



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

**Σύγκριση Αντιστροφέα Πλήρους Γέφυρας και Ενισχυτή
Κλάσης E για χρήση σε Σύστημα Επαγωγικής Φόρτισης
Βιολογικών Εμφυτευμάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Α. Μαριόλης

Επιβλέπων : Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



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

Σύγκριση Αντιστροφέα Πλήρους Γέφυρας και Ενισχυτή Κλάσης E για χρήση σε Σύστημα Επαγωγικής Φόρτισης Βιολογικών Εμφυτευμάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Α. Μαριόλης

Επιβλέπων : Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30ή Οκτωβρίου 2019.

.....
Στ. Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

.....
Κωνσταντίνος Α. Μαριόλης

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

Copyright © Κωνσταντίνος Α. Μαριόλης, 2019.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, η προσομοίωση και η σύγκριση συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με την χρήση δύο διαφορετικών τοπολογιών οδήγησης υψηλής διακοπτικής συχνότητας: αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και ενισχυτή κλάσης E, για εφαρμογή σε συστήματα ασύρματης φόρτισης μπαταρίας βιολογικών εμφυτευμάτων χαμηλής ισχύος, όπως για παράδειγμα ενός καρδιακού βηματοδότη.

Ο προτεινόμενος σχεδιασμός καλύπτει προδιαγραφές ισχύος εξόδου για την φόρτιση μιας τυπικής μπαταρίας 1000mAh (4V – 1A), δηλαδή έως και 4W.

Η διάταξη αποτελείται από την εκάστοτε μελετούμενη τοπολογία οδήγησης υψηλής συχνότητας, δύο συζευγμένα πηνία - όπου το δευτερεύον είναι εμφυτευμένο και το πρωτεύον εφάπτεται στο δέρμα ώστε να επιτυγχάνεται η μεταφορά της ενέργειας - , κύκλωμα συντονισμού, και ανορθωτή πλήρους γέφυρας της τάσης εξόδου του δευτερεύοντος τυλίγματος για την τροφοδότηση της μπαταρίας του εμφυτεύματος.

Πραγματοποιείται ανάλυση ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος, καθώς και ανάλυση των δύο προς σύγκριση τοπολογιών. Γίνονται προσομοιώσεις με τα λογισμικά Matlab-Simulink και Ltsrprice του συστήματος με τη χρήση και των δύο τοπολογιών, για την σύγκριση αυτών υπό διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας, διαφορετικές τιμές αντίστασης φορτίου εξόδου και διαφορετικές τιμές του συντελεστή σύζευξης. Επίσης μελετάται και προσομοιώνεται ένα σύστημα ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος, το οποίο προσαρμόζει το εύρος λειτουργίας των παλμών οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων των τοπολογιών, με στόχο τον περιορισμό της DC τάσης στην έξοδο του συστήματος σε επιθυμητά επίπεδα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται πειραματική αξιολόγηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος και για τις δύο μελετούμενες τοπολογίες, προς επαλήθευση των θεωρητικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

Μέσω της σύγκρισης της συμπεριφοράς των δύο τοπολογιών ως μέρος ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, προκύπτει το συμπέρασμα πως στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας (150 kHz – 320 kHz), η χρήση του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας ως τοπολογία οδήγησης του συστήματος αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή.

Λέξεις κλειδιά: Επαγωγική φόρτιση, συζευγμένα πηνία, βιολογικά εμφυτεύσιμες συσκευές, βηματοδότης, αντιστροφέας πλήρους γέφυρας, ενισχυτής κλάσης E, συντονισμός.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the study, simulation and comparison of an inductive power transfer system with the use of two different high switching frequency driving topologies: Full Bridge Inverter and Class E Amplifier, for use in low power biomedical implants charging systems, such as a cardiac pacemaker.

The specifications for the proposed design for charging a typical battery of 1000mAh (4V – 1A), are up to 4W output power.

The system consists of each one of the two high switching frequency driving topologies to be studied, two mutually coupled coils - where the secondary is implanted and the primary is placed on the skin surface so that energy is transferred -, a resonant circuit and a full bridge voltage rectifier of the secondary's output, that provides DC power to the implant's battery charger.

An analysis of an inductive power transfer system is being carried out, as well as an analysis of the two high switching frequency driving topologies which are to be compared. Simulations by Matlab-Simulink and Ltspice software are also carried out, for the two topologies to be studied and compared under several different conditions, such as various operation frequencies, load values and coupling coefficients. Furthermore, a control system located on the primary side, which adjusts the duty cycle of the driving pulses of the topologies' switching elements is being studied and simulated, which limits the DC output voltage to wanted reference levels.

Subsequently, an experimental review of the behavior of an inductive power transfer system is done for both topologies, for the validation of the theoretical and simulations' results.

Through the comparison of the behavior of the two driving topologies as parts of an inductive charging system for medical implants, under all the aforementioned conditions, it is concluded that Full Bridge Inverter is the optimal choice for this specific frequency range (150 kHz – 320 kHz), for this application.

Keywords: Inductive Charging, mutually coupled coils, Biomedical Implanted Devices, pacemaker, Full Bridge Inverter, Class E Amplifier, resonance.

Ευχαριστίες

Κατ' αρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες της διπλωματικής μου εργασίας κ. Σταύρο Παπαθανασίου, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και τον κ. Στέφανο Μανιά, Ομότιμο Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την πρόταση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος για μελέτη και την ευκαιρία που μου έδωσαν να εργασθώ πάνω σε αυτό, όπως επίσης και για την πολύτιμη καθοδήγησή τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Διδάκτορες κ. Γατή Ελένη και κ. Κοκόση Σωτήρη για την σημαντική βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, καθώς και για τη συμβολή τους στην πραγματοποίηση των πειραματικών διαδικασιών.

Ευχαριστώ πολύ τον φίλο και συμφοιτητή μου Λέκκα Κωνσταντίνο για τη βοήθειά του με την υλοποίηση τμημάτων της εργασίας στο Matlab, και όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου που με βοήθησαν με τη γνώμη και τις γνώσεις τους κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, για την απρόσκοπτη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο σχημάτων	14
Ευρετήριο Πινάκων	26
Ακρωνύμια	28
Εισαγωγή.....	30
Κεφάλαιο 1: Επαγωγική μεταφορά ισχύος.....	32
1.1: Ασύρματη μεταφορά ισχύος.....	32
1.2: Γενική περιγραφή συστημάτων επαγωγικής μεταφοράς ισχύος.....	34
1.2.1: Κατηγοριοποίηση συστημάτων Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος για φόρτιση συσκευών	35
1.3: Τρόποι ασύρματης τροφοδότησης	39
1.3.1: Χωρητική Μεταφορά Ισχύος στο κοντινό πεδίο (Near-Field Capacitive Power Transfer)	39
1.3.2: Μεταφορά Ισχύος μέσω Υπερήχων (Ultrasonics Power Transfer)	40
1.3.3: Μεταφορά Ισχύος στο Μέσο Πεδίο (Midfield Power Transfer)	41
1.3.4: Ηλεκτρομαγνητική Μεταφορά Ισχύος στο μακρινό πεδίο (Electromagnetic Far-Field Power Transfer)	42
1.3.5: Οπτική Μεταφορά Ισχύος (Optical Power Transfer).....	43
1.4: Εφαρμογές Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος.....	44
Κεφάλαιο 2: Βιολογικά Εμφυτεύματα	49
2.1: Εισαγωγή – Αναδρομή	49
2.2: Γενικά Χαρακτηριστικά – Απαιτήσεις	49
2.3: Τροφοδοσία Εμφυτευμάτων.....	51
2.3.1: Χαρακτηριστικά στοιχεία μπαταριών και φόρτισης	52
2.4: Θέματα Ασφαλείας – Διεθνείς Κανονισμοί και Πρότυπα	54
2.5: Εφαρμογές – Κατηγορίες Εμφυτευμάτων	58
2.6: Αξιολόγηση Επαγωγικής Φόρτισης Εμφυτευμάτων	60
Κεφάλαιο 3: Περιγραφή και ανάλυση της διάταξης	62
3.1: Βαθμίδες του συστήματος	62
3.2: Αντιστροφέας υψηλής διακοπτικής συχνότητας.....	72
3.2.1: Αντιστροφέας Πλήρους Γέφυρας.....	73
3.2.2: Ενισχυτής κλάσης E	77
3.3: Ανάλυση Συστήματος Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος με αντιστάθμιση Σειράς – Σειράς (SS)	83
Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση Συστήματος.....	87

4.1: Προσομοίωση επαγωγικού φορτιστή με Αντιστροφέα Πλήρους Γέφυρας	88
4.1.1: Προσομοίωση με σταθερές συνθήκες σύζευξης, συχνότητας και αντίστασης φορτίου	89
4.1.2: Προσομοίωση με μεταβαλλόμενες συνθήκες σύζευξης, συχνότητας και αντίστασης φορτίου	98
4.2: Προσομοίωση επαγωγικού φορτιστή με Ενισχυτή Κλάσης E.....	125
4.2.1: Προσομοίωση με σταθερές συνθήκες σύζευξης, συχνότητας και αντίστασης φορτίου	126
4.2.2: Προσομοίωση με μεταβαλλόμενες συνθήκες σύζευξης, συχνότητας και αντίστασης φορτίου	134
4.3: Τεχνικές ελέγχου	160
4.3.1: Προσομοίωση Τεχνικής Ελέγχου Εύρους Παλμών στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας	163
4.3.2: Προσομοίωση Τεχνικής Ελέγχου Εύρους Παλμών στον Ενισχυτή Κλάσης E.....	169
Κεφάλαιο 5: Πειραματική Αξιολόγηση	175
5.1: Πειραματικές μετρήσεις συστήματος επαγωγικής φόρτισης με διάταξη αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.....	176
5.2: Πειραματικές μετρήσεις συστήματος επαγωγικής φόρτισης με διάταξη ενισχυτή κλάσης E	184
Κεφάλαιο 6: Συγκρίσεις – Συμπεράσματα	197
6.1: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	197
6.1.1: Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R) – Σταθερός συντελεστής σύζευξης (k).....	198
6.1.2: Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή αντίσταση φορτίου (R).....	215
6.1.3: Μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή συχνότητα λειτουργίας (f).....	226
6.1.4: Αρμονική ανάλυση των ρευμάτων των τυλιγμάτων.....	237
6.1.5: Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας	239
6.2: Αποτελέσματα Πειραμάτων.....	246
6.3: Σύγκριση γενικών χαρακτηριστικών	248
6.4: Τελική Πρόταση.....	251
6.5: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	252
Επίλογος.....	253
Βιβλιογραφία	255

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 1.1: Πρόταση ασύρματης μετάδοσης ισχύος από μια πηγή σε πολλές συσκευές της εταιρίας WiTricity [1].....	33
Σχήμα 1.2:Τυπικό μονοφασικό διάγραμμα βαθμίδων συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος [7]	35
Σχήμα 1.3: Εφαρμογές στατικής φόρτισης. Αριστερά: Επιφάνεια φόρτισης φορητών συσκευών [11] Δεξιά: Σταθερό πλαίσιο πρωτεύοντος για την φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος [1].....	36
Σχήμα 1.4: Εφαρμογή δυναμικής φόρτισης για την φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου εν κινήσει [12].	37
Σχήμα 1.5: Τυπικό σύστημα χωρητικής μεταφοράς ισχύος σε εμφυτεύσιμη συσκευή: Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται κατευθυνόμενο από τις πρωτεύουσες πλάκες των πυκνωτών, δημιουργεί ρεύματα μετατόπισης που επιτρέπουν την μεταφορά ισχύος στις δευτερεύουσες πλάκες των πυκνωτών μέσα στο σώμα [15].....	39
Σχήμα 1.6: Τυπικό διάγραμμα συστήματος μεταφοράς ενέργειας με υπερήχους σε εμφυτεύσιμη συσκευή [15].	40
Σχήμα 1.7: Σύστημα ασύρματης τροφοδότησης εμφυτεύματος στο μέσο πεδίο [15]......	41
Σχήμα 1.8: Α) Παράσταση ασύρματης τροφοδότησης εμφυτεύματος στην καρδιά, όπου Β) φαίνονται όλα τα στρώματα ιστών μέσω των οποίων διαδίδονται τα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα [15].	42
Σχήμα 1.9: Σύστημα ηλεκτρομαγνητικής μεταφοράς ενέργειας στο ευρύ πεδίο [15].....	42
Σχήμα 1.10: Οπτική μεταφορά ισχύος μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας [17].	43
Σχήμα 1.11: Επιφάνεια με ενσωματωμένο ασύρματο φορτιστή συσκευών [17].	44
Σχήμα 1.12: Αρχή λειτουργίας συστήματος RFID [17].	45
Σχήμα 1.13: Σύστημα ασύρματης φόρτισης αυτοκινήτου σε χώρο στάθμευσης της εταιρίας Νοίνο [3].	45
Σχήμα 1.14: Σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος για τροφοδότηση υποβρύχιων φορτίων [17].	46
Σχήμα 1.15: Αριστερά: Ζώνη ασύρματης συλλογής δεδομένων, Δεξιά: Νευροαισθητήρας συλλογής δεδομένων [18].....	47
Σχήμα 1.16: Αριστερά: Σύστημα Ασύρματης Μεταφοράς Ισχύος σε σύστημα αξιοποίησης νευρικού αισθητήρα για τον έλεγχο της κίνησης μηχανικού χεριού [18], Δεξιά: Ενδοσκοπικό σύστημα με χρήση Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος για την τροφοδότηση μικροσκοπικού ρομπότ στο εσωτερικό του σώματος [17].	47
Σχήμα 1.17: Αριστερά: Σύστημα Υποβοήθησης Αριστερής Κοιλίας[19] , Δεξιά: Διέγερση νευρών με χρήση Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος [18].....	48
Σχήμα 2.1: Κατά αύξουσα σειρά ισχύος: Βιοαισθητήρες, Βηματοδότες, Εμφυτεύσιμοι Καρδιακοί Απινιδωτές, Κοχλιακά εμφυτεύματα, Εμφυτεύματα αμφιβληστροειδούς, Συσκευές κοιλιακής υποβοήθησης [24].	54
Σχήμα 2.2: Επίπεδα αναφοράς της ICNIRP της ανθρώπινης έκθεσης σε χρονομεταβλητό μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο. Με συνεχόμενη γραμμή παριστάνεται η έκθεση στους εργασιακούς χώρους και με διακεκομμένη η έκθεση σε ευρύτερους δημόσιους χώρους [25].	56
Σχήμα 2.3: Διάγραμμα επαγωγικής φόρτισης βηματοδότη. Η εξωτερική μπαταρία φορτίζει την μπαταρία του εμφυτεύματος, ενώ παράλληλα αποστέλλονται πληροφορίες σε μία εξωτερική μονάδα καταγραφής [32].	58
Σχήμα 2.4: Α) Τυπική διάταξη συστήματος εμφυτεύματος κοχλία. Το πηνίο του εμφυτεύματος (RX) τοποθετείται κάτω από το κρανίο και πίσω από το αυτί και τροφοδοτείται από το εξωτερικό πηνίο (TX) μέσω επαγωγής. Β) Η σωστή σύζευξη των πηνίων γίνεται με χρήση μόνιμων μαγνητών στο κέντρο τους [15].	59
Σχήμα 2.5: Σύστημα επαναφοράς όρασης. Α) Εξωτερική μονάδα, Β) Χωρική τοποθέτηση του εμφυτεύματος, C) Εμφύτευμα ίριδας [15].	60

Σχήμα 3.1: Απεικόνιση πεπλεγμένης ροής και ροής σκέδασης [6].	63
Σχήμα 3.2: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα των συζευγμένων πηνίων και (β) μοντέλο σκέδασης [6].	64
Σχήμα 3.3: Αριστερά: Καμπύλες συντονισμού της έντασης του ρεύματος για διάφορες τιμές της ωμικής αντίστασης R του κυκλώματος. Δεξιά: Γραφική παράσταση της σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος συναρτήσει της συχνότητας της διεγείρουσας τάσης [34].	65
Σχήμα 3.4: Γραφική παράσταση της μέσης ισχύος συναρτήσει της κυκλικής συχνότητας της διεγείρουσας τάσης [34].	66
Σχήμα 3.5: (α) κανονικοποιημένη ισχύς εξόδου συναρτήσει της συχνότητας για διάφορους συντελεστές ποιότητας και (β) διαφορά φάσης τάσης – ρεύματος εισόδου και τιμή σύνθετης αντίστασης συναρτήσει της συχνότητας [6].	67
Σχήμα 3.6: Τοπολογίες συντονισμού, α) ΣΣ, β) ΣΠ, γ) ΠΣ, δ) ΠΠ [5].	69
Σχήμα 3.7: Φαινόμενο διακλάδωσης - Απόσχιση συχνότητας συντονισμού [42].	70
Σχήμα 3.8: Μεταβολές της φάσης της σύνθετης αντίστασης εισόδου συναρτήσει του συντελεστή σύζευξης – Επίδραση φαινομένου διακλάδωσης [42].	70
Σχήμα 3.9: Φαινόμενο διακλάδωσης τρίαρινας [6].	71
Σχήμα 3.10: α) Κύκλωμα ισχύος αντιστροφέα πλήρους γέφυρας β) Παλμοί διέγερσης διακοπών και ιδανικές κυματομορφές τάσης εξόδου δύο επιπέδων και της θεμελιώδους συνιστώσας της [45].	73
Σχήμα 3.11: Ενεργοποιημένες διαδρομές αντιστροφέα πλήρους γέφυρας ανάλογα με την παραγόμενη τάση εξόδου και κατεύθυνση του ρεύματος εξόδου [46].	74
Σχήμα 3.12: Τοποθέτηση φίλτρου μεταξύ ανορθωτή και αντιστροφέα [3].	75
Σχήμα 3.13: Κύκλωμα ενισχυτή κλάσης E [50].	77
Σχήμα 3.14: Καταστάσεις λειτουργίας ενισχυτή κλάσης E: (α) Όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε αγωγή (β) Όταν ο διακόπτης δε βρίσκεται σε αγωγή [51].	78
Σχήμα 3.15: Κανονικοποιημένες κυματομορφές τάσης και ρεύματος στοιχείων ενισχυτή κλάσης E υπό λειτουργία σε βέλτιστες συνθήκες [50].	79
Σχήμα 3.16: Περιπτώσεις λειτουργίας ενισχυτή κλάσης E υπό μη-βέλτιστες συνθήκες. (α): μη μηδενική τάση διακόπτη κατά τη μετάβαση σε αγωγή, (β) μηδενισμός τάσης διακόπτη πριν τη μετάβαση σε αγωγή και αγωγή αντιπαράλληλης διόδου και (γ) μηδενισμός τάσης διακόπτη πριν τη μετάβαση σε αγωγή, αγωγή αντιπαράλληλης διόδου και θετική τιμή τάσης διακόπτη κατά την μετάβαση σε αγωγή [63].	81
Σχήμα 3.17: Ισοδύναμο κύκλωμα πρώτης αρμονικής συνιστώσας IPTS με αντιστάθμιση σειράς – σειράς [6].	83
Σχήμα 4.1: Κύκλωμα συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και αντιστάθμιση σειράς – σειράς.	88
Σχήμα 4.2: Κύκλωμα προσομοίωσης συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και αντιστάθμιση σειράς - σειράς στο Simulink.	89
Σχήμα 4.3: Παλμοί διέγερσης των MOSFET Q1 και Q4 (πάνω) και Q2 και Q3 (κάτω).	89
Σχήμα 4.4: Ρεύμα εισόδου του φίλτρου εισόδου του αντιστροφέα.	90
Σχήμα 4.5: Ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα.	90
Σχήμα 4.6: Τάση πρωτεύοντος, $V_{primary}$.	90
Σχήμα 4.7: Ρεύμα πρωτεύοντος, $I_{primary}$.	91
Σχήμα 4.8: Τάση δευτερεύοντος, $V_{secondary}$ (α): Στην μεταβατική και μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, (β): Σε μεγέθυνση στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.	91
Σχήμα 4.9: Ρεύμα δευτερεύοντος, $I_{secondary}$.	92
Σχήμα 4.10: Διαφορά φάσης τάσης – ρεύματος πρωτεύοντος.	92
Σχήμα 4.11: Τάση (μπλε) και ρεύμα (κόκκινο) πρωτεύοντος.	92
Σχήμα 4.12: Τάση (μπλε) και ρεύμα (κόκκινο) δευτερεύοντος.	93
Σχήμα 4.13: Τάσεις και ρεύματα τυλιγμάτων. Με μπλε απεικονίζεται η τάση πρωτεύοντος, με κόκκινο το ρεύμα πρωτεύοντος, με μαύρο η τάση δευτερεύοντος και με πράσινο το ρεύμα δευτερεύοντος.	93
Σχήμα 4.14: Τάση πηνίου πρωτεύοντος.	93

Σχήμα 4.15: Τάση πηνίου δευτερεύοντος.	94
Σχήμα 4.16: Ανορθωμένη τάση εξόδου, V_{out}	94
Σχήμα 4.17: Ανορθωμένο ρεύμα εξόδου, I_{out}	95
Σχήμα 4.18: Ρεύματα και τάσεις στα MOSFET 1 και 3.	96
Σχήμα 4.19: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος πρωτεύοντος.	97
Σχήμα 4.20: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος δευτερεύοντος.	97
Σχήμα 4.21: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και φορτίο, για σταθερή σύζευξη.	99
Σχήμα 4.22: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	99
Σχήμα 4.23: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	100
Σχήμα 4.24: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	100
Σχήμα 4.25: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	101
Σχήμα 4.26: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	102
Σχήμα 4.27: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	102
Σχήμα 4.28: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	103
Σχήμα 4.29: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	103
Σχήμα 4.30: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	104
Σχήμα 4.31: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	104
Σχήμα 4.32: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	105
Σχήμα 4.33: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	106
Σχήμα 4.34: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	106
Σχήμα 4.35: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	107
Σχήμα 4.36: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	107
Σχήμα 4.37: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	108
Σχήμα 4.38: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	108
Σχήμα 4.39: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	109
Σχήμα 4.40: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	109
Σχήμα 4.41: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	110
Σχήμα 4.42: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	110
Σχήμα 4.43: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	111

Σχήμα 4.44: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	111
Σχήμα 4.45: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	112
Σχήμα 4.46: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	113
Σχήμα 4.47: Ισχύς εξόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	113
Σχήμα 4.48: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	114
Σχήμα 4.49: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	115
Σχήμα 4.50: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	115
Σχήμα 4.51: Ισχύς εξόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	116
Σχήμα 4.52: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	116
Σχήμα 4.53: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	118
Σχήμα 4.54: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	119
Σχήμα 4.55: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.	120
Σχήμα 4.56: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	121
Σχήμα 4.57: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	122
Σχήμα 4.58: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	123
Σχήμα 4.59: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	124
Σχήμα 4.60: εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	124
Σχήμα 4.61: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	124
Σχήμα 4.62: Κύκλωμα συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση ενισχυτή κλάσης E και αντιστάθμιση σειράς – σειράς.	125
Σχήμα 4.63: Κύκλωμα προσομοίωσης συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση ενισχυτή κλάσης E και αντιστάθμιση σειράς - σειράς στο Simulink.	126
Σχήμα 4.64: Βασικές κυματομορφές στοιχείων Ενισχυτή Κλάσης E.	126
Σχήμα 4.65: Ρεύμα εισόδου (α) στη στη μεταβατική και (β) στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.	127
Σχήμα 4.66: Τάση πρωτεύοντος.	128
Σχήμα 4.67: Ρεύμα πρωτεύοντος.	128
Σχήμα 4.68: Τάση δευτερεύοντος.	128
Σχήμα 4.69: Ρεύμα δευτερεύοντος.	129
Σχήμα 4.70: Τάση (μπλε) και ρεύμα (κόκκινο) πρωτεύοντος.	129
Σχήμα 4.71: Τάση (μπλε) και ρεύμα (κόκκινο) δευτερεύοντος.	130
Σχήμα 4.72: Τάσεις και ρεύματα τυλιγμάτων. Με μπλε απεικονίζεται η τάση πρωτεύοντος, με κόκκινο το ρεύμα πρωτεύοντος, με μαύρο η τάση δευτερεύοντος και με πράσινο το ρεύμα δευτερεύοντος.	130

Σχήμα 4.73: Τάση στο πηνίο πρωτεύοντος.....	130
Σχήμα 4.74: Τάση στο πηνίο δευτερεύοντος.....	131
Σχήμα 4.75: Ανορθωμένη τάση εξόδου, V_{out}	131
Σχήμα 4.76: Ανορθωμένο ρεύμα εξόδου, I_{out}	131
Σχήμα 4.77: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος πρωτεύοντος.....	133
Σχήμα 4.78: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος δευτερεύοντος.....	133
Σχήμα 4.79: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	134
Σχήμα 4.80: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	135
Σχήμα 4.81: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	135
Σχήμα 4.82: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	136
Σχήμα 4.83: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	137
Σχήμα 4.84: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	137
Σχήμα 4.85: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	138
Σχήμα 4.86: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	138
Σχήμα 4.87: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	139
Σχήμα 4.88: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	139
Σχήμα 4.89: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	140
Σχήμα 4.90: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	140
Σχήμα 4.91: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	141
Σχήμα 4.92: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	142
Σχήμα 4.93: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	142
Σχήμα 4.94: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	143
Σχήμα 4.95: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	143
Σχήμα 4.96: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	144
Σχήμα 4.97: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	144
Σχήμα 4.98: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	145
Σχήμα 4.99: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	145
Σχήμα 4.100: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	146
Σχήμα 4.101: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.....	146

Σχήμα 4.102: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	147
Σχήμα 4.103: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	148
Σχήμα 4.104: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	148
Σχήμα 4.105: Ισχύς εξόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	149
Σχήμα 4.106: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	149
Σχήμα 4.107: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	150
Σχήμα 4.108: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	151
Σχήμα 4.109: Ισχύς εξόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	151
Σχήμα 4.110: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	152
Σχήμα 4.111: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	153
Σχήμα 4.112: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	154
Σχήμα 4.113: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.....	155
Σχήμα 4.114: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	156
Σχήμα 4.115: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	157
Σχήμα 4.116: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.	158
Σχήμα 4.117: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	159
Σχήμα 4.118: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	159
Σχήμα 4.119: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.	159
Σχήμα 4.120: Σχηματικό διάγραμμα εφαρμογής κυκλώματος ελέγχου εύρους παλμών στα μελετούμενα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος.....	162
Σχήμα 4.121: Κύκλωμα Ελέγχου Εύρους Παλμού αντιστροφεία πλήρους γέφυρας.	163
Σχήμα 4.122: Μεταβλητή τάση εξόδου, για διαφορετικές τιμές τάσης αναφοράς.	164
Σχήμα 4.123: Μέση απόδοση συστήματος υπό μεταβλητή τάση εξόδου.	164
Σχήμα 4.124: Τάσεις και ρεύματα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον για κάθε τιμή της τάσης αναφοράς. (α): $V_{ref}= 4\text{ V}$, (β): $V_{ref}= 3.8\text{ V}$, (γ): $V_{ref}= 3.5\text{ V}$, (δ): $V_{ref}= 3.2\text{ V}$	166
Σχήμα 4.125: Σταθερή τάση εξόδου σε μεταβολή της τιμής της αντίστασης φορτίου.....	167
Σχήμα 4.126: Μέση απόδοση συστήματος υπό μεταβλητή τιμή αντίστασης φορτίου.	167
Σχήμα 4.127: Τάσεις και ρεύματα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον για κάθε τιμή της αντίστασης φορτίου. (α): $R=10\ \Omega$, (β): $R=20\ \Omega$, (γ): $R=30\ \Omega$	168
Σχήμα 4.128: Κύκλωμα Ελέγχου Εύρους Παλμού Ενισχυτή Κλάσης E.	169
Σχήμα 4.129: Μεταβλητή τάση εξόδου, για διαφορετικές τιμές τάσης αναφοράς.	170
Σχήμα 4.130: Μέση απόδοση συστήματος υπό μεταβλητή τάση εξόδου.	170
Σχήμα 4.131: Τάσεις και ρεύματα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον για κάθε τιμή της τάσης αναφοράς. (α): $V_{ref}= 4\text{ V}$, (β): $V_{ref}= 3.8\text{ V}$, (γ): $V_{ref}= 3.5\text{ V}$, (δ): $V_{ref}= 3.2\text{ V}$	171

Σχήμα 4.132: Σταθερή τάση εξόδου σε μεταβολή της τιμής της αντίστασης φορτίου.	172
Σχήμα 4.133: Μέση απόδοση συστήματος υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου.	172
Σχήμα 4.134: Τάσεις και ρεύματα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον για κάθε τιμή της αντίστασης φορτίου. (α): $R=10 \Omega$, (β): $R=20 \Omega$, (γ): $R=30 \Omega$	173
Σχήμα 5.1: Πειραματική διάταξη συστήματος με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.....	176
Σχήμα 5.2: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για $V_{in}=10 \text{ V}$, $k=0.6$, $R=5 \Omega$	178
Σχήμα 5.3: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για $V_{in}=10 \text{ V}$, $k=0.39$, $R=5 \Omega$	178
Σχήμα 5.4: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για $V_{in}=5 \text{ V}$, $k=0.15$, $R=5 \Omega$	179
Σχήμα 5.5: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για $V_{in}=6 \text{ V}$, $k=0.6$, $R=10 \Omega$	179
Σχήμα 5.6: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για $V_{in}=6 \text{ V}$, $k=0.39$, $R=10 \Omega$	180
Σχήμα 5.7: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της DC απόδοσης της διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας και $k=0.6$	182
Σχήμα 5.8: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εξόδου της διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας και $k=0.6$	182
Σχήμα 5.9: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εισόδου της διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας και $k=0.6$	183
Σχήμα 5.10: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της τάσης εξόδου της διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας και $k=0.6$	183
Σχήμα 5.11: Πειραματική διάταξη συστήματος με ενισχυτή κλάσης E.....	184
Σχήμα 5.12: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{in}=6 \text{ V}$, $k=0.6$, $R=5 \Omega$	186
Σχήμα 5.13: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{in}=6 \text{ V}$, $k=0.15$, $R=5 \Omega$	187
Σχήμα 5.14: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{in}=6 \text{ V}$, $k=0.39$, $R=10 \Omega$	187
Σχήμα 5.15: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{in}=6 \text{ V}$, $k=0.6$, $R=10 \Omega$	188
Σχήμα 5.16: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{in}=12 \text{ V}$, $k=0.6$, $R=20 \Omega$	188
Σχήμα 5.17: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{in}=12 \text{ V}$, $k=0.39$, $R=20 \Omega$	189
Σχήμα 5.18: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της DC απόδοσης της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.39$	191
Σχήμα 5.19: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εξόδου της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.39$	191
Σχήμα 5.20: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εισόδου της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.39$	192
Σχήμα 5.21: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της τάσης εξόδου της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.39$	192
Σχήμα 5.22: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $k=0.39$ και διάφορες συχνότητες λειτουργίας : (α) 180 kHz, (β) 200 kHz, (γ) 220 kHz, (δ) 250 kHz, (ε) 270 kHz, (στ) 310 kHz, (ζ) 320 kHz και (η) 330 kHz.	194

Σχήμα 6.73: THD (%) Ρεύματος δευτερεύοντος, συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).....	238
Σχήμα 6.74: THD (%) Ρεύματος δευτερεύοντος, συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).....	239
Σχήμα 6.75: Τάση πυκνωτή συντονισμού πρωτεύοντος V_{C1} (V), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).	240
Σχήμα 6.76: Τάση πυκνωτή συντονισμού πρωτεύοντος V_{C1} (V), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).	240
Σχήμα 6.77: Τάση πηνίου πρωτεύοντος V_{L1} (V), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).....	241
Σχήμα 6.78: Τάση πηνίου πρωτεύοντος (V_{L1}), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).	241
Σχήμα 6.79: Τάση πυκνωτή συντονισμού δευτερεύοντος (V_{C2}), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).	242
Σχήμα 6.80: Τάση πυκνωτή συντονισμού δευτερεύοντος (V_{C2}), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).	242
Σχήμα 6.81: Τάση πηνίου δευτερεύοντος V_{L2} (V), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).....	243
Σχήμα 6.82: Τάση πηνίου δευτερεύοντος (V_{L2}), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).....	243
Σχήμα 6.83: Διάγραμμα σύγκρισης των δύο συστημάτων. $k=0.6$, $R=10 \Omega$	244
Σχήμα 6.84: Διάγραμμα σύγκρισης των δύο συστημάτων. $k=0.6$, $R=40 \Omega$	244
Σχήμα 6.85: Διάγραμμα σύγκρισης των δύο συστημάτων. $k=0.39$, $R=10 \Omega$	245
Σχήμα 6.86: Διάγραμμα σύγκρισης των δύο συστημάτων. $k=0.39$, $R=40 \Omega$	245
Σχήμα 6.87: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων απόδοσης συστήματος $\eta_{DC}(\%)$, με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (μπλε χρώμα) και ενισχυτή κλάσης E (κόκκινο χρώμα).....	246
Σχήμα 6.88: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων ισχύος εξόδου P_{out} (W) συστήματος, με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (μπλε χρώμα) και ενισχυτή κλάσης E (κόκκινο χρώμα).....	247
Σχήμα 6.89: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων ισχύος εισόδου P_{in} (W) συστήματος, με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (μπλε χρώμα) και ενισχυτή κλάσης E (κόκκινο χρώμα).....	247
Σχήμα 6.90: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων κέρδους τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος, με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (μπλε χρώμα) και ενισχυτή κλάσης E (κόκκινο χρώμα).....	248

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Βασικοί περιορισμοί του Επαγόμενου Ρεύματος και του Ηλεκτρικού Πεδίου, όπου f_H : η συχνότητα σε Hz [6].	55
Πίνακας 2.2: Επίπεδα αναφοράς. fM: η συχνότητα σε MHz [6].....	56
Πίνακας 3.1: Επιλεγθείσες τιμές στοιχείων για την υλοποίηση του ενισχυτή κλάσης E.	80
Πίνακας 4.1: Πειραματικές τιμές του συντελεστή σύζευξη των δύο πηνίων ανάλογα με την μεταξύ τους απόσταση.....	87
Πίνακας 4.2: Τιμές προσομοίωσης συστήματος με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας στο Simulink.	88
Πίνακας 4.3: Τιμές παραμέτρων συστήματος κατά την προσομοίωσή του σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.	98
Πίνακας 4.4 : Τιμές προσομοίωσης συστήματος με χρήση ενισχυτή κλάσης E στο Simulink.....	125
Πίνακας 5.1: Λίστα στοιχείων πειραματικής διάταξης.....	175

Ακρωνύμια

ADC	Asymmetrical Duty Cycle
EMI	Electromagnetic Interference
ESR	Equivalent Series Resistance
FHA	First Harmonic Approximation
GaN	Gallium Nitride
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMD	Implantable Medical Device
IPT	Inductive Power Transfer
IPTS	Inductive Power Transfer System
PI	Proportional – Integral
PWM	Pulse Width Modulation
SAR	Specific Absorption Ratio
SiC	Silicon Carbide
TET	Transcutaneous Energy Transfer
THD	Total Harmonic Distortion
ZCS	Zero Current Switching
ZVS	Zero Voltage Switching

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, οι βιολογικά εμφυτεύσιμες συσκευές εισάγονται με ολοένα και αυξανόμενο ρυθμό στην ζωή του ανθρώπου. Η ανάγκη για βελτίωση της ποιότητας ζωής, σε συνάρτηση με την ταχύτατη ανάπτυξη της ιατρικής και της τεχνολογίας οδηγούν στην συνεχόμενη ανάπτυξη και εξέλιξη τέτοιων συσκευών. Συσκευές υποβοήθησης όπως ο Βηματοδότης, το Σύστημα Υποβοήθησης Αριστερής Κουλίας (LVAD) και το Κοχλιακό Εμφύτευμα, καθώς επίσης και συσκευές διάγνωσης όπως οι γαστρικές κάψουλες είναι μερικά μόνο παραδείγματα των μέσων με τα οποία εκατομμύρια ασθενείς με χρόνιες παθήσεις ανά τον κόσμο βρίσκουν λύσεις που παλαιότερα φάνταζαν αδύνατες.

Παρόλα αυτά, ένα από τα κυριότερα ζητήματα προς αντιμετώπιση είναι η περιορισμένη διάρκεια ζωής των μπαταριών που τροφοδοτούν αυτές τις συσκευές. Την λύση σε αυτό το ζήτημα καλείται να δώσει η ασύρματη φόρτιση.

Η ασύρματη φόρτιση μπορεί εκ πρώτης όψεως να φαντάζει ως πολυτέλεια, αλλά μέσω μίας λεπτομερέστερης μελέτης μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι ίσως είναι αναγκαία και επιθυμητή, καθώς απαλλάσσει τον ασθενή από πρόσθετες χειρουργικές επεμβάσεις για την αντικατάσταση της μπαταρίας της εκάστοτε εμφυτεύσιμης συσκευής και συμβάλλει στην μείωση του όγκου της μπαταρίας (και κατ' επέκταση του όλου συστήματος), ενισχύοντας έτσι την ευελιξία της χρήσης των εμφυτεύσιμων συσκευών. Συνεπώς, αν το σύστημα ασύρματης φόρτισης αυτών των συσκευών κατορθώσει να ξεπεράσει κάποιους περιορισμούς και να είναι αποδοτικό, ασφαλές, αξιόπιστο, εύχρηστο και οικονομικό, στο μέλλον μπορεί να αποτελεί βασικό τμήμα της δομής τους.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη της συμπεριφοράς μιας διάταξης ασύρματης επαγωγικής φόρτισης μιας εμφυτεύσιμης συσκευής χαμηλής ισχύος, όπως είναι ένας καρδιακός βηματοδότης. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μία πολυεπίπεδη σύγκριση δύο διαφορετικών τοπολογιών αντιστροφέα υψηλής διακοπτικής συχνότητας, του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και του αντιστροφέα κλάσης E. Ο αντιστροφέας υψηλής διακοπτικής συχνότητας είναι ένα πολύ σημαντικό τμήμα του συνολικού συστήματος, καθώς μετατρέπει την τάση τροφοδοσίας σε εναλλασσόμενη τάση κατάλληλης συχνότητας για να επιτευχθεί η μεταφορά της ισχύος.

Η δε επαγωγική μεταφορά ισχύος, παρά το ότι υπάρχουν και άλλοι τρόποι ασύρματης μεταφοράς ισχύος, αποτελεί μία πολύ ασφαλή λύση στην φόρτιση εμφυτεύσιμων συσκευών, καθώς στηρίζεται στην μαγνητική σύζευξη δύο πηνίων που διεγείρονται σε σχετικά χαμηλή συχνότητα της τάξης μεγέθους των εκατοντάδων kHz, ελαττώνοντας έτσι την αρνητική αλληλεπίδραση των ανθρώπινων ιστών με το μαγνητικό πεδίο.

Στο 1^ο κεφάλαιο αναλύεται η ασύρματη μεταφορά ισχύος, οι διάφοροι τρόποι επίτευξης αυτής καθώς επίσης και μια πιο συγκεκριμένη αναφορά στον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων επαγωγικής μεταφοράς ισχύος.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση των γενικών στοιχείων που αφορούν στα βιολογικά εμφυτεύματα, διάφορες περιπτώσεις όπου αυτά βρίσκουν εφαρμογή και το πώς μπορούν να συσχετισθούν και να αλληλεπιδράσουν με την ασύρματη φόρτιση.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά σε κάθε βαθμίδα ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης, πραγματοποιείται θεωρητική ανάλυση αυτού και παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια αναλύονται ξεχωριστά οι δύο τοπολογίες προς σύγκριση ώστε να αξιολογηθούν μετέπειτα ως μέρος του συνολικού συστήματος επαγωγικής φόρτισης.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συνολικού συστήματος που πραγματοποιήθηκαν με τα λογισμικά Matlab-Simulink και LTspice για τις δύο μελετώμενες τοπολογίες, υπό διάφορες συνθήκες σύζευξης, σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και αντιστάσεων φορτίου. Επίσης, γίνεται χρήση συστήματος ελέγχου της μεταφερόμενης ισχύος στην αντίσταση φορτίου και καταγραφή της συμπεριφοράς των δύο τοπολογιών συνδυαστικά με αυτό.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν πειραματικά, κατά την μελέτη των αντίστοιχων κυκλωμάτων στο εργαστήριο.

Στο 6^ο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα των προσομοιώσεων και της πειραματικής διαδικασίας και η αξιολόγηση αυτών. Γίνεται μια ολοκληρωμένη σύγκριση της επίδρασης των δύο διαφορετικών τοπολογιών στην συνολική λειτουργία του συστήματος, παρατίθεται μία συμπερασματική – τελική πρόταση, καθώς επίσης και ορισμένα θέματα τα οποία κρίνονται άξια για περαιτέρω μελέτη – βελτίωση.

Κεφάλαιο 1: Επαγωγική μεταφορά ισχύος

1.1: Ασύρματη μεταφορά ισχύος

Η ασύρματη μεταφορά ισχύος είναι η τεχνολογία κατά την οποία μια πηγή ισχύος μεταδίδει ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σε ένα φορτίο μέσω ενός διακένου αέρα, χωρίς ενδιάμεσες διασυνδέσεις. Η τεχνολογία αυτή καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από πολύ χαμηλά έως πολύ υψηλά επίπεδα ισχύος.

Πρώτος οραματιστής της ασύρματης μεταφοράς ισχύος υπήρξε ο Nikola Tesla (1856-1943), ο οποίος υποστήριξε, ήδη από τα τέλη του 19ου αιώνα, την δυνατότητα μεταφοράς ενέργειας χωρίς αγωγούς και εισήγαγε τις βάσεις για όλους τους δυνατούς τρόπους επίτευξης αυτής: μέσω ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ραδιοσυχνότητες), μέσω χωρητικής σύζευξης και μέσω επαγωγικής σύζευξης. Τα επιτεύγματά του εντυπωσίασαν, αλλά λόγω του ότι τα τεχνικά μέσα της εποχής ήταν περιορισμένα και ελλείπει χρηματοδότησης, δεν υπήρξε εμπορική εξέλιξη με αποτέλεσμα το κεφάλαιο της ασύρματης μεταφοράς ισχύος να μείνει για αρκετά χρόνια σχετικά στάσιμο.

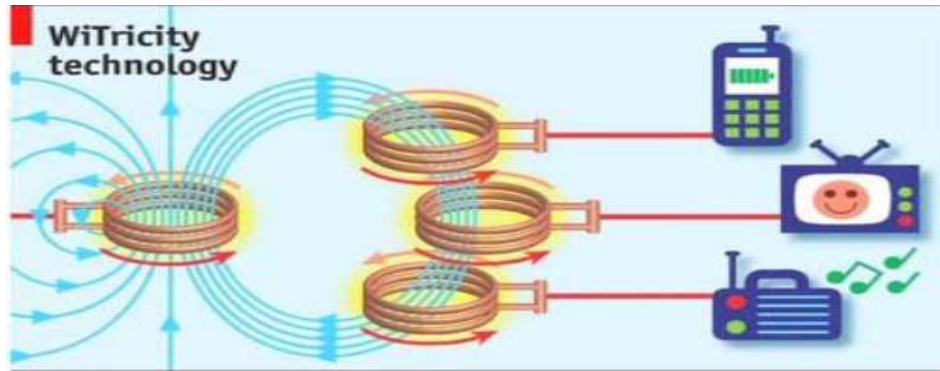
Στη σημερινή εποχή όμως, με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος και των οριζόντων που ανοίγονται με τα νέα υλικά ημιαγωγικών στοιχείων (όπως Καρβίδιο του Πυριτίου – SiC και Νιτρίδιο Γαλλίου – GaN), το ζήτημα ανακινείται πλέον η ασύρματη τροφοδότηση συσκευών είναι μία εφαρμόσιμη και πολλά υποσχόμενη πρακτική.

Η τεχνολογία αυτή μπορεί να μην είναι ακόμα πλήρως ολοκληρωμένη, υπάρχουν όμως στην αγορά προϊόντα που την αξιοποιούν.

Παραδείγματα αποτελούν η επαγωγική κουζίνα, τα πλαίσια ασύρματης φόρτισης κινητών τηλεφώνων και φορητών υπολογιστών, καθώς και η ασύρματη τροφοδότηση διαφόρων ή και όλων των οικιακών συσκευών. Πιο συγκεκριμένα ως προς το τελευταίο, μέσω ενός πηνίου παραγωγής μαγνητικού πεδίου που θα αποτελεί τον πομπό, γίνεται η σύζευξη (σε μεγάλες συχνότητες για την μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά και τη μείωση του μεγέθους των πηνίων) με τα πηνία – δέκτες που θα είναι προσαρτημένα στις συσκευές, με αποτέλεσμα την τροφοδότησή τους [1].

Μελέτες βρίσκονται σε εξέλιξη και αφορούν στον σχεδιασμό διατάξεων ασύρματης παροχής ισχύος σε διαμερίσματα για κάθε ηλεκτρική και ηλεκτρονική συσκευή που βρίσκεται εντός αυτών, με στόχο την πλήρη κατάργηση των καλωδίων τροφοδοσίας [1].

Οι τεχνικές αυτές εξετάζουν την σύζευξη σε εύρος συχνοτήτων από μερικές δεκάδες kHz έως μικροκυματικές συχνότητες (GHz) [2] για την επίτευξη συζεύξεων σε εύρος αποστάσεων από κάποια χιλιοστά έως μερικά μέτρα, αντίστοιχα.



Σχήμα 1.1: Πρόταση ασύρματης μετάδοσης ισχύος από μια πηγή σε πολλές συσκευές της εταιρίας WiTricity [1]

Σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα φόρτισης με καλώδια, η ασύρματη φόρτιση παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως:

- Βελτιώνει τη φιλικότητα προς τον χρήστη, καθώς αυτός απαλλάσσεται από την σύνδεση και αποσύνδεση καλωδίων και παρέχει έναν καθολικό τρόπο φόρτισης από τον ίδιο φορτιστή ανεξάρτητα από τον τύπο και το είδος της συσκευής.
- Μειώνει τις απαιτήσεις αυτονομίας των μπαταριών, συμβάλλοντας έτσι στην σχεδίαση μικρότερων σε βάρος και όγκο συσκευών.
- Αυτοματοποιεί τη διαδικασία της φόρτισης και την καθιστά ανεξάρτητη από παράγοντες όπως σκόνη, υγρασία, καιρικές συνθήκες κτλ., διευρύνοντας έτσι και τον χρόνο ζωής της συσκευής.
- Λόγω απουσίας γαλβανικής επαφής μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, είναι πιο αξιόπιστη και ασφαλής.
- Αυξάνει την ευελιξία, ειδικά σε ό,τι αφορά συσκευές των οποίων η αντικατάσταση των μπαταριών ή φόρτισή τους με καλώδια είναι επικίνδυνη, ακριβή ή και μη εφικτή (π.χ. βιολογικά εμφυτεύσιμες συσκευές κλπ.).

Παρ' όλα αυτά όμως, υπάρχουν και μειονεκτήματα προς αντιμετώπιση. Μερικά είναι:

- Μεγαλύτερο κόστος υλοποίησης σε σχέση με την ενσύρματη φόρτιση.
- Έκλυση μεγάλου ποσοστού θερμότητας, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος για την χρήση ειδικών υλικών απαγωγής αυτής.
- Μεγάλη ροή σκέδασης και κατ' επέκταση χαμηλότερη απόδοση συγκριτικά με έναν ενσύρματο φορτιστή.
- Πιθανός κίνδυνος για την υγεία λόγω μακράς έκθεσης στο παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

1.2: Γενική περιγραφή συστημάτων επαγωγικής μεταφοράς ισχύος

Η λειτουργία των Συστημάτων Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος (Inductive Power Transfer Systems– IPTSs) βασίζεται στην μαγνητική σύζευξη δυο πηνίων, και η δυνατότητα μεταφοράς ισχύος καθορίζεται από την μεταξύ τους πεπλεγμένη μαγνητική ροή.

Τα Συστήματα Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες [3]:

- **Ισχυρά συζευγμένα:**

Τα ισχυρά συζευγμένα IPTSs έχουν συντελεστή σύζευξης $k > 0,6$, έχοντας έτσι έχουν πολύ καλή μαγνητική σύζευξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος και παρουσιάζουν μικρή ροή σκέδασης. Αυτά τα συστήματα μελετώνται και περιγράφονται με τις γνωστές αρχές των μετασχηματιστών ισχύος.

- **Ασθενώς συζευγμένα:**

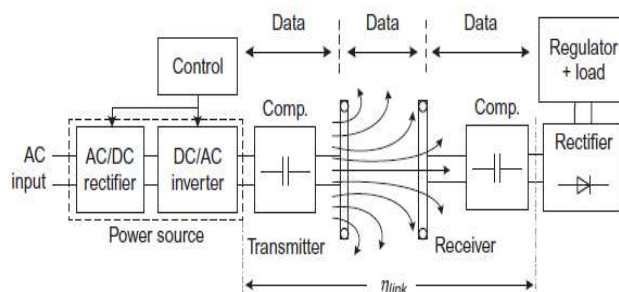
Τα ασθενώς συζευγμένα IPTSs έχουν συντελεστή σύζευξης $k < 0,6$ και σε αντίθεση με τα προηγούμενα, έχουν λιγότερο καλή μαγνητική σύζευξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος και παρουσιάζουν μεγάλη ροή σκέδασης. Η ιδιαιτερότητα αυτών των συστημάτων, είναι ότι λόγω φυσικών περιορισμών, το πρωτεύον διαχωρίζεται από το δευτερεύον με μεγάλα διάκενα αέρα, με αποτέλεσμα η μελέτη και περιγραφή τους με τις σχέσεις των κλασσικών μετασχηματιστών να μην γίνεται με ακρίβεια. Για τον λόγο αυτό, γίνεται ανάλυση με βάση τη λειτουργία του μετασχηματιστή διακένου αέρα και με τη βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για την επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

Το μεγάλο διάκενο αέρα προκαλεί μικρής τιμής επαγωγή μαγνήτισης και μεγάλης τιμής επαγωγές σκέδασης. Έτσι, δημιουργείται μεγάλο ρεύμα μαγνήτισης αυξάνοντας τις απώλειες χαλκού στο πρωτεύον. Επίσης η τάση εξόδου είναι ασταθής, καθώς εξαρτάται σημαντικά από το φορτίο. Τέτοιου είδους προβλήματα αντιμετωπίζονται στην πράξη με τροποποίηση της σχεδίασης του συστήματος και των μονάδων ελέγχου, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται και η απόδοση του IPTS.

Η μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος επιτυγχάνεται με τη λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες συντονισμού. Η απόδοση επηρεάζεται από τη συχνότητα λειτουργίας, το φορτίο και τα χαρακτηριστικά της κατασκευής [4]. Εν γένει, η ισχύς εξόδου και η απόδοση μεγιστοποιούνται σε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας, συνεπώς, δεν μπορούν να επιτευχθούν ταυτόχρονα. Εξαιτίας αυτού, επιλέγεται ένας συμβιβασμός ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις προτεραιότητες του κάθε συστήματος.

Τα περισσότερα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος περιλαμβάνουν τοπολογίες συντονισμού τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον υποσύστημα. Το γεγονός αυτό καθιστά σύνθετη την επιλογή συχνότητα λειτουργίας, καθώς προκύπτουν έως και τρεις συχνότητες συντονισμού (φαινόμενο διακλάδωσης [5]). Η κατάσταση γίνεται ακόμη πιο περίπλοκη για συστήματα στα οποία το διάκενο δεν είναι προκαθορισμένο, καθώς οι συχνότητες αυτές είναι διαφορετικές για κάθε διαφορετική τοποθέτηση του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον πηνίο. Επιπλέον, διαφέρουν και για διαφορετικές τιμές φορτίου στο δευτερεύον [6].

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος:



Σχήμα 1.2:Τυπικό μονοφασικό διάγραμμα βαθμίδων συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος [7]

Ο ανορθωτής σε συνδυασμό με τον αντιστροφέα (υψηλής διακοπτικής συχνότητας) χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου σε εναλλασσόμενη τάση με συχνότητα ίση με την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, η οποία είναι πολλές φορές μεγαλύτερη από αυτήν του δικτύου παροχής. Η δημιουργηθείσα τάση δίνεται ως είσοδος στο πρωτεύον, το πλαίσιο τυλιγμάτων του οποίου μαζί με του δευτερεύοντος θα λειτουργήσουν ως συζευγμένα πηνία. Στη συνέχεια, στην μεριά του δευτερεύοντος βρίσκεται ένας ανορθωτής της εναλλασσόμενης τάσης που επάγεται στο δευτερεύον. Στις πλευρές και του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος βρίσκονται κυκλώματα συντονισμού καθώς και ελεγκτές.

Συστήματα IPT ασθενούς σύζευξης χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η μετάδοση ισχύος σε κινούμενο ως προς το πρωτεύον, δευτερεύον μέλος και σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η γαλβανική απομόνωση μεταξύ των δύο τυλιγμάτων. Μερικές σχετικές εφαρμογές είναι: η επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, ρομποτικές εφαρμογές, κυλιόμενοι μετασχηματιστές, υποβρύχια μεταφορά ισχύος, και μεταφορά ισχύος σε υγρά περιβάλλοντα [8]–[10].

1.2.1: Κατηγοριοποίηση συστημάτων Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος για φόρτιση συσκευών

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται η ασύρματη φόρτιση μιας συσκευής. Ο στατός και ο δυναμικός. Η διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών επαγωγικής φόρτισης βρίσκεται στην μεταβολή ή όχι των παραμέτρων σύζευξης με το χρόνο. Η μεταβολή αυτή επηρεάζει τη συμπεριφορά επίδοσης, απόδοσης, αλλά και ασφάλειας της λειτουργίας του συστήματος:

- **Στατή φόρτιση:**

Στατή φόρτιση αποτελεί η φόρτιση μιας συσκευής, η οποία καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισής της παραμένει σε σταθερή θέση σχετικά με τον φορτιστή. Παράδειγμα αυτής είναι η φόρτιση ενός κινητού τηλεφώνου το οποίο τοποθετείται σε μία επιφάνεια φόρτισης, με διαφορετικό μεν τρόπο κάθε φορά, αλλά σε σταθερή θέση κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Αντίστοιχα, η στάθμευση ενός ηλεκτρικού οχήματος σε θέση ασύρματης φόρτισης ενδέχεται να οδηγεί σε διαφορετικό διάκενο κάθε φορά αλλά παραμένει σταθερό μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα που μπορεί να παρέχει αυτός ο στατικός τρόπος ασύρματης φόρτισης είναι η αυτονομία και αυτοματοποίηση της διαδικασίας, η ελάχιστη συμμετοχή του χρήστη, η ασφάλεια λόγω απουσίας καλωδίων, η χαμηλή ανάγκη για συντήρηση και συνεπώς η αυξημένη απόδοση της όλης φόρτισης.

Από την άλλη μεριά, πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές του φορτιστή, καθώς το μαγνητικό πεδίο μπορεί να αποδειχθεί επικίνδυνο όταν ένα αντικείμενο βρεθεί μεταξύ της μαγνητικής ζεύξης. Γι' αυτόν το λόγο, το σύστημα θα πρέπει να διαθέτει ένα μηχανισμό αναγνώρισης ξένων αντικειμένων, ο οποίος θα το απενεργοποιεί όταν υπάρχει παρεμβολή στην μαγνητική ζεύξη.

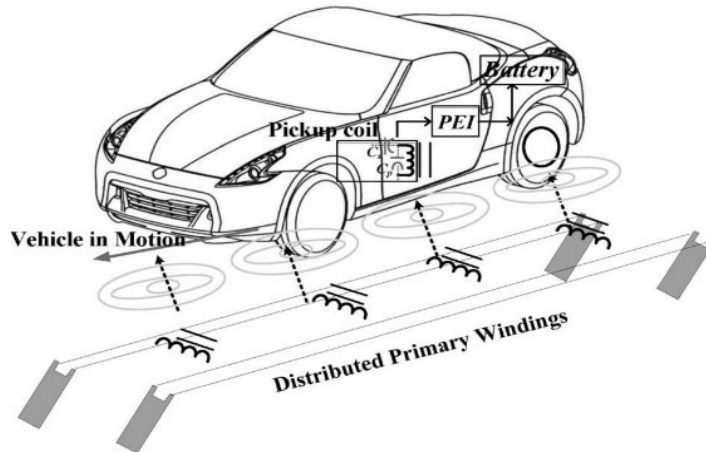
Πέραν άλλων, η χρήση ενός στατού συστήματος φόρτισης ευνοεί την ευκαιριακή φόρτιση. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις μαζικής μεταφοράς επιβατών, όπως με ένα ηλεκτρικό λεωφορείο, σταθμοί φόρτισης μπορούν να είναι εγκατεστημένοι σε στάσεις, επιτρέποντας της ασύρματη φόρτιση αυτού όσο θα γίνεται η επιβίβαση και αποβίβαση. Επίσης, πλαίσια ασύρματης φόρτισης μπορούν να εγκατασταθούν σε δημόσιους χώρους, όπως για παράδειγμα σε χώρους αναμονής αεροδρομίων.



Σχήμα 1.3: Εφαρμογές στατής φόρτισης. Αριστερά: Επιφάνεια φόρτισης φορητών συσκευών [11] Δεξιά: Σταθερό πλαίσιο πρωτεύοντος για την φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος [1]

- **Δυναμική φόρτιση:**

Δυναμική φόρτιση αποτελεί η φόρτιση ενός συστήματος ενώ αυτό βρίσκεται σε κίνηση ως προς τον φορτιστή. Οι δυναμικές συνθήκες προκύπτουν από την κίνηση του ενός πηνίου σε σχέση με το άλλο κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ισχύος. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η εν κινήσει φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων, κατά την οποία πολλαπλά πρωτεύοντα είναι εγκατεστημένα κατά μήκος των αυτοκινητόδρομων. Μια τέτοια πρακτική μελετάται για την αύξηση της αυτονομίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Περισσότερες εφαρμογές δυναμικής φόρτισης αποτελούν τα μη επανδρωμένα σκάφη, ρομπότ και drones, τα οποία χρησιμοποιούνται σε δυσπρόσιτες περιοχές και περιβάλλοντα. Σε τέτοιες περιπτώσεις η επιστροφή στην βάση για επαναφόρτιση δυσχεραίνει τον σκοπό τους, συνεπώς η ασύρματη δυναμική φόρτιση αποτελεί ιδανική λύση.



Σχήμα 1.4: Εφαρμογή δυναμικής φόρτισης για την φόρτιση ηλεκτρικού αυτοκινήτου εν κινήσει [12].

Στα αρνητικά αυτής της προσέγγισης συγκαταλέγονται ο χαμηλός συντελεστής σύζευξης μεταξύ πηγής – δέκτη λόγω της μεγάλης μη-συζευγμένης ροής από το πηνίο-πηγή, τα επιπλέον μέτρα ασφαλείας που πρέπει να ληφθούν για τον περιορισμό των εκπομπών πεδίου στα μη-συζευγμένα τμήματα του πηνίου, καθώς και η μεγάλη αυτεπαγωγή του πηνίου για την οποία διανεμημένοι πυκνωτές πρέπει να κάνουν αντιστάθμιση για να περιορίσουν την τάση στους ακροδέκτες του. Άλλο προκύπτον ζήτημα αποτελεί η ανάπτυξη μιας στρατηγικής τροφοδότησης των συζευγμένων τμημάτων, καθώς απαιτούνται σύνθετοι τρόποι ανατροφοδότησης της θέσης του δέκτη, αλλά και μέθοδοι ώστε να γίνεται τροφοδότηση των πηνίων και διακοπή αυτής, κατά βούληση.

Λόγω του ότι κατά τη δυναμική φόρτιση είναι περισσότερο πιθανό να μη γίνει σωστή ευθυγράμμιση, είναι προφανές ότι παρουσιάζεται χαμηλότερη απόδοση συστήματος συγκριτικά με την περίπτωση στατικής φόρτισης. Θεωρητικά η απόδοση της δυναμικής φόρτισης μπορεί να φτάσει αυτήν της στατικής, εάν γίνει βελτιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων πηνίων-πηγών, αξιοποιώντας στοιχεία των αντίστοιχων πηνίων της στατικής φόρτισης και αν το σύστημα ρυθμιστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεταφέρει ενέργεια μόνο όταν η αποκλίνουσα ευθυγράμμιση βρίσκεται εντός επιθυμητών ορίων, τα οποία εξασφαλίζουν απόδοση της τάξης του 90% [13].

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των συστημάτων επαγωγικής φόρτισης αφορά στη συχνότητα λειτουργίας τους, δηλαδή το αν η μεταφορά ισχύος γίνεται σε σταθερή, προκαθορισμένη συχνότητα ή αν η συχνότητα μεταβάλλεται για να προσαρμοστεί στις αλλαγές των παραμέτρων. Και οι δυο επιλογές αφορούν τόσο στη στατική όσο και τη δυναμική φόρτιση, με στόχο πάντα τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας είτε σε σχέση με τον έλεγχο της μεταφερόμενης ισχύος είτε για μεγιστοποίηση της απόδοσης.

- **Η λειτουργία με σταθερή συχνότητα:**

Τα περισσότερα συστήματα επαγωγικής φόρτισης λειτουργούν σε σταθερή συχνότητα. Η συχνότητα αυτή προεπιλέγεται κατά την κατασκευή του συστήματος ούτως ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις μεγέθους μεταφερόμενης ισχύος και απόδοσης, ανάλογα με την εφαρμογή. Οι μελετητές συχνά ακολουθούν ειδικές διαδικασίες κατά το σχεδιασμό των στοιχείων των κυκλωμάτων συντονισμού έτσι ώστε αυτά να συντονίζονται στην προκαθορισμένη συχνότητα [14]. Για παράδειγμα, οι τιμές του πηνίου και του πυκνωτή πρωτεύοντος μπορεί να επιλεγθούν τέτοιες ώστε να δημιουργείται μηδενική διαφορά

φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος εισόδου, στη φυσική συχνότητα (συχνότητα συντονισμού) του δευτερεύοντος.

Στην περίπτωση σταθερής συχνότητας, οι συνθήκες είναι βέλτιστες για την ονομαστική κατάσταση διακένου του συστήματος. Όμως, ακόμα και αν όλα τα στοιχεία του συστήματος έχουν προσχεδιασθεί καταλλήλως, ο συντελεστής σύζευξης επηρεάζεται σημαντικά από την παραμικρή αλλαγή της απόστασης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος [14]. Ειδικά σε εφαρμογές φόρτισης αυτοκινήτων, οι συνθήκες σύζευξης είναι άμεσα εξαρτώμενες από την ικανότητα του οδηγού να ευθυγραμμίσει το όχημα με τον φορτιστή κατά τη στάθμευση. Είναι λοιπόν σαφές ότι η προεπιλογή μιας συχνότητας λειτουργίας αποτελεί αποδεκτή λύση μόνο για συστήματα στατικής φόρτισης σε συγκεκριμένη ευθυγραμμισμένη θέση και σταθερού φορτίου. Οι προϋποθέσεις αυτές, όμως, αποκλείουν τις περισσότερες εφαρμογές ασύρματης φόρτισης.

- **Η λειτουργία με μεταβαλλόμενη συχνότητα:**

Εξαιτίας της φύσης των ασύρματων φορτιστών, πολλές φορές η βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας σε μία μόνο κατάσταση διακένου δεν είναι ικανοποιητική για τις επιδόσεις των διάφορων εφαρμογών. Για την δυνατότητα προσαρμογής της συχνότητας λειτουργίας στις απαιτήσεις κάθε πιθανού διακένου, υιοθετούνται τεχνικές μεταβολής της συχνότητας του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Η λειτουργία με μεταβλητή συχνότητα είναι επιθυμητή τόσο σε συστήματα στατικής φόρτισης, για να δημιουργούνται οι βέλτιστες συνθήκες φόρτισης σε κάθε περίπτωση διακένου, όσο και σε δυναμικές φορτίσεις για την προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο. Σε στατικά συστήματα φόρτισης, μια συχνά ακολουθούμενη στρατηγική καταφεύγει στην μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας μέχρις ότου να επιτευχθεί συντονισμός. Μέσω τεχνικών ελέγχου, οι συνθήκες συντονισμού ανιχνεύονται με μεταβολή της διακοπτικής συχνότητας λειτουργίας.

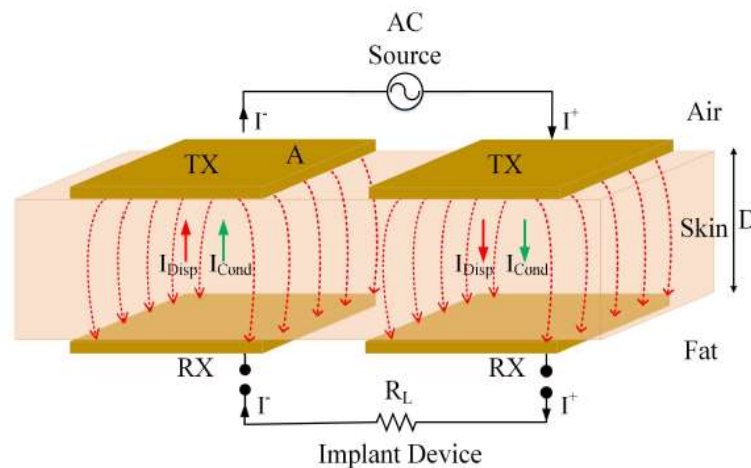
1.3: Τρόποι ασύρματης τροφοδότησης

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες, πέραν της επαγωγικής μεταφοράς ισχύος η οποία είναι και αυτή που μελετάται και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοσθεί αρκετές άλλες μέθοδοι για την ασύρματη τροφοδότηση συσκευών. Οι μέθοδοι αυτοί, καθώς και τα χαρακτηριστικά τους, με μια ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή τους για την τροφοδότηση εμφυτεύσιμων συσκευών παρουσιάζονται στην συνέχεια.

1.3.1: Χωρητική Μεταφορά Ισχύος στο κοντινό πεδίο (Near-Field Capacitive Power Transfer)

Η χωρητική μεταφορά ισχύος αποτελεί το δυαδικό αντίστοιχο της επαγωγικής μεταφοράς ισχύος και βασίζεται στην μεταφορά ισχύος μέσω ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο σχηματίζεται μεταξύ δύο αγωγών.

Πιο συγκεκριμένα, μια τέτοια διάταξη απαρτίζεται από ένα ζεύγος πυκνωτών, καθένας από τους οποίους αποτελείται από δύο παράλληλες πλάκες χωρισμένες μεταξύ τους σε μία συγκεκριμένη απόσταση. Ο πομπός της ενέργειας συνδέεται στις πρωτεύουσες πλάκες του κάθε πυκνωτή και ο δέκτης στις δευτερεύουσες πλάκες του κάθε πυκνωτή. Αν μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης συνδεθεί στις πρωτεύουσες πλάκες των πυκνωτών, τότε δημιουργείται ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των πλακών του κάθε πυκνωτή. Συνεπώς, σύμφωνα και με τις εξισώσεις του Maxwell, το χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο θα παράξει ένα ρεύμα μετατόπισης ανάλογο του ρυθμού μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου. Το ρεύμα μετατόπισης είναι αυτό που επιτρέπει την μεταφορά της ενέργειας μεταξύ των πλακών των πυκνωτών και διαμέσου του υλικού που βρίσκεται ανάμεσά τους. Αν μια αντίσταση φορτίου συνδεθεί μεταξύ των δευτερευουσών πλακών των πυκνωτών, τότε το χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα μετατόπισης θα προκαλέσει την συνεχή μετακίνηση ηλεκτρικών φορτίων μεταξύ των πρωτευνόντων και δευτερευόντων πλακών του κάθε πυκνωτή, και συνεπώς την δημιουργία ενός ηλεκτρικού ρεύματος στον δέκτη.



Σχήμα 1.5: Τυπικό σύστημα χωρητικής μεταφοράς ισχύος σε εμφυτεύσιμη συσκευή: Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται κατευθυνόμενο από τις πρωτεύουσες πλάκες των πυκνωτών, δημιουργεί ρεύματα μετατόπισης που επιτρέπουν την μεταφορά ισχύος στις δευτερεύουσες πλάκες των πυκνωτών μέσα στο σώμα [15].

Η χωρητική μεταφορά ισχύος ήταν από τις πρώτες μεθόδους ασύρματης μεταφοράς ισχύος που είχαν εφαρμοσθεί, αλλά δεν θεωρήθηκε κατάλληλη λόγω των απαιτήσεων υψηλών τάσεων για

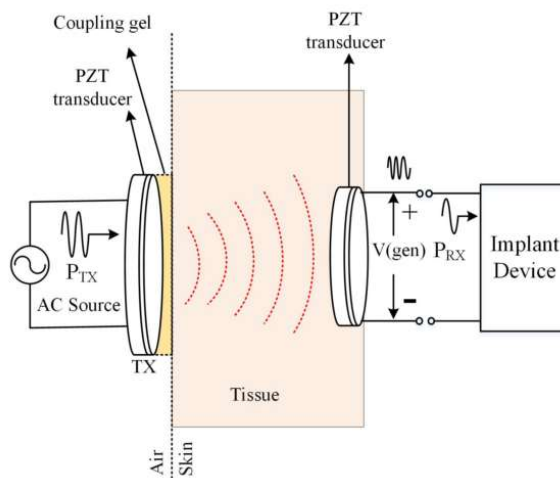
την μεταφορά επαρκούς ποσότητας ισχύος. Επίσης, το ηλεκτρικό πεδίο, σε αντίθεση με το μαγνητικό, αλληλεπιδρά ισχυρά με τα περισσότερα υλικά (συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπινου σώματος) λόγω διηλεκτρικής πόλωσης. Έτσι, τα υλικά μεταξύ των πλακών μπορούν να απορροφήσουν την ενέργεια και ειδικά στον άνθρωπο μπορεί να προκληθεί υπερβολική έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Παρόλα αυτά, ο συγκεκριμένος τρόπος ασύρματης μεταφοράς ισχύος έχει το θετικό χαρακτηριστικό ότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι συγκεντρωμένο και περιορισμένο μεταξύ των πλακών, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή από και προς άλλες συσκευές. Στην αντίστοιχη περίπτωση, στην επαγωγική μεταφορά ισχύος, χρειάζονται συχνά επιπλέον φερρομαγνητικά υλικά για τον περιορισμό και την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, αυξάνοντας έτσι το κόστος.

Για τον λόγο αυτόν, σήμερα, η χωρητική μεταφορά ισχύος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, καθώς και σε εφαρμογές όπου απαιτούν ισχυρά ηλεκτρικά πεδία.

1.3.2: Μεταφορά Ισχύος μέσω Υπερήχων (Ultrasonics Power Transfer)

Η παρούσα τεχνική χρησιμοποιεί διαδιδόμενα κύματα υπερήχων ($f > 20$ kHz) προκειμένου να μεταφερθεί ενέργεια και σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες τεχνικές που μεταφέρουν ενέργεια μέσω διακένου, χρειάζεται μέσο διάδοσης (όχι αγωγή απαραίτητα). Ένα σύστημα υποδόριας μεταφοράς ενέργειας με υπερήχους (Ultrasonic Transcutaneous Energy Transfer – UTET) σε εφαρμογές τροφοδότησης βιολογικών εμφυτευμάτων εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.6: Τυπικό διάγραμμα συστήματος μεταφοράς ενέργειας με υπερήχους σε εμφυτεύσιμη συσκευή [15].

Ένας ταλαντωτής υπερήχων (TX) διεγείρεται από μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης και παράγει επιφανειακές δονήσεις, οι οποίες μέσω ενός μετατροπέα γίνονται ακουστικά κύματα (εύρους 200 kHz - 1.2 MHz). Τα κύματα αυτά διαδίδονται μέσω του ιστού και προσπίπτουν σε μία πιεζοηλεκτρική συσκευή συλλογής ενέργειας (RX) η οποία βρίσκεται τοποθετημένη μέσα στο σώμα και μετατρέπει την ακουστική ενέργεια σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια η παραγόμενη ηλεκτρική τάση ανορθώνεται ώστε να τροφοδοτήσει την εμφυτευμένη συσκευή.

Τα προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν αυτά τα συστήματα, ιδιαίτερα στον τομέα των βιολογικών εμφυτευμάτων, είναι ο περιορισμός της τροφοδότησης εμφυτευμάτων σε συγκεκριμένα σημεία λόγω των διαφορετικών πυκνοτήτων των οργάνων και των διαφορετικών ακουστικών εμπεδησεών τους που ενίοτε προκαλούν μείωση της απόδοσης, η μεγάλη ευαισθησία στην απόσταση μεταξύ των μετατροπέων μετάδοσης και λήψης ενέργειας και στις ιδιότητες των

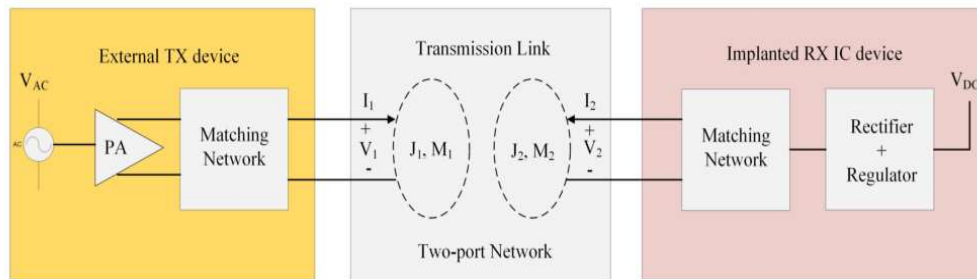
ιστών και στις συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως επίσης και τα ενδεχόμενα προβλήματα υγείας που μπορούν να προκύψουν λόγω μακρόχρονης έκθεσης σε διαδιδόμενα κύματα υπερήχων.

1.3.3: Μεταφορά Ισχύος στο Μέσο Πεδίο (Midfield Power Transfer)

Κατά την επαγωγική μεταφορά ισχύος, όταν ο δέκτης είναι πολύ μικρότερος από την απόστασή του από την πηγή, τότε η σύζευξη μεταξύ των πηνίων είναι ασθενής, καθιστώντας την απόδοσή τους πολύ χαμηλή. Πρόσφατες μελέτες [16] έδειξαν ότι πολύ μεγαλύτερη απόδοση μπορεί να επιτευχθεί στο μέσο πεδίο (midfield) όπου τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία δεν χαρακτηρίζονται πλέον από τις οιοειδή στατικές περιγραφές. Η μεταφορά ισχύος στο μέσο πεδίο αποτελεί μία μέθοδο που συνδυάζει τις αρχές λειτουργίας της επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας στο κοντινό πεδίο και της ακτινοβολίας ενέργειας στο μακρινό πεδίο.

Όταν η απόσταση πηγής-δέκτη είναι της τάξης ενός μήκους κύματος από την πηγή, τότε το σύστημα τροφοδότησης λειτουργεί στο μέσο πεδίο. Αυτό αντιστοιχεί σε συχνότητες υπό-GHz, για τυπικές αποστάσεις. Συνεπώς, με την χρήση αυτού του τρόπου τροφοδότησης και με τον κατάλληλο σχεδιασμό του συστήματος, μπορεί να γίνει εφικτή η χρήση δεκτών ισχύος πολύ μικρού μεγέθους, της τάξης των χιλιοστών.

Ένα τυπικό σύστημα τροφοδότησης στο μέσο πεδίο παρουσιάζεται παρακάτω:

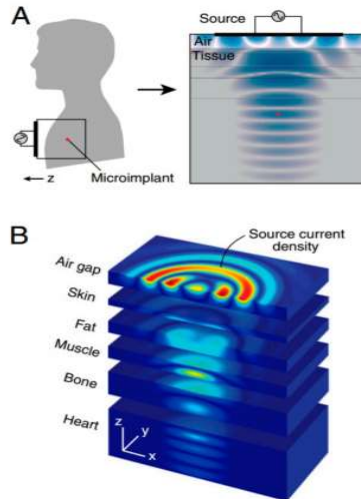


Σχήμα 1.7: Σύστημα ασύρματης τροφοδότησης εμφυτεύματος στο μέσο πεδίο [15].

Μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοτεί ένα πρωτεύον πηνίο (TX) από το οποίο παράγονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Αυτά τα κύματα διαπερνούν τους ιστούς και μέσω ενός κυκλώματος σύζευξης λαμβάνονται από ένα δευτερεύον πηνίο-δέκτη (RX) και μετατρέπονται σε συνεχή τάση ώστε να τροφοδοτηθεί το φορτίο. Η μετάδοση λοιπόν της ισχύος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές και μαγνητικές κατανομές ρεύματος στην πηγή (TX) και στον δέκτη (RX). Η σύζευξη μεγιστοποιείται βελτιστοποιώντας την μαγνητική κατανομή ρεύματος από τα ΗΜ πεδία στους ιστούς. Η συχνότητα λειτουργίας επιλέγεται ανάλογα με το βάθος του εμφυτεύματος και τον τύπο των ιστών έτσι ώστε τα μεταδιδόμενα κύματα να προσπίπτουν με ακρίβεια στον δέκτη ο οποίος βρίσκεται εμφυτευμένος στον ιστό.

Για την μεγιστοποίηση της απόδοσης, οι σημαντικότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψιν είναι η συμβατότητα της εμπέδησης του φορτίου με τον δέκτη (RX) και η σχεδίαση του πομπού (TX) έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η ΗΜ σύζευξη.

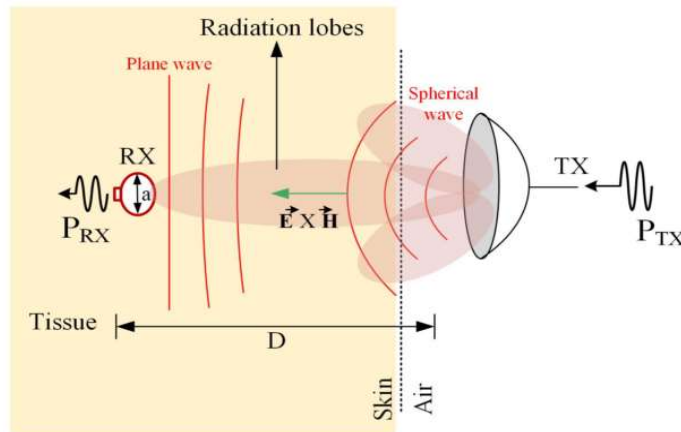
Αυτός ο τρόπος μετάδοσης, παρότι πολλά υποσχόμενος, χαρακτηρίζεται ακόμα από χαμηλά επίπεδα μεταφερόμενης ισχύος (μερικά mW) και από την έλλειψη ενδεδειγμένης μελέτης ως προς την ασφάλεια του ανθρώπου από την έκθεσή του στα μεταδιδόμενα ΗΜ κύματα.



Σχήμα 1.8: A) Παράσταση ασύρματης τροφοδότησης εμφυτεύματος στην καρδιά, όπου B) φαίνονται όλα τα στρώματα ιστών μέσω των οποίων διαδίδονται τα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα [15].

1.3.4: Ηλεκτρομαγνητική Μεταφορά Ισχύος στο μακρινό πεδίο (Electromagnetic Far-Field Power Transfer)

Η μετάδοση ενέργειας στο ευρύ πεδίο (Far-Field) βασίζεται στην αρχή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, μία κεραία εκπομπής (TX) παράγει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε μια συγκεκριμένη συχνότητα προς μία κεραία λήψης (RX), η οποία είναι τοποθετημένη σε μεγάλη απόσταση από αυτήν και εμφυτευμένη στο σώμα. Όταν τα εκπεμπόμενα κύματα από την κεραία TX προσπίπτουν στην κεραία RX, παράγεται ένα ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο στη συνέχεια ανορθώνεται ώστε να χρησιμοποιηθεί από την εμφυτευμένη συσκευή. Οι συχνότητες στις οποίες είναι συντονισμένες οι κεραίες είναι συγκεκριμένες και χωρίζονται στις εξής: 402 MHz (Medical Issue Communication Service Band) για τηλεμετρικούς σκοπούς, 433 MHz για μετάδοση ισχύος και 2.4 GHz για αποστολή σημάτων ελέγχου. Ένα τυπικό σύστημα εικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 1.9: Σύστημα ηλεκτρομαγνητικής μεταφοράς ενέργειας στο ευρύ πεδίο [15].

Τα συστήματα αυτά έχουν μεγάλο εύρος τροφοδότησης (μερικές δεκάδες mm) συσκευών βαθιά εμφυτευμένων στο σώμα, χρησιμοποιώντας κεραίες λήψης μεγέθους πολύ μικρότερου των αντίστοιχων μεθόδων επαγωγικής μεταφοράς ισχύος. Σε ό,τι αφορά στην απόδοσή τους, εξαρτάται από παράγοντες όπως ο προσανατολισμός και οι επιμέρους αποδόσεις των κεραιών TX

και RX, οι απώλειες λόγω ασυμβατότητας εμπεδήσεων και οι απώλειες μετατροπής σημάτων ραδιοσυχνοτήτων σε συνεχή σήματα (RF σε DC).

Όμως, παρόλο που αυτά τα συστήματα έχουν μελετηθεί αρκετά για την μετάδοση ενέργειας την τελευταία δεκαετία, δεν έχουν μελετηθεί τόσο και για την τροφοδότηση βιολογικών αισθητήρων. Η μικρή σχετικά ισχύς που μεταδίδεται στο εμφύτευμα προκειμένου να τηρηθούν οι κανονισμοί περί ακτινοβολιών (πχ. Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς 1 W) σε συνδυασμό με τις μεγάλες απώλειες της μετατροπής RF σε DC που μειώνουν την συνολική αποδοτικότητα, καθιστούν την τροφοδότηση βιολογικών εμφυτευμάτων μη πρακτική.

1.3.5: Οπτική Μεταφορά Ισχύος (Optical Power Transfer)

Ο συγκεκριμένος τρόπος ασύρματης μεταφοράς ισχύος βασίζεται στο Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο για την μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.

Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο περιγράφεται από την αποβολή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια ενός υλικού, εάν αυτό εκτεθεί σε φωτόνια με συγκεκριμένο μήκος κύματος. Συνεπώς, η οπτική μεταφορά ισχύος επιτυγχάνεται με την εκπομπή και την εστίαση μιας ακτίνας laser με συγκεκριμένο μήκος κύματος ή και της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο ή μια φωτοδιόδο, προκαλώντας έτσι την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Το οπτικό μέσο μπορεί να είναι το κενό, ο αέρας, οπτικές ίνες (μια τέτοια μεταφορά θεωρείται ασύρματη καθώς οι οπτικές ίνες δεν αποτελούνται από αγώγιμα υλικά), κτλ.

Ένα αρνητικό στοιχείο αυτής της μεθόδου αποτελούν οι χαμηλές αποδόσεις μετατροπής του φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα από τις φωτοδιόδους.



Σχήμα 1.10: Οπτική μεταφορά ισχύος μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας [17].

1.4: Εφαρμογές Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος

Καθώς οι απαιτήσεις των εφαρμογών ολοένα και αυξάνονται, τα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος γίνονται όλο και πιο δημοφιλή σε εφαρμογές όπου:

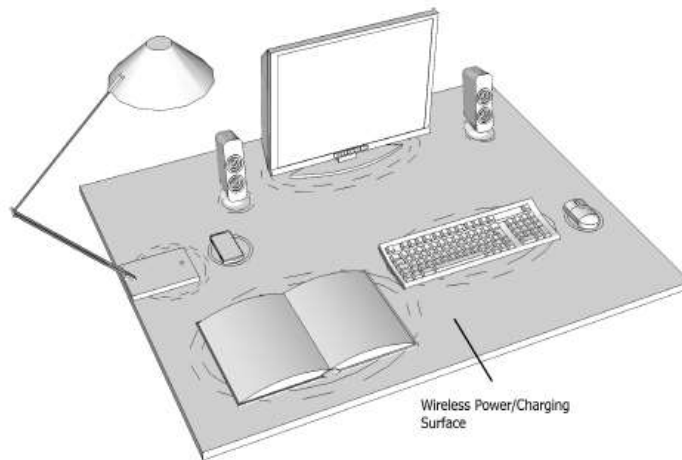
- Απαιτείται ευελιξία σχετικής κίνησης μεταξύ πηγής και φορτίου,
- Υπάρχει περιορισμένος χώρος στην πλευρά του φορτίου για μέσο αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρία)
- Η πλευρά του φορτίου είναι δυσπρόσιτη
- Η ασύρματη σύζευξη συμβάλλει στην αύξηση της ασφάλειας

Συνεπώς υπάρχει μια πληθώρα εφαρμογών στην καθημερινή ζωή, από απλές ηλεκτρονικές συσκευές έως και τμήματα της «βαριάς» βιομηχανίας και της βιοϊατρικής, όπου η επαγωγική μεταφορά ισχύος είναι αναγκαία έως και απαραίτητη. Οι κυριότερες είναι οι παρακάτω:

Ηλεκτρονικές συσκευές:

Καθώς πλέον οι ηλεκτρονικές συσκευές (smartphones, laptops, tablets, wearables) αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής ζωής του ανθρώπου, η δυνατότητα ασφαλούς, ευέλικτης, αποδοτικής και διαλειτουργικής ασύρματης τροφοδότησης αυτών, αποτελεί το επόμενο βήμα στην χρήση και την εφαρμογή τους, αλλά και στην συνολική εμπειρία του καταναλωτή.

Η φόρτιση και τροφοδότηση των συσκευών αυτών μπορεί να πραγματοποιείται χωρίς καλώδια και με ασφάλεια παντού, στο σπίτι, στο αυτοκίνητο, σε δημόσιους χώρους, κτλ..

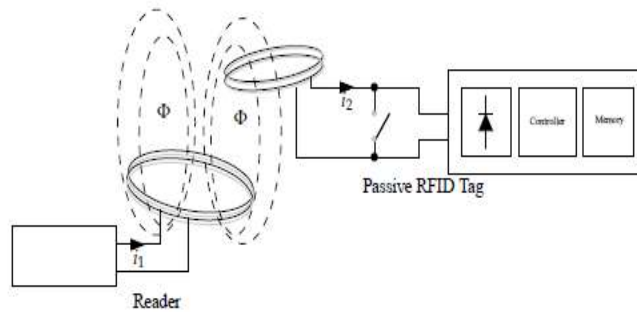


Σχήμα 1.11: Επιφάνεια με ενσωματωμένο ασύρματο φορτιστή συσκευών [17].

Άλλες εφαρμογές της επαγωγικής μεταφοράς ισχύος στην καθημερινή ζωή είναι στην φόρτιση της ηλεκτρικής οδοντόβουρτσας, στις επαγωγικές εστίες και στα συστήματα RFID (Radio Frequency Identification – Ταυτοποίηση μέσω Ραδιοσυχνοτήτων).

Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα RFID κάνουν χρήση της επαγωγικής σύζευξης με τον εξής τρόπο: Εναλλασσόμενο ρεύμα συγκεκριμένης συχνότητας διαπερνά το πρωτεύον πηνίο- πομπό ή αλλιώς «αναγνώστη» (reader), δημιουργώντας ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Εάν ένα δευτερεύον πηνίο-δέκτης ή αλλιώς «ετικέτα» (tag) βρεθεί σε κοντινή απόσταση, θα δημιουργηθεί σε αυτό μία τάση λόγω επαγωγής. Η τάση αυτή στη συνέχεια θα ανορθωθεί ούτως ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει τα λογικά κυκλώματα της «ετικέτας». Κατά την μεταφορά δεδομένων από την «ετικέτα» προς τον «αναγνώστη», γίνεται χρήση της ανακλώμενης αντίστασης του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον, η οποία αλλάζει ανάλογα και μετράται μέσω του ρεύματος που διαρρέει το

πηνίο πρωτεύοντος. Τα κυκλώματα αυτά λόγω του μικρού τους μεγέθους και κόστους τους, έχουν ένα ευρύ φάσμα χρήσεων (εισιτήρια, ταυτότητες, διαβατήρια, κτλ.)

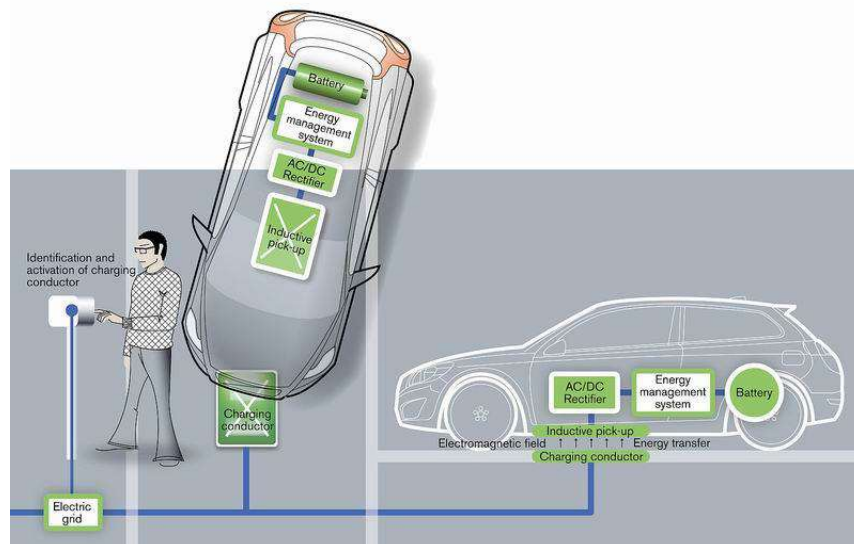


Σχήμα 1.12: Αρχή λειτουργίας συστήματος RFID [17].

Ηλεκτρικά οχήματα:

Τα ηλεκτρικά οχήματα, τα τελευταία χρόνια γνωρίζουν ολοένα και μεγαλύτερη ανάπτυξη, ιδιαίτερα λόγω του ενδιαφέροντος της κοινής γνώμης έναντι της αυξανόμενης περιβαλλοντικής μόλυνσης, της μείωσης των ενεργειακών αποθεμάτων, της αύξησης της τιμής του πετρελαίου καθώς και λόγω της ίδιας, σχετικά, απόδοσης με μικρό κόστος παραγωγής που αυτά παρέχουν. Με τον όρο ηλεκτρικό όχημα δεν εννοείται μόνο το αυτοκίνητο, αλλά και άλλα μέσα μεταφοράς, όπως λεωφορεία, τρένα, ακόμα και πλοία και αεροπλάνα, τα οποία πλέον προσανατολίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια ως μία από τις κύριες πηγές τροφοδότησής τους.

Ένα σημαντικό σύστημα, το οποίο αποτελεί ταυτόχρονα παράγοντα βελτίωσης της λειτουργίας του ηλεκτρικού οχήματος, αλλά και ένα μέσο προσέλκυσης καταναλωτών προς την ηλεκτρική κίνηση είναι η ασύρματη φόρτιση. Μπορεί εκ πρώτης όψεως να φαίνεται ως κάτι το “μακρινό”, αλλά με την μεγάλη τεχνολογική πρόοδο της εποχής και σε συνδυασμό με τα πολλαπλά οφέλη που μπορεί να παρέχει τόσο στον καταναλωτή όσο και στον κατασκευαστή, η ασύρματη φόρτιση αποτελεί και θα αποτελέσει ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο στον τομέα της ηλεκτρικής κίνησης.

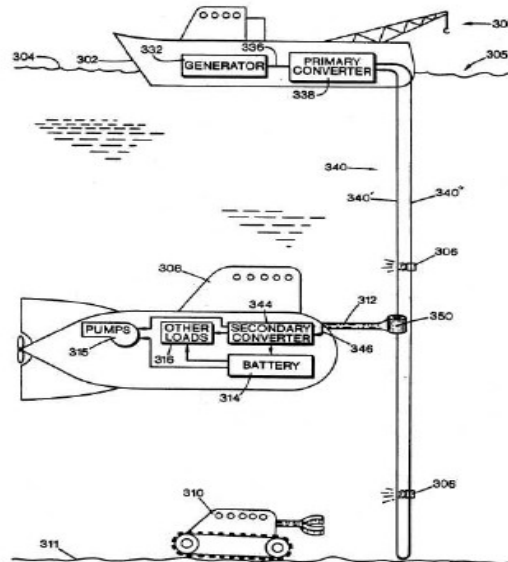


Σχήμα 1.13: Σύστημα ασύρματης φόρτισης αυτοκινήτου σε χώρο στάθμευσης της εταιρίας Volvo [3].

Βιομηχανία:

Η μεταφορά ισχύος σε βιομηχανικά συστήματα ανέκαθεν απαιτούσε ογκώδεις και ακριβές εγκαταστάσεις (καλώδια, υποσταθμούς, κ.ά.), καθώς και πληθώρα σταθμών φόρτισης μπαταριών μηχανημάτων και συσκευών. Θέματα ασφάλειας, πρακτικότητας αλλά και οικονομικά που εγείρονται σε τέτοια συστήματα, μπορούν να αντιμετωπισθούν με την χρήση επαγωγικών συστημάτων μεταφοράς ισχύος.

Μερικές εφαρμογές αυτών των συστημάτων σε βιομηχανικά περιβάλλοντα είναι η φόρτιση ρομπότ, οχημάτων και εργαλείων και η τροφοδότηση γραμμών παραγωγής. Επίσης, είναι δυνατή η τροφοδότηση μηχανημάτων για έργα σε δυσχερείς συνθήκες και περιβάλλοντα (πχ υποβρύχια) όπου είναι μη πρακτική ή και αδύνατη η παροχή ισχύος με καλώδια. Επιπλέον, με την κατάργηση της γαλβανικής επαφής, η επαγωγική μεταφορά ισχύος μπορεί να αυξήσει σημαντικά την εγγενή ασφάλεια συσκευών που λειτουργούν σε περιβάλλοντα όπου είναι πιο επικίνδυνα, όπως διυλιστήρια, πυρηνικοί αντιδραστήρες, κτλ.



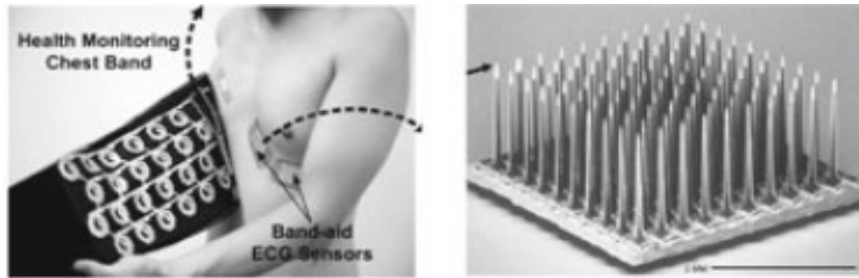
Σχήμα 1.14: Σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος για τροφοδότηση υποβρύχιων φορτίων [17].

Βιοϊατρική:

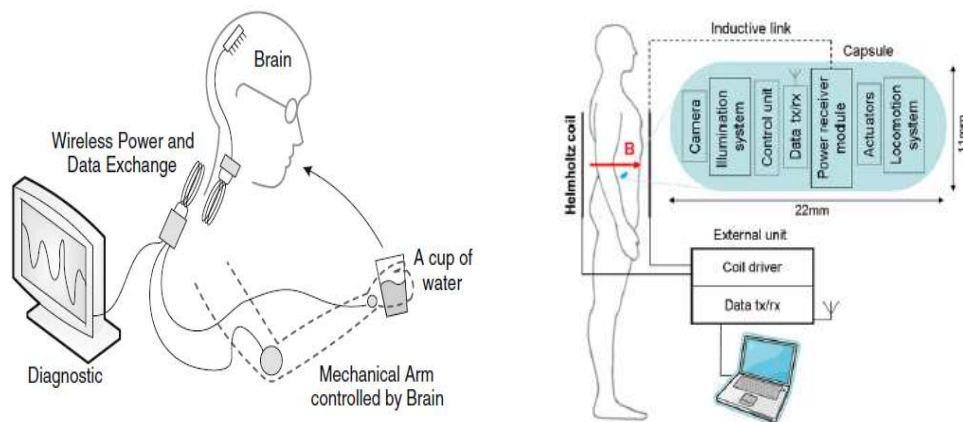
Η ασύρματη μεταφορά ισχύος και κατ' επέκταση η επαγωγική μεταφορά ισχύος μπορεί να βρει πολλές εφαρμογές στον χώρο της βιοϊατρικής, προσφέροντας λύσεις και διευκολύνσεις σε ένα μεγάλο ποσοστό ασθενών. Πιο συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις όπου η επαγωγική μεταφορά ισχύος μπορεί να βρει εφαρμογή, κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

- Βιοϊατρικά συστήματα Διάγνωσης:
Η κατηγορία αυτή αφορά σε συστήματα και συσκευές, όπως ασύρματοι βιο-αισθητήρες που τοποθετούνται εσωτερικά ή εξωτερικά του σώματος του ασθενούς και παρακολουθούν βασικές λειτουργίες του, παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες οι οποίες στη συνέχεια συλλέγονται ασύρματα και αξιολογούνται. Αυτό μπορεί να γίνει για παράδειγμα μέσω μίας ζώνης συλλογής δεδομένων -βλ.σχ.1.15-, μέσω εφαρμογής νευρικού αισθητήρα στον εγκέφαλο για την παρακολούθηση και επεξεργασία νευρικών σημάτων μέσω υπολογιστή (BCI – Brain-Computer-Interface. Διεπαφή-Εγκεφάλου-Υπολογιστή) ή μέσω χρήσης ενδοσκοπικής κάψουλας για την παρακολούθηση της

κατάστασης του στομάχου. Ακόμα ένα μικροσύστημα Διάγνωσης και Παρακολούθησης είναι μια συσκευή που εφαρμόζει τεχνολογίες εργαστηρίου σε μικροσυστοίχια (lab-on-a-chip). Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα με χαμηλές απαιτήσεις ισχύος, το οποίο εμφυτεύεται στον άνθρωπο και εκτελεί διάφορες λειτουργίες όπως ανάλυση DNA, βιοχημικές αναλύσεις, και πολλές άλλες που κανονικά θα λάμβαναν χώρα σε ένα μικροβιολογικό εργαστήριο. Το κύκλωμα αυτό τροφοδοτείται και μεταφέρει πληροφορίες ασύρματα, κάνοντας χρήση των πηνίων που είναι ενσωματωμένα σε αυτό [18].

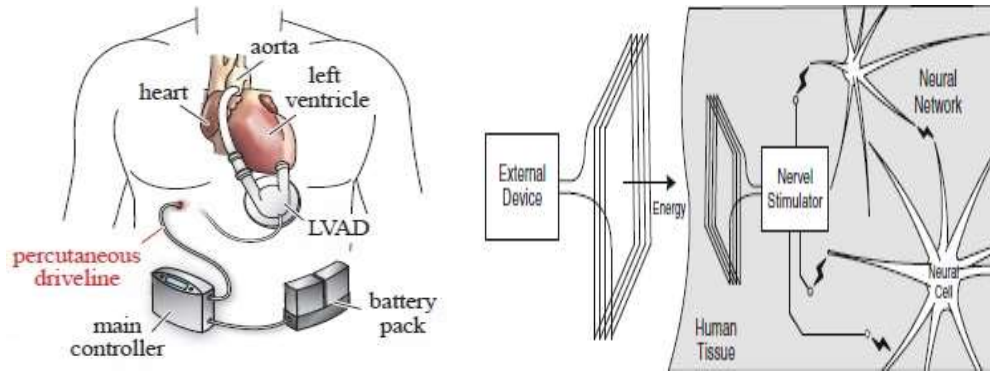


Σχήμα 1.15: Αριστερά: Ζώνη ασύρματης συλλογής δεδομένων, Δεξιά: Νευροαισθητήρας συλλογής δεδομένων [18].



Σχήμα 1.16: Αριστερά: Σύστημα Ασύρματης Μεταφοράς Ισχύος σε σύστημα αξιοποίησης νευρικού αισθητήρα για τον έλεγχο της κίνησης μηχανικού χεριού [18], Δεξιά: Ενδοσκοπικό σύστημα με χρήση Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος για την τροφοδότηση μικροσκοπικού ρομπότ στο εσωτερικό του σώματος [17].

- Βιοϊατρικά συστήματα Θεραπείας:
Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται εμφυτεύσιμες συσκευές που χρησιμοποιούν ηλεκτρικές διεγέρσεις των νεύρων για την θεραπεία ασθενειών και δυσλειτουργιών οργάνων, καθώς επίσης και εμφυτεύσιμες συσκευές που αντικαθιστούν όργανα του σώματος που υφίστανται μερική ή ανεπανόρθωτη βλάβη. Μερικά παραδείγματα αυτών είναι ο καρδιακός βηματοδότης, η τεχνητή καρδιά, το Σύστημα Υποβοήθησης Αριστερής Κοιλίας (LVAD), κοχλιακά εμφυτεύματα για ενίσχυση της ακοής, κλπ.



Σχήμα 1.17: Αριστερά: Σύστημα Υποβοήθησης Αριστερής Κοιλίας[19] , Δεξιά: Διέγερση νεύρων με χρήση Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος [18].

Κεφάλαιο 2: Βιολογικά Εμφυτεύματα

2.1: Εισαγωγή – Αναδρομή

Τα τελευταία 60 χρόνια, οι ταχείες εξελίξεις στον κλάδο της ηλεκτρονικής, αλλά και της ιατρικής επιστήμης, άνοιξαν τον δρόμο για την ανάπτυξη και την χρήση βιολογικών, ιατρικών συσκευών, εμφυτεύσιμων στο ανθρώπινο σώμα (Implantable Medical Devices – IMDs), οι οποίες επιτρέπουν και διευκολύνουν την διάγνωση και πρόγνωση ασθενειών, αλλά και παρέχουν περαιτέρω βιολογικές διερευνήσεις αυτών.

Η ανάπτυξη των βιοϋλικών καθώς και η δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σε μικρο- και νάνο- κλίμακες σε συνδυασμό και με την ασύρματη τεχνολογία, καθιστούν δυνατή την κατασκευή και τη χρήση συσκευών απολύτως συμβατών με το ανθρώπινο σώμα, οι οποίες μπορούν να βελτιώσουν το επίπεδο της ιατρικής περίθαλψης, αλλά και να παρέχουν δυνατότητες οι οποίες μέχρι πρότινος φάνταζαν αδύνατες. Για παράδειγμα, χρόνιες παθήσεις σε όλο το σώμα, από τον εγκέφαλο, τον κοιλία και τον αμφιβληστροειδή, μέχρι την καρδιά, τους πνεύμονες, τις αρθρώσεις, ακόμα και τα αγγεία και τον οισοφάγο, μπορούν να εντοπιστούν και να αντιμετωπισθούν με την χρήση εμφυτεύσιμων βιολογικών συσκευών.

Ήδη από την προηγούμενη δεκαετία υπήρχαν 3.000.000 ασθενείς με εμφυτευμένο βηματοδότη και περίπου 600.000 βηματοδότες εμφυτεύονταν κάθε χρόνο. Επίσης, σε τουλάχιστον 60.000 ασθενείς χρησιμοποιήθηκε εμφύτευμα κοιλία. Οι αριθμοί αυτοί τα τελευταία χρόνια αυξάνονται, τόσο λόγω της αύξησης του πληθυσμού όσο και της αναβάθμισης του συστήματος υγείας και της γενικότερης εξέλιξης και ενημέρωσης περί βιολογικών εμφυτευμάτων. Για παράδειγμα, περισσότεροι από 230.000 νέοι βηματοδότες εμφυτεύθηκαν το 2009 στις ΗΠΑ [20]. Τα παραπάνω στοιχεία αποδεικνύουν το κατά πόσο οι εμφυτεύσιμες βιολογικές συσκευές έχουν γίνει δημοφιλείς και χρήσιμες στην ανθρώπινη ζωή.

2.2: Γενικά Χαρακτηριστικά – Απαιτήσεις

Ένα εμφυτεύσιμο σύστημα μπορεί να λειτουργήσει είτε τηλεμετρικά, συλλέγοντας και αξιολογώντας βιολογικά στοιχεία, είτε διεγερτικά, στέλνοντας ηλεκτρικά σήματα σε σημεία του σώματος που αδυνατούν να λειτουργήσουν αυτόνομα ή και με τους δύο ανωτέρω τρόπους με ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου. Ανεξαρτήτως λειτουργίας, ένα εμφυτεύσιμο σύστημα αποτελείται από δύο θεμελιώδη στοιχεία: μία μονάδα που βρίσκεται στο σώμα του δέκτη και μία συσκευή που βρίσκεται έξω από αυτό. Η γενική λειτουργία της εξωτερικής μονάδας είναι η μετάδοση και λήψη δεδομένων προς και από την εσωτερική μονάδα, καθώς και ενίοτε η μεταφορά ισχύος προς αυτήν. Η εσωτερική μονάδα μπορεί να αποτελείται μόνο από ηλεκτρονικά ή να περιέχει και χημικά, βιολογικά και μηχανικά στοιχεία [21].

Σε κάθε περίπτωση, τα συλλεχθέντα στοιχεία διαμορφώνονται και μεταδίδονται στην εξωτερική μονάδα ελέγχου, η οποία με τη σειρά της, αναλόγως την περίπτωση, δίνει τις κατάλληλες εντολές στην αντίστοιχη μονάδα επεξεργασίας του εμφυτεύματος ώστε να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες ενέργειες.

Τα εμφυτεύματα μέσα στο σώμα του δέκτη μπορεί να βρίσκονται μέσα σε κάποια κοιλότητα (για παράδειγμα εντερική, στοματική κτλ.), βαθιά μέσα στους ιστούς ή ακόμα να βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια του σώματος. Πολλές φορές, για να προστατευτεί το ηλεκτρονικό κύκλωμα από το διαβρωτικό περιβάλλον του εσωτερικού του σώματος και να διασφαλισθεί η ομαλή

λειτουργία του, έχοντας ταυτόχρονα και μηχανική σταθερότητα, συνηθίζεται να περιβάλλεται από ένα κέλυφος. Επίσης, χρησιμοποιείται συχνά και ένα λεπτό περίβλημα, το οποίο ενισχύει την βιοσυμβατότητα ιστών και συσκευής, προστατεύοντας τους ιστούς του δέκτη από πιθανές μολύνσεις λόγω της συσκευής και υποστηρίζοντας την ομαλή ενσωμάτωση της συσκευής στους ιστούς.

Σε ό,τι αφορά στις απαιτήσεις ενός εμφυτεύσιμου συστήματος, οι συσκευές που το απαρτίζουν θα πρέπει να πληρούν κάποιες προϋποθέσεις και να έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για να διασφαλιστεί η εύρυθμη, αλλά και συμφέρουσα από πολλές απόψεις λειτουργία του. Φυσικά, τα χαρακτηριστικά αυτά πολλές φορές καθορίζονται από τις ανάγκες και τις προτιμήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό που πρέπει να έχει μία εμφυτεύσιμη συσκευή είναι το μικρό μέγεθος και βάρος της. Με μικρότερες και πιο ελαφριές συσκευές, πέραν του ότι μειώνεται ο χώρος επέμβασης στο σώμα του ασθενή, μειώνεται και ο πόνος και ενόχλησή του μετεγχειρητικά και κατά τη διάρκεια της θεραπείας. Τα στοιχεία που επιβαρύνουν σε μέγεθος και βάρος είναι κυρίως η πηγή ενέργειας και το χρησιμοποιούμενο περίβλημα της συσκευής. Βέβαια, με την εξέλιξη της νανοτεχνολογίας και των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS – Micro Electromechanical Systems), ο συνολικός όγκος των ηλεκτρονικών στοιχείων έχει μειωθεί αισθητά τα τελευταία χρόνια.

Επίσης σημαντικό στοιχείο είναι η μικρή κατανάλωση ισχύος της συσκευής. Μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας θα οδηγούσε σε μεγαλύτερο διασκορπισμό ενέργειας στους γύρω ιστούς, γεγονός ανεπιθύμητο, που θα προκαλούσε υπερθέρμανση ή ακόμα και καταστροφή αυτών. Συν τοις άλλοις, μικρότερη κατανάλωση ισχύος από τα ηλεκτρονικά στοιχεία επιμηκύνει την διάρκεια ζωής της χρησιμοποιούμενης μπαταρίας που τροφοδοτεί το σύστημα ή αν δεν χρησιμοποιείται μπαταρία και η συσκευή τροφοδοτείται ασύρματα, η μικρότερη κατανάλωση θα μείωνε με τη σειρά της τα επαγόμενα Ηλεκτρομαγνητικά πεδία κατά την ασύρματη επικοινωνία της στους γύρω ιστούς έτσι ώστε να εντάσσονται στους υπάρχοντες περιορισμούς για την έκθεση των ιστών σε αυτά.

Άλλα χαρακτηριστικά ιδιαίτερης σημασίας είναι η επιλογή κατάλληλων υλικών κατασκευής της συσκευής, αλλά και των ηλεκτροδίων έτσι ώστε να διασφαλιστεί η βιοσυμβατότητά της με τους γύρω ιστούς και να αποφευχθούν πιθανές μολύνσεις ή ακόμα και δυσλειτουργία της ίδιας της συσκευής.

Ένα εμφυτευόμενο βιολογικό σύστημα, λόγω της εξαιρετικά σημαντικής χρησιμότητάς του, πρέπει να διασφαλίζει την ορθή λειτουργία του και να χαρακτηρίζεται από σταθερότητα. Πιθανές μεταβολές στα γύρω Ηλεκτρομαγνητικά πεδία ή και μηχανική αστάθεια μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα στην λειτουργία των στοιχείων του συστήματος προκαλώντας σοβαρές ή και κρίσιμες ακόμα παρενέργειες στον άνθρωπο. Αυτό καθίσταται ακόμα πιο σημαντικό, αν συνυπολογισθεί το γεγονός ότι οι περισσότερες συσκευές εμφυτεύονται βαθιά μέσα στους ιστούς και η συντήρηση αυτών είναι αρκετά δύσκολη.

Τέλος, καθώς ένα εμφυτεύσιμο σύστημα λειτουργεί και διαγνωστικά, είναι σημαντικό να υπάρχει ένα διαθέσιμο δίκτυο αποστολής και λήψης δεδομένων, το οποίο διασφαλίζει την γρήγορη και σε μεγάλες ποσότητες μετάδοση δεδομένων από και προς το σύστημα, με μεγάλη ακρίβεια και με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ισχύος. Ιδιαίτερη έμφαση επίσης πρέπει να δοθεί στην ασφάλεια αυτού του δικτύου από παρεμβολές τρίτων, λόγω της ευαίσθητης σκοπιμότητας και λειτουργίας του εμφυτεύσιμου συστήματος.

2.3: Τροφοδοσία Εμφυτευμάτων

Η σημαντικότερη πρόκληση που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα σύγχρονα εμφυτεύσιμα βιολογικά συστήματα είναι η τροφοδοσία αυτών έτσι ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία τους. Η πιο δημοφιλής πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται είναι η παραδοσιακή μπαταρία, με την μπαταρία Λιθίου να προτιμάται λόγω της υψηλής πυκνότητας ενέργειας, του συμπαγούς μεγέθους και της αρκετά μεγάλης μέσης διάρκειας ζωής (5-10 χρόνια) της. Παρ' όλα αυτά, προς το τέλος της ζωής της μπαταρίας, προκύπτει εν τέλει η ανάγκη αντικατάστασης αυτής, γεγονός που επιβαρύνει τον ασθενή τόσο σωματικά (χειρουργική αφαίρεση και αντικατάσταση με άλλη), όσο και ψυχολογικά (εισαγωγή στο χειρουργείο, προ- και μετεγχειρητικό άγχος κτλ.). Για αυτό το λόγο, προέκυψε η ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών τρόπων τροφοδοσίας των εμφυτεύσιμων συστημάτων [22].

