



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

**Συμβολή στην ανάπτυξη συστημάτων ασύρματης  
επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων**

Διδακτορική Διατριβή

Ιωάννης Καρακίτσιος

Αθήνα, Μάιος 2019





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Ιωάννη Καρακίτσιου**

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Μηχανικού  
Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

**“Συμβολή στην ανάπτυξη συστημάτων ασύρματης  
επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων”**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Χατζηαργυρίου


Σταύρος Παπαθανασίου


Παύλος Γεωργιλιάκης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 30/05/2019

**Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή**

  
.....  
Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής ΕΜΠ


  
.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Καθηγητής ΕΜΠ

  
.....  
Παύλος Γεωργιλιάκης  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

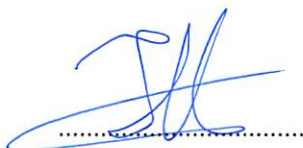
  
.....  
Ιωάννης Προυσαλίδης  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

  
.....  
Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

  
.....  
Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

  
.....  
Αντώνιος Αντωνόπουλος  
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2019



Ιωάννης Καρακίτσιος

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

Copyright © Ιωάννης Καρακίτσιος, 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.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επαγωγική φόρτιση είναι μία ιδιαίτερα υποσχόμενη μέθοδος φόρτισης, που επιτρέπει την ασύρματη μεταφορά ενέργειας μεταξύ του ηλεκτρικού δικτύου και της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος. Εκτός από την ικανότητα ασύρματης φόρτισης καθώς το όχημα σταθμεύει πάνω από το φορτιστή (στατική επαγωγική φόρτιση), παρέχεται, επίσης, η δυνατότητα δυναμικής φόρτισης καθώς το όχημα κινείται στο δρόμο.

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη συστημάτων επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και η πρόταση μεθόδων για την αύξηση της απόδοσης και της μεταφερόμενης ισχύος των συστημάτων αυτών. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιείται, αρχικά, μία ανασκόπηση των μεθόδων αντιστάθμισης, των μεθόδων ελέγχου και των μαγνητικών συζευκτών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στατικής επαγωγικής φόρτισης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας της δυναμικής φόρτισης καθώς και οι τροποποιήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας καλείται να λειτουργήσει με το όχημα να κινείται πάνω από το φορτιστή. Επιπλέον, το φαινόμενο της διακλάδωσης που υποδεικνύει τη μεγιστοποίηση της απόδοσης σε συχνότητες διαφορετικές από αυτές που μεγιστοποιούν τη μεταφερόμενη ισχύ, μελετάται στη δυναμική φόρτιση όχι μόνο ως προς τη συχνότητα λειτουργίας αλλά και ως προς την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Ακόμη, εξετάζεται η επιλογή των πυκνωτών αντιστάθμισης λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των αυτεπαγωγών των τυλιγμάτων του μαγνητικού συζεύκτη, λόγω της κίνησης του οχήματος, ώστε να επιτευχθεί μία υψηλή μεταφερόμενη ισχύς, παράλληλα με μία αυξημένη απόδοση λειτουργίας.

Η ανάγκη επίτευξης μίας μεγάλης απόδοσης, καθώς και μίας αυξημένης μεταφερόμενης ισχύος στη δυναμική φόρτιση απαιτεί τη βέλτιστη επιλογή όχι μόνο των πυκνωτών αντιστάθμισης, αλλά και των υπόλοιπων παραμέτρων του συστήματος. Στο πλαίσιο αυτό προτείνεται μία μέθοδος βελτιστοποίησης με στόχο τον ορισμό των βέλτιστων τιμών της συχνότητας λειτουργίας των πυκνωτών αντιστάθμισης και της αντίστασης φορτίου. Λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου βελτιστοποίησης, προτείνεται επίσης μία μέθοδος ελέγχου, η οποία δεν απαιτεί μηχανισμούς ανίχνευσης (αισθητήρες κλπ.) για τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης του οχήματος κατά την κίνηση, εξαλείφοντας παράλληλα την ανάγκη για συνεχή μεταφορά δεδομένων μεταξύ οχήματος και φορτιστή. Η αποτελεσματική λειτουργία του προτεινόμενου ελέγχου επαληθεύεται με την πειραματική υλοποίηση ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης αποτελούμενο από έναν κυκλικό συζεύκτη, την κατάλληλη τοπολογία αντιστάθμισης και τον απαιτούμενο αντιστροφέα για την εφαρμογή του ελέγχου.

Από την πλευρά του ηλεκτρικού δικτύου, τεχνολογίες επαγωγικής φόρτισης δύναται να επιτρέψουν τη μεταφορά ιδιαίτερα μεγάλων ποσών ισχύος στην μπαταρία του οχήματος. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται μια μεθοδολογία για τη μελέτη της επίδρασης της στατικής και δυναμικής επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής, ορίζοντας παράλληλα το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο διείσδυσης επαγωγικών φορτιστών που δεν παραβιάζει τους τεχνικούς περιορισμούς του δικτύου. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη μία μελλοντικά αυξημένη διείσδυση επαγωγικών φορτιστών, προτείνονται τροποποιήσεις στο σύστημα ελέγχου των φορτιστών που θα επιτρέψουν την ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας για την αποτελεσματική αντιμετώπιση προβλημάτων δικτύου που αναμένεται να εμφανισθούν.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ασύρματη Επαγωγική Φόρτιση, Ηλεκτρικά οχήματα, Έλεγχος Αντιστροφέα, Βελτιστοποίηση Συστήματος Επαγωγικής Φόρτισης, Επίδραση στο Δίκτυο Διανομής

# ABSTRACT

Inductive charging, which allows the wireless transfer of energy between the Electric Vehicle (EV) and the charging station, appears to be a very promising charging solution. Apart from the ability to transfer energy in a contactless way while the EV is parked over the station (i.e. *static* inductive charging), energy can also be wirelessly transferred while the EV moves on the road (i.e. *dynamic* inductive charging).

The present PhD thesis aims to study inductive charging systems for EVs, while also proposing ways to increase the transferred power and the system's efficiency. In this scope, a review of the compensation methods, the magnetic couplers and the control schemes is initially presented, considering the case of static inductive charging. Moreover, the basic operational principles in the case of dynamic inductive charging are studied, while examining the necessary modifications in the operation of the system when it is expected to operate with the EV moving over the station. Additionally, in the case of dynamic inductive charging, the bifurcation phenomenon (indicating the maximization of the system's efficiency in frequencies different than the one maximizing the power transferred to the EV battery) is studied not only according to the operational frequency but also according to the movement of the EV. Moreover, the selection of the compensation capacitors' values is examined according to the variations of the self-inductance values of the magnetic coupler's coils (due to the movement of the vehicle over the station), in order to achieve a high transferred power at an increased system efficiency.

In order to achieve a high power transfer and efficiency in dynamic inductive charging not only do the compensation capacitors need to be appropriately selected, but the optimal values of all the system's parameters shall also be optimally defined. In this respect, an optimisation method is proposed aiming to define the optimal values for the operational frequency, the values of the compensation capacitors as well as the load resistance in a dynamic inductive charging system. Taking into account the requirements for the implementation of this optimisation method, a control scheme is also proposed that does not require any additional detection mechanisms to identify the position of the EV over the station, while eliminating communication requirements between the primary and the secondary side of the system. The effective operation of the proposed control scheme is validated by an experimental setup, comprising a circular magnetic coupler, the required compensation capacitors and the inverter implementing the suggested control scheme.

Considering the electric grid side, inductive charging technologies can allow the wireless transfer of significant amounts of power to the vehicle's battery. In this respect, a methodology is introduced for grid impact analysis of both static and dynamic inductive charging technologies in distribution networks, while also defining the maximum deployment level of inductive charging stations that does not violate technical grid constraints. Additionally, in case of a vast deployment of inductive chargers, modifications in the control system of the charging stations are examined in order to develop the necessary energy management system that will effectively eliminate issues which may arise in the grid operation.

# KEY WORDS

Wireless Inductive Charging, Electric Vehicles, Converter Control, Optimisation in Inductive Power Transfer, Grid Impact

# Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Νικόλαου Χατζηαργυρίου στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός της διατριβής είναι η μελέτη συστημάτων επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και η πρόταση μεθόδων για την αύξηση της απόδοσης και της μεταφερόμενης ισχύος των συστημάτων αυτών.

Το 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της διατριβής, όπου περιγράφεται η βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης, η οποία είναι παρόμοια με αυτή ενός μετασηματιστή: ενέργεια μεταφέρεται ασύρματα μεταξύ ενός πρωτεύοντος και ενός δευτερεύοντος πηνίου. Παρατίθεται στη συνέχεια η διάκριση μεταξύ στατικής φόρτισης όπου το όχημα φορτίζει ενώ είναι σταθευμένο πάνω από το φορτιστή, και δυναμικής φόρτισης όπου η φόρτιση του οχήματος πραγματοποιείται όταν αυτό διέρχεται πάνω από το φορτιστή. Περιγράφονται, επίσης, τα πρότυπα που δύναται να εφαρμοσθούν στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, εξετάζοντας παράλληλα και θέματα ασφαλείας που σχετίζονται με την εκπομπή ΗΜ πεδίων σε διατάξεις επαγωγικής φόρτισης λόγω των ρευμάτων υψηλής συχνότητας που διατρέχουν τα τυλίγματα του μαγνητικού συζεύκτη. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα ερευνητικά θέματα που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο εξετάζεται λεπτομερώς η στατική επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, μελετώντας αρχικά τη χρήση διαφόρων μεθόδων αντιστάθμισης για τον περιορισμό της διακινούμενης αέργου ισχύος και την αύξηση της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος στην μπαταρία του οχήματος. Παράλληλα μελετώνται οι διάφορες μαγνητικές διατάξεις και οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Αναλύεται επίσης το φαινόμενο της διακλάδωσης στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης, το οποίο υποδεικνύει ότι ενδέχεται να υπάρχουν έως και τρεις διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας που οδηγούν σε επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο του συστήματος, αλλά μία μόνο συχνότητα που μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη ισχύ.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, περιγράφονται οι τροποποιήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας καλείται να λειτουργήσει με το όχημα να κινείται με μεγάλες ταχύτητες πάνω από το φορτιστή. Ειδικότερα, στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, το φαινόμενο της διακλάδωσης μελετάται όχι μόνο σχετικά με τη συχνότητα λειτουργίας αλλά και σύμφωνα με την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Επιπλέον, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, οι τιμές των αυτεπαγωγών των τυλιγμάτων του μαγνητικού συζεύκτη δεν παραμένουν σταθερές, αλλά είναι ικανές να επηρεάσουν τόσο τη μεταφερόμενη ισχύ όσο και την απόδοση του συστήματος, επιβάλλοντας την ανάγκη για μία διαφορετική προσέγγιση σχετικά με την επιλογή των στοιχείων αντιστάθμισης.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο προτείνεται μία μέθοδος βελτιστοποίησης με στόχο τον ορισμό των βέλτιστων τιμών της συχνότητας λειτουργίας, των πυκνωτών αντιστάθμισης και της αντίστασης φορτίου για ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Η μέθοδος βελτιστοποίησης εξετάζει περιορισμούς που σχετίζονται με τις λειτουργικές συνθήκες στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος ενός συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, ώστε να ορίσει την περιοχή εκείνη της κίνησης όπου μεγιστοποιείται η ενέργεια που μεταφέρεται στο όχημα, επιτυγχάνοντας παράλληλα μία μεγάλη απόδοση λειτουργίας. Οι τιμές που εξάγονται από τη μέθοδο βελτιστοποίησης υλοποιούνται στο σύστημα ελέγχου του δευτερεύοντος του συστήματος. Επιπλέον, προτείνεται

μία μέθοδος ελέγχου η οποία δύναται να εξαλείψει επιτυχώς την ανάγκη χρήσης μηχανισμών ανίχνευσης (αισθητήρες κλπ.) που χρησιμοποιούνται συχνά σε συστήματα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης για τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης του οχήματος καθώς αυτό κινείται πάνω από το φορτιστή. Επίσης, ο προτεινόμενος έλεγχος στην πλευρά του πρωτεύοντος, αντίθετα με ελέγχους που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία για τη δυναμική φόρτιση, δεν απαιτεί τη συνεχή μεταφορά δεδομένων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, επιτρέποντας τη φόρτιση ακόμα και όταν το όχημα κινείται με μεγάλες ταχύτητες πάνω από το φορτιστή. Η μέθοδος βελτιστοποίησης εφαρμόζεται στην περίπτωση ενός κυκλικού μαγνητικού συζεύκτη 60 εκατοστών και η αποτελεσματική λειτουργία του προτεινόμενου ελέγχου επαληθεύεται με την προσομοίωση του συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης για όλο το εύρος κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Εξετάζοντας, επίσης τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που αναπτύσσονται λόγω του ρεύματος υψηλής συχνότητας στα τυλίγματα του μαγνητικού συζεύκτη, παρατηρείται ότι η προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου δύναται να εξασφαλίσει την τήρηση των ορίων που τίθενται από διεθνείς οδηγίες/συστάσεις σχετικά με την ασφάλεια των ατόμων που εκτίθενται στα πεδία αυτά.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για να εξετασθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης και του προτεινόμενου ελέγχου. Στο πλαίσιο αυτό περιγράφεται ο αντιστροφέας DC/AC που κατασκευάστηκε για να επιτρέψει τον κατάλληλο έλεγχο του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο. Ο συγκεκριμένος αντιστροφέας, με τον ανάλογο έλεγχο, εφαρμόζεται σε μία κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη διαμέτρου περίπου 25 εκατοστών, η οποία επιτρέπει την ασύρματη μεταφορά ενέργειας σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης (καθώς δηλαδή το δευτερεύον κινείται πάνω από το πρωτεύον). Η προτεινόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης που περιγράφεται στην παρούσα διατριβή εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη μαγνητική διάταξη εξάγοντας τις παραμέτρους για τη σχεδίαση του συστήματος επαγωγικής φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάστηκε όλο το σύστημα επαγωγικής φόρτισης, αποτελούμενο από μία DC τάση τροφοδοσίας, τον DC/AC αντιστροφέα υψηλής συχνότητας, το σύστημα αντιστάθμισης, το μαγνητικό συζεύκτη και την ισοδύναμη αντίσταση φορτίου, και εξετάστηκε η λειτουργία του όταν το δευτερεύον κινείται πάνω από το πρωτεύον.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι τεχνολογίες επαγωγικής φόρτισης επιτρέπουν τη μεταφορά ιδιαίτερα μεγάλων ποσών ισχύος μεταξύ του δικτύου και του οχήματος. Αυτή η ενεργειακή ζήτηση μπορεί να τροποποιήσει σημαντικά το προφίλ φορτίου ενός δικτύου διανομής και να επηρεάσει τη λειτουργία και το σχεδιασμό του. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο μια μεθοδολογία για τη μελέτη της επίδρασης της επαγωγικής φόρτισης (στατικής και δυναμικής) στο δίκτυο διανομής. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε ένα ρεαλιστικό μοντέλο μίας γραμμής διανομής μέσης τάσης, εξετάζοντας ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση της επαγωγικής φόρτισης στη λειτουργία του δικτύου. Παράλληλα, ορίζεται το μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο διείσδυσης επαγωγικών φορτιστών που δεν παραβιάζει τους τεχνικούς περιορισμούς του δικτύου. Εξετάζεται, επίσης, η επίδραση της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, και ειδικότερα από φωτοβολταϊκά, στο μέγιστο αριθμό επαγωγικών φορτιστών που μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο διανομής. Σε περίπτωση που ο μέγιστος αριθμός φορτιστών ξεπερασθεί, σημαντική είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης της ζήτησης των επαγωγικών φορτιστών, ώστε να εξαλειφθούν προβλήματα που δύναται να παρουσιασθούν στη λειτουργία του δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό περιγράφεται ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας των επαγωγικών φορτιστών, με τις απαραίτητες τροποποιήσεις που απαιτούνται στο σύστημα ελέγχου των επαγωγικών φορτιστών για να ενταχθούν στο σύστημα αυτό.



Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου και την ευγνωμοσύνη μου στον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή. Η άριστη καθοδήγηση που μου παρείχε, η αμέριστη συμπαράσταση και η εξασφάλιση των απαραίτητων μέσων ήταν καθοριστικής σημασίας για την εκπόνηση της διατριβής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω, επίσης, στους κ. Πάυλο Γεωργιάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ και κ. Σταύρο Παπαθανασίου, Καθηγητή ΕΜΠ, για την αποδοχή συμμετοχής τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και τις πολύτιμες συμβουλές τους που συνεισέφεραν σημαντικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω στον κ. Αντώνιο Κλαδά, καθηγητή ΕΜΠ, για την αποδοχή συμμετοχής του τόσο στην πενταμελή εξεταστική επιτροπή της ενδιάμεσης κρίσης όσο και στην επταμελή εξεταστική επιτροπή και για τις πολύτιμες συμβουλές του και επισημάνσεις που συνεισέφεραν καθοριστικά στην ορθή ολοκλήρωση της διατριβής.

Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον κ. Ιωάννη Προυσαλίδη, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Ναυπηγών Μηχανικών ΕΜΠ για την αποδοχή συμμετοχής του στην πενταμελή εξεταστική επιτροπή της ενδιάμεσης κρίσης και την επταμελή εξεταστική επιτροπή, αλλά και για τις υποδείξεις και συμβουλές του.

Εξίσου θερμές ευχαριστίες οφείλονται στους κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, Καθηγητή ΕΜΠ και κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ για την αποδοχή συμμετοχής τους στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Ιδιαίτερα ευχαριστώ τα μέλη του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας κα. Ελένη Αυλωνίτου και κα. Ειρήνη Γασπαράκη για την πολύτιμη γραμματειακή υποστήριξη στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής εργασίας

Θερμές ευχαριστίες εκφράζω, επίσης, σε όλα τα μέλη του εργαστηρίου των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για την εξαιρετική και φιλική συνεργασία. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Ευάγγελο Καρφόπουλο για τις συμβουλές και την παρακίνηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της έρευνας που παρουσιάζεται εδώ. Ευχαριστώ επίσης, τον Φοίβο Παλαιογιάννη για τη σημαντική βοήθειά που μου παρείχε στην πειραματική υλοποίηση της διάταξης.

Ιωάννης Καρακίτσιος,

Αθήνα, Μάιος 2019



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	1
1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	1
1.1.1 Φόρτιση με αγώγιμη σύνδεση .....	1
1.1.2 Ασύρματη επαγωγική φόρτιση.....	2
1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	3
1.2.1 Στατική Φόρτιση .....	4
1.2.2 Δυναμική Φόρτιση .....	7
1.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	9
1.4 ΕΠΙΠΕΔΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ .....	11
1.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ.....	13
1.6 ΘΕΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ .....	15
1.6.1 Διεθνείς και Ευρωπαϊκές Οδηγίες-Συστάσεις .....	15
1.6.2 Εκτίμηση και μέτρηση των ΗΜ πεδίων .....	18
1.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	19
1.7.1 Διαφοροποιήσεις στη λειτουργία δυναμικής & στατικής επαγωγικής φόρτισης..	19
1.7.2 Επίδραση της επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής.....	21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	25
2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	25
2.1.1 Επαγωγική σύζευξη.....	25
2.1.2 Καλώδια Litz.....	27
2.1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικής φόρτισης .....	29
2.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ.....	31
2.2.1 Τοπολογίες αντιστάθμισης ενός πυκνωτή .....	31
2.2.2 Τοπολογίες συνδυασμού στοιχείων.....	35
2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΖΕΥΚΤΗ .....	39
2.3.1 Προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων .....	41
2.3.2 Μαγνητικές διατάξεις στατικής επαγωγικής φόρτισης .....	44
2.3.3 Επίδραση του μεγέθους της διάταξης στη μεταφερόμενη ισχύ.....	54
2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ .....	55
2.4.1 Έλεγχος στο πρωτεύον .....	56
2.4.2 Έλεγχος στο δευτερεύον .....	57
2.4.3 Έλεγχος και στις δύο πλευρές του συστήματος .....	58
2.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ ΣΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	59
2.6 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	62
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ</b> .....	65
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	65
3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ .....	66
3.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	68
3.4 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΩΝ