Μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων ασύρματης μεταφοράς ισχύος σε μικροδίκτυα Σ.Τ.

Δ. Μπαρός[1], Κ. Γραβιάς[1], Δ. Βογλίτσης[1] και Ν. Παπανικολάου[1]
[1]Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών
e-mail: npapanik@ee.duth.gr

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της ενσωμάτωσης της ασύρματης μεταφοράς ισχύος (Wireless Power Transfer - WPT) στα μικροδίκτυα συνεχούς τάσης, ως μέσο αύξησης της αξιοπιστίας τους και περιορισμού της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης. Σε αυτό το πλαίσιο, μελετάται η περίπτωση του συστήματος WPT με αντιστάθμιση σειράς-σειράς (SS-WPT) ως διασυνδετικό μέσο διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής με το κυρίως μικροδίκτυο Σ.Τ. Δεδομένου ότι τα μικροδίκτυα Σ.Τ. απαντώνται σε εξηλεκτρισμένα μέσα μεταφοράς, η μελέτη εστιάζει σε δύο επίπεδα συνεχούς τάσης, ήτοι στο υψηλό επίπεδο των $270V_{dc}$ και στο χαμηλό επίπεδο των $28V_{dc}$, τα οποία είναι σύμφωνα με τα σχετικά αεροπορικά πρότυπα. Σημαντικό αποτέλεσμα της εργασίας είναι η ανάδειξη της δυνατότητας της συγκεκριμένης τοπολογίας WPT να μεταφέρει σταθερή ισχύ στον ζυγό Σ.Τ. του μικροδικτύου, συμβάλλοντας έτσι στην ευστάθεια του συνολικού συστήματος. Η συμπεριφορά σταθερής μεταφερόμενης ισχύος μελετάται διεξοδικά για μια σειρά παραμέτρων του συστήματος, ενώ πραγματοποιούνται εκτεταμένες πειραματικές δοκιμές και μετρήσεις και για τα δύο επίπεδα Σ.Τ. Επιπρόσθετα, η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος μελετάται μέσω πειραματικών μετρήσεων και καταμερίζονται οι απώλειες ισχύος στις βασικές μονάδες της διάταξης. Τα αποτελέσματα της εργασίας επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα επιτυχούς ενσωμάτωσης των συστημάτων WPT στα μικροδίκτυα Σ.Τ.

Λέξεις-Κλειδιά: Αρμονική ανάλυση, Ασύρματη μεταφορά ισχύος, Μικροδίκτυα Σ.Τ.

Abstract

The aim of this paper is to study the incorporation of the Wireless Power Transfer (WPT) into DC microgrids, by means of increasing the system reliability and reducing the installation complexity. In this context, the case of Series-Series (SS) compensated WPT system is studied, in order to interconnect distributed energy sources to the main DC bus of the microgrid. Taking into account that the DC microgrids are commonly used in electrified means of transportation, emphasis is given on the low-voltage (LVDC) and high-voltage (HVDC) DC buses, which are $28V_{dc}$ and $270V_{dc}$ respectively, in accordance with the aeronautical standards. Significant results of this work highlight the ability of Constant Power Generation (CPG) behavior of the proposed system when transferring power to the DC bus, contributing to the stability of the total system. The CPG behavior is thoroughly studied for various system parameters values. Furthermore, the efficiency of the proposed system is studied through experimental measurements and the power losses are distributed to the basic units of the topology. The results of this paper validate the effective incorporation of WPT systems into DC microgrids.

Keywords: DC Microgrids, harmonic analysis, wireless power transfer

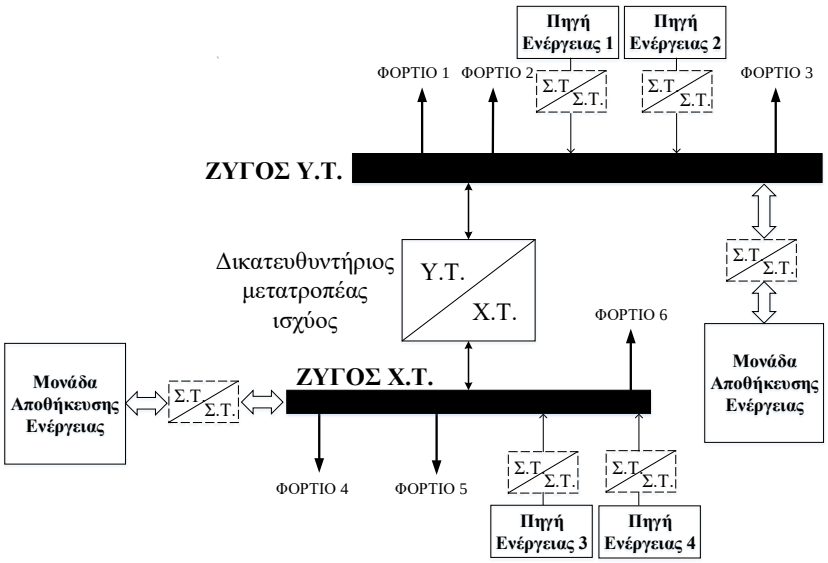
---

1. Εισαγωγή

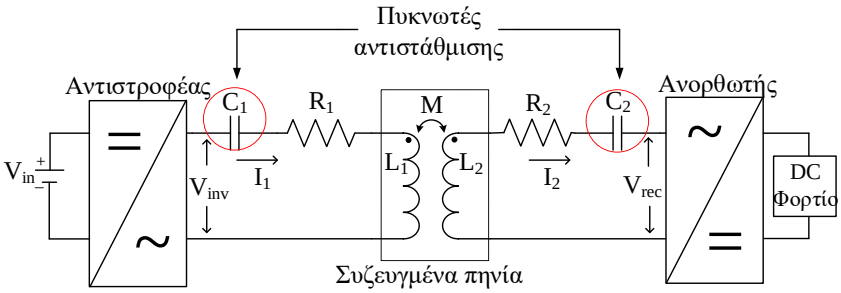
Η σύγχρονη τάση στα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής παγκοσμίως περιλαμβάνει τη μετάβαση σε συστήματα συνεχούς τάσης (Σ.Τ.) τόσο στο επίπεδο της παραγωγής όσο και της κατανάλωσης. Αυτή η τάση ενισχύεται από την εκτεταμένη χρήση ηλεκτρονικών συσκευών και τη μαζική διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), οι οποίες λειτουργούν εγγενώς σε Σ.Τ. Επομένως, τα μικροδίκτυα Σ.Τ., τα οποία διασυνδέουν τις μονάδες παραγωγής (συνήθως Α.Π.Ε.) με τα διάφορα φορτία μέσω μετατροπέων Σ.Τ.-Σ.Τ., αυξάνουν την απόδοση εξαιτίας των λιγότερων επιπέδων μετατροπής της ισχύος και της αυξημένης αξιοπιστίας (Dragicevic, et al., 2016), (Dragicevic, et al., 2014), (Li & Bhat, 2010). Η δομή ενός τυπικού μικροδικτύου Σ.Τ. περιλαμβάνει τους ζυγούς υψηλής και χαμηλής τάσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Οι ζυγοί του μικροδικτύου Σ.Τ. είναι διασυνδεδεμένοι με τα φορτία και τις μονάδες παραγωγής ενέργειας μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, ενώ μπορούν να ενσωματωθούν και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας τόσο για την αποθήκευση της ενέργειας όσο και για την απόσβεση μεταβατικών φαινομένων. Αυτή η δομή του μικροδικτύου Σ.Τ. μπορεί να ενσωματωθεί και σε εξηλεκτρισμένα μέσα μεταφοράς συμπεριλαμβανομένου και του πλήρους εξηλεκτρισμένου αεροσκάφους.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μελετάται η υλοποίηση της υψίσυχνης μαγνητικής ζεύξης μέσω ενός μετασχηματιστή με πυρήνα αέρος (Air-Core Transformer, ACT) προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα των καλωδιώσεων στην αξιοποίηση των διεσπαρμένων πηγών ενέργειας. Παρόλο που τα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος εγείρουν θέματα απόδοσης, πρόσφατα ερευνητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούν να επιτευχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα σε βαθμό απόδοσης και πυκνότητα ισχύος με τους συμβατικούς μετατροπείς ισχύος (Bosshard & Kolar, 2016), (Bosshard & Kolar, 2017).

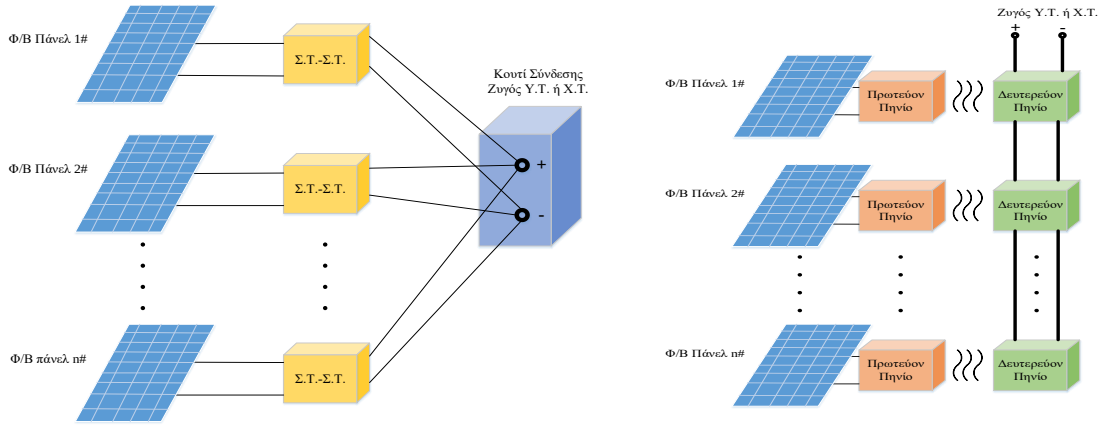
Ένα μονοκατευθυντήριο σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος (Wireless Power Transfer, WPT) αποτελείται από μια πηγή Σ.Τ., το πρωτεύον και το δευτερεύον πηνίο μαζί με τα κυκλώματα αντιστάθμισης τους, την ανορθωτική διάταξη και το φορτίο. Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η τοπολογία αντιστάθμισης σειράς-σειράς (Series-Series,SS) καθώς μπορεί να προσφέρει επιλογή του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κυκλώματος αντιστάθμισης ανεξάρτητη από το φορτίο και δυνατότητα ενίσχυσης του ρεύματος (Zhang, et al., 2015). Μια τυπική σχηματική διάταξη ενός SS-WPT συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2, όπου μια γέφυρα ανόρθωσης με διόδους χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει το φορτίο Σ.Τ. Η βασική ιδέα της ενσωμάτωσης ενός συστήματος SS-WPT σε μικροδικτυακές εφαρμογές είναι η ανάπτυξη ενός κατανεμημένου δικτύου από τοπολογίες μετατροπέων, ικανού να αξιοποιήσει κάθε πιθανή πηγή ενέργειας είτε αφορά κτιριακές υποδομές είτε εξηλεκτρισμένα μέσα μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, οι πηγές ενέργειας μπορεί να είναι Α.Π.Ε. (Φ/Β πάνελ, Α/Γ) ή συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές, κυψέλες καυσίμου). Το Σχήμα 3 συγκρίνει τη διασύνδεση Φ/Β πάνελ στο ζυγό ενός μικροδικτύου με συμβατικούς μετατροπείς ισχύος και με συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος. Όπως ξεκάθαρα φαίνεται, η ευελιξία της εγκατάστασης είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων WPT και αφορά κυρίως τη μείωση της πολυπλοκότητας των καλωδιώσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, τα σύγχρονα συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση του βάρους και της πολυπλοκότητας των καλωδιώσεων χωρίς να επηρεάσουν τον βαθμό απόδοσης της διάταξης.



Σχήμα 1: Αρχιτεκτονική ενός τυπικού μικροδικτύου *(Dragicevic, et al., 2016), (Dragicevic, et al., 2014).*



Σχήμα 2: Το σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος με αντιστάθμιση σειράς-σειράς.



α) β)

Σχήμα 3: Αξιοποίηση Φ/Β πάνελ σε μικροδικτυακές εφαρμογές με α) συμβατικούς μετατροπείς ισχύος β) συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος

2. Ανάλυση του συστήματος

Σε αυτήν την ενότητα διεξάγεται η λεπτομερής ανάλυση του συστήματος SS-WPT που απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παρούσα εργασία εστιάζει στην

περίπτωση όπου το φορτίο είναι μια πηγή σταθερή τάσης, προσομοιώνοντας με αυτόν τον τρόπο επαρκώς την έγχυση ισχύος σε ζυγό Σ.Τ. Η ανάλυση του κυκλώματος στη μόνιμη κατάσταση πραγματοποιείται υποθέτοντας συνεχή αγωγή λειτουργίας (Continuous Conduction Mode, CCM) για τη γέφυρα διόδων, δηλαδή δεν υπάρχουν χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το ρεύμα του δευτερεύοντος είναι μηδενικό εκτός από τα διαστήματα των μεταβάσεων. Επομένως, η γέφυρα διόδων μαζί με το φορτίο Σ.Τ. (υποθέτοντας CCM) μπορούν να αναπαρασταθούν από μία πηγή τάσης τετραγωνικής μορφής. Όμοια, η πλευρά του αντιστροφέα μαζί με την πηγή Σ.Τ. στην είσοδο μπορούν επίσης να αναπαρασταθούν από μια πηγή τάσης τετραγωνικής μορφής. Η διακοπτική συχνότητα f_s του υψίσυχνου αντιστροφέα είναι όμοια με τη θεμελιώδη συχνότητα της τετραγωνικής τάσης. Αυτές οι πηγές τάσης μπορούν να εκφραστούν βάσει του θεωρήματος Fourier στις ακόλουθες αρμονικές συνιστώσες:

$$v_{inv}(t) = \sum_{h=1,3,5...}^{\infty} V_{inv,h} \sin(\omega_h t) \tag{1}$$

$$V_{inv,h} = \frac{4}{\pi} V_{in} \frac{1}{h} \tag{2}$$

$$\omega_h = h\omega_1 \tag{3}$$

, όπου V_{in} είναι η τροφοδοσία Σ.Τ. στην είσοδο του αντιστροφέα (προερχόμενη από διάφορες διεσπαρμένες πηγές ενέργειας), $V_{inv,h}$ είναι η τιμή κορυφής της αντίστοιχης αρμονικής συνιστώσας και ω_1 είναι η θεμελιώδης γωνιακή συχνότητα.

Παρόμοια, η τάση εξόδου $v_{rec}(t)$, η οποία αναπαριστά τη γέφυρα διόδων μαζί με το φορτίο Σ.Τ., περιγράφεται από τη σχέση (4):

$$v_{rec}(t) = \sum_{h=1,3,5...}^{\infty} v_{rec,h} = \sum_{h=1,3,5...}^{\infty} V_{rec,h} \sin(\omega_h t + \delta_h) \tag{4}$$

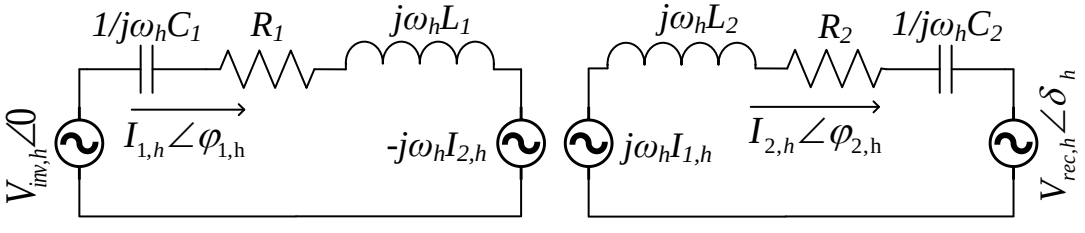
$$V_{rec,h} = \frac{4}{\pi} V_{dc-bus} \frac{1}{h} \tag{5}$$

, όπου η δ_h υποδηλώνει τη διαφορά φάσης μεταξύ $v_{inv}(t)$ και $v_{rec}(t)$, και $V_{rec,h}$ είναι η τιμή κορυφής της αντίστοιχης αρμονικής συνιστώσας. Προφανώς, η δ_h μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\delta_h = h\delta_1 \ , \ h > 1 \tag{6}$$

, όπου η δ_1 αναφέρεται στη θεμελιώδη αρμονική συνιστώσα.

Η παραπάνω ανάλυση καθιστά ικανή τη μελέτη του συστήματος υπό την έννοια των αρμονικών συνιστωσών. Το ισοδύναμο κύκλωμα της *h*-τάξης αρμονικής απεικονίζεται στο Σχήμα 4, ενώ ο Πίνακας 1 συνοψίζει τα κυκλωματικά του στοιχεία. $I_{1,h}\angle\varphi_{1,h}$ και $I_{2,h}\angle\varphi_{2,h}$ είναι οι *h*-τάξης φασιθέτες του ρεύματος (πλάτος και γωνία) της πλευράς πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα. Όλες οι φασικές γωνίες αναφέρονται στο φασιθέτη $V_{inv,h}\angle 0$.



Σχήμα 4: Ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος SS-WPT.

Οι *h*-τάξης φασιθέτες του ρεύματος πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι:

$$I_{1,h}\angle\varphi_{1,h} = I_{11,h}\angle\varphi_{11,h} + I_{12,h}\angle\varphi_{12,h} \tag{7}$$

$$I_{2,h}\angle\varphi_{2,h} = I_{21,h}\angle\varphi_{21,h} + I_{22,h}\angle\varphi_{22,h} \tag{8}$$

Οι *h*-τάξης φασιθέτες των συνολικών ρευμάτων που διαρρέουν το πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα περιγράφονται από τις σχέσεις (όπου j=1,2 υποδηλώνει το πρωτεύον και δευτερεύον ρεύμα αντίστοιχα):

$$i_j(t) = \sum_{h=1,3,5...}^{\infty} I_{j,h}\sin(h\omega_1 t + \varphi_{j,h}) \quad , j = 1,2 \tag{9}$$

Στις σχέσεις (7)-(9) η γωνία δ_1 είναι μια άγνωστη παράμετρος, η οποία μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας συνεχή αγωγή λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, το ρεύμα $i_2(t)$ γίνεται μηδέν μόνο κατά τα διαστήματα των μεταβάσεων. Θεωρώντας ιδανικές διόδους, η μετάβαση πραγματοποιείται στη γωνία $\varphi_{com} = \pi\text{-}\delta_1$. Επομένως, η γωνία δ_1 μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις (10), (11):

$$\sum_{h=1,3,5...}^{\infty} I_{2,h}\sin(h\omega_1 t_{com} + \varphi_{2,h}) = 0 \tag{10}$$

$$\delta_1 = \pi - \omega_1 t_{com} \quad , \quad \varphi_{com} = \omega_1 t_{com} \tag{11}$$

Η ενεργός ισχύς η οποία φθάνει στη γέφυρα διόδων, P_{rec}, υπολογίζεται συνδυάζοντας τις σχέσεις (5) και (8) ως ακολούθως:

$$P_{rec} = \sum_{h=1,3,5...}^{\infty} \frac{V_{rec,h}\cdot I_{2,h}}{2}\cos\left(\delta_h - \phi_{2,h}\right) \tag{12}$$

Τέλος, η ενεργός ισχύς, η οποία εγχέεται στο ζυγό Σ.Τ. υπολογίζεται από τη P_{rec} αφαιρώντας τις απώλειες αγωγής της γέφυρας διόδων (οι διακοπτικές απώλειες αμελούνται):

$$P_{out} = P_{rec} - 2\Delta V_{on} I_{out} \tag{13}$$

ΔV_{on}, η πτώση τάσης της κάθε διόδου

I_{out}, το μέσο ρεύμα εξόδου που εγχέεται στο ζυγό Σ.Τ.

3. Πειραματικές μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοιώσεων

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η μαθηματική ανάλυση του συστήματος SS-WPT, πραγματοποιήθηκαν τόσο η κατασκευή της πειραματικής διάταξης του συστήματος όσο και η ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης στο MATLAB/Simulink. Στον Πίνακας 1 παρουσιάζονται οι παράμετροι του συστήματος και οι τιμές των στοιχείων τόσο για την πειραματική διάταξη όσο και για το μοντέλο προσομοίωσης. Τα χαλαρά συζευγμένα πηνία ορθογωνικής μορφής είναι κατασκευασμένα από σύρμα Litz, σε διαμόρφωση διπλού D (DD). Η συγκεκριμένη διαμόρφωση επιλέγεται καθώς παρουσιάζει χαμηλότερες σκεδάσεις (Budhia, et al., 2013). Οι διαστάσεις του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου είναι πανομοιότυπες και ίσες με 400 × 450 mm, ενώ κάθε πηνίο αποτελείται από 24 σπείρες σύρματος Litz διαμέτρου 2 mm. Η απόσταση μεταξύ των δύο πηνίων είναι 75 mm, έχοντας ως αποτέλεσμα συντελεστή σύζευξης k = 0.447. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται πυρήνες φεριττών I93 για την βελτίωση της κατανομής του μαγνητικού πεδίου. Ένα τροφοδοτικό

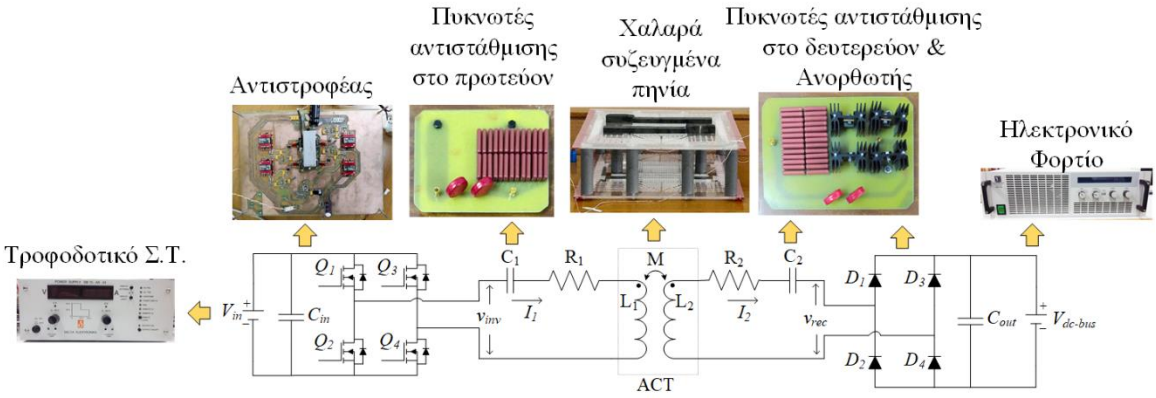
Σ.Τ. χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της τάσης εισόδου. Το πρωτεύον πηνίο οδηγείται από έναν μονοφασικό αντιστροφέα συνδεσμολογίας γέφυρας με διαμόρφωση τετραγωνικού παλμού. Μια γέφυρα με τέσσερις διόδους εφαρμόζεται στο έξοδο του δευτερεύοντος για την ανόρθωση της επαγόμενης τάσης, ενώ χρησιμοποιείται ένας πυκνωτής στην έξοδο της γέφυρας για την σταθεροποίηση της ανορθωμένης τάσης. Τέλος, χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρονικό φορτίο σε λειτουργία σταθερής τάσης προκειμένου να εξομοιώσει τη συμπεριφορά ενός ζυγού Σ.Τ. Η σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.

Πίνακας 1: Παράμετροι του συστήματος SS-WPT.

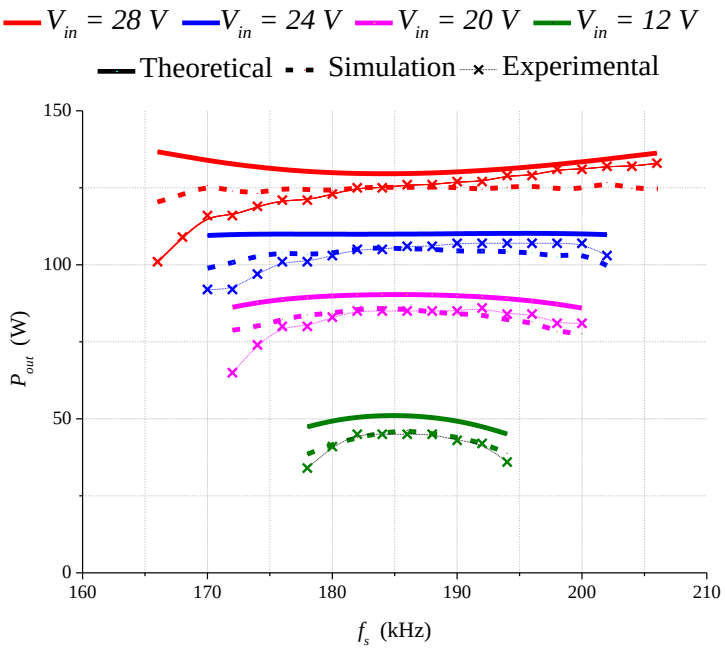
Σύμβολο	Παράμετρος	Τιμή
L_1	Συντελεστής αυτεπαγωγής πρωτεύοντος	187.73 μH
L_2	Συντελεστής αυτεπαγωγής δευτερεύοντος	188.97 μH
C_1	Χωρητικότητα αντιστάθμισης πρωτεύοντος	15.495 nF
C_2	Χωρητικότητα αντιστάθμισης δευτερεύοντος	15.515 nF
R_1	Παρασιτική αντίσταση πρωτεύοντος	0.47 Ω
R_2	Παρασιτική αντίσταση δευτερεύοντος	0.457 Ω
M	Συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής	84.3225 μH
K	Συντελεστής σύζευξης	0.447
f_r	Συχνότητα συντονισμού	93 kHz
C_{in}	Χωρητικότητα φίλτρου εισόδου	233.5 μF
C_{out}	Χωρητικότητα φίλτρου εξόδου	1000 μF
Q_1-Q_4	MOSFETs Αντιστροφέα	SiC Z-FET CMF10120D
D_1-D_4	Δίοδοι ανόρθωσης	Ultrafast Soft Recovery Diode VS-HFA15TB60-N3
V_{in}	Τροφοδοτικό Σ.Τ.	DELTA ELEKTRONIKA SM 330-AR-22
$V_{dc\text{-}bus}$	Ηλεκτρονικό φορτίο	EA-EL 9750-25 2400W 800R
Eff	Συνολική απόδοση συστήματος (μέγιστη)	96%

Αρχικά, μελετάται η περίπτωση έγχυσης ισχύος στο ζυγό χαμηλής τάσης $28V_{dc}$. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η συχνότητα συντονισμού επιλέγεται να είναι ίση με 180 kHz μέσω κατάλληλης επιλογής των χωρητικοτήτων αντιστάθμισης, ενώ το εύρος συχνοτήτων το οποίο εξετάζεται είναι από 160 kHz μέχρι 230 kHz. Το Σχήμα 6 συγκρίνει τα θεωρητικά, τα πειραματικά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την ισχύ εξόδου P_{out} ως προς τη συχνότητα λειτουργίας f_s, σε όλο το εύρος συχνοτήτων για το οποίο η γέφυρα διόδων βρίσκεται σε συνεχή αγωγή λειτουργίας. Σύμφωνα με το Σχήμα 6, η ισχύς εξόδου παραμένει σχετικά σταθερή (η απόκλιση είναι μικρότερη του 10% σύμφωνα με τα

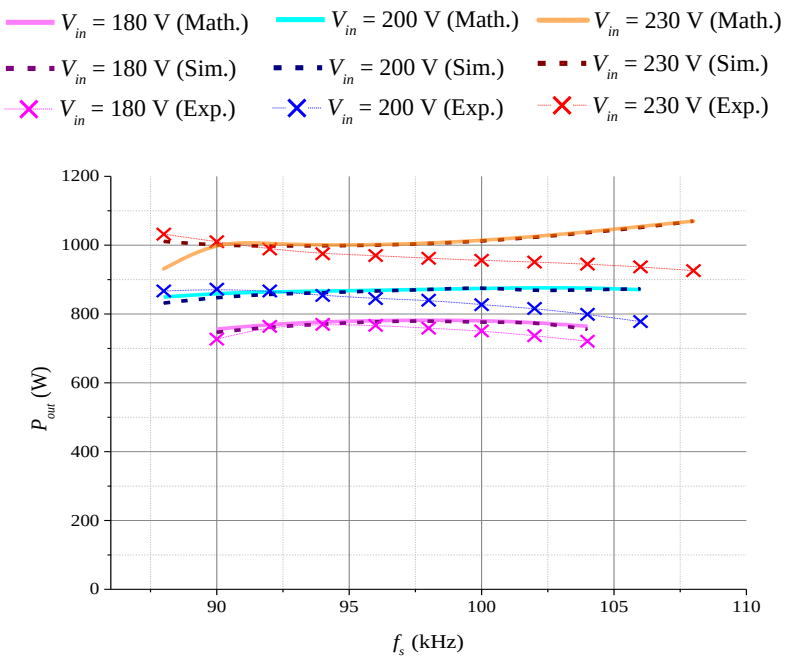
πειραματικά αποτελέσματα), επιβεβαιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ικανότητα του συστήματος να μεταφέρει σταθερή ισχύ στο ζυγό Σ.Τ. Ακόμη, τα πειραματικά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμφωνούν με τους θεωρητικούς υπολογισμούς για την ισχύ εξόδου. Αξίζει να αναφέρουμε ότι οι καταγεγραμμένες διαφορές οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι μια ιδανική γέφυρα διόδων έχει ληφθεί υπόψιν στους θεωρητικούς υπολογισμούς. Επιπρόσθετα, τα πειραματικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους, με τις όποιες αποκλίσεις να περιορίζονται στα όρια της CCM περιοχής λειτουργίας.



Σχήμα 5: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 6: Σύγκριση των θεωρητικών υπολογισμών με τα πειραματικά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την ισχύ εξόδου ως συνάρτηση της συχνότητας λειτουργίας, για διάφορες τάσεις εισόδου (μεταφορά ισχύος στο ζυγό Χ.Τ.).

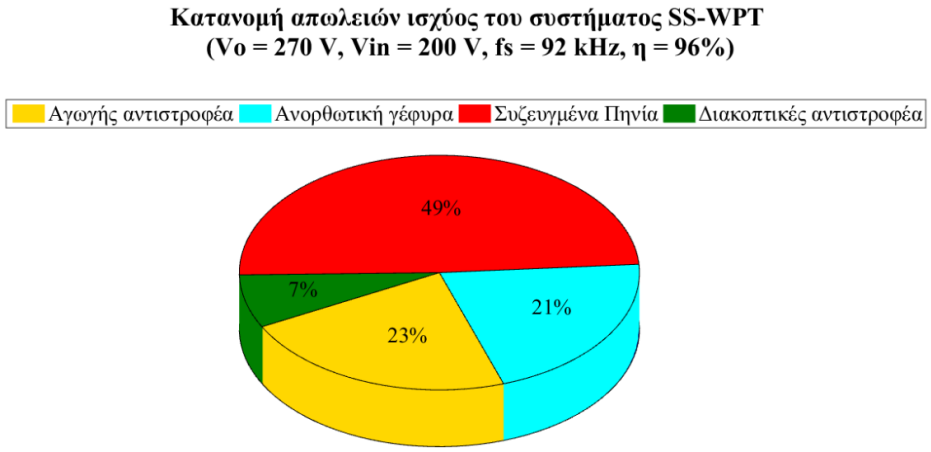


Σχήμα 7: Σύγκριση των θεωρητικών υπολογισμών με τα πειραματικά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την ισχύ εξόδου ως συνάρτηση της συχνότητας λειτουργίας, για διάφορες τάσεις εισόδου (μεταφορά ισχύος στο ζυγό Υ.Τ.).

Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση έγχυσης ισχύος στον ζυγό υψηλής τάσης $270V_{dc}$. Αξίζει να αναφέρουμε ότι η συχνότητα λειτουργίας σε αυτήν την περίπτωση είναι τα 93 kHz, ενώ το εύρος συχνοτήτων το οποίο εξετάζεται είναι από 80 kHz μέχρι 110 kHz. Παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση, στο Σχήμα 7 συγκρίνονται τα θεωρητικά, τα πειραματικά και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την ισχύ εξόδου P_{out}, ως προς τη συχνότητα λειτουργίας f_s. Σύμφωνα και με αυτά τα αποτελέσματα, όπως και στην περίπτωση του ζυγού Χ.Τ., η ισχύς εξόδου παραμένει σχετικά σταθερή σε όλο το εύρος συχνοτήτων για το οποίο η γέφυρα διόδων βρίσκεται σε συνεχή αγωγή λειτουργίας, επισημαίνοντας για άλλη μια φορά την ικανότητα του συστήματος SS-WPT να μεταφέρει σταθερή ισχύ και στον ζυγό Υ.Τ.

Τέλος, εξετάζεται η κατανομή των απωλειών ισχύος για την περίπτωση μεταφοράς ισχύος στο ζυγό Υ.Τ. και για το σημείο λειτουργίας στο οποίο επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός απόδοσης (δηλαδή V_{in} = 200 V, f_s = 92 kHz, P_{out} = 870 W). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η κατανομή των απωλειών βασίζεται στις πραγματικές μετρήσεις και προκύπτει από τις σχέσεις υπολογισμού των απωλειών σε ημιαγωγικούς διακόπτες (Zhang, et al., 2014) και στις ωμικές απώλειες του κάθε πηνίου, ενώ οι απώλειες του πυρήνα αμελούνται εξαιτίας των χαλαρά συζευγμένων πηνίων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της κατανομής, οι απώλειες ισχύος στο εξεταζόμενο σύστημα SS-WPT οφείλονται κυρίως στις διακοπτικές και στις απώλειες αγωγής του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, στις ωμικές απώλειες του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου καθώς και στις απώλειες αγωγής της ανορθωτικής γέφυρας διόδων. Η κατανομή των απωλειών απεικονίζεται και στο Σχήμα 8. Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, οι διακοπτικές απώλειες του αντιστροφέα είναι χαμηλές εξαιτίας της χρήσης τρανζίστορ MOSFET τεχνολογίας καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Από την άλλη πλευρά, οι ωμικές απώλειες στα συζευγμένα πηνία υπερισχύουν έναντι των άλλων, ακόμη και αν ο συντελεστής ποιότητας των δύο πηνίων είναι εξαιρετικά υψηλός (Q = 237). Παρόλα αυτά, οι απόλυτες τιμές των ωμικών απωλειών των πηνίων παραμένουν χαμηλές,

έχοντας ως αποτέλεσμα τον υψηλό βαθμό απόδοσης του 96%. Όσον αφορά τις απώλειες αγωγής του αντιστροφέα και της γέφυρας ανόρθωσης, αυτές είναι 23% και 21% αντίστοιχα.



Σχήμα 8: Κατανομή απωλειών ισχύος του συστήματος SS-WPT για τη μεταφορά ισχύος στον ζυγό $270V_{dc}$.

4. Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία έχει προταθεί η ενσωμάτωση της ασύρματης μεταφοράς ισχύος σε εφαρμογές μικροδικτύων, στοχεύοντας στην αύξηση της αξιοποίησης διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής σε κτιριακές υποδομές ή εξηλεκτρισμένα μέσα μεταφορά και στη μείωση της πολυπλοκότητας στην εγκατάσταση. Για τον λόγο αυτόν, έχει μελετηθεί η περίπτωση του συστήματος SS-WPT ως διασυνδετικό μέσο των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής με το κυρίως δίκτυο Σ.Τ. του μικροδικτύου και έχει εξαχθεί το μαθηματικό μοντέλο το οποίο περιγράφει την ασύρματη μεταφορά ισχύος σε φορτία σταθερής τάσης.

Επιπρόσθετα, με τη βοήθεια του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος SS-WPT, έχει αναδειχθεί η ικανότητά του να μεταφέρει σταθερή ισχύ στον ζυγό Σ.Τ., η οποία επιβεβαιώθηκε μέσω πειραματικών δοκιμών και αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Οι εκτεταμένες πειραματικές μετρήσεις απέδειξαν επίσης ότι η ικανότητα σταθερής μεταφοράς ισχύος είναι έγκυρη για ένα μεγάλο εύρος τόσο συχνοτήτων λειτουργίας του συστήματος όσο και τάσεων εισόδου. Αυτή η ικανότητα του SS-WPT συστήματος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα στις εφαρμογές των μικροδικτύων Σ.Τ.

5. Βιβλιογραφία

Bosshard, R. & Kolar, J. W., "*Inductive Power Transfer for Electric Vehicle Charging*", IEEE Power Electronics Magazine, September 2016, vol. 3, pp. 22-30.

Bosshard, R. & Kolar, J. W., "*All-SiC 9.5 kW/dm3 on-board power electronics for 50 kW/85 kHz automotive IPT system*", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics On Power Electronics, March 2017, vol. 5, pp. 419-431.

Budhia, M., Boys, J. T., Covic, G. A. & Huang, C.-Y., "*Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, January 2013, vol. 60, pp. 318-328.

Dragicevic, T., Lu, X., Vasquez, J. C. & Guerrero, J. M., "*DC microgrids—Part II: A review of power architectures, applications, and standardization issues*", IEEE Transactions on Power Electronics, May 2016, vol. 31, pp. 3528-2549.

Dragicevic, T., Vasquez, J. C., Guerrero, J. M. & Skrlec, D., "*Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids*", IEEE Electrification Magazine, March 2014, vol. 2, pp. 54-65.

Li, X. & Bhat, A. K. S., "*Analysis and Design of High-Frequency Isolated Dual-Bridge Series Resonant DC/DC Converter*", IEEE Transactions on Power Electronics, April 2010, vol. 25, pp. 850-562.

Zhang, W., Wong, S.-C., Tse, C. K. & Chen, Q., "*Design for Efficiency Optimization and Voltage Controllability of Series-series Compensated Inductive Power Transfer Systems*", IEEE Transaction on Power Electronics, January 2014, vol. 29, pp. 191-200.

Zhang, W., Wong, S.-C., Tse, C. K. & Chen, Q., "*Load-Independent Duality of Current and Voltage Outputs of a Series- or Parallel-Compensated Inductive Power Transfer Converter With Optimized Efficiency*", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics On Power Electronics, March 2015, vol. 3, pp. 137-146.