Γενικά, τα εμφυτεύσιμα βιολογικά συστήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο τροφοδότησης των συσκευών: α) Συστήματα που λειτουργούν αυτόνομα με μπαταρία μιας χρήσεως ή μέσω άλλων πηγών και β) Συστήματα με συσκευές που έχουν ή δεν έχουν μπαταρία και λαμβάνουν ισχύ από εξωτερικές πηγές.

Αυτόνομα Συστήματα:

Τα αυτόνομα συστήματα διαχωρίζονται σε συστήματα που χρησιμοποιούν μπαταρίες μιας χρήσης και σε συστήματα που χρησιμοποιούν εναλλακτικές μεθόδους τροφοδότησης.

Τα πρώτα αξιοποιούν κυρίως μπαταρίες Λιθίου (Li), καθώς η μεγάλη διάρκεια ζωής τους και η δυνατότητά τους να παρέχουν ρεύματα εύρους από mA μέχρι A, τις καθιστούν ιδανικές για εφαρμογές που είναι απαραίτητη η τροφοδότηση συσκευών με χαμηλές απαιτήσεις ισχύος και λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα, όπως οι βηματοδότες, τα εμφυτεύματα κοχλία, οι καρδιακοί απινιδωτές ή τα συστήματα χορήγησης φαρμάκων.

Πέραν της χρήσης συμβατικών μπαταριών, έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι τροφοδότησης των εμφυτευμένων στο σώμα συσκευών, οι οποίες αξιοποιούν την διαθέσιμη στο περιβάλλον ενέργεια, όπως την χημική, την θερμική, την κινητική και την ηλεκτρομαγνητική [20].

Συστήματα με εξωτερικές πηγές τροφοδότησης:

Τα προαναφερθέντα αυτόνομα συστήματα, ενώ προσφέρουν άνεση και μικρή σχετικά πολυπλοκότητα, συνήθως υστερούν στο κομμάτι της αξιοπιστίας και παρέχουν περιορισμένη ισχύ, ενώ είναι αρκετές οι φορές που χρειάζεται ο ασθενής να υποβληθεί σε χειρουργικές επεμβάσεις είτε για την αντικατάσταση της εκάστοτε συσκευής λόγω αποφόρτισης της μπαταρίας της, είτε λόγω πιθανής μόλυνσης που μπορεί να προκληθεί από κακή βιοσυμβατότητα εμφυτεύματος-ασθενή (πχ βλάβη μπαταρίας, μόλυνση από επαφή ιστού με κάποιο καλώδιο, κ.ά.).

Για αυτόν τον λόγο, προκύπτει η ανάγκη για την χρήση συστημάτων που είτε τροφοδοτούνται εξ' ολοκλήρου, είτε απλά επαναφορτίζονται από κάποια εξωτερική πηγή. Αυτό, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες ανάγκες συνεχούς αποστολής δεδομένων και επικοινωνίας μεταξύ της εμφυτεύσιμης συσκευής και μονάδων ελέγχου (πχ μία έξυπνη συσκευή), καθιστά την τεχνολογία της Ασύρματης Μεταφοράς Ισχύος εξαιρετικά ενδιαφέρουσα.

2.3.1: Χαρακτηριστικά στοιχεία μπαταριών και φόρτισης

Τεχνικές Προδιαγραφές Φόρτισης:

Σχετικά με την διαδικασία της φόρτισης, κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και είναι χρήσιμα και για την επιλογή της κατάλληλης μπαταρίας είναι τα κάτωθι [23]:

- Χαρακτηριστικά της φόρτισης:
 - Όρια φόρτισης, δηλαδή περιορισμοί στην λειτουργία της μπαταρίας και όρια παύσης της διαδικασίας της φόρτισης όπως η μέγιστη τάση φόρτισης, το μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα φόρτισης και ο μέγιστος χρόνος φόρτισης.
 - Περιβαλλοντικές συνθήκες που μπορούν να επηρεάσουν τη φόρτιση, όπως το εύρος της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο χώρο που λειτουργεί η μπαταρία, καθώς επίσης και πιθανή πίεση στο εξωτερικό της μπαταρίας.
 - Η διαδικασία της φόρτισης, δηλαδή η τάση και το ρεύμα φόρτισης και τα όρια αυτών, ο τρόπος φόρτισης.
Για παράδειγμα, σταθερό ρεύμα, σταθερή τάση, παλμικό ρεύμα, μέθοδος σταθερού ρεύματος – σταθερής τάσης (CCCV – Constant Current Constant Voltage, μέθοδος κυρίως χρησιμοποιούμενη στις μπαταρίες Ιόντων Λιθίου, όπου η μπαταρία φορτίζεται με σταθερό ρεύμα μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή τάσης και έπειτα παραμένει σε σταθερή τάση μέχρι το ρεύμα να μειωθεί μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή), καθώς και περιπτώσεις υπερφόρτισης ή και υποφόρτισης.
 - Τερματισμός της φόρτισης, δηλαδή οι περιπτώσεις τερματισμού της διαδικασίας της φόρτισης προκαλούμενες από διάφορες συνθήκες, ανάλογα και τον τύπο της μπαταρίας. Για παράδειγμα, τερματισμός φόρτισης μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ή αφού η τάση φόρτισης έχει αυξηθεί μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο ή το ρεύμα φόρτισης έχει μειωθεί μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο ή όταν η θερμοκρασία της μπαταρίας υπερβεί κάποιο όριο, κ.ά..
- Χαρακτηριστικά αποφόρτισης της μπαταρίας, τα οποία είναι σημαντικά για τον καθορισμό ενός εύρους λειτουργίας της μπαταρίας και την μελέτη της απόδοσής της. Τα πιο σημαντικά είναι:
 - Εύρος τάσης ανοιχτού κυκλώματος (ονομαστική τάση μπαταρίας χωρίς φορτίο), το οποίο παρέχει πληροφορίες για το αν η μπαταρία πληροί όλες τις τεχνικές προδιαγραφές και είναι σε καλή κατάσταση.
 - Εύρος τάσης λειτουργίας, το οποίο είναι το εύρος της τάσης για τα συγκεκριμένα φορτία για τα οποία επιλέχθηκε η μπαταρία και η χωρητικότητα αυτής. Επίσης διασφαλίζει ότι η μπαταρία θα μπορεί να λειτουργεί με συγκεκριμένη ευστάθεια μεταξύ αυτών των ορίων, καθώς χρήση μιας μπαταρίας σε εύρος μεγαλύτερου του σχεδιασθέντος μπορεί να επηρεάσει δραματικά την απόδοσή της.
 - Μεταφέρσιμη Ενέργεια ή Χωρητικότητα. Οι μεταβολές αυτής κατά τη φόρτιση είναι σημαντικές στον σχεδιασμό της διάταξης φόρτισης. Επίσης, αυτό το χαρακτηριστικό παρέχει πληροφορίες στον κατασκευαστή της εκάστοτε συσκευής που θα κάνει χρήση της

μπαταρίας για το αναμενόμενο προσδόκιμο ζωής αυτής. Ο ρυθμός μείωσης της χωρητικότητας της μπαταρίας είναι συνάρτηση των κύκλων φόρτισης και του χρόνου και το αναμενόμενο χρονικό σημείο κατά το οποίο η χωρητικότητα μειώνεται σε σημείο που δεν μπορεί να αποδώσει σωστά θα πρέπει να παρέχεται από τον κατασκευαστή της μπαταρίας.

- Ρυθμός αυτοαποφόρτισης μπαταρίας (Self – Discharge rate).

Η μείωση του μεταφέρσιμου φορτίου της μπαταρίας είναι συνάρτηση του χρόνου, και συμβαίνει ακόμα και όταν η μπαταρία δεν χρησιμοποιείται. Για τον λόγο αυτό είναι κάτι το οποίο θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη.

- Μέγιστο ρεύμα αποφόρτισης. Η μπαταρία θα πρέπει να ανταποκρίνεται στο απαιτούμενο μέγιστο ρεύμα αποφόρτισης της τροφοδοτούμενης συσκευής για το διάστημα που η συσκευή τραβάει ρεύμα, χωρίς να πέφτει η τάση της κάτω από την απαιτούμενη τάση λειτουργίας, ακόμα και σε περίπτωση που η μπαταρία χρησιμοποιείται σε ρεύματα υψηλότερα από αυτά για τα οποία σχεδιάστηκε.

- Μηχανικά σχεδιαστικά στοιχεία, όπως:

-Διαστάσεις και αντοχές υλικών (Μπαταρίας, κυψελών, εξωτερικών μερών).

-Κατάλληλη επιλογή επαφών και καλωδίων (Για τάση, ρεύμα, θερμοκρασία, κτλ.).

-Μέτρα ασφαλείας (πχ πρόβλεψη για μηχανισμό αποσυμπίεσης αερίων από τις κυψέλες της μπαταρίας, για πρόληψη διαστολής αυτής ή και πιθανής έκρηξης).

-Αντοχή της μπαταρίας αλλά και της τροφοδοτούμενης συσκευής που την περιλαμβάνει, σε κρούσεις και δονήσεις.

-Θερμική διαχείριση της μπαταρίας.

-Προστασία από είσοδο ξένων προς την μπαταρία σωμάτων (δάχτυλα, βίδες, σκόνη) και υγρών.

Επίσης, τελευταία χρησιμοποιείται και ο όρος της τεχνολογίας έξυπνης μπαταρίας (Smart Battery technology), ο οποίος περιγράφει ειδικά ηλεκτρικά στοιχεία με συγκεκριμένες λειτουργίες που συμβάλλουν στην διαχείριση της μπαταρίας και την ασφάλεια αυτής.

Η τεχνολογία αυτή χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες που πραγματεύονται:

-Την κατάσταση φόρτισης και άλλα στοιχεία της μπαταρίας.

-Την προστασία της μπαταρίας από λανθασμένες συνθήκες λειτουργίας (πχ βραχυκύκλωμα, υπέρταση).

- Τον τρόπο φόρτισης και τον έλεγχο αυτού για επίτευξη μεγαλύτερης απόδοσης.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά Μπαταρίας:

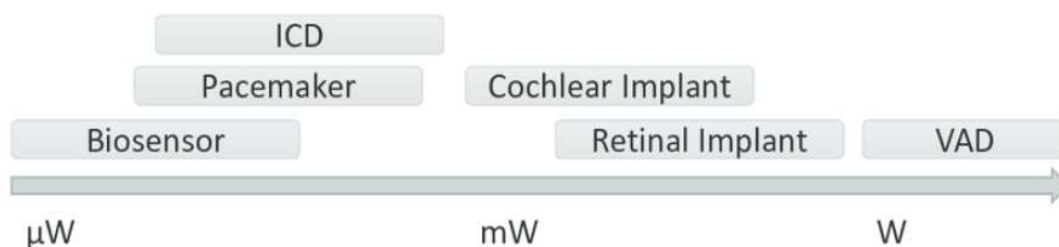
Σε ό,τι αφορά στην επιλογή μπαταρίας, μερικά από τα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι ο χημικός τύπος της μπαταρίας, ο τύπος των κυψελών (δυνατότητα επαναφόρτισης ή όχι) και στοιχεία όπως το σχήμα της, η ονομαστική της τάση και η χωρητικότητά της σε mAh.

Ο κυριότερος τύπος μπαταριών που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εμφυτευμάτων είναι οι μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-Ion), καθώς είναι σχετικά μικρές σε μέγεθος και με μικρό βάρος, έχουν χαμηλό ρυθμό αυτό-αποφόρτισης - πράγμα που τις κάνει κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό ρεύμα, αποδίδουν υψηλές σχετικά τάσεις (3 - 4 V), έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα και θερμοκρασιακή αντοχή και χαμηλό χρόνο επαναφόρτισης.

Πέραν των μπαταριών αυτών, χρησιμοποιούνται και άλλοι τύποι μπαταριών, όπως οι μπαταρίες Μεταλλικού Υδριδίου Νικελίου (NiMH), Λιθίου-Ιωδίου (Li-Iodine) και Λιθίου-Διοξειδίου του Μαγγανίου (Li-Manganese Dioxide), φυσικά ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος της εκάστοτε εφαρμογής.

Οι απαιτήσεις ισχύος διαφόρων εμφυτευμάτων διαφέρουν ανάλογα την εφαρμογή, την θέση τους στο σώμα και το μέγεθός τους και ανάλογα με τα επιπλέον ηλεκτρονικά συστήματα που συνοδεύουν τη συσκευή (για παράδειγμα κύκλωμα διαχείρισης ρεύματος και τάσης για αποδοτικότερη φόρτιση, κύκλωμα ελέγχου κτλ.).

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται τυπικά το εύρος απαίτησης ισχύος από διάφορες περιπτώσεις εμφυτεύσιμων συσκευών.



Σχήμα 2.1: Κατά αύξουσα σειρά ισχύος: Βιοαισθητήρες, Βηματοδότες, Εμφυτεύσιμοι Καρδιακοί Απινιδωτές, Κοχλιακά εμφυτεύματα, Εμφυτεύματα αμφιβληστροειδούς, Συσκευές κοιλιακής υποβοήθησης [24].

Οι περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούν μπαταρίες με τάση εξόδου 2 - 4 V. Αυτό που αλλάζει ανάλογα την εφαρμογή είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας και τα αποδιδόμενα Ah αυτής.

2.4: Θέματα Ασφαλείας – Διεθνείς Κανονισμοί και Πρότυπα

Λόγω εγειρόμενων προβληματισμών σχετικά με τις μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα συστήματα ασύρματης φόρτισης πρέπει να υπόκεινται σε συγκεκριμένους κανονισμούς που αφορούν στην προστασία από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Σχετικοί κανονισμοί ασφάλειας έχουν αναπτυχθεί από διάφορες επιστημονικές επιτροπές εθνικών και διεθνών οργανισμών. Οι πιο διακεκριμένοι από αυτούς είναι η Διεθνής Επιτροπή

Προστασίας από Μη Ιονίζουσα Ακτινοβολία (International Commission on Non – Ionizing Radiation Protection – ICNIRP) και η Επιτροπή Συντονισμού Προτύπων 28 (Standards Coordinating Committee 28 – SCC28) του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών – IEEE, που ορίζουν οδηγίες για έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία συχνοτήτων έως και 300 GHz.

Γενικά, οι οδηγίες ασφάλειας καθορίζουν δυο διαφορετικά όρια έκθεσης [25], [26]:

Τα όρια βασικών περιορισμών:

Οι βασικοί περιορισμοί θέτουν τα όρια πάνω από τα οποία αναμένονται βιολογικές επιπτώσεις, όπως θέρμανση ανθρωπίνων ιστών και διέγερση νευρικού συστήματος.

Τα επίπεδα αναφοράς για τη μέγιστη επιτρεπτή έκθεση:

Τα όρια και τα επίπεδα αναφοράς αφορούν δυο κατηγορίες: την έκθεση ανθρώπων σε Η/Μ πεδία στο εργασιακό περιβάλλον και την έκθεση του ευρέος κοινού σε δημόσιους χώρους. Για χώρους εργασίας, όπου η έκθεση του εργαζόμενου στο πεδίο θεωρείται διάρκειας 8ώρου και υπάρχει συνήθως εξοπλισμός προστασίας, τα όρια είναι σχετικά ψηλότερα από τα όρια των δημόσιων χώρων. Στους δημόσιους χώρους θεωρείται ότι το ευρύ κοινό μπορεί να εκτίθεται στο πεδίο συνεχόμενα για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Σχήμα 2.2).

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι βασικοί περιορισμοί επαγόμενου ρεύματος και ηλεκτρικού πεδίου των διεθνών οργανισμών και στον Πίνακα 2.2 τα αντίστοιχα επίπεδα αναφοράς όπως προέκυψαν από τη χρήση απλοποιημένων ανατομικών μοντέλων για τη συσχέτιση των επιπέδων του εμπόπτου πεδίου με τους βασικούς περιορισμούς. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζονται τα επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε χρονομεταβλητά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία της ICNIRP και της IEEE.

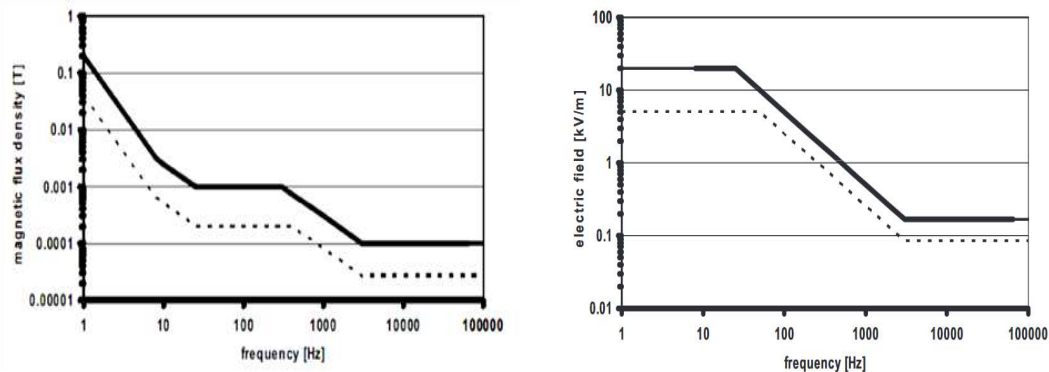
Η άμεση εφαρμογή των επιπέδων αναφοράς στα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος, τα οποία λειτουργούν με βάση τα μαγνητικά πεδία, οδηγεί κατά γενική παραδοχή σε μια υπερβολικά συντηρητική οριοθέτηση για την έκθεση του χρήστη.

	Περιοχή σώματος	Συχνότητα	Πυκνότητα ρεύματος ($mArms/m^2$)		Ηλεκτρικό πεδίο (V_{RMS}/m)	
			Ευρύ κοινό	Χώρος εργασίας	Ευρύ κοινό	Χώρος εργασίας
ICNIRP 1998	Κεντρικό νευρικό σύστημα κεφαλιού και σώματος	100kHz-10MHz	$f_H/500$	$f_H/100$		
ICNIRP 2010	Παντού	3kHz-10MHz			$1.35 \cdot 10^{-4} f_H$	$2.7 \cdot 10^{-4} f_H$
IEEE 2005	εγκέφαλος	20Hz-5MHz			$2.95 \cdot 10^{-4} f_H$	$8.85 \cdot 10^{-4} f_H$
	καρδιά	167Hz-5MHz			$5.65 \cdot 10^{-4} f_H$	$5.65 \cdot 10^{-4} f_H$
	προεξοχές	3.35kHz-5MHz			$6.27 \cdot 10^{-4} f_H$	$6.27 \cdot 10^{-4} f_H$
	αλλού	3.35kHz-5MHz			$2.09 \cdot 10^{-4} f_H$	$6.27 \cdot 10^{-4} f_H$

Πίνακας 2.1: Βασικοί περιορισμοί του Επαγόμενου Ρεύματος και του Ηλεκτρικού Πεδίου, όπου f_H : η συχνότητα σε Hz [6].

	Συχνότητα σε MHz	Ηλεκτρικό πεδίο (V _{RMS} /m)		Μαγνητικό Πεδίο (A _{RMS} /m)		Ισοδύναμη πυκνότητα ισχύος επίπεδου κύματος (W/m ²)	
		Ευρύ κοινό	Χώρος εργασίας	Ευρύ κοινό	Χώρος εργασίας	Ευρύ κοινό	Χώρος εργασίας
ICNIRP 1998	0.15-1	87	610	0.73/f _M	1.6/f _M		
	1-10	87/√f _M	610/f _M	0.73/f _M	1.6/f _M		
	10-400	28	61	0.073	0.16	2	10
ICNIRP 2010	0.003-10	83	170	21	80		
IEEE 2005	0.1-1	614	1842	16.3/f _M	16.3/f _M	1000	9000
	1-1.34	614	1842/f _M	16.3/f _M	16.3/f _M	1000	9000/f _M ²
	1.34-3	832.8/f _M	1842/f _M	16.3/f _M	16.3/f _M	1800/f _M ²	9000/f _M ²
	3-30	832.8/f _M	1842/f _M	16.3/f _M	16.3/f _M	1800/f _M ²	9000/f _M ²

Πίνακας 2.2: Επίπεδα αναφοράς. f_M: η συχνότητα σε MHz [6].



Σχήμα 2.2: Επίπεδα αναφοράς της ICNIRP της ανθρώπινης έκθεσης σε χρονομεταβλητό μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο. Με συνεχόμενη γραμμή παριστάνεται η έκθεση στους εργασιακούς χώρους και με διακεκομμένη η έκθεση σε ευρύτερους δημόσιους χώρους [25].

Δεδομένου ότι τα περισσότερα εμφυτεύσιμα βιολογικά συστήματα έχουν συχνότητα ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ 100 kHz και 10 GHz, κάτι που επιπλέον χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι ο Ρυθμός Ειδικής Απορρόφησης (Specific Absorption Rate – SAR). Ο SAR αποτελεί μέγεθος που εκφράζει τον ρυθμό απορρόφησης της ακτινοβολίας ραδιοσυχνοτήτων από τους ιστούς του ανθρώπινου σώματος. Υπολογίζεται ως η ενέργεια που απορροφάται από ορισμένη μάζα ιστού (ειδική απορρόφηση) μέσα σε ορισμένο χρόνο και μετριέται σε μονάδες ισχύος ανά μάζα (W/kg). Το θεσμοθετημένο όριο για το γενικό κοινό ανέρχεται στα 0.08 W/kg για το SAR όλου του σώματος και στα 2 W/kg για συγκεντρωμένο SAR σε συγκεκριμένο σημείο (πχ κεφάλι) [25], [27].

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι αυτός της βιοσυμβατότητας του εμφυτεύματος με το ανθρώπινο σώμα. Είναι σημαντική η χρήση βιοσυμβατών υλικών για την κατασκευή των εμφυτευμάτων και των στοιχείων που τα απαρτίζουν, για την προστασία τους από το «εχθρικό» περιβάλλον στο οποίο τοποθετούνται. Επίσης, πολλά από τα φυσικοχημικά στοιχεία των επιφανειών των εμφυτευμάτων τις καθιστούν επιρρεπείς σε προσβολή και αποίκιση από βακτήρια. Αυτό μπορεί να επιφέρει μολύνσεις, που αν δεν εντοπισθούν και αντιμετωπισθούν εγκαίρως μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα τόσο στο εμφύτευμα όσο και στον ίδιο

τον άνθρωπο (μόλυνση ιστών, σηψαιμία, υπολειτουργία ή και διακοπή λειτουργίας της εμφυτευμένης συσκευής). Μια αποτελεσματική τακτική είναι η επίστρωση των εμφυτευμάτων με ειδικά βιοσυμβατά υλικά, καθώς και με αντιμικροβιακά στρώματα ή και ακόμα συστήματα αυτόματης χορήγησης αντιβιοτικών φαρμάκων.

Καθώς οι εμφυτεύσιμες συσκευές έχουν ολοένα και πιο πολλές λειτουργίες που τους επιτρέπουν την ασύρματη επικοινωνία και τον προγραμματισμό εξ' αποστάσεως, τίθεται το σοβαρό θέμα της ασφάλειας έναντι κακόβουλων επιθέσεων κατά αυτών. Οι επιθέσεις μπορούν να αφορούν τόσο την ιδιωτικότητα του δέκτη της εμφυτεύσιμης συσκευής, αλλά και την ίδια του την υγεία. Αν δεν υπάρχει σωστή προστασία της συσκευής, κάποιος τρίτος μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση σε αυτήν και στα στοιχεία που δέχεται και μεταφέρει ή/και να τα μεταβάλλει. Επιπλέον, θα μπορούσε να ελέγξει την ίδια τη συσκευή (ενεργοποίηση, απενεργοποίηση αυτής ή λειτουργιών της), προξενώντας σοβαρές επιπλοκές υγείας. Είναι συνεπώς απαραίτητο οι εμφυτεύσιμες βιολογικές συσκευές να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να προστατεύονται τόσο σε επίπεδο συσκευής όσο και σε επίπεδο δικτύου όταν μεταφέρουν πληροφορίες.

Συμβατότητα και τυποποίηση:

Ένα σημαντικό στοιχείο για την ευρύτερη αποδοχή κάθε νέας τεχνολογίας είναι η τυποποίηση των τοπολογιών, των μεθόδων σχεδίασης και των διαδικασιών πιστοποίησης. Αναγνωρίζοντας αυτή την ανάγκη ιδρύθηκαν, πρόσφατα, οργανισμοί και επιτροπές για τον καθορισμό διεθνών προδιαγραφών και προτύπων λειτουργίας και συμβατότητας τέτοιων συστημάτων .

Τα δύο πιο αναγνωρισμένα σχήματα δημιουργίας κανόνων τυποποίησης που υπάρχουν σήμερα στον τομέα της ασύρματης φόρτισης για συσκευές χαμηλής ισχύος (έως 5 W) είναι:

- ***To Wireless Power Consortium (πρότυπο Qi)***

Η Σύμπραξη για την Ασύρματη Ισχύ (Wireless Power Consortium) [28] ιδρύθηκε το Δεκέμβρη του 2008 με αποστολή την καθιέρωση του Qi ως παγκόσμιου προτύπου για την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρονικών προϊόντων. Μετρά πάνω από 140 μέλη, συμπεριλαμβανομένων πρωτεργατών της βιομηχανίας στους τομείς της κινητής τηλεφωνίας, ηλεκτρονικών, μπαταριών, ημιαγωγών, εξαρτημάτων, τεχνολογίας ασύρματης ισχύος, και υποδομών όπως ασύρματους διαχειριστές, εταιρίες επίπλων και αυτοκινητοβιομηχανίες. Προϊόντα με το λογότυπο Qi είναι διαθέσιμα στις Η.Π.Α., την ανατολική Ασία και την Ευρώπη. Το πρότυπο Qi εγγυάται ότι όποια συσκευή κατέχει το λογότυπο μπορεί να λειτουργήσει με οποιαδήποτε επιφάνεια ασύρματης φόρτισης φέρει επίσης το ίδιο σήμα, ανεξαρτήτως κατασκευαστή ή φίρμας.

- ***Alliance for wireless power και Power Matters Alliance (A4WP/PMA)***

Η Συμμαχία για την Ασύρματη Ισχύ (Alliance for Wireless Power – A4WP) είναι ένας ανεξάρτητος οργανισμός που αποτελείται από παγκοσμίου κύρους βιομηχανίες ασύρματης ισχύος. Σκοπός της είναι η δημιουργία μιας νέας τεχνολογίας ασύρματης μεταφοράς ισχύος που να παρέχει χωρική ελευθερία στις διαδικασίες ταυτόχρονης φόρτισης πολλών ηλεκτρικών συσκευών σε αυτοκίνητα, τραπέζια και διάφορες άλλες επιφάνειες.

Η (PMA) είναι μια παγκόσμια οργάνωση που ιδρύθηκε το 2012 και συνεργάζεται με τη βιομηχανία για τη δημιουργία τυποποιημένου μοντέλου προϊόντων που να είναι συμβατά με ασύρματους φορτιστές. Αποστολή της είναι η παροχή πιστοποίησης ευρείας

διαλειτουργικότητας, τεχνικών προδιαγραφών βασισμένων σε ανοιχτά πρότυπα, και η επίτευξη των στόχων υψηλής ενεργειακής απόδοσης και υπακοής στους διεθνείς κανονισμούς.

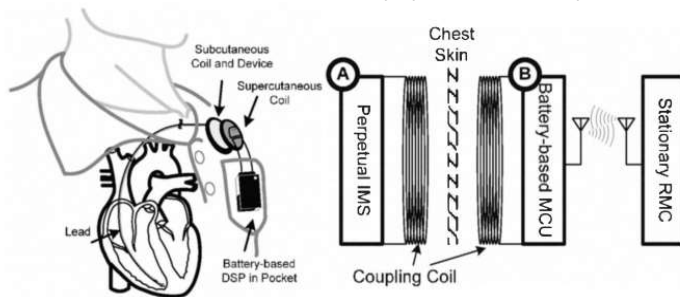
Οι δυο οργανώσεις προχώρησαν σε συγχώνευση τον Ιούνιο 2015 [29] υπό το όνομα AirFuel Alliance [30] και βρίσκονται σε διαδικασία συσσωμάτωσης για την ισχυρότερη εξυπηρέτηση των τεχνολογιών ασύρματης φόρτισης.

2.5: Εφαρμογές – Κατηγορίες Εμφυτευμάτων

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάσθηκαν τα βασικότερα στοιχεία των εμφυτεύσιμων βιολογικών συσκευών, από τους τρόπους λειτουργίας τους μέχρι και τους τρόπους τροφοδότησής τους. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις πιο δημοφιλείς εμφυτεύσιμες συσκευές, καθώς και ο συνδυασμός τους με συστήματα ασύρματης τροφοδότησης.

Καρδιακός Βηματοδότης:

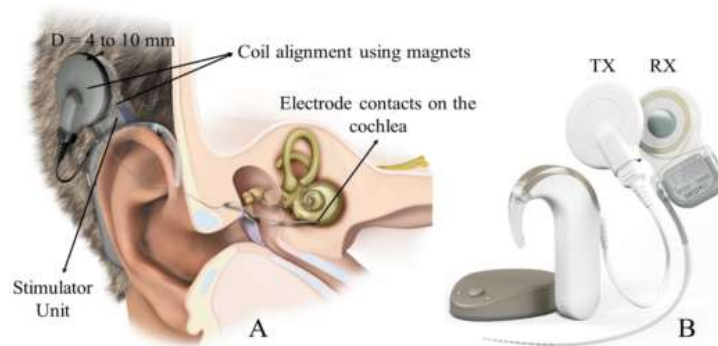
Ο καρδιακός βηματοδότης είναι μία ηλεκτρονική συσκευή που πρωτοεμφανίσθηκε το 1932 [31]. Χρησιμοποιείται όταν ο ασθενής πάσχει από αρρυθμίες, εμφυτεύεται στο στήθος του και συνδέεται με την καρδιά μέσω καλωδίων. Παρακολουθεί συνεχώς τις συσπάσεις της καρδιάς και όταν αντιληφθεί ότι δεν λειτουργεί σωστά, παράγει ηλεκτρικούς παλμούς που επαναφέρουν τις συσπάσεις σε φυσιολογικούς ρυθμούς. Η διέγερση λαμβάνει χώρα μόνο όταν ο ρυθμός πέσει κάτω από κάποια όρια, εξοικονομώντας έτσι την ενέργεια της μπαταρίας. Επίσης, μερικές λειτουργίες του όπως η ισχύς του ηλεκτρικού ερεθίσματος, η ευαισθησία εντοπισμού του καρδιακού χτύπου και η προσαρμογή του επιτρεπτού ρυθμού ανάλογα με την φυσική δραστηριότητα, μπορούν να προγραμματίζονται. Η μπαταρία του βηματοδότη διαρκεί περίπου 6-10 χρόνια, ανάλογα με την χρήση του και όταν η μπαταρία του βηματοδότη εξαντληθεί, ο ασθενής θα πρέπει να υποβάλλεται σε μικροεπέμβαση για την αντικατάστασή του. Η ασύρματη τροφοδότηση ενός βηματοδότη εξυπηρετεί στην μείωση του μεγέθους της μπαταρίας και κατ'επέκταση του συνολικού μεγέθους του εμφυτεύματος καθώς και στην απαλλαγή του ασθενούς από την ανάγκη για την χειρουργική αντικατάστασή του. Ταυτόχρονα, δίνεται η δυνατότητα στο εμφύτευμα να επικοινωνεί με εξωτερικές μονάδες συλλογής και καταγραφής των δεδομένων του. Η τυπική απαίτηση ισχύος του είναι μερικές δεκάδες μW .



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα επαγωγικής φόρτισης βηματοδότη. Η εξωτερική μπαταρία φορτίζει την μπαταρία του εμφυτεύματος, ενώ παράλληλα αποστέλλονται πληροφορίες σε μία εξωτερική μονάδα καταγραφής [32].

Εμφύτευμα Κοχλίας:

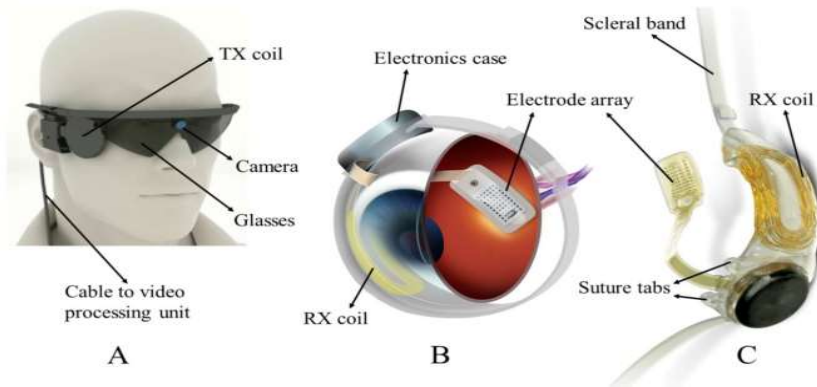
Τα εμφυτεύματα κοχλίας είναι ευρέως διαδεδομένα για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την ακοή. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από μία εξωτερική μονάδα η οποία φοριέται πίσω από το αυτί και περιλαμβάνει ένα μικρόφωνο και έναν επεξεργαστή ήχου και μία εσωτερική μονάδα, το εμφύτευμα. Το σήμα που λαμβάνεται από το μικρόφωνο αποστέλλεται ασύρματα στο εμφύτευμα, το οποίο διεγείρει ηλεκτρικά τα ακουστικά νεύρα του κοχλίας. Η δραστηριότητα αυτών μεταδίδεται στον εγκέφαλο που τα ερμηνεύει σαν ακουστικά γεγονότα, όπως ακριβώς κατά την διαδικασία της ακοής. Το εμφύτευμα τροφοδοτείται μέσω μαγνητικής σύζευξης δύο πηνίων και εξασφαλίζεται καλύτερη σύζευξη αυτών με την χρήση μόνιμων μαγνητών στο κέντρο τους. Οι παλμοί διέγερσης κυμαίνονται από 10 μ A έως 2 mA. Ένα τέτοιο σύστημα τροφοδότησης, ανάλογα με την χρήση χρειάζεται 20 mW με 40 mW ισχύος.



Σχήμα 2.4: A) Τυπική διάταξη συστήματος εμφυτεύματος κοχλίας. Το πηνίο του εμφυτεύματος (RX) τοποθετείται κάτω από το κρανίο και πίσω από το αυτί και τροφοδοτείται από το εξωτερικό πηνίο (TX) μέσω επαγωγής. B) Η σωστή σύζευξη των πηνίων γίνεται με χρήση μόνιμων μαγνητών στο κέντρο τους [15].

Εμφύτευμα Ίριδας:

Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη ασύρματων εμφυτευμάτων ίριδας έχει βοηθήσει στην παροχή τεχνητής όρασης σε άτομα με προβλήματα όπως σταδιακή απώλεια όρασης (Retinis Pigmentosa) και μερική ή ολική απώλεια αυτής λόγω ηλικίας. Ένα αναπτυσσόμενο και αρκετά υποσχόμενο σύστημα αποτελείται από το εμφύτευμα ίριδας, το οποίο περιλαμβάνει ένα πηνίο-δέκτη, ηλεκτρονικά ισχύος (μετατροπείς τάσης, συχνότητας, κτλ.), ηλεκτρόδια και μία εξωτερική μονάδα εγκατεστημένη πάνω σε ένα ζευγάρι γυαλιά. Πάνω σε αυτά βρίσκεται μια μικρή βιντεοκάμερα που συνδέεται με μία συσκευή επεξεργασίας βίντεο και ένα πηνίο-πομπός. Η εικόνα που λαμβάνεται από την κάμερα περνάει από τη συσκευή επεξεργασίας και τα δεδομένα καθώς και οι κατάλληλες εντολές διέγερσης μεταφέρονται μεταξύ των δύο πηνίων, επαγωγικά, στο εμφύτευμα το οποίο διεγείρει τα λειτουργικά οπτικά νεύρα. Ένα τέτοιο σύστημα καταναλώνει περίπου 45 mW και λειτουργεί σε συχνότητα 3.156 MHz.



Σχήμα 2.5: Σύστημα επαναφοράς όρασης. *A) Εξωτερική μονάδα, B) Χωρική τοποθέτηση του εμφυτεύματος, C) Εμφύτευμα ίριδας [15].*

Άλλες εμφυτεύσιμες βιολογικές συσκευές που αξιοποιούν και την τεχνολογία ασύρματης μεταφοράς ισχύος είναι τα εμφυτεύματα για την διέγερση μυών και περιφερειακών νεύρων, η τεχνητή καρδιά, ο εμφυτεύσιμος καρδιακός απινιδωτής, ενδοσκοπικές κάψουλες για παρακολούθηση στομάχου, καθώς και εμφυτεύματα στον φλοιό του εγκεφάλου για διέγερση των νεύρων [33].

2.6: Αξιολόγηση Επαγωγικής Φόρτισης Εμφυτευμάτων

Η χρήση της επαγωγικής μεταφοράς ισχύος για την φόρτιση βιολογικών εμφυτευμάτων αποτελεί μία ασφαλή και αξιόπιστη λύση συγκριτικά και με τις υπόλοιπες διαθέσιμες μεθόδους ασύρματης φόρτισης.

Άλλωστε, η επαγωγική μεταφορά ισχύος αποτελεί τον παλαιότερο και περισσότερο χρησιμοποιούμενο τρόπο ασύρματης μεταφοράς ισχύος.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, η επαγωγική μεταφορά ισχύος μπορεί να συνεισφέρει με τους παρακάτω τρόπους στον τομέα της ασύρματης φόρτισης εμφυτευμάτων:

- Απαλλάσσει την διαδικασία της φόρτισης από αγώγιμες συνδέσεις διαμέσου του ασθενή, περιορίζοντας έτσι ενδεχόμενες μολύνσεις και λοιμώξεις (για παράδειγμα τεχνητή καρδιά).
- Η συσκευή δε χρειάζεται να αντικατασταθεί μετά την αποφόρτιση της μπαταρίας της, συνεπώς ο ασθενής δεν επιβαρύνεται με επιπλέον χειρουργικές επεμβάσεις.
- Ο όγκος και το βάρος των εμφυτεύσιμων συσκευών μειώνεται, αυξάνοντας κατ' επέκταση την άνεση του ασθενούς.
- Οι εμφυτεύσιμες συσκευές γίνονται πιο πρακτικές και ευέλικτες, γεγονός που θέτει τις προϋποθέσεις για την χρήση τους σε περισσότερες εφαρμογές.
- Η διαδικασία της φόρτισης καθίσταται ασφαλής, καθότι το μαγνητικό πεδίο έχει ασθενή αλληλεπίδραση με τους βιολογικούς οργανισμούς.

Παρόλα αυτά, καθώς είναι μια τεχνολογία που δεν έχει τελειοποιηθεί πλήρως και ακόμα εξελίσσεται, υπάρχουν κάποια θέματα προς αντιμετώπιση, όπως:

- Προκειμένου να αποφεύγονται τραυματισμοί της περιοχής εμφύτευσης ή άλλες δυσκολίες, πρέπει το πηνίο του δευτερεύοντος να μπορεί να είναι ευλύγιστο. Αυτό όμως

προκαλεί συχνά αποσυντονισμό του συστήματος, που με τη σειρά του προκαλεί μείωση της απόδοσης.

- Το εμφύτευμα βρίσκεται σε ένα περιβάλλον που κινείται (ανθρώπινο σώμα) πράγμα που κάνει το σύστημα πιο επιρρεπές σε λανθασμένη ευθυγράμμιση. Αυτό προκαλεί απώλεια ισχύος, μειώνοντας την απόδοση λόγω κακής σύζευξης.
- Η μειωμένη απόδοση ή μη χρήση κυκλώματος ελέγχου της διαδικασίας της φόρτισης μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση και βλάβη των ιστών.
- Παρ'ότι η διαδικασία της φόρτισης είναι σχετικά ασφαλής, χρειάζεται προσοχή ανά περίπτωση έτσι ώστε να μην παραβιάζονται τα επιτρεπόμενα όρια Ρυθμού Ειδικής Απορρόφησης (SAR) των ΗΜ πεδίων από τους ιστούς. Επίσης σημαντική είναι η κατάλληλη θωράκιση των εμφυτεύσιμων συσκευών για την προστασία τους από τις Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές (EMI) που μπορεί να προκληθούν από άλλες ηλεκτρονικές συσκευές.

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή και ανάλυση της διάταξης

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται και αναλύονται οι βαθμίδες που απαρτίζουν ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος και τα βασικά μεγέθη που τις περιγράφουν και αναλύεται θεωρητικά η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος. Επίσης παρουσιάζονται και αναλύονται οι δύο τοπολογίες αντιστροφέα υψηλής διακοπτικής συχνότητας, της πλήρους γέφυρας και του αντιστροφέα κλάσης E, η συμβολή των οποίων στην λειτουργία του όλου συστήματος είναι το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας

3.1: Βαθμίδες του συστήματος

- **Πηγή ισχύος εισόδου**

Η τροφοδοσία της όλης διάταξης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: Είτε με την χρήση της τάσης δικτύου (230V, 50Hz) η οποία στη συνέχεια ανορθώνεται μέσω μίας διάταξης ανόρθωσης πλήρους γέφυρας και μέσω ενός DC-DC μετατροπέα λαμβάνει την επιθυμητή τιμή, είτε με την χρήση μίας πηγής σταθερής τάσης, η οποία μπορεί να είναι ένα τροφοδοτικό ή μία μπαταρία.

Στην παρούσα εργασία, καθώς και στις προσομοιώσεις και τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη επιλογή, δηλαδή η χρήση μίας πηγής σταθερής τάσης.

Σημειώνεται επίσης, ότι συνηθίζεται συμπληρωματικά με αυτή τη βαθμίδα, να γίνεται χρήση μετατροπέων συνεχούς σε συνεχή τάση (DC/DC Converters), για τον έλεγχο της παρεχόμενης τάσης και ισχύος κατ' επέκταση στο υπόλοιπο σύστημα.

- **Αντιστροφέας υψηλής διακοπτικής συχνότητας**

Η συμβολή της βαθμίδας αυτής στην συνολική απόδοση του συστήματος είναι πολύ μεγάλη, καθώς ο αντιστροφέας υψηλής διακοπτικής συχνότητας αναλαμβάνει τον ρόλο της μετατροπής της τάσης από συνεχή σε εναλλασσόμενη, ούτως ώστε να μπορέσει μέσω του μαγνητικού πεδίου και της επαγωγικής σύζευξης να τροφοδοτηθεί ασύρματα το φορτίο.

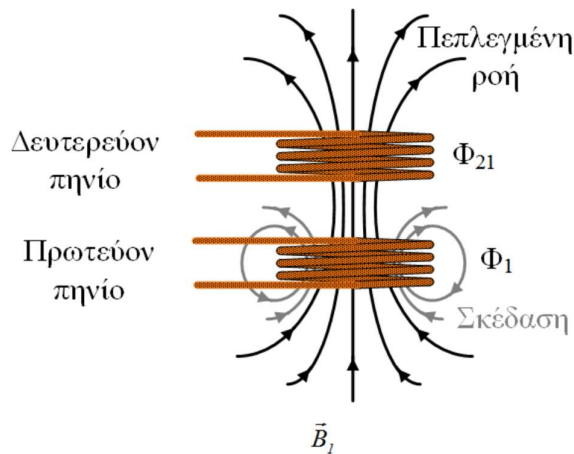
Στις διατάξεις των αντιστροφέων χρησιμοποιούνται ημιαγωγικά στοιχεία για την υλοποίηση των διακοπών, με τα MOSFETs συνδεδεμένα παράλληλα με διόδους ελευθέρως διέλευσης να είναι τα πιο δημοφιλή. Βέβαια, νέοι τύποι ημιαγωγών που προσφέρουν μεγαλύτερες αποδόσεις μελετώνται και χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο, με επικρατέστερους τους ημιαγωγούς από Καρβίδιο του Πυριτίου (SiC) και τους ημιαγωγούς από Νιτρίδιο του Γαλλίου (GaN).

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις αντιστροφέων υψηλής διακοπτικής συχνότητας, καθώς και διάφορες παραλλαγές αυτών. Η πιο κλασική διάταξη είναι αυτή του Αντιστροφέα Πλήρους Γέφυρας (Full Bridge Inverter), η οποία κάνει χρήση τεσσάρων ημιαγωγικών στοιχείων για την μετατροπή της τάσης από συνεχή σε εναλλασσόμενη. Άλλες χρησιμοποιούμενες διατάξεις αποτελούν ο Ενισχυτής Κλάσης D (Class D Amplifier) και ο Ενισχυτής Κλάσης E (Class E Amplifier), οι οποίοι κάνουν χρήση δύο και ενός ημιαγωγικών στοιχείων αντίστοιχα και εμπίπτουν στην κατηγορία των συντονιζόμενων αντιστροφέων.

Στην παρούσα εργασία, πραγματοποιείται σύγκριση του Αντιστροφέα Πλήρους Γέφυρας με τον Ενισχυτή Κλάσης E, και η περαιτέρω ανάλυση αυτών πραγματοποιείται και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.2: Αντιστροφέας Υψηλής Διακοπτικής Συχνότητας.

- **Επαγωγική Σύζευξη**

Επαγωγική σύζευξη μεταξύ δυο πηνίων επιτυγχάνεται όταν το ένα είναι τοποθετημένο τόσο κοντά στο άλλο ώστε αν το πρώτο διαρρέεται από ρεύμα, μέρος της μαγνητικής ροής που δημιουργείται, εμπλέκει το δεύτερο, ή και αντίστροφα. Για παράδειγμα, έστω ότι το πρώτο πηνίο αποτελείται από N_1 στρόφες και διαρρέεται από ρεύμα I_1 , που μεταβάλλεται με το χρόνο. Τότε, βάσει του νόμου του Ampere, δημιουργείται στο χώρο μαγνητικό πεδίο πυκνότητας B_1 , ως αποτέλεσμα της μαγνητικής ροής Φ_1 , όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Απεικόνιση πεπλεγμένης ροής και ροής σκέδασης [6].

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, στα άκρα του πηνίου θα δημιουργηθεί μια αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη ως αντίδραση στη μεταβολή αυτή του ρεύματος, ίση με

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = -L_1 \frac{dI_1}{dt} \quad (3.1)$$

Όπου L_1 ορίζεται η αυτεπαγωγή του πρώτου πηνίου. Από την ίδια σχέση, η αυτεπαγωγή μπορεί να εκφραστεί και ως

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi_1}{I_1} \quad (3.2)$$

Ένα μέρος Φ_{21} της μαγνητικής ροής Φ_1 εμπλέκει το δεύτερο πηνίο. Για μεταβαλλόμενο με το χρόνο I_1 , η μεταβολή της ροής Φ_1 , προκαλεί στο δευτερεύον επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη ίση με

$$\varepsilon_{21} = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} \quad (3.3)$$

Η μεταβολή αυτή της πεπλεγμένης ροής Φ_{21} στο δευτερεύον πηνίο είναι ανάλογη με τη μεταβολή του ρεύματος I_1 με βάση τη σχέση:

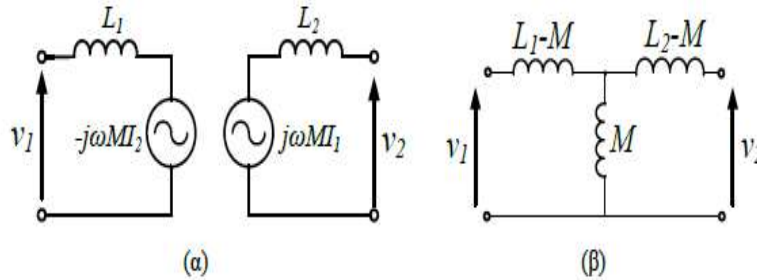
$$N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = M \frac{dI_1}{dt} \quad (3.4)$$

Όπου M είναι η αμοιβαία επαγωγή, η οποία μπορεί να εκφραστεί και ως

$$M = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1} = \frac{N_1 \Phi_{12}}{I_2} \quad (3.5)$$

Η μαγνητική ροή του πρωτεύοντος που δεν εμπλέκει το δευτερεύον τύλιγμα, ονομάζεται ροή σκέδασης.

Η περιγραφή των ηλεκτρικών μεγεθών της επαγωγικής σύζευξης πραγματοποιείται μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος είτε με τη μορφή εξαρτημένων πηγών ή με το μοντέλο σκέδασης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2 (α) και (β) αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα των συζευγμένων πηνίων και (β) μοντέλο σκέδασης [6].

Το ισοδύναμο κύκλωμα περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (3.6)$$

$$v_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (3.7)$$

Ο συντελεστής σύζευξης μεταξύ των δύο πηνίων ορίζεται ως εξής:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3.8)$$

και είναι πάντα μικρότερος ή ίσος της μονάδας.

- **Βαθμίδα συντονισμού**

Όπως είναι αναμενόμενο, τα συζευγμένα πηνία με μεγάλο διάκενο προκαλούν ασθενή σύζευξη μεταξύ των δύο πλευρών. Επιπλέον, ένα μέρος της σκέδασης πρέπει να αντισταθμίζεται έτσι ώστε να μεταφέρεται η επιθυμητή ισχύς στην αντίσταση φορτίου.

Για την αντιμετώπιση αυτού του μειονεκτήματος, όλοι οι σχεδιαστές συστημάτων IPT υιοθετούν μια μέθοδο αντισταθμισμού ούτως να διευκολύνεται η μεταφορά ισχύος από το πρωτεύον στο δευτερεύον. Η μέθοδος αυτή δεν είναι άλλη από την λειτουργία των τυλιγμάτων σε κατάσταση συντονισμού.

Ηλεκτρικός συντονισμός:

Για την λειτουργία σε συντονισμό, χρησιμοποιούνται κυκλώματα L-C που είναι συνδεδεμένα είτε σε σειρά, είτε παράλληλα. Η συχνότητα στην οποία επιτυγχάνεται ο συντονισμός είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις και ισούται με $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος συντονισμού ενός εν σειρά κυκλώματος:

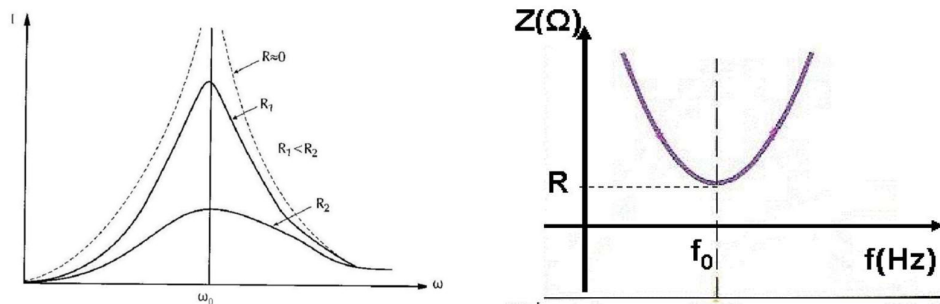
Η εν σειρά σύνδεση πηνίου, πυκνωτή και αντίστασης αποτελεί ένα βασικό κύκλωμα συντονισμού. Ένα ηλεκτρικό κύκλωμα λειτουργεί σε κατάσταση συντονισμού όταν η τάση τροφοδοσίας του βρίσκεται σε φάση με το ρεύμα, παρότι στο κύκλωμα υπάρχουν παθητικά στοιχεία αντίδρασης.

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος στοιχείων L – C – R συνδεδεμένων σε σειρά είναι:

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + jX \quad (3.9)$$

Για δεδομένη τάση, το ρεύμα γίνεται μέγιστο όταν η αντίσταση Z παίρνει την ελάχιστη τιμή, δηλαδή όταν $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$. Αυτό συμβαίνει για γωνιακή συχνότητα $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Η τιμή αυτή της γωνιακής συχνότητας μηδενίζει και τη γωνία της ισοδύναμης αντίστασης, με αποτέλεσμα το ρεύμα και η τάση να είναι συμφασικά, και ο συντελεστής ισχύος του κυκλώματος να γίνεται ίσος με την μονάδα.

Στο σχήμα 3.3 δίδεται η γραφική παράσταση της έντασης του ρεύματος συναρτήσει της συχνότητας της εφαρμοζόμενης εναλλασσόμενης τάσης, για διάφορες τιμές της ωμικής αντίστασης (R) ενός κυκλώματος L-C-R. Παρατηρείται ότι το κύκλωμα με τη μικρότερη ωμική αντίσταση δίνει οξύτερο συντονισμό. Στη θεωρητική περίπτωση όπου η ωμική αντίσταση είναι ίση με μηδέν το ρεύμα απειρίζεται.



Σχήμα 3.3: Αριστερά: Καμπύλες συντονισμού της έντασης του ρεύματος για διάφορες τιμές της ωμικής αντίστασης R του κυκλώματος. Δεξιά: Γραφική παράσταση της σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος συναρτήσει της συχνότητας της διεγείρουσας τάσης [34].

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι στην κατάσταση συντονισμού παρατηρούνται τα εξής:

- Το πλάτος του ρεύματος γίνεται μέγιστο και ίσο με: $I_o = \frac{V_o}{Z}$.
- Η χωρητική και η επαγωγική αντίσταση εξισώνονται.
- Η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της η οποία ισούται με την ωμική αντίσταση $Z = R$ (σχήμα 3.3).

- Η διαφορά φάσης μεταξύ εφαρμοζόμενης τάσης και έντασης του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα μηδενίζεται.

Συντελεστής Ποιότητας Q:

Ο συντελεστής ποιότητας Q εκφράζει το λόγο της αποθηκευμένης ενέργειας προς την ενέργεια που καταναλώνεται ανά κύκλο λειτουργίας σε ένα ταλαντούμενο σύστημα ($Q = \omega \frac{E_{αποθ.}}{E_{απωλ.}}$). Συνεπώς όσο υψηλότερη είναι η τιμή του, τόσο καλύτερη είναι και η απόκριση του συστήματος.

Για τα εν σειρά L-C-R κυκλώματα, ο συντελεστής ποιότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

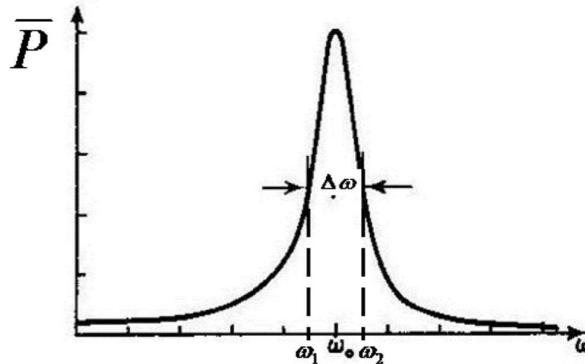
$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{1}{\omega_o C R} \tag{3.10}$$

Συνεπώς ο συντελεστής ποιότητας αυξάνει όσο μικραίνει η τιμή της ωμικής αντίστασης στο εν σειρά κύκλωμα.

Ουσιαστικά, ο συντελεστής ποιότητας είναι μία ενδεικτική ποσότητα του πόσο στενή είναι η καμπύλη του συντονισμού:

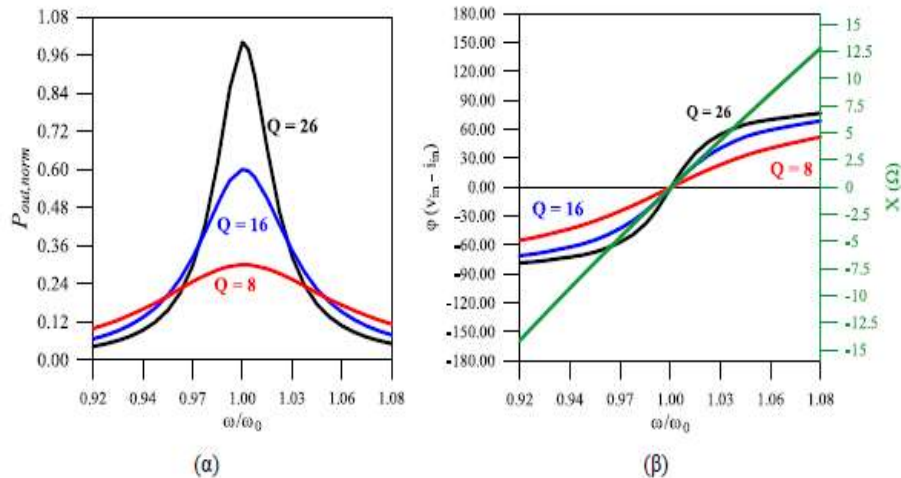
$$Q = \frac{\omega_o}{\Delta\omega} = \frac{\omega_o}{\omega_2 - \omega_1} \tag{3.11}$$

όπου στην παραπάνω σχέση ω_o είναι η κυκλική συχνότητα συντονισμού και $\Delta\omega$ είναι το εύρος της καμπύλης της μέσης ισχύος ανάμεσα σε δύο τιμές της κυκλικής συχνότητας ω_1 και ω_2 . Αυτές οι συχνότητες ονομάζονται κυκλικές συχνότητες ημίσειας ισχύος διότι αντιστοιχούν σε κυκλικές συχνότητες όπου η μέση ισχύς του κυκλώματος είναι ίση με το μισό της μέγιστης.



Σχήμα 3.4: Γραφική παράσταση της μέσης ισχύος συναρτήσει της κυκλικής συχνότητας της διεγείρουσας τάσης [34].

Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.5) είναι καταγεγραμμένα η μεταβολή της ισχύος εξόδου ενός συντονισμένου κυκλώματος ανάλογα με το συντελεστή ποιότητας και η διαφορά φάσης ρεύματος και τάσης εισόδου και το μέτρο της αντίδρασης X ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας.



Σχήμα 3.5: (α) κανονικοποιημένη ισχύς εξόδου συναρτήσει της συχνότητας για διάφορους συντελεστές ποιότητας και (β) διαφορά φάσης τάσης – ρεύματος εισόδου και τιμή σύνθετης αντίστασης συναρτήσει της συχνότητας [6].

Μία ακόμα παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο και επηρεάζει τον συντελεστή ποιότητας είναι η εσωτερική αντίσταση, ESR (equivalent series resistance), των στοιχείων.

Για παράδειγμα, τα πηνία σχηματίζονται με την χρήση αγωγών χαλκού. Οι αγωγοί αυτοί παρουσιάζουν κάποια αντίσταση συγκεκριμένης τιμής, η οποία εξαρτάται από το μήκος τους και την διατομή τους. Σε υψηλότερες συχνότητες, η αντίσταση του αγωγού τείνει να επηρεάζεται, λόγω δύο φαινομένων που αυξάνουν την αντίστασή του. Τα φαινόμενα αυτά είναι το Επιδερμικό Φαινόμενο (Skin Effect) και το Φαινόμενο Γειτνίασης (Proximity Effect). Και τα δύο αυτά φαινόμενα οφείλονται στα επαγόμενα δινορρέυματα, τα οποία προκαλούν ανακατανομή της πυκνότητας της ηλεκτρικής ροής μέσα σε έναν αγωγό.

Κατά το επιδερμικό φαινόμενο, το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό, τείνει να συγκεντρώνεται μόνο σε μία εξωτερική στρώση του (επιδερμίδα), αντί να τον διαρρέει ομοιόμορφα σε ολόκληρη τη διατομή του. Το γεγονός αυτό μειώνει την ενεργό διατομή του αγωγού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ωμική του αντίσταση.

Το φαινόμενο γειτνίασης προκαλείται όταν δύο γειτονικοί αγωγοί διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Τα παραγόμενα από τους δύο αγωγούς μαγνητικά πεδία προκαλούν δυνάμεις αντίθετες μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το ρεύμα να περιορίζεται σε μικρότερες περιοχές. Έτσι, και σε αυτή την περίπτωση η ενεργός διατομή του αγωγού μειώνεται, αυξάνοντας την ωμική του αντίσταση.

Συνοπτικά, η συνολική αντίσταση ενός πηνίου μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$r_L = r_{DC} + r_{Skin} + r_{Proximity} \quad (3.12)$$

Όπου r_{DC} είναι η συνολική DC αντίσταση των αγωγών του πηνίου, r_{Skin} είναι η αντίσταση των αγωγών του πηνίου λόγω επιδερμικού φαινομένου και $r_{Proximity}$ είναι η αντίσταση των αγωγών του πηνίου λόγω φαινομένου γειτνίασης. Η συνολική αυτή αντίσταση καλείται ESR και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας όπου τείνει να αυξάνεται.

Συνεπώς είναι επιθυμητό να γίνεται χρήση πηνίων με πολύ χαμηλή αντίσταση, ούτως ώστε οι απώλειες να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Λαμβάνοντας υπ' όψη τα παραπάνω, νέοι τύποι αγωγών αναπτύχθηκαν για τον περιορισμό αυτών των φαινομένων. Ένας τέτοιος αγωγός είναι το καλώδιο Litz.

Το καλώδιο Litz κατασκευάζεται από πολλούς και λεπτούς αγωγούς, συνεστραμμένους ή πλεγμένους μεταξύ τους, σε δεσμίδες κλώνων ή σε κάποιο άλλο μοτίβο ανάλογα την εφαρμογή τους. Το βασικό τους χαρακτηριστικό και η διαφορά από οποιοδήποτε λεπτόκλωνο αγωγό, είναι πως κάθε κλώνος του καλωδίου είναι ηλεκτρικά μονωμένος με μια μονωτική επικάλυψη που εμποδίζει την ηλεκτρική επαφή με γειτονικούς κλώνους. Επίσης, ανάλογα την πλέξη, κάθε κλώνος αλλάζει συνεχώς θέσεις κατά μήκος του αγωγού, αντιμετωπίζοντας έτσι το επιδερμικό φαινόμενο. Η χρήση του καλωδίου Litz αποτελεί μία άριστη λύση σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας, και όταν απαιτείται υψηλός συντελεστής ποιότητας πηνίων [35].

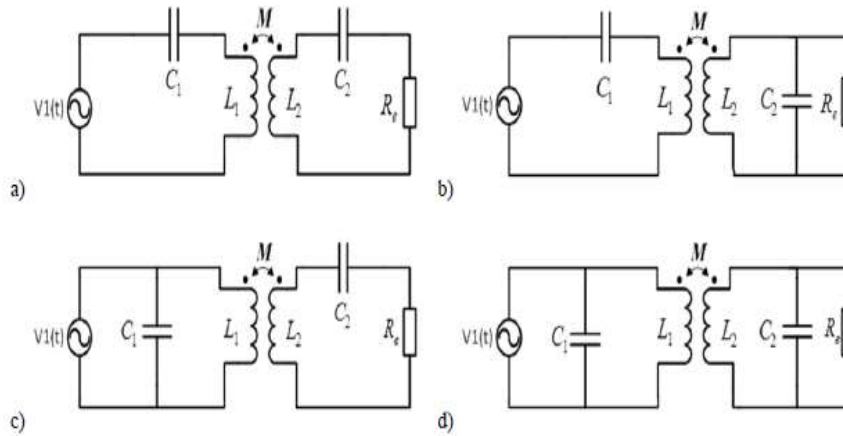
Τοπολογίες συντονισμού:

Για την επίτευξη συνθηκών συντονισμού σε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος, απαιτούνται πυκνωτές συντονισμού οι οποίοι θα αντισταθμίζουν την άεργο ισχύ σε μία δεδομένη συχνότητα. Η αντιστάθμιση σχετίζεται με μία δεδομένη αντίδραση πηνίου και πραγματοποιείται συνδέοντας έναν πυκνωτή (σε σειρά ή παράλληλα ανάλογα την τοπολογία) και επιλέγοντας κατάλληλα την τιμή του έτσι ώστε να ακυρώνει την αντίστοιχη τιμή της αντίδρασης πηνίου στην δεδομένη συχνότητα. Η συχνότητα συντονισμού του συνολικού συστήματος ορίζεται ως η συχνότητα κατά την οποία το φανταστικό μέρος της σχέσης (3.13) μηδενίζεται.

$$S = P + jQ \quad (3.13)$$

Όπου S η φαινόμενη ισχύς (VA), P η ενεργός ισχύς (W) και Q η άεργος ισχύς (VAr).

Υπάρχουν τέσσερις επικρατούσες τοπολογίες κυκλωμάτων συντονισμού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα IPTS και ονομάζονται ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των πυκνωτών σε κάθε πλευρά (σε σειρά (Σ) ή παράλληλα (Π)): ΣΣ (SS), ΣΠ (SP), ΠΣ (PS) και ΠΠ (PP). Η χρήση πυκνωτών συντονισμού στο δευτερεύον συμβάλλει στην αύξηση της απορρόφησης ισχύος, καθότι αντισταθμίζει τις επαγωγές σκέδασης. Από την άλλη πλευρά, η χρήση τους στο πρωτεύον έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της απαιτούμενης ονομαστικής ισχύος των μετατροπέων, λόγω της βελτίωσης του συντελεστή ισχύος. Κάθε τοπολογία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα [36] και η χρήση της κατάλληλης τοπολογίας επαφίεται στον σχεδιαστή, ανάλογα με τις απαιτήσεις και την εφαρμογή.



Σχήμα 3.6: Τοπολογίες συντονισμού, α) ΣΣ, β) ΣΠ, γ) ΠΣ, δ) ΠΠ [5].

Επιλογή τοπολογίας αντιστάθμισης:

Οι τοπολογίες αντιστάθμισης που είναι πιο δημοφιλείς μεταξύ των τεσσάρων, είναι οι ΣΣ και ΣΠ. Η χρήση πυκνωτή συντονισμού συνδεδεμένου σε σειρά στο πρωτεύον, προτιμάται διότι η τιμή του είναι ανεξάρτητη από την αντίσταση φορτίου, γεγονός ιδιαίτερα επιθυμητό σε εφαρμογές μεταβαλλόμενης αντίστασης φορτίου [37], όπως η φόρτιση κάποιων συσκευής.

Η εν σειρά αντιστάθμιση, χαρακτηρίζεται από λειτουργία του συντονισμένου κυκλώματος σε υψηλότερη τάση και χαμηλότερο ρεύμα, άρα και καλύτερη απόδοση σε σχέση με την παράλληλη. Η παράλληλη από την άλλη μεριά, λόγω των μεγαλύτερων ρευμάτων που διαρρέουν τον βρόχο συντονισμού, χαρακτηρίζεται μεν από καλύτερη μεταφορά ισχύος σε χαμηλότερους συντελεστές σύζευξης, αλλά παρουσιάζει μείωση στην απόδοση [37].

Για τους παραπάνω λόγους, αλλά και για το λόγο ότι παρουσιάζει χαρακτηριστικά πηγής τάσης [38], η τοπολογία αντιστάθμισης ΣΣ προτιμάται και χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης.

Φαινόμενο διακλάδωσης

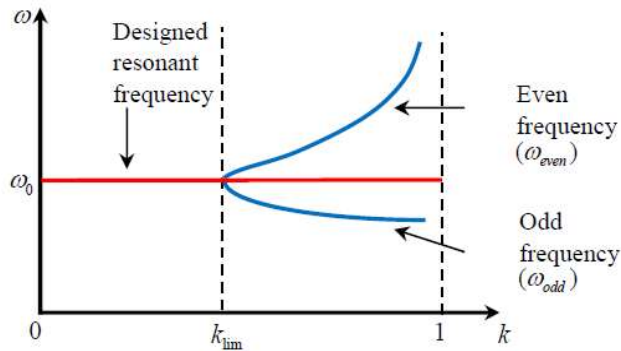
Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση τοπολογιών αντιστάθμισης στο πρωτεύον και στο δευτερεύον ενός συστήματος Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος, βελτιώνει σημαντικά την δυνατότητα μεταφοράς ισχύος. Ταυτόχρονα όμως προσδίδει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στον καθορισμό των συνθηκών συντονισμού, οι οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την σύζευξη των δύο κυκλωμάτων συντονισμού στις δύο πλευρές, που με τη σειρά της επηρεάζει την μορφή της Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου (Z_{in}) του συνολικού συστήματος.

Σε μια τέτοια περίπτωση, η συνάρτηση της Σύνθετης Αντίστασης Εισόδου σε σχέση με την συχνότητα, $Z_{in}(\omega)$, χαρακτηρίζεται από μη γραμμικότητα και ενδέχεται να έχει περισσότερες από μία λύσεις και σημεία ισορροπίας, που εξαρτώνται από όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος, όπως οι τιμές των αυτεπαγωγών και των πυκνωτών, η αντίσταση του φορτίου και κυρίως ο συντελεστής σύζευξης.

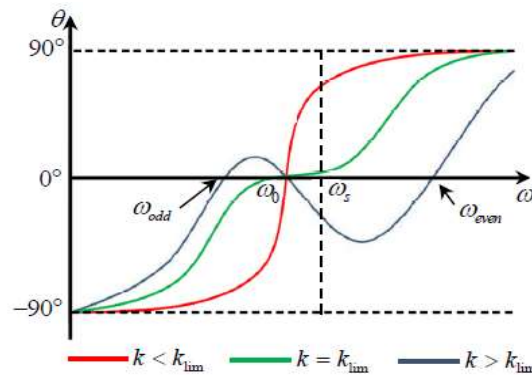
Συνεπώς, τα σημεία ισορροπίας της σύνθετης αντίστασης εισόδου είναι κυμαινόμενα, ανάλογα την περίπτωση, με αποτέλεσμα την ύπαρξη έως και τριών συχνοτήτων

συντονισμού του κυκλώματος, όσο τα πηνία πλησιάζουν μεταξύ τους. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως Διακλάδωση (Bifurcation) ή Απόσχιση Συχνότητας (Frequency Splitting) [39]–[41].

Οι δύο νέες συχνότητες συντονισμού πέραν της προκαθορισμένης κεντρικής συχνότητας συντονισμού ω_0 , επηρεάζονται από τον συντελεστή σύζευξης. Πιο συγκεκριμένα, όταν η σύζευξη δεν είναι ισχυρή, οι δύο συχνότητες συντονισμού είναι παραπλήσιες με την ω_0 . Όταν όμως ο συντελεστής σύζευξης ξεπεράσει κάποια οριακή τιμή, οι δύο συχνότητες συντονισμού εμφανίζονται σε διαφορετικές τιμές από την ω_0 , εκατέρωθέν της. Επιπλέον, όσο αυξάνεται ο συντελεστής σύζευξης, τόσο οι τιμές αυτές μεταβάλλονται, δημιουργώντας μία κυματομορφή «τρίαινας», όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7 [42].

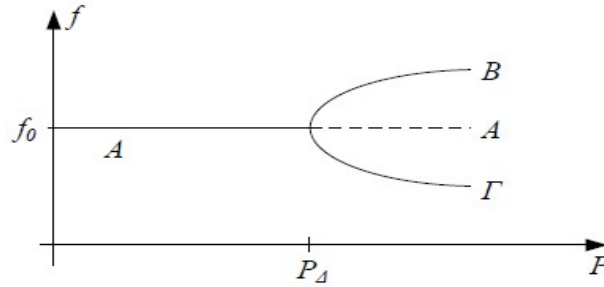


Σχήμα 3.7: Φαινόμενο διακλάδωσης - Απόσχιση συχνότητας συντονισμού [42].



Σχήμα 3.8: Μεταβολές της φάσης της σύνθετης αντίστασης εισόδου συναρτήσει του συντελεστή σύζευξης – Επίδραση φαινόμενου διακλάδωσης [42].

Η μη μοναδικότητα των συχνοτήτων συντονισμού οδηγεί με τη σειρά της σε μια μη μονότονη καμπύλη ισχύος εξόδου – συχνότητας λειτουργίας. Όταν η ισχύς φτάσει το σημείο διακλάδωσης, P_Δ , το μέχρι τότε ευσταθές σημείο ισορροπίας Α γίνεται ασταθές και γύρω από αυτό εμφανίζονται δυο νέα σημεία ισορροπίας Β και Γ, σχηματίζοντας μία μορφή τρίαινας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9:



Σχήμα 3.9: Φαινόμενο διακλάδωσης τρίαρινας [6]

Το φαινόμενο της διακλάδωσης εμποδίζει την ευσταθή λειτουργία των βασικών τεχνικών ελέγχου της συχνότητας λειτουργίας των IPTSs, που πραγματεύονται την μεταβολή της έως ότου επιτευχθεί μηδενισμός της φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος του πρωτεύοντος, δηλαδή μηδενισμό του φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης εισόδου του συστήματος.

Με την διακλάδωση εμφανίζονται παραπάνω από μία συχνότητες μηδενισμού της φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος πρωτεύοντος. Συνεπώς, σε τιμές παραμέτρων μεγαλύτερες του σημείου διακλάδωσης, το πρότερο σημείο ισορροπίας του συστήματος γίνεται ασταθές και ο εκάστοτε ελεγκτής αναγκάζεται να μεταβεί σε κάποιο από τα νέα σημεία ισορροπίας, με αποτέλεσμα να υπάρξει αστάθεια και αδυναμία επαρκούς ελέγχου του συστήματος.

Τέλος, ανάλογα την συμμετρία του κυκλώματος (λόγω ύπαρξης φορτίου στην πλευρά του δευτερεύοντος, διαφορετική τοπολογία αντιστάθμισης σε πρωτεύον και δευτερεύον), οι συχνότητες συντονισμού πρωτεύοντος (ω_1) και δευτερεύοντος (ω_2) ενδέχεται να διαφέρουν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η διακλάδωση τρίαρινας να λαμβάνει μία ατελή, μη συμμετρική μορφή.

- **Ανορθωτική διάταξη εξόδου**

Η τάση που λαμβάνεται στο δευτερεύον μετά τη σύζευξη είναι εναλλασσόμενη. Για αυτό το λόγο, αμέσως μετά την βαθμίδα συντονισμού, χρησιμοποιείται μια ανορθωτική διάταξη (συνήθως πλήρους γέφυρας) έτσι ώστε να μετατραπεί σε συνεχή, χρησιμοποιώντας παράλληλα έναν πυκνωτή ως φίλτρο εξόδου για σταθεροποίηση της τιμής της τάσης και μείωση της διακύμανσης.

Επίσης, συνηθίζεται η χρήση μετατροπέων συνεχούς σε συνεχή τάση (DC/DC Converters), για τον έλεγχο της παρεχόμενης τάσης και ισχύος στην αντίσταση φορτίου.

- **Αντίσταση φορτίου**

Η ισοδύναμη αντίσταση μιας μπαταρίας, R_L , όπως αυτή ανακλάται στην AC πλευρά ενός ανορθωτή πλήρους γέφυρας με πυκνωτή εξομάλυνσης δίνεται από τη σχέση [43]:

$$R_L = \frac{8}{\pi^2} \cdot R_{L-DC} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad (3.14)$$

και είναι ανάλογη του λόγου της τάσης της μπαταρίας προς το ρεύμα φόρτισης.

3.2: Αντιστροφέας υψηλής διακοπτικής συχνότητας

Οι αντιστροφείς είναι ένα είδος μετατροπέων, οι οποίοι έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν μία πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη, μεταβλητής συχνότητας και μεταβλητής RMS τιμής. Στα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος, είναι μία απαραίτητη βαθμίδα που αναλαμβάνει τον ρόλο της μετατροπής της τάσης εισόδου στην κατάλληλη συχνότητα προκειμένου να τροφοδοτηθεί το τύλιγμα του πρωτεύοντος.

Στην βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα τοπολογιών αντιστροφέων για εφαρμογή σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων [44]. Οι τοπολογίες που χρησιμοποιούνται συχνότερα, λόγω της μεγάλης απόδοσής τους και της δυνατότητας λειτουργίας τους σε υψηλές συχνότητες (όπως απαιτούν και εφαρμογές ασύρματης μεταφοράς ισχύος) είναι αυτές των συντονιζόμενων αντιστροφέων, δηλαδή αντιστροφέων που κάνουν χρήση παθητικών συντονιζόμενων δικτύων.

Οι συντονιζόμενοι αντιστροφείς αποτελούν διακοπτικά κυκλώματα, τα οποία με την κατάλληλη επιλογή παθητικών στοιχείων, διακοπτικής συχνότητας και εύρους λειτουργίας παλμών, μπορούν να επιτύχουν μεταβάσεις των διακοπών σε κατάσταση αγωγής υπό μηδενική τάση ή ρεύμα (Zero Voltage Switching, Zero Current Switching – ZVS, ZCS) και γι' αυτό προτιμώνται σε πολλές εφαρμογές. Οι συντονιζόμενοι αντιστροφείς έχουν θεωρητική απόδοση 100 %, κάτι όμως που πρακτικά είναι ανέφικτο λόγω μη ιδανικότητας των διακοπών και λόγω ωμικών απωλειών. Ένα ρεαλιστικά τυπικό εύρος απόδοσης αυτών είναι μεταξύ 85-95 %. Οι τοπολογίες συντονιζόμενων αντιστροφέων που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι οι ενισχυτές κλάσης E, κλάσης D και κλάσης F [44]. Ωστόσο, τα παραπάνω κυκλώματα είναι αρκετά ευαίσθητα σε μεταβολές των παραμέτρων του συστήματος και επιτυγχάνουν μέγιστη απόδοση μόνο σε προκαθορισμένες συνθήκες, όπως επίσης παρουσιάζουν δυσκολία στον έλεγχό τους, λόγω της πολυπλοκότητας που προσδίδουν τα παθητικά στοιχεία στην ολική τους συμπεριφορά

Από την άλλη μεριά, ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας, παρ' ότι αποτελεί μία τοπολογία ευρέως χρησιμοποιούμενη σε ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών συστημάτων επαγωγικής φόρτισης, δεν προτιμάται στον ίδιο βαθμό σε τέτοιες εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης χαμηλής ισχύος.

Αυτό συμβαίνει λόγω των διακοπτικών απωλειών που προκύπτουν σε λειτουργία σε υψηλές συχνότητες, καθώς η τοπολογία του αποτελείται από τέσσερα διακοπτικά στοιχεία, σε αντίθεση με των συντονιζόμενων αντιστροφέων που αποτελούνται από ένα (Κλάσης E και κλάσης F) ή δύο (Κλάσης D).

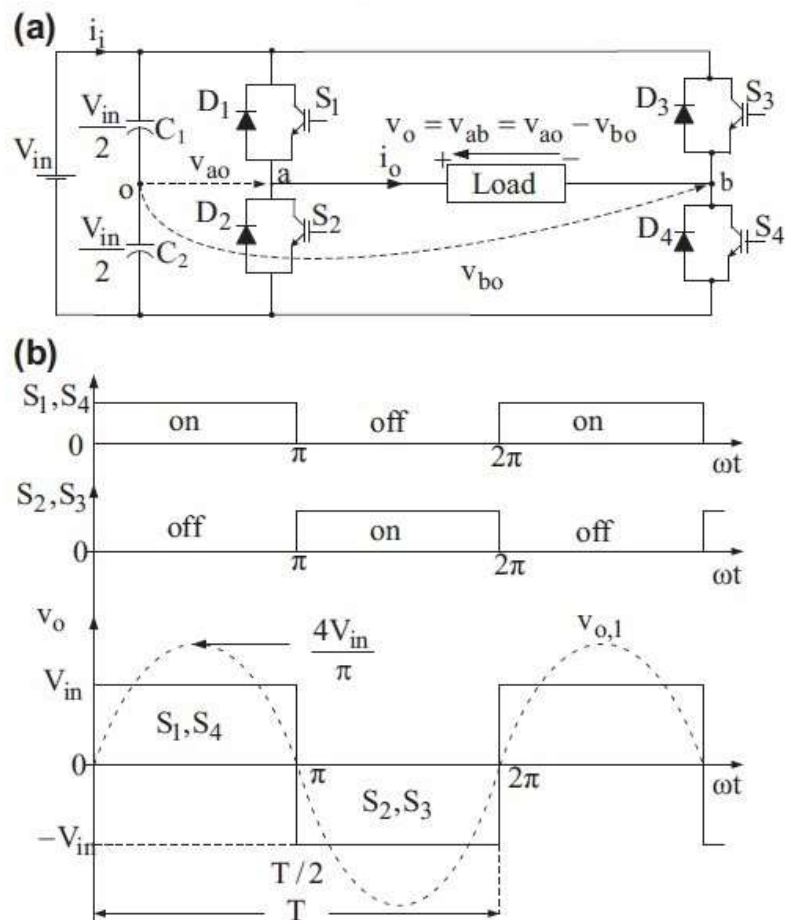
Παρ' όλα αυτά, με την ανάπτυξη νέων υλικών ημιαγωγών, όπως το Νιτρίδιο του Γαλλίου (GaN) και το Καρβίδιο του Πυριτίου (SiC), τα οποία έχουν πολύ χαμηλές απώλειες ακόμα και σε εφαρμογές πολύ υψηλής συχνότητας, δίνεται πλέον η δυνατότητα επανεξέτασης της χρήσης του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας σε τέτοιες εφαρμογές.

Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία μελετώνται και συγκρίνονται σε ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων και περιπτώσεων, ο μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας και ο ενισχυτής κλάσης E.

3.2.1: Αντιστροφέας Πλήρους Γέφυρας

Για την μετατροπή της συνεχούς σε εναλλασσόμενη τάση μεταβλητής συχνότητας προς τροφοδότηση του πρωτεύοντος, επιλέγεται συχνά η χρήση μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, τροφοδοτούμενου από μια πηγή συνεχούς τάσης.

Ο αντιστροφέας παράγει στην έξοδό του προς το πρωτεύον εναλλασσόμενη τάση τετραγωνικής μορφής -δύο επιπέδων- και μεταβλητής συχνότητας, η οποία γενικά καθορίζεται από την μονάδα ελέγχου (Σχήμα 3.10). Οι διακόπτες του κάθε σκέλους δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να άγουν ταυτόχρονα για να μην υπάρξει βραχυκύκλωση της πηγής τάσης και γι' αυτό το σκοπό συνηθίζεται να εισάγεται ένας νεκρός χρόνος (dead-time) μεταξύ των παλμών οδήγησης του κάθε ζεύγους διακοπών. Επίσης, δίοδοι συνδέονται αντιπαράλληλα με τον κάθε διακόπτη για τη διέλευση του ρεύματος σε περίπτωση οδήγησης επαγωγικού φορτίου.

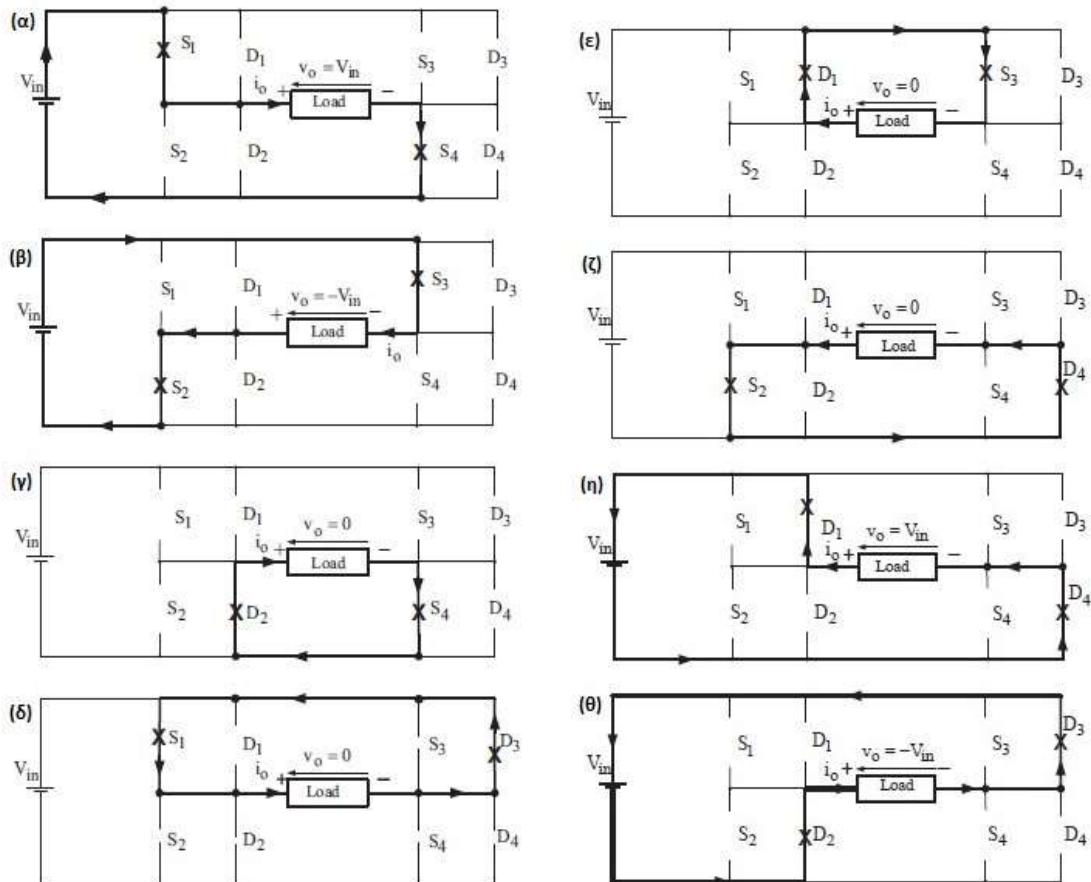


Σχήμα 3.10: α) Κύκλωμα ισχύος αντιστροφέα πλήρους γέφυρας β) Παλμοί διέγερσης διακοπών και ιδανικές κυματομορφές τάσης εξόδου δύο επιπέδων και της θεμελιώδους συνιστώσας της [45].

Αναλύοντας το αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, προκύπτουν έξι καταστάσεις λειτουργίας αυτού ανάλογα με το ποια στοιχεία του βρίσκονται σε αγωγή και είναι οι ακόλουθες [46]:

- i. Αγωγή των διακοπών S1 και S4, κατά την οποία εφαρμόζεται στο φορτίο τάση ίση με την τάση τροφοδοσίας (V_{in}) και το διαρρέει ρεύμα θετικής φοράς (Σχ.3.11 (α)).

- ii. Αγωγή των διακοπών S2 και S3, κατά την οποία εφαρμόζεται στο φορτίο τάση ίση με την τάση τροφοδοσίας και αντίθετης πολικότητας ($-V_{in}$) και το διαρρέει ρεύμα αρνητικής φοράς (Σχ.3.11 (β)).
- iii. Αγωγή της διόδου ελευθέρας διέλευσης D2 και του διακόπτη S4 ή αγωγή του διακόπτη S1 και της διόδου ελευθέρας διέλευσης D1. Σε αυτή την κατάσταση, η τάση που εφαρμόζεται στο φορτίο είναι μηδενική και το ρεύμα που το διαρρέει είναι θετικής φοράς (Σχ.3.11 (γ) και (δ)).
- iv. Αγωγή της διόδου ελευθέρας διέλευσης D1 και του διακόπτη S2 ή αγωγή του διακόπτη S2 και της διόδου ελευθέρας διέλευσης D4. Σε αυτή την κατάσταση, η τάση που εφαρμόζεται στο φορτίο είναι μηδενική και το ρεύμα που το διαρρέει είναι αρνητικής φοράς (Σχ.3.11 (ε) και (ζ)).
- v. Αγωγή των διόδων ελευθέρας διέλευσης D1 και D4, κατά την οποία εφαρμόζεται στο φορτίο τάση ίση με την τάση τροφοδοσίας (V_{in}) και το διαρρέει ρεύμα αρνητικής φοράς (Σχ.3.11 (η)).
- vi. Αγωγή των διόδων ελευθέρας διέλευσης D1 και D4, κατά την οποία εφαρμόζεται στο φορτίο τάση ίση με την τάση τροφοδοσίας και αντίθετης πολικότητας ($-V_{in}$) και το διαρρέει ρεύμα θετικής φοράς (Σχ.3.11 (θ)).



Σχήμα 3.11: Ενεργοποιημένες διαδρομές αντιστροφέα πλήρους γέφυρας ανάλογα με την παραγόμενη τάση εξόδου και κατεύθυνση του ρεύματος εξόδου [46].

(α): $v_o > 0$ και $i_o > 0$, (β): $v_o < 0$ και $i_o < 0$ (γ): $v_o = 0$ και $i_o > 0$, (δ): $v_o = 0$ και $i_o < 0$
(ε): $v_o = 0$ και $i_o < 0$, (ζ): $v_o < 0$ και $i_o > 0$ (η): $v_o > 0$ και $i_o < 0$ (θ): $v_o < 0$ και $i_o > 0$

Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας προσδιορίζεται από το πλάτος της συνεχούς τάσης εισόδου και από τον βαθμό χρησιμοποίησης των διακοπτικών στοιχείων. Συνεπώς, ρυθμίζοντας αυτές τις παραμέτρους είναι δυνατός ο έλεγχος της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

Το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου είναι:

$$\hat{V}_{inv,1} = \frac{4V_{in}}{\pi} \sin(\pi D) \quad (3.15)$$

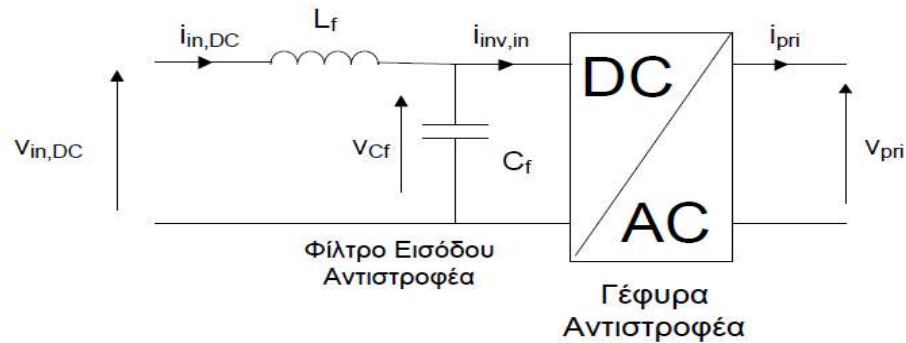
όπου D ο βαθμός χρησιμοποίησης των διακοπών, και V_{in} η τάση τροφοδοσίας. Συνεπώς, για $D=0.5$, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας είναι:

$$\hat{V}_{inv,1} = \frac{4V_{in}}{\pi} \quad (3.16)$$

Φίλτρο εισόδου αντιστροφέα:

Στην είσοδο του αντιστροφέα, μετά τη βαθμίδα του ανορθωτή ή της πηγής σταθερής τάσης, συνήθως τοποθετείται ένα παθητικό φίλτρο LC, το οποίο είναι απαραίτητο για την εξομάλυνση του ρεύματος εισόδου και τη εξάλειψη των αρμονικών του, οι οποίες επιβαρύνουν την τροφοδοσία αλλά και την συμπεριφορά του όλου συστήματος.

Για τη σχεδίαση του φίλτρου ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία [46]:



Σχήμα 3.12: Τοποθέτηση φίλτρου μεταξύ ανορθωτή και αντιστροφέα [3].

Κύριος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του πλάτους της κυρίαρχης αρμονικής του ρεύματος εισόδου του αντιστροφέα, δηλαδή της 2ης αρμονικής.

Η σχέση που συνδέει την n-οστή αρμονική συνιστώσα του ρεύματος της πηγής εισόδου του αντιστροφέα $i_{in,n}$, με την αντίστοιχη συνιστώσα του ρεύματος εισόδου του αντιστροφέα $i_{inv,in,n}$ είναι:

$$i_{in,n} = \frac{1}{\frac{n^2 X_{L_f}}{X_{C_f}} - 1} i_{inv,in,n} \quad (3.17)$$

Αντίστοιχα, η σχέση που συνδέει την n-οστή αρμονική συνιστώσα της τάσης του πυκνωτή του φίλτρου εισόδου του αντιστροφέα $U_{C,n}$, με την αντίστοιχη συνιστώσα του ρεύματος εισόδου του αντιστροφέα $i_{inv,in,n}$ είναι:

$$U_{C,n} = \frac{n X_{L_f} X_{C_f}}{n^2 X_{L_f} - X_{C_f}} i_{inv,in,n} \quad (3.18)$$

Όπου:

$$X_{L_f} = 2\pi f_o L_f \quad (3.19)$$

και

$$X_{C_f} = \frac{1}{2\pi f_o C_f} \quad (3.20)$$

Από τις δυο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι προκειμένου να μειωθεί κατά το δυνατόν το πλάτος της 2ης αρμονικής του ρεύματος της πηγής εισόδου και το πλάτος της δεύτερης αρμονικής της τάσης στον πυκνωτή πρέπει ιδανικά να ισχύουν:

$$\frac{1}{\frac{2^2 X_{L_f}}{X_{C_f}} - 1} \rightarrow 0 \text{ και ταυτόχρονα } \frac{2 X_{L_f} X_{C_f}}{4^2 X_{L_f} - X_{C_f}} \rightarrow 0 \quad (3.21)$$

Δηλαδή:

$$X_{L_f} \gg X_{C_f} \rightarrow 2\pi f_o L_f \gg \frac{1}{2\pi f_o C_f} \quad (3.22)$$

Η συνθήκη αυτή θεωρητικά έχει άπειρους συνδυασμούς L_f και C_f , αλλά στην πράξη η επιλογή γίνεται έτσι ώστε το L_f να έχει μικρή τιμή για να μειώνονται οι ωμικές απώλειες στο τύλιγμα του πηνίου.

Έτσι επιλέγονται $L_f = 100\mu H$ και $C_f = 1\mu F$.

Αξιολογώντας τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, στα θετικά του στοιχεία συγκαταλέγονται:

- Η μικρή του πολυπλοκότητα – Ουσιαστικά αποτελείται από τέσσερα διακοπτικά στοιχεία.
- Η ελεγχιμότητά του, καθώς υπάρχουν και εφαρμόζονται ποικίλες τεχνικές ελέγχου του (SPWM, Phase shifting, κ.ά.) [45], [47].
- Η σταθερότητα της λειτουργίας του ακόμα και σε μεταβαλλόμενο φορτίο [48].

Όπως είναι όμως λογικό, έχει και κάποια στοιχεία προς αντιμετώπιση, τα οποία είναι:

- Η τάση και το ρεύμα στην έξοδό του είναι τετραγωνικής μορφής, γεγονός που αυξάνει το αρμονικό περιεχόμενο.
- Λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας, ενδέχεται ανά περίπτωση να έχει υψηλές διακοπτικές απώλειες.
- Αποτελείται από τέσσερις διακόπτες, κάτι που μπορεί να αυξήσει το κόστος.

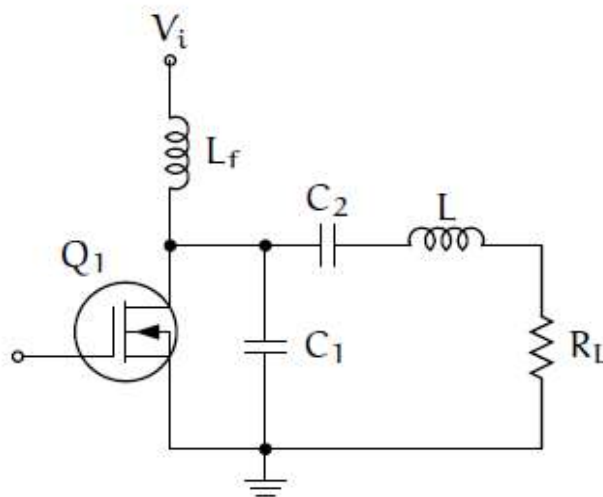
Τα παραπάνω στοιχεία όμως, δεν είναι δύσκολο να αντιμετωπισθούν: Η λειτουργία σε συνθήκες συντονισμού των επαγωγικών φορτιστών καθιστά επαρκή τη λειτουργία του αντιστροφέα με τάση εξόδου τετραγωνικής μορφής. Η τετραγωνική τάση εξόδου να μην αποφεύγεται σε άλλες εφαρμογές λόγω αυξημένου αρμονικού περιεχομένου, στη συγκεκριμένη εφαρμογή όμως, τόσο το ρεύμα πρωτεύοντος όσο και η τάση εξόδου στο δευτερεύον είναι ημιτονοειδούς μορφής εάν το κύκλωμα λειτουργεί σε συντονισμό, ή περιέχουν κάποιες αρμονικές αν λειτουργεί σε άλλη συχνότητα εντός του εύρους στο οποίο υφίσταται ικανοποιητική μεταφορά ισχύος [6].

Παρά την υψηλή συχνότητα λειτουργίας του αντιστροφέα, για τον ίδιο λόγο, οι διακοπτικές απώλειες παραμένουν σε επιτρεπτά επίπεδα, καθότι στη συχνότητα συντονισμού για την πλευρά του πρωτεύοντος, το ρεύμα και η τάση εισόδου είναι συμφασικά με αποτέλεσμα η μετάβαση από το ένα επίπεδο τάσης στο άλλο να γίνεται με μηδενικό ρεύμα. Δεν ισχύει το ίδιο για λειτουργία σε οποιαδήποτε άλλη κοντινή συχνότητα, αλλά και σε αυτή την περίπτωση, η διαφορά φάσης μπορεί να είναι μικρή ανάλογα με την τιμή της αντίστασης φορτίου και του συντελεστή σύζευξης. Επίσης, με την κατάλληλη τεχνική ελέγχου είναι δυνατόν οι διακόπτες να οδηγούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνονται μεταβάσεις σε κατάσταση αγωγής υπό μηδενική τάση ή ρεύμα (Zero Voltage Switching, Zero Current Switching – ZVS, ZCS). Στην μείωση των απωλειών μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά η επιλογή ημιαγωγικού στοιχείου κατάλληλου τύπου, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα (GaN, SiC).

3.2.2: Ενισχυτής κλάσης E

Ο ενισχυτής κλάσης E παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Sokals το 1975 [49]. Αποτελείται από ένα διακόπτη (συνήθως MOSFET) με το ένα του άκρο γειωμένο (την Πηγή του MOSFET) και τέσσερα παθητικά στοιχεία, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13.

Η χαρακτηριστική του ιδιότητα είναι ότι μπορεί να μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής υπό μηδενική τάση (ZVS), αλλά και ότι η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του διακόπτη έχει μηδενική κλίση την στιγμή που μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής (Zero-Voltage Derivative Switching – ZVDS). Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, η αγωγή του διακόπτη είναι πιο «ομαλή» (Soft-Switching) έχοντας έτσι λιγότερες διακοπτικές απώλειες, γεγονός που επιτρέπει αποδοτική λειτουργία ακόμα και σε συχνότητες της τάξης των MHz.



Σχήμα 3.13: Κύκλωμα ενισχυτή κλάσης E [50].

Όπως φαίνεται από το παραπάνω κύκλωμα, τα στοιχεία που απαρτίζουν έναν ενισχυτή κλάσης E, είναι μία πηγή συνεχούς τάσης (V_i), ένα πηνίο με αρκετά μεγάλη τιμή αυτεπαγωγής (L_f), το οποίο διασφαλίζει ότι το ρεύμα που το διαρρέει είναι συνεχές, ένα διακόπτη (συνήθως MOSFET λόγω της δυνατότητας λειτουργίας του σε υψηλές συχνότητες), έναν πυκνωτή που τοποθετείται παράλληλα με το διακόπτη (C_1) και έναν πυκνωτή (C_2) και ένα πηνίο (L) που αποτελούν ένα εν σειρά συντονιζόμενο κύκλωμα. R_L είναι η αντίσταση φορτίου την οποία οδηγεί ο ενισχυτής κλάσης E.

Οι συνθήκες ZVS/ ZVDS που λειτουργεί ένας ενισχυτής κλάσης E αναφέρονται και ως βέλτιστες συνθήκες. Αν υποθεθεί ένα εύρος λειτουργίας $0 \leq \omega t \leq 2\pi$ και ένα εύρος λειτουργίας παλμού (Duty Cycle, D) 50 %, αυτές εκφράζονται ως:

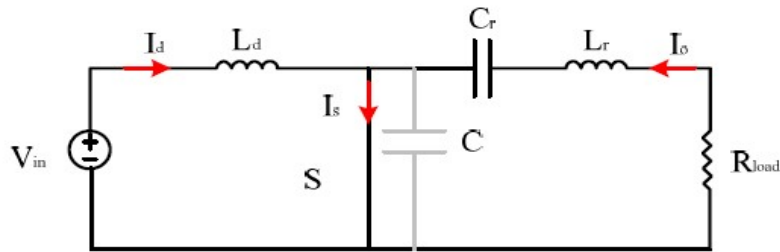
$$U_{DS}(2\pi) = 0$$

$$\frac{dU_{DS}(\omega t)}{d\omega t} \Big|_{\omega t=2\pi} = 0 \quad (3.23)$$

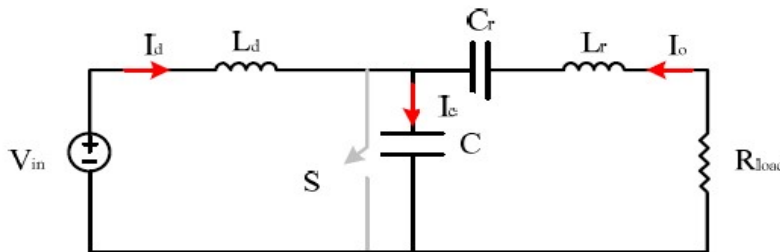
Όπου U_{DS} είναι η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του διακόπτη S.

Αναλύοντας τον Ενισχυτή Κλάσης E, προκύπτουν δύο καταστάσεις λειτουργίας του όταν λειτουργεί βέλτιστα, ανάλογα με την κατάσταση αγωγής του διακόπτη:

- i. Ο διακόπτης βρίσκεται σε αγωγή (Σχήμα 3.14 (a)) και η τάση στα άκρα του είναι μηδενική, ενώ ο παράλληλος πυκνωτής δε διαρρέεται από ρεύμα. Το ρεύμα εξόδου είναι ημιτονοειδούς μορφής λόγω του συντονισμένου κυκλώματος, καθώς οι τιμές του πυκνωτή και της αυτεπαγωγής επιλέγονται έτσι ώστε να προκύπτει υψηλός συντελεστής ποιότητας ($Q > 5$). Η σβέση του διακόπτη πραγματοποιείται με μηδενική τάση. Όταν πραγματοποιηθεί η σβέση, το ρεύμα που διέρρεε τον διακόπτη συνεχίζει την κυκλοφορία του μέσω του παράλληλου με αυτόν πυκνωτή.
- ii. Ο διακόπτης δε βρίσκεται σε αγωγή (Σχήμα 3.14 (b)) και η τάση στα άκρα του από μηδενική αυξάνεται έως μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μηδενίζεται ξανά. Το ρεύμα που διαρρέει τον παράλληλο πυκνωτή αποτελεί το άθροισμα των ρευμάτων εισόδου και εξόδου, και αποκτά αρνητική τιμή όταν η τάση του διακόπτη τείνει να μηδενισθεί, καθώς ισχύει ότι $I_c = CdU_s/dt$ (όπου U_s η τάση στα άκρα του διακόπτη).



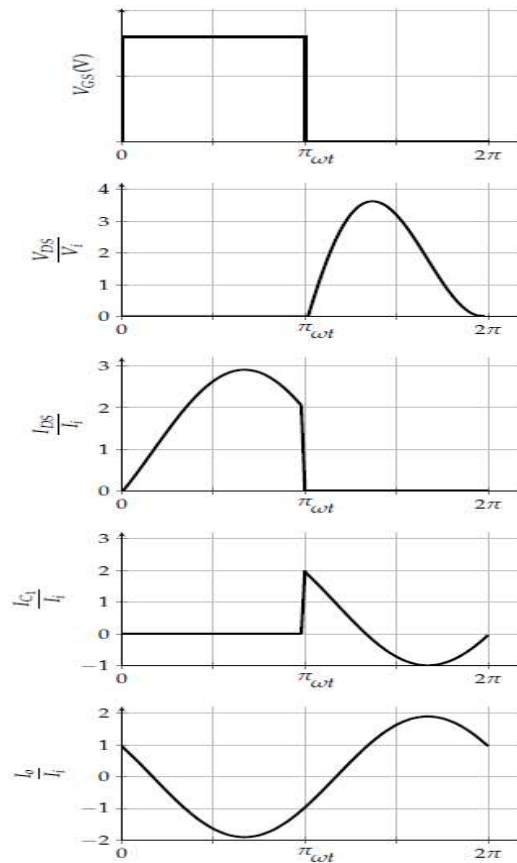
(a)



(b)

Σχήμα 3.14: Καταστάσεις λειτουργίας ενισχυτή κλάσης E: (a) Όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε αγωγή (b) Όταν ο διακόπτης δε βρίσκεται σε αγωγή [51].

Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος των στοιχείων ενός ενισχυτή κλάσης E, υπό λειτουργία σε βέλτιστες συνθήκες. Σε αυτό παρατηρείται ότι η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του διακόπτη μπορεί να είναι έως και τέσσερις φορές μεγαλύτερη της τάσης τροφοδοσίας.



Σχήμα 3.15: Κανονικοποιημένες κυματομορφές τάσης και ρεύματος στοιχείων ενισχυτή κλάσης E υπό λειτουργία σε βέλτιστες συνθήκες [50].

Σχεδίαση Ενισχυτή:

Σε ό,τι αφορά στην σχεδίαση ενός ενισχυτή κλάσης E και την επιλογή των τιμών των παθητικών του στοιχείων ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα, έχουν παρουσιασθεί αρκετοί τρόποι υπολογισμού αυτών στην βιβλιογραφία [49], [52]–[54], αλλά στην πλειοψηφία τους απαρτίζονται από πολύπλοκες μαθηματικές αναλύσεις και ερμηνείες χωρίς να δίνονται κάποιες σαφείς οδηγίες.

Άλλες βιβλιογραφικές πηγές που κάνουν χρήση τέτοιων ενισχυτών κάνουν χρήση διάφορων σετ εξισώσεων και μεθοδολογιών [55]–[62] που προκύπτουν από τις παραπάνω πηγές, αλλά σε αρκετές περιπτώσεις οι εξισώσεις αυτές ενδέχεται να διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Επίσης, υπάρχουν πηγές που κάνουν κυκλωματική ανάλυση και στη συνέχεια υπολογίζουν τις τιμές των στοιχείων με αριθμητικές μεθόδους [50], [63].

Στην παρούσα εργασία, για την μείωση του συνόλου των στοιχείων του συστήματος, το πηνίο και ο πυκνωτής που αποτελούν το συντονιζόμενο κύκλωμα στην τοπολογία του ενισχυτή κλάσης E, υλοποιούνται από το πηνίο πρωτεύοντος της επαγωγικής διάταξης και τον εν σειρά πυκνωτή αντιστάθμισης, αντίστοιχα. Λόγω της δυσκολίας ακριβούς σχεδίασης του ενισχυτή κλάσης E που

παρατηρήθηκε με την χρήση των προαναφερθέντων εξισώσεων, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία δοκιμής και σφάλματος (trial and error):

Έχοντας δεδομένη την τιμή του πηνίου πρωτεύοντος και γνωρίζοντας ένα εύρος τιμών χωρητικότητας πυκνωτών με την χρήση των εξισώσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω, πραγματοποιήθηκε πληθώρα παραμετρικών προσομοιώσεων του μελετώμενου συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος για δεδομένες τιμές συχνότητας, σύζευξης και αντίστασης φορτίου με το λογισμικό LTspice, ούτως ώστε να παρατηρηθεί σε ποια περίπτωση ο ενισχυτής κλάσης E λειτουργεί κοντά σε συνθήκες ZVS.

Για συχνότητα 200 kHz, συντελεστή σύζευξης τιμής 0.39 και αντίσταση φορτίου της τάξης των 10 Ω, οι τιμές των στοιχείων που επιλέχθηκαν είναι:

Πηνίο εισόδου (L_{choke})	Παράλληλος πυκνωτής (C_{shunt})	Εν σειρά πυκνωτής (C_{prim})
94 μH	15 nF	80 nF

Πίνακας 3.1: Επιλεγθείσες τιμές στοιχείων για την υλοποίηση του ενισχυτή κλάσης E.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι ο ενισχυτής κλάσης E, καθώς αποτελείται από δύο κυκλώματα συντονισμού ανάλογα την κατάσταση λειτουργίας του (Πηνίο και πυκνωτής σειράς όταν ο διακόπτης άγει – πηνίο και εν σειρά σύνδεση πυκνωτή σειράς και παράλληλου πυκνωτή όταν ο διακόπτης δεν άγει), το εύρος συχνοτήτων βέλτιστης λειτουργίας του βρίσκεται μεταξύ των συχνοτήτων συντονισμού των δύο σχηματιζόμενων κυκλωμάτων:

$$f_L \leq f_S \leq f_H \quad (3.24)$$

Όπου f_S είναι η επιλεγθείσα συχνότητα λειτουργίας του ενισχυτή, f_L η συχνότητα συντονισμού του συντονισμένου κυκλώματος που σχηματίζεται όταν ο διακόπτης άγει και f_H η συχνότητα συντονισμού του συντονισμένου κυκλώματος που σχηματίζεται όταν ο διακόπτης δεν άγει. Εν προκειμένω, βάσει των τιμών των στοιχείων που επιλέχθηκαν προκύπτει:

$$125 \text{ kHz} \leq f_S \leq 316 \text{ kHz} \quad (3.25)$$

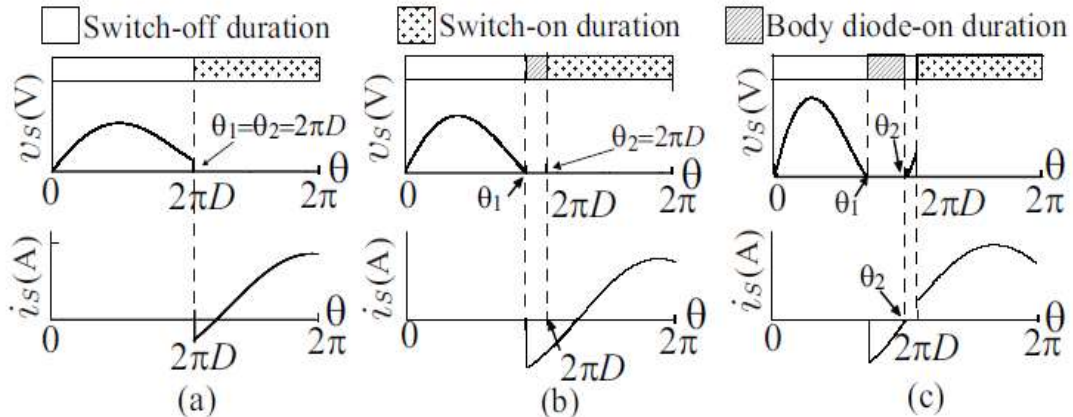
Λειτουργία σε μη-βέλτιστες συνθήκες:

Καθώς ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης είναι ένα δυναμικό σύστημα, στο οποίο είναι δυνατόν οι παράμετροι αυτού (συχνότητα λειτουργίας, σύζευξη, τιμή αντίστασης φορτίου) να αλλάζουν ανά πάσα στιγμή, ενδέχεται ο ενισχυτής κλάσης E να πάψει να λειτουργεί υπό βέλτιστες συνθήκες και να παρουσιασθεί μείωση της απόδοσης του συστήματος. Συνεπώς είναι σημαντικό να ελεγχθεί η συμπεριφορά του ενισχυτή κλάσης E κατά τη λειτουργία του υπό μη-βέλτιστες συνθήκες. Σύμφωνα με το σχήμα 3.16, υπάρχουν τρεις περιπτώσεις κατά τις οποίες μπορεί να συμβεί αυτό [64].

Η πρώτη περίπτωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16(a), όπου η τάση του διακόπτη δεν μηδενίζεται κατά το διάστημα που ο διακόπτης δεν άγει, και είναι θετική τη στιγμή που μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής. Σε αυτή την περίπτωση, οι απώλειες αγωγής παρουσιάζονται την στιγμή που ο διακόπτης μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής.

Η δεύτερη περίπτωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16(b), όπου η τάση του διακόπτη μηδενίζεται πριν τη στιγμή μετάβασης του διακόπτη σε κατάσταση αγωγής. Τότε η αντιπαράλληλη δίοδος που είναι συνδεδεμένη με τον διακόπτη, μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής, για ένα μικρό χρονικό διάστημα, όμως έχει επιτευχθεί ZVS. Παρ' όλα αυτά, καθώς η αντίσταση αγωγής της δίοδου είναι μεγαλύτερη από αυτή του διακόπτη, οι απώλειες αγωγής είναι σημαντικές.

Υπάρχει επίσης μία περίπτωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16(c), κατά την οποία η τάση του διακόπτη μηδενίζεται όπως στην προηγούμενη περίπτωση, και μετά το πέρας της αγωγής της διόδου, αποκτά θετική τιμή μέχρις ότου ο διακόπτης να μεταβεί σε κατάσταση αγωγής. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υφίστανται μόνο απώλειες λόγω αγωγής της διόδου, αλλά και απώλειες λόγω μη μηδενικής τάσης του διακόπτη κατά την μετάβασή του σε κατάσταση αγωγής.



Σχήμα 3.16: Περιπτώσεις λειτουργίας ενισχυτή κλάσης E υπό μη-βέλτιστες συνθήκες. (a): μη μηδενική τάση διακόπτη κατά τη μετάβαση σε αγωγή, (b) μηδενισμός τάσης διακόπτη πριν τη μετάβαση σε αγωγή και αγωγή αντιπαράλληλης διόδου και (c) μηδενισμός τάσης διακόπτη πριν τη μετάβαση σε αγωγή, αγωγή αντιπαράλληλης διόδου και θετική τιμή τάσης διακόπτη κατά την μετάβαση σε αγωγή [63].

Αξιολογώντας τον ενισχυτή κλάσης E, στα θετικά του στοιχεία συγκαταλέγονται τα κάτωθι:

- Περιλαμβάνει ένα μόλις διακοπτικό στοιχείο.
- Λειτουργεί με ZVS, γεγονός που ελαχιστοποιεί τις διακοπτικές απώλειες.
- Έχει δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές συχνότητες (MHz).
- Παρέχει σταθερό ημιτονοειδές ρεύμα, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για οδήγηση πρωτεύοντος πηνίου επαγωγικού συστήματος μεταφοράς ισχύος.

Όμως, αναλύοντάς τον περαιτέρω, παρατηρούνται κάποια μειονεκτήματά του όπως:

- Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχει δυσκολία στη σχεδιάσή του.
- Η ιδιαιτερότητα της σχεδιάσής του, αλλά και η λειτουργία του γενικότερα, τον καθιστούν δύσκολα ελέγξιμο καθώς εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις τιμές των στοιχείων του.
- Λόγω της εξάρτησής του από τις τιμές των στοιχείων του, λειτουργεί βέλτιστα και με την μεγαλύτερη απόδοση σε συγκεκριμένες τιμές αντίστασης φορτίου και συχνότητας, γεγονός που τον καθιστά πολύ ασταθής όταν λειτουργεί σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.
- Η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του διακόπτη είναι πολλές φορές μεγαλύτερη της τάσης τροφοδοσίας, πράγμα που αυξάνει την καταπόνησή του. Επίσης, είναι πολύ πιθανό λόγω λειτουργίας σε μη-βέλτιστες συνθήκες, το ρεύμα που διαρρέει τον διακόπτη να παρουσιάζει αιχμές αρκετά μεγάλης τιμής, οι οποίες μπορούν να του προκαλέσουν βλάβη.
- Το πηνίο στην είσοδο του ενισχυτή, καθώς πρέπει να είναι μεγάλης τιμής ώστε να σταθεροποιεί το ρεύμα που εισέρχεται από την πηγή, προσθέτει σε όγκο στη διάταξη.

Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, για την κατά το δυνατόν καλύτερη απόδοση του ενισχυτή κλάσης E σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός κατάλληλου

κυκλώματος ελέγχου που θα ρυθμίζει τις παραμέτρους του συστήματος με τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται με τον βέλτιστο τρόπο σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Αυτό είναι αρκετά δύσκολο, διότι ιδιαίτερο ρόλο στην επίτευξη ZVS από τον διακόπτη παίζουν τα παθητικά στοιχεία του ενισχυτή, δηλαδή ο παράλληλος με τον διακόπτη πυκνωτής και το συντονιζόμενο δίκτυο LC στην έξοδο του ενισχυτή.

Συνοψίζοντας, ο Ενισχυτής κλάσης E αποτελεί μία πολύ αξιόλογη λύση για την οδήγηση συστήματος επαγωγικής φόρτισης, καθώς δουλεύει σε πολύ υψηλές συχνότητες (όπως απαιτούν τέτοιες εφαρμογές) και με πολύ χαμηλές απώλειες, συνεπώς πολύ καλή απόδοση. Αυτό όμως συμβαίνει μόνο σε περιπτώσεις συγκεκριμένων συνθηκών του συστήματος, με πολύ μικρή ανοχή σε μεταβολή αυτών. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την περιορισμένη του ελεγχσιμότητα, δεν τον καθιστά την ιδανική λύση για χρήση σε τέτοιες εφαρμογές και προβάλλει την ανάγκη για την ύπαρξη ενός κατάλληλου συστήματος ελέγχου που θα εξασφαλίζει όλα τα προτερήματα του ενισχυτή, ακόμα και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας.

3.3: Ανάλυση Συστήματος Επαγωγικής Μεταφοράς Ισχύος με αντιστάθμιση Σειράς – Σειράς (SS)

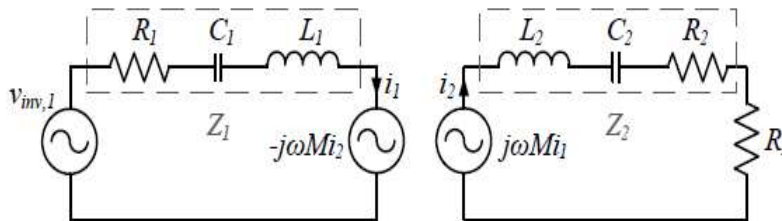
Όπως προαναφέρθηκε, η αντιστάθμιση Σειράς – Σειράς είναι ιδιαίτερα προτιμητέα σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης, λόγω των χαρακτηριστικών πηγής τάσης που διαθέτει.

Όπως κάθε τοπολογία αντιστάθμισης, η συμπεριφορά της εξαρτάται και επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους του συνολικού συστήματος, όπως τις τιμές των αυτεπαγωγών και των πυκνωτών συντονισμού, την τιμή της αντίστασης φορτίου, την τιμή του συντελεστή σύζευξης και της συχνότητας λειτουργίας. Αυτές οι παράμετροι παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση του συστήματος, καθώς καθορίζουν τις συχνότητες συντονισμού, την ισχύ εξόδου, τα ρεύματα και τις τάσεις στα τυλίγματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, και κατ' επέκταση, την συνολική απόδοση.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι κάθε εφαρμογή έχει διαφορετικές απαιτήσεις και ιδιαιτερότητες, γεγονός που καθιστά πολύ δύσκολη την εξαγωγή μιας γενικευμένης προσέγγισης του συστήματος για την επίτευξη της βέλτιστης λειτουργίας του. Συνεπώς, είναι συνήθως προτιμότερη η ξεχωριστή αντιμετώπιση της κάθε περίπτωσης και προσαρμογή των δεδομένων στην εκάστοτε περίπτωση προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία του συστήματος.

Στη συνέχεια γίνεται μία γενική μελέτη της συμπεριφοράς ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με αντιστάθμιση σειράς – σειράς και αναλύονται οι βασικές σχέσεις που το διέπουν.

Για την απλοποίηση της μελέτης, χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα πρώτης αρμονικής συνιστώσας (First Harmonic Approximation, FHA) (Σχήμα 3.17) κατά το οποίο ως πηγή του συστήματος θεωρείται η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και τα ρεύματα και οι τάσεις στα πηνία και στους πυκνωτές αντιστάθμισης θεωρούνται ημιτονοειδή. Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι ικανοποιητικά ακριβής, καθώς λόγω της λειτουργίας του συστήματος σε συνθήκες συντονισμού, το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος μεταφέρεται από την θεμελιώδη συνιστώσα.



Σχήμα 3.17: Ισοδύναμο κύκλωμα πρώτης αρμονικής συνιστώσας IPTS με αντιστάθμιση σειράς – σειράς [6]

Η σύνθετες αντιστάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (3.26)$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + R_L = R_2 + j\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right) + R_L \quad (3.27)$$

όπου με R_1 , R_2 συμβολίζεται η εσωτερική αντίσταση, με C_1 , C_2 η χωρητικότητα και με L_1 , L_2 η αυτεπαγωγή κάθε πλευράς.

Η ανακλώμενη σύνθετη αντίσταση στην πλευρά του πρωτεύοντος, είναι συνάρτηση της συχνότητας και της αμοιβαίας επαγωγής των τυλιγμάτων (κατ' επέκταση και του συντελεστή σύζευξης) και δίνεται από την σχέση:

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_2} \quad (3.28)$$

Η ανακλώμενη σύνθετη αντίσταση αποτελεί ένα μέτρο του ποσοστού του πραγματικού φορτίου, που «βλέπει» η πηγή. Ιδανικά προτιμάται η υψηλή τιμή της Z_r , καθώς έτσι μεταφέρεται μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος με μεγαλύτερη απόδοση λόγω του ότι η απαιτούμενη τάση που θα επάγεται στο δευτερεύον θα είναι χαμηλή. Αυτό επιτυγχάνεται με μείωση της σύνθετης αντίστασης δευτερεύοντος στο ελάχιστο δυνατό, δηλαδή με την λειτουργία σε συνθήκες συντονισμού όπου θα ισχύει ότι $\omega L_2 = \frac{1}{\omega C_2}$.

Θεωρώντας, για λόγους απλότητας, τις εσωτερικές αντιστάσεις μηδενικές και αντικαθιστώντας την σχέση (3.27) στην (3.28), προκύπτει:

$$Z_r = \frac{\omega^4 C_2^2 M^2 R_L}{(\omega^2 C_2 L_2 - 1)^2 + \omega^2 C_2^2 R_L^2} + j \frac{-\omega^3 C_2 M^2 (\omega^2 C_2 L_2 - 1)}{(\omega^2 C_2 L_2 - 1)^2 + \omega^2 C_2^2 R_L^2} \quad (3.29)$$

Και για την συνολική αντίσταση εισόδου του συστήματος ισχύει:

$$Z_{in} = Z_1 + Z_r = Z_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_2} \quad (3.30)$$

Το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον τύλιγμα δίνεται από τη σχέση:

$$i_1 = \frac{V_{inv,1}}{Z_{in}} \quad (3.31)$$

Το ρεύμα που διαρρέει το δευτερεύον τύλιγμα δίνεται από τη σχέση:

$$i_2 = \frac{j\omega M i_1}{Z_2} = \frac{j\omega M}{Z_2} \cdot \frac{V_{inv,1}}{Z_{in}} \quad (3.32)$$

Για την εξαγωγή του κέρδους τάσης ισχύουν τα εξής:

$$V_o = \frac{R_L}{R_L + Z_2} \cdot j\omega M i_1 \Rightarrow i_2 = \frac{j\omega M}{R_L + Z_2} \cdot i_1 \quad (3.33)$$

$$i_1 = \frac{V_{inv,1} + j\omega M i_2}{Z_1} \quad (3.34)$$

$$\frac{i_2}{V_{inv,1}} = \frac{j\omega M}{(R_L + Z_2) \cdot Z_1 + \omega^2 M^2} \quad (3.35)$$

$$\frac{V_o}{V_{inv,1}} = \frac{j\omega M R_L}{(R_L + Z_2) \cdot Z_1 + \omega^2 M^2} \quad (3.36)$$

Η λειτουργία του κυκλώματος σε κατάσταση συντονισμού επιτυγχάνεται όταν η τάση διέγερσης είναι σε φάση με το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον τύλιγμα. Συνεπώς είναι αναγκαία η εύρεση των συχνοτήτων μηδενισμού της διαφοράς φάσης τάσης και ρεύματος πρωτεύοντος, καθώς σε αυτές τις συχνοότητες το σύστημα θα λειτουργεί σε συντονισμό. Η σύνθετη αντίσταση εισόδου του συστήματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{V_{inv,1}}{i_1} = \frac{(R_L + Z_2) \cdot Z_1 + \omega^2 M^2}{(R_L + Z_2)} \quad (3.37)$$

Αναλύοντας σε πραγματικό και φανταστικό μέρος προκύπτει:

$$Re \left\{ \frac{V_{inv,1}}{i_1} \right\} = \frac{R_1 \left[(R_L + R_2)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 \right] + (R_L + R_2) \omega^2 M^2}{(R_L + R_2)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \quad (3.38)$$

$$Im \left\{ \frac{V_{inv,1}}{i_1} \right\} = \frac{\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \left[(R_L + R_2)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 \right] - \omega^2 M^2 \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}{(R_L + R_2)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2} \quad (3.39)$$

Επομένως, για την φάση μεταξύ $V_{inv,1} - i_1$ προκύπτει:

$$\varphi_{V_{inv,1}-i_1} = \tan^{-1} \left(\frac{Im \left\{ \frac{V_{inv,1}}{i_1} \right\}}{Re \left\{ \frac{V_{inv,1}}{i_1} \right\}} \right) \quad (3.40)$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \left[(R_L + R_2)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 \right] - \omega^2 M^2 \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)}{R_1 \left[(R_L + R_2)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 \right] + (R_L + R_2) \omega^2 M^2} \right) \quad (3.41)$$

Ο μηδενισμός της παραπάνω εξίσωσης ισχύει όταν:

$$\varphi_{V_{inv,1}-i_1} = 0 \Rightarrow \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \left[(R_L + R_2)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 \right] - \omega^2 M^2 \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) = 0 \quad (3.42)$$

Η (3.42) μπορεί να έχει από μία μέχρι τρεις πραγματικές λύσεις, οι οποίες είναι άμεσα εξαρτώμενες από τις αυτεπαγωγές και τις χωρητικότητες συντονισμού L και C, από την αμοιβαία επαγωγή, M, και κατ' επέκταση από τον συντελεστή σύζευξης, και από την τιμή του ωμικού φορτίου R_L και των εσωτερικών αντιστάσεων R_1 και R_2 .

Οι παράμετροι που μπορούν να προσδιορισθούν άμεσα κατά την σχεδίαση του συστήματος είναι οι αυτεπαγωγές και οι χωρητικότητες συντονισμού. Μία πρακτική που συνηθίζεται στην βιβλιογραφία, κατά την σχεδίαση των συστημάτων, είναι η εξίσωση των φυσικών συχνοτήτων των συντονισμένων κυκλωμάτων στο πρωτεύον και στο δευτερεύον [39], [65], δηλαδή:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \Rightarrow L_1 C_1 = L_2 C_2 \quad (3.43)$$

όπου, L_1 , L_2 είναι οι αυτεπαγωγές και C_1 , C_2 οι χωρητικότητες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κυκλώματος, αντίστοιχα. Αυτή η επιλογή οδηγεί στην εξάλειψη των φανταστικών μερών των σύνθετων αντιστάσεων Z_1 και Z_2 στην ίδια συχνότητα λειτουργίας.

Θεωρώντας $L_1=L_2=L$ και $C_1=C_2=C$ και αγνοώντας για λόγους απλούστευσης τις εσωτερικές αντιστάσεις R_1 και R_2 , η φάση μεταξύ $V_{inv,1} - i_1$ δίνεται πλέον από τη σχέση:

$$\varphi_{V_{inv,1}-i_1} = \tan^{-1} \left(\frac{Im \left\{ \frac{V_{inv,1}}{i_1} \right\}}{Re \left\{ \frac{V_{inv,1}}{i_1} \right\}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \left[R_L^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 - \omega^2 M^2 \right]}{R_L \omega^2 M^2} \right) \quad (3.44)$$

Η οποία μηδενίζεται για:

$$\varphi_{V_{inv,1-i1}} = 0 \Rightarrow \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \left[R_L^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 - \omega^2 M^2 \right] = 0 \Rightarrow$$

$$\left. \begin{array}{l} \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0 \\ \text{ή} \\ R_L^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 - \omega^2 M^2 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

ή

(3.45)

$$\omega = \sqrt{\frac{2L - CR_L^2 \pm \sqrt{C^2 R_L^2 - 2LC - 4(L^2 - M^2)}}{2C(L^2 - M^2)}}$$

Σε περίπτωση που λαμβάνονταν υπόψιν οι εσωτερικές αντιστάσεις, διαπιστώνεται και από την (3.42) ότι μόνο η εσωτερική αντίσταση στο δευτερεύον παίζει ρόλο στον καθορισμό των συχνοτήτων συντονισμού.

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση Συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος και για τις δύο τοπολογίες αντιστροφών υψηλής διακοπτικής συχνότητας, που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση των λογισμικών Matlab Simulink και Ltspice. Επίσης, γίνεται χρήση της τεχνικής ελέγχου εύρους λειτουργίας παλμών (Assymetrical Duty Cycle control- ADC) για τον έλεγχο της τάσης εξόδου και μελετάται η επίδρασή της στο όλο σύστημα.

Χαρακτηριστικά στοιχεία κυκλώματος:

Καθώς σε ένα εμφυτεύσιμο σύστημα ο διαθέσιμος χώρος είναι υψίστης σημασίας, είναι απαραίτητο τα χρησιμοποιούμενα πηνία στο πρωτεύον και στο δευτερεύον κυρίως, να είναι όσο το δυνατόν μικρότερης διαμέτρου. Γι' αυτό το λόγο, στις περισσότερες εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων, γίνεται χρήση επίπεδων κυκλικών ή σπειροειδών πηνίων.

Στη συγκεκριμένη εργασία, χρησιμοποιούνται πηνία με τιμή αυτεπαγωγής 20 μH και εσωτερικής αντίστασης 0.3 Ω σε κάθε πλευρά, για την καταγραφή μιας πιο ρεαλιστικής συμπεριφοράς του συστήματος. Η επιθυμητή φυσική συχνότητα λειτουργίας του κυκλώματος ορίζεται στα 200 kHz, οπότε βάσει αυτής οι τιμές των πυκνωτών συντονισμού ορίζονται στα 31.7 nF σε κάθε πλευρά. Όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, η τοπολογία αντιστάθμισης που χρησιμοποιείται είναι η Σειρά - Σειρά.

Όπως είναι αναμενόμενο, βέλτιστη λειτουργία του συστήματος επιτυγχάνεται όταν τα δύο πηνία είναι πλήρως συζευγμένα μεταξύ τους, δηλαδή η σχετική τους μετατόπιση στον οριζόντιο άξονα είναι μηδενική. Επίσης, καθώς συνήθως σε τέτοιες εφαρμογές το δευτερεύον πηνίο τοποθετείται ακριβώς κάτω από το δέγμα, η απόστασή των δύο πηνίων στον κατακόρυφο άξονα είναι σχετικά μικρή (3 με 4 χιλιοστά για μια τυπική περίπτωση).

Σχετικά με τις τιμές του συντελεστή σύζευξης των πηνίων, για μία κατακόρυφη απόσταση 3.7 χιλιοστών μεταξύ τους, πειραματικά μέσω της μεθόδου λόγου τάσης [6] προκύπτουν τα εξής:

Κατακόρυφη απόσταση Y(mm)	Οριζόντια απόσταση X(mm)	Συντελεστής Σύζευξης - k
3.7	0	0.6
3.7	5	0.54
3.7	10	0.39
3.7	15	0.25
3.7	20	0.15

Πίνακας 4.1: Πειραματικές τιμές του συντελεστή σύζευξης των δύο πηνίων ανάλογα με την μεταξύ τους απόσταση.

Σχετικά με τις προδιαγραφές ισχύος, η μέγιστη επιθυμητή ισχύς εξόδου είναι 4 W, λαμβάνοντας υπόψιν τυπικές μπαταρίες Ιόντων Λιθίου που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές βιολογικών εμφυτευμάτων με χωρητικότητα 1000 mAh και ονομαστική τάση 3.2 - 4 V.

Η τάση εισόδου του συστήματος επιλέγεται 6 V και μπορεί να προέρχεται είτε από ένα τροφοδοτικό είτε από μία μπαταρία.

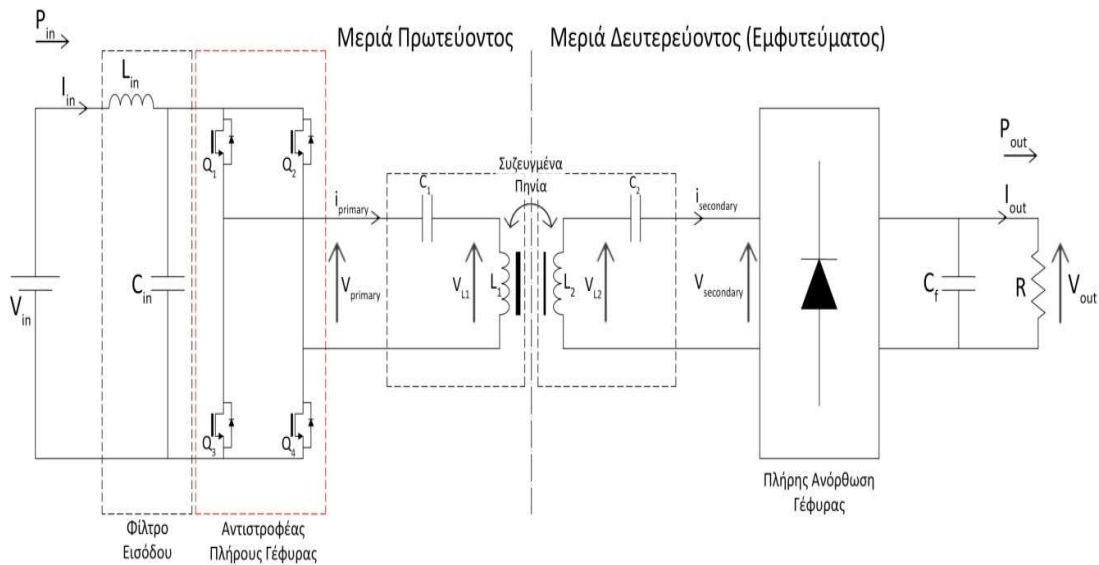
Αρχικά, παρατίθενται αποτελέσματα προσομοιώσεων του συστήματος για συγκεκριμένες τιμές συχνότητας, αντίστασης φορτίου και συντελεστή σύζευξης και αποτυπώνονται οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων του. Στη συνέχεια παρατίθενται αποτελέσματα παραμετρικών προσομοιώσεων του συστήματος για την μελέτη της συμπεριφοράς του σε μεταβολές της

συχνότητας, της αντίστασης φορτίου (καθώς κατά τη διάρκεια της φόρτισης η αντίσταση φορτίου μεταβάλλεται) και του συντελεστή σύζευξης.

Τα παραπάνω, θα αποτελέσουν μέτρο σύγκρισης των δύο προς μελέτη τοπολογιών οδήγησης ως προς την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την απόδοση αυτών σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων.

4.1: Προσομοίωση επαγωγικού φορτιστή με Αντιστροφέα Πλήρους Γέφυρας

Ένα κύκλωμα συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και αντιστάθμιση σειράς - σειράς, όπου αναγράφονται όλα τα βασικά μεγέθη του παρατίθεται στο σχήμα 4.1:



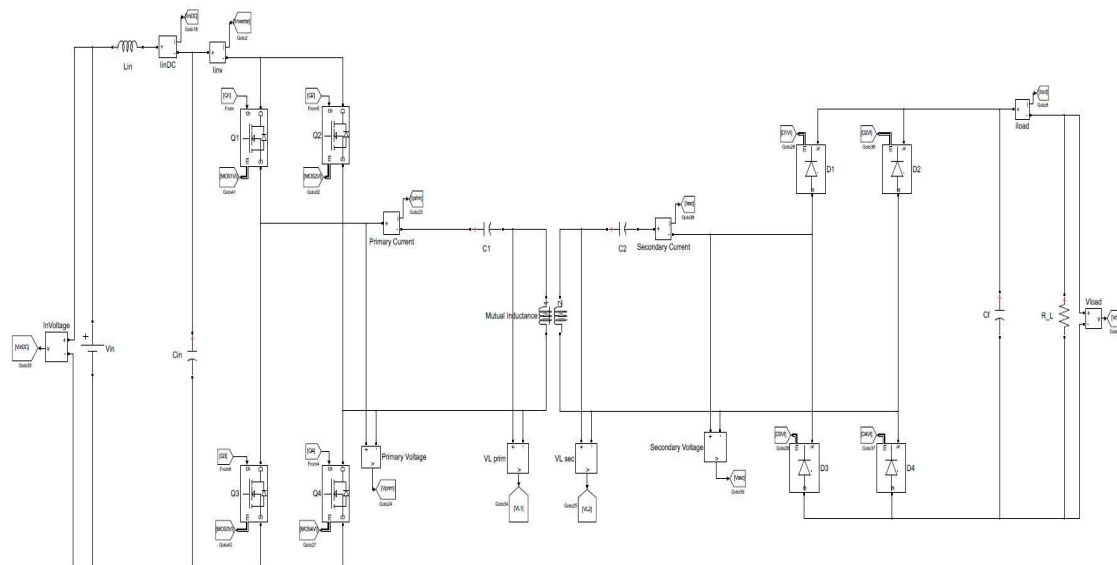
Σχήμα 4.1: Κύκλωμα συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και αντιστάθμιση σειράς – σειράς.

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, και στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το κύκλωμα προσομοίωσης της διάταξης στο Simulink.

Ως ημιαγωγικά στοιχεία για την υλοποίηση των διακοπών της γέφυρας χρησιμοποιούνται MOSFETs, συνδεδεμένα παράλληλα με διόδους ελευθέρως διέλευσης. Η οδήγηση των διακοπών γίνεται με τη χρήση δύο γεννητριών παλμών, οι έξοδοι των οποίων συνδέονται στην πύλη των MOSFET. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο παραγόμενοι παλμοί έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 180°, βαθμό χρησιμοποίησης 50 % και συνδέονται ανά ζεύγη στα MOSFETs (γεννήτρια A στα Q1, Q4, γεννήτρια B στα Q2, Q3), ενώ υπάρχει και πρόβλεψη νεκρού χρόνου (dead-time) για την προστασία των σκελών του αντιστροφέα. Η πτώση τάσης στις διόδους του ανορθωτή στην έξοδο είναι ίση με 0.4 V.

Vin	Lin	Cin	Lp, Ls	Cp, Cs	Cf
6 V	100 μH	1 μF	20 μH	31.7 nF	220 μF

Πίνακας 4.2: Τιμές προσομοίωσης συστήματος με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας στο Simulink.



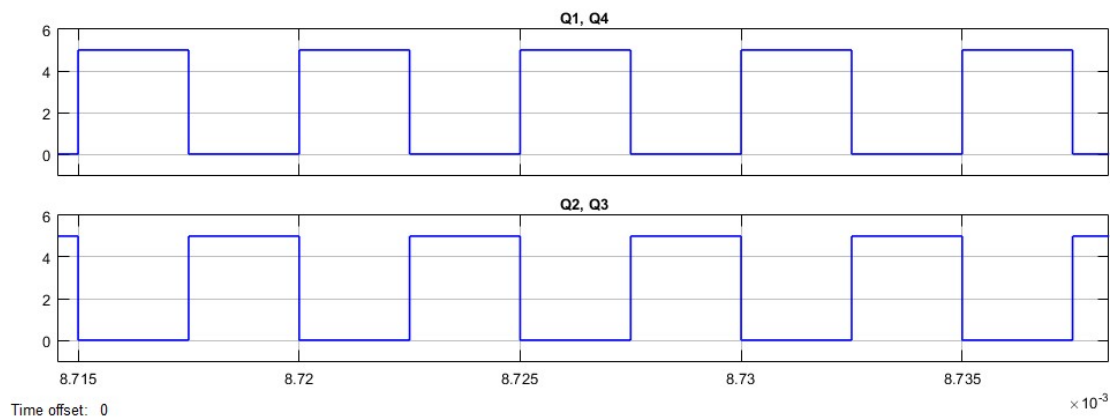
Σχήμα 4.2: Κύκλωμα προσομοίωσης συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και αντιστάθμιση σειράς - σειράς στο Simulink.

4.1.1: Προσομοίωση με σταθερές συνθήκες σύζευξης, συχνότητας και αντίστασης φορτίου

Η προσομοίωση του κυκλώματος, πραγματοποιείται για σταθερή συχνότητα, ίση με 200 kHz, συντελεστή σύζευξης ίσο με 0.39 και αντίσταση φορτίου ίση με 10 Ω.

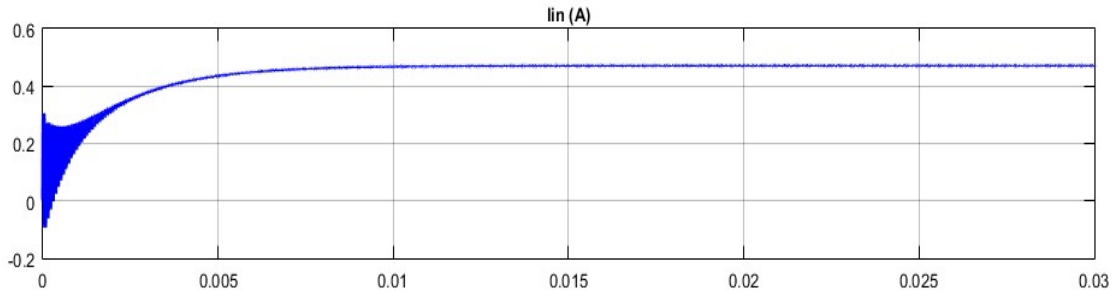
Βασικές κυματομορφές:

Οι παλμοί διέγερσης που εφαρμόζονται στις πύλες των MOSFET παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3



Σχήμα 4.3: Παλμοί διέγερσης των MOSFET Q1 και Q4 (πάνω) και Q2 και Q3 (κάτω).

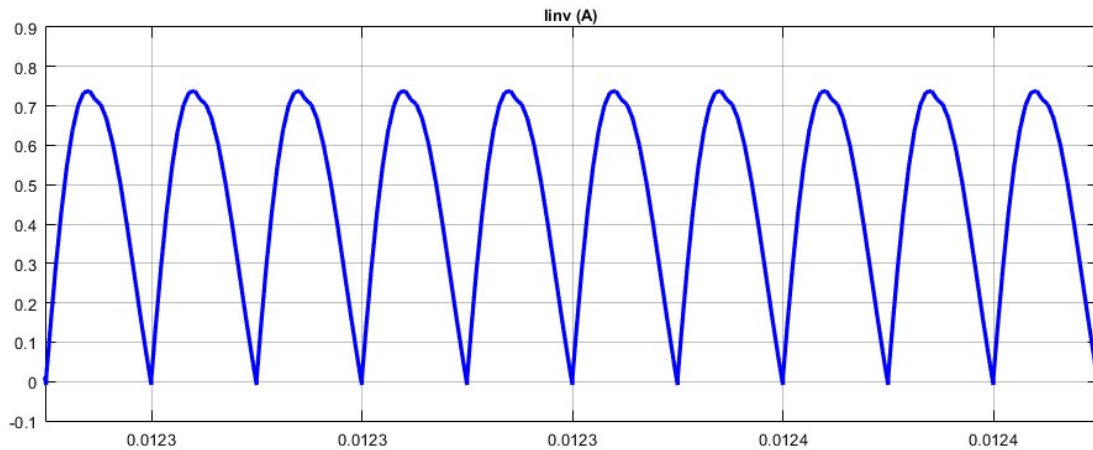
Για το ρεύμα εισόδου (I_{in}) του φίλτρου του αντιστροφέα λαμβάνεται η εξής κυματομορφή:



Σχήμα 4.4: Ρεύμα εισόδου του φίλτρου εισόδου του αντιστροφέα.

Το ρεύμα εισόδου έχει μέση τιμή ίση με 0.4711 A. Παρατηρείται μια αστάθεια αυτού κατά την μεταβατική κατάσταση, κατά την έναρξη της λειτουργίας, όμως περιορίζεται και αποκτά σταθερή τιμή καθώς το σύστημα μεταβαίνει στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

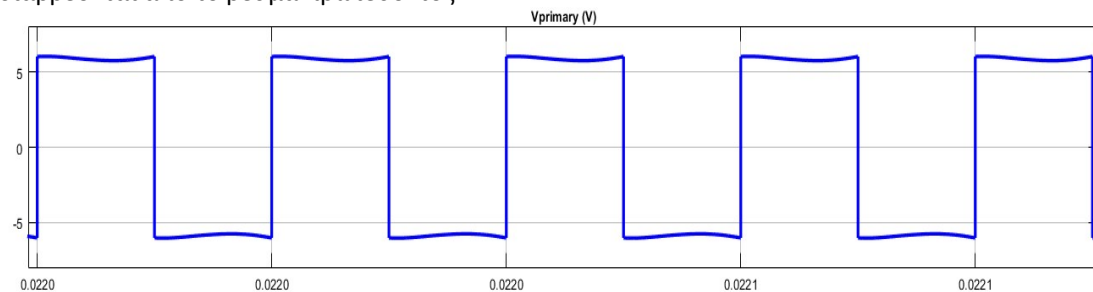
Για το ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα (i_{inv}) λαμβάνεται η παρακάτω κυματομορφή:



Σχήμα 4.5: Ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα.

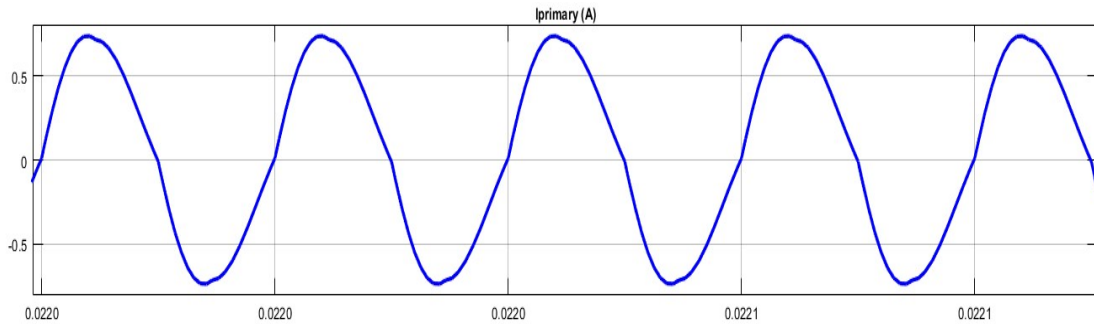
Το ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα έχει διπλάσια συχνότητα από τη συχνότητα λειτουργίας. Η τιμή του καθορίζεται από την εξίσωση $i_{inv} = i_{primary} \cdot S(\omega t)$, όπου $S(\omega t) = V_{primary}(\omega t) / V_{in}$ και $i_{primary}$ το ρεύμα του πρωτεύοντος και $V_{primary}$ η τάση του, δηλαδή η τάση εξόδου του αντιστροφέα [46].

Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η τάση εξόδου του αντιστροφέα, η οποία είναι και η τάση που εφαρμόζεται στο πρωτεύον κύκλωμα συντονισμού ($V_{primary}$). Όπως ήταν αναμενόμενο, είναι εναλλασσόμενη, σχεδόν τετραγωνικής μορφής. Η παρατηρούμενη πτώση τάσης οφείλεται στην πτώση τάσης πάνω στις παρασιτικές αντιστάσεις των στοιχείων του κυκλώματος, καθώς διαρρέονται από το ρεύμα πρωτεύοντος.



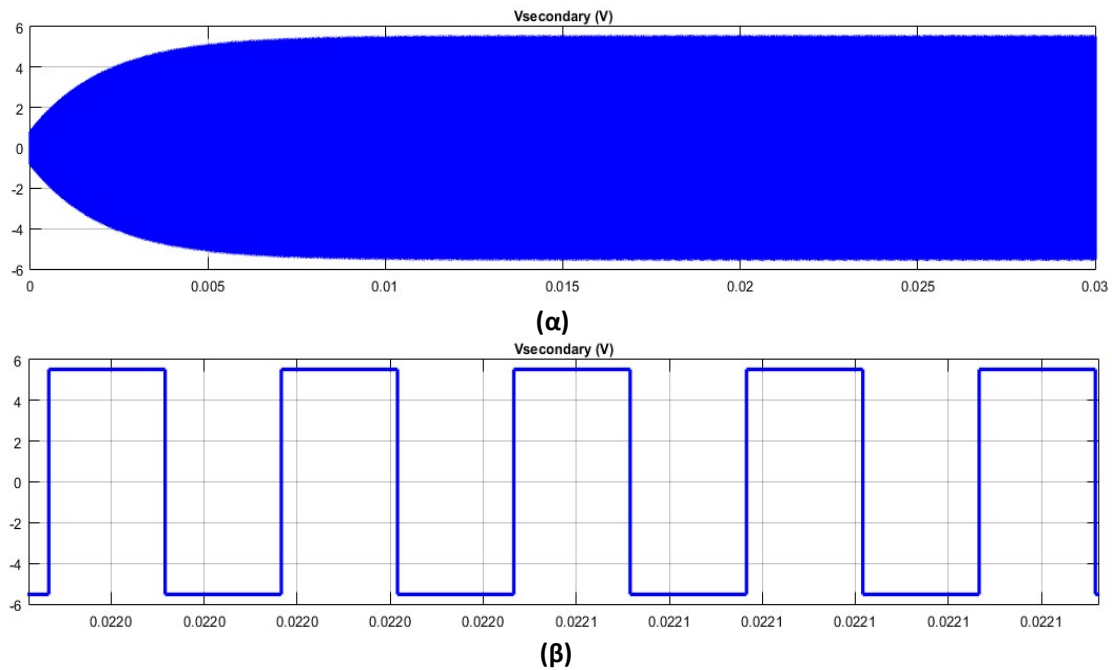
Σχήμα 4.6: Τάση πρωτεύοντος, $V_{primary}$.

Για το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον (I_{primary}), όπως αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7, παρατηρείται ότι είναι ημιτονοειδούς μορφής, με μία διαφορά φάσης με την τάση πρωτεύοντος, γεγονός που οδηγεί στην εμφάνιση αέργου ισχύος. Η διαφορά φάσης μεταξύ αυτών των μεγεθών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως τη συχνότητα λειτουργίας, το συντελεστή σύζευξης, το συντελεστή ποιότητας και τις αυτεπαγωγές σκέδασης.



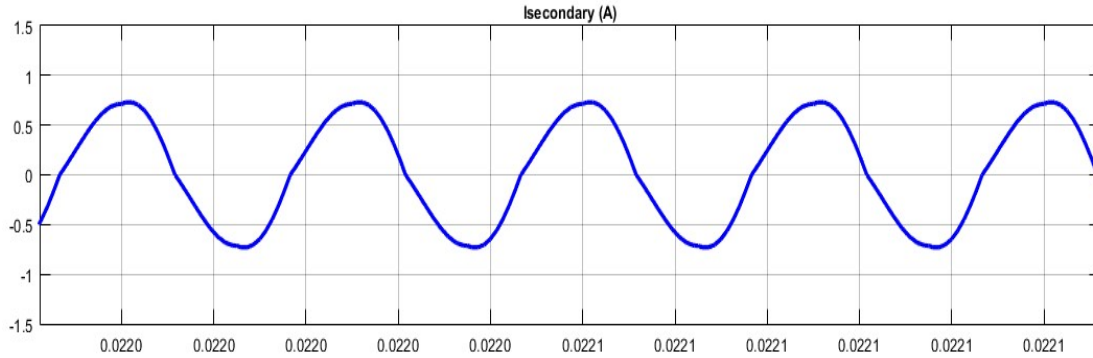
Σχήμα 4.7: Ρεύμα πρωτεύοντος, I_{primary} .

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η τάση του δευτερεύοντος ($V_{\text{secondary}}$). Παρατηρείται μία διαφορά φάσης σε σχέση με την αντίστοιχη κυματομορφή του πρωτεύοντος, καθώς και μία εξομάλυνση της κυμάτωσης των κορυφών.



Σχήμα 4.8: Τάση δευτερεύοντος, $V_{\text{secondary}}$ (α): Στην μεταβατική και μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, (β): Σε μεγέθυνση στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

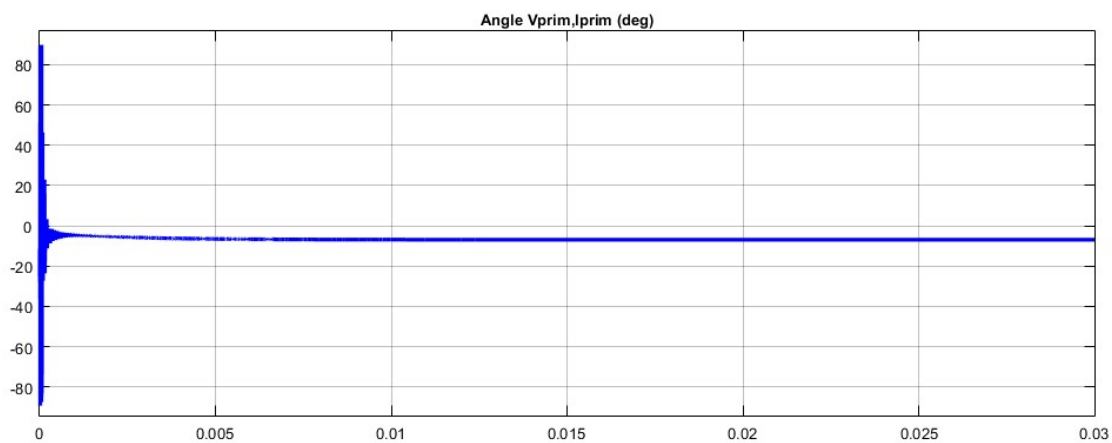
Για το ρεύμα που διαρρέει το δευτερεύον ($I_{\text{secondary}}$) λαμβάνεται η παρακάτω κυματομορφή:



Σχήμα 4.9: Ρεύμα δευτερεύοντος, $I_{\text{secondary}}$.

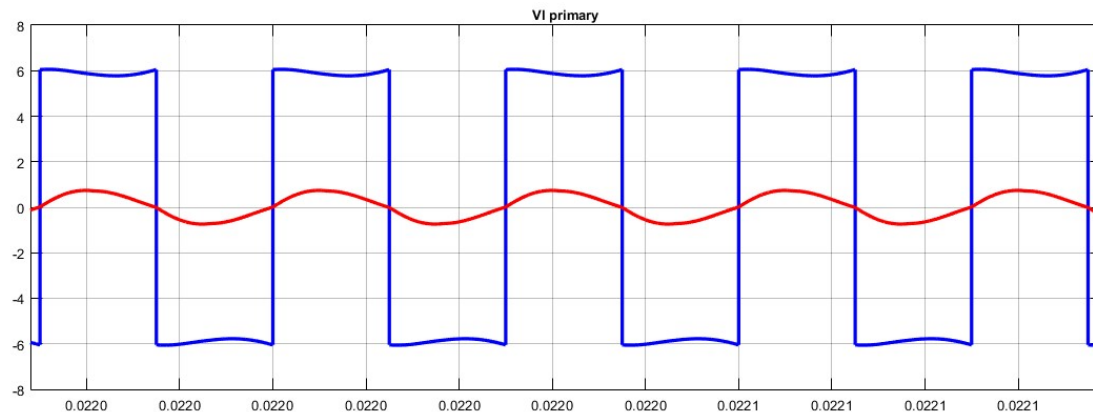
Όπως ήταν αναμενόμενο, είναι ημιτονοειδούς μορφής.

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος πρωτεύοντος. Όπως φαίνεται, παρουσιάζει διακυμάνσεις μέχρι το πρωτεύον να έλθει σε συντονισμό, όπου και σταθεροποιείται σε τιμή ίση με -6.888° . Συνεπώς, το ρεύμα του πρωτεύοντος προηγείται ελάχιστα της τάσης πρωτεύοντος.

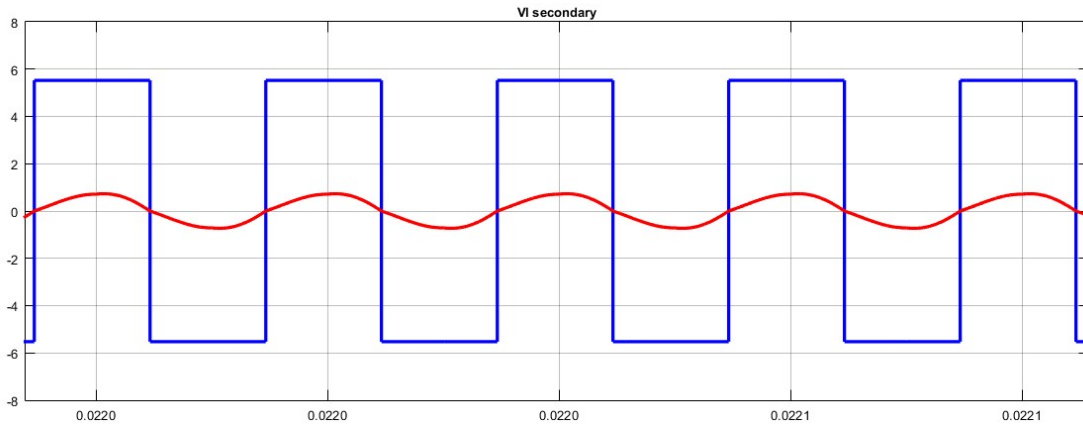


Σχήμα 4.10: Διαφορά φάσης τάσης – ρεύματος πρωτεύοντος.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η σχεδόν μηδενική διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος πρωτεύοντος και δευτερεύοντος που επιτυγχάνεται κατά την κατάσταση συντονισμού:

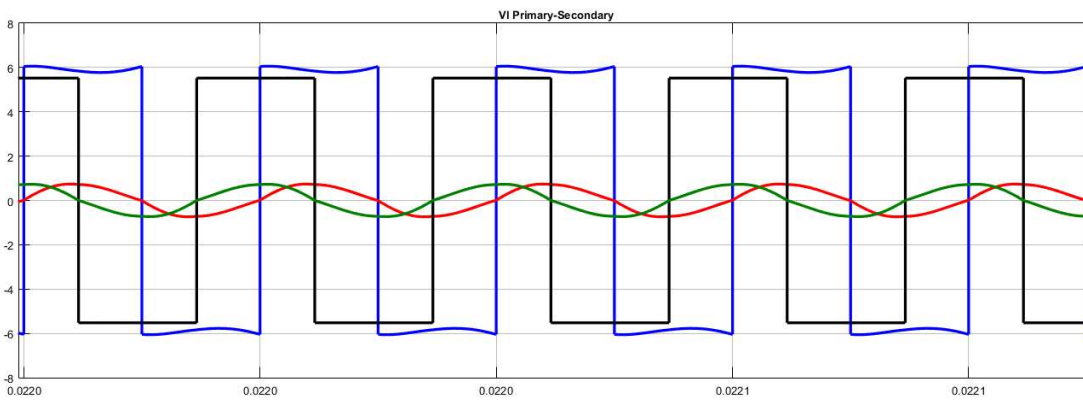


Σχήμα 4.11: Τάση (μπλε) και ρεύμα (κόκκινο) πρωτεύοντος.



Σχήμα 4.12: Τάση (μπλε) και ρεύμα (κόκκινο) δευτερεύοντος.

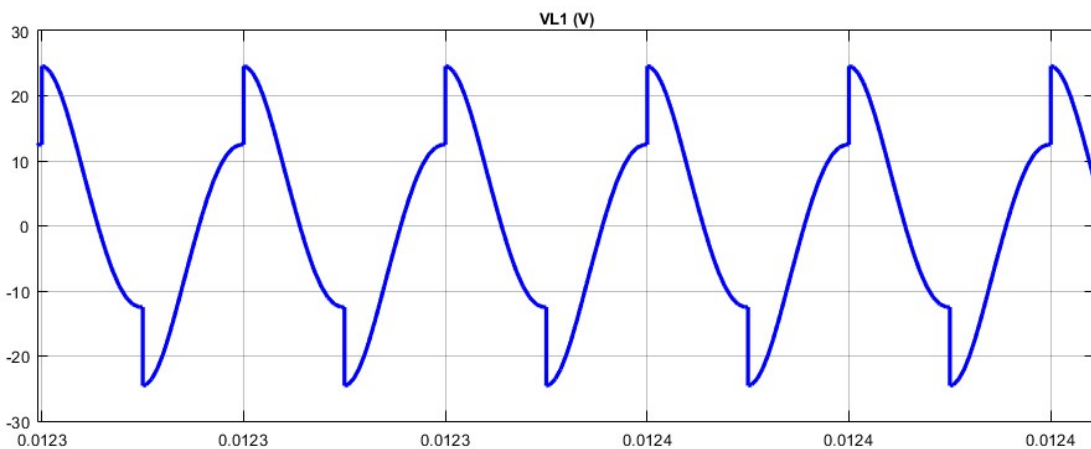
Επίσης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα μεγέθη των δύο τυλιγμάτων:



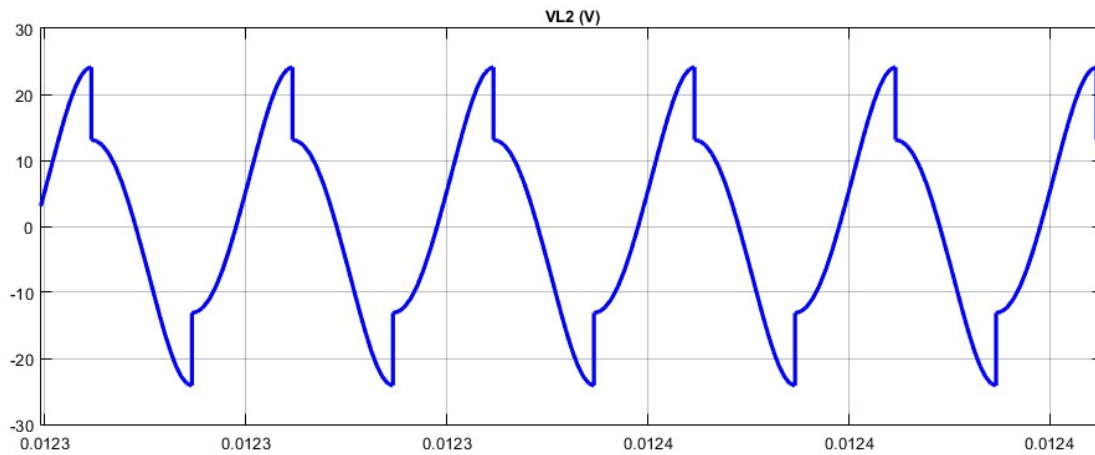
Σχήμα 4.13: Τάσεις και ρεύματα τυλιγμάτων. Με μπλε απεικονίζεται η τάση πρωτεύοντος, με κόκκινο το ρεύμα πρωτεύοντος, με μαύρο η τάση δευτερεύοντος και με πράσινο το ρεύμα δευτερεύοντος.

Παρατηρείται ότι τα μεγέθη του πρωτεύοντος έχουν διαφορά φάσης 90° σε σχέση με τα αντίστοιχα του δευτερεύοντος.

Στα παρακάτω σχήματα 4.14 Και 4.15 , παρουσιάζονται η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου στην μεριά του πρωτεύοντος (V_{L1}) και στην μεριά του δευτερεύοντος (V_{L2}), αντίστοιχα:



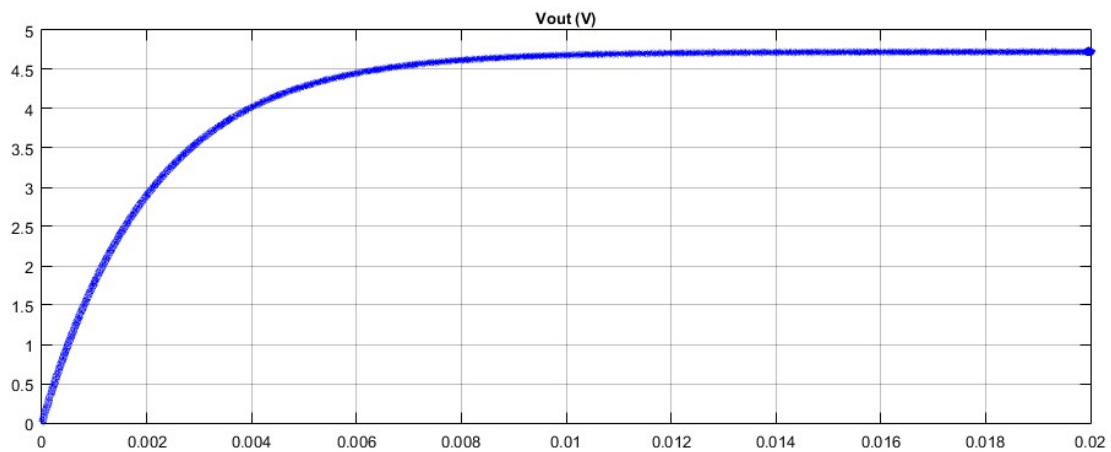
Σχήμα 4.14: Τάση πηνίου πρωτεύοντος.



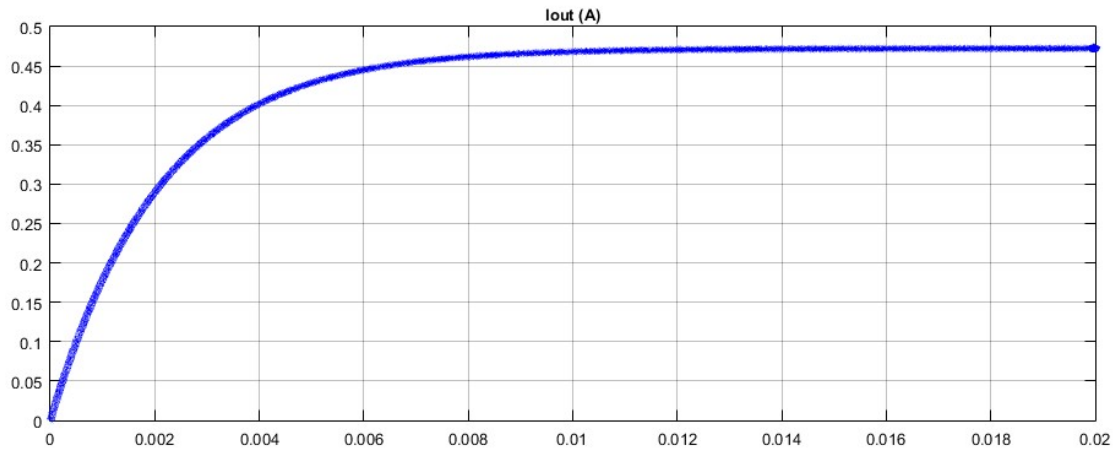
Σχήμα 4.15: Τάση πηνίου δευτερεύοντος.

Για τις τάσεις που αναπτύσσονται στα πηνία στην μεριά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, παρατηρείται ότι είναι πολύ μεγαλύτερης τιμής από την τάση που εφαρμόζεται στο πρωτεύον, λόγω του ότι τα πηνία βρίσκονται σε συντονισμό. Κατά συνέπεια, μεγάλες τιμές τάσης μπορούν να εμφανισθούν και στους αντίστοιχους πυκνωτές αντιστάθμισης, γεγονός που προβάλλει την ανάγκη κατάλληλης προστασίας αυτών (για παράδειγμα με την κατάλληλη μόνωση).

Στο Σχήμα 4.16 απεικονίζεται η ανορθωμένη τάση εξόδου του δευτερεύοντος και στο Σχήμα 4.17 το ανορθωμένο ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος, τα οποία τροφοδοτούν την μπαταρία.



Σχήμα 4.16: Ανορθωμένη τάση εξόδου, V_{out} .



Σχήμα 4.17: Ανορθωμένο ρεύμα εξόδου, I_{out} .

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου μετράται ίση με 4.723 V και η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου ίση με 0.4723 A.

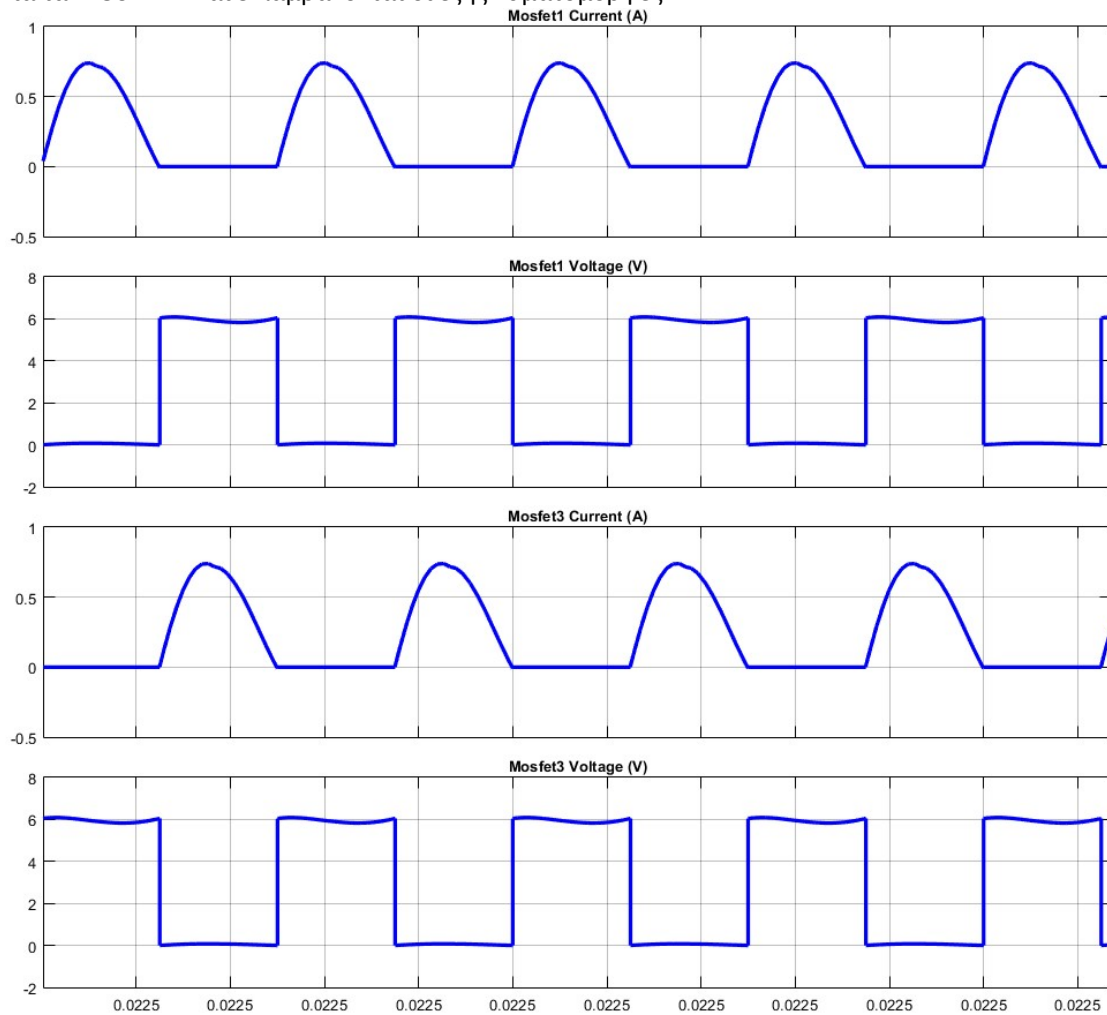
Η απόδοση του συστήματος από την είσοδο του αντιστροφέα έως την ανορθωμένη έξοδο του δευτερεύοντος είναι:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\bar{V}_{out} \cdot \bar{I}_{out}}{\bar{V}_{in} \cdot \bar{I}_{in}} = \frac{4.723 \cdot 0.4723}{6 \cdot 0.4711} = \frac{2.231 \text{ W}}{2.826 \text{ W}} = 0.7892 = 78.92 \% \quad (4.1)$$

Παρατηρείται μία σχετικά ικανοποιητική απόδοση, αν ληφθεί υπ' όψη ότι εξετάζεται μία περίπτωση με χαμηλό συντελεστή σύζευξης και χαμηλό συντελεστή ποιότητας. Συν τους άλλους, στις ολικές απώλειες συνεισφέρουν οι βαθμίδες του αντιστροφέα και της ανορθωτικής διάταξης, το φίλτρο εισόδου του αντιστροφέα, το φίλτρο εξόδου της ανορθωτικής διάταξης, οι διακοπτικές απώλειες των MOSFET, καθώς και το γεγονός ότι η σύνδεση της κάθε βαθμίδας με μη γραμμικά στοιχεία επηρεάζει τον συντονισμό του κυκλώματος.

Τάσεις και ρεύματα στους διακόπτες:

Για τα MOSFET 1 και 3 λαμβάνονται οι εξής κυματομορφές:



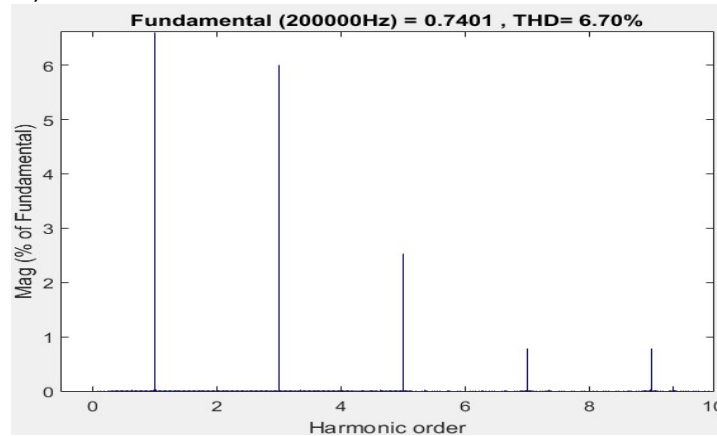
Σχήμα 4.18: Ρεύματα και τάσεις στα MOSFET 1 και 3.

Όπως παρατηρείται, η τάση που εφαρμόζεται στους διακόπτες είναι ίση με την τάση εισόδου. Επίσης, η μέγιστη τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον διακόπτη ισούται με την μέγιστη τιμή του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον.

Αρμονική ανάλυση των ρευμάτων των τυλιγμάτων:

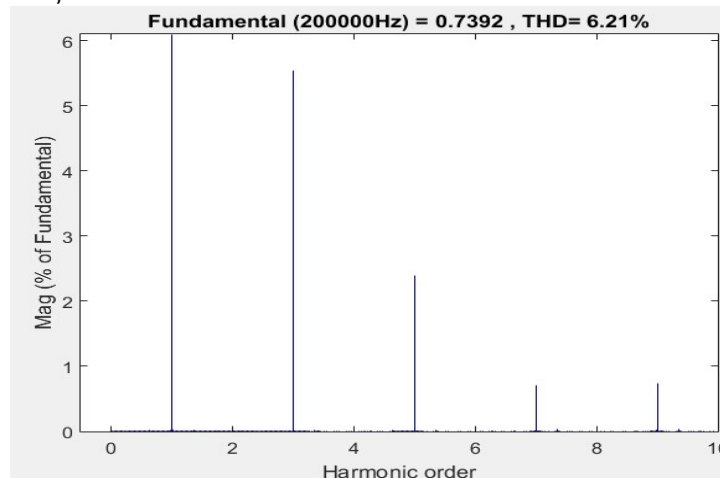
Παρακάτω παρουσιάζονται τα φάσματα συχνοτήτων καθώς και οι συντελεστές Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD%) των ρευμάτων των τυλιγμάτων:

Ρεύμα πρωτεύοντος:



Σχήμα 4.19: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος πρωτεύοντος.

Ρεύμα δευτερεύοντος:



Σχήμα 4.20: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος δευτερεύοντος

Από τα παραπάνω, λοιπόν, φαίνεται η ιδιότητα της διάταξης να λειτουργεί ως φίλτρο όταν βρίσκεται σε συντονισμό και να εξαλείφει τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες.

Καθώς τα ρεύματα έχουν σχεδόν ημιτονοειδή μορφή, οι Συντελεστές Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης είναι πολύ μικροί (κοντά στο 5%) όπως επίσης μικρές είναι και οι μέγιστες τιμές των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών. Έτσι επιτυγχάνεται βέλτιστη ποιότητα και μεταφορά ενέργειας.

4.1.2: Προσομοίωση με μεταβαλλόμενες συνθήκες σύζευξης, συχνότητας και αντίστασης φορτίου

Με βάση το κύκλωμα της προηγούμενης ενότητας, στην παρούσα ενότητα, πραγματοποιείται ένα πλήθος παραμετρικών προσομοιώσεων για μία πιο σφαιρική παρουσίαση της συμπεριφοράς του υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Πιο συγκεκριμένα, το κύκλωμα μελετάται μεταβάλλοντας τρεις σημαντικές παραμέτρους: τη συχνότητα λειτουργίας (f), το συντελεστή σύζευξης (k) και την αντίσταση φορτίου εξόδου (R). Οι τιμές που λαμβάνουν οι συγκεκριμένες παράμετροι είναι:

f (kHz)	k	R (Ω)
150 - 320 με βήμα 2	0.6, 0.54, 0.39, 0.25, 0.15	4, 10, 20, 30, 40, 50

Πίνακας 4.3: Τιμές παραμέτρων συστήματος κατά την προσομοίωσή του σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Τα σημεία ενδιαφέροντος είναι η DC ισχύς στην είσοδο και στην έξοδο της διάταξης και κατ'επέκταση η συνολική DC απόδοση του συστήματος, το ρεύμα εισόδου της διάταξης, οι τάσεις και τα ρεύματα σε πρωτεύον και δευτερεύον και η διαφορά φάσης αυτών, καθώς επίσης και η τάση και το ρεύμα στην έξοδο, δηλαδή στην αντίσταση φορτίου. Επιπλέον, καταγράφεται και η σύνθετη ανακλώμενη αντίσταση, αλλά και η σύνθετη αντίσταση εισόδου του συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος.

Επίσης σημαντική είναι η μελέτη των τάσεων που εφαρμόζονται στα τυλίγματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, αλλά και στους αντίστοιχους πυκνωτές συντονισμού, η τάση και το ρεύμα που των διακοπτικών στοιχείων, αλλά και η τάση και το ρεύμα των διόδων της ανόρθωσης. Τα στοιχεία αυτά είναι πολύ σημαντικά για την επιλογή των στοιχείων και την κατάλληλη μόνωση των πηνίων και των πυκνωτών, καθώς αφού η λειτουργία του συστήματος πραγματοποιείται σε συνθήκες συντονισμού, επάγονται πολύ υψηλές, σε σχέση με την τάση τροφοδοσίας, τάσεις.

Τέλος, καταγράφονται και οι τιμές του συντελεστή ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD%) των ρευμάτων που διαρρέουν τα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος.

Για συνοπτικούς λόγους, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν στην συνολική DC-DC απόδοση του συστήματος, στην ισχύ εισόδου και εξόδου αυτού, καθώς και στο κέρδος τάσης που επιτυγχάνεται. Επιλεγμένα αποτελέσματα των υπόλοιπων μεγεθών του συστήματος παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

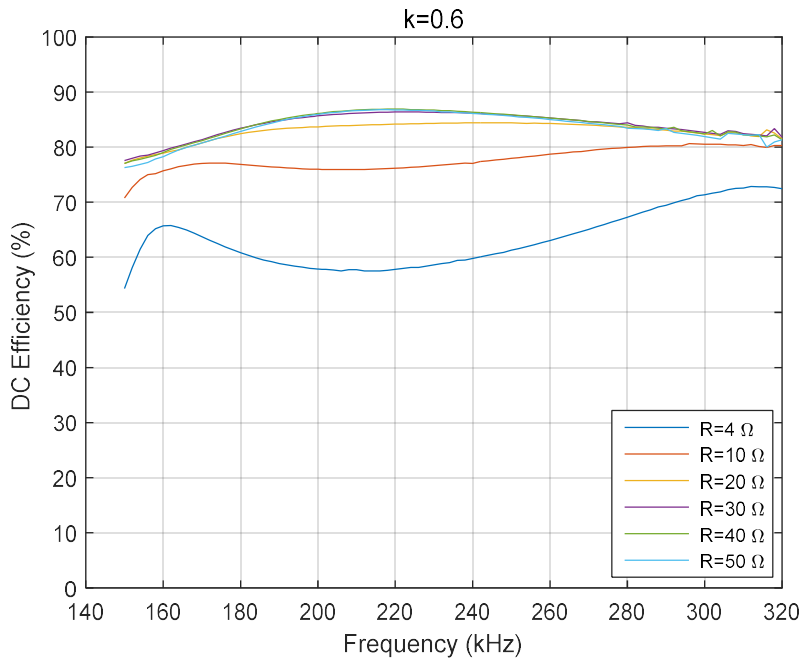
Τα προαναφερθέντα παρουσιάζονται στη συνέχεια με τέσσερις τρόπους:

- Αποτελέσματα προσομοιώσεων για όλο το εύρος συχνοτήτων και αντιστάσεων φορτίων, για τιμές του συντελεστή σύζευξης ίσες με 0.6, 0.39 και 0.15, δηλαδή στην καλύτερη, σε μία μέση και στη χειρότερη σύζευξη μεταξύ των πηνίων.
- Αποτελέσματα προσομοιώσεων για όλο το εύρος συχνοτήτων και συντελεστών σύζευξης, για τιμές αντίστασης φορτίου ίσες με 4 Ω , 20 Ω και 50 Ω .
- Αποτελέσματα προσομοιώσεων για όλο το εύρος τιμών συντελεστών σύζευξης και αντιστάσεων φορτίου, για συχνότητα ίση με 200 kHz.
- Τρισδιάστατη αναπαράσταση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για τις άνω περιπτώσεις.

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας, μεταβλητή αντίσταση φορτίου – Σταθερός συντελεστή σύζευξης k:

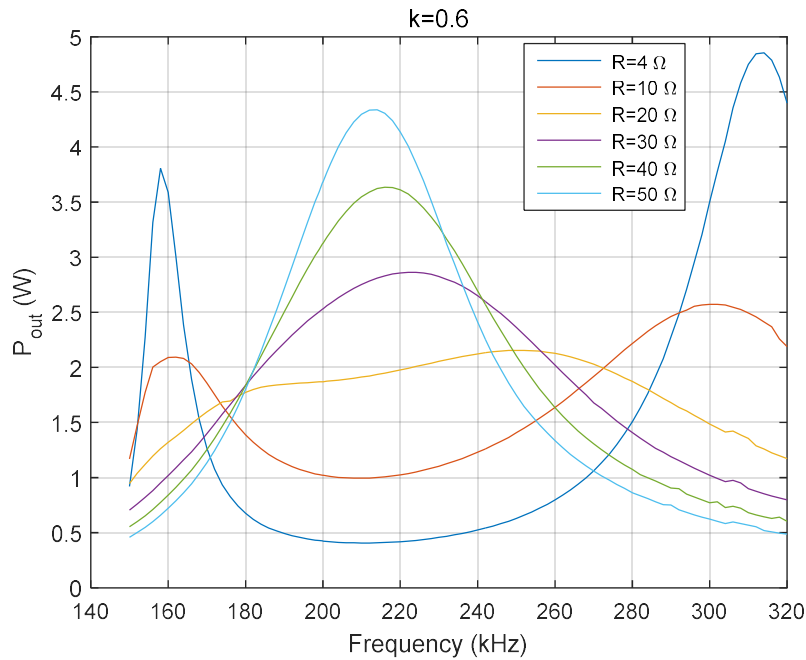
k=0.6:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



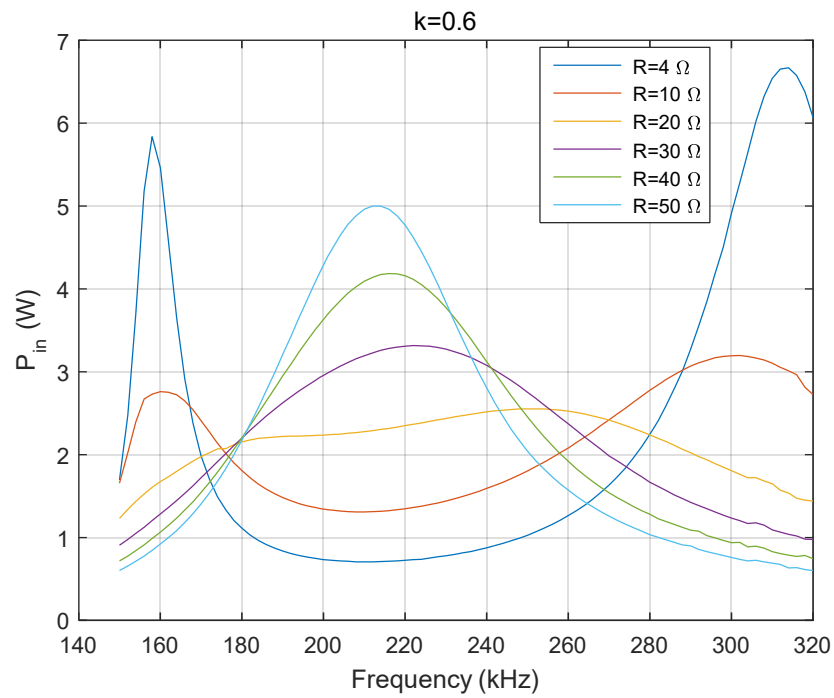
Σχήμα 4.21: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή συχνότητα και φορτίο, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



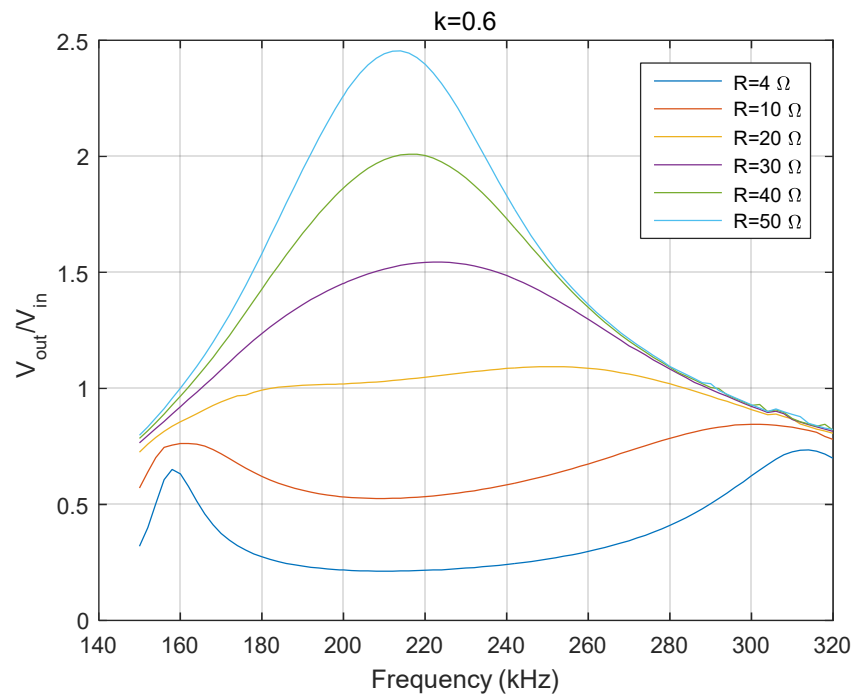
Σχήμα 4.22: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.23: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.24: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

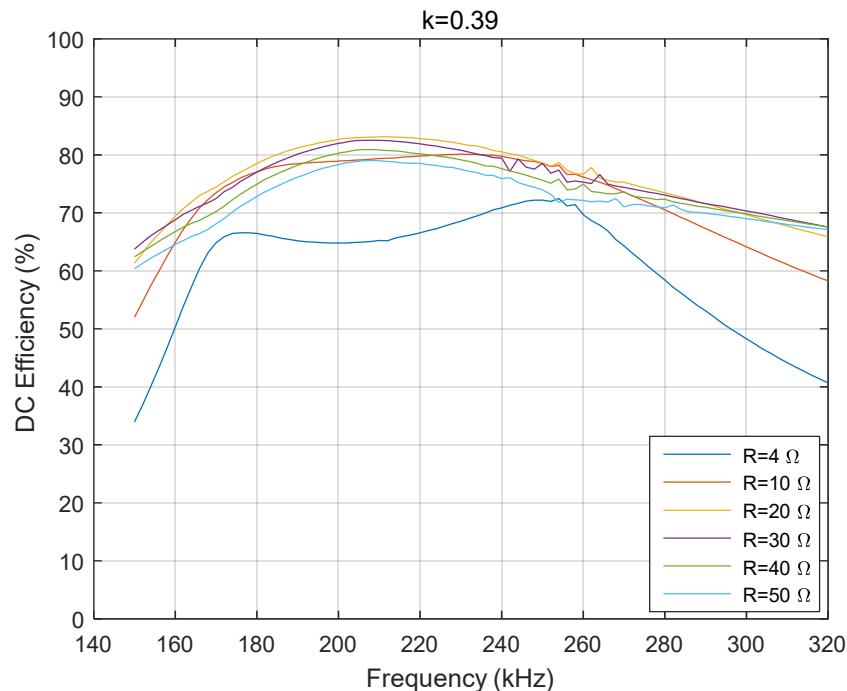
Στα παραπάνω σχήματα αρχικά γίνεται εμφανής η επίδραση του φαινομένου διακλάδωσης. Πιο συγκεκριμένα, για μικρές τιμές αντίστασης φορτίου (4 Ω, 10 Ω) και σε συχνότητες συντονισμού περί των 160 kHz και 300 kHz, παρατηρούνται δύο κορυφές υψηλής ισχύος στην είσοδο και στην έξοδο με μεγαλύτερη την κορυφή των υψηλών συχνοτήτων. Αυτό οφείλεται στο ότι η συνολική χωρητικότητα του δευτερεύοντος επηρεάζεται είτε από τον πυκνωτή φιλτραρίσματος που είναι τοποθετημένος παράλληλα με την αντίσταση φορτίου είτε από τις παρασιτικές χωρητικότητες των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα, με αποτέλεσμα οι συχνότητες συντονισμού του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος να διαφέρουν ($\omega_1 \neq \omega_2$), παρ' ότι οι τιμές των πηνίων και των πυκνωτών συντονισμού είναι ίδιες ($L_1 C_1 = L_2 C_2$).

Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της ισχύος εξόδου και κατ' επέκταση της απόδοσης του συστήματος, με την αύξηση της αντίστασης φορτίου. Η μικρότερη απόδοση παρατηρείται στην μικρότερη τιμή αντίστασης φορτίου, γεγονός που δικαιολογείται από το ότι το σύστημα λειτουργεί με χαμηλές τιμές τάσης και υψηλές τιμές ρεύματος, γεγονός που αυξάνει τις απώλειες στις παρασιτικές αντιστάσεις. Επίσης, η ποσότητα ισχύος είναι αρκετά χαμηλή. Αντίθετα, στις μεγαλύτερες τιμές αντίστασης φορτίου η απόδοση του συστήματος είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα, με τιμές που ξεπερνούν το 80 % σχεδόν σε όλο το εύρος συχνοτήτων, καθώς τα επίπεδα τάσης είναι υψηλότερα και συνεπώς τα επίπεδα ρεύματος χαμηλότερα. Η μεγαλύτερη απόδοση παρατηρείται στις μεγάλες τιμές της αντίστασης φορτίου (40 Ω, 50 Ω) και είναι ίση με 86.89 %.

Παρατηρείται αύξηση του κέρδους τάσης καθώς αυξάνεται η αντίσταση φορτίου, ενώ σε πολύ μικρές τιμές αντίστασης φορτίου (4 Ω, 10 Ω), το κέρδος είναι μικρότερο της μονάδας.

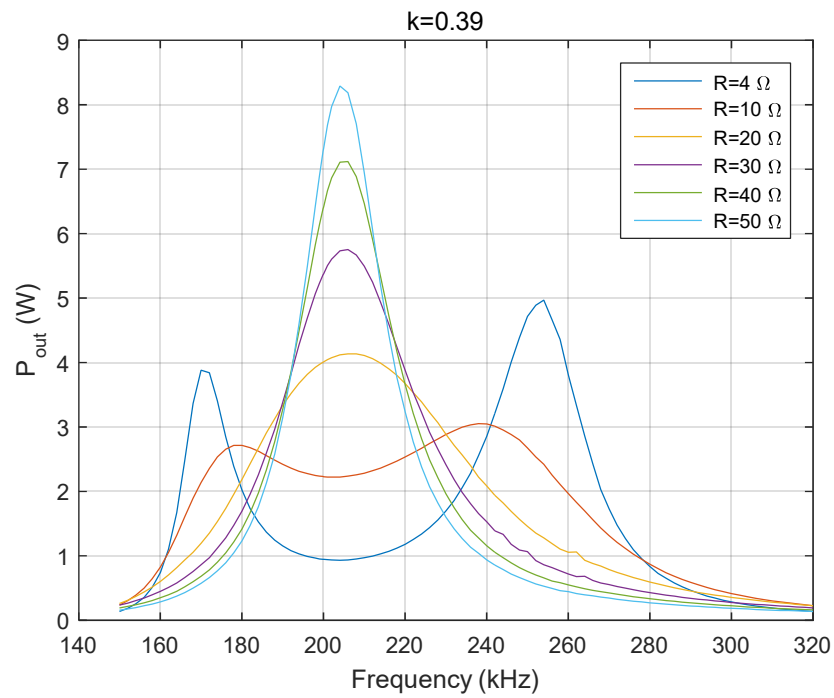
k=0.39:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



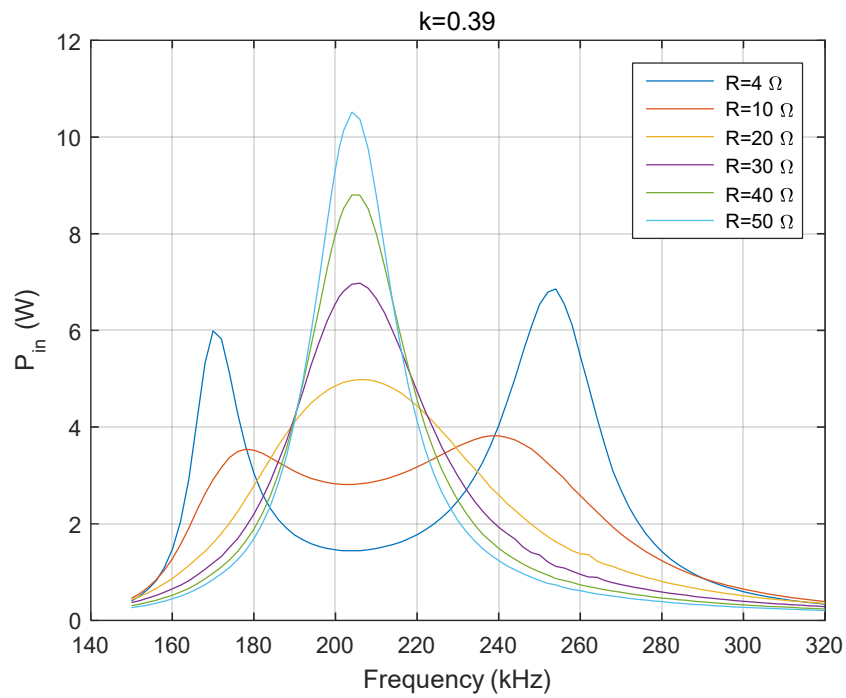
Σχήμα 4.25: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



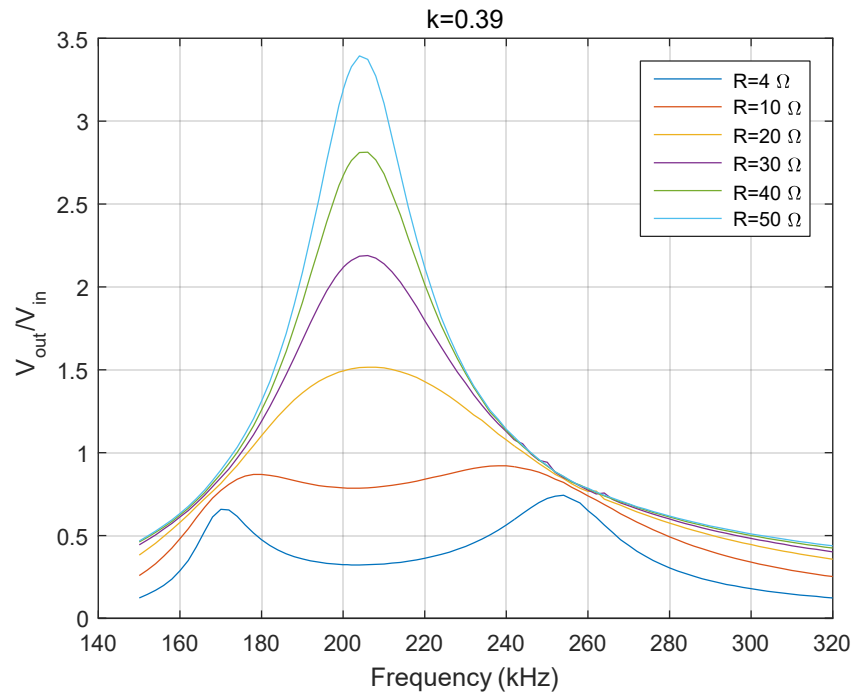
Σχήμα 4.26: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.27: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

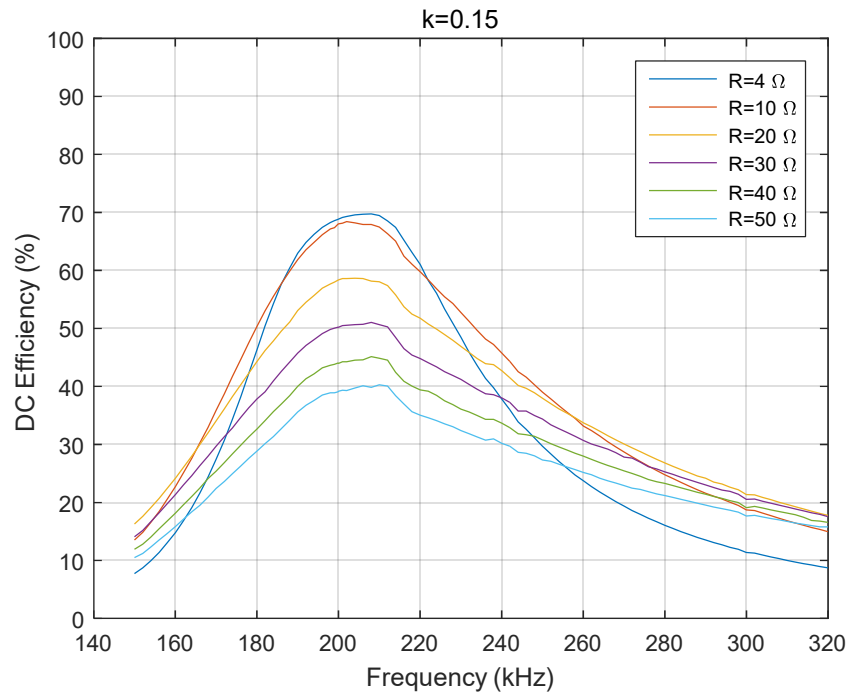
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.28: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη

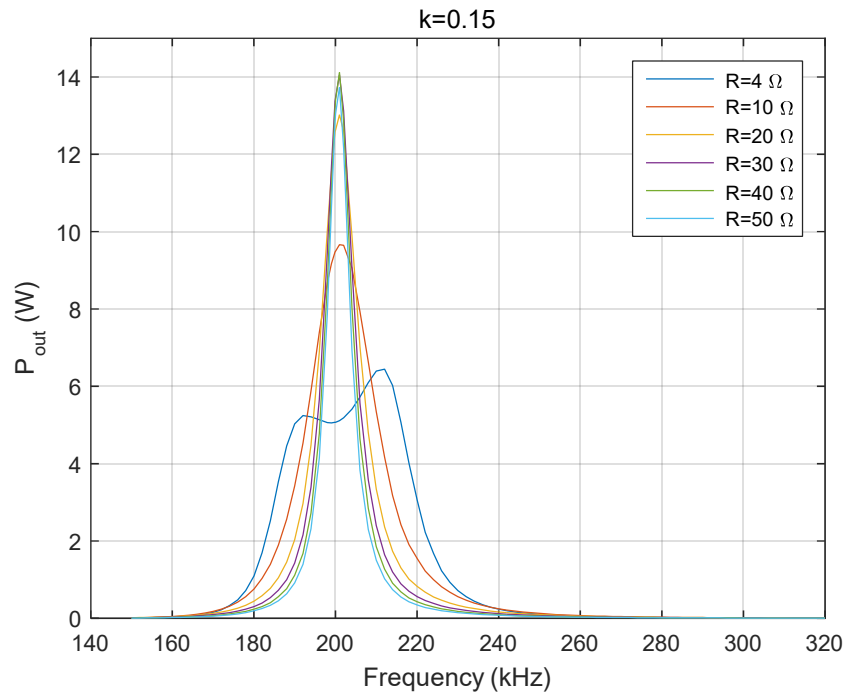
$k=0.15$:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



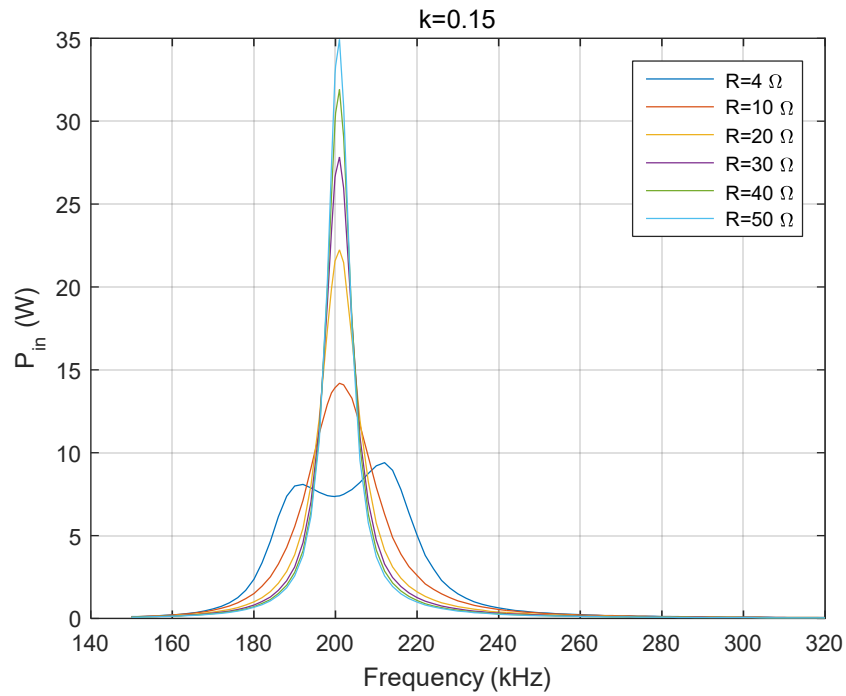
Σχήμα 4.29: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



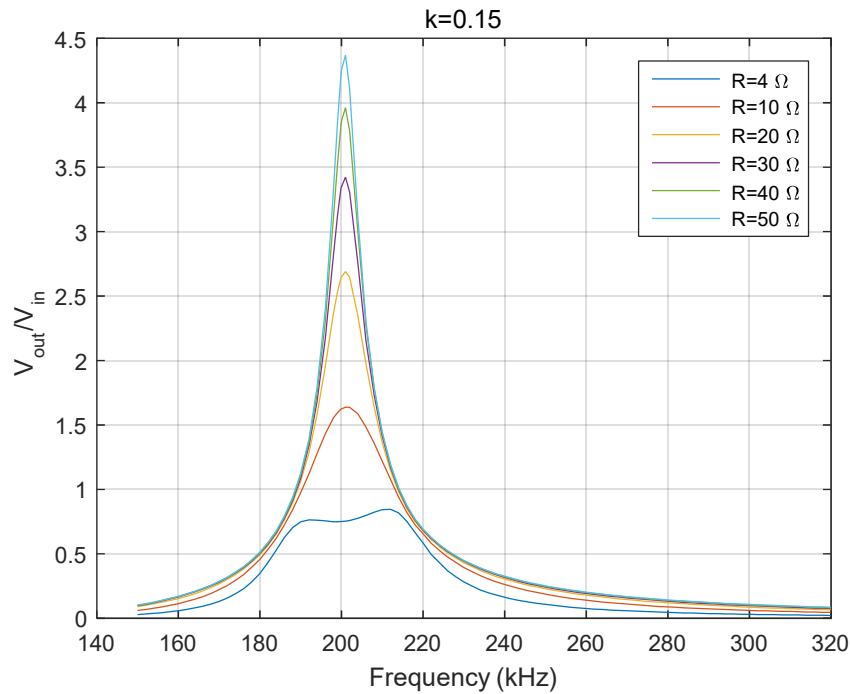
Σχήμα 4.30: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.31: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.32: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Από τα παραπάνω σχήματα διαπιστώνεται -όπως ήταν αναμενόμενο- η σημαντική επίδραση του βαθμού σύζευξης στην απόδοση του συστήματος. Στην μέση σύζευξη ($k=0.39$) παρατηρείται μειωμένη απόδοση συγκριτικά με την καλύτερη σύζευξη, αλλά με σχετικά ικανοποιητικές τιμές. Η μέγιστη απόδοση παρατηρείται στις μεσαίες τιμές της αντίστασης φορτίου (20 Ω, 30 Ω) και είναι ίση με 83.11 %. Βέβαια το εύρος συχνοτήτων όπου η απόδοση ξεπερνά το 80 % είναι μικρότερο από ότι στην περίπτωση καλύτερης σύζευξης. Στην χειρότερη σύζευξη ($k=0.15$) το φαινόμενο εντείνεται καθώς η μέγιστη απόδοση μειώνεται στο 69.73 % και παρατηρείται στις χαμηλές τιμές της αντίστασης φορτίων (4 Ω, 10 Ω), με την απόδοση να έχει σταθερές τιμές σε ακόμα πιο μικρό εύρος συχνοτήτων.

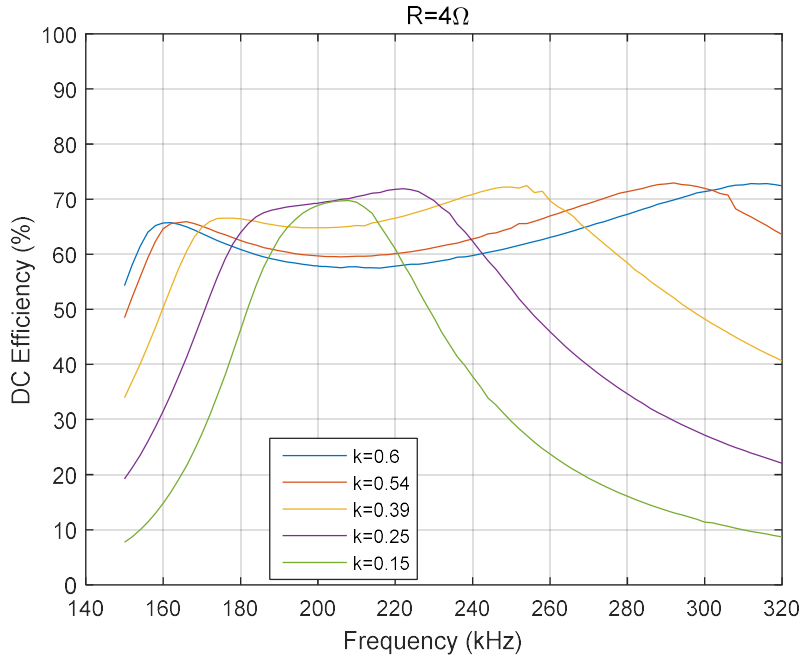
Επίσης, όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή σύζευξης, τόσο πιο χαμηλές τιμές απόδοσης παρατηρούνται (μικρότερες και από 10 %) σε συχνότητες πολύ μικρότερες ή μεγαλύτερες της συχνότητας συντονισμού, γεγονός που οφείλεται στο ότι σε αυτές τις περιπτώσεις, τα ποσοστά ισχύος στην είσοδο και στην έξοδο μειώνονται σημαντικά. Σε αυτό συμβάλλει και το ότι όσο εξασθενεί η σύζευξη, το φαινόμενο της διακλάδωσης παύει να εμφανίζεται, με αποτέλεσμα οι καμπύλες ισχύος να συγκλίνουν και να παρουσιάζουν μέγιστο κοντά στη συχνότητα συντονισμού [66]. Στο συγκεκριμένο σύστημα, η μέγιστη ισχύς δεν παρατηρείται κατά την συχνότητα συντονισμού, αλλά σε συχνότητα ελάχιστα μεγαλύτερη. Αυτό συμβαίνει διότι καθώς η ω_1 διαφέρει της ω_2 και οι κορυφές ισχύος διαφέρουν σε πλάτος, το σημείο συγχώνευσης κατά την εξασθένιση της σύζευξης μετατοπίζεται προς την υψηλότερη κορυφή (που εν προκειμένω βρίσκεται σε συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας συντονισμού) [6].

Αξιοσημείωτο είναι ακόμα, το γεγονός ότι όσο εξασθενεί η σύζευξη αυξάνονται κατά πολύ τα επίπεδα ισχύος και η τάση εξόδου, ιδιαίτερα όσο αυξάνεται και η αντίσταση φορτίου. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι πως όσο η σύζευξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος μειώνεται, τόσο πιο «ελεύθερα» πραγματοποιούν τις ηλεκτρικές τους ταλαντώσεις τα συντονιζόμενα κυκλώματα στις δύο πλευρές, με αποτέλεσμα να επάγονται μεγαλύτερες τάσεις και ρεύματα.

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας, μεταβλητός συντελεστή σύζευξης – Σταθερή αντίσταση φορτίου:

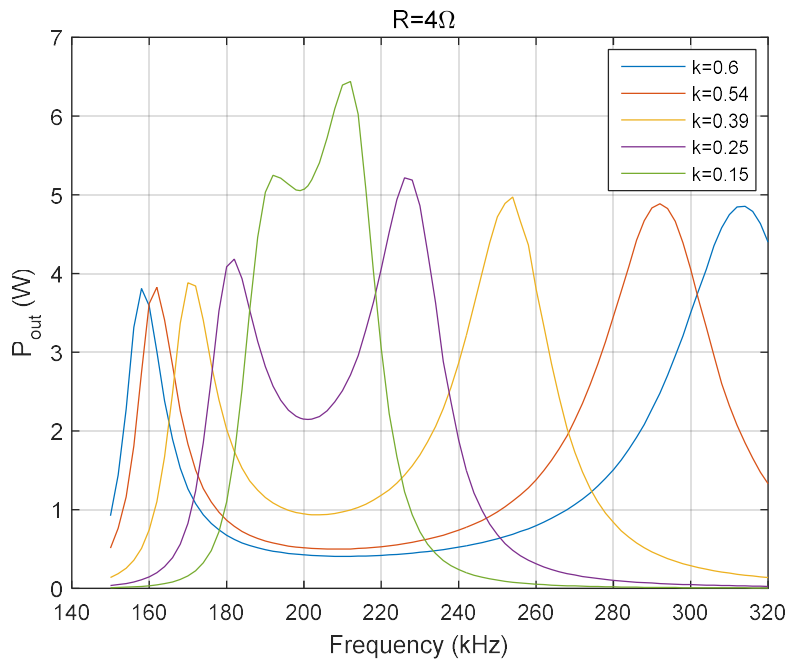
R=4 Ω:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



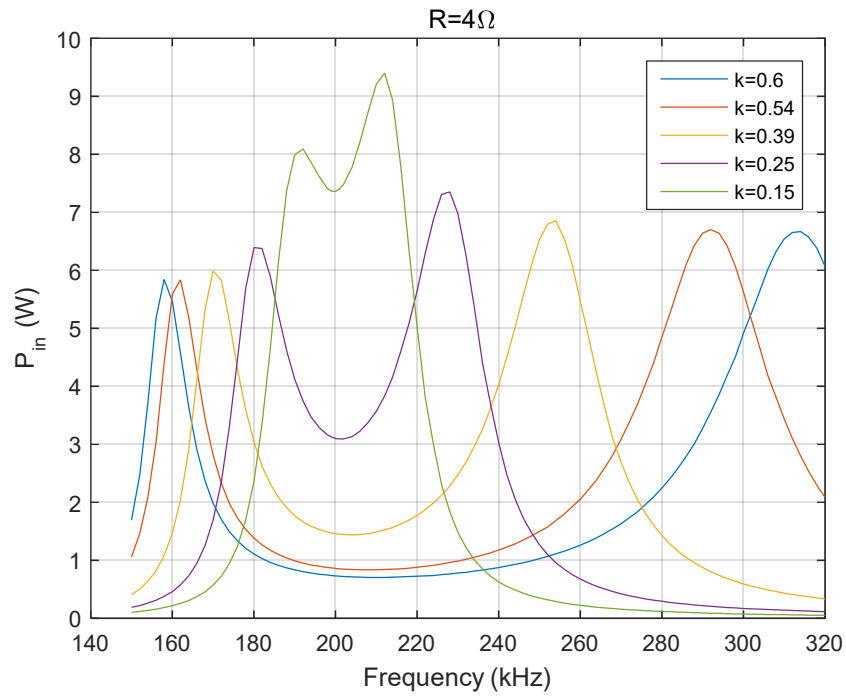
Σχήμα 4.33: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



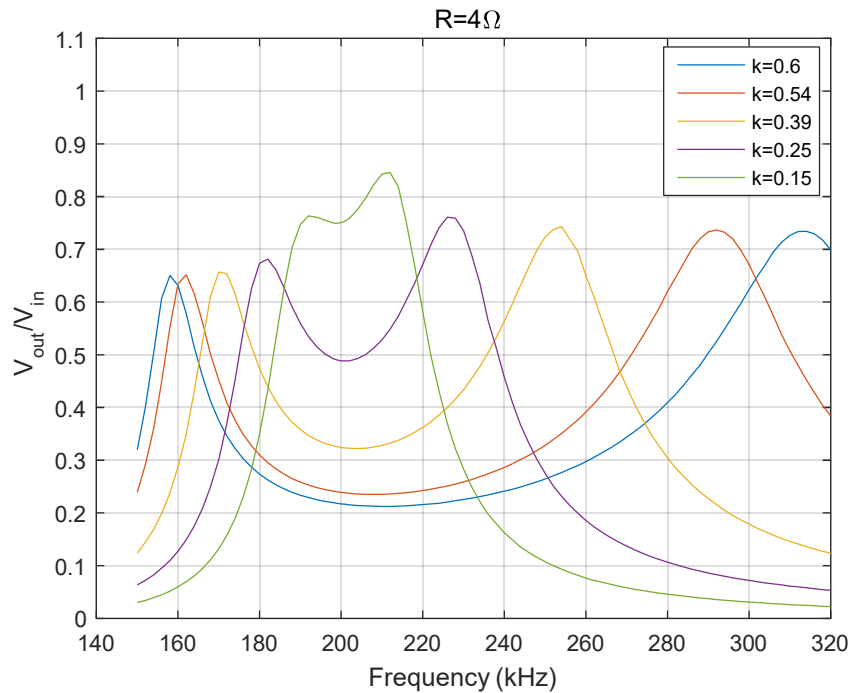
Σχήμα 4.34: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.35: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

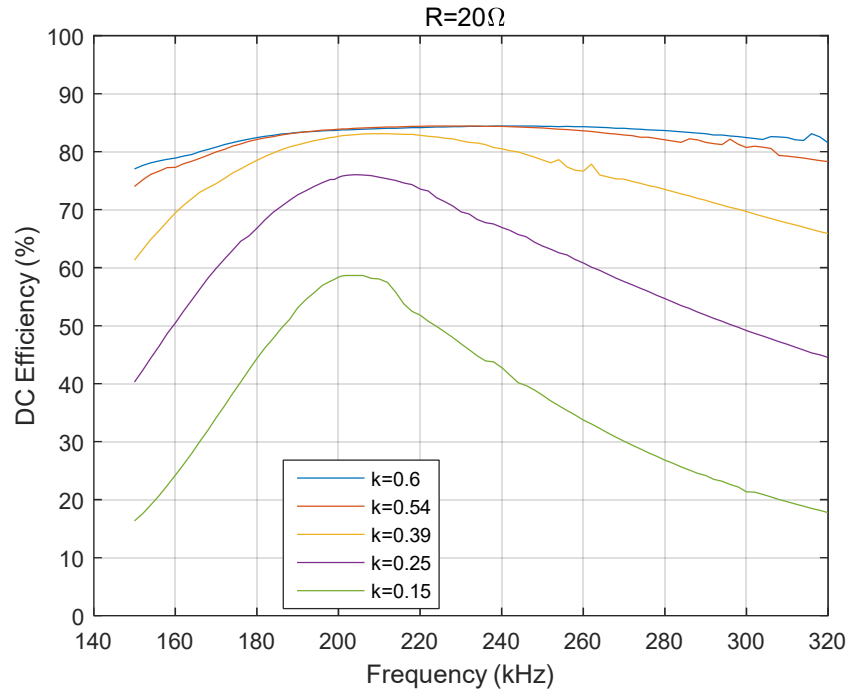
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.36: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

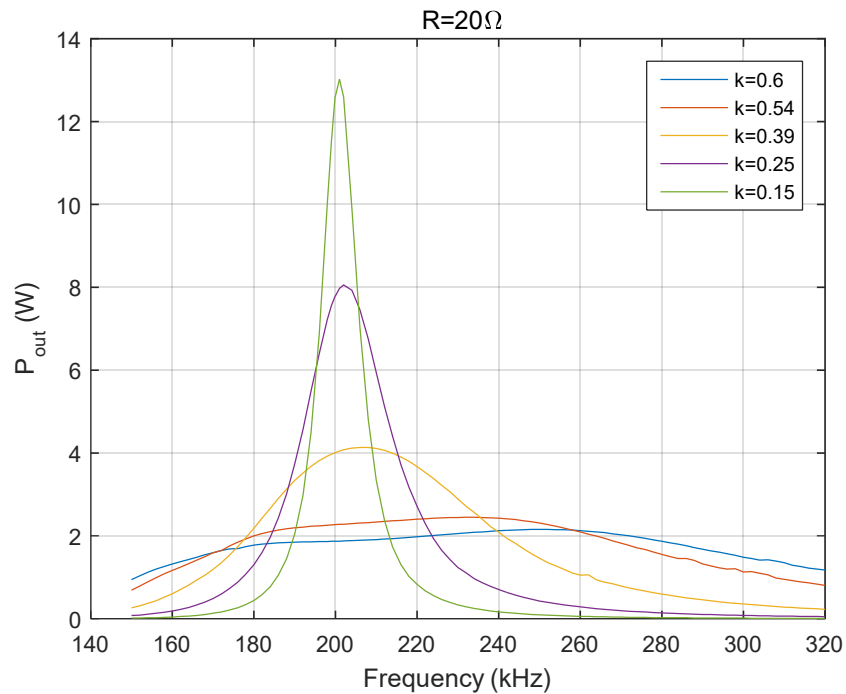
R=20 Ω:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



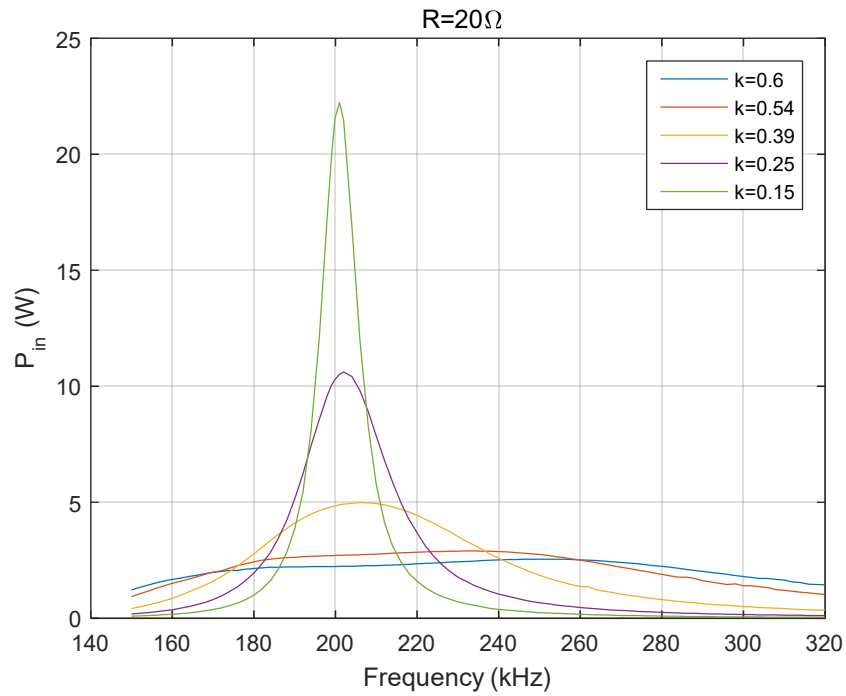
Σχήμα 4.37: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



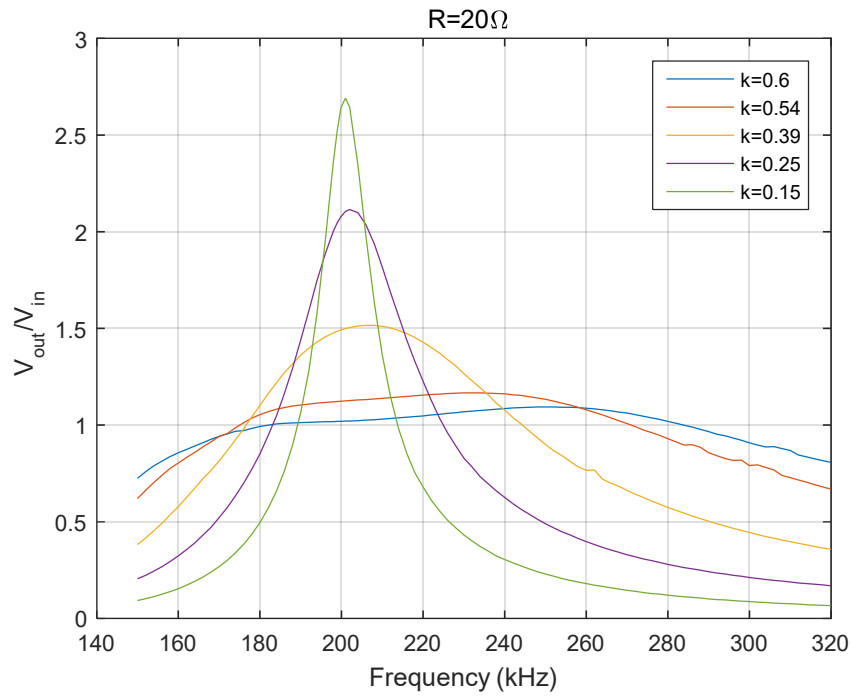
Σχήμα 4.38: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.39: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

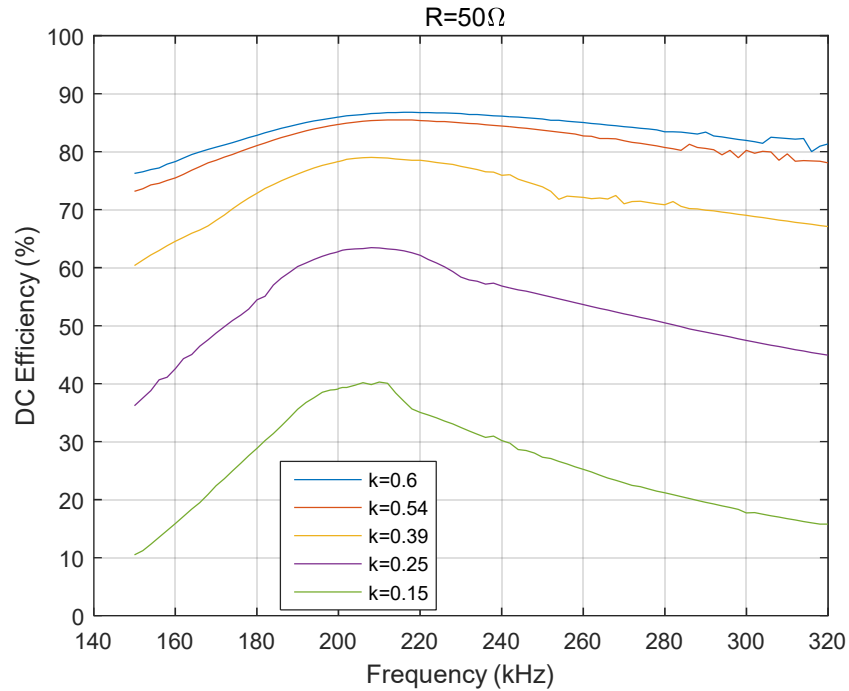
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.40: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

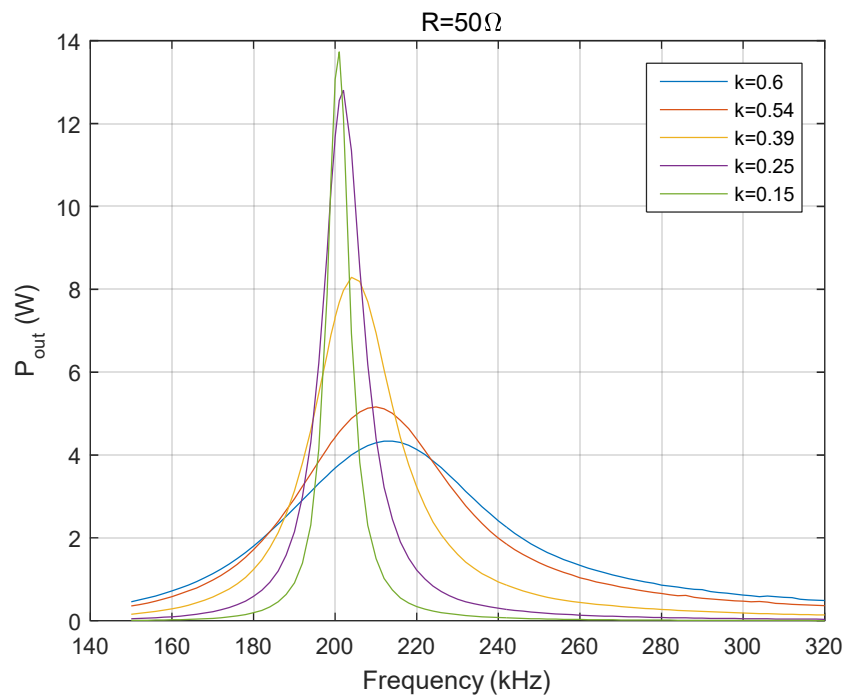
R=50 Ω:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



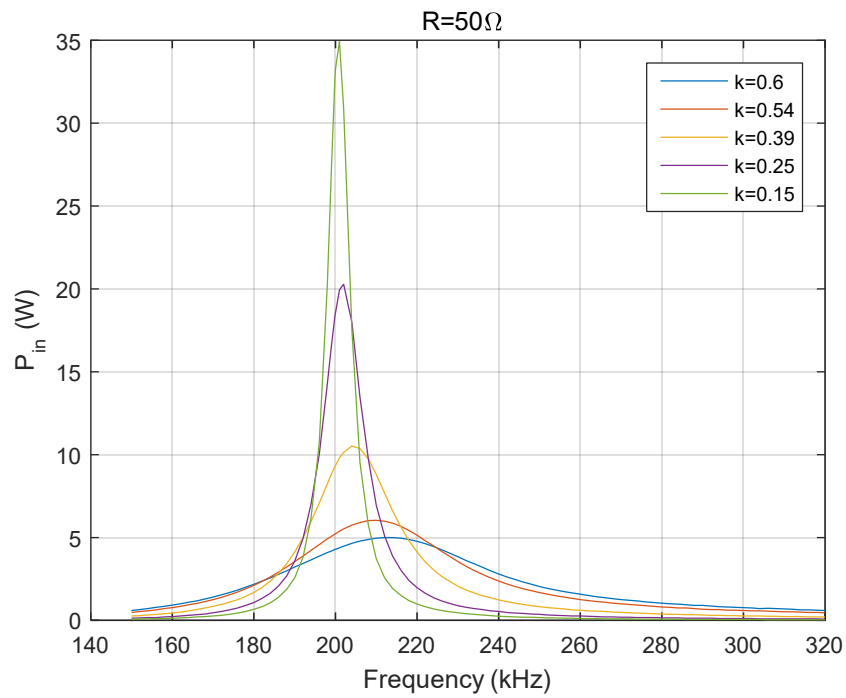
Σχήμα 4.41: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



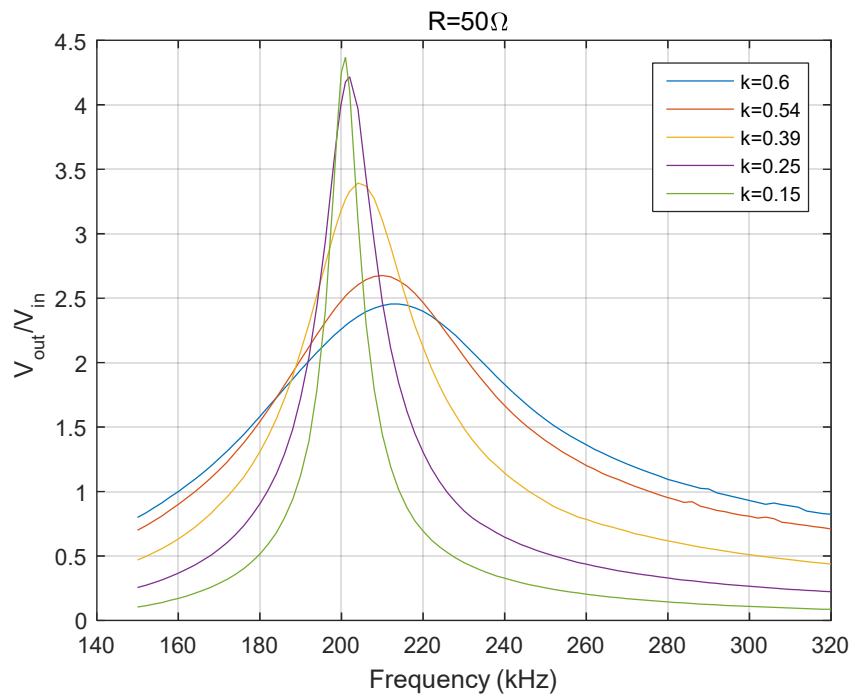
Σχήμα 4.42: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.43: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.44: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Με βάση τα παραπάνω σχήματα, είναι πιο ευκρινές το γεγονός ότι σε ισχυρότερες συζεύξεις η απόδοση λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, και ειδικά με την αύξηση της αντίστασης φορτίου.

Ειδικότερα, για την πολύ μικρή τιμή αντίστασης φορτίου (4 Ω) στην ισχυρή σύζευξη ($k=0.6$) η απόδοση δεν είναι η μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις σύζευξης, αλλά αντίθετα, η μέγιστη απόδοση παρουσιάζεται για τις μικρότερες τιμές του συντελεστή σύζευξης ($k=0.25$, $k=0.15$) και αυτό διότι σε αυτές τις περιπτώσεις τα συντονιζόμενα κυκλώματα LC ταλαντώνονται πιο «ελεύθερα», μεταφέροντας μεγαλύτερα ποσά ισχύος. Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αναλογία της τιμής της τάσης προς το ρεύμα στο κύκλωμα του πρωτεύοντος, καθώς και από την αντίστοιχη ποσότητα ισχύος.

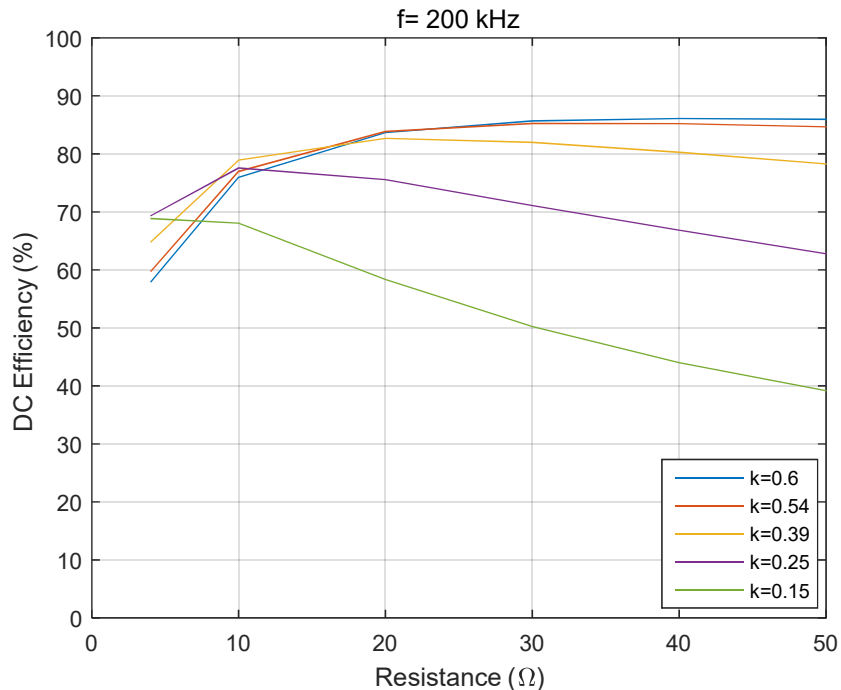
Έτσι, καθώς όπως παρατηρείται σε αυτή την περίπτωση αντίστασης φορτίου και ισχυρής σύζευξης τα ποσά ισχύος είναι χαμηλά, η απόδοση είναι και αυτή χαμηλής τιμής. Το γεγονός όμως ότι σε όλο το εύρος συχνοτήτων διατηρεί σταθερές σχετικά τιμές, υποδηλώνει ότι ο λόγος τάσης – ρεύματος διατηρεί υψηλές τιμές. Επίσης για την αντίσταση φορτίου των 4 Ω, παρατηρείται το φαινόμενο διακλάδωσης, το οποίο εξασθενεί όσο μειώνεται ο συντελεστής σύζευξης και παύει να εμφανίζεται όσο η αντίσταση φορτίου αυξάνεται.

Επιπλέον, με την αύξηση της αντίστασης φορτίου παρατηρείται αύξηση της ισχύος και του κέρδους τάσης, σε συχνότητες κοντά στα 200 kHz και μείωση στις πολύ μεγαλύτερες και πολύ μικρότερες από αυτήν, καθώς όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη περίπτωση, οι καμπύλες ισχύος συγκλίνουν προς την κεντρική συχνότητα – συχνότητα συντονισμού όσο η τιμή της αντίστασης φορτίου αυξάνεται, αλλά και όσο η τιμή του συντελεστή σύζευξης μειώνεται.

Μεταβλητή αντίσταση φορτίου, μεταβλητός συντελεστής σύζευξης – Σταθερή συχνότητα λειτουργίας :

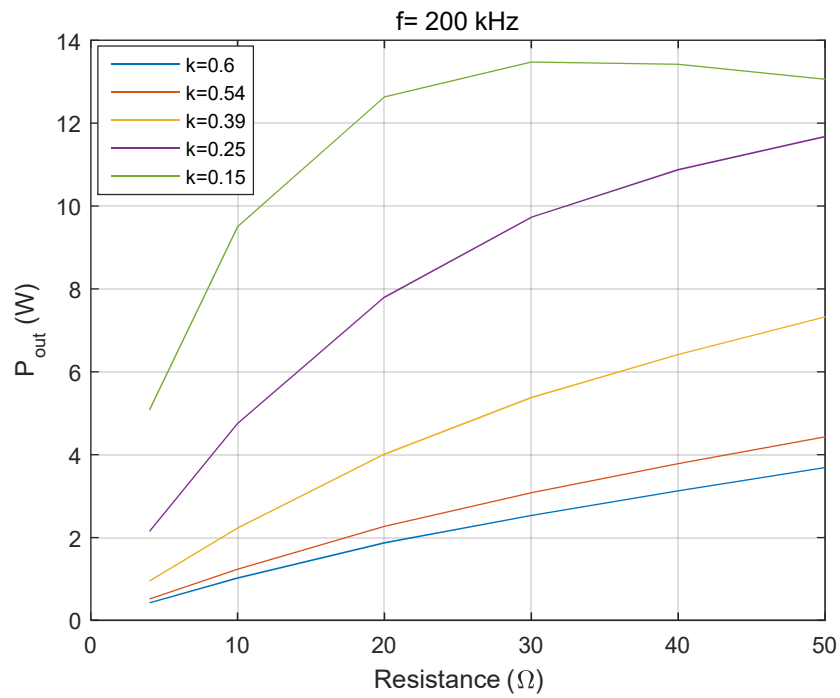
f=200 kHz:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



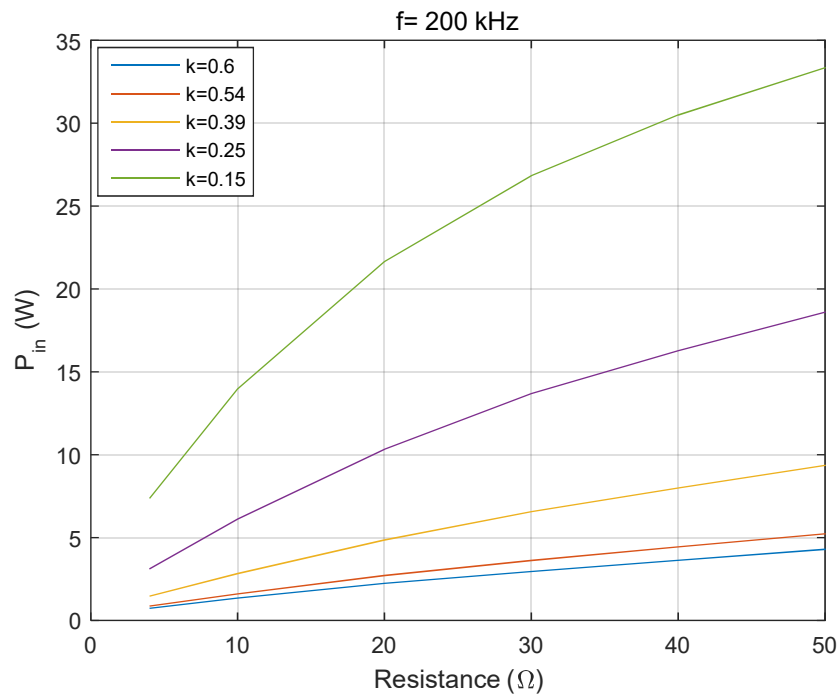
Σχήμα 4.45: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



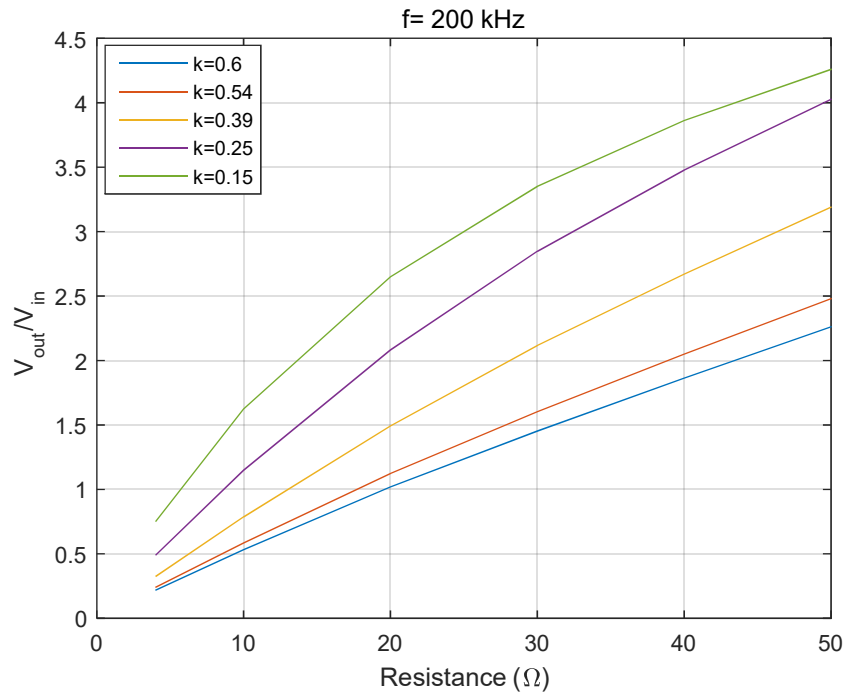
Σχήμα 4.46: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.47: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.48: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

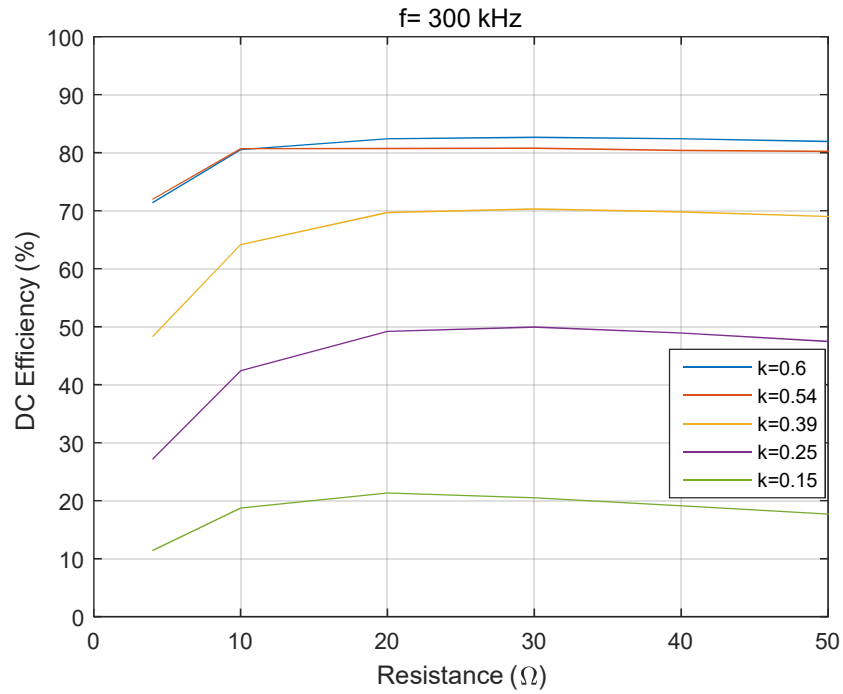
Σύμφωνα με τα παραπάνω σχήματα για την λειτουργία του συστήματος στην συχνότητα συντονισμού, διαπιστώνονται και επιβεβαιώνονται εμφανέστερα τα πορίσματα των προηγούμενων περιπτώσεων, δηλαδή πώς τα ποσά ισχύος και η τάση στην αντίσταση φορτίου αυξάνονται με την αύξηση της τιμής της αντίστασης φορτίου, αλλά και όταν μειώνεται ο συντελεστής σύζευξης.

Σχετικά με την απόδοση, στις χαμηλές τιμές αντίστασης φορτίου (4 Ω , 10 Ω) οι μεγαλύτερες τιμές δεν παρατηρούνται στην καλύτερη σύζευξη, αλλά σε ασθενέστερες, και αυτό διότι τα μεταφερόμενα ποσά ισχύος στην περίπτωση ισχυρότερης σύζευξης με χαμηλή αντίσταση φορτίου είναι αρκετά χαμηλά σε σχέση με τον λόγο τάσης και ρεύματος πρωτεύοντος.

Όσο όμως αυξάνεται η τιμή της αντίστασης φορτίου, τόσο φαίνεται το πόσο σημαντική είναι η καλή σύζευξη προκειμένου να επιτευχθεί αποδοτικότερη μεταφορά ισχύος, καθώς έτσι αυξάνεται το ποσό ισχύος που μεταφέρεται ενώ ταυτόχρονα σε συνθήκες ισχυρής σύζευξης ο λόγος της τάσης προς το ρεύμα πρωτεύοντος παραμένει υψηλός. Στις ασθενείς συζεύξεις προκαλούνται μεγάλες απώλειες στις παρασιτικές αντιστάσεις του κυκλώματος πρωτεύοντος λόγω του υψηλής τιμής ρεύματος που το διαρρέει, γεγονός που εξηγεί τις χαμηλές τιμές απόδοσης.

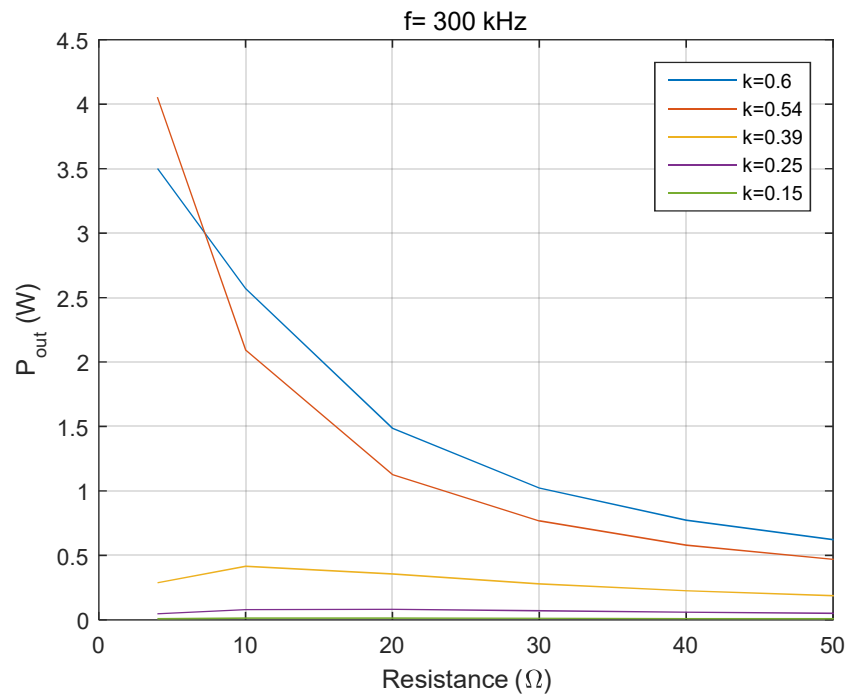
f=300 kHz:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



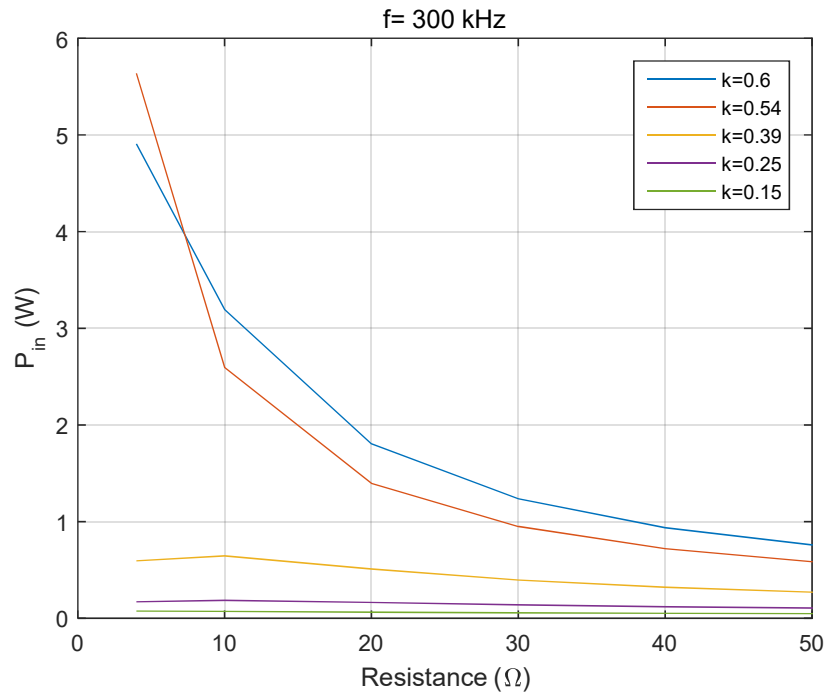
Σχήμα 4.49: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς εισόδου (P_{out}):



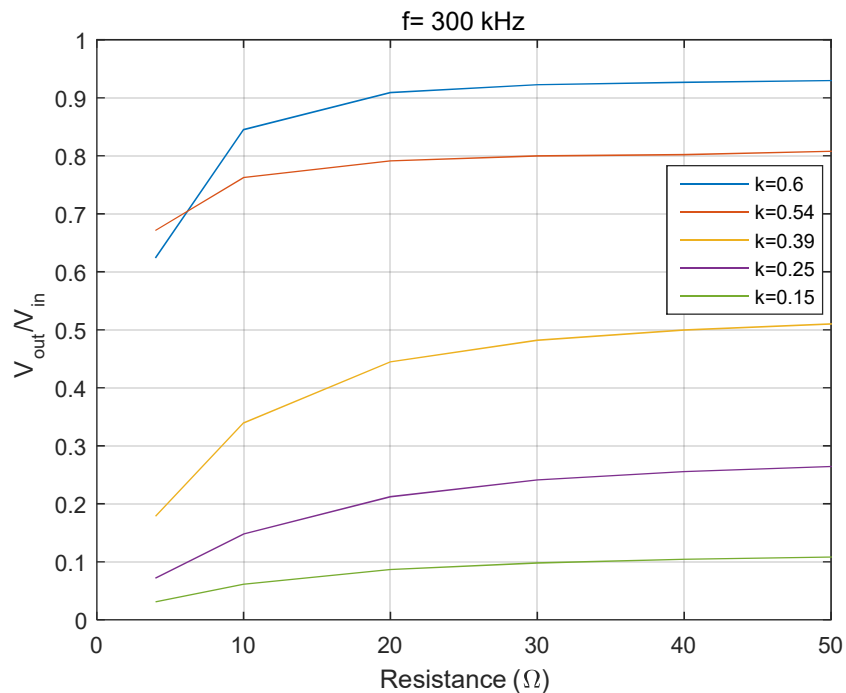
Σχήμα 4.50: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.51: Ισχύς εξόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.52: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Σε μία συχνότητα αρκετά μεγαλύτερη από την συχνότητα συντονισμού, παρατηρείται πως το σύστημα έχει διαφορετική συμπεριφορά. Η ισχύς που μεταφέρεται, όπως είναι λογικό κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα και μειώνεται ιδιαίτερα όσο αυξάνεται η τιμή της αντίστασης φορτίου και

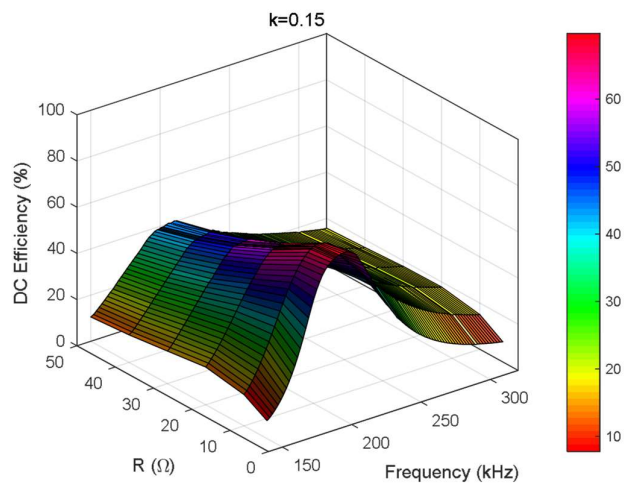
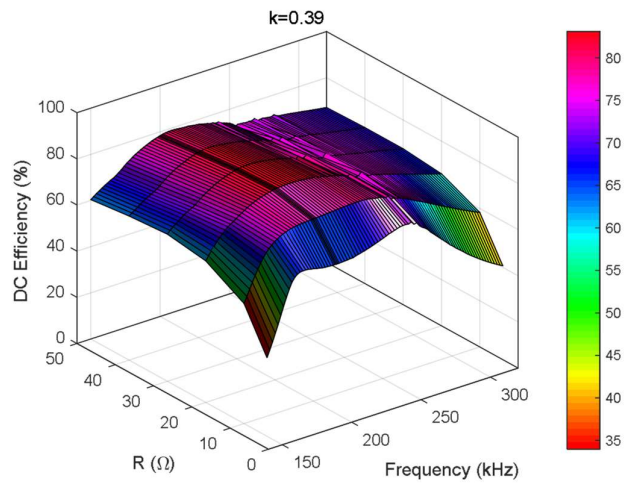
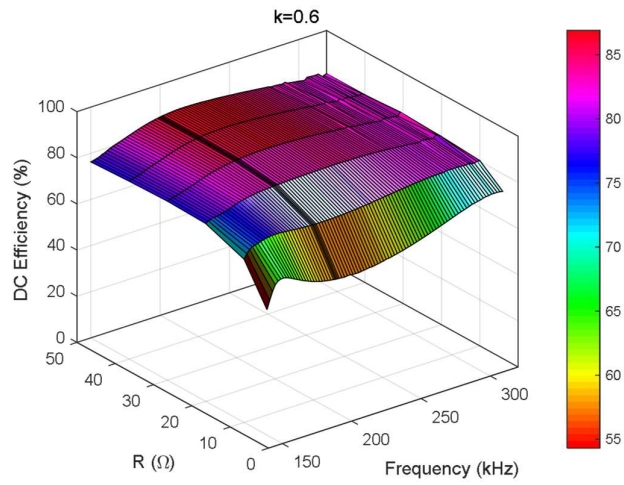
μειώνεται η τιμή του συντελεστή σύζευξης. Αξιοσημείωτο είναι όμως, ότι για ισχυρή σύζευξη και χαμηλές τιμές αντίστασης φορτίου (4Ω , 10Ω), η ισχύς είναι πολύ μεγαλύτερη. Αντίστοιχα, η απόδοση και η τάση εξόδου λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή σύζευξης.

Τα παραπάνω υφίστανται διότι στις συχνότητες που είναι πολύ υψηλότερες από την συχνότητα συντονισμού, για μικρές τιμές αντίστασης φορτίου και ισχυρή σύζευξη λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της διακλάδωσης με αποτέλεσμα η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος πρωτεύοντος να είναι σχεδόν μηδενική και συνεπώς να μεταφέρονται μεγαλύτερα ποσά ισχύος. Αντίθετα, σε μεγαλύτερες τιμές φορτίων και ασθενέστερο συντελεστή σύζευξης, το φαινόμενο διακλάδωσης παύει να ισχύει και οι καμπύλες ισχύος συγκλίνουν προς την συχνότητα συντονισμού, με αποτέλεσμα μικρότερες τάσεις στην έξοδο και μικρότερες αποδόσεις.

Στα παρακάτω σχήματα, απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα μεγέθη που μελετήθηκαν στις παραπάνω περιπτώσεις, για τις ίδιες τιμές παραμέτρων, με σκοπό την πλήρη παρουσίαση και κατανόηση της συμπεριφοράς τους.

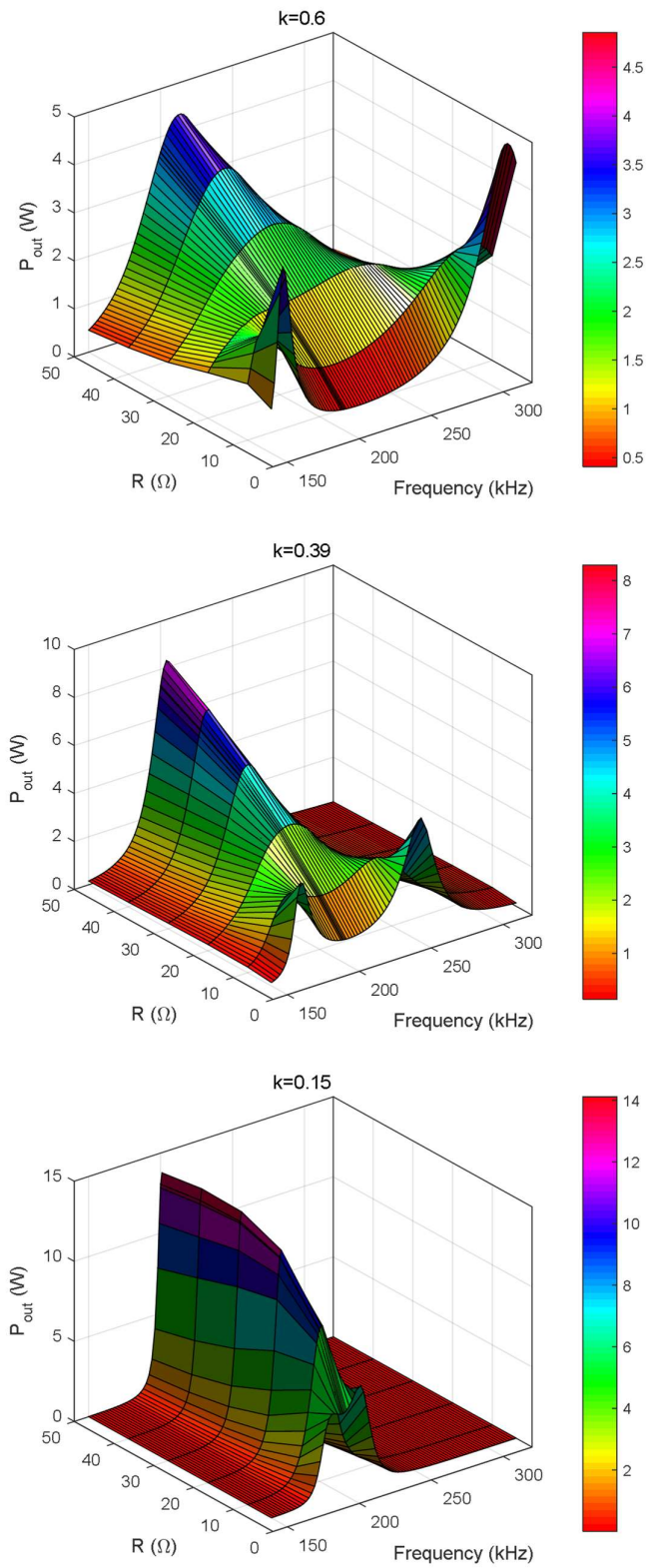
Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας, μεταβλητή αντίσταση φορτίου – Σταθερός συντελεστής σύζευξης k:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



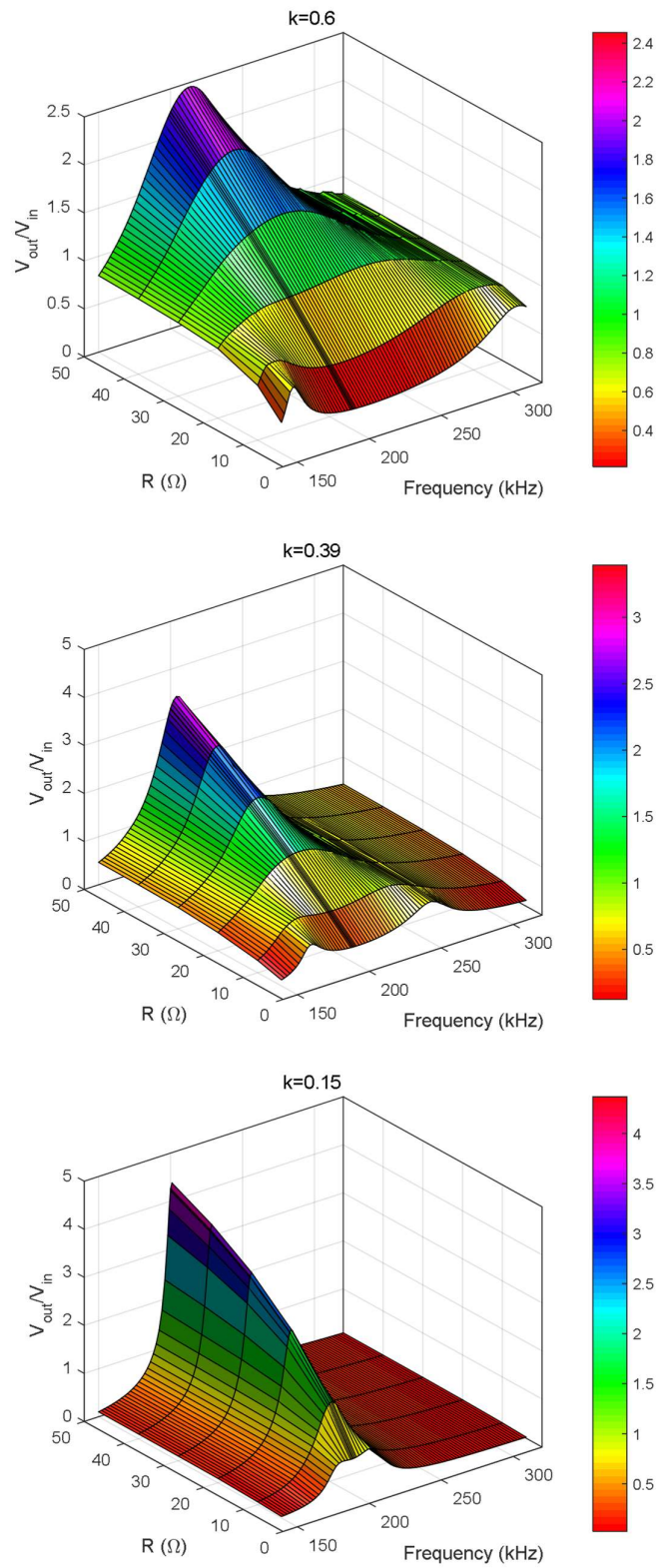
Σχήμα 4.53: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



Σχήμα 4.54: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

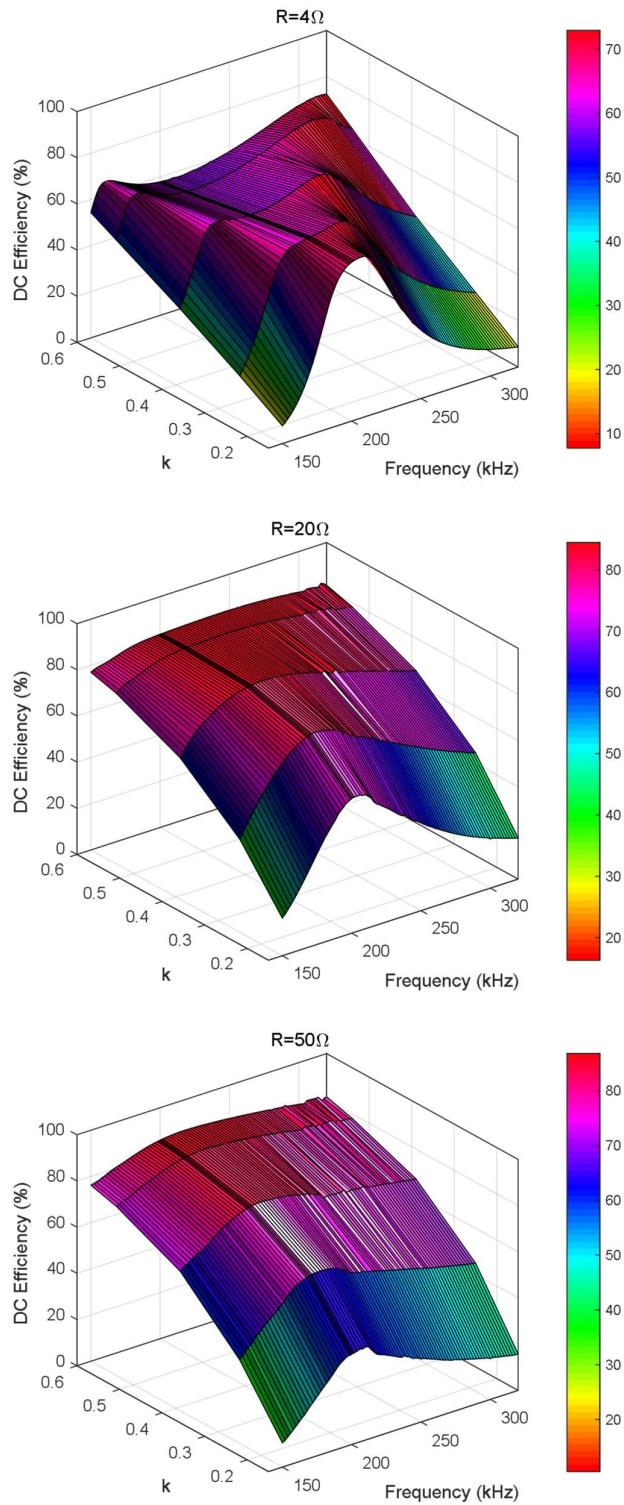
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.55: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

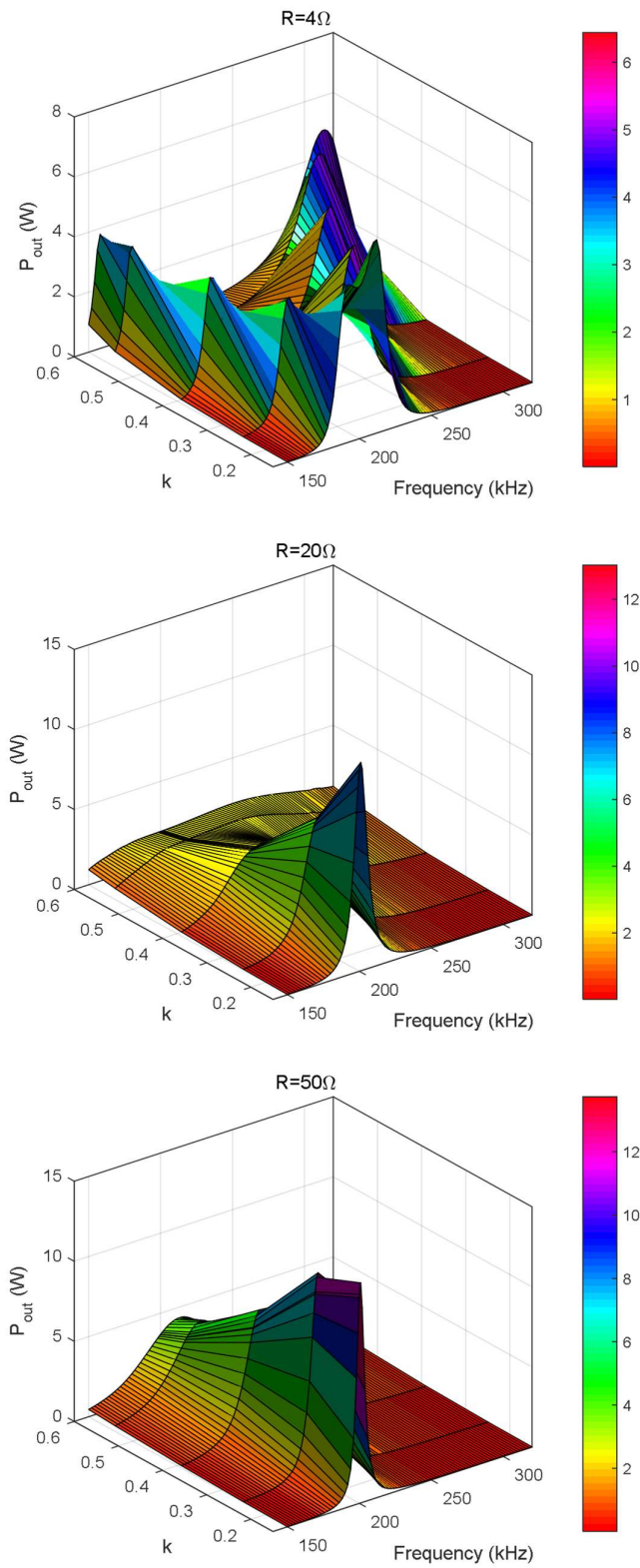
Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας, μεταβλητός συντελεστή σύζευξης – Σταθερή αντίσταση φορτίου:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



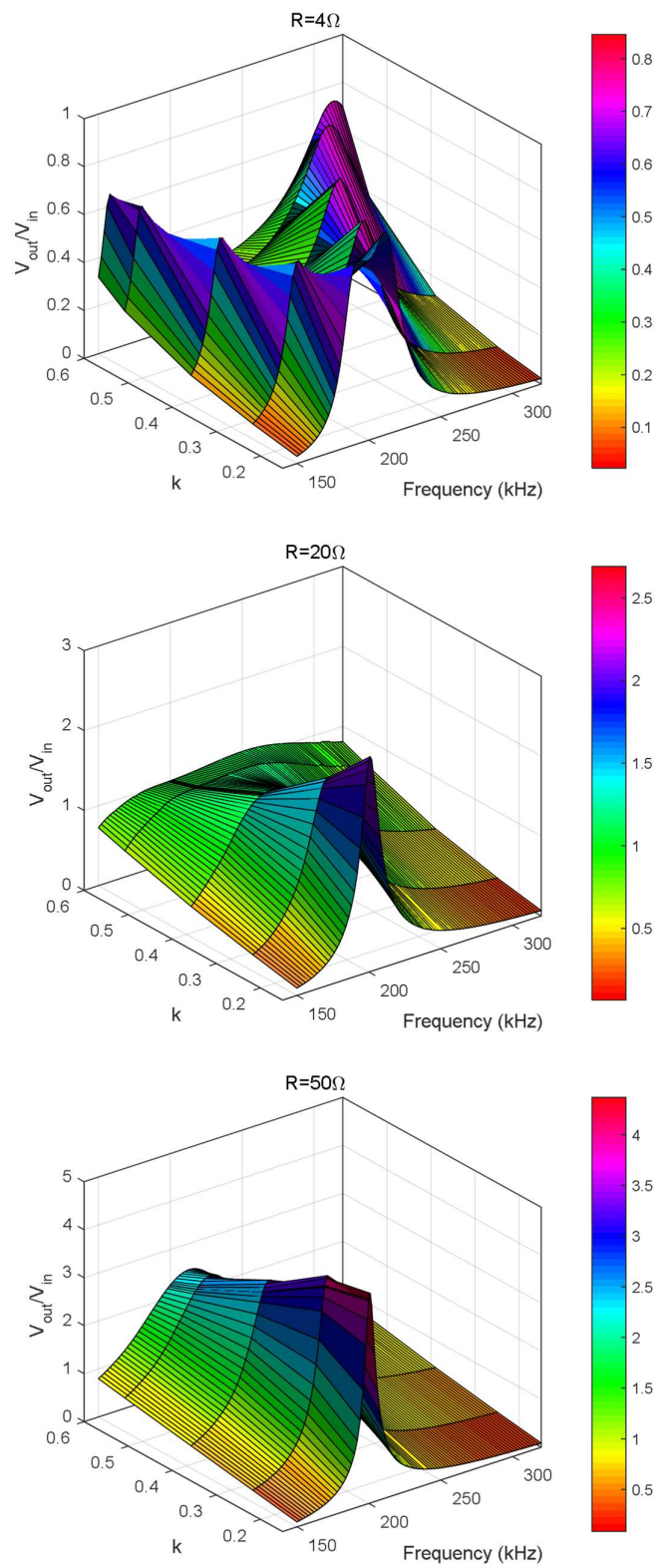
Σχήμα 4.56: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



Σχήμα 4.57: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

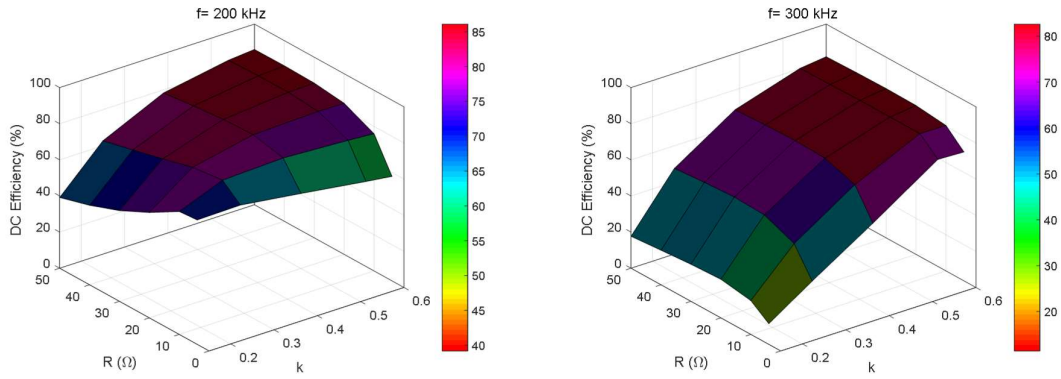
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.58: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

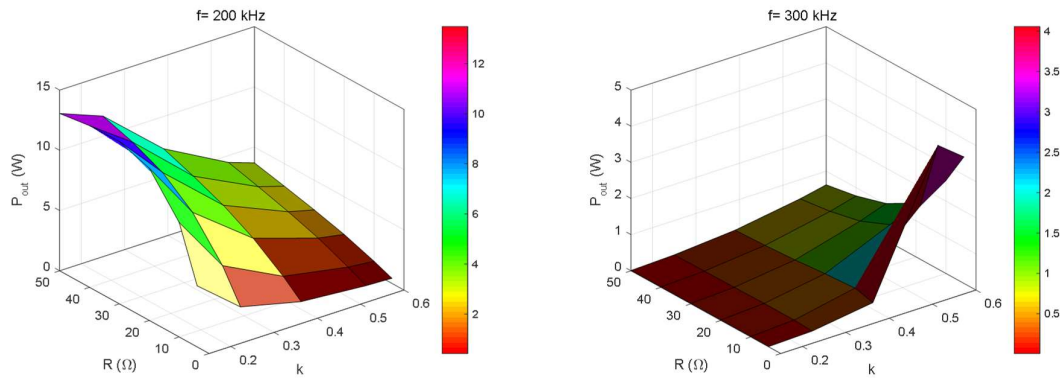
Μεταβλητή αντίσταση φορτίου, μεταβλητός συντελεστή σύζευξης – Σταθερή συχνότητα λειτουργίας :

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



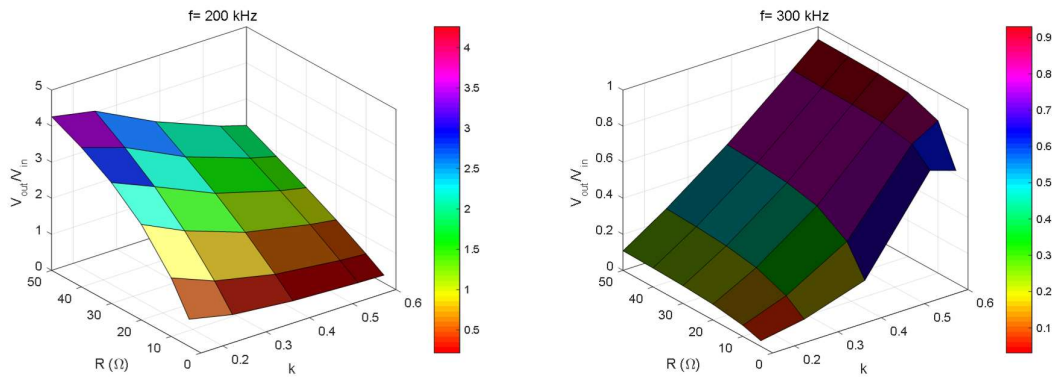
Σχήμα 4.59: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



Σχήμα 4.60: εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

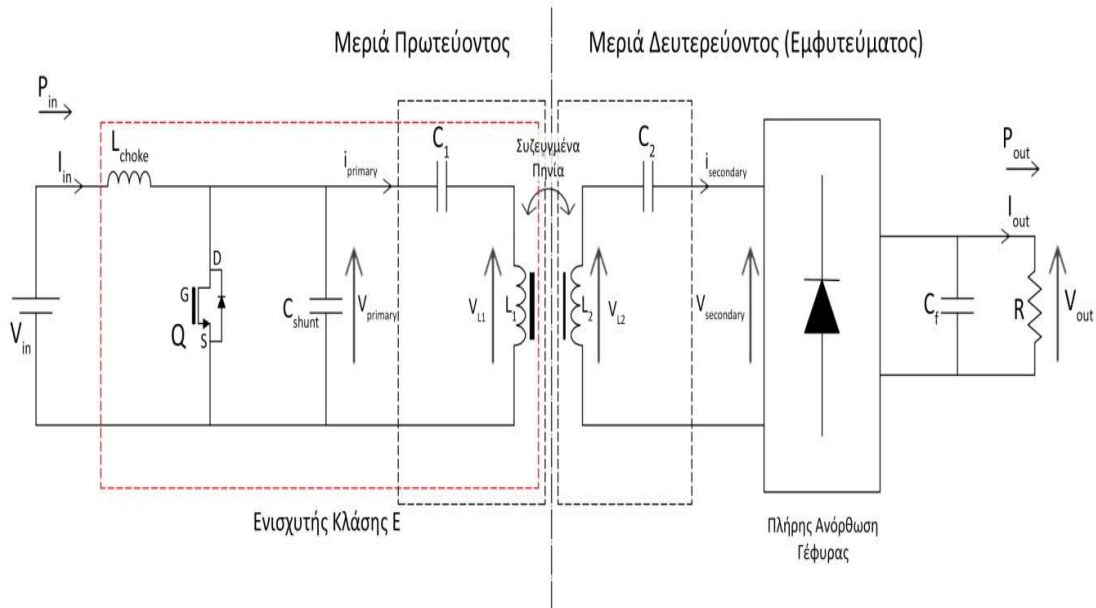
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.61: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

4.2: Προσομοίωση επαγωγικού φορτιστή με Ενισχυτή Κλάσης E

Ένα κύκλωμα συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση ενισχυτή κλάσης E και αντιστάθμιση σειράς - σειράς, όπου αναγράφονται όλα τα βασικά μεγέθη του παρατίθεται στο σχήμα 4.62:



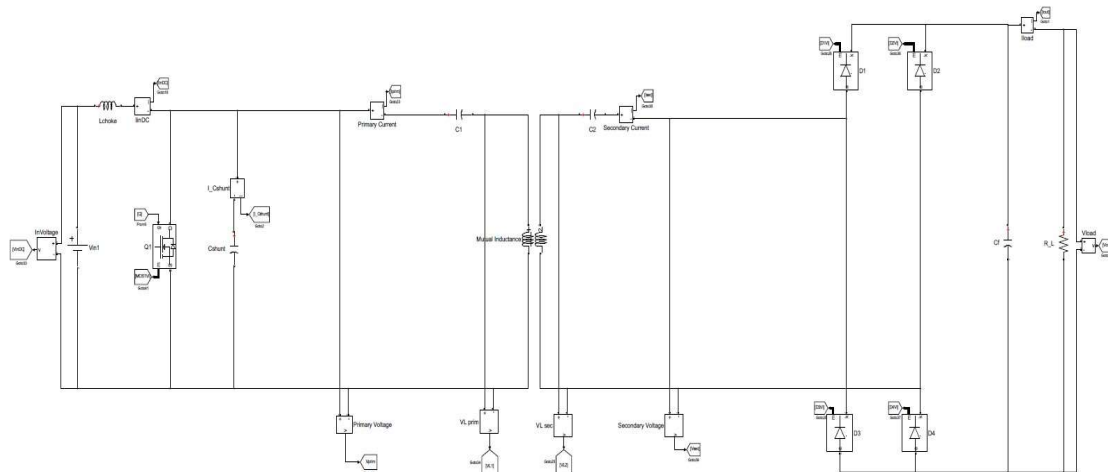
Σχήμα 4.62: Κύκλωμα συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση ενισχυτή κλάσης E και αντιστάθμιση σειράς – σειράς.

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι τιμές των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, και στο σχήμα 4.63 παρουσιάζεται το κύκλωμα προσομοίωσης της διάταξης στο Simulink.

Η πτώση τάσης στις διόδους του ανορθωτή στην έξοδο είναι ίση με 0.4 V.

V _{in}	L _{choke}	C _{shunt}	L _p , L _s	C _p , C _s	C _f
6V	94μH	15nF	20μH	80nF, 31.7nF	220μF

Πίνακας 4.4 : Τιμές προσομοίωσης συστήματος με χρήση ενισχυτή κλάσης E στο Simulink.



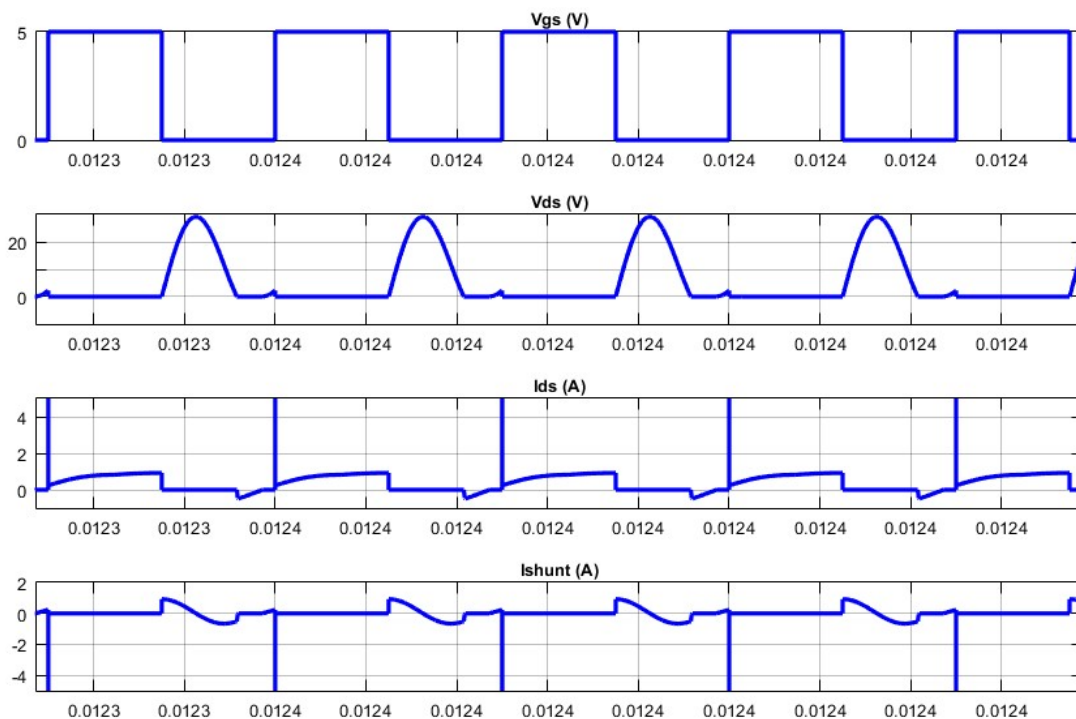
Σχήμα 4.63: Κύκλωμα προσομοίωσης συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος με χρήση ενισχυτή κλάσης E και αντιστάθμιση σειράς - σειράς στο Simulink.

4.2.1: Προσομοίωση με σταθερές συνθήκες σύζευξης, συχνότητας και αντίστασης φορτίου

Η προσομοίωση του κυκλώματος, πραγματοποιείται για σταθερή συχνότητα, ίση με 200 kHz, συντελεστή σύζευξης ίσο με 0.39 και αντίσταση φορτίου ίση με 10 Ω.

Βασικές κυματομορφές:

Στο σχήμα 4.64 παρουσιάζονται ο παλμός που οδηγεί το MOSFET και η τάση και το ρεύμα αυτού, καθώς και το ρεύμα που διαρρέει τον παράλληλο πυκνωτή.

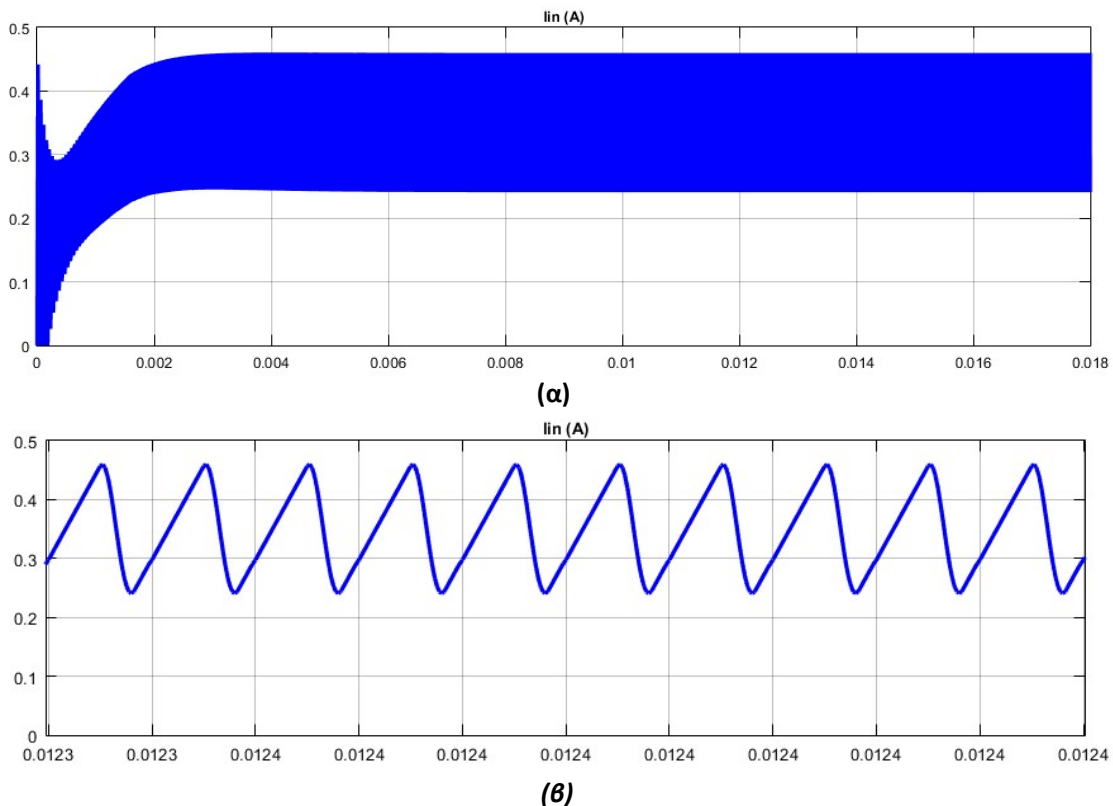


Σχήμα 4.64: Βασικές κυματομορφές στοιχείων Ενισχυτή Κλάσης E.

Παρατηρείται ότι ενώ η τάση του διακόπτη μηδενίζεται, άγει η δίοδος που είναι παράλληλα συνδεδεμένη μαζί του, έτσι ώστε η τάση του διακόπτη να μη λάβει αρνητικές τιμές, και στην συνέχεια αποκτά ξανά θετική τιμή, μεταβαίνοντας εν τέλει σε κατάσταση αγωγής με μη μηδενική τάση. Η περίπτωση αυτή αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.2.2 και είναι μία κατάσταση κατά την οποία οι απώλειες αυξάνονται όχι μόνο λόγω μη μηδενικής τάσης κατά την αγωγή του διακόπτη, αλλά και λόγω των απωλειών αγωγής της διόδου.

Η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του διακόπτη, όπως ήταν αναμενόμενο είναι αρκετά υψηλή και αγγίζει τα 30 V, (δηλαδή 5 φορές μεγαλύτερη της τάσης τροφοδοσίας). Επίσης, παρατηρείται η εμφάνιση αιχμών ρεύματος πολύ υψηλής τιμής (μεγαλύτερης των 10 A), όταν ο διακόπτης μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι ο διακόπτης δεν λειτουργεί σε ονομαστικές συνθήκες σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή με ZVS.

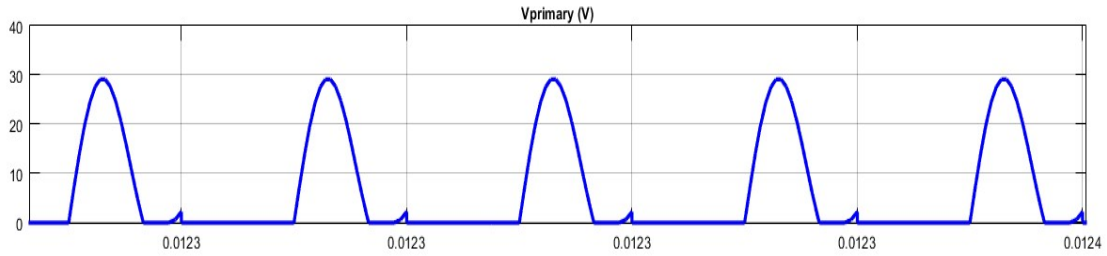
Για το ρεύμα εισόδου της διάταξης, δηλαδή το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο (I_{Choke}), λαμβάνεται η εξής κυματομορφή:



Σχήμα 4.65: Ρεύμα εισόδου (α) στη στη μεταβατική και (β) στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

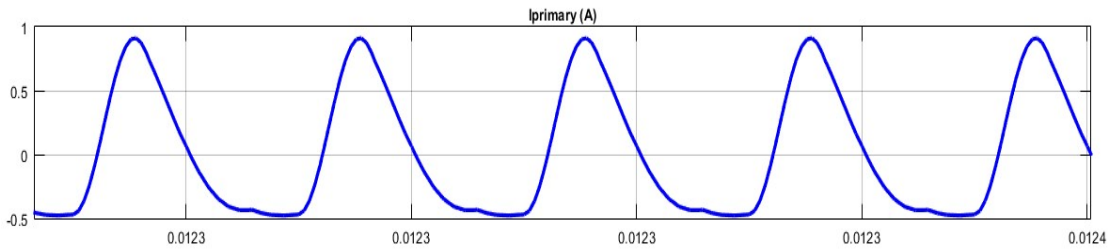
Το ρεύμα εισόδου δεν είναι απόλυτα συνεχές, καθώς οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ 0.25A - 0.45 A. Η κυμάτωση αυτή θα μπορούσε να ελαττωθεί περαιτέρω με την χρήση πηνίου μεγαλύτερης τιμής αυτεπαγωγής.

Η τάση εξόδου του ενισχυτή κλάσης E, η οποία είναι και η τάση που εφαρμόζεται στη μεριά του πρωτεύοντος του κυκλώματος συντονισμού ($V_{primary}$) είναι:



Σχήμα 4.66: Τάση πρωτεύοντος.

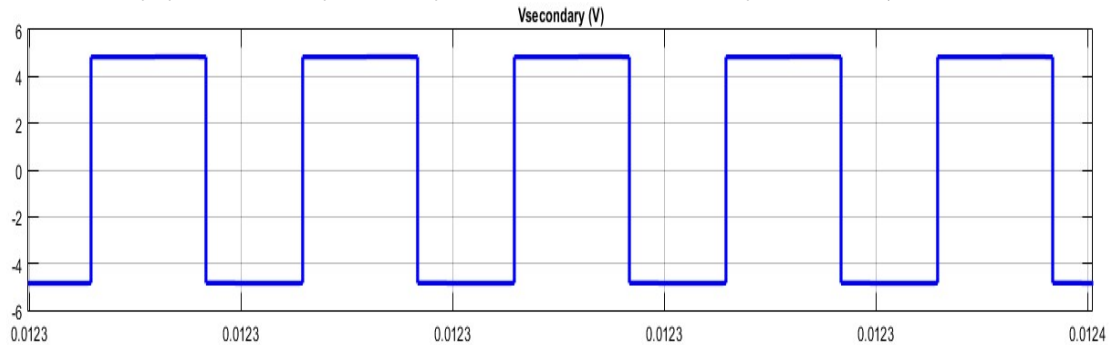
Για το ρεύμα εξόδου του ενισχυτή κλάσης E, δηλαδή το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον ($I_{primary}$), προκύπτει:



Σχήμα 4.67: Ρεύμα πρωτεύοντος.

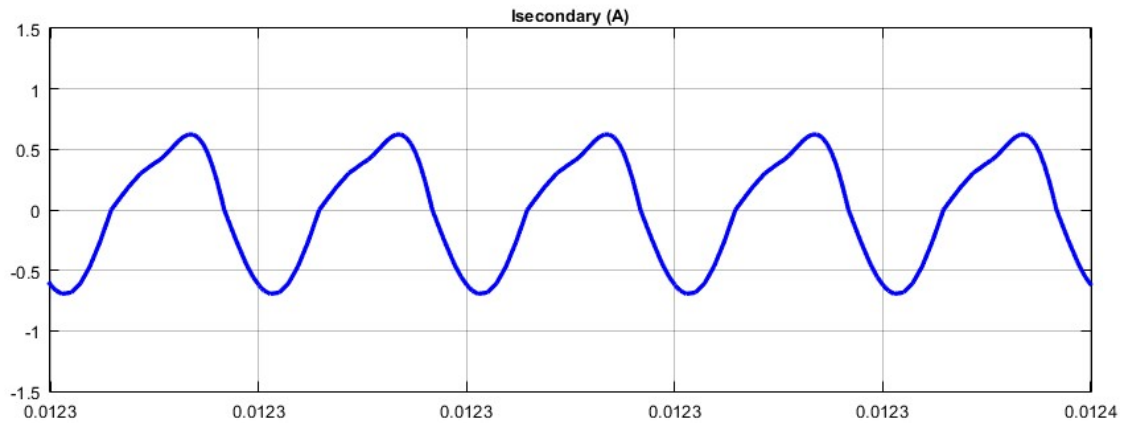
Παρατηρείται ότι το ρεύμα εξόδου δεν έχει την αναμενόμενη ημιτονοειδή μορφή, λόγω μη λειτουργίας σε ZVS. Για να ήταν η τάση που εφαρμόζεται στην μεριά του πρωτεύοντος εναλλασσόμενη μορφής, θα χρειαζόταν η παρουσία ακόμα ενός δικτύου LC εν σειρά πριν το πηνίο και τον πυκνωτή της επαγωγικής διάταξης, πράγμα που θα προσέδιδε σε πολυπλοκότητα και όγκο.

Η τάση στην μεριά του δευτερεύοντος μετά τον πυκνωτή συντονισμού ($V_{secondary}$) είναι:



Σχήμα 4.68: Τάση δευτερεύοντος.

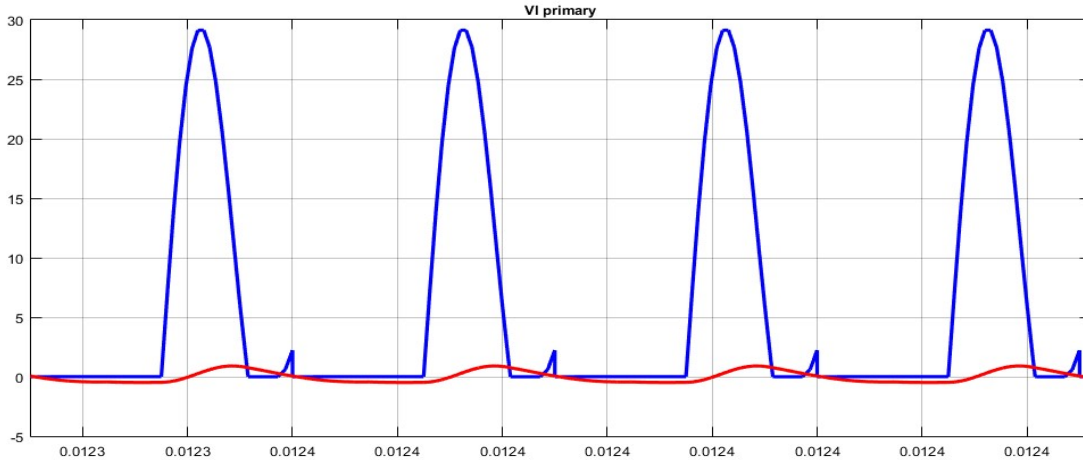
Για το ρεύμα που διαρρέει το δευτερεύον ($I_{\text{secondary}}$) λαμβάνεται η παρακάτω κυματομορφή:



Σχήμα 4.69: Ρεύμα δευτερεύοντος.

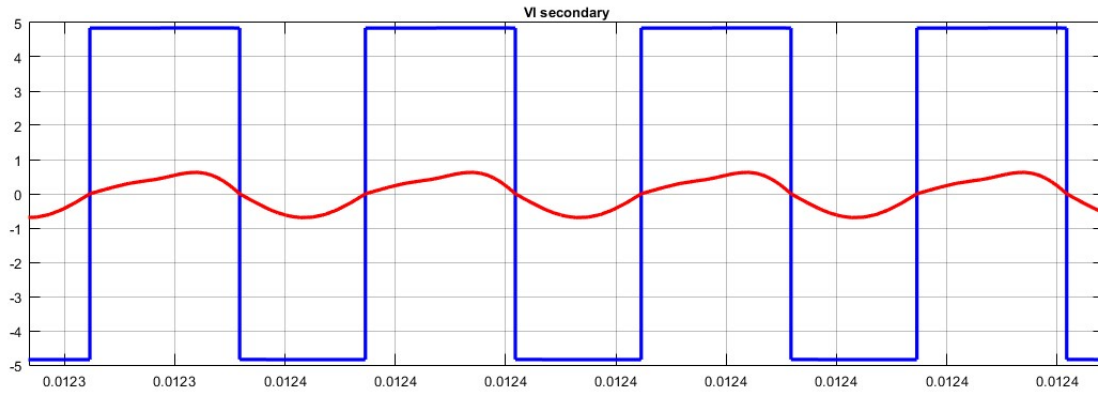
Η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος πρωτεύοντος μετράται ίση με 54.58° , ενώ μεταξύ τάσης και ρεύματος πρωτεύοντος ίση με 8.231° . Αυτό συμβαίνει, καθώς αφού ο πυκνωτής πρωτεύοντος δεν έχει την ίδια τιμή με του δευτερεύοντος (31.7nF), το πρωτεύον δε συντονίζεται στα 200kHz . Το ρεύμα στο δευτερεύον λαμβάνει περισσότερο ημιτονοειδή μορφή, αν και παρατηρείται η ύπαρξη κάποιων αρμονικών συνιστωσών, πράγμα λογικό, αφού το δευτερεύον επηρεάζεται από την διάταξη πλήρους ανόρθωσης και το φίλτρο πυκνωτή εξόδου. Αυτός είναι και ο λόγος που η τάση στο δευτερεύον είναι τετραγωνικής μορφής. Τα παραπάνω φαίνονται λεπτομερέστερα στα ακόλουθα σχήματα:

Τάση και ρεύμα πρωτεύοντος:



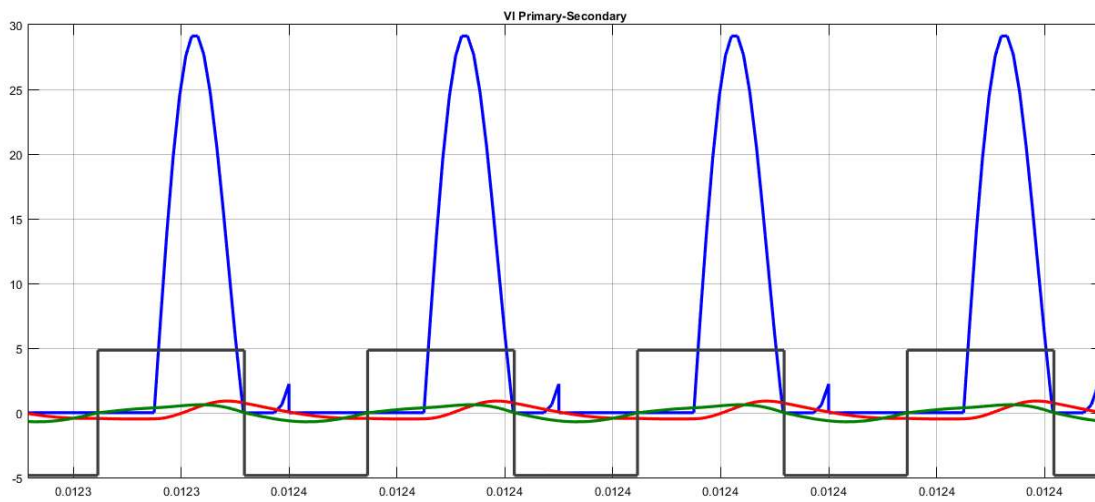
Σχήμα 4.70: Τάση (μπλε) και ρεύμα (κόκκινο) πρωτεύοντος.

Τάση και ρεύμα δευτερεύοντος:



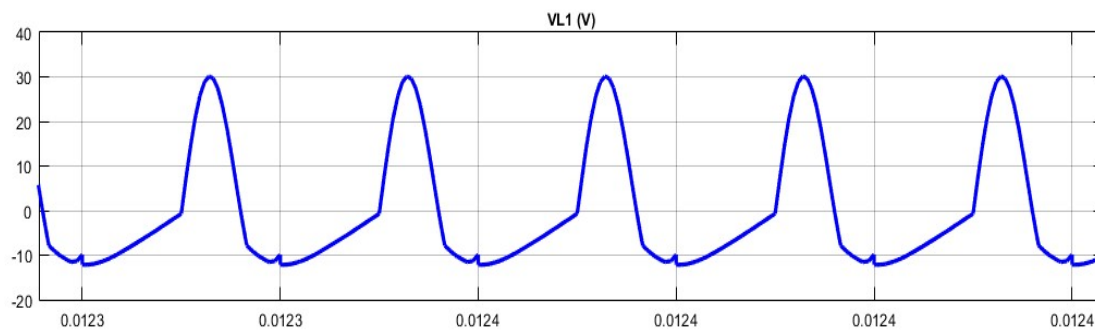
Σχήμα 4.71: Τάση (μπλε) και ρεύμα (κόκκινο) δευτερεύοντος.

Συγκεντρωτικά όλα τα μεγέθη των δύο τυλιγμάτων:



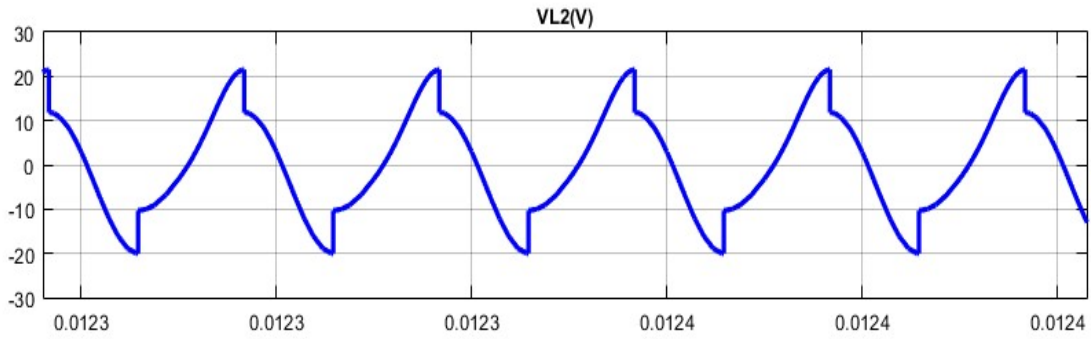
Σχήμα 4.72: Τάσεις και ρεύματα τυλιγμάτων. Με μπλε απεικονίζεται η τάση πρωτεύοντος, με κόκκινο το ρεύμα πρωτεύοντος, με μαύρο η τάση δευτερεύοντος και με πράσινο το ρεύμα δευτερεύοντος.

Η τάση που αποκτά το πηνίο του πρωτεύοντος (V_{L1}) είναι:



Σχήμα 4.73: Τάση στο πηνίο πρωτεύοντος.

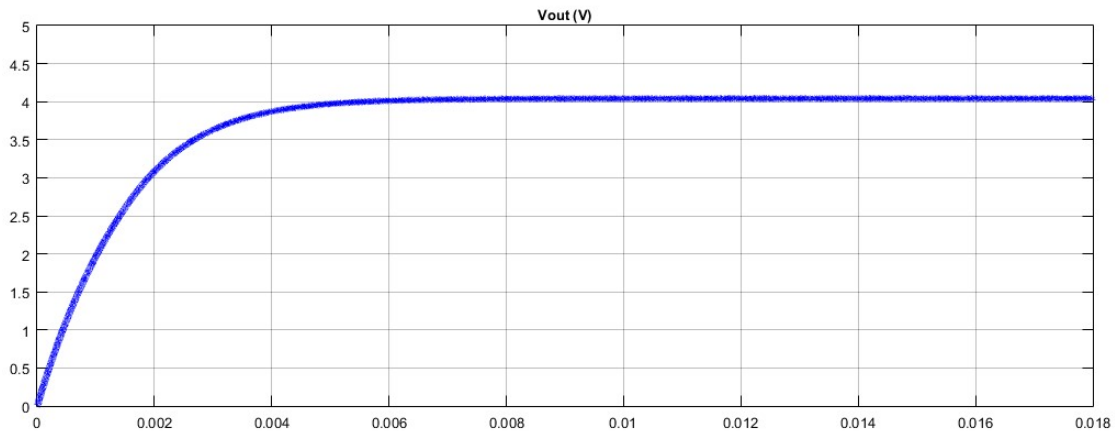
Ενώ η τάση που επαγεται στο πηνίο του δευτερεύοντος (V_{L2}):



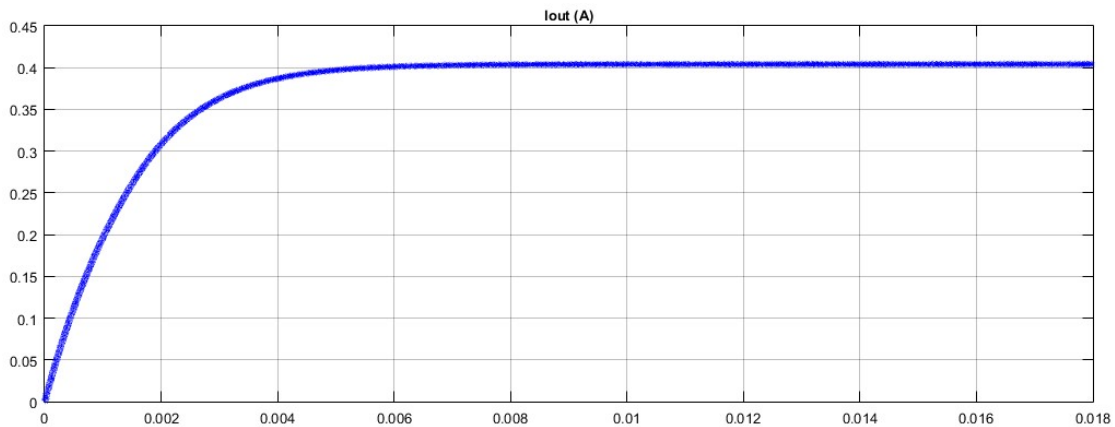
Σχήμα 4.74: Τάση στο πηνίο δευτερεύοντος.

Η τάση στο πηνίο πρωτεύοντος παρατηρείται ότι έχει την ίδια μορφή με την τάση εξόδου του ενισχυτή κλάσης E, με την μόνη διαφορά ότι λαμβάνει και αρνητικές τιμές λόγω της ηλεκτρικής ταλάντωσης. Από την άλλη μεριά, η τάση του πηνίου δευτερεύοντος είναι εναλλασσόμενης μορφής, αλλά έχει αρκετά μεγάλη παραμόρφωση, γεγονός που οφείλεται στο ότι το ρεύμα του δευτερεύοντος δεν είναι καθαρά ημιτονοειδούς μορφής, αλλά περιέχει αρμονικές συνιστώσες ($V_{L2}=j\omega L_2 i_{\text{secondary}}$).

Στο Σχήμα 4.75 απεικονίζεται η ανορθωμένη τάση εξόδου του δευτερεύοντος και στο Σχήμα 4.76 το ανορθωμένο ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος, τα οποία τροφοδοτούν την μπαταρία.



Σχήμα 4.75: Ανορθωμένη τάση εξόδου, V_{out} .



Σχήμα 4.76: Ανορθωμένο ρεύμα εξόδου, I_{out} .

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου μετράται ίση με 4.041V και η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου ίση με 0.4041 A.

Η απόδοση του συστήματος από την είσοδο του αντιστροφέα έως την ανορθωμένη έξοδο του δευτερεύοντος είναι:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\bar{V}_{out} \cdot \bar{I}_{out}}{\bar{V}_{in} \cdot \bar{I}_{in}} = \frac{4.041 \cdot 0.4041}{6 \cdot 0.3484} = \frac{1.633 \text{ W}}{2.131 \text{ W}} = 0.7695 = 76.95 \% \quad (4.2)$$

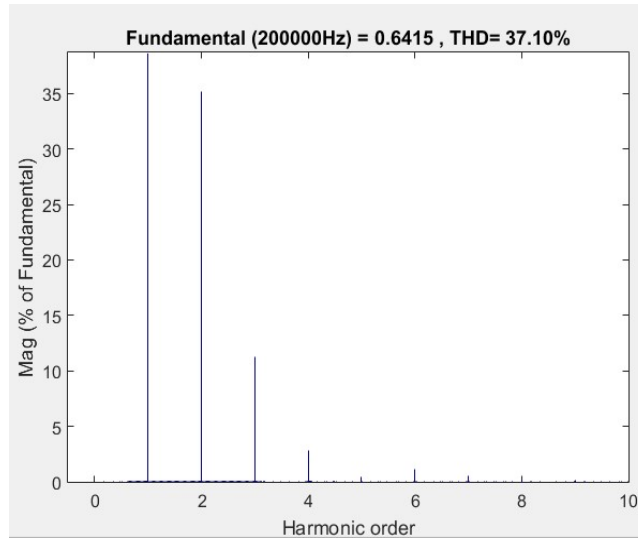
Παρατηρείται μία σχετικά ικανοποιητική απόδοση, αν ληφθεί υπ' όψη ότι εξετάζεται μία περίπτωση με χαμηλό συντελεστή σύζευξης και χαμηλό συντελεστή ποιότητας και λειτουργία σε συνθήκες όπου δεν επιτυγχάνεται το ιδανικό ZVS. Φυσικά, σημαντικό ρόλο παίζει και ότι το δευτερεύον βρίσκεται σε συντονισμό, γεγονός που συμβάλλει στην μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος.

Συν τοις άλλοις, στις ολικές απώλειες συνεισφέρουν οι βαθμίδες του αντιστροφέα και της ανορθωτικής διάταξης, το φίλτρο εξόδου της ανορθωτικής διάταξης, οι διακοπτικές απώλειες του MOSFET και η απώλεια αγωγής της παράλληλης διόδου του, καθώς και το γεγονός ότι η σύνδεση της κάθε βαθμίδας με μη γραμμικά στοιχεία επηρεάζει τον συντονισμό του κυκλώματος.

Αρμονική ανάλυση των ρευμάτων των τυλιγμάτων:

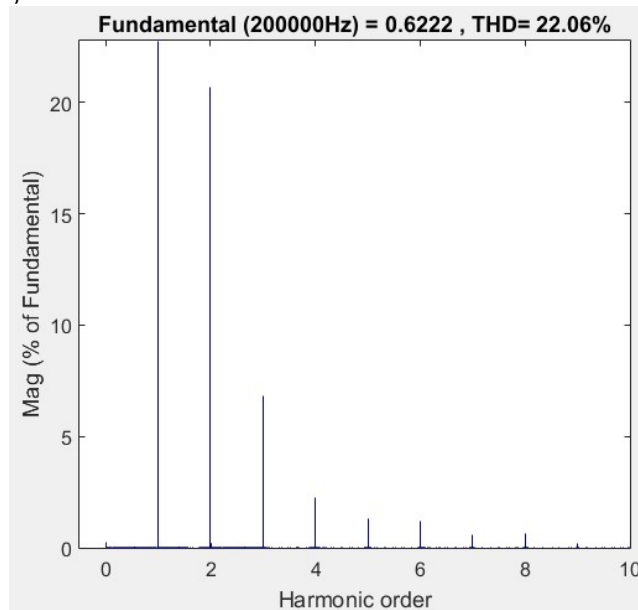
Παρακάτω παρουσιάζονται τα φάσματα συχνοτήτων καθώς και οι συντελεστές Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD%) των ρευμάτων των τυλιγμάτων:

Ρεύμα πρωτεύοντος:



Σχήμα 4.77: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος πρωτεύοντος.

Ρεύμα δευτερεύοντος:



Σχήμα 4.78: Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος δευτερεύοντος.

Από τα παραπάνω, λοιπόν, φαίνεται στην περίπτωση του ενισχυτή Κλάσης E, εάν δε λειτουργεί ακριβώς στις βέλτιστες συνθήκες, το αρμονικό περιεχόμενο είναι αρκετά υψηλό. Το γεγονός αυτό είναι ανεπιθύμητο, καθώς η παρουσία τους έχει αρνητικές επιδράσεις, ιδίως στην πλευρά του δευτερεύοντος όπου λόγω αρμονικών μπορεί να παρουσιασθεί αύξηση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων και κατ'επέκταση αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών του ασθενή.

4.2.2: Προσομοίωση με μεταβαλλόμενες συνθήκες σύζευξης, συχνότητας και αντίστασης φορτίου

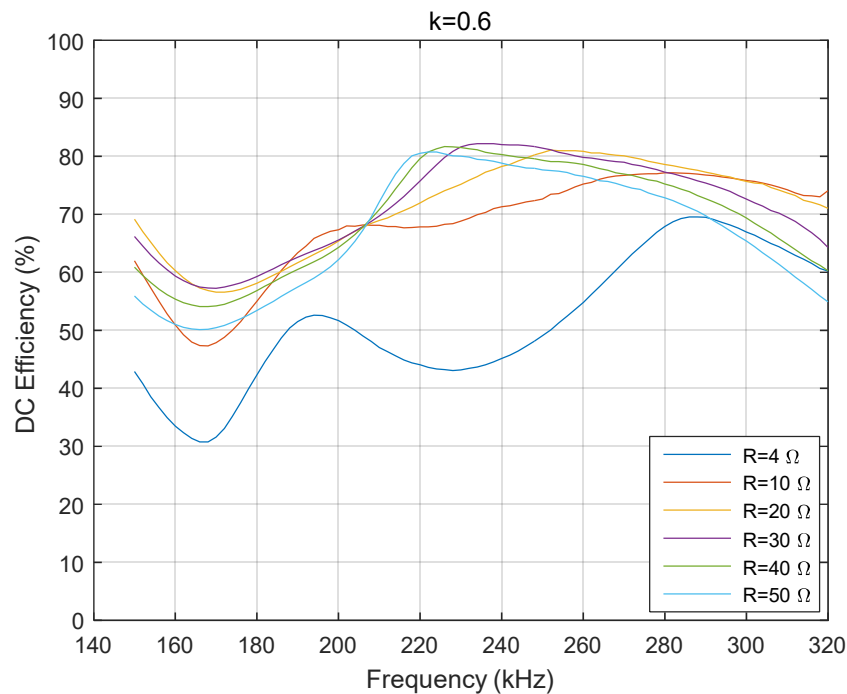
Σε αντιστοιχία με την ενότητα 4.1.2, πραγματοποιείται το ίδιο πλήθος παραμετρικών προσομοιώσεων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών για τις ίδιες περιπτώσεις και για τον Ενισχυτή Κλάσης E, για την μελέτη της συμπεριφοράς του σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Σε αυτή την περίπτωση, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του λογισμικού LTspice.

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας, μεταβλητή αντίσταση φορτίου – Σταθερός συντελεστής σύζευξης k:

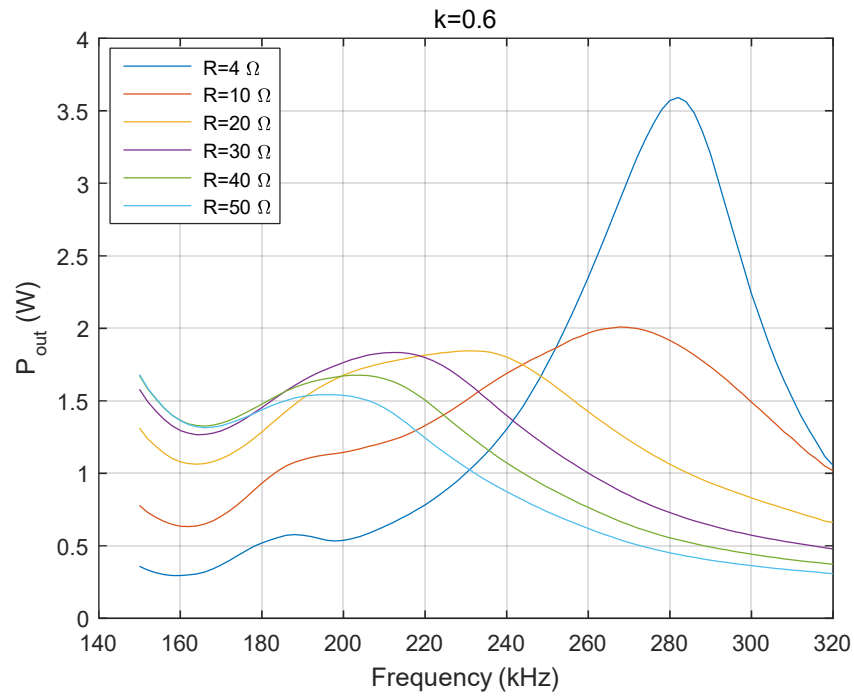
k=0.6:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



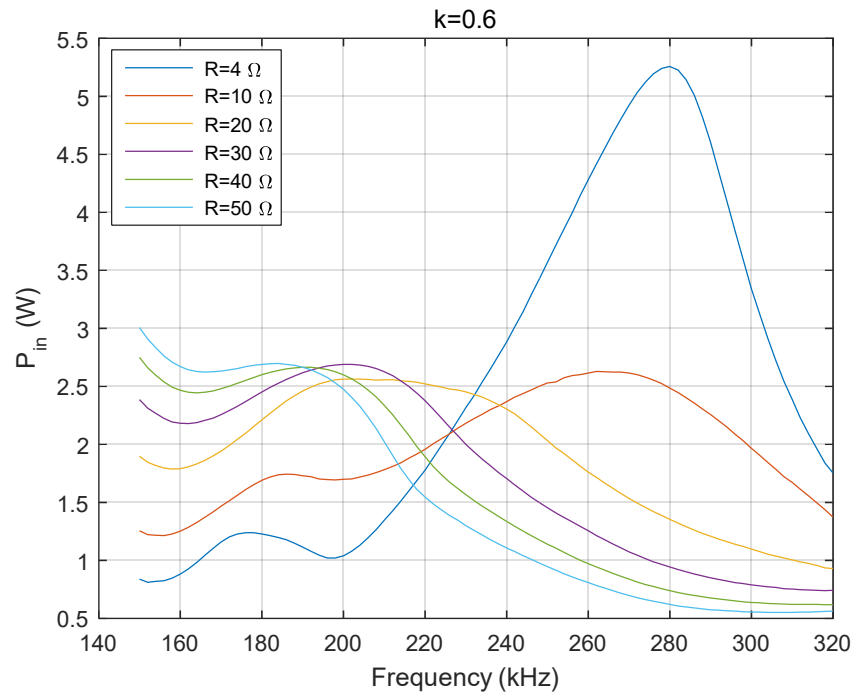
Σχήμα 4.79: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



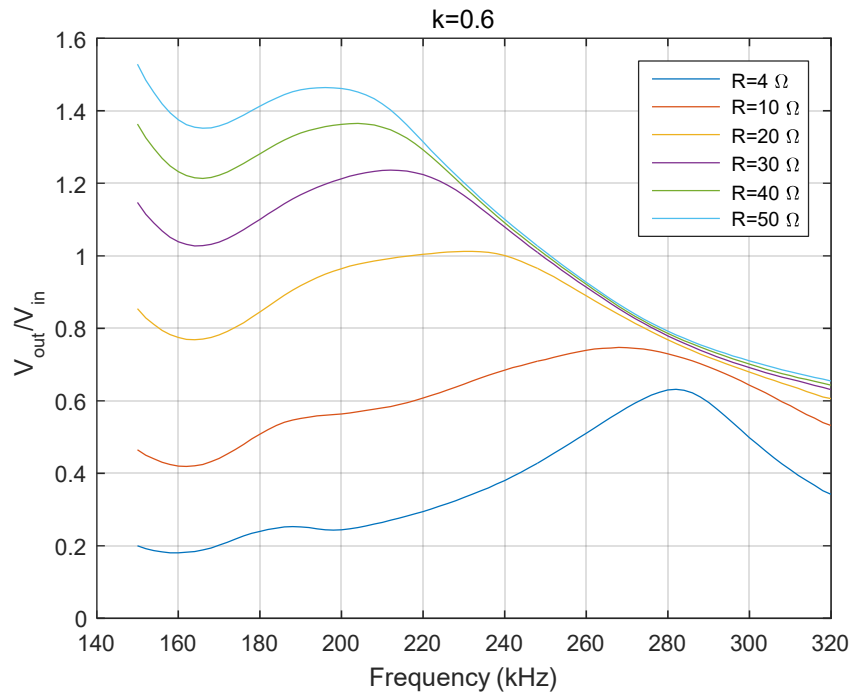
Σχήμα 4.80: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.81: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):

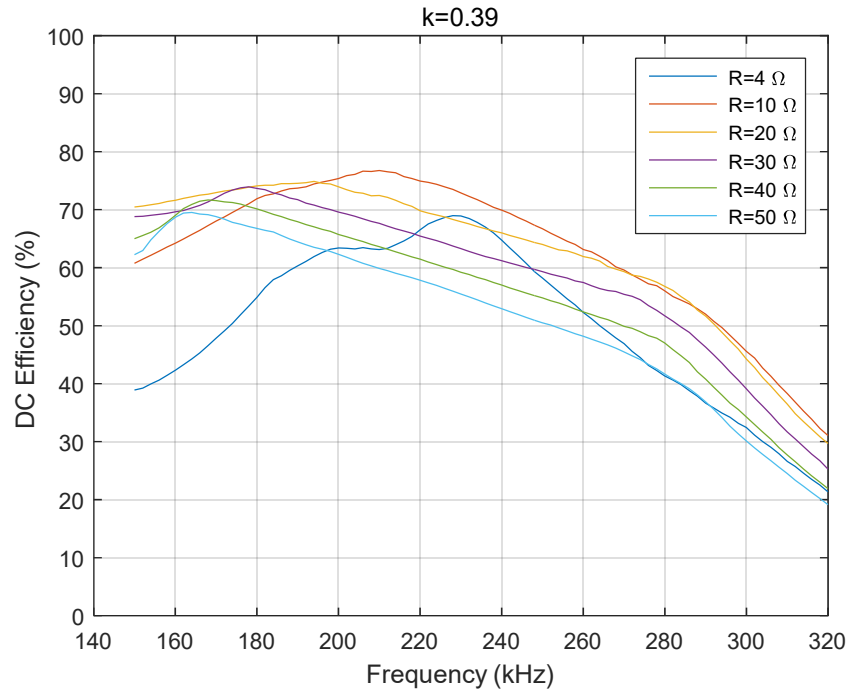


Σχήμα 4.82: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Από τις παραπάνω κυματομορφές, παρατηρούνται για χαμηλές τιμές αντίστασης φορτίου δύο κορυφές ισχύος, και κατ' επέκταση απόδοσης, με υψηλότερη αυτήν που εμφανίζεται σε συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας συντονισμού των 200 kHz. Επίσης παρατηρείται ότι στις χαμηλές τιμές αντίστασης φορτίου τα ποσά ισχύος είναι μεγαλύτερα για υψηλές τιμές συχνοτήτων, ενώ για υψηλότερες τιμές αντίστασης φορτίου ($R \geq 20 \Omega$) τα ποσά ισχύος είναι μεγαλύτερα για χαμηλές τιμές συχνοτήτων. Οι μεγαλύτερες τιμές αποδόσεων παρατηρούνται εντός του διαστήματος μεταξύ των συχνοτήτων 210 kHz - 280 kHz (μέγιστη τιμή 82.16% για αντίσταση φορτίου 30 Ω), όπου ο διακόπτης λειτουργεί πιο κοντά σε ZVS. Σε γενικές γραμμές, σε αυτή την περίπτωση, η απόδοση δεν χαρακτηρίζεται από σταθερότητα στις μεταβολές της συχνότητας. Τέλος, το κέρδος τάσης αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται, αλλά όσο η τιμή της αντίστασης φορτίου μεγαλώνει, το σημείο καμπής από το οποίο ξεκινά η μείωση μετατοπίζεται σε ολοένα και πιο χαμηλές τιμές συχνοτήτων. Όταν η αντίσταση φορτίου αυξάνεται πέρα από μια συγκεκριμένη τιμή ($R \geq 20 \Omega$), και με την αύξηση της συχνότητας, αποκτά σταθερή και ομοιόμορφη τιμή.

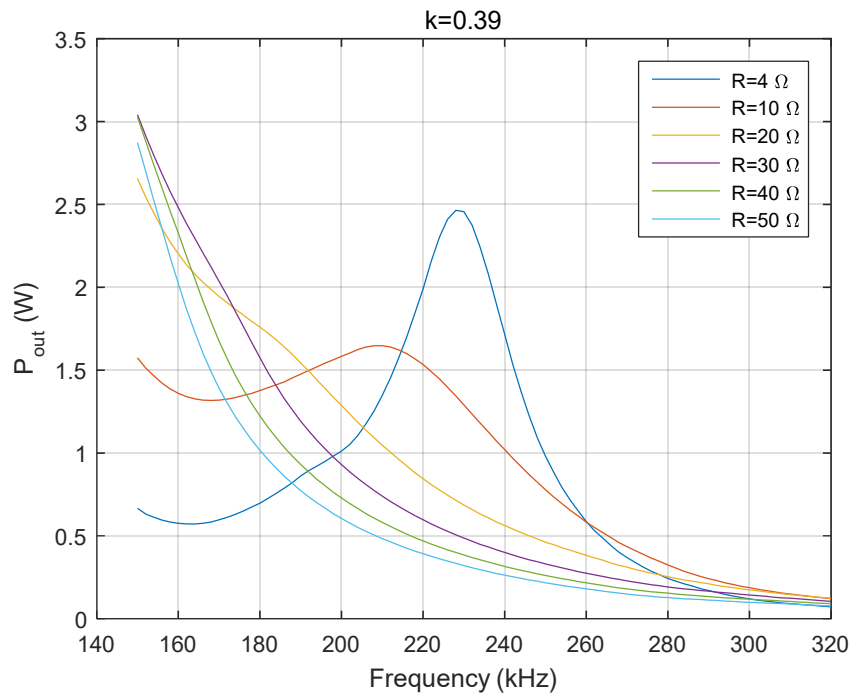
$k=0.39$:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



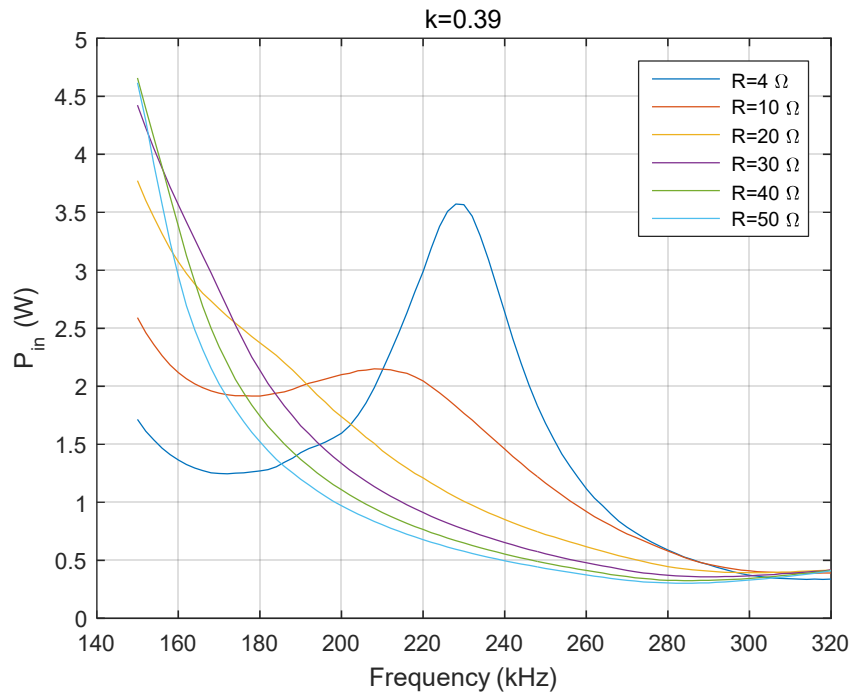
Σχήμα 4.83: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



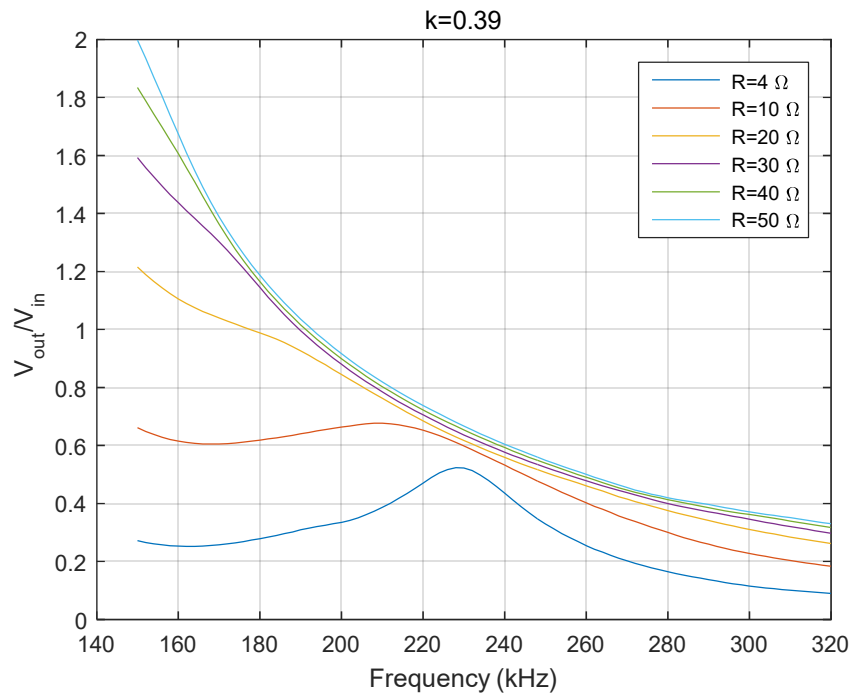
Σχήμα 4.84: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.85: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

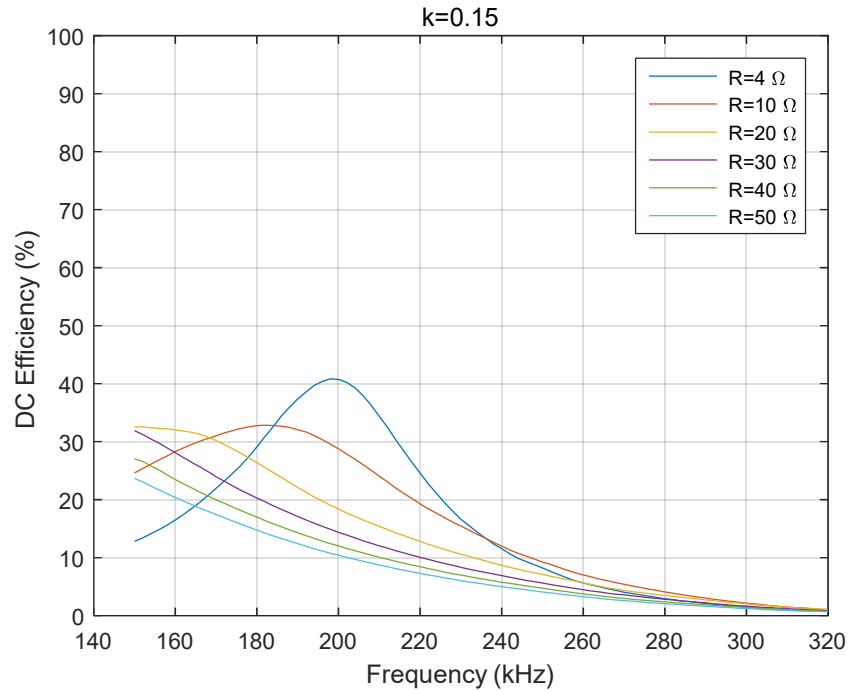
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.86: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

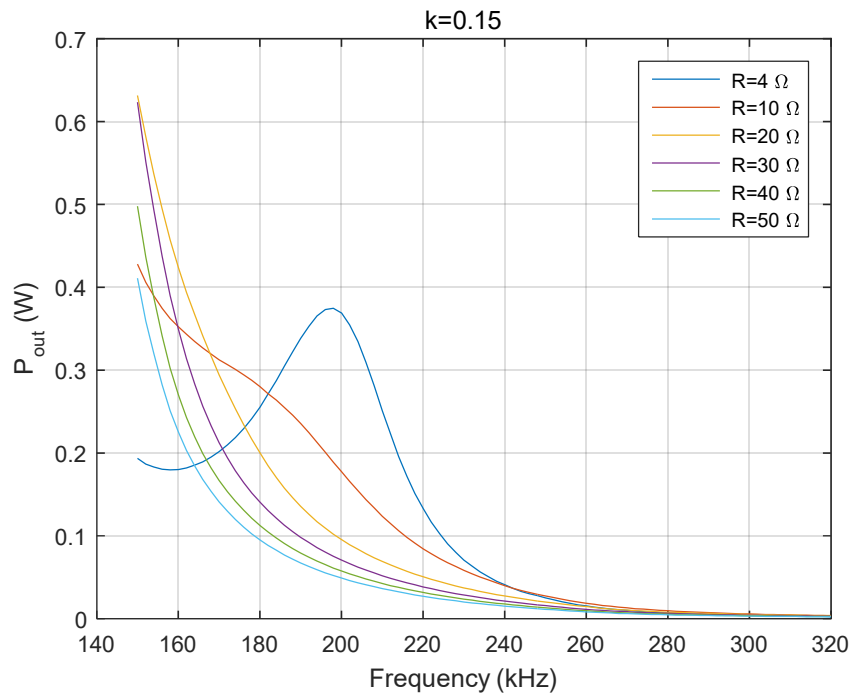
$k=0.15$:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



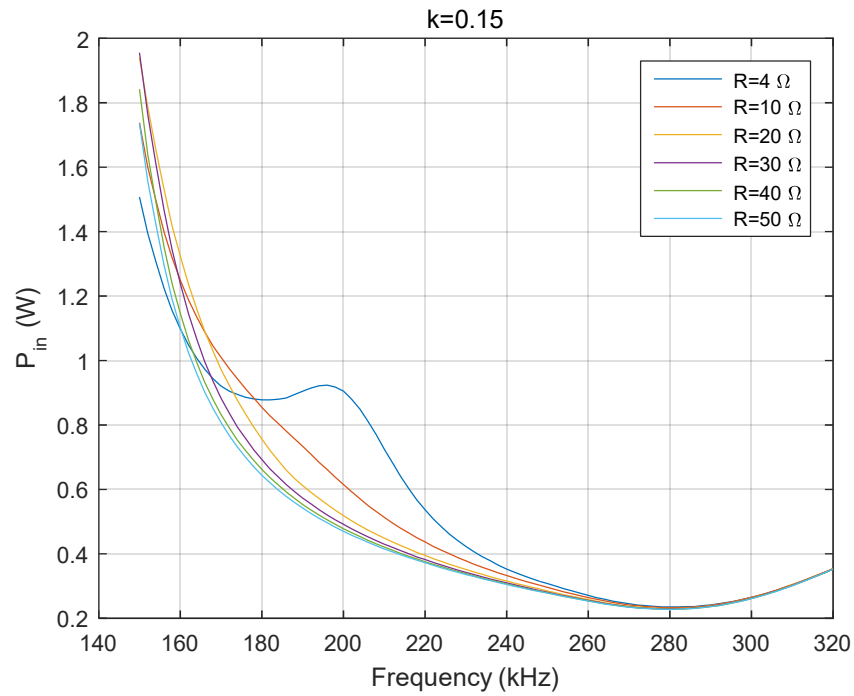
Σχήμα 4.87: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



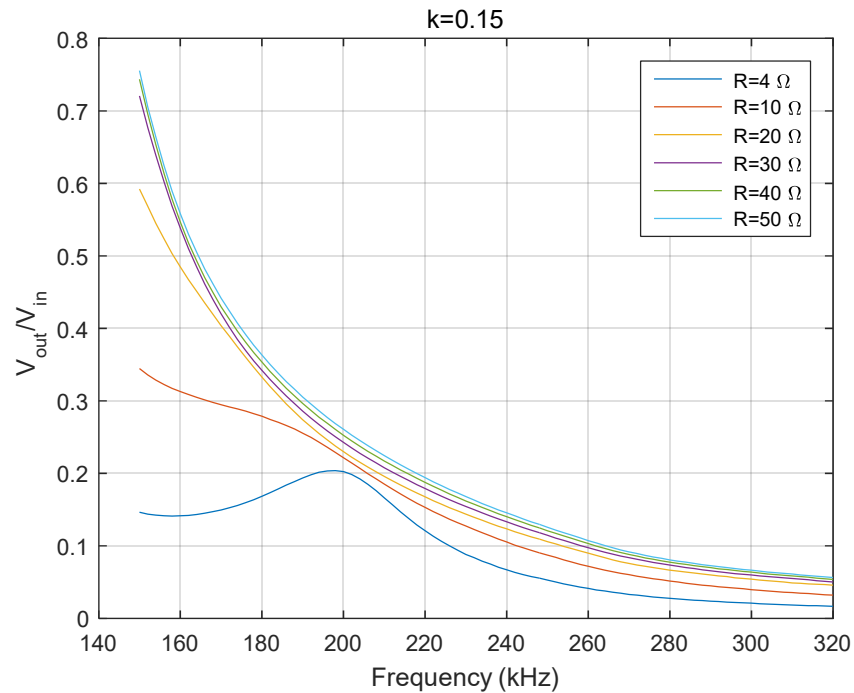
Σχήμα 4.88: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.89: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



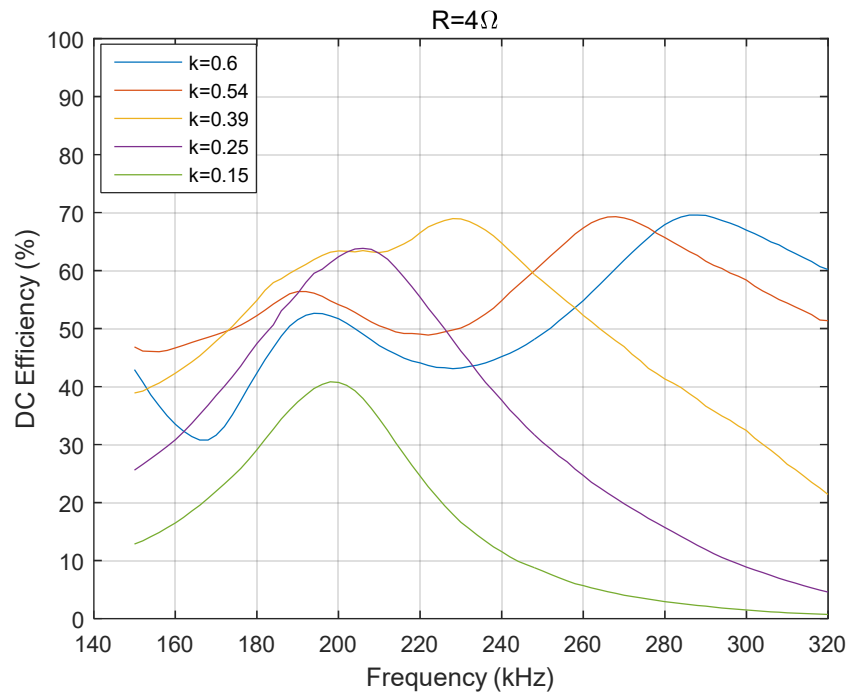
Σχήμα 4.90: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Στις περιπτώσεις μέσης και χειρότερης σύζευξης, αρχικά το όχι τόσο ισχυρό φαινόμενο διακλάδωσης που εμφανιζόταν στην περίπτωση ισχυρής σύζευξης δεν εμφανίζεται και οι κορυφές μέγιστης ισχύος (η οποία και μειώνεται όσο ασθενεί η σύζευξη) σταδιακά συγκλίνουν προς την συχνότητα των 200 kHz, δηλαδή την συχνότητα συντονισμού του δευτερεύοντος. Η μεταβολή της απόδοσης, η οποία και μειώνεται όσο η συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται και όσο η αντίσταση φορτίου αποκτά μεγαλύτερες τιμές, είναι πιο γραμμική και τείνει να γίνεται εκθετική, με εξαίρεση την περίπτωση κυρίως της χαμηλότερης τιμής αντίστασης φορτίου των 4 Ω και στη συνέχεια των 10 Ω, όπου η γραμμικότητα αυτή κάνει την εμφάνισή της αφού πρώτα η καμπύλη παρουσιάσει μέγιστο. Πιο συγκεκριμένα, καθώς τα επίπεδα ισχύος μειώνονται κατά πολύ, στην περίπτωση ασθενέστερης σύζευξης η μέγιστη απόδοση αγγίζει μόλις το 40.83 % ενώ η ελάχιστη τιμή της είναι μικρότερη ακόμη και του 5 %.

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας, μεταβλητός συντελεστής σύζευξης – Σταθερή αντίσταση φορτίου:

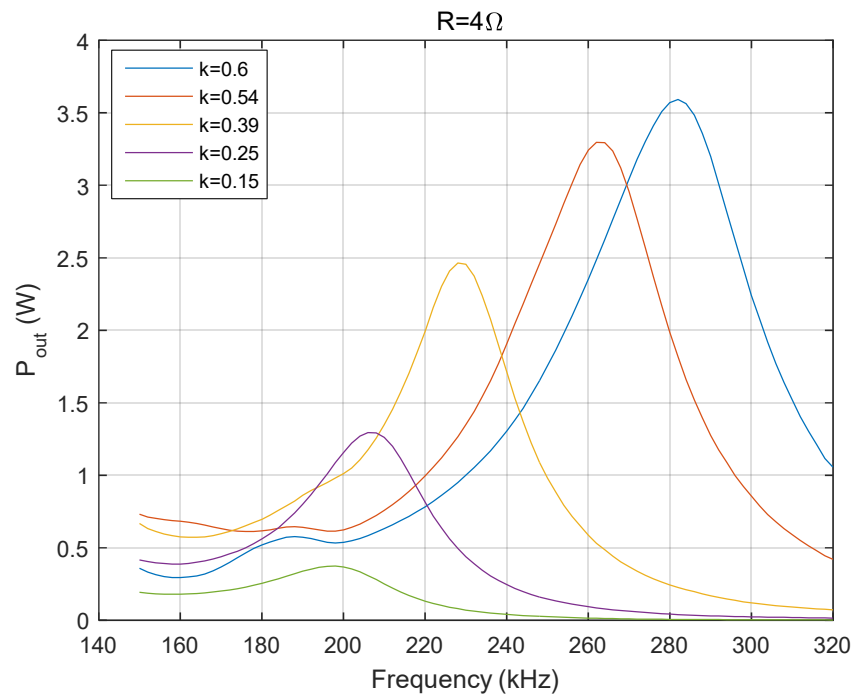
R=4 Ω:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



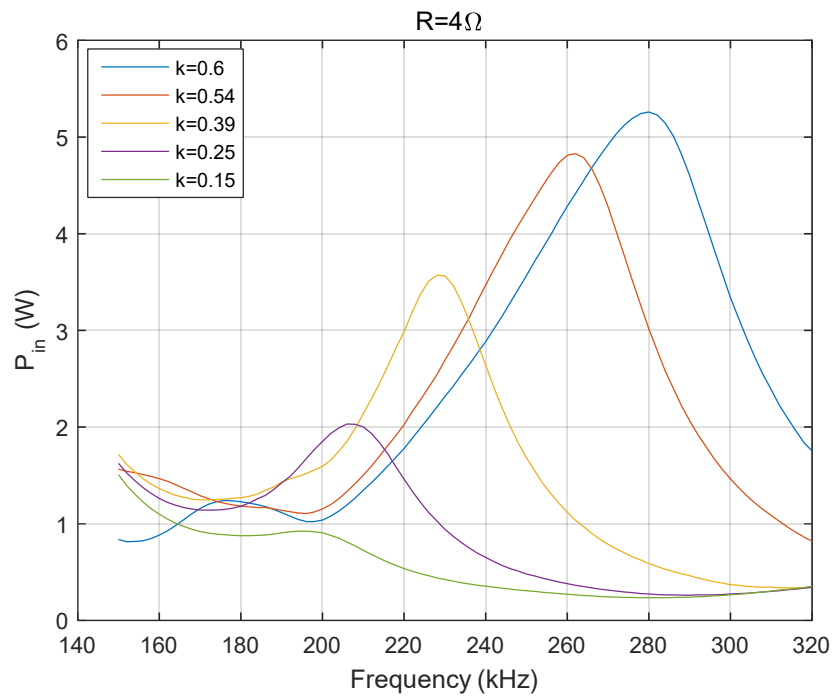
Σχήμα 4.91: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



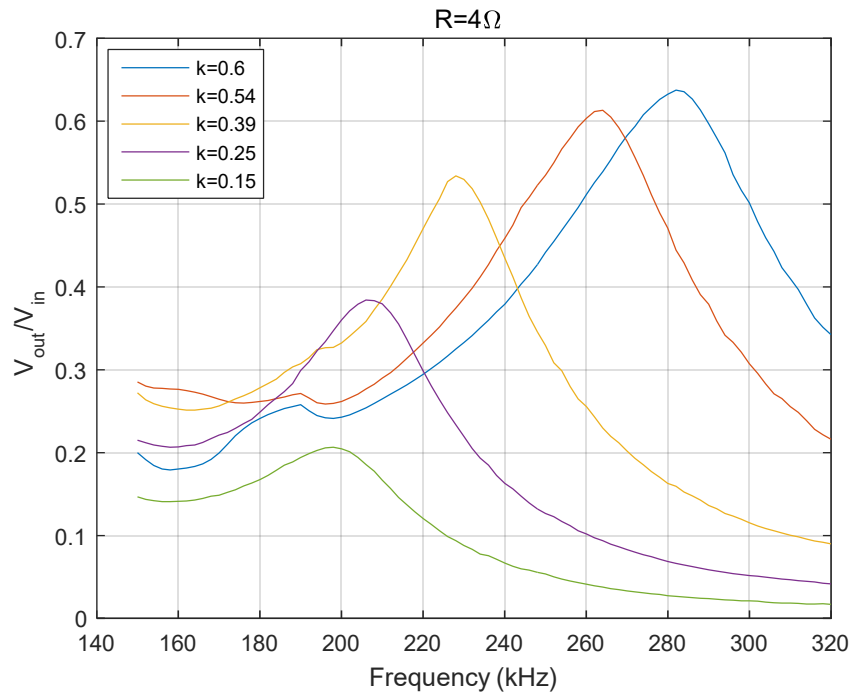
Σχήμα 4.92: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.93: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

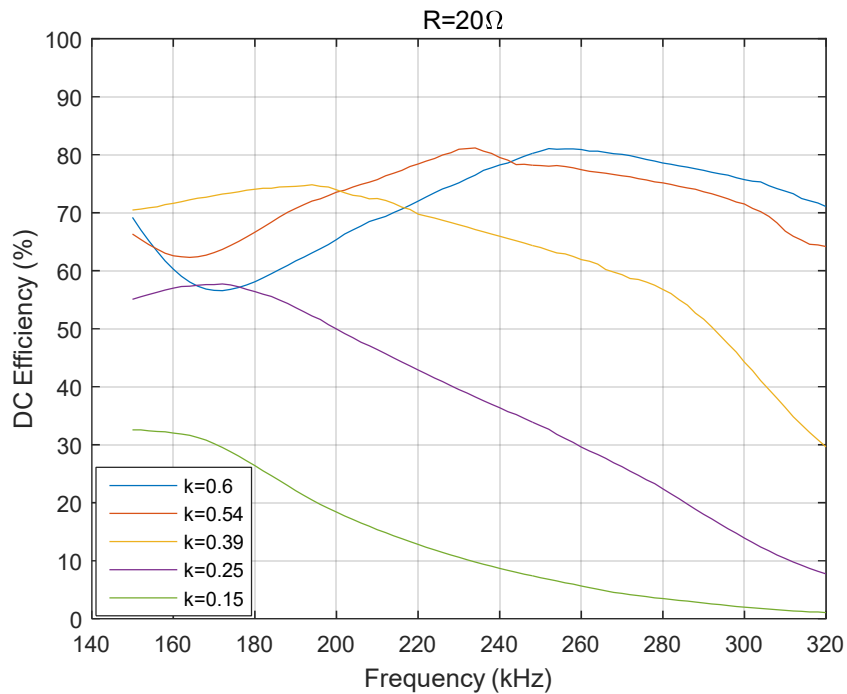
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.94: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

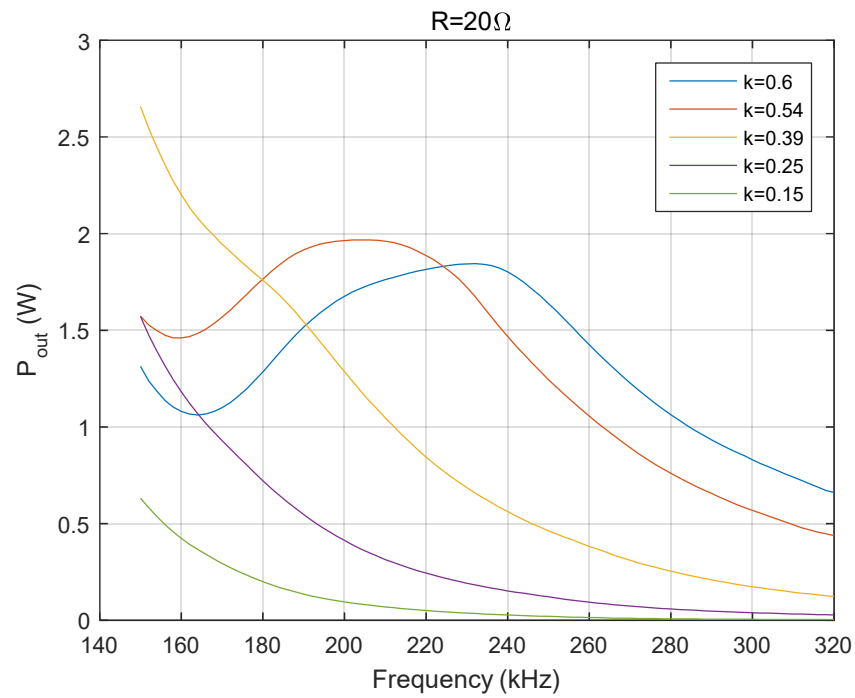
$R=20\Omega$:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



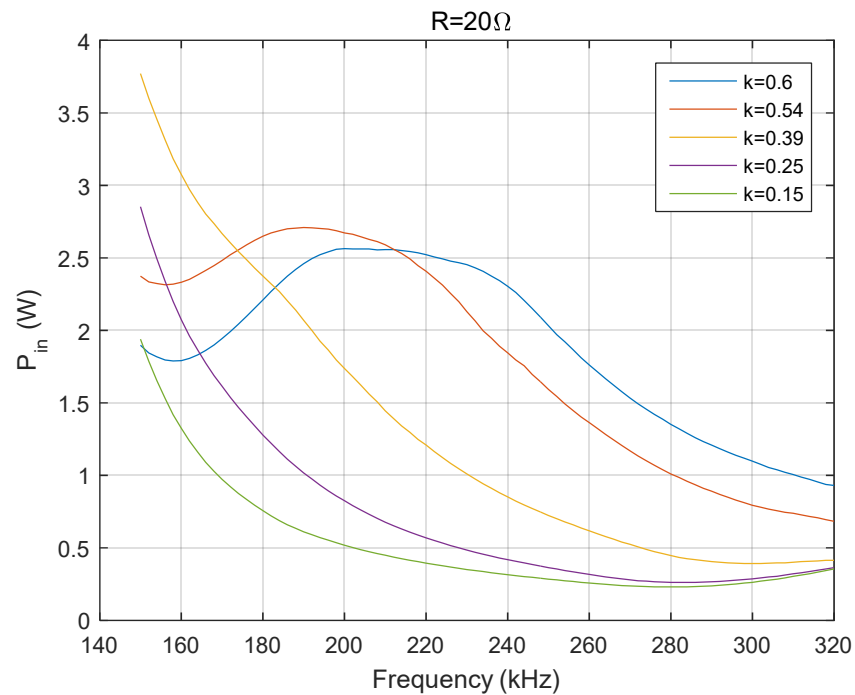
Σχήμα 4.95: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



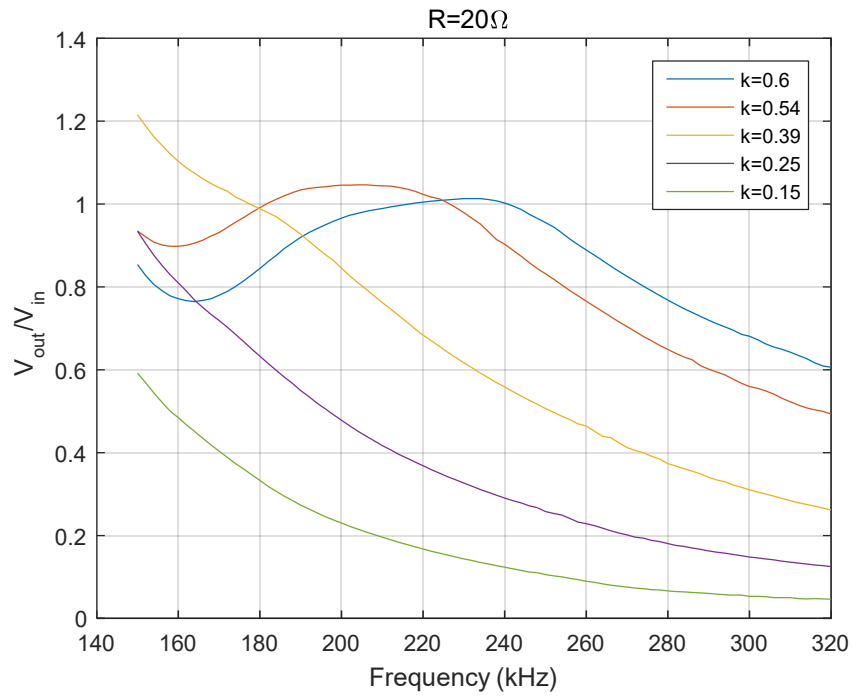
Σχήμα 4.96: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.97: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

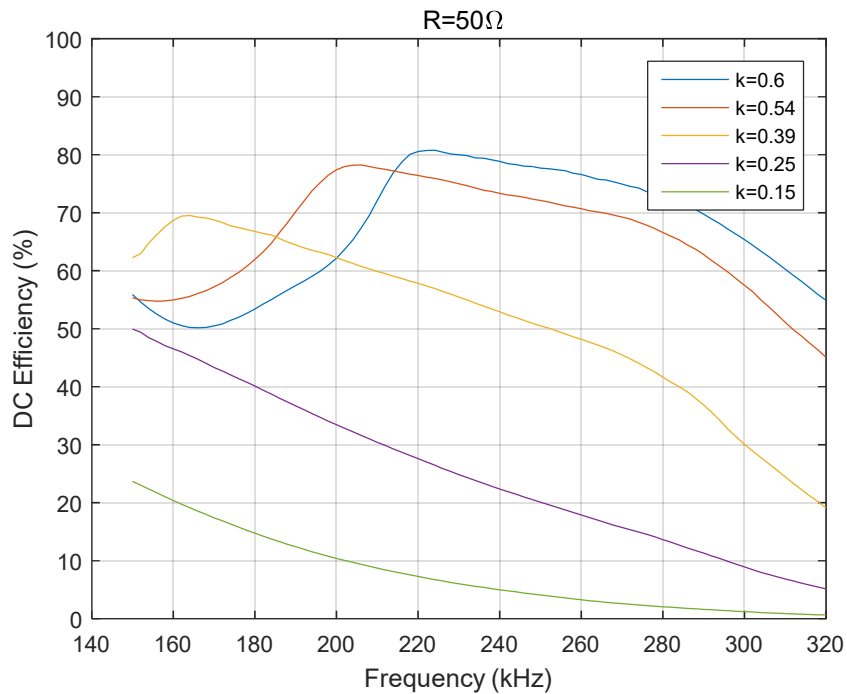
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.98: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

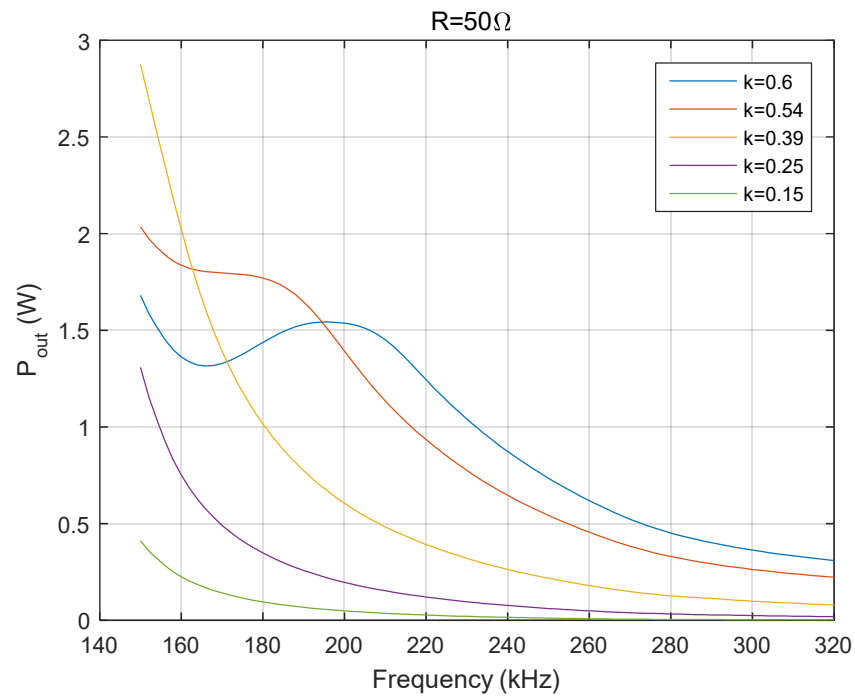
$R=50\Omega$:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



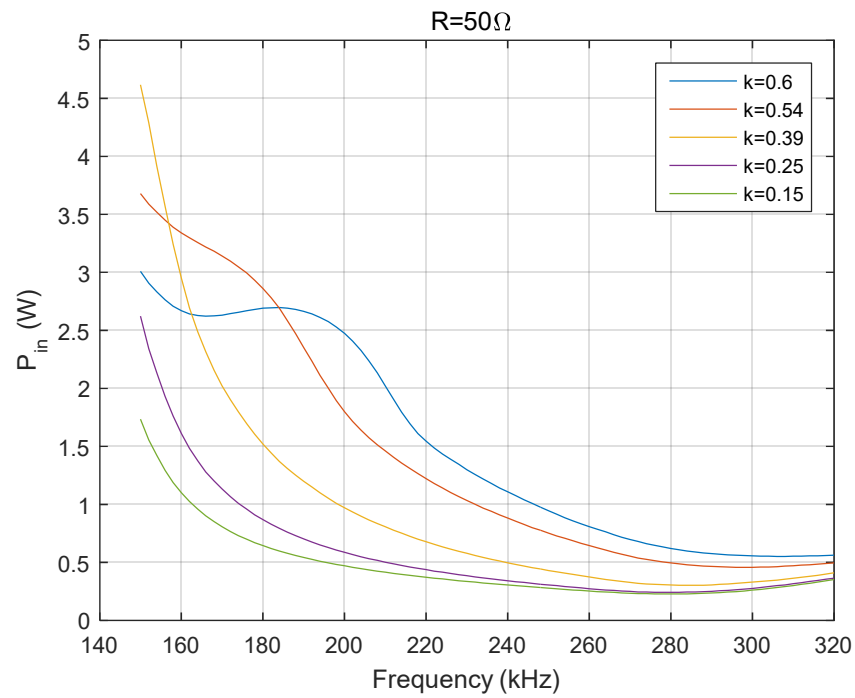
Σχήμα 4.99: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



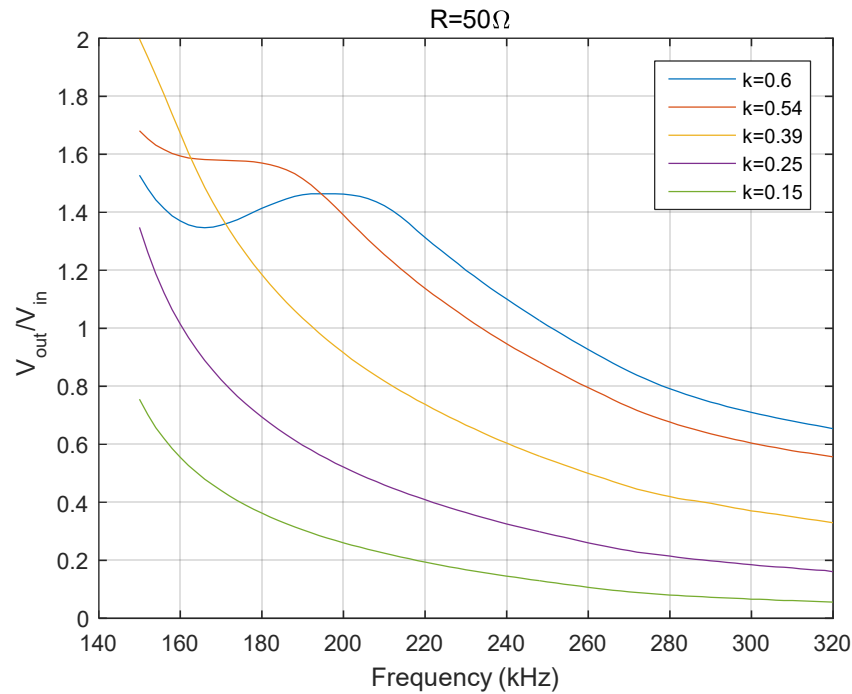
Σχήμα 4.100: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.101: Ισχύς εισόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



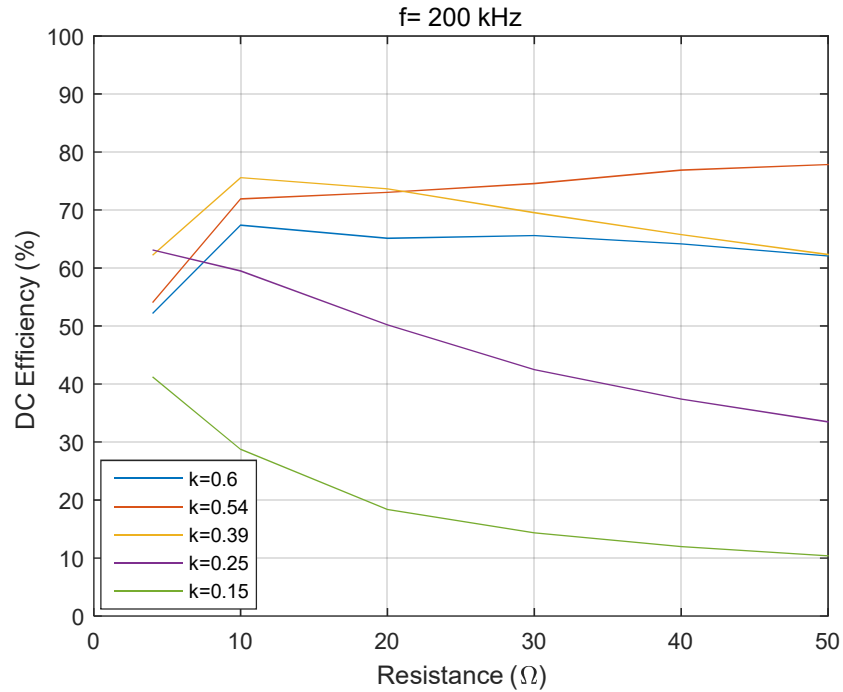
Σχήμα 4.102: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Από τα παραπάνω σχήματα που ακολουθούν τις μεταβολές της αντίστασης φορτίου, φαίνεται η μεγάλη επίδραση του συντελεστή σύζευξης στην συμπεριφορά του συστήματος. Αρχικά για την ελάχιστη τιμή αντίστασης φορτίου των $4\ \Omega$, παρατηρούνται δύο κορυφές, με την δεύτερη εκ των οποίων να εμφανίζεται στις υψηλές συχνότητες, και με την μείωση του συντελεστή σύζευξης να συγκλίνουν σε μία με κέντρο την συχνότητα των $200\ \text{kHz}$. Όμως, όσο μειώνεται ο συντελεστής σύζευξης τόσο μειώνονται τα επίπεδα ισχύος, τάσης εξόδου, αλλά και απόδοσης, η οποία στην καλύτερη σύζευξη λαμβάνει μέγιστη τιμή μόλις $69.5\ \%$ και στην χειρότερη $40.83\ \%$, τιμές ιδιαίτερα χαμηλές. Ειδικά όσο ο συντελεστής σύζευξης μειώνεται και η συχνότητα αυξάνεται, η απόδοση μειώνεται σε τιμές κάτω του $10\ \%$. Επίσης, στις υψηλές συχνότητες δεν μεταφέρονται σημαντικά ποσοστά ισχύος και το κέρδος τάσης σπάνια ξεπερνάει την μονάδα. Όσο η αντίσταση φορτίου αυξάνει, η τάση εξόδου, η ισχύς και η απόδοση παρουσιάζουν εμφανέστερη μείωση με την εξασθένηση του συντελεστή σύζευξης και την αύξηση της συχνότητας, εκτός από τις περιπτώσεις πολύ καλής σύζευξης ($k=0.6$, $k=0.54$) όπου η απόδοση διατηρεί σχετικά σταθερή συμπεριφορά για ένα εύρος συχνοτήτων. Τέλος, παρατηρείται πως οι κορυφές που εμφανίζονται στις καμπύλες στις υψηλές συζεύξεις και παρατηρούνται αρχικά στην ελάχιστη τιμή αντίστασης φορτίου, με την αύξηση αυτής μετατοπίζονται προς την συχνότητα των $200\ \text{kHz}$ και στη συνέχεια λαμβάνουν μία μοιόμορφη φθίνουσα μορφή.

Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

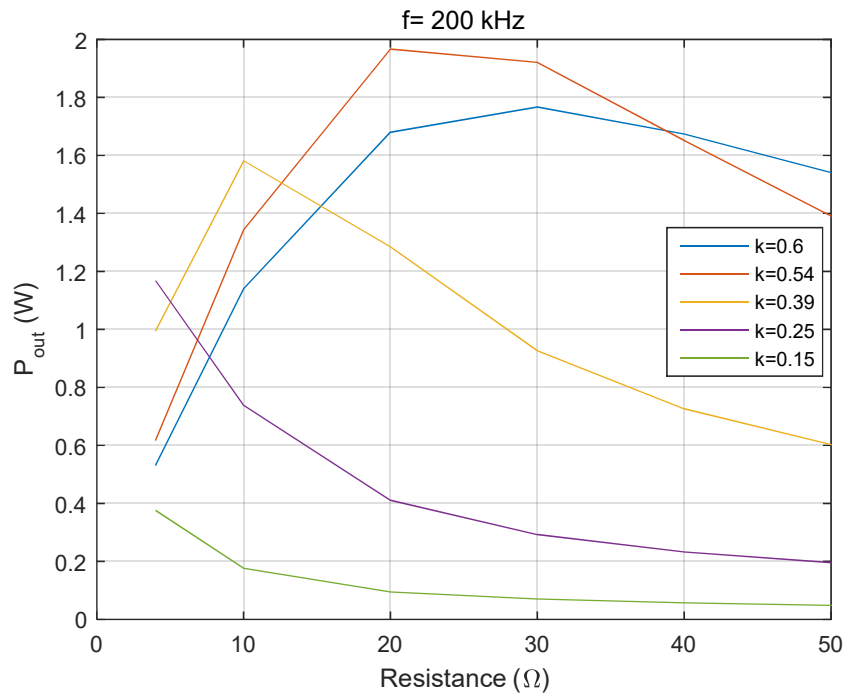
f=200 kHz:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



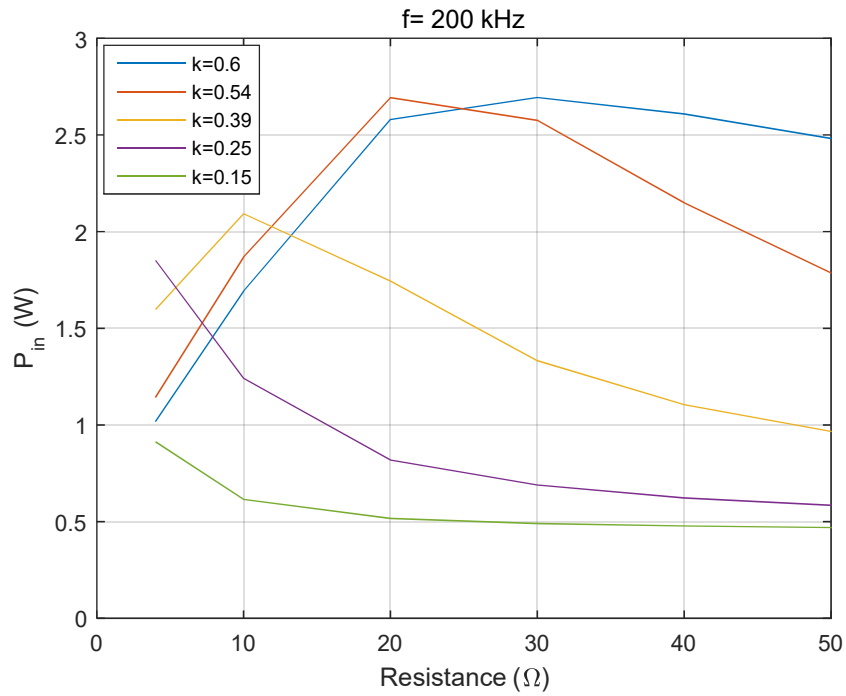
Σχήμα 4.103: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



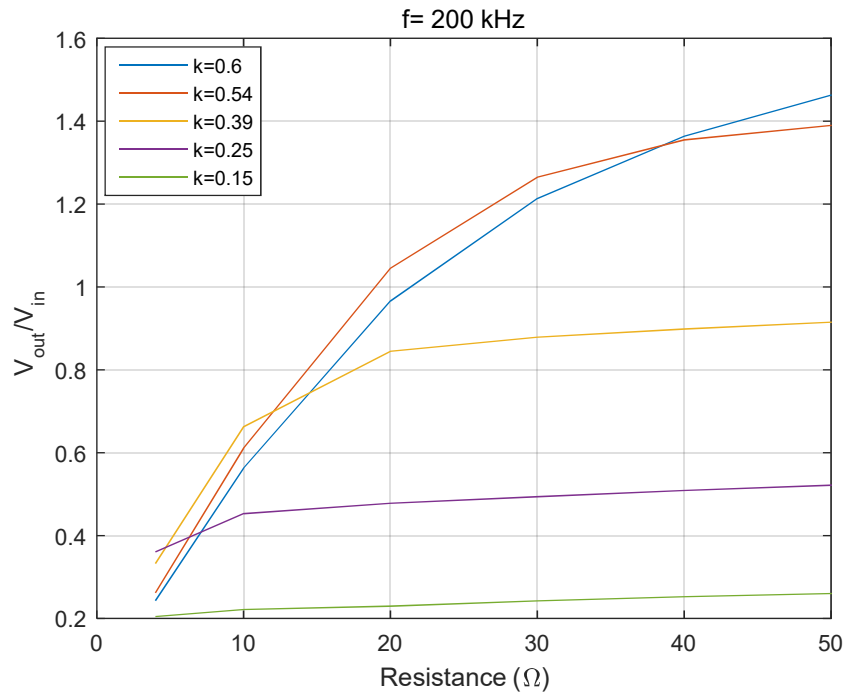
Σχήμα 4.104: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.105: Ισχύς εξόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):

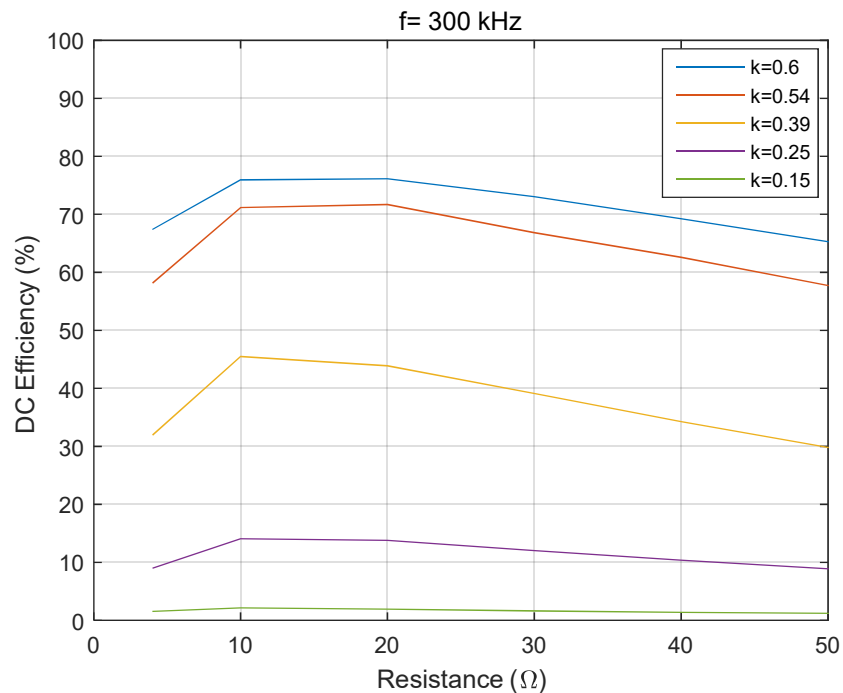


Σχήμα 4.106: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Εξετάζοντας το σύστημα κατά την λειτουργία του στην συχνότητα συντονισμού του δευτερεύοντος, σε κάθε περίπτωση αντίστασης φορτίου και σύζευξης, παρατηρείται ότι ικανοποιητική απόδοση και μεταφορά ισχύος υφίσταται για τιμές σύζευξης μεγαλύτερων της μέσης ($k \geq 0.39$). Πιο συγκεκριμένα η απόδοση παραμένει σχετικά σταθερή με την αύξηση της αντίστασης φορτίου, ενώ η ισχύς αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται, παραμένοντας όμως σε υψηλά επίπεδα. Σε χαμηλότερες τιμές σύζευξης όμως, η μεταφορά ισχύος είναι μικρή και η απόδοση μειώνεται σημαντικά. Σχετικά με το κέρδος τάσης, παρατηρείται αύξηση αυτού με την αύξηση της αντίστασης φορτίου και μάλιστα σε καταστάσεις ισχυρής σύζευξης ($k=0.6, k=0.54$) η τιμή του ξεπερνάει την μονάδα.

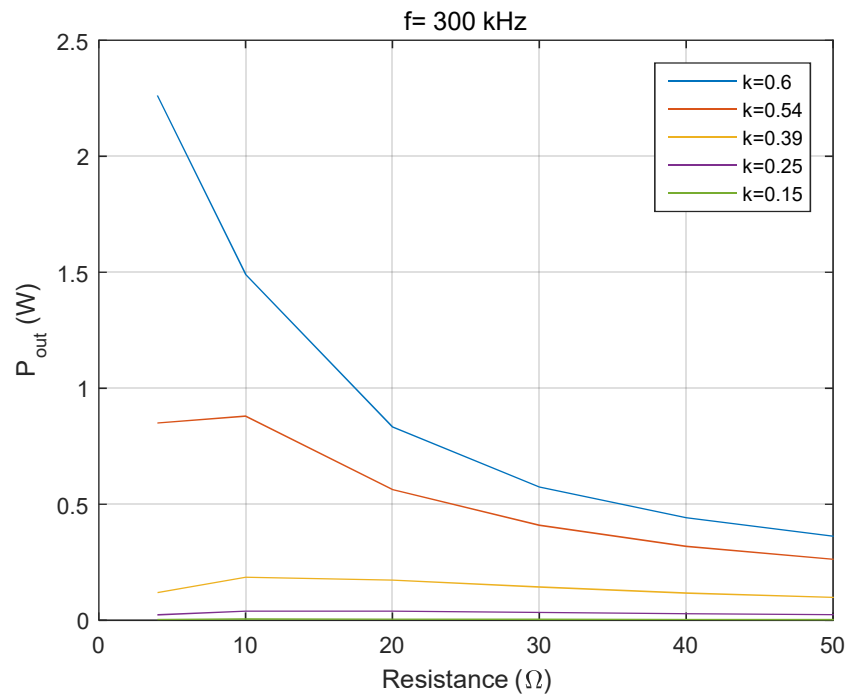
f=300 kHz:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



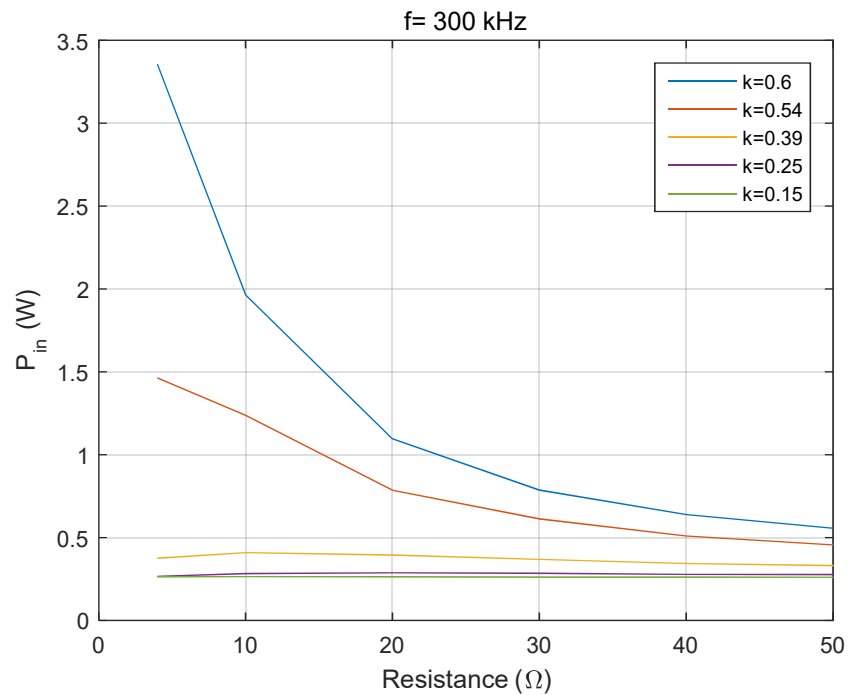
Σχήμα 4.107: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



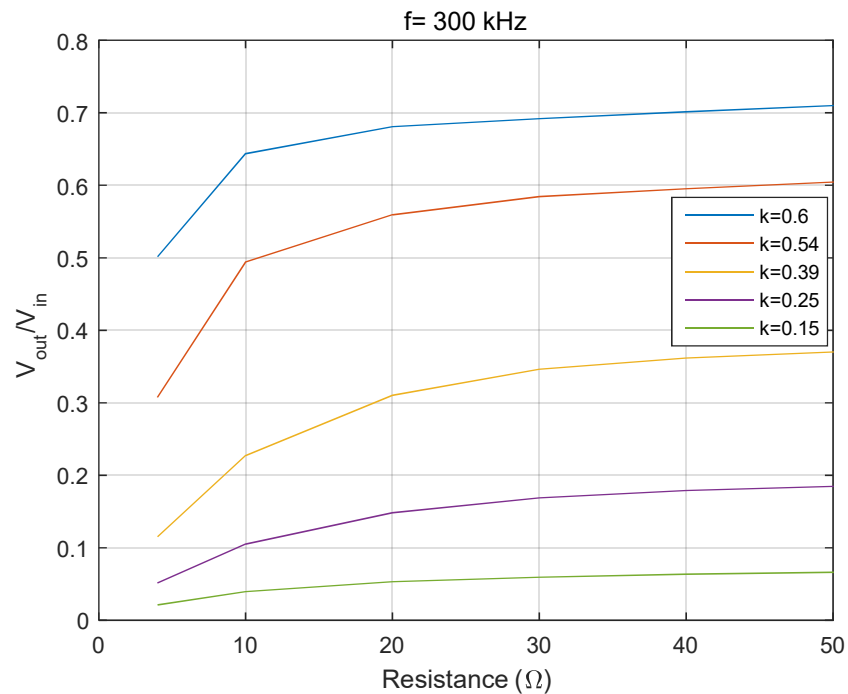
Σχήμα 4.108: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 4.109: Ισχύς εξόδου P_{in} (W) υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



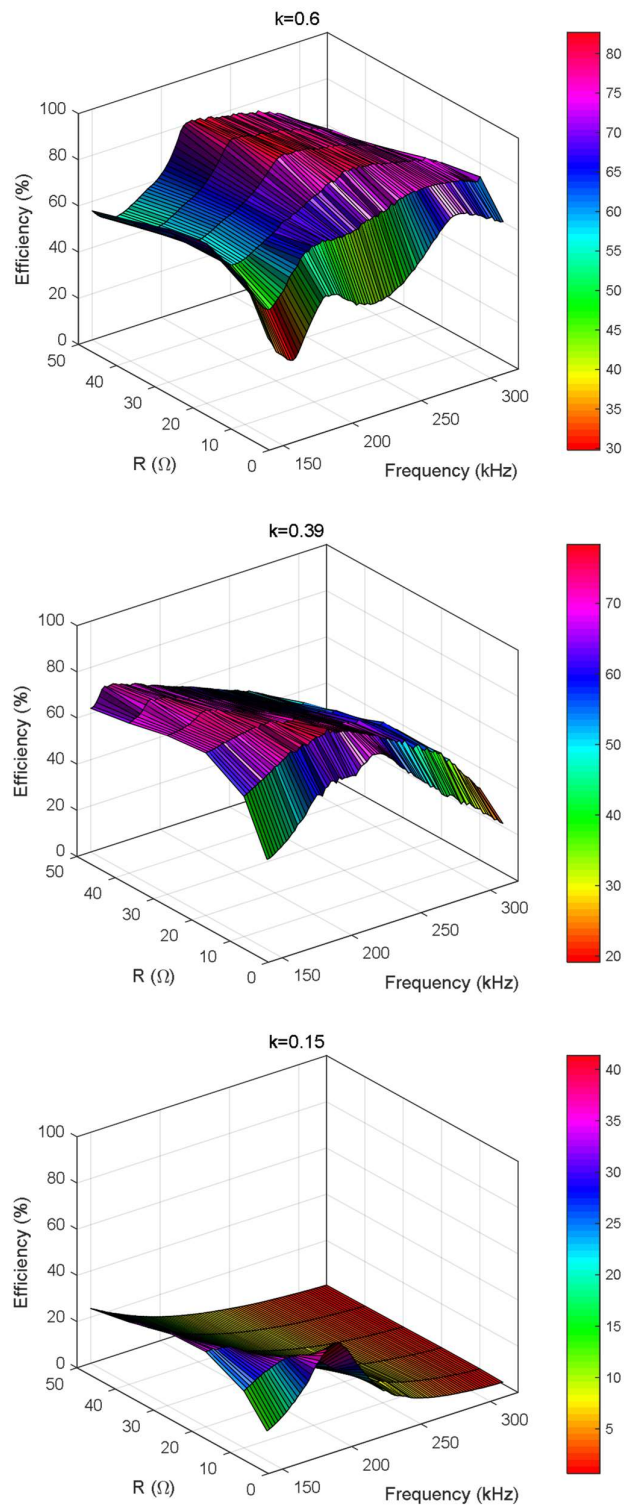
Σχήμα 4.110: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Στην περίπτωση λειτουργίας του συστήματος στα 300 kHz φαίνεται ακόμα πιο έντονα η επίδραση της σύζευξης στα μεγέθη του. Σε υψηλότερους συντελεστές σύζευξης η απόδοση παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές της (μεταξύ 60 % - 80 %) και μειώνεται ελαφρά με την αύξηση της αντίστασης φορτίου, ενώ όσο εξασθενεί η σύζευξη η απόδοση μειώνεται σημαντικά. Ίδια συμπεριφορά παρουσιάζει και η ισχύς, η οποία έχει μεγαλύτερες τιμές όσο πιο ισχυρή είναι η σύζευξη και όσο πιο χαμηλή η αντίσταση φορτίου. Σε ό,τι αφορά στο κέρδος τάσης, παρατηρείται αύξηση με την αύξηση του συντελεστή σύζευξης, αλλά και όσο αυξάνεται η αντίσταση φορτίου. Ωστόσο, η τιμή του δεν φθάνει την μονάδα.

Στα παρακάτω σχήματα, απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα μεγέθη που μελετήθηκαν στις παραπάνω περιπτώσεις, για τις ίδιες τιμές παραμέτρων, με σκοπό την πλήρη παρουσίαση και κατανόηση της συμπεριφοράς τους.

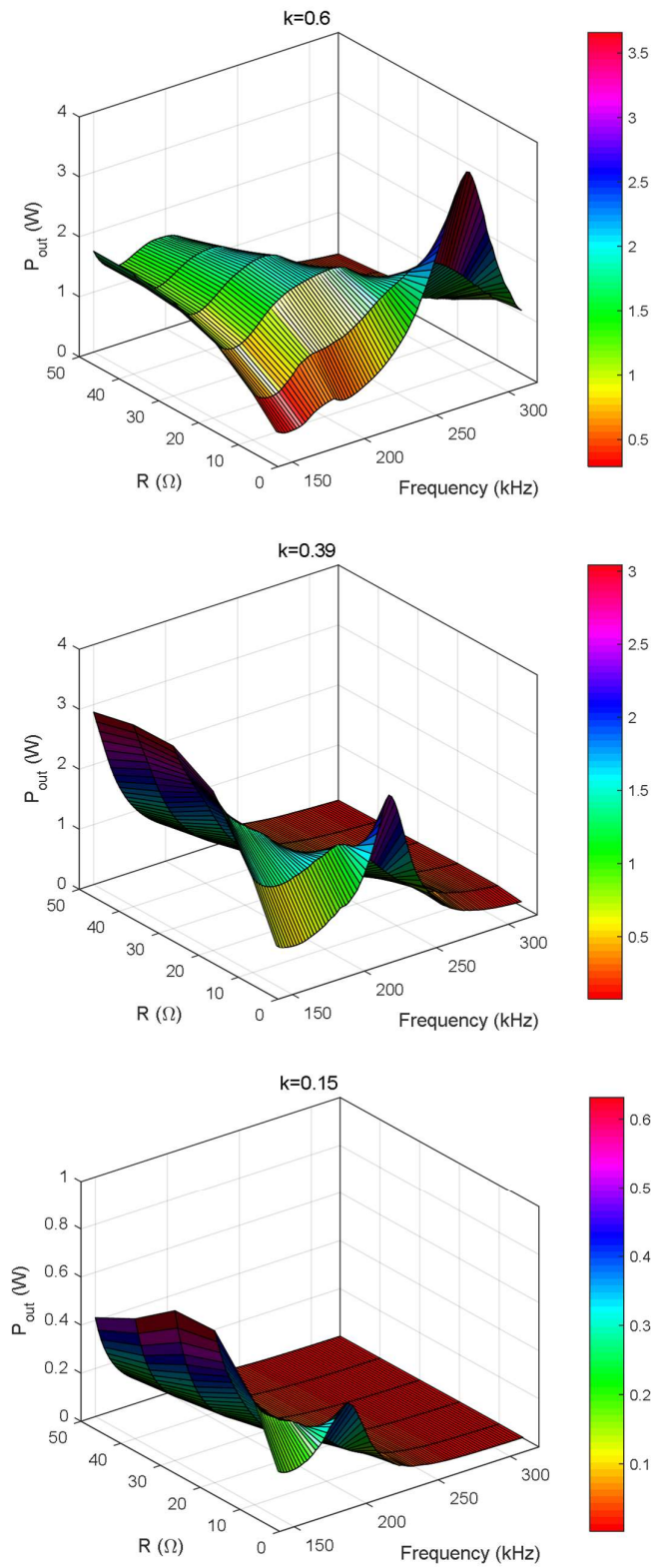
Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας, μεταβλητή αντίσταση φορτίου – Σταθερός συντελεστής σύζευξης k:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



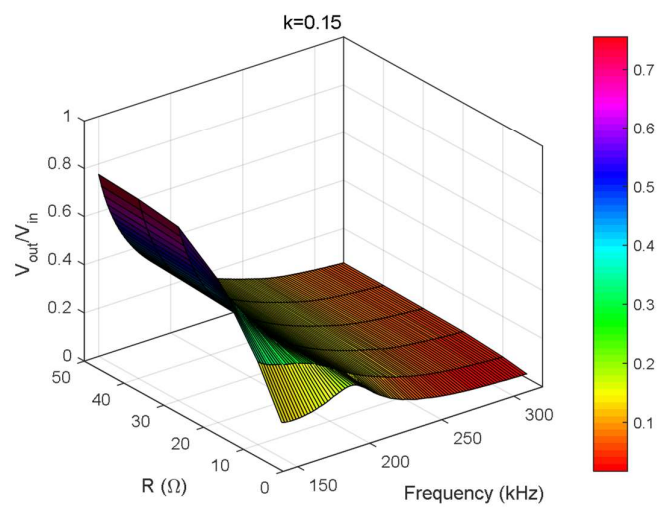
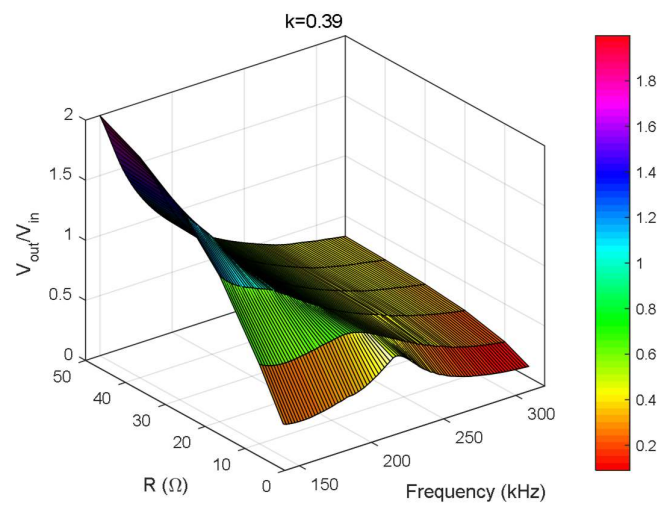
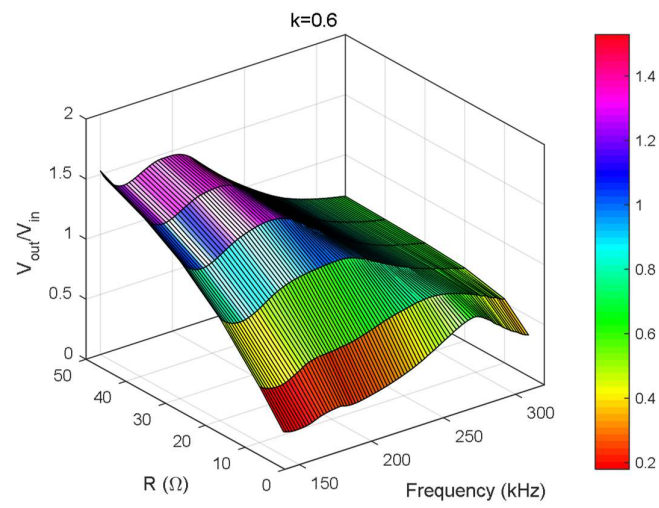
Σχήμα 4.111: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



Σχήμα 4.112: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

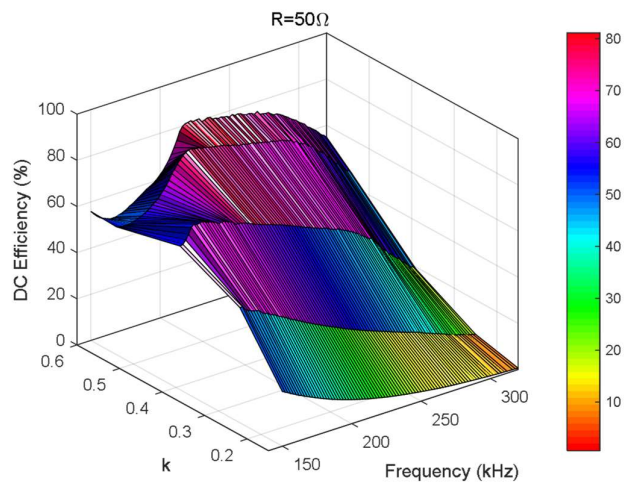
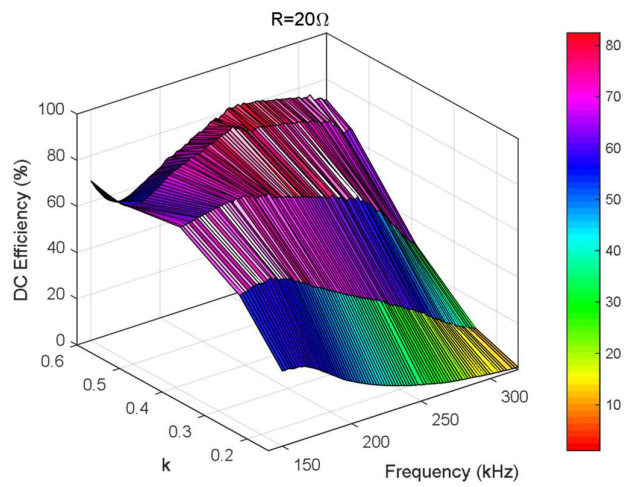
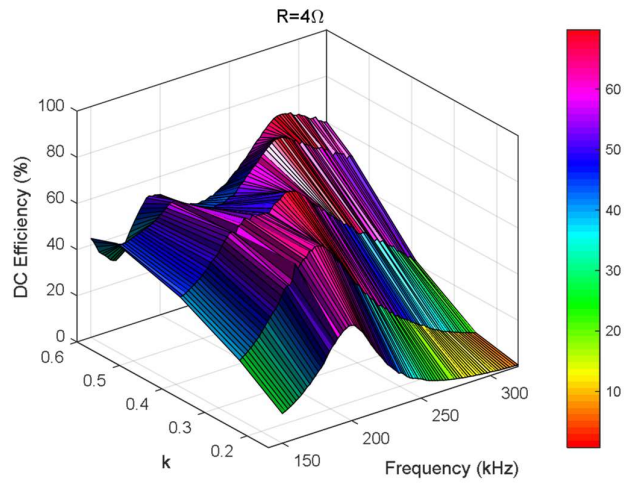
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.113: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

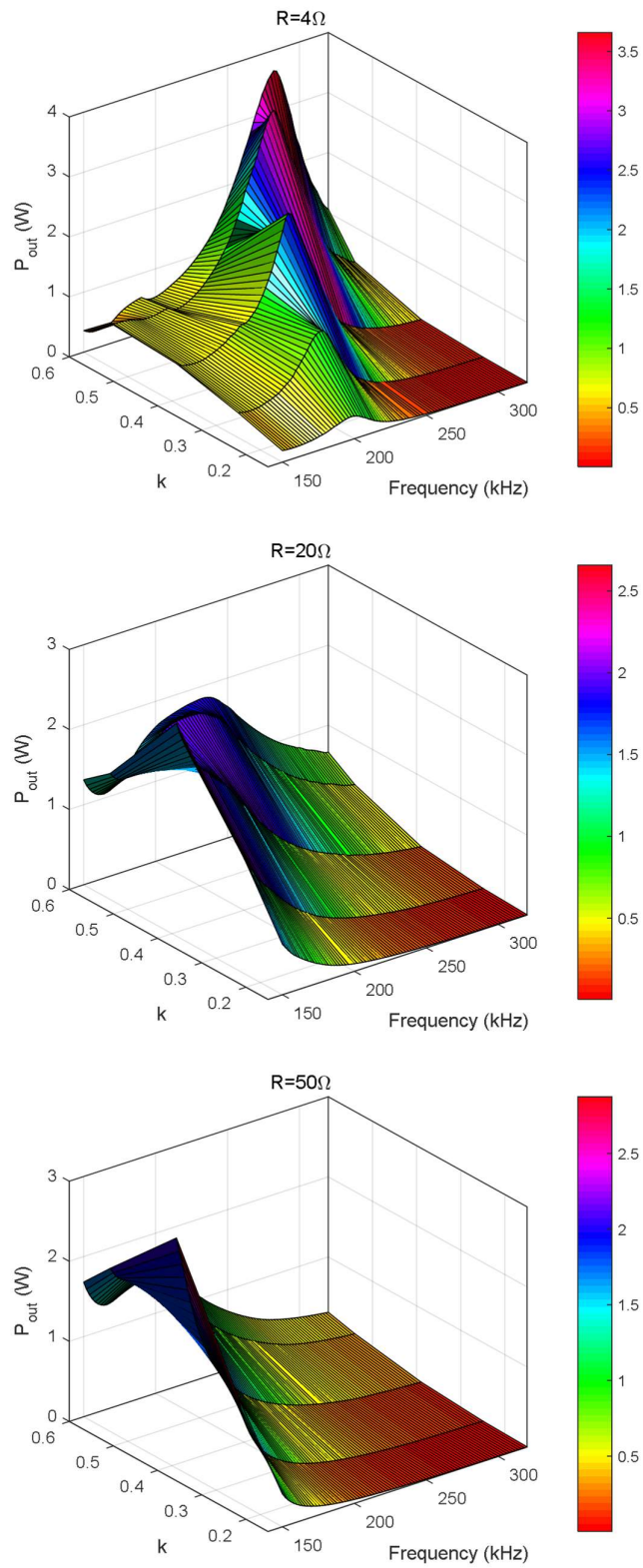
Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας, μεταβλητός συντελεστή σύζευξης – Σταθερή αντίσταση φορτίου:

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



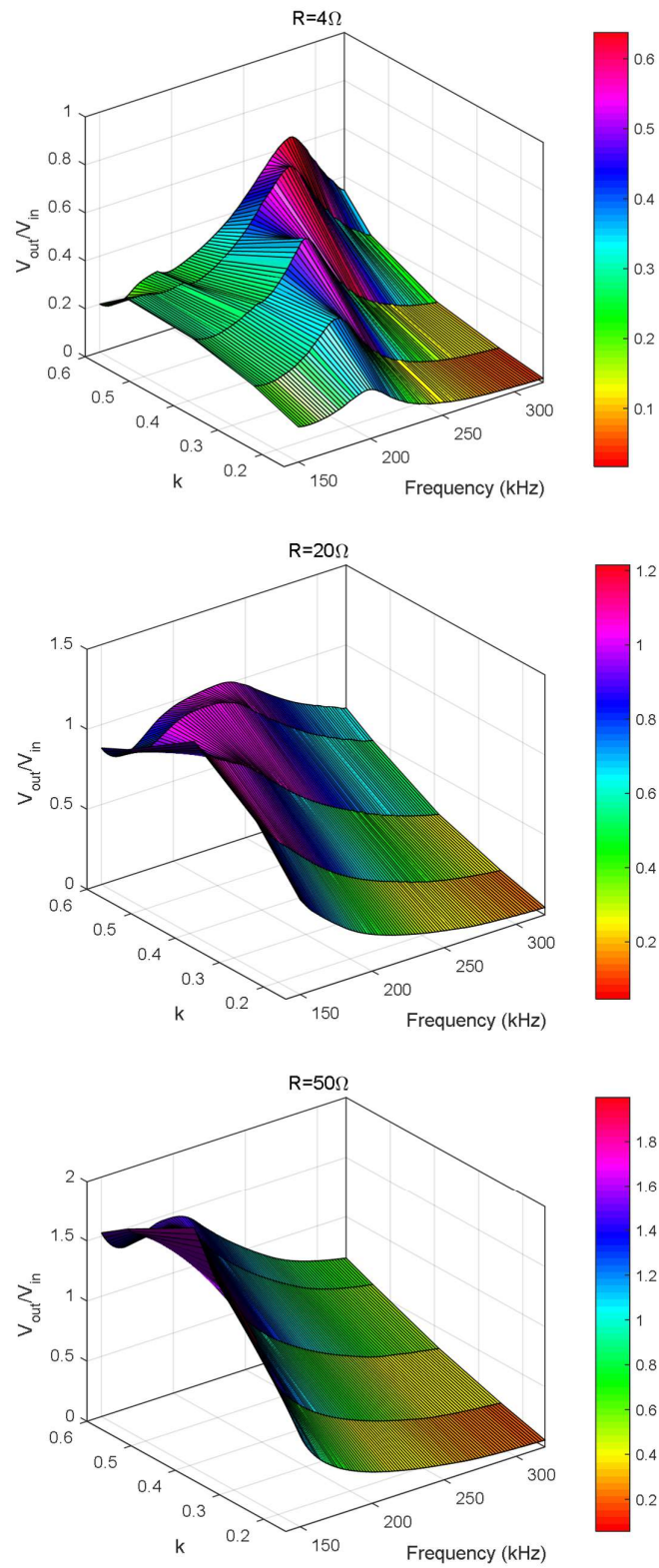
Σχήμα 4.114: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



Σχήμα 4.115: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

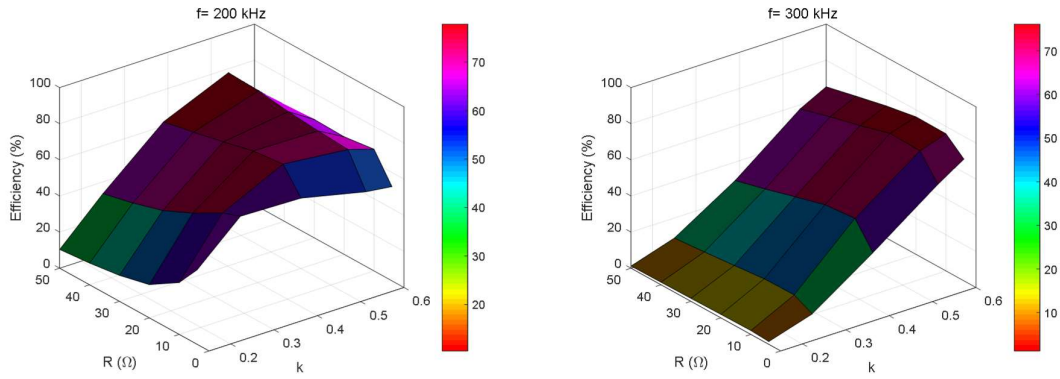
Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.116: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

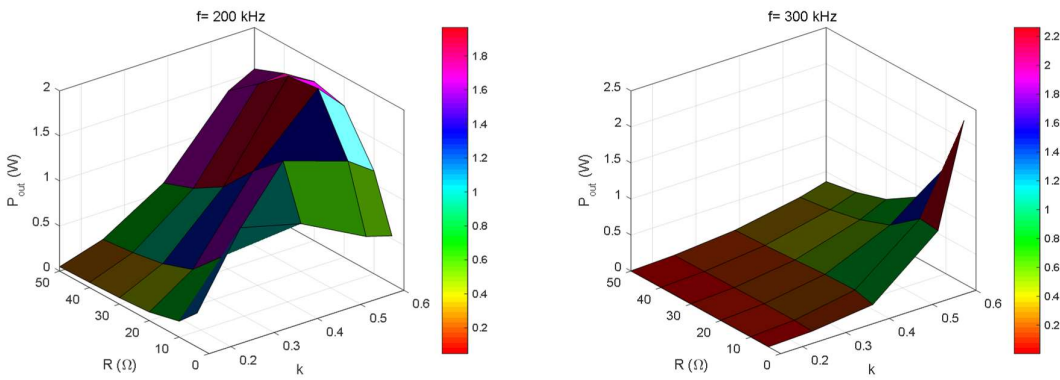
Μεταβλητή αντίσταση φορτίου, μεταβλητός συντελεστή σύζευξης – Σταθερή συχνότητα λειτουργίας :

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



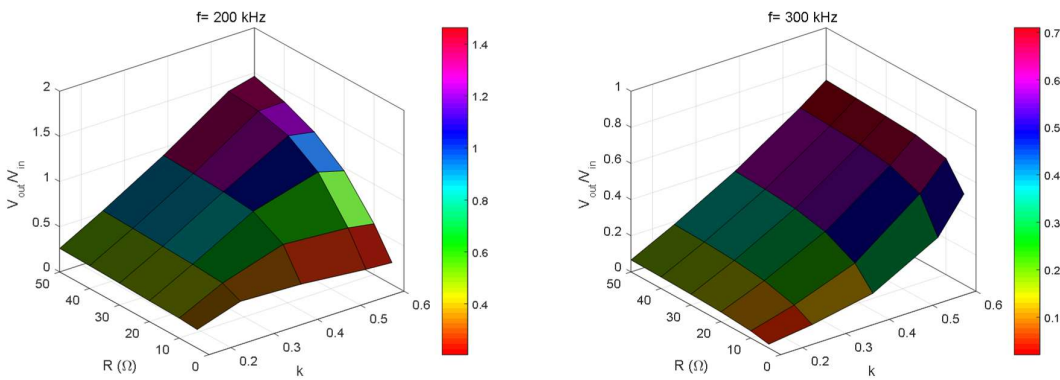
Σχήμα 4.117: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς εξόδου (P_{out}):



Σχήμα 4.118: Ισχύς εξόδου $P_{out} (W)$ υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):



Σχήμα 4.119: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

4.3: Τεχνικές ελέγχου

Η βαθμίδα ελέγχου σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης είναι μεγάλης σημασίας, καθώς είναι αναγκαία η επίβλεψη και η διατήρηση της τάσης και συνεπώς της ισχύος στην έξοδο στα επιθυμητά επίπεδα. Όταν μάλιστα η εφαρμογή της φόρτισης αφορά σε βιολογικά εμφυτεύματα, αναδεικνύεται σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό η ανάγκη ύπαρξης ενός κυκλώματος ελέγχου.

Για τον έλεγχο της συνεχούς τάσης που εφαρμόζεται στην αντίσταση φορτίου, συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς τάσεως σε συνεχή στην μεριά του δευτερεύοντος, οι οποίοι ρυθμίζονται ανάλογα από ελεγκτικές μονάδες. Σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης βιολογικών εμφυτευμάτων όμως όπου ο χώρος της συσκευής είναι εξαιρετικής σημασίας, μία τέτοια λύση θα ήταν ασύμφορη, καθώς όχι μόνο προσθέτει σε βάρος και όγκο, αλλά και ενδέχεται να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας στους ιστούς γύρω από την εμφυτεύσιμη συσκευή.

Για τους λόγους αυτούς, δίνεται περισσότερη βαρύτητα στις τεχνικές ελέγχου όπου εξασφαλίζουν την ρύθμιση της τάσης και της ισχύος στην αντίσταση φορτίου, αποκλειστικά από την μεριά του πρωτεύοντος. Το μόνο που χρειάζεται είναι η γνώση του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας, πράγμα εφικτό καθώς οι περισσότερες πλέον εμφυτεύσιμες συσκευές παρέχουν την δυνατότητα επικοινωνίας και ανατροφοδότησης των δεδομένων τους.

Υπάρχουν αρκετές τεχνικές ελέγχου ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης, οι οποίες ταξινομούνται ανάλογα με την παράμετρο του συστήματος στην οποία επεμβαίνουν. Οι βασικότερες τεχνικές ελέγχου είναι οι: Μεταβλητής συχνότητας λειτουργίας, Μεταβλητού εύρους λειτουργίας παλμού (Duty Cycle – D) των διακοπτικών στοιχείων της βαθμίδας αντιστροφής και Μεταβλητής τάσης τροφοδοσίας. Η τελευταία δεν χρησιμοποιείται όσο οι υπόλοιπες λόγω του ότι απαιτεί μία επιπλέον βαθμίδα DC/DC μετατροπής, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα και το κόστος της διάταξης.

Φυσικά, η τεχνική ελέγχου πρέπει να προσαρμόζεται και στην βαθμίδα αντιστροφής που χρησιμοποιείται στην μεριά του πρωτεύοντος, καθώς κάθε διαφορετική διάταξη έχει τις δικές της ιδιαιτερότητες και απαιτήσεις, όπως επίσης και κάθε διαφορετική διάταξη δεν μπορεί να υποστηρίξει οποιαδήποτε τεχνική ελέγχου.

Σχετικά με τον αντιστροφής πλήρους γέφυρας, υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων τεχνικών ελέγχου που μπορούν να εφαρμοσθούν. Πιο συγκεκριμένα, μία ενδιαφέρουσα τεχνική ελέγχου συχνότητας που έχει μελετηθεί πραγματεύεται την προσαρμογή της συχνότητας λειτουργίας με τέτοιο τρόπο ώστε να ακολουθεί την συχνότητα συντονισμού η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την κατάσταση της σύζευξης, ούτως ώστε η τάση και το ρεύμα στην μεριά του πρωτεύοντος να είναι πάντα σε φάση, ανεξάρτητα από τις μεταβολές της σύζευξης [3]. Επίσης, για την αντιμετώπιση ενδεχόμενου προβλήματος που μπορεί να προκύψει λόγω της εμφάνισης του φαινομένου της διακλάδωσης, έχει μελετηθεί σύστημα ελέγχου της συχνότητας λειτουργίας με τέτοιο τρόπο ώστε να την προσαρμόζει στην συχνότητα μηδενισμού φάσης της τάσης πρωτεύοντος και του ρεύματος δευτερεύοντος, όπου αποδεικνύεται πως είναι μοναδική για κάθε κατάσταση λειτουργίας και αυξάνει την μεταφερόμενη ισχύ [6]. Επίσης στην ίδια λογική, μελετάται σύστημα προσαρμογής της συχνότητας λειτουργίας σε συχνότητες μεγαλύτερες από αυτές όπου εμφανίζονται οι τρεις μηδενισμοί φάσης της αντίστασης εισόδου του συστήματος λόγω διακλάδωσης, προς έλεγχο της ισχύος εξόδου [43], καθώς επίσης και σύστημα προσαρμογής της συχνότητας λειτουργίας για διατήρηση σταθερού κέρδους τάσης [47]. Ως προς τον έλεγχο του εύρους λειτουργίας παλμών, μία τεχνική που έχει αποδειχθεί πως συγκριτικά με άλλες είναι πολύ αποδοτική [47] και μπορεί να εφαρμοσθεί μόνο στον αντιστροφής πλήρους γέφυρας, είναι αυτή της ολίσθησης φάσης (Phase Shift), κατά την οποία μεταβάλλοντας την γωνία αγωγής μεταξύ των

παλμών των διακοπών της κάθε ημιέφυρας επιτυγχάνεται έλεγχος του πλάτους της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και κατ' επέκτασιν, της θεμελιώδους συνιστώσας του. Ακόμα μία τεχνική που εφαρμόζεται είναι αυτή της μεταβολής του εύρους λειτουργίας των παλμών που οδηγούν τους διακόπτες, ελέγχοντας έτσι το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα [47], [67], [68].

Από την άλλη μεριά η λειτουργία του ενισχυτή κλάσης E, λόγω της ανάγκης για λειτουργία αυτού σε συνθήκες ZVS, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές των παθητικών στοιχείων που τον υλοποιούν. Συνεπώς, κύριος στόχος των τεχνικών ελέγχου που έχουν εφαρμοσθεί στην συγκεκριμένη τοπολογία είναι η διατήρηση της λειτουργίας σε βέλτιστες συνθήκες σε κατά το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις τιμών αντίστασης φορτίου, σύζευξης και συχνότητας λειτουργίας. Στην διαθέσιμη βιβλιογραφία έχουν γίνει κάποιες προσπάθειες ελέγχου του ενισχυτή κλάσης E σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, έχει μελετηθεί η προσθήκη δικτυωμάτων παθητικών στοιχείων είτε στην είσοδο της διάταξης του ενισχυτή [69], είτε στην έξοδό του [62], για την προσαρμογή του φορτίου που «βλέπει», με σκοπό την μείωση της καταπόνησης του διακόπτη λόγω της υψηλής τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα του και την καλύτερη συμπεριφορά του σε μεταβολές της αντίστασης φορτίου. Επιπλέον, άλλες μελέτες κάνουν χρήση πηνίων κορεσμού (saturable reactors) σε παράλληλη συνδεσμολογία με τον πυκνωτή που βρίσκεται παράλληλα με τον διακόπτη, και με μεταβολή στη συχνότητα λειτουργίας στοχεύουν στη ρύθμιση της συνολικής ενεργούς αντίδρασης του πυκνωτή, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται λειτουργία σε βέλτιστες συνθήκες ανεξάρτητα των μεταβολών της αντίστασης φορτίου και της σύζευξης [70]. Τέλος, στην βιβλιογραφικές πηγές [71], [72], πραγματοποιείται έλεγχος της μεταφερόμενης ισχύος κάνοντας χρήση DC/DC μετατροπέα για την ρύθμιση της τάσης εισόδου του ενισχυτή. Με τις παραπάνω τεχνικές ελέγχου, ανάλογα φυσικά και την εφαρμογή, τα επίπεδα ισχύος και τη συχνότητα λειτουργίας του εκάστοτε συστήματος, επιτυγχάνεται ικανοποιητική συμπεριφορά και απόδοση. Παρ' όλα αυτά όμως, η υλοποίηση αυτών απαιτεί τη χρήση επιπλέον στοιχείων που αυξάνουν σημαντικά την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Καθώς σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης βιολογικών εμφυτευμάτων, όπως προαναφέρθηκε, είναι πολύ σημαντική η δυνατότητα ελέγχου αποκλειστικά από την μεριά του πρωτεύοντος, και στα πλαίσια της σύγκρισης της ελεγχιμότητας των δύο μελετώμενων τοπολογιών οδήγησης στην ίδια βάση, πραγματοποιείται στη συνέχεια η εφαρμογή της τεχνικής ελέγχου βαθμού χρησιμοποίησης των διακοπτικών στοιχείων ή αλλιώς ADC (Assymetrical Duty Cycle Control [67]).

Πιο συγκεκριμένα, οι παλμοί έναυσης των ημιαγωγικών διακοπών της βαθμίδας αντιστροφέα θα είναι ρυθμιζόμενοι ανάλογα με τις απαιτήσεις της αντίστασης φορτίου (συνεπώς ο ελεγκτής θα βρίσκεται μόνο στην μεριά του πρωτεύοντος). Μία τέτοια τεχνική, σε αντιδιαστολή με τις αντίστοιχες τεχνικές που χρησιμοποιούν ελεγκτές τόσο στην μεριά του πρωτεύοντος όσο και στον δευτερεύοντος, μειώνει κατά πολύ το κόστος, το μέγεθος, την πολυπλοκότητα, αλλά και τις απώλειες.

Με την χρήση του ελέγχου ADC, η τάση εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να ελεγχθεί, ρυθμίζοντας κατάλληλα το βαθμό χρησιμοποίησης των ημιαγωγικών διακοπών του (Duty Cycle). Όπως είναι γνωστό, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα (V_1) εξαρτάται από το βαθμό χρησιμοποίησης (D) των ημιαγωγικών διακοπών, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$|\widehat{V}_1| = \frac{4V_{in} \sin(\pi D)}{\pi} \quad (4.3)$$

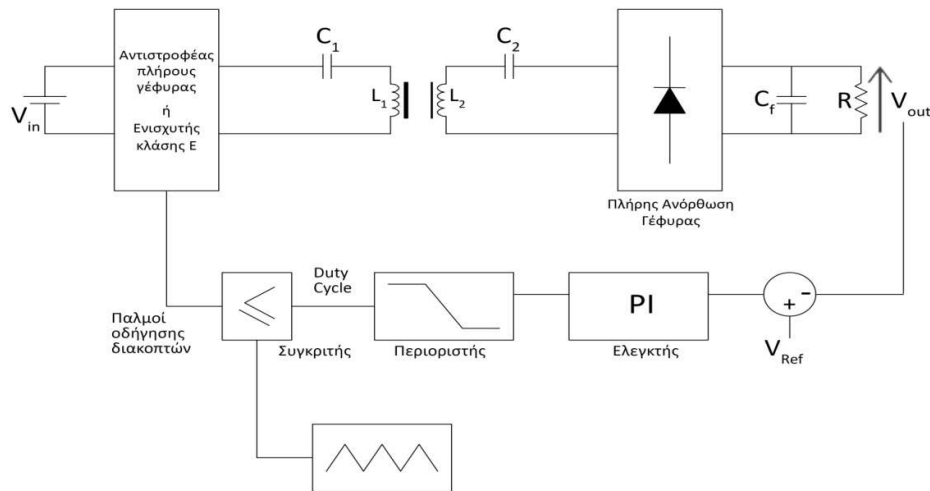
Επομένως, η DC τάση στην έξοδο της διάταξης μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας κάθε φορά - ανάλογα τις απαιτήσεις- τον βαθμό χρησιμοποίησης των ημιαγωγικών διακοπών.

Πιο αναλυτικά ως προς την χρησιμοποιούμενη διάταξη, ένας αισθητήρας τάσης (στην προκειμένη περίπτωση το σύστημα επικοινωνίας της εμφυτεύσιμης συσκευής) μετρά την τιμή της τάσης εξόδου και την μεταφέρει στον ελεγκτή. Αυτή η τάση ανατροφοδότησης συγκρίνεται με μία σταθερή τάση αναφοράς, η οποία είναι και η επιθυμητή τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου. Στη συνέχεια, το σφάλμα που δημιουργείται από την σύγκριση των δύο τιμών τροφοδοτείται σε έναν PI ελεγκτή, ο οποίος δίνει τις κατάλληλες εντολές για να μηδενισθεί το σφάλμα. Μαζί με τον PI ελεγκτή, χρησιμοποιείται και ένας περιοριστής, ώστε οι τιμές του σφάλματος και κατά συνέπεια ο βαθμός χρησιμοποίησης, να παραμείνουν σε ένα επιτρεπτό και ελεγχόμενο εύρος. Τα όρια του βαθμού χρησιμοποίησης επιλέγονται μεταξύ 10 - 50 %.

Τέλος, το σήμα από τον περιοριστή εισάγεται σε έναν συγκριτή, όπου γίνεται σύγκριση με ένα τριγωνικό σήμα με την επιθυμητή συχνότητα, παράγοντας έτσι παλμούς ρυθμιζόμενης συχνότητας και ρυθμιζόμενου εύρους, οι οποίοι οδηγούν τις πύλες των ημιαγωγικών διακοπών (PWM – Pulse Width Modulation).

Η χρήση αυτής της τεχνικής ελέγχου προσφέρει δύο λειτουργίες: Μεταβολή της τάσης εξόδου σε επιθυμητά επίπεδα ρυθμίζοντας την τάση αναφοράς στον συγκριτή και διατήρηση σταθερής τάσης αναφοράς ανεξάρτητα από τις μεταβολές της αντίστασης φορτίου.

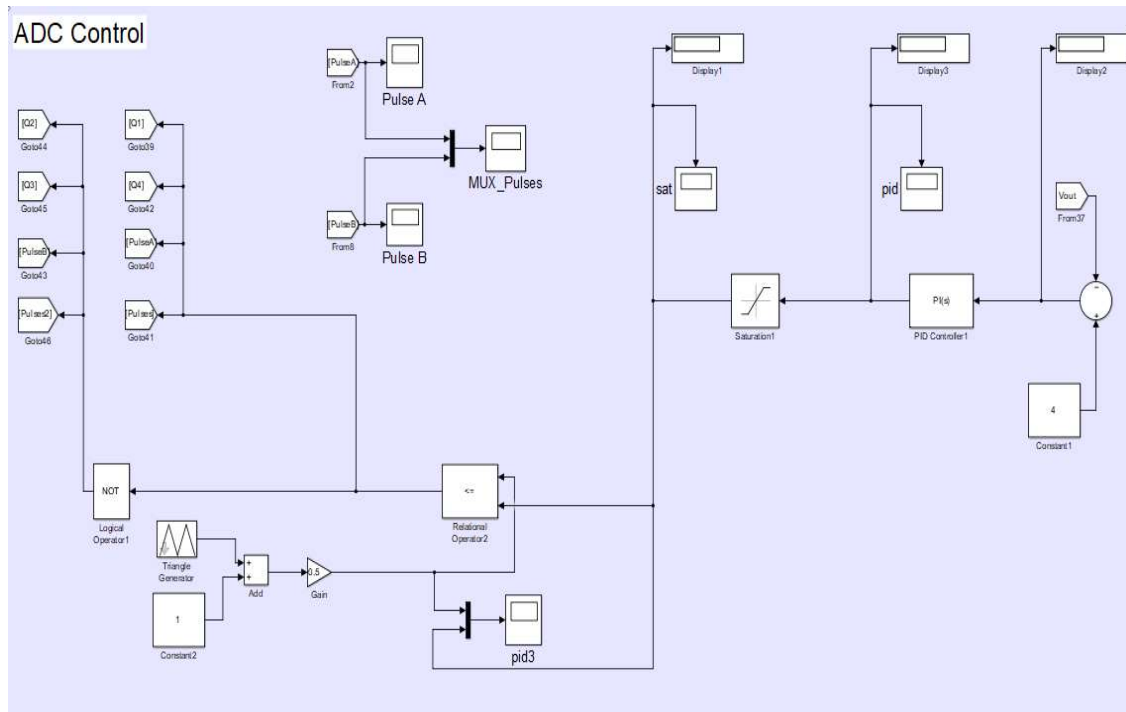
Ο συγκεκριμένος τρόπος ελέγχου επιλέγεται λόγω της απλότητας υλοποίησής του και λόγω της επίδρασής του μόνο σε μεγέθη που αφορούν σε στοιχεία του πρωτεύοντος. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στον ενισχυτή πλήρους γέφυρας (παράγοντας δύο παλμούς συμπληρωματικούς μεταξύ τους, έναν για την οδήγηση των στοιχείων της κάθε ημιγέφυρας) και στον ενισχυτή κλάσης E (παράγοντας έναν μόνο παλμό για την οδήγηση του διακόπτη). Στη συνέχεια πραγματοποιούνται προσομοιώσεις κάνοντας χρήση του ελέγχου ADC και για τις δύο τοπολογίες οδήγησης. Ένα σχηματικό διάγραμμα της εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνικής ελέγχου παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 4.120: Σχηματικό διάγραμμα εφαρμογής κυκλώματος ελέγχου εύρους παλμών στα μελετούμενα συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος.

4.3.1: Προσομοίωση Τεχνικής Ελέγχου Εύρους Παλμών στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας

Η προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιείται με το λογισμικό Simulink, για τις ίδιες συνθήκες που πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 4.1.1, δηλαδή για σταθερή συχνότητα, ίση με 200 kHz, συντελεστή σύζευξης ίσο με 0.39 και αντίσταση φορτίου ίση με 10 Ω. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα ελέγχου του συστήματος, όπως περιγράφηκε παραπάνω:

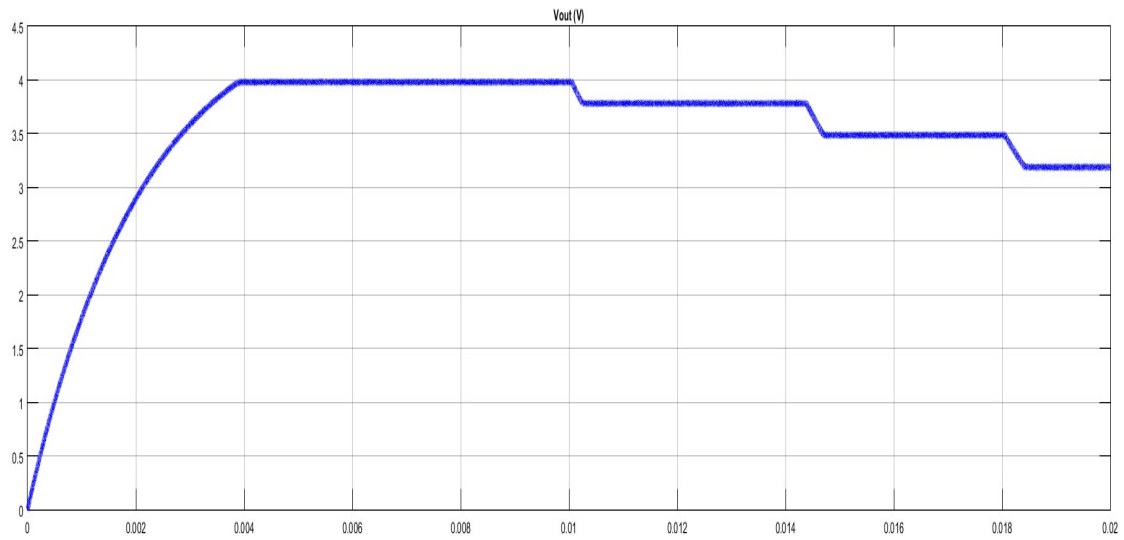


Σχήμα 4.121: Κύκλωμα Ελέγχου Εύρους Παλμού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

Προσομοίωση υπό μεταβλητή τάση αναφοράς:

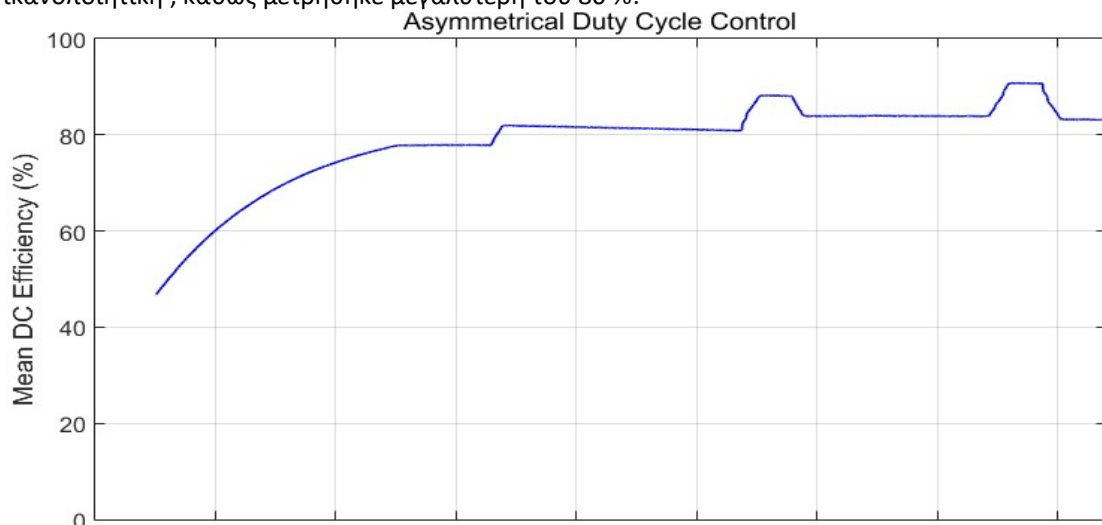
Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, μεταβλήθηκε η τάση αναφοράς στις εξής τιμές : 4 V, 3.8 V, 3.5 V και 3.2 V.

Για την τάση εξόδου λαμβάνεται η κάτωθι κυματομορφή:



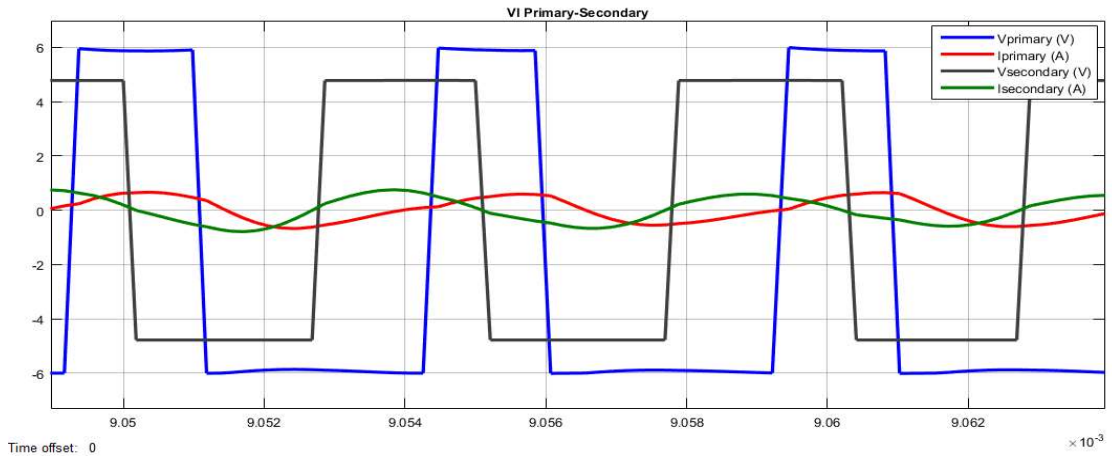
Σχήμα 4.122: Μεταβλητή τάση εξόδου, για διαφορετικές τιμές τάσης αναφοράς.

Η μέση απόδοση του συστήματος για την λειτουργία υπό μεταβλητή τάση αναφοράς είναι αρκετά ικανοποιητική, καθώς μετρήθηκε μεγαλύτερη του 80 %:

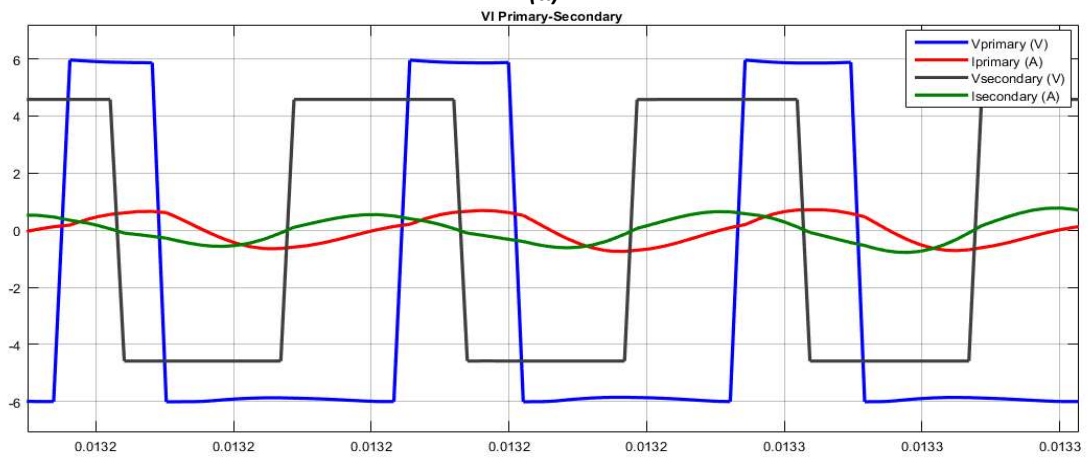


Σχήμα 4.123: Μέση απόδοση συστήματος υπό μεταβλητή τάση εξόδου.

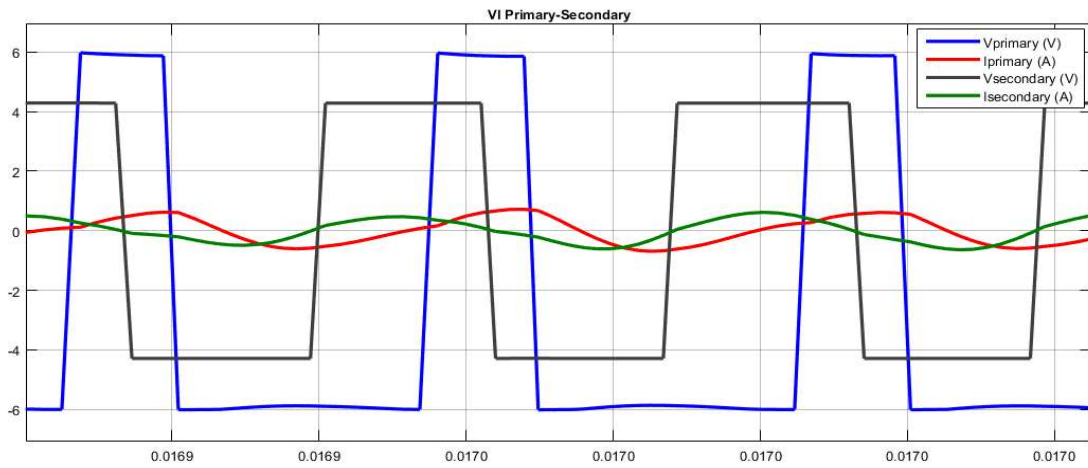
Σχετικά με την τάση και το ρεύμα σε πρωτεύον και δευτερεύον, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα μεγέθη αυτά σε κάθε στάδιο λειτουργίας ανάλογα με την τάση αναφοράς.



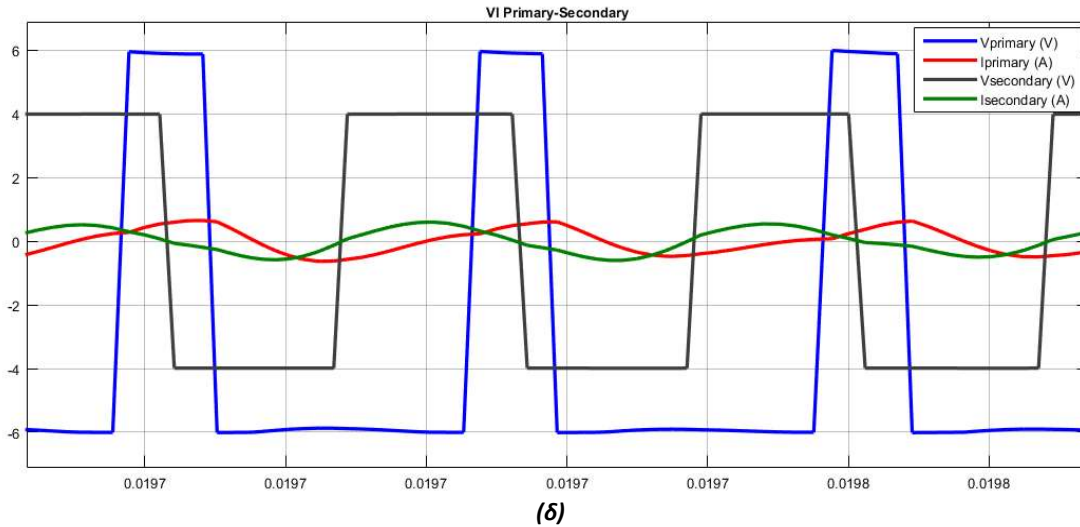
(a)



(b)



(γ)



Σχήμα 4.124: Τάσεις και ρεύματα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον για κάθε τιμή της τάσης αναφοράς. (α): $V_{ref}= 4\text{ V}$, (β): $V_{ref}= 3.8\text{ V}$, (γ): $V_{ref}= 3.5\text{ V}$, (δ): $V_{ref}= 3.2\text{ V}$.

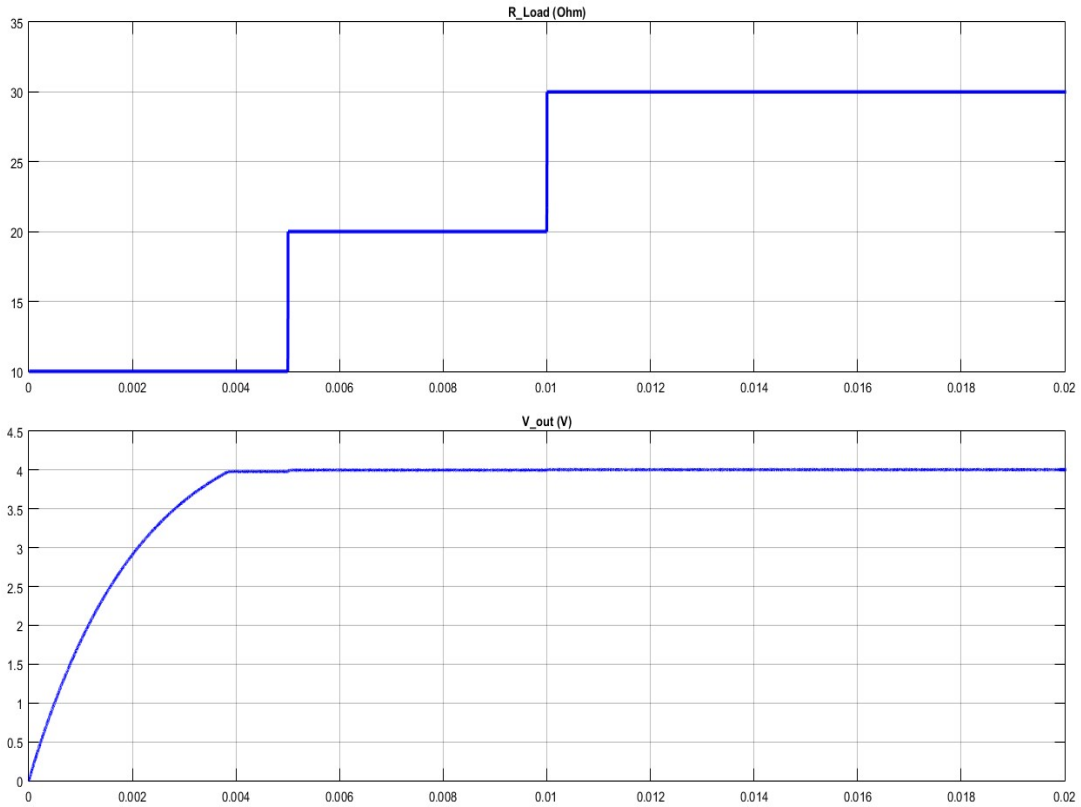
Από τα παραπάνω σχήματα είναι εμφανής η μείωση του εύρους λειτουργίας των παλμών, ούτως ώστε να μειωθεί η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και συνεπώς να μειωθεί η τάση στην μεριά της αντίστασης φορτίου στα επιθυμητά επίπεδα. Πράγματι, η τάση εξόδου ακολουθούσε σε κάθε περίπτωση την τάση αναφοράς.

Η τάση και το ρεύμα είναι σχεδόν συμφασικά τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον, ενώ η παραμόρφωση στα ρεύματα είναι χαμηλή στις υψηλές τιμές του εύρους λειτουργίας, αλλά όσο μειώνεται παρατηρείται αύξηση του αρμονικού περιεχομένου.

Προσομοίωση υπό μεταβλητή τιμή αντίστασης φορτίου:

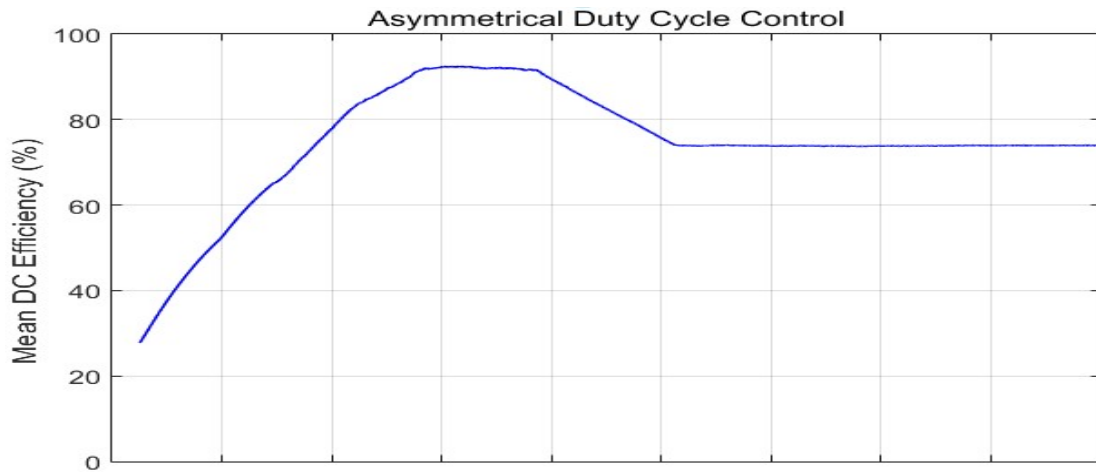
Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, η τιμή της αντίστασης φορτίου έλαβε τις εξής τιμές : 10 Ω, 20 Ω και 30 Ω.

Για την τάση εξόδου ανάλογα με την μεταβολή της αντίστασης φορτίου λαμβάνεται η κάτωθι κυματομορφή:



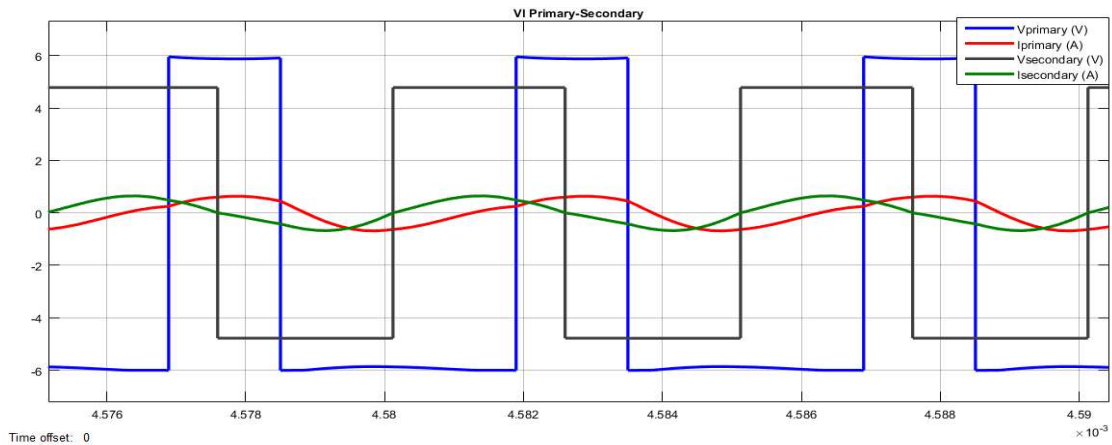
Σχήμα 4.125: Σταθερή τάση εξόδου σε μεταβολή της τιμής της αντίστασης φορτίου.

Η μέση απόδοση του συστήματος για την λειτουργία υπό μεταβλητή τιμή αντίστασης φορτίου είναι και σε αυτή την περίπτωση αρκετά ικανοποιητική, καθώς μετρήθηκε μεγαλύτερη του 70 %:

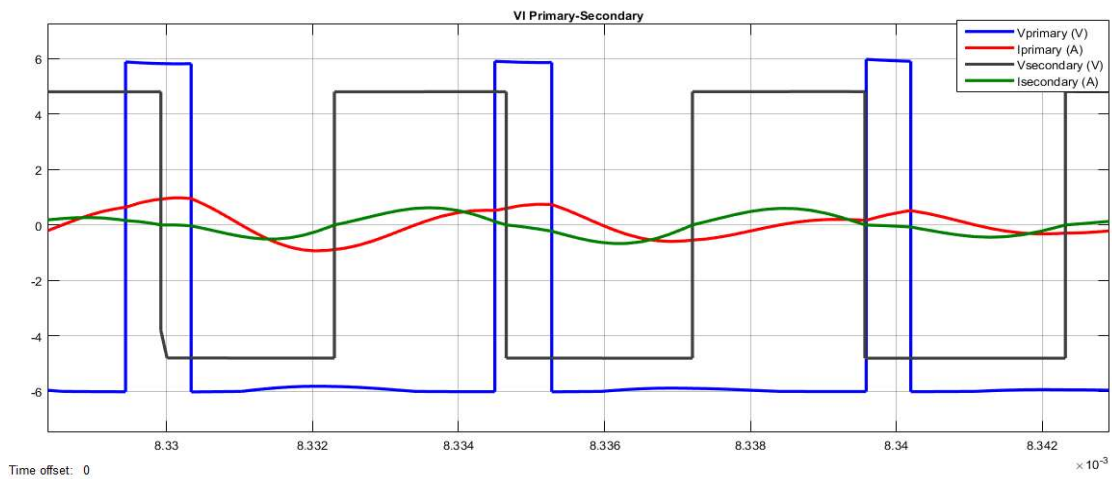


Σχήμα 4.126: Μέση απόδοση συστήματος υπό μεταβλητή τιμή αντίστασης φορτίου.

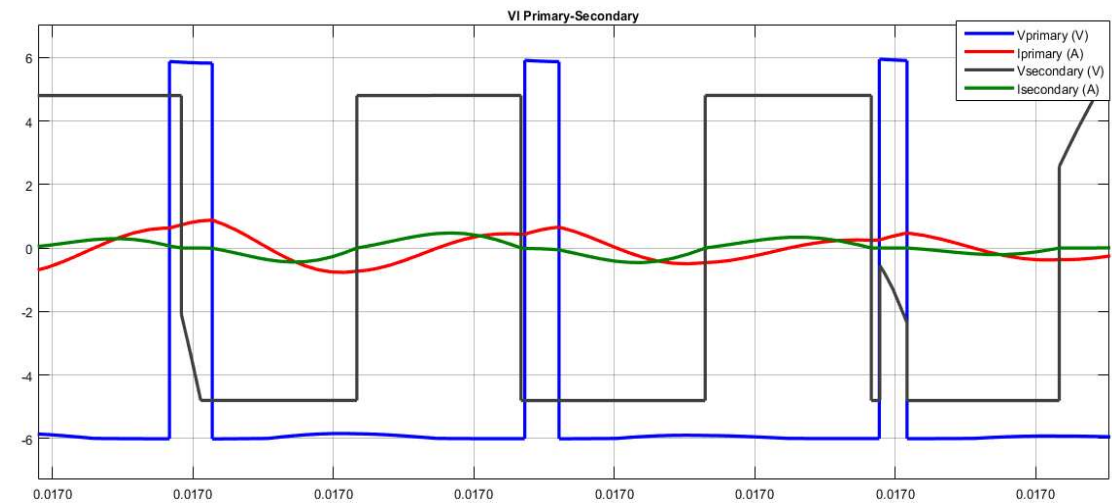
Σχετικά με την τάση και το ρεύμα στην μεριά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα μεγέθη αυτά σε κάθε στάδιο λειτουργίας ανάλογα με την τιμή της αντίστασης φορτίου.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 4.127: Τάσεις και ρεύματα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον για κάθε τιμή της αντίστασης φορτίου. (α): $R=10\ \Omega$, (β): $R=20\ \Omega$, (γ): $R=30\ \Omega$

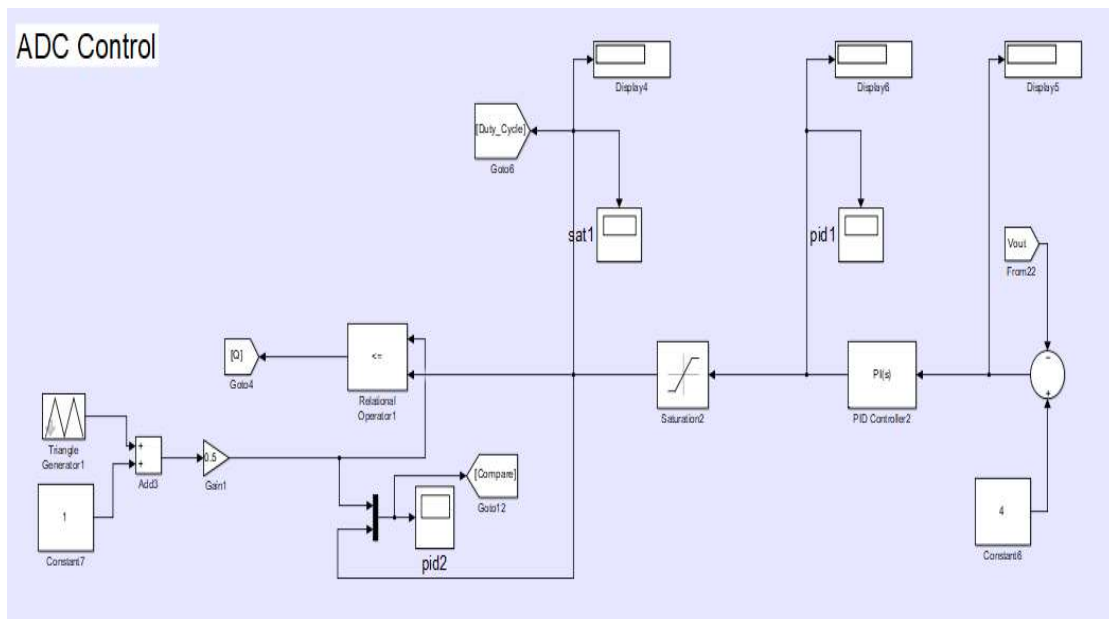
Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται πως και στις τρεις τιμές αντίστασης φορτίου το σύστημα ελέγχου ανταποκρίθηκε ανάλογα, συγκρατώντας την τάση στο επίπεδο αναφοράς. Η τάση και το ρεύμα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον είναι σχεδόν συμφασικά και στην

περίπτωση μεγάλης τιμής αντίστασης φορτίου, ενώ η τάση του δευτερεύοντος παρουσιάζει κάποιες ανομοιομορφίες.

Συνοψίζοντας, εξάγεται το συμπέρασμα πως η τεχνική ελέγχου εύρους παλμού εφαρμόζεται ικανοποιητικά στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και μπορεί να συγκρατήσει την τάση σε επιθυμητά επίπεδα, ακόμα και σε περίπτωση υψηλών σχετικά τιμών αντίστασης φορτίου ή χαμηλής τάσης αναφοράς, με πολύ καλή απόδοση - μεγαλύτερη του 80% - . Σε περιπτώσεις όμως όπου ο ελεγκτής δεν μπορεί να συγκρατήσει την τάση αναφοράς όταν η αντίσταση φορτίου είναι πολύ υψηλή, μία λύση είναι η μείωση της ελάχιστης τιμής του εύρους λειτουργίας των παλμών σε ποσοστό κάτω του 10%.

4.3.2: Προσομοίωση Τεχνικής Ελέγχου Εύρους Παλμών στον Ενισχυτή Κλάσης E

Η προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιείται με το λογισμικό Simulink, για τις ίδιες συνθήκες που πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 4.2.1, δηλαδή για σταθερή συχνότητα, ίση με 200 kHz, συντελεστή σύζευξης ίσο με 0.39 και τιμή αντίστασης φορτίου ίση με 10 Ω. Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το κύκλωμα ελέγχου του συστήματος, όπως περιγράφηκε παραπάνω:

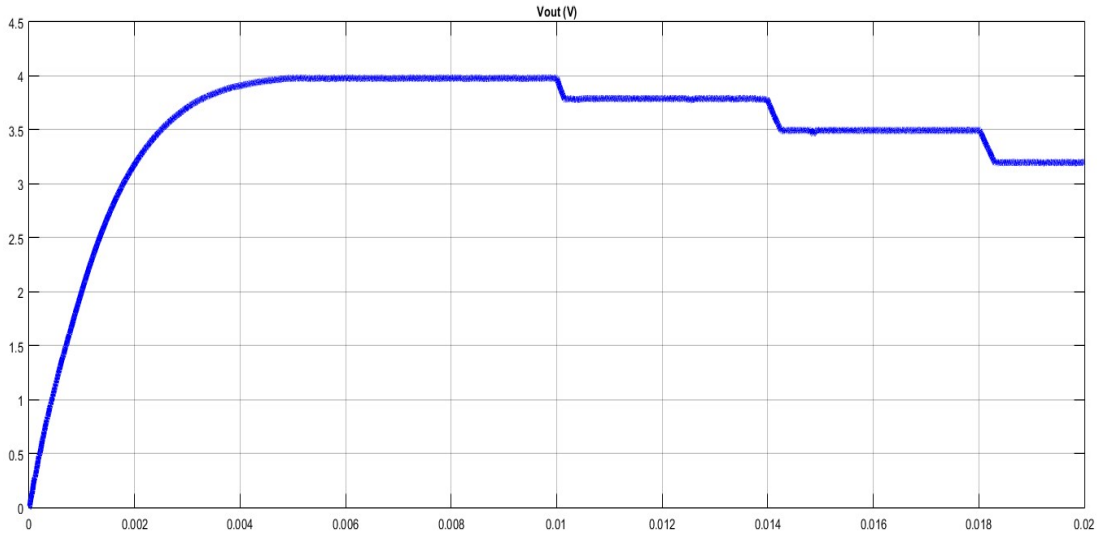


Σχήμα 4.128: Κύκλωμα Ελέγχου Εύρους Παλμού Ενισχυτή Κλάσης E.

Προσομοίωση υπό μεταβλητή τάση αναφοράς:

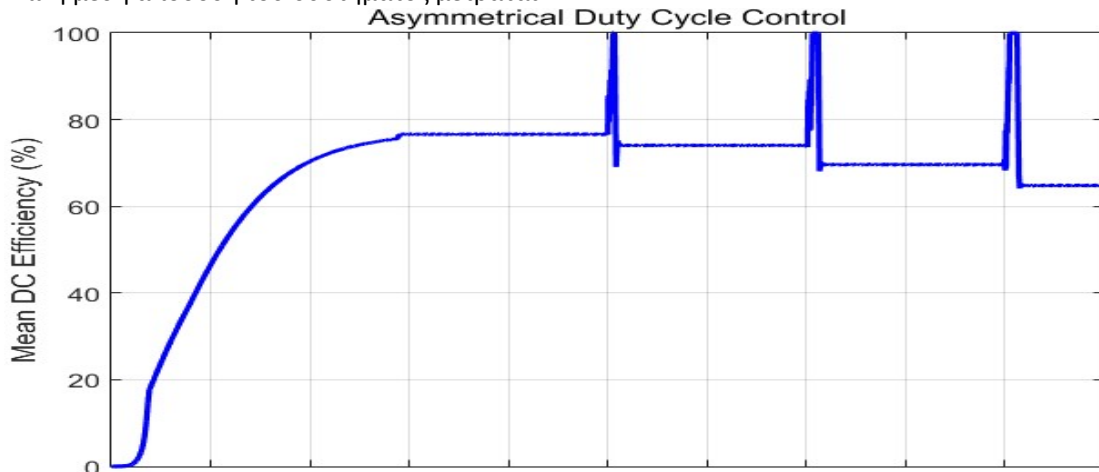
Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, μεταβλήθηκε η τάση αναφοράς στις εξής τιμές : 4 V, 3.8 V, 3.5 V και 3.2 V.

Για την τάση εξόδου λαμβάνεται η κάτωθι κυματομορφή:



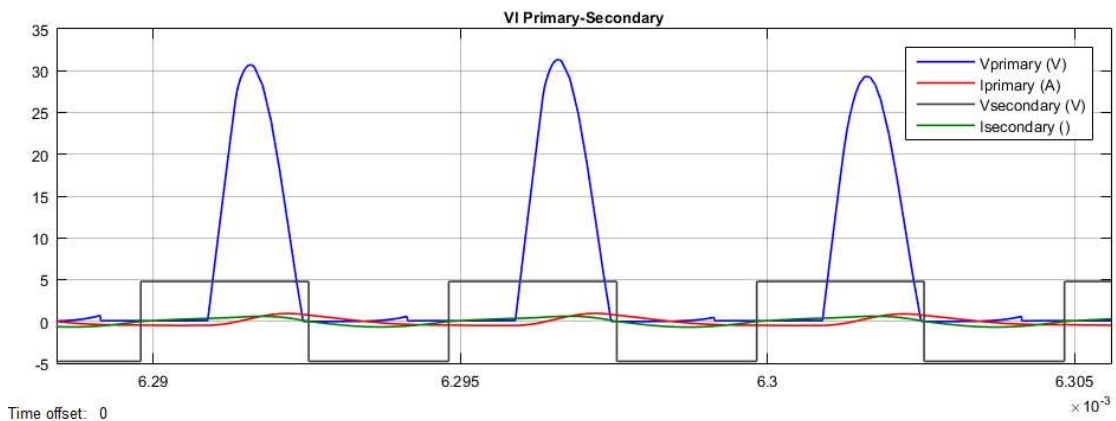
Σχήμα 4.129: Μεταβλητή τάση εξόδου, για διαφορετικές τιμές τάσης αναφοράς.

Ενώ η μέση απόδοση του συστήματος μετράται:

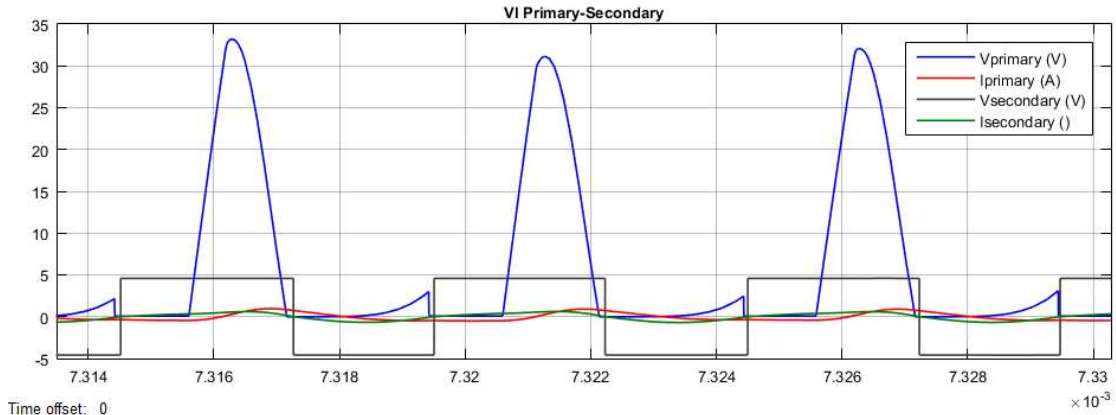


Σχήμα 4.130: Μέση απόδοση συστήματος υπό μεταβλητή τάση εξόδου.

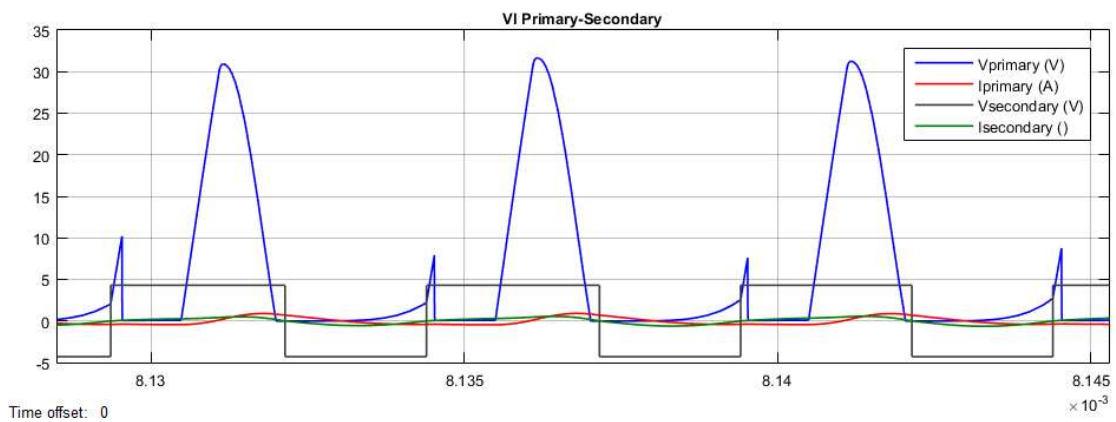
Σχετικά με την τάση και το ρεύμα στην μεριά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται συνολικά τα μεγέθη αυτά σε κάθε στάδιο λειτουργίας ανάλογα με την τάση αναφοράς.



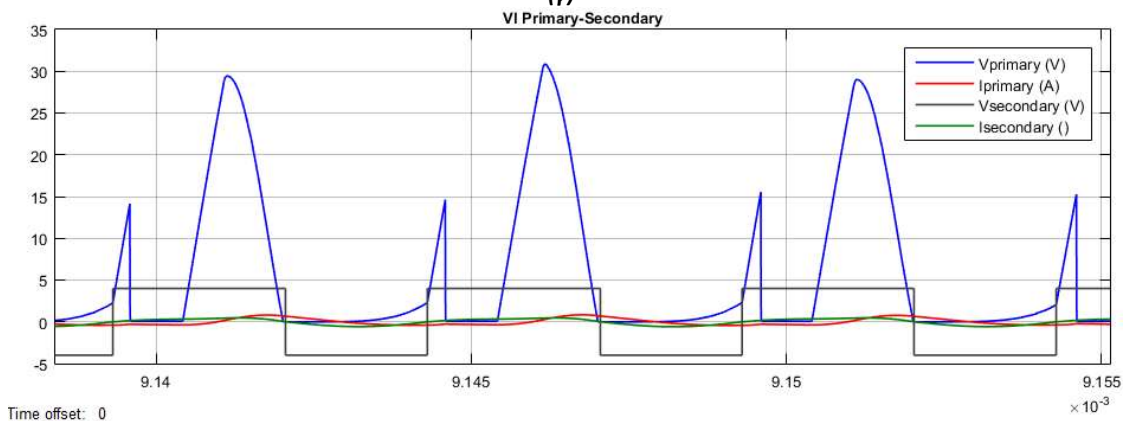
(α)



(β)



(γ)



(δ)

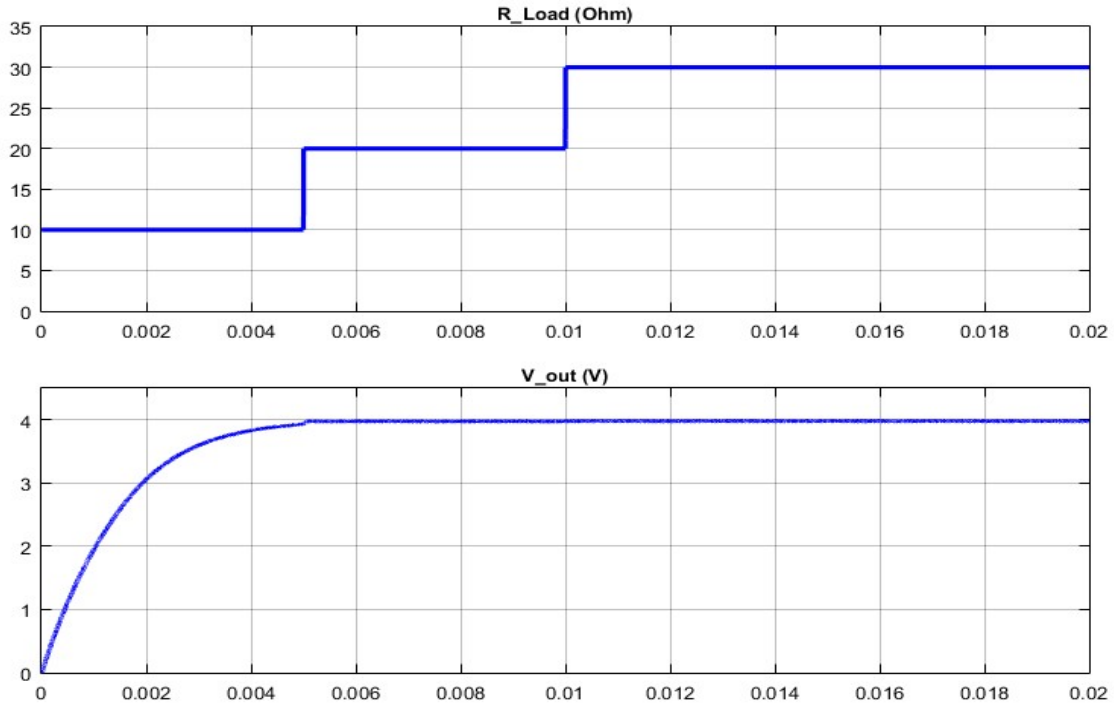
Σχήμα 4.131: Τάσεις και ρεύματα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον για κάθε τιμή της τάσης αναφοράς. (α): $V_{ref}=4\text{ V}$, (β): $V_{ref}=3.8\text{ V}$, (γ): $V_{ref}=3.5\text{ V}$, (δ): $V_{ref}=3.2\text{ V}$.

Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι μειώνοντας το εύρος λειτουργίας του παλμού, μειώνεται και η τάση στην έξοδο της διάταξης, όμως η τάση στα άκρα του διακόπτη κατά τη στιγμή της μετάβασής του σε κατάσταση αγωγής, λαμβάνει αυξανόμενες τιμές και δεν επιτυγχάνεται λειτουργία σε ZVS, γεγονός που αυξάνει τις διακοπτικές απώλειες του συστήματος. Επίσης η τάση και το ρεύμα στο δευτερεύον είναι σχεδόν συμφασικά.

Προσομοίωση υπό μεταβλητή τιμή αντίστασης φορτίου:

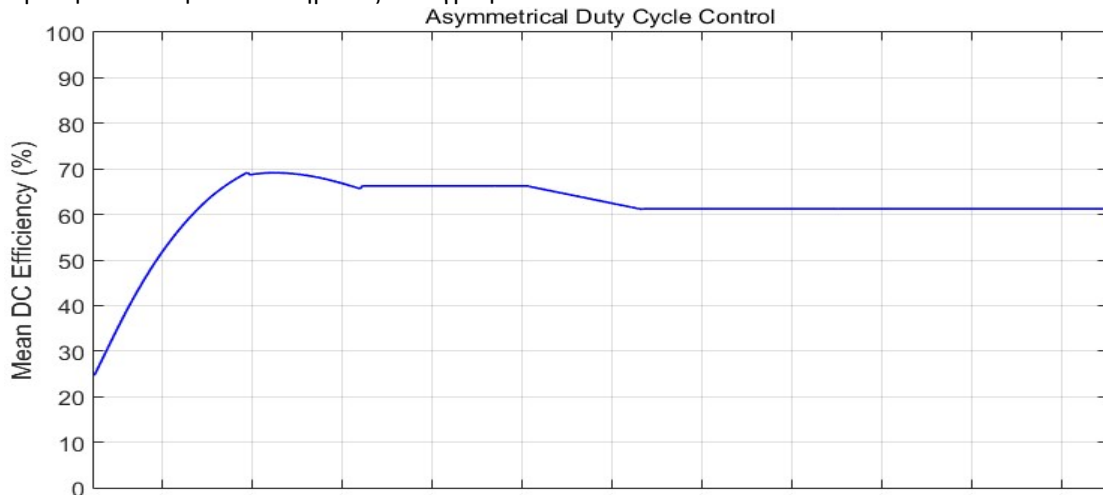
Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, η τιμή της αντίστασης φορτίου έλαβε τις εξής τιμές : 10 Ω, 20 Ω και 30 Ω.

Για την τάση εξόδου ανάλογα με την μεταβολή της αντίστασης φορτίου λαμβάνεται η κάτωθι κυματομορφή:



Σχήμα 4.132: Σταθερή τάση εξόδου σε μεταβολή της τιμής της αντίστασης φορτίου.

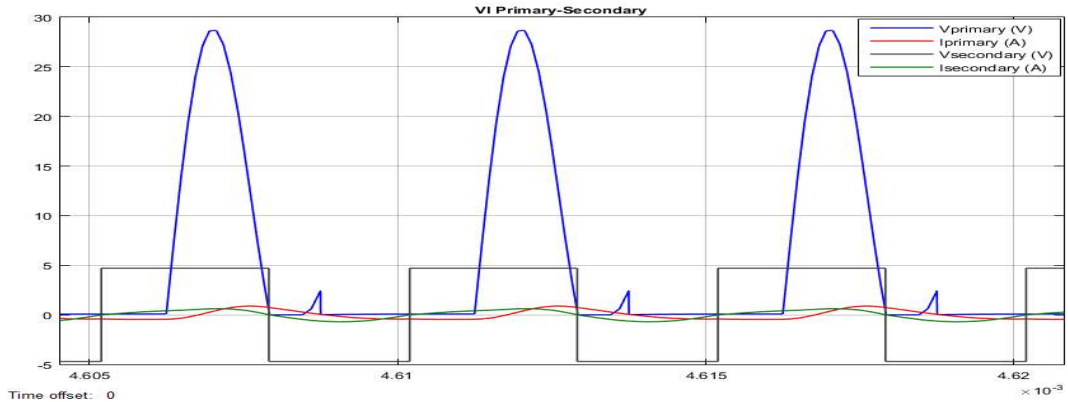
Η μέση απόδοση του συστήματος καταγράφεται:



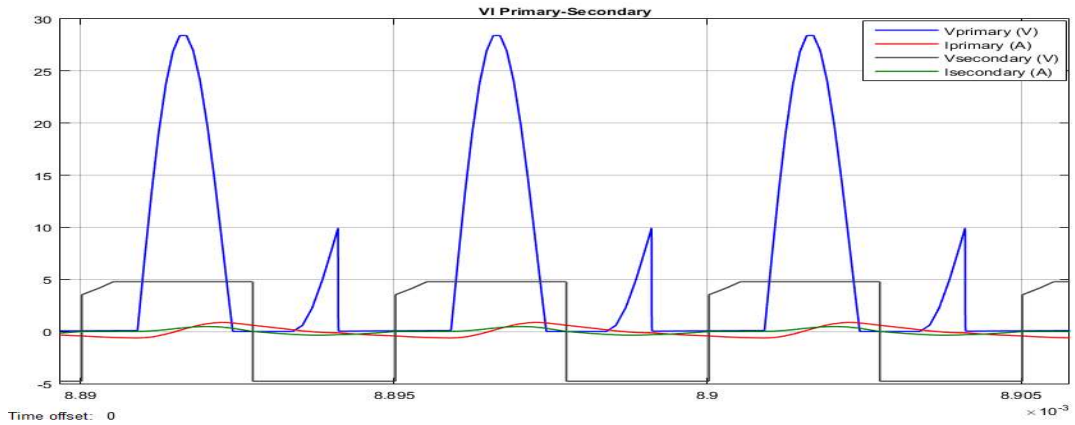
Σχήμα 4.133: Μέση απόδοση συστήματος υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου.

Όπως φαίνεται, είναι αρκετά χαμηλή και κυμαίνεται μεταξύ 60 - 70 %.

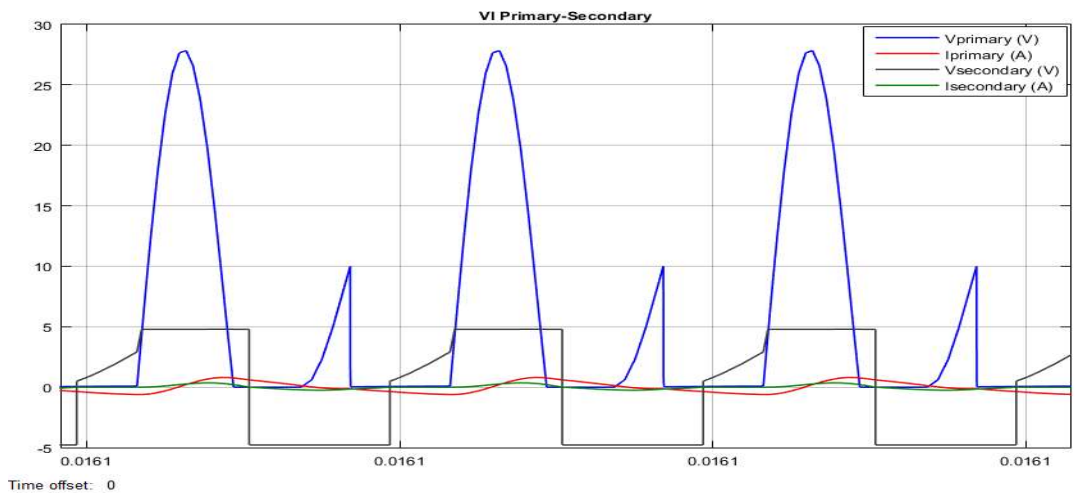
Σχετικά με την τάση και το ρεύμα σε πρωτεύον και δευτερεύον, στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα μεγέθη αυτά σε κάθε στάδιο λειτουργίας ανάλογα με την τιμή της αντίστασης φορτίου.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 4.134: Τάσεις και ρεύματα στο πρωτεύον και στο δευτερεύον για κάθε τιμή της αντίστασης φορτίου. (α): $R=10 \Omega$, (β): $R=20 \Omega$, (γ): $R=30 \Omega$

Όπως είναι εμφανές, όσο η αντίσταση φορτίου αυξάνεται, η λειτουργία του συστήματος παρεκκλίνει ολοένα και περισσότερο από το βέλτιστο. Όσο η αντίσταση φορτίου αυξάνεται, το

εύρος λειτουργίας μειώνεται και ο διακόπτης μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής με αρκετά υψηλή τάση στα άκρα του. Επίσης, αυξάνεται το αρμονικό περιεχόμενο των ρευμάτων στο πρωτεύον και στο δευτερεύον, γεγονός που προσθέτει στις ήδη αυξημένες απώλειες.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται ότι είναι δυνατή η ρύθμιση και ο έλεγχος της τάσης εξόδου συστήματος επαγωγικής φόρτισης που κάνει χρήση ενισχυτή κλάσης E, μεταβάλλοντας το εύρος λειτουργίας του διακόπτη, με τίμημα όμως την μειωμένη απόδοση λόγω διακοπτικών απωλειών.

Έτσι καταδεικνύεται η δυσκολία αποδοτικού ελέγχου της διάταξης του ενισχυτή κλάσης E καθώς οι συνθήκες λειτουργίας του μεταβάλλονται. Πρόκειται για μία διάταξη που παρά την φαινομενική της απλότητα είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθεί έτσι ώστε να λειτουργεί υπό βέλτιστες συνθήκες. Από την άλλη μεριά ο αντιστροφείας πλήρους γέφυρας, παρά το ότι αποτελείται από τέσσερα διακοπτικά στοιχεία, έχει καλύτερη ελεγχσιμότητα και ευκολία χειρισμού.

Αξιολογώντας την τεχνική έλεγχου εύρους λειτουργίας παλμών σε μια εφαρμογή ασύρματης φόρτισης, μέσω των παραπάνω προσομοιώσεων αναδεικνύονται τα ακόλουθα πλεονεκτήματά της:

- Λόγω της απουσίας μονάδας ελέγχου στην μεριά του δευτερεύοντος, μειώνεται η πολυπλοκότητα, το μέγεθος και το κόστος της διάταξης.
- Παρουσιάζει γρήγορη απόκριση στις μεταβολές της τάσης αναφοράς ή στις μεταβολές της αντίστασης φορτίου, ρυθμίζοντας αποτελεσματικά την τάση εξόδου.
- Προσφέρει ικανοποιητικές τιμές αποδόσεων, αποτελώντας μία πολύ καλή τεχνική έλεγχου της τάσης εξόδου.

Από την άλλη μεριά, στην ίδια εφαρμογή, η συγκεκριμένη τεχνική έλεγχου παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία είναι:

- Το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον δεν είναι καθαρά ημιτονοειδές και έχει αυξημένο αρμονικό περιεχόμενο, ειδικά όσο μειώνεται το εύρος λειτουργίας των παλμών. Η παραμόρφωση αυτή του ρεύματος υποδηλώνει την παρουσία αρμονικών ρεύματος, οι οποίες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας στο τύλιγμα του πρωτεύοντος και συνεπώς αύξηση των απωλειών. Τα παραπάνω, συντελούν στην μείωση της απόδοσης του συστήματος.
- Όταν η τιμή του εύρους λειτουργίας των παλμών γίνει πολύ μικρή, στην περίπτωση του αντιστροφεία πλήρους γέφυρας είναι πιθανό να παρουσιασθεί το φαινόμενο του κωδωνισμού (ringing) στην τάση εξόδου του, δηλαδή υψίσυχνι παλμοί τάσης με μεγάλο αρμονικό περιεχόμενο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποτελέσει πηγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) στην προς φόρτιση εμφυτεύσιμη συσκευή.
- Και πάλι όταν η τιμή του εύρους λειτουργίας των παλμών μειωθεί αρκετά, μπορεί να προκαλέσει ενδεχόμενες δυσλειτουργίες. Στην περίπτωση του ενισχυτή κλάσης E, όσο μειώνεται το εύρος λειτουργίας του παλμού που οδηγεί τον διακόπτη, τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα να λειτουργεί σε μη βέλτιστες συνθήκες και να μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής με υψηλή τάση στα άκρα του (hard – switching), αυξάνοντας κατά πολύ τις διακοπτικές απώλειες, μειώνοντας έτσι επιπλέον τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Κεφάλαιο 5: Πειραματική Αξιολόγηση

Με σκοπό την εις βάθος κατανόηση και σύγκριση των δύο διατάξεων και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, πραγματοποιήθηκε η μελέτη τους υπό πραγματικές συνθήκες, στην πρωτότυπη πειραματική διάταξη του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος.

Η κύρια διάταξη αποτελείται από δύο επίπεδα, κυκλικά πηνία, τοποθετημένα σε μία κατασκευή μέσω της οποίας είναι η δυνατή η σχετική τους μετατόπιση. Και τα δύο πηνία είναι κατασκευασμένα από 23 σπείρες σύρματος Litz, το οποίο με τη σειρά του αποτελείται από 24 κλώνους χαλκού πάχους 0.08 mm. Η συνολική διάμετρος του σύρματος είναι 0.5 mm, ενώ η διάμετρος του κάθε πηνίου είναι 4.5 cm, με κενό διαμέτρου 1.5 cm στο μέσον τους.

Η τιμή των πυκνωτών συντονισμού που χρησιμοποιήθηκαν είναι η πλησιέστερη δυνατή στην θεωρητική τιμή που υπολογίσθηκε στο κεφάλαιο 4, και είναι ίση με 33 nF.

Τα ημιαγωγικά στοιχεία της διάταξης είναι MOSFET υψηλής διακοπτικής συχνότητας και χαμηλής αντίστασης αγωγής, ενώ για την ανόρθωση του δευτερεύοντος χρησιμοποιείται πλήρης γέφυρα με τέσσερις ταχείες διόδους πυριτίου χαμηλής πτώσης τάσης ορθής αγωγής, ώστε να περιορισθούν οι απώλειες. Η αντίσταση φορτίου οδηγείται μέσω χωρητικού φίλτρου εξομάλυνσης.

Η τροφοδοσία του συστήματος πραγματοποιείται με την χρήση DC τροφοδοτικού. Για την μέτρηση του ρεύματος εξόδου χρησιμοποιήθηκε μία ωμική αντίσταση μικρής τιμής (0.248 Ω) συνδεδεμένη σε σειρά με την αντίσταση φορτίου, ούτως ώστε σε περίπτωση απρόβλεπτης αποκοπής του φορτίου, να μην προκληθεί ζημιά στα μετρητικά όργανα. Η τιμή του ρεύματος υπολογίζεται μετρώντας σε κάθε περίπτωση την τάση στα άκρα της αντίστασης μέτρησης με ένα βολτόμετρο και διαιρώντας την μετρηθείσα τιμή με την τιμή της αντίστασης.

Η λίστα στοιχείων της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1 .

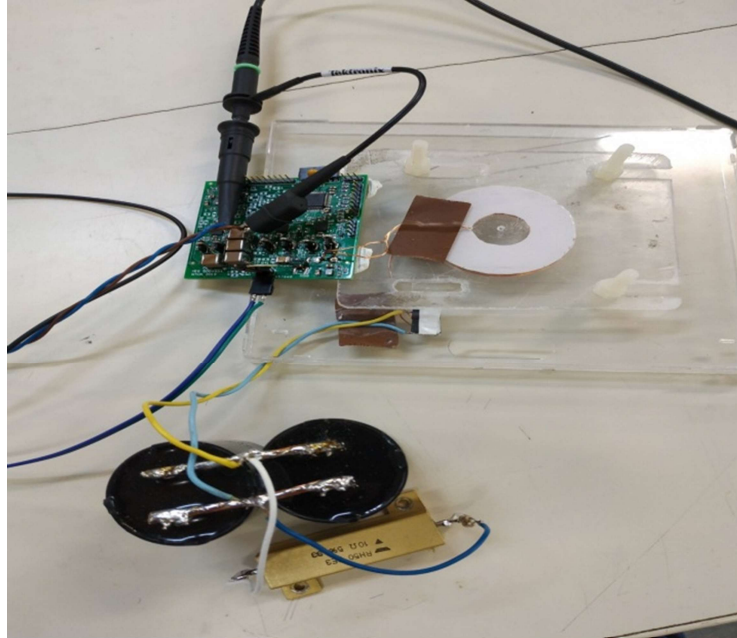
Στοιχείο	Τιμή/ Τύπος
L1, L2	20 μH
C1, C2	33 nF
MOSFETs αντιστροφένων	CSD19533Q5A
Δίοδοι ανορθωτή	PMEG6010
Σύρμα Litz	24 κλώνοι x 0.08mm, χαλκός

Πίνακας 5.1: Λίστα στοιχείων πειραματικής διάταξης

Στη συνέχεια, πραγματοποιούνται μετρήσεις για κάθε μία από τις μελετώμενες τοπολογίες, σε συνθήκες μεταβλητής σύζευξης, συχνότητας και αντίστασης φορτίου.

5.1: Πειραματικές μετρήσεις συστήματος επαγωγικής φόρτισης με διάταξη αντιστροφέα πλήρους γέφυρας

Η μελετώμενη πειραματική διάταξη είχε ως εξής:



Σχήμα 5.1: Πειραματική διάταξη συστήματος με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

Για την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, ελήφθησαν μετρήσεις για τις ακόλουθες συνθήκες:

- Μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας του συστήματος (5-6 V, 10 V, 15 V) σε συνθήκες ισχυρής, μέσης και ασθενούς σύζευξης (0.6, 0.39 και 0.15 αντίστοιχα) για δύο δεδομένες τιμές αντίστασης φορτίου (5 Ω και 10 Ω) και λειτουργία στη συχνότητα συντονισμού (200 kHz).
- Μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας για δεδομένες συνθήκες σύζευξης και αντίστασης φορτίου.

Τα μεγέθη που καταγράφηκαν είναι οι τάσεις και τα ρεύματα εισόδου, καθώς και οι τάσεις και τα ρεύματα εξόδου, με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Ως χωρητικό φίλτρο στην έξοδο του ανορθωτή χρησιμοποιήθηκαν δύο πυκνωτές πολυπροπυλενίου, τιμής 30 μF έκαστος, συνδεδεμένοι παράλληλα μεταξύ τους σχηματίζοντας συνολική χωρητικότητα τιμής 60 μF . Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Μετρήσεις με μεταβλητή τάση εισόδου:

Αντίσταση φορτίου - $R=5 \Omega$, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.6$

V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η_{DC} (%)
5	0.1276	1.45	0.274194	0.638	0.397581	62.31672
10.01	0.22	2.94	0.548387	2.2022	1.612258	73.21125
14.98	0.31	4.35	0.822581	4.6438	3.578226	77.05383

Αντίσταση φορτίου - R=5 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.39

V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η_{DC} (%)
5.064	0.2	1.84	0.358871	1.0128	0.660323	65.19773
10.01	0.36	3.77	0.709677	3.6036	2.675484	74.24475
14.97	0.5	5.51	1.064516	7.485	5.865484	78.36318

Αντίσταση φορτίου - R=5 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.15

V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η_{DC} (%)
5.025	1.28	4.59	0.903226	6.432	4.145806	64.45595

Στην περίπτωση ασθενούς σύζευξης δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για μεγαλύτερη τάση τροφοδοσίας προς προστασία της διάταξης, καθώς το ρεύμα που διέρρεε τα πηνία της αυξανόταν κατά πολύ και προκαλούσε αύξηση στη θερμοκρασία τους.

Από τα παραπάνω μετρούμενα αποτελέσματα, παρατηρείται πως με αύξηση της τάσης τροφοδοσίας, προκαλείται αύξηση και στην συνολική απόδοση του συστήματος καθώς αυξάνονται αντίστοιχα η ισχύς του και η τάση στην έξοδο της διάταξης. Παρ' όλα αυτά, σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης βιολογικών εμφυτευμάτων είναι αναγκαίος ο συμβιβασμός σε χαμηλότερες τιμές απόδοσης έναντι των υψηλότερων που προσφέρει μια αυξημένη τάση τροφοδοσίας, διότι είναι πολύ πιθανή η αύξηση της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος και κατ' επέκταση των ιστών του εκάστοτε ασθενή, λόγω των υψηλότερων τιμών ρεύματος που το διαρρέει.

Αντίσταση φορτίου - R=10 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.6

V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η_{DC} (%)
6	0.24	3.42	0.322581	1.44	1.103226	76.6129
9.99	0.37	5.68	0.53629	3.6963	3.046129	82.41022
14.92	0.53	8.42	0.802419	7.9076	6.756371	85.44149

Αντίσταση φορτίου - R=10 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.39

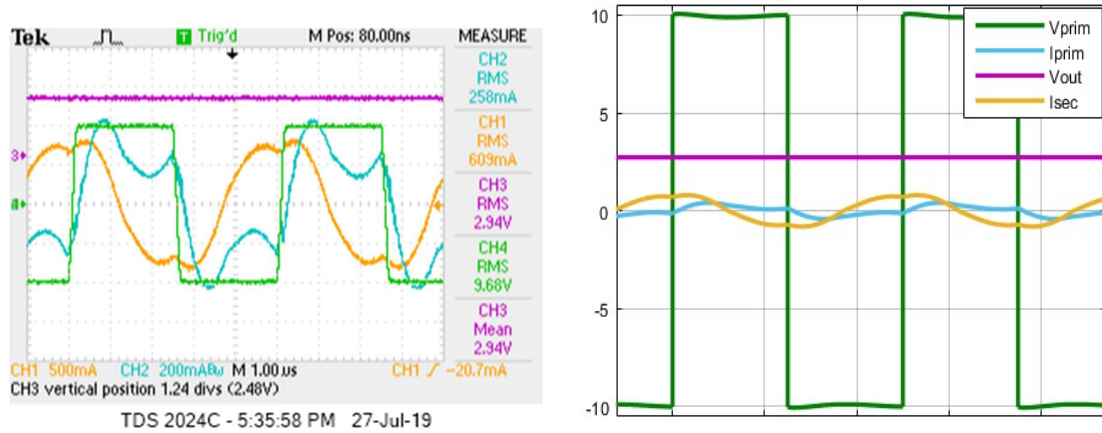
V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η_{DC} (%)
5.985	0.37	4.34	0.407258	2.21445	1.7675	79.81666
9.95	0.58	7.15	0.677419	5.771	4.843548	83.9291
14.98	0.85	10.7	1.024194	12.733	10.95887	86.06668

Και σε αυτή την περίπτωση, για λόγους προστασίας της πειραματικής διάταξης, δεν ελήφθησαν μετρήσεις στην περίπτωση ασθενούς σύζευξης, λόγω εμφάνισης μεγάλων τιμών ρευμάτων.

Ωστόσο, με την αύξηση της τιμής της αντίστασης φορτίου, παρατηρείται σημαντική βελτίωση της απόδοσης ακόμα και στην περίπτωση χαμηλής τάσης τροφοδοσίας.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες μετρούμενες κυματομορφές από τις παραπάνω περιπτώσεις, σε ευθεία σύγκριση με τις αντίστοιχες που λαμβάνονται από προσομοίωση του συστήματος στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας στο Simulink. Ταυτόχρονα, συγκρίνονται και οι μετρούμενες τιμές από τον παλμογράφο, με τις τιμές της προσομοίωσης (Σημειώνεται ότι στο κανάλι 1 του παλμογράφου αντιστοιχεί το ρεύμα στο δευτερεύον, στο κανάλι 2 το ρεύμα στο πρωτεύον, στο κανάλι 3 η τάση στην αντίσταση φορτίου και στο κανάλι 4 η τάση εξόδου του αντιστροφέα).

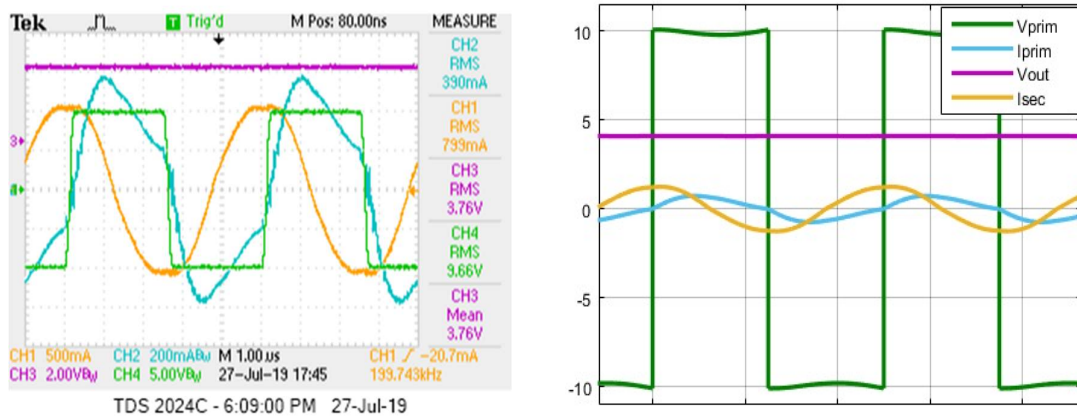
Τάση εισόδου $V_{in}=10\text{ V}$, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.6$, Αντίσταση φορτίου - $R=5\ \Omega$:



Σχήμα 5.2: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για $V_{in}=10\text{ V}$, $k=0.6$, $R=5\ \Omega$.

RMS	V_{primary} (V)	I_{primary} (A)	V_{out} (V)	$I_{\text{secondary}}$ (A)	η_{DC} (%)
Πείραμα	9.68	0.258	2.94	0.609	73.211
Προσομοίωση	9.958	0.2462	2.73	0.5967	72.37

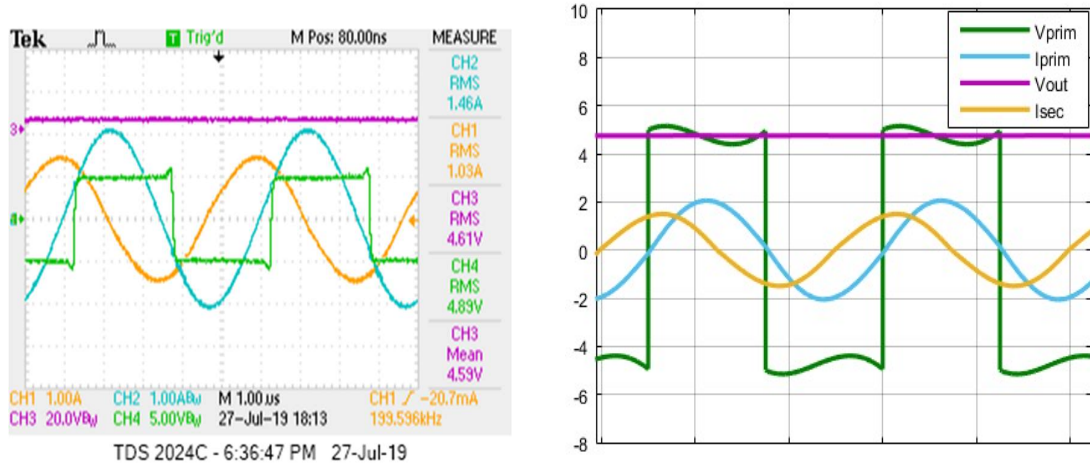
Τάση εισόδου $V_{in}=10\text{ V}$, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.39$, Αντίσταση φορτίου - $R=5\ \Omega$:



Σχήμα 5.3: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για $V_{in}=10\text{ V}$, $k=0.39$, $R=5\ \Omega$.

RMS	V_{primary} (V)	I_{primary} (A)	V_{out} (V)	$I_{\text{secondary}}$ (A)	η_{DC} (%)
Πείραμα	9.66	0.390	3.76	0.799	74.2447
Προσομοίωση	9.913	0.4986	4.098	0.9072	76.85

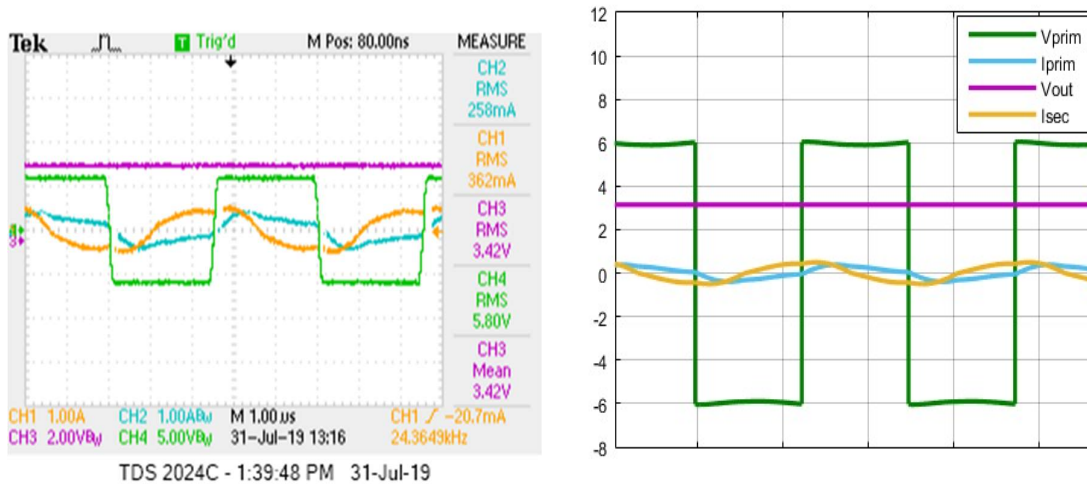
Τάση εισόδου $V_{in}=5\text{ V}$, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.15$, Αντίσταση φορτίου - $R=5\ \Omega$:



Σχήμα 5.4: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για $V_{in}=5\text{ V}$, $k=0.15$, $R=5\ \Omega$.

RMS	$V_{\text{primary}}\text{ (V)}$	$I_{\text{primary}}\text{ (A)}$	$V_{\text{out}}\text{ (V)}$	$I_{\text{secondary}}\text{ (A)}$	$\eta_{\text{DC}}\text{ (\%)}$
Πείραμα	4.89	1.46	4.61	1.03	64.4556
Προσομοίωση	4.771	1.459	4.753	1.058	68.57

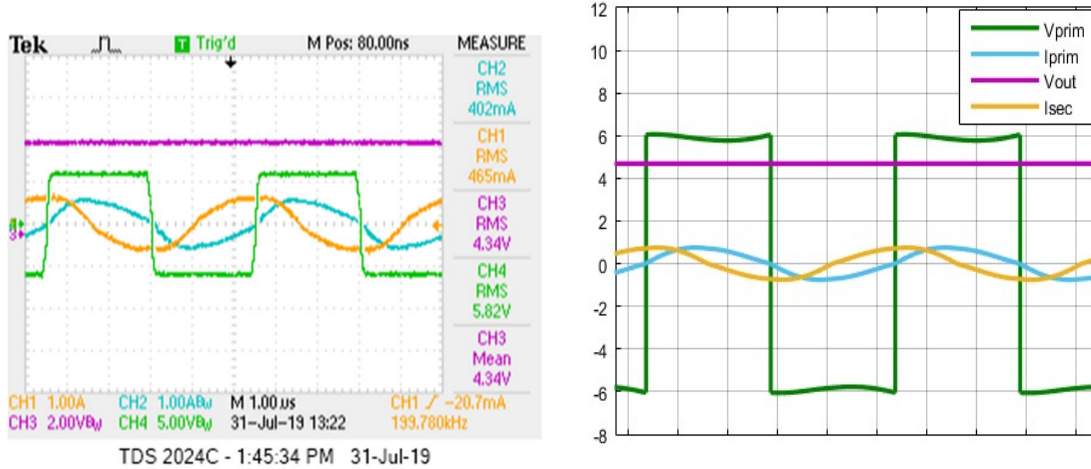
Τάση εισόδου $V_{in}=6\text{ V}$, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.6$, Αντίσταση φορτίου - $R=10\ \Omega$:



Σχήμα 5.5: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για $V_{in}=6\text{ V}$, $k=0.6$, $R=10\ \Omega$.

RMS	$V_{\text{primary}}\text{ (V)}$	$I_{\text{primary}}\text{ (A)}$	$V_{\text{out}}\text{ (V)}$	$I_{\text{secondary}}\text{ (A)}$	$\eta_{\text{DC}}\text{ (\%)}$
Πείραμα	5.8	0.258	3.42	0.362	76.129
Προσομοίωση	5.955	0.253	3.148	0.356	75.77

Τάση εισόδου $V_{in}=6\text{ V}$, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.39$, Αντίσταση φορτίου - $R=10\ \Omega$:



Σχήμα 5.6: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφή πλήρους γέφυρας για $V_{in}=6\text{ V}$, $k=0.39$, $R=10\ \Omega$.

RMS	$V_{\text{primary}}\text{ (V)}$	$I_{\text{primary}}\text{ (A)}$	$V_{\text{out}}\text{ (V)}$	$I_{\text{secondary}}\text{ (A)}$	$\eta_{\text{DC}}\text{ (\%)}\text{}$
Πείραμα	5.82	0.402	4.34	0.465	79.816
Προσομοίωση	5.906	0.532	4.688	0.535	78.89

Όπως φαίνεται, υπάρχει μεγάλη συνάφεια μεταξύ των αποτελεσμάτων των πειραμάτων και των προσομοιώσεων. Καθώς είναι φυσικό, στην όλη διαδικασία πρέπει να συγκαταλεχθούν τα σφάλματα μετρήσεων και οργάνων, αλλά και η ιδανικότητα συνθηκών που προσφέρει η διαδικασία της προσομοίωσης. Σε κάθε περίπτωση όμως, διαπιστώνεται ότι η πραγματική λειτουργία του συστήματος συμπίπτει σε πολύ μεγάλο βαθμό με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται μέσω της προσομοίωσής του.

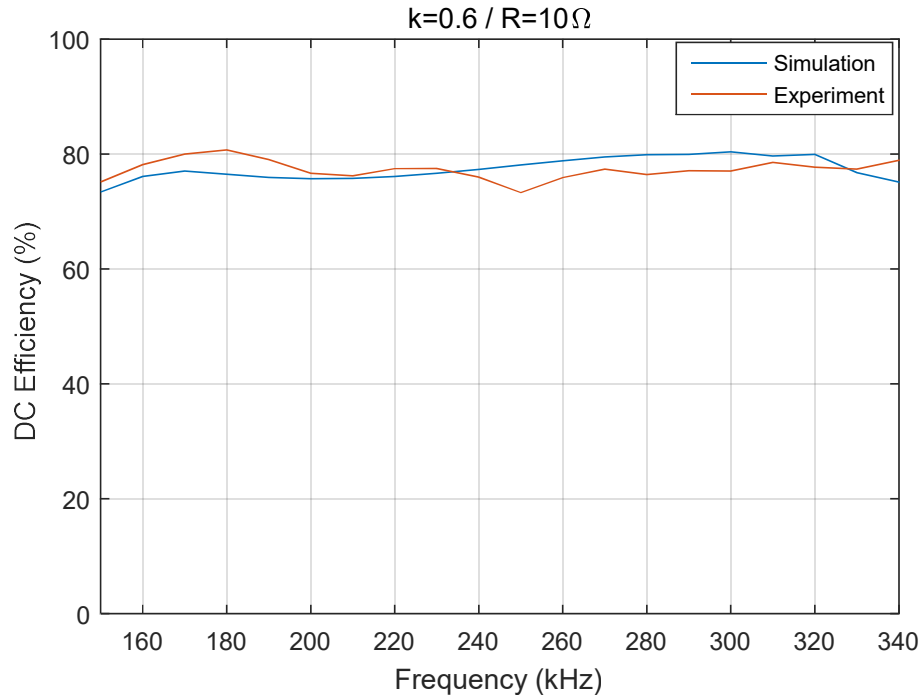
Μετρήσεις με μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας:

Για την μελέτη της απόκρισης του συστήματος σε μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ένα εύρος συχνοτήτων από 150 kHz έως 340 kHz, για αντίσταση φορτίου 10 Ω και βέλτιστη σύζευξη ($k=0.6$), τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

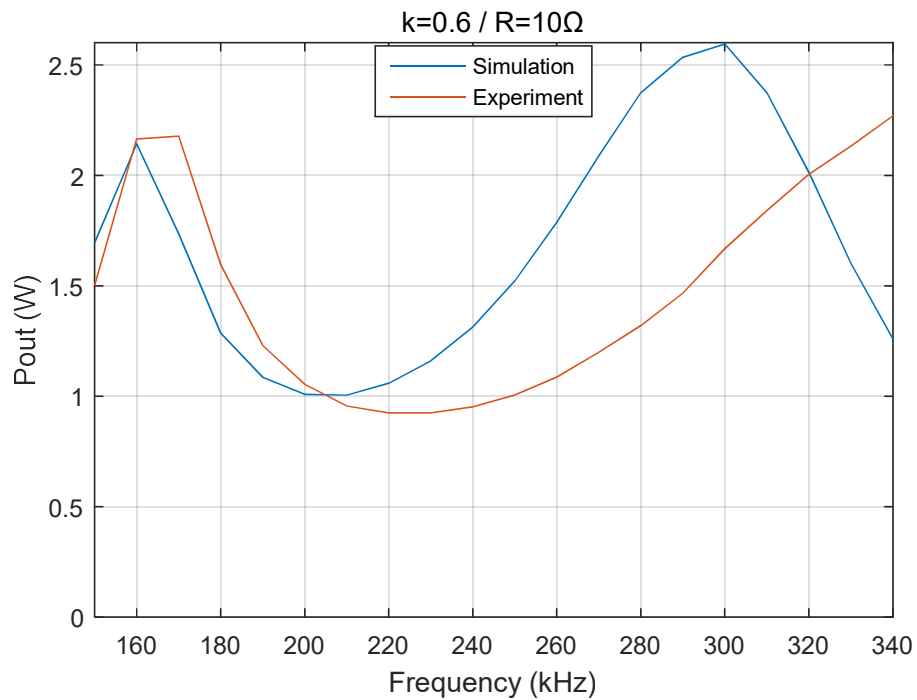
f (kHz)	V_{in} (V)	I_{in} (A)	V_{out} (V)	I_{out} (A)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η_{DC} (%)
150	6.052	0.33	3.96	0.3790	1.9971	1.5009	75.1551
160	6.019	0.46	4.75	0.4556	2.7687	2.1643	78.1696
170	6.05	0.45	4.78	0.4556	2.7225	2.1779	79.9994
180	5.991	0.33	4.08	0.3911	1.9770	1.5958	80.7173
190	5.987	0.26	3.59	0.3427	1.5566	1.2304	79.0458
200	5.98	0.23	3.31	0.3185	1.3754	1.0543	76.6609
210	5.97	0.21	3.16	0.3024	1.2537	0.9556	76.2259
220	5.97	0.2	3.1	0.2983	1.194	0.925	77.4706
230	5.967	0.2	3.1	0.2983	1.1934	0.925	77.5096
240	5.968	0.21	3.15	0.3024	1.2532	0.9526	76.0102
250	5.967	0.23	3.24	0.3104	1.3724	1.0059	73.2993
260	5.967	0.24	3.37	0.3225	1.4320	1.0870	75.9103
270	5.96	0.26	3.54	0.3387	1.5496	1.1990	77.3768
280	5.956	0.29	3.72	0.3548	1.7272	1.32	76.4225
290	5.944	0.32	3.91	0.375	1.9020	1.4662	77.0866
300	6.015	0.36	4.18	0.3991	2.1654	1.6686	77.0586
310	6.008	0.39	4.39	0.4193	2.3431	1.8409	78.5690
320	5.997	0.43	4.56	0.4395	2.5787	2.0041	77.7207
330	5.987	0.46	4.72	0.4516	2.7540	2.1316	77.4000
340	5.99	0.48	4.85	0.4677	2.8752	2.2685	78.9005

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων διάταξης με αντιστροφή πλήρους γέφυρας για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας

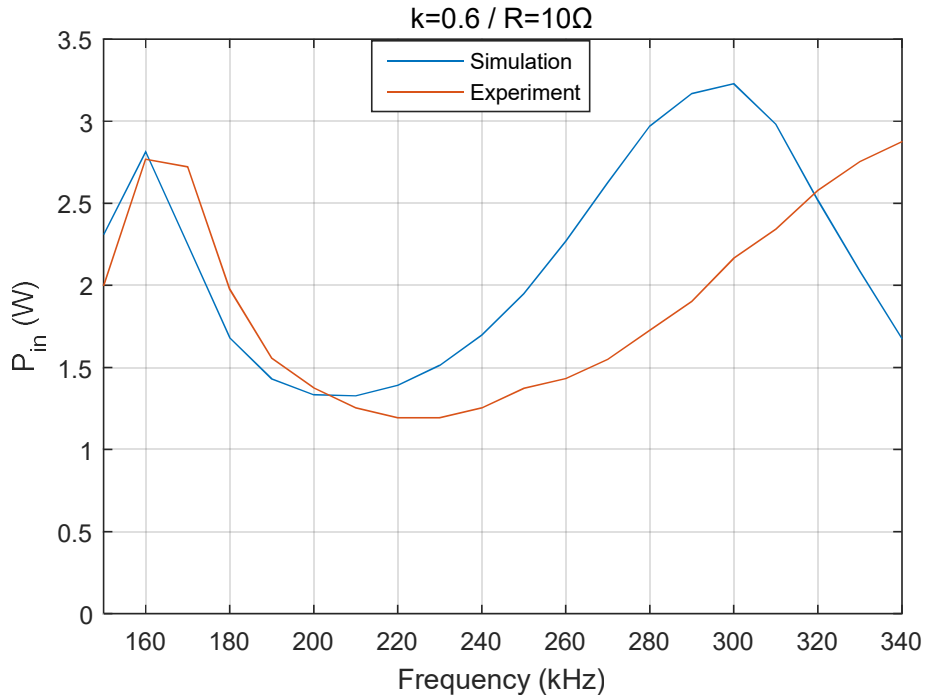
Για καλύτερη σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων, παρουσιάζεται ακολούθως η απόδοση του συστήματος, η ισχύς και η τάση εξόδου και στις δύο περιπτώσεις:



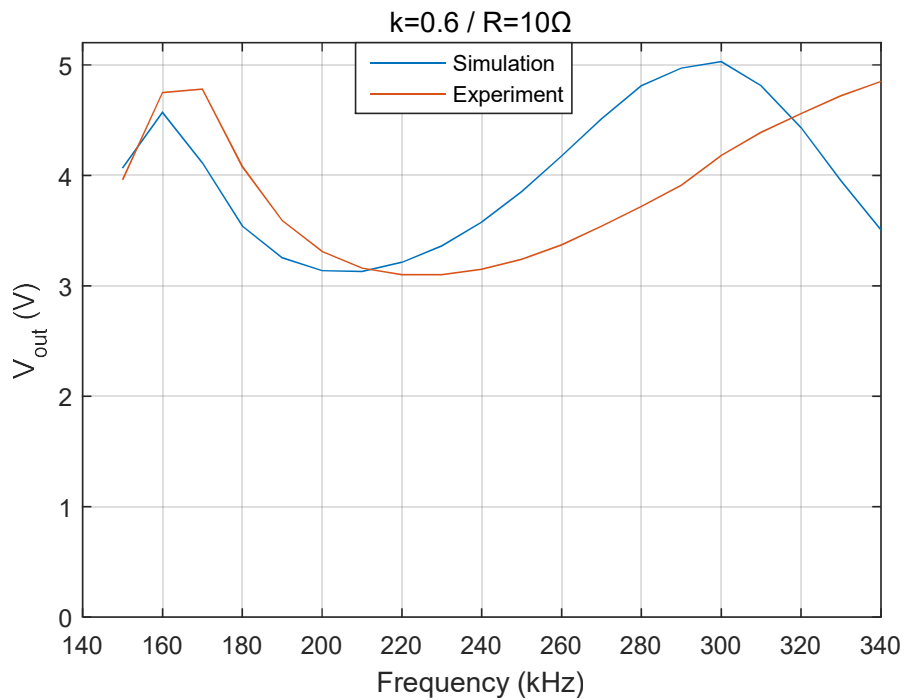
Σχήμα 5.7: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της DC απόδοσης της διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας και $k=0.6$.



Σχήμα 5.8: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εξόδου της διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας και $k=0.6$.



Σχήμα 5.9: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εισόδου της διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας και $k=0.6$.



Σχήμα 5.10: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της τάσης εξόδου της διάταξης με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας και $k=0.6$.

Όπως είναι εμφανές, τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια μεταξύ τους και ακολουθούν το ίδιο μοτίβο και στις δύο περιπτώσεις. Η απόδοση διατηρεί σταθερές τιμές μεταξύ 70% και 80% σε όλο το εύρος συχνοτήτων, ενώ η ισχύς στην είσοδο και στην έξοδο και η τάση στην έξοδο εμφανίζουν δύο κορυφές μεγιστοποίησης, λόγω του φαινομένου της διακλάδωσης, καθώς η σύζευξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι ισχυρή.

Η ελαφρά απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των κυματομορφών προσομοιώσεων και πειραμάτων οφείλεται στην ενδεχομένως μη ακριβή ρύθμιση της απόστασης των πηνίων ώστε να επιτευχθεί ή ακριβής τιμή της σύζευξης και σε κάθε περίπτωση εμπίπτει στα πλαίσια των σφαλμάτων μέτρησης και οργάνων που περιλαμβάνει κάθε πειραματική διαδικασία.

5.2: Πειραματικές μετρήσεις συστήματος επαγωγικής φόρτισης με διάταξη ενισχυτή κλάσης E

Η μελετώμενη πειραματική διάταξη είχε ως εξής:



Σχήμα 5.11: Πειραματική διάταξη συστήματος με ενισχυτή κλάσης E.

Για την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, ελήφθησαν μετρήσεις για τις ακόλουθες συνθήκες:

- Μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας του συστήματος (6 V, 12 V) σε συνθήκες ισχυρής, μέσης και ασθενούς σύζευξης (0.6, 0.39 και 0.15 αντίστοιχα) για τρεις δεδομένες τιμές φορτίου (5 Ω, 10 Ω και 20 Ω) και λειτουργία στη συχνότητα όπου διαπιστώθηκε καλύτερο ZVS και μεγαλύτερη απόδοση, δηλαδή 240 kHz.
- Μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας για δεδομένες συνθήκες σύζευξης και αντίστασης φορτίου.

Τα μεγέθη που καταγράφηκαν είναι οι τάσεις και τα ρεύματα εισόδου, καθώς και οι τάσεις και τα ρεύματα εξόδου, με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Ως χωρητικό φίλτρο στην έξοδο του ανορθωτή χρησιμοποιήθηκαν τρεις πυκνωτές, τιμής 33 μF έκαστος, συνδεδεμένοι παράλληλα μεταξύ τους ώστε να εμφανίζουν συνολική χωρητικότητα τιμής 99 μF. Οι μετρήσεις παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Μετρήσεις με μεταβλητή τάση εισόδου:**Αντίσταση φορτίου - R=5 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.6**

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
6.04	0.39	2.3	0.439516	2.3556	1.010887	42.91420
12	0.77	4.74	0.907258	9.24	4.300403	46.54116

Αντίσταση φορτίου - R=5 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.39

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
6	0.51	3.18	0.608871	3.06	1.93621	63.2748
11.97	1.09	6.76	1.298387	13.0473	8.777097	67.2713

Αντίσταση φορτίου - R=5 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.15

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
6.09	0.07	0.876	0.157258	0.4263	0.137758	32.31481692
12.06	0.14	1.84	0.350806	1.6884	0.645484	38.23050645

Αντίσταση φορτίου - R=10 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.6

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
6.031	0.34	3.53	0.350806	2.05054	1.238347	60.39125178
11.97	0.68	7.25	0.725806	8.1396	5.262097	64.64810033

Αντίσταση φορτίου - R=10 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.39

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
6.056	0.34	3.91	0.391129	2.05904	1.529315	74.27318149
11.97	0.77	8.52	0.850806	9.2169	7.248871	78.64760351

Αντίσταση φορτίου - R=10 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.15

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
5.988	0.06	1.15	0.112903	0.35928	0.129839	36.13858541
12	0.11	2.16	0.21371	1.32	0.461613	34.97067449

Αντίσταση φορτίου - R=20 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.6

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
6.011	0.33	5.44	0.270161	1.98363	1.469677	74.09030007
12.05	0.69	11.4	0.568548	8.3145	6.481452	77.95359448

Αντίσταση φορτίου - R=20 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.39

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
6.065	0.22	4.46	0.221774	1.3343	0.989113	74.12972369
12.07	0.46	9.46	0.471774	5.5522	4.462984	80.38226056

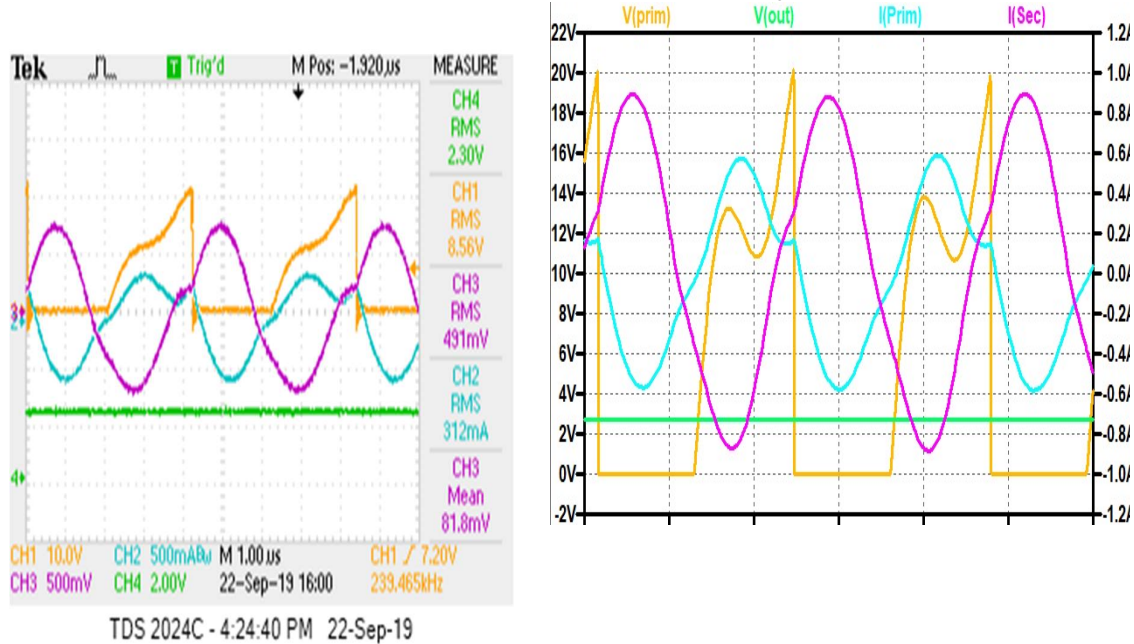
Αντίσταση φορτίου - R=20 Ω, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.15

V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
6.03	0.05	1.38	0.064516	0.3015	0.089032	29.5297705
12.03	0.1	3.15	0.153226	1.203	0.482661	40.12147052

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3.2.2, κατά τη σχεδίαση του ενισχυτή κλάσης E, η επιλογή των παθητικών στοιχείων του έγινε ώστε να επιτυγχάνεται λειτουργία σε ZVS σε μεσαίες τιμές του συντελεστή σύζευξης ($k=0.39$) και για αντίσταση φορτίου της τάξης των 10 Ω. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί το ότι σε όλες τις μελετώμενες περιπτώσεις, μεγαλύτερη απόδοση παρατηρείται στην περίπτωση του μέσου συντελεστή σύζευξης, ανεξαρτήτως της τάσης τροφοδοσίας. Όπως είναι φυσικό, μικρότερες τιμές απόδοσης καταγράφονται στις περιπτώσεις ασθενούς σύζευξης, ενώ όσο αυξάνεται η αντίσταση φορτίου, η απόδοση στην περίπτωση ισχυρής σύζευξης παρουσιάζει αύξηση. Τέλος, παρατηρείται επίσης αύξηση της απόδοσης με την αύξηση της τάσης εισόδου, καθώς μεταφέρονται μεγαλύτερα ποσά ισχύος. Βέβαια, το επίπεδο της τάσης εισόδου είναι μία παράμετρος που πάντα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στην σχεδίαση συστήματος που περιέχει ενισχυτή κλάσης E, διότι η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του διακόπτη είναι πολλαπλάσια αυτής.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες μετρούμενες κυματομορφές από τις παραπάνω περιπτώσεις, σε ευθεία σύγκριση με τις αντίστοιχες που λαμβάνονται από προσομοίωση του συστήματος στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας στο LTspice. Ταυτόχρονα, συγκρίνονται και οι μετρούμενες τιμές από τον παλμογράφο, με τις τιμές της προσομοίωσης. (Σημειώνεται ότι στο κανάλι 1 του παλμογράφου αντιστοιχεί η τάση στα άκρα του MOSFET, στο κανάλι 2 το ρεύμα στο πρωτεύον, στο κανάλι 3 το ρεύμα στο δευτερεύον και στο κανάλι 4 η τάση της αντίστασης φορτίου. Επίσης, η μέτρηση του ρεύματος στο δευτερεύον στον παλμογράφο γίνεται σε V, όμως η κλίμακα μέτρησης είναι 1 A/V, οπότε η τιμή μέτρησης που εμφανίζεται στο κανάλι 3 του παλμογράφου είναι αντίστοιχη σε A.).

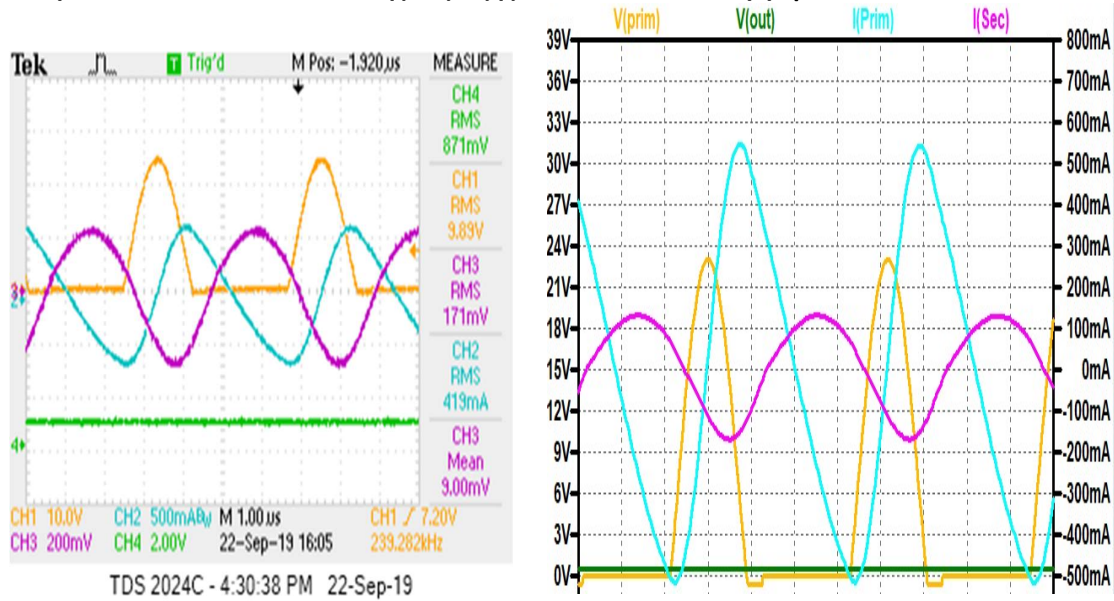
Τάση εισόδου $V_{in}=6$ V, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.6$, Αντίσταση φορτίου - $R=5$ Ω:



Σχήμα 5.12: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{in}=6$ V, $k=0.6$, $R=5$ Ω.

RMS	$V_{primary}$ (V)	$I_{primary}$ (A)	V_{out} (V)	$I_{secondary}$ (A)	η_{DC} (%)
Πείραμα	8.56	0.312	2.30	0.491	42.9142
Προσομοίωση	8.88	0.3737	2.689	0.598	51.4652

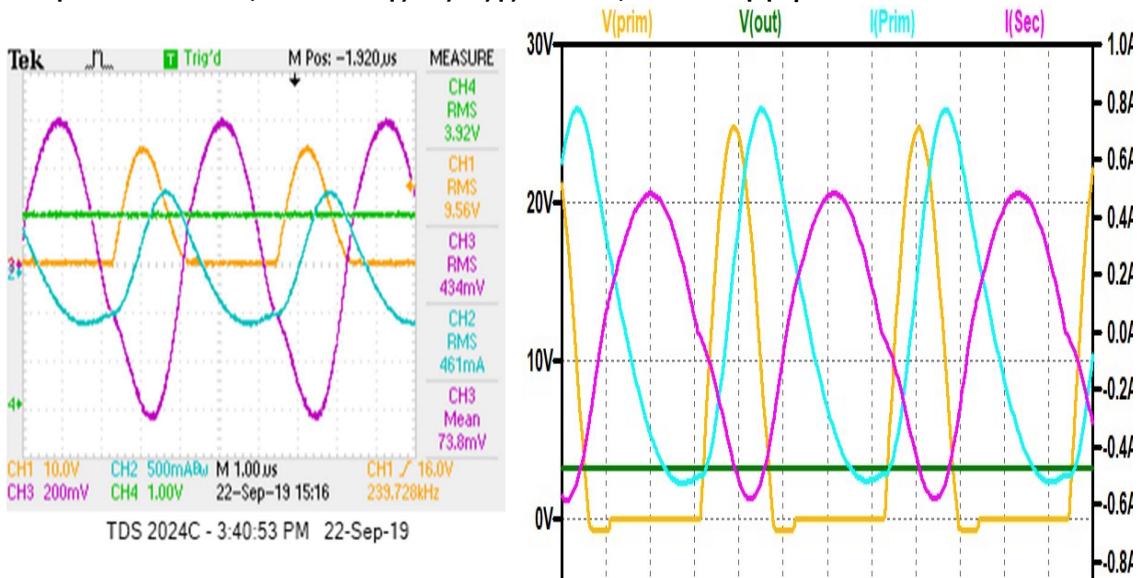
Τάση εισόδου $V_{in}=6\text{ V}$, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.15$, Αντίσταση φορτίου - $R=5\ \Omega$:



Σχήμα 5.13: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{in}=6\text{ V}$, $k=0.15$, $R=5\ \Omega$.

RMS	$V_{\text{primary}}\text{ (V)}$	$I_{\text{primary}}\text{ (A)}$	$V_{\text{out}}\text{ (V)}$	$I_{\text{secondary}}\text{ (A)}$	$\eta_{\text{DC}}\text{ (\%)}\text{ (Sim)}$
Πείραμα	9.89	0.419	0.871	0.171	32.3148
Προσομοίωση	8.88	0.353	0.4662	0.104	12.4889

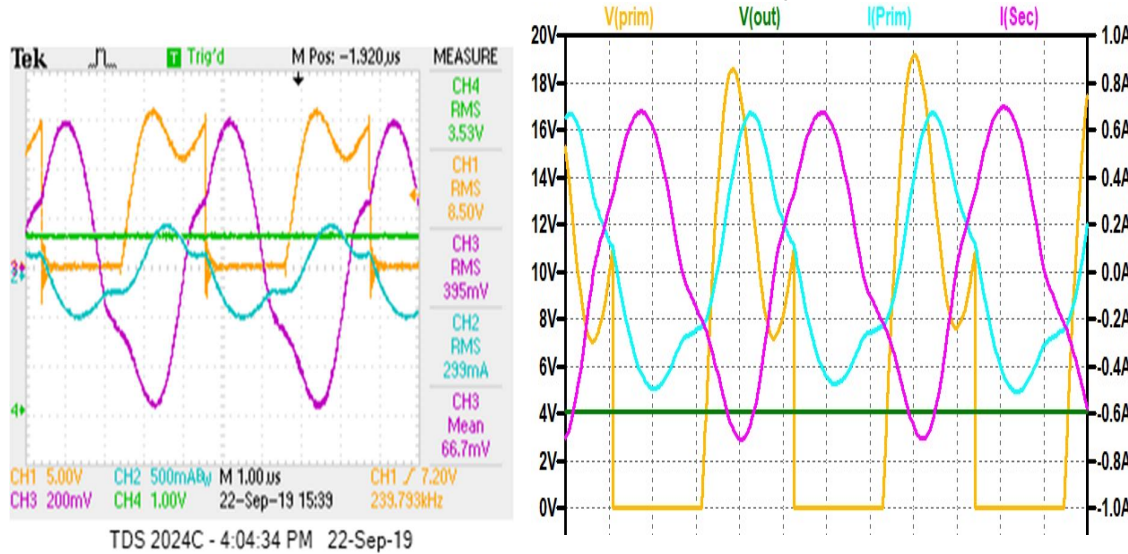
Τάση εισόδου $V_{in}=6\text{ V}$, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.39$, Αντίσταση φορτίου - $R=10\ \Omega$:



Σχήμα 5.14: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{in}=6\text{ V}$, $k=0.39$, $R=10\ \Omega$.

RMS	V_{primary} (V)	I_{primary} (A)	V_{out} (V)	$I_{\text{secondary}}$ (A)	η_{DC} (%)
Πείραμα	9.56	0.461	3.92	0.434	74.2731
Προσομοίωση	8.88	0.4546	3.188	0.3637	69.5776

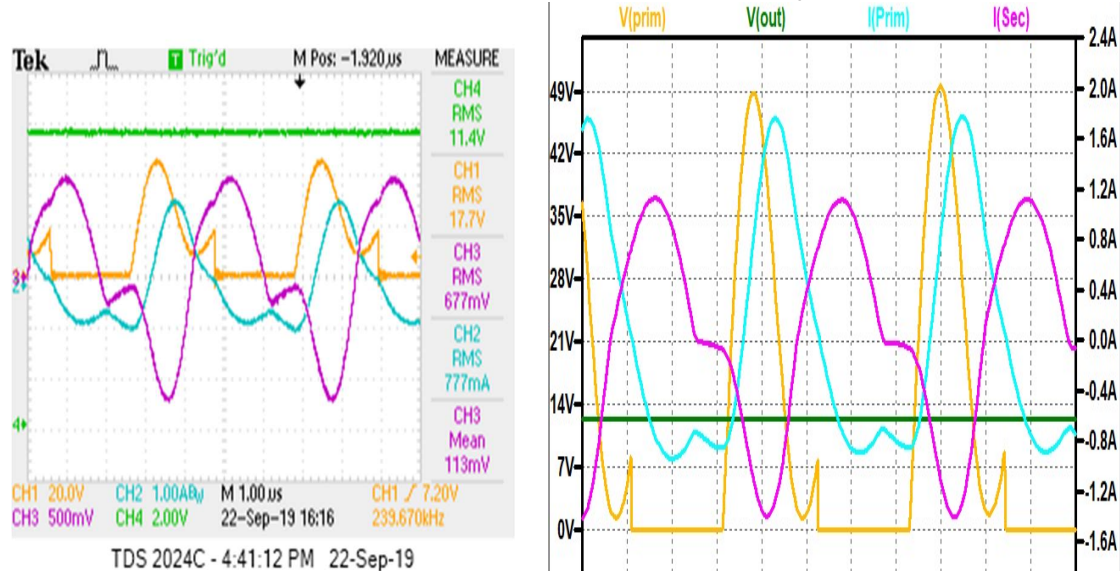
Τάση εισόδου $V_{\text{in}}=6$ V, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.6$, Αντίσταση φορτίου - $R=10$ Ω :



Σχήμα 5.15: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{\text{in}}=6$ V, $k=0.6$, $R=10$ Ω .

RMS	V_{primary} (V)	I_{primary} (A)	V_{out} (V)	$I_{\text{secondary}}$ (A)	η_{DC} (%)
Πείραμα	8.50	0.299	3.53	0.395	60.3912
Προσομοίωση	8.99	0.3837	4.107	0.4652	70.8436

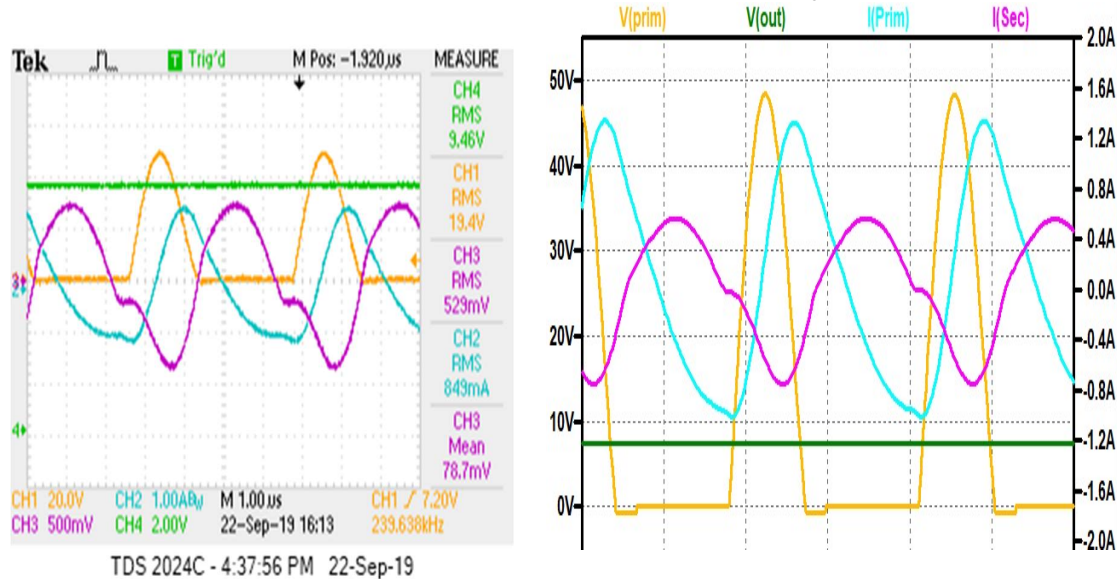
Τάση εισόδου $V_{\text{in}}=12$ V, Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.6$, Αντίσταση φορτίου - $R=20$ Ω :



Σχήμα 5.16: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $V_{\text{in}}=12$ V, $k=0.6$, $R=20$ Ω .

RMS	V _{primary} (V)	I _{primary} (A)	V _{out} (V)	I _{secondary} (A)	η _{DC} (%)
Πείραμα	17.7	0.777	11.4	0.677	77.9535
Προσομοίωση	20.9231	0.9265	12.42	0.7939	81.9516

Τάση εισόδου V_{in}=12 V, Συντελεστής Σύζευξης - k=0.39, Αντίσταση φορτίου - R=20 Ω:



Σχήμα 5.17: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για V_{in}=12 V, k=0.39, R=20 Ω.

RMS	V _{primary} (V)	I _{primary} (A)	V _{out} (V)	I _{secondary} (A)	η _{DC} (%)
Πείραμα	19.4	0.894	9.46	0.529	80.3822
Προσομοίωση	21.2241	0.7948	7.42	0.4335	76.0482

Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, είναι ευδιάκριτες κάποιες σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποδίδεται στην απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων. Κατά τη διάρκεια των συγκεκριμένων πειραματικών διαδικασιών, παρατηρήθηκε υπερευαισθησία του συστήματος που υλοποιείται με ενισχυτή κλάσης E, στην μεταβολή του συντελεστή σύζευξης: η απειροελάχιστη αλλαγή της σχετικής θέσης των δύο πηνίων, με ίδιες συνθήκες αντίστασης φορτίου και συχνότητας, οδηγούσε σε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Συνεπώς, η τιμή του συντελεστή σύζευξης κατά την λήψη της κάθε μέτρησης είναι πολύ πιθανό να είναι διαφορετική από την θεωρητική που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις, γεγονός που ερμηνεύει την εμφανιζόμενη διαφορά στις μετρούμενες ποσότητες. Επίσης, μέσω των μετρήσεων από τον παλμογράφο, είναι εμφανείς οι υψηλές τιμές τάσης που αποκτά ο διακόπτης.

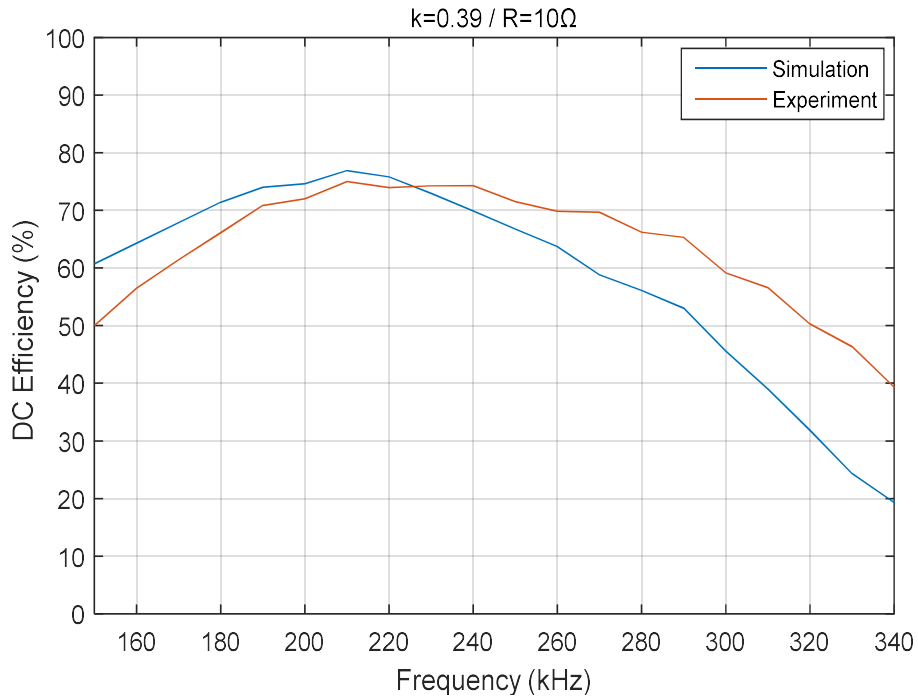
Μετρήσεις με μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας:

Για την μελέτη της απόκρισης του συστήματος σε μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε ένα εύρος συχνοτήτων από 150 kHz έως 340 kHz, για αντίσταση φορτίου 10 Ω και μέση σύζευξη, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

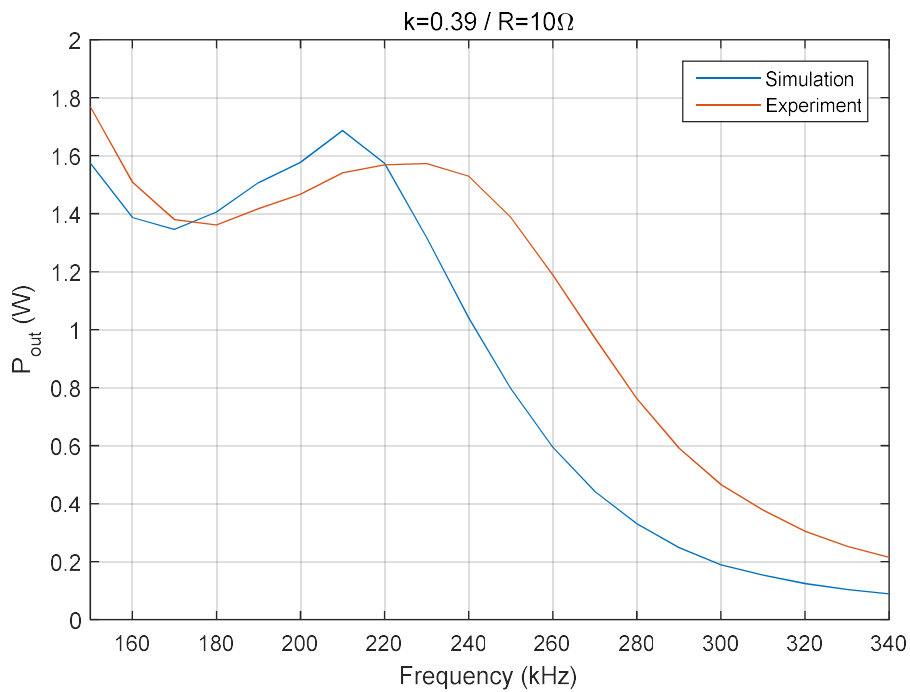
f (kHz)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	P _{in} (W)	P _{out} (W)	η _{DC} (%)
150	6	0.59	4.22	0.4193	3.54	1.7696	49.9908
160	6.072	0.44	3.9	0.3870	2.6716	1.5096	56.5066
170	6.07	0.37	3.72	0.3709	2.2459	1.38	61.4453
180	6.056	0.34	3.71	0.3669	2.0590	1.3613	66.1148
190	6.062	0.33	3.78	0.375	2.0004	1.4175	70.8587
200	5.994	0.34	3.83	0.3830	2.0379	1.4671	71.9904
210	6.045	0.34	3.94	0.3911	2.0553	1.5410	74.9792
220	6.062	0.35	3.97	0.3951	2.1217	1.5687	73.9402
230	6.052	0.35	3.98	0.3951	2.1182	1.5727	74.2489
240	6.056	0.34	3.91	0.3911	2.0590	1.5293	74.2731
250	6.064	0.32	3.74	0.3709	1.9404	1.3874	71.4987
260	6.08	0.28	3.47	0.3427	1.7024	1.1893	69.8610
270	6.065	0.23	3.13	0.3104	1.3949	0.9718	69.667
280	6.06	0.19	2.78	0.2741	1.1514	0.7622	66.2027
290	6.05	0.15	2.45	0.2419	0.9075	0.5927	65.3159
300	6.058	0.13	2.18	0.2137	0.7875	0.4658	59.1572
310	6.065	0.11	1.95	0.1935	0.6671	0.3774	56.5718
320	6.067	0.1	1.76	0.1733	0.6067	0.3051	50.2985
330	6.068	0.09	1.61	0.1572	0.5461	0.2531	46.3607
340	6.067	0.09	1.48	0.1451	0.5460	0.2148	39.3455

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα λειτουργίας και $k=0.39$.

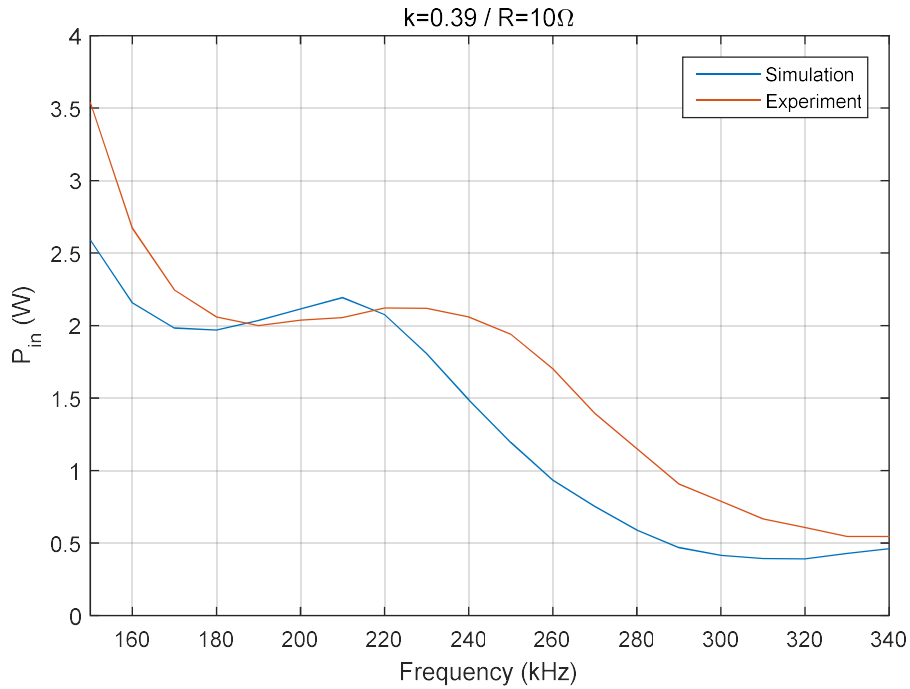
Για καλύτερη σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων, παρουσιάζεται ακολούθως η απόδοση του συστήματος, η ισχύς και η τάση εξόδου και στις δύο περιπτώσεις:



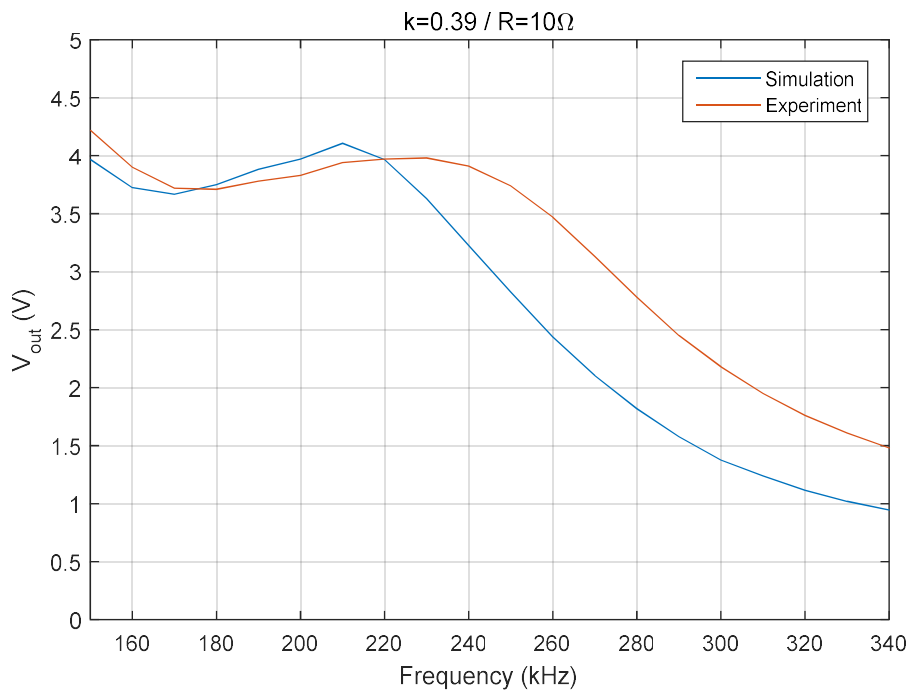
Σχήμα 5.18: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της DC απόδοσης της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.39$.



Σχήμα 5.19: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εξόδου της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.39$.



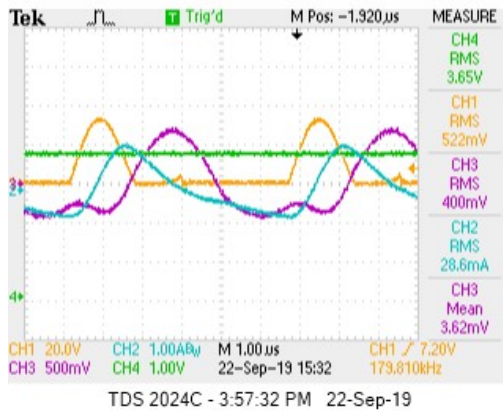
Σχήμα 5.20: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εισόδου της διάταξης με με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.39$.



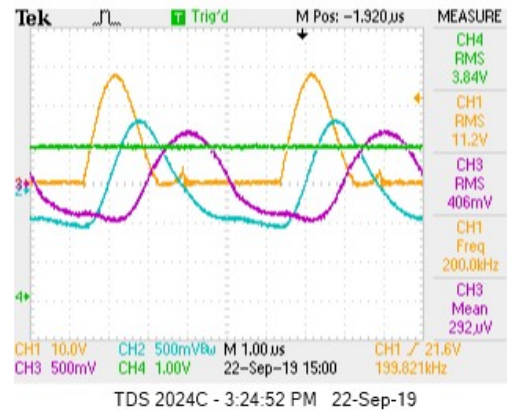
Σχήμα 5.21: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της τάσης εξόδου της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.39$.

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα πειραματικά δεδομένα έχουν κάποιες αποκλίσεις με τα δεδομένα των προσομοιώσεων. Παρατηρείται όμως, ότι παρά τις όποιες αποκλίσεις, τα μετρούμενα μεγέθη ακολουθούν το ίδιο μοτίβο μεταβολής και στις δύο περιπτώσεις.

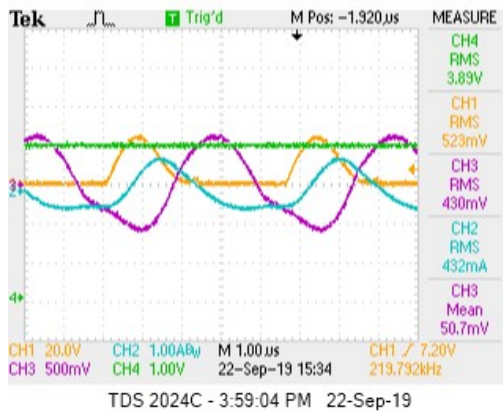
Στη συνέχεια παρατίθενται στιγμιότυπα των παραπάνω μετρήσεων, όπου φαίνεται μεταξύ άλλων και η τάση στα άκρα του διακόπτη που υποδηλώνει τον τρόπο αγωγής του.



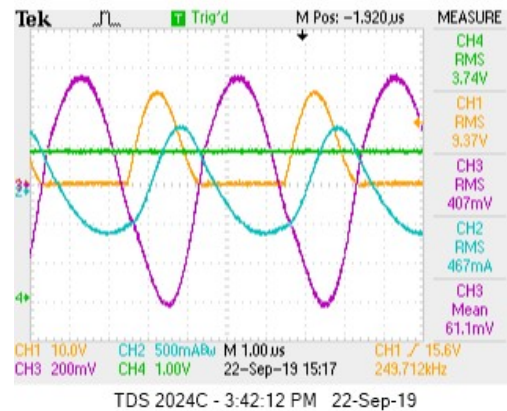
(α)



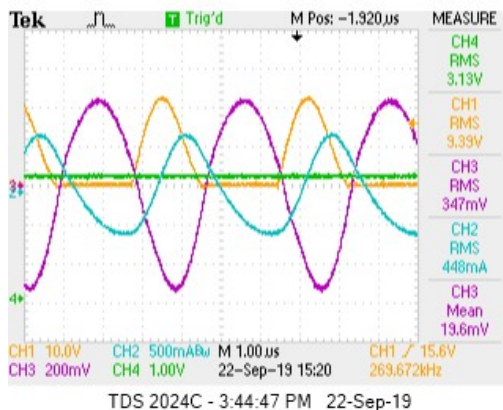
(β)



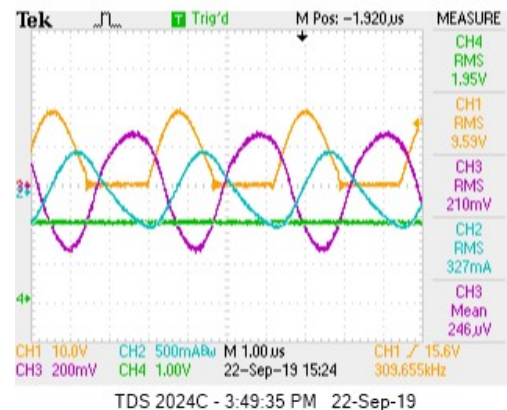
(γ)



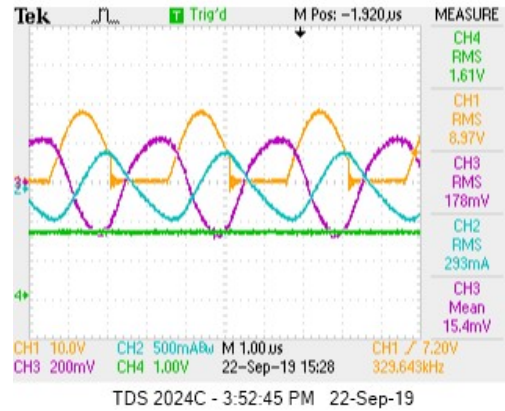
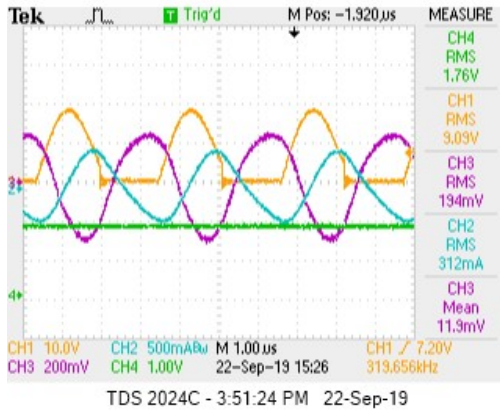
(δ)



(ε)



(σ)



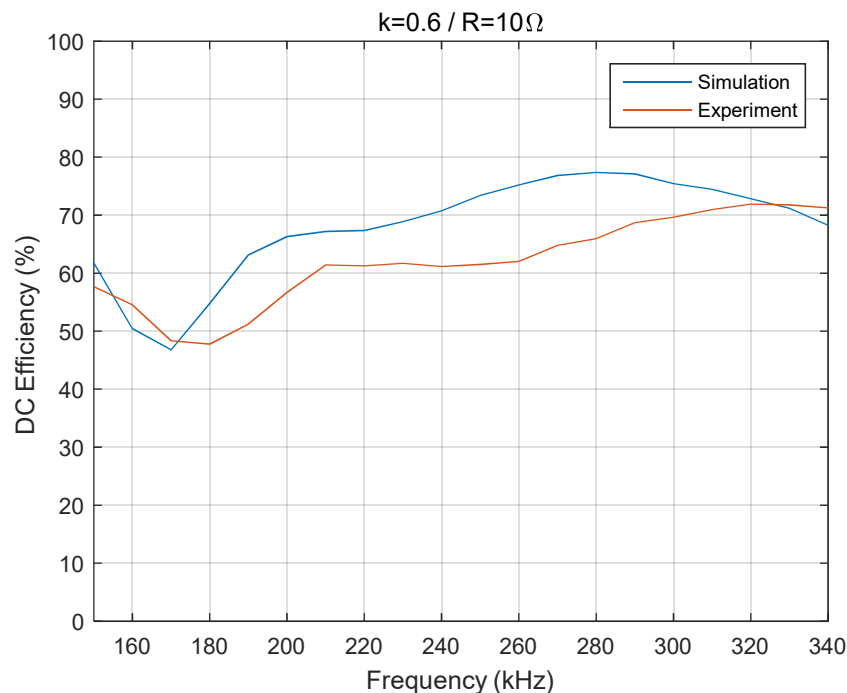
(ζ)

(η)

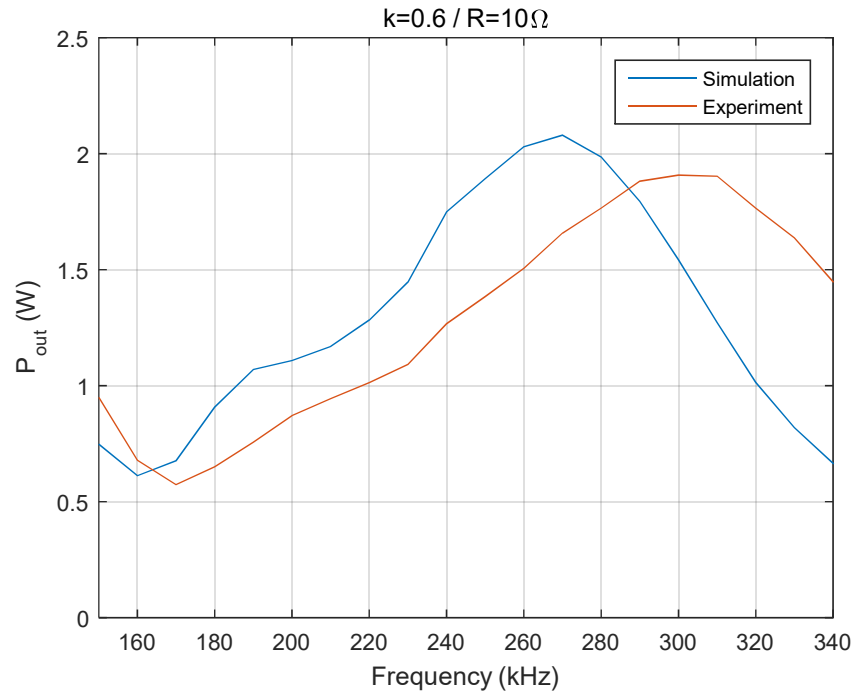
Σχήμα 5.22: Κυματομορφές πειραματικών μετρήσεων διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για $k=0.39$ και διάφορες συχνότητες λειτουργίας : (α) 180 kHz, (β) 200 kHz, (γ) 220 kHz, (δ) 250 kHz, (ε) 270 kHz, (στ) 310 kHz, (ζ) 320 kHz και (η) 330 kHz.

Παρατηρείται ότι λειτουργεί με ZVS, προσεγγιστικά, σε ένα εύρος συχνοτήτων 240kHz-300kHz. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, λειτουργεί υπό μη ιδανικές συνθήκες και είτε μεταβαίνει σε αγωγή με θετική τάση στα άκρα του, είτε μεταβαίνει σε αγωγή η αντισυμβαλλόμενη δίοδος, αυξάνοντας έτσι τις συνολικές απώλειες του συστήματος.

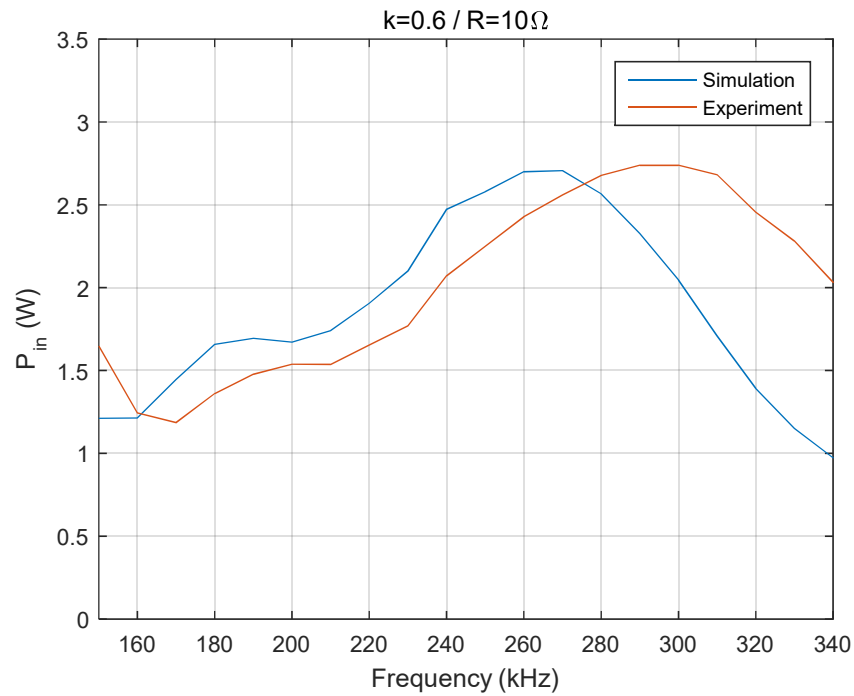
Για την ευρύτερη διερεύνηση της λειτουργίας του ενισχυτή κλάσης E, πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες μετρήσεις υπό μεταβλητή συχνότητα, αλλά σε συνθήκες ισχυρής σύζευξης ($k=0.6$). Οι μετρήσεις σε απόδοση, ισχύ και τάση εξόδου παρουσιάζονται ακολούθως:



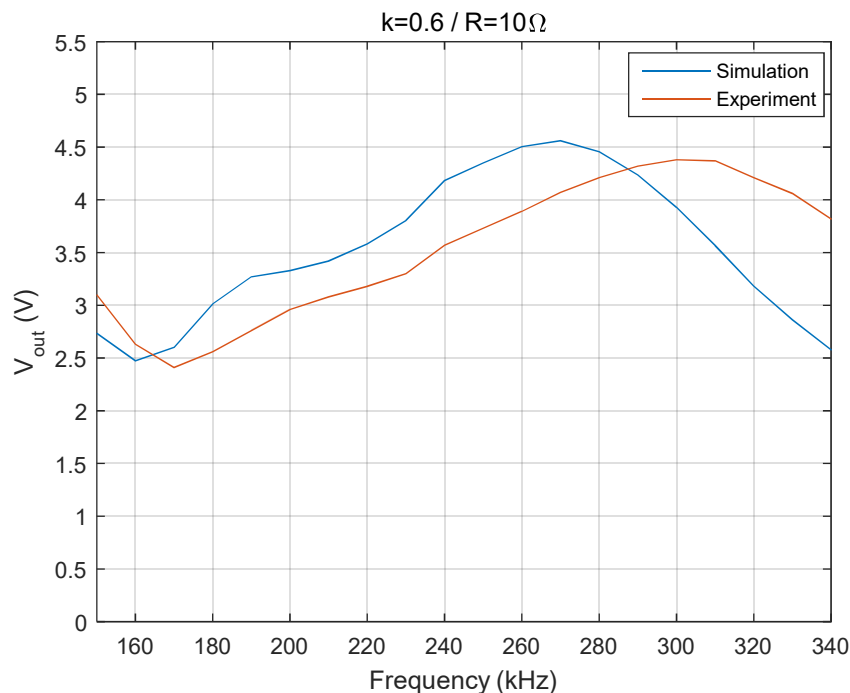
Σχήμα 5.23: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της DC απόδοσης της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.6$.



Σχήμα 5.24: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εξόδου της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.6$.



Σχήμα 5.25: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της ισχύος εισόδου της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.6$.



Σχήμα 5.26: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων της τάσης εξόδου της διάταξης με ενισχυτή κλάσης E για μεταβαλλόμενη συχνότητα και $k=0.6$.

Σε γενικά πλαίσια, αν συνυποληφθούν τα σφάλματα μετρήσεων και οργάνων, καθώς και η υπερευαισθησία του ενισχυτή κλάσης E στην μετατόπιση μεταξύ των πηνίων, συμπεραίνεται ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ακολουθούν με καλή ακρίβεια τα πειραματικά αποτελέσματα.

Πορίσματα πειραματικής αξιολόγησης:

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν μετρήσεις και κυματομορφές των δύο συγκρινόμενων τοπολογιών υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, που ελήφθησαν στο εργαστήριο. Η διαδικασία αυτή ήταν υψίστης σημασίας, καθώς μέσω αυτής κατέστη δυνατή η παρακολούθηση της συμπεριφοράς των δύο τοπολογιών σε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος υπό πραγματικές συνθήκες, και με πραγματικά στοιχεία, προσφέροντας έτσι μία πιο σφαιρική αντίληψη, αλλά και ένα ακόμα μέτρο σύγκρισης, στην όλη προσπάθεια αξιολόγησης αυτών.

Κατά κύριο λόγο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, πλησιάζουν αρκετά αυτά των πειραματικών μετρήσεων, και αν αναλογισθεί κανείς την ιδανικότητα των συνθηκών που παρέχει ένα περιβάλλον προσομοίωσης, αλλά και όλα τα σφάλματα που εμπεριέχει μία πειραματική διαδικασία, κρίνεται ότι πλησιάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, συνοψίζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των κεφαλαίων 4 και 5, προκειμένου να ολοκληρωθεί η σύγκριση των δύο τοπολογιών.

Κεφάλαιο 6: Συγκρίσεις – Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται μία πολύπλευρη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προηγούμενων κεφαλαίων, προς πραγματοποίηση μίας ολοκληρωμένης σύγκρισης των δύο τοπολογιών. Η σύγκριση πραγματοποιείται σε τρεις άξονες: α) Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας, β) Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και η συμπεριφορά της κάθε διάταξης σε πραγματικές συνθήκες και γ) Τα πορίσματα / παρατηρήσεις που εξήχθησαν καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης των δύο τοπολογιών στην εφαρμογή τους σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης.

6.1: Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Τα κυριότερα σημεία ενδιαφέροντος σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης είναι τα εξής: Η συνολική DC απόδοσή του, η παρεχόμενη ισχύς στην έξοδο, η DC τάση εξόδου ή το κέρδος τάσης και η ενεργός τιμή των ρευμάτων σε πρωτεύον και δευτερεύον προς διερεύνηση του πότε λαμβάνει υψηλές τιμές, γεγονός που μπορεί να συντελέσει στην αύξηση της θερμοκρασίας των τυλίγματος. Ειδικά στην περίπτωση του δευτερεύοντος τυλίγματος, κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητο, διότι ενέχει τον κίνδυνο αύξησης της θερμοκρασίας των ιστών του ασθενή γύρω από το εμφύτευμα. Εξίσου σημαντικά και άξια προσοχής μεγέθη αποτελούν οι τάσεις που αποκτούν στα άκρα τους τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, αλλά και οι αντίστοιχοι πυκνωτές αντιστάθμισης, καθώς λόγω λειτουργίας σε συνθήκες συντονισμού οι αυξημένες τιμές τάσης είναι δεδομένες. Τέλος, άλλος ένας δείκτης ποιοτικής λειτουργίας του συστήματος αποτελεί το ποσοστό Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD) των ρευμάτων που διαρρέουν τα τυλίγματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Υψηλό αρμονικό περιεχόμενο μεταφράζεται σε μεγαλύτερα ποσοστά απωλειών, λόγω της ύπαρξης υψίσυχων αρμονικών συνιστωσών.

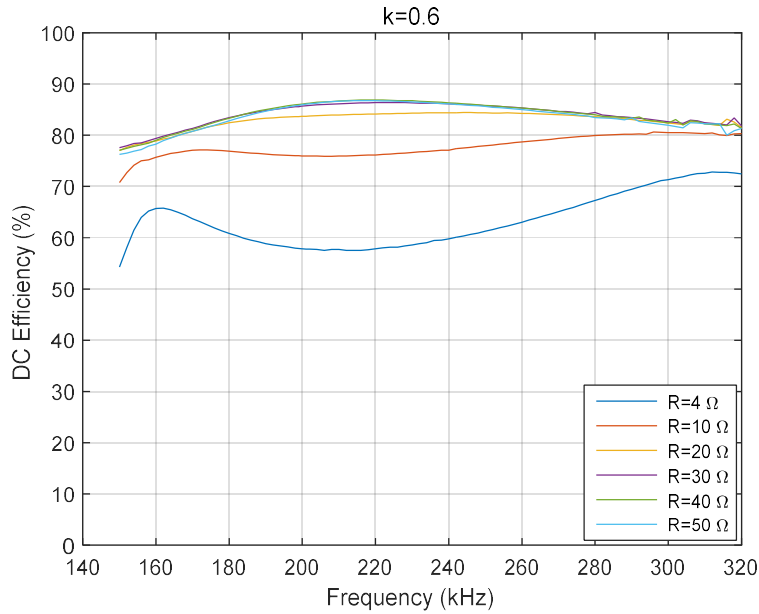
Τα παραπάνω μεγέθη έχουν καταγραφεί για κάθε διάταξη σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, τιμών αντίστασης φορτίου και συντελεστών σύζευξης για κάθε μελετώμενη τοπολογία και μια γενική ιδέα έχει ήδη παρουσιασθεί στα κεφάλαια 4.2.1 και 4.2.2. Στη συνέχεια, στην ίδια λογική με τα προαναφερθέντα κεφάλαια, παρατίθενται για κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και για τον ενισχυτή κλάσης E, προς άμεση σύγκριση της συμπεριφοράς τους στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας.

6.1.1: Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R) – Σταθερός συντελεστής σύζευξης (k)

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):

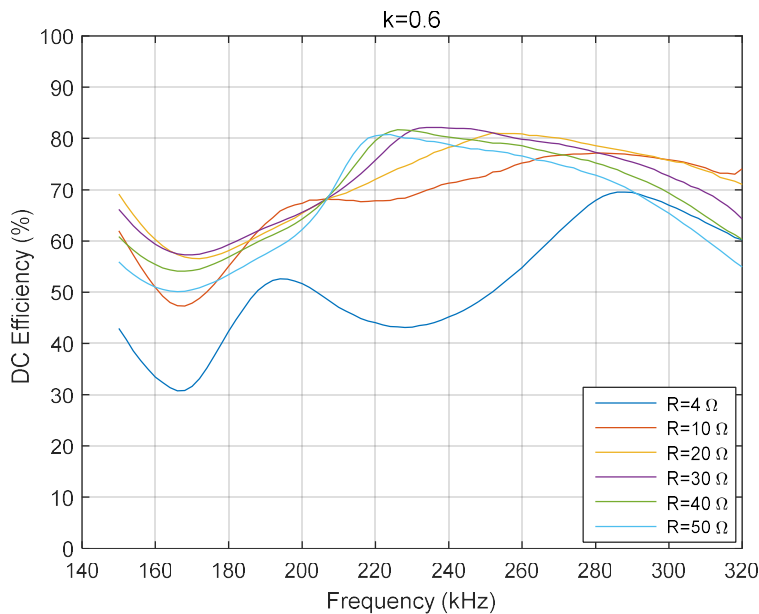
k=0.6:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.1: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) με αντιστροφήα πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

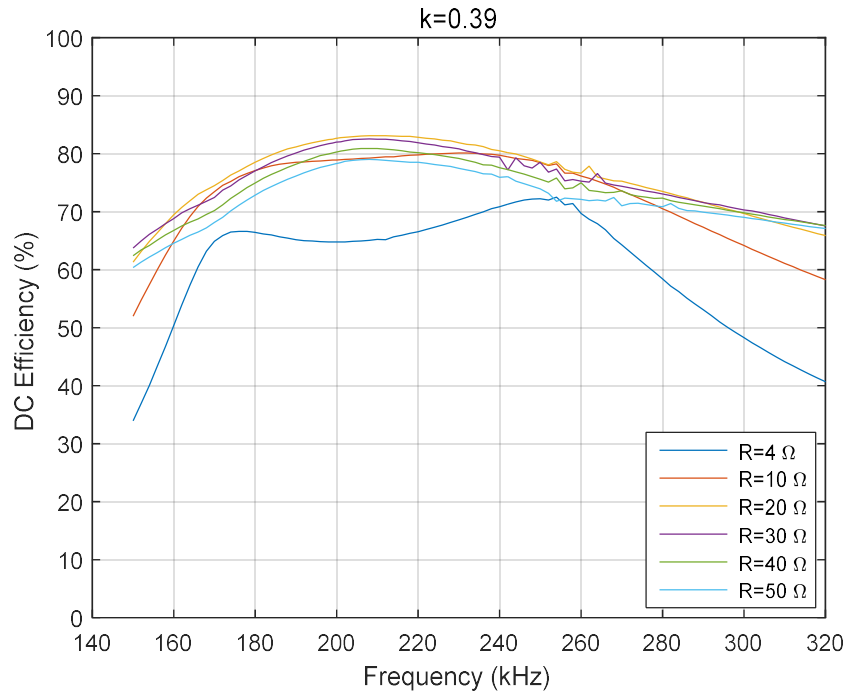
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.2: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

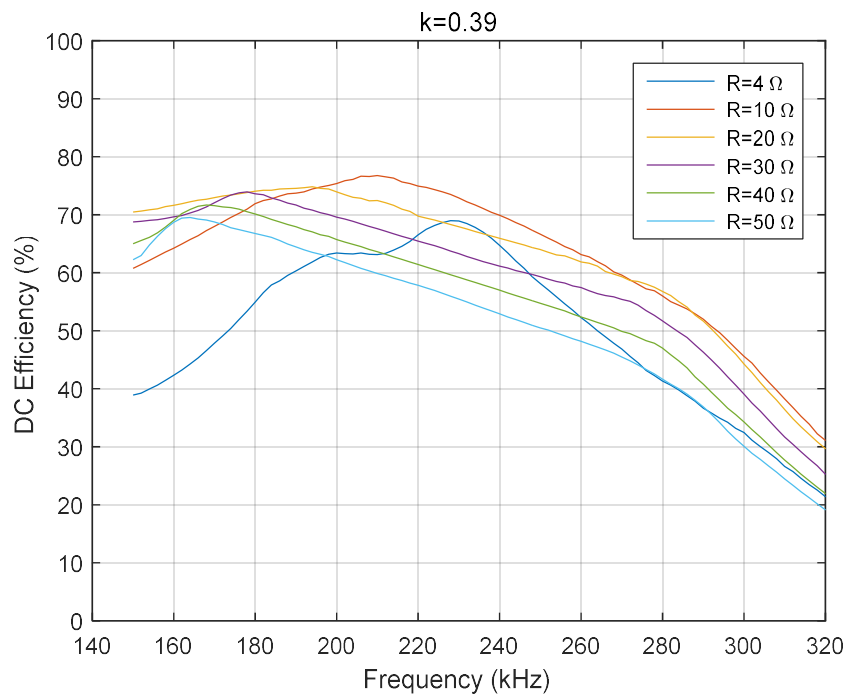
$k=0.39$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.3: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

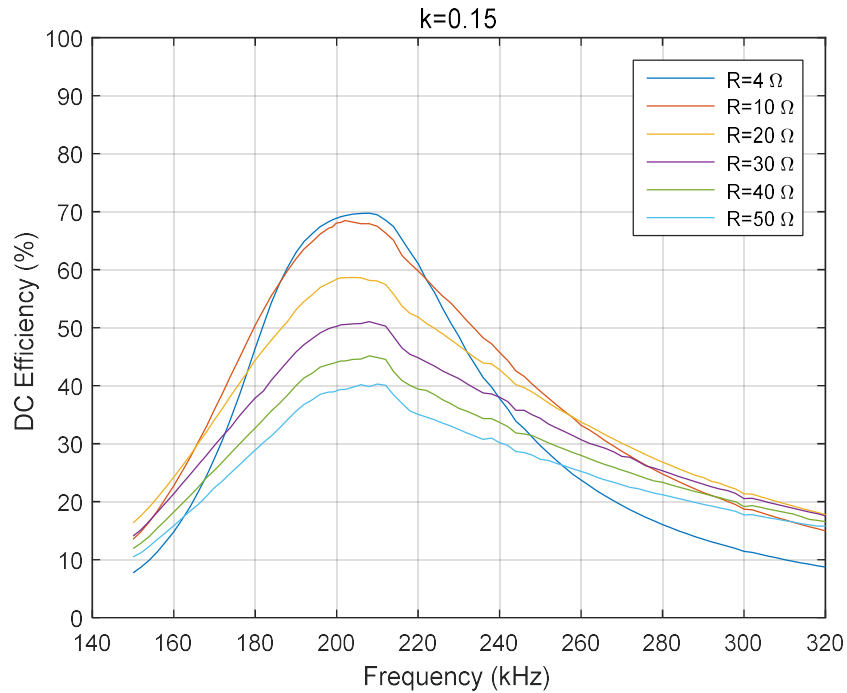
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.4: Απόδοση συστήματος $\eta_{DC}(\%)$ με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

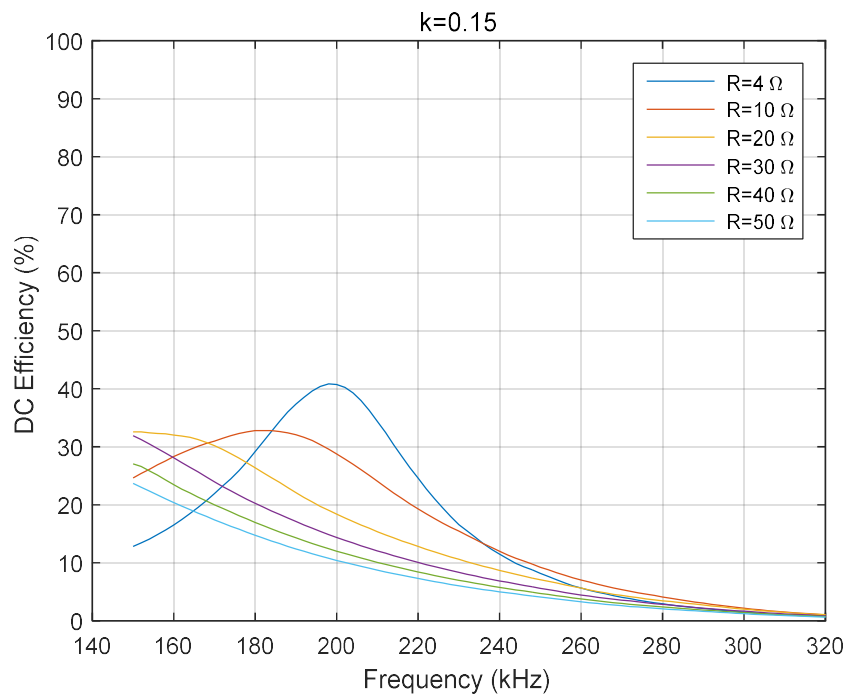
$k=0.15$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.5: Απόδοση συστήματος $\eta_{dc}(\%)$ με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ενισχυτής κλάσης E:

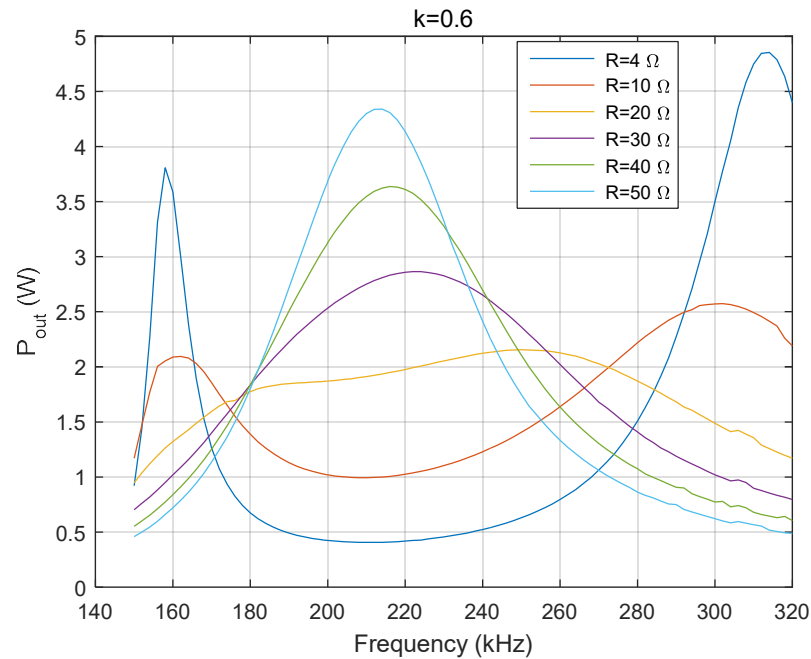


Σχήμα 6.6: Απόδοση συστήματος $\eta_{dc}(\%)$ με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):

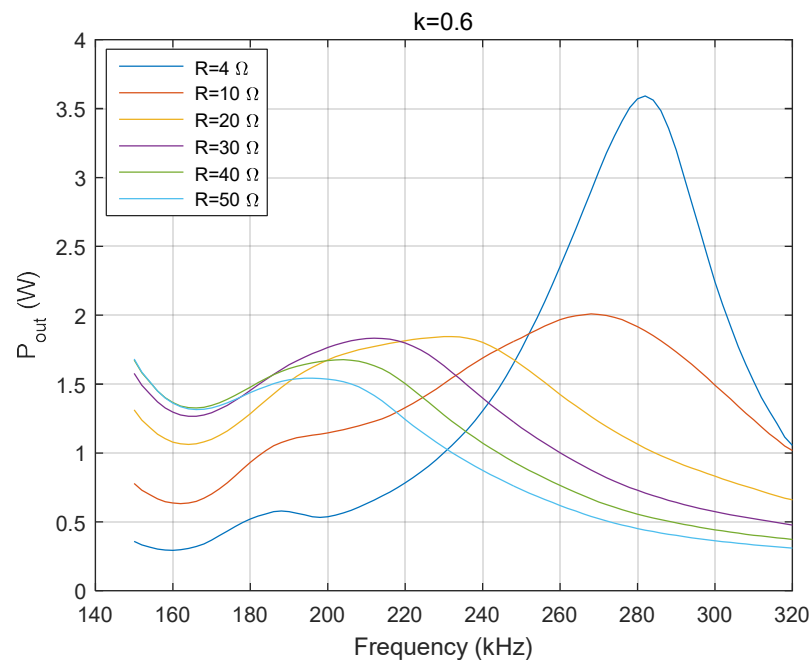
$k=0.6$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.7: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

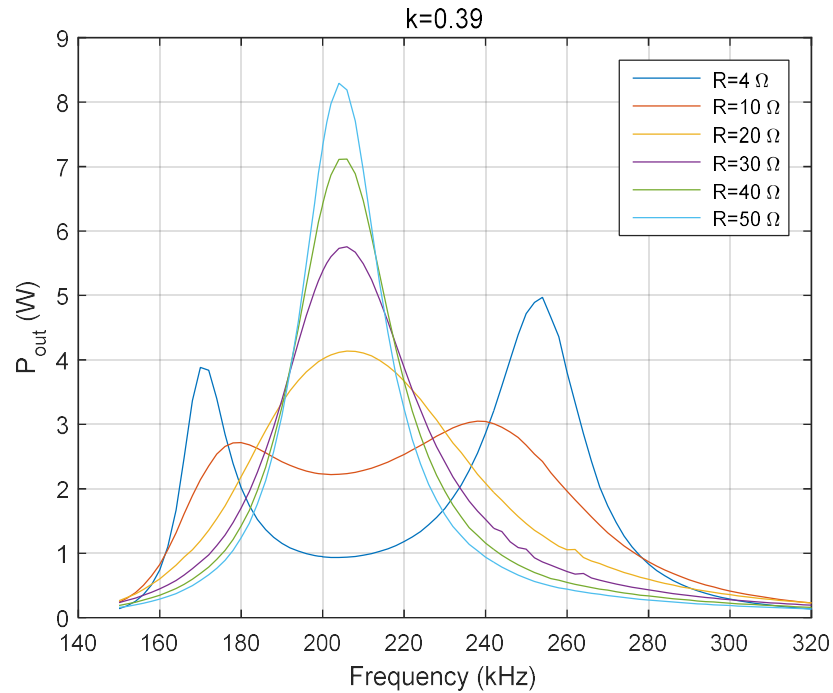
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.8: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

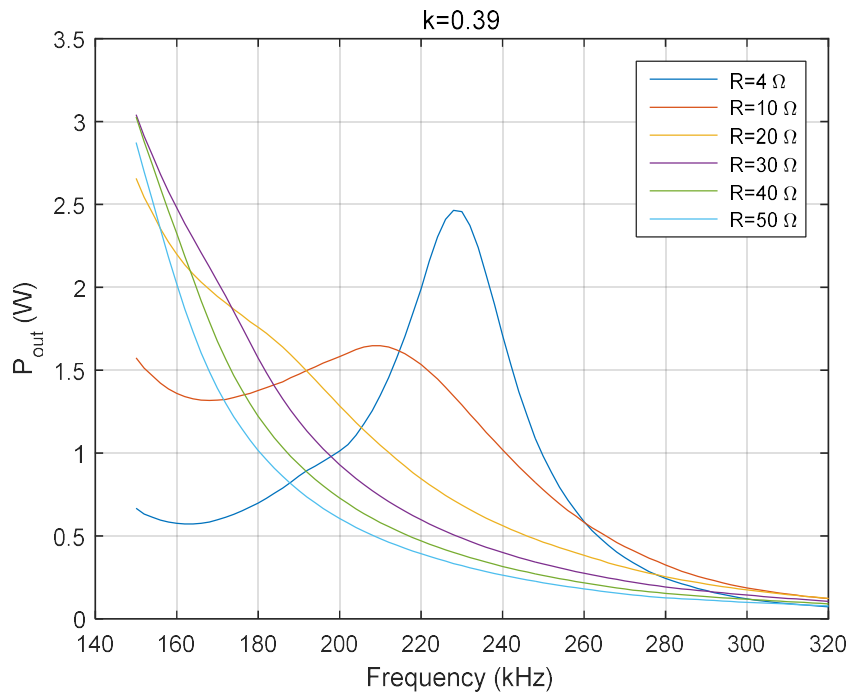
$k=0.39$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.9: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

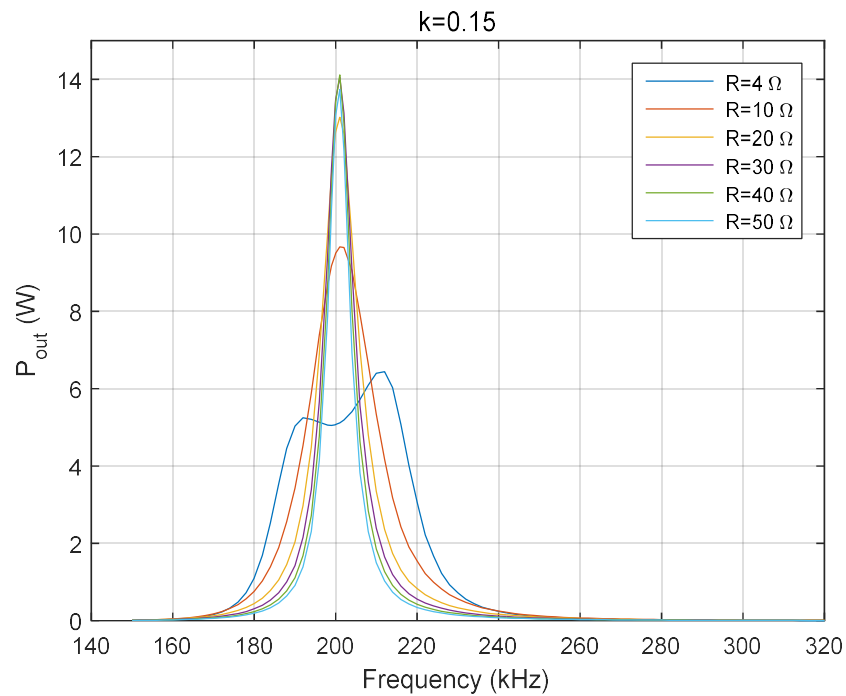
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.10: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

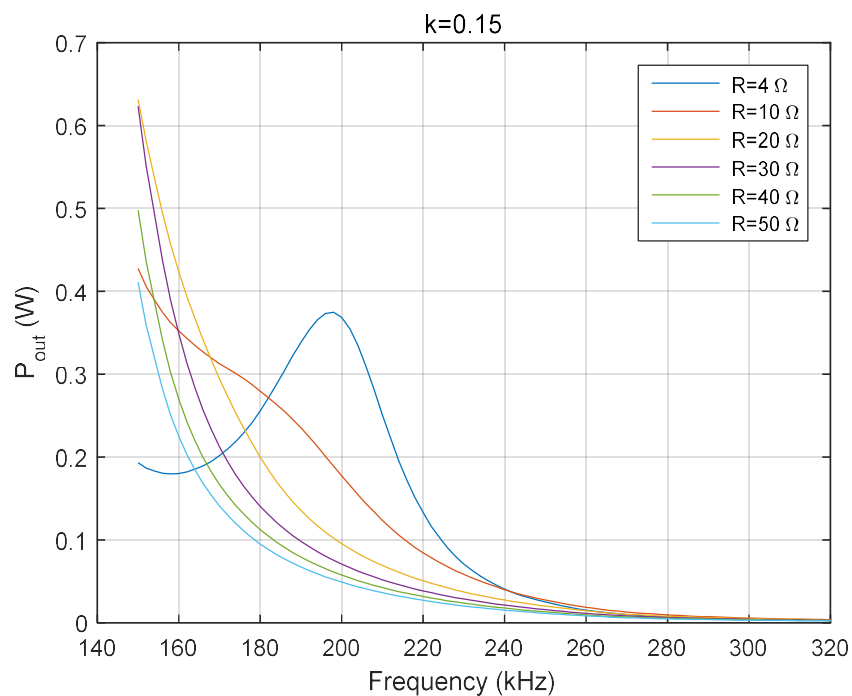
$k=0.15$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.11: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ενισχυτής κλάσης E:

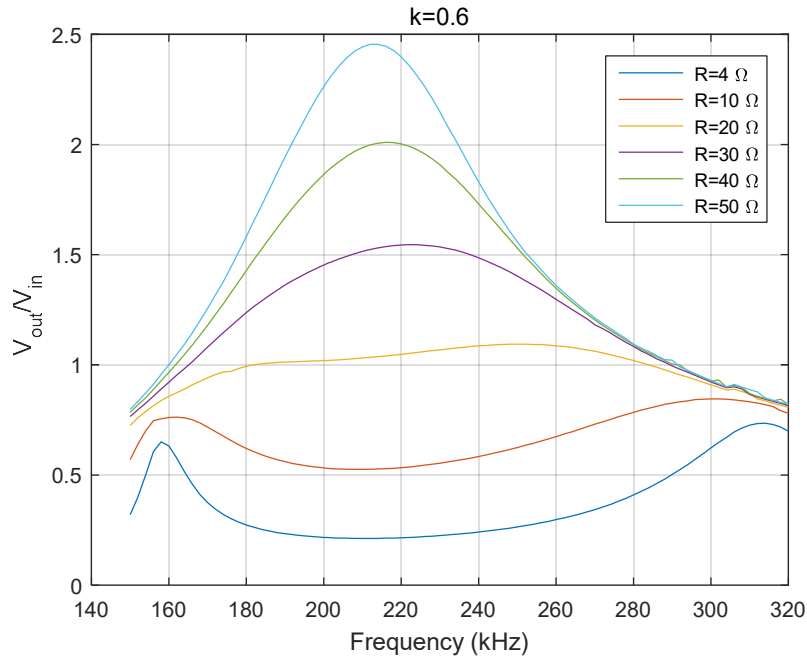


Σχήμα 6.12: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):

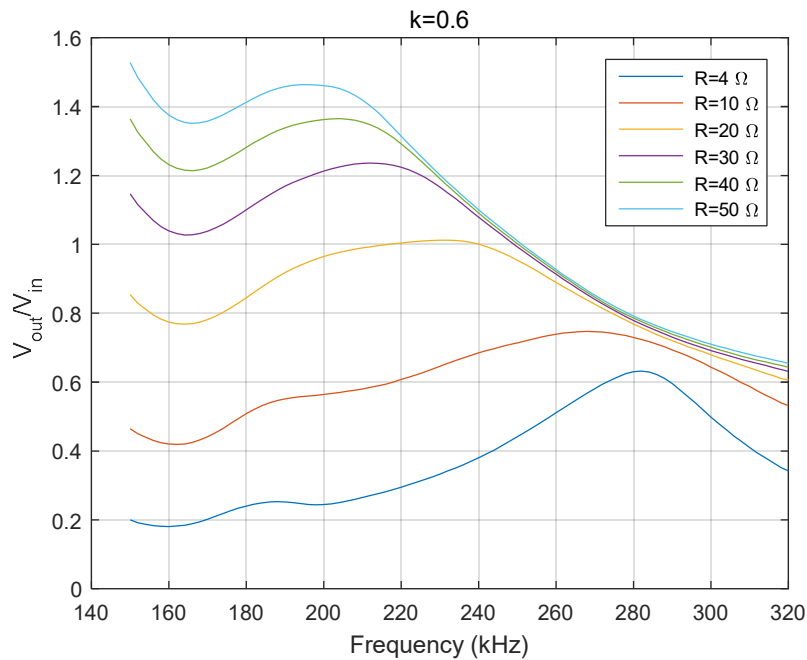
$k=0.6$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.13: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

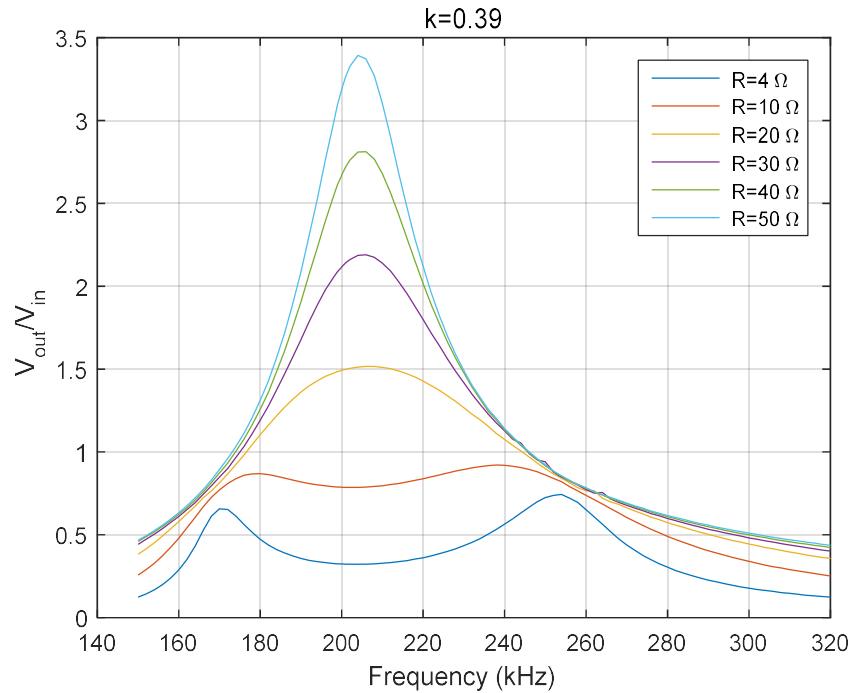
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.14: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

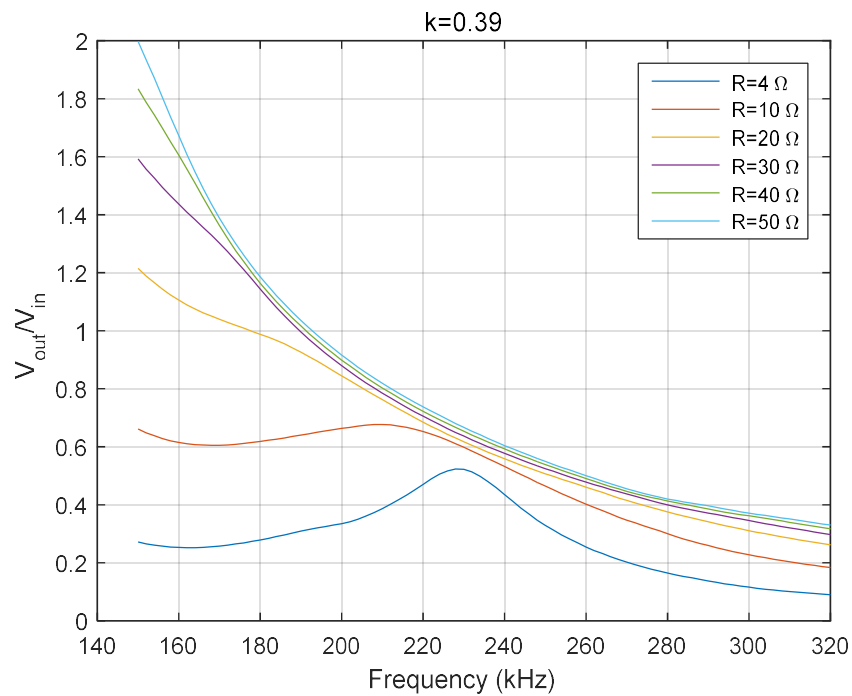
$k=0.39$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.15: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

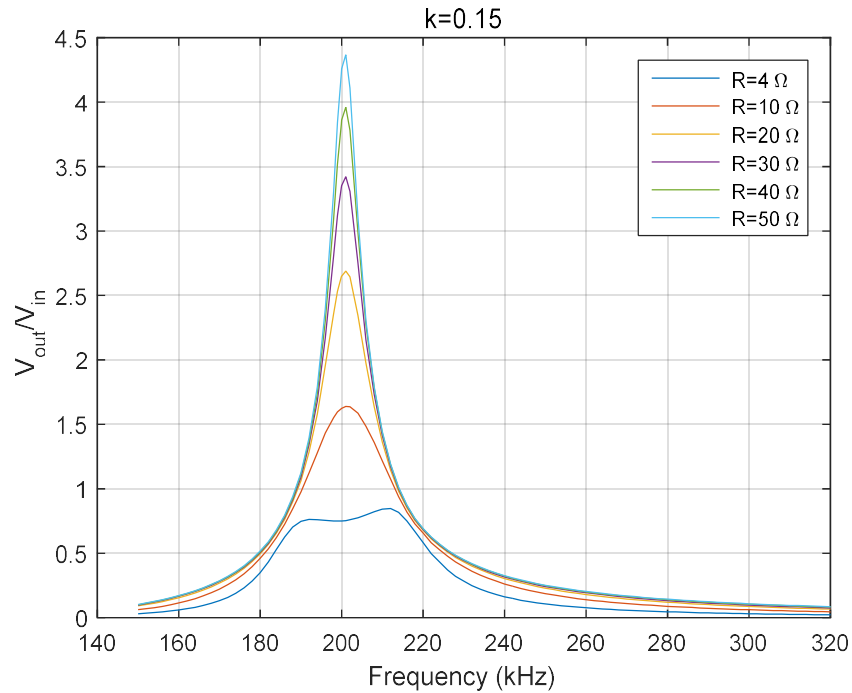
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.16: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

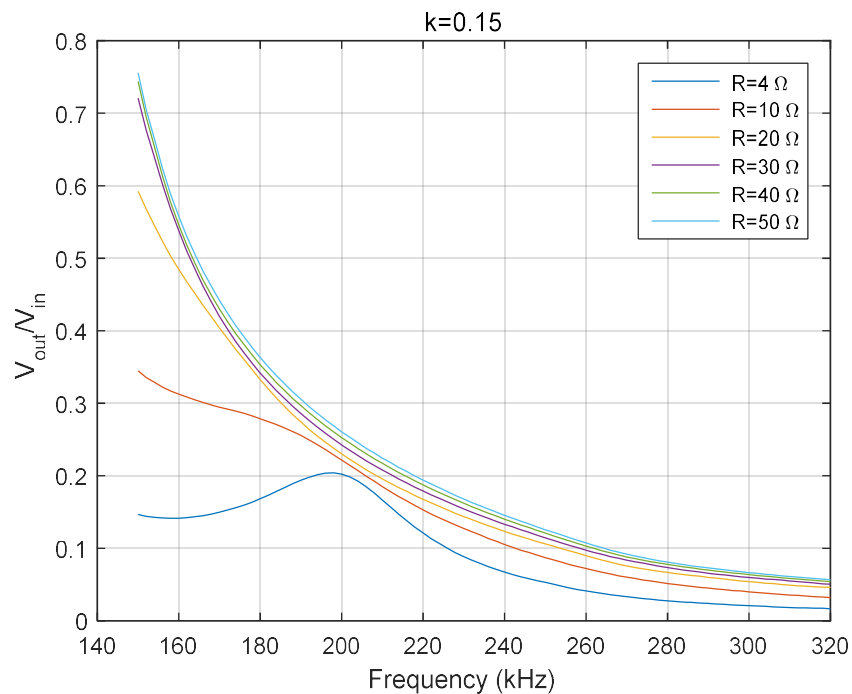
$k=0.15$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.17: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ενισχυτής κλάσης E:

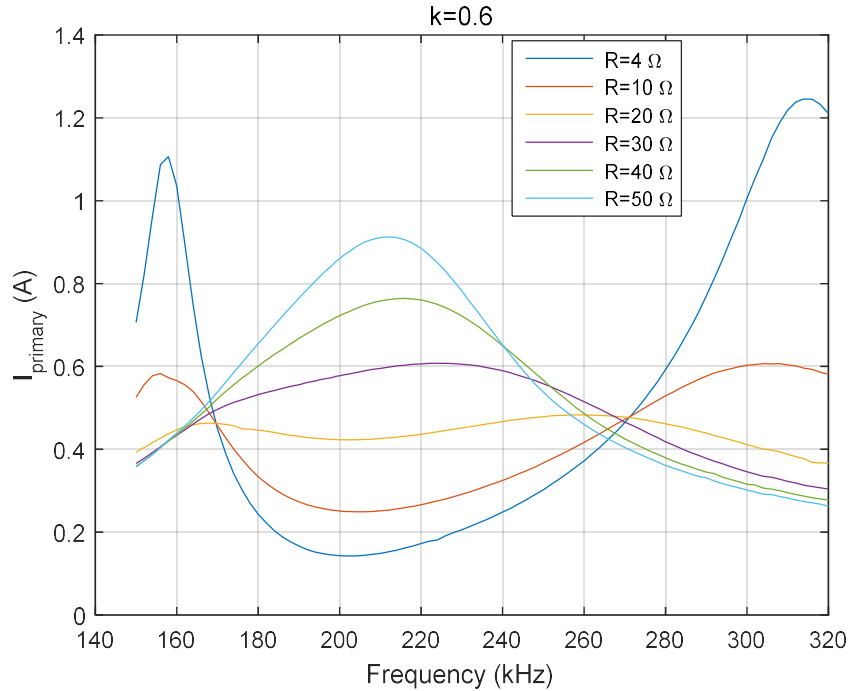


Σχήμα 6.18: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ρεύμα πρωτεύοντος (I_{primary}):

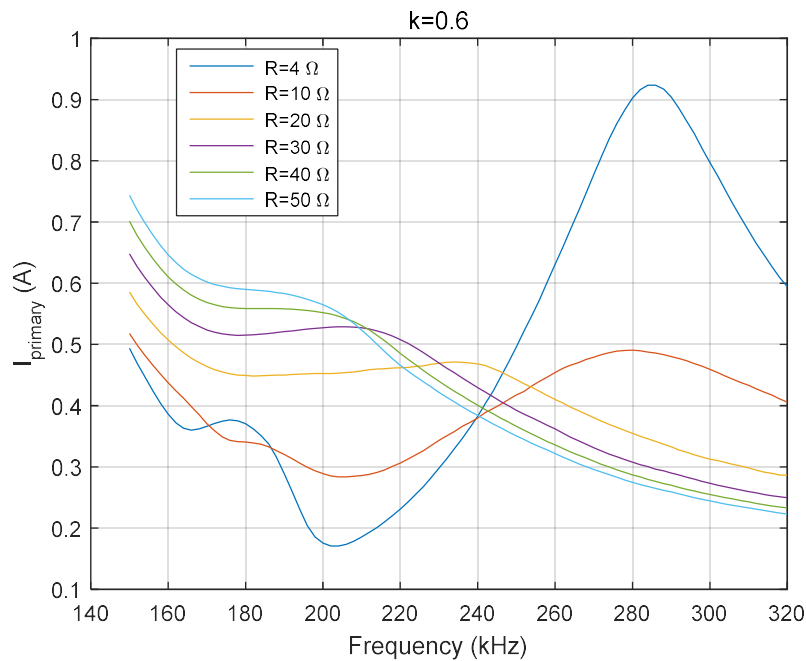
$k=0.6$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.19: Ρεύμα πρωτεύοντος I_{primary} (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

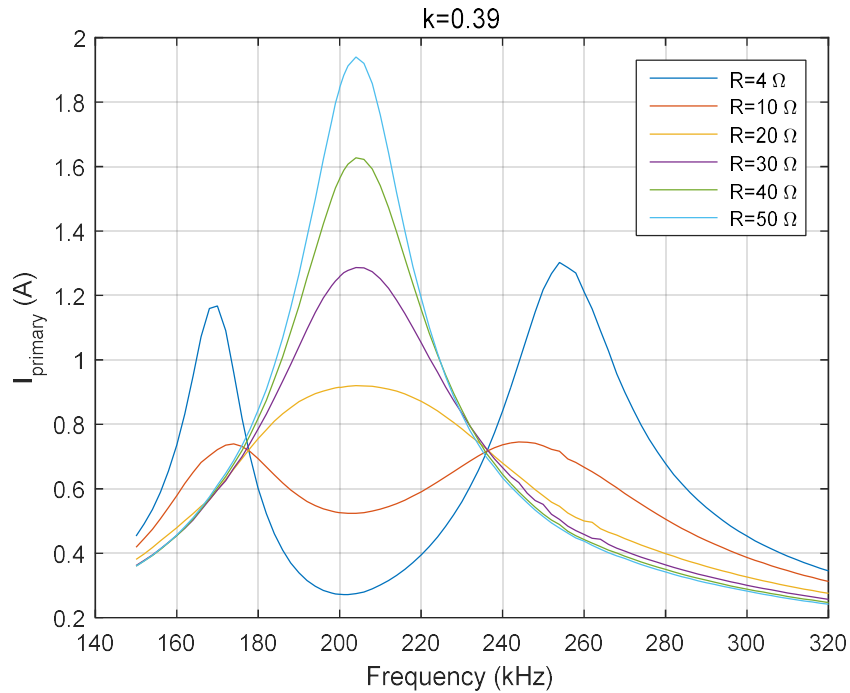
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.20: Ρεύμα πρωτεύοντος I_{primary} (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

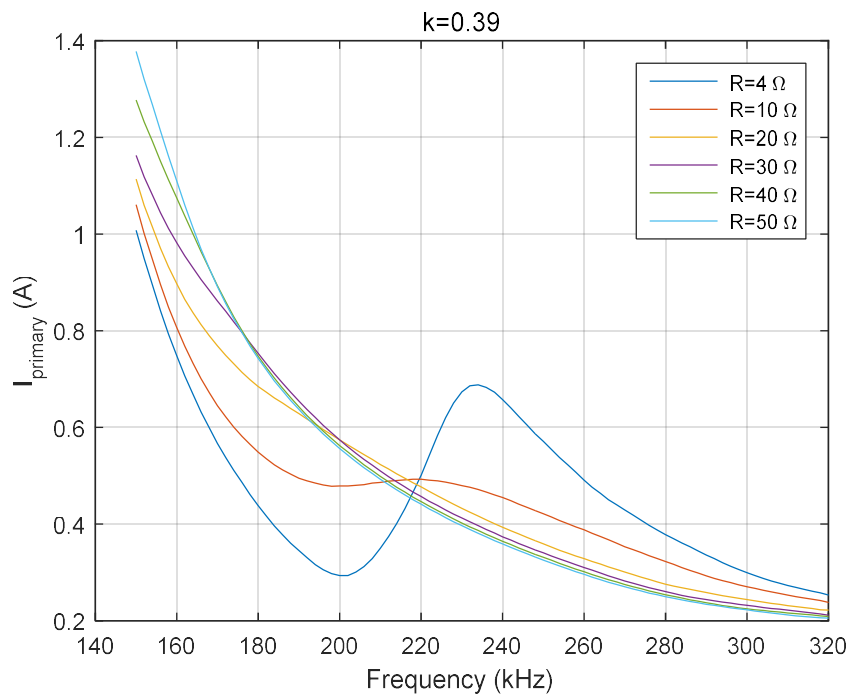
$k=0.39$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.21: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

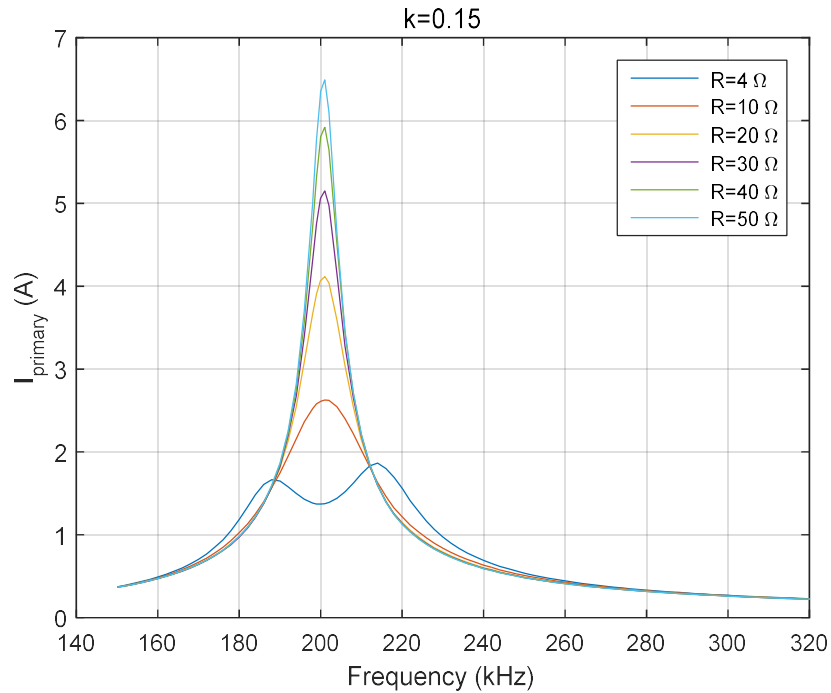
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.22: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

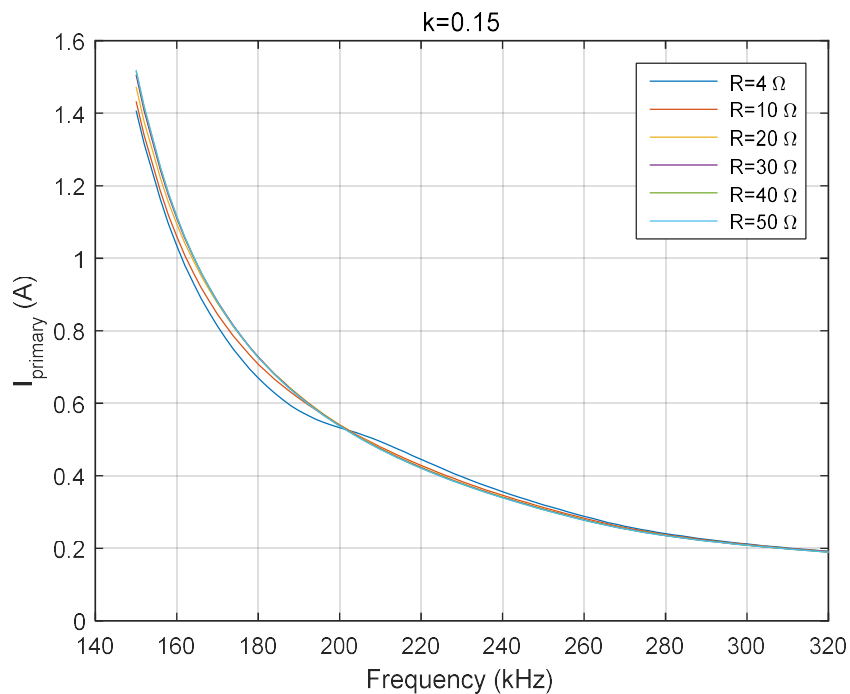
$k=0.15$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.23: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ενισχυτής κλάσης E:

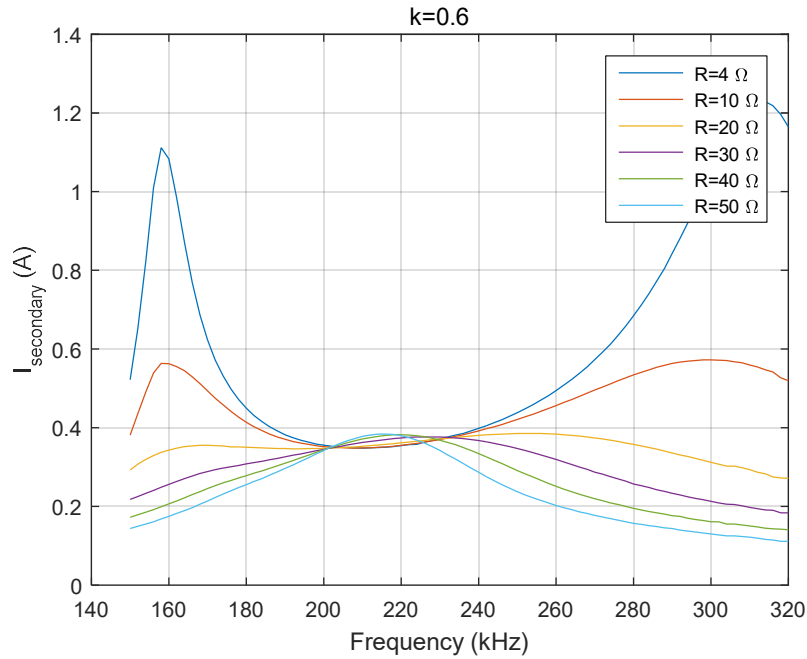


Σχήμα 6.24: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ρεύμα δευτερεύοντος ($I_{\text{secondary}}$):

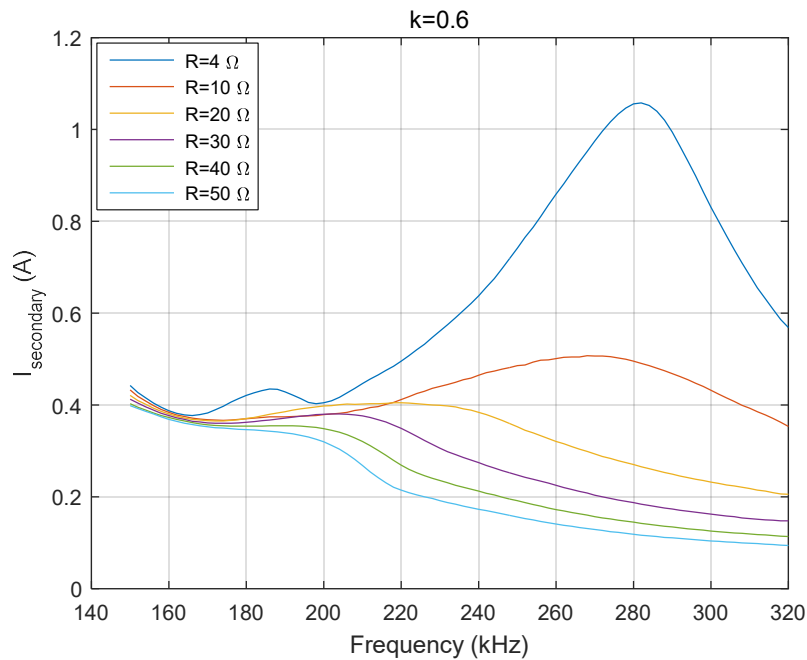
$k=0.6$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.25: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{\text{secondary}}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

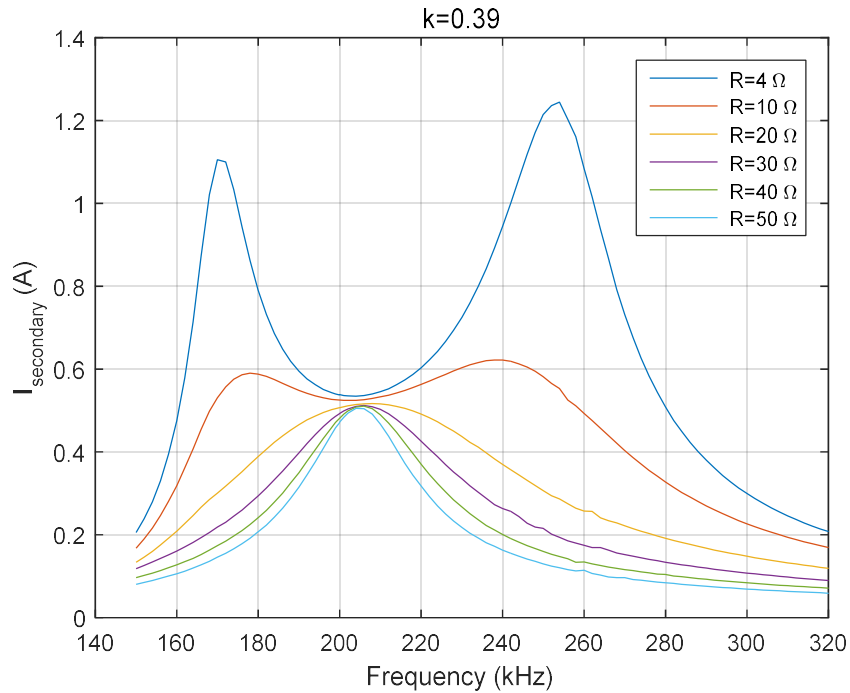
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.26: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{\text{secondary}}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

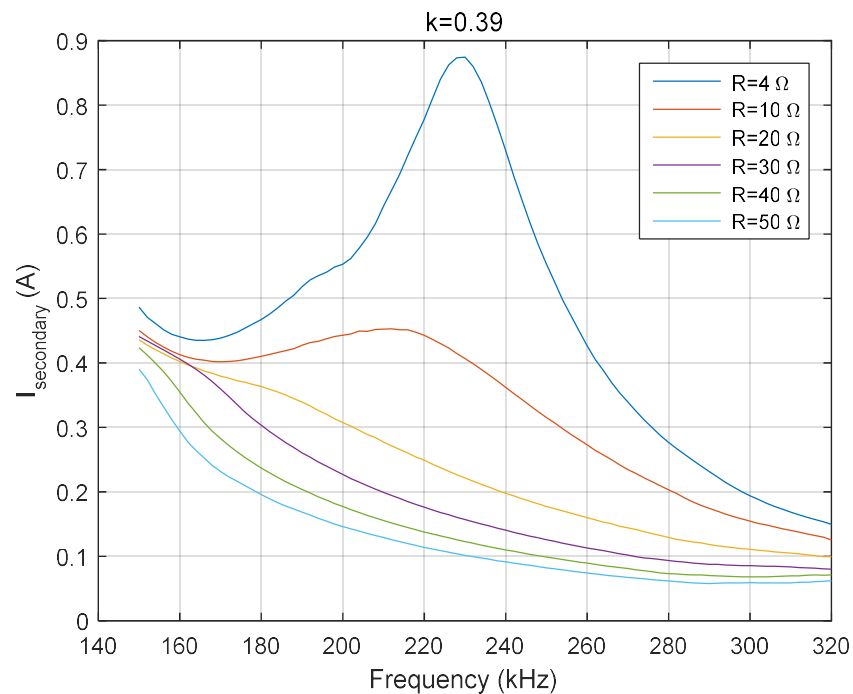
$k=0.39$:

Αντιστροφείας Πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.27: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{secondary}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

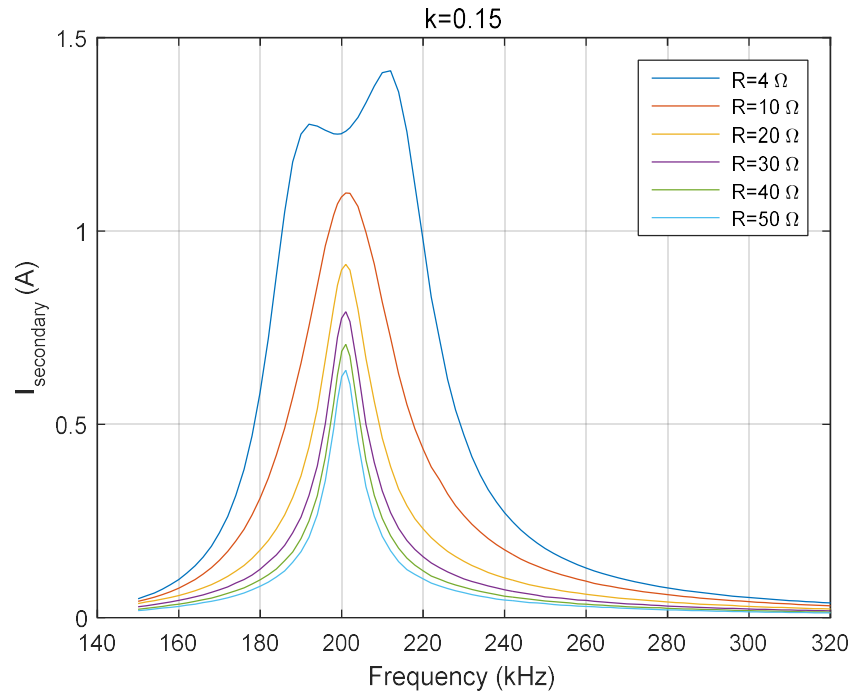
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.28: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{secondary}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

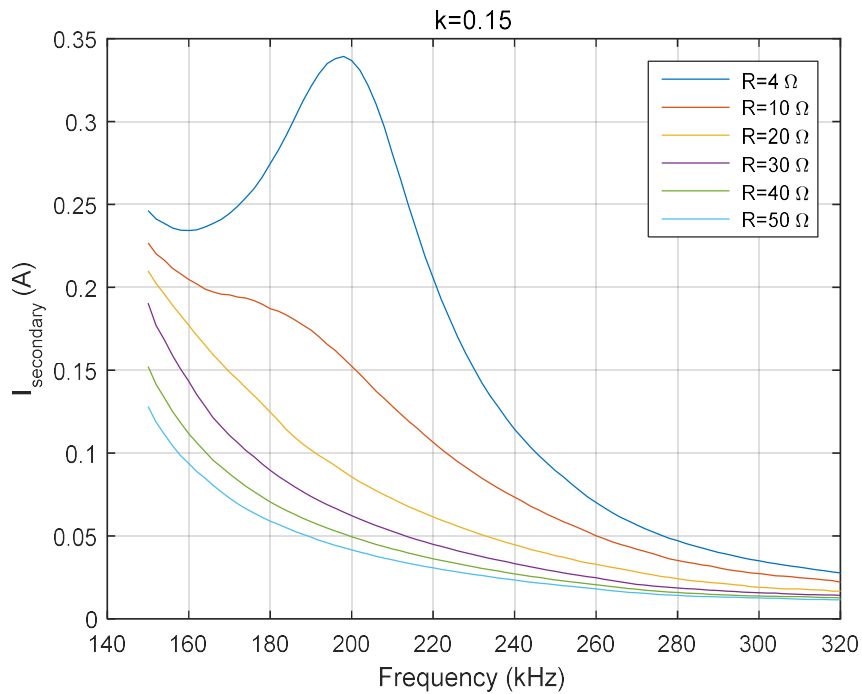
$k=0.15$:

Αντιστροφείας Πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.29: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{secondary}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.30: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{secondary}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη.

Από τα παραπάνω, για κάθε επιμέρους μέγεθος εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

DC-DC Απόδοση Συστήματος - η_{DC} (%):

Σε συνθήκες ισχυρής σύζευξης, το σύστημα με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας διατηρεί σταθερές τιμές αποδόσεων για όλο το εύρος των μελετώμενων συχνοτήτων, ενώ όσο αυξάνεται η αντίσταση φορτίου, η απόδοση αποκτά τιμές μεγαλύτερες του 80%. Από την άλλη μεριά, το σύστημα με τον ενισχυτή κλάσης E, στο μελετώμενο φάσμα συχνοτήτων, δεν εμφανίζει την ίδια σταθερότητα, και παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές αποδόσεων σε συχνότητες μεγαλύτερες των 210 kHz. Συγκριτικά όμως, οι τιμές αποδόσεων του συστήματος με τον ενισχυτή Κλάσης E είναι χαμηλότερες από το σύστημα με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας. Με μείωση του συντελεστή σύζευξης, οι καμπύλες των μεγεθών του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας τείνουν να παρουσιάζουν μέγιστο γύρω από την κεντρική συχνότητα συντονισμού (200 kHz), ενώ του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E εμφανίζουν μέγιστες τιμές σε συχνότητες μικρότερες των 210 kHz, και γραμμική έως εκθετική μείωση των τιμών της απόδοσής του, σε αύξηση της συχνότητας. Σε κάθε περίπτωση, η απόδοση που εμφανίζει το σύστημα με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E, με την μεγαλύτερη διαφορά τους να παρουσιάζεται στην ασθενέστερη σύζευξη.

Ισχύς Εξόδου - P_{out} (W):

Σε συνθήκες ισχυρής σύζευξης, το σύστημα με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας εμφανίζει έντονα το φαινόμενο της διακλάδωσης, αλλά με αυξανόμενη τιμή αντίστασης φορτίου η ισχύς εξόδου αποκτά μία κορυφή γύρω από την κεντρική συχνότητα συντονισμού. Οι μέγιστες τιμές που λαμβάνει η ισχύς εξόδου ξεπερνούν τα 4 W, ενώ οι ελάχιστες είναι περί των 0.5 W. Το σύστημα με τον ενισχυτή κλάσης E από την άλλη, έχει ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά, παρουσιάζοντας μέγιστη ισχύ για την χαμηλότερη τιμή της αντίστασης φορτίου και σε συχνότητα πολύ μεγαλύτερη των 200 kHz, με την τιμή αυτής ίση με 3.5 W. Σε μεγαλύτερες τιμές αντίστασης φορτίου, η τιμή της κυμαίνεται μεταξύ 0.5 W - 2 W και εμφανίζεται όλο και πλησιέστερα στην συχνότητα των 200 kHz. Όσο η σύζευξη εξασθενεί, η ισχύς εξόδου του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας τείνει να παρουσιάζει μία κορυφή μεγιστοποίησης γύρω από την κεντρική συχνότητα, εμφανίζοντας αρκετά μεγάλες τιμές. Το σύστημα με τον ενισχυτή κλάσης E, εμφανίζει εκθετική μείωση των τιμών της παρεχόμενης ισχύος στην έξοδο, με τις μέγιστες τιμές αυτής να εμφανίζονται σε συχνότητες περί των 150 kHz. Οι τιμές αυτές ενδέχεται να είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας σε κάποιες περιπτώσεις, αλλά εμφανίζονται σε συχνότητες πολύ διαφορετικές της κεντρικής.

Κέρδος Τάσης - V_{out}/V_{in} :

Το κέρδος τάσης του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της αντίστασης φορτίου σε κάθε τιμή σύζευξης και με την μείωση αυτής τείνει να μεγιστοποιείται γύρω από την κεντρική συχνότητα, λαμβάνοντας μεγαλύτερες τιμές. Από την άλλη μεριά, αύξηση του κέρδους τάσης με αντίστοιχη αύξηση της τιμής της αντίστασης φορτίου παρατηρείται και στο σύστημα με τον ενισχυτή κλάσης E, με την μόνη διαφορά ότι τις μέγιστες τιμές αυτού (που είναι σημαντικά μικρότερες από τις μέγιστες τιμές του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας), τις εμφανίζει στις χαμηλές συχνότητες του μελετώμενου εύρους. Επίσης, με την μείωση του συντελεστή σύζευξης, παρατηρείται σχεδόν ανεξαρτησία του κέρδους τάσης από την τιμή της αντίστασης φορτίου, και εκθετική μείωση αυτού με την αύξηση της συχνότητας.

Ρεύμα πρωτεύοντος - $I_{primary}$ (A):

Το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον, στο σύστημα με την τοπολογία του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, αποκτά μεγάλες τιμές γύρω από την συχνότητα συντονισμού - ειδικά όσο αυξάνει η σύζευξη και η αντίσταση φορτίου - καθώς σε εκείνες τις συχνότητες μηδενίζεται η διαφορά φάσης

μεταξύ αυτού και της τάσης πρωτεύοντος. Συγκριτικά, στο σύστημα με την τοπολογία του ενισχυτή κλάσης E, οι τιμές του ρεύματος στο πρωτεύον είναι ίσες και μικρότερες, ειδικά στις συχνότητες γύρω από τα 200 kHz (καθώς το πρωτεύον δε συντονίζεται στα 200 kHz). Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται στις χαμηλές συχνότητες (περί των 150 kHz), ενώ με μείωση της τιμής του συντελεστή σύζευξης παρατηρείται ανεξαρτησία της τιμής του ρεύματος από την αντίσταση φορτίου και εξάρτηση μόνο από την τιμή της συχνότητας.

Ρεύμα δευτερεύοντος – $I_{\text{secondary}}$ (A):

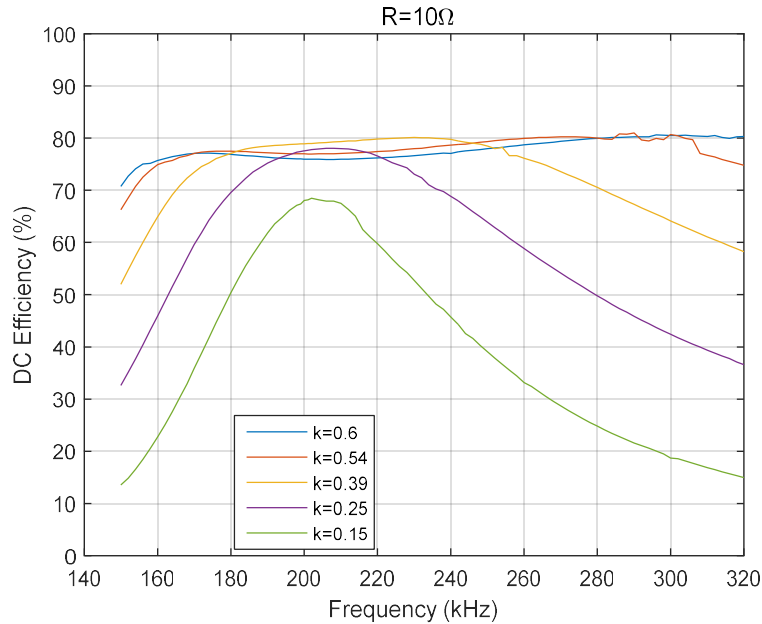
Στο σύστημα με την τοπολογία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, το δευτερεύον εμφανίζει μικρότερες τιμές ρεύματος σχετικά με το πρωτεύον, και όσο πιο ισχυρή είναι η σύζευξη, τόσο πιο σταθερές τιμές εμφανίζει γύρω από τη συχνότητα συντονισμού, ανεξάρτητα της τιμής της αντίστασης φορτίου. Στις άλλες περιπτώσεις, λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές σε συχνότητες αρκετά μεγαλύτερες ή αρκετά μικρότερες της συχνότητας συντονισμού και όσο η αντίσταση φορτίου είναι μικρής τιμής. Στην περίπτωση της ασθενέστερης σύζευξης, οι καμπύλες τιμών του ρεύματος δευτερεύοντος παρουσιάζουν μέγιστο γύρω από την συχνότητα συντονισμού, με μέγιστη τιμή περίπου 1.25 A. Στην περίπτωση του συστήματος με την τοπολογία ενισχυτή κλάσης E, επίσης παρουσιάζεται αυξημένο ρεύμα σε μικρές τιμές της αντίστασης φορτίου. Οι τιμές του είναι σχετικά σταθερές και ανεξάρτητες της τιμής της αντίστασης φορτίου σε συνθήκες ισχυρής σύζευξης, αλλά όσο αυτή εξασθενεί, τόσο πιο απότομα μειώνονται με τη μεταβολή της συχνότητας. Γενικότερα, παρατηρούνται σχεδόν ίσες και λίγο μικρότερες τιμές ρεύματος δευτερεύοντος στο σύστημα με την τοπολογία ενισχυτή κλάσης E, συγκριτικά με του συστήματος με την τοπολογία πλήρους γέφυρας, με την διαφορά μεταξύ τους να αυξάνεται αρκετά όσο η σύζευξη εξασθενεί.

6.1.2: Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή αντίσταση φορτίου (R)

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):

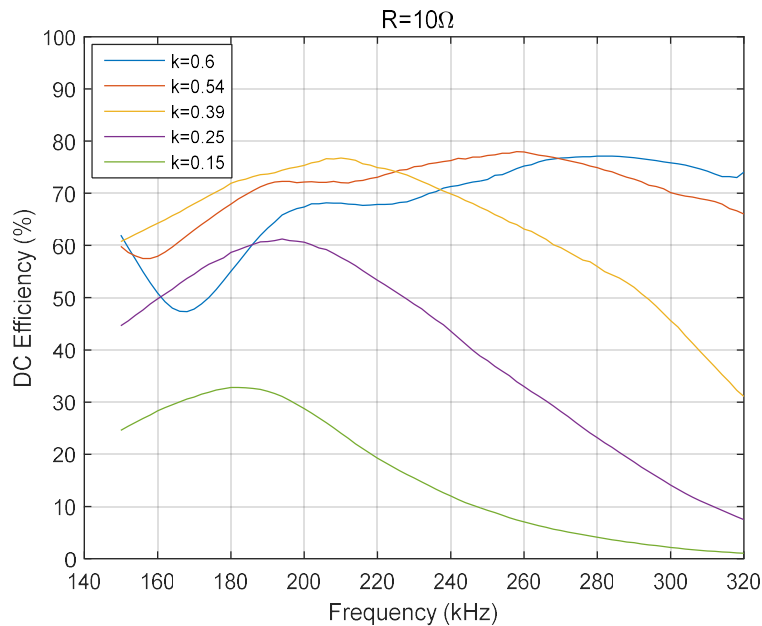
R=10 Ω:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.31: Απόδοση συστήματος η_{dc} (%) με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

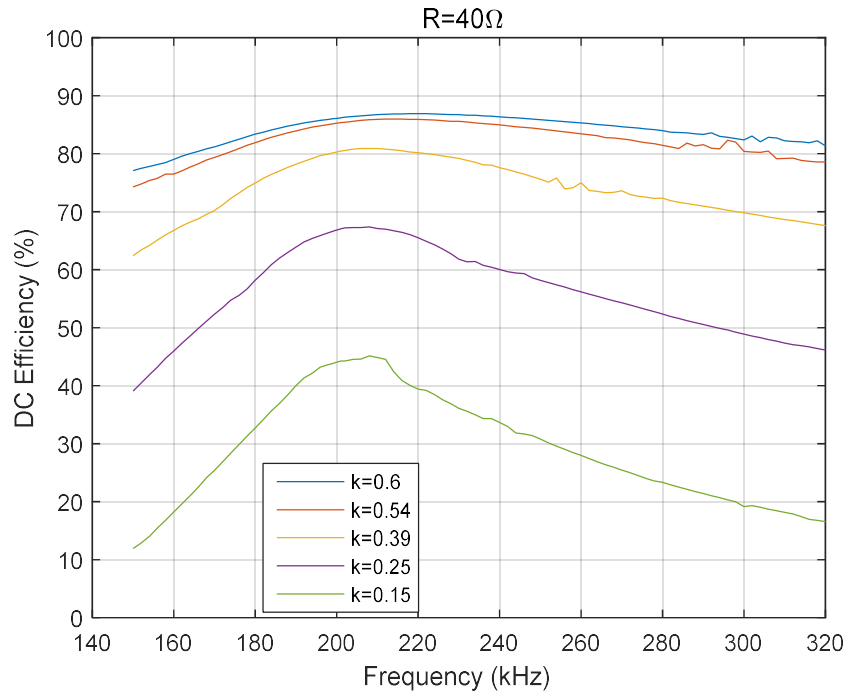
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.32: Απόδοση συστήματος η_{dc} (%) με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

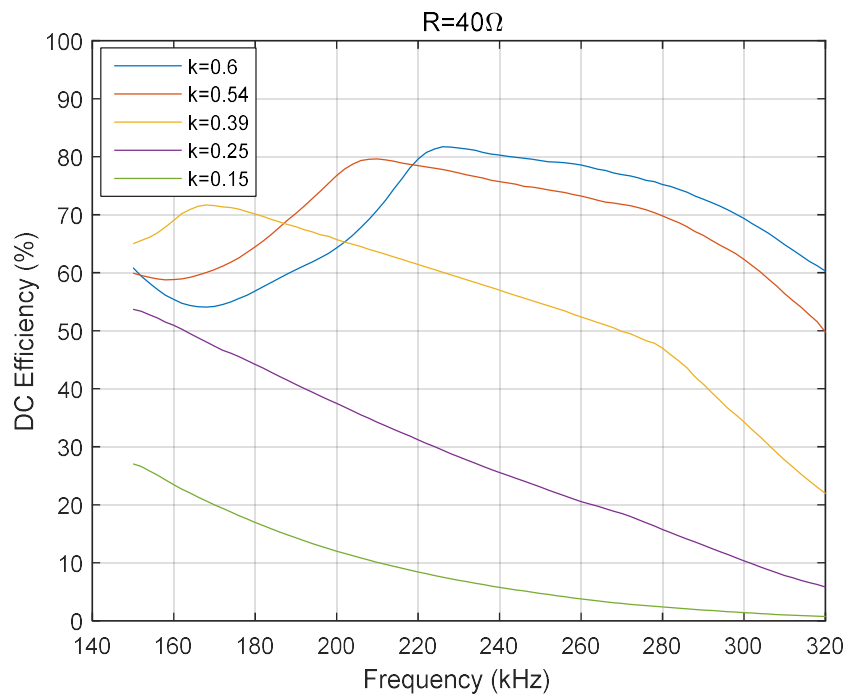
R=40 Ω:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.33: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ενισχυτής κλάσης E:

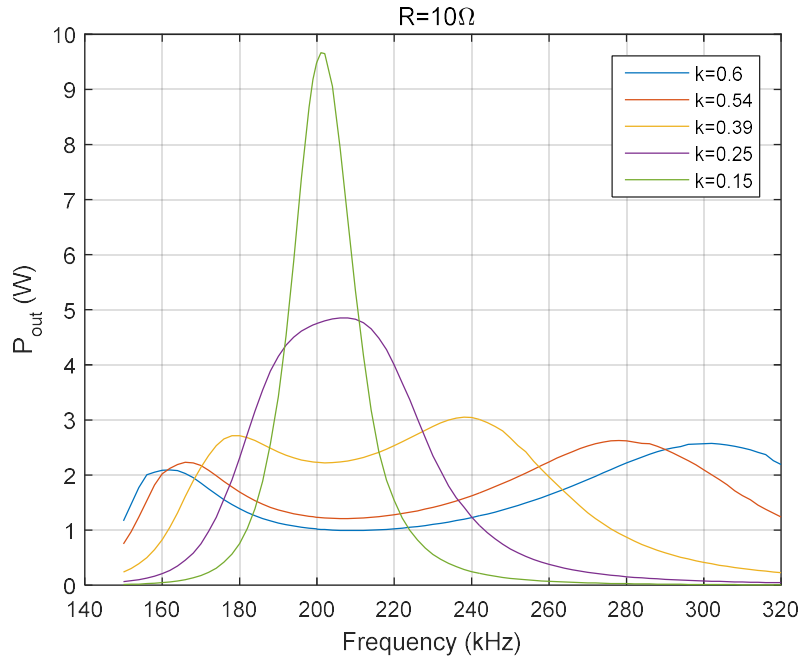


Σχήμα 6.34: Απόδοση συστήματος η_{DC} (%) με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):

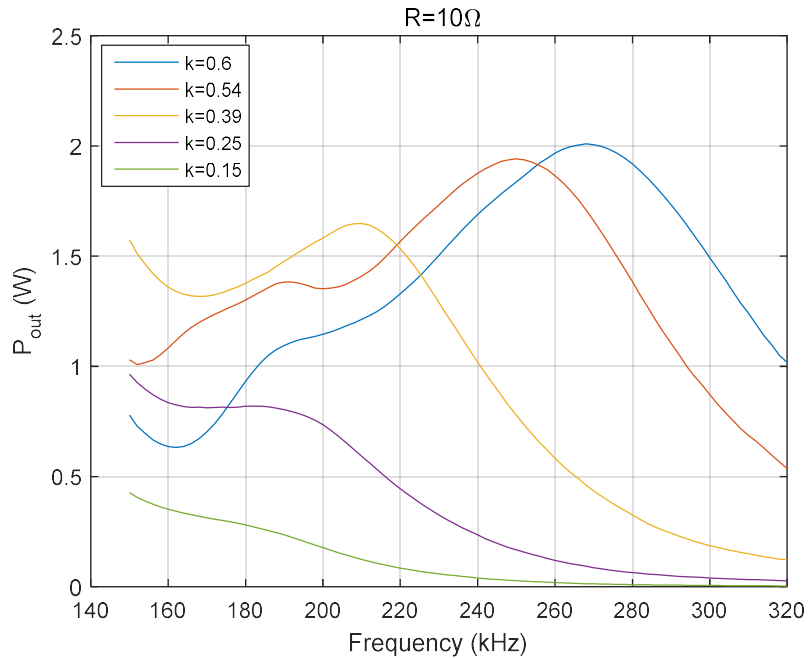
$R=10 \Omega$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.35: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

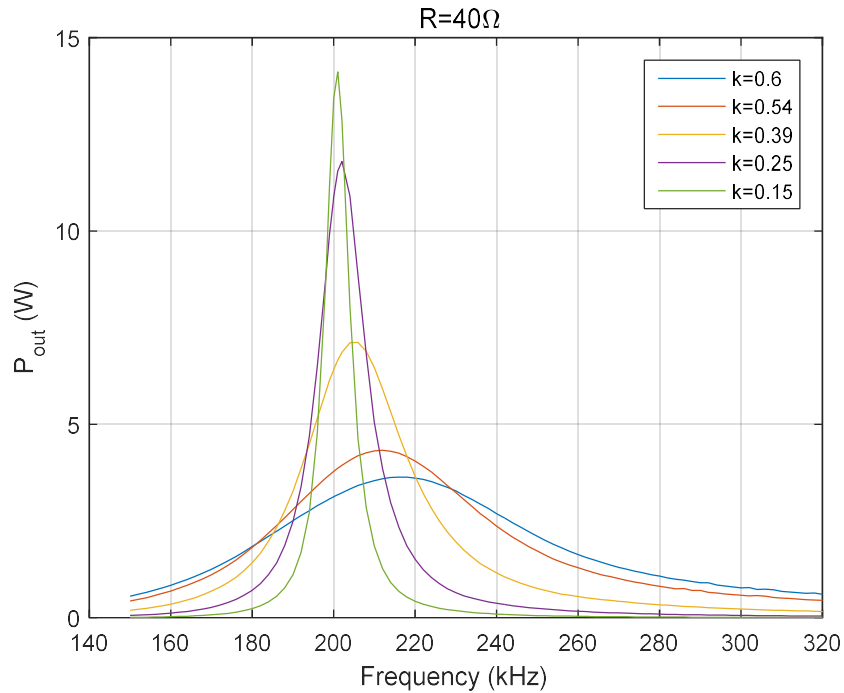
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.36: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

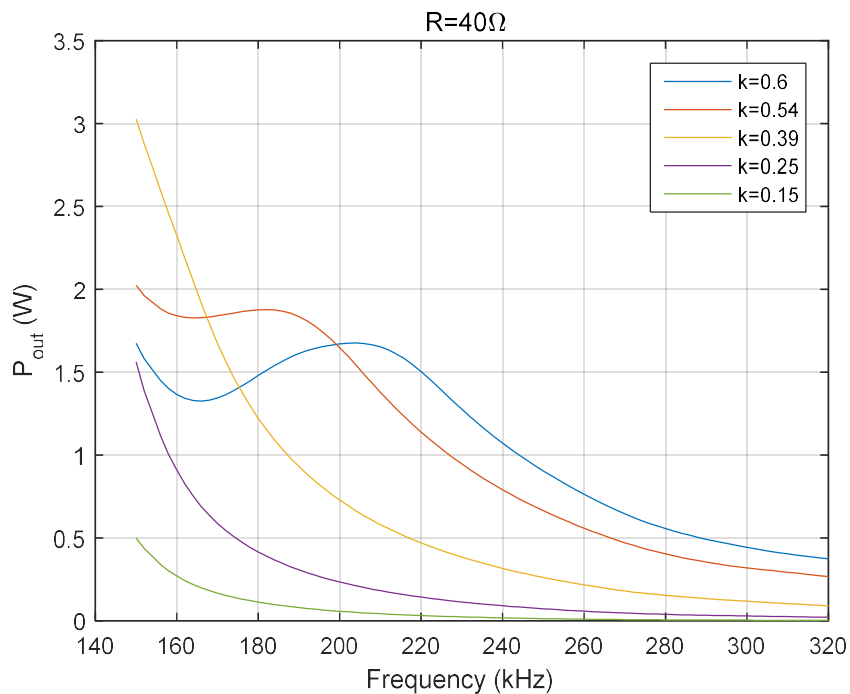
R=40 Ω:

Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.37: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ενισχυτής κλάσης E:

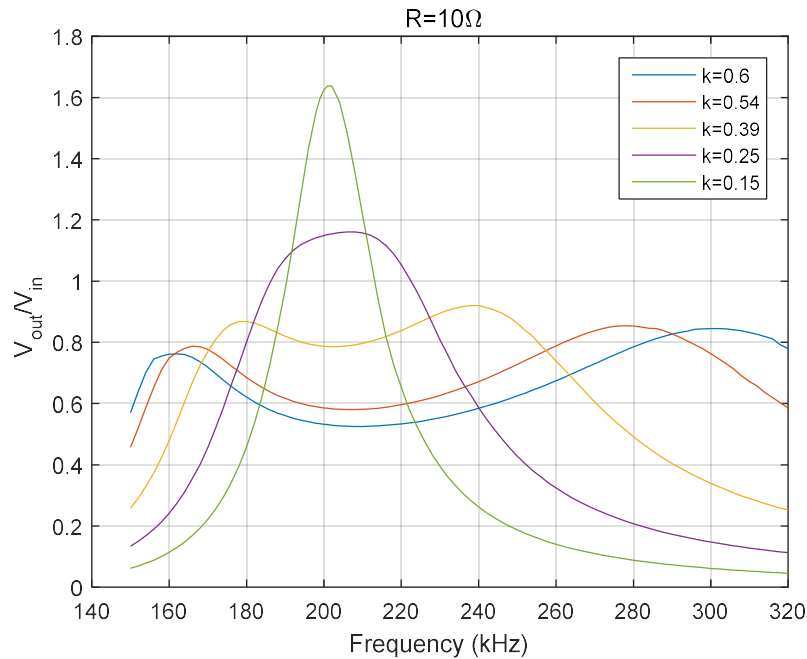


Σχήμα 6.38: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):

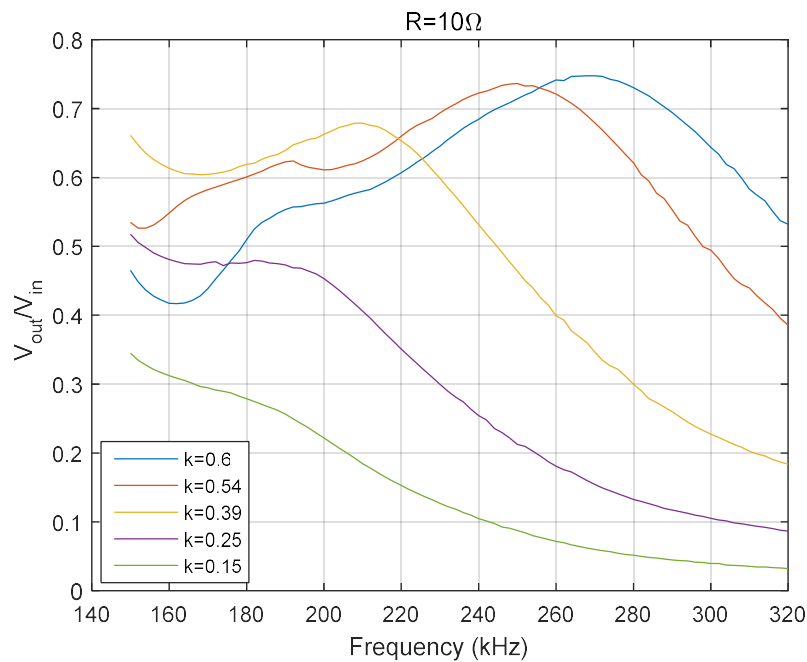
$R=10\Omega$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.39: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

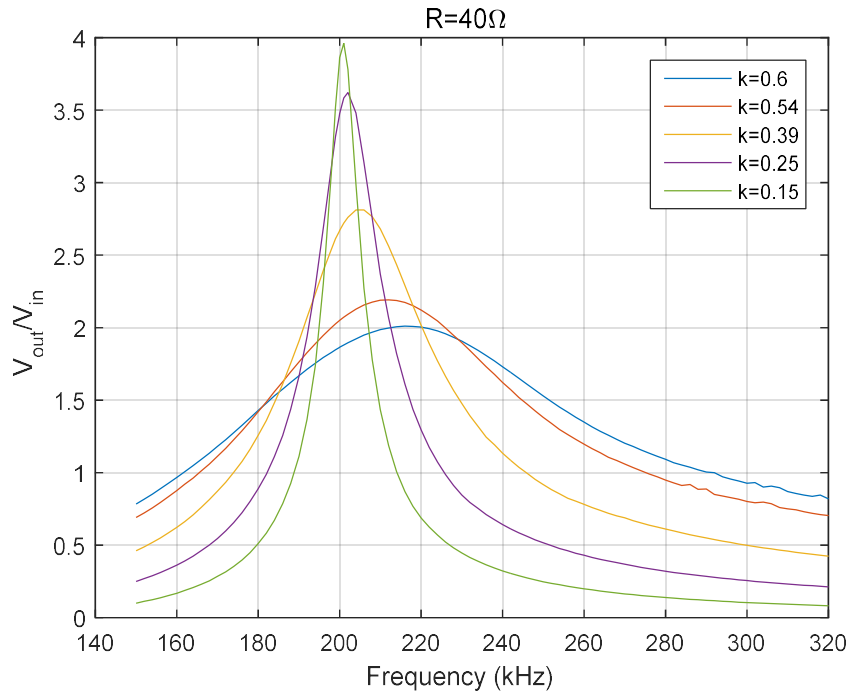
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.40: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

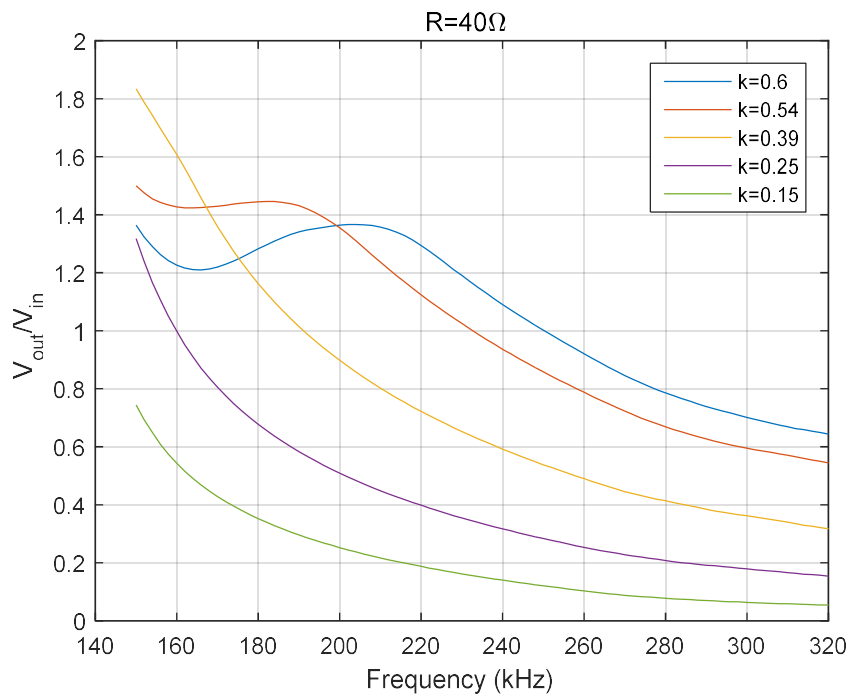
R=40 Ω:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.41: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ενισχυτής κλάσης E:

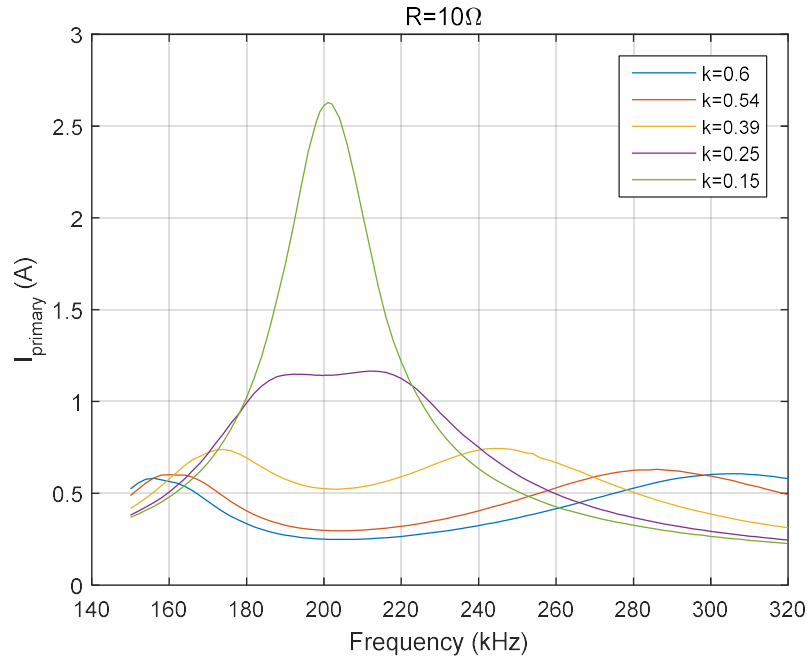


Σχήμα 6.42: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ρεύμα πρωτεύοντος ($I_{primary}$):

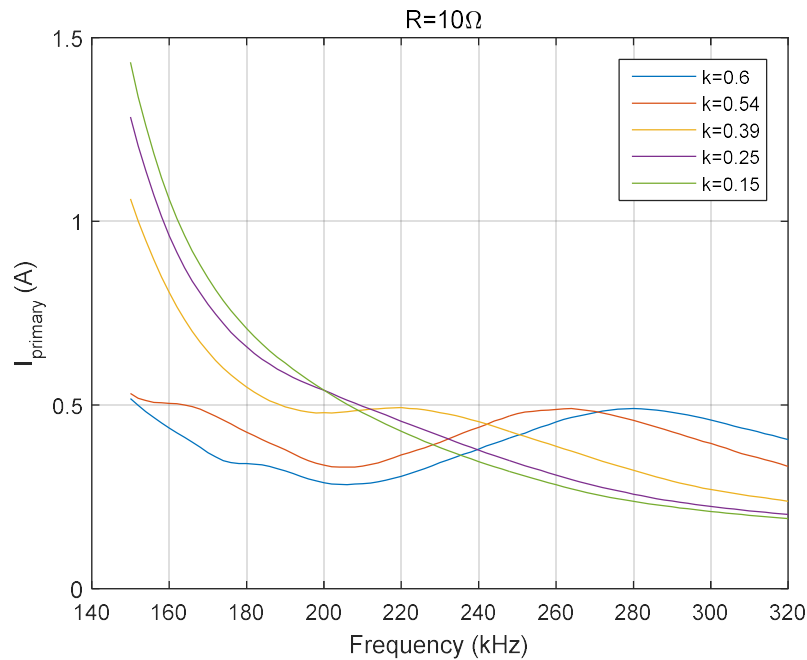
$R=10\ \Omega$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.43: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

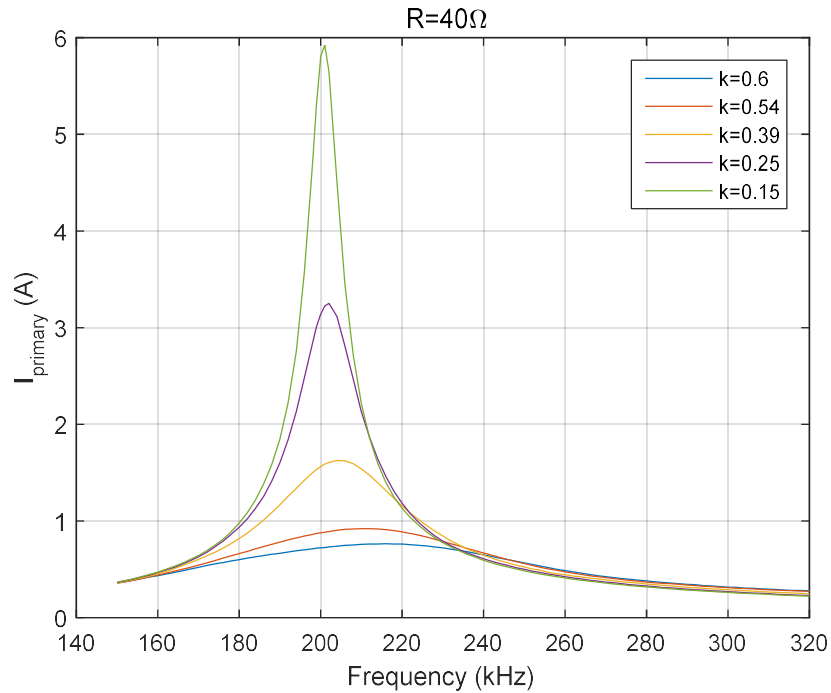
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.44: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

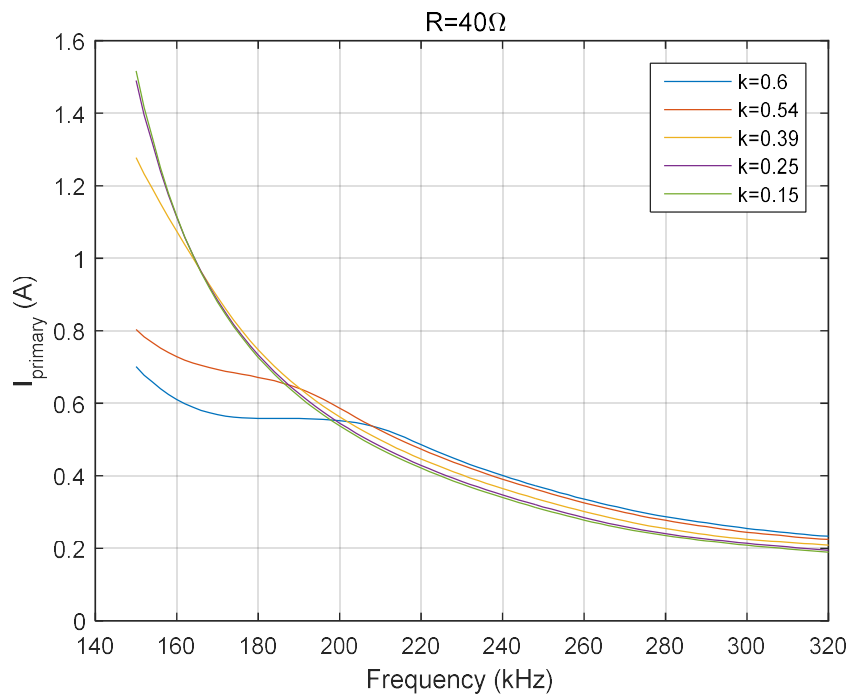
R=40 Ω:

Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.45: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ενισχυτής κλάσης E:

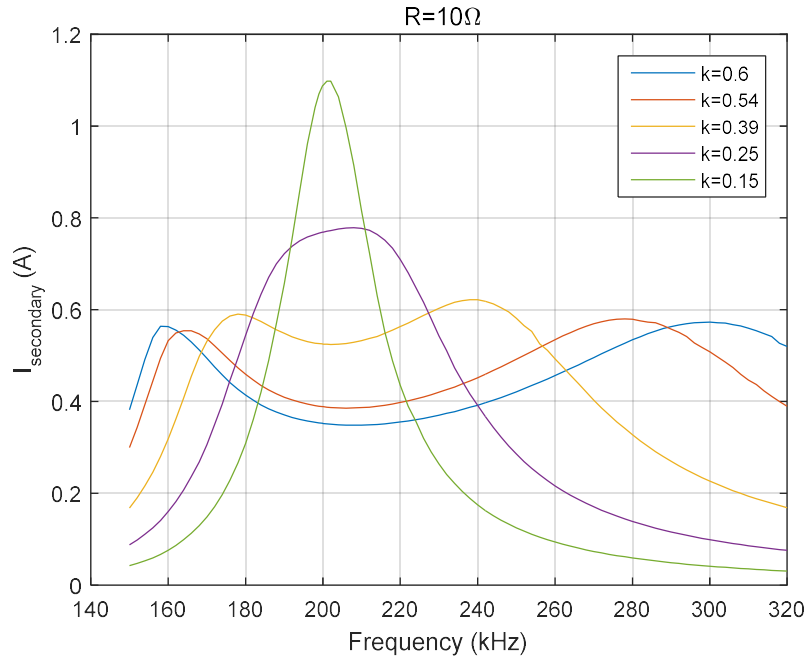


Σχήμα 6.46: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ρεύμα δευτερεύοντος ($I_{\text{secondary}}$):

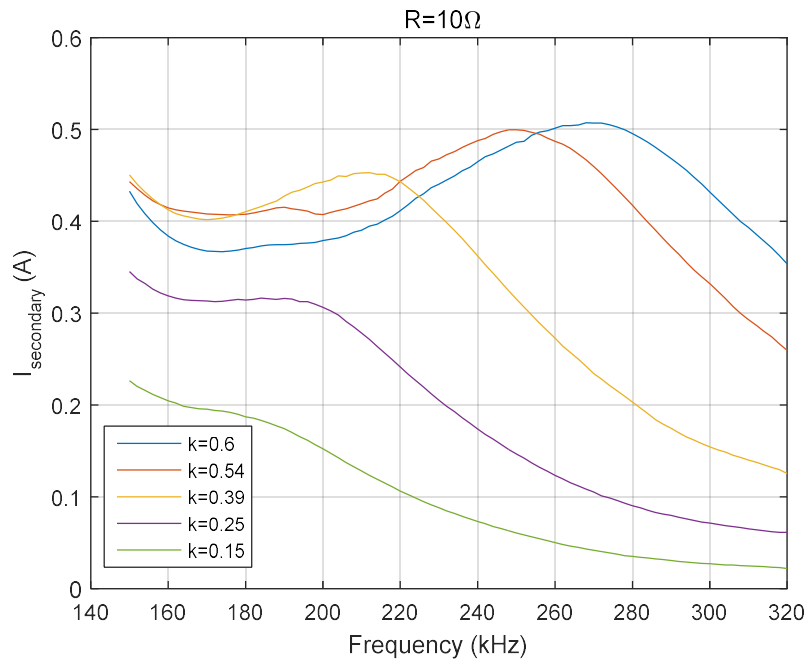
$R=10\ \Omega$:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.47: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{\text{secondary}}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

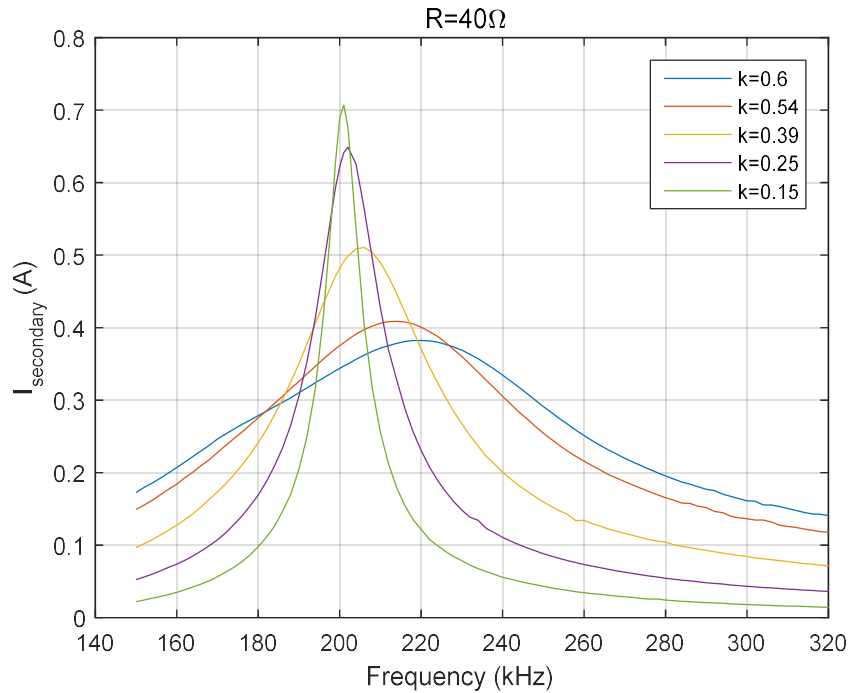
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.48: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{\text{secondary}}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

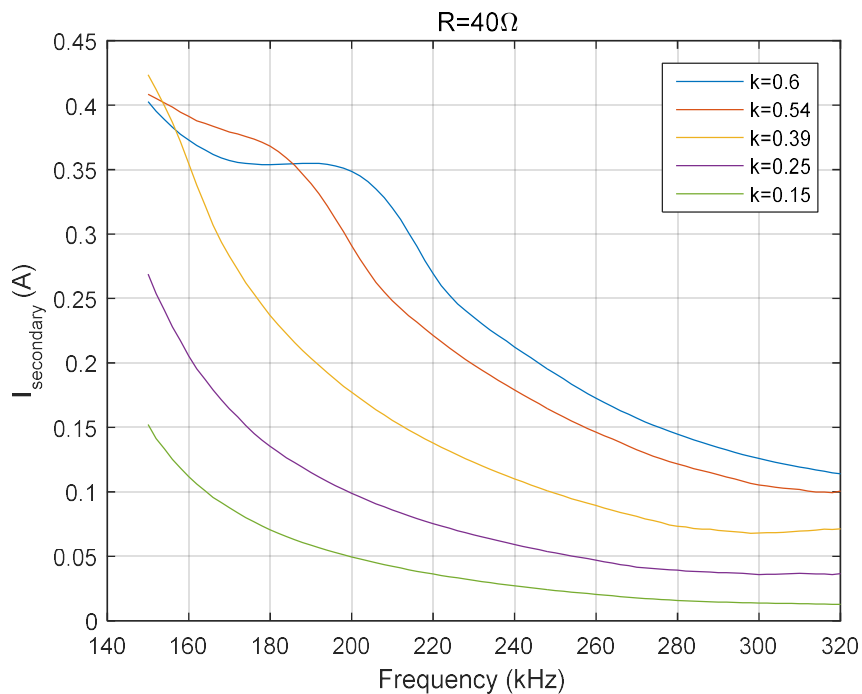
R=40 Ω:

Αντιστροφείας Πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.49: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{\text{secondary}}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.50: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{\text{secondary}}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου.

Από τα παραπάνω, για κάθε επιμέρους μέγεθος εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

DC-DC Απόδοση Συστήματος - η_{DC} (%):

Και στις δύο μελετώμενες περιπτώσεις, φαίνεται η επίδραση του συντελεστή σύζευξης στη συνολική απόδοση του συστήματος, καθώς όσο πιο ισχυρή είναι η σύζευξη, τόσο πιο μεγάλη η απόδοση. Επίσης, αύξηση της απόδοσης παρατηρείται με αύξηση της αντίστασης φορτίου. Οι τιμές απόδοσης που σημειώνονται για το σύστημα με την τοπολογία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, είναι γενικότερα υψηλότερες από τις αντίστοιχες του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E.

Ισχύς Εξόδου - P_{out} (W):

Η σημαντική διαφορά που παρατηρείται είναι πως στην περίπτωση του συστήματος με την τοπολογία πλήρους γέφυρας, η ισχύς στην έξοδο αποκτά μεγαλύτερες τιμές -και ειδικά γύρω από τη συχνότητα συντονισμού- όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή σύζευξης, ενώ στο σύστημα με την τοπολογία του ενισχυτή κλάσης E, η ισχύς μειώνεται. Επίσης, στο σύστημα με την τοπολογία πλήρους γέφυρας, αύξηση της αντίστασης φορτίου προκαλεί πιο «στενή» καμπύλη ισχύος και αύξηση αυτής. Στο σύστημα με τον ενισχυτή κλάσης E, αύξηση της αντίστασης φορτίου μετατοπίζει τις κορυφές μέγιστης ισχύος από τις υψηλές τιμές συχνοτήτων σε χαμηλές, και κάνει την εξάρτησή της από τη συχνότητα περισσότερο γραμμική. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αποδιδόμενη τάση εξόδου του συστήματος είναι υψηλότερη με την χρήση τοπολογίας αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

Κέρδος Τάσης - V_{out}/V_{in} :

Η μορφή του κέρδους τάσης είναι αντίστοιχη με την μορφή της ισχύος σε κάθε περίπτωση. Το κέρδος τάσης του συστήματος με την τοπολογία ενισχυτή κλάσης E είναι γενικά μικρότερο της αντίστοιχου του συστήματος με την τοπολογία πλήρους γέφυρας, με μόνη εξαίρεση τις χαμηλές συχνότητες του μελετώμενου εύρους, όπου και έχει υψηλότερες τιμές σε ισχυρότερες συζεύξεις. Επίσης, στην περίπτωση του συστήματος με ενισχυτή κλάσης E παρατηρείται αύξηση του κέρδους τάσης με την αύξηση της αντίστασης φορτίου.

Ρεύμα πρωτεύοντος - $I_{primary}$ (A):

Όπως φάνηκε και από την προηγούμενη περίπτωση, το ρεύμα πρωτεύοντος στην περίπτωση του συστήματος με τοπολογία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, με αύξηση της αντίστασης φορτίου και μείωση του συντελεστή σύζευξης, ενώ οι τιμές του ρεύματος πρωτεύοντος στην περίπτωση του συστήματος με τοπολογία ενισχυτή κλάσης E είναι μικρότερες, ιδιαίτερα σε συχνότητες κοντά στην συχνότητα συντονισμού.

Ρεύμα δευτερεύοντος - $I_{secondary}$ (A):

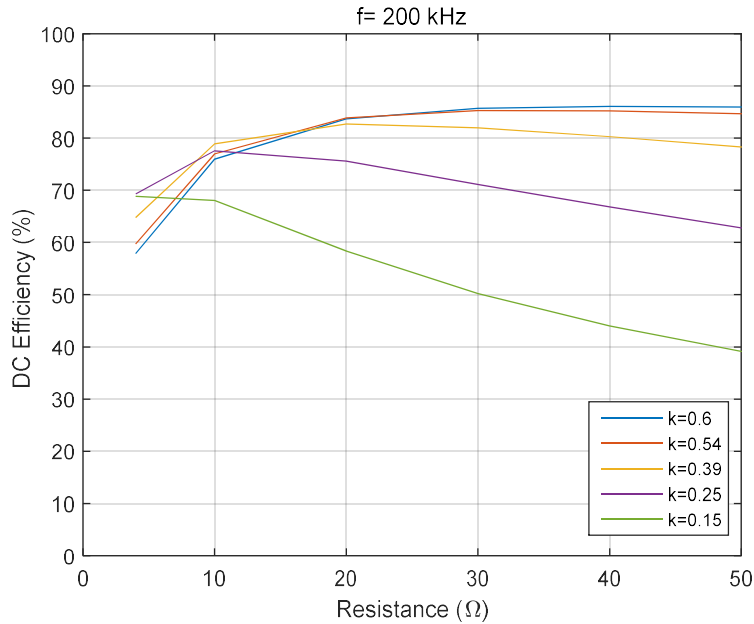
Σχετικά με το ρεύμα που διαρρέει το δευτερεύον τύλιγμα του συστήματος, και με τις δύο τοπολογίες αποκτά παραπλήσιες τιμές, με μειούμενο ρεύμα καθώς η αντίσταση φορτίου αυξάνεται, με την μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση του συστήματος με τοπολογία γέφυρας, σε ασθενή σύζευξη λόγω συντονισμού το ρεύμα αποκτά μεγαλύτερες τιμές στην κεντρική συχνότητα ενώ στην περίπτωση του συστήματος με τοπολογία ενισχυτή κλάσης E, το ρεύμα αποκτά μεγαλύτερες τιμές σε χαμηλές συχνότητες.

6.1.3: Μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή συχνότητα λειτουργίας (f)

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):

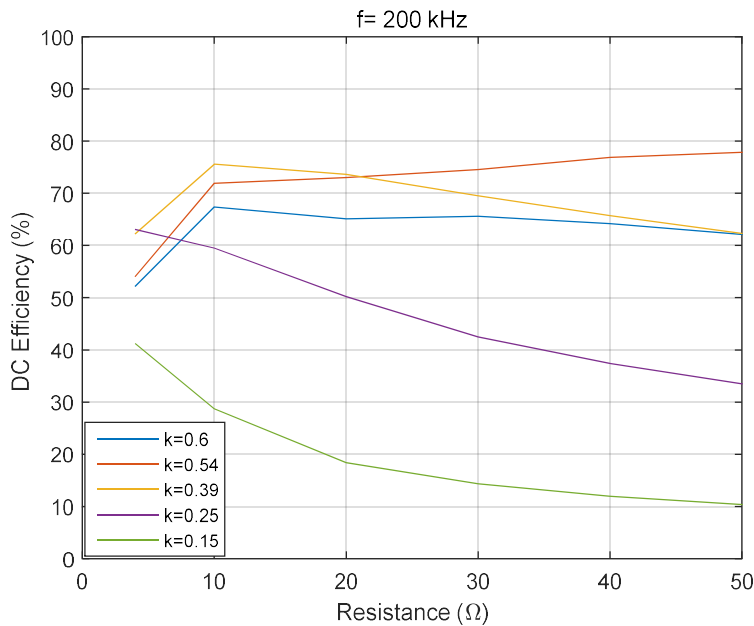
f=200 kHz:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.51: Απόδοση συστήματος η_{dc} (%) με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

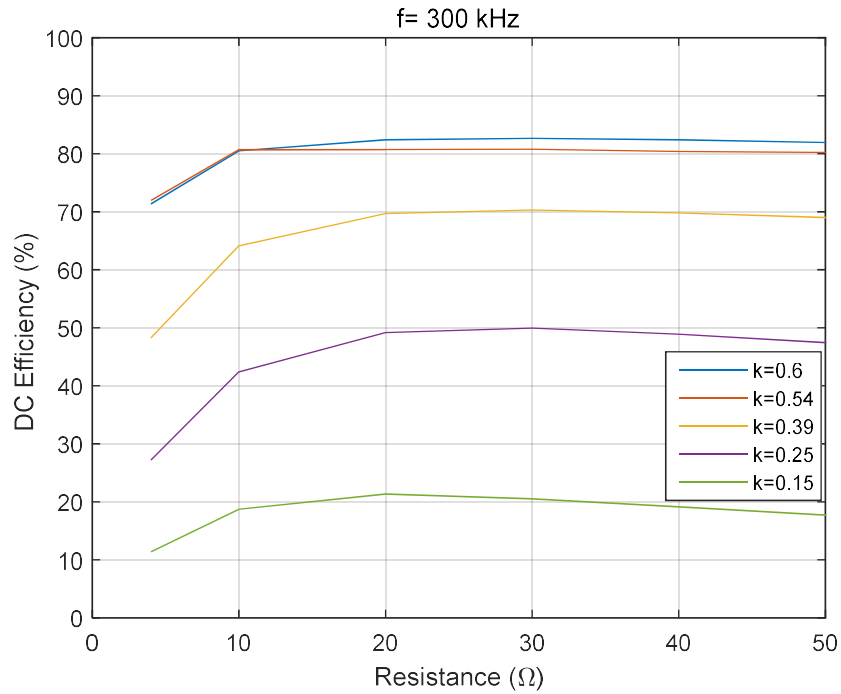
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.52: Απόδοση συστήματος η_{dc} (%) με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

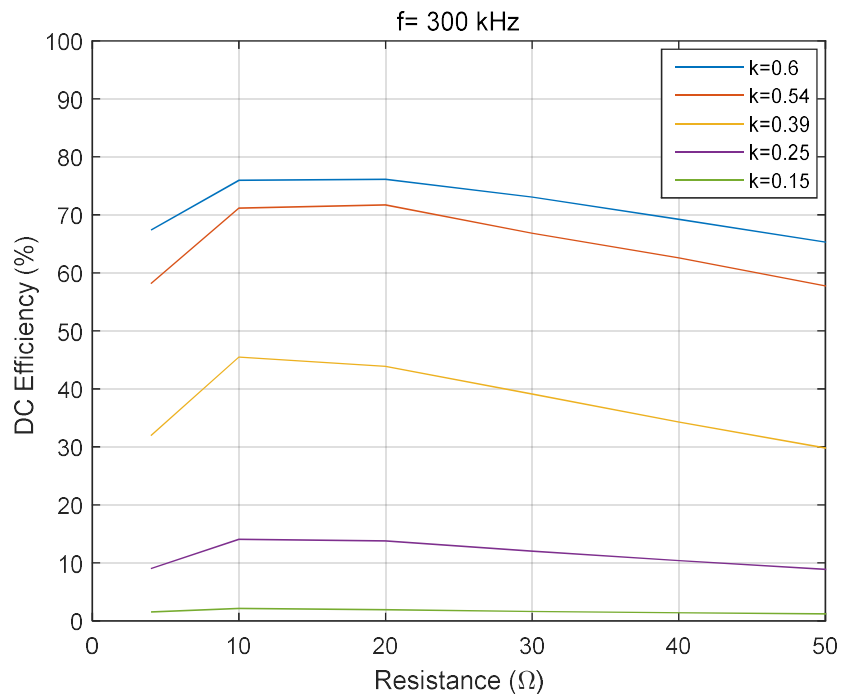
f=300 kHz:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.53: Απόδοση συστήματος η_{dc} (%) με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ενισχυτής κλάσης E:

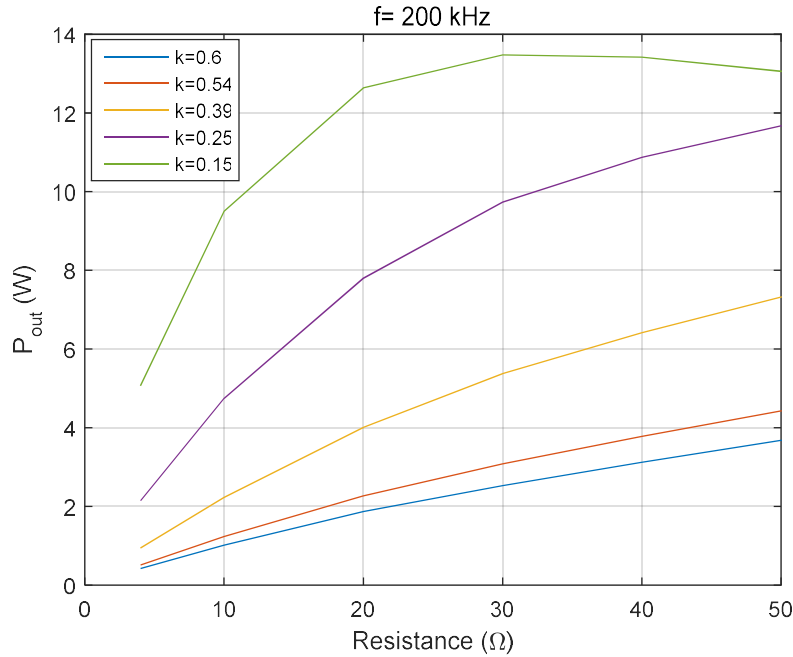


Σχήμα 6.54: Απόδοση συστήματος η_{dc} (%) με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ισχύς εξόδου (P_{out}):

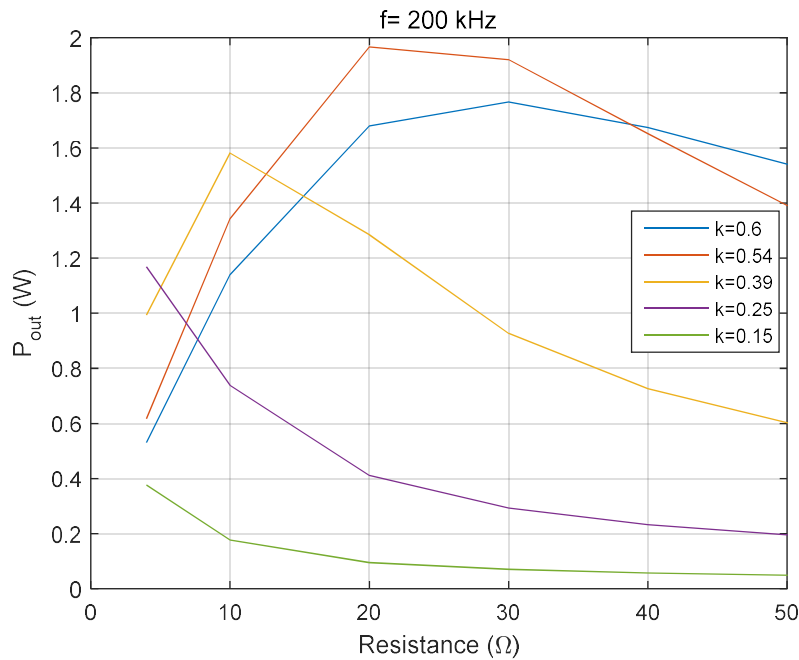
$f=200$ kHz:

Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.55: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

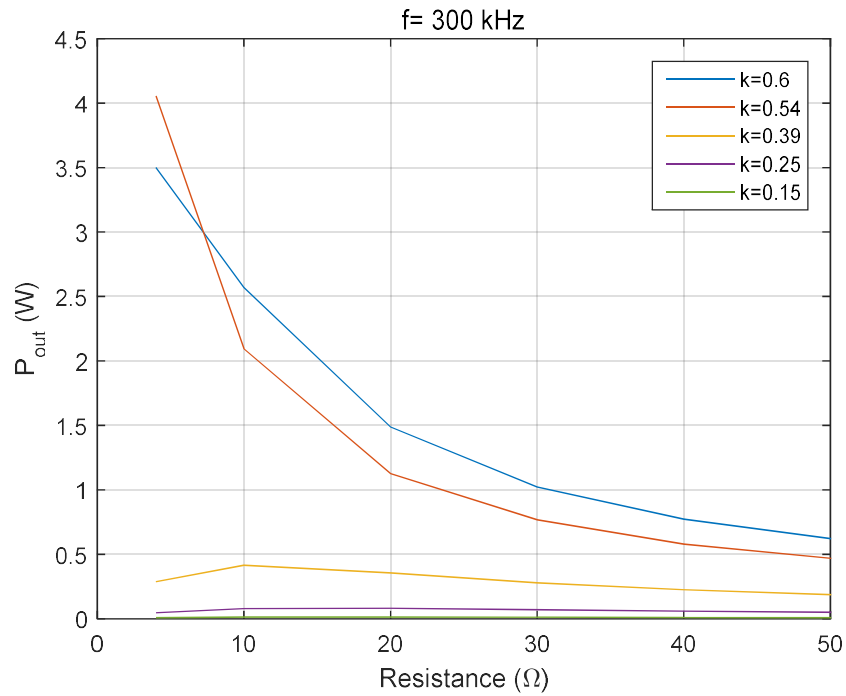
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.56: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

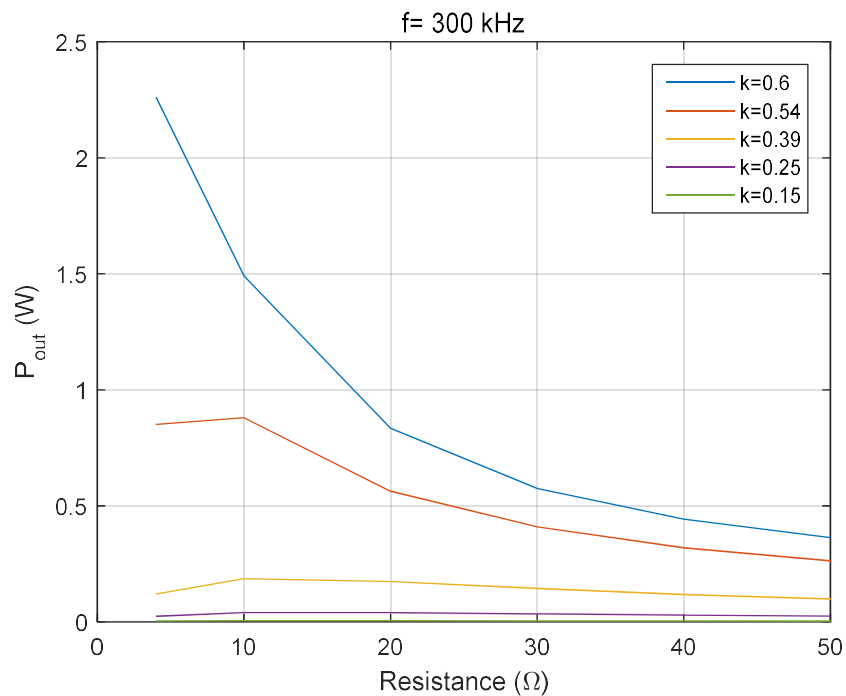
f=300 kHz:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.57: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ενισχυτής κλάσης E:

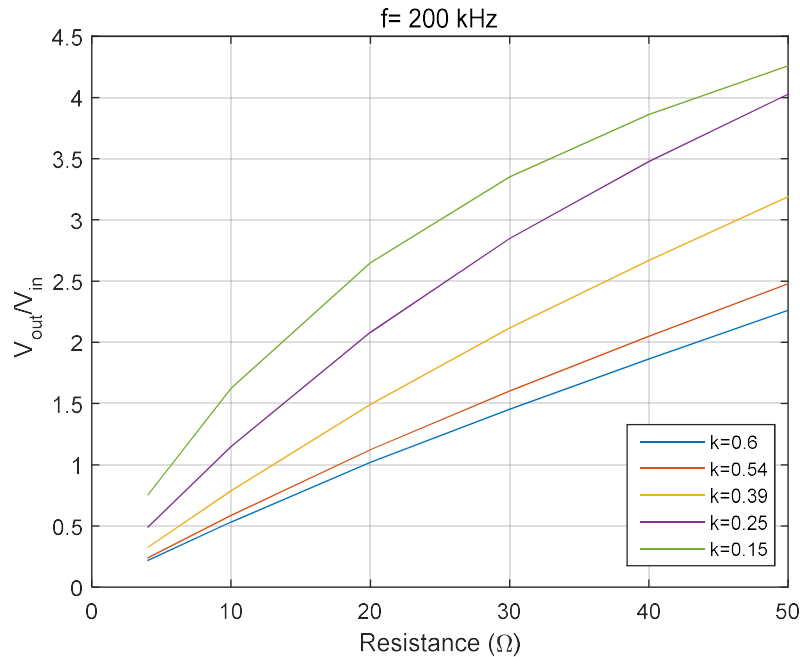


Σχήμα 6.58: Ισχύς εξόδου P_{out} (W) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Κέρδος Τάσης (V_{out}/V_{in}):

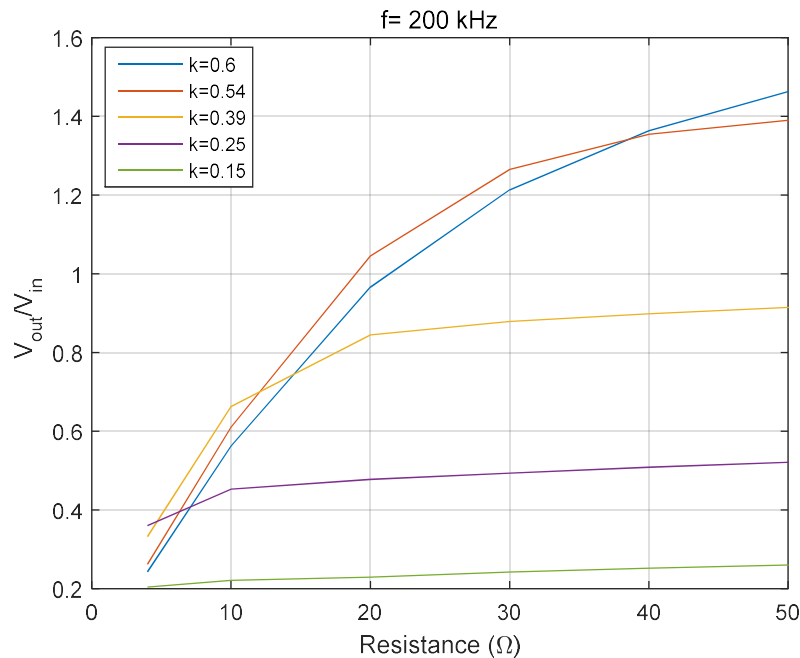
$f=200$ kHz:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.59: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

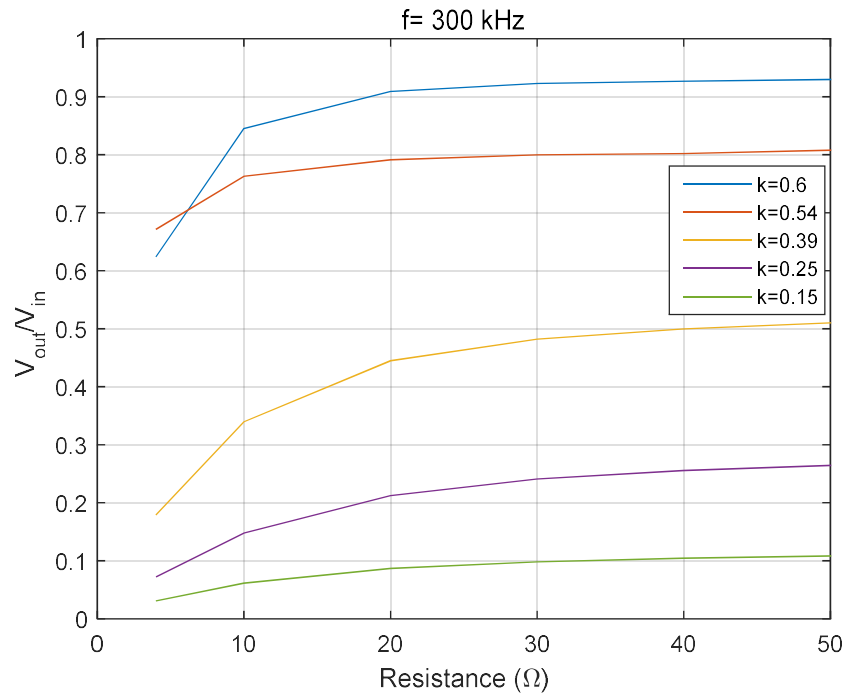
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.60: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

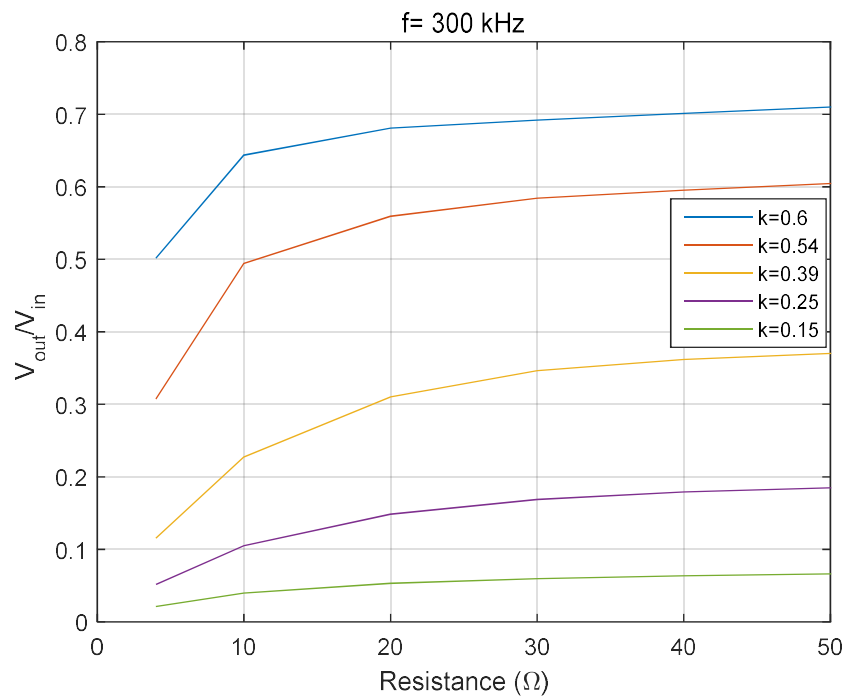
f=300 kHz:

Αντιστροφέας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.61: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ενισχυτής κλάσης E:

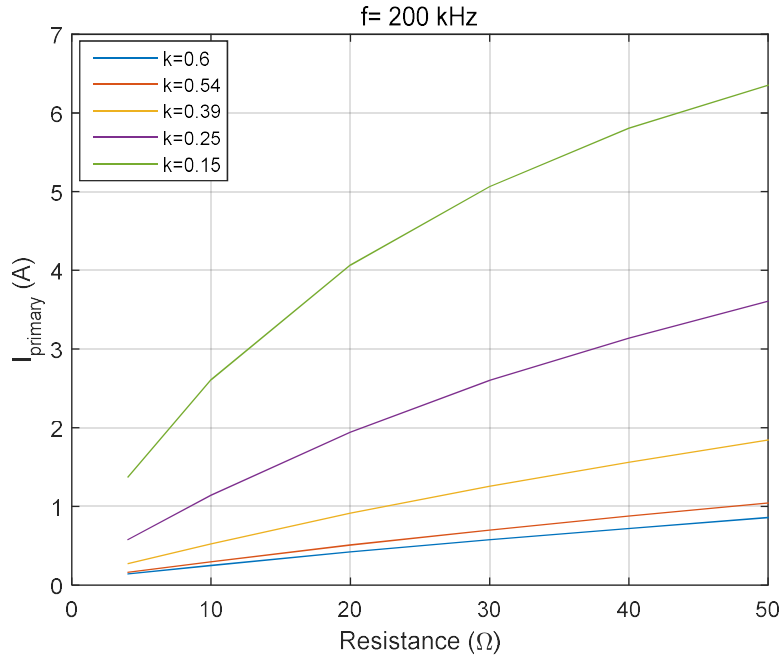


Σχήμα 6.62: Κέρδος τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ρεύμα πρωτεύοντος ($I_{primary}$):

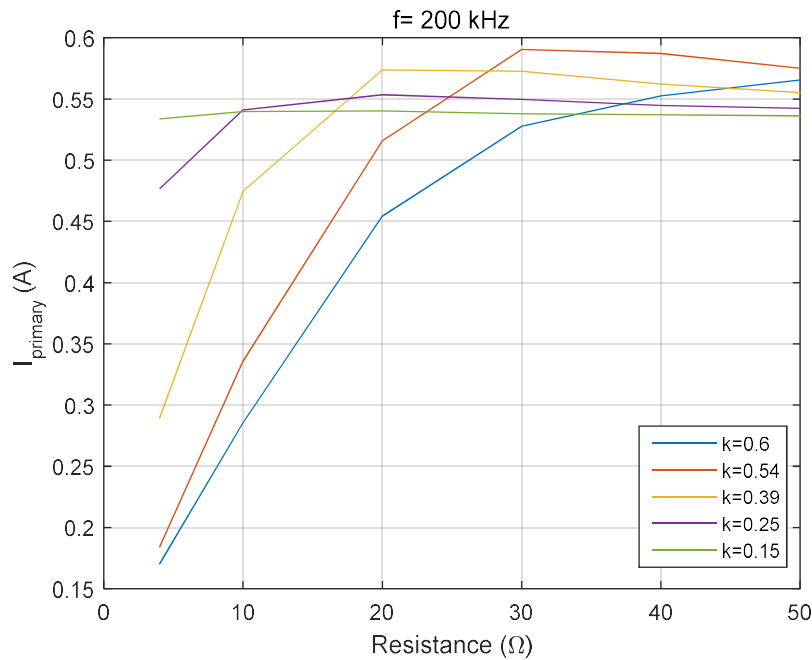
$f=200$ kHz:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.63: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

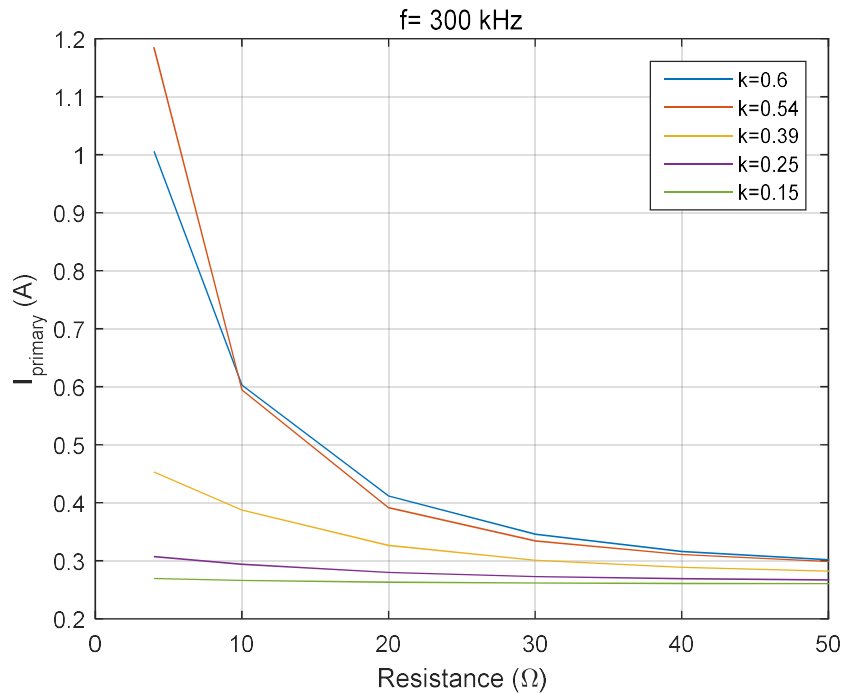
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.64: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

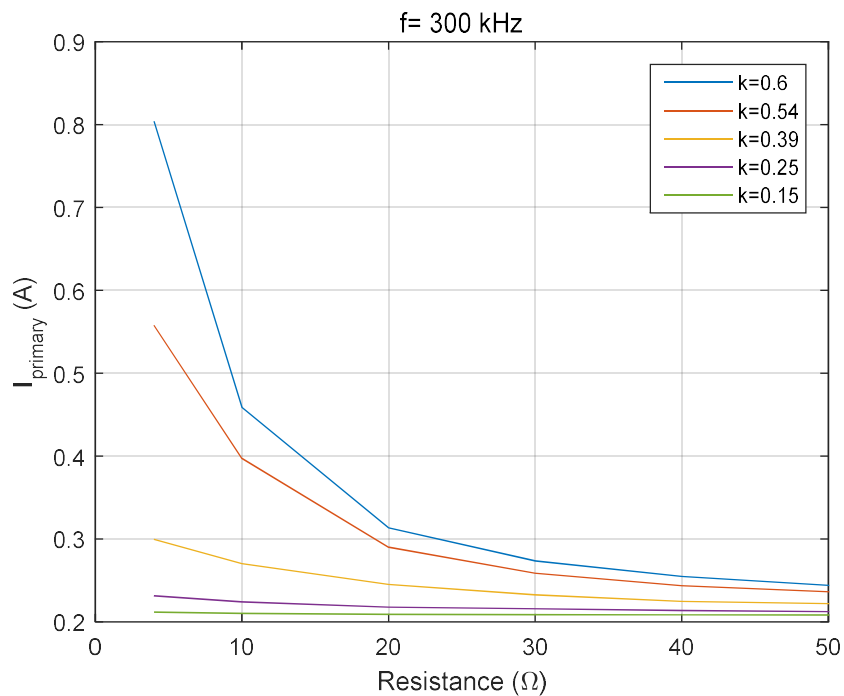
f=300 kHz:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.65: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ενισχυτής κλάσης E:

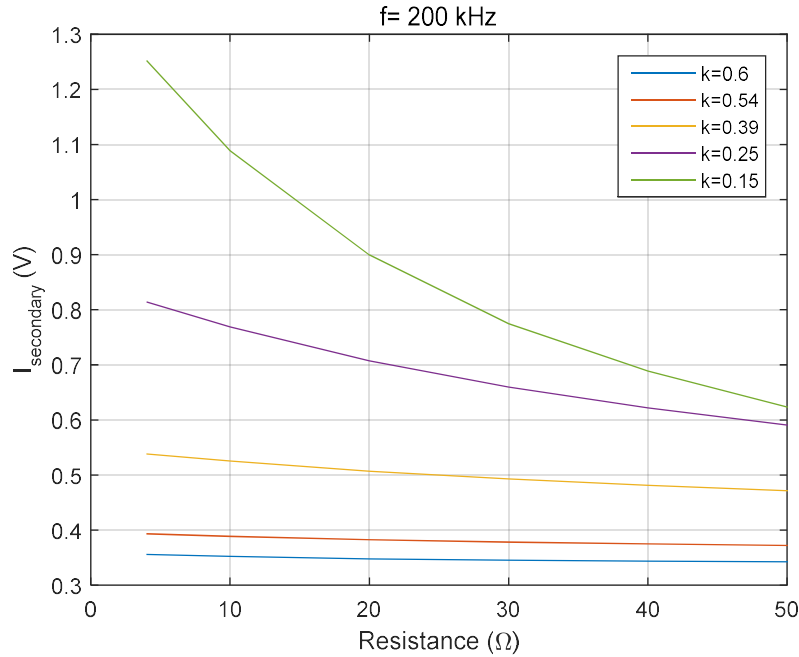


Σχήμα 6.66: Ρεύμα πρωτεύοντος $I_{primary}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ρεύμα δευτερεύοντος ($I_{\text{secondary}}$):

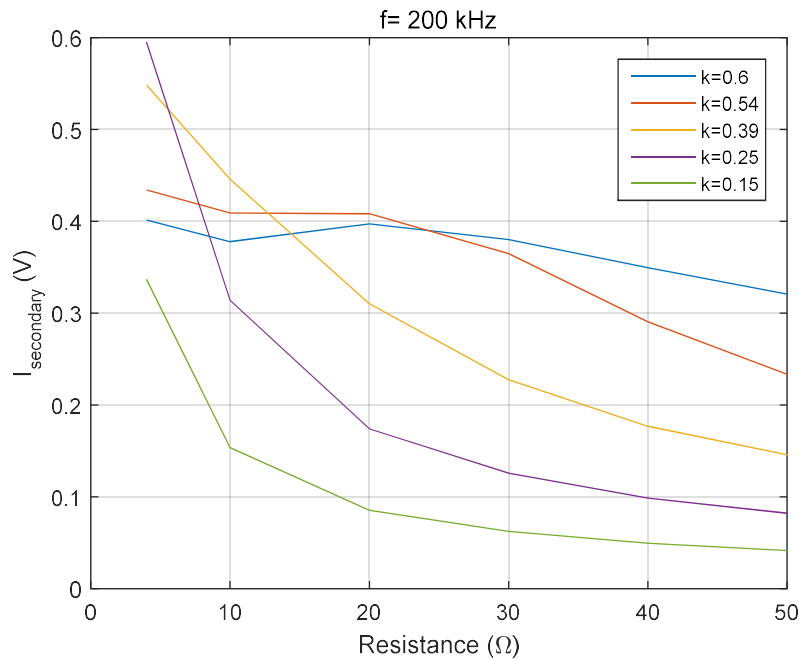
$f=200$ kHz:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.67: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{\text{secondary}}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

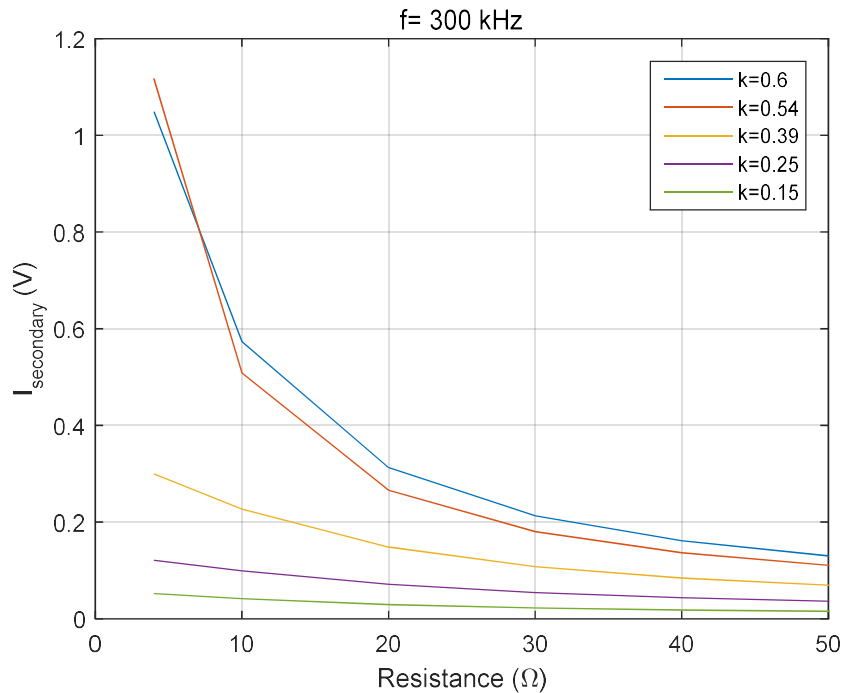
Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.68: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{\text{secondary}}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

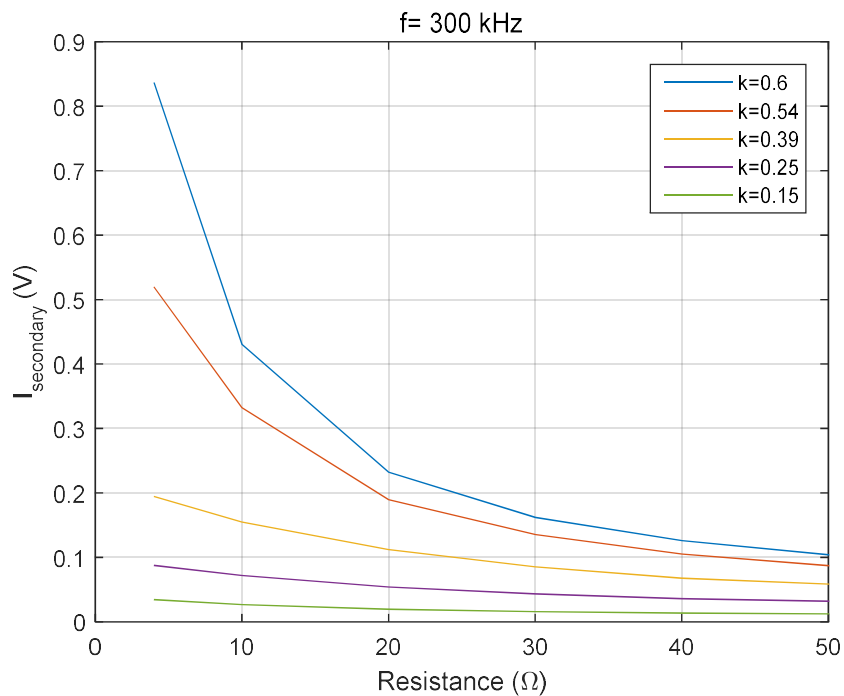
f=300 kHz:

Αντιστροφείας πλήρους γέφυρας:



Σχήμα 6.69: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{secondary}$ (A) συστήματος με αντιστροφή πλήρους γέφυρας υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Ενισχυτής κλάσης E:



Σχήμα 6.70: Ρεύμα δευτερεύοντος $I_{secondary}$ (A) συστήματος με ενισχυτή κλάσης E υπό μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σύζευξη, για σταθερή συχνότητα.

Από τα παραπάνω, για κάθε επιμέρους μέγεθος στις δύο συχνότητες, εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

DC-DC Απόδοση Συστήματος - η_{DC} (%):

Καθ' όλο το εύρος τιμών της αντίστασης φορτίου, η περίπτωση του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας στην συχνότητα συντονισμού παρουσιάζει μεγαλύτερη απόδοση από αυτή του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E, αγγίζοντας σε περιπτώσεις καλής σύζευξης τιμές μεγαλύτερες του 80 % και ελάχιστη παρατηρούμενη απόδοση σε περίπτωση ασθενούς σύζευξης κοντά στο 40 %. Από την άλλη μεριά, η περίπτωση του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E παρουσιάζει μεν ικανοποιητικές αποδόσεις μεταξύ 60 % - 80 %, αλλά σε περιπτώσεις πολύ ασθενούς σύζευξης η απόδοση αγγίζει το 10 %. Ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στην περίπτωση των 300 kHz με την χρήση και των δύο τοπολογιών.

Ισχύς Εξόδου - P_{out} (W):

Στη συχνότητα των 200 kHz, στην περίπτωση του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, λόγω συντονισμού παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές ισχύος εξόδου όσο μειώνεται ο συντελεστής σύζευξης ή όσο αυξάνεται η αντίσταση φορτίου, ενώ στην περίπτωση του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E, υψηλή ισχύς εξόδου εμφανίζεται για μεγάλες τιμές του συντελεστή σύζευξης και μειώνεται όσο η σύζευξη εξασθενεί. Η παρεχόμενη ισχύς από το σύστημα με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας είναι μεγαλύτερη από το αντίστοιχο με ενισχυτή κλάσης E. Στη συχνότητα των 300 kHz, και οι δύο περιπτώσεις εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, δηλαδή μεγαλύτερη ισχύ σε ισχυρότερη σύζευξη, με τις τιμές ισχύος όμως του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας να είναι σχεδόν διπλάσιες από τις αντίστοιχες του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E.

Κέρδος Τάσης - V_{out}/V_{in} :

Αντίστοιχα με την ισχύ εξόδου, το κέρδος τάσης στην συχνότητα των 200 kHz είναι μεγαλύτερο σε ασθενείς συζεύξεις στο σύστημα με την τοπολογία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, ενώ στο σύστημα με την τοπολογία του ενισχυτή κλάσης E είναι μεγαλύτερο στις ισχυρές. Και στις δύο περιπτώσεις, το κέρδος τάσης αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης φορτίου. Στην συχνότητα των 300kHz παρατηρείται και πάλι αύξηση της τιμής κέρδους τάσης με αύξηση της αντίστασης φορτίου και μεγαλύτερες τιμές αυτού σε συνθήκες ισχυρής σύζευξης. Σε κάθε συχνότητα λειτουργίας όμως και σε κάθε τιμή αντίστασης φορτίου και συντελεστή σύζευξης, η αντίστοιχη τιμή κέρδους του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E.

Ρεύμα πρωτεύοντος - $I_{primary}$ (A):

Και με τις δύο τοπολογίες, το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον του συστήματος αυξάνεται καθώς αυξάνεται η αντίσταση φορτίου ή μειώνεται ο συντελεστής σύζευξης, με την διαφορά όμως ότι στην περίπτωση του συστήματος με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας το ρεύμα μπορεί να λάβει πολύ υψηλές τιμές (μεγαλύτερες των 5 A), ενώ στην περίπτωση του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E η τιμή του ρεύματος αποκτά σχεδόν σταθερή τιμή όσο εξασθενεί η σύζευξη. Γενικά, τα ρεύματα του πρωτεύοντος τυλίγματος έχουν μικρότερη τιμή στο σύστημα με την τοπολογία ενισχυτή κλάσης E. Στην μεγαλύτερη συχνότητα λειτουργίας, το σύστημα έχει την ίδια συμπεριφορά και στις δύο περιπτώσεις, με την περίπτωση της χρήσης της τοπολογίας αντιστροφέα πλήρους γέφυρας να εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές ρεύματος στο πρωτεύον.

Ρεύμα δευτερεύοντος - $I_{secondary}$ (A):

Στην συχνότητα των 200 kHz, το ρεύμα δευτερεύοντος στο σύστημα με την τοπολογία πλήρους γέφυρας αποκτά αυξημένες τιμές όταν η σύζευξη δεν είναι ισχυρή, όμως με την αύξηση του συντελεστή σύζευξης παρατηρούνται μικρότερες τιμές. Στο σύστημα με την τοπολογία ενισχυτή

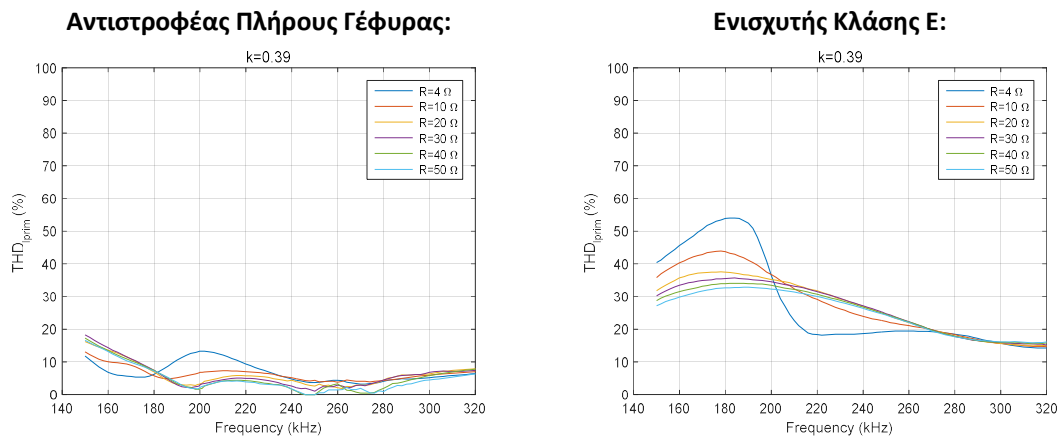
κλάσης E παρατηρούνται μειούμενες τιμές ρεύματος όσο η τιμή του συντελεστή σύζευξης μειώνεται και μικρότερες από τις αντίστοιχες που προκύπτουν στο σύστημα με τοπολογία πλήρους γέφυρας. Στα 300 kHz, το ρεύμα δευτερεύοντος ακολουθεί την ίδια μορφή και στις δύο περιπτώσεις, πάλι με τις τιμές του στο σύστημα με την τοπολογία γέφυρας να είναι λίγο πιο αυξημένες.

6.1.4: Αρμονική ανάλυση των ρευμάτων των τυλιγμάτων

Καθώς για την βέλτιστη μεταφορά ισχύος και με τις λιγότερες δυνατές απώλειες είναι επιθυμητό τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα να είναι ημιτονοειδούς μορφής και να μην εμπεριέχουν πολλές αρμονικές συνιστώσες, κρίνεται σκόπιμη η σύγκριση των συντελεστών Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (THD %) των ρευμάτων που διαρρέουν τα τυλίγματα του μελετώμενου συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος και για τις δύο τοπολογίες. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι συντελεστές Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης ρευμάτων για κάθε τοπολογία, σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας.

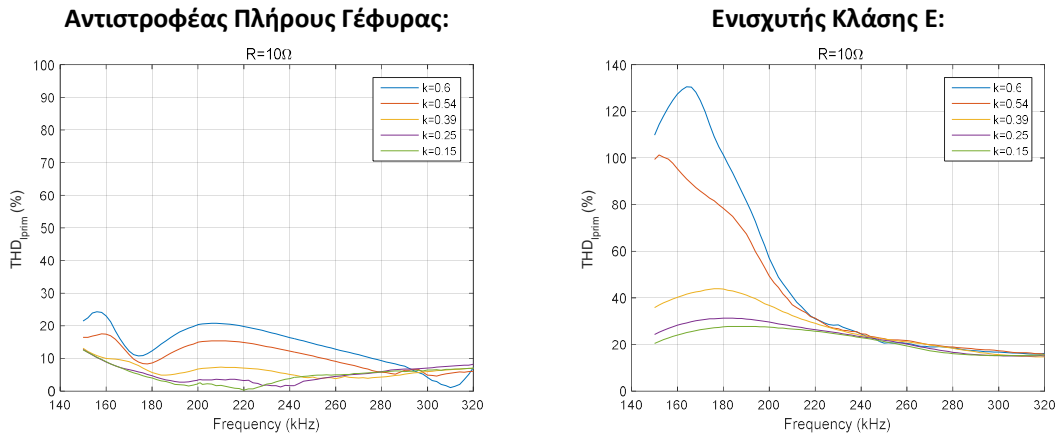
THD (%) Ρεύματος Πρωτεύοντος:

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R)– Σταθερός συντελεστής σύζευξης (k):



Σχήμα 6.71: THD (%) Ρεύματος πρωτεύοντος, συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

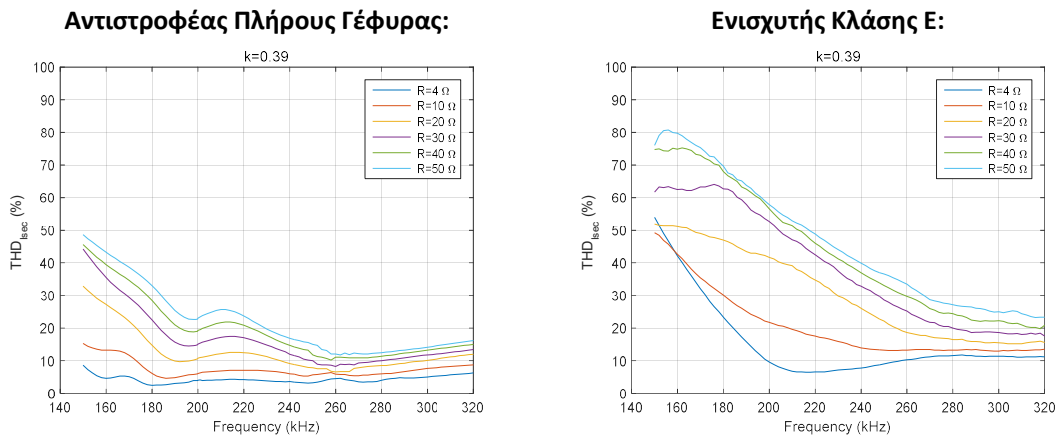
Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή αντίσταση φορτίου (R):



Σχήμα 6.72: THD (%) Ρεύματος πρωτεύοντος, συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

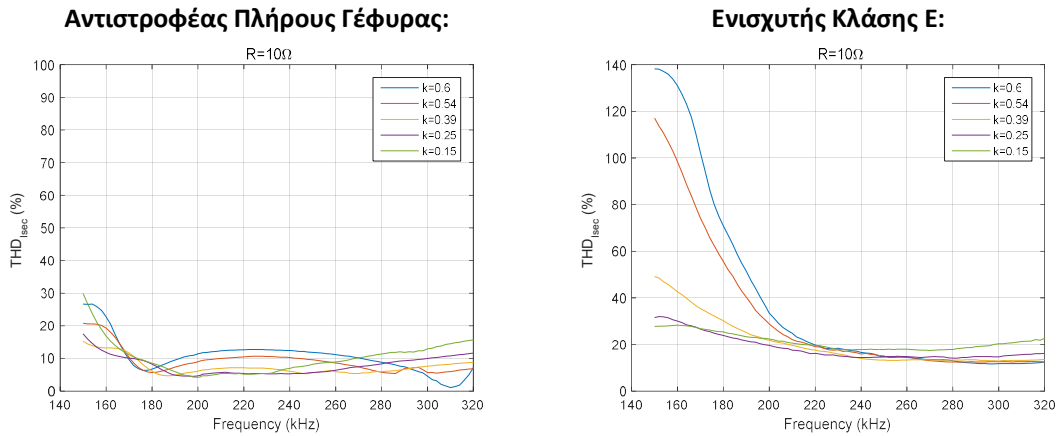
THD (%) Ρεύματος Δευτερεύοντος:

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R)– Σταθερός συντελεστής σύζευξης (k):



Σχήμα 6.73: THD (%) Ρεύματος δευτερεύοντος, συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή αντίσταση φορτίου (R):



Σχήμα 6.74: THD (%) Ρεύματος δευτερεύοντος, συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφή πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται πως η ύπαρξη περισσότερων παθητικών στοιχείων στην τοπολογία του ενισχυτή κλάσης E και η μη λειτουργία αυτού σε μία ακριβή συχνότητα συντονισμού, αλλά μεταβαλλόμενη ανάλογα με την αγωγή του διακόπτη του, προκαλούν τη δημιουργία αυξημένου αρμονικού περιεχομένου (τιμές THD μεγαλύτερες του 100 %), τόσο στο ρεύμα του πρωτεύοντος, όσο και του δευτερεύοντος. Το γεγονός αυτό εισάγει τόσο μεγάλη παραμόρφωση, ειδικά στις χαμηλότερες συχνότητες, που δικαιολογεί μέρος των μεγάλων απωλειών που παρατηρήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Από την άλλη μεριά, σε κάθε μελετώμενη περίπτωση, το σύστημα με την τοπολογία πλήρους γέφυρας παρουσιάζει συγκριτικά πολύ χαμηλότερες τιμές THD, με αξιοσημείωτη την παρατήρηση ότι στην περίπτωση του δευτερεύοντος, το THD του ρεύματος αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης φορτίου.

Η ύπαρξη μεγάλου πλήθους αρμονικών συνιστωσών είναι γενικά ανεπιθύμητη, ειδικά στην μεριά του δευτερεύοντος, καθώς μπορεί να προκληθεί αύξηση της θερμοκρασίας του εμφυτεύματος και των γύρω ιστών, καθώς και μείωση της απόδοσης του συστήματος.

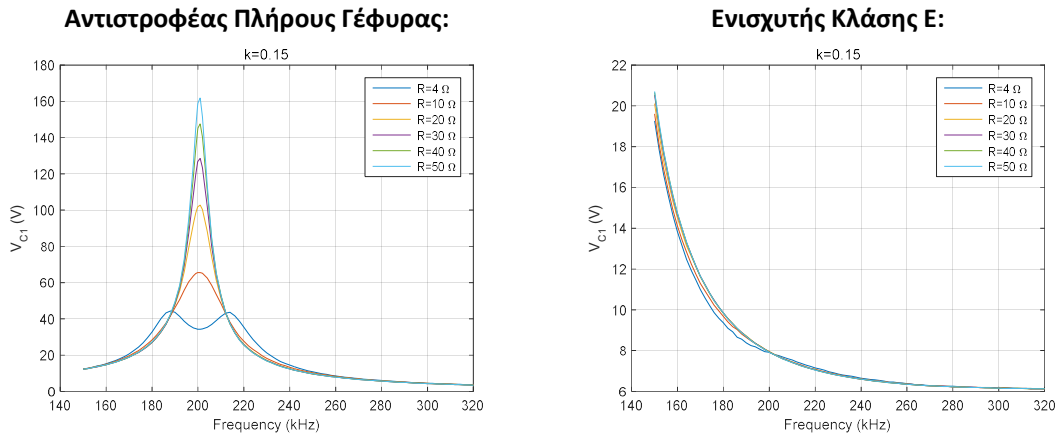
6.1.5: Περιοχή ασφαλούς λειτουργίας

Λόγω του ότι τα συστήματα αυτά λειτουργούν σε συνθήκες συντονισμού και σε ένα εύρος συχνοτήτων γύρω από τις συχνότητες συντονισμού, αναπτύσσονται τάσεις στα άκρα των συντονισμένων στοιχείων μεγάλης τιμής, που μεταβάλλονται ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, τον συντελεστή σύζευξης και την αντίσταση φορτίου. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη κατά τη σχεδίαση του συστήματος, η μελέτη της συμπεριφοράς της τάσης του κάθε συντονισμένου στοιχείου πέραν της ονομαστικής κατάστασης λειτουργίας, έτσι ώστε να αποφευχθούν πιθανές καταστροφές των εξαρτημάτων και ειδικότερα σε περίπτωση εμφυτεύματος, να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα μόνωσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τάσεις στα πηνία και στους πυκνωτές συντονισμού για κάθε μελετώμενη τοπολογία, σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, όπου αποκτούν τις μέγιστες τιμές τους:

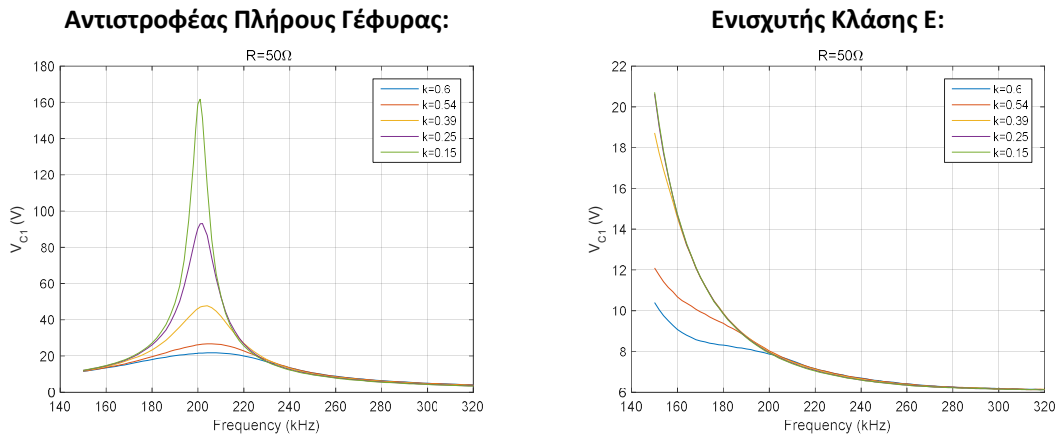
Τάση πυκνωτή συντονισμού πρωτεύοντος (V_{C1}):

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R)– Σταθερός συντελεστής σύζευξης (k):



Σχήμα 6.75: Τάση πυκνωτή συντονισμού πρωτεύοντος V_{C1} (V), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

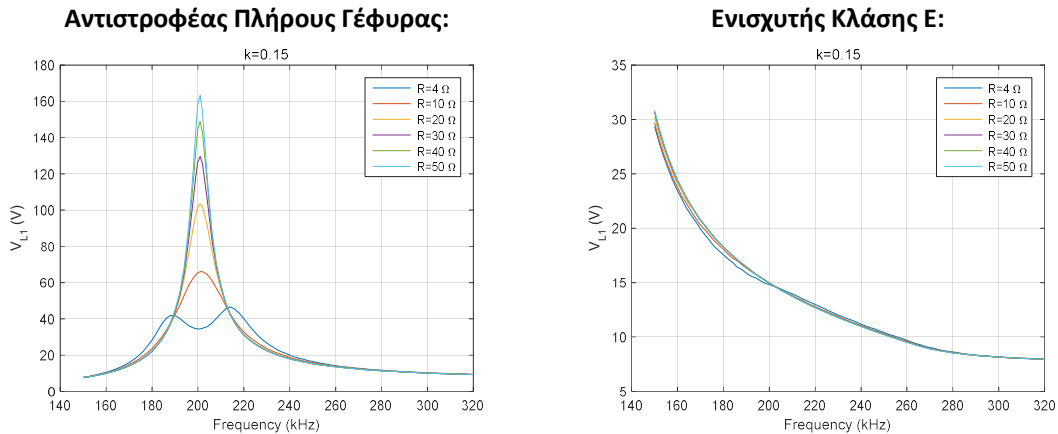
Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή αντίσταση φορτίου (R):



Σχήμα 6.76: Τάση πυκνωτή συντονισμού πρωτεύοντος V_{C1} (V), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

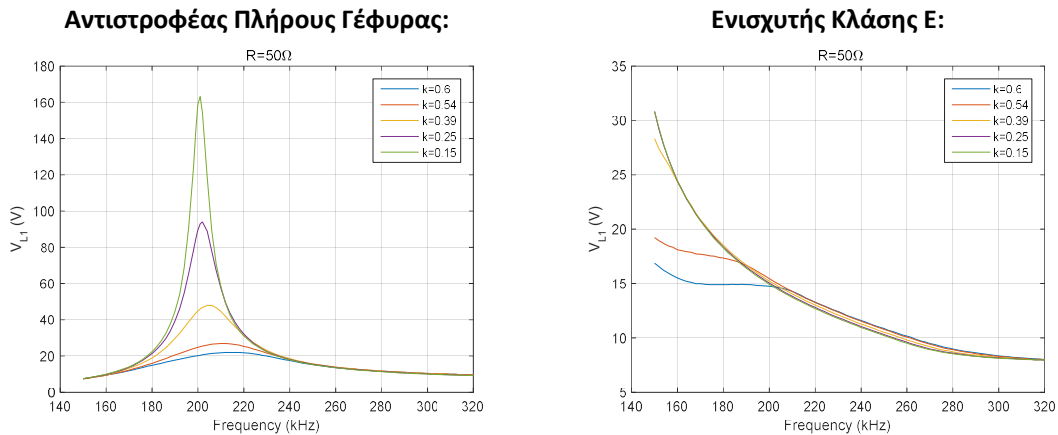
Τάση πηνίου πρωτεύοντος (V_{L1}):

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R)– Σταθερός συντελεστής σύζευξης (k):



Σχήμα 6.77: Τάση πηνίου πρωτεύοντος V_{L1} (V), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφή πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή αντίσταση φορτίου (R):



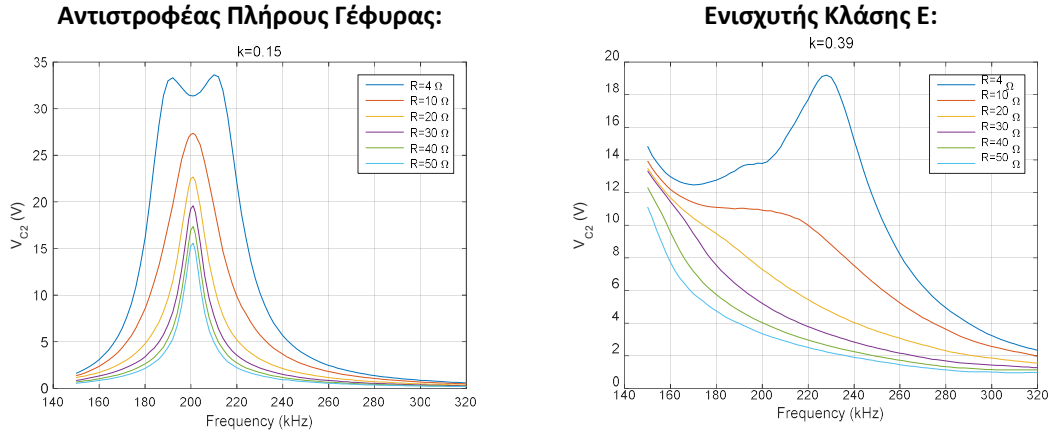
Σχήμα 6.78: Τάση πηνίου πρωτεύοντος (V_{L1}), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφή πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, γίνεται αντιληπτό το πόσο μεγάλης σημασίας είναι η σωστή διαστασιολόγηση των στοιχείων συντονισμού ώστε να αντέχουν στις επαγόμενες τάσεις στα άκρα τους. Ειδικά στην περίπτωση της πλήρους γέφυρας, καθώς λόγω συντονισμού στο πρωτεύον η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος πρωτεύοντος είναι μηδενική, ιδιαίτερα σε χαμηλές τιμές συντελεστή σύζευξης, η μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στα άκρα του πυκνωτή και του πηνίου πρωτεύοντος (στην περίπτωση μεγάλης αντίστασης φορτίου) είναι πολλές φορές μεγαλύτερη της τάσης τροφοδοσίας (160 V έναντι 6 V). Φυσικά, το φαινόμενο αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί, εξασφαλίζοντας λειτουργία του συστήματος σε όσο το δυνατόν καλύτερες συνθήκες σύζευξης. Από την άλλη μεριά, καθώς στην περίπτωση του συστήματος με τον ενισχυτή κλάσης E δεν υφίσταται συντονισμός του πρωτεύοντος σε μία συγκεκριμένη συχνότητα, η τάση

δεν λαμβάνει τόσο μεγάλες τιμές και παρατηρείται ότι οι τιμές της εξαρτώνται κυρίως από την συχνότητα λειτουργίας.

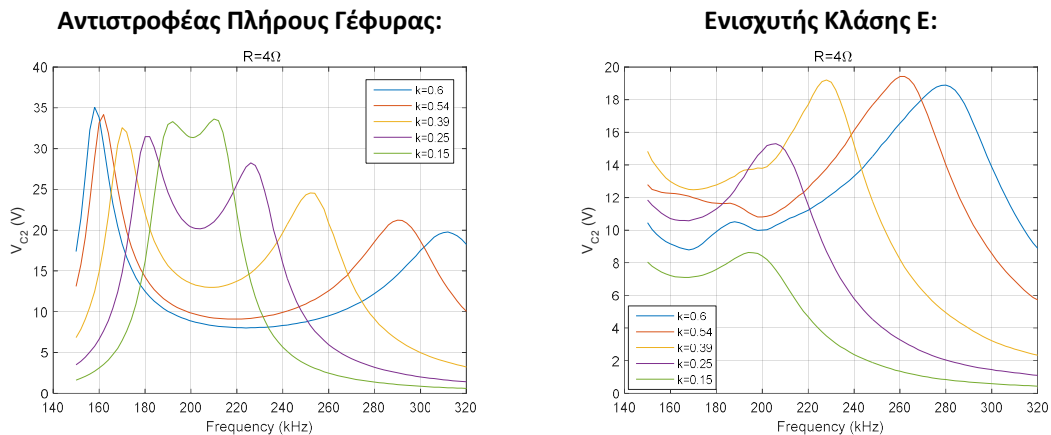
Τάση πυκνωτή συντονισμού πρωτεύοντος (V_{C2}):

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R)– Σταθερός συντελεστής σύζευξης (k):



Σχήμα 6.79: Τάση πυκνωτή συντονισμού δευτερεύοντος (V_{C2}), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφή πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

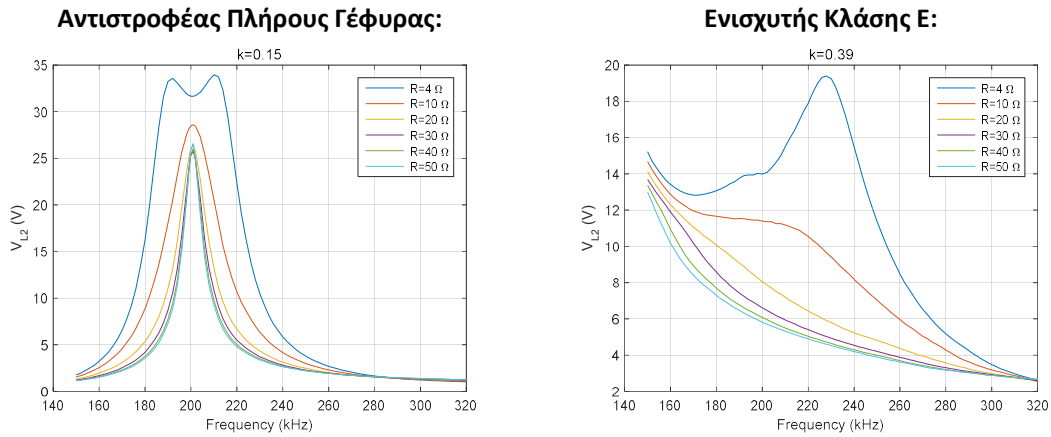
Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή αντίσταση φορτίου (R):



Σχήμα 6.80: Τάση πυκνωτή συντονισμού δευτερεύοντος (V_{C2}), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφή πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

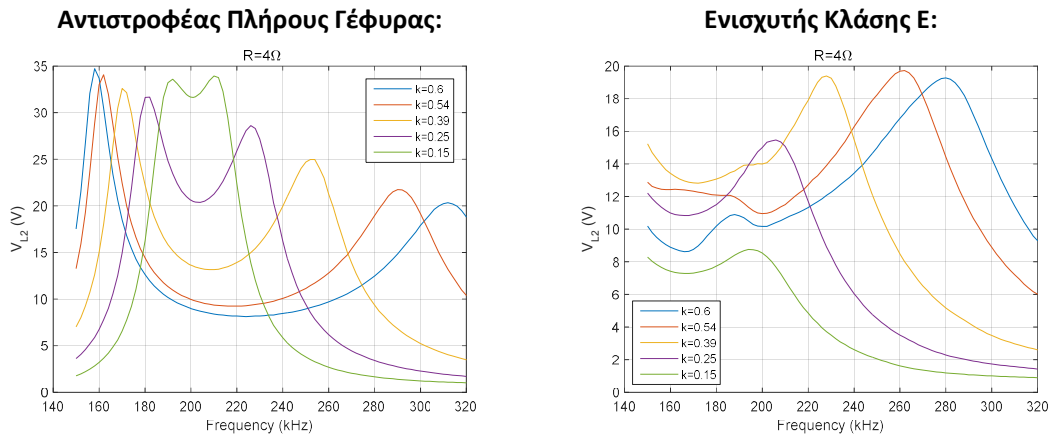
Τάση πηνίου δευτερεύοντος (V_{L2}):

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητή αντίσταση φορτίου (R)– Σταθερός συντελεστής σύζευξης (k):



Σχήμα 6.81: Τάση πηνίου δευτερεύοντος V_{L2} (V), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και αντίσταση φορτίου, για σταθερή σύζευξη, με αντιστροφή πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

Μεταβλητή συχνότητα λειτουργίας (f), μεταβλητός συντελεστής σύζευξης (k) – Σταθερή αντίσταση φορτίου (R):



Σχήμα 6.82: Τάση πηνίου δευτερεύοντος (V_{L2}), συστήματος υπό μεταβλητή συχνότητα και σύζευξη, για σταθερή αντίσταση φορτίου, με αντιστροφή πλήρους γέφυρας (αριστερά) και ενισχυτή κλάσης E (δεξιά).

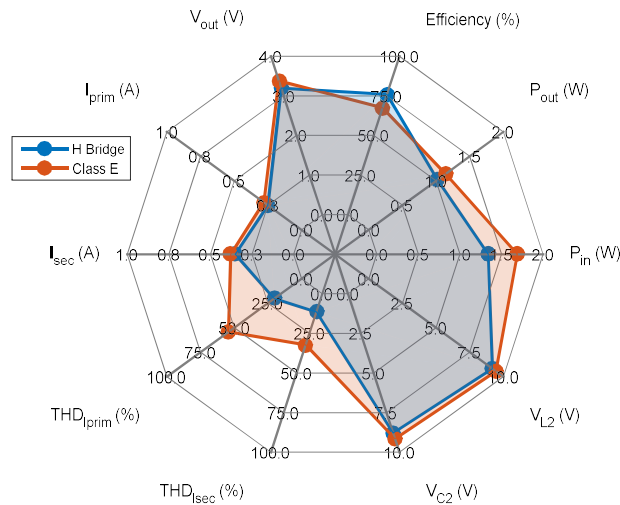
Στην περίπτωση του δευτερεύοντος, η τάση στα στοιχεία συντονισμού λαμβάνει χαμηλότερες τιμές, λόγω του ότι η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος δευτερεύοντος δεν μηδενίζεται. Παρ' όλα αυτά, ειδικά σε συνθήκες ασθενούς σύζευξης και χαμηλής τιμής αντίστασης φορτίου, η εμφανιζόμενη τάση στα άκρα των στοιχείων είναι αρκετά μεγάλη (έως 35 V στην τοπολογία πλήρους γέφυρας και έως 20 V στην τοπολογία ενισχυτή κλάσης E), ειδικά αν ληφθεί υπόψιν και το γεγονός ότι η πλευρά του δευτερεύοντος βρίσκεται εμφυτευμένη σε ασθενή και τάσεις τέτοιων τιμών μπορούν να αποβούν επιβλαβείς. Στην περίπτωση του συστήματος με ενισχυτή κλάσης E, η τάση στα στοιχεία συντονισμού εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά από την αντίστοιχη στα στοιχεία πρωτεύοντος και αυτό διότι, η πλευρά του δευτερεύοντος έρχεται σε συντονισμό σε συχνότητες κοντά στα 200 kHz.

Σε κάθε περίπτωση όμως, είναι εμφανές πως η διαστασιολόγηση των στοιχείων και η προστασία του συστήματος από την εμφάνιση τάσεων μεγάλων τιμών στα στοιχεία συντονισμού πρέπει να λαμβάνουν ειδική μέριμνα κατά την σχεδίαση ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης, πόσο μάλλον ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης με εφαρμογή σε βιολογικά εμφυτεύματα. Ένας τρόπος προστασίας και περιορισμού αυτών των τάσεων είναι η κατάλληλη μόνωση των στοιχείων, καθώς και η λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες ισχυρής σύζευξης.

Σύνοψη:

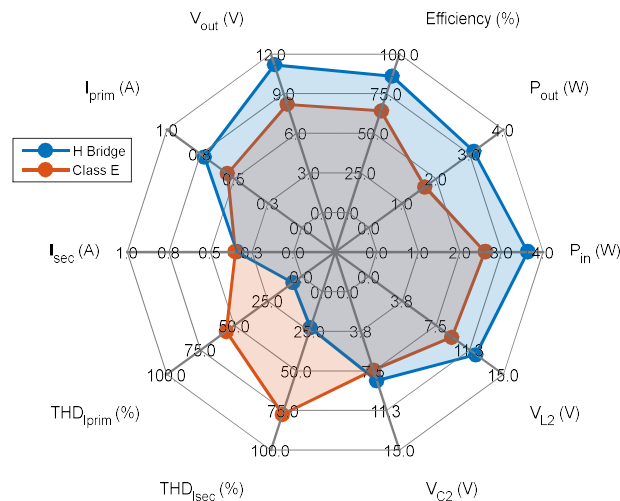
Προς μία γενικότερη σύγκριση των δύο τοπολογιών σε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος, στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται από κοινού όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη σε συχνότητα λειτουργίας ίση με 200 kHz και διαφορετικές τιμές αντίστασης φορτίου και καταστάσεις σύζευξης.

Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.6$, Αντίσταση φορτίου - $R=10 \Omega$:



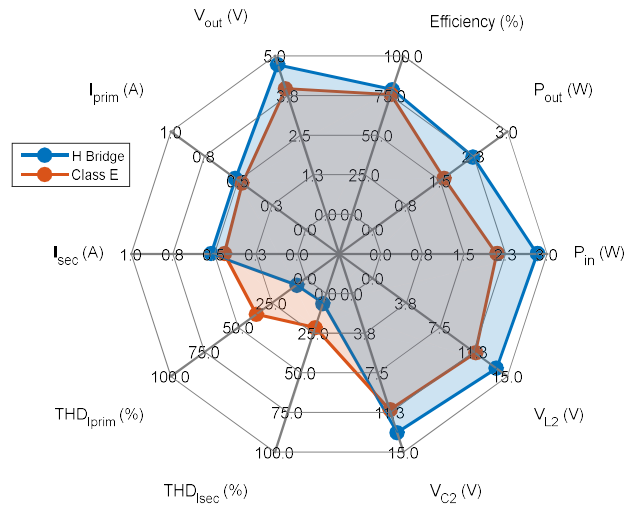
Σχήμα 6.83: Διάγραμμα σύγκρισης των δύο συστημάτων. $k=0.6$, $R=10 \Omega$.

Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.6$, Αντίσταση φορτίου - $R=40 \Omega$:



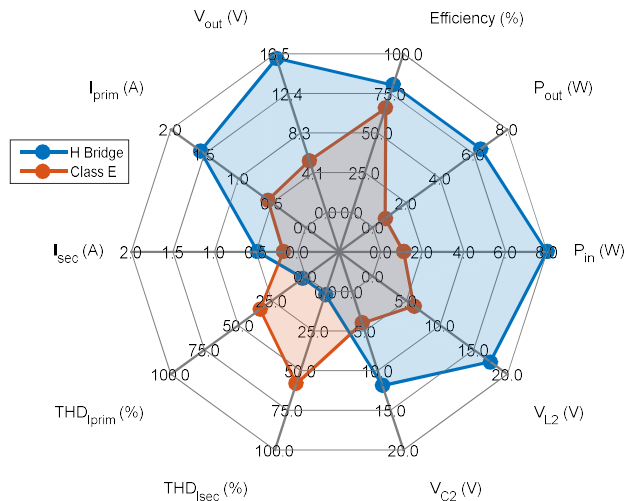
Σχήμα 6.84: Διάγραμμα σύγκρισης των δύο συστημάτων. $k=0.6$, $R=40 \Omega$.

Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.39$, Αντίσταση φορτίου - $R=10 \Omega$:



Σχήμα 6.85: Διάγραμμα σύγκρισης των δύο συστημάτων. $k=0.39$, $R=10 \Omega$.

Συντελεστής Σύζευξης - $k=0.39$, Αντίσταση φορτίου - $R=40 \Omega$:



Σχήμα 6.86: Διάγραμμα σύγκρισης των δύο συστημάτων. $k=0.39$, $R=40 \Omega$.

Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας όχι μόνο προσφέρει μεγαλύτερη ισχύ και τάση στην έξοδο του συστήματος επαγωγικής φόρτισης, αλλά το κάνει προσφέροντας καλύτερη συνολική απόδοση. Άξιο προσοχής είναι οι πολύ μεγάλες τιμές του συντελεστή Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης που εμφανίζουν τα ρεύματα σε πρωτεύον και δευτερεύον, στο σύστημα που κάνει χρήση του ενισχυτή κλάσης E.

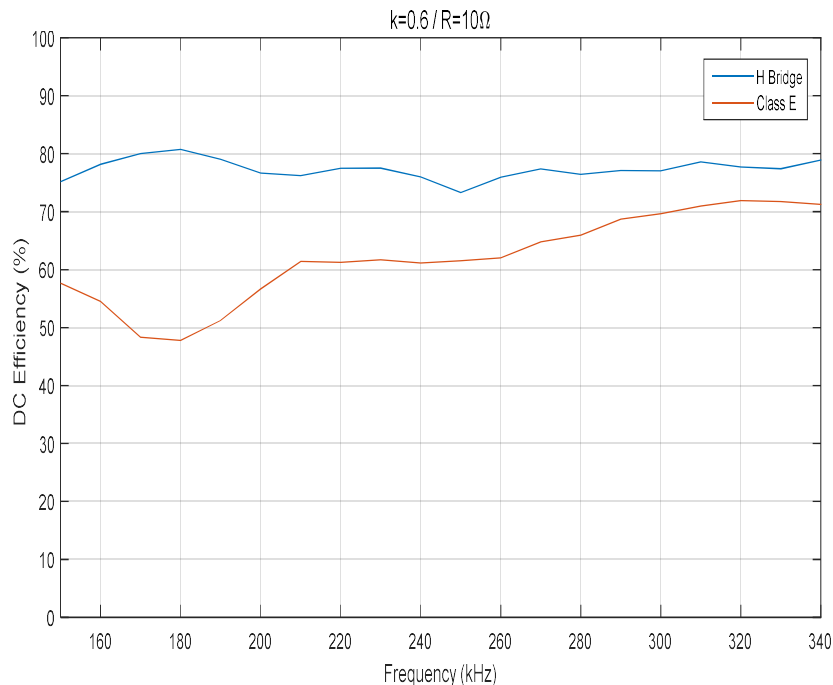
6.2: Αποτελέσματα Πειραμάτων

Υλοποιώντας στην πράξη ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος κάνοντας χρήση και των δύο συγκρινόμενων τοπολογιών οδήγησης, παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας υπήρξε πολύ μεγάλη συνάφεια των πειραματικών μετρήσεων με τις αντίστοιχες που ελήφθησαν μέσω προσομοιώσεων. Από την άλλη μεριά, για την περίπτωση του ενισχυτή κλάσης E, υπήρξε μεν συνάφεια, αλλά οι αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών μετρήσεων και μετρήσεων προσομοιώσεων ήταν αρκετά μεγαλύτερες. Αυτό οφείλεται στην πολύ μεγάλη ευαισθησία του ενισχυτή κλάσης E στην παραμικρή μετακίνηση των δύο συζευγμένων πηνίων, γεγονός που καθιστούσε την συμπεριφορά του πολύ ασταθή και την επίτευξη βέλτιστων συνθηκών ZVS δύσκολη.

Παρ' όλα αυτά, με τις μετρήσεις που ελήφθησαν στο εργαστήριο επιβεβαιώθηκαν όλα όσα παρατηρήθηκαν θεωρητικά, αλλά και μέσω των προσομοιώσεων, όπως η εμφάνιση του φαινομένου διακλάδωσης στην περίπτωση του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, και η εμφάνιση υψηλών τιμών τάσεων στον διακόπτη και όλες οι καταστάσεις λειτουργίας -βέλτιστης και μη- του διακόπτη του ενισχυτή κλάσης E.

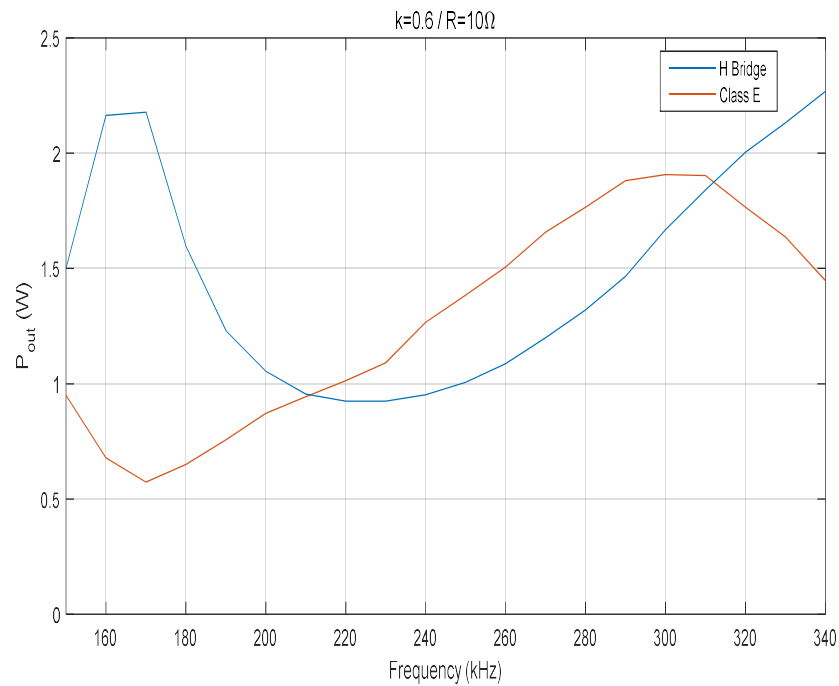
Στη συνέχεια, προς πραγματοποίηση σύγκρισης στις ίδιες συνθήκες, παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα κάθε φορά, η απόδοση, η ισχύς εξόδου και το κέρδος τάσης, για όλο το εύρος μελετώμενων συχνοτήτων σε συνθήκες βέλτιστης σύζευξης του συστήματος που κάνει χρήση του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και του ενισχυτή κλάσης E.

DC-DC Απόδοση Συστήματος (%):



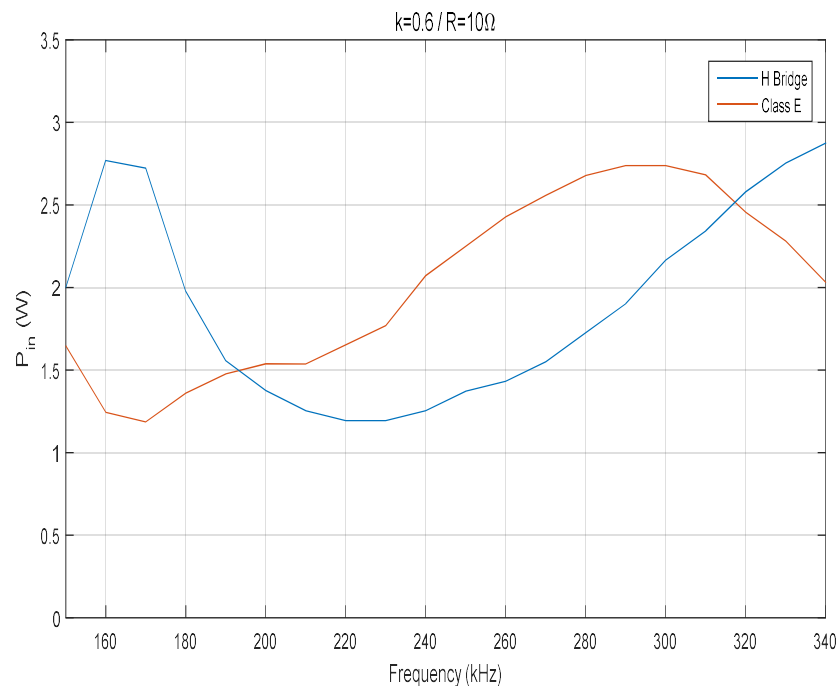
Σχήμα 6.87: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων απόδοσης συστήματος η_{DC} (%), με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (μπλε χρώμα) και ενισχυτή κλάσης E (κόκκινο χρώμα).

Ισχύς Εξόδου (P_{out}):



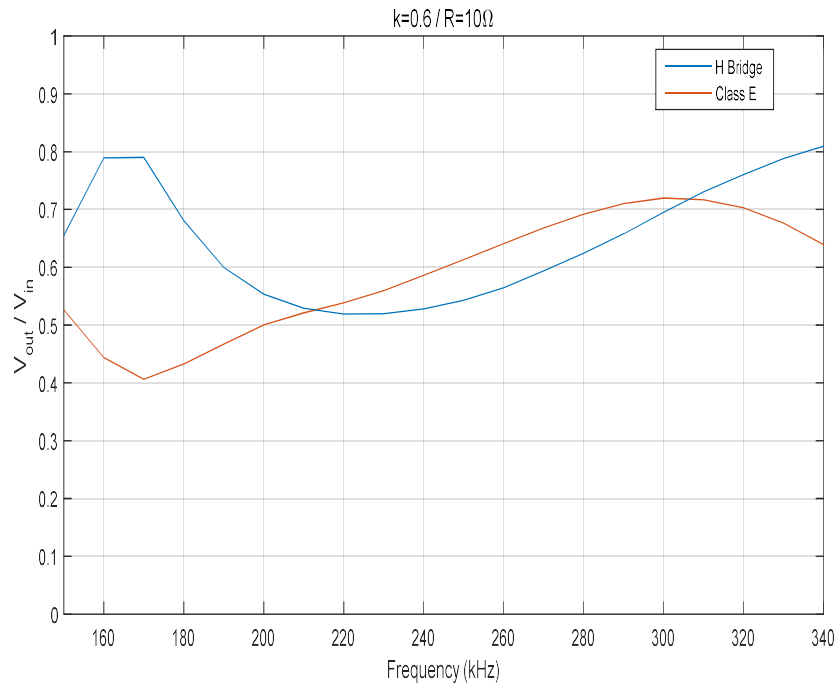
Σχήμα 6.88: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων ισχύος εξόδου P_{out} (W) συστήματος, με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (μπλε χρώμα) και ενισχυτή κλάσης E (κόκκινο χρώμα).

Ισχύς Εισόδου (P_{in}):



Σχήμα 6.89: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων ισχύος εισόδου P_{in} (W) συστήματος, με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (μπλε χρώμα) και ενισχυτή κλάσης E (κόκκινο χρώμα).

Κέρδος Τάσης:



Σχήμα 6.90: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων κέρδους τάσης V_{out}/V_{in} συστήματος, με χρήση αντιστροφέα πλήρους γέφυρας (μπλε χρώμα) και ενισχυτή κλάσης E (κόκκινο χρώμα).

Στις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, παρατηρείται ότι η διάταξη με τον ενισχυτή κλάσης E παρουσιάζει ελαφρώς μεγαλύτερη ισχύ και κέρδος τάσης στο εύρος συχνοτήτων 210 kHz – 310 kHz. Παρ' όλα αυτά, η διάταξη με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη απόδοση σε όλο το εύρος μελετώμενων συχνοτήτων.

6.3: Σύγκριση γενικών χαρακτηριστικών

Διευρύνοντας το πεδίο σύγκρισης των δύο τοπολογιών για τη χρήση τους σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης, παρακάτω συγκρίνονται σε σχέση με τέσσερις βασικούς άξονες: την ευκολία σχεδίασης και διαστασιολόγησης, την ανοχή των μεγεθών τους σε μεταβολές των βασικών παραμέτρων λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος (συχνότητα, αντίσταση φορτίου, συντελεστής σύζευξης), την ελεγχιμότητά τους, καθώς επίσης και τις πηγές απωλειών τους.

Ευκολία σχεδίασης:

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3.2.2, η σχεδίαση ενός ενισχυτή κλάσης E δεν αποτελεί μία ξεκάθαρα ορισμένη διαδικασία, καθώς στηρίζεται σε ποικίλες μαθηματικές εξισώσεις που σκοπό έχουν να εξασφαλίσουν λειτουργία υπό ZVS σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, εξισώσεις που ανάλογα την μέθοδο και την προσέγγιση μπορεί να αποδίδουν διαφορετικά αποτελέσματα. Η ήδη ιδιαίτερη διαδικασία σχεδίασης, αποκτά ακόμα μεγαλύτερο βαθμό ιδιαιτερότητας, όταν ο ενισχυτής κλάσης E καλείται να εφαρμοσθεί για την οδήγηση ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος. Σε αυτήν την περίπτωση, όπου μία αλλαγή στη συχνότητα λειτουργίας, στην τιμή αντίστασης φορτίου ή στον συντελεστή σύζευξης μπορεί να αλλάξει σημαντικά την ανακλώμενη σύνθετη αντίσταση στην πλευρά του πρωτεύοντος, δηλαδή την σύνθετη αντίσταση που «βλέπει» ο ενισχυτής κλάσης E, η ιδανική λειτουργία υπό ZVS είναι πιο δύσκολο να επιτευχθεί και ακόμα πιο δύσκολο να διατηρηθεί, καθώς η σχεδίαση του ενισχυτή κλάσης E είναι περισσότερο επιτεύξιμη σε συγκεκριμένες και εξ' αρχής καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας. Συν

τοις άλλους, καθώς το πηνίο στην είσοδο της διάταξης πρέπει να είναι μεγάλης τιμής αυτεπαγωγής ώστε να περιορίζει την κυμάτωση του ρεύματος, πρέπει να είναι και μεγάλο σε μέγεθος, γεγονός που αυξάνει τον όγκο του συστήματος.

Από την άλλη μεριά, ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας, καθώς δεν αποτελείται από παθητικά στοιχεία, αλλά μόνο από τέσσερις διακόπτες, είναι πολύ πιο εύκολο να υλοποιηθεί -και άμεσα- ανεξαρτήτως συνθηκών λειτουργίας, γεγονός που μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα σχεδίασης του συνολικού συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος.

Ανοχή μεγεθών σε μεταβολή παραμέτρων:

Από τις ποικίλες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων, παρατηρήθηκε ότι ο ενισχυτής κλάσης E δεν παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά σε μια μεταβολή των παραμέτρων λειτουργίας. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο ότι αφού είναι σχεδιασμένος για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, η λειτουργία σε οποιαδήποτε συνθήκη διαφορετική από την βέλτιστη, προκαλεί μειωμένες αποδόσεις και ασταθή συμπεριφορά, τόσο σε αυτόν όσο και στο σύστημα όπου εφαρμόζεται.

Επίσης, κάτι που παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, αλλά αναδείχθηκε στον πραγματικό του βαθμό κατά την πειραματική μελέτη, είναι η υπερευαισθησία του συστήματος που οδηγείται από ενισχυτή κλάσης E, στην μεταβολή του συντελεστή σύζευξης. Η απειροελάχιστη μετακίνηση της σχετικής θέσης των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος προκαλούσε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα μετρήσεων του ίδιου μεγέθους, κάτι που δεν παρατηρήθηκε κατά την πειραματική μελέτη της διάταξης που οδηγείται από αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

Συγκρίνοντας τις δύο τοπολογίες ως προς την σταθερότητα στην μεταβολή παραμέτρων του συστήματος, το σύστημα με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας παρουσίασε πολύ μεγαλύτερη ευστάθεια και αξιόπιστη συμπεριφορά, διατηρώντας ικανοποιητικές τιμές αποδόσεων ακόμα και σε περιπτώσεις ασθενούς σύζευξης.

Ελεγχιμότητα:

Ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης -και δη εμφυτευμάτων-, πρέπει να παρέχει τη δυνατότητα της ελεγχιμότητας, τόσο για την απόδοση της επιθυμητής τάσης στην μπαταρία, όσο και για την εξασφάλιση της λειτουργίας του σε μη επικίνδυνες για αυτό συνθήκες.

Όπως προέκυψε από το κεφάλαιο 4.3, και για τις δύο τοπολογίες οδήγησης έχουν εφαρμοσθεί αρκετές τεχνικές ελέγχου, όμως πιο συγκεκριμένα για την τοπολογία του ενισχυτή κλάσης E οι περισσότερες κάνουν χρήση περισσότερων παθητικών στοιχείων και δύσχρηστων διατάξεων, αυξάνοντας έτσι τον συνολικό βαθμό πολυπλοκότητας του συστήματος. Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση της τοπολογίας πλήρους γέφυρας υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων τεχνικών ελέγχου πιο εύκολων στη χρήση και στη διαχείριση, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν σταθερές επιδόσεις και αποδόσεις.

Συγκρίνοντας τις δύο τοπολογίες οδήγησης στο ίδιο σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος, με το ίδιο σύστημα ελέγχου, παρατηρήθηκε ότι και οι δύο ανταποκρίθηκαν στις μεταβολές των συνθηκών, με την τάση εξόδου να διατηρείται στα επιθυμητά επίπεδα. Σημειώνεται ότι η διάταξη με τον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας παρουσίασε μεγαλύτερη απόδοση από την αντίστοιχη με τον ενισχυτή κλάσης E, καθώς ο ενισχυτής κλάσης E μετέβαινε σε καταστάσεις μη βέλτιστης λειτουργίας, προκαλώντας την εμφάνιση μεγαλύτερων ποσοστών απωλειών.

Πηγές απωλειών συστήματος:

Σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης χαμηλών επιπέδων ισχύος, όπως είναι λογικό, τα ποσοστά απωλειών είναι περισσότερο εμφανή σε σχέση με μία εφαρμογή επαγωγικής φόρτισης υψηλής ισχύος (όπως πχ επαγωγική φόρτιση αυτοκινήτου).

Οι βασικές απώλειες που υφίστανται σε ένα τέτοιο σύστημα, ανεξαρτήτως της τοπολογίας οδήγησης που χρησιμοποιείται, περιλαμβάνουν:

- την πτώση τάσης των διόδων της ανόρθωσης στην πλευρά του δευτερεύοντος.
- τις ωμικές απώλειες και απώλειες θερμότητας λόγω των ισοδύναμων εσωτερικών αντιστάσεων των πυκνωτών και των πηνίων συντονισμού (ESR).
- τις απώλειες που προκαλούνται από τις επαγωγές σκέδασης των πηνίων, όταν το σύστημα δε λειτουργεί σε κατάσταση συντονισμού ώστε να τις εξουδετερώνει.
- τις απώλειες θερμότητας στα πηνία συντονισμού λόγω των αρμονικών συνιστωσών ρεύματος που εμφανίζονται.

Ως προς την βαθμίδα του αντιστροφέα υψηλής διακοπτικής συχνότητας, στη διάταξη αντιστροφή πλήρους γέφυρας, οι απώλειες που προκαλούνται αποδίδονται αποκλειστικά στα τέσσερα διακοπτικά του στοιχεία όταν αυτά λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες.

Από την άλλη μεριά, ο ενισχυτής κλάσης E μπορεί θεωρητικά να έχει μηδενικές απώλειες, αλλά όταν εφαρμόζεται σε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος, όπου η λειτουργία του σε βέλτιστες συνθήκες δεν δύναται να εξασφαλισθεί καθώς μπορούν να μεταβάλλονται διάφορες παράμετροι, εμφανίζει απώλειες που όπως αποδείχθηκε στα παραπάνω κεφάλαια λειτουργούν πολύ επιβαρυντικά στη συνολική απόδοση του συστήματος. Κατ' αρχήν, στα άκρα του διακόπτη αναπτύσσεται τάση πολλαπλάσια της τάσης τροφοδοσίας. Έτσι, μη λειτουργία σε συνθήκες ZVS προκαλεί μεταβάσεις του διακόπτη σε κατάσταση αγωγής με μεγάλη τάση στα άκρα του και μη μηδενικό ρεύμα, επιβαρύνοντας και το ίδιο το εξάρτημα, αλλά και την απόδοσή του. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.2.2, κατά τη λειτουργία σε μη βέλτιστες συνθήκες, η αντιπαράλληλη με το διακοπτικό στοιχείο διάδος μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής και καθώς η αντίσταση αγωγής της είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερη της αντίστασης αγωγής του διακόπτη, προκαλεί μεγάλα ποσοστά απωλειών. Άλλη σημαντική πηγή απωλειών αποτελούν οι αρμονικές συνιστώσες ρεύματος πρωτεύοντος που εμφανίζονται λόγω της λειτουργίας του ενισχυτή κλάσης E μεταξύ δύο συχνοτήτων συντονισμού, που προκύπτουν από τα δύο συντονισμένα LC κυκλώματα που εναλλάσσονται ανάλογα με την κατάσταση αγωγής του διακόπτη. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνουν οι πολύ υψηλές τιμές Συντελεστή Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας. Τέλος, δεν πρέπει να παραλείπονται οι ωμικές απώλειες στην εσωτερική αντίσταση του παράλληλου πυκνωτή, και ειδικότερα του πηνίου εισόδου της διάταξης, καθώς η τιμή αυτεπαγωγής του είναι υψηλή και είναι μεγάλο σε μέγεθος, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη τιμή εσωτερικής αντίστασης.

6.4: Τελική Πρόταση

Σε όλη την έκταση της παραπάνω μελέτης, πραγματοποιήθηκε μία ολοκληρωμένη σύγκριση των δύο τοπολογιών σε εφαρμογή επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων. Μελετήθηκε η συμπεριφορά και η επίδραση της κάθε τοπολογίας στο σύνολο του συστήματος, σε ένα ευρύ πεδίο συνθηκών λειτουργίας, σε διαφορετικές τιμές συχνοτήτων, αντιστάσεων φορτίου και συντελεστών σύζευξης, με σκοπό την διαπίστωση της πιο αποδοτικής και συμφέρουσας τοπολογίας για μια τέτοια εφαρμογή. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε τόσο σε επίπεδο προσομοιώσεων, όσο και σε επίπεδο πειραμάτων προς εξακρίβωση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης και περαιτέρω διερεύνηση της λειτουργίας τους σε πραγματικές συνθήκες.

Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, και με βάση την ανάλυση και την σύγκριση αυτών που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, διαπιστώνεται ότι η χρήση του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας ως τοπολογία οδήγησης ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων που κάνει χρήση της συγκεκριμένης τοπολογίας αντιστάθμισης (Σειρά – Σειρά), στην συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας και συντονισμού και στο ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων γύρω από αυτή, προσφέρει σημαντικότερα πλεονεκτήματα από ό,τι η χρήση τοπολογίας ενισχυτή κλάσης E.

Πιο συγκεκριμένα, συνοψίζοντας όλες τις μελετώμενες περιπτώσεις προκύπτουν τα εξής προτερήματα της χρήσης του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας έναντι του ενισχυτή κλάσης E:

- Αποδίδει μεγαλύτερα ποσά ισχύος στην έξοδο της διάταξης.
- Παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές απόδοσης και για περισσότερες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.
- Σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας, παρουσιάζει κατά κύριο λόγο μεγαλύτερη ευστάθεια των μεγεθών του και προσδίδει πιο προβλεπόμενη συμπεριφορά του συστήματος σε τέτοιες μεταβολές.
- Η σχεδιάσή του είναι απλή και καθορισμένη.
- Προσφέρει μεγαλύτερη ελεγχιμότητα με πολλές δοκιμασμένες τεχνικές ελέγχου που μπορούν να εφαρμοσθούν.
- Οι απώλειές του είναι κυρίως διακοπτικές, οι οποίες μπορούν να περιορισθούν με την κατάλληλη επιλογή ημιαγωγικών διακοπών νέας τεχνολογίας (SiC, GaN).

Συνεπώς, σχετικά με το γενικότερο πεδίο εφαρμογών των δύο τοπολογιών οδήγησης προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, για λόγους ελαχιστοποίησης των απωλειών, αλλά και από άποψη δυνατότητας παροχής ισχύος, υπερέχει ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας.
- Σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, αλλά σε πολύ υψηλές συχνότητες λειτουργίας της τάξης των MHz, υπερέχει ο ενισχυτής κλάσης E.
- Όπως προέκυψε από την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, αλλά σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας της τάξης των εκατοντάδων kHz, υπερέχει ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας.

6.5: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε μια σύγκριση δύο διαφορετικών τοπολογιών οδήγησης υψηλής διακοπτικής συχνότητας για εφαρμογή σε συστήματα ασύρματης φόρτισης μπαταρίας βιολογικών εμφυτευμάτων χαμηλής ισχύος σε συχνότητες της τάξης των 200 kHz, όπου αναδείχθηκε πως μεταξύ των δύο, καλύτερη λύση αποτελεί ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας. Το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο, όμως, παρουσιάζει πολλές δυνατότητες περαιτέρω έρευνας, σχεδιασμού και αξιολόγησης στοιχείων σε όλα τα επιμέρους τμήματα ενός τέτοιου συστήματος. Μερικά από τα σημαντικότερα είναι:

- Η μελέτη συστήματος επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων με χρήση τοπολογίας αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, κάνοντας χρήση ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων νέας γενιάς, όπως το Καρβίδιο του Πυριτίου (SiC) και το Νιτρίδιο του Γαλλίου (GaN) για την μελέτη της βελτίωσης ή μη της απόδοσής του.
- Η πραγματοποίηση παρόμοιας σύγκρισης των δύο τοπολογιών, ενδεχομένως με υλοποίηση διαφορετικής τοπολογίας αντιστάθμισης (πχ Σειρά - Παράλληλα) και σε υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας (της τάξης των MHz).
- Η τροποποίηση του συστήματος με σκοπό τη μείωση των στοιχείων που βρίσκονται στο εμφυτευμένο δευτερεύον. Ήδη γίνονται έρευνες [73], [74] όπου χρησιμοποιείται πυκνωτής αντιστάθμισης μόνο στην μεριά του πρωτεύοντος, για εφαρμογή σε σύστημα επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων.
- Η θερμική μελέτη της διάταξης και η πρόταση μεθόδων απαγωγής της θερμότητας από τα κυκλώματα του συστήματος και ιδιαίτερα από το κύκλωμα του δευτερεύοντος, προκειμένου να αποφευχθεί πιθανή αύξηση θερμοκρασίας στους ιστούς γύρω από την εμφυτεύσιμη συσκευή.
- Η ανάπτυξη κυκλώματος ελέγχου της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος προς επίτευξη συντονισμού χωρίς επικοινωνία με την πλευρά του δευτερεύοντος, αλλά αντλώντας πληροφορίες μέσω της συμπεριφοράς του ρεύματος και της τάσης πρωτεύοντος, προς μείωση της πολυπλοκότητας και του όγκου της εμφυτεύσιμης συσκευής. Παρεμφερές θέμα ερευνάται στην βιβλιογραφική πηγή [75].
- Η προσπάθεια βελτιστοποίησης της σχεδίασης και της επιλογής των κατάλληλων παθητικών στοιχείων του ενισχυτή κλάσης E μέσω σχετικών λογισμικών και η χρήση αυτών για την πραγματοποίηση ελέγχου (συχνότητας λειτουργίας ή εύρους λειτουργίας παλμού) ώστε να επιτυγχάνεται λειτουργία υπό ZVS σε μεγαλύτερο πλήθος περιπτώσεων.
- Η μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI).
Κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ισχύος, η παρεμβολή του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στα συστήματα του κοντινού περιβάλλοντος είναι μεγάλης σημασίας. Η παράμετρος αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά την επιλογή του εύρους συχνοτήτων λειτουργίας του συστήματος και κατά την κατασκευή και τοποθέτηση αυτού. Ειδικά για ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων, πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για την εξασφάλιση της λειτουργίας του χωρίς να υπάρχει η παραμικρή αλληλεπίδραση με γειτονικά συστήματα ή συσκευές.

Επίλογος

Μία συνηθισμένη πρακτική στα συστήματα επαγωγικής φόρτισης εμφυτεύσιμων συσκευών είναι η χρήση του ενισχυτή κλάσης E για την οδήγησή τους, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες και με χαμηλές απώλειες, λόγω της λειτουργίας του υπό συνθήκες ZVS. Όμως, η λειτουργία σε τέτοιες συνθήκες, δεν είναι εξασφαλισμένη σε κάθε μεταβολή των παραμέτρων του συστήματος.

Καθώς όμως νέα υλικά ημιαγωγών αναπτύσσονται (SiC, GaN) που παρουσιάζουν πολύ χαμηλές απώλειες ακόμα και στις υψηλές διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας που απαιτούνται από τα συστήματα επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων, δίνεται η δυνατότητα της εφαρμογής της τοπολογίας αντιστροφέα πλήρους γέφυρας ακόμα και σε τέτοιες εφαρμογές χαμηλής ισχύος. Ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας, αποτελεί μία πολύ αξιόπιστη τοπολογία με μεγάλη ελεγχιμότητα και καλές αποδόσεις που χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης μεγαλύτερων επιπέδων ισχύος.

Για τους παραπάνω λόγους, προέκυψε η ανάγκη της διερεύνησης που πραγματοποιείται μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ο στόχος αυτής είναι να αξιολογηθεί η δυνατότητα χρήσης της τοπολογίας αντιστροφέα πλήρους γέφυρας σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης χαμηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας λειτουργίας, και το κατά πόσο μπορεί να αντικαταστήσει την τοπολογία ενισχυτή κλάσης E σε τέτοιες εφαρμογές.

Πράγματι, με βάση την μελέτη της κάθε τοπολογίας σε ένα τέτοιο σύστημα και των αποτελεσμάτων της σύγκρισης που πραγματοποιήθηκε σε ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας παρουσιάζει πολύ καλή και σταθερή συμπεριφορά σε τέτοιες συνθήκες λειτουργίας και σε τέτοια επίπεδα ισχύος και μάλιστα καλύτερη και πιο σταθερή συμπεριφορά και από τον ενισχυτή κλάσης E στην πλειοψηφία των μελετώμενων περιπτώσεων.

Συνεπώς, με την κατάλληλη επιλογή των στοιχείων του συστήματος (όπως ημιαγωγικοί διακόπτες GaN, δίοδοι ανόρθωσης με χαμηλή πτώση τάσης και πυκνωτές και πηνία με χαμηλή εσωτερική αντίσταση) για την μείωση των απωλειών στο ελάχιστο δυνατό και με την εφαρμογή ενός κατάλληλου και αποδοτικού συστήματος ελέγχου, η τοπολογία του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας μπορεί να αποτελέσει μία λύση πολύ υψηλής απόδοσης σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης εμφυτευμάτων στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

- [1] “www.witricity.com.” .
- [2] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, “Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413–1452, 2016.
- [3] Ε. Γ. Γατή, “Επαγωγικός Φορτιστής Ηλεκτρικού Οχήματος,” Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ε.Μ.Π., 2012.
- [4] B. Peschiera, “Design and Implementation of a Fixed - Frequency Inductive Power Transfer System,” MSc Thesis, Canada, Concordia University, 2014.
- [5] M. Ibrahim, “Wireless Inductive Charging for Electrical Vehicles : Electromagnetic Modelling and Interoperability Analysis,” PhD Thesis, Université Paris-Sud, 2014.
- [6] Ε. Γ. Γατή, “Μελέτη , κατασκευή και έλεγχος συστημάτων επαγωγικής μεταφοράς ισχύος,” Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Ε.Μ.Π., 2016.
- [7] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, 4th ed. Elsevier Inc., 2018.
- [8] “DELPHI, Hybrid and Electric Vehicle Products, Delphi Wireless Charging System.”
- [9] “HaloIPT, Ltd. Fact Sheet, Wireless Charging Technology, The EV Industry’s most flexible charging solution, 2010.”
- [10] “<http://www.austin-insulators.com/radio/xfmr.html>.” .
- [11] “<https://www.apple.com/>.” .
- [12] A. Khaligh and S. Dusmez, “Comprehensive topological analysis of conductive and inductive charging solutions for plug-in electric vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 8, pp. 3475–3489, 2012.
- [13] Z. P. Srdjan Lukic, “Cutting the Cord,” *IEEE Electrification Magazine*, no. October, pp. 57–64, 2013.
- [14] C. Y. Huang, J. E. James, and G. A. Covic, “Design considerations for variable coupling lumped coil systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 2, pp. 680–689, 2015.
- [15] K. Agarwal, R. Jegadeesan, Y.-X. Guo, and N. V. Thakor, “Wireless Power Transfer Strategies for Implantable Bioelectronics: Methodological Review,” *IEEE Rev. Biomed. Eng.*, pp. 1–1, 2017.
- [16] J. S. Ho, A. J. Yeh, S. Kim, and A. S. Y. Poon, “Midfield Wireless Powering for Implantable Systems,” *Neural Computation, Neural Devices, and Neural Prosthesis*. pp. 313–334, 2014.
- [17] S. Aldaher and P. E. Division, “Design and Optimization of Switched-Mode Circuits for Inductive Links,” no. January, pp. 2010–2014, 2014.
- [18] X. X. Z. W. Tianjia Sun, *Wireless Power Transfer for Medical Microsystems*. 2013.

- [19] O. Knecht and J. W. Kolar, "Performance of Series-Compensated IPT Systems for High Power Transcutaneous Energy Transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, no. c, pp. 1–1, 2018.
- [20] A. Ben Amar, A. B. Kouki, and H. Cao, "Power approaches for implantable medical devices," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 11, pp. 28889–28914, 2015.
- [21] K. Bazaka and M. Jacob, *Implantable Devices: Issues and Challenges*, vol. 2, no. 1. 2012.
- [22] S. Rao and J. C. Chiao, "Body electric: Wireless power transfer for implant applications," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 54–64, 2015.
- [23] AdvaMed, "Successful Practices for Battery Powered Medical Devices."
- [24] K. N. Bocan and E. Sejdić, "Adaptive transcutaneous power transfer to implantable devices: A state of the art review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 3, 2016.
- [25] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "ICNIRP GUIDELINES for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz-100kHz)," *Health Phys.*, pp. 818–836, 2008.
- [26] G. Monti *et al.*, "EMC and EMI issues of WPT systems for wearable and implantable devices," *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 7, no. 1, pp. 67–77, 2018.
- [27] T. Sunohara, I. Laakso, A. Hirata, and T. Onishi, "Induced field and SAR in human body model due to wireless power transfer system with induction coupling," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, vol. 2014-Decem, pp. 449–452, 2014.
- [28] "Wireless Power Consortium." Ιστοσελίδα:" [Online]. Available: www.wirelesspowerconsortium.com.
- [29] "www.merger.powermatters.org." .
- [30] "www.airfuel.org." .
- [31] R. H. Freeburger, "The evolution of a Pacemaker," *SAE Tech. Pap.*, no. June, pp. 38–48, 1965.
- [32] S. Y. Lee, Y. C. Su, and C. J. Cheng, "A Near-Field Telemetry Device with Close-Loop Endocardial Stimulation for a Pacemaker," *2010 Int. Symp. Next-Generation Electron. ISNE 2010 - Conf. Progr.*, pp. 1–4, 2010.
- [33] J. D. Kim, C. Sun, and I. S. Suh, "A proposal on wireless power transfer for medical implantable applications based on reviews," *IEEE Wirel. Power Transf. Conf. 2014, IEEE WPTC 2014*, pp. 166–169, 2014.
- [34] "http://e-physics.teipir.gr/HN/physics1_files/RLC.pdf." .
- [35] Π. Αθανασόπουλος, "Επαγωγική Ζεύξη Ισχύος για Ενεργά Εμφυτεύσιμα Ιατροτεχνολογικά Προϊόντα," Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Katholieke Universiteit Leuven Dept. Elektrotechniek ESAT-MICAS, 2009.
- [36] W. Zhang and C. C. Mi, "Compensation topologies of high-power wireless power transfer

- systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 6, pp. 4768–4778, 2016.
- [37] V. Prasanth, "Wireless Power Transfer for e-Mobility," MSc Thesis, Delft, 2012.
- [38] W. Zhang, S.-C. Wong, K. T. Chi, 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," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2979–2990, 2014.
- [39] M. Schormans, V. Valente, and A. Demosthenous, "Practical Inductive Link Design for Biomedical Wireless Power Transfer: A Tutorial," *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. PP, pp. 1–19, 2018.
- [40] M. Iordache, A. Marinescu, I. Sîrbu, L. Mandache, D. Niculae, and L. Iordache, "New Aspects on the Frequency Splitting and Bifurcation Phenomena in Wireless Power Transfer Systems," no. 40, 2016.
- [41] M. Kosik, R. Fajtl, and J. Lettl, "Analysis of bifurcation in two-coil inductive power transfer," *2017 IEEE 18th Work. Control Model. Power Electron. COMPEL 2017*, 2017.
- [42] M. Kim, J. W. Lee, and B. K. Lee, "Practical Bifurcation Criteria Considering Inductive Power Pad Losses in Wireless Power Transfer Systems," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 173–181, 2017.
- [43] R. Bosshard, U. Badstubner, J. W. Kolar, and I. Stevanovic, "Comparative evaluation of control methods for Inductive Power Transfer," *2012 Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2012*, no. Icrera, 2012.
- [44] A. Laskovski, T. Dissanayake, and M. Yuce, "Wireless Power Technology for Biomedical Implants." 2009.
- [45] S. N. Manias, *Power Electronics and Motor Drive Systems*. 2017.
- [46] Σ. Ν. Μανιάς, *Καθηγητής Ε.Μ.Π. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, Αθήνα: Εκδόσεις Συμείων*, 2014.
- [47] W. P. Choi, W. C. Ho, X. Liu, and S. Y. R. Hui, "Comparative Study on Power Conversion Methods for Wireless Battery Charging Platform," *Proc. EPE-PEMC 2010 - 14th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, pp. 9–16, 2010.
- [48] C. Bossetti, "Design and Evaluation of a Transcutaneous Energy Transfer System," PhD Thesis, Duke University, 2009.
- [49] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class E-A New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Switching Power Amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 10, no. 3, pp. 168–176, 1975.
- [50] S. Aldhaher and P. E. Division, "Design and Optimization of Switched-Mode Circuits for Inductive Links," PhD Thesis, Cranfield University, 2014.
- [51] K. Peng and E. Santi, "Class E Resonant Inverter Optimized Design for High Frequency (MHz) Operation Using eGaN HEMTs," *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*,

- vol. 2015-May, no. May, pp. 2469–2473, 2015.
- [52] B. N. O. Sokal, “Class-E RF Power Amplifiers,” *Notes*, vol. 204, no. 204, pp. 9–20, 2001.
- [53] M. K. Kazimierczuk and K. Puczek, “Exact Analysis of Class E Tuned Power Amplifier at any Q and Switch Duty Cycle,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 149–159, 1987.
- [54] F. Raab, “Idealized Operation of the Class E Tuned Power Amplifier,” *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 24, no. 12, pp. 725–735, Dec. 1977.
- [55] O. S. Saadeh, Z. Dalalah, F. R. N. Zghoul, A. Abuelrub, and M. S. Saadeh, “A 500 kHz Silicon Carbide (SiC) Single Switch Class-E Inverter,” *Int. J. Electr. Electron. Eng. Telecommun.*, vol. 7, no. 3, pp. 103–107, 2018.
- [56] J. J. Casanova, Z. N. Low, and J. Lin, “Design and Optimization of a Class-E Amplifier for a Loosely Coupled Planar Wireless Power System,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 56, no. 11, pp. 830–834, 2009.
- [57] F. Corti, F. Grasso, A. Reatti, A. Ayachit, D. K. Saini, and M. K. Kazimierczuk, “Design of Class-E ZVS Inverter With Loosely-Coupled Transformer at Fixed Coupling Coefficient,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 1, pp. 5627–5632, 2016.
- [58] P. Troyk and Z. Hu, “Simplified Design Equations for Class-E Neural Prosthesis Transmitters,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 60, no. 5, pp. 1414–1421, 2013.
- [59] P. B. Green, “Class-E Power Amplifier Design for Wireless Power Transfer,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–51, 2018.
- [60] M. Fu, H. Yin, M. Liu, and C. Ma, “Loading and Power Control for a High-Efficiency Class E PA-Driven Megahertz WPT System,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 11, pp. 6867–6876, 2016.
- [61] S. Mutashar and M. Hannan, “Efficiency Improvement of Wireless Power Transmission for Bio-Implanted Devices,” *Int. J. Electr. Comput. Electron. Commun. Eng.*, vol. 7, no. 9, pp. 721–724, 2013.
- [62] S. Gnanasegaran *et al.*, “The Development of Wireless Power Transfer Technologies for Mobile Charging in Vehicles using Inductive Approach,” *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 143–149, 2018.
- [63] T. Nagashima, “Analysis and Design of Class-E Switching Circuits for Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems,” Diploma Thesis, Chiba University, 2015.
- [64] T. Nagashima, X. Wei, T. Kousaka, and H. Sekiya, “Bifurcation analysis of the class-E inverter for switching-pattern derivations,” *IEICE Commun. Express*, vol. 1, no. 1, pp. 33–39, 2012.
- [65] Y. Fang and M. H. Pong, “Multiple Harmonics Analysis for Variable Frequency Variable Duty-Cycle Controlled Inductive Power Transfer Systems,” *2018 IEEE PELS Work. Emerg. Technol. Wirel. Power Transf. Wow 2018*, 2018.

- [66] K. Yamaguchi and M. Ichijo, "Efficient Wireless Power Transfer – Resonance Does Not Imply High Efficiency," vol. 2, no. 2, pp. 3–6.
- [67] S. Nutwong, A. Sangswang, and S. Naetiladdanon, "Output Voltage Control of the SP topology IPT system using a Primary side Controller," *2016 13th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol. ECTI-CON 2016*, 2016.
- [68] K. Aditya and S. Williamson, "Linearization and control of series-series compensated inductive power transfer system based on extended describing function concept," *Energies*, vol. 9, no. 11, 2016.
- [69] M. K. Uddin, S. Mekhilef, and G. Ramasamy, "Compact Wireless IPT System Using a Modified Voltage-fed Multi-resonant Class EF2 Inverter," *J. Power Electron.*, vol. 18, no. 1, pp. 277–288, 2018.
- [70] S. Aldhaher, P. C. K. Luk, and J. F. Whidborne, "Tuning Class E Inverters Applied In Inductive Links Using Saturable Reactors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2969–2978, 2014.
- [71] S. H. Hwang, C. G. Kang, Y. H. Son, and B. J. Jang, "Software-Based Wireless Power Transfer Platform for Various Power Control Experiments," *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 7677–7689, 2015.
- [72] G. Wang, W. Liu, M. Sivaprakasam, and G. A. Kendir, "Design and analysis of an adaptive transcutaneous power telemetry for biomedical implants," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 52, no. 10, pp. 2109–2117, 2005.
- [73] E. Gati, S. Kokosis, N. Patsourakis, and S. Manias, "Analysis of primary-side series compensation of inductive chargers for biomedical implantable devices," no. MIS 5004934, pp. 2–5, 2019.
- [74] Y. Zhang, T. Kan, Z. Yan, Y. Mao, Z. Wu, and C. C. Mi, "Modeling and Analysis of Series-None Compensation for Wireless Power Transfer Systems with a Strong Coupling," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1209–1215, 2019.
- [75] K. Song, Z. Li, Z. Du, G. Wei, and C. Zhu, "Design for constant output voltage and current controllability of primary side controlled wireless power transfer system," *2017 IEEE PELS Work. Emerg. Technol. Wirel. Power Transf. WoW 2017*, 2017.

