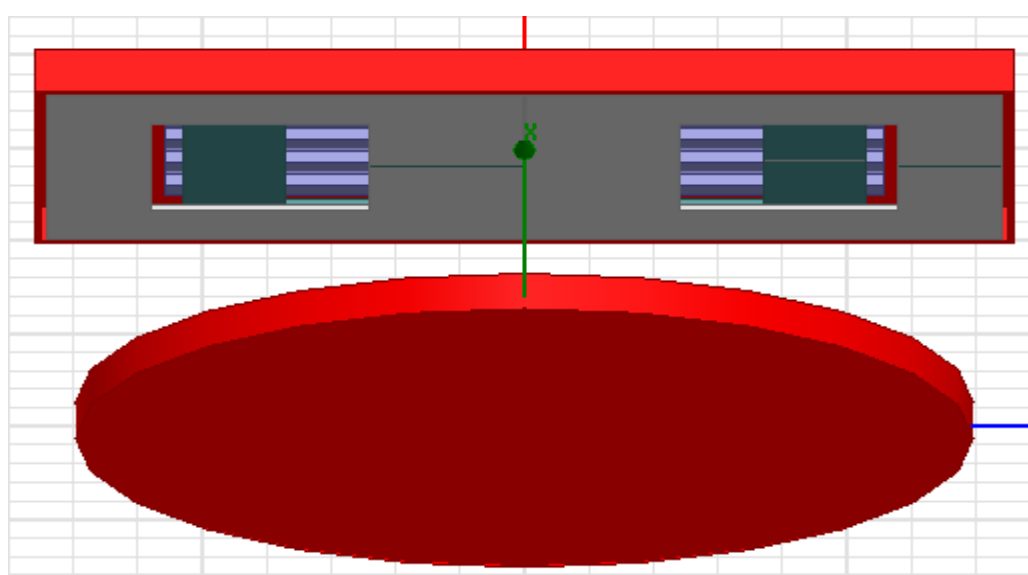
Παρατηρούμε επομένως, ότι και τα συστήματα που συνδυάζουν έναν CP συζεύκτη με έναν DD συζεύκτη είναι ικανά να μεταφέρουν το επιθυμητό επίπεδο ισχύος, , αλλά μόνο σε ορισμένες περιοχές μη μηδενικής μετατόπισης μεταξύ τους. Ειδικότερα μία διάταξη με πρωτεύον ένα κυκλικό συζεύκτη και δευτερεύον έναν DD συζεύκτη, μεταφέρει ισχύ 3.6kW σε οριζόντιες μετατοπίσεις από 10cm έως 36cm. Από την άλλη παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει και μία διάταξη με πρωτεύον έναν DD συζεύκτη και δευτερεύον έναν κυκλικό συζεύκτη, παρουσιάζοντας μεταφορά ισχύος 3.6kW από 9,5cm έως και τα 37cm.

Ως προς την χρήση υλικών για την κατασκευή των διατάξεων (DD-DD, DD-CP, CP-DD) παρατηρούμε (Πίνακας 7) ότι όταν έχουμε χρησιμοποίηση μόνο DD συζεύκτη, έχουμε και μία μείωση 20% στη χρήση φερρίτη, ενώ όσο αφορά τα τυλίγματα παρατηρούμε μία αύξηση κατά 24.1% στη χρήση τυλίγματος.

Πίνακας 7: Απαιτούμενη ποσότητα υλικών σε συνδυασμούς DD και CP συζευκτών

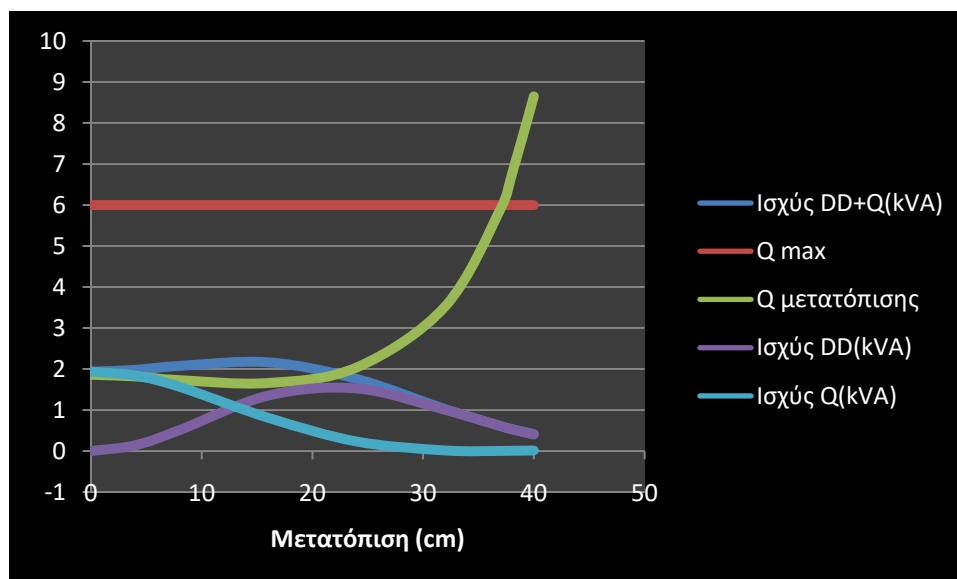
Συνδυασμός	Φερρίτες (ράβδοι)	Τυλίγματα (cm <sup>3</sup> )	Ανοχή σε μετατόπιση (cm)
DD-DD	48	1648	0-17
CP-DD	60	1328	10- 36
DD- CP	60	1328	9,5- 37

#### 6.4 Διάταξη CP-DDQ



Σχήμα 6.4-1: Σχεδίαση CP-DDQ διάταξης στο Maxwell

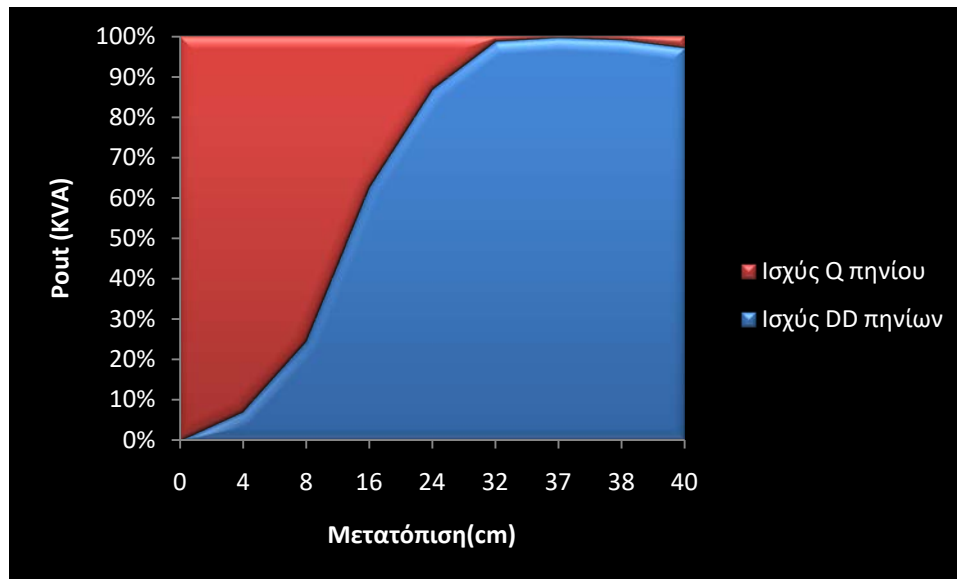
Ένα σύστημα, με DD διάταξη μεσαίου μεγέθους στο πρωτεύον και DDQ διάταξη στο δευτερεύον, επιτυγχάνει τη μεταφορά ισχύος 3.6kW σε ένα διάκενο ίσο με 18cm. Σε περίπτωση αντικατάστασης της DD διάταξης με μία κυκλική (CP) διάταξη (Σχήμα 6.4-1) η συμπεριφορά του συστήματος σχετικά με την μετατόπιση απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4-2.



