



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Μελέτη Βασικών Τοπολογιών Αντιστάθμισης στην Κυκλική Διάταξη για την Επαγωγική Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

Διπλωματική Εργασία

Γεωργόπουλος Χ. Δημήτριος

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

Αθήνα, Μάρτιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών &
Μηχανικών Υπολογιστών

Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Μελέτη Βασικών Τοπολογιών Αντιστάθμισης στην Κυκλική Διάταξη για την Επαγωγική Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

Διπλωματική Εργασία

Γεωργόπουλος Χ. Δημήτριος

Επιβλέπων: Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή τη 2^η Μαρτίου 2018.

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

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

.....
Γεωργιλάκης
Πάυλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

.....

Γεωργόπουλος Χ. Δημήτριος

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

Copyright© Γεωργόπουλος Χ. Δημήτριος, 2018

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.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η σύγκριση των τεσσάρων Βασικών Τοπολογιών Αντιστάθμισης στην κυκλική διάταξη για την Επαγωγική Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων. Οι εξεταζόμενες τοπολογίες αντιστάθμισης, ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των πυκνωτών σε πρωτεύον-δευτερεύον, είναι: Σειρά-Σειρά, Παράλληλα-Παράλληλα, Παράλληλα-Σειρά, Σειρά-Παράλληλα. Αρχικά, εκφράστηκαν με μαθηματικό τρόπο τα εξεταζόμενα μεγέθη (ρεύμα στα διάφορα σημεία της διάταξης σε πρωτεύον και δευτερεύον, μεταφερόμενη ισχύς, απόδοση κλπ.) της εκάστοτε τοπολογίας. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε μελέτη ως προς την επίδραση των αντιστάσεων των τυλιγμάτων, της αντίστασης του φορτίου και της συχνότητας λειτουργίας στην απόδοση και στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος στη Στατική Επαγωγική Φόρτιση και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της κάθε τοπολογίας. Τα αποτελέσματα των τοπολογιών εξήχθησαν μέσω προσομοιώσεων στο περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής Matlab. Στη συνέχεια, παρατηρήθηκε το Φαινόμενο της Διακλάδωσης και πως αυτό επηρεάζεται από την αντίσταση του φορτίου, αλλά και από την επιλογή των πυκνωτών αντιστάθμισης. Πραγματοποιήθηκε, επίσης, μελέτη της ικανότητας μεταφοράς ισχύος του συστήματος σε διάφορες μετατοπίσεις στη Στατική Επαγωγική Φόρτιση και πως επηρεάζεται το Φαινόμενο Διακλάδωσης στις μετατοπίσεις αυτές. Τέλος, μελετήθηκε η Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση στις τέσσερις Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε μελέτη σχετικά με τη μεταφερόμενη ισχύ και την απόδοση του συστήματος κατά τη διάρκεια που το Όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε εξετάζοντας διάφορες περιπτώσεις μεταβολής της συχνότητας λειτουργίας και της αντίστασης φορτίου.

Λέξεις Κλειδιά

Κυκλική Διάταξη Επαγωγικής Φόρτισης, Ηλεκτρικά Οχήματα, Τοπολογίες Αντιστάθμισης, Στατική Επαγωγική Φόρτιση, Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση, Φαινόμενο Διακλάδωσης

Abstract

The scope of this thesis is to study and compare the four basic compensation topologies using a circular magnetic coupler in Inductive Charging of Electrical Vehicles. Depending on how the compensation capacitors are connected to the primary and secondary side coils, the considered compensation topologies are: Series-Series, Parallel-Parallel, Parallel-Series, Series-Parallel. At first, the mathematical expressions of the circuit of each topology were calculated (current of different lines of primary and secondary side circuits, transferred power, efficiency etc.). Afterwards, the effect of the coils' resistances, the load resistance and the operating frequency on the efficiency and the power transfer capability of the system was studied in Static Inductive Charging, while also comparing the results of each topology. The presented results were extracted using numerical computing environment Matlab. Moreover, the Bifurcation Phenomenon as well as the effect of the load resistance and the compensation capacitors on this phenomenon, was investigated. Additionally, the power transfer capability of the system has been studied considering different misalignments cases, while also investigating the impact of misalignment on the Bifurcation Phenomenon. Finally, Dynamic Inductive Charging was studied for the four basic compensation topologies. Specifically, a study has been carried out concerning the impact of the Vehicle movement over the charging station on the transferred power and the efficiency of the system. The analysis has been performed considering a number of different cases for the operating frequency and the load resistance.

Keywords

Circular Magnetic Coupler, Electric Vehicles, Compensation Topologies, Static Inductive Charging, Dynamic Inductive Charging, Bifurcation Phenomena

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Λέξεις Κλειδιά.....	3
Abstract.....	5
Keywords.....	5
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή.....	11
1.1 Επαγωγική Φόρτιση.....	11
1.2 Σχεδίαση Μαγνητικών Συζευκτών.....	12
1.2.1 Τύποι Στατικών Μαγνητικών Συζευκτών.....	13
1.2.2 Τύποι Δυναμικών Μαγνητικών Συζευκτών.....	16
1.3 Τεχνικές Συντονισμού.....	18
1.4 Τεχνικές Ελέγχου.....	21
Κεφάλαιο 2 ^ο : Περιγραφή των Τοπολογιών στη Στατική Φόρτιση.....	23
2.1 Περιγραφή Μαγνητικής Διάταξης.....	23
2.2 Μαθηματικές Εκφράσεις Τοπολογιών Αντιστάθμισης.....	26
2.2.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS).....	26
2.2.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP).....	29
2.2.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS).....	32
2.2.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP).....	36
2.3 Επίδραση των Αντιστάσεων Τυλιγμάτων στις Εξεταζόμενες Τοπολογίες Αντιστάθμισης.....	38
2.3.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS).....	40
2.3.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP).....	40
2.3.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS).....	42
2.3.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP).....	43

2.4	Ικανότητα Μεταφοράς Ισχύος.....	44
2.4.1	Επίδραση της Αντίστασης Φορτίου.....	44
2.4.2	Επίδραση της Συχνότητας Λειτουργίας του Συστήματος.....	48
Κεφάλαιο 3 ^ο : Φαινόμενο Διακλάδωσης.....		59
3.1	Φαινόμενο Διακλάδωσης για τις τέσσερις Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης.....	59
3.1.1	Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS).....	60
3.1.2	Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP).....	62
3.1.3	Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS).....	65
3.1.4	Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP).....	67
3.2	Επίδραση των Πυκνωτών Αντιστάθμισης στο Φαινόμενο Διακλάδωσης.....	69
3.2.1	Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS).....	69
3.2.2	Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP).....	72
3.2.3	Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS).....	74
3.2.4	Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP).....	77
3.3	Επίδραση της Αντίστασης Φορτίου στο Φαινόμενο Διακλάδωσης.....	80
3.3.1	Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS).....	80
3.3.2	Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP).....	83
3.3.3	Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS).....	86
3.3.4	Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP).....	88

Κεφάλαιο 4 ^ο : Επίδραση της Μετατόπισης στη Μεταφερόμενη Ισχύ και την Απόδοση του Συστήματος.....	91
4.1 Εισαγωγή.....	91
4.2 Αποτελέσματα σε Διάφορες Μετατοπίσεις.....	91
4.2.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS).....	92
4.2.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP).....	94
4.2.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS).....	96
4.2.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP).....	97
4.3 Φαινόμενο Διακλάδωσης σε Διάφορες Μετατοπίσεις.....	100
4.3.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS).....	100
4.3.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP).....	103
4.3.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS).....	105
4.3.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP).....	108
Κεφάλαιο 5 ^ο : Συμπεριφορά των Βασικών Τοπολογιών Αντιστάθμισης στη Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση.....	113
5.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS).....	113
5.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP).....	120
5.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS).....	126
5.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP).....	131
5.5 Σύγκριση των Τοπολογιών Αντιστάθμισης στη Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση.....	136
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα και Επεκτάσεις.....	141
6.1 Συμπεράσματα.....	141
6.2 Επεκτάσεις.....	142
Αναφορές.....	143
Παράρτημα Α.....	147
Παράρτημα Β.....	149

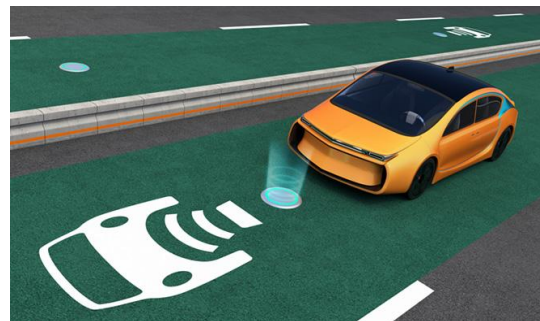
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

1.1 Επαγωγική Φόρτιση

Η Επαγωγική Φόρτιση είναι μία ακμάζουσα τεχνολογία φόρτισης, η οποία επιτρέπει την ασύρματη μεταφορά ενέργειας εξαλείφοντας τη χρήση καλωδίων. Χρησιμοποιείται σε πολλές πρακτικές εφαρμογές χαμηλής ισχύος όπως κινητά τηλέφωνα και άλλες μικρές συσκευές τεχνολογίας, αλλά και σε εφαρμογές υψηλής ισχύος όπως φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων.



(a)

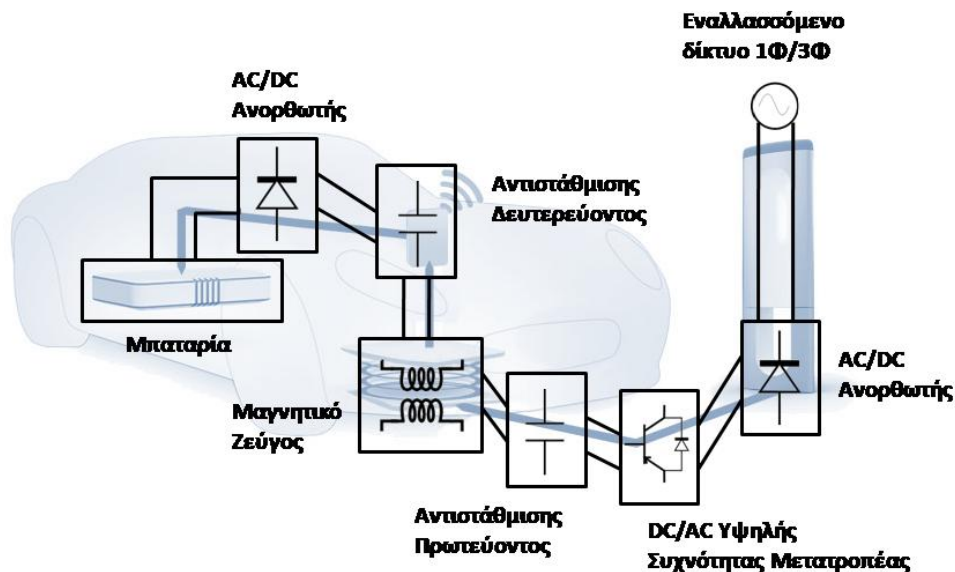


(b)

Σχήμα 1.1-1: (a) Στατική Επαγωγική Φόρτιση, (b) Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση

Η Επαγωγική Φόρτιση σε ηλεκτρικά οχήματα πραγματοποιείται όταν το Ηλεκτρικό Όχημα, το οποίο είναι εξοπλισμένο με την κατάλληλη κυκλωματική διάταξη, τοποθετηθεί πάνω από το φορτιστή, ο οποίος τροφοδοτείται από το AC δίκτυο. Διακρίνονται δύο κατηγορίες Επαγωγικής Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων: η Στατική Επαγωγική Φόρτιση, (**Σχήμα 1.1-1(a)**), όπου το Ηλεκτρικό Όχημα σταθμεύει πάνω από ένα φορτιστή και η Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση, (**Σχήμα 1.1-1(b)**), όπου το Όχημα έχει τη δυνατότητα να φορτίζει την μπαταρία του ενώ κινείται στο δρόμο.

Το μεγάλο πρόβλημα των Ηλεκτρικών Οχημάτων, σήμερα, είναι η περιορισμένη αυτονομία και ο μεγάλος χρόνος επαναφόρτισης της μπαταρίας. Με τη Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση, το Ηλεκτρικό Όχημα είναι πλέον σε θέση να φορτίζει σε διάφορα σημεία μιας διαδρομής, με αποτέλεσμα να εξαλείφεται η ανάγκη για συχνές στάσεις σε σταθμούς φόρτισης. Επιπλέον, σύμφωνα με μελέτες, η χρήση Επαγωγικών Συστημάτων Φόρτισης μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας κατά 20 % και παραπάνω, [1], και κατά συνέπεια σε μείωση του κόστους της μπαταρίας.



Σχήμα 1.1-2: Σύστημα Επαγωγικής Φόρτισης σε Ηλεκτρικά Οχήματα

Στο Σχήμα 1.1-2 παρουσιάζεται ένα Σύστημα Επαγωγικής Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων. Η AC ισχύς η οποία προέρχεται από το AC δίκτυο μετατρέπεται σε μία DC ισχύ μέσω ενός AC/DC μετατροπέα, περιλαμβάνοντας συνήθως και ένα σύστημα διόρθωσης συντελεστή ισχύος (PFC). Στη συνέχεια, η DC ισχύς μετατρέπεται σε μία υψηλής συχνότητα AC ισχύ, μέσω ενός DC/AC μετατροπέα, για την οδήγηση του πηνίου εκπομπής μέσω ενός συστήματος αντιστάθμισης. Ανάμεσα στον DC/AC μετατροπέα και στο πηνίο του πρωτεύοντος, μπορεί να παρεμβληθεί ένας υψηλής συχνότητας μετασχηματιστής απομόνωσης για μεγαλύτερη ασφάλεια και προστασία. Το υψηλής συχνότητας ρεύμα στο πηνίο εκπομπής παράγει ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει μία AC τάση στο πηνίο λήψης. Η μεταφερόμενη ισχύς και η απόδοση βελτιώνονται με χρήση ενός συστήματος πυκνωτών αντιστάθμισης στο δευτερεύον. Τέλος, η AC ισχύς ανορθώνεται με σκοπό τη φόρτιση της μπαταρίας [1].

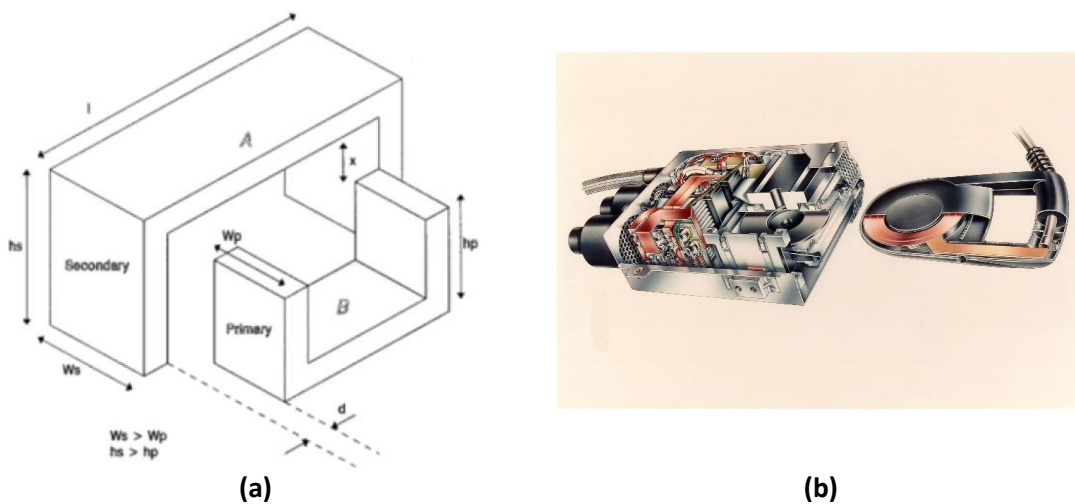
1.2 Σχεδίαση Μαγνητικών Συζευκτών

Σε ένα Σύστημα Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος χρειάζονται δύο διατάξεις μαγνητικών συζευκτών. Η μία βρίσκεται στην πλευρά του φορτιστή και ονομάζεται πρωτεύον συζεύκτης και η άλλη στην πλευρά του Οχήματος και ονομάζεται δευτερεύον συζεύκτης. Ο δευτερεύον συζεύκτης αναφέρεται, συνήθως, και ως *pick-up* πηνίο. Η μορφή των δύο αυτών συζευκτών ποικίλει ανάλογα την εφαρμογή [1].

1.2.1 Τύποι Στατικών Μαγνητικών Συζευκτών

Πρώιμες διατάξεις επαγωγικής φόρτισης περιλαμβάνουν συζεύκτες παρόμοιους με ένα απλό πυρήνα μετασχηματιστή [2], [3], (Σχήμα 1.2-1(a)), έχοντας, όμως, τη δυνατότητα να μεταφέρουν ισχύ μόνο μέσα από ένα πολύ μικρό διάκενο. Πρώιμα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος περιλαμβάνουν, επίσης, συγκεκριμένα *plug-in* συστήματα, όπου ο ένας συζεύκτης έπρεπε να εισαχθεί εντός του άλλου ώστε να πραγματοποιηθεί μεταφορά ισχύος [4], [5], (Σχήμα 1.2-1(b)), τα οποία όμως δεν μπορούν να θεωρηθούν πλήρως ασύρματα. Μια σχεδίαση επαγωγικής διάταξης, παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα προτείνεται στην αναφορά [6], δεν περιλαμβάνει ωστόσο τη χρήση φερριτή στη διάταξη, με αποτέλεσμα να είναι πολύ ευαίσθητη στα γύρω σιδηρομαγνητικά αντικείμενα.

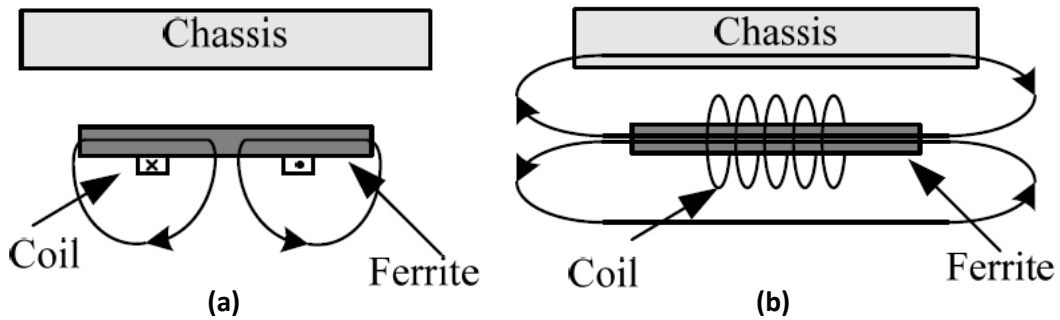
Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων για τη φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων, μελέτες ανέδειξαν νέες μορφές σχεδίασης των συζευκτών οι οποίες επιτρέπουν τη μεταφορά ισχύος σε μεγαλύτερα διάκενα [7], [8], [9], [10].



Σχήμα 1.2-1: (a) Απλός Πυρήνας Μετασχηματιστή [2], (b) Επαγωγικός Φορτιστής Τύπου *plug-in*¹

Οι μαγνητικοί συζεύκτες που περιλαμβάνουν φερριτή στο σχεδιασμό τους, μπορούν να χαρακτηριστούν ως "διπλής όψεως" και "μονής όψεως", ανάλογα με την περιοχή διανομής της μαγνητικής ροής [1]. Οι "διπλής όψεως" συζεύκτες ονομάζονται έτσι λόγω της κατανομής της μαγνητικής ροής όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2-2(b) [7], [8], [11]. Για την αποφυγή απωλειών λόγω δινορευμάτων στο αμάξωμα του Ηλεκτρικού Οχήματος, χρησιμοποιείται θωράκιση αλουμινίου η οποία αποφέρει απώλειες σε ποσοστό 1% ~ 2% [7]. Αντίθετα, στους "μονής όψεως" συζεύκτες, (Σχήμα 1.2-2(b)), η μαγνητική ροή υπάρχει μόνο σε μία πλευρά του συζεύκτη. Επιπλέον, η ροή διαρροής στο πίσω μέρος των συγκεκριμένων συζευκτών περιορίζεται σημαντικά, απαιτώντας πολύ μικρότερη προσπάθεια θωράκισης [1].

¹ http://www.tzev.com/1993_MC_thin_paddle_LPI_car-side_reciever_components_.html

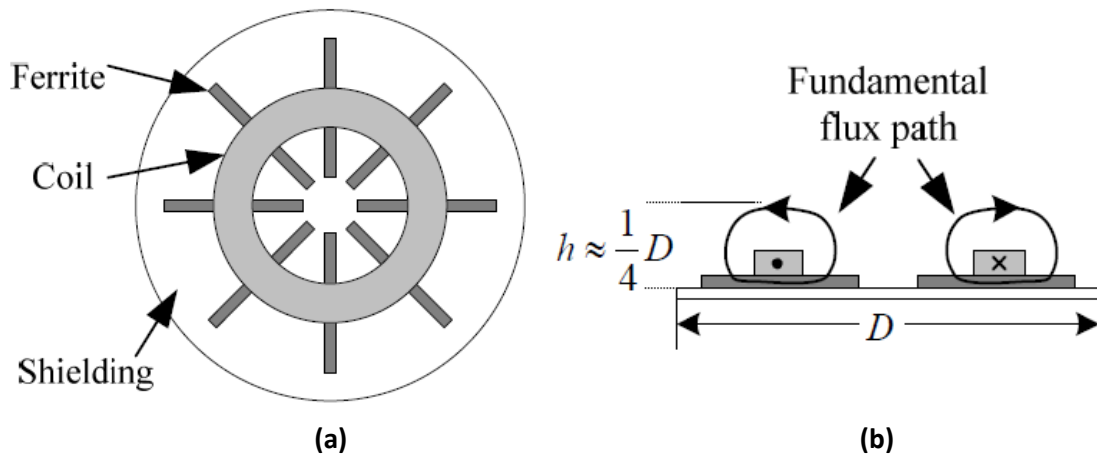


Σχήμα 1.2-2: (a) Μαγνητική Ροή "Μονής Όψεως" [1], (b) Μαγνητική Ροή "Διπλής Όψεως" [1]

Διατάξεις συζευκτών "μονής όψεως" οι οποίες χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές είναι οι εξής:

- Κυκλική Διάταξη

Η κυκλική διάταξη, (Σχήμα 1.2-3(a)), αποτελείται από ένα κυκλικό πηνίο (συνήθως καλώδιο *Litz*) πάνω από ένα στρώμα φερρίτη. Το στρώμα φερρίτη χρησιμοποιείται με στόχο την ενίσχυση και καθοδήγηση της μαγνητικής ροής. Επιπλέον, στο κάτω μέρος της κυκλικής διάταξης χρησιμοποιείται θωράκιση αλουμινίου [1].



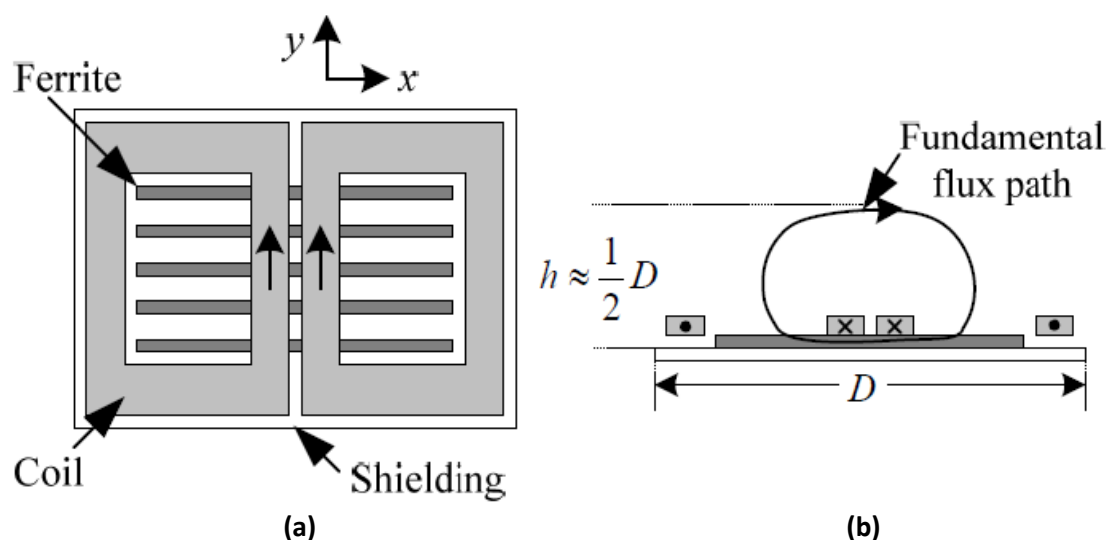
Σχήμα 1.2-3: (a) Κυκλική Διάταξη [1], (b) Μαγνητική Ροή Κυκλικής Διάταξης [1]

Σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης όπου χρησιμοποιούνται συζεύκτες κυκλικής διάταξης, θα πρέπει οι συζεύκτες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος να είναι ίδιοι και να τοποθετούνται ο ένας πάνω από τον άλλον ώστε το σύστημα να είναι σε θέση να μεταφέρει ενέργεια μέσω ενός συγκεκριμένου διακένου.

Τα πλεονεκτήματα των κυκλικής διάταξης συζευκτών είναι ότι το Ηλεκτρικό Όχημα μπορεί να τα προσεγγίσει από οποιαδήποτε κατεύθυνση, λόγω συμμετρικότητας της διάταξης, και οι εκπομπές της μαγνητικής ροής είναι σχετικά χαμηλές [12]. Κύριο μειονέκτημα είναι η μικρή ανοχή στην μετατόπιση των δύο συζευκτών. Συγκεκριμένα, σε μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ίση με περίπου το $\pm 40\%$ της διαμέτρου της διάταξης, η μεταφερόμενη ισχύς σχεδόν μηδενίζεται [12].

- DD Διάταξη

Η διάταξη DD, (Σχήμα 1.2-4(a)), είναι ένας τύπος ορθογώνιου διπολικού συζεύκτη, ο οποίος προτάθηκε από το Πανεπιστήμιο του Auckland [13]. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει δύο πηνία στο πρωτεύον και άλλα δύο στο δευτερεύον όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2-4(a). Τα πηνία αυτά τοποθετούνται πάνω από ράβδους φερρίτη (Σχήμα 1.2-4(a)).

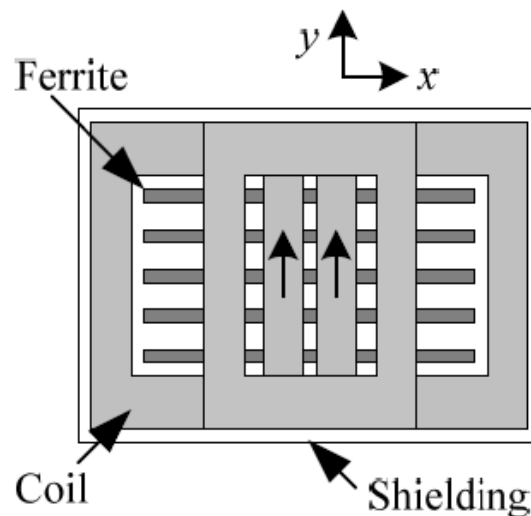


Σχήμα 1.2-4: (a) DD Διάταξη [1], (b) Μαγνητική Ροή DD Διάταξης [1]

Το ύψος της μαγνητικής ροής σε συζεύκτη διάταξης DD είναι περίπου ίσο με το $1/2$ του μήκους του, (Σχήμα 1.2-4(b)), ενώ, για σύγκριση, το αντίστοιχο ύψος σε κυκλική διάταξη είναι ίσο με το $1/4$ της διαμέτρου, (Σχήμα 1.2-3(b)) [1]. Επιπλέον, συγκρίνοντας ένα ζεύγος κυκλικών και DD συζευκτών με παρόμοιες διαστάσεις, αποδεικνύεται ότι η διάταξη DD είναι πιο ανεκτική σε μετατοπίσεις ως τον (y) άξονά που φαίνεται στο Σχήμα 1.2-4(a). Ωστόσο, σε μετατόπισης ως προς τον (x) άξονα ίση με 34% του μήκους της διάταξης, η μεταφερόμενη ισχύς σχεδόν μηδενίζεται [13], [1].

- Διάταξη DDQ

Για την αύξηση της ανοχής της διάταξης DD σε μετατοπίσεις στον οριζόντιο (x) άξονα, ένα επιπλέον πηνίο τετραγωνικής μορφής, ονομαζόμενο Q πηνίο, μπορεί να προστεθεί. Η νέα διάταξη ονομάζεται DDQ [13], [14], [15], [1], (Σχήμα 1.2-5). Η χρήση τέτοιου τύπου διάταξης στον δευτερεύον συζεύκτη επιτρέπει μία ζώνη μεταφοράς ικανοποιητικής ποσότητας ισχύος η οποία είναι σχεδόν τρεις φορές μεγαλύτερη, ανεξαρτήτως της διάταξης που χρησιμοποιείται στον πρωτεύον συζεύκτη, σε σχέση με τη ζώνη ισχύος που παρατηρείται σε σύστημα πρωτεύοντος δευτερεύοντος με κυκλική - κυκλική ή DD-DD διάταξη [12].



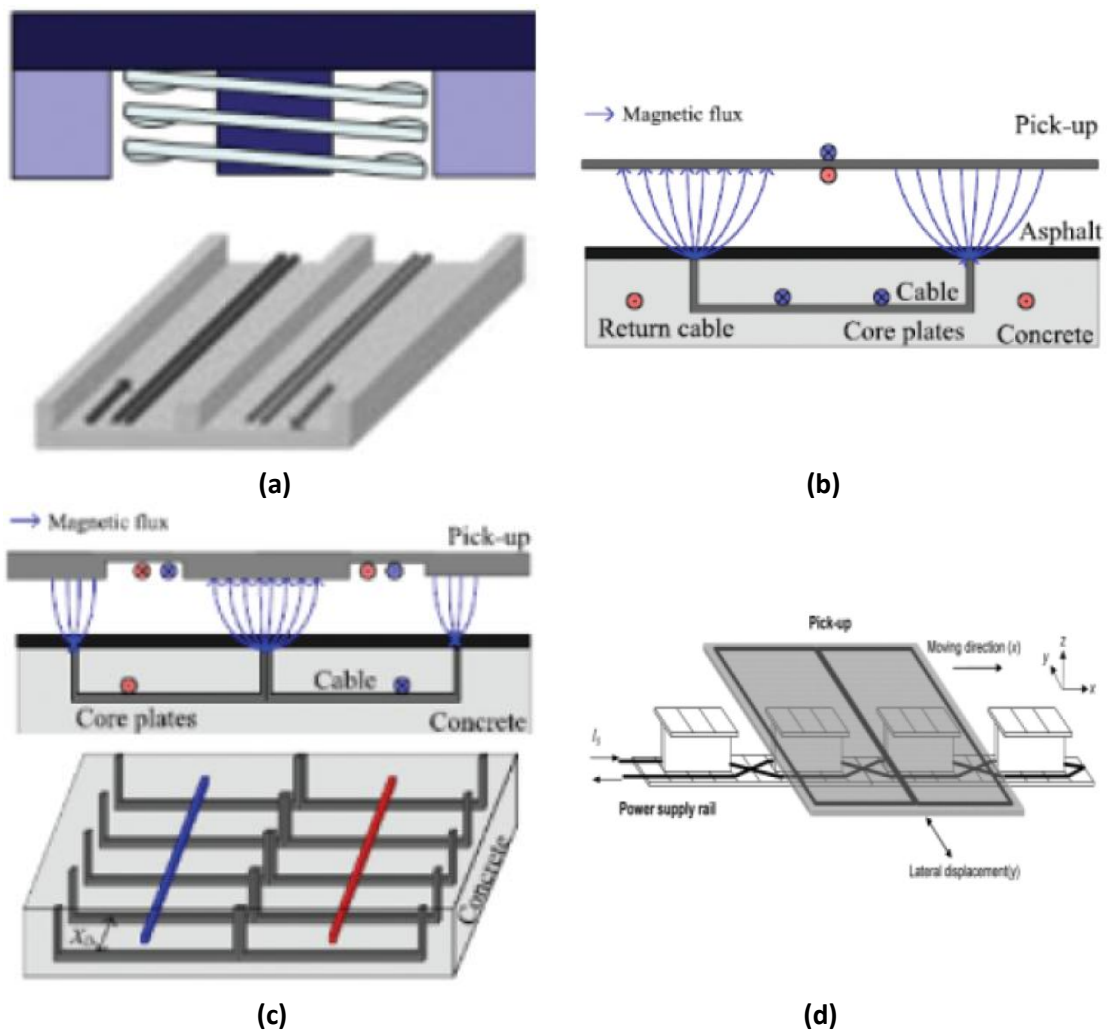
Σχήμα 1.2-5: DDQ Διάταξη

1.2.2 Τύποι Δυναμικών Μαγνητικών Συζευκτών

Μέσω της Δυναμικής Επαγωγικής Φόρτισης, η οποία αναφέρεται και ως σύστημα *Online Electric Vehicles (OLEV)* [16] ή *Roadway Powered Electric Vehicles (RPEV)* [17], επιτρέπεται η φόρτιση της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος ενώ αυτό κινείται. Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική ώστε να λύσει το πρόβλημα της αυτονομίας των Ηλεκτρικών Οχημάτων [1].

Οι μαγνητικές συνιστώσες ενός Συστήματος Δυναμικής Επαγωγικής Φόρτισης περιλαμβάνουν έναν πρωτεύον μαγνητικό συζεύκτη, ο οποίος, συνήθως, είναι θαμμένος κάτω από τον δρόμο, και ένα δευτερεύον *pick-up* πηνίο, το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω στο Ηλεκτρικό Όχημα [1]. Τα είδη πρωτεύοντος στη Δυναμική Φόρτιση διακρίνονται σε δύο κατηγορίες οδηγώντας στην ανάδειξη δύο τύπων διατάξεων δυναμικής φόρτισης: την ενιαία και την τμηματική διάταξη.

Στην ενιαία διάταξη το πρωτεύον είναι ένας μεγάλος σε μήκος συζευκτης, το όνομα του οποίου καθορίζεται από το σχηματισμό των φερριτών που χρησιμοποιούνται στην πλευρά του πρωτεύοντος. Συνήθεις τύποι συζευκτών είναι οι: *E*-τύπου [18], (Σχήμα 1.2-6(a)), *U*-τύπου [18], (Σχήμα 1.2-6(b)), *W*-τύπου [18], (Σχήμα 1.2-6(c)), και *I*-τύπου [18], [19], [20], (Σχήμα 1.2-6(d)).

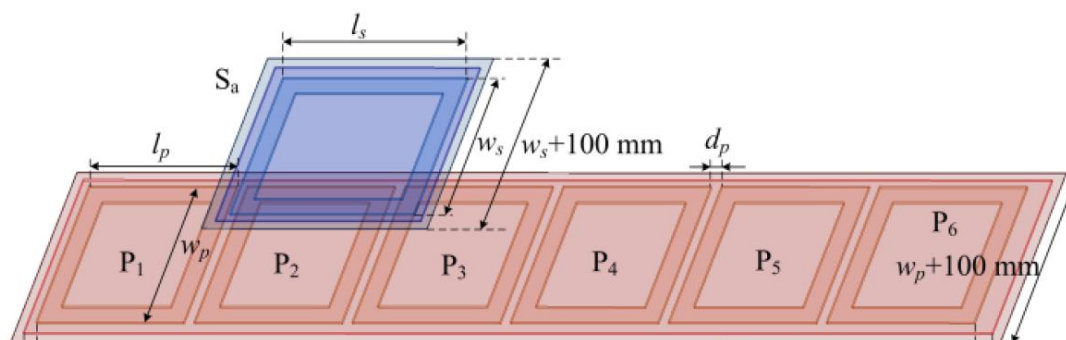


Σχήμα 1.2-6: Σύστημα Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος (α) *E*-τύπου [16], (β) *U*-τύπου [16], (γ) *W*-τύπου [16], (δ) *I*-τύπου [20]

Το κυριότερο πρόβλημα στην ενιαία διάταξη είναι ότι το πηνίο του δευτερεύοντος καλύπτει μόνο ένα μικρό μέρος της διάταξης, το οποία κάνει τον συντελεστή σύζευξης πολύ μικρό και, ως συνέπεια αυτού, εμφανίζονται θέματα απόδοσης και ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (*EMI: Electromagnetic Interference*) [1]. Για τη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, η διάταξη είναι, συνήθως, δομημένη σε τμήματα [21], [22], [23], τα οποία τροφοδοτούνται από έναν μόνο μετατροπέα ισχύος και μία σειρά από διακόπτες. Τα τμήματα αυτά ενεργοποιούνται από τους διακόπτες μόνο στην περίπτωση που ένα Ηλεκτρικό Όχημα βρίσκεται πάνω από το

φορτιστή. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο πάνω από τα ανενεργά τμήματα της διάταξης είναι, έτσι, σημαντικά μειωμένο. Ωστόσο, υπάρχει πάντα ένα ρεύμα υψηλής συχνότητας, που ρέει μέσω κοινών καλωδίων τροφοδοσίας σε μεγάλο μέρος του πρωτεύοντος, με αποτέλεσμα την χαμηλότερη απόδοση του συστήματος [1].

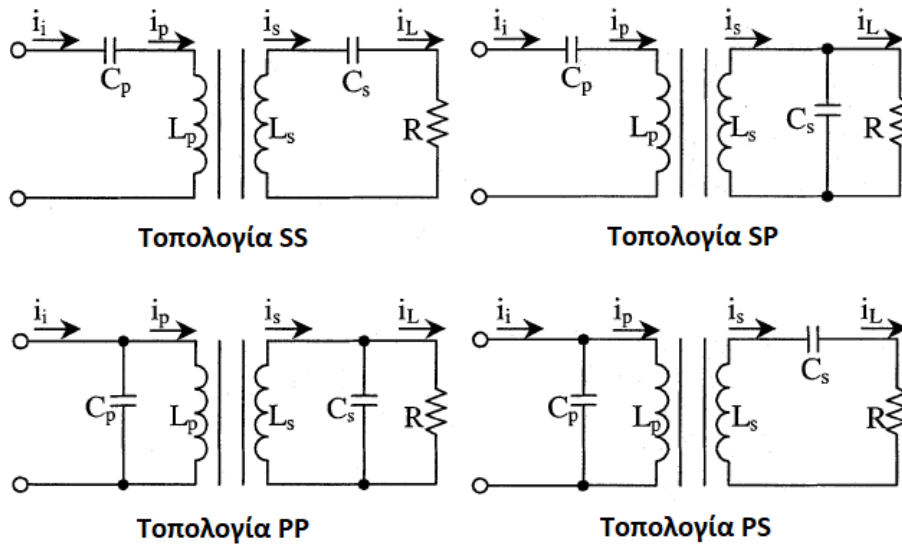
Στη τμηματική διάταξη το πρωτεύον αποτελείται από πολλά μικρά "τμήματα" παρόμοια με του συζεύκτες των στατικών φορτιστών [12], [24], [25]. Κάθε "τμήμα" οδηγείται, συνήθως, από έναν ανεξάρτητο μετατροπέα ισχύος και ενεργοποιείται μόνο, όταν ένα Ηλεκτρικό Όχημα βρεθεί από πάνω του. Με αυτόν τον τρόπο, δεν υπάρχει ένα κοινό ρεύμα υψηλής συχνότητας σε όλη τη διάταξη του πρωτεύοντος, με αποτέλεσμα η απόδοση του συστήματος να είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική, ενώ τα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία να μειώνονται σημαντικά. Παρ' όλα αυτά, το κόστος κατασκευής μετατροπέων ισχύος για κάθε "τμήμα" είναι πολύ μεγάλο [1]. Μια μέθοδος διπλής σύζευξης έχει προταθεί στο [24], έτσι ώστε δύο "τμήματα" του πρωτεύοντος, να μπορούν να οδηγηθούν από τον ίδιο μετατροπέα, ενώ μια νέα τεχνική, για οδήγηση ακόμα περισσότερων "τμημάτων", με ένα μόνο μετατροπέα εισάγεται στο [25].



Σχήμα 1.2-7: Σύστημα Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος Τμηματικής Διάταξης [26]

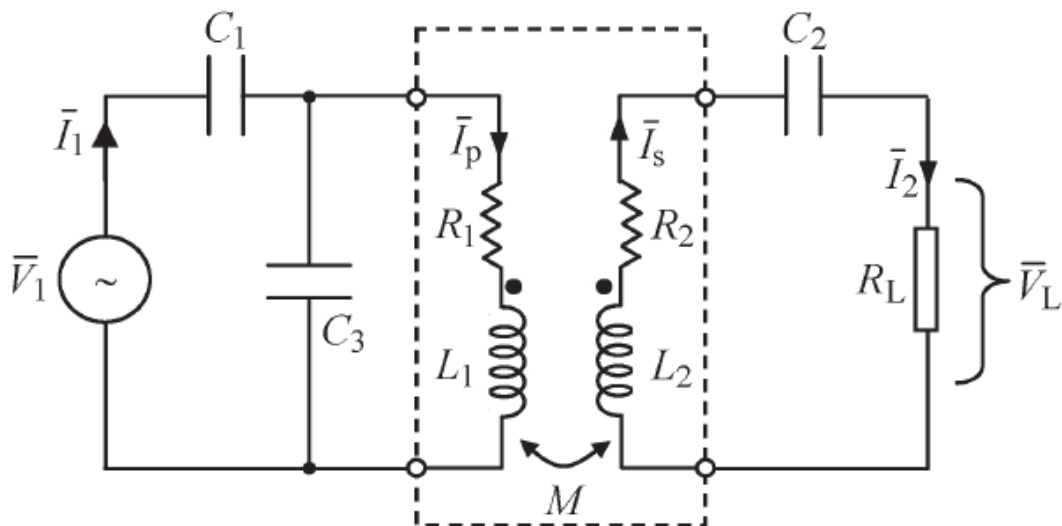
1.3 Τεχνικές Συντονισμού

Σε ένα Σύστημα Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος είναι αναγκαία η χρήση ενός Συστήματος Αντιστάθμισης με στόχο τη μείωση της άεργου ισχύος στα πηνία και στην πλευρά παροχής από το δίκτυο. Το πιο απλό Σύστημα Αντιστάθμισης είναι η προσθήκη ενός πυκνωτή σε κάθε πλευρά. Ανάλογα τον τρόπο σύνδεσης των πυκνωτών με τα πηνία, διακρίνονται τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης, (Σχήμα 1.3-1): Σειρά-Σειρά (SS), Παράλληλα-Παράλληλα (PP), Παράλληλα-Σειρά (PS) και Σειρά-Παράλληλα (SP) [27], [28], [6], [29], [30], [31], [1].



Σχήμα 1.3-1: Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης [28]

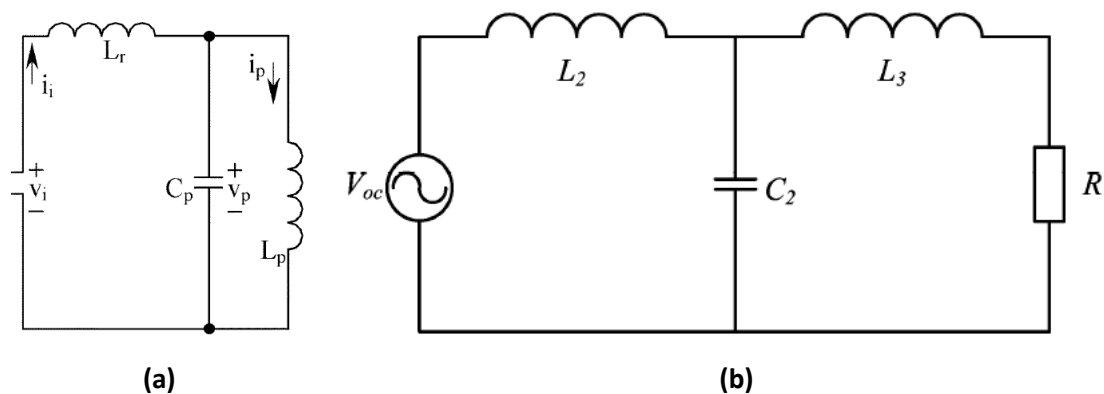
Ο πυκνωτής αντιστάθμισης στην πλευρά του δευτερεύοντος, επιλέγεται, συνήθως, ώστε να επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος. Για τη μείωση της άεργου ισχύος, ο πυκνωτής αντιστάθμισης στην πλευρά του πρωτεύοντος επιλέγεται με στόχο μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο του συστήματος. Οι σχέσεις από τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης για τις τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης θα περιγραφούν αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 1.3-2: Τοπολογία Αντιστάθμισης SPS [32]

Εκτός από τις τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης διακρίνονται στη βιβλιογραφία τοπολογίες που δεν περιορίζονται στη χρήση ενός μόνο πυκνωτή σε κάθε πλευρά, αλλά χρησιμοποιούν και επιπλέον πυκνωτές ή πηνία αντιστάθμισης. Για παράδειγμα, μία ειδική τοπολογία αντιστάθμισης είναι Σειρά-Παράλληλα-Σειρά

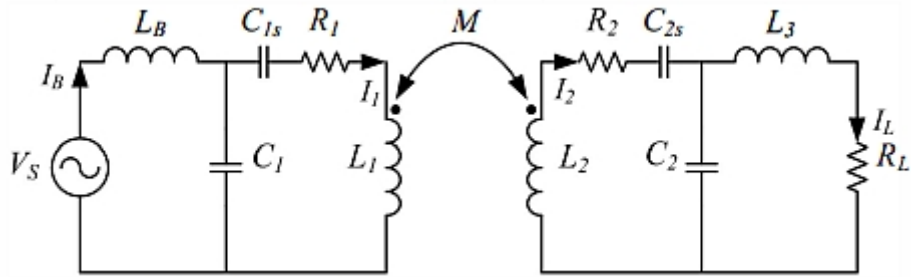
(SPS) [32], (Σχήμα 1.3-2), η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών των τοπολογιών Σειρά-Σειρά (SS) και Παράλληλα-Σειρά (PS). Ως αποτέλεσμα, η τοπολογία αυτή επιτυγχάνει ικανοποιητική μεταφορά ισχύος σε μεγάλες μετατοπίσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος [1], το οποίο την καθιστά κατάλληλη για συστήματα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης.



Σχήμα 1.3-3: Τοπολογία Αντιστάθμισης LCL (a) Πρωτεύον Κύκλωμα [33], (b) Ισοδύναμο Δευτερεύον Κύκλωμα [34]

Μία άλλη ειδική τοπολογία αντιστάθμισης, είναι η τοπολογία LCL [1], (Σχήματα 1.3-3(a) & (b)) Συγκεκριμένα, η τοπολογία LCL περιλαμβάνει έναν πυκνωτή παράλληλα με το πηνίο και μία επαγωγή σε σειρά με το πηνίο και τον πυκνωτή στο πρωτεύον και στο δευτερεύον αντίστοιχα. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας είναι ότι, στη συχνότητα συντονισμού, λειτουργεί ως πηγή ρεύματος και αυτό κάνει τον έλεγχο στην πλευρά του πρωτεύοντος πολύ πιο εύκολο. Επιπλέον, με κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του LCL, η άεργος ισχύς μπορεί να αντισταθμιστεί πλήρως [1]. Η χρήση πολλαπλών LCL αντισταθμισμένων διατάξεων σε παράλληλη σύνδεση για τη δυναμική επαγωγική φόρτιση προτείνεται στο [35].

Μία παραλλαγή της τοπολογίας αντιστάθμισης LCL είναι η τοπολογία LCCL (ή LCC) [36], (Σχήμα 1.3-3). Η τοπολογία αυτή είναι ίδια με την LCL, με την προσθήκη ενός πυκνωτή σε σειρά με το πηνίο και στο πρωτεύον και στο δευτερεύον. Ο πυκνωτής αυτός χρησιμοποιείται για την εξάλειψη μη-γραμμικών φαινομένων που προκαλούνται από τις διόδους του AC/DC μετατροπέα στην πλευρά του δευτερεύοντος. Η τοπολογία αυτή μπορεί να επιτύχει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος σε συγκεκριμένες συνθήκες φορτίου [36].



Σχήμα 1.3-4: Τοπολογία Αντιστάθμισης LCCL (ή LCC)²

1.4 Τεχνικές Ελέγχου

Ο έλεγχος της ροής ισχύος είναι ένα κοινό πρόβλημα σε όλα τα Συστήματα Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος. Υπάρχουν τρεις επιλογές ελέγχου και επιλέγοντας σωστά μπορεί η απόδοση να επηρεαστεί από 10 % ως 20 % [12]. Οι επιλογές αυτές είναι οι εξής:

- 1) Έλεγχος στην πλευρά του δευτερεύοντος
- 2) Έλεγχος στην πλευρά του πρωτεύοντος
- 3) Έλεγχος και στο πρωτεύον και στο δευτερεύον

Σε αρχικές εφαρμογές της Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος, στόχος ήταν η μεταφορά ισχύος σε πολλαπλούς δευτερεύοντες συζεύκτες μέσω ενός μόνο συζεύκτη πρωτεύοντος [12]. Η πιο κοινή προσέγγιση ελέγχου, προς την κατεύθυνση αυτή είναι ο έλεγχος στο δευτερεύον, όπου το ρεύμα στο πρωτεύον και η συχνότητα του συστήματος παραμένουν σταθερά, ενώ κάθε δευτερεύον ρυθμίζει ανεξάρτητα την ισχύ που χρειάζεται από το φορτίο του [37], [27], [12].

Σε εφαρμογές φόρτισης όπου υπάρχει μία παροχή για κάθε συζευγμένο φορτίο, υπάρχει η τάση χρήσης ελέγχου μόνο στην πλευρά του πρωτεύοντος [38], [39], [40]. Ο έλεγχος ρυθμίζει το ρεύμα και τη συχνότητα του πρωτεύοντος με στόχο τη ρύθμιση της ισχύος στο δευτερεύον, το οποίο συνήθως αποτελείται από ένα απλό ανορθωτή και φίλτρο. Ο έλεγχος μόνο στο πρωτεύον, δεν είναι επιθυμητό να εφαρμόζεται σε Συστήματα Επαγωγικής Φόρτισης με πολλαπλά δευτερεύοντα *pick-up*, δεδομένου ότι οποιαδήποτε ρύθμιση στην πλευρά του πρωτεύοντος θα επηρεάσει ταυτόχρονα τη μεταφορά ισχύος σε όλα τα δευτερεύοντα [12].

Με χρήση ενός ελέγχου και στο πρωτεύον και στο δευτερεύον, η απόδοση του συστήματος μπορεί να λαμβάνει τιμές πάνω από 90 %, για ένα μεγάλο εύρος φορτίων [41], [12]. Για παράδειγμα η αναφορά [42] χρησιμοποιεί έλεγχο και στις δύο πλευρές του επαγωγικού συστήματος μεταφοράς με στόχο τον κατάλληλο έλεγχο της τιμής των ρευμάτων στο πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα και την αύξηση της απόδοσης του συστήματος.

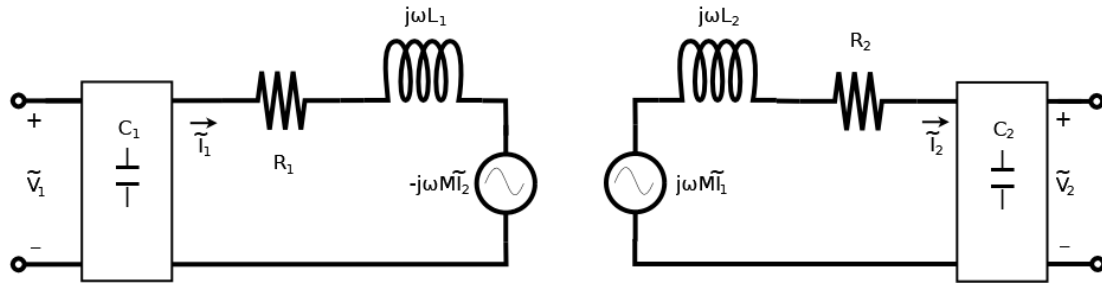
² <https://www.edn.com/Home/PrintView?contentItemId=4458626>

Ορισμένα συστήματα που δύναται να εφαρμόσουν έναν από τους παραπάνω τρόπους ελέγχου (έλεγχος στο πρωτεύον, στο δευτερεύον ή και στις δύο πλευρές του συστήματος) επιτρέπουν τη μεταβολή της συχνότητας βελτιώνοντας την απόδοση. Ωστόσο τέτοια συστήματα είναι δύσχρηστα σε περιπτώσεις πολλαπλών *pick-up* δευτερευόντων, όπου κάθε δευτερεύον έχει ρυθμιστεί να λειτουργεί σε διαφορετική συχνότητα [12].

Κεφάλαιο 2^ο: Περιγραφή των Τοπολογιών στη Στατική Φόρτιση

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται περιγραφή των βασικών τοπολογιών που χρησιμοποιούνται στην επαγωγική φόρτιση. Συγκεκριμένα, εξάγονται οι μαθηματικές εκφράσεις που διέπουν τη λειτουργία του ηλεκτρικού κυκλώματος για κάθε τοπολογία και εξετάζεται η λειτουργία του συστήματος για την κυκλική μαγνητική διάταξη. Για τη διάταξη αυτή, παρουσιάζεται η επίδραση της αντίστασης των τυλιγμάτων, της αντίστασης του φορτίου και της συχνότητας λειτουργίας για τις τέσσερις τοπολογίες αντιστάθμισης.

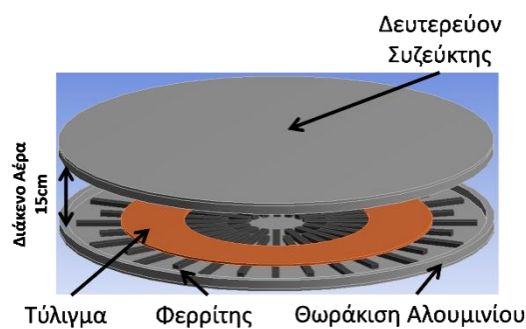
2.1 Περιγραφή Μαγνητικής Διάταξης



Σχήμα 2.1-1: Ισοδύναμο Κύκλωμα ενός Συστήματος Επαγωγικής Μεταφοράς Ενέργειας

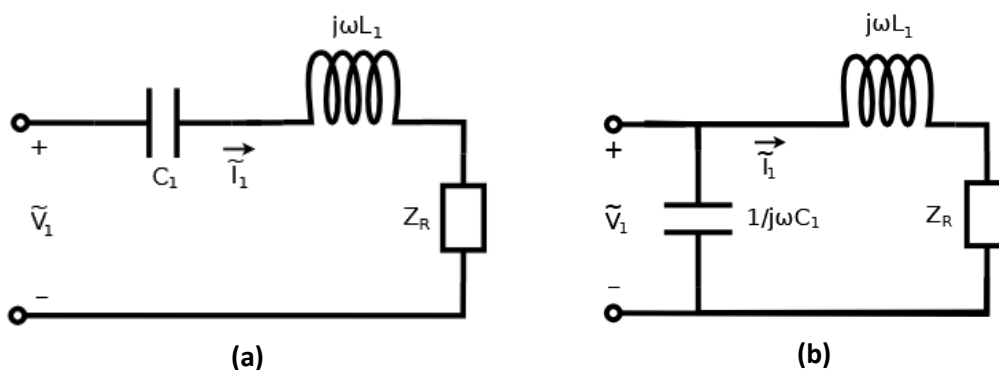
Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.1-1**. Συγκεκριμένα, στο σχήμα παρουσιάζονται τα πηνία L_1 και L_2 του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα, οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων των πηνίων R_1 και R_2 οι οποίες συνδέονται εν σειρά με τα πηνία και οι πυκνωτές αντιστάθμισης C_1 και C_2 οι οποίοι συνδέονται εν σειρά ή εν παραλλήλω με τα πηνία. Οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , υπολογίζονται, συνήθως, με στόχο τη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου και την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο. Το δεύτερο επιτυγχάνεται με μηδενισμένης άεργου ισχύος εισόδου. Λόγω της ύπαρξης των πυκνωτών που λειτουργούν ως φίλτρα [43] μπορεί να πραγματοποιηθεί μία ανάλυση πρώτης τάξης [43], [44] θεωρώντας σχεδόν ημιτονοειδή ρεύματα. Το ισοδύναμο κύκλωμα του φορτίου της μπαταρίας μπορεί να παρασταθεί ως μία ωμική αντίσταση, R_L , στην έξοδο του δευτερεύοντος κυκλώματος. Η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον λόγω του ρεύματος στο πρωτεύον, \tilde{I}_1 , είναι ίση με $j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_1$, ενώ η τάση στο πρωτεύον λόγω του ρεύματος του δευτερεύοντος, \tilde{I}_2 , είναι ίση με $-j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_2$, όπου M , η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος και $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ η γωνιακή ταχύτητα στη συχνότητα λειτουργίας f .

Η κυκλική μαγνητική διάταξη, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη, σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται στην αναφορά [45], όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1-2. Συγκεκριμένα, η διάταξη αποτελείται από δύο ίδιους συζεύκτες (*rads*) στο πρωτεύον και στο δευτερεύον, ο καθένας με διάμετρο 60 cm και διάκενο αέρα μεταξύ τους ίσο με 15 cm. Κάθε *rad* περιλαμβάνει τη θωράκιση αλουμινίου, τους ράβδους φερρίτη με σχετική μαγνητική διαπερατότητα ίση με 2300 και το πηνίο το οποίο αποτελείται από 18 περιελίξεις. Για τη σχεδίαση έχουμε θεωρήσει ότι χρησιμοποιείται ένα εμπορικά διαθέσιμο στρογγυλό καλώδιο τύπου *Litz*³, διαμέτρου 4.8 mm και αποτελείται από 1050 συνεστραμμένα μικρότερα καλώδια με διάμετρο 0.1016 mm, που έχουν ως αποτέλεσμα συνολική κυκλική διατομή του καλωδίου 8.51 mm². Το ρεύμα στο πρωτεύον του κυκλώματος θεωρείται ίσο με 23 A, σύμφωνα με την αναφορά [45]. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται για το καλώδιο *Litz* που θεωρήθηκε στην κατασκευή της κυκλικής διάταξης, η AC αντίσταση των καλωδίων για μία συχνότητα ίση με 25 kHz είναι περίπου ίση με 0.045 Ω. Η AC αντίσταση των καλωδίων μεταβάλλεται με τη συχνότητα, ωστόσο, η μεταβολή αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.