Σχήμα 6.4-2: Ανοχή σε μετατόπιση με διάκενο 18cm CP-DDQ διάταξης

Παρατηρούμε ότι, λόγω του Q πηνίου (Σχήμα 6.4.3) το συγκεκριμένο σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας είναι δυνατό να μεταφέρει ισχύ και σε μηδενική μετατόπιση. Ωστόσο, και σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη μεταφορά ισχύος από το συνδυασμό των πηνίων DD και Q παρατηρείται σε περίπτωση μη μηδενικής μετατόπισης. Για την επίτευξη μίας ισχύος ίσης με 3.6kW, η ανοχή που εμφανίζει ο συγκεκριμένος συνδυασμός συζευκτών, είναι ίση με 37cm, που μεταφράζεται στο 50% του συνολικού μήκους της DDQ διάταξης. Το ποσοστό αυτό είναι σαφώς ανώτερο από το 30% μιας διάταξης CP-CP, αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να πλησιάσει το 66%, που εμφάνιζε ο DDQ συζεύκτης με πρωτεύον DD συζεύκτη.





Σχήμα 6.4-3: Ποσοστό ισχύος εκάστοτε πηνίου επί της συνολικής

Ως προς την απαιτούμενη χρήση υλικών για την κατασκευή των διατάξεων (DD-DDQ, CP-DDQ) παρατηρούμε (Πίνακας 8) ότι μία διάταξη με DD συζεύκτη στο πρωτεύον, όταν συνδυάζεται με έναν DDQ συζεύκτη για δευτερεύον, παρουσιάζει ανώτερη ανοχή σε μετατόπιση σε σχέση με τον κυκλικό συζεύκτη για πρωτεύον (49 έναντι 37cm), με 20% μικρότερη ποσότητα σε φερρίτη (48 έναντι 60). Από την άλλη για την επίτευξη αυτής της ανοχής απαιτεί περίπου 21.1% περισσότερο καλώδιο Litz.

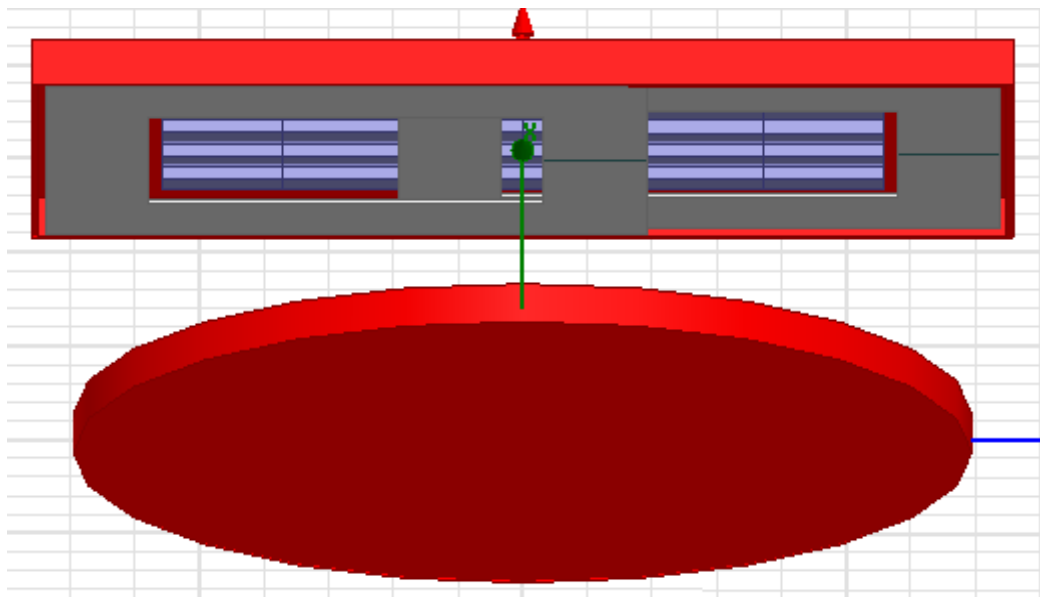
Πίνακας 8: Απαιτούμενη ποσότητα υλικών DD-DDQ και CP-DDQ διατάξεων

Συνδυασμός	Φερρίτες (ράβδοι)	Τυλίγματα (cm <sup>3</sup> )	Ανοχή σε μετατόπιση(cm)
DD-DDQ	48	2045,6	49
CP-DDQ	60	1689,6	37

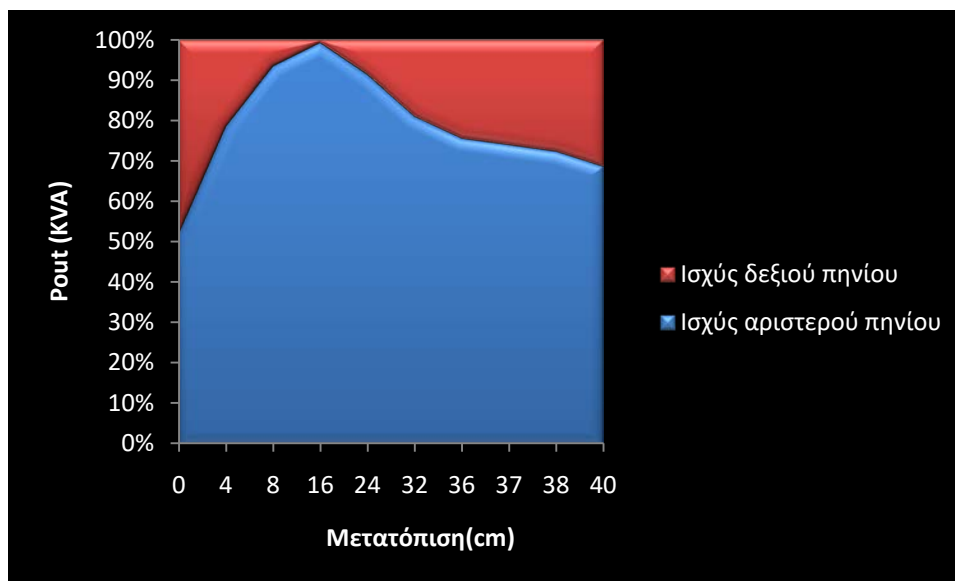
## 6.5 Διάταξη CP-BP

Ένα σύστημα, με DD διάταξη μεσαίου μεγέθους στο πρωτεύον και BP διάταξη στο δευτερεύον, επιτυγχάνει τη μεταφορά ισχύος 3.6kW σε ένα διάκενο ίσο με 18cm. Σε περίπτωση αντικατάστασης της DD διάταξης με μία κυκλική (CP) διάταξη (Σχήμα 6.5-1), το ποσοστό συνεισφοράς του κάθε πηνίου στην συνολική ισχύ της διάταξης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.5-3. Στα 16cm πέρα από την μεγάλη αύξηση της ισχύος του αριστερού πηνίου, έχουμε και μηδενισμό στην ισχύ του δεξιού πηνίου. Από εκεί και ύστερα η ισχύς του

αριστερού πηνίου είναι συνεχώς φθίνουσα, ενώ η ισχύς του δεξιού πηνίου διατηρείται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα.

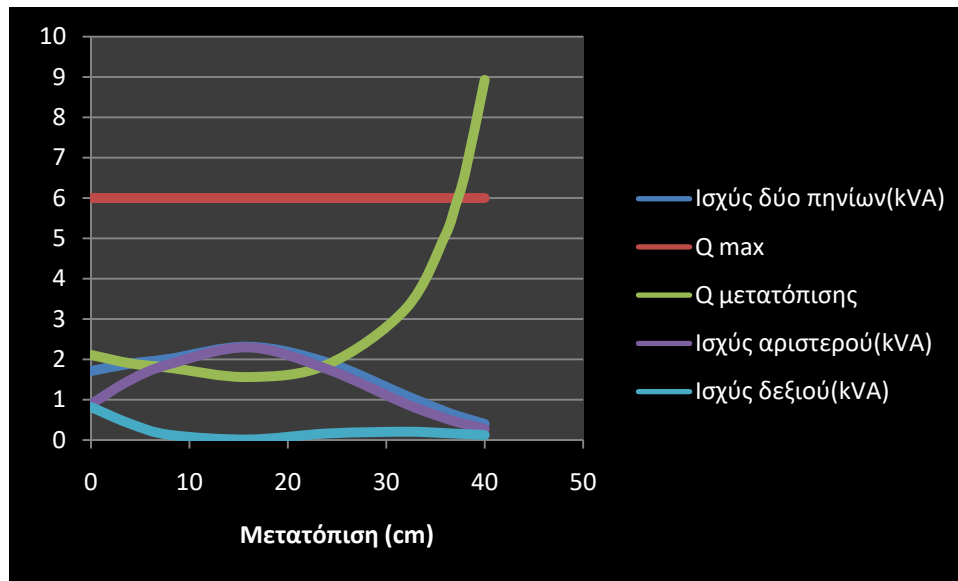


Σχήμα 6.5-1: Σχεδίαση διάταξης CP-BP στο Maxwell



Σχήμα 6.5-2: Ποσοστό ισχύος εκάστοτε πηνίου επί της συνολικής

Η συνολική ανοχή στη μετατόπιση που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος συνδυασμός είναι ίση με 37cm, που αποτελεί το 50% του συνολικού της μήκους της BP διάταξης. Η ανοχή αυτή σε μετατόπιση είναι σαφέστατα μικρότερη συγκρινόμενη με ένα σύστημα με DD συζεύκτη στο πρωτεύον και BP συζεύκτη στο δευτερεύον.



Σχήμα 6.5-3: Ανοχή σε μετατόπιση με διάκενο 18cm CP-BP διάταξης

Τέλος, πέρα από την συμπεριφορά των διατάξεων με την αντικατάσταση του DD συζεύκτη με τον κυκλικό στο πρωτεύον παρουσιάζεται και η χρήση των υλικών για την υλοποίησή τους. Στο παρακάτω Πίνακα 9 απεικονίζεται η σύγκριση βάσει χρησιμοποίησης υλικών μεταξύ ενός DD συζεύκτη και ενός κυκλικού για πρωτεύον, με ένα δευτερεύον BP σε ένα διάκενο 20cm. Παρατηρούμε ότι μία διάταξη με DD συζεύκτη στο πρωτεύον, όταν συνδυάζεται με έναν BP συζεύκτη για δευτερεύον, παρουσιάζει ανώτερη μετατόπιση σε σχέση με τον κυκλικό συζεύκτη για πρωτεύον (51 έναντι 37cm), με μικρότερη ποσότητα ράβδων φερριτών ( 48 έναντι 60). Από την άλλη για την επίτευξη αυτής της ανοχής απαιτεί περίπου 356cm<sup>3</sup> περισσότερο όγκο τυλίγματος.

Πίνακας 9: Απαιτούμενη ποσότητα υλικών DD-BP και CP-BP διατάξεων

Συνδυασμός	Φερρίτες (ράβδοι)	Τυλίγματα (cm <sup>3</sup> )	Ανοχή σε μετατόπιση (cm <sup>3</sup> )
DD-BP	48	1734	51
CP-BP	60	1378	37



## 7<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Συμπεράσματα και επεκτάσεις

### 7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκαν διατάξεις δύο πόλων στατικής επαγωγικής φόρτισης. Η μαγνητοστατική ανάλυση της κάθε διάταξης πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό εργαλείο Maxwell, το οποίο και αναλύθηκε ως προς τις δυνατότητες της χρήσης του.

Μελετήθηκαν τρεις διατάξεις δύο πόλων: η DD, η DDQ και η BP διάταξη. Σχετικά με όλες τις διατάξεις παρατηρήθηκε ότι η επίτευξη μεγάλων ποσών ισχύος παρατηρείται σε ιδιαίτερα μικρά διάκενα. Μία μεγαλύτερη διάταξη είναι ικανή να μεταφέρει μεγαλύτερα ποσά ισχύος σε αυξημένα διάκενα, ενώ αντίθετα μία μικρότερη διάταξη απαιτεί ιδιαίτερα μικρά διάκενα για την επίτευξη οποιοδήποτε ποσού ισχύος. Επίσης, μία μικρή διάταξη αδυνατεί να μεταφέρει τα ιδιαίτερα αυξημένα ποσά ισχύος, που απαιτούνται σε περιπτώσεις ταχείας φόρτισης, για οποιοδήποτε εξεταζόμενο διάκενο. Ακόμη, το διάκενο δε φαίνεται να επηρεάζει την ανεκτικότητα στη μετατόπιση. Πιο συγκεκριμένα, για μία διάταξη συγκεκριμένου μεγέθους η μέγιστη ανεκτή μετατόπιση παραμένει σταθερή, ανεξαρτήτου του διακένου που εξετάζεται.

Η μελέτη που πραγματοποιήθηκε έδειξε, επίσης, ότι η εισαγωγή του έξτρα Q πηνίου στην DDQ διάταξη δεν συνεισφέρει στην αύξηση ισχύος όσον αφορά το διάκενο, αλλά στην ανοχή σε οριζόντιες μετατοπίσεις, σημείο που υστερούσε η DD διάταξη. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκε μία αύξηση στην ανεκτικότητα στη μετατόπιση ίση με 240-320%. Ωστόσο η συγκεκριμένη διάταξη απαιτεί 22-30% περισσότερη χρήση πηνίου σε σχέση με την DD διάταξη.

Αντίθετα, η BP διάταξη επιτυγχάνει ιδιαίτερα μεγάλη οριζόντια μετατόπιση με ικανοποιητική χρήση καλωδίου Litz. Πιο συγκεκριμένα, ο BP συζεύκτης αποφεύγει τη χρήση του επιπλέον πηνίου Q, στηριζόμενος σε μία επικάλυψη μεταξύ του δεξιού και του αριστερού πηνίου του. Η ακριβής τιμή της επικάλυψης ορίζεται αυτή στην οποία εμφανίζεται μηδενική σύζευξη μεταξύ των δύο πηνίων. Επιτυγχάνεται έτσι μία ανοχή στην BP διάταξη ίση με το 60-71% του συνολικού μήκους της διάταξης, όμοια με την ανοχή της DDQ διάταξης (60-66%). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ιδιαίτερα ικανοποιητικά αυτά χαρακτηριστικά ως προς τη μετατόπιση η BP διάταξη τα επιτυγχάνει χρησιμοποιώντας 18-28% λιγότερο τύλιγμα σε σχέση με την DDQ διάταξη.

Οι διατάξεις δύο πόλων, που εξετάστηκαν, συγκρίθηκαν επίσης και με την πιο αντιπροσωπευτική διάταξη ενός πόλου: την κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη. Η κυκλική διάταξη παρουσίασε χαμηλά επίπεδα ισχύος, σε σχέση με τις υπόλοιπες και στο μόνο που υπερτερούσε, ήταν η ανοχή στη μετατόπιση σε σχέση μόνο με την DD διάταξη με την χρήση λιγότερου τυλίγματος, αλλά παράλληλα περισσότερης ποσότητας φερρίτη. Η κυκλική διάταξη, ωστόσο, δεν μπορεί να επιτύχει τις ιδιαίτερα μεγάλες ανοχές μετατόπισης που εμφανίζουν οι διατάξεις DDQ και BP.

Εξετάσθηκε, επίσης, η διαλειτουργικότητα μεταξύ διατάξεων ενός και δύο πόλων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάσθηκε ο συνδυασμός κυκλικού συζεύκτη με DD συζεύκτη, ο οποίος αποδίδει μηδενική ισχύ για πλήρη ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο συζευκτών. Ικανή ισχύ εξόδου παρουσίαζε μόνο για ορισμένες μετατοπίσεις, γεγονός που υποδεικνύει σημαντικούς περιορισμούς ως προς τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος. Τέλος προχωρήσαμε στην αντικατάσταση του DD συζεύκτη με έναν κυκλικό για τα συστήματα με δευτερεύον το DDQ ή το BP συζεύκτη. Παρατηρήθηκε ότι, αν και η λειτουργία μεταξύ συζευκτών μονών και διπλών πόλων είναι ικανή, ωστόσο υπάρχουν περιορισμοί ως προς τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος. Πιο συγκεκριμένα η αντικατάσταση του DD συζεύκτη με έναν κυκλικό, οδηγεί σε μεγιστοποίηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος σε μη μηδενικές μετατοπίσεις και περιορίζει σημαντικά την ανοχή σε μετατόπιση.

## 7.2 Επεκτάσεις

Κάποια θέματα τα οποία μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω είναι τα ακόλουθα:

- Χρήση διατάξεων δύο πόλων σε δυναμική επαγωγική φόρτιση: Στην παρούσα διπλωματική είδαμε την συμπεριφορά όλων των εξεταζόμενων διατάξεων, ως προς την οριζόντια μετατόπιση σε σχέση με το πρωτεύον και αυτό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μία αναφορά για την συμπεριφορά τους στη δυναμική επαγωγική φόρτιση.
- Υλοποίηση πειραματικής BP διάταξης: Στην παρούσα διπλωματική η BP διάταξη ενδείκνυται ως μία ιδιαίτερα καλή επιλογή μεταξύ των διατάξεων δύο πόλων, τόσο ως προς την ανεκτικότητα σε μετατοπίσεις, όσο και ως προς τη χρήση υλικών. Σύμφωνα με τις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για τα διάφορα επίπεδα ισχύος και τα διάφορα μεγέθη διατάξεων θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η κατασκευή μίας BP διάταξης επιθυμητής ισχύος και επιθυμητού μεγέθους.
- Μελέτη του κυκλώματος ελέγχου: Στην παρούσα διπλωματική δεν ασχοληθήκαμε με την υλοποίηση του ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος ή του δευτερεύοντος, παρά μόνο με τη μαγνητοστατική ανάλυση των συζευκτών. Άρα, ένα κομμάτι που θα μπορούσε να επεκτείνει την παρούσα έρευνα, είναι και η μελέτη του ελέγχου σε πρωτεύον και δευτερεύον για τις εξεταζόμενες διατάξεις.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Ιωάννης Καρακίτσιος, Ευάγγελος Καρφόπουλος, Νίκος Χατζηαργυρίου Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών "Ασύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων"
- [2] Maria Carmen Falvo, Danilo Sbordone, I. Safak Bayram, Michael Devetsikiotis "EV Charging Stations and Modes: International Standards"
- [3] A. Lorico, J. Taiber, T. Yanni, "Effect of Inductive Power Technology Systems on Battery-Electric Vehicle Design", IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Nov. 2011
- [4] Siqi Li and Chunting Chris Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications", Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of (early access articles)
- [5] G. A. Covic and J. T. Boys, "Inductive power transfer," Proc. IEEE, vol. 101, no. 6, pp. 1–14, Jun. 2013
- [6] Klontz, K.W. ; Esser, A. ; Bacon, R.R. ; Divan, D.M. ; Novotny, D.W. ; Lorenz, R.D., "An electric vehicle charging system with 'universal' inductive interface", Power Conversion Conference, 1993 Yokohama, Page(s): 227 – 232
- [7] Severns, R. ; Yeow, E. ; Woody, G. ; Hall, J. ; Hayes, J., "An ultra-compact transformer for a 100 W to 120 kW inductive coupler for electric vehicle battery charging" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings, Eleventh Annual Volume: 1, Page(s): 32 - 38 vol.1
- [8] D. A. G. Pedder, A. D. Brown, and J. A. Skinner, "A contactless electrical energy transmission system," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 46, pp. 23-30, 1999
- [9] Chwei-Sen Wang ; Stielau, O.H. ; Covic, G.A., "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger", Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 52, Issue: 5, 2005 , Page(s): 1308 – 1314
- [10] Takanashi, H. ; Sato, Y. ; Kaneko, Y. ; Abe, S. ; Yasuda, T. , "A Large Air Gap 3 kW Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012, Page(s): 269 – 274
- [11] Covic, G.A. ; Boys, J.T. ; Kissin, M.L.G. ; Lu, H.G., "A Three-Phase Inductive Power Transfer System for Roadway-Powered Vehicles", Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 54, Issue: 6, 2007 , Page(s): 3370 – 3378
- [12] Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, S. Abe, and T. Yasuda, "Compact contactless power transfer system for electric vehicles," in Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, 2010, pp. 807-813.
- [13] G. A. J. Elliot, J. T. Boys, and G. A. Covic, "A Design Methodology for Flat Pick-up ICPT Systems," in Industrial Electronics and Applications, 2006 1ST IEEE Conference on, 2006, pp. 1-7.
- [14] Chigira, M. ; Nagatsuka, Y. ; Kaneko, Y. ; Abe, S. ; Yasuda, T. ; Suzuki, A., "Small-Size Light-Weight Transformer with New Core Structure for Contactless Electric Vehicle Power Transfer System", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, Page(s): 260 – 266
- [15] M. Budhia, G. Covic, and J. Boys, "A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems," in IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010, pp. 2487-2492
- [16] Covic, G.A. ; Boys, J.T., "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation

- Applications”, Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of, Volume: 1 , Issue: 1 , 2013, Page(s): 28 – 41
- [17]R. Mecke and C. Rathge, "High frequency resonant inverter for contactless energy transmission over large air gap," in Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, 2004, pp. 1737-1743 Vol.3.
- [18]F. Nakao, Y. Matsuo, M. Kitaoka, and H. Sakamoto, "Ferrite core couplers for inductive chargers," in Proc. Power Convers. Conf., vol. 2. 2002, pp. 850–854.
- [19]M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Design and optimization of magnetic structures for lumped inductive power transfer systems," IEEE Trans. Power Electron. Soc., vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, Nov. 2011
- [20]M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and H. Chang-Yu, "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 60, pp. 318-328, 2013.
- [21]G. A. Covic, M. L. G. Kissin, D. Kacprzak, N. Clausen, and H. Hao, "A bipolar primary pad topology for EV stationary charging and highway power by inductive coupling," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011, pp. 1832-1838.
- [22]M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys, and H. Chang-Yu, "Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011, pp. 614-621.
- [23]Adeel Zaheer, Dariusz Kacprzak, Grant A. Covic "A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications", pp 283-290
- [24]L. Sungwoo, H. Jin, P. Changbyung, C. Nam-Sup, C. Gyu-Hyeong, and R. Chun-Taek, "On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, 2010, pp. 1598-1601.
- [25]H. Jin, L. Wooyoung, C. Gyu-Hyeong, L. Byunghun, and R. Chun-Taek, "Characterization of novel Inductive Power Transfer Systems for On-Line Electric Vehicles," in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, 2011, pp. 1975-1979
- [26]H. Jin, L. Sungwoo, P. Changbyung, C. Gyu-Hyeong, and R. Chun-Taek, "High performance inductive power transfer system with narrow rail width for On-Line Electric Vehicles," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, 2010, pp. 647-651.
- [27]J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C. T. Rim, "Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 3666-3679, 2011.
- [28]Sungwoo Lee ; Wooyoung Lee ; Jin Huh ; Hyun-Jae Kim ; Changbyung Park ; Gyu-Hyeong Cho ; Chun-Taek Rim, "Active EMF cancellation method for I-type pickup of On-Line Electric Vehicles", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, Page(s): 1980 - 1983
- [29]S. Choi, J. Huh, W. Y. Lee, S. W. Lee, and C. T. Rim, "New Cross-Segmented Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 5832-5841, 2013
- [30]Seungyong Shin ; Jaegue Shin ; Yangsu Kim ; Seokhwan Lee ; Boyune Song ; Guho Jung ; SeongjeubJeon, "Hybrid inverter segmentation control for Online Electric Vehicle", Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, Page(s): 1 – 6



- [31]G. R. Nagendra, J. T. Boys, G. A. Covic, B. S. Riar, and A. Sondhi, "Design of a double coupled IPT EV highway," in Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, 2013, pp. 4606-4611
- [32]K. Lee, Z. Pantic, and S. Lukic, "Reflexive Field Containment in Dynamic Inductive Power Transfer Systems," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. PP, pp. 1-1, 2013.
- [33]U. K. Madawala and D. J. Thrimawithana, "A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 58, pp. 4789-4796, 2011.
- [34]J. L. Villa, J. Sallan, J. F. Sanz Osorio, and A. Llombart, "High-Misalignment Tolerant Compensation Topology For ICPT Systems," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 59, pp. 945-951, 2012.
- [35]J. U. W. Hsu, A. P. Hu, and A. Swain, "A Wireless Power Pickup Based on Directional Tuning Control of Magnetic Amplifier," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 56, pp. 2771-2781, 2009.
- [36]Z. Pantic and S. M. Lukic, "Framework and topology for active tuning of parallel compensated receivers in power transfer systems," IEEE Trans. PowerElectron., vol. 27, no. 11, pp. 4503-4513, Nov. 2012.
- [37]Thrimawithana, D.J, Madawala, U.K., "A primary side controller for inductive power transfer systems", Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, pp. 661 – 666, 2010
- [38]S. Krishnan, S. Bhuyan, V. P. Kumar, W. Wenjiang, J. A. Afif, and L. KhoonSeong, "Frequency agile resonance-based wireless charging system for Electric Vehicles," in Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012, pp. 1-4.
- [39]Chopra, S. ; Bauer, P., "Analysis and design considerations for a contactless power transfer system", Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011 IEEE 33rd International, pp. 1 - 6, 2011
- [40]O. H. Stielau and G. A. Covic, "Design of loosely coupled inductive power transfer systems," in Proceedings International Conference on Power System Technology, Perth, Australia, 2000, pp. 85-90.
- [41]A. W. Green and J. T. Boys, "10 kHz inductively coupled power transfer-concept and control," in 5th International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994, pp. 694-699.
- [42] "ANSYS Maxwell - Low Frequency Electromagnetic Field Simulation". Ansys.com. Retrieved 2016-09-27.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Σε αυτή την ενότητα παραθέτουμε τις μετρήσεις, που εξάγαμε από τις σειρές προσομοιώσεων, οι οποίες και χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν πρωτύτερα.

### Μετρήσεις 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου:

Για το Σχήμα 3.1-1: BH-Curve φερρίτη N87

<u>H (A/m)</u>	<u>B (mT)</u>
0	0
15	0,1
25	0,2
50	0,3
110	0,4
200	0,43
400	0,46
600	0,475
800	0,485
1000	0,49
1200	0,495

Για το Σχήμα 3.2-2: Διάκενα επίτευξης ισχύος

<u>Διάκενο (cm)</u>	<u>Ισχύς εξόδου (KW)</u>
4	56,045
6	35,318
<b>7</b>	<b>28,638</b>
8	23,421
10	15,911
12	11,061
<b>14</b>	<b>7,786</b>
15	6,572
16	5,555
18	4,013
<b>19</b>	<b>3,419</b>
20	2,921

Για το Σχήμα 3.3-2: Ανοχή στην μετατόπιση με  $Q_{max}=6$  στα 3,6kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	3,419	6	1,05
4	3,18	6	1,13
8	2,546	6	1,41
12	1,704	6	2,11
16	0,898	6	4,01
<b>17</b>	<b>0,729</b>	<b>6</b>	<b>4,94</b>
18	0,57	6	6,32

Για το Σχήμα 3.3-3: Ανοχή στην μετατόπιση στα 7,2kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	7,786	6	0,93
4	7,188	6	1
8	5,619	6	1,28
12	3,588	6	2,01
16	1,733	6	4,15
<b>17</b>	<b>1,347</b>	<b>6</b>	<b>5,35</b>
20	0,483	6	14,91

Για το Σχήμα 3.3-4: Ανοχή στην μετατόπιση στα 30kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	28,638	6	1,05
4	26,08	6	1,15
8	19,606	6	1,53
12	11,829	6	2,54
<b>16</b>	<b>5,084</b>	<b>6</b>	<b>5,9</b>
20	0,98	6	30,61

Για το Σχήμα 3.4-2: Διάκενα επίτευξης ισχύος μικρότερης

Διάκενο (cm)	Ισχύς εξόδου (KW)
<b>4</b>	8,79
5	<b>6,419</b>
6	4,75
<b>7</b>	<b>3,556</b>
8	2,684
10	1,572
12	0,942
14	0,579
16	0,363
18	0,234
20	0,153

Για το Σχήμα 3.4-3: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 3,6kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	3,556	6	1,01
4	2,944	6	1,22
8	1,598	6	2,25
<b>11</b>	<b>0,654</b>	<b>6</b>	<b>5,5</b>
12	0,415	6	8,67

Για το Σχήμα 3.4-4: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 7,2kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	6,419	6	1,12
4	5,251	6	1,37
8	2,765	6	2,6
<b>10</b>	<b>1,572</b>	<b>6</b>	<b>4,58</b>
11	1,08	6	6,67
12	0,665	6	10,83

Για το Σχήμα 3.4-6: Διάκενα επίτευξης ισχύος μεγαλύτερης

Διάκενο (cm)	Ισχύς εξόδου (KW)
4	235,554
6	161,294
8	116,766
10	86,872
12	65,866
14	50,814
16	39,689
<b>18</b>	<b>31,246</b>
19	27,796
20	24,781
22	19,798
24	15,896
26	12,829
28	10,42
30	8,497
31	7,699
<b>32</b>	<b>6,966</b>
34	5,739
36	4,739
38	3,932
<b>39</b>	<b>3,587</b>
40	3,283

Για το Σχήμα 3.4-7: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 3,6kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	3,587	6	1
8	3,212	6	1,12
16	2,273	6	1,58
24	1,197	6	3
<b>29</b>	<b>0,645</b>	<b>6</b>	<b>5,58</b>
30	0,554	6	6,5
32	0,391	6	9,21

Για το Σχήμα 3.4-8: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 7,2kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	6,966	6	1,03
8	6,157	6	1,17
16	4,172	6	1,73
24	1,995	6	3,61
<b>27</b>	<b>1,322</b>	<b>6</b>	<b>5,45</b>
28	1,127	6	6,39
32	0,504	6	14,29

Για το Σχήμα 3.4-9: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 30kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	31,246	6	0,96
8	26,809	6	1,12
16	16,522	6	1,82
24	6,327	6	4,74
<b>25</b>	<b>5,311</b>	<b>6</b>	<b>5,65</b>
26	4,397	6	6,83
32	0,706	6	42,49

#### Μετρήσεις 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου:

Για το Σχήμα 4.2-1: Διάκενα επίτευξης ισχύος DDQ

Διάκενο (cm)	Ισχύς εξόδου (KW)
4	50,787
<b>6</b>	<b>32,84</b>
7	26,768
8	21,989
10	15,077
12	10,498
<b>14</b>	<b>7,414</b>
15	6,265
16	5,299
<b>18</b>	<b>3,867</b>
19	3,269
20	2,797

Για το Σχήμα 4.3-1: Ανοχή στην μετατόπιση με  $Q_{max}=6$  στα 3,6kW, Σχήμα 4.3-2: Ισχύς εκάστοτε πηνίου σε μεταβολές μετατοπίσεων, Σχήμα 4.3-3: Ποσοστό ισχύος εκάστοτε πηνίου επί της συνολικής:

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς DD πηνίου(KVA)	Ισχύς Q πηνίου (KVA)
0	3,867	6	0,93	3,867	0
8	3,222	6	1,12	2,824	0,398
16	2,05	6	1,76	0,973	1,077
24	1,303	6	2,76	0,028	1,275
32	1,146	6	3,14	0,222	0,924
40	1,014	6	3,55	0,586	0,428
48	0,669	6	5,38	0,554	0,115
<b>49</b>	<b>0,621</b>	<b>6</b>	<b>5,8</b>	<b>0,528</b>	<b>0,046</b>
52	0,481	6	7,48	0,435	0,093

Για το Σχήμα 4.3-4: Ανοχή στην μετατόπιση στα 7,2kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς DD πηνίου(KVA)	Ισχύς Q πηνίου (KVA)
0	7,414	6	0,97	7,414	0
8	6,181	6	1,16	5,342	0,839
16	3,798	6	1,9	1,642	2,156
24	2,419	6	2,98	0,008	2,411
32	2,24	6	3,21	0,628	1,612
40	1,96	6	3,67	1,306	0,654
<b>48</b>	<b>1,2</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>1,07</b>	<b>0,13</b>
52	0,813	6	8,86	0,777	0,036

Για το Σχήμα 4.3-5: Ανοχή στην μετατόπιση στα 30kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς DD πηνίου(KVA)	Ισχύς Q πηνίου (KVA)
0	32,84	6	0,91	32,84	0
8	27,002	6	1,11	22,325	4,677
16	15,945	6	1,88	5,671	10,274
24	9,691	6	3,1	0,088	9,603
32	9,92	6	3,02	4,527	5,393
40	8,262	6	3,63	6,655	1,607
<b>46</b>	<b>5,19</b>	<b>6</b>	<b>5,78</b>	<b>4,898</b>	<b>0,292</b>
47	4,682	6	6,41	4,496	0,186
48	4,18	6	7,18	4,076	0,104
52	2,518	6	11,91	2,518	0

Για το Σχήμα 4.4-2: Διάκενα επίτευξης ισχύος μικρότερης DDQ

Διάκενο (cm)	Ισχύς εξόδου (KW)
<b>4</b>	<b>7,988</b>
5	5,896
6	4,383
<b>7</b>	<b>3,298</b>
8	2,501
10	1,466
12	0,881
14	0,542
16	0,341
18	0,22
20	0,144

Για το Σχήμα 4.4-3: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 3,6kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς DD πηνίου(KVA)	Ισχύς Q πηνίου (KVA)
0	3,298	6	1,09	3,298	0
8	2,196	6	1,64	1,475	0,721
16	1,064	6	3,38	0	1,064
24	1,025	6	3,51	0,57	0,455
<b>31</b>	<b>0,645</b>	<b>6</b>	<b>5,58</b>	<b>0,577</b>	<b>0,068</b>
32	0,568	6	6,34	0,524	0,044
36	0,297	6	12,12	0,295	0,002



Για το Σχήμα 4.4-4: Ανοχή μικρότερης στην μετατόπιση στα 7,2kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς DD πηνίου(KVA)	Ισχύς Q πηνίου (KVA)
0	7,988	6	0,9	7,988	0
8	5,281	6	1,36	3,357	1,924
16	2,471	6	2,91	0,012	2,459
24	2,511	6	2,87	1,614	0,897
<b>32</b>	<b>1,231</b>	<b>6</b>	<b>5,85</b>	<b>1,185</b>	<b>0,046</b>
36	0,584	6	12,33	0,582	0,001

Για το Σχήμα 4.4-6: Διάκενα επίτευξης ισχύος μεγαλύτερης DDQ

Διάκενο (cm)	Ισχύς εξόδου (KW)
4	213,118
6	149,37
8	109,669
10	82,259
12	63,027
14	48,833
16	38,185
<b>18</b>	<b>30,081</b>
20	23,916
22	19,098
24	15,35
26	12,404
28	10,078
30	8,231
<b>31</b>	<b>7,445</b>
32	6,735
34	5,544
36	4,588
<b>38</b>	<b>3,808</b>
39	3,477
40	3,179

Για το Σχήμα 4.4-7: Ανοχή μεγαλύτερης στην μετατόπιση στα 3,6kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς DD πηνίου(KVA)	Ισχύς Q πηνίου (KVA)
0	3,808	6	0,95	3,808	0
8	3,556	6	1,01	3,398	0,158
16	2,933	6	1,23	2,387	0,546
24	2,191	6	1,64	1,237	0,954
32	1,578	6	2,28	0,39	1,188
40	1,119	6	3,22	0,026	1,173
48	1,005	6	3,58	0,047	0,958
56	0,879	6	4,1	0,221	0,658
64	0,735	6	4,89	0,354	0,381
<b>70</b>	<b>0,604</b>	<b>6</b>	<b>5,96</b>	<b>0,379</b>	<b>0,225</b>
71	0,58	6	6,21	0,376	0,204
72	0,558	6	6,45	0,373	0,185

Για το Σχήμα 4.4-8: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 7,2kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς DD πηνίου(KVA)	Ισχύς Q πηνίου (KVA)
0	7,445	6	0,97	7,445	0
8	6,9	6	1,04	6,553	0,347
16	5,592	6	1,29	4,408	1,184
24	4,07	6	1,77	2,067	2,003
32	2,892	6	2,49	0,495	2,397
40	2,252	6	3,2	0,001	2,251
48	1,918	6	3,63	0,252	1,73
56	1,772	6	4,06	0,681	1,091
64	1,458	6	4,94	0,901	0,557
<b>69</b>	<b>1,21</b>	<b>6</b>	<b>5,95</b>	<b>0,886</b>	<b>0,324</b>
70	1,158	6	6,22	0,871	0,287
72	1,055	6	6,82	0,832	0,223

Για το Σχήμα 4.4-9: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 30kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς DD πηνίου(KVA)	Ισχύς Q πηνίου (KVA)
0	30,081	6	1	30,081	0
8	27,59	6	1,09	25,789	1,801
16	21,719	6	1,38	15,91	5,809
24	15,088	6	1,99	6,065	9,023
32	10,388	6	2,89	0,655	9,733
40	12,363	6	2,42	4,141	8,222
48	8,276	6	3,62	2,753	5,523
56	7,506	6	4	4,639	2,867
64	5,764	6	5,2	4,71	1,054
<b>66</b>	<b>5,24</b>	<b>6</b>	<b>5,73</b>	<b>4,482</b>	<b>0,758</b>
67	4,974	6	6,03	4,341	0,633
68	4,703	6	6,38	4,181	0,522
72	3,71	6	8,09	3,46	0,25

**Μετρήσεις 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου:**

Για το Σχήμα 5.1-2: Επικάλυψη μηδενισμού συντελεστή σύζευξης

Επικάλυψη (mm)	K
97,5	0,04
107,5	0,012
<b>112,5</b>	<b>0,00008</b>
117,5	0,012
122,5	0,024
127,5	0,036
137,5	0,059
147,5	0,082
157,5	0,104
167,5	0,123

Για το Σχήμα 5.2-1: Διάκενα επίτευξης ισχύος BP

Διάκενο (cm)	Ισχύς εξόδου (KW)
4	61,382
6	36,964
<b>7</b>	<b>29,331</b>
8	23,524
10	15,62
12	10,614
<b>14</b>	<b>7,37</b>
16	5,219
<b>18</b>	<b>3,733</b>
20	2,701

Για το Σχήμα 5.3-1: Ανοχή στην μετατόπιση με  $Q_{\max}=6$  στα 3,6kW, Σχήμα 5.3-2: Ισχύς εκάστοτε πηνίου σε μεταβολές μετατοπίσεων, Σχήμα 5.3-3: Ποσοστό ισχύος εκάστοτε πηνίου επί της συνολικής

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς αριστερού πηνίου(KVA)	Ισχύς δεξιού πηνίου (KVA)
0	3,733	6	0,96	1,886	1,847
8	2,923	6	1,23	0,707	2,216
16	1,558	6	2,31	0,009	1,549
24	0,955	6	3,77	0,344	0,611
32	0,983	6	3,66	0,973	0,1
40	1,111	6	3,24	1,111	0
48	0,798	6	4,51	0,775	0,023
<b>51</b>	<b>0,637</b>	<b>6</b>	<b>5,65</b>	<b>0,611</b>	<b>0,027</b>
52	0,579	6	6,22	0,552	0,027

Για το Σχήμα 5.3-4: Ανοχή στην μετατόπιση στα 7,2kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς αριστερού πηνίου(KVA)	Ισχύς δεξιού πηνίου (KVA)
0	7,37	6	0,98	3,715	3,655
8	5,593	6	1,29	1,359	4,234
16	2,766	6	2,6	0,007	2,759
24	1,749	6	4,12	0,798	0,951
32	2,101	6	3,43	2,012	0,089
40	2,117	6	3,4	2,098	0,019
48	1,408	6	5,11	1,333	0,075
<b>49</b>	<b>1,298</b>	<b>6</b>	<b>5,55</b>	<b>1,222</b>	<b>0,076</b>
50	1,186	6	6,07	1,11	0,076
52	0,972	6	7,41	0,9	0,072

Για το Σχήμα 5.3-5: Ανοχή στην μετατόπιση στα 30kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς αριστερού πηνίου(KVA)	Ισχύς δεξιού πηνίου (KVA)
0	29,331	6	1,02	14,893	14,438
8	20,709	6	1,45	5,239	15,47
16	8,714	6	3,44	0,003	8,711
24	5,828	6	5,14	3,624	2,204
32	7,595	6	3,95	7,578	0,017
40	7,085	6	4,23	6,697	0,388
43	6,105	6	4,91	5,622	0,483
44	5,711	6	5,25	5,221	0,49
<b>45</b>	<b>5,3</b>	<b>6</b>	<b>5,66</b>	<b>4,816</b>	<b>0,484</b>
46	4,451	6	6,74	4,41	0,041
48	4,036	6	7,43	3,611	0,425
52	2,478	6	12,11	2,177	0,301

Για το Σχήμα 5.4-1: Επικάλυψη μηδενισμού συντελεστή σύζευξης μικρότερης

Επικάλυψη (mm)	K
65	0,016
<b>70</b>	<b>0,004</b>
75	0,022
80	0,0412
85	0,059
95	0,093
105	0,12

Για το Σχήμα 5.4-3: Διάκενα επίτευξης ισχύος μικρότερης BP

Διάκενο (cm)	Ισχύς εξόδου (KW)
4	8,541
<b>5</b>	<b>6,092</b>
6	4,441
<b>7</b>	<b>3,286</b>
8	2,454
10	1,414
12	0,842
14	0,516
16	0,324
18	0,207
20	0,136

Για το Σχήμα 5.4-4: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 3,6kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς αριστερού πηνίου(KVA)	Ισχύς δεξιού πηνίου (KVA)
0	3,286	6	1,1	1,616	1,67
8	1,711	6	2,1	0,194	1,517
16	0,73	6	4,93	0,377	0,353
24	1,077	6	3,34	1,077	0
<b>32</b>	<b>0,679</b>	<b>6</b>	<b>5,3</b>	<b>0,64</b>	<b>0,039</b>
33	0,597	6	6,03	0,559	0,029
34	0,514	6	7	0,478	0,038
36	0,362	6	9,94	0,333	0,036

Για το Σχήμα 5.4-5: Ανοχή μικρότερης σε μετατόπιση στα 7,2kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς αριστερού πηνίου(KVA)	Ισχύς δεξιού πηνίου (KVA)
0	6,092	6	1,18	3,052	3,04
8	3	6	2,4	0,345	2,655
14	1,251	6	5,76	0,3	0,951
14,5	1,231	6	5,85	0,399	0,832
15	1,229	6	5,86	0,507	0,722
15,5	1,24	6	5,81	0,619	0,621
16	1,265	6	5,69	0,738	0,527
17	1,347	6	5,35	0,982	0,365
24	1,917	6	3,76	1,907	0,01
30	1,417	6	5,08	1,329	0,088
<b>31</b>	<b>1,267</b>	<b>6</b>	<b>5,68</b>	<b>1,18</b>	<b>0,087</b>
32	1,113	6	6,47	1,03	0,083

Για το Σχήμα 5.4-6: Επικάλυψη μηδενισμού συντελεστή σύζευξης μεγαλύτερης

Επικάλυψη (mm)	K
150	0,037
160	0,019
<b>170</b>	<b>0,003</b>
180	0,013
190	0,029

Για το Σχήμα 5.4-8: Διάκενα επίτευξης ισχύος μεγαλύτερης ΒΡ

Διάκενο (cm)	Ισχύς εξόδου (KW)
4	280,62
6	184,982
8	128,688
10	92,765
12	68,505
14	51,73
16	39,62
<b>18</b>	<b>30,722</b>
20	24,083
22	19,036
24	15,168
26	12,17
28	9,829
30	7,974
<b>31</b>	<b>7,209</b>
32	6,521
34	5,348
36	4,405
<b>38</b>	<b>3,648</b>
40	3,041

Για το Σχήμα 5.4-9: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 3,6kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς αριστερού πηνίου(KVA)	Ισχύς δεξιού πηνίου (KVA)
0	3,648	6	0,99	1,804	1,844
8	3,338	6	1,08	1,124	2,214
16	2,606	6	1,38	0,429	2,177
24	1,791	6	2,01	0,04	1,751
32	1,216	6	2,96	0,054	1,162
40	0,96	6	3,75	0,341	0,619
48	0,916	6	3,93	0,663	0,253
56	0,914	6	3,94	0,845	0,069
64	0,84	6	4,29	0,832	0,008
72	0,678	6	5,31	0,678	0
74	0,629	6	5,72	0,628	0,001
<b>75</b>	<b>0,604</b>	<b>6</b>	<b>5,96</b>	<b>0,602</b>	<b>0,002</b>
76	0,578	6	6,23	0,576	0,002

Για το Σχήμα 5.4-10: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 7,2kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς αριστερού πηνίου(KVA)	Ισχύς δεξιού πηνίου (KVA)
0	7,209	6	1	3,644	3,556
8	6,513	6	1,11	2,178	4,335
16	4,887	6	1,47	0,755	4,132
24	3,198	6	2,25	0,037	3,161
32	2,119	6	3,4	0,194	1,925
40	1,764	6	4,08	0,871	0,893
48	1,807	6	3,98	1,528	0,279
56	1,839	6	3,92	1,801	0,038
64	1,65	6	4,36	1,649	0,001
72	1,262	6	5,71	1,243	0,019
<b>73</b>	<b>1,206</b>	<b>6</b>	<b>5,97</b>	<b>1,185</b>	<b>0,021</b>
74	1,149	6	6,27	1,126	0,023
76	1,037	6	6,94	1,01	0,027

Για το Σχήμα 5.4-11: Ανοχή μεγαλύτερης σε μετατόπιση στα 30kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς αριστερού πηνίου(KVA)	Ισχύς δεξιού πηνίου (KVA)
0	30,722	6	0,98	15,58	15,142
8	26,877	6	1,12	9,035	17,842
16	18,472	6	1,62	2,669	15,803
24	10,779	6	2,78	0,013	10,766
32	7,018	6	4,27	1,618	5,4
40	6,816	6	4,4	5,11	1,706
48	7,602	6	3,95	7,433	0,169
56	7,603	6	3,95	7,556	0,047
64	6,293	6	4,77	6,022	0,271
<b>69</b>	<b>5,021</b>	<b>6</b>	<b>5,97</b>	<b>4,961</b>	<b>0,33</b>
70	4,748	6	6,32	4,416	0,332
72	4,201	6	7,14	3,874	0,327
76	3,157	6	9,5	2,862	0,295



### Μετρήσεις 6<sup>ου</sup> κεφαλαίου:

Για το Σχήμα 6.2-2: Διάκενα επίτευξης ισχύος CP-CP

Διάκενο (cm)	Ισχύς εξόδου (KW)
4	40,985
<b>5</b>	<b>32,237</b>
6	25,997
8	17,239
10	11,766
12	8,07
<b>13</b>	<b>6,79</b>
14	5,71
16	4,06
<b>17</b>	<b>3,45</b>
18	2,931
20	2,128

Για το Σχήμα 6.2-3: Ανοχή στην μετατόπιση στα 3,6kW

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	3,45	6	1,04
4	3,228	6	1,12
8	2,675	6	1,35
12	1,936	6	1,86
16	1,222	6	2,95
<b>20</b>	<b>0,651</b>	<b>6</b>	<b>5,53</b>
21	0,537	6	6,7
22	0,439	6	8,2
24	0,275	6	13,09

Για το Σχήμα 6.3-2: Ανοχή σε μετατόπιση με διάκενο 19cm ενός συστήματος CP (πρωτεύον) -DD(δευτερεύον)

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	0	6	
8	0,441	6	8,16
9	0,542	6	6,64
9,5	0,591	6	6,09
<b>10</b>	<b>0,641</b>	<b>6</b>	<b>5,62</b>
16	1,186	6	3,04
24	1,356	6	2,65
32	0,915	6	3,93
<b>36</b>	<b>0,629</b>	<b>6</b>	<b>5,72</b>
36,5	0,593	6	6,07
37	0,56	6	6,43
38	0,495	6	7,27
40	0,379	6	9,5
48	0,094	6	
56	0,013	6	
64	0,001	6	

Για το Σχήμα 6.3-3: Ανοχή σε μετατόπιση με διάκενο 19cm ενός συστήματος DD (πρωτεύον)-CP (δευτερεύον)

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης
0	0	6	
8	0,488	6	7,37
9	0,598	6	6,02
<b>9,5</b>	<b>0,654</b>	<b>6</b>	<b>5,5</b>
10	0,709	6	5,08
16	1,314	6	2,74
24	1,498	6	2,4
32	1,005	6	3,58
36	0,69	6	5,22
36,5	0,652	6	5,52
<b>37</b>	<b>0,616</b>	<b>6</b>	<b>5,84</b>
38	0,545	6	6,61
40	0,418	6	8,61
48	0,104	6	
56	0,014	6	
64	0,001	6	

Για το Σχήμα 6.4-2: Ανοχή σε μετατόπιση με διάκενο 18cm CP-DDQ διάταξης, Σχήμα 6.4-3: Ποσοστό ισχύος εκάστοτε πηνίου επί της συνολικής

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς DD πηνίου(KVA)	Ισχύς Q πηνίου (KVA)
0	1,933	6	1,86	0	1,933
4	1,98	6	1,82	0,142	1,838
8	2,075	6	1,73	0,511	1,564
16	2,163	6	1,66	1,353	0,81
24	1,758	6	2,04	1,527	0,231
32	1,019	6	3,53	1,006	0,013
<b>37</b>	<b>0,609</b>	<b>6</b>	<b>5,91</b>	<b>0,607</b>	<b>0,002</b>
38	0,535	6	6,73	0,53	0,005
40	0,416	6	8,65	0,404	0,012

Για το Σχήμα 6.5-2: Ποσοστό ισχύος εκάστοτε πηνίου επί της συνολικής, Σχήμα 6.5-3: Ανοχή σε μετατόπιση με διάκενο 18cm CP-BP διάταξης

Μετατόπιση (cm)	Ισχύς εξόδου (KVA)	Q max	Q μετατόπισης	Ισχύς αριστερού πηνίου(KVA)	Ισχύς δεξιού πηνίου (KVA)
0	1,71	6	2,11	0,892	0,818
4	1,893	6	1,9	1,489	0,404
8	2,014	6	1,79	1,884	0,13
16	2,313	6	1,56	2,298	0,015
24	1,923	6	1,87	1,759	0,164
32	1,103	6	3,26	0,895	0,208
36	0,708	6	5,08	0,536	0,172
<b>37</b>	<b>0,622</b>	<b>6</b>	<b>5,79</b>	<b>0,461</b>	<b>0,161</b>
38	0,545	6	6,61	0,395	0,15
40	0,403	6	8,93	0,277	0,126