Σχήμα 2.1-2: Κυκλική Μαγνητική Διάταξη Συστήματος Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος

Η σχεδίαση της παραπάνω διάταξης πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ANSYS.



Σχήμα 2.1-3: (α) Ισοδύναμο Κύκλωμα Πρωτεύοντος στην περίπτωση εν Σειρά Αντισταθμισμένου Δευτερεύοντος, (β) Ισοδύναμο Κύκλωμα Πρωτεύοντος στην περίπτωση εν Παραλλήλω Αντισταθμισμένου Δευτερεύοντος

³ <https://www.newenglandwire.com>

Στο **Σχήμα 2.1-3** φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του πρωτεύοντος στις περιπτώσεις όπου ο πυκνωτής αντιστάθμισης του δευτερεύοντος, C_2 , έχει συνδεθεί σε σειρά, (**Σχήμα 2.1-3(a)**), και εν παραλλήλω, (**Σχήμα 2.1-3(b)**), με το πηνίο L_2 . Σύμφωνα με την αναφορά [29], όπου έχει θεωρηθεί ότι οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων είναι μηδενικές, Z_r είναι η ισοδύναμη αντίσταση του δευτερεύοντος στο πρωτεύον, και η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδρασή της είναι ίσες με:

$$Re\{Z_r\} = \begin{cases} \frac{\omega^4 \cdot C_2^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(\omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 - 1)^2 + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2}, & \text{δευτερεύον εν σειρά αντισταθμισμένο} \\ \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{R_L^2 \cdot (\omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 - 1)^2 + \omega^2 \cdot L_2^2}, & \text{δευτερεύον εν παραλλήλω αντισταθμισμένο} \end{cases} \quad (2.1)$$

και

$$Im\{Z_r\} = \begin{cases} \frac{-\omega^3 \cdot C_2 \cdot M^2 \cdot (\omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 - 1)}{(\omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 - 1)^2 + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2}, & \text{δευτερεύον εν σειρά αντισταθμισμένο} \\ \frac{-\omega^3 \cdot M^2 \cdot [C_2 \cdot R_L^2 \cdot (\omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 - 1) + L_2]}{R_L^2 \cdot (\omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 - 1)^2 + \omega^2 \cdot L_2^2}, & \text{δευτερεύον εν παραλλήλω αντισταθμισμένο} \end{cases} \quad (2.2)$$

Η μεταφερόμενη ισχύς από το πρωτεύον στο δευτερεύον δίνεται από τη σχέση:

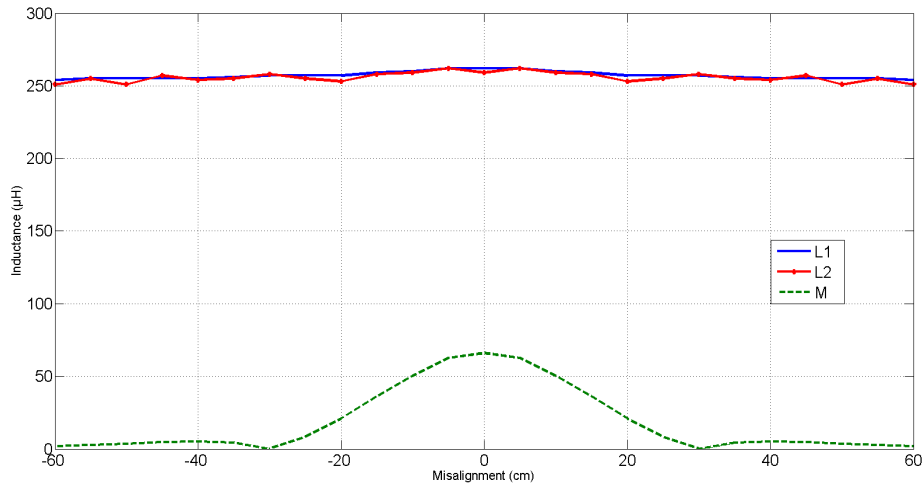
$$P_{out} = Re\{Z_r\} \cdot |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.3)$$

Όπως θα δούμε και πιο αναλυτικά σε επόμενη ενότητα, η σχέση που συνδέει τη γωνιακή ταχύτητα με την τιμή του πυκνωτή στο δευτερεύον και την αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος είναι:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2.4)$$

Αυτό υποδεικνύει ότι ο όρος $\omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 - 1$ σε ένα αντισταθμισμένο σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος λαμβάνει μηδενικές τιμές. Οπότε, από τις σχέσεις (2.1), η ισοδύναμη ωμική αντίσταση του δευτερεύοντος και κατ' επέκταση και η μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος είναι ανάλογη του τετραγώνου της αμοιβαίας επαγωγής, M . Συνεπώς η μεταφερόμενη ισχύς σε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας μεγιστοποιείται με τη μεγιστοποίηση της αμοιβαίας επαγωγής.

Οι τιμές των επαγωγών των πηνίων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος του κυκλώματος, L_1 και L_2 , και η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των πηνίων, M , μεταβάλλονται με την οριζόντια μετατόπιση, x , σύμφωνα με το **Σχήμα 2.1-4**. Η μη σωστή ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο πηνίων, ή αλλιώς η μετατόπιση μεταξύ των δύο *rad*, μπορεί να προκαλέσει μεταβολές και στην απόδοση αλλά και στην μεταφερόμενη ισχύ του συστήματος.



Σχήμα 2.1-4: Τιμές Επαγωγών για διαφορετικές περιπτώσεις οριζόντιας μετατόπισης

Σύμφωνα με το **Σχήμα 2.1-4**, η αμοιβαία επαγωγή μεγιστοποιείται στην περίπτωση που το πρωτεύον βρίσκεται ακριβώς πάνω από το δευτερεύον, δηλαδή η οριζόντια μετατόπιση μεταξύ των πηνίων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι ίση με $x = 0 \text{ cm}$. Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως η μεταφερόμενη ισχύς, σε περίπτωση και για την οποία θα πραγματοποιηθεί η μελέτη στο παρόν **Κεφάλαιο**, οι τιμές των επαγωγών είναι ίσες με: $L_1 = 262 \mu\text{H}$, $L_2 = 259 \mu\text{H}$ και $M = 66 \mu\text{H}$.

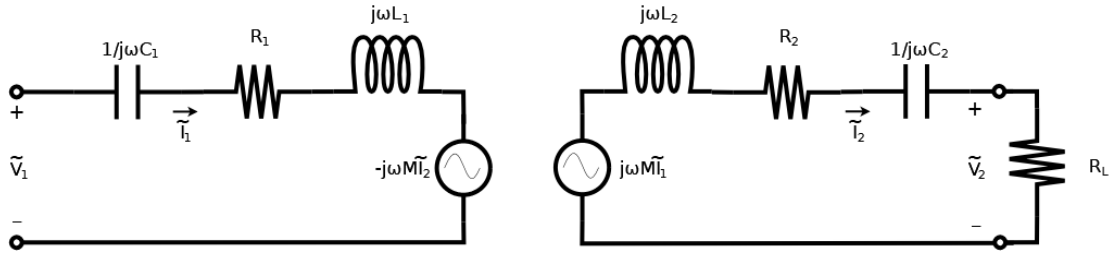
Συνεπώς, στην περίπτωση όπου η οριζόντια μετατόπιση μεταξύ των πηνίων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι ίση με $x = 0 \text{ cm}$, η μεταφερόμενη ισχύς λαμβάνει την μέγιστή της τιμή, όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.1-4**.

2.2 Μαθηματικές Εκφράσεις Τοπολογιών Αντιστάθμισης

Στην ενότητα αυτή εξάγονται οι μαθηματικές εκφράσεις στις τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης.

2.2.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Στην τοπολογία **SS** οι πυκνωτές αντιστάθμισης συνδέονται εν σειρά με τα πηνία του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα. Το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.2-1**.



Σχήμα 2.2-1: Ισοδύναμο Κύκλωμα Τοπολογίας Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του *Kirchhoff* για το πρωτεύον και το δευτερεύον προκύπτουν οι εξής μαθηματικές σχέσεις:

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_1 \cdot \left(R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_1} \right) - j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_2 \quad (2.5)$$

$$j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 \cdot \left(R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_2} + R_L \right) \quad (2.6)$$

Η φαινόμενη ισχύς εξόδου του συστήματος στα άκρα της αντίστασης φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{out} = \tilde{V}_2 \cdot \tilde{I}_2^* \quad (2.7)$$

Η τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου είναι ίση με:

$$\tilde{V}_2 = \tilde{I}_2 \cdot R_L \quad (2.8)$$

Αντικαθιστώντας την (2.8) στην (2.7) προκύπτει:

$$S_{out} = |\tilde{I}_2|^2 \cdot R_L \quad (2.9)$$

Επομένως, η ενεργός ισχύς στην έξοδο του συστήματος είναι:

$$P_{out} = Re\{S_{out}\} = |\tilde{I}_2|^2 \cdot R_L \quad (2.10)$$

Λύνουμε την (2.6) ως προς \tilde{I}_2 και αντικαθιστούμε στην (2.10):

$$P_{out} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \quad (2.11)$$

Η φαινόμενη ισχύς στην είσοδο του κυκλώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{in} = \tilde{V}_1 \cdot \tilde{I}_1^* \quad (2.12)$$

Από τις (2.5) και (2.6), λύνουμε ως προς \tilde{V}_1 συναρτήσει του ρεύματος \tilde{I}_1 και αντικαθιστούμε στην (2.12):

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot & \left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right) \\ & + j \cdot |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Από την (2.13), η ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς εισόδου, P_{in} και Q_{in} , δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_{in} = Re\{\mathbf{S}_{in}\} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right) \quad (2.14)$$

$$Q_{in} = Im\{\mathbf{S}_{in}\} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right) \quad (2.15)$$

Η απόδοση του συστήματος είναι:

$$eff = \frac{|S_{out}|}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.16)$$

Ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο του συστήματος είναι:

$$PF = \frac{P_{in}}{|S_{in}|} = \frac{P_{in}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.17)$$

Η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται αν επιλέξουμε το C_2 να είναι ίσο με:

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_2} \quad (2.18)$$

Σε αυτή την περίπτωση η ισχύς εξόδου είναι ίση με:

$$P_{out,max} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L)^2} \quad (2.19)$$

Για την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, θέτοντας την (2.15) ίση με το μηδέν και χρησιμοποιώντας την (2.18), για το C_1 προκύπτει:

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_1} \quad (2.20)$$

Τα υπόλοιπα μεγέθη του κυκλώματος προκύπτουν μέσω των (2.5), (2.6) και (2.8).

Η τάση στο πρωτεύον είναι ίση με:

$$|\tilde{V}_1| = |\tilde{I}_1| \cdot \sqrt{\left[R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right]^2 + \left[\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right]^2} \quad (2.21)$$

Η τάση στο δευτερεύον είναι ίση με:

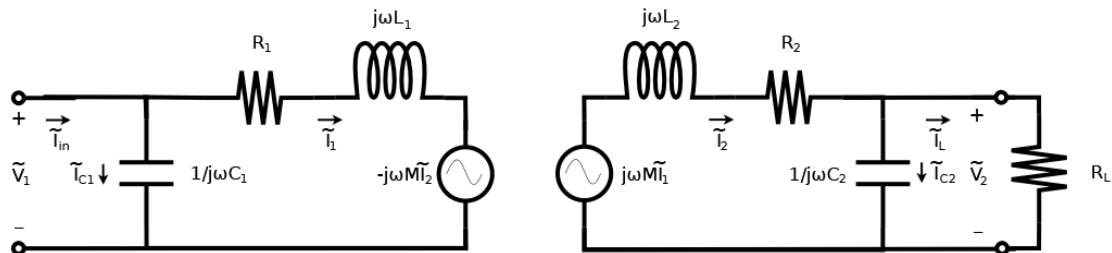
$$|\tilde{V}_2| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M \cdot R_L}{\sqrt{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2}} \quad (2.22)$$

Το ρεύμα στο πηνίο του δευτερεύοντος είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_2| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M}{\sqrt{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2}} \quad (2.23)$$

2.2.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

Στην τοπολογία **PP** οι πυκνωτές αντιστάθμισης συνδέονται εν παραλλήλω με τα πηνία του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα. Το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.2-2**.



Σχήμα 2.2-2: Ισοδύναμο Κύκλωμα Τοπολογίας Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με την τοπολογία **SS**, μέσω του δεύτερου νόμου του *Kirchhoff* για το πρωτεύον και το δευτερεύον προκύπτουν οι εξής μαθηματικές σχέσεις:

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1) - j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_2 \quad (2.24)$$

$$j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2) + \tilde{V}_2 \quad (2.25)$$

Η φαινόμενη ισχύς εξόδου του συστήματος στα άκρα της αντίστασης φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{out} = \tilde{V}_2 \cdot \tilde{I}_L^* \quad (2.26)$$

Η τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου είναι ίση με:

$$\widetilde{V}_2 = \widetilde{I}_L \cdot R_L = \widetilde{I}_{C2} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_2} \quad (2.27)$$

Αντικαθιστώντας το δεύτερο μέλος της (2.27) στην (2.26) προκύπτει:

$$\mathbf{S}_{out} = |\widetilde{I}_L|^2 \cdot R_L \quad (2.28)$$

Επομένως, η ενεργός ισχύς στην έξοδο του συστήματος είναι:

$$P_{out} = Re\{\mathbf{S}_{out}\} = |\widetilde{I}_L|^2 \cdot R_L \quad (2.29)$$

Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του *Kirchhoff* για το πρωτεύον και το δευτερεύον προκύπτουν οι εξής μαθηματικές σχέσεις:

$$\widetilde{I}_{in} = \widetilde{I}_1 + \widetilde{I}_{C1} \quad (2.30)$$

$$\widetilde{I}_2 = \widetilde{I}_L + \widetilde{I}_{C2} \quad (2.31)$$

Από τις (2.25), (2.27) και (2.31), λύνουμε ως προς \widetilde{I}_L συναρτήσει του \widetilde{I}_1 και αντικαθιστούμε στην (2.29):

$$P_{out} = |\widetilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \quad (2.32)$$

Η φαινόμενη ισχύς στην είσοδο του κυκλώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{S}_{in} = \widetilde{V}_1 \cdot \widetilde{I}_{in}^* \quad (2.33)$$

Η τάση στην είσοδο του κυκλώματος είναι ίση με:

$$\widetilde{V}_1 = \widetilde{I}_{C1} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_1} \quad (2.34)$$

Από τις (2.24), (2.31) και (2.27) λύνουμε ως προς \widetilde{V}_1 συναρτήσει του \widetilde{I}_1 και από τις (2.30) και (2.34) λύνουμε ως προς \widetilde{I}_{in} συναρτήσει του \widetilde{I}_1 . Αντικαθιστούμε τις σχέσεις που προκύπτουν στην (2.33):

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{in} = & |\widetilde{I}_1|^2 \cdot \left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right) \\ & + j \cdot |\widetilde{I}_1|^2 \cdot \left[\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right. \\ & \left. - \omega \cdot C_1 \cdot \left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right)^2 \right] \quad (2.35) \end{aligned}$$

Από την (2.35), η ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς εισόδου, P_{in} και Q_{in} , δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_{in} = Re\{\mathbf{S}_{in}\} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right) \quad (2.36)$$

$$Q_{in} = Im\{\mathbf{S}_{in}\} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left[\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right. \\ \left. - \omega \cdot C_1 \cdot \left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right)^2 \right] \quad (2.37)$$

Η απόδοση του συστήματος είναι:

$$eff = \frac{|\mathbf{S}_{out}|}{|\mathbf{S}_{in}|} = \frac{P_{out}}{|\mathbf{S}_{in}|} = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.38)$$

Ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο του συστήματος είναι:

$$PF = \frac{P_{in}}{|\mathbf{S}_{in}|} = \frac{P_{in}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.39)$$

Με στόχο τη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου για να βρούμε την σχέση από την οποία υπολογίζεται η τιμή του πυκνωτή C_2 , θέτουμε την παράγωγο της ενεργού ισχύος εξόδου ως προς το C_2 ίση με το μηδέν. Από αυτήν προκύπτει:

$$C_2 = \frac{L_2}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} \quad (2.40)$$

Σε αυτή την περίπτωση η ισχύς εξόδου είναι ίση με :

$$P_{out, max} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L - \frac{\omega^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2})^2 + (\frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \omega \cdot L_2)^2} \quad (2.41)$$

Για την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο, θέτοντας την (2.37) ίση με το μηδέν και χρησιμοποιώντας την (2.40), για το C_1 προκύπτει:

$$C_1 = \frac{L_1 - \omega \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_L^2}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \frac{\omega^3 \cdot L_2^3 \cdot R_L^2}{(\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2)^2}}{(R_2 + R_L - \frac{\omega^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2})^2 + (\frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \omega \cdot L_2)^2}}{\left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \frac{\omega^2 \cdot L_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2)^2}}{(R_2 + R_L - \frac{\omega^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2})^2 + (\frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \omega \cdot L_2)^2} \right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_L^2}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \frac{\omega^3 \cdot L_2^3 \cdot R_L^2}{(\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2)^2}}{(R_2 + R_L - \frac{\omega^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2})^2 + (\frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \omega \cdot L_2)^2} \right)^2} \quad (2.42)$$

Τα υπόλοιπα μεγέθη του κυκλώματος προκύπτουν μέσω των (2.24), (2.25), (2.27), (2.40), (2.42) και (2.34).

Η τάση στο πρωτεύον είναι ίση με:

$$|\tilde{V}_1| = |\tilde{I}_1| \cdot \sqrt{\left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}\right)^2} \quad (2.43)$$

Το ρεύμα εισόδου είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_{in}| = |\tilde{I}_1| \cdot \sqrt{\left[1 + \omega \cdot C_1 \cdot \left(\omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} - \omega \cdot L_1\right)\right]^2 + \left[\omega \cdot C_1 \cdot \left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}\right)\right]^2} \quad (2.44)$$

Το ρεύμα στον πυκνωτή στην πλευρά του πρωτεύοντος είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_{C1}| = |\tilde{I}_1| \cdot \omega \cdot C_1 \cdot \sqrt{\left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}\right)^2} \quad (2.45)$$

Η τάση στο δευτερεύον είναι ίση με:

$$|\tilde{V}_2| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M \cdot R_L}{\sqrt{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}} \quad (2.46)$$

Το ρεύμα της αντίστασης φορτίου είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_L| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M}{\sqrt{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}} \quad (2.47)$$

Το ρεύμα του πηνίου του δευτερεύοντος είναι ίσο με:

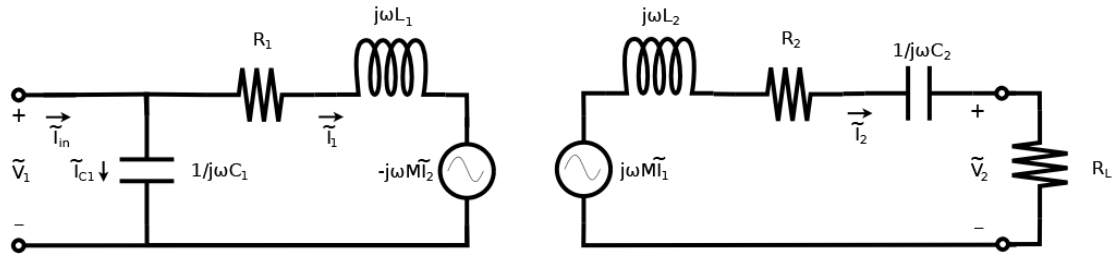
$$|\tilde{I}_2| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2}}{\sqrt{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}} \quad (2.48)$$

Το ρεύμα του πυκνωτή στην πλευρά του δευτερεύοντος είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_{C2}| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega^2 \cdot M \cdot C_2 \cdot R_L}{\sqrt{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}} \quad (2.49)$$

2.2.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Στην τοπολογία **PS** ο πυκνωτής αντιστάθμισης του πρωτεύοντος συνδέεται εν παραλλήλω με το αντίστοιχο πηνίο, ενώ ο πυκνωτής αντιστάθμισης του δευτερεύοντος συνδέεται εν σειρά με το αντίστοιχο πηνίο. Το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.2-3**.



Σχήμα 2.2-3: Ισοδύναμο Κύκλωμα Τοπολογίας Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του *Kirchhoff* για το πρωτεύον και το δευτερεύον προκύπτουν οι εξής μαθηματικές σχέσεις:

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1) - j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_2 \quad (2.50)$$

$$j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 \cdot \left(R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_2} + R_L \right) \quad (2.51)$$

Η φαινόμενη ισχύς εξόδου του συστήματος στα άκρα της αντίστασης φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{S}_{out} = \tilde{V}_2 \cdot \tilde{I}_2^* \quad (2.52)$$

Η τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου είναι ίση με:

$$\tilde{V}_2 = \tilde{I}_2 \cdot R_L \quad (2.53)$$

Αντικαθιστώντας την (2.53) στην (2.52) προκύπτει:

$$\mathbf{S}_{out} = |\tilde{I}_2|^2 \cdot R_L \quad (2.54)$$

Επομένως, η ενεργός ισχύς στην έξοδο του συστήματος είναι:

$$P_{out} = \text{Re}\{\mathbf{S}_{out}\} = |\tilde{I}_2|^2 \cdot R_L \quad (2.55)$$

Λύνουμε την (2.51) ως προς \tilde{I}_2 και αντικαθιστούμε στην (2.55):

$$P_{out} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L)^2 + (\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2})^2} \quad (2.56)$$

Η φαινόμενη ισχύς στην είσοδο του κυκλώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{S}_{in} = \tilde{V}_1 \cdot \tilde{I}_{in}^* \quad (2.57)$$

Η τάση στην είσοδο του κυκλώματος είναι ίση με:

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_{C1} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_1} \quad (2.58)$$

Επίσης, σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του *Kirchhoff* για το πρωτεύον προκύπτει η μαθηματική σχέση:

$$\widetilde{I}_{in} = \widetilde{I}_1 + \widetilde{I}_{C1} \quad (2.59)$$

Από τις (2.50) και (2.51), λύνουμε ως προς \widetilde{V}_1 συναρτήσει του \widetilde{I}_1 και από τις (2.58) και (2.59), λύνουμε ως προς \widetilde{I}_{in} συναρτήσει του \widetilde{I}_1 . Αντικαθιστούμε τις σχέσεις που προκύπτουν στην (2.57):

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{in} = & |\widetilde{I}_1|^2 \cdot \left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right) \\ & + j \cdot |\widetilde{I}_1|^2 \cdot \left[\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right] \\ & - \omega \cdot C_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.60)$$

Από την (2.60), η ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς εισόδου, P_{in} και Q_{in} , δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_{in} = Re\{\mathbf{S}_{in}\} = |\widetilde{I}_1|^2 \cdot \left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right) \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} Q_{in} = & Im\{\mathbf{S}_{in}\} = |\widetilde{I}_1|^2 \cdot \left[\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right] \\ & - \omega \cdot C_1 \cdot \left[\left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.62)$$

Η απόδοση του συστήματος είναι:

$$eff = \frac{|\mathbf{S}_{out}|}{|\mathbf{S}_{in}|} = \frac{P_{out}}{|\mathbf{S}_{in}|} = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.63)$$

Ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο του συστήματος είναι:

$$PF = \frac{P_{in}}{|\mathbf{S}_{in}|} = \frac{P_{in}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.64)$$

Η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται αν επιλέξουμε το C_2 να είναι ίσο με:

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_2} \quad (2.65)$$

Σε αυτή την περίπτωση η ισχύς εξόδου είναι ίση με :

$$P_{out,max} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L)^2} \quad (2.66)$$

Η επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο επιτυγχάνεται, θέτοντας την (2.62) ίση με το μηδέν και χρησιμοποιώντας την (2.65):

$$C_1 = \frac{L_1}{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{R_2 + R_L}\right)^2 + \omega^2 \cdot L_1^2} \quad (2.67)$$

Τα υπόλοιπα μεγέθη του κυκλώματος προκύπτουν μέσω των (2.50), (2.51), (2.53), (2.58) και (2.59).

Η τάση στο πρωτεύον είναι ίση με:

$$|\tilde{V}_1| = |\tilde{I}_1| \cdot \sqrt{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2}\right)^2} \quad (2.68)$$

Το ρεύμα εισόδου είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_{in}| = |\tilde{I}_1| \cdot \sqrt{\left(1 + \omega \cdot C_1 \cdot \left(\frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} - \omega \cdot L_1\right)\right)^2 + \left(\omega \cdot C_1 \cdot \left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2}\right)\right)^2} \quad (2.69)$$

Το ρεύμα του πυκνωτή στην πλευρά του πρωτεύοντος είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_{C1}| = |\tilde{I}_1| \cdot \omega \cdot C_1 \cdot \sqrt{\left(R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2}\right)^2} \quad (2.70)$$

Η τάση του δευτερεύοντος είναι ίση με:

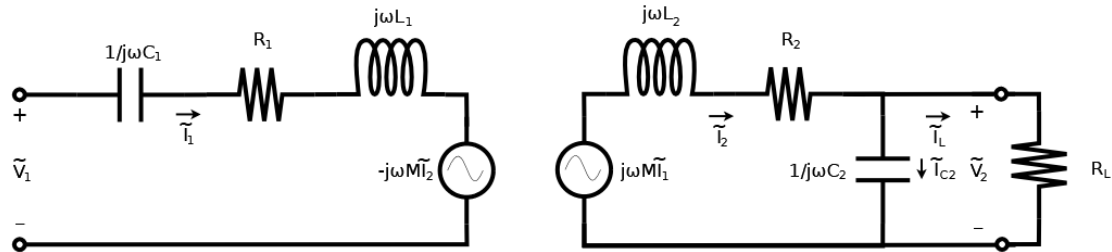
$$|\tilde{V}_2| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M \cdot R_L}{\sqrt{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2}} \quad (2.71)$$

Το ρεύμα του πηνίου του δευτερεύοντος είναι ίση με:

$$|\tilde{I}_2| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M}{\sqrt{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2}} \quad (2.72)$$

2.2.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Στην τοπολογία **SP** ο πυκνωτής αντιστάθμισης του πρωτεύοντος συνδέεται εν σειρά με το αντίστοιχο πηνίο, ενώ ο πυκνωτής αντιστάθμισης του δευτερεύοντος συνδέεται εν παράλληλο με το αντίστοιχο πηνίο. Το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.2-4**.



Σχήμα 2.2-4: Ισοδύναμο Κύκλωμα Τοπολογίας Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του *Kirchhoff* για το πρωτεύον και το δευτερεύον προκύπτουν οι εξής μαθηματικές σχέσεις:

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_1 \cdot \left(R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_1} \right) - j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_2 \quad (2.73)$$

$$j \cdot \omega \cdot M \cdot \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2) + \tilde{V}_2 \quad (2.74)$$

Η φαινόμενη ισχύς εξόδου του συστήματος στα άκρα της αντίστασης φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{out} = \tilde{V}_2 \cdot \tilde{I}_L^* \quad (2.75)$$

Η τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου είναι ίση με:

$$\tilde{V}_2 = \tilde{I}_L \cdot R_L = \tilde{I}_{C2} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_2} \quad (2.76)$$

Αντικαθιστώντας το δεύτερο μέλος της (2.76) στην (2.75) προκύπτει:

$$S_{out} = |\tilde{I}_L|^2 \cdot R_L \quad (2.77)$$

Επομένως, η ενεργός ισχύς στην έξοδο του συστήματος είναι:

$$P_{out} = Re\{S_{out}\} = |\tilde{I}_L|^2 \cdot R_L \quad (2.78)$$

Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του *Kirchhoff* για το δευτερεύον προκύπτει η μαθηματική σχέση:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_L + \tilde{I}_{C2} \quad (2.79)$$

Από τις (2.74), (2.76) και (2.79), λύνουμε ως προς \tilde{I}_L συναρτήσει του \tilde{I}_1 και αντικαθιστούμε στην (2.78):

$$S_{out} = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \quad (2.80)$$

Η φαινόμενη ισχύς στην είσοδο του κυκλώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{in} = \tilde{V}_1 \cdot \tilde{I}_1^* \quad (2.81)$$

Από τις (2.73), (2.74), (2.76) και (2.79), λύνουμε ως προς \tilde{V}_1 συναρτήσει του ρεύματος \tilde{I}_1 και αντικαθιστούμε στην (2.81):

$$S_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right) + j \cdot |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right) \quad (2.82)$$

Από την (2.79), η ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς εισόδου, P_{in} και Q_{in} , δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_{in} = Re\{S_{in}\} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right) \quad (2.83)$$

$$Q_{in} = Im\{S_{in}\} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right) \quad (2.84)$$

Η απόδοση του συστήματος είναι:

$$eff = \frac{|S_{out}|}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.85)$$

Ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο του συστήματος είναι:

$$PF = \frac{P_{in}}{|S_{in}|} = \frac{P_{in}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.86)$$

Για την εύρεση του πυκνωτή C_2 που επιτυγχάνει τη μέγιστη μεταφορά ισχύος αρκεί η παράγωγος της ενεργού ισχύος εξόδου ως προς το C_2 να είναι ίση με το μηδέν. Από αυτήν προκύπτει:

$$C_2 = \frac{L_2}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} \quad (2.87)$$

Σε αυτή την περίπτωση η ισχύς εξόδου είναι ίση με :

$$P_{out,max} = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L - \frac{\omega^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2})^2 + (\frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \omega \cdot L_2)^2} \quad (2.88)$$

Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 υπολογίζεται με στόχο την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο. Θέτοντας την (2.84) ίση με το μηδέν και χρησιμοποιώντας την (2.87), για το C_1 προκύπτει:

$$C_1 = \frac{\left(R_2 + R_L - \frac{\omega^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \omega \cdot L_2\right)^2}{\omega^2 \cdot L_1 \cdot \left(\left(R_2 + R_L - \frac{\omega^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_2 \cdot R_L}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \omega \cdot L_2\right)^2\right) - \omega^3 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{\omega \cdot L_2 \cdot R_2^2}{\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2} + \frac{\omega^3 \cdot L_2^2 \cdot R_L^2}{(\omega^2 \cdot L_2^2 + R_2^2)^2}\right)} \quad (2.89)$$

Τα υπόλοιπα μεγέθη του κυκλώματος προκύπτουν μέσω των (2.73), (2.74), (2.76) και (2.79).

Η τάση στο πρωτεύον είναι ίση με:

$$|\tilde{V}_1| = |\tilde{I}_1| \cdot \sqrt{\left(R_1 + \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{R_2 + R_L + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_2^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}\right)^2} \quad (2.90)$$

Η τάση στο δευτερεύον είναι ίση με:

$$|\tilde{V}_2| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M \cdot R_L}{\sqrt{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}} \quad (2.91)$$

Το ρεύμα στην αντίσταση φορτίου είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_L| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M}{\sqrt{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}} \quad (2.92)$$

Το ρεύμα στο πηνίο του δευτερεύοντος είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_2| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega \cdot M \cdot \sqrt{1 + \omega^2 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2}}{\sqrt{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}} \quad (2.93)$$

Το ρεύμα στον πυκνωτή στην πλευρά του δευτερεύοντος είναι ίσο με:

$$|\tilde{I}_{C2}| = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega^2 \cdot M \cdot C_2 \cdot R_L}{\sqrt{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}} \quad (2.94)$$

2.3 Επίδραση των Αντιστάσεων Τυλιγμάτων στις Εξεταζόμενες Τοπολογίες Αντιστάθμισης

Η επιλογή των πυκνωτών αντιστάθμισης C_1 και C_2 γίνεται με στόχο τη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου και την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος και κατ' επέκταση, τον μηδενισμό της άεργου ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος.

Οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.18), (2.20), (2.40), (2.42), (2.65), (2.67) και (2.87), (2.89) για τις τέσσερις τοπολογίες.

Για τις τοπολογίες **SS** και **PS**, η τιμή του πυκνωτή C_2 υπολογίζεται από την ίδια σχέση (2.18) και εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα και την τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου στο δευτερεύον. Αντίστοιχα, για τις τοπολογίες **PP** και **SP**, η τιμή του πυκνωτή C_2 υπολογίζεται από ίδια σχέση (2.40), αλλά, εκτός από τη συχνότητα και την αυτεπαγωγή του πηνίου L_2 , εξαρτάται και από την τιμή της αντίστασης του δευτερεύοντος τυλίγματος.

Για την τοπολογία **SS**, η τιμή του πυκνωτή C_1 εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα και την τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου στο πρωτεύον (2.20). Αντίθετα, για τις τοπολογίες **PP** και **SP**, η τιμή του πυκνωτή C_1 εξαρτάται από τις τιμές των αντιστάσεων τυλιγμάτων R_1 και R_2 , των πηνίων L_1 και L_2 , της αμοιβαίας επαγωγής M μεταξύ των πηνίων και της συχνότητας (2.42), (2.89), ενώ για την τοπολογία **PS** εξαρτάται από τις τιμές των αντιστάσεων τυλιγμάτων R_1 και R_2 , του πηνίου L_1 , της αμοιβαίας επαγωγής M μεταξύ των πηνίων και της συχνότητας (2.67).

Στην περίπτωση όπου θεωρήσουμε ότι οι τιμές των αντιστάσεων του κυκλώματος είναι σχεδόν μηδενικές και συνεπώς μπορούμε να τις αμελήσουμε, η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης του δευτερεύοντος υπολογίζεται από την ίδια σχέση (2.18) και για τις τέσσερις τοπολογίες. Επίσης, οι σχέσεις υπολογισμού της τιμής του πυκνωτή αντιστάθμισης του πρωτεύοντος, (2.20), (2.42), (2.65) και (2.89), απλοποιούνται και παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.3-1**.

	C_1	C_2
Τοπολογία SS	$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_1}$	$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_2}$
Τοπολογία PP	$\frac{L_1 - \frac{M^2}{L_2}}{\left(\frac{M^2 \cdot R_L}{L_2^2}\right)^2 + \omega^2 \cdot \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right)^2}$	$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_2}$
Τοπολογία PS	$\frac{L_1}{\left(\frac{\omega^2 \cdot M^2}{R_L}\right)^2 + \omega^2 \cdot L_1^2}$	$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_2}$
Τοπολογία SP	$\frac{1}{\omega^2 \cdot \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right)}$	$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_2}$

Πίνακας 2.3-1: Σχέσεις Υπολογισμού Πυκνωτών Αντιστάθμισης στην περίπτωση Μηδενικών Αντιστάσεων Τυλιγμάτων

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται οι τιμές για κάθε μέγεθος που εμφανίζεται στην εκάστοτε τοπολογία για συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Επιλέγουμε ως συχνότητα $f = 25 \text{ kHz}$ και όπως αναφέρθηκε στην **Ενότητα 2.1**, θεωρούμε ότι το ρεύμα στο πηνίο του πρωτεύοντος είναι σταθερό και ίσο με $|\tilde{I}_1| = 23 \text{ A}$.

2.3.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Στον Πίνακα 2.3-2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών της τοπολογίας SS, στην περίπτωση όπου έχουμε υποθέσει αντίσταση φορτίου με τιμή $R_L = 1 \Omega$, για μηδενικές και μη μηδενικές τιμές αντιστάσεων R_1 και R_2 . Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις σχέσεις (2.11), (2.13), (2.14), (2.15), (2.16), (2.17), (2.18), (2.20), (2.21), (2.22) και (2.23).

	$R_1 = R_2 = 0.0451 \Omega$	$R_1 = R_2 = 0 \Omega$
C_1 (nF)	154.69	154.69
C_2 (nF)	156.48	156.48
P_{out} (W)	52055.62	56856.92
$ S_{in} $ (VA)	54427.18	56856.92
P_{in} (W)	54427.18	56856.92
eff	0.956	1
$ \tilde{V}_1 $ (V)	2366.4	2472.04
$ \tilde{V}_2 $ (V)	228.16	238.45
$ \tilde{I}_2 $ (A)	228.16	238.45

Πίνακας 2.3-2: Σύγκριση Αποτελεσμάτων Τοπολογίας Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Αρχικά παρατηρούμε ότι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης δεν μεταβάλλονται λόγω της μη εξάρτησής τους από τις αντιστάσεις του κυκλώματος. Όσον αφορά τις τάσεις του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος και το ρεύμα του δευτερεύοντος, οι τιμές τους παρουσιάζουν ελάχιστη αύξηση με τη θεώρηση μηδενικών αντιστάσεων.

Διαφορά παρατηρείται στην απόδοση του συστήματος στις δύο περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση με μη μηδενικές αντιστάσεις η απόδοση είναι ίση με 95.6 %. Αντίθετα, στην περίπτωση που οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων θεωρηθούν μηδενικές, η απόδοση είναι ίση με 100 %. Αυτό οφείλεται στην κατανάλωση ενεργού ισχύος στις αντιστάσεις R_1 και R_2 . Επίσης παρατηρείται ένα μεγάλο ρεύμα δευτερεύοντος στην εξεταζόμενη περίπτωση. Συγκεκριμένα, το ρεύμα στο τύλιγμα του δευτερεύοντος είναι ίσο με 228.16 A με αποτέλεσμα η κατανάλωση ισχύος στην αντίσταση R_2 να είναι ίση με $|\tilde{I}_2|^2 \cdot R_2 = 228^2 \cdot 0.0451 = 2344.48 W$. Ωστόσο, σε πρακτικές εφαρμογές, το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα δεν επιτρέπεται να πάρει τόσο μεγάλες τιμές. Τεχνικές ελέγχου όπως περιγράφονται και στην αναφορά [42] συμβάλουν, συνήθως, στο στόχο αυτό.

2.3.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

Στον Πίνακα 2.3-3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών της τοπολογίας PP, στην περίπτωση όπου έχουμε υποθέσει αντίσταση φορτίου με τιμή $R_L = 50 \Omega$, για μηδενικές και μη μηδενικές τιμές αντιστάσεων R_1 και R_2 . Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις σχέσεις (2.32), (2.35), (2.36), (2.37), (2.38), (2.39), (2.40), (2.42), (2.43), (2.44), (2.45), (2.46), (2.47), (2.48) και (2.49).

	$R_1 = R_2 = 0.0451 \Omega$	$R_1 = R_2 = 0 \Omega$	$R_1 = R_2 = 0.0451 \Omega$ με χρήση Πυκνωτών Αντιστάθμισης υπολογισμένους με $R_1 = R_2 = 0 \Omega$
C_1 (nF)	164.07	164.13	164.13
C_2 (nF)	156.48	156.48	156.48
P_{out} (W)	1712.9	1717.57	1712.9
$ S_{in} $ (VA)	1740.63	1717.57	1740.65
P_{in} (W)	1740.63	1717.57	1740.63
Q_{in} (VAr)	0	0	-7.64
eff	0.984	1	0.984
PF	1	1	0.999
$ \tilde{V}_1 $ (V)	889.19	888.94	889.19
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	1.96	1.93	1.96
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	22.92	22.92	22.93
$ \tilde{V}_2 $ (V)	292.65	293.05	292.65
$ \tilde{I}_L $ (A)	5.85	5.86	5.85
$ \tilde{I}_2 $ (A)	9.27	9.29	9.27
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	7.19	7.2	7.19

Πίνακας 2.3-3: Σύγκριση Αποτελεσμάτων Τοπολογίας Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

Στην τοπολογία **PP**, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης C_1 και C_2 μεταβάλλονται με τη θεώρηση μηδενικών αντιστάσεων. Ωστόσο, η μεταβολή είναι ελάχιστη. Παρατηρούμε μία μικρή αύξηση στην η ισχύ εξόδου και μία πολύ μικρή μείωση στην ισχύ εισόδου. Η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται λόγω των μηδενικών ωμικών απωλειών. Τα υπόλοιπα μεγέθη του κυκλώματος εμφανίζουν μικρές διαφορές.

Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 , για την μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος, εξαρτάται από την αντίσταση του δευτερεύοντος τυλίγματος, ενώ η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 , για την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο, εξαρτάται από την αντίσταση και του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος. Σε περίπτωση που θεωρήσουμε μηδενικές αντιστάσεις για τον υπολογισμό των πυκνωτών αντιστάθμισης C_1 και C_2 , τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην τρίτη στήλη του Πίνακα 2.3-3. Οι τιμές των πυκνωτών C_1 και C_2 δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτη μεταβολή. Αυτό έχει ως συνέπεια μία μικρή αύξηση της άεργου ισχύος εισόδου και μία αμελητέα μείωση του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του συστήματος. Στα υπόλοιπα εξεταζόμενα μεγέθη, επίσης δεν παρατηρείται αξιοσημείωτη μεταβολή.

2.3.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Στον Πίνακα 2.3-4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών της τοπολογίας PS, στην περίπτωση όπου έχουμε υποθέσει αντίσταση φορτίου με τιμή $R_L = 1 \Omega$, για μηδενικές και μη μηδενικές τιμές αντιστάσεων R_1 και R_2 . Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις σχέσεις (2.56), (2.60), (2.61), (2.62), (2.63), (2.64), (2.65), (2.67), (2.68), (2.69), (2.70), (2.71) και (2.72).

	$R_1 = R_2 = 0.0451 \Omega$	$R_1 = R_2 = 0 \Omega$	$R_1 = R_2 = 0.0451 \Omega$ με χρήση πυκνωτών αντιστάθμισης υπολογισμένους με $R_1 = R_2 = 0 \Omega$
C_1 (nF)	21.34	19.78	19.78
C_2 (nF)	156.48	156.48	156.48
P_{out} (W)	52055.62	56856.92	52055.62
$ S_{in} $ (VA)	54427.18	56856.92	54450.35
P_{in} (W)	54427.18	56856.92	54427.18
Q_{in} (VAr)	0	0	1588.12
eff	0.956	1	0.956
PF	1	1	0.999
$ \tilde{V}_1 $ (V)	2548.69	2647.07	2548.69
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	21.36	21.48	21.36
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	8.54	8.22	7.92
$ \tilde{V}_2 $ (V)	228.16	238.45	228.16
$ \tilde{I}_2 $ (A)	228.16	238.45	228.16

Πίνακας 2.3-4: Σύγκριση Αποτελεσμάτων Τοπολογίας Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Στον Πίνακα 2.3-4 και για τις διάφορες εξεταζόμενες περιπτώσεις, μεταβάλλεται μόνο η τιμή του πυκνωτή C_1 , αφού η τιμή του C_2 , η οποία υπολογίζεται από τη σχέση (2.62), δεν εξαρτάται από τις αντιστάσεις του κυκλώματος. Αύξηση με τον μηδενισμό των αντιστάσεων παρουσιάζει η τάση στο πρωτεύον κύκλωμα, αν και όχι ιδιαίτερα σημαντική. Τα υπόλοιπα μεγέθη μεταβάλλονται ελάχιστα. Για $R_1 = R_2 = 0.0451 \Omega$ παρατηρείται ένα μεγάλο ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα, που οδηγεί και σε αυξημένες απώλειες στην αντίσταση R_2 του δευτερεύοντος. Για το λόγο αυτό παρατηρείται και μία μείωση στην απόδοση, θεωρώντας τις αντιστάσεις μη μηδενικές. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ωστόσο, τεχνικές ελέγχου εφαρμόζονται συνήθως ώστε να περιορίσουν το ρεύμα του δευτερεύοντος σε μικρότερες τιμές.

Στην τρίτη στήλη του Πίνακα 2.3-4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στην περίπτωση όπου έχουμε υπολογίσει και χρησιμοποιήσει πυκνωτές αντιστάθμισης θεωρώντας μηδενικές αντιστάσεις, όπως δίνονται από τον Πίνακα 2.3-1 σε κύκλωμα με μη μηδενικές αντιστάσεις. Αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της άεργου ισχύος εισόδου και την αμελητέα μείωση του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του συστήματος. Τα υπόλοιπα εξεταζόμενα μεγέθη δεν μεταβάλλονται σημαντικά στην συγκεκριμένη περίπτωση.

2.3.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Στον Πίνακα 2.3-5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών της τοπολογίας SP, στην περίπτωση όπου έχουμε υποθέσει αντίσταση φορτίου με τιμή $R_L = 50 \Omega$, για μηδενικές και μη μηδενικές τιμές αντιστάσεων R_1 και R_2 . Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις σχέσεις (2.80), (2.82), (2.83), (2.84), (2.85), (2.86), (2.87), (2.89), (2.90), (2.91), (2.92), (2.93) και (2.94).

	$R_1 = R_2 = 0.0451 \Omega$	$R_1 = R_2 = 0 \Omega$	$R_1 = R_2 = 0.0451 \Omega$ με χρήση πυκνωτών αντιστάθμισης υπολογισμένους με $R_1 = R_2 = 0 \Omega$
C_1 (nF)	165.27	165.3	165.3
C_2 (nF)	156.48	156.48	156.48
P_{out} (W)	1712.9	1717.57	1712.9
$ S_{in} $ (VA)	1740.63	1717.57	1740.63
P_{in} (W)	1740.63	1717.57	1740.63
Q_{in} (VAr)	0	0	3.8
eff	0.984	1	0.984
PF	1	1	0.999
$ \tilde{V}_1 $ (V)	75.68	74.68	75.68
$ \tilde{V}_2 $ (V)	292.65	293.05	292.65
$ \tilde{I}_L $ (A)	5.85	5.86	5.85
$ \tilde{I}_2 $ (A)	9.27	9.29	9.27
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	7.19	7.2	7.19

Πίνακας 2.3-5: Σύγκριση Αποτελεσμάτων Τοπολογίας Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Στην τοπολογία SP, με τη θεώρηση μηδενικών αντιστάσεων οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης C_1 και C_2 μεταβάλλονται ελάχιστα η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται λόγω των μηδενικών ωμικών απωλειών, ωστόσο δε διαφέρει ιδιαίτερα σε σχέση με την απόδοση 98.4% που παρατηρείται θεωρώντας $R_1 = R_2 = 0.0451 \Omega$. Τα υπόλοιπα εξεταζόμενα μεγέθη του κυκλώματος εμφανίζουν πολύ μικρές διαφορές.

Στην τρίτη στήλη του Πίνακα 2.3-5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στην περίπτωση όπου έχουμε υπολογίσει και χρησιμοποιήσει πυκνωτές αντιστάθμισης θεωρώντας μηδενικές αντιστάσεις, όπως δίνονται από τον Πίνακα 2.3-1 σε κύκλωμα με μη μηδενικές αντιστάσεις. Αυτό έχει ως συνέπεια μία μικρή αύξηση της άεργου ισχύος εισόδου και μια αμελητέα μείωση του συντελεστή ισχύος στην είσοδο του συστήματος.

Συμπεραίνουμε, επομένως ότι για όλες τις τοπολογίες η θεώρηση μηδενικών αντιστάσεων R_1 και R_2 δεν προκαλεί σημαντικές μεταβολές στα εξεταζόμενα μεγέθη του κυκλώματος.

2.4 Ικανότητα Μεταφοράς Ισχύος

Στην προηγούμενη **Ενότητα** παρουσιάστηκε η επίδραση των αντιστάσεων των τυλιγμάτων στα εξεταζόμενα μεγέθη του κυκλώματος. Στην **Υποενότητα** αυτή θα παρουσιάσουμε την επίδραση της αντίστασης του φορτίου, αλλά και της συχνότητας του συστήματος. Παράλληλα, θα πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων τοπολογιών αντιστάθμισης με βάση τις τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών σε κάθε περίπτωση.

2.4.1 Επίδραση της Αντίστασης Φορτίου

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε τοπολογίας σε τρεις διαφορετικές τιμές αντίστασης φορτίου R_L . Συγκεκριμένα, οι τιμές της αντίστασης φορτίου για τις οποίες πραγματοποιήθηκε η μελέτη είναι $R_L = 1 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 50 \Omega$. Επιλέγουμε η συχνότητα του συστήματος να είναι σταθερή και ίση με $f = 25 \text{ kHz}$. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και στην **Ενότητα 2.1**, θεωρούμε ότι το ρεύμα στο πηνίο του πρωτεύοντος είναι σταθερό και ίσο με $|\tilde{I}_1| = 23 \text{ A}$. Οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων έχουν μη μηδενικές τιμές και οι πυκνωτές αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , επιλέγονται έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο. Συνεπώς, η άεργος ισχύς εισόδου είναι μηδενική.

	SS	PP	PS	SP
C_1 (nF)	154.69	165.3	21.34	165.3
C_2 (nF)	156.48	156.48	156.48	156.48
P_{out} (W)	52055.62	34.35	52055.62	34.35
$ S_{in} $ (VA)	54427.18	59.76	54427.18	59.76
eff	0.956	0.575	0.956	0.575
$ \tilde{V}_1 $ (V)	2366.4	885.81	2548.69	2.6
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	23	0.07	21.36	23
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	23	23	8.54	23
$ \tilde{V}_2 $ (V)	228.16	5.86	228.16	5.86
$ \tilde{I}_L $ (A)	228.16	5.86	228.16	5.86
$ \tilde{I}_2 $ (A)	228.16	5.86	228.16	5.86
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	228.16	0.14	228.16	0.14

Πίνακας 2.4-1: Αποτελέσματα Τοπολογιών Αντιστάθμισης σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 25 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 1 \Omega$

Στον **Πίνακα 2.4-1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών που εμφανίζονται σε κάθε τοπολογία στην περίπτωση όπου η αντίσταση φορτίου είναι ίση με $R_L = 1 \Omega$.

Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 είναι κοινή και για τις τέσσερις τοπολογίες. Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 είναι κοινή μόνο για τις τοπολογίες **PP** και **SP**, ενώ για την τοπολογία **SS** η τιμή είναι ελάχιστα μικρότερη. Αντίθετα, στην τοπολογία **PS** η τιμή του C_1 είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις άλλες τοπολογίες.

Παρατηρούμε ότι οι τοπολογίες **SS** και **PS** έχουν την ικανότητα μεγάλης μεταφοράς ισχύος σε αντίθεση με τις τοπολογίες **PP** και **SP** οι οποίες δύναται να μεταφέρουν σχεδόν μηδαμινή ισχύ στο φορτίο R_L της εξεταζόμενης περίπτωσης. Συγκεκριμένα, η ενεργός ισχύς εξόδου στις τοπολογίες **PP** και **SP** παρουσιάζει πολύ μικρή τιμή και είναι ίση με 0.07 % της αντίστοιχης τιμής στις τοπολογίες **SS** και **PS**. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το μέτρο της φαινόμενης ισχύος εισόδου το οποίο στις τοπολογίες **PP** και **SP** έχει τιμή ίση με 0.11 % της τιμής που εμφανίζει στις τοπολογίες **SS** και **PS**. Επιπλέον, μειωμένη είναι και η απόδοση του συστήματος στις τοπολογίες **PP** και **SP**.

Στο πρωτεύον κύκλωμα, το ρεύμα εισόδου, \tilde{I}_{in} , και το ρεύμα του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 , \tilde{I}_{C1} , στις τοπολογίες **SS** και **SP** είναι τα ίδια με το ρεύμα στο πηνίο του πρωτεύοντος, \tilde{I}_1 , το οποίο είναι σταθερό και ίσο με 23 A, (**Σχήμα 2.2-1 & 2.2-4**). Στις τοπολογίες **PP** και **PS**, οι τιμές των δύο αυτών ρευμάτων είναι διαφορετικές μεταξύ τους και δεν ξεπερνούν τα 23 A.

Στο δευτερεύον κύκλωμα, το ρεύμα της αντίστασης φορτίου, \tilde{I}_L , και το ρεύμα του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 , \tilde{I}_{C2} , στις τοπολογίες **SS** και **PS** είναι τα ίδια μεγέθη με το ρεύμα στο πηνίο του δευτερεύοντος, \tilde{I}_2 , (**Σχήμα 2.2-1 & 2.2-3**). Παρατηρούμε, όμως, ότι οι τιμές των ρευμάτων αυτών είναι πολύ μεγάλες, γεγονός που επιφέρει μεγάλη κατανάλωση ισχύος στην αντίσταση R_2 του δευτερεύοντος τυλίγματος. Σε πρακτικές εφαρμογές, όπως εξηγήθηκε στην **Ενότητα 2.3.1**, υπάρχουν τεχνικές ελέγχου οι οποίες οριοθετούν την τιμή των ρευμάτων αυτών κοντά στα 23 A. Στις τοπολογίες **PP** και **SP**, οι τιμές των ρευμάτων που εξετάζονται είναι ίσες μεταξύ των δύο τοπολογιών και δεν ξεπερνούν τα 23 A.

	SS	PP	PS	SP
C_1 (nF)	154.69	165.24	144.82	165.29
C_2 (nF)	156.48	156.48	156.48	156.48
P_{out} (W)	5634.75	343.33	5634.75	343.33
$ S_{in} $ (VA)	5684.02	368.83	5684.02	368.83
eff	0.991	0.931	0.991	0.931
$ \tilde{V}_1 $ (V)	247.13	885.98	978.29	16.04
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	23	0.42	5.81	23
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	23	22.996	22.25	23
$ \tilde{V}_2 $ (V)	237.38	58.59	237.38	58.59
$ \tilde{I}_L $ (A)	23.73	5.86	23.78	5.86
$ \tilde{I}_2 $ (A)	23.73	6.03	23.78	6.03
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	23.73	1.44	23.78	1.44

Πίνακας 2.4-2: Αποτελέσματα Τοπολογιών Αντιστάθμισης σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 25$ kHz και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 10 \Omega$

Στον **Πίνακα 2.4-2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών που εμφανίζονται σε κάθε τοπολογία στην περίπτωση όπου η αντίσταση φορτίου είναι ίση με $R_L = 10 \Omega$.

Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 , όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, είναι κοινή και για τις τέσσερις τοπολογίες. Επίσης, παρατηρούμε ότι η τιμή του C_2 δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της αντίστασης φορτίου. Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 κυμαίνεται στις ίδιες τιμές για τις τοπολογίες **PP** και **SP**, ενώ στις τοπολογίες **SS** και **PS** οι τιμές είναι μικρότερες. Αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι με την αύξηση της αντίστασης φορτίου, η τιμή του C_1 για την τοπολογία **PS** παρουσιάζει μεγάλη αύξηση.

Η απόδοση του συστήματος και για τις τέσσερις τοπολογίες είναι μεγαλύτερη από 90 %. Η ενεργός ισχύς εξόδου στις τοπολογίες **PP** και **SP** παρουσιάζει και σ' αυτή την περίπτωση μικρή τιμή, η οποία είναι ίση με 6.09 % της αντίστοιχης τιμής στις τοπολογίες **SS** και **PS**. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το μέτρο της φαινόμενης ισχύος εισόδου το οποίο στις τοπολογίες **PP** και **SP** έχει τιμή ίση με 6.49 % της τιμής που εμφανίζει στις τοπολογίες **SS** και **PS**. Ωστόσο, και πάλι η ικανότητα μεταφοράς ισχύος για τις τοπολογίες **PP** και **SP** δεν είναι ιδιαίτερα αυξημένη.

Πρέπει να σημειωθεί, επίσης, ότι με την αύξηση της αντίστασης φορτίου, μειώνεται σημαντικά και η μεταφερόμενη ισχύς στις τοπολογίες **SS** και **PS**. Συγκεκριμένα, για ένα φορτίο $R_L = 10 \Omega$, παρατηρείται μία τιμή μεταφερόμενης ισχύος ίσης με το 10.82 % της αντίστοιχης τιμής για ένα φορτίο ίσο με 1Ω .

Στο πρωτεύον κύκλωμα, το ρεύμα του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 , \tilde{I}_{C1} , έχει τιμή κοντά στα 23 A και για τις τέσσερις τοπολογίες αντιστάθμισης. Από την άλλη, το ρεύμα εισόδου, \tilde{I}_{in} , εμφανίζει μικρότερες τιμές στις τοπολογίες **PP** και **PS** σε σχέση με τις τοπολογίες **SS** και **SP**.

Στο δευτερεύον κύκλωμα, το ρεύμα της αντίστασης φορτίου, \tilde{I}_L , το ρεύμα του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 , \tilde{I}_{C2} , και το ρεύμα στο πηνίο του δευτερεύοντος, \tilde{I}_2 , στις τοπολογίες **PP** και **SP** έχουν τιμές μικρότερες από τις αντίστοιχες στις τοπολογίες **SS** και **PS**. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι στις τοπολογίες **SS** και **PS** οι τιμές των τριών παραπάνω ρευμάτων είναι ελάχιστα μεγαλύτερες από 23 A και συνεπώς δεν χρειάζονται τεχνικές ελέγχου για τον περιορισμό τους.

	SS	PP	PS	SP
C_1 (nF)	154.69	164.07	154.25	165.27
C_2 (nF)	156.48	156.48	156.48	156.48
P_{out} (W)	1135.09	1712.9	1135.09	1712.9
$ S_{in} $ (VA)	1159.97	1740.63	1159.97	1740.63
eff	0.979	0.984	0.979	0.984
$ \tilde{V}_1 $ (V)	50.43	889.19	947.9	75.68
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	23	1.96	1.22	23
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	23	22.92	22.97	23
$ \tilde{V}_2 $ (V)	238.23	292.65	238.23	292.65
$ \tilde{I}_L $ (A)	4.76	5.85	4.76	5.85
$ \tilde{I}_2 $ (A)	4.76	9.27	4.76	9.27
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	4.76	7.19	4.76	7.19

Πίνακας 2.4-3: Αποτελέσματα Τοπολογιών Αντιστάθμισης σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 25$ kHz και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 50 \Omega$

Στον **Πίνακα 2.4-3** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών που εμφανίζονται σε κάθε τοπολογία στην περίπτωση όπου η αντίσταση φορτίου είναι ίση με $R_L = 50 \Omega$.

Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 είναι κοινή και για τις τέσσερις τοπολογίες και ίση με την τιμή την οποία είχε στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 κυμαίνεται στις ίδιες τιμές για τις τοπολογίες **PP** και **SP**, ενώ στις τοπολογίες **SS** και **PS** οι τιμές είναι περίπου ίσες μεταξύ τους, αλλά μικρότερες από τις αντίστοιχες των τοπολογιών **PP** και **SP**.

Μία αξιοσημείωτη αύξηση παρουσιάζει στην περίπτωση αυτή η ενεργός ισχύς εξόδου στις τοπολογίες **PP** και **SP**. Μάλιστα, στην περίπτωση αυτή, έχει μεγαλύτερη τιμή από την αντίστοιχη τιμή στις τοπολογίες **SS** και **PS**, οι οποίες τοπολογίες παρουσιάζουν τώρα σημαντική μείωση στη μεταφερόμενη ισχύ τους. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το μέτρο της φαινόμενης ισχύος εισόδου. Η απόδοση του συστήματος και για τις τέσσερις τοπολογίες κυμαίνεται κοντά στο 98 %.

Στο πρωτεύον κύκλωμα, το ρεύμα του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 , \tilde{I}_{C1} , έχει τιμή κοντά στα 23 A και για τις τέσσερις τοπολογίες αντιστάθμισης. Από την άλλη, το ρεύμα εισόδου, \tilde{I}_{in} , εμφανίζει πολύ μικρότερες τιμές στις τοπολογίες **PP** και **PS** σε σχέση με τις τοπολογίες **SS** και **SP**.

Στο δευτερεύον κύκλωμα, το ρεύμα της αντίστασης φορτίου, \tilde{I}_L , το ρεύμα του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 , \tilde{I}_{C2} , και το ρεύμα στο πηνίο του δευτερεύοντος, \tilde{I}_2 , στις τοπολογίες **PP** και **SP** έχουν τιμές μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στις τοπολογίες **SS** και **PS**. Οι τιμές των τριών αυτών ρευμάτων, ωστόσο, είναι μικρότερες από 23 A και για τις τέσσερις τοπολογίες.

2.4.2 Επίδραση της Συχνότητας Λειτουργίας του Συστήματος

Στην προηγούμενη **Υποενότητα** παρουσιάστηκε η επίδραση της αντίστασης φορτίου στα εξεταζόμενα μεγέθη κάθε τοπολογίας σε μία σταθερή συχνότητα λειτουργίας. Στην **Υποενότητα** αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε τοπολογίας σε διαφορετικές τιμές συχνότητας λειτουργίας f , θεωρώντας ότι η αντίσταση φορτίου παραμένει σταθερή. Οι τιμές της συχνότητας για τις οποίες πραγματοποιήθηκε η μελέτη είναι $f = 25 \text{ kHz}$, $f = 50 \text{ kHz}$ και $f = 85 \text{ kHz}$, ενώ παίρνουμε τρεις περιπτώσεις για την τιμή της αντίστασης του φορτίου: $R_L = 10 \Omega$, $R_L = 1 \Omega$ και $R_L = 50 \Omega$. Επίσης, θεωρούμε ότι το ρεύμα στο πηνίο του πρωτεύοντος είναι σταθερό και ίσο με $|\tilde{I}_1| = 23 \text{ A}$. Οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων έχουν μη μηδενικές τιμές και οι πυκνωτές αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , επιλέγονται έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο.

Η περίπτωση της συχνότητας λειτουργίας $f = 25 \text{ kHz}$ και αντίστασης φορτίου $R_L = 10 \Omega$ παρουσιάστηκε στην **Υποενότητα 2.4.1**, στον **Πίνακα 2.4-2**.

	SS	PP	PS	SP
$C_1 \text{ (nF)}$	38.67	41.32	30.43	41.32
$C_2 \text{ (nF)}$	39.12	39.12	39.12	39.12
$P_{out} \text{ (W)}$	22539.01	343.47	22539.01	343.47
$ \mathbf{S}_{in} \text{ (VA)}$	22664.51	368.9	22664.51	368.9
eff	0.994	0.931	0.994	0.931
$ \tilde{V}_1 \text{ (V)}$	985.41	1771.69	2134.23	16.04
$ \tilde{I}_{in} \text{ (A)}$	23	0.21	10.62	23
$ \tilde{I}_{C1} \text{ (A)}$	23	22.9991	20.4	23
$ \tilde{V}_2 \text{ (V)}$	474.75	58.61	474.75	58.61
$ \tilde{I}_L \text{ (A)}$	47.48	5.86	47.48	5.86
$ \tilde{I}_2 \text{ (A)}$	47.48	5.9	47.48	5.9
$ \tilde{I}_{C2} \text{ (A)}$	47.48	0.72	47.48	0.72

Πίνακας 2.4-4: Αποτελέσματα Τοπολογιών Αντιστάθμισης σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 50 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 10 \Omega$

Στον **Πίνακα 2.4-4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών που εμφανίζονται σε κάθε τοπολογία στην περίπτωση όπου η συχνότητα λειτουργίας είναι ίση με $f = 50 \text{ kHz}$ και η τιμή της αντίστασης φορτίου είναι $R_L = 10 \Omega$.

Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 είναι κοινή και για τις τέσσερις τοπολογίες. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της συχνότητας η τιμή του πυκνωτή C_2 παρουσιάζει αξιοσημείωτη μείωση. Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 είναι κοινή μόνο για τις τοπολογίες **PP** και **SP**, ενώ για την τοπολογία **SS** η τιμή είναι ελάχιστα μικρότερη. Αντίθετα, στην τοπολογία **PS** η τιμή του C_1 είναι αισθητά μικρότερη σε σχέση με τις άλλες τοπολογίες.

Η τιμή ενεργού ισχύος εξόδου στις τοπολογίες **PP** και **SP** μεταβάλλεται ελάχιστα με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας. Υπενθυμίζεται ότι τόσο για μία συχνότητα ίση με 25 kHz , όσο και για μία συχνότητα 50 kHz , η δυνατότητα μεταφοράς ισχύος είναι ιδιαίτερα μικρή. Αντίθετα, η τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου στις τοπολογίες **SS** και **PS** αυξάνεται κατά 300% και συνεπώς η διαφορά μεταξύ των τοπολογιών **SS-PS** και **PP-SP** είναι πολύ μεγάλη. Η απόδοση του συστήματος και για τις τέσσερις τοπολογίες είναι μεγαλύτερη από 90% και παρουσιάζει αμελητέα αύξηση με την αύξηση της συχνότητας από 25 kHz σε 50 kHz για τις τοπολογίες **SS** και **PS**.

Στο πρωτεύον κύκλωμα, το ρεύμα του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 , \widetilde{I}_{C1} , για την τοπολογία **PS** μειώνεται ελάχιστα με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας. Για τις υπόλοιπες τοπολογίες, το \widetilde{I}_{C1} έχει τιμή κοντά στα 23 A . Το ρεύμα εισόδου, \widetilde{I}_{in} , για την τοπολογία **PP** παρουσιάζει ελάχιστη μείωση με την αύξηση της συχνότητας, ενώ για την τοπολογία **PS** η τιμή του σχεδόν διπλασιάζεται για τη συχνότητα των 50 kHz σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του στη συχνότητα 25 kHz . Παρά τις μεταβολές αυτές, οι τιμές του \widetilde{I}_{in} για τις τοπολογίες **PP** και **PS** είναι μικρότερες σε σχέση με τις τοπολογίες **SS** και **SP**.

Στο δευτερεύον κύκλωμα, οι τιμές των ρευμάτων της αντίστασης φορτίου, \widetilde{I}_L , του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 , \widetilde{I}_{C2} , και του πηνίου του δευτερεύοντος, \widetilde{I}_2 , στις τοπολογίες **SS** και **PS** διπλασιάζονται με την αύξηση της συχνότητας από 25 kHz σε 50 kHz , ενώ για τις τοπολογίες **PP** και **SP** οι τιμές μεταβάλλονται ελάχιστα. Η αύξηση των τιμών των ρευμάτων στις τοπολογίες **SS** και **PS** καθιστά αναγκαία τη χρήση τεχνικών ελέγχου για τον περιορισμό τους.

	SS	PP	PS	SP
C_1 (nF)	13.38	14.3	7.51	14.3
C_2 (nF)	13.54	13.54	13.54	13.54
P_{out} (W)	65137.73	343.5	65137.73	343.5
$ S_{in} $ (VA)	65455.36	368.91	65455.36	368.91
eff	0.995	0.931	0.995	0.931
$ \tilde{V}_1 $ (V)	2845.89	3011.77	4296.11	16.04
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	23	0.12	15.24	23
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	23	22.9997	17.3	23
$ \tilde{V}_2 $ (V)	807.08	58.61	807.08	58.61
$ \tilde{I}_L $ (A)	80.71	5.86	80.71	5.86
$ \tilde{I}_2 $ (A)	80.71	5.88	80.71	5.88
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	80.71	0.42	80.71	0.42

Πίνακας 2.4-5: Αποτελέσματα Τοπολογιών Αντιστάθμισης σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 85$ kHz και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 10 \Omega$

Στον **Πίνακα 2.4-5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών που εμφανίζονται σε κάθε τοπολογία στην περίπτωση όπου η συχνότητα λειτουργίας είναι ίση με $f = 85$ kHz και η τιμή της αντίστασης φορτίου είναι ίση με $R_L = 10 \Omega$.

Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 είναι κοινή και για τις τέσσερις τοπολογίες και, όπως παρατηρήσαμε και στην προηγούμενη περίπτωση, παρουσιάζει μεγάλη μείωση με την μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας. Η τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 είναι κοινή μόνο για τις τοπολογίες **PP** και **SP**, ενώ για την τοπολογία **SS** η τιμή είναι ελάχιστα μικρότερη. Αντίθετα, στην τοπολογία **PS** η τιμή του C_1 είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις άλλες τοπολογίες. Και για την περίπτωση του πυκνωτή C_1 , η αύξηση της συχνότητας επιφέρει μεγάλη μείωση της τιμής του.

Η τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου στις τοπολογίες **PP** και **SP** και πάλι δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας. Αντίθετα, η τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου στις τοπολογίες **SS** και **PS** αυξάνεται περίπου κατά 190 % με την αύξηση της συχνότητας από 50 kHz σε 85 kHz και συνεπώς η διαφορά μεταξύ των τοπολογιών **SS-PS** και **PP-SP** αυξάνεται περαιτέρω. Η απόδοση του συστήματος και για τις τέσσερις τοπολογίες είναι μεγαλύτερη από 90 % και παρουσιάζει αμελητέα αύξηση με την αύξηση της συχνότητας από 50 kHz σε 85 kHz για τις τοπολογίες **SS** και **PS**.

Στο πρωτεύον κύκλωμα, το ρεύμα του πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 , \tilde{I}_{C1} , για την τοπολογία **PS**, όπως και προηγουμένως, μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας. Για τις υπόλοιπες τοπολογίες, το \tilde{I}_{C1} έχει τιμή κοντά στα 23 A. Συγκρίνοντας, επομένως, τις τοπολογίες **PS** και **SS** που παρουσιάζουν μεγάλη ικανότητα μεταφοράς ισχύος, παρατηρούμε ότι για την τοπολογία **PS** το ρεύμα στον πυκνωτή C_1 παίρνει μικρότερες τιμές.

Το ρεύμα εισόδου, \tilde{I}_{in} , για την τοπολογία **PP** παρουσιάζει ελάχιστη μείωση με την αύξηση της συχνότητας, ενώ για την τοπολογία **PS** η τιμή του αυξάνεται κατά 5 A. Παρά τις μεταβολές αυτές, οι τιμές του \tilde{I}_{in} για τις τοπολογίες **PP** και **PS** είναι μικρότερες σε σχέση με τις τοπολογίες **SS** και **SP**.

Στο δευτερεύον κύκλωμα, το ρεύμα της αντίστασης φορτίου, \tilde{I}_L , το ρεύμα του πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 , \tilde{I}_{C2} , και το ρεύμα στο πηνίο του δευτερεύοντος, \tilde{I}_2 , στις τοπολογίες **SS** και **PS** παρουσιάζουν αύξηση κατά 70 % με τη συχνότητα, ενώ για τις τοπολογίες **PP** και **SP** οι τιμές μεταβάλλονται ελάχιστα. Η αύξηση των τιμών των ρευμάτων στις τοπολογίες **SS** και **PS** καθιστά αναγκαία τη χρήση τεχνικών ελέγχου για τον περιορισμό τους.

Στους Πίνακες 2.4-6 και 2.4-7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εξεταζόμενων μεγεθών σε κάθε τοπολογία στις περιπτώσεις συχνοτήτων λειτουργίας $f = 50 \text{ kHz}$ και $f = 85 \text{ kHz}$ και αντίστασης φορτίου $R_L = 1 \Omega$. Η περίπτωση όπου η συχνότητα είναι ίση με $f = 25 \text{ kHz}$ και η αντίσταση του φορτίου είναι $R_L = 1 \Omega$ παρουσιάστηκε στην Υποενότητα 2.4.1, στον Πίνακα 2.4-1.

	SS	PP	PS	SP
C_1 (nF)	38.67	41.25	38.25	41.32
C_2 (nF)	39.12	39.12	39.12	39.12
P_{out} (W)	4540.36	1716.4	4540.36	1716.4
$ S_{in} $ (VA)	4568.31	1742.39	4568.31	1742.39
eff	0.994	0.985	0.994	0.985
$ \tilde{V}_1 $ (V)	198.62	1773.3	1903.51	75.76
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	23	0.983	2.4	23
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	23	22.979	22.87	23
$ \tilde{V}_2 $ (V)	476.46	292.95	476.46	292.95
$ \tilde{I}_L $ (A)	9.53	5.86	9.53	5.86
$ \tilde{I}_2 $ (A)	9.53	6.88	9.53	6.88
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	9.53	3.6	9.53	3.6

Πίνακας 2.4-6: Αποτελέσματα Τοπολογιών Αντιστάθμισης σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 50 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 1 \Omega$

	SS	PP	PS	SP
C_1 (nF)	38.67	41.25	38.25	41.32
C_2 (nF)	39.12	39.12	39.12	39.12
P_{out} (W)	4540.36	1716.4	4540.36	1716.4
$ S_{in} $ (VA)	4568.31	1742.39	4568.31	1742.39
eff	0.994	0.985	0.994	0.985
$ \tilde{V}_1 $ (V)	198.62	1773.3	1903.51	75.76
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	23	0.983	2.4	23
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	23	22.979	22.87	23
$ \tilde{V}_2 $ (V)	476.46	292.95	476.46	292.95
$ \tilde{I}_L $ (A)	9.53	5.86	9.53	5.86
$ \tilde{I}_2 $ (A)	9.53	6.88	9.53	6.88
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	9.53	3.6	9.53	3.6

Πίνακας 2.4-7: Αποτελέσματα Τοπολογιών Αντιστάθμισης σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 85$ kHz και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 1 \Omega$

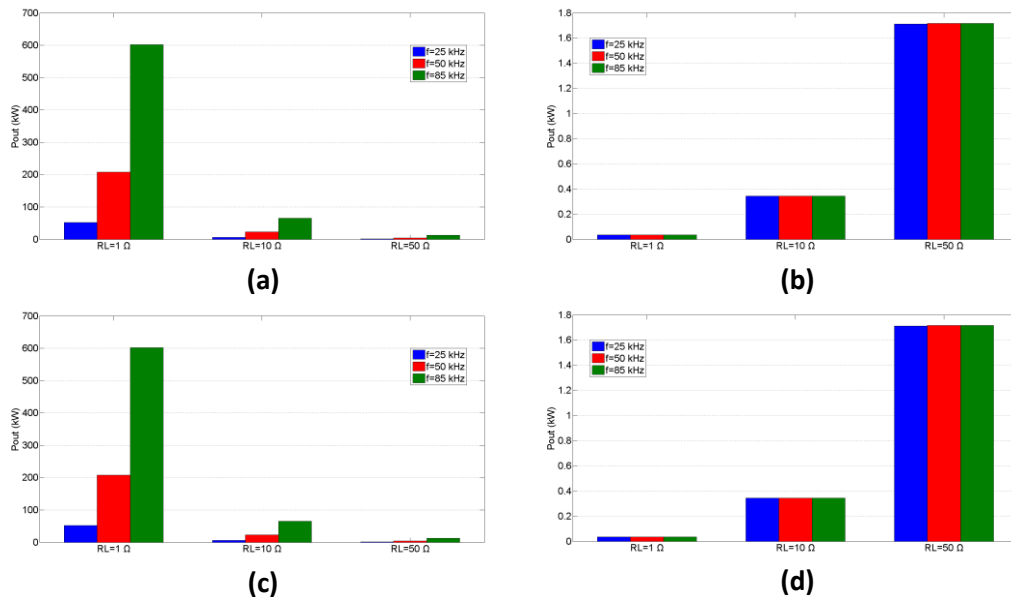
Αντίστοιχα, στους **Πίνακες 2.4-8** και **2.4-9**, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μεγεθών κάθε τοπολογίας στις περιπτώσεις όπου η συχνότητα λειτουργίας είναι ίση με $f = 50$ kHz και $f = 85$ kHz με αντίσταση φορτίου $R_L = 50 \Omega$. Η περίπτωση της συχνότητας λειτουργίας $f = 25$ kHz και αντίστασης φορτίου $R_L = 50 \Omega$ παρουσιάστηκε στην **Υποενότητα 2.4.1**, στον **Πίνακα 2.4-3**.

	SS	PP	PS	SP
C_1 (nF)	38.67	41.25	38.25	41.32
C_2 (nF)	39.12	39.12	39.12	39.12
P_{out} (W)	4540.36	1716.4	4540.36	1716.4
$ S_{in} $ (VA)	4568.31	1742.39	4568.31	1742.39
eff	0.994	0.985	0.994	0.985
$ \tilde{V}_1 $ (V)	198.62	1773.3	1903.51	75.76
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	23	0.983	2.4	23
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	23	22.979	22.87	23
$ \tilde{V}_2 $ (V)	476.46	292.95	476.46	292.95
$ \tilde{I}_L $ (A)	9.53	5.86	9.53	5.86
$ \tilde{I}_2 $ (A)	9.53	6.88	9.53	6.88
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	9.53	3.6	9.53	3.6

Πίνακας 2.4-8: Αποτελέσματα Τοπολογιών Αντιστάθμισης σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 50$ kHz και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 50 \Omega$

	SS	PP	PS	SP
C_1 (nF)	13.38	14.29	12.97	14.3
C_2 (nF)	13.54	13.54	13.54	13.54
P_{out} (W)	13121.64	1717.16	13121.64	1717.16
$ S_{in} $ (VA)	13157.33	1742.77	13157.33	1742.77
eff	0.997	0.985	0.997	0.985
$ \tilde{V}_1 $ (V)	572.06	3012.72	3268.76	75.77
$ \tilde{I}_{in} $ (A)	23	0.58	4.03	23
$ \tilde{I}_{C1} $ (A)	23	22.993	22.65	23
$ \tilde{V}_2 $ (V)	809.99	293.02	809.99	293.02
$ \tilde{I}_L $ (A)	16.2	5.86	16.2	5.86
$ \tilde{I}_2 $ (A)	16.2	6.23	16.2	6.23
$ \tilde{I}_{C2} $ (A)	16.2	2.12	16.2	293.02

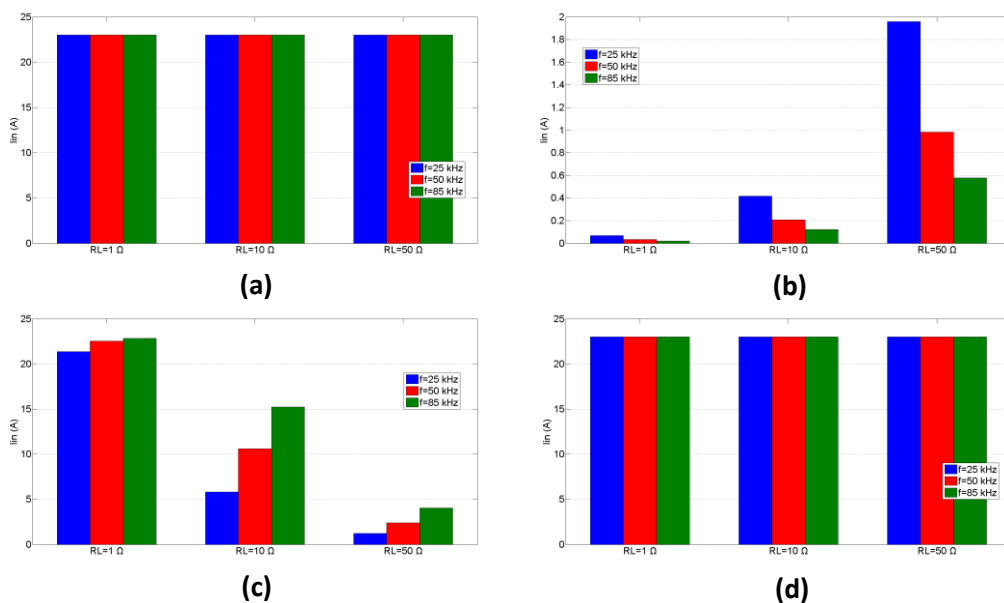
Πίνακας 2.4-9: Αποτελέσματα Τοπολογιών Αντιστάθμισης σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 85 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 50 \Omega$



Σχήμα 2.4-1: Ενεργός Ισχύς Εξόδου στην Τοπολογία Αντιστάθμισης (α) Σειρά-Σειρά (SS), (b) Παράλληλα-Παράλληλα (PP), (c) Παράλληλα-Σειρά (PS), (d) Σειρά-Παράλληλα (SP)

Η ενεργός ισχύς εξόδου για όλες τις τοπολογίες αντιστάθμισης και όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δίνεται στο Σχήμα 2.4-1. Συγκεκριμένα, η ενεργός ισχύς εξόδου, στις τοπολογίες αντιστάθμισης SS και PS, (Σχήματα 2.4-1(a) & 2.4-1(c)), παρουσιάζει σημαντική αύξηση καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, για όλες τις εξεταζόμενες τιμές της αντίστασης του φορτίου. Επίσης, με την αύξηση της αντίστασης φορτίου η ενεργός ισχύς εξόδου μειώνεται για κάθε συχνότητα λειτουργίας. Πρέπει, ωστόσο, να τονισθεί ότι σε πρακτικές εφαρμογές, όπως αναφέρθηκε και στην Υποενότητα 2.3.1, υπάρχουν τεχνικές ελέγχου που συμβάλουν στην μείωση μεγάλων ρευμάτων στο δευτερεύον και κατά συνέπεια και στην μείωση της μεταφερόμενη ισχύος.

Από την άλλη, στις τοπολογίες **PP** και **SP**, (Σχήματα 2.4-1(b) & 2.4-1(c)), για μικρές τιμές αντίστασης φορτίου, η ενεργός ισχύς εξόδου παραμένει σχεδόν σταθερή με την αύξηση της συχνότητας, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές αντίστασης φορτίου παρουσιάζει μια αμελητέα αύξηση με τη συχνότητα. Επιπλέον, η αύξηση της τιμής της αντίστασης φορτίου προκαλεί ιδιαίτερα σημαντική αύξηση της ισχύος εξόδου σε κάθε συχνότητα λειτουργίας.

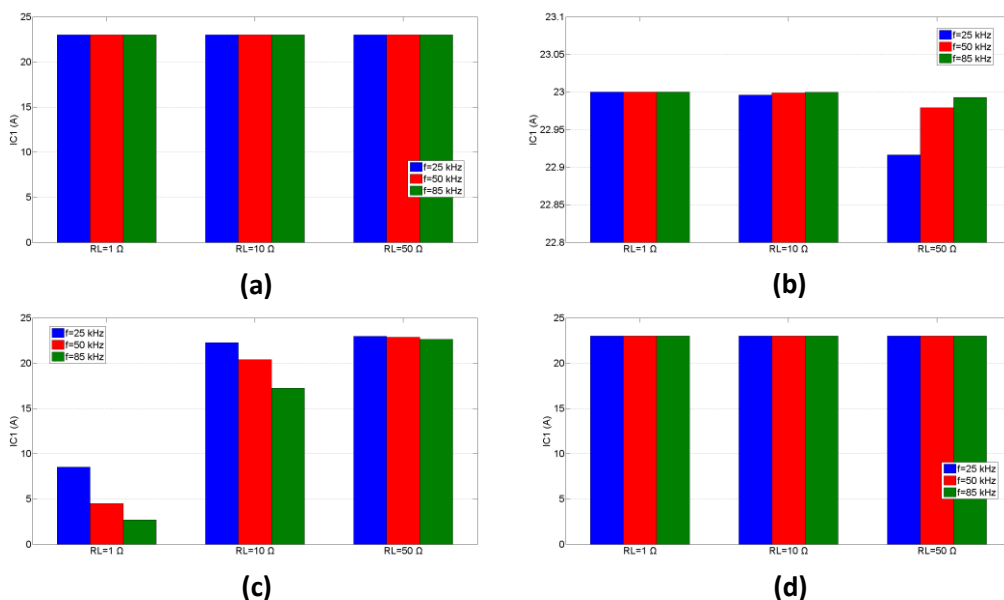


Σχήμα 2.4-2: Ρεύμα Εισόδου, \widetilde{I}_{in} , στην Τοπολογία Αντιστάθμισης (a) Σειρά-Σειρά (SS), (b) Παράλληλα-Παράλληλα (PP), (c) Παράλληλα-Σειρά (PS), (d) Σειρά-Παράλληλα (SP)

Το ρεύμα εισόδου \widetilde{I}_{in} για όλες τις τοπολογίες αντιστάθμισης και όλες τις περιπτώσεις που εξετάσθηκαν δίνεται στο Σχήμα 2.4-2. Συγκεκριμένα, το ρεύμα εισόδου, \widetilde{I}_{in} , για τις τοπολογίες **SS** και **SP**, (Σχήματα 2.4-2(a) & 2.4-2(d)), είναι ίσο με το ρεύμα του πηνίου L_1 , \widetilde{I}_1 , (Σχήματα 2.2-1 & 2.2-4), το οποίο έχουμε θεωρήσει ότι είναι σταθερό και ίσο με $23 A$ και άρα δεν παρουσιάζει καμία μεταβολή με τη συχνότητα λειτουργίας και την αντίσταση του φορτίου.

Στην τοπολογία **PP**, (Σχήμα 2.4-2(b)), το ρεύμα \widetilde{I}_{in} μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας για κάθε τιμή αντίστασης φορτίου που εξετάσθηκε. Αντίθετα, με την αύξηση της αντίστασης φορτίου, το ρεύμα \widetilde{I}_{in} , αυξάνεται σε όλες τις συχνότητες λειτουργίας που εξετάσθηκαν. Παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές της αντίστασης φορτίου, το ρεύμα \widetilde{I}_{in} λαμβάνει ιδιαίτερα μικρές τιμές. Για μεγαλύτερες τιμές αντίστασης φορτίου, παρατηρείται μία αύξηση της τιμής του ρεύματος \widetilde{I}_{in} , ωστόσο σε καμία περίπτωση το ρεύμα \widetilde{I}_{in} δε προσεγγίζει την τιμή των $23 A$ που παρατηρείται στις τοπολογίες **SS** και **SP**.

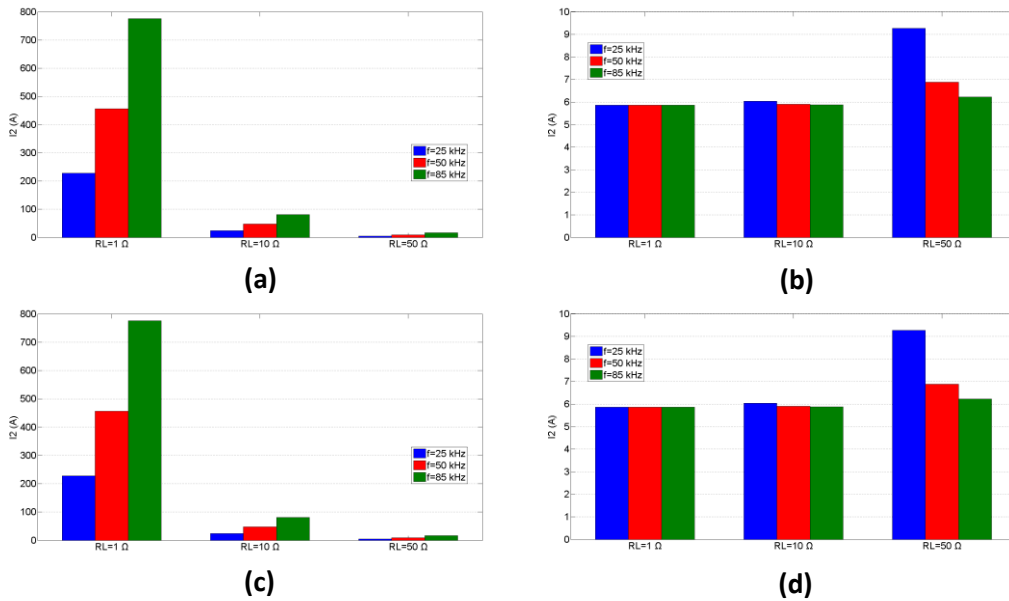
Αντίθετα, στην τοπολογία **PS**, (Σχήμα 2.4-2(c)), για μικρές τιμές αντίστασης φορτίου, το ρεύμα \tilde{I}_{in} έχει τιμές κοντά στα 23 A, οι οποίες, όμως, μειώνονται σημαντικά σε μεγαλύτερες τιμές αντίστασης φορτίου.



Σχήμα 2.4-3: Ρεύμα στον Πυκνωτή Αντιστάθμισης C_1 , \tilde{I}_{C1} , στην Τοπολογία Αντιστάθμισης (a) Σειρά-Σειρά (SS), (b) Παράλληλα-Παράλληλα (PP), (c) Παράλληλα-Σειρά (PS), (d) Σειρά-Παράλληλα (SP)

Το ρεύμα στον πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 , \tilde{I}_{C1} για όλες τις τοπολογίες αντιστάθμισης και όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δίνεται στο Σχήμα 2.4-3. Συγκεκριμένα, το ρεύμα στον πυκνωτή αντιστάθμισης C_1 , \tilde{I}_{C1} , για τις τοπολογίες **SS** και **SP**, (Σχήματα 2.4-3(a) & 2.4-3(d)), είναι ίσο με το ρεύμα \tilde{I}_1 του πηνίου L_1 , (Σχήματα 2.2-1 & 2.2-4), το οποίο είναι σταθερό και ίσο με 23 A. Στην τοπολογία **PP**, (Σχήμα 2.4-3(b)), το ρεύμα \tilde{I}_{C1} λαμβάνει τιμές κοντά στα 23 A και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι παραμένει σχεδόν σταθερό με τη μεταβολή της συχνότητας για αντίσταση φορτίου $R_L = 1 \Omega$ και $R_L = 10 \Omega$. Για μεγαλύτερες τιμές της αντίστασης φορτίου ωστόσο ($R_L = 50 \Omega$), παρατηρείται μία μεταβολή του ρεύματος στον πυκνωτή C_1 καθώς αυξάνεται η συχνότητα.

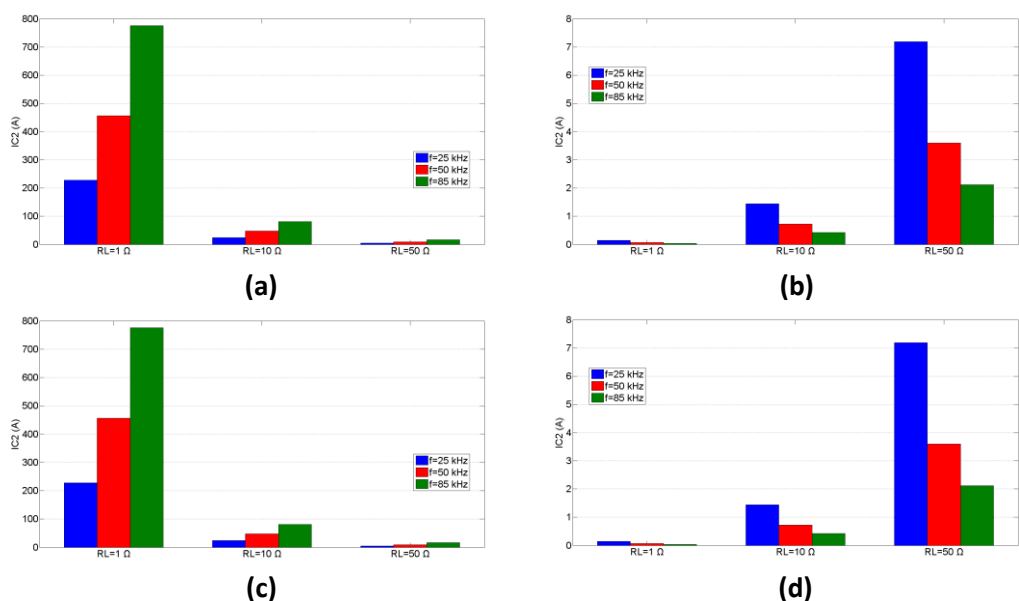
Στην τοπολογία **PS**, (Σχήμα 2.4-3(c)), σε μεγάλες τιμές της αντίστασης φορτίου το ρεύμα \tilde{I}_{C1} έχει τιμές κοντά στα 23 A, και δε φαίνεται να επηρεάζεται από τη μεταβολή της συχνότητας. Σε μικρότερες τιμές αντίστασης φορτίου το ρεύμα \tilde{I}_{C1} μειώνεται σημαντικά. Επίσης, σε μικρές αντιστάσεις του φορτίου, το \tilde{I}_{C1} παρουσιάζει μείωση με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας.



Σχήμα 2.4-4: Ρεύμα στο πηνίο του δευτερεύοντος, \tilde{I}_2 , στην Τοπολογία Αντιστάθμισης (a) Σειρά-Σειρά (SS), (b) Παράλληλα-Παράλληλα (PP), (c) Παράλληλα-Σειρά (PS), (d) Σειρά-Παράλληλα (SP)

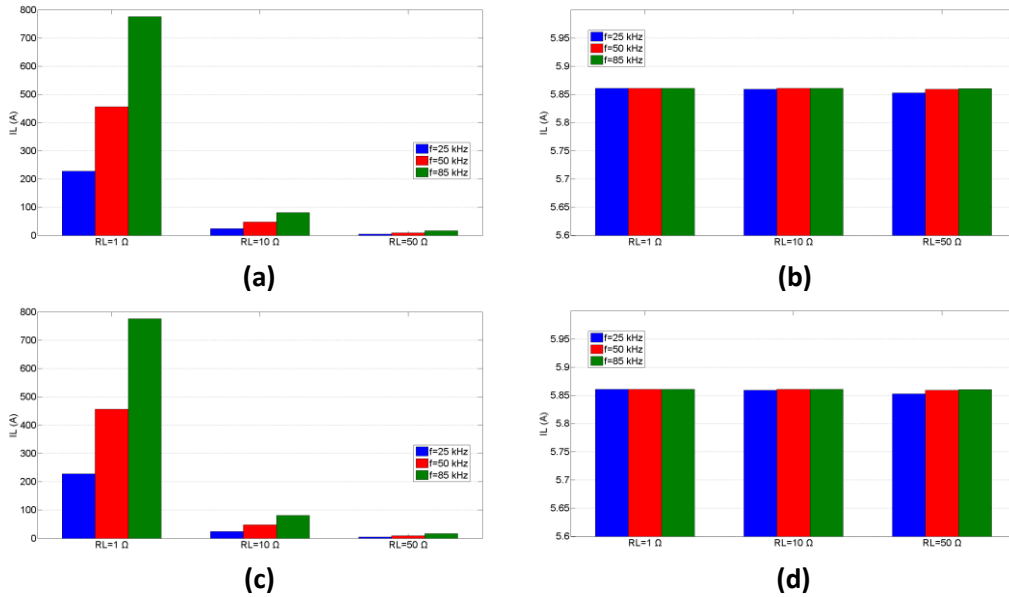
Το ρεύμα στο πηνίο L_2 του δευτερεύοντος, \tilde{I}_2 για όλες τις τοπολογίες αντιστάθμισης και όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δίνεται στο Σχήμα 2.4-4. Συγκεκριμένα, το ρεύμα στο πηνίο L_2 του δευτερεύοντος, \tilde{I}_2 , για τις τοπολογίες SS και PS, (Σχήματα 2.4-4(a) & 2.4-4(c)), παρουσιάζει σημαντική αύξηση καθώς αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, για όλες τις περιπτώσεις της αντίστασης φορτίου που εξετάστηκαν. Επίσης, με την αύξηση της αντίστασης φορτίου το ρεύμα \tilde{I}_2 μειώνεται για κάθε συχνότητα λειτουργίας. Παρατηρούμε, ωστόσο ότι οι τιμές που εμφανίζονται για το ρεύμα στο δευτερεύον, κυρίως σε μικρές αντιστάσεις φορτίου, είναι ιδιαίτερα μεγάλες και ενδέχεται να είναι απαγορευτικές για τα καλώδια του τυλίγματος του δευτερεύοντος πηνίου. Σε πρακτικές εφαρμογές, όπως αναφέρθηκε και στην Υποενότητα 2.3.1, χρησιμοποιούνται τεχνικές ελέγχου με σκοπό την μείωση του ρεύματος.

Στις τοπολογίες PP και SP, (Σχήματα 2.4-4(b) & 2.4-4(d)), το ρεύμα \tilde{I}_2 για μικρές τιμές αντίστασης φορτίου, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη μεταβολή με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας. Σε μεγαλύτερες τιμές αντίστασης φορτίου, παρατηρούμε μια μεταβολή του ρεύματος \tilde{I}_2 με την αύξηση της συχνότητας.



Σχήμα 2.4-5: Ρεύμα στον Πυκνωτή Αντιστάθμισης C_2 , \widetilde{I}_{C2} , στην Τοπολογία Αντιστάθμισης (a) Σειρά-Σειρά (SS), (b) Παράλληλα-Παράλληλα (PP), (c) Παράλληλα-Σειρά (PS), (d) Σειρά-Παράλληλα (SP)

Το ρεύμα στο πηνίο στον πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 , \widetilde{I}_{C2} για όλες τις τοπολογίες αντιστάθμισης και όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δίνεται στο Σχήμα 2.4-5. Το ρεύμα στον πυκνωτή αντιστάθμισης C_2 , \widetilde{I}_{C2} , για τις τοπολογίες SS και PS, (Σχήματα 2.4-5(a) & 2.4-5(c)), παρουσιάζει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με το ρεύμα \widetilde{I}_2 , αφού στις συγκεκριμένες τοπολογίες είναι το ίδιο μέγεθος, (Σχήματα 2.2-1 & 2.2-3). Στις τοπολογίες PP και SP, (Σχήματα 2.4-5(b) & 2.4-5(d)), το ρεύμα \widetilde{I}_{C2} μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας λειτουργίας, ενώ παρουσιάζει μεγάλη αύξηση καθώς αυξάνεται η αντίσταση του φορτίου.



Σχήμα 2.4-6: Ρεύμα στην αντίσταση φορτίου, \tilde{I}_L , στην Τοπολογία Αντιστάθμισης (a) Σειρά-Σειρά (SS), (b) Παράλληλα-Παράλληλα (PP), (c) Παράλληλα-Σειρά (PS), (d) Σειρά-Παράλληλα (SP)

Το ρεύμα \tilde{I}_L στην αντίσταση φορτίου για όλες τις τοπολογίες αντιστάθμισης και όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν δίνεται στο Σχήμα 2.4-5. Στις τοπολογίες SS και PS (Σχήματα 2.4-6(a) & 2.4-6(c)), το ρεύμα \tilde{I}_L παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με τα ρεύματα \tilde{I}_2 και \tilde{I}_{C2} , αφού είναι το ίδιο μέγεθος, (Σχήματα 2.2-1 & 2.2-3).

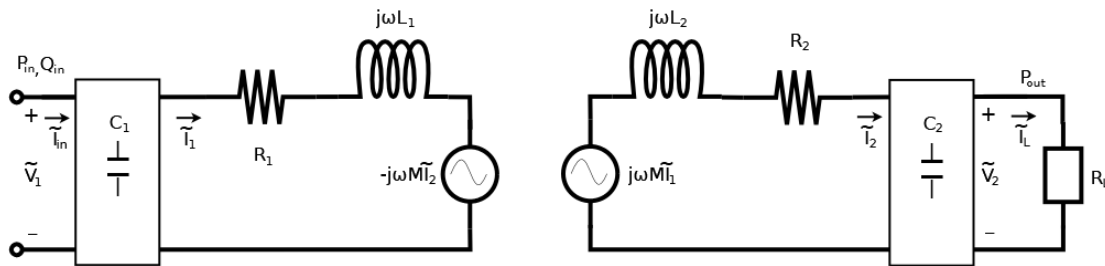
Στις τοπολογίες PP και SP, (Σχήματα 2.4-6(b) & 2.4-6(d)), το ρεύμα \tilde{I}_L παραμένει σχεδόν σταθερό για κάθε συχνότητα λειτουργίας του συστήματος και για κάθε τιμή της αντίστασης του φορτίου. Οι τιμές, ωστόσο, που λαμβάνει το ρεύμα \tilde{I}_L στις τοπολογίες αυτές είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με τις τοπολογίες SS και PS.

Κεφάλαιο 3^ο: Φαινόμενο Διακλάδωσης

Σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης είναι επιθυμητό ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο του συστήματος να είναι ίσος με τη μονάδα, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα μηδενική άεργο ισχύ και κατά συνέπεια υψηλή απόδοση. Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίες ενδέχεται να υπάρχουν περισσότερα του ενός σημεία όπου ο συντελεστής ισχύος μεγιστοποιείται, υποδεικνύοντας το **Φαινόμενο της Διακλάδωσης**. Ωστόσο, η μεταφερόμενη ισχύς ενδέχεται να μεγιστοποιείται σε ένα μόνο από τα σημεία αυτά, λαμβάνοντας σχεδόν μηδενικές τιμές στα υπόλοιπα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το **Φαινόμενο Διακλάδωσης** στην κυκλική διάταξη επαγωγικής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και πως το φαινόμενο αυτό επηρεάζεται από τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης και της αντίστασης του φορτίου.

3.1 Φαινόμενο Διακλάδωσης για τις τέσσερις Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης



Σχήμα 3.1-1: Ισοδύναμο Κύκλωμα ενός Συστήματος Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος

Ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.1-1** είναι ίσος με:

$$PF = \frac{P_{in}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} = 1 \quad (3.1)$$

Επιπλέον, η απόδοση του συστήματος είναι ίση με:

$$eff = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} = 1 \quad (3.2)$$

Δεδομένου των μικρών αντιστάσεων τυλιγμάτων $P_{out} \cong P_{in}$ και μία αυξημένη τιμή για το συντελεστή ισχύος στην είσοδο οδηγεί και σε αυξημένη απόδοση.

Το σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να λειτουργήσει σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Επίσης, σύμφωνα με την **Υποενότητα 2.3** του **Κεφαλαίου 2**, μπορούμε να θεωρήσουμε μηδενικές αντιστάσεις τυλιγμάτων, R_1 και R_2 , στο κύκλωμα χωρίς να υπάρχει αλλοίωση των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση αυτή $P_{out} = P_{in}$ και $eff = PF$ σύμφωνα με τις σχέσεις του **Κεφαλαίου 2** (2.11), (2.14), (2.16) και (2.17) για την τοπολογία αντιστάθμισης **SS**, (2.32), (2.36), (2.38) και (2.39) για την τοπολογία αντιστάθμισης **PP**, (2.56), (2.61), (2.63) και (2.64) για την τοπολογία αντιστάθμισης **PS** και (2.80), (2.83), (2.85) και (2.86) για την τοπολογία αντιστάθμισης **SP**. Επομένως, στην ενότητα αυτή θα εξετασθεί η απόδοση του συστήματος και η εξάρτησή της από τη συχνότητα λειτουργίας.

Οι πυκνωτές αντιστάθμισης έχουν υπολογισθεί έτσι ώστε η ισχύς εξόδου και ο συντελεστής ισχύος να μεγιστοποιούνται στη συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$.

Η μελέτη που πραγματοποιείται στο παρόν κεφάλαιο αφορά τη στατική επαγωγική φόρτιση στην περίπτωση που οι συζεύκτες (*rads*) του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι ιδανικά ευθυγραμμισμένοι. Συνεπώς, οι τιμές των επαγωγών των πηνίων, L_1 και L_2 , και της αμοιβαίας επαγωγής, M , έχουν τις τιμές $L_1 = 262 \mu\text{H}$, $L_2 = 259 \mu\text{H}$ και $M = 66 \mu\text{H}$, σύμφωνα με το **Σχήμα 2.1-4** του **Κεφαλαίου 2**. Επίσης, σύμφωνα με την αναφορά [45], θεωρούμε ότι το ρεύμα στο πηνίο του πρωτεύοντος είναι σταθερό και ίσο με $|\tilde{I}_1| = 23 \text{ A}$.

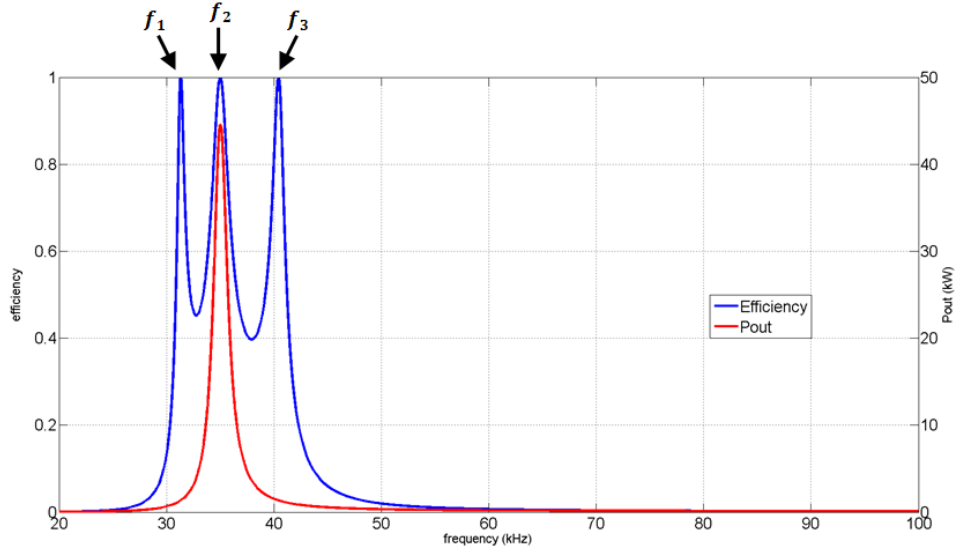
3.1.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Θεωρώντας μηδενικές αντιστάσεις τυλιγμάτων, R_1 και R_2 , και για μία συχνότητα ίση με $f = 35 \text{ kHz}$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης υπολογίζονται από τις σχέσεις του **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**:

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_1} \text{ και } C_2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_2}$$

Από αυτές προκύπτει ότι $C_1 = 78.923 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$.

Για μία αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 2.5 \Omega$, η απόδοση και η ενεργός ισχύς εξόδου του συστήματος για διάφορες συχνότητες παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.1-2**.



Σχήμα 3.1-2: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Παρατηρούμε ότι η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται σε τρεις διαφορετικές τιμές συχνότητας. Οι τιμές αυτές μπορούν να υπολογιστούν αν θέσουμε την σχέση της απόδοσης (2.16) ίση με τη μονάδα.

$$eff = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} = 1 \quad (3.3)$$

Η ενεργός ισχύς εξόδου είναι ίση με την ενεργό ισχύ εισόδου λόγω της θεώρησης των μηδενικών αντιστάσεων R_1 και R_2 . Επομένως για την επίτευξη μοναδιαίας απόδοσης αρκεί η άεργος ισχύς εισόδου του συστήματος, η οποία δίνεται από τη σχέση (2.15), να είναι ίση με το μηδέν:

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right) = 0 \quad (3.4)$$

Λύνοντας την (3.4) ως προς την γωνιακή ταχύτητα ω και χρησιμοποιώντας την συνθήκη ότι η συχνότητα του συστήματος δεν μπορεί να είναι μηδενική, προκύπτει η πολυωνμική εξίσωση 6^{ου} βαθμού:

$$\begin{aligned} \omega^6 \cdot (L_1 \cdot L_2^2 - M^2 \cdot L_2) + \omega^4 \cdot \left(L_1 \cdot R_L^2 - \frac{2 \cdot L_1 \cdot L_2}{C_2} - \frac{L_2^2}{C_1} + \frac{M^2}{C_2} \right) \\ + \omega^2 \cdot \left(\frac{L_1}{C_2^2} - \frac{R_L^2}{C_1} + \frac{2 \cdot L_2}{C_1 \cdot C_2} \right) - \frac{1}{C_1 \cdot C_2^2} = 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Θέτοντας $w = \omega^2$, προκύπτει:

$$w^3 \cdot (L_1 \cdot L_2^2 - M^2 \cdot L_2) + w^2 \cdot \left(L_1 \cdot R_L^2 - \frac{2 \cdot L_1 \cdot L_2}{C_2} - \frac{L_2^2}{C_1} + \frac{M^2}{C_2} \right) + w \cdot \left(\frac{L_1}{C_2^2} - \frac{R_L^2}{C_1} + \frac{2 \cdot L_2}{C_1 \cdot C_2} \right) - \frac{1}{C_1 \cdot C_2^2} = 0 \quad (3.6)$$

Το πολυώνυμο (3.6) έχει μέχρι τρεις ρίζες και γνωρίζοντας ότι $\omega > 0$ και $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, μέχρι και τρεις συχνότητες είναι δυνατό να μεγιστοποιούν την απόδοση. Σύμφωνα με το **Σχήμα 3.1-1**, οι συχνότητες που μεγιστοποιούν την απόδοση είναι:

$$f_1 = 31.323 \text{ kHz}, f_2 = 35 \text{ kHz και } f_3 = 40.428 \text{ kHz}$$

Η ενεργός ισχύς εξόδου, σε αντίθεση με την απόδοση, μεγιστοποιείται μόνο σε μία τιμή συχνότητας. Συγκεκριμένα, αν θέσουμε την παράγωγο ως προς την γωνιακή ταχύτητα της (2.11) ίση με το μηδέν και λύσουμε ως προς την γωνιακή ταχύτητα προκύπτει:

$$\omega^2 = \frac{2}{2 \cdot L_2 \cdot C_2 - C_2^2 \cdot R_L^2} \quad (3.7)$$

Για τις τιμές των L_2 , C_2 και R_L που έχουμε θεωρήσει, η συχνότητα που μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη ισχύ σύμφωνα με την (3.7) είναι $f = 35.017 \text{ kHz}$. Η συχνότητα αυτή είναι κοντινή σε σχέση με τη συχνότητα $f_2 = 35 \text{ kHz}$ στην οποία μεγιστοποιείται η απόδοση. Η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου για τη συχνότητα $f = 35.017 \text{ kHz}$ είναι 44597.3 W .

Αντίθετα, στις συχνότητες f_1 και f_3 όπου, επίσης, παρατηρείται μεγιστοποίηση της απόδοσης, η ενεργός ισχύς εξόδου έχει τιμές 1337.93 W και 1337.79 W αντίστοιχα, δηλαδή 3 % της μέγιστης τιμής. Συνεπώς, για να υπάρχει μέγιστη μεταφορά ισχύος θα πρέπει το σύστημα να λειτουργεί κοντά στη συχνότητα των 35 kHz .

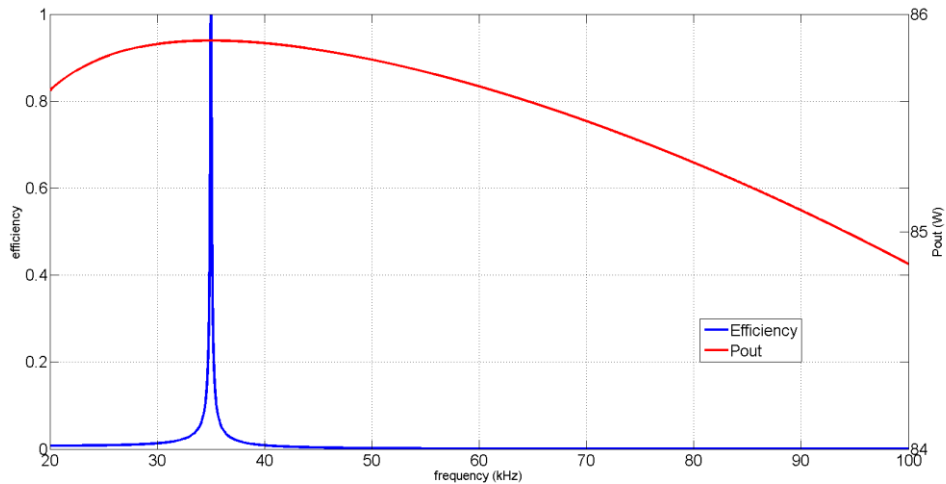
3.1.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

Στην τοπολογία **PP**, αρχικά, επιλέγουμε αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 2.5 \Omega$. Οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης για μηδενικές αντιστάσεις R_1 και R_2 και για συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 35 \text{ kHz}$, υπολογίζονται από τις σχέσεις του **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**:

$$C_1 = \frac{L_1 \cdot \frac{M^2}{L_2}}{\left(\frac{M^2 \cdot R_L}{L_2^2} \right)^2 + \omega^2 \cdot \left(L_1 \cdot \frac{M^2}{L_2} \right)^2} \text{ και } C_2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_2}$$

Συνεπώς, με αντικατάσταση των τιμών των στοιχείων του κυκλώματος και για $R_L = 2.5 \Omega$, προκύπτει ότι $C_1 = 84.336 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$.

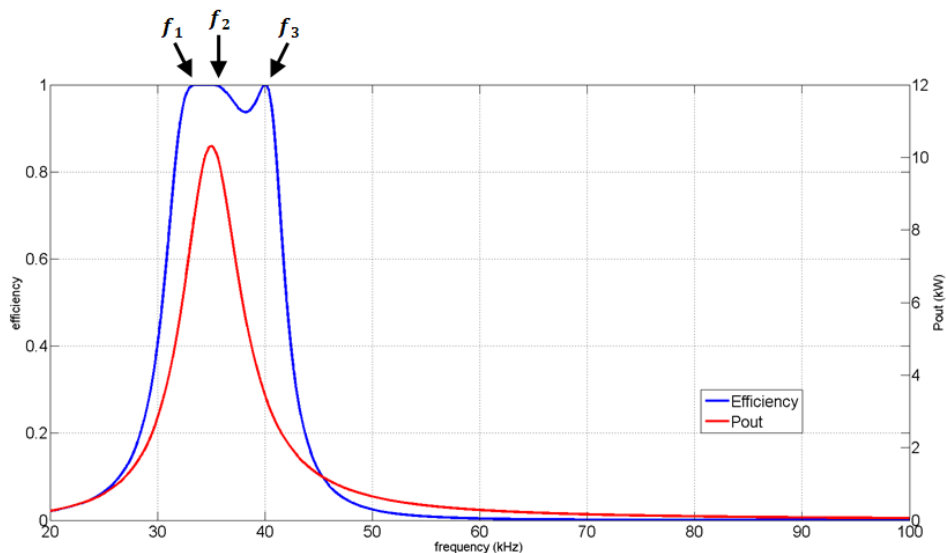
Στο **Σχήμα 3.1-3** παρουσιάζονται η απόδοση και η ενεργός ισχύς εξόδου του συστήματος.



Σχήμα 3.1-3: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

Παρατηρούμε ότι για τη συγκεκριμένη τιμή της αντίστασης φορτίου, σε αντίθεση με την τοπολογία **SS**, το **Φαινόμενο Διακλάδωσης** δεν εμφανίζεται. Συγκεκριμένα μόνο μία συχνότητα φαίνεται να μεγιστοποιεί την απόδοση.

Το **Φαινόμενο Διακλάδωσης**, ωστόσο, εμφανίζεται σε περίπτωση επιλογής μίας αντίστασης $R_L = 300 \Omega$. Στην περίπτωση αυτή οι πυκνωτές αντιστάθμισης παίρνουν τιμές: $C_1 = 74.599 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$, και τα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση και τη μεταφερόμενη ισχύ παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.1-4**.



Σχήμα 3.1-4: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Πράγματι, από το **Σχήμα 3.1-4**, παρατηρούμε ότι εμφανίζεται το **Φαινόμενο Διακλάδωσης** αφού υπάρχουν πολλαπλά σημεία μεγιστοποίησης της απόδοσης του συστήματος.

Για να επιτευχθεί μοναδιαία απόδοση αρκεί η άεργος ισχύς εισόδου, η οποία δίνεται από τη (2.37), να είναι ίση με το μηδέν.

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot [\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} - \omega \cdot C_1 \cdot \left(\frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \right)^2] = 0 \quad (3.8)$$

Λύνουμε την (3.8) ως προς την γωνιακή ταχύτητα ω και χρησιμοποιώντας την συνθήκη ότι η συχνότητα του συστήματος δεν μπορεί να είναι μηδενική, προκύπτει η πολυωνυμική εξίσωση 6^{ου} βαθμού:

$$\begin{aligned} & \omega^6 \cdot (C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L^2 - 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_L^2 + M^4 \cdot C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2) \\ & + \omega^4 \cdot (C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2^2 \cdot R_L^2 + M^2 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - 2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2 \\ & + 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \cdot R_L^2 + C_1 \cdot L_1^2 \cdot L_2^2 - 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot L_1 \cdot L_2 + M^4 \cdot C_1) \\ & + \omega^2 \cdot (2 \cdot C_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - M^2 \cdot C_2 \cdot R_L^2 + C_1 \cdot L_1^2 \cdot R_L^2 - L_1 \cdot L_2^2 + M^2 \cdot L_2) \\ & + L_1 \cdot R_L^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Θέτοντας $w = \omega^2$, προκύπτει:

$$\begin{aligned} & w^3 \cdot (C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L^2 - 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_L^2 + M^4 \cdot C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2) \\ & + w^2 \cdot (C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2^2 \cdot R_L^2 + M^2 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - 2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2 \\ & + 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \cdot R_L^2 + C_1 \cdot L_1^2 \cdot L_2^2 - 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot L_1 \cdot L_2 + M^4 \cdot C_1) \\ & + w \cdot (2 \cdot C_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - M^2 \cdot C_2 \cdot R_L^2 + C_1 \cdot L_1^2 \cdot R_L^2 - L_1 \cdot L_2^2 + M^2 \cdot L_2) \\ & + L_1 \cdot R_L^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Και πάλι δηλαδή προκύπτει ένα πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού που έχει μέχρι τρεις ρίζες. Από το **Σχήμα 3.1-4** παρατηρούμε ότι οι συχνότητες που μεγιστοποιούν την απόδοση είναι:

$$f_1 = 33.634 \text{ kHz}, f_2 = 35 \text{ kHz και } f_3 = 40.032 \text{ kHz}$$

Παρατηρούμε ότι προκύπτουν τρεις τιμές συχνότητας στις οποίες μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος. Στο **Σχήμα 3.1-4** φαίνεται να υπάρχουν μόνο δύο τιμές, ωστόσο, αυτό συμβαίνει επειδή οι συχνότητες f_1 και f_2 είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους.

Αντίθετα, η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται σε μία συχνότητα. Η συχνότητα αυτή υπολογίζεται αν μηδενίσουμε την παράγωγο ως προς τη γωνιακή ταχύτητα της ενεργού ισχύος εξόδου (2.32). Τελικά, προκύπτει:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_2 \cdot L_2}} \quad (3.11)$$

Με αντικατάσταση των τιμών των στοιχείων, η συχνότητα στην οποία μεγιστοποιείται η ενεργός ισχύς εξόδου είναι $f = 35 \text{ kHz}$, ενώ η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου είναι 10305.41 W . Στη συχνότητα $f_2 = 35 \text{ kHz}$ παρατηρείται επίσης μεγιστοποίηση της απόδοσης.

Αντίθετα, στις άλλες δύο συχνότητες όπου μεγιστοποιείται η απόδοση, f_1 και f_3 , η ενεργός ισχύς εξόδου είναι ίση με 8763.34 W και 3418.59 W αντίστοιχα. Η τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου στη συχνότητα $f_1 = 33.634 \text{ kHz}$ είναι μόνο 14.96% μικρότερη της μέγιστης τιμής και συνεπώς δεν υπάρχει μεγάλη απώλεια μεταφερόμενης ισχύος. Αντίθετα, στην συχνότητα f_3 η ενεργός ισχύς εξόδου είναι κατά 66.83% μικρότερη της μέγιστης και κατά συνέπεια θα πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία του συστήματος στη συχνότητα αυτή.

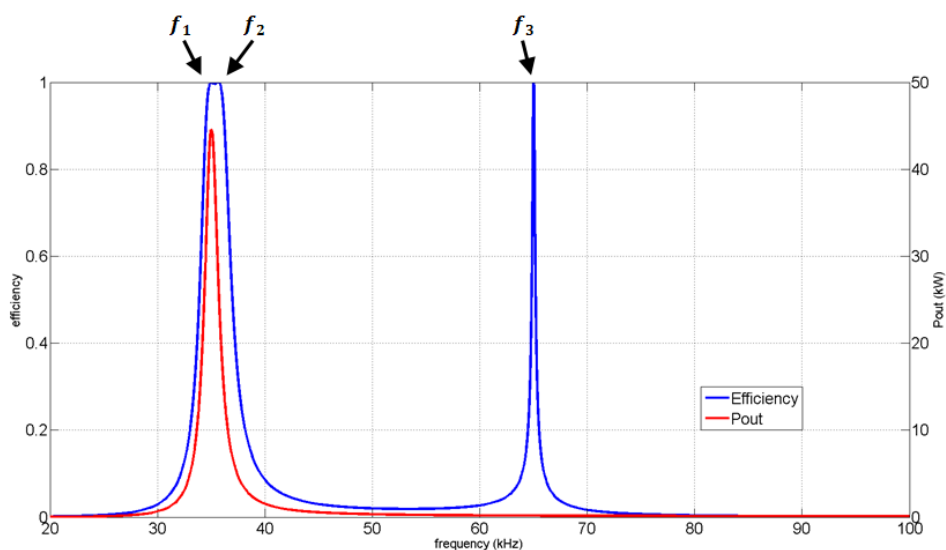
3.1.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Στην τοπολογία **PS** οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης υπολογίζονται από τις σχέσεις του Πίνακα 2.3-1 του Κεφαλαίου 2:

$$C_1 = \frac{L_1}{\left(\frac{\omega^2 \cdot M^2}{R_L}\right)^2 + \omega^2 \cdot L_1^2} \text{ και } C_2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_2}$$

Οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης για $f = 35 \text{ kHz}$ και για μία αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 2.5 \Omega$ είναι $C_1 = 25.14 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$.

Η απόδοση του συστήματος και η ενεργός ισχύς εξόδου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1-5, όπου φαίνεται ότι η απόδοση μεγιστοποιείται σε δύο τιμές συχνότητας.



Σχήμα 3.1-5: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Θέτουμε την άεργο ισχύ εισόδου (2.62) ίση με το μηδέν.

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left[\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right. \\ \left. - \omega \cdot C_1 \cdot \left(\left(\frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right)^2 \right) \right] = 0 \quad (3.12)$$

Από την (3.12), λύνοντας ως προς τη γωνιακή ταχύτητα προκύπτει ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού.

$$\omega^6 \cdot (C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1^2 \cdot L_2^2 - 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2 + M^4 \cdot C_1 \cdot C_2^2) \\ + \omega^4 \cdot (C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1^2 \cdot R_L^2 - C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2^2 + M^2 \cdot C_2^2 \cdot L_2 - 2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1^2 \cdot L_2 \\ + 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1) + \omega^2 \cdot (2 \cdot C_2 \cdot L_1 \cdot L_2 - C_2^2 \cdot L_1 \cdot R_L^2 - M^2 \cdot C_2 + C_1 \cdot L_1^2) \\ - L_1 = 0 \quad (3.13)$$

Θέτοντας $w = \omega^2$, προκύπτει:

$$w^3 \cdot (C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1^2 \cdot L_2^2 - 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2 + M^4 \cdot C_1 \cdot C_2^2) \\ + w^2 \cdot (C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1^2 \cdot R_L^2 - C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2^2 + M^2 \cdot C_2^2 \cdot L_2 - 2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1^2 \cdot L_2 \\ + 2 \cdot M^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1) + w \cdot (2 \cdot C_2 \cdot L_1 \cdot L_2 - C_2^2 \cdot L_1 \cdot R_L^2 - M^2 \cdot C_2 + C_1 \cdot L_1^2) \\ - L_1 = 0 \quad (3.14)$$

Η σχέση (3.14) είναι ένα πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού και συνεπώς μπορεί να έχει μέχρι τρεις ρίζες. Σύμφωνα με το **Σχήμα 3.1-5** οι συχνότητες που μεγιστοποιούν την απόδοση είναι:

$$f_1 = 35 \text{ kHz}, f_2 = 35.673 \text{ kHz και } f_3 = 65.013 \text{ kHz}$$

Όπως και στην τοπολογία **PP**, υπάρχουν δύο μεγιστοποιήσεις κοντά στη συχνότητα των 35 kHz και η πτώση της απόδοσης μεταξύ των f_1 και f_2 είναι ελάχιστη.

Η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται για μία τιμή συχνότητας. Η σχέση της ισχύος εξόδου για την τοπολογία **PS** (2.56) είναι η ίδια με την αντίστοιχη σχέση της τοπολογίας **SS** (2.11). Οπότε, παραγωγίζοντας την ισχύ εξόδου ως προς ω και θέτοντας την παράγωγο ίση με το μηδέν για την εύρεση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος προκύπτει η σχέση (3.7).

$$\omega^2 = \frac{2}{2 \cdot L_2 \cdot C_2 - C_2^2 \cdot R_L^2} \quad (3.7)$$

Η συχνότητα για την οποία μεγιστοποιείται η ενεργός ισχύς εξόδου του συστήματος είναι $f = 35.017 \text{ kHz}$ και η μέγιστη τιμή της είναι 44597.3 W. Η συχνότητα $f = 35.017 \text{ kHz}$ είναι πολύ κοντά στη συχνότητα $f_1 = 35 \text{ kHz}$ στην οποία μεγιστοποιείται η απόδοση, οπότε λειτουργία του συστήματος κοντά στη συχνότητα των 35 kHz είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή.

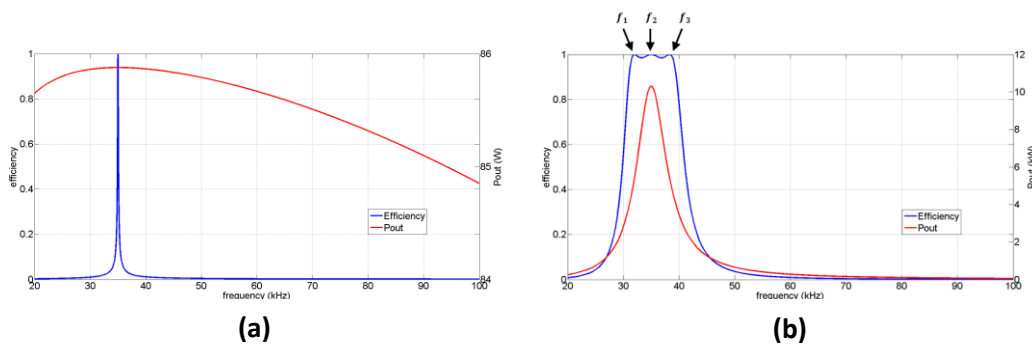
Αντίθετα, στη συχνότητα f_2 η τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου είναι ίση με $26411.89 W$, ενώ στη συχνότητα f_3 είναι ίση με $170.09 W$. Οι τιμές της ισχύος για τις δύο αυτές συχνότητες είναι 59.22% και 0.38% της μέγιστης τιμής αντίστοιχα. Συνεπώς, λειτουργία του συστήματος σε συχνότητες που απομακρύνονται από τη συχνότητα των $35 kHz$ θα πρέπει να αποφεύγεται.

3.1.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Για την τοπολογία **SP** και για αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης υπολογίζονται από τις σχέσεις του Πίνακα 2.3-1 του Κεφαλαίου 2:

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 \cdot \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2}\right)} \text{ και } C_2 = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_2}$$

Για μία συχνότητα ίση με $f = 35 kHz$ οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης είναι $C_1 = 84.34 nF$ και $C_2 = 79.837 nF$. Στο Σχήμα 3.1-6(a) παρουσιάζονται η απόδοση και η ενεργός ισχύς εξόδου του συστήματος για αντίστασης φορτίου ίση με $R_L = 2.5 \Omega$.



Σχήμα 3.1-6: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου (a) $R_L = 2.5 \Omega$, (b) $R_L = 300 \Omega$

Όπως και στην τοπολογία **PP**, παρατηρούμε ότι για αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 2.5 \Omega$ η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται σε ένα μόνο σημείο λειτουργίας, (Σχήμα 3.1-6(a)). Αντίθετα, επιλέγοντας αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 300 \Omega$, η απόδοση, (Σχήμα 3.1-6(b)), μεγιστοποιείται σε τρεις διαφορετικές τιμές συχνότητας. Στην περίπτωση αυτή, θέτοντας την σχέση της απόδοσης (2.85) ίση με τη μονάδα, προκύπτει ότι η άεργος ισχύς εισόδου (2.84) πρέπει να είναι ίση με το μηδέν:

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \right) = 0 \quad (3.15)$$

Λύνοντας την (3.15) ως προς τη γωνιακή ταχύτητα, παίρνουμε μία πολυωνμική εξίσωση 6^{ου} βαθμού.

$$\begin{aligned} & \omega^6 \cdot (M^2 \cdot C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2^2 \cdot R_L^2) \\ & + \omega^4 \cdot (C_2^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L^2 + 2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - M^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 - C_1 \cdot L_1 \cdot L_2^2 \\ & + M^2 \cdot C_1 \cdot L_2) + \omega^2 \cdot (L_2^2 - 2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - C_1 \cdot L_1 \cdot R_L^2) + R_L^2 = 0 \quad (3.16) \end{aligned}$$

Θέτοντας $w = \omega^2$, προκύπτει:

$$\begin{aligned} & w^3 \cdot (M^2 \cdot C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - C_1 \cdot C_2^2 \cdot L_1 \cdot L_2^2 \cdot R_L^2) \\ & + w^2 \cdot (C_2^2 \cdot L_2^2 \cdot R_L^2 + 2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - M^2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 - C_1 \cdot L_1 \cdot L_2^2 \\ & + M^2 \cdot C_1 \cdot L_2) + w \cdot (L_2^2 - 2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L^2 - C_1 \cdot L_1 \cdot R_L^2) + R_L^2 = 0 \quad (3.17) \end{aligned}$$

Η σχέση (3.17) είναι ένα πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού το οποίο μπορεί να έχει μέχρι τρεις ρίζες. Από το **Σχήμα 3.1-6(b)** παρατηρούμε ότι η απόδοση μεγιστοποιείται για τις ακόλουθες συχνότητες:

$$f_1 = 31.985 \text{ kHz}, f_2 = 35 \text{ kHz} \text{ και } f_3 = 38.299 \text{ kHz}$$

Η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται σε μία τιμή συχνότητας. Η σχέση της ισχύος εξόδου για την τοπολογία **SP**, (2.80), είναι η ίδια με την αντίστοιχη σχέση της τοπολογίας **PP**, (2.32), και η γωνιακή συχνότητα που μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη ισχύ είναι:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_2 \cdot L_2}} \quad (3.11)$$

Στην εξεταζόμενη περίπτωση για $R_L = 300 \Omega$, η συχνότητα στην οποία μεγιστοποιείται η ενεργός ισχύς εξόδου είναι $f = 35 \text{ kHz}$, και η μέγιστη τιμή της είναι 10305.41 W . Συνεπώς, για να υπάρχει μέγιστη μεταφορά ισχύος θα πρέπει το σύστημα να λειτουργεί κοντά στη συχνότητα των 35 kHz .

Αντίθετα, στις συχνότητες f_1 και f_3 η τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου είναι 5415.58 W και 5415.89 W , δηλαδή περίπου 52.55 % της μέγιστης τιμής και για τις δύο συχνότητες. Επομένως, λειτουργία του συστήματος σε συχνότητες που δεν είναι κοντά στα 35 kHz θα πρέπει να αποφεύγεται.

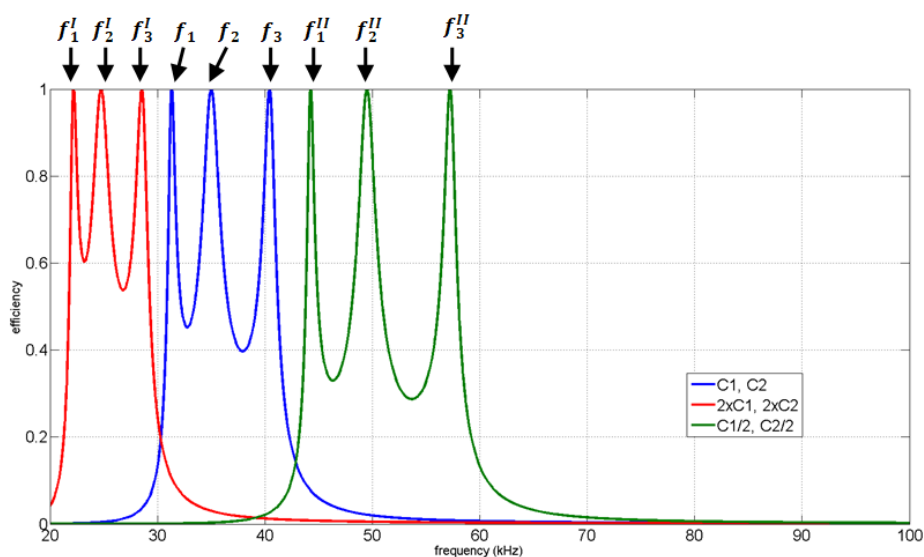
3.2 Επίδραση των Πυκνωτών Αντιστάθμισης στο Φαινόμενο Διακλάδωσης

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά της απόδοσης του συστήματος και της μεταφερόμενης ισχύος της κάθε τοπολογίας για διάφορες τιμές πυκνωτών αντιστάθμισης.

Οι τιμές των επαγωγών των πηνίων, L_1 και L_2 , της αμοιβαίας επαγωγής, M , των αντιστάσεων των τυλιγμάτων, R_1 και R_2 , και του ρεύματος στο πηνίο του πρωτεύοντος, \tilde{I}_1 , παραμένουν ίδιες με αυτές της Ενότητας 3.1.

3.2.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

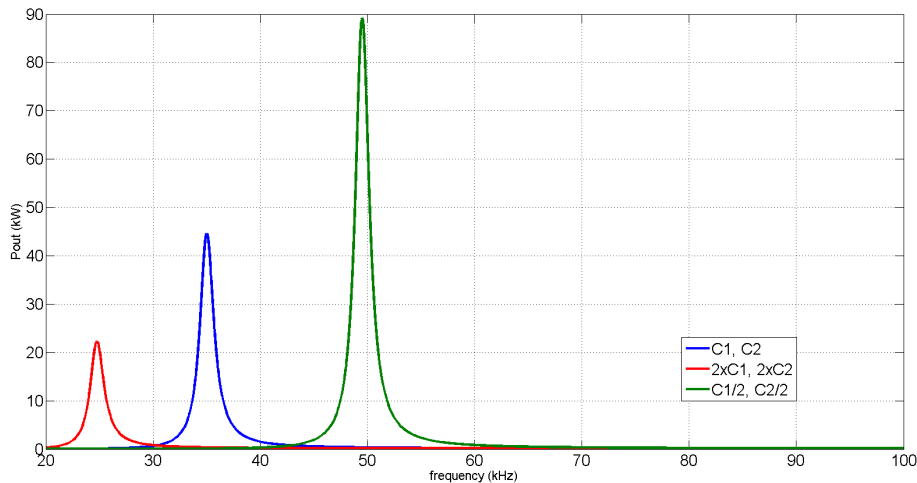
Στην τοπολογία SS έχουμε υπολογίσει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης σε συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$: $C_1 = 78.923 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$. Επιλέγοντας τιμές πυκνωτών $C_1^I = 2 \cdot C_1 = 157.846 \text{ nF}$ και $C_2^I = 2 \cdot C_2 = 159.674 \text{ nF}$, και $C_1^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_1 = 39.461 \text{ nF}$ και $C_2^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_2 = 39.919 \text{ nF}$ αντίστοιχα, τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2-1.



Σχήμα 3.2-1: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στις περιπτώσεις Πυκνωτών Αντιστάθμισης: C_1-C_2 , $C_1^I = 2 \cdot C_1$ - $C_2^I = 2 \cdot C_2$ και $C_1^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_1$ - $C_2^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_2$

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.2-1 παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος για τις τρεις περιπτώσεις τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης. Και για τις τρεις περιπτώσεις η απόδοση μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνότητας οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση (3.6). Οι συχνότητες στην περίπτωση των αρχικών τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης, όπως υπολογίστηκαν στην Υποενότητα 3.1.1, είναι ίσες με $f_1 = 31.323 \text{ kHz}$, $f_2 = 35 \text{ kHz}$ και $f_3 = 40.428 \text{ kHz}$. Στην περίπτωση που έχουμε διπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών οι

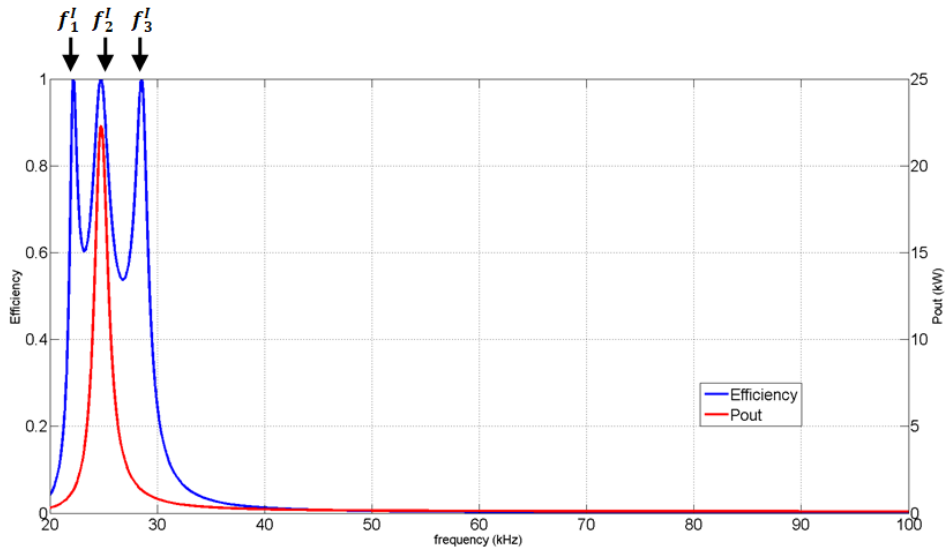
συχνότητες όπου μεγιστοποιείται η απόδοση είναι ίσες με $f_1^I = 22.192 \text{ kHz}$, $f_2^I = 24.749 \text{ kHz}$ και $f_3^I = 28.531 \text{ kHz}$, ενώ για την περίπτωση που έχουμε υποδιπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών είναι ίσες με $f_1^{II} = 44.255 \text{ kHz}$, $f_2^{II} = 49.497 \text{ kHz}$ και $f_3^{II} = 57.229 \text{ kHz}$.



Σχήμα 3.2-2: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στις περιπτώσεις Πυκνωτών Αντιστάθμισης: C_1-C_2 , $C_1^I = 2 \cdot C_1$ - $C_2^I = 2 \cdot C_2$ και $C_1^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_1$ - $C_2^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_2$

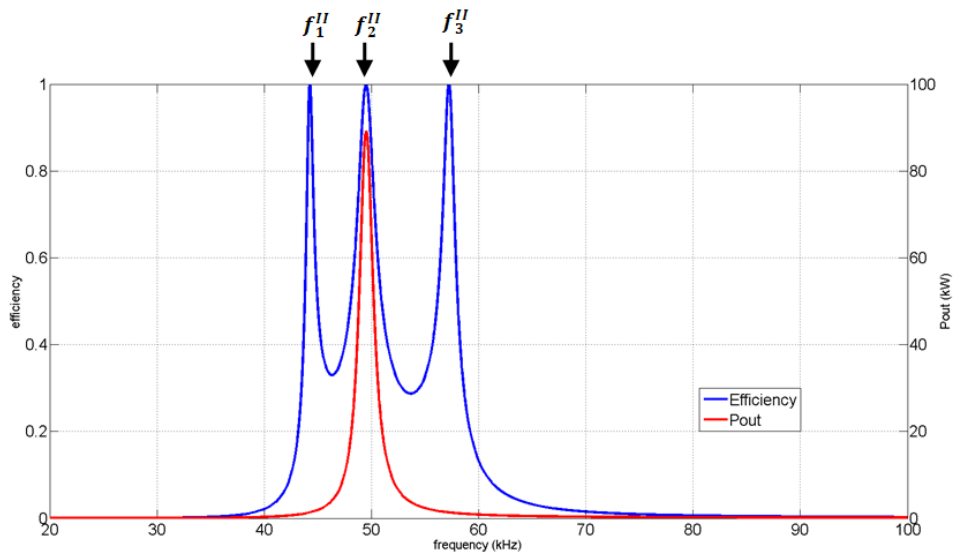
Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 3.2-2**), μεγιστοποιείται σε μία τιμή συχνότητας για κάθε περίπτωση τιμών πυκνωτών αντιστάθμισης. Η συχνότητα αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.7) και στην περίπτωση των αρχικών τιμών των πυκνωτών είναι ίση με $f = 35.017 \text{ kHz}$. Στην περίπτωση που έχουμε διπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών η συχνότητα όπου μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου είναι ίση με $f^I = 24.773 \text{ kHz}$, ενώ για την περίπτωση που έχουμε υποδιπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών είναι ίση με $f^{II} = 49.509 \text{ kHz}$.

Πρέπει να τονισθεί ότι η μεταβολή των τιμών των πυκνωτών επιδρά σημαντικά στη μεταφερόμενη ισχύ. Συγκεκριμένα, με τον διπλασιασμό των πυκνωτών αντιστάθμισης, η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου είναι 22309.14 W , ενώ με τον υποδιπλασιασμό των πυκνωτών η μέγιστη τιμή είναι 89173.06 W . Οι τιμές αυτές είναι 50.02% και 199.95% , αντίστοιχα, της μέγιστης τιμής των αρχικών πυκνωτών αντιστάθμισης.



Σχήμα 3.2-3: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στην περίπτωση Πυκνωτών Αντιστάθμισης: $C_1' = 2 \cdot C_1$ -
 $C_2' = 2 \cdot C_2$

Στην περίπτωση που έχουμε διπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, (Σχήμα 3.2-3), η ισχύς μεγιστοποιείται για $f^I = 24.773 \text{ kHz}$, η οποία συχνότητα είναι πολύ κοντά στη συχνότητα $f_2^I = 24.749 \text{ kHz}$ όπου παρουσιάζεται και μεγιστοποίηση της απόδοσης. Αντίθετα, στις συχνότητες f_1^I και f_3^I , όπου μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος, η ενεργός ισχύς εξόδου έχει τιμές 1338.12 W και 1337.98 W αντίστοιχα, δηλαδή περίπου 6 % της μέγιστης τιμής.

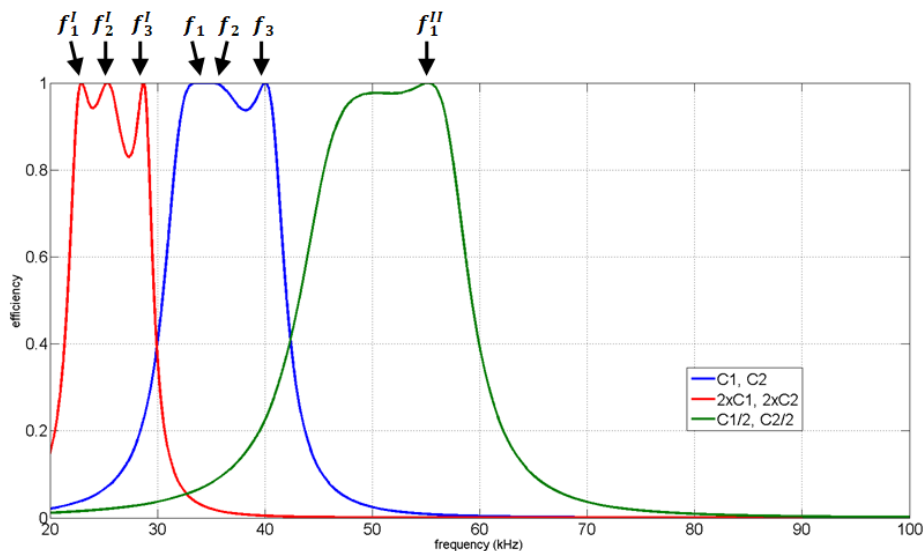


Σχήμα 3.2-4: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στην περίπτωση Πυκνωτών Αντιστάθμισης: $C_1' = \frac{1}{2} \cdot C_1$ - $C_2' = \frac{1}{2} \cdot C_2$

Στην περίπτωση που έχουμε υποδιπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, (Σχήμα 3.2-4), η ισχύς μεγιστοποιείται για $f^{II} = 49.509 \text{ kHz}$, δηλαδή σε μία συχνότητα που βρίσκεται κοντά στη συχνότητα $f_2^{II} = 49.497 \text{ kHz}$ όπου μεγιστοποιείται η απόδοση. Αντίθετα, στις συχνότητες f_1^{II} και f_3^{II} , η ενεργός ισχύς εξόδου είναι ίση με 1338.02 W και 1337.74 W αντίστοιχα, δηλαδή μόλις 1.5 % περίπου της μέγιστης τιμής.

3.2.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

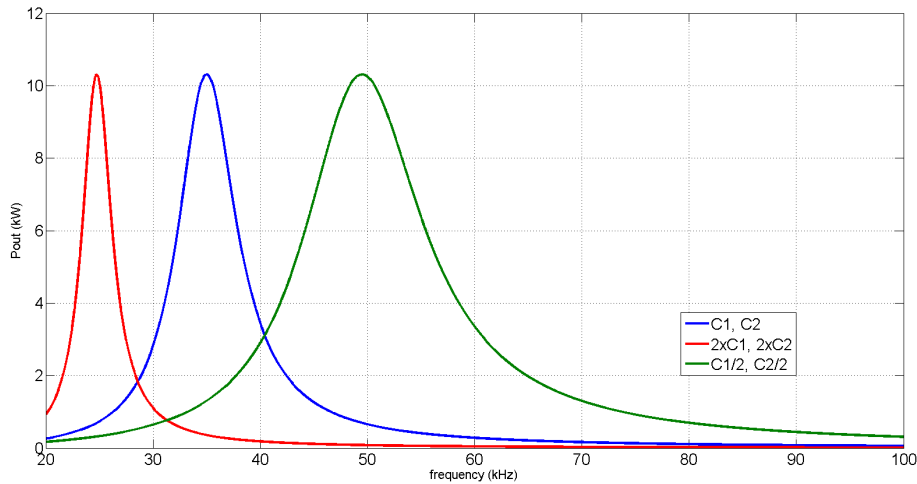
Στην τοπολογία PP έχουμε υπολογίσει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης σε συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$: $C_1 = 74.599 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$. Για τιμές πυκνωτών $C_1^I = 2 \cdot C_1 = 149.197 \text{ nF}$ - $C_2^I = 2 \cdot C_2 = 159.674 \text{ nF}$, και $C_1^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_1 = 37.299 \text{ nF}$ - $C_2^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_2 = 39.919 \text{ nF}$, τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2-5.



Σχήμα 3.2-5: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στις περιπτώσεις Πυκνωτών Αντιστάθμισης: C_1-C_2 ,

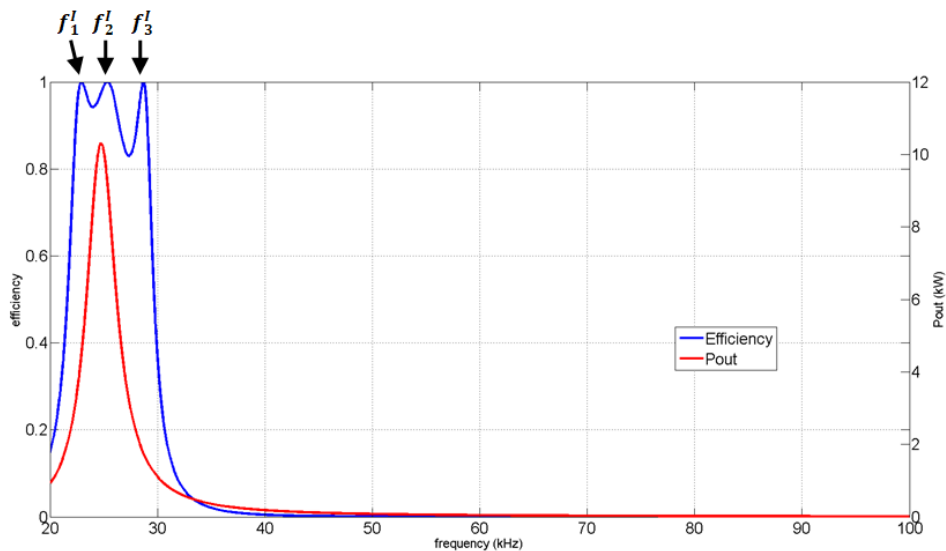
$$C_1^I = 2 \cdot C_1 - C_2^I = 2 \cdot C_2 \text{ και } C_1^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_1 - C_2^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_2$$

Παρατηρούμε ότι η απόδοση του συστήματος, (Σχήμα 3.2-5), παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά για τις δύο περιπτώσεις των τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης. Στην περίπτωση των διπλασίων τιμών των πυκνωτών, οι τιμές συχνότητας για τις οποίες μεγιστοποιείται η απόδοση είναι ίσες με $f_1^I = 22.92 \text{ kHz}$, $f_2^I = 25.336 \text{ kHz}$ και $f_3^I = 28.691 \text{ kHz}$. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου έχουμε υποδιπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών, η απόδοση μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα $f_1^{II} = 55.191 \text{ kHz}$. Υπενθυμίζουμε ότι η απόδοση με τις αρχικές τιμές των πυκνωτών, όπως υπολογίστηκαν στην Υποενότητα 3.1.2, μεγιστοποιείται στις συχνότητες $f_1 = 33.634 \text{ kHz}$, $f_2 = 35 \text{ kHz}$ και $f_3 = 40.032 \text{ kHz}$.



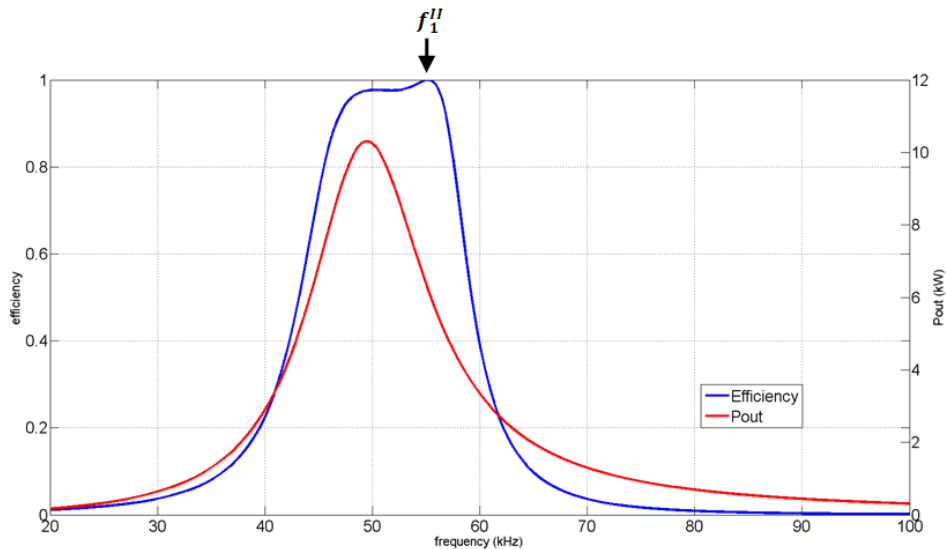
Σχήμα 3.2-6: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στις περιπτώσεις Πυκνωτών Αντιστάθμισης: C_1-C_2 , $C_1^I = 2 \cdot C_1-C_2^I = 2 \cdot C_2$ και $C_1^I = \frac{1}{2} \cdot C_1-C_2^I = \frac{1}{2} \cdot C_2$

Η ενεργός ισχύς εξόδου, (Σχήμα 3.2-6), εμφανίζει μία τιμή συχνότητας για κάθε περίπτωση στην οποία μεγιστοποιείται. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.11) και στην περίπτωση των αρχικών τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης είναι ίση με $f = 35 \text{ kHz}$. Στην περίπτωση που έχουμε διπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών η συχνότητα όπου μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου είναι ίση με $f^I = 24.749 \text{ kHz}$, ενώ για την περίπτωση που έχουμε υποδιπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών είναι ίση με $f^{II} = 49.497 \text{ kHz}$. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή της ισχύος εξόδου κυμαίνεται στα 10305.41 W και για τις τρεις περιπτώσεις. Συνεπώς, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέγιστη τιμή της ισχύος εξόδου δεν έχει σημαντική εξάρτηση από τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης στην περίπτωση της τοπολογίας αντιστάθμισης **PP**.



Σχήμα 3.2-7: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στην περίπτωση Πυκνωτών Αντιστάθμισης: $C_1^I = 2 \cdot C_1-C_2^I = 2 \cdot C_2$

Για την περίπτωση όπου έχουμε διπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, (Σχήμα 3.2-7), στις συχνότητες f_1^I , f_2^I και f_3^I η ισχύς εξόδου είναι ίση με $4460.4 W$, $9184.14 W$ και $1751.35 W$ αντίστοιχα, δηλαδή 43.28 %, 89.12 % και 16.99 % της μέγιστης τιμής της περίπτωσης αυτής. Επομένως, η λειτουργία του συστήματος σε μία συχνότητα κοντά στην $f_2^I = 25.336 kHz$ επιτυγχάνει ικανοποιητική μεταφορά ισχύος.



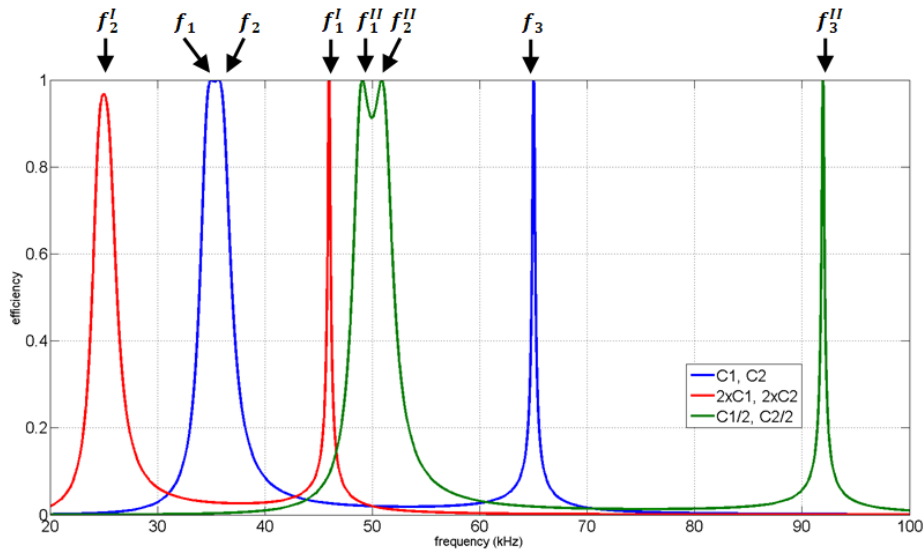
Σχήμα 3.2-8: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στην περίπτωση Πυκνωτών Αντιστάθμισης:

$$C_1^I = \frac{1}{2} \cdot C_1 - C_2^I = \frac{1}{2} \cdot C_2$$

Στην περίπτωση όπου έχουμε υποδιπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών, (Σχήμα 3.2-8), στη συχνότητα $f_1^{II} = 55.191 kHz$ η ισχύς εξόδου έχει τιμή $6206.77 W$, δηλαδή 60.23 % της μέγιστης τιμής της περίπτωσης αυτής. Αντίθετα, στο διάστημα συχνοτήτων $f = 50.136 kHz$ ως $f = 50.59 kHz$, όπου η απόδοση έχει τιμή πολύ κοντά στη μέγιστη, η ισχύς εξόδου λαμβάνει τιμές από $10212.31 W$ ως $10039.84 W$ αντίστοιχα, δηλαδή 99.1 % ως 97.42 % της μέγιστης τιμής της περίπτωσης αυτής. Παρατηρούμε, επομένως, ότι η λειτουργία του συστήματος στο διάστημα αυτών των συχνοτήτων επιτυγχάνει και ικανοποιητική μεταφορά ισχύος αλλά και υψηλή απόδοση.

3.2.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

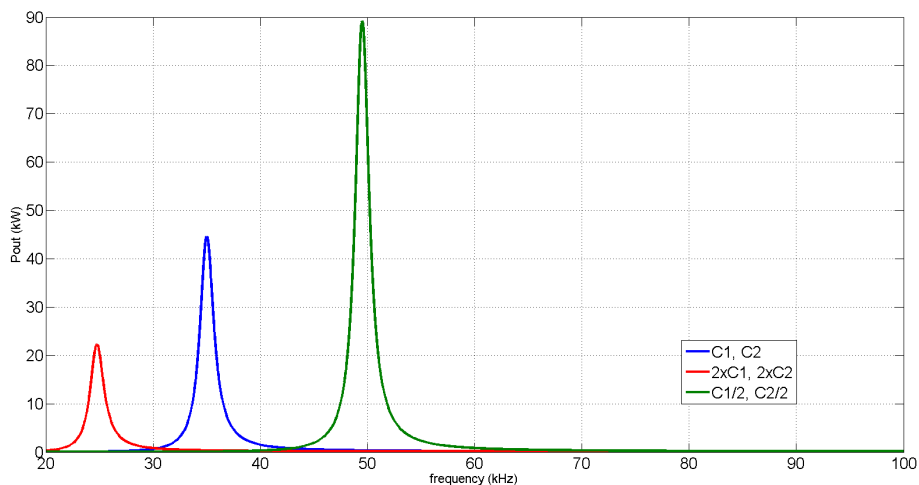
Στην τοπολογία PS έχουμε υπολογίσει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης σε συχνότητα $f = 35 kHz$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$: $C_1 = 25.14 nF$ και $C_2 = 79.837 nF$. Για τις περιπτώσεις όπου $C_1^I = 2 \cdot C_1 = 50.287 nF$ - $C_2^I = 2 \cdot C_2 = 159.674 nF$, και $C_1^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_1 = 12.572 nF$ - $C_2^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_2 = 39.919 nF$ τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 3.2-9.



Σχήμα 3.2-9: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στις περιπτώσεις Πυκνωτών Αντιστάθμισης: C_1-C_2 ,

$$C_1^I = 2 \cdot C_1 - C_2^I = 2 \cdot C_2 \text{ και } C_1^I = \frac{1}{2} \cdot C_1 - C_2^I = \frac{1}{2} \cdot C_2$$

Όταν υποδιπλασιάζουμε τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, το **Φαινόμενο Διακλάδωσης** γίνεται πιο εμφανές και η απόδοση μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνότητας, οι οποίες είναι $f_1^{II} = 49.076 \text{ kHz}$, $f_2^{II} = 50.88 \text{ kHz}$ και $f_3^{II} = 91.945 \text{ kHz}$. Αντίθετα, όταν διπλασιάζουμε τις τιμές των πυκνωτών, η απόδοση μεγιστοποιείται σε μία μόνο συχνότητα, η οποία είναι ίση με $f_1^I = 45.969 \text{ kHz}$, και στη συχνότητα $f_2^I = 24.995 \text{ kHz}$ γίνεται ίση με $eff = 0.9676$. Υπενθυμίζουμε ότι η απόδοση με τις αρχικές τιμές των πυκνωτών, όπως υπολογίστηκαν στην **Υποενότητα 3.1.3**, μεγιστοποιείται στις συχνότητες $f_1 = 35 \text{ kHz}$, $f_2 = 35.673 \text{ kHz}$ και $f_3 = 65.013 \text{ kHz}$.

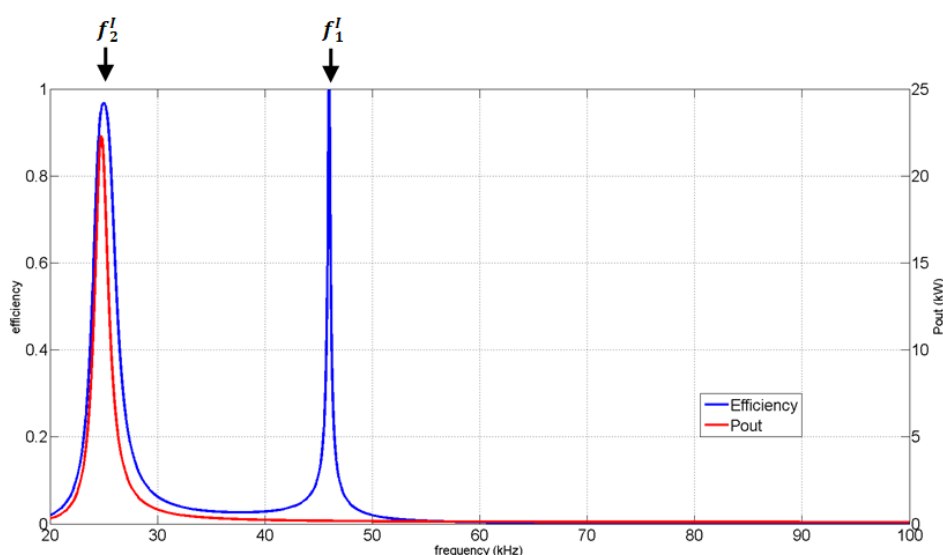


Σχήμα 3.2-10: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στις περιπτώσεις Πυκνωτών Αντιστάθμισης: C_1-C_2 ,

$$C_2, C_1^I = 2 \cdot C_1 - C_2^I = 2 \cdot C_2 \text{ και } C_1^I = \frac{1}{2} \cdot C_1 - C_2^I = \frac{1}{2} \cdot C_2$$

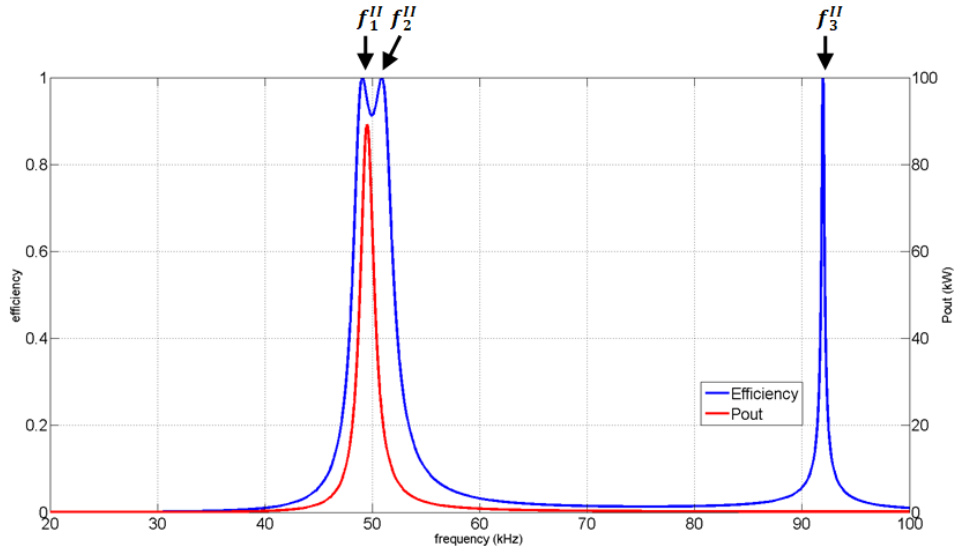
Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 3.2-10**), για τις αρχικές τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, μεγιστοποιείται στη συχνότητα $f = 35.017 \text{ kHz}$, σύμφωνα με τη σχέση (3.7). Στην περίπτωση των διπλάσιων τιμών των πυκνωτών, η συχνότητα στην οποία μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου είναι ίση με $f^I = 24.773 \text{ kHz}$, ενώ για την περίπτωση του υποδιπλασιασμού των τιμών, η συχνότητα μεγιστοποίησης της ισχύος εξόδου είναι ίση με $f^{II} = 49.509 \text{ kHz}$.

Και στην περίπτωση αυτή, παρόμοια με την τοπολογία αντιστάθμισης SS, παρατηρείται σημαντική εξάρτηση της μεταφερόμενης ισχύος από την επιλογή των τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης. Συγκεκριμένα, με τον διπλασιασμό των πυκνωτών αντιστάθμισης, η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου είναι 22309.14 W , ενώ με τον υποδιπλασιασμό των πυκνωτών η μέγιστη τιμή είναι 89173.06 W . Οι τιμές αυτές είναι 50.02 % και 199.95 %, αντίστοιχα, της μέγιστης τιμής των αρχικών πυκνωτών αντιστάθμισης.



Σχήμα 3.2-11: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στην περίπτωση Πυκνωτών Αντιστάθμισης: $C_1^I = 2 \cdot C_1$ -
 $C_2^I = 2 \cdot C_2$

Για την περίπτωση όπου έχουμε διπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, (**Σχήμα 3.2-11**), στη συχνότητα f_1^I η ισχύς εξόδου έχει τιμή 169.91 W , δηλαδή 0.76 % της μέγιστης τιμής, ενώ στη συχνότητα f_2^I , όπου η απόδοση έχει τιμή κοντά στη μέγιστη, η ισχύς εξόδου είναι ίση με 20633.65 W , δηλαδή 92.49 % της μέγιστης τιμής. Συνεπώς, η λειτουργία του συστήματος κοντά στη συχνότητα f_2^I επιτυγχάνει ικανοποιητική μεταφορά ισχύος με όχι ιδιαίτερα σημαντικές απώλειες.

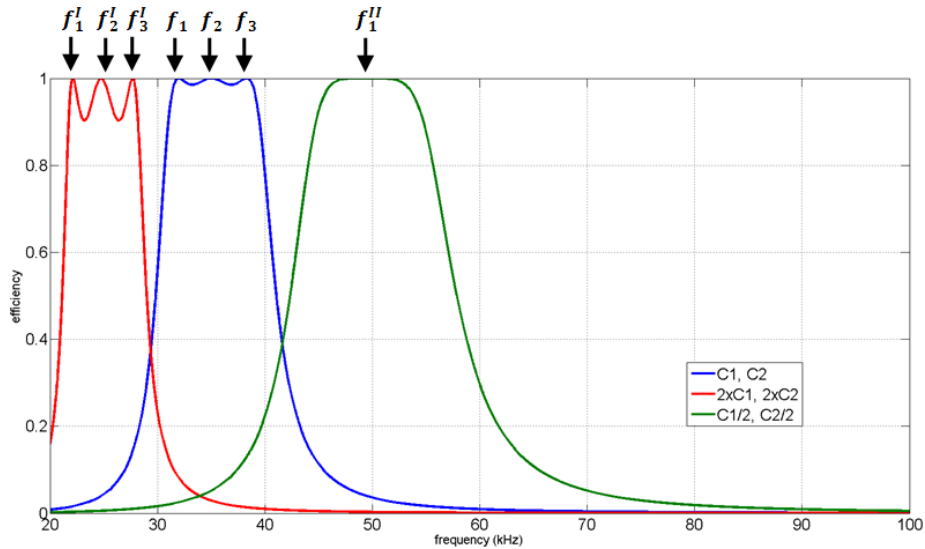


Σχήμα 3.2-12: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσεως της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στην περίπτωση Πυκνωτών Αντιστάθμισης: $C_1^I = \frac{1}{2} \cdot C_1$ -
 $C_2^I = \frac{1}{2} \cdot C_2$

Στην περίπτωση όπου έχουμε υποδιπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών, στις συχνότητες f_1'' , f_2'' και f_3'' η ισχύς εξόδου είναι ίση με 67225.4 W, 22687.51 W και 170.17 W αντίστοιχα, δηλαδή 75.39 %, 25.44 % και 0.19 % της μέγιστης τιμής. Στη συχνότητα f_1'' επιτυγχάνεται ικανοποιητική μεταφορά ισχύος. Αντίθετα η λειτουργία του συστήματος στις συχνότητες f_2'' και f_3'' δε συνίσταται λόγω της μικρής μεταφερόμενης ισχύος.

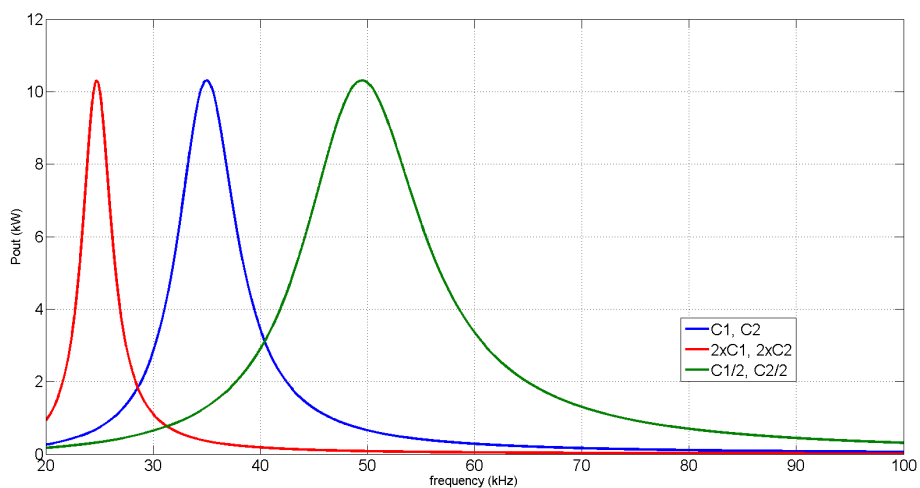
3.2.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Στην τοπολογία SP έχουμε υπολογίσει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης σε συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$: $C_1 = 84.34 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$. Οι τιμές των πυκνωτών για τις δύο περιπτώσεις που θα μελετήσουμε είναι $C_1^I = 2 \cdot C_1 = 168.673 \text{ nF}$ και $C_2^I = 2 \cdot C_2 = 159.674 \text{ nF}$, και $C_1^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_1 = 42.168 \text{ nF}$ και $C_2^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_2 = 39.919 \text{ nF}$ αντίστοιχα.



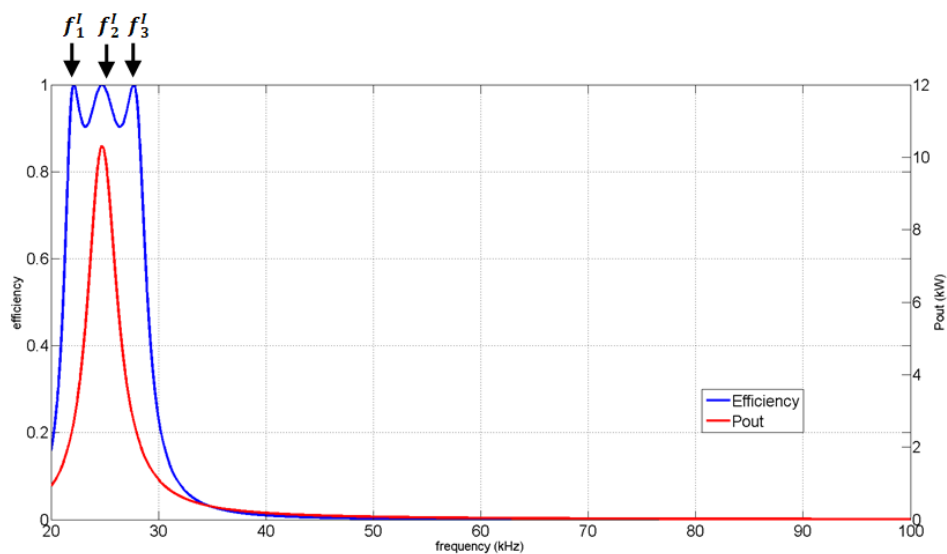
Σχήμα 3.2-13: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στις περιπτώσεις Πυκνωτών Αντιστάθμισης: C_1-C_2 , $C_1^I = 2 \cdot C_1 - C_2^I = 2 \cdot C_2$ και $C_1^I = \frac{1}{2} \cdot C_1 - C_2^I = \frac{1}{2} \cdot C_2$

Παρατηρούμε ότι για τις περιπτώσεις των αρχικών και των διπλάσιων τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης η απόδοση του συστήματος, (Σχήμα 3.2-13), μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνότητας, ενώ στην περίπτωση όπου έχουμε υποδιπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών η απόδοση εμφανίζει μόνο ένα σημείο μεγιστοποίησης. Οι συχνότητες στην περίπτωση των αρχικών τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης, όπως υπολογίστηκαν στην Ενότητα 3.1.4, είναι ίσες με $f_1 = 31.985 \text{ kHz}$, $f_2 = 35 \text{ kHz}$ και $f_3 = 38.299 \text{ kHz}$. Στην περίπτωση που έχουμε διπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών οι συχνότητες όπου μεγιστοποιείται η απόδοση είναι ίσες με $f_1^I = 22.122 \text{ kHz}$, $f_2^I = 24.749 \text{ kHz}$ και $f_3^I = 27.688 \text{ kHz}$, ενώ για την περίπτωση που έχουμε υποδιπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών η συχνότητα μεγιστοποίησης της απόδοσης είναι ίση με $f_1^{II} = 49.497 \text{ kHz}$.



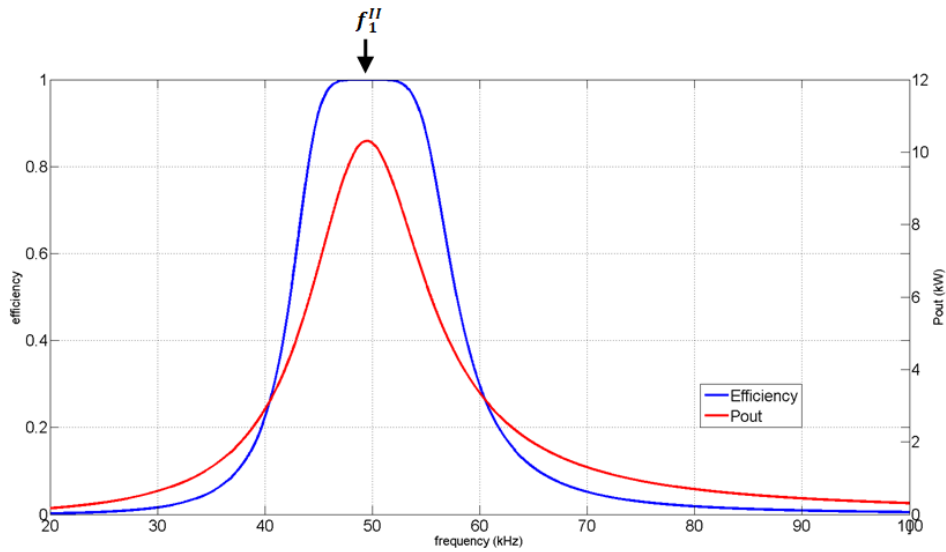
Σχήμα 3.2-14: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στις περιπτώσεις Πυκνωτών Αντιστάθμισης: C_1-C_2 , $C_1^I = 2 \cdot C_1 - C_2^I = 2 \cdot C_2$ και $C_1^I = \frac{1}{2} \cdot C_1 - C_2^I = \frac{1}{2} \cdot C_2$

Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 3.2-14**), για τις αρχικές τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, μεγιστοποιείται στη συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$, σύμφωνα με τη σχέση (3.11). Στην περίπτωση των διπλασίων τιμών των πυκνωτών, η συχνότητα στην οποία μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου είναι ίση με $f^I = 24.749 \text{ kHz}$, ενώ για την περίπτωση του υποδιπλασιασμού των τιμών, η συχνότητα μεγιστοποίησης της ισχύος εξόδου είναι ίση με $f^{II} = 49.497 \text{ kHz}$. Και στις δύο περιπτώσεις η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται σε συχνότητα όπου μεγιστοποιείται και η απόδοση του συστήματος. Επίσης, η μέγιστη τιμή της ισχύος εξόδου είναι ίση με 10305.41 W και για τις τρεις περιπτώσεις. Συνεπώς, η μέγιστη τιμή της ισχύος εξόδου δε φαίνεται να έχει σημαντική εξάρτηση από τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, παρόμοια με την τοπολογία **PP**.



Σχήμα 3.2-15: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στην περίπτωση Πυκνωτών Αντιστάθμισης: $C_1^I = 2 \cdot C_1$ -
 $C_2^I = 2 \cdot C_2$

Στην περίπτωση που έχουμε διπλασιάσει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, (**Σχήμα 3.2-15**), στις συχνότητες f_1^I και f_3^I , όπου μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος η ενεργός ισχύς εξόδου έχει τιμές 2707.81 W και 2706.99 W αντίστοιχα, δηλαδή περίπου 26.27 % της μέγιστης τιμής της περίπτωσης αυτής. Και στις δύο αυτές συχνότητες η μεταφερόμενη ισχύς λαμβάνει σχετικά μικρές τιμές. Συνεπώς θα πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία του συστήματος σε αυτές τις συχνότητες.



Σχήμα 3.2-16: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στην περίπτωση Πυκνωτών Αντιστάθμισης: $C_1^I = \frac{1}{2} \cdot C_1$ -
 $C_2^I = \frac{1}{2} \cdot C_2$

Στην περίπτωση όπου $C_1^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_1$ και $C_2^{II} = \frac{1}{2} \cdot C_2$, η απόδοση του συστήματος και η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιούνται στην ίδια συχνότητα, $f = 49.497 \text{ kHz}$.

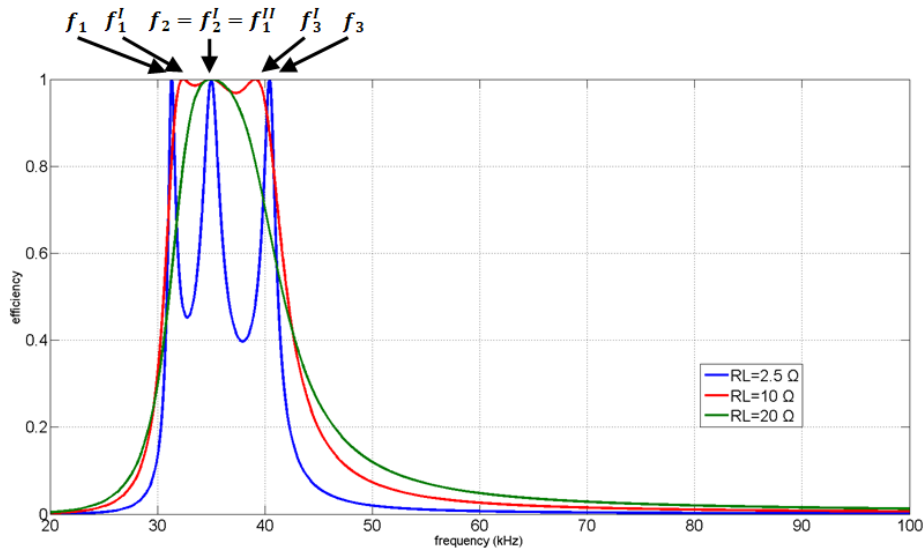
3.3 Επίδραση της Αντίστασης Φορτίου στο Φαινόμενο Διακλάδωσης

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε το **Φαινόμενο Διακλάδωσης** σε περιπτώσεις διαφορετικών αντιστάσεων φορτίου για κάθε τοπολογία αντιστάθμισης.

Οι τιμές των επαγωγών των πηνίων, L_1 και L_2 , της αμοιβαίας επαγωγής, M , των αντιστάσεων των τυλιγμάτων, R_1 και R_2 , και του ρεύματος στο πηνίο του πρωτεύοντος, \tilde{I}_1 , παραμένουν ίδιες με αυτές των **Ενοτήτων 3.1** και **3.2**.

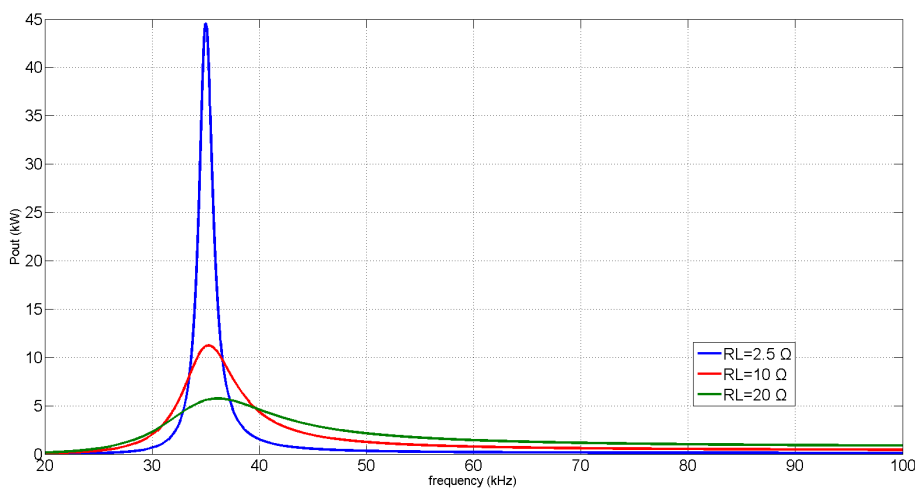
3.3.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Στην τοπολογία **SS** για συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης είναι ίσες με $C_1 = 78.923 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$.



Σχήμα 3.3-1: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στις περιπτώσεις Αντίστασης Φορτίου: $R_L = 2.5 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 20 \Omega$

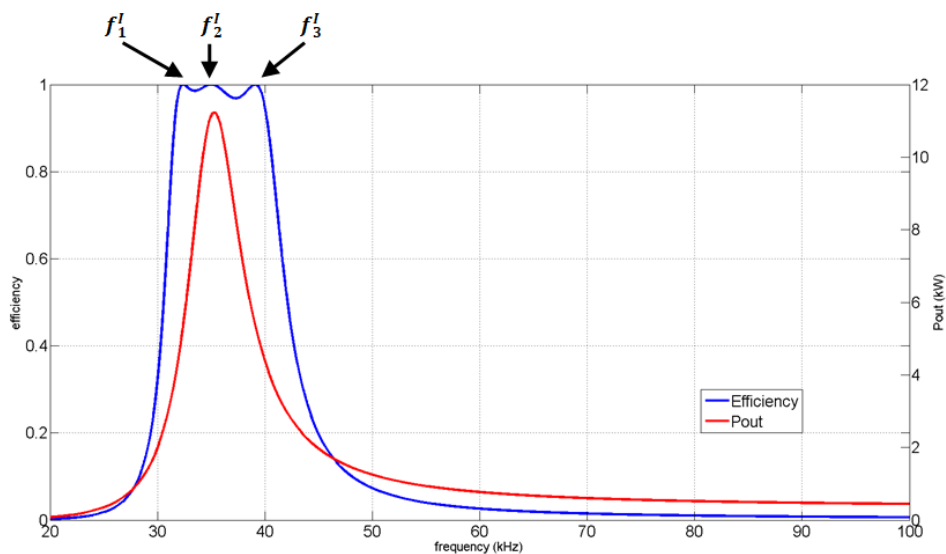
Στο **Σχήμα 3.3-1** παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος για $R_L = 2.5 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 20 \Omega$. Η απόδοση, για τις περιπτώσεις όπου έχουμε αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 2.5 \Omega$ και $R_L = 10 \Omega$, μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνότητας λειτουργίας, ενώ για την περίπτωση αντίστασης φορτίου ίσης με $R_L = 20 \Omega$ μεγιστοποιείται μόνο σε μία τιμή συχνότητας. Συγκεκριμένα, για $R_L = 2.5 \Omega$ η απόδοση μεγιστοποιείται στις συχνότητες $f_1 = 31.323 \text{ kHz}$, $f_2 = 35 \text{ kHz}$ και $f_3 = 40.428 \text{ kHz}$. Για $R_L = 10 \Omega$, η απόδοση μεγιστοποιείται στις συχνότητες $f_1^I = 32.387 \text{ kHz}$, $f_2^I = 35 \text{ kHz}$ και $f_3^I = 39.1 \text{ kHz}$ και για $R_L = 20 \Omega$ στη συχνότητα $f_1^{II} = 35 \text{ kHz}$.



Σχήμα 3.3-2: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στις περιπτώσεις Αντίστασης Φορτίου: $R_L = 2.5 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 20 \Omega$

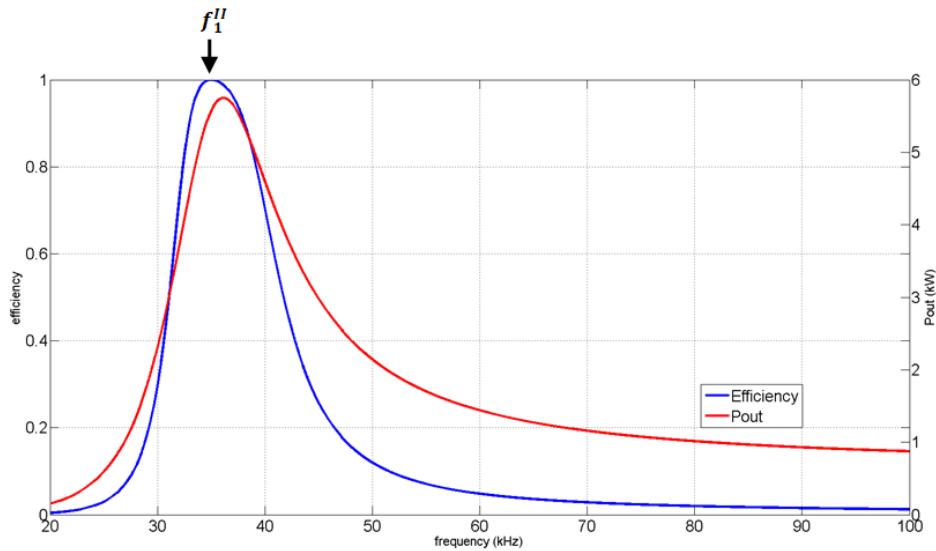
Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 3.3-2**), μεγιστοποιείται σε μία τιμή συχνότητας για κάθε περίπτωση τιμών πυκνωτών αντιστάθμισης. Η συχνότητα αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.7) και στην περίπτωση αντίστασης φορτίου με τιμή $R_L = 2.5 \Omega$ είναι ίση με $f = 35.017 \text{ kHz}$. Για $R_L = 10 \Omega$ η συχνότητα όπου μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου είναι ίση με $f^I = 35.273 \text{ kHz}$, ενώ για $R_L = 20 \Omega$ είναι ίση με $f^{II} = 36.131 \text{ kHz}$.

Στην **Ενότητα 3.1**, βρήκαμε ότι η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου για αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$ είναι 44597.3 W . Για $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 20 \Omega$ η μέγιστη τιμή είναι 11230.5 W και 5749.2 W αντίστοιχα, δηλαδή 25.18 % και 12.89 % της μέγιστης τιμής όταν $R_L = 2.5 \Omega$. Οπότε, παρατηρούμε ότι με την αύξηση της τιμής της αντίστασης φορτίου, η μέγιστη ισχύς εξόδου μειώνεται σημαντικά.



Σχήμα 3.3-3: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου $R_L = 10 \Omega$

Όταν η αντίσταση φορτίου είναι ίση με $R_L = 10 \Omega$, (**Σχήμα 3.3-3**), στις συχνότητες f_1^I , f_2^I και f_3^I , όπου μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος η ενεργός ισχύς εξόδου έχει τιμές 5352.3 W , 11143.96 W και 5351.48 W αντίστοιχα, δηλαδή περίπου 47.66 %, 99.23 % και 47.65 % της μέγιστης τιμής της περίπτωσης αυτής. Συνεπώς, η λειτουργία του συστήματος κοντά στη συχνότητα f_2^I επιτυγχάνει ικανοποιητική μεταφορά ισχύος με ιδιαίτερα μεγάλη απόδοση.

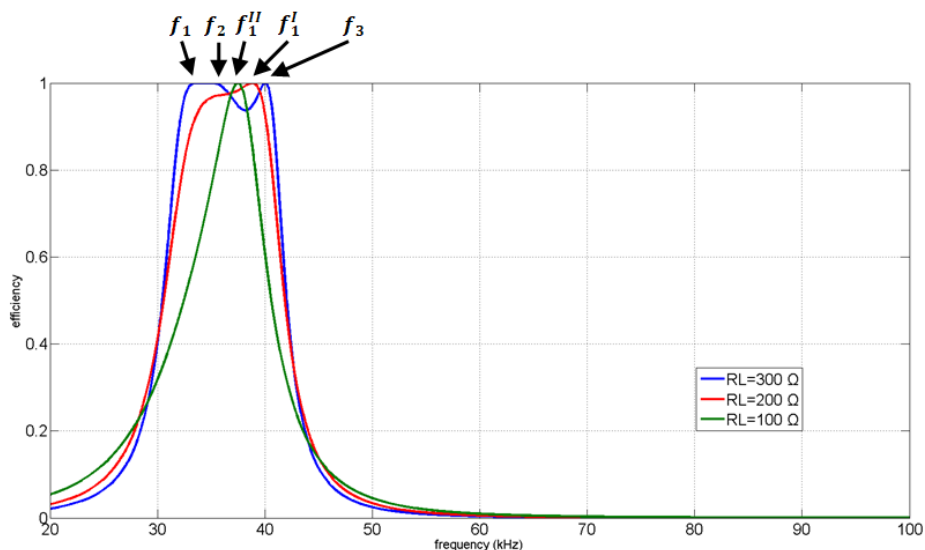


Σχήμα 3.3-4: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου $R_L = 20 \Omega$

Στην περίπτωση όπου η αντίσταση φορτίου είναι ίση με $R_L = 20 \Omega$, (Σχήμα 3.3-4), στη συχνότητα f_1'' , η ενεργός ισχύς εξόδου είναι ίση με 96.92 % της μέγιστης τιμής για $R_L = 20 \Omega$, η οποία είναι $P_{out,max} = 5749.2 W$. Άρα, είναι ευνοϊκό το σύστημα να λειτουργεί σε συχνότητες κοντά στην f_1'' .

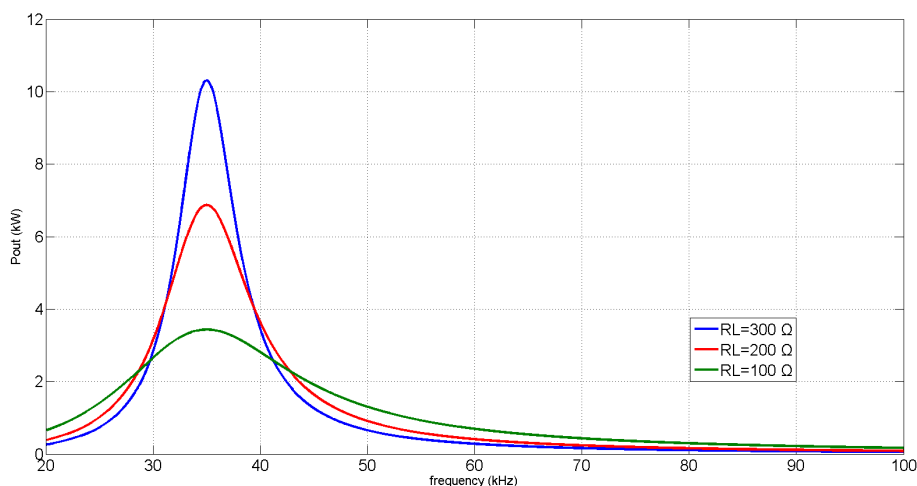
3.3.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

Στην τοπολογία PP, για συχνότητα $f = 35 kHz$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$ οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης έχουν υπολογιστεί ίσες με $C_1 = 74.599 nF$ και $C_2 = 79.837 nF$.



Σχήμα 3.3-5: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στις περιπτώσεις Αντίστασης Φορτίου: $R_L = 300 \Omega$, $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$

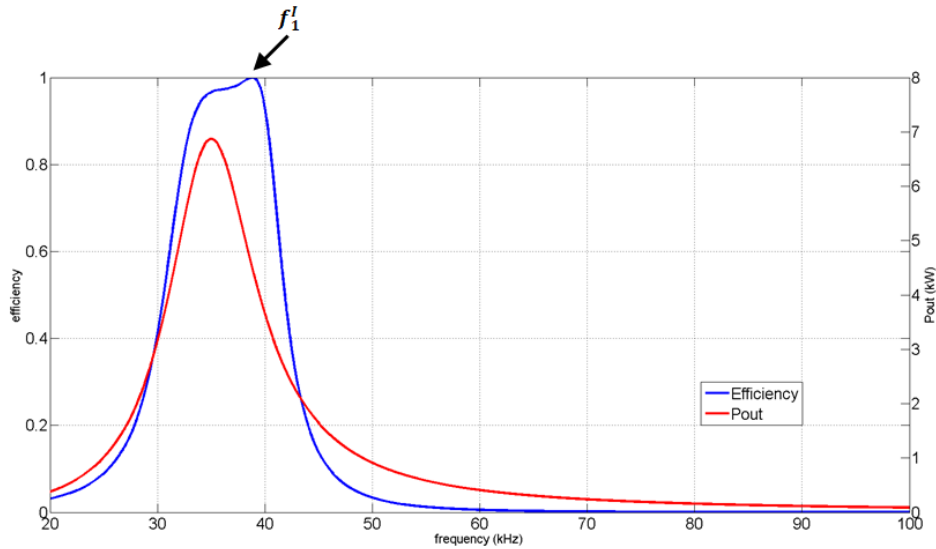
Στο **Σχήμα 3.3-5** παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος για $R_L = 300 \Omega$, $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$. Παρατηρούμε ότι το **Φαινόμενο της Διακλάδωσης** δεν εμφανίζεται για όλες τις τιμές αντίστασης φορτίου. Συγκεκριμένα, για $R_L = 300 \Omega$, εμφανίζεται το **Φαινόμενο της Διακλάδωσης** και η απόδοση μεγιστοποιείται στις συχνότητες $f_1 = 33.634 \text{ kHz}$, $f_2 = 35 \text{ kHz}$ και $f_3 = 40.032 \text{ kHz}$. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου έχουμε αντίσταση φορτίου $R_L = 200 \Omega$, η απόδοση μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα $f_1^I = 38.818 \text{ kHz}$. Παρόμοια, για $R_L = 100 \Omega$, παρουσιάζεται μόνο μία συχνότητα μεγιστοποίησης της απόδοσης: $f_1^{II} = 37.477 \text{ kHz}$.



Σχήμα 3.3-6: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στις περιπτώσεις Αντίστασης Φορτίου: $R_L = 300 \Omega$, $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$

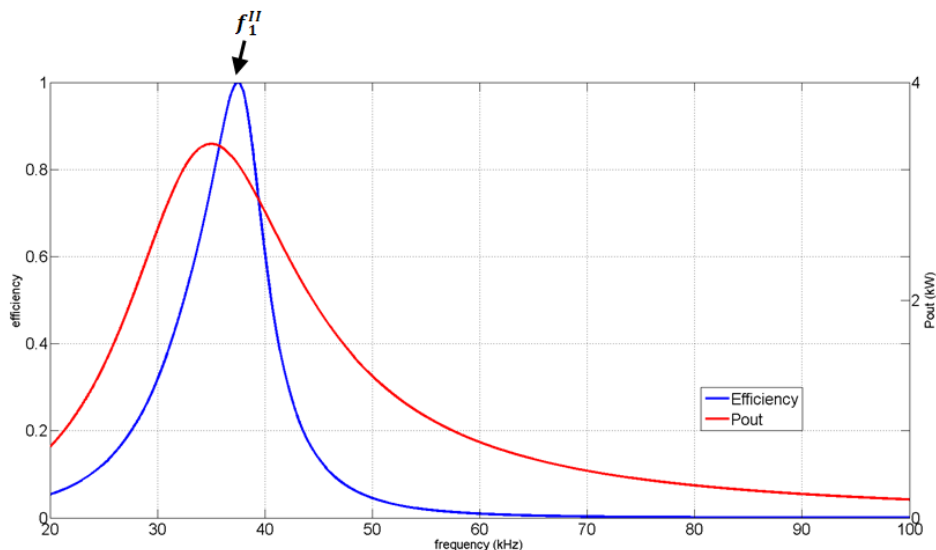
Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 3.3-6**), μεγιστοποιείται μόνο σε μία τιμή συχνότητας για κάθε περίπτωση αντίστασης φορτίου που εξετάζεται. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.11) και επειδή δεν υπάρχει εξάρτηση από την τιμή της αντίστασης φορτίου, η τιμή αυτή είναι ίδια και για τις τρεις τιμές αντίστασης φορτίου. Συνεπώς, η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται στη συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$.

Η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου για αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$ είναι 10305.41 W . Για $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$ η μέγιστη τιμή είναι 6870.27 W και 3435.14 W αντίστοιχα, δηλαδή 66.67% και 33.33% της μέγιστης τιμής όταν $R_L = 300 \Omega$. Οπότε, παρατηρούμε ότι με την μείωση της τιμής της αντίστασης φορτίου, η μέγιστη ισχύς εξόδου μειώνεται σημαντικά.



Σχήμα 3.3-7: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου $R_L = 200 \Omega$

Η απόδοση του συστήματος και η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιούνται στην ίδια συχνότητα μόνο στην περίπτωση αντίστασης φορτίου $R_L = 300 \Omega$. Αντίθετα για $R_L = 200 \Omega$, (Σχήμα 3.3-7), στη συχνότητα f_1^I η ισχύς εξόδου είναι ίση με $4488.65 W$, δηλαδή 65.33 % της μέγιστης τιμής που παρουσιάζεται για $f = 35 kHz$. Ωστόσο, στη συχνότητα των $35 kHz$, η απόδοση έχει τιμή ίση με 96.63 %. Επομένως, η λειτουργία του συστήματος σε συχνότητα κοντά στα $35 kHz$ επιτυγχάνει σχετικά αποδεκτή μεταφορά ισχύος με υψηλή απόδοση.

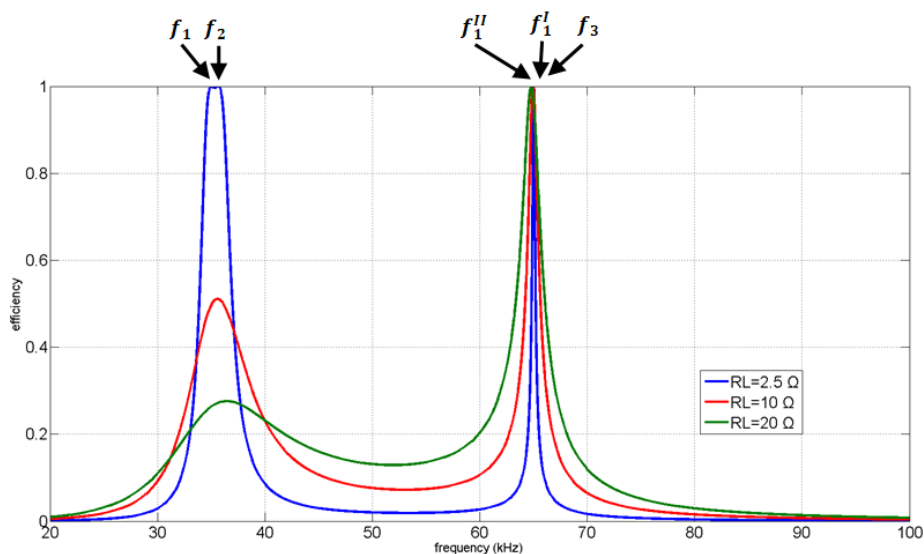


Σχήμα 3.3-8: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου $R_L = 100 \Omega$

Για αντίσταση φορτίου $R_L = 100 \Omega$, (**Σχήμα 3.3-8**), στη συχνότητα $f_1^{II} = 37.477 \text{ kHz}$, η ισχύς εξόδου είναι ίση με 3247.61 W , δηλαδή 94.54% της μέγιστης τιμής της περίπτωσης αυτής. Στη συχνότητα των 35 kHz , όπου μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου, η απόδοση είναι ίση με 76.11% .

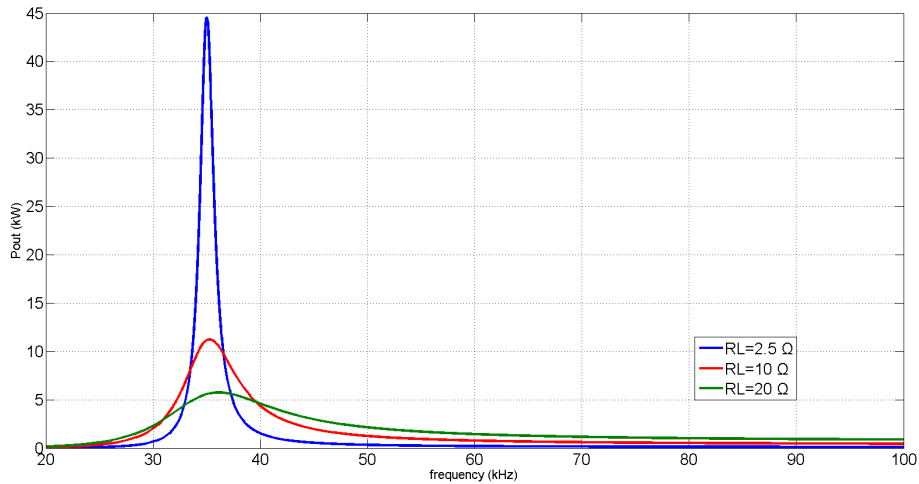
3.3.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Στην τοπολογία **PS** για συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης έχουν υπολογιστεί ίσες με $C_1 = 25.14 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$.



Σχήμα 3.3-9: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στις περιπτώσεις Αντίστασης Φορτίου: $R_L = 2.5 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 20 \Omega$

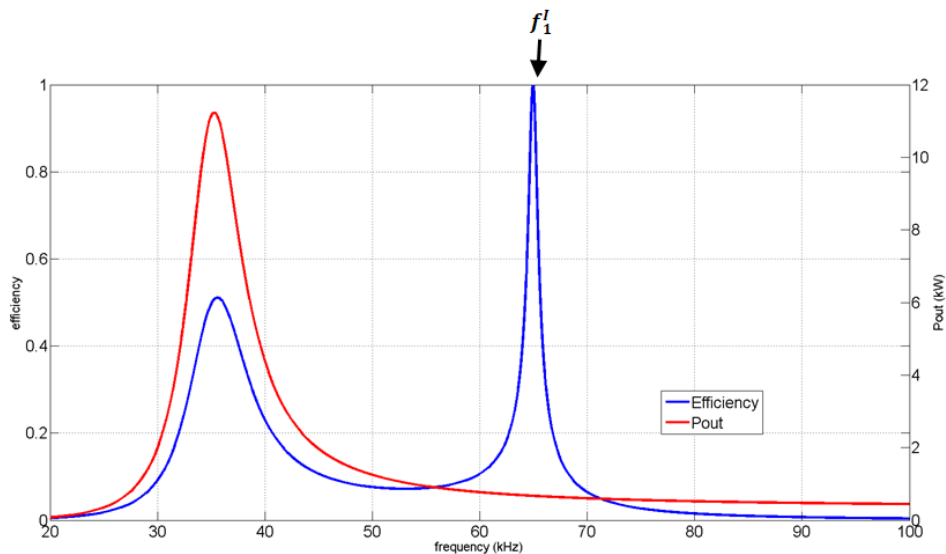
Στο **Σχήμα 3.3-9** παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος για αντιστάσεις φορτίου ίσες με $R_L = 2.5 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 20 \Omega$. Παρατηρούμε ότι η απόδοση για $R_L = 2.5 \Omega$ μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνότητας λειτουργίας, ενώ για $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 20 \Omega$ μεγιστοποιείται μόνο σε μία τιμή συχνότητας. Συγκεκριμένα, για $R_L = 2.5 \Omega$, σύμφωνα με την **Υποενότητα 3.1.3**, οι συχνότητες μεγιστοποίησης της απόδοσης είναι $f_1 = 35 \text{ kHz}$, $f_2 = 35.673 \text{ kHz}$ και $f_3 = 65.013 \text{ kHz}$. Αντίθετα, για $R_L = 10 \Omega$, η απόδοση μεγιστοποιείται στη συχνότητα $f_1^I = 64.958 \text{ kHz}$, ενώ για $R_L = 20 \Omega$, στη συχνότητα $f_1^{II} = 64.791 \text{ kHz}$.



Σχήμα 3.3-10: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στις περιπτώσεις Αντίστασης Φορτίου: $R_L = 2.5 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 20 \Omega$

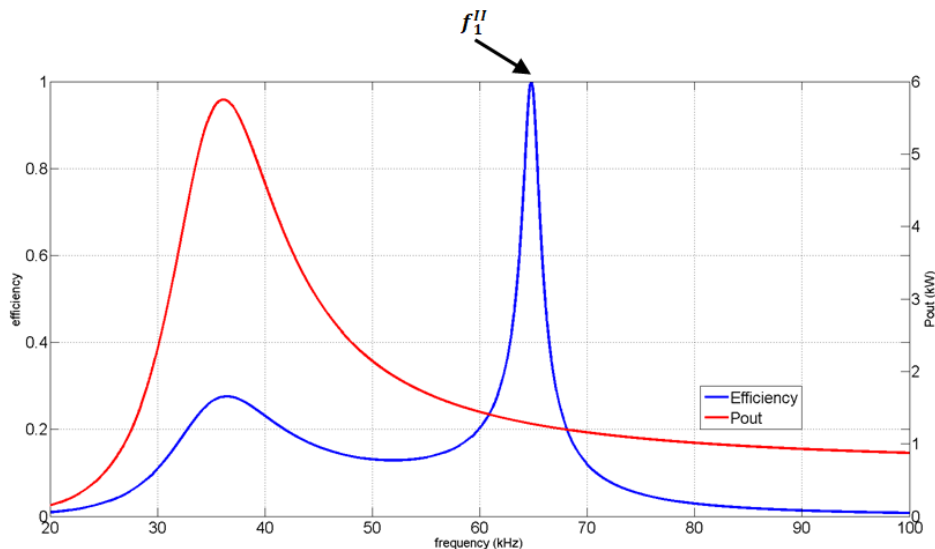
Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 3.3-10**), μεγιστοποιείται σε μία τιμή συχνότητας λειτουργίας και για τις τρεις περιπτώσεις αντίστασης φορτίου. Η συχνότητα αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.7) και στην περίπτωση αντίστασης φορτίου με τιμή $R_L = 2.5 \Omega$ είναι ίση με $f = 35.017 \text{ kHz}$. Για $R_L = 10 \Omega$ η συχνότητα όπου μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου είναι ίση με $f^I = 35.273 \text{ kHz}$, ενώ για $R_L = 20 \Omega$ είναι ίση με $f^{II} = 36.131 \text{ kHz}$.

Η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου για αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$ είναι 44597.3 W . Για $R_L = 10 \Omega$ και $R_L = 20 \Omega$ η μέγιστη τιμή είναι 11230.5 W και 5749.2 W αντίστοιχα, δηλαδή 25.18% και 12.89% της μέγιστης τιμής όταν $R_L = 2.5 \Omega$. Οπότε, παρατηρούμε ότι με την αύξηση της τιμής της αντίστασης φορτίου, η μέγιστη ισχύος εξόδου μειώνεται σημαντικά.



Σχήμα 3.3-11: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου $R_L = 10 \Omega$

Η απόδοση του συστήματος και η ενεργός ισχύς εξόδου δεν έχουν κοινά σημεία μεγιστοποίησης σε καμία από τις τρεις περιπτώσεις αντίστασης φορτίου. Για $R_L = 10 \Omega$, (Σχήμα 3.3-11), στη συχνότητα $f_1^I = 64.958 \text{ kHz}$, όπου μεγιστοποιείται η απόδοση, η ισχύς εξόδου είναι ίση με 670.14 W , δηλαδή 5.97% της μέγιστης τιμής, ενώ στη συχνότητα $f^I = 35.273 \text{ kHz}$, όπου μεγιστοποιείται η ισχύς η απόδοση είναι ίση με 50.71% .

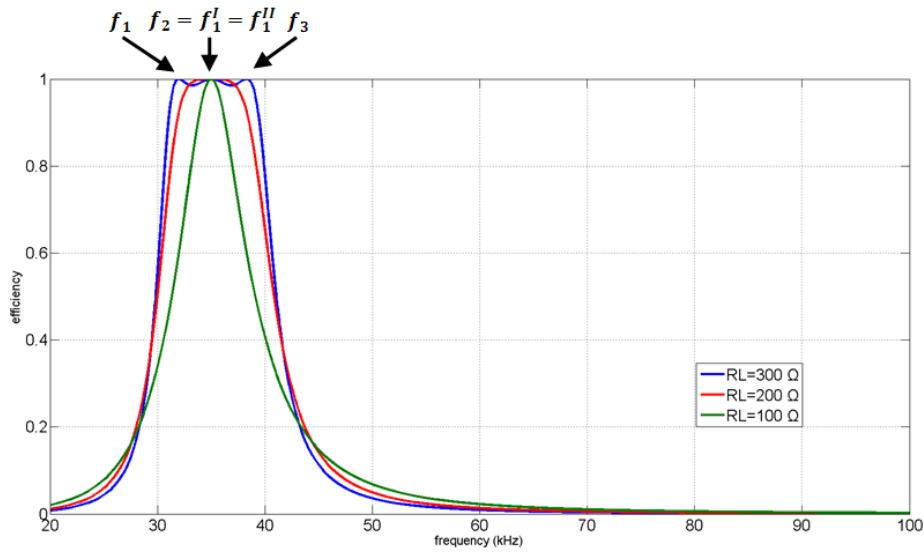


Σχήμα 3.3-12: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου $R_L = 20 \Omega$

Για $R_L = 20 \Omega$, (Σχήμα 3.3-12), στη συχνότητα $f_1^{II} = 64.791 \text{ kHz}$, όπου μεγιστοποιείται η απόδοση, η ισχύς εξόδου είναι ίση με 1278.17 W , δηλαδή 22.23% της μέγιστης τιμής. Επίσης, στη συχνότητα $f^{II} = 36.131 \text{ kHz}$, όπου μεγιστοποιείται η ισχύς, η απόδοση είναι ίση με 27.53% . Επομένως, τόσο για $R_L = 10 \Omega$ όσο και για $R_L = 20 \Omega$, δεν υπάρχει κάποια συχνότητα (ή κάποιο περιορισμένο εύρος συχνοτήτων) που να επιτρέπει μεγάλη μεταφορά ισχύος επιτυγχάνοντας αυξημένη απόδοση.

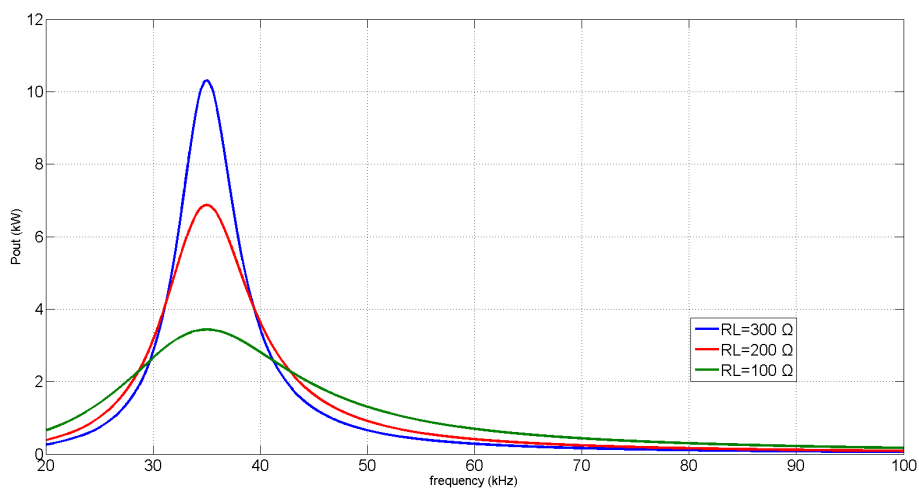
3.3.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Στην τοπολογία **SP** για συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης έχουν υπολογισθεί ίσες με $C_1 = 84.34 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$.



Σχήμα 3.3-13: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στις περιπτώσεις Αντίστασης Φορτίου: $R_L = 300 \Omega$, $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$

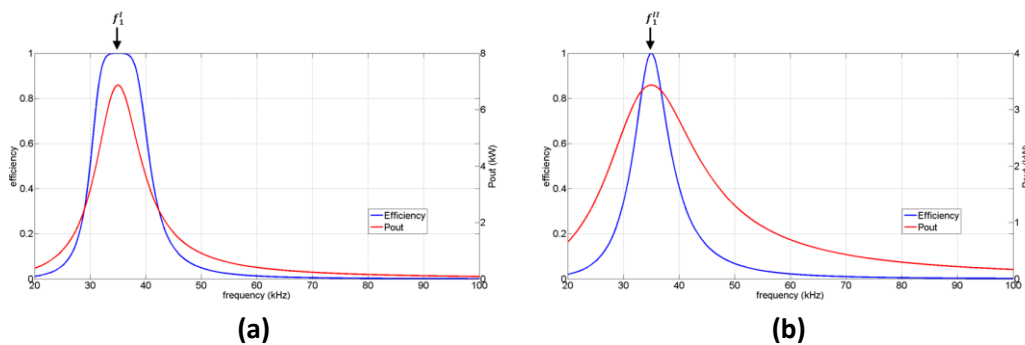
Στο **Σχήμα 3.3-13** παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος για τιμές αντίστασης φορτίου ίσες με $R_L = 300 \Omega$, $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$. Παρατηρούμε ότι η απόδοση για την περίπτωση όπου έχουμε αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 300 \Omega$, μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνότητας λειτουργίας, ενώ για τις περιπτώσεις αντίστασης φορτίου ίσης με $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$ μεγιστοποιείται μόνο σε μία τιμή συχνότητας. Για $R_L = 300 \Omega$, οι συχνότητες μεγιστοποίησης της απόδοσης είναι οι $f_1 = 31.985 \text{ kHz}$, $f_2 = 35 \text{ kHz}$ και $f_3 = 38.299 \text{ kHz}$. Στις περιπτώσεις όπου έχουμε αντίσταση φορτίου $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$, η απόδοση μεγιστοποιείται στη συχνότητα $f_1^I = f_1^{II} = 35 \text{ kHz}$.



Σχήμα 3.3-14: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στις περιπτώσεις Αντίστασης Φορτίου: $R_L = 300 \Omega$, $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$

Η ενεργός ισχύς εξόδου, (Σχήμα 3.3-14), εμφανίζει μία τιμή συχνότητας στην οποία μεγιστοποιείται για κάθε περίπτωση αντίστασης φορτίου. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.11) και επειδή δεν υπάρχει εξάρτηση από την τιμή της αντίστασης φορτίου, η τιμή αυτή είναι ίδια και για τις τρεις τιμές αντίστασης φορτίου. Συνεπώς η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται στη συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$.

Στην **Ενότητα 3.1**, είδαμε ότι η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου για αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$ είναι 10305.41 W . Για $R_L = 200 \Omega$ και $R_L = 100 \Omega$ η μέγιστη τιμή είναι 6870.27 W και 3435.14 W αντίστοιχα, δηλαδή 66.67% και 33.33% της μέγιστης τιμής όταν $R_L = 300 \Omega$. Οπότε, παρατηρούμε ότι με την μείωση της τιμής της αντίστασης φορτίου, η μέγιστη ισχύς εξόδου μειώνεται.



Σχήμα 3.3-15: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στην περίπτωση Αντίστασης Φορτίου: (a) $R_L = 200 \Omega$, (b) $R_L = 100 \Omega$

Η απόδοση του συστήματος και η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιούνται στη συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και για τις τρεις τιμές αντίστασης φορτίου. Κατά συνέπεια, το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί σε συχνότητα κοντά στα 35 kHz ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος με μέγιστη απόδοση.

Κεφάλαιο 4^ο: Επίδραση της Μετατόπισης στη Μεταφερόμενη Ισχύ και την Απόδοση του Συστήματος

4.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα **Κεφάλαια** είχαμε θεωρήσει ότι η μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ήταν μηδενική. Ωστόσο, το Ηλεκτρικό Όχημα ενδέχεται να μην είναι ιδανικά ευθυγραμμισμένο πάνω από το φορτιστή, στη στατική φόρτιση. Επιπλέον κατά τη δυναμική φόρτιση δεν πρέπει να εξετάζεται μόνο το σημείο λειτουργίας όπου το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτιστή, αλλά θα πρέπει επιπλέον να εξετάζεται και κάθε άλλη θέση καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Στο παρόν **Κεφάλαιο** θα πραγματοποιηθεί μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες μετατοπίσεις μεταξύ των δύο *rads*.

Σύμφωνα με την **Ενότητα 2.1** του **Κεφαλαίου 2** και το **Σχήμα 2.1-4**, η μετατόπιση μεταξύ των *rads* του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος προκαλεί μεταβολή των τιμών των επαγωγών των πηνίων, L_1 και L_2 , και της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ τους, M . Συγκεκριμένα, οι τιμές των επαγωγών των L_1 και L_2 δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη μεταβολή. Αντίθετα, η αμοιβαία επαγωγή μειώνεται σημαντικά και για μετατοπίσεις ίσες με $x = \pm 30 \text{ cm}$ σχεδόν μηδενίζεται.

Η κατεύθυνση της μετατόπισης δεν έχει σημασία στην κυκλική μαγνητική διάταξη την οποία χρησιμοποιούμε, λόγω της συμμετρικότητας που παρουσιάζει. Γι' αυτό το λόγο οι τιμές των επαγωγών στον θετικό άξονα της μετατόπισης είναι ίδιες με αυτές στον αρνητικό άξονα.

4.2 Αποτελέσματα σε Διάφορες Μετατοπίσεις

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τεσσάρων βασικών τοπολογιών αντιστάθμισης σε τρεις διαφορετικές μετατοπίσεις: $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$. Οι τιμές των επαγωγών στις συγκεκριμένες μετατοπίσεις δίνονται στον **Πίνακα 4.2-1**.

	L_1 (μH)	L_2 (μH)	M (μH)
$x = 0 \text{ cm}$	262	259	66
$x = 10 \text{ cm}$	260	259	50.4
$x = 25 \text{ cm}$	257	255	8.41

Πίνακας 4.2-1: Τιμές Επαγωγών για Μετατοπίσεις $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$

Όπως αναφέρθηκε και στην **Ενότητα 2.1** του **Κεφαλαίου 2**, θεωρούμε ότι το ρεύμα στο πηνίου του πρωτεύοντος είναι σταθερό και ίσο με $|\tilde{I}_1| = 23 \text{ A}$. Οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων R_1 και R_2 , σύμφωνα με τα συμπεράσματα της **Ενότητας 2.3** του **Κεφαλαίου 2**, μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές χωρίς να υπάρχει σημαντική αλλοίωση στα αποτελέσματα.

4.2.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Θεωρώντας μία συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 25 \text{ kHz}$ και μία αντίσταση φορτίου $R_L = 10 \Omega$, στην περίπτωση όπου το πρωτεύον rad είναι ευθυγραμμισμένο με το δευτερεύον rad , δηλαδή η μετατόπιση είναι ίση με $x = 0 \text{ cm}$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , μπορούν να επιλεγθούν έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή είναι: $C_1 = 154.69 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$.

	$x = 0 \text{ cm}$	$x = 10 \text{ cm}$	$x = 25 \text{ cm}$
$P_{out} \text{ (W)}$	5685.69	3315.56	91.96
$ S_{in} \text{ (VA)}$	5685.69	3319.72	419.89
$Q_{in} \text{ (VAr)}$	0	-116.19	-409.7
$eff\text{-}PF$	1	0.9987	0.219

Πίνακας 4.2-2: Αποτελέσματα των μεγεθών της Τοπολογίας Αντιστάθμισης SS στις τρεις περιπτώσεις Μετατόπισης. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις σχέσεις (2.11), (2.13), (2.15), (2.16) και (2.17) του Κεφαλαίου 2

Παρατηρούμε στον **Πίνακα 4.2-2** ότι η μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος στη θέση $x = 10 \text{ cm}$ μειώνεται κατά 41.68 % σε σχέση με την αρχική θέση $x = 0 \text{ cm}$, και κατά 98.38 % στη θέση $x = 25 \text{ cm}$. Το ποσοστό της μεταβολής της ισχύος σε μία μετατόπιση x σε σχέση την τιμή της στη θέση $x = 0 \text{ cm}$, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta = \frac{P_{out}(x) - P_{out}(x=0 \text{ cm})}{P_{out}(x=0 \text{ cm})} \quad (4.1)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (2.11) του **Κεφαλαίου 2**, από την οποία υπολογίζεται η τιμή της μεταφερόμενης ισχύος στην τοπολογία αντιστάθμισης **SS**, στην (4.1) προκύπτει:

$$\Delta = \frac{M^2(x)}{M^2(x=0 \text{ cm})} \cdot \frac{A(x=0 \text{ cm})}{A(x)} - 1 \quad (4.2)$$

, όπου $A(x) = R_L^2 + (\omega \cdot L_2(x) - 1/(\omega \cdot C_2))^2$.

Από τον **Πίνακα 4.2-1**, παρατηρούμε ότι ισχύει $L_2(x = 0 \text{ cm}) = L_2(x = 10 \text{ cm})$. Αυτό έχει ως συνέπεια, τα $A(x = 0 \text{ cm})$ και $A(x = 10 \text{ cm})$ να είναι ίσα μεταξύ τους και το ποσοστό μεταβολής της ισχύος, Δ , το οποίο δίνεται από την (4.2), να εξαρτάται μόνο από την αμοιβαία επαγωγή, M . Σε διαφορετικές τιμές μετατόπισης, όμως, όπου $L_2(x) \neq L_2(x = 0 \text{ cm})$, το ποσοστό μεταβολής της ισχύος, Δ , εξαρτάται από την αμοιβαία επαγωγή M , αλλά και από τις τιμές της επαγωγής του πηνίου L_2 , της συχνότητας λειτουργίας f και της αντίστασης του φορτίου R_L .

Παράλληλα, η απόδοση του συστήματος και ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο παρουσιάζουν ελάχιστη μεταβολή για $x = 10 \text{ cm}$, ενώ, αντίθετα, για $x = 25 \text{ cm}$ παρουσιάζουν πτώση πάνω από 75 %. Οι μεταβολές στην απόδοση και στον συντελεστή ισχύος οφείλονται στην αύξηση, κατά μέτρο, της άεργου ισχύος εισόδου, η οποία συμβαίνει λόγω της μη κατάλληλης επιλογής των πυκνωτών αντιστάθμισης στην περίπτωση μη μηδενικής μετατόπισης.

Για τον μηδενισμό της άεργου ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος, σε μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$, θα πρέπει οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, να είναι ίσες με $C_1^I = 155.88 \text{ nF}$ και $C_2^I = 156.48 \text{ nF}$. Σε αυτήν την περίπτωση, η απόδοση του συστήματος λαμβάνει μοναδιαία τιμή στη μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$, ενώ η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 3315.56 W . Η τιμή της ισχύος εξόδου δίνεται από τη σχέση (2.11) του **Κεφαλαίου 2**:

$$P_{out} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L)^2 + (\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2})^2}$$

Παρατηρούμε ότι η τιμή της ισχύος 3315.56 W είναι ίδια με την αντίστοιχη τιμή για $x = 10 \text{ cm}$ όταν χρησιμοποιούμε τους πυκνωτές αντιστάθμισης C_1 και C_2 . Αυτό συμβαίνει γιατί ισχύει ότι $L_2(x = 0 \text{ cm}) = L_2(x = 10 \text{ cm})$ και συνεπώς ο όρος $\omega \cdot L_2 - 1/(\omega \cdot C_2)$ της σχέσης (2.11) του **Κεφαλαίου 2**, μηδενίζεται και η τιμή της ισχύος εξαρτάται μόνο από τα $|\tilde{I}_1|$, ω , M και R_L , τα οποία παραμένουν σταθερά στις δύο αυτές περιπτώσεις.

Για τον μηδενισμό της άεργου ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος, σε μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$, θα πρέπει οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, να είναι ίσες με $C_1^{II} = 157.7 \text{ nF}$ και $C_2^{II} = 158.94 \text{ nF}$. Στην περίπτωση αυτή, η απόδοση του συστήματος λαμβάνει μοναδιαία τιμή στην μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$, ενώ η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 92.32 W , τιμή η οποία είναι κατά 0.39 % μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή για $x = 25 \text{ cm}$ όταν χρησιμοποιούμε τους πυκνωτές αντιστάθμισης C_1 και C_2 . Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οι ιδανικές τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης.

Και στις δύο περιπτώσεις μετατόπισης, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$, παρατηρούμε ότι η ισχύς εξόδου μειώνεται σημαντικά ακόμα και αν επιλέξουμε κατάλληλα τους πυκνωτές για μεγιστοποίηση της ισχύος. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος η οποία μειώνεται σημαντικά όταν αυξάνεται η μετατόπιση.

4.2.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

Για μία συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 25 \text{ kHz}$ και μία αντίσταση φορτίου $R_L = 10 \Omega$, στην περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , επιλέγονται ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή είναι: $C_1 = 165.25 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$.

	$x = 0 \text{ cm}$	$x = 10 \text{ cm}$	$x = 25 \text{ cm}$
$P_{out} \text{ (W)}$	343.51	200.32	5.75
$ S_{in} \text{ (VA)}$	343.51	466.08	997.85
$Q_{in} \text{ (VAr)}$	0	-420.84	-997.84
$eff\text{-}PF$	1	0.4298	0.0058

Πίνακας 4.2-5: Αποτελέσματα των μεγεθών της Τοπολογίας Αντιστάθμισης PP στις τρεις περιπτώσεις Μετατόπισης. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις σχέσεις (2.32), (2.35), (2.37), (2.38) και (2.39) του Κεφαλαίου 2

Αξιοσημείωτη μείωση παρουσιάζει η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς για μετατοπίσεις διάφορες του $x = 0 \text{ cm}$. Συγκεκριμένα, η ενεργός ισχύς εξόδου, στη θέση $x = 10 \text{ cm}$, μειώνεται κατά 41.68 % σε σχέση με την αρχική θέση $x = 0 \text{ cm}$, και κατά 98.33 % στη θέση $x = 25 \text{ cm}$. Παρατηρούμε ότι τα ποσοστά αυτά έχουμε τιμές σχεδόν ίσες με τα αντίστοιχα της τοπολογίας **SS**. Πραγματοποιώντας παρόμοια διαδικασία με αυτή της τοπολογίας **SS**, μέσω της σχέσης (2.32) του **Κεφαλαίου 2**, η ποσοστιαία μεταβολή δίνεται από την:

$$\Delta = \frac{M^2(x)}{M^2(x=0 \text{ cm})} \cdot \frac{B(x=0 \text{ cm})}{B(x)} - 1 \quad (4.3)$$

, όπου $B(x) = (R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2(x) \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2(x))^2$.

Όπως παρατηρήσαμε και προηγουμένως, οι τιμές της επαγωγής L_2 στις μετατοπίσεις $x = 0 \text{ cm}$ και $x = 10 \text{ cm}$ είναι ίσες μεταξύ τους και κατά συνέπεια οι όροι $B(x = 0 \text{ cm})$ και $B(x = 10 \text{ cm})$ είναι ίσοι. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το ποσοστό μεταβολής της ισχύος, (4.3), να εξαρτάται μόνο από τις τιμές της αμοιβαίας επαγωγής M και συγκεκριμένα από το ποσοστό μεταβολής της καθώς η μετατόπιση αυξάνεται από $x = 0 \text{ cm}$ σε $x = 10 \text{ cm}$. Συγκρίνοντας, επομένως, την ποσοστιαία μεταβολή Δ από $x = 0 \text{ cm}$ σε $x = 10 \text{ cm}$ για τις τοπολογίες **SS** και **PP**, (4.2) και (4.3), παρατηρούμε ότι δίνεται από την ίδια ακριβώς σχέση:

$$\Delta = \frac{M^2(x)}{M^2(x=0 \text{ cm})} \quad (4.4)$$

Ωστόσο, για διαφορετικές τιμές μετατόπισης, ο όρος $\frac{B(x=0 \text{ cm})}{B(x)}$ ενδέχεται να μην είναι ίσος με τη μονάδα. Επομένως, το ποσοστό μεταβολής της μεταφερόμενης ισχύος εξαρτάται από την αμοιβαία επαγωγή M , αλλά και από τιμές της επαγωγής του πηνίου L_2 , της συχνότητας λειτουργίας f και της αντίστασης του φορτίου R_L .

Όσον αφορά την απόδοση του συστήματος και τον συντελεστή ισχύος εισόδου, για $x = 10 \text{ cm}$ παρουσιάζουν μείωση μεγαλύτερη από 50 % σε σχέση με την αρχική θέση $x = 0 \text{ cm}$, ενώ για $x = 25 \text{ cm}$ λαμβάνουν σχεδόν μηδενικές τιμές.

Στην περίπτωση που εξετάζουμε έχουμε θεωρήσει: $C_1 = 165.25 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$. Για τον μηδενισμό της άεργου ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος, σε μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$, θα πρέπει οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, να είναι ίσες με $C_1^I = 161.97 \text{ nF}$ και $C_2^I = 156.48 \text{ nF}$. Σε αυτήν την περίπτωση, η απόδοση του συστήματος λαμβάνει μοναδιαία τιμή στη μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$, ενώ η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 200.32 W . Παρατηρούμε ότι η τιμή της ισχύος είναι ίδια με την αντίστοιχη τιμή για $x = 10 \text{ cm}$ όταν χρησιμοποιούμε τις αρχικές τιμές για τους πυκνωτές αντιστάθμισης C_1 και C_2 . Η μεταφερόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση (2.32) του **Κεφαλαίου 2**:

$$P_{out} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}$$

Καθώς $L_2(x = 0 \text{ cm}) = L_2(x = 10 \text{ cm})$, ο παρονομαστής στη μεταφερόμενη ισχύ λαμβάνει τις ίδιες τιμές και για τις δύο περιπτώσεις πυκνωτών αντιστάθμισης.

Για τον μηδενισμό της άεργου ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος, σε μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$, θα πρέπει οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, να είναι ίσες με $C_1^{II} = 157.89 \text{ nF}$ και $C_2^{II} = 158.94 \text{ nF}$. Στην περίπτωση αυτή, η απόδοση του συστήματος λαμβάνει μοναδιαία τιμή στη μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$, ενώ η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 5.75 W , τιμή η οποία είναι σχεδόν ίση με την αντίστοιχη τιμή για $x = 25 \text{ cm}$ όταν χρησιμοποιούμε τους πυκνωτές αντιστάθμισης $C_1 = 165.25 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι η μεταφερόμενη ισχύς εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη τιμή της αμοιβαίας επαγωγής M και σε λιγότερο από τη τιμή των πυκνωτών αντιστάθμισης και της επαγωγής του πηνίου L_2 .

Όπως και στην τοπολογία **SS**, και στις δύο περιπτώσεις μετατόπισης, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$, η ισχύς εξόδου μειώνεται σημαντικά ακόμα και αν επιλέξουμε κατάλληλα τους πυκνωτές για μεγιστοποίηση της ισχύος. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος η οποία μειώνεται σημαντικά όταν αυξάνεται η μετατόπιση.

4.2.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Για $f = 25 \text{ kHz}$ και $R_L = 10 \Omega$, στην περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , μπορούν να επιλεγθούν με στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή είναι: $C_1 = 144.81 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$.

	$x = 0 \text{ cm}$	$x = 10 \text{ cm}$	$x = 25 \text{ cm}$
$P_{out} \text{ (W)}$	5685.69	3315.56	91.96
$ S_{in} \text{ (VA)}$	5685.69	3481.23	1742.29
$Q_{in} \text{ (VAR)}$	0	1061.15	1739.86
$eff\text{-}PF$	1	0.9524	0.0528

Πίνακας 4.2-8: Αποτελέσματα των μεγεθών της Τοπολογίας Αντιστάθμισης PS στις τρεις περιπτώσεις Μετατόπισης. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις σχέσεις (2.56), (2.60), (2.62), (2.63) και (2.64) του Κεφαλαίου 2

Στην τοπολογία **PS**, η μεταφερόμενη ισχύς λαμβάνει τις ίδιες ακριβώς τιμές με αυτές της τοπολογίας **SS**. Συνεπώς, για μετατοπίσεις ίσες με $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$, η ισχύς εξόδου μειώνεται κατά 41.68 % και 98.38 % αντίστοιχα σε σχέση με την αρχική θέση $x = 0 \text{ cm}$. Η μεταφερόμενη ισχύς για την τοπολογία **PS** δίνεται από τη σχέση (2.56) του **Κεφαλαίου 2** και είναι ίδια με την αντίστοιχη σχέση της τοπολογίας **SS**. Συνεπώς, το ποσοστό μεταβολής της ισχύος υπολογίζεται από τη σχέση (4.2) και για το λόγο αυτό παρατηρούνται οι ίδιες μεταβολές με την τοπολογία **SS**.

Η απόδοση του συστήματος και ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο λαμβάνει υψηλές τιμές για $x = 10 \text{ cm}$. Αντίθετα, για $x = 25 \text{ cm}$, οι τιμές της απόδοσης και του συντελεστή ισχύος στην είσοδο είναι ελάχιστα μεγαλύτερες από 5%. Αυτό συμβαίνει λόγω της ιδιαίτερα μεγάλης τιμής της άεργου ισχύος εισόδου στη συγκεκριμένη μετατόπιση, η οποία είναι σχεδόν 1900 % μεγαλύτερη της ενεργού ισχύος εξόδου.

Στην περίπτωση που εξετάζουμε έχουμε θεωρήσει: $C_1 = 144.81 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$. Για τον μηδενισμό της άεργου ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος, σε μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$, θα πρέπει οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, να είναι ίσες με $C_1^I = 152.29 \text{ nF}$ και $C_2^I = 156.48 \text{ nF}$. Σε αυτήν την περίπτωση, η απόδοση του συστήματος λαμβάνει μοναδιαία τιμή στη μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$, ενώ η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 3315.56 W . Όπως παρατηρήσαμε και στην τοπολογία **SS**, η τιμή της ισχύος είναι ίδια με την αντίστοιχη τιμή για $x = 10 \text{ cm}$ όταν $C_1 = 144.81 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$. Η μεταφερόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση (2.56) του **Κεφαλαίου 2**:

$$P_{out} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L)^2 + (\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2})^2}$$

$L_2(x = 0 \text{ cm}) = L_2(x = 10 \text{ cm})$ και συνεπώς ο όρος $\omega \cdot L_2 - 1/(\omega \cdot C_2)$ της σχέσης (2.56) του **Κεφαλαίου 2**, μηδενίζεται και η τιμή της ισχύος εξαρτάται μόνο από τα $|\tilde{I}_1|$, ω , M και R_L , τα οποία παραμένουν σταθερά στις δύο αυτές περιπτώσεις.

Για τον μηδενισμό της άεργου ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος, σε μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$, θα πρέπει οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, να είναι ίσες με $C_1^{II} = 157.7 \text{ nF}$ και $C_2^{II} = 158.93 \text{ nF}$. Στην περίπτωση αυτή, η απόδοση του συστήματος λαμβάνει μοναδιαία τιμή στην μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$, ενώ η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 92.32 W , τιμή η οποία είναι κατά 0.39% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή για $x = 25 \text{ cm}$ όταν χρησιμοποιούμε τους πυκνωτές αντιστάθμισης $C_1 = 144.81 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση που $C_1 = 144.81 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$ δεν χρησιμοποιούνται οι ιδανικές τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης.

Όπως έχουμε παρατηρήσει και στις προηγούμενες τοπολογίες αντιστάθμισης, η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος μειώνεται σημαντικά όταν αυξάνεται η μετατόπιση. Γι' αυτό το λόγο, στις δύο περιπτώσεις μετατόπισης, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$, η ισχύς εξόδου μειώνεται σημαντικά, ακόμα και αν επιλέξουμε κατάλληλα τους πυκνωτές για μεγιστοποίησή της.

4.2.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Για $f = 25 \text{ kHz}$ και $R_L = 10 \Omega$, στην περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , μπορούν να επιλεγθούν με στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή είναι: $C_1 = 165.3 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$.

	$x = 0 \text{ cm}$	$x = 10 \text{ cm}$	$x = 25 \text{ cm}$
$P_{out} \text{ (W)}$	343.51	200.32	5.75
$ S_{in} \text{ (VA)}$	343.51	462.07	959.05
$Q_{in} \text{ (VAr)}$	0	416.39	959.04
$eff\text{-}PF$	1	0.4335	0.006

Πίνακας 4.2-11: Αποτελέσματα των μεγεθών της Τοπολογίας Αντιστάθμισης SP στις τρεις περιπτώσεις Μετατόπισης. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τις σχέσεις (2.80), (2.82), (2.84), (2.85) και (2.86) του Κεφαλαίου 2

Στην τοπολογία **SP**, η μεταφερόμενη ισχύς λαμβάνει τις ίδιες ακριβώς τιμές με αυτές της τοπολογίας **PP**. Συνεπώς, για μετατοπίσεις ίσες με $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$, η ισχύς εξόδου μειώνεται κατά 41.68 % και 98.33 % αντίστοιχα σε σχέση με την αρχική θέση $x = 0 \text{ cm}$. Το ποσοστό μεταβολής της ισχύος δίνεται από τη σχέση (4.3).

Όσον αφορά την απόδοση του συστήματος και τον συντελεστή ισχύος στην είσοδο, για μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$ οι τιμές εμφανίζονται μειωμένες κατά 55 % σε σχέση με την περίπτωση μηδενικής μετατόπισης, ενώ για $x = 25 \text{ cm}$ λαμβάνουν σχεδόν μηδενικές τιμές. Οι πολύ μικρές τιμές της απόδοσης και του συντελεστή ισχύος σε μετατοπίσεις διάφορες του $x = 0 \text{ cm}$, οφείλονται στην αύξηση της άεργου ισχύος εισόδου. Στην περίπτωση που εξετάζουμε έχουμε θεωρήσει: $C_1 = 165.3 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$. Για τον μηδενισμό της άεργου ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος, σε μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$, θα πρέπει οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, να είναι ίσες με $C_1^I = 161.99 \text{ nF}$ και $C_2^I = 156.48 \text{ nF}$. Σε αυτήν την περίπτωση, η απόδοση του συστήματος λαμβάνει μοναδιαία τιμή στη μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$, ενώ η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 200.32 W . Παρατηρούμε ότι η τιμή της ισχύος είναι ίδια με την αντίστοιχη τιμή για $x = 10 \text{ cm}$ όταν χρησιμοποιούμε τους πυκνωτές αντιστάθμισης $C_1 = 165.3 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$. Η μεταφερόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση (2.80) του **Κεφαλαίου 2**:

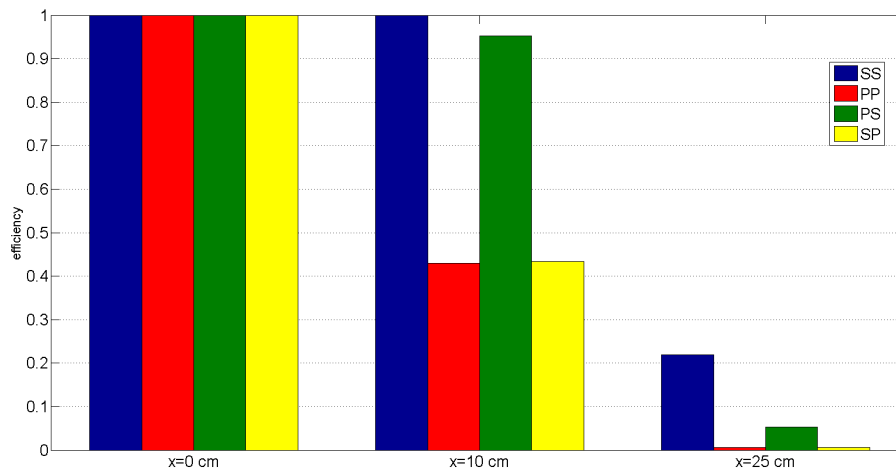
$$P_{out} = |\tilde{I}_1| \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2}$$

Αυτό συμβαίνει γιατί ισχύει ότι $L_2(x = 0 \text{ cm}) = L_2(x = 10 \text{ cm})$ και συνεπώς ο παρονομαστής της παραπάνω σχέσης, από την οποία υπολογίζεται η τιμή της μεταφερόμενης ισχύος και στην τοπολογία **SP**, λαμβάνει τις ίδιες τιμές και για τις δύο περιπτώσεις πυκνωτών αντιστάθμισης.

Για τον μηδενισμό της άεργου ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος, σε μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$, θα πρέπει οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, σύμφωνα με τον **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, να είναι ίσες με $C_1^{II} = 157.87 \text{ nF}$ και $C_2^{II} = 158.94 \text{ nF}$. Στην περίπτωση αυτή, η απόδοση του συστήματος λαμβάνει μοναδιαία τιμή στη μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$, ενώ η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με 5.75 W , τιμή η οποία είναι σχεδόν ίση με την αντίστοιχη τιμή για $x = 25 \text{ cm}$ όταν χρησιμοποιούμε τους πυκνωτές αντιστάθμισης $C_1 = 165.3 \text{ nF}$ και $C_2 = 156.48 \text{ nF}$. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι η μεταφερόμενη ισχύς εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από τη τιμή της αμοιβαίας επαγωγής M και σε λιγότερο από τη τιμή των πυκνωτών αντιστάθμισης και της επαγωγής του πηνίου L_2 .

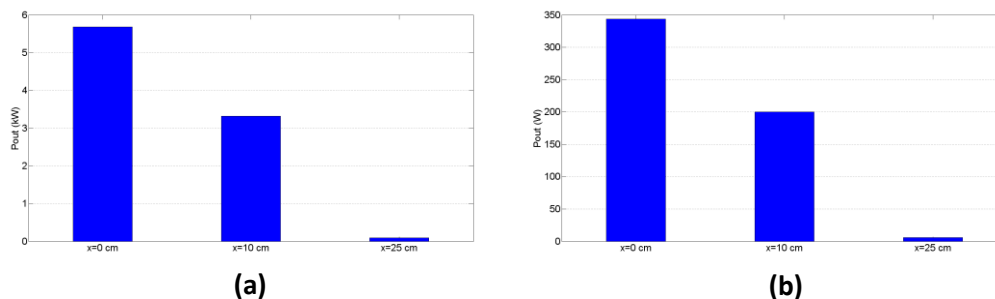
Παρατηρούμε ότι η επιλογή των κατάλληλων πυκνωτών αντιστάθμισης για τη μεγιστοποίηση της ισχύος δεν επηρεάζει σημαντικά την τιμή της ισχύος εξόδου. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος η οποία μειώνεται σημαντικά όταν αυξάνεται η μετατόπιση.

Στα **Σχήματα 4.2-1 και 4.2-2(a) & (b)**, παρουσιάζονται η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος για τις τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης στις τρεις μετατοπίσεις ($x = 0\text{ cm}$, $x = 10\text{ cm}$, $x = 25\text{ cm}$) που μελετήθηκαν στην παρούσα **Ενότητα**. Οι πυκνωτές αντιστάθμισης έχουν επιλεγεί με στόχο την μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο σε μηδενική μετατόπιση.



Σχήμα 4.2-1: Απόδοση του Συστήματος για τις Τέσσερις Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης σε τρεις διαφορετικές Μετατοπίσεις

Για τις τοπολογίες **SS** και **PS**, η απόδοση του συστήματος δε φαίνεται να παρουσιάζει ιδιαίτερη μείωση για μικρές μετατοπίσεις ($x = 10\text{ cm}$). Ωστόσο η απόδοση μειώνεται σημαντικά για μεγαλύτερες μετατοπίσεις ($x = 25\text{ cm}$). Αντίθετα για τις τοπολογίες **PP** και **SP** η απόδοση λαμβάνει ιδιαίτερα μικρές τιμές ακόμα και για μικρές τιμές μετατόπισης ($x = 10\text{ cm}$).



Σχήμα 4.2-2: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος για τις Τοπολογίες Αντιστάθμισης: (a) SS και PS, (b) PP και SP, σε τρεις διαφορετικές Μετατοπίσεις

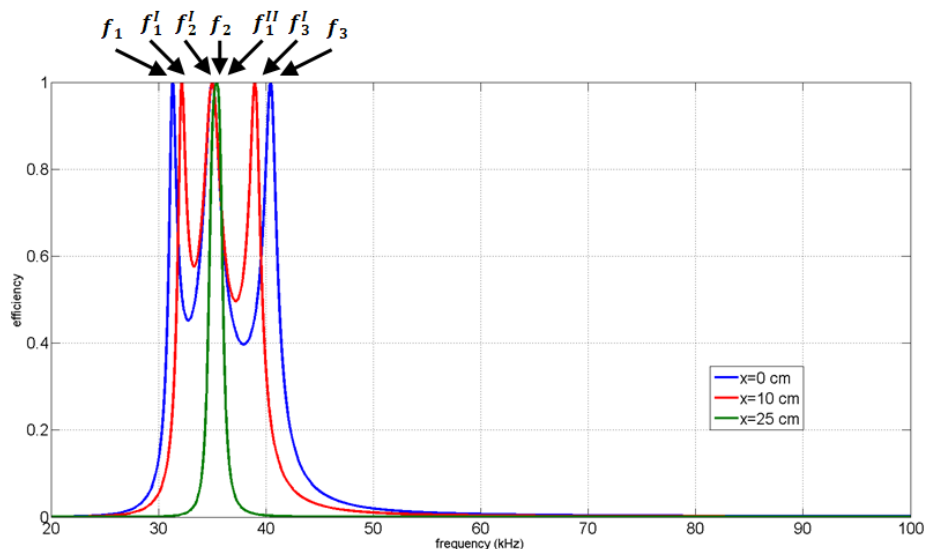
Για τις τοπολογίες **SS** και **PS**, παρατηρούμε ότι η μεταφερόμενη ισχύς μειώνεται σημαντικά σε μετατοπίσεις διάφορες της $x = 0 \text{ cm}$. Αντίθετα, για τις τοπολογίες **PP** και **SP**, η ισχύς μειώνεται λιγότερο σε μικρές μετατοπίσεις ($x = 10 \text{ cm}$) σε σχέση με μεγαλύτερες μετατοπίσεις ($x = 25 \text{ cm}$), όπου λαμβάνει μονοψήφιας τιμές.

4.3 Φαινόμενο Διακλάδωσης σε Διάφορες Μετατοπίσεις

Σε αυτήν την **Ενότητα** θα πραγματοποιηθεί μελέτη σχετικά με τη συμπεριφορά του **Φαινομένου Διακλάδωσης**, το οποίο παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 3**, σε διάφορες μετατοπίσεις.

4.3.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (**SS**)

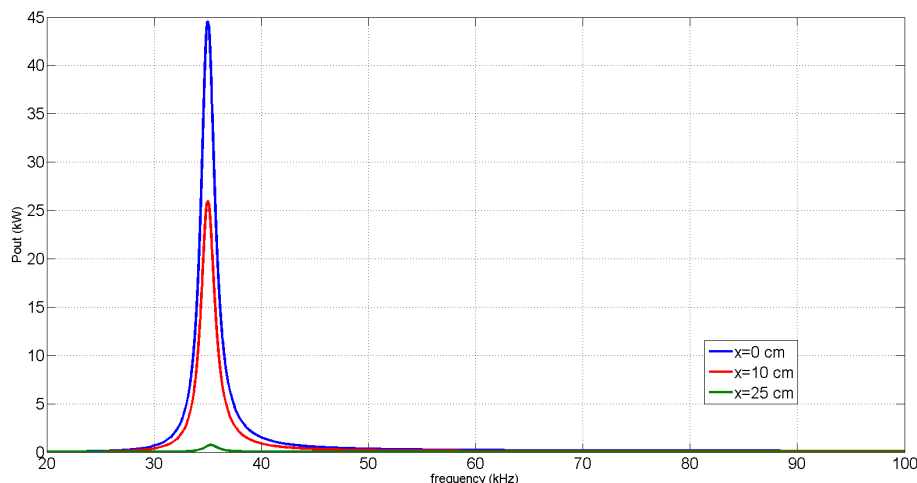
Για την τοπολογία αντιστάθμισης **SS**, έχουμε υπολογίσει στο **Κεφάλαιο 3** τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης σε συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$ στην περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$. Οι τιμές αυτές είναι ίσες με $C_1 = 78.923 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$, και υπολογίστηκαν με στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο. Είδαμε στο **Κεφάλαιο 3** ότι η απόδοση του συστήματος δε μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα των 35 kHz , αλλά και σε δύο επιπλέον συχνότητες, υποδεικνύοντας το **Φαινόμενο της Διακλάδωσης**.



Σχήμα 4.3-1: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (**SS**) στις περιπτώσεις Μετατόπισης: $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$

Διαφορετική, ωστόσο, συμπεριφορά, παρουσιάζεται όταν θεωρηθούν μετατοπίσεις διάφορες του $x = 0 \text{ cm}$. Συγκεκριμένα, στο **Σχήμα 4.3-1** παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος για τις επιπλέον περιπτώσεις μετατόπισης. Παρατηρούμε ότι για $x = 0 \text{ cm}$ και $x = 10 \text{ cm}$ η απόδοση μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνότητας, ενώ για $x = 25 \text{ cm}$ μεγιστοποιείται μόνο σε μία τιμή. Ο υπολογισμός των συχνοτήτων μεγιστοποίησης της απόδοσης πραγματοποιείται από τη σχέση (3.6) του **Κεφαλαίου 3** και για μηδενική μετατόπιση, όπως υπολογίστηκε στην **Υποενότητα 3.1.1**, η απόδοση μεγιστοποιείται για $f_1 = 31.323 \text{ kHz}$, $f_2 = 35 \text{ kHz}$ και $f_3 = 40.428 \text{ kHz}$. Για μετατόπιση $x = 10 \text{ cm}$, οι συχνότητες μεγιστοποίησης της απόδοσης είναι ίσες με $f_1^I = 32.173 \text{ kHz}$, $f_2^I = 34.993 \text{ kHz}$ και $f_3^I = 38.972 \text{ kHz}$, ενώ για $x = 25 \text{ cm}$ η απόδοση μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα $f_1^{II} = 35.415 \text{ kHz}$.

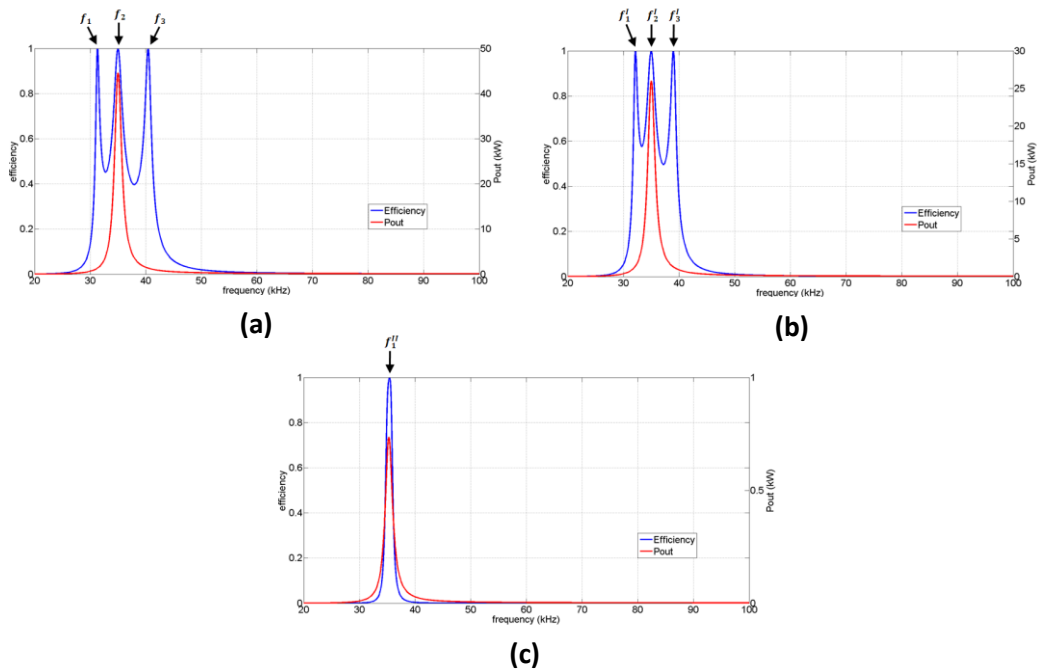
Παρατηρούμε, επομένως, ότι όσο αυξάνεται η μετατόπιση οι τρεις συχνότητες μεγιστοποίησης της απόδοσης τείνουν προς μία μόνο τιμή η οποία είναι κοντά στα 35 kHz . Πρέπει, βέβαια, να τονισθεί ότι η τιμή αυτή δεν είναι ίδια και για τις τρεις μετατοπίσεις που εξετάστηκαν. Συγκεκριμένα, για μετατοπίσεις $x = 0 \text{ cm}$ και $x = 10 \text{ cm}$ η συχνότητα αυτή είναι πολύ κοντά στα 35 kHz . Αντίθετα, για μεγαλύτερες μετατοπίσεις ($x = 25 \text{ cm}$) η συγκεκριμένη συχνότητα γίνεται ίση με 35.415 kHz .



Σχήμα 4.3-2: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στις περιπτώσεις Μετατόπισης: $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$

Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 4.3-2**), μεγιστοποιείται σε κοντινές συχνότητες και για τις τρεις περιπτώσεις μετατόπισης. Συγκεκριμένα, η συχνότητα αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.7) του **Κεφαλαίου 3** και για μετατοπίσεις ίσες με $x = 0 \text{ cm}$ και $x = 10 \text{ cm}$ είναι ίση με $f = f^I = 35.017 \text{ kHz}$, ενώ για τη μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$ είναι ίση με $f^{II} = 35.291 \text{ kHz}$.

Πολύ μεγάλη διαφορά, ωστόσο, παρατηρείται στην τιμή που λαμβάνει η μεταφερόμενη ισχύς για κάθε μετατόπιση. Η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου για μετατόπιση $x = 0 \text{ cm}$ είναι 44597.3 W . Για $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$ η μέγιστη τιμή είναι 26006.49 W και 735.49 W αντίστοιχα, δηλαδή 58.31% και 1.65% της μέγιστης τιμής όταν $x = 0 \text{ cm}$.



Σχήμα 4.3-3: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS) στην περίπτωση Μετατόπισης: (a) $x = 0 \text{ cm}$, (b) $x = 10 \text{ cm}$ και (c) $x = 25 \text{ cm}$

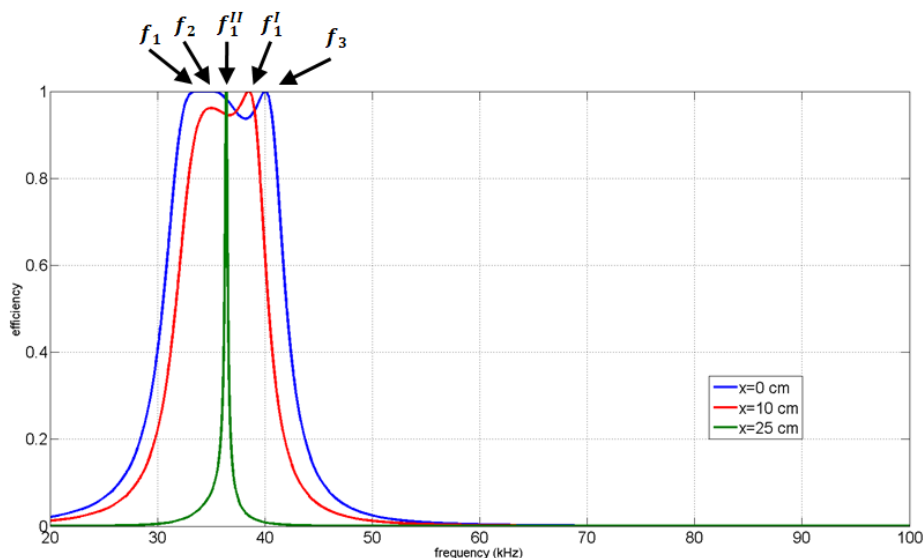
Στην τοπολογία **SS**, τόσο η απόδοση όσο και η μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιούνται σε παραπλήσιες συχνότητες, (**Σχήμα 4.3-3**), για τις εξεταζόμενες μετατοπίσεις. Συγκεκριμένα, όταν η μετατόπιση είναι ίση με $x = 0 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-3(a)**), η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιούνται στη συχνότητα 35 kHz και 35.017 kHz . Όταν η μετατόπιση είναι ίση με $x = 10 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-3(b)**), η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιούνται στη συχνότητα 34.993 kHz και 35.017 kHz . Αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται και για την περίπτωση μίας μετατόπισης ίσης με $x = 25 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-3(c)**), όπου η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιούνται στη συχνότητα 35.415 kHz και 35.291 kHz αντίστοιχα.

Στις συχνότητες f_1^I , f_2^I και f_3^I , όπου μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος όταν η μετατόπιση είναι ίση με $x = 10 \text{ cm}$, η ενεργός ισχύς εξόδου έχει τιμές 1393.53 W , 25981.41 W και 1284.83 W αντίστοιχα, δηλαδή περίπου 5.36% , 99.9% και 4.94% της μέγιστης τιμής της περίπτωσης αυτής. Αντίστοιχα, στην συχνότητα $f_1^{II} = 35.415 \text{ kHz}$, όπου μεγιστοποιείται η απόδοση όταν η μετατόπιση είναι ίση με $x = 25 \text{ cm}$, η ενεργός ισχύς είναι ίση 717.51 W , δηλαδή 97.56% της

μέγιστης τιμής της συγκεκριμένης μετατόπισης. Επομένως λειτουργία του συστήματος κοντά στη συχνότητα 35 kHz είναι ευνοϊκή για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις μετατόπισης.

4.3.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

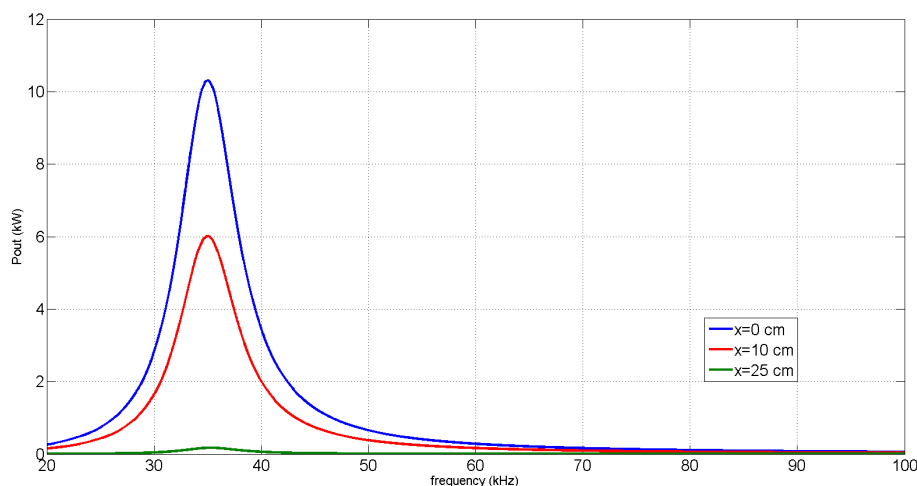
Για την τοπολογία αντιστάθμισης **PP**, έχουμε υπολογίσει στο **Κεφάλαιο 3** τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης σε συχνότητα $f = 35\text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 300\ \Omega$ στην περίπτωση όπου $x = 0\text{ cm}$. Οι τιμές αυτές είναι ίσες με $C_1 = 74.599\text{ nF}$ και $C_2 = 79.837\text{ nF}$, και υπολογίστηκαν με στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο. Είδαμε στο **Κεφάλαιο 3** ότι η απόδοση του συστήματος δεν μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα των 35 kHz , αλλά και σε δύο επιπλέον συχνότητες, υποδεικνύοντας το **Φαινόμενο της Διακλάδωσης**.



Σχήμα 4.3-4: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στις περιπτώσεις Μετατόπισης: $x = 0\text{ cm}$, $x = 10\text{ cm}$ και $x = 25\text{ cm}$

Για μετατοπίσεις διάφορες του $x = 0\text{ cm}$, η απόδοση παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά. Στο **Σχήμα 4.3-4** παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος για $x = 0\text{ cm}$, $x = 10\text{ cm}$ και $x = 25\text{ cm}$. Για $x = 0\text{ cm}$, σύμφωνα με την **Υποενότητα 3.1.2** του **Κεφαλαίου 3** και τη σχέση (3.10), η απόδοση μεγιστοποιείται στις συχνότητες $f_1 = 33.634\text{ kHz}$, $f_2 = 35\text{ kHz}$ και $f_3 = 40.032\text{ kHz}$. Στην περίπτωση όπου έχουμε μετατόπιση ίση με $x = 10\text{ cm}$, η απόδοση μεγιστοποιείται στη συχνότητα $f_1^l = 38.497\text{ kHz}$, ενώ στη συχνότητα $f_2^l = 34.995\text{ kHz}$ γίνεται ίση με $eff = 0.9616$. Αντίστοιχα, για $x = 25\text{ cm}$, η συχνότητα μεγιστοποίησης της απόδοσης είναι $f_1^{ll} = 36.398\text{ kHz}$.

Παρατηρούμε, δηλαδή ότι για μετατοπίσεις διάφορες του $x = 0 \text{ cm}$, η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται σε μία μόνο συχνότητα. Για τις τρεις μετατοπίσεις που εξετάστηκαν, οι τιμές της συχνότητας όπου μεγιστοποιείται η απόδοση είναι διαφορετικές μεταξύ τους.



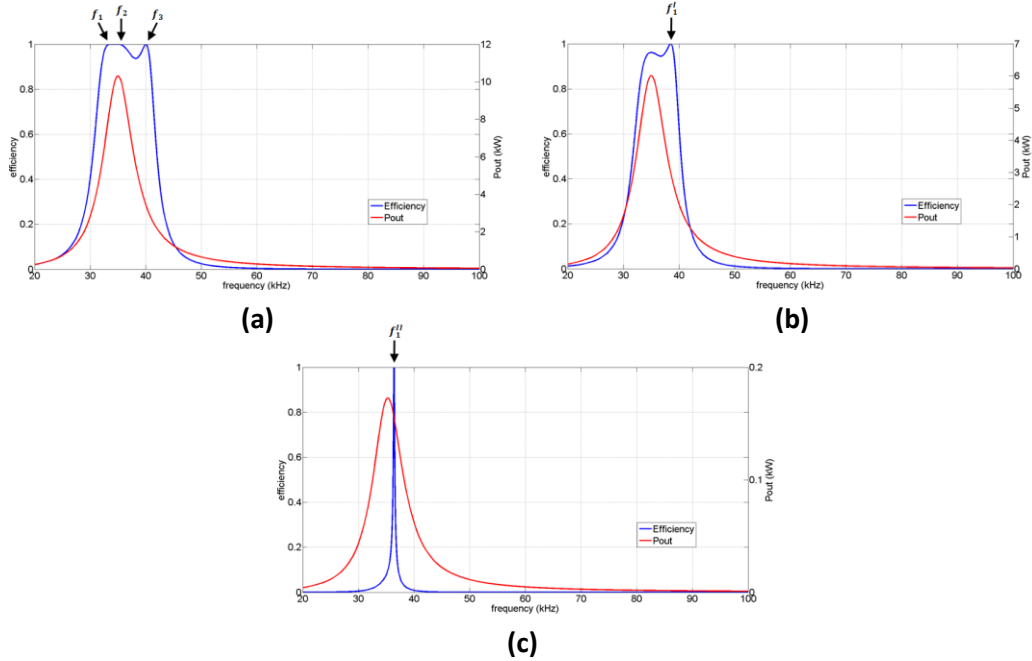
Σχήμα 4.3-5: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στις περιπτώσεις Μετατόπισης: $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$

Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 4.3-5**), μεγιστοποιείται σε μία μόνο συχνότητα. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.11) του **Κεφαλαίου 3**:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_2 \cdot L_2}}$$

Για μετατοπίσεις ίσες με $x = 0 \text{ cm}$ και $x = 10 \text{ cm}$ η συχνότητα αυτή είναι ίση με $f = f^I = 35 \text{ kHz}$, ενώ για τη μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$ είναι ίση με $f^{II} = 35.273 \text{ kHz}$.

Όπως και στην τοπολογία **SS**, η τιμή που λαμβάνει η μεταφερόμενη ισχύς μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της μετατόπισης. Η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου για μετατόπιση $x = 0 \text{ cm}$ είναι 10305.41 W . Για $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$ η μέγιστη τιμή είναι 6009.5 W και 172.62 W αντίστοιχα, δηλαδή 58.31% και 1.68% της μέγιστης τιμής όταν $x = 0 \text{ cm}$.

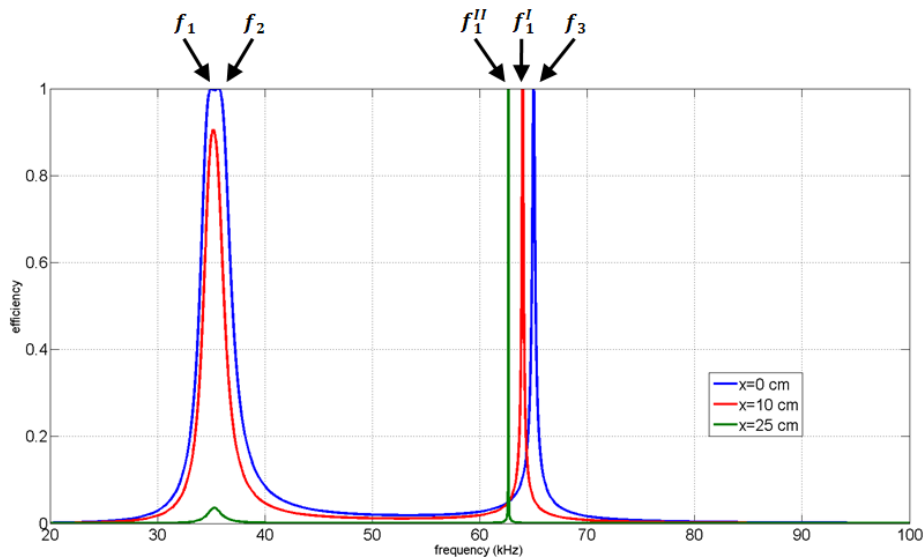


Σχήμα 4.3-6: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP) στην περίπτωση Μετατόπισης: (a) $x = 0 \text{ cm}$, (b) $x = 10 \text{ cm}$ και (c) $x = 25 \text{ cm}$

Η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιούνται στην ίδια συχνότητα μόνο όταν η μετατόπιση είναι ίση με $x = 0 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-6**). Όταν η μετατόπιση είναι ίση με $x = 10 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-6(b)**), στη συχνότητα $f_1^I = 38.497 \text{ kHz}$, όπου μεγιστοποιείται η απόδοση η ισχύς εξόδου είναι ίση με 2990.61 W , δηλαδή 49.76% της μέγιστης τιμής στην περίπτωση αυτή, Ωστόσο, στη συχνότητα $f_2^I = 34.995 \text{ kHz}$, όπου η απόδοση παρουσιάζει τοπικό μέγιστο και γίνεται ίση με $eff = 0.9616$, η ισχύς εξόδου είναι ίση με 6009.48 W , τιμή η οποία είναι πολύ κοντά στη μέγιστη στην συγκεκριμένη περίπτωση. Αντίστοιχα, για μετατόπιση ίση με $x = 25 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-6(c)**), στη συχνότητα $f_1^{II} = 36.398 \text{ kHz}$ η ισχύς εξόδου είναι ίση με 155.37 W , δηλαδή 90.01% της μέγιστης τιμής της περίπτωσης αυτής.

4.3.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

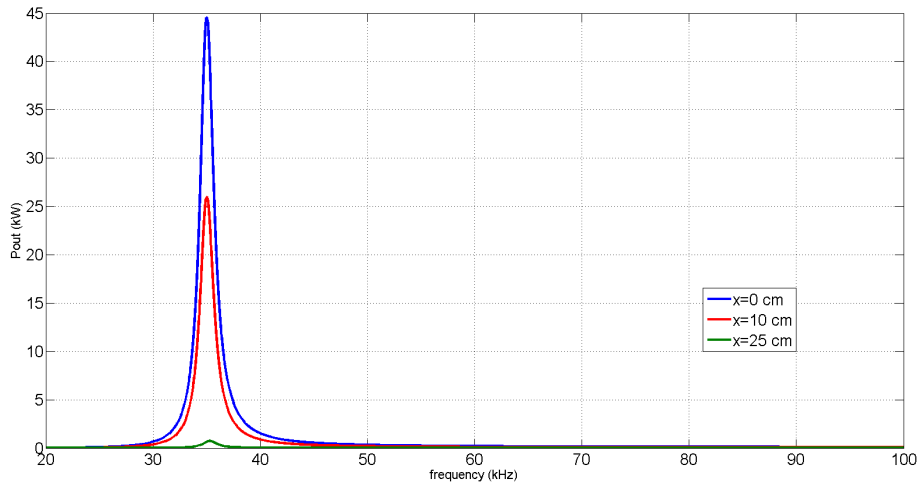
Στην τοπολογία αντιστάθμισης **PS** σε συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης για τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο, όπως έχουμε υπολογίσει στο **Κεφάλαιο 3**, είναι ίσες με $C_1 = 25.14 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$. Είδαμε στο **Κεφάλαιο 3** ότι η απόδοση του συστήματος δεν μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα των 35 kHz , αλλά και σε δύο επιπλέον συχνότητες, υποδεικνύοντας το **Φαινόμενο της Διακλάδωσης**.



Σχήμα 4.3-7: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στις περιπτώσεις Μετατόπισης: $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$

Στο **Σχήμα 4.3-7** παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος για μετατοπίσεις $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$. Παρατηρούμε ότι η απόδοση για $x = 0 \text{ cm}$ μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνότητας λειτουργίας, ενώ για $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$ μεγιστοποιείται μόνο σε μία τιμή συχνότητας. Συγκεκριμένα, για $x = 0 \text{ cm}$, σύμφωνα με την **Υποενότητα 3.1.3** του **Κεφαλαίου 3** και τη σχέση (3.14), οι συχνότητες μεγιστοποίησης της απόδοσης είναι $f_1 = 35 \text{ kHz}$, $f_2 = 35.673 \text{ kHz}$ και $f_3 = 65.013 \text{ kHz}$. Για $x = 10 \text{ cm}$, η απόδοση μεγιστοποιείται στη συχνότητα $f_1^I = 63.991 \text{ kHz}$, ενώ στη συχνότητα $f_2^I = 35.199 \text{ kHz}$ εμφανίζεται τοπικό μέγιστο όπου η απόδοση είναι ίση με $eff = 0.905$. Αντίστοιχα, για $x = 25 \text{ cm}$, η απόδοση μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα $f_1^{II} = 62.659 \text{ kHz}$.

Παρατηρούμε ότι οι συχνότητες f_1^I και f_1^{II} στις οποίες μεγιστοποιείται η απόδοση για μετατοπίσεις, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$ αντίστοιχα, έχουν πολύ μεγάλη διαφορά από τη συχνότητα των 35 kHz , στην οποία έχουμε υπολογίσει τους πυκνωτές για την αντιστάθμιση του συστήματος σε περίπτωση μετατόπισης $x = 0 \text{ cm}$. Είναι, επομένως, φανερό ότι η μετατόπιση συμβάλει καθοριστικά στη συχνότητα μεγιστοποίησης της απόδοσης, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τη σχεδίαση συστημάτων ελέγχου σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης.



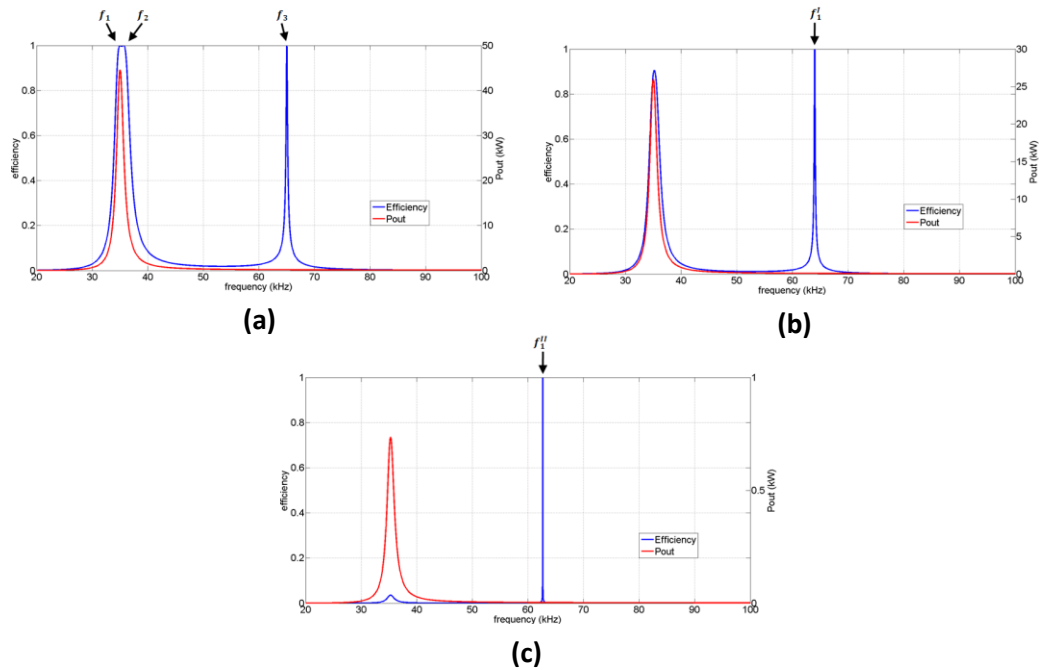
Σχήμα 4.3-8: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στις περιπτώσεις Μετατόπισης: $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$

Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 4.3-8**), μεγιστοποιείται σε μία τιμή συχνότητας λειτουργίας και για τις τρεις περιπτώσεις μετατόπισης. Η συχνότητα αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.7) του **Κεφαλαίου 3**:

$$\omega^2 = \frac{2}{2 \cdot L_2 \cdot C_2 - C_2^2 \cdot R_L^2}$$

Στις περιπτώσεις μετατόπισης ίσης με $x = 0 \text{ cm}$ και $x = 10 \text{ cm}$ η συχνότητα στην οποία μεγιστοποιείται η μεταφερόμενη ισχύς είναι ίση με $f = f^I = 35.017 \text{ kHz}$. Για $x = 25 \text{ cm}$ η συχνότητα όπου μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου είναι ίση με $f^{II} = 35.291 \text{ kHz}$.

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος παρουσιάζει σημαντικά μειωμένες τιμές σε μετατοπίσεις διάφορες του $x = 0 \text{ cm}$. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου για μετατόπιση $x = 0 \text{ cm}$ είναι 44597.3 W . Για $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$ η μέγιστη τιμή είναι 26006.49 W και 735.49 W αντίστοιχα, δηλαδή 58.31% και 1.65% της μέγιστης τιμής όταν $x = 0 \text{ cm}$. Το γεγονός αυτό οφείλεται εν μέρει στη μη σωστή επιλογή των πυκνωτών για διάφορες μετατοπίσεις, ωστόσο οφείλεται επίσης και στην ικανότητα μεταφοράς του συστήματος επαγωγικής φόρτισης, όπως περιγράφηκε στην **Ενότητα 4.2**.



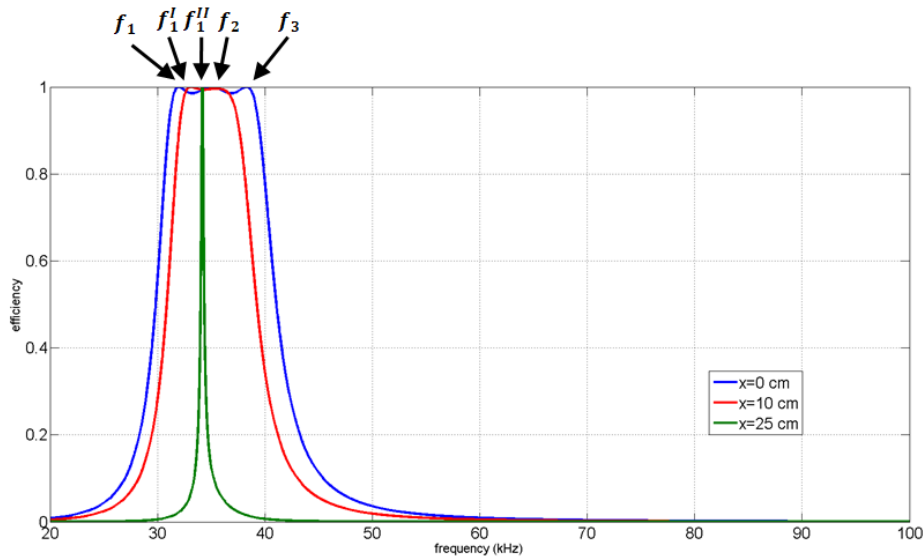
Σχήμα 4.3-9: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS) στην περίπτωση Μετατόπισης: (a) $x = 0 \text{ cm}$, (b) $x = 10 \text{ cm}$ και (c) $x = 25 \text{ cm}$

Η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιούνται σε παραπλήσιες συχνότητες μόνο όταν η μετατόπιση είναι ίση με $x = 0 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-9(a)**). Για μετατόπιση ίση με $x = 10 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-9(b)**), στη συχνότητα f_1^I , όπου μεγιστοποιείται η απόδοση του συστήματος, η ισχύς εξόδου είναι ίση με 101.84 W , δηλαδή μόλις 0.39% της μέγιστης τιμής στην περίπτωση αυτή, ενώ στην συχνότητα f_2^I , όπου η απόδοση παρουσιάζει τοπικό μέγιστο και γίνεται ίση με 90.5% , η ισχύς εξόδου είναι ίση με 24645.55 W , δηλαδή 94.77% της μέγιστης τιμής.

Αντίστοιχα, για $x = 25 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-9(c)**), στη μοναδική συχνότητα όπου μεγιστοποιείται η απόδοση, f_1^{II} , η ισχύς εξόδου είναι ίση με μόνο 3.08 W , δηλαδή 0.42% της μέγιστης τιμής στη περίπτωση αυτή. Παρόμοια, στη συχνότητα f^{II} , όπου η ισχύς εξόδου λαμβάνει τη μέγιστή της τιμή, η απόδοση είναι μικρότερη από 0.04 .

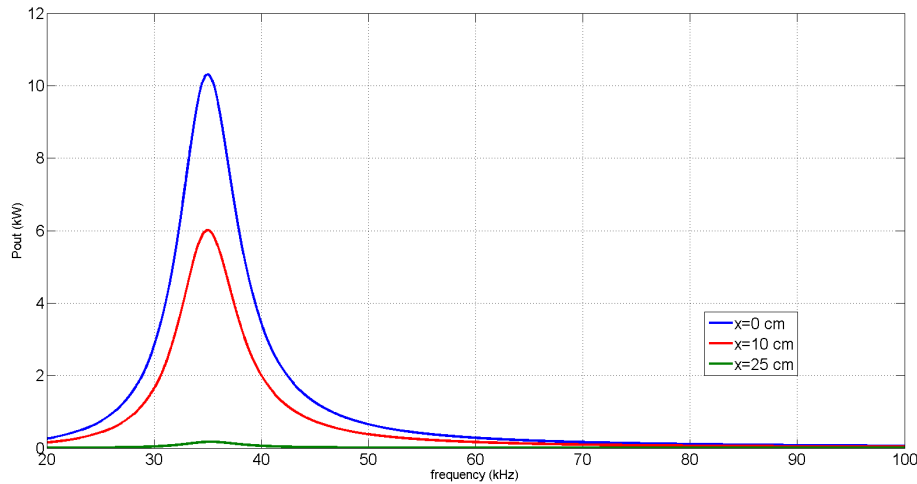
4.3.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Στην τοπολογία αντιστάθμισης **SP** για συχνότητα $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, για τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο όπως έχουμε υπολογίσει στο **Κεφάλαιο 3**, είναι ίσες με $C_1 = 84.34 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.837 \text{ nF}$. Είδαμε στο **Κεφάλαιο 3**, και όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 4.3-10**, ότι η απόδοση του συστήματος δεν μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα των $f_2 = 35 \text{ kHz}$, αλλά και σε δύο επιπλέον συχνότητες $f_1 = 31.985 \text{ kHz}$, και $f_3 = 38.299 \text{ kHz}$, υποδεικνύοντας το **Φαινόμενο της Διακλάδωσης**.



Σχήμα 4.3-10: Απόδοση του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στις περιπτώσεις Μετατόπισης: $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$

Στο **Σχήμα 4.3-10** παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος για τιμές μετατόπισης ίσες με $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$. Παρατηρούμε ότι η απόδοση για την περίπτωση μηδενικής μετατόπισης μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνότητας λειτουργίας, ενώ για μεγαλύτερες τιμές μετατόπισης οι τρεις αυτές συχνότητες «τείνουν» προς τη συχνότητα των 35 kHz . Συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου η μετατόπιση είναι ίση με $x = 10 \text{ cm}$, η απόδοση μεγιστοποιείται στη συχνότητα $f_1^I = 33.108 \text{ kHz}$. Ωστόσο, μεγάλες τιμές της απόδοσης παρατηρούνται μεταξύ 32 kHz και 38 kHz : Στο εύρος αυτό των συχνοτήτων η απόδοση είναι μεγαλύτερη από 85 %. Σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις, ωστόσο, η απόδοση μεγιστοποιείται μόνο σε μία τιμή συχνότητας. Συγκεκριμένα, σε μετατόπιση $x = 25 \text{ cm}$, η απόδοση μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα $f_1^{II} = 34.174 \text{ kHz}$.



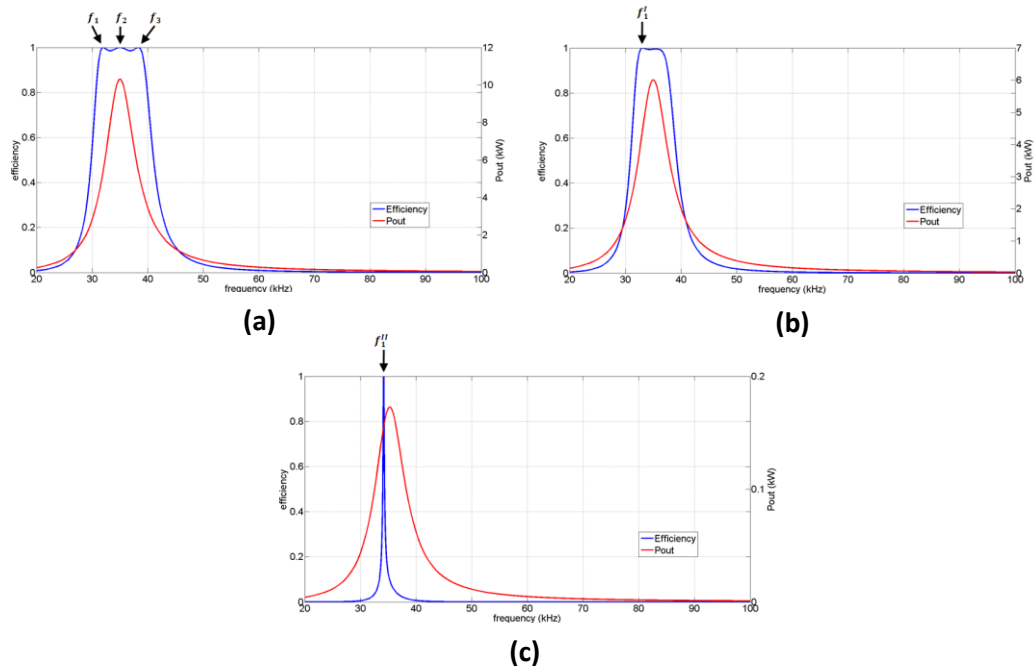
Σχήμα 4.3-11: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στις περιπτώσεις Μετατόπισης: $x = 0 \text{ cm}$, $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$

Η ενεργός ισχύς εξόδου, (**Σχήμα 4.3-11**), εμφανίζει μία τιμή συχνότητας στην οποία μεγιστοποιείται για κάθε περίπτωση μετατόπισης. Η τιμή αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.11) του **Κεφαλαίου 3**:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C_2 \cdot L_2}}$$

Για $x = 0 \text{ cm}$ και $x = 10 \text{ cm}$ η συχνότητα μεγιστοποίησης της ισχύος εξόδου είναι ίση με $f = f^I = 35 \text{ kHz}$. Για $x = 25 \text{ cm}$ η συχνότητα όπου μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου είναι ίση με $f^{II} = 35.273 \text{ kHz}$.

Η μεταφερόμενη ισχύς σε μετατοπίσεις διάφορες του $x = 0 \text{ cm}$ παρουσιάζει σημαντικά μειωμένες τιμές. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος εξόδου για μετατόπιση $x = 0 \text{ cm}$ είναι 10305.41 W . Για $x = 10 \text{ cm}$ και $x = 25 \text{ cm}$ η μέγιστη τιμή είναι 6009.5 W και 172.62 W αντίστοιχα, δηλαδή 58.31% και 1.68% της μέγιστης τιμής όταν $x = 0 \text{ cm}$. Όπως περιγράφηκε στην **Ενότητα 4.2**, το γεγονός αυτό οφείλεται εν μέρει στη μη σωστή επιλογή των πυκνωτών για διάφορες μετατοπίσεις, ωστόσο οφείλεται και στην ικανότητα μεταφοράς του συστήματος επαγωγικής φόρτισης.



Σχήμα 4.3-12: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου συναρτήσει της Συχνότητας για την Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP) στην περίπτωση Μετατόπισης: (a) $x = 0 \text{ cm}$, (b) $x = 10 \text{ cm}$ και (c) $x = 25 \text{ cm}$

Η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιούνται στην ίδια συχνότητα μόνο στη μηδενική μετατόπιση, (**Σχήμα 4.3-12**). Για μετατόπιση ίση με $x = 10 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-12(b)**), στη συχνότητα f_1^I , όπου μεγιστοποιείται η απόδοση, η ισχύς εξόδου είναι ίση με 4474.45 W , δηλαδή 74.46% της μέγιστης τιμής στην περίπτωση αυτή. Ωστόσο, σε συχνότητες κοντά στα 35 kHz η απόδοση, αν και δε μεγιστοποιείται, λαμβάνει αρκετά μεγάλες τιμές. Για παράδειγμα, στη συχνότητα των 35.497 kHz , όπου η απόδοση είναι ίση με 0.9961 , η ισχύς εξόδου είναι ίση με 5879.77 W , δηλαδή 97.84% της μέγιστης τιμής. Επομένως είναι ευνοϊκή η λειτουργία του συστήματος σε μία συχνότητα κοντά στα 35 kHz .

Για $x = 25 \text{ cm}$, (**Σχήμα 4.3-12(c)**), η απόδοση μεγιστοποιείται σε μία μόνο συχνότητα $f_1^{II} = 34.174 \text{ kHz}$. Στη συχνότητα αυτή, η ισχύς εξόδου είναι ίση με 105.09 W , δηλαδή 89.84% της μέγιστης τιμής στην περίπτωση αυτή. Αντίθετα, για $f_1^{II} = 35.273 \text{ kHz}$, όπου μεγιστοποιείται η μεταφερόμενη ισχύς η απόδοση είναι ίση με 9.57% .

Επομένως, αν και μία συχνότητα λειτουργίας κοντά στα 35 kHz είναι ευνοϊκή για τη λειτουργία του συστήματος σε μικρές μετατοπίσεις ($x = 0 \text{ cm}$ και $x = 10 \text{ cm}$), οδηγεί ωστόσο σε πολύ μικρά ποσοστά απόδοσης στην περίπτωση μεγάλων μετατοπίσεων ($x = 25 \text{ cm}$).

Κεφάλαιο 5^ο: Συμπεριφορά των Βασικών Τοπολογιών Αντιστάθμισης στη Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση

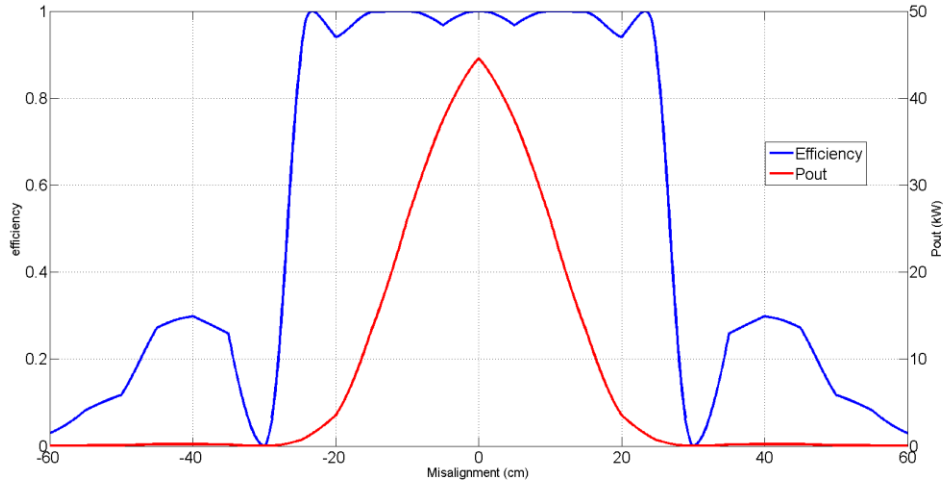
Στα προηγούμενα **Κεφάλαια** μελετήθηκε η στατική επαγωγική φόρτιση σε διάφορες τιμές μετατόπισης μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος συζεύκτη, και η μηδενική μετατόπιση κατά την οποία οι δύο συζεύκτες είναι τέλεια ευθυγραμμισμένοι. Συγκεκριμένα, παρατηρήσαμε ότι η μετατόπιση μεταξύ των δύο συζευκτών μπορεί να προκαλέσει σημαντική μεταβολή στις τιμές της μεταφερόμενης ισχύος και της απόδοσης του συστήματος. Στη δυναμική επαγωγική φόρτιση, οι δύο συζεύκτες είναι αδύνατο να είναι συνέχεια ευθυγραμμισμένοι καθώς κινείται το ηλεκτρικό όχημα, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές διακυμάνσεις στις τιμές της μεταφερόμενης ισχύος και της απόδοσης.

Στην **Ενότητα** αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τεσσάρων βασικών τοπολογιών αντιστάθμισης σε σταθερή συχνότητα λειτουργίας για ένα μεγάλο εύρος μετατόπισης μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, καθώς το Ηλεκτρικό Όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή στη δυναμική φόρτιση.

5.1 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Όπως αναφέρθηκε και στην **Ενότητα 2.1** του **Κεφαλαίου 2**, θεωρούμε ότι το ρεύμα στο πηνίο του πρωτεύοντος της εξεταζόμενης διάταξης είναι σταθερό και ίσο με $|\tilde{I}_1| = 23 A$. Οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων R_1 και R_2 , σύμφωνα με τα συμπεράσματα της **Ενότητας 2.3** του **Κεφαλαίου 2**, μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές χωρίς να υπάρχει σημαντική αλλοίωση στα αποτελέσματα.

Στην τοπολογία **SS**, για μία συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 35 kHz$ και μία αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$, στην περίπτωση όπου $x = 0 cm$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , μπορούν να επιλεγθούν ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή είναι: $C_1 = 78.92 nF$ και $C_2 = 79.84 nF$.



Σχήμα 5.1-1: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

Στο **Σχήμα 5.1-1** παρουσιάζεται η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος συναρτήσει της μετατόπισης x . Η απόδοση στην περίπτωση αυτή δεν εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα, όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, αλλά εξαρτάται επίσης και από τη μετατόπιση. Συγκεκριμένα, η απόδοση δίνεται από τη σχέση:

$$eff = \frac{|S_{out}|}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (5.1)$$

, όπου:

$$P_{out} = P_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{R_L^2 + (\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2})^2} \quad (5.2)$$

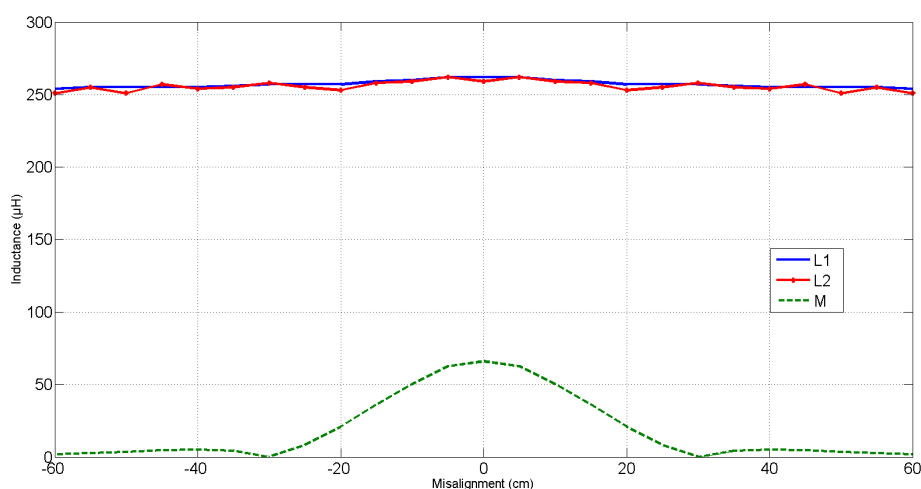
και

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2})}{R_L^2 + (\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2})^2} \right) \quad (5.3)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εκφράσεις η απόδοση εξαρτάται από τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M , οι οποίες είναι συνάρτηση της μετατόπισης. Σε περίπτωση σταθερής συχνότητας λειτουργίας, για την μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος θα πρέπει η άεργος ισχύς εισόδου να είναι ίση με μηδέν:

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2})}{R_L^2 + (\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2})^2} \right) = 0 \quad (5.4)$$

Σύμφωνα με το **Κεφάλαιο 2**, οι τιμές των επαγωγών των πηνίων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, L_1 και L_2 , και η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των πηνίων, M , μεταβάλλονται με την οριζόντια μετατόπιση, x , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5.1-2**.



Σχήμα 5.1-2: Μεταβολή των τιμών των Επαγωγών L_1 , L_2 και M συναρτήσει της Μετατόπισης x

Είναι ιδιαίτερα δύσκολο να βρεθεί μία μαθηματική έκφραση για τις τιμές των επαγωγών σε όλο το εύρος μετατοπίσεων. Ωστόσο, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι για μία περιοχή από $x = -20 \text{ cm}$ ως $x = 20 \text{ cm}$, οι τιμές των L_1 , L_2 και M μεταβάλλονται συναρτήσει της μετατόπισης x με τη μορφή ενός πολυώνυμου 2^{ου} βαθμού. Συνεπώς, οι τιμές των επαγωγών στην περιοχή αυτή θα δίνονται από σχέσεις της μορφής:

$$H(x) = a_H \cdot x^2 + b_H \cdot x + c_H \quad (5.5)$$

,όπου το $H(x)$ υποδηλώνει τα L_1 , L_2 και M , και a_H , b_H και c_H είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου.

Οι τιμές των συντελεστών a_H , b_H και c_H για τις τρεις επαγωγές, L_1 , L_2 και M , μπορούν να υπολογισθούν μέσω του περιβάλλοντος αριθμητικής υπολογιστικής Matlab με χρήση της συνάρτησης cftool. Η διαδικασία εξαγωγής των τιμών των συντελεστών περιγράφεται στο **Παράρτημα Α**. Στον **Πίνακα 5.1-1** παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών της (5.5) για μία περιοχή μετατόπισης x από -20 cm ως 20 cm .

	a_H	b_H	c_H
L_1	$-1.255 \cdot 10^{-8}$	$5.082 \cdot 10^{-23}$	0.0002619
L_2	$-1.957 \cdot 10^{-8}$	$-6.505 \cdot 10^{-22}$	0.0002614
M	$-1.113 \cdot 10^{-7}$	$1.826 \cdot 10^{-22}$	$6.371 \cdot 10^{-5}$

Πίνακας 5.1-1: Τιμές των Συντελεστών των Επαγωγών L_1 , L_2 και M

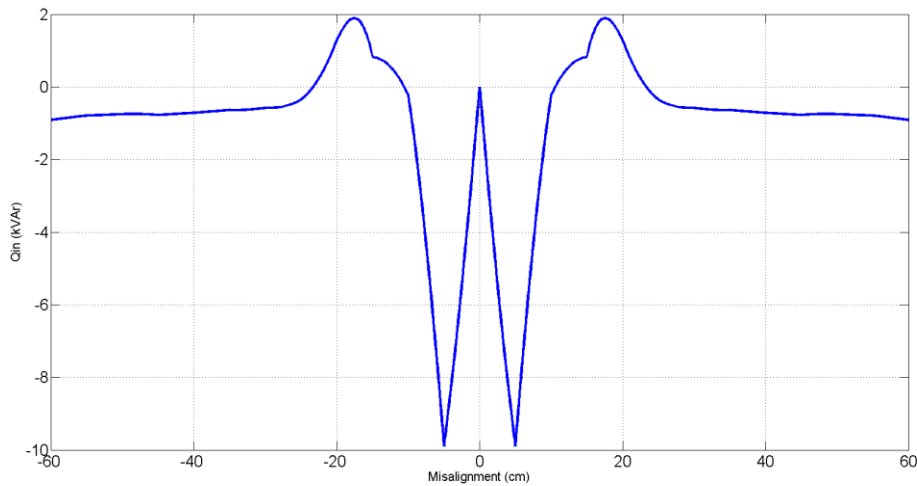
Αντικαθιστώντας τα L_1 , L_2 και M στη σχέση (5.4) προκύπτει ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού ως προς τη μετατόπιση x :

$$A_6 \cdot x^6 + A_5 \cdot x^5 + A_4 \cdot x^4 + A_3 \cdot x^3 + A_2 \cdot x^2 + A_1 \cdot x + A_0 = 0 \quad (5.6)$$

, όπου οι τιμές των συντελεστών A_6 , A_5 , A_4 , A_3 , A_2 , A_1 και A_0 υπολογίζονται από τις σχέσεις του Πίνακα Β.1 του Παραρτήματος Β.

Επομένως, σύμφωνα με την (5.6) ενδέχεται να υπάρχουν ως και έξι διαφορετικές τιμές της μετατόπισης x όπου η απόδοση μεγιστοποιείται.

Στο Σχήμα 5.1-3 παρατηρούμε ότι η άεργος ισχύς εισόδου μηδενίζεται σε μετατοπίσεις ίσες με -23.3 cm , -10.6 cm , 0 cm , 10.6 cm και 23.3 cm . Τα σημεία αυτά αντιστοιχούν στη μεγιστοποίηση της απόδοσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1-1.



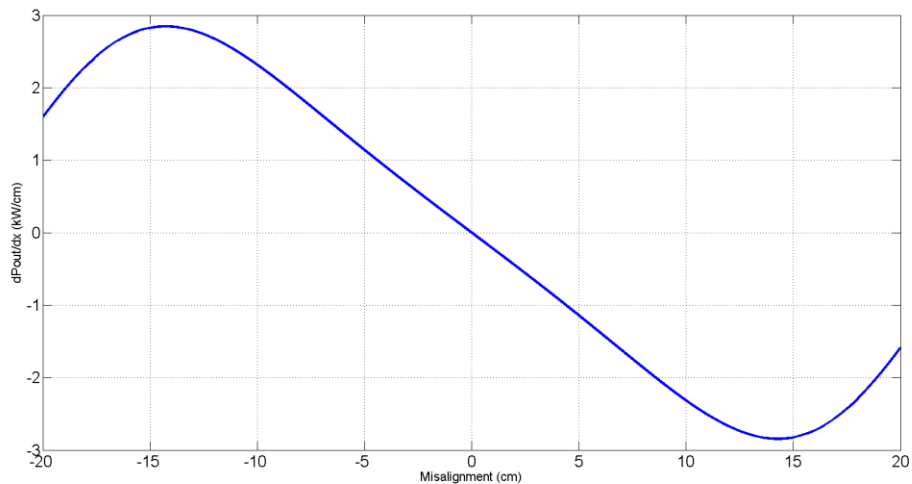
Σχήμα 5.1-3: Άεργος Ισχύς Εισόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

Η μεταφερόμενη ισχύς, (5.2), εξαρτάται από τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M . Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να βρεθεί μία μαθηματική έκφραση για τις τιμές των επαγωγών σε όλο το εύρος μετατοπίσεων. Ωστόσο, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι για μία περιοχή από $x = -20 \text{ cm}$ ως $x = 20 \text{ cm}$, οι τιμές των L_1 , L_2 και M μεταβάλλονται συναρτήσει της μετατόπισης x με τη μορφή ενός πολυώνυμου 2^{ου} βαθμού, όπως δίνεται στη σχέση (5.5).

Για να βρούμε τη τιμή της μετατόπισης όπου η ισχύς μεγιστοποιείται, αρκεί να βρούμε που μηδενίζεται η παράγωγος της ισχύος ως προς τη μετατόπιση x , $\partial P_{out} / \partial x$:

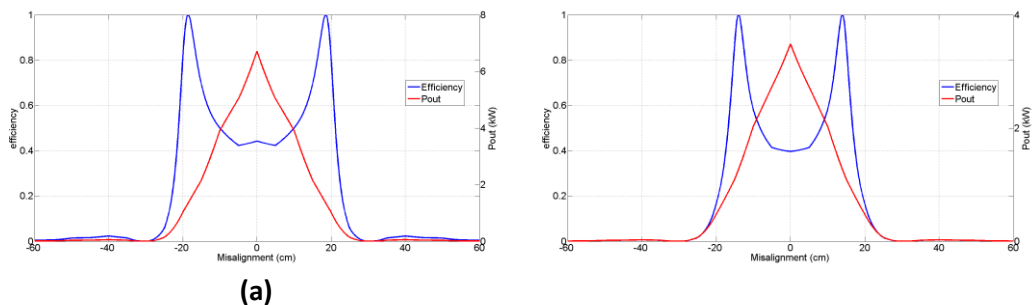
$$\frac{\partial P_{out}}{\partial x} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{2 \cdot \omega^2 \cdot M(x) \cdot M'(x) \cdot R_L \cdot \left(R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2(x) - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2 \right) - 2 \cdot \omega^3 \cdot M^2(x) \cdot R_L \cdot \left(\omega \cdot L_2(x) - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right) \cdot L_2'(x)}{\left(R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2(x) - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2 \right)^2} \quad (5.7)$$

Αντικαθιστούμε τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M , με τις αντίστοιχες σχέσεις της μορφής της (5.5) στην σχέση (5.7). Από το **Σχήμα 5.1-4** παρατηρούμε ότι η παράγωγος της ισχύος μηδενίζεται σε μετατόπιση ίση με $x = 0 \text{ cm}$, ενώ είναι θετική-αρνητική πριν και μετά τη θέση $x = 0 \text{ cm}$ αντίστοιχα. Κατά συνέπεια αναμένεται η ύπαρξη μεγίστου στη θέση $x = 0 \text{ cm}$, κάτι που επιβεβαιώνεται και από το **Σχήμα 5.1-1**.



Σχήμα 5.1-4: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

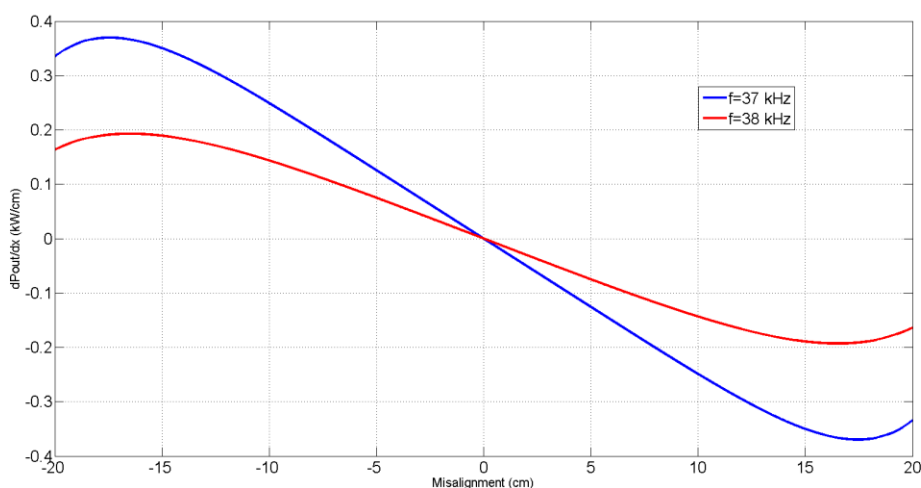
Η λειτουργία του συστήματος σε συχνότητες διαφορετικές των 35 kHz , ενδέχεται να προκαλέσει διακυμάνσεις στις τιμές τόσο της απόδοσης όσο και της μεταφερόμενης ισχύος σε όλο το εύρος της μετακίνησης του Ηλεκτρικού Οχήματος. Συγκεκριμένα, μεταβάλλουμε τη συχνότητα λειτουργίας σε 37 kHz και 38 kHz , και τα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση και τη μεταφερόμενη ισχύ δίνονται στα **Σχήματα 5.1-5(a)** και **(b)**.



Σχήμα 5.1-5: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας (a) $f = 37 \text{ kHz}$, (b) $f = 38 \text{ kHz}$, και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

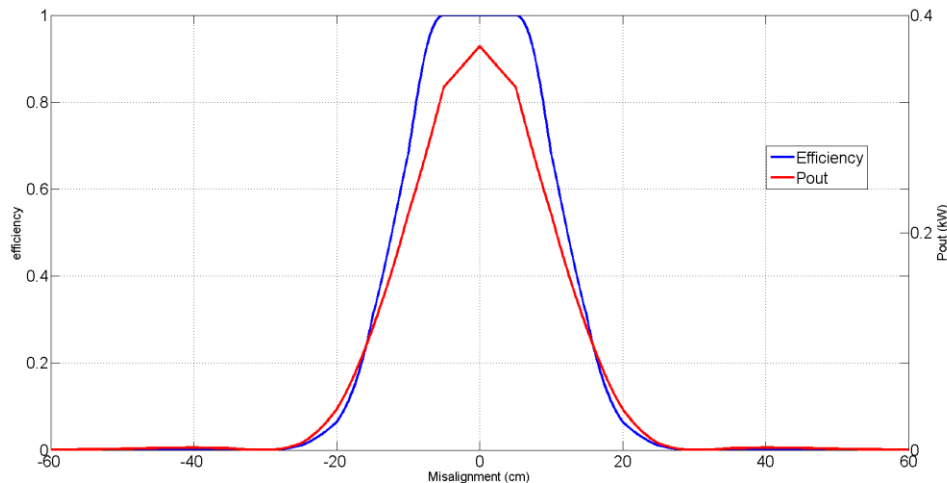
Για συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 37 \text{ kHz}$, (**Σχήμα 5.1-5(a)**), η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται για μετατοπίσεις ίσες με -18.57 cm και 18.57 cm . Αντίστοιχα, για συχνότητα λειτουργίας $f = 38 \text{ kHz}$, (**Σχήμα 5.1-5(b)**), η απόδοση μεγιστοποιείται για μετατοπίσεις ίσες με -13.99 cm και 13.99 cm . Είναι φανερό ότι για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας του συστήματος, η απόδοση δεν μεγιστοποιείται στις ίδιες τιμές μετατόπισης x .

Η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος για συχνότητα λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$, σύμφωνα με το **Σχήμα 5.1-1**, είναι ίση με 44575.82 W . Για $f = 37 \text{ kHz}$ η μέγιστη τιμή της ισχύος είναι 6715.51 W , ενώ για $f = 38 \text{ kHz}$ είναι ίση με 3485.93 W . Οι τιμές αυτές είναι ίση με το 15.07% και 7.82% αντίστοιχα, της τιμής όταν η συχνότητα λειτουργίας είναι $f = 35 \text{ kHz}$. Παρατηρούμε, επομένως, ότι η μέγιστη τιμή της ισχύος μειώνεται σημαντικά με τη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας. Από το **Σχήμα 5.1-6**, παρατηρούμε ότι η παράγωγος της ισχύος μηδενίζεται για $x = 0 \text{ cm}$, ενώ το πρόσημο της παραγώγου υποδεικνύει την ύπαρξη μεγίστου τόσο για $f = 37 \text{ kHz}$ όσο και για $f = 38 \text{ kHz}$. Πράγματι, η ισχύς, (**Σχήμα 5.1-5**), μεγιστοποιείται για την περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$.



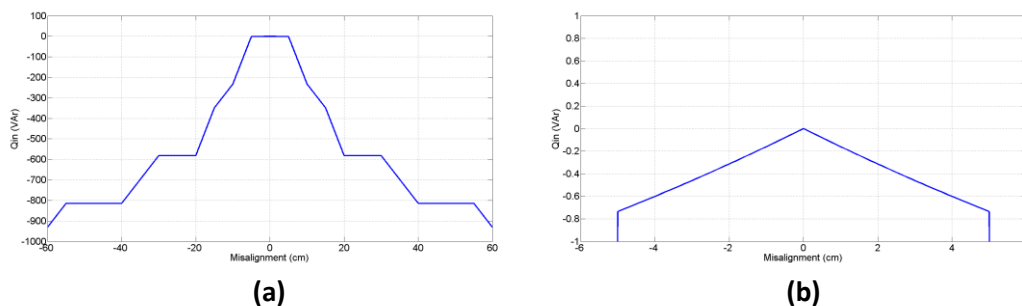
Σχήμα 5.1-6: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητες Λειτουργίας $f = 37 \text{ kHz}$ και $f = 38 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

Εξάρτηση τόσο της απόδοσης όσο και της ισχύος αναμένεται επίσης, σύμφωνα και με τα συμπεράσματα προηγούμενων **Κεφαλαίων**, από τη μεταβολή της αντίστασης φορτίου. Για ένα φορτίο ίσο με $R_L = 300 \Omega$, η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς καθώς το Ηλεκτρικό Όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, δίνεται στο **Σχήμα 5.1-7**.



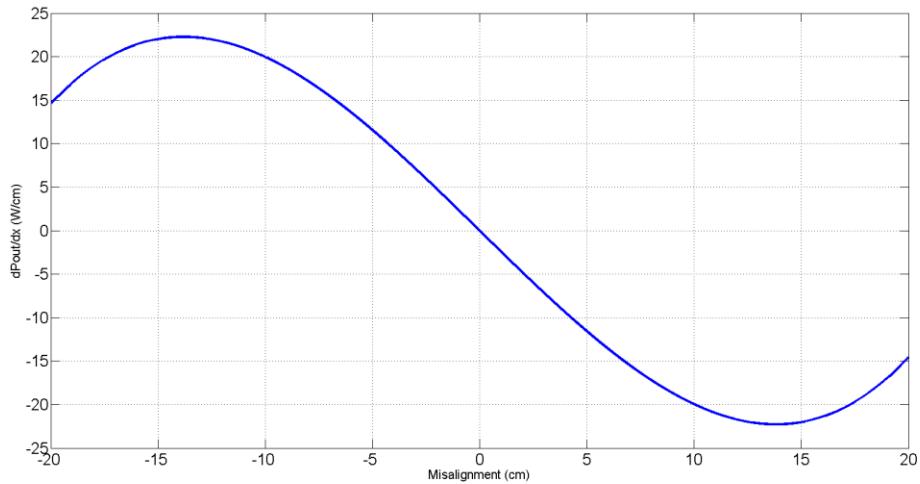
Σχήμα 5.1-7: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Παρατηρούμε ότι για αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 300 \Omega$, η απόδοση του συστήματος, στην περιοχή -5 cm ως 5 cm , λαμβάνει τιμές κοντά στην μονάδα. Αντίστοιχη εικόνα παρατηρούμε και από το **Σχήμα 5.1-8(a)**, της άεργος ισχύος εισόδου του συστήματος συναρτήσει της μετατόπισης x , όπου η άεργος λαμβάνει σχεδόν μηδενικές τιμές στην περιοχή -5 cm ως 5 cm . Εξετάζοντας, πιο προσεκτικά στην περιοχή αυτή, (**Σχήμα 5.1-8(b)**), παρατηρούμε ότι η άεργος ισχύς μηδενίζεται μόνο στο $x = 0 \text{ cm}$.



Σχήμα 5.1-8: Άεργος Ισχύς Εισόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$: (a) στην περιοχή -60 cm ως 60 cm , (b) στην περιοχή -6 cm ως 6 cm

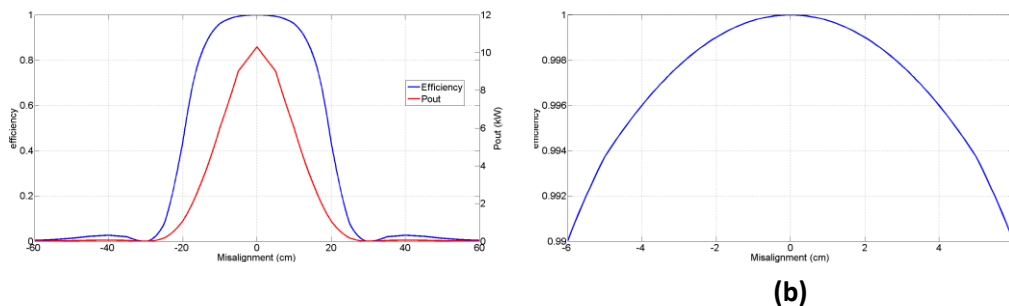
Η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος παρουσιάζει αξιοσημείωτη μείωση σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή στην περίπτωση που η αντίσταση φορτίου είναι ίση με $R_L = 2.5 \Omega$. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή είναι 371.46 W , η οποία είναι ίση με μόνο 0.83% της αντίστοιχη τιμής όταν $R_L = 2.5 \Omega$. Αντίθετα, η μετατόπιση x όπου μεγιστοποιείται η ισχύς δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της αντίστασης του φορτίου, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 5.1-7** και **5.1-9**.



Σχήμα 5.1-9: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

5.2 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

Στην τοπολογία **PP**, για μία συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 35 \text{ kHz}$ και μία αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$, στην περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , μπορούν να επιλεγθούν ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή είναι: $C_1 = 74.599 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.84 \text{ nF}$.



Σχήμα 5.2-1: (α) Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$, (β) Απόδοση του Συστήματος στην περιοχή -6 cm ως 6 cm

Στο Σχήμα 5.2-1(a) παρουσιάζεται η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος συναρτήσει της μετατόπισης x . Η απόδοση στην περίπτωση αυτή δεν εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα, όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, αλλά εξαρτάται επίσης και από τη μετατόπιση. Συγκεκριμένα, η απόδοση δίνεται από τη σχέση:

$$eff = \frac{|S_{out}|}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (5.8)$$

, όπου:

$$P_{out} = P_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \quad (5.9)$$

και

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot [\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} - \omega \cdot C_1 \cdot \left(\frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \right)^2] \quad (5.10)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εκφράσεις η απόδοση εξαρτάται από τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M , οι οποίες είναι συνάρτηση της μετατόπισης. Σε περίπτωση σταθερής συχνότητας λειτουργίας, για την μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος θα πρέπει η άεργος ισχύς εισόδου να είναι ίση με μηδέν:

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot [\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} - \omega \cdot C_1 \cdot \left(\frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \right)^2] = 0 \quad (5.11)$$

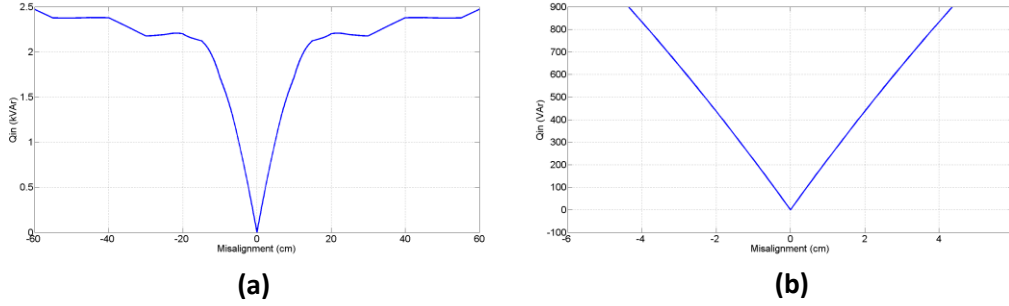
Αντικαθιστώντας τα L_1 , L_2 και M στη μορφή της (5.5) στη σχέση (5.11) προκύπτει ένα πολυώνυμο 8^{ου} βαθμού ως προς τη μετατόπιση x :

$$A_8 \cdot x^8 + A_7 \cdot x^7 + A_6 \cdot x^6 + A_5 \cdot x^5 + A_4 \cdot x^4 + A_3 \cdot x^3 + A_2 \cdot x^2 + A_1 \cdot x + A_0 = 0 \quad (5.12)$$

, όπου οι τιμές των συντελεστών A_8 , A_7 , A_6 , A_5 , A_4 , A_3 , A_2 , A_1 και A_0 υπολογίζονται από τις σχέσεις του Πίνακα Β.2 του Παραρτήματος Β.

Επομένως, σύμφωνα με την (5.12) ενδέχεται να υπάρχουν ως και οχτώ διαφορετικές τιμές της μετατόπισης x όπου η απόδοση μεγιστοποιείται.

Στα Σχήματα 5.2-2(a) και (b) παρατηρούμε ότι η άεργος ισχύς εισόδου μηδενίζεται μόνο στη μηδενική μετατόπιση, 0 cm. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη μεγιστοποίηση της απόδοσης, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.2-1(a) και (b).

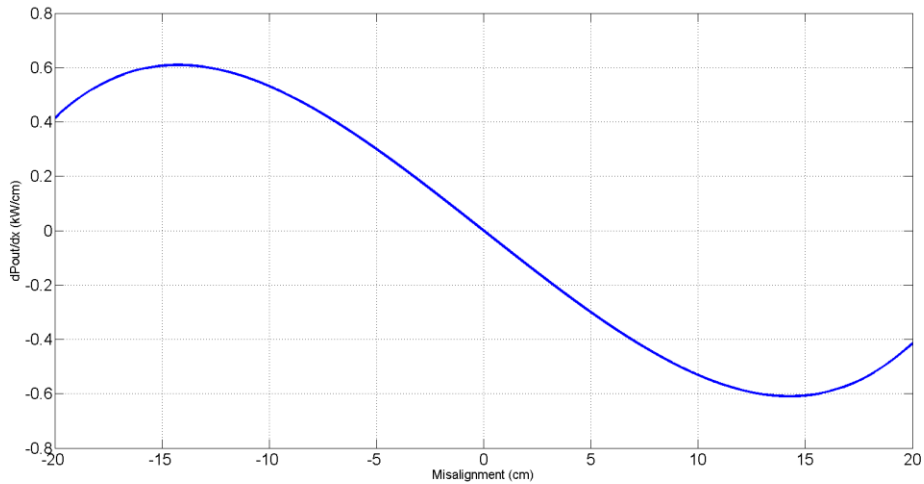


Σχήμα 5.2-2: Άεργος Ισχύς Εισόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$: (a) στην περιοχή -60 cm ως 60 cm , (b) στην περιοχή -6 cm ως 6 cm

Για να βρούμε τη τιμή της μετατόπισης όπου η μεταφερόμενη ισχύς, (5.9), μεγιστοποιείται, αρκεί να βρούμε που μηδενίζεται η παράγωγος της ισχύος ως προς τη μετατόπιση x , $\partial P_{out} / \partial x$. Έχοντας θεωρήσει ότι οι τιμές των L_1 , L_2 και M μεταβάλλονται συναρτήσει της μετατόπισης x με τη μορφή ενός πολυώνυμου $2^{\text{ου}}$ βαθμού, όπως δίνεται στη σχέση (5.5), για μία περιοχή από $x = -20 \text{ cm}$ ως $x = 20 \text{ cm}$, προκύπτει ότι:

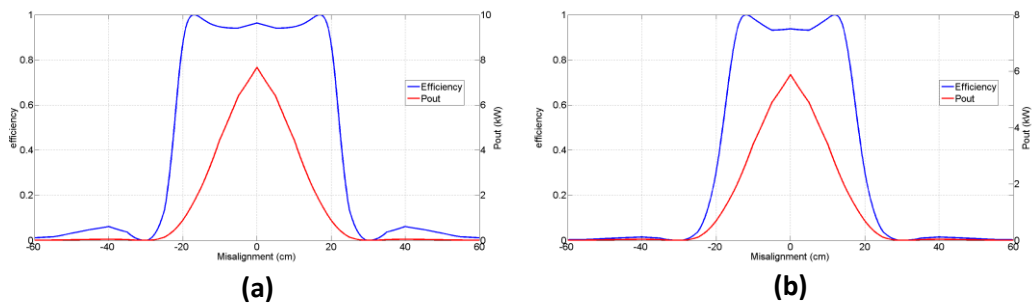
$$\frac{\partial P_{out}}{\partial x} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \omega^2 \cdot M(x) \cdot M'(x) \cdot R_L \cdot \left((R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2(x) \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2(x))^2 \right)}{\left((R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2(x) \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2(x))^2 \right)^2} - \frac{\omega^2 \cdot M^2(x) \cdot R_L \cdot (2 \cdot \omega^2 \cdot L_2(x) \cdot L_2'(x) - 2 \cdot (R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2(x) \cdot R_L) \cdot \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2'(x) \cdot R_L)}{\left((R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2(x) \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2(x))^2 \right)^2} \right) \quad (5.13)$$

Αντικαθιστούμε τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M , με τις αντίστοιχες σχέσεις της μορφής της (5.5) στην σχέση (5.13). Από το **Σχήμα 5.2-3** παρατηρούμε ότι η παράγωγος της ισχύος μηδενίζεται σε μετατόπιση ίση με $x = 0 \text{ cm}$, ενώ είναι θετική-αρνητική πριν και μετά τη θέση $x = 0 \text{ cm}$ αντίστοιχα. Κατά συνέπεια αναμένεται η ύπαρξη μεγίστου στη θέση $x = 0 \text{ cm}$, κάτι που επιβεβαιώνεται και από το **Σχήμα 5.2-1(a)**.



Σχήμα 5.2-3: Παράγωγος της Ενεργούς Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Η λειτουργία του συστήματος σε συχνότητες διαφορετικές των 35 kHz , ενδέχεται να προκαλέσει διακυμάνσεις στις τιμές τόσο της απόδοσης όσο και της μεταφερόμενης ισχύος σε όλο το εύρος της μετακίνησης του Ηλεκτρικού Οχήματος. Συγκεκριμένα, μεταβάλλουμε τη συχνότητα λειτουργίας σε 37 kHz και 38 kHz , και τα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση και τη μεταφερόμενη ισχύ δίνονται στα **Σχήματα 5.2-4(a)** και **(b)**.

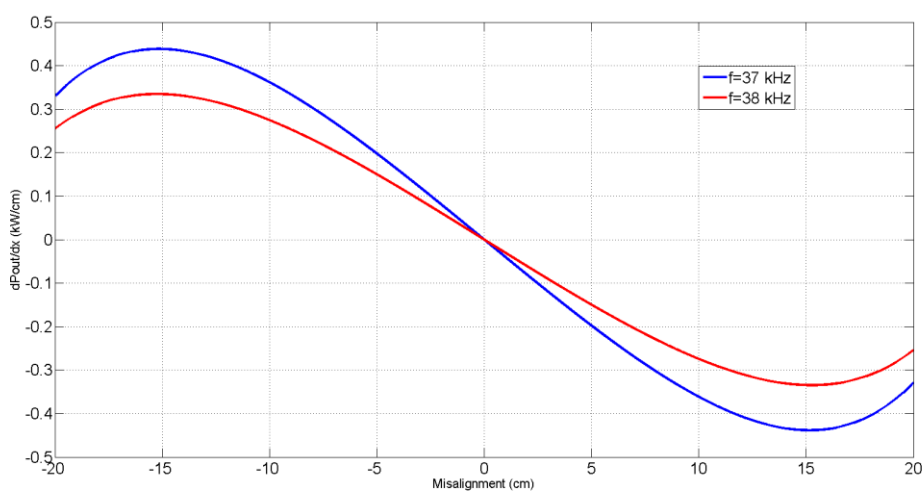


Σχήμα 5.2-4: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας (a) $f = 37 \text{ kHz}$, (b) $f = 38 \text{ kHz}$, και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Για συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 37 \text{ kHz}$, (**Σχήμα 5.2-4(a)**), η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται για μετατοπίσεις ίσες με -16.97 cm και 16.97 cm . Αντίστοιχα, για συχνότητα λειτουργίας $f = 38 \text{ kHz}$, (**Σχήμα 5.2-4(b)**), η απόδοση μεγιστοποιείται για μετατοπίσεις ίσες με -11.95 cm και 11.95 cm . Είναι φανερό ότι για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας του συστήματος, η απόδοση δεν μεγιστοποιείται στις ίδιες τιμές μετατόπισης x .

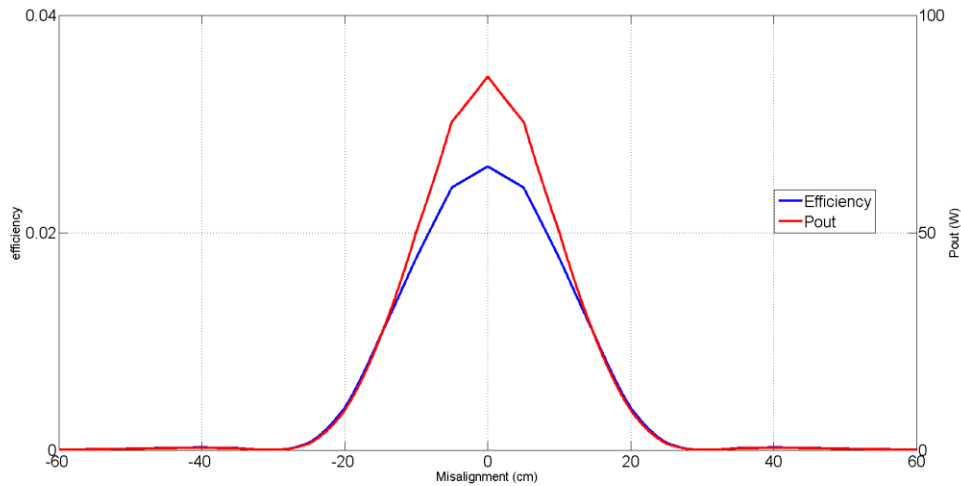
Η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος για συχνότητα λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$, σύμφωνα με το **Σχήμα 5.2-1(a)**, είναι ίση με 10305.41 W . Για $f = 37 \text{ kHz}$ η μέγιστη τιμή της ισχύος είναι 7673.25 W , ενώ για $f = 38 \text{ kHz}$ είναι ίση με 5881.42 W . Οι τιμές αυτές είναι ίσες με το 74.46 % και 57.01 % αντίστοιχα, της μέγιστης τιμής όταν η συχνότητα λειτουργίας είναι $f = 35 \text{ kHz}$.

Από το **Σχήμα 5.2-5**, παρατηρούμε ότι η παράγωγος της ισχύος μηδενίζεται για $x = 0 \text{ cm}$, ενώ το πρόσημο της παραγώγου υποδεικνύει την ύπαρξη μεγίστου τόσο για $f = 37 \text{ kHz}$ όσο και για $f = 38 \text{ kHz}$. Πράγματι, η ισχύς, (**Σχήμα 5.2-4(a) & (b)**), μεγιστοποιείται για την περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$.



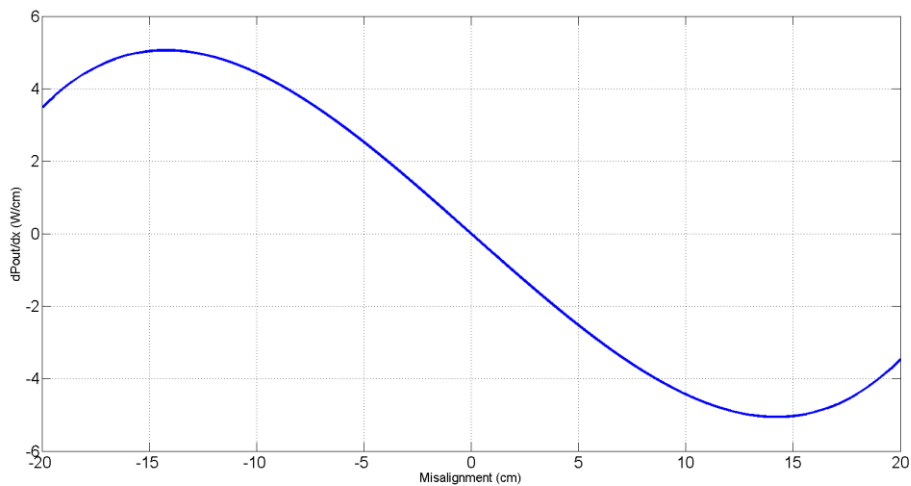
Σχήμα 5.2-5: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητες Λειτουργίας $f = 37 \text{ kHz}$ και $f = 38 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Εξάρτηση τόσο της απόδοσης όσο και της ισχύος αναμένεται επίσης, σύμφωνα και με τα συμπεράσματα προηγούμενων **Κεφαλαίων**, από τη μεταβολή της αντίστασης φορτίου. Για ένα φορτίο ίσο με $R_L = 2.5 \Omega$, η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, δίνεται στο **Σχήμα 5.2-6**.



Σχήμα 5.2-6: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

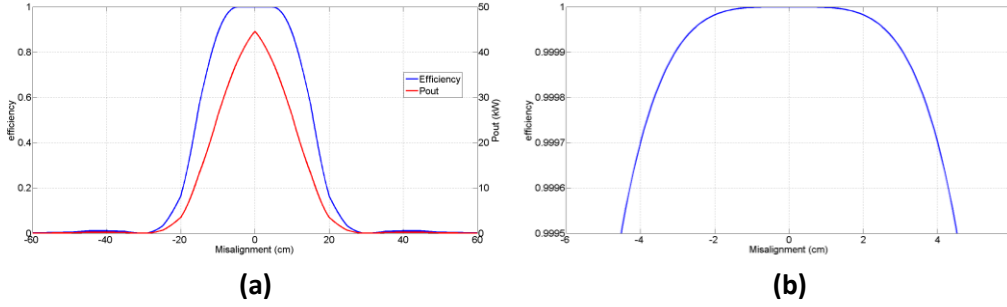
Σε αντίθεση με την περίπτωση όπου έχουμε αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 300 \Omega$, για $R_L = 2.5 \Omega$ παρατηρούμε ότι η απόδοση του συστήματος παρουσιάζει αξιοσημείωτη μείωση, έχοντας μέγιστη τιμή ίση με $eff = 2.61 \%$ στη μετατόπιση $x = 0 \text{ cm}$. Αντίστοιχα, η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος για $R_L = 2.5 \Omega$ είναι ίση με 85.88 W , δηλαδή 0.83% της αντίστοιχης τιμής για $R_L = 300 \Omega$, και παρουσιάζεται στη μετατόπιση $x = 0 \text{ cm}$, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 5.2-6** και **5.2-7**.



Σχήμα 5.2-7: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

5.3 Τοπολογία Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Στην τοπολογία **PS**, για μία συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 35 \text{ kHz}$ και μία αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$, στην περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , μπορούν να επιλεχθούν ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή είναι: $C_1 = 25.14 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.84 \text{ nF}$.



Σχήμα 5.3-1: (α) Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$, (β) Απόδοση του Συστήματος στην περιοχή -6 cm ως 6 cm

Στο **Σχήμα 5.3-1(a)** παρουσιάζεται η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος συναρτήσει της μετατόπισης x . Η απόδοση στην περίπτωση αυτή δεν εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα, όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, αλλά εξαρτάται επίσης και από τη μετατόπιση. Συγκεκριμένα, η απόδοση δίνεται από τη σχέση:

$$eff = \frac{|S_{out}|}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (5.14)$$

, όπου:

$$P_{out} = P_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \quad (5.15)$$

και

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left[\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} - \omega \cdot C_1 \cdot \left(\left(\frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}\right)^2} \right)^2 \right) \right] \quad (5.16)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εκφράσεις η απόδοση εξαρτάται από τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M , οι οποίες είναι συνάρτηση της μετατόπισης. Σε περίπτωση σταθερής συχνότητας λειτουργίας, για την μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος θα πρέπει η άεργος ισχύς εισόδου να είναι ίση με μηδέν:

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left[\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right. \\ \left. - \omega \cdot C_1 \cdot \left(\left(\frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right)^2 + \left(\omega \cdot L_1 - \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)}{R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2} \right)^2 \right) \right] = 0 \quad (5.17)$$

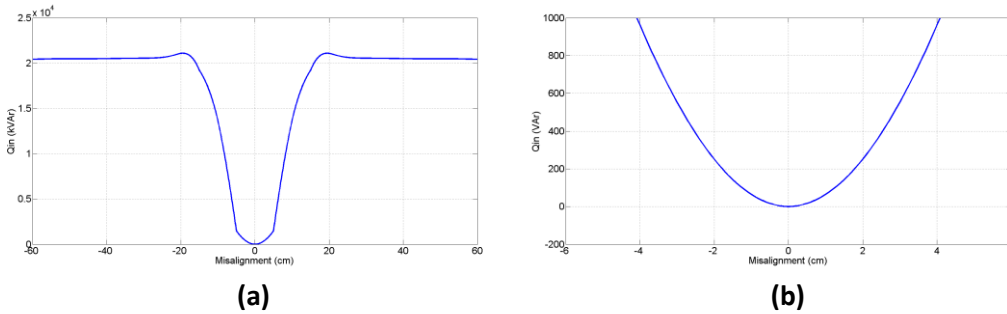
Αντικαθιστώντας τα L_1 , L_2 και M στη μορφή της (5.5) στη σχέση (5.17) προκύπτει ένα πολυώνυμο 8^{ου} βαθμού ως προς τη μετατόπιση x :

$$A_8 \cdot x^8 + A_7 \cdot x^7 + A_6 \cdot x^6 + A_5 \cdot x^5 + A_4 \cdot x^4 + A_3 \cdot x^3 + A_2 \cdot x^2 + A_1 \cdot x + A_0 = 0 \quad (5.18)$$

, όπου οι τιμές των συντελεστών A_8 , A_7 , A_6 , A_5 , A_4 , A_3 , A_2 , A_1 και A_0 υπολογίζονται από τις σχέσεις του Πίνακα Β.3 του Παραρτήματος Β.

Επομένως, σύμφωνα με την (5.18) ενδέχεται να υπάρχουν ως και οχτώ διαφορετικές τιμές της μετατόπισης x όπου η απόδοση μεγιστοποιείται.

Στα Σχήματα 5.3-2(a) και (b) παρατηρούμε ότι η άεργος ισχύς εισόδου μηδενίζεται μόνο στη μηδενική μετατόπιση, 0 cm. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη μεγιστοποίηση της απόδοσης, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.3-1(a) και (b).

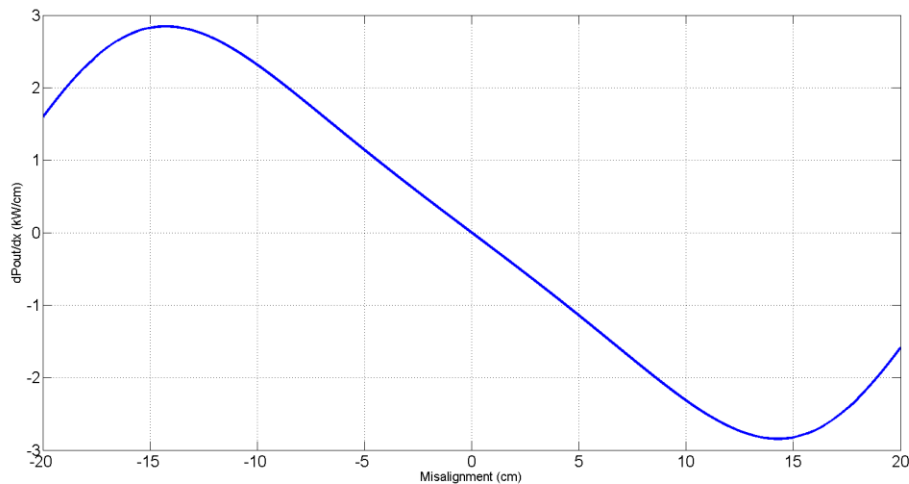


Σχήμα 5.3-2: Άεργος Ισχύς Εισόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$: (a) στην περιοχή -60 cm ως 60 cm , (b) στην περιοχή -6 cm ως 6 cm

Η μεταφερόμενη ισχύς, (5.15), εξαρτάται από τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M . Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις των L_1 , L_2 και M στη μορφή της (5.5) για μία περιοχή από $x = -20 \text{ cm}$ ως $x = 20 \text{ cm}$, μπορούμε να υπολογίσουμε την παράγωγο της ισχύος ως προς τη μετατόπιση x . Για να βρούμε τη τιμή της μετατόπισης όπου η ισχύς μεγιστοποιείται, αρκεί να βρούμε που μηδενίζεται η παράγωγος $\partial P_{out} / \partial x$:

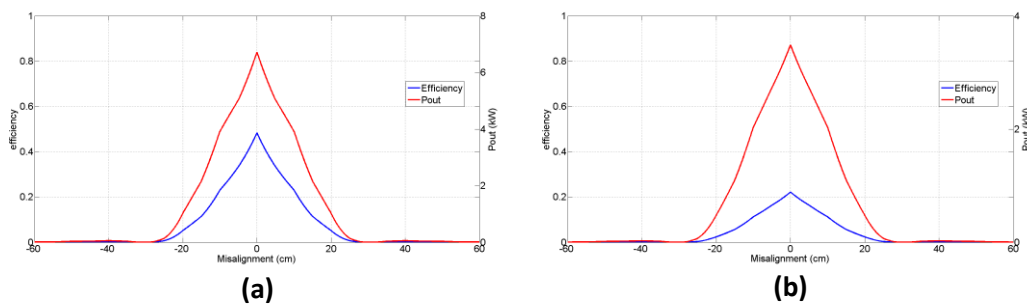
$$\frac{\partial P_{out}}{\partial x} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{2 \cdot \omega^2 \cdot M(x) \cdot M'(x) \cdot R_L \cdot \left(R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2(x) - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2 \right) - 2 \cdot \omega^3 \cdot M^2(x) \cdot R_L \cdot \left(\omega \cdot L_2(x) - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right) \cdot L_2'(x)}{\left(R_L^2 + \left(\omega \cdot L_2(x) - \frac{1}{\omega \cdot C_2} \right)^2 \right)^2} \quad (5.19)$$

Αντικαθιστούμε τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M , με τις αντίστοιχες σχέσεις της μορφής της (5.5) στην σχέση (5.19). Από το **Σχήμα 5.3-3** παρατηρούμε ότι η παράγωγος της ισχύος μηδενίζεται σε μετατόπιση ίση με $x = 0 \text{ cm}$, ενώ είναι θετική-αρνητική πριν και μετά τη θέση $x = 0 \text{ cm}$ αντίστοιχα. Κατά συνέπεια αναμένεται η ύπαρξη μεγίστου στη θέση $x = 0 \text{ cm}$, κάτι που επιβεβαιώνεται και από το **Σχήμα 5.3-1(a)**.



Σχήμα 5.3-3: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

Η λειτουργία του συστήματος σε συχνότητες διαφορετικές των 35 kHz , ενδέχεται να προκαλέσει διακυμάνσεις στις τιμές τόσο της απόδοσης όσο και της μεταφερόμενης ισχύος σε όλο το εύρος της μετακίνησης του Ηλεκτρικού Οχήματος. Συγκεκριμένα, μεταβάλλουμε τη συχνότητα λειτουργίας σε 37 kHz και 38 kHz , και τα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση και τη μεταφερόμενη ισχύ δίνονται στα **Σχήματα 5.3-4(a)** και **(b)**.



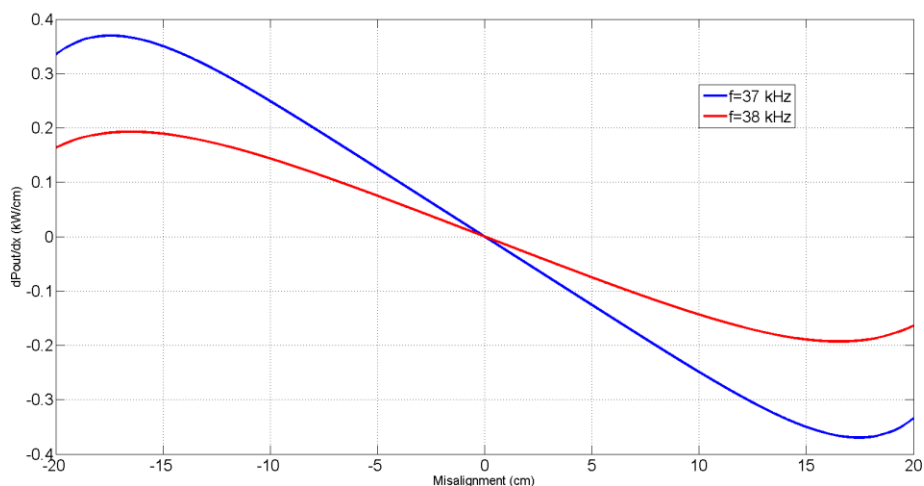
Σχήμα 5.3-4: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας (a) $f = 37 \text{ kHz}$, (b) $f = 38 \text{ kHz}$, και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τοπολογίες αντιστάθμισης, στην τοπολογία **PS**, η απόδοση δεν λαμβάνει μοναδιαία τιμή για καμία τιμές της μετατόπισης x καθώς μεταβάλλουμε τη συχνότητα λειτουργίας. Συγκεκριμένα, για συχνότητα λειτουργίας $f = 37 \text{ kHz}$, (**Σχήμα 5.3-4(a)**), η μέγιστη τιμή της απόδοσης είναι ίση με 48.36%

στη μηδενική μετατόπιση και, αντίστοιχα, για $f = 38 \text{ kHz}$, (**Σχήμα 5.3-4(b)**), η μέγιστη τιμή της απόδοσης είναι ίση με 22.17 %. Παρατηρούμε ότι η λειτουργία του συστήματος σε διαφορετικές συχνότητες οδηγεί σε μειωμένες τιμές απόδοσης. Συνεπώς, το σύστημα ενδείκνυται να λειτουργεί στην σταθερή συχνότητα των 35 kHz .

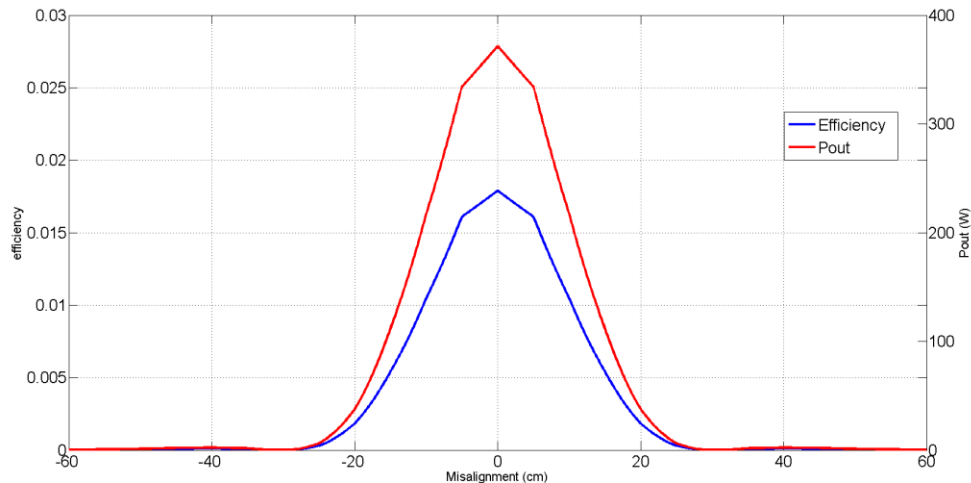
Η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος για συχνότητα λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$, σύμφωνα με το **Σχήμα 5.3-1(a)**, είναι ίση με 44575.82 W . Για $f = 37 \text{ kHz}$ η μέγιστη τιμή της ισχύος είναι 6715.51 W , ενώ για $f = 38 \text{ kHz}$ είναι ίση με 3485.93 W . Οι τιμές αυτές είναι ίση με το 15.07 % και 7.82 % αντίστοιχα, της μέγιστης τιμής όταν η συχνότητα λειτουργίας είναι $f = 35 \text{ kHz}$. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή της ισχύος μειώνεται σημαντικά με τη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας.

Από το **Σχήμα 5.3-5**, παρατηρούμε ότι η παράγωγος της ισχύος μηδενίζεται για $x = 0 \text{ cm}$, ενώ το πρόσημο της παραγώγου υποδεικνύει την ύπαρξη μεγίστου τόσο για $f = 37 \text{ kHz}$ όσο και για $f = 38 \text{ kHz}$. Πράγματι, η ισχύς (**Σχήμα 5.3-4**) μεγιστοποιείται για την περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$.



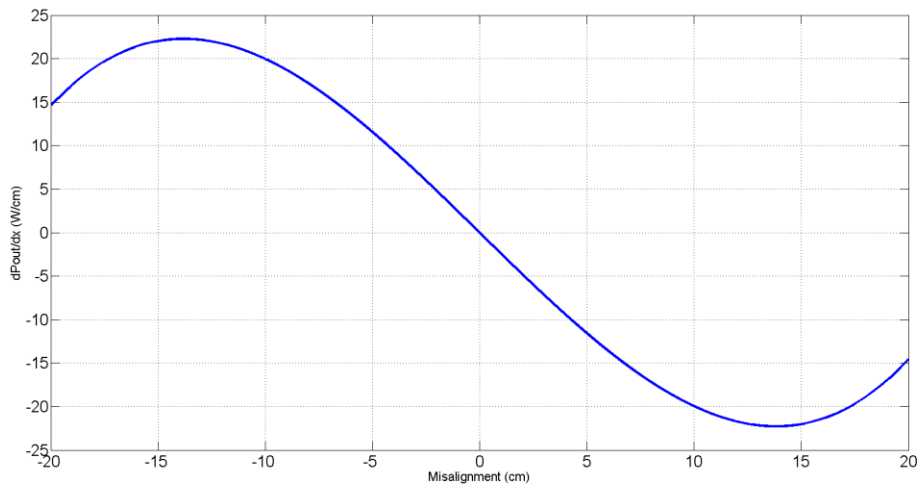
Σχήμα 5.3-5: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητες Λειτουργίας $f = 37 \text{ kHz}$ και $f = 38 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

Εξάρτηση τόσο της απόδοσης όσο και της ισχύος αναμένεται επίσης, σύμφωνα και με τα συμπεράσματα προηγούμενων **Κεφαλαίων**, από τη μεταβολή της αντίστασης φορτίου. Πράγματι, για ένα φορτίο ίσο με $R_L = 300 \Omega$, η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, δίνεται στο **Σχήμα 5.3-6**.



Σχήμα 5.3-6: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

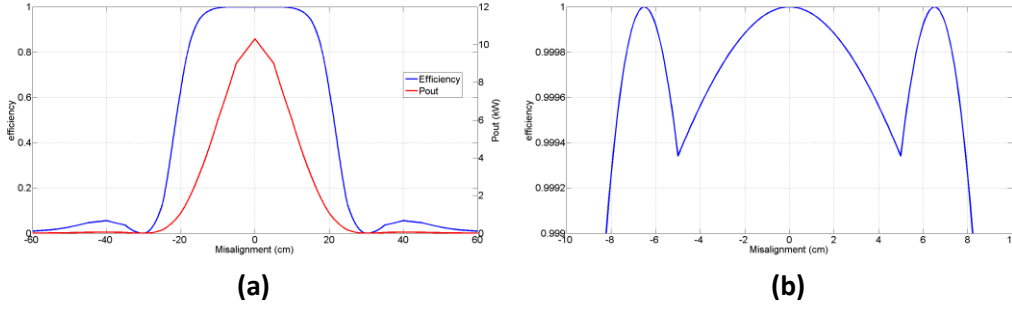
Όπως και στην τοπολογία **PP**, η απόδοση του συστήματος για αντίσταση φορτίου διαφορετική της αρχικής, λαμβάνει σημαντικά μειωμένες τιμές. Συγκεκριμένα, για $R_L = 300 \Omega$, η μέγιστη τιμή της απόδοσης επιτυγχάνεται στο $x = 0 \text{ cm}$ και είναι ίση με 1.79 %. Αντίστοιχα, η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος για $R_L = 300 \Omega$ είναι ίση με 371.46 W, δηλαδή 0.83 % της αντίστοιχης τιμής για $R_L = 2.5 \Omega$, και παρουσιάζεται στη μετατόπιση $x = 0 \text{ cm}$, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 5.3-6** και **5.3-7**. Συνεπώς, το σύστημα ενδείκνυται να λειτουργεί σε τιμές φορτίου κοντά στα 2.5 Ω.



Σχήμα 5.2-7: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

5.4 Τοπολογία Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

Στην τοπολογία **SP**, για μία συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 35 \text{ kHz}$ και μία αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$, στην περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , μπορούν να επιλεγθούν ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή είναι: $C_1 = 84.34 \text{ nF}$ και $C_2 = 79.84 \text{ nF}$.



Σχήμα 5.4-1: (α) Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$, (β) Απόδοση του Συστήματος στην περιοχή -6 cm ως 6 cm

Στο **Σχήμα 5.4-1** παρουσιάζεται η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος συναρτήσει της μετατόπισης x . Η απόδοση στην περίπτωση αυτή δεν εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα, όπως είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, αλλά εξαρτάται επίσης και από τη μετατόπιση. Συγκεκριμένα, η απόδοση δίνεται από τη σχέση:

$$eff = \frac{|S_{out}|}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{|S_{in}|} = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (5.20)$$

, όπου:

$$P_{out} = P_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot R_L}{(R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2)^2} \quad (5.21)$$

και

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right) \quad (5.22)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εκφράσεις η απόδοση εξαρτάται από τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M , οι οποίες είναι συνάρτηση της μετατόπισης. Σε περίπτωση σταθερής συχνότητας λειτουργίας, για την μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος θα πρέπει η άεργος ισχύς εισόδου να είναι ίση με μηδέν:

$$Q_{in} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1} - \omega^2 \cdot M^2 \cdot \frac{\omega \cdot L_2 - \omega \cdot C_2 \cdot R_L^2 + \omega^3 \cdot C_2^2 \cdot L_2 \cdot R_L^2}{(R_2 + R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2 \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot C_2 \cdot R_2 \cdot R_L + \omega \cdot L_2)^2} \right) = 0 \quad (5.23)$$

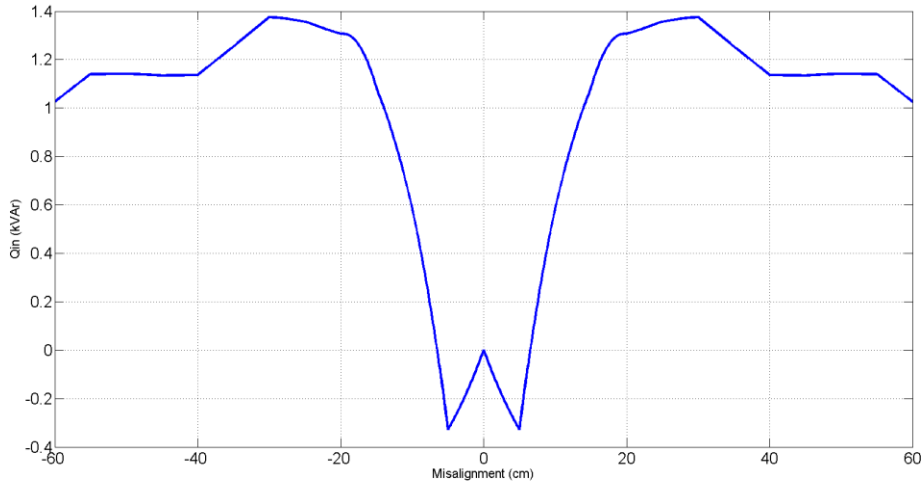
Αντικαθιστώντας τα L_1 , L_2 και M στη μορφή της (5.5) στη σχέση (5.23) προκύπτει ένα πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού ως προς τη μετατόπιση x :

$$A_6 \cdot x^6 + A_5 \cdot x^5 + A_4 \cdot x^4 + A_3 \cdot x^3 + A_2 \cdot x^2 + A_1 \cdot x + A_0 = 0 \quad (5.24)$$

, όπου οι τιμές των συντελεστών A_6 , A_5 , A_4 , A_3 , A_2 , A_1 και A_0 υπολογίζονται από τις σχέσεις του Πίνακα Β.4 του Παραρτήματος Β.

Επομένως, σύμφωνα με την (5.24) ενδέχεται να υπάρχουν ως και έξι διαφορετικές τιμές της μετατόπισης x όπου η απόδοση μεγιστοποιείται.

Στο Σχήμα 5.4-2 παρατηρούμε ότι η άεργος ισχύς εισόδου μηδενίζεται σε μετατοπίσεις ίσες με -6.52 cm , 0 cm και 6.52 cm . Τα σημεία αυτά αντιστοιχούν στη μεγιστοποίηση της απόδοσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.4-1.

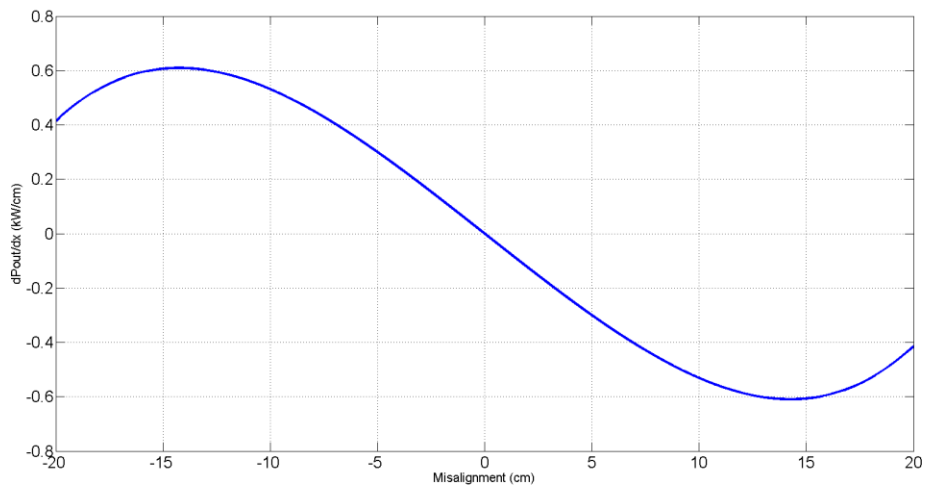


Σχήμα 5.4-2: Άεργος Ισχύς Εισόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Η μεταφερόμενη ισχύς, (5.21), εξαρτάται από τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M , οι οποίες μπορούν να εκφραστούν με τη μορφή της (5.5) για μία περιοχή από $x = -20 \text{ cm}$ ως $x = 20 \text{ cm}$. Για να βρούμε τη τιμή της μετατόπισης όπου η ισχύς μεγιστοποιείται, αρκεί να βρούμε που μηδενίζεται η παράγωγος της ισχύος ως προς τη μετατόπιση x , $\partial P_{out} / \partial x$:

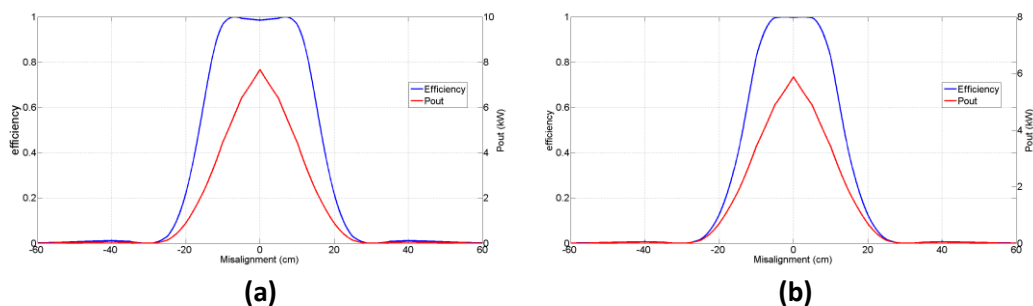
$$\frac{\partial P_{out}}{\partial x} = |\tilde{I}_1|^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \omega^2 \cdot M(x) \cdot M'(x) \cdot R_L \cdot \left((R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2(x) \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2(x))^2 \right)}{\left((R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2(x) \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2(x))^2 \right)^2} - \frac{\omega^2 \cdot M^2(x) \cdot R_L \cdot (2 \cdot \omega^2 \cdot L_2(x) \cdot L_2'(x) - 2 \cdot (R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2(x) \cdot R_L) \cdot \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2'(x) \cdot R_L)}{\left((R_L - \omega^2 \cdot C_2 \cdot L_2(x) \cdot R_L)^2 + (\omega \cdot L_2(x))^2 \right)^2} \right) \quad (5.25)$$

Από το **Σχήμα 5.4-3** παρατηρούμε ότι η παράγωγος της ισχύος μηδενίζεται σε μετατόπιση ίση με $x = 0 \text{ cm}$, ενώ είναι θετική-αρνητική πριν και μετά τη θέση $x = 0 \text{ cm}$ αντίστοιχα. Κατά συνέπεια αναμένεται η ύπαρξη μεγίστου στη θέση $x = 0 \text{ cm}$, κάτι που επιβεβαιώνεται και από το **Σχήμα 5.4-1**.



Σχήμα 5.4-3: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Η λειτουργία του συστήματος σε συχνότητες διαφορετικές των 35 kHz , ενδέχεται να προκαλέσει διακυμάνσεις στις τιμές τόσο της απόδοσης όσο και της μεταφερόμενης ισχύος σε όλο το εύρος της μετακίνησης του Ηλεκτρικού Οχήματος. Συγκεκριμένα, μεταβάλλουμε τη συχνότητα λειτουργίας σε 37 kHz και 38 kHz , και τα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση και τη μεταφερόμενη ισχύ δίνονται στα **Σχήματα 5.4-4(a)** και **(b)**.

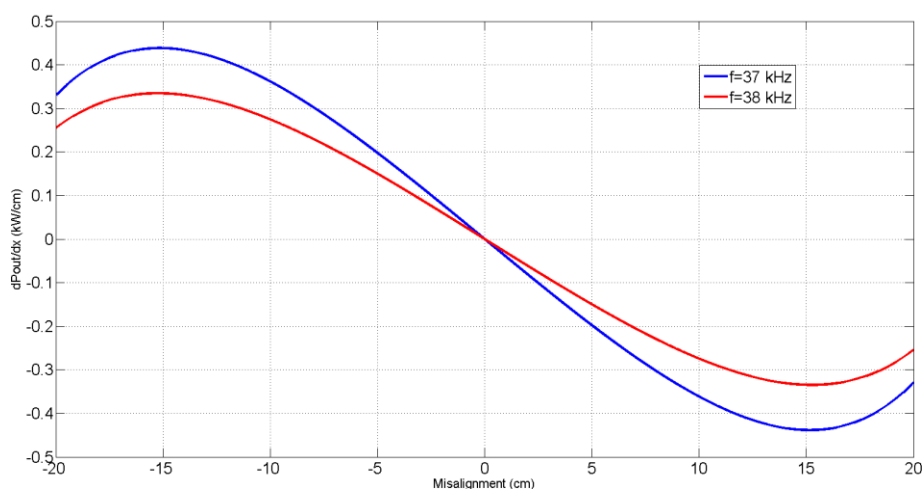


Σχήμα 5.4-4: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας (a) $f = 37 \text{ kHz}$, (b) $f = 38 \text{ kHz}$, και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Για συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 37 \text{ kHz}$, (**Σχήμα 5.4-4(a)**), η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται για μετατοπίσεις ίσες με -6.77 cm και 6.77 cm . Αντίστοιχα, για συχνότητα λειτουργίας $f = 38 \text{ kHz}$, (**Σχήμα 5.4-4(b)**), η απόδοση μεγιστοποιείται για μετατοπίσεις ίσες με -2.43 cm και 2.43 cm . Είναι φανερό ότι για διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας του συστήματος, η απόδοση δεν μεγιστοποιείται στις ίδιες τιμές μετατόπισης x .

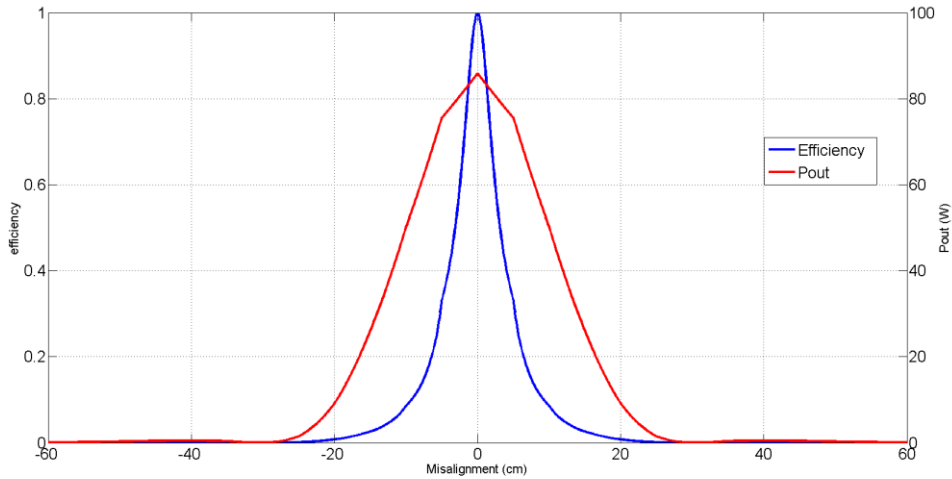
Η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος για συχνότητα λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$, σύμφωνα με το **Σχήμα 5.4-1**, είναι ίση με 10305.41 W . Για $f = 37 \text{ kHz}$ η μέγιστη τιμή της ισχύος είναι 7673.25 W , ενώ για $f = 38 \text{ kHz}$ είναι ίση με 5881.42 W . Οι τιμές αυτές είναι ίση με το 74.46% και 57.01% αντίστοιχα, της μέγιστης τιμής όταν η συχνότητα λειτουργίας είναι $f = 35 \text{ kHz}$.

Από το **Σχήμα 5.4-5**, παρατηρούμε ότι η παράγωγος της ισχύος μηδενίζεται για $x = 0 \text{ cm}$, ενώ το πρόσημο της παραγώγου υποδεικνύει την ύπαρξη μεγίστου τόσο για $f = 37 \text{ kHz}$ όσο και για $f = 38 \text{ kHz}$. Πράγματι, η ισχύς, (**Σχήμα 5.4-1**), μεγιστοποιείται για την περίπτωση όπου $x = 0 \text{ cm}$.



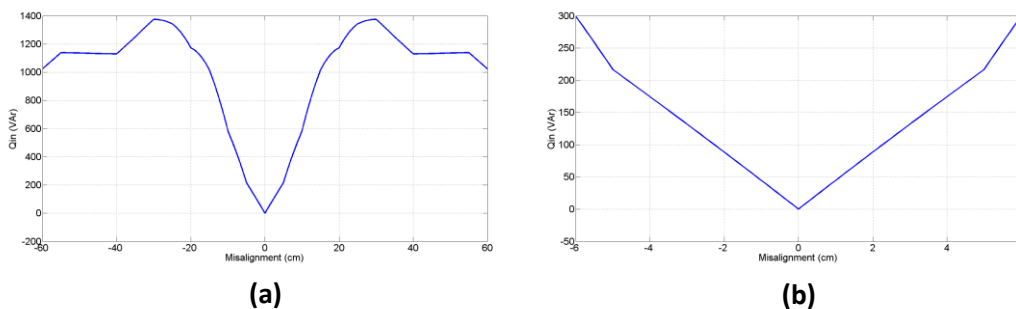
Σχήμα 5.4-5: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητες Λειτουργίας $f = 37 \text{ kHz}$ και $f = 38 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Εξάρτηση τόσο της απόδοσης όσο και της ισχύος αναμένεται επίσης, σύμφωνα και με τα συμπεράσματα προηγούμενων **Κεφαλαίων**, από τη μεταβολή της αντίστασης φορτίου. Για ένα φορτίο ίσο με $R_L = 2.5 \Omega$, η απόδοση και η μεταφερόμενη ισχύς καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, δίνεται στο **Σχήμα 5.4-6**.



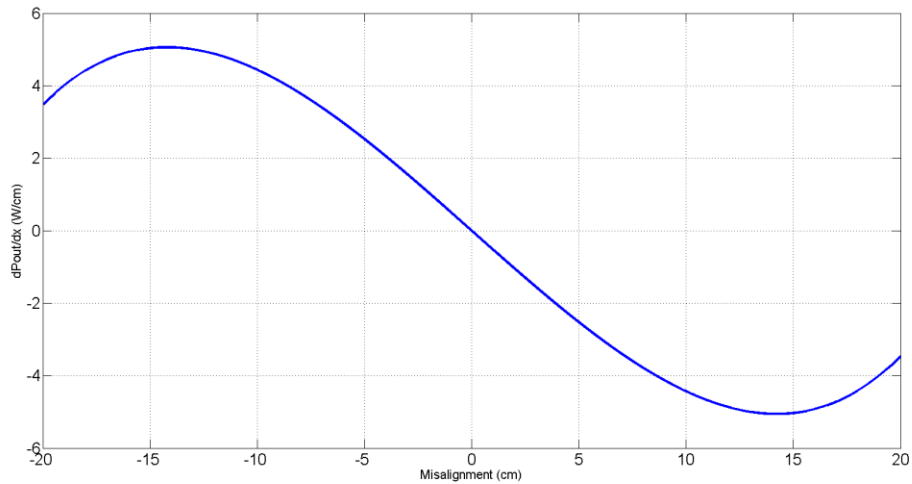
Σχήμα 5.4-6: Απόδοση και Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

Στο **Σχήμα 5.4-6**, παρατηρούμε ότι για αντίσταση φορτίου ίση με $R_L = 2.5 \Omega$, η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται για μία μόνο τιμή μετατόπισης. Επιπλέον, από τα **Σχήμα 5.4-7(a)** και **(b)**, η άεργος ισχύος εισόδου του συστήματος μηδενίζεται στο $x = 0 \text{ cm}$. Συνεπώς, η απόδοση λαμβάνει τη μέγιστή της τιμή στο $x = 0 \text{ cm}$.



Σχήμα 5.4-7: Άεργος Ισχύς Εισόδου του Συστήματος συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$: (a) στην περιοχή -60 cm ως 60 cm , (b) στην περιοχή -6 cm ως 6 cm

Η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος παρουσιάζει αξιοσημείωτη μείωση σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή στην περίπτωση που η αντίσταση φορτίου είναι ίση με $R_L = 300 \Omega$. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή είναι 86.88 W , η οποία είναι ίση με μόνο 0.83% της αντίστοιχη τιμής όταν $R_L = 300 \Omega$. Αντίθετα, η μετατόπιση x όπου μεγιστοποιείται η ισχύς δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της αντίστασης του φορτίου, όπως φαίνεται στα **Σχήματα 5.4-6** και **5.4-8**.

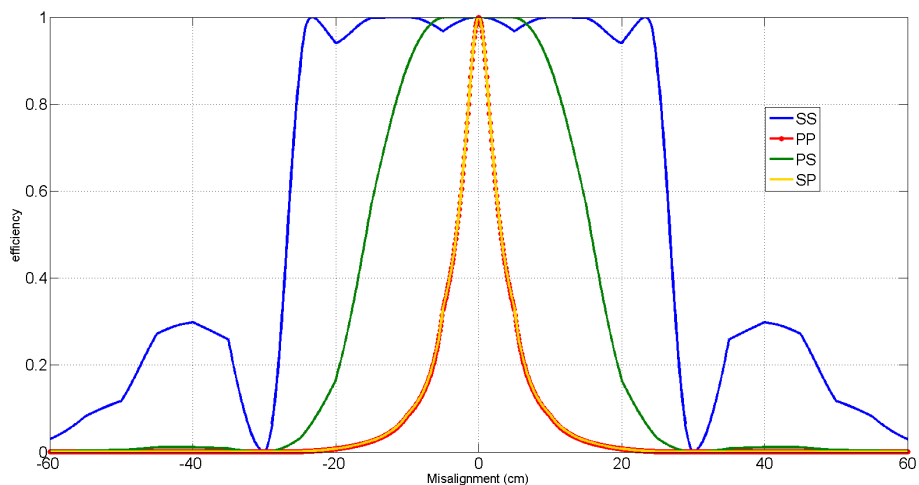


Σχήμα 5.4-8: Παράγωγος της Ενεργού Ισχύος Εξόδου ως προς τη Μετατόπιση x συναρτήσει της Μετατόπισης x σε Συχνότητα Λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και Αντίσταση Φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

5.5 Σύγκριση των Τοπολογιών Αντιστάθμισης στη Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση

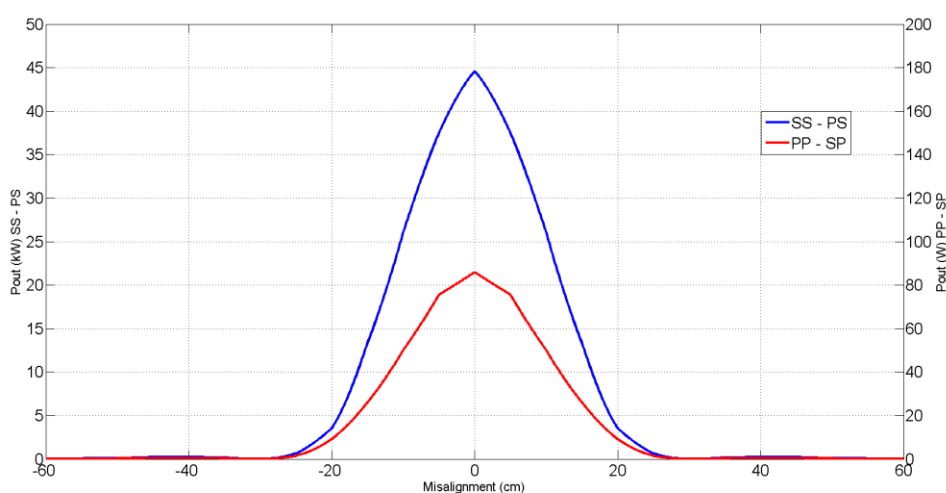
Στην παρούσα **Ενότητα** θα πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων βασικών τοπολογιών αντιστάθμισης ως προς την απόδοση και την ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος.

Για συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$, έχουμε υπολογίσει και επιλέξει τους πυκνωτές αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , ξεχωριστά για κάθε τοπολογία σύμφωνα με τις σχέσεις του **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, στην περίπτωση μηδενικής μετατόπισης.



Σχήμα 5.5-1: Απόδοση του Συστήματος για τις Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης (SS, PP, PS, SP) για συχνότητα λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

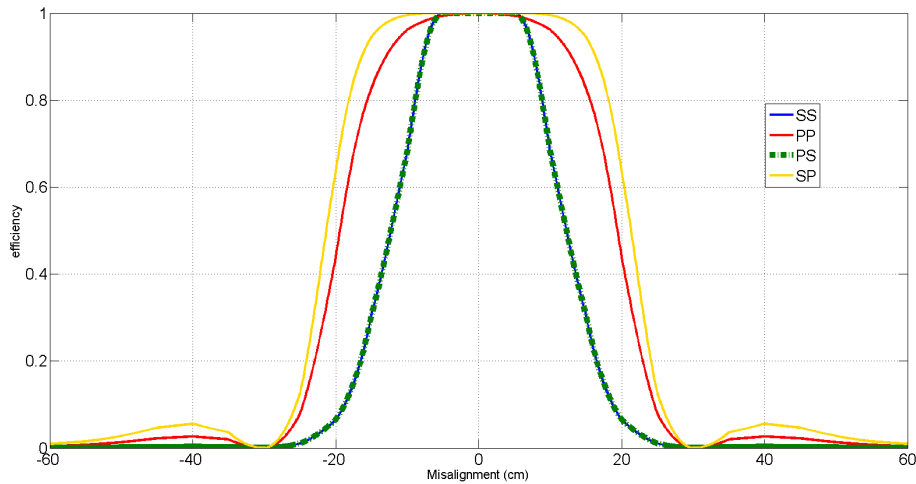
Παρατηρούμε ότι η απόδοση του συστήματος δεν παρουσιάζει ίδια συμπεριφορά για όλες τις τοπολογίες αντιστάθμισης. Συγκεκριμένα, για την τοπολογία **SS**, η απόδοση μεγιστοποιείται σε πέντε διαφορετικές τιμές μετατόπισης, ενώ, για την τοπολογία **SP**, η απόδοση μεγιστοποιείται μόνο σε μία τιμή μετατόπισης, η οποία είναι η $x = 0 \text{ cm}$. Η απόδοση του συστήματος για τις τοπολογίες **PP** και **SP** παρουσιάζει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά σε όλο το εύρος της μετατόπισης x , -60 cm ως 60 cm , και μεγιστοποιείται σε μία μόνο τιμή μετατόπισης, η οποία είναι η $x = 0 \text{ cm}$.



Σχήμα 5.5-2: Ενεργός Ισχύς Εξόδου του Συστήματος για τις Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης (SS, PP, PS, SP) για συχνότητα λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$

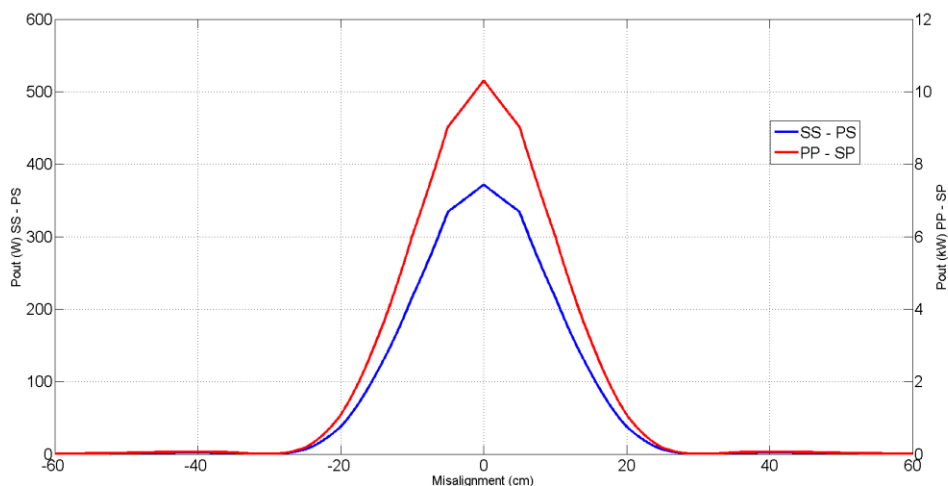
Η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται και για τις τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης στο $x = 0 \text{ cm}$. Η μέγιστη τιμή της ισχύος για τις τοπολογίες **SS** και **PS** είναι 44575.82 W , ενώ για τις τοπολογίες **PP** και **SP** είναι 85.88 W , δηλαδή μόλις 0.19% της μέγιστης τιμής των τοπολογιών **SS** και **PS**. Παρόμοια συμπεριφορά της μέγιστης τιμής της ισχύος με την τιμή της αντίστασης φορτίου έχουμε παρατηρήσει και σε προηγούμενα Κεφάλαια και οφείλεται στη σχέση εξάρτησης της ισχύος με το φορτίο.

Αντίστοιχα, για συχνότητα λειτουργίας ίση με $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$, έχουμε επιλέξει τους πυκνωτές αντιστάθμισης, C_1 και C_2 , ξεχωριστά για κάθε τοπολογία σύμφωνα με τις σχέσεις του **Πίνακα 2.3-1** του **Κεφαλαίου 2**, στην περίπτωση μηδενική μετατόπισης.



Σχήμα 5.5-3: Απόδοση του Συστήματος για τις Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης (SS, PP, PS, SP) για συχνότητα λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Όπως και στην περίπτωση αντίστασης φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$ που είδαμε προηγουμένως, για $R_L = 300 \Omega$, η απόδοση του συστήματος δεν παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά για όλες τις τοπολογίες αντιστάθμισης. Συγκεκριμένα, για την τοπολογία **SP**, παρατηρείται μια ιδιαίτερα μεγάλη περιοχή (περίπου -15 cm ως 15 cm), όπου η απόδοση είναι πολύ κοντά στη μέγιστη τιμή της, ενώ στην τοπολογία **PP**, η απόδοση μεγιστοποιείται για μία τιμή μετατόπισης ($x = 0 \text{ cm}$). Η απόδοση του συστήματος για τις τοπολογίες **SS** και **PS** παρουσιάζει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά σε όλο το εύρος της μετατόπισης x , -60 cm ως 60 cm , και λαμβάνει μέγιστη τιμή σε μία μόνο τιμή μετατόπισης, η οποία είναι η $x = 0 \text{ cm}$.



Σχήμα 5.5-4: Ενεργός Ισχύς του Συστήματος για τις Βασικές Τοπολογίες Αντιστάθμισης (SS, PP, PS, SP) για συχνότητα λειτουργίας $f = 35 \text{ kHz}$ και αντίσταση φορτίου $R_L = 300 \Omega$

Η ενεργός ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται και για τις τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης στο $x = 0 \text{ cm}$. Αντίθετα με την περίπτωση αντίστασης φορτίου $R_L = 2.5 \Omega$, παρατηρούμε ότι μεγαλύτερες τιμές φορτίου είναι πιο ευνοϊκές στην περίπτωση των τοπολογιών **PP** και **SP**. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή για τις **PP** και **SP** είναι ίση με 10305.41 W , ενώ για τις τοπολογίες **SS** και **PS** είναι 371.47 W , δηλαδή 3.6 % της μέγιστης τιμής των τοπολογιών **PP** και **SP**.

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα και Επεκτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά των τεσσάρων βασικών τοπολογιών (**SS**, **PP**, **PS** και **SP**) αντιστάθμισης στην κυκλική διάταξη Επαγωγικής Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων. Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι λόγω της πολύ μικρής τιμής των αντιστάσεων στα τυλίγματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, δεν εμφανίζονται σημαντικές διαφορές με τη θεώρηση μηδενικών αντιστάσεων των τυλιγμάτων στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε. Σχετικά με την ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος παρατηρήθηκε για όλες τις τοπολογίες μεγάλη εξάρτηση από τη συχνότητα, ενώ η αντίσταση φορτίου έχει επίδραση κυρίως στις τοπολογίες **PP** και **SP**. Η ένταση του ρεύματος σε διάφορα σημεία της διάταξης φαίνεται να είναι μικρότερη στις τοπολογίες **PP** και **SP**, ωστόσο το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος των τοπολογιών αυτών. Συγκεκριμένα η μεταφορά ισχύος περιορίζεται σημαντικά σε περίπτωση επιλογής των τοπολογιών **PP** και **SP** για την εξεταζόμενη κυκλική διάταξη.

Εξετάσθηκε επίσης το **Φαινόμενο Διακλάδωσης** για τις τέσσερις τοπολογίες και βρέθηκε ότι μπορεί να υπάρχουν ως και τρεις διαφορετικές συχνότητες όπου ο συντελεστής ισχύος γίνεται ίσος με τη μονάδα. Αντίθετα η μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιείται σε μία μόνο συχνότητα, η οποία, ανάλογα με την εξεταζόμενη τοπολογία, ενδέχεται να μην είναι ίδια με καμία από τις συχνότητες μεγιστοποίησης της απόδοσης. Ταύτιση μεταξύ των συχνοτήτων μεγιστοποίησης του συντελεστή ισχύος και της μεταφερόμενης ισχύος επιτυγχάνεται μόνο στις τοπολογίες **PP** και **SP**, ενώ στις τοπολογίες **SS** και **PS** οι συχνότητες είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους.

Οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης και της αντίστασης φορτίου έχουν επίσης επίδραση στο **Φαινόμενο Διακλάδωσης** και τις συχνότητες μεγιστοποίησης τόσο της ισχύος όσο και της απόδοσης. Για παράδειγμα, αύξηση ή μείωση της αντίστασης φορτίου δύναται να εξαλείψει το **Φαινόμενο Διακλάδωσης**. Σχετικά με τη μεταφερόμενη ισχύ, για όλες τις τοπολογίες αντιστάθμισης, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση της μέγιστης τιμής με τη μεταβολή της αντίστασης του φορτίου. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι με τη μεταβολή της αντίστασης φορτίου στην τοπολογία **PS**, αντίθετα με τις τοπολογίες **SP**, **SS** και **PP**, δεν υπάρχει συχνότητα ή διάστημα συχνοτήτων που να επιτρέπει μεγάλη μεταφορά ισχύος με αυξημένη απόδοση.

Επιπρόσθετα, εξετάσθηκε η επίδραση της μετατόπισης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου στη μεταφερόμενη ισχύ και την απόδοση του συστήματος, για τις τοπολογίες που εξετάσθηκαν. Παρατηρήθηκε ότι για τιμές μετατόπισης διάφορες της μηδενικής, η μεταφερόμενη ισχύς μειώνεται σημαντικά και για τις

τέσσερις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης, γεγονός που οφείλεται κυρίως στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος στις μετατοπίσεις αυτές. Για τις τοπολογίες **SS** και **PS**, η απόδοση του συστήματος δε φαίνεται να παρουσιάζει ιδιαίτερη μείωση για μικρές μετατοπίσεις, ενώ αντίθετα για τις τοπολογίες **PP** και **SP**, η απόδοση λαμβάνει ιδιαίτερα μικρές τιμές ακόμα και για μικρές τιμές μετατόπισης. Διαπιστώθηκε ότι η μετατόπιση συμβάλει καθοριστικά στη συχνότητα μεγιστοποίησης τόσο της απόδοσης όσο και της μεταφερόμενης ισχύος, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τη σχεδίαση συστημάτων ελέγχου σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης.

Τελευταία εξετάστηκε η εφαρμογή των βασικών τοπολογιών αντιστάθμισης στην κυκλική διάταξη, στην περίπτωση της Δυναμικής Επαγωγικής Φόρτισης. Ο συντελεστής ισχύος δύναται να είναι ίσος με τη μονάδα σε έως και 8 σημεία κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή, υποδεικνύοντας και στη Δυναμική Φόρτιση το **Φαινόμενο Διακλάδωσης**, το οποίο ωστόσο είναι πολύ πιο έντονο σε αυτή την περίπτωση. Διαπιστώθηκε, επίσης ότι η λειτουργία του συστήματος σε διαφορετική συχνότητα ή διαφορετική αντίσταση φορτίου δύναται να μεταβάλει τα σημεία μεγιστοποίησης του συντελεστή ισχύος και της μεταφερόμενης ισχύος.

6.2 Επεκτάσεις

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

- Χρήση διαφορετικών μαγνητικών διατάξεων: Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο η κυκλική μαγνητική διάταξη. Σημείο περαιτέρω μελέτης αποτελεί η εξέταση των τεσσάρων βασικών τοπολογιών αντιστάθμισης με χρήση των μαγνητικών διατάξεων DD, DDQ και BP, που αναφέρθηκαν στο **Κεφάλαιο 1**.
- Μελέτη της συμπεριφοράς ειδικών τοπολογιών αντιστάθμισης στη στατική και δυναμική επαγωγική φόρτιση: Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά των τεσσάρων βασικών τοπολογιών αντιστάθμισης **SS**, **PP**, **PS** και **SP**. Επέκταση της παρούσας έρευνας αποτελεί η μελέτη για τις ειδικές τοπολογίες αντιστάθμισης **SPS**, **LCL** και **LCCL** (ή **LCC**).
- Μελέτη του συστήματος ελέγχου: Στη διπλωματική αυτή, έγινε φανερό η σημαντική επίδραση της συχνότητας λειτουργίας καθώς και οι των τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης στη μεταφερόμενη ισχύ και την απόδοση του συστήματος. Τα αποτελέσματα της διπλωματικής αυτής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του συστήματος ελέγχου της εξεταζόμενης κυκλικής διάταξης.

Αναφορές

- [1] 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)
- [2] 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
- [3] A. Kawamura, K. Ishioka, and J. Hirai, "Wireless transmission of power and information through one high-frequency resonant AC link inverter for robot manipulator applications", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 32, pp. 503-508, 1996
- [4] Klontz K.W., Esser A., Bacon R.R., Divan D.M., Novotny D.W., and Lorenz R.D., "An electric vehicle charging system with 'universal' inductive interface", *Power Conversion Conference, 1993 Yokohama*, Page(s): 227 – 232
- [5] Severns R., Yeow E., Woody G., Hall J., and 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
- [6] Chwei-Sen Wang, Stielau O.H., and 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] G. A. J. Elliott, G. A. Covic, D. Kacprzak, and J. T. Boys, "A New Concept: Asymmetrical Pick-Ups for Inductively Coupled Power Transfer Monorail Systems", *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 3389-3391, 2006
- [10] H. Chang-Yu, J. T. Boys, G. A. Covic, and M. Budhia, "Practical considerations for designing IPT system for EV battery charging", in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE, 2009*, pp. 402-407
- [11] 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

- [12] G. A. Covic, and J. T. Boys, "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 1, No. 1, Page(s): 28-41, March 2013
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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
- [17] M. Eghtesadi, "Inductive power transfer to an electric vehicle-analytical model", in *Vehicular Technology Conference, 1990 IEEE 40th*, 1990, pp. 100-104
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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
- [21] T. E. Stamati and P. Bauer, "On-road charging of electric vehicles", in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE*, 2013, pp. 1-8
- [22] 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
- [23] J. Young Jae, K. Young Dae, and J. Seungmin, "Optimal design of the wireless charging electric vehicle", in *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 1-5

- [24] 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
- [25] 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
- [26] Fei Lu, Hua Zhang, Heath Hofmann, Chris Mi, "A Dynamic Charging System with Reduced Output Power Pulsation for Electric Vehicles", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (early access articles)
- [27] J. T. Boys, G. A. Covic, and A. W. Green, "Stability and control of inductively coupled power transfer systems", *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 147, pp. 37-43, 2000
- [28] W. Chwei-Sen, G. A. Covic, and O. H. Stielau, "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 51, pp.148-157, 2004
- [29] A. Khaligh and S. Dusmez, "Comprehensive Topological Analysis of Conductive and Inductive Charging Solutions for Plug-In Electric Vehicles", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 61, pp. 3475-3489, 2012
- [30] W. Zhang, S.-C. Wong, C. K. Tse, and Q. Chen, "Analysis and Comparison of Secondary Series and Parallel Compensated Inductive Power Transfer Systems Operating for Optimal Efficiency and Load-independent Voltage-Transfer Ratio", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 2979-2990, 2014
- [31] C. Duan, C. Jiang, A. Taylor, and K. Bai, "Design of a zero-voltage-switching large-air-gap wireless charger with low electric stress for electric vehicles", *Power Electronics, IET*, vol. 6, pp. 1742-1750, 2013
- [32] 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
- [33] Chwei-Sen Wang, Grant A. Covic, Oskar H. Stielau, "Investigating an LCL Load Resonant Inverter for Inductive Power Transfer Applications", *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol. 19, No. 4, pp. 995-1002, July 2004
- [34] Nicholas Keeling, Grant A. Covic, Frank Hao, Libin George, John T. Boys, "Variable Tuning in LCL Compensated Power Transfer Pickups", *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009, ECCE 2009, IEEE*, Sept. 2009
- [35] Kai Song, Chunbo Zhu, Kim-Ean Koh, Daita Kobayashi, Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Modeling and Desing of Dynamic Wireless Power Transfer System for EV Applications", *IECON2015-Yokohama*, November 9-12, 2015

- [36] S. Li, W. Li, J. Deng, T.D. Nguyen, C.C. Mi, "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer", *IEEE Trans. Vehi. Techn.*, vol. 64, pp. 2261-2273, 2015
- [37] G. A. Covic and J. T. Boys, "Inductive power transfer", *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1–14, Jun. 2013
- [38] Y. H. Chao, J. J. Shieh, C.-T. Pan, W.-C. Shen, and M.-P. Chen, "A primary-side control strategy for series-parallel loosely coupled inductive power transfer systems," in *Proc. IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, May 2007, pp. 2322–2327
- [39] P. Si, A. P. Hu, J. W. Hsu, M. Chiang, Y. Wang, S. Malpas, and D. Budgett, "Wireless power supply for implantable biomedical device based on primary input voltage regulation", in *Proc. 2nd IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, May 2007, pp. 235–239
- [40] P. Si, A. P. Hu, S. Malpas, and D. Budgett, "A frequency control method for regulating wireless power to implantable devices", *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 22–29, Mar. 2008
- [41] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, and D. Bronson, "A high efficiency 5 kW inductive charger for EVs using dual side control", *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 8, no. 3, pp. 585–595, Aug. 2012
- [42] Tobias Diekhans, Rik W. De Doncker, "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, Issue 11, Nov. 2015
- [43] Zhao T. Cai, S. Duan, H. Feng, C. Chen, X. Zhang, "A General Design Method of Primary Compensation Network for Dynamic WPT System Maintaining Stable Transmission Power", *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 31, no.12, pp .8343-8358, 2016
- [44] E. Gati, G. Kampitsis, S. Manias, "Variable Frequency Controller for Inductive Power Transfer in Dynamic Conditions", *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016
- [45] Budhia, M., Covic, G.A, and Boys, J.T: "Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, Nov. 2011

Παράρτημα Α

Στην **Ενότητα** αυτή περιγράφεται η διαδικασία εξαγωγής των συντελεστών της σχέσης (5.5) του **Κεφαλαίου 5** για τις επαγωγές L_1 , L_2 και M μέσω του περιβάλλοντος αριθμητικής υπολογιστικής *Matlab*.

Αρχικά, εισάγουμε τα δεδομένα στο *Workspace* μέσω του *Command Window*. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν τις τιμές των επαγωγών L_1 , L_2 και M , και της μετατόπισης x , για μετατοπίσεις από -20 cm ως 20 cm και παρουσιάζονται στον **Πίνακα Α.1**. Οι τιμές εισάγονται για κάθε μεταβλητή ξεχωριστά σε μορφή πίνακα-γραμμής ή πίνακα-στήλης.

$x(\text{cm})$	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$L_1(\mu\text{H})$	257	259	260	262	262	262	260	259	257
$L_2(\mu\text{H})$	253	258	259	262	259	262	259	258	253
$M(\mu\text{H})$	21	36.2	50.4	62.6	66	62.6	50.4	36.2	21

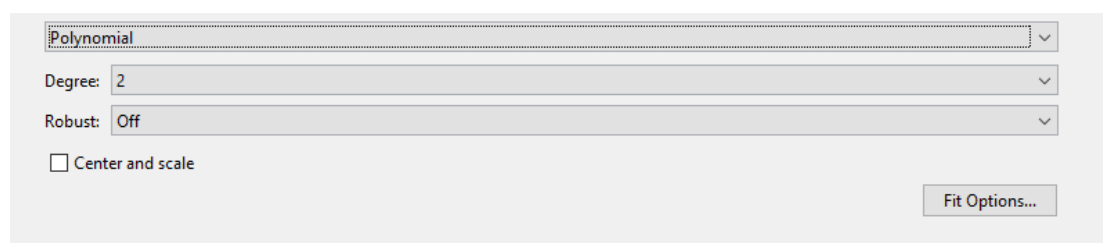
Πίνακας Α.1

Στη συνέχεια, πληκτρολογούμε τη λέξη "*cftool*" στο *Command Window* και αναδύεται ένα νέο παράθυρο με όνομα "*Curve Fitting Tool*".

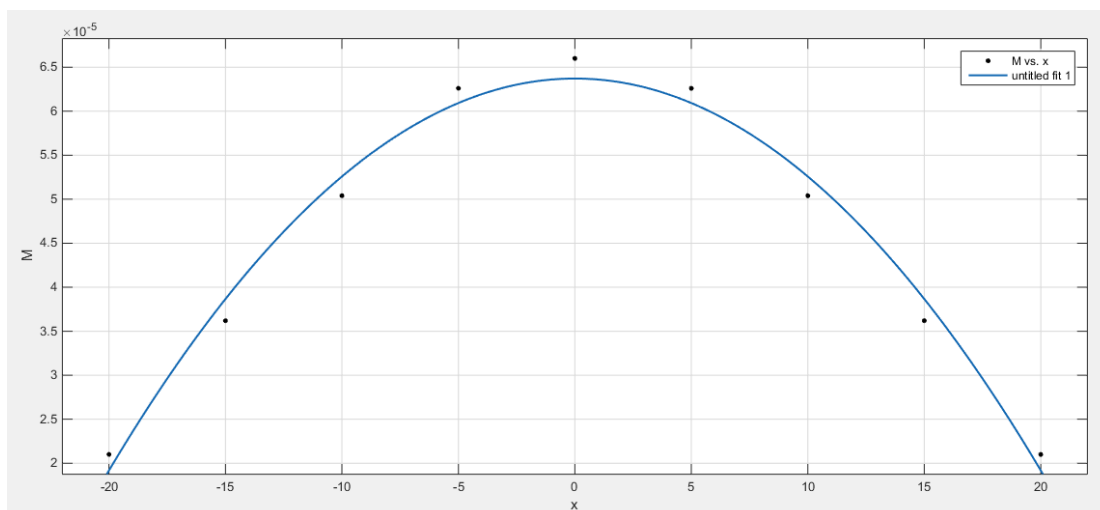
Στο τμήμα που βρίσκεται πάνω και αριστερά εισάγουμε τα δεδομένα.



Στην κατηγορία "*X data*" επιλέγουμε από τη λίστα τη μεταβλητή της μετατόπισης x , ενώ στην κατηγορία "*Y data*" επιλέγουμε εκ των τριών μεταβλητών των επαγωγών L_1 , L_2 και M .

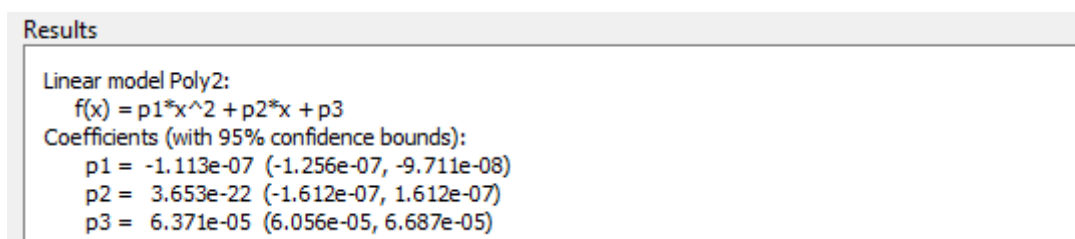


Στο τμήμα που βρίσκεται πάνω και στη μέση του παραθύρου, επιλέγουμε από τη λίστα τον τύπο προσαρμογής καμπύλης που επιθυμούμε. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέγουμε τον τύπο "Polynomial", ενώ στην κατηγορία "Degree" επιλέγουμε το "2". Με αυτό τον τρόπο, το πρόγραμμα προσαρμόζει τα δεδομένα "X data" και "Y data" ώστε να ταιριάζουν κατά προσέγγιση με σημεία ενός πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού.



Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται με σημεία τα δεδομένα "X data" και "Y data" τα οποία δόθηκαν προηγουμένως, σχετικά με την αμοιβαία επαγωγή, **M**, και με μπλε συνεχόμενη γραμμή απεικονίζεται η καμπύλη του πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού.

Στα αριστερά του παραθύρου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, όπως φαίνεται παρακάτω.



Στα αποτελέσματα παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών **p1**, **p2**, **p3** του πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού που προσεγγίζει την αμοιβαία επαγωγή.

Πραγματοποιώντας την παραπάνω διαδικασία για τις τρεις επαγωγές **L₁**, **L₂** και **M**, επιλέγοντας κάθε φορά στην κατηγορία "Y data" την αντίστοιχη μεταβλητή, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.1-1 του Κεφαλαίου 5.

Παράρτημα Β

Στην **Ενότητα** αυτή παρουσιάζονται οι τιμές των συντελεστών των σχέσεων (5.6), (5.12), (5.18) και (5.24) του **Κεφαλαίου 5**.

Συντ.	Τιμή
A_0	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.619 \cdot 10^{-4} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 + C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.6835 \cdot 10^{-11}$ $- C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 6.833 \cdot 10^{-8} - C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 1.3286 \cdot 10^{-7} + C_1 \cdot \omega^2 \cdot 2.619 \cdot 10^{-4}$ $+ C_2 \cdot \omega^2 \cdot 5.228 \cdot 10^{-4} - 1$
A_1	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 5.082 \cdot 10^{-23} - C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 8.9036 \cdot 10^{-29}$ $+ C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.4008 \cdot 10^{-25} + C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 3.3743 \cdot 10^{-25} + C_1 \cdot \omega^2 \cdot 5.082 \cdot 10^{-23}$ $- C_2 \cdot \omega^2 \cdot 1.301 \cdot 10^{-21}$
A_2	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.255 \cdot 10^{-8} + C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 2.4948 \cdot 10^{-16}$ $+ C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.0231 \cdot 10^{-11} + C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 2.6301 \cdot 10^{-12} - C_1 \cdot \omega^2 \cdot 1.255 \cdot 10^{-8}$ $- C_2 \cdot \omega^2 \cdot 3.914 \cdot 10^{-8}$
A_3	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.2271 \cdot 10^{-32} - C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.5461 \cdot 10^{-29}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 5.4985 \cdot 10^{-29}$
A_4	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 3.287 \cdot 10^{-18} - C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.8298 \cdot 10^{-16}$ $+ C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 1.1896 \cdot 10^{-14}$
A_5	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 6.9627 \cdot 10^{-36}$
A_6	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 2.3762 \cdot 10^{-22}$

Πίνακας Β.1: Συντελεστές Τοπολογίας Αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά (SS)

Συντ.	Τιμή
A_0	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 4.1476 \cdot 10^{-15} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.6835 \cdot 10^{-11}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.3734 \cdot 10^{-11} + C_1 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 6.8592 \cdot 10^{-8}$ $+ C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 1.3286 \cdot 10^{-7} - R_L^2 \cdot 2.619 \cdot 10^{-4} + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 4.1476 \cdot 10^{-15}$ $- \omega^2 \cdot 1.6835 \cdot 10^{-11}$
A_1	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 2.3229 \cdot 10^{-32} + C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 8.9036 \cdot 10^{-29}$ $+ C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 8.7921 \cdot 10^{-29} + C_1 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 2.662 \cdot 10^{-26}$ $+ C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 3.3018 \cdot 10^{-27} - R_L^2 \cdot 5.082 \cdot 10^{-23} - C_1 \cdot \omega^4 \cdot 2.3229 \cdot 10^{-32}$ $+ \omega^2 \cdot 8.9036 \cdot 10^{-29}$
A_2	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 7.4395 \cdot 10^{-19} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.4948 \cdot 10^{-16}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.4089 \cdot 10^{-15} - C_1 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 6.5737 \cdot 10^{-12}$ $- C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 2.6301 \cdot 10^{-12} + R_L^2 \cdot 1.255 \cdot 10^{-8} + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 7.4395 \cdot 10^{-19}$ $- \omega^2 \cdot 2.4948 \cdot 10^{-16}$
A_3	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 4.0755 \cdot 10^{-36} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.2271 \cdot 10^{-32}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.0143 \cdot 10^{-32} - C_1 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 1.2756 \cdot 10^{-30}$ $+ C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 5.4985 \cdot 10^{-29} + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 4.0755 \cdot 10^{-36} - \omega^2 \cdot 1.2271 \cdot 10^{-32}$
A_4	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.5306 \cdot 10^{-21} + C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.287 \cdot 10^{-18}$ $+ C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 6.505 \cdot 10^{-18} + C_1 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 1.575 \cdot 10^{-16}$ $- C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 1.1896 \cdot 10^{-14} - C_1 \cdot \omega^4 \cdot 1.5306 \cdot 10^{-21} + \omega^2 \cdot 3.287 \cdot 10^{-18}$
A_5	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 4.932 \cdot 10^{-39} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 6.9627 \cdot 10^{-36}$ $+ C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.4343 \cdot 10^{-36} + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 4.932 \cdot 10^{-39} - \omega^2 \cdot 6.9627 \cdot 10^{-36}$
A_6	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.4026 \cdot 10^{-25} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.3762 \cdot 10^{-22}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.0477 \cdot 10^{-22} - C_1 \cdot \omega^4 \cdot 1.4026 \cdot 10^{-25} - \omega^2 \cdot 2.3762 \cdot 10^{-22}$
A_7	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.1612 \cdot 10^{-42} - C_1 \cdot \omega^4 \cdot 1.1612 \cdot 10^{-42}$
A_8	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.4743 \cdot 10^{-28} + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 1.4743 \cdot 10^{-28}$

Πίνακας Β.2: Συντελεστές Τοπολογίας Αντιστάθμισης Παράλληλα-Παράλληλα (PP)

Συντ.	Τιμή
A_0	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 6.8592 \cdot 10^{-8} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 2.619 \cdot 10^{-4}$ $+ C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 4.1476 \cdot 10^{-15} - C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.6835 \cdot 10^{-11}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 3.3734 \cdot 10^{-11} + C_1 \cdot \omega^2 \cdot 6.8592 \cdot 10^{-8} + C_2 \cdot \omega^2 \cdot 1.3286 \cdot 10^{-7}$ $- 2.619 \cdot 10^{-4}$
A_1	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.662 \cdot 10^{-26} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 5.082 \cdot 10^{-23}$ $- C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 2.3229 \cdot 10^{-32} + C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 8.9036 \cdot 10^{-29}$ $+ C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 8.7921 \cdot 10^{-29} + C_1 \cdot \omega^2 \cdot 2.662 \cdot 10^{-26} - C_2 \cdot \omega^2 \cdot 3.3743 \cdot 10^{-25}$ $- 5.082 \cdot 10^{-23}$
A_2	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 6.5737 \cdot 10^{-12} + C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 1.255 \cdot 10^{-8}$ $+ C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 7.4395 \cdot 10^{-19} - C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.4948 \cdot 10^{-16}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 1.4089 \cdot 10^{-15} - C_1 \cdot \omega^2 \cdot 6.5737 \cdot 10^{-12} + C_2 \cdot \omega^2 \cdot 3.9316 \cdot 10^{-12}$ $+ 1.255 \cdot 10^{-8}$
A_3	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.2756 \cdot 10^{-30} + C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 4.0755 \cdot 10^{-36}$ $- C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.2271 \cdot 10^{-32} - C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 3.016 \cdot 10^{-32} - C_1 \cdot \omega^2 \cdot 1.2756 \cdot 10^{-30}$ $+ C_2 \cdot \omega^2 \cdot 5.4985 \cdot 10^{-29}$
A_4	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.575 \cdot 10^{-16} - C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.5306 \cdot 10^{-21}$ $+ C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.287 \cdot 10^{-18} + C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 6.505 \cdot 10^{-18} - C_2 \cdot \omega^2 \cdot 1.1739 \cdot 10^{-14}$
A_5	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 4.932 \cdot 10^{-39} - C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 6.927 \cdot 10^{-36} + C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 2.4343 \cdot 10^{-36}$
A_6	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.4026 \cdot 10^{-25} - C_2^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.3762 \cdot 10^{-22}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot \omega^4 \cdot 3.0477 \cdot 10^{-22}$
A_7	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.1612 \cdot 10^{-42}$
A_8	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.4743 \cdot 10^{-28}$

Πίνακας Β.3: Συντελεστές Τοπολογίας Αντιστάθμισης Παράλληλα-Σειρά (PS)

Συντ.	Τιμή
A_0	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.6835 \cdot 10^{-11} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 6.833 \cdot 10^{-8}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.3286 \cdot 10^{-7} + C_1 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 2.619 \cdot 10^{-4}$ $+ C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 5.228 \cdot 10^{-4} - R_L^2 + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 1.6835 \cdot 10^{-11} - \omega^2 \cdot 6.833 \cdot 10^{-8}$
A_1	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 8.9036 \cdot 10^{-23} + C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.4008 \cdot 10^{-25}$ $+ C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.3743 \cdot 10^{-25} + C_1 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 5.082 \cdot 10^{-23}$ $- C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 1.301 \cdot 10^{-21} - C_1 \cdot \omega^4 \cdot 8.9036 \cdot 10^{-29} + \omega^2 \cdot 3.4008 \cdot 10^{-25}$
A_2	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 2.4948 \cdot 10^{-16} + C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.0231 \cdot 10^{-11}$ $+ C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.6301 \cdot 10^{-12} - C_1 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 1.255 \cdot 10^{-8}$ $- C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^2 \cdot 3.914 \cdot 10^{-8} + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 2.4948 \cdot 10^{-16} + \omega^2 \cdot 1.0231 \cdot 10^{-11}$
A_3	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 1.2271 \cdot 10^{-32} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 2.5461 \cdot 10^{-29}$ $- C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 5.4985 \cdot 10^{-29} + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 1.2271 \cdot 10^{-32} + \omega^2 \cdot 2.5461 \cdot 10^{-29}$
A_4	$- C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 3.287 \cdot 10^{-18} - C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 3.8298 \cdot 10^{-16}$ $+ C_1 \cdot C_2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^4 \cdot 1.1896 \cdot 10^{-14} - C_1 \cdot \omega^4 \cdot 3.287 \cdot 10^{-18} - \omega^2 \cdot 3.8298 \cdot 10^{-16}$
A_5	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 6.9627 \cdot 10^{-36} + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 6.9627 \cdot 10^{-36}$
A_6	$C_1 \cdot C_2^2 \cdot R_L^2 \cdot \omega^6 \cdot 2.3762 \cdot 10^{-22} + C_1 \cdot \omega^4 \cdot 2.3762 \cdot 10^{-22}$

Πίνακας Β.4: Συντελεστές Τοπολογίας Αντιστάθμισης Σειρά-Παράλληλα (SP)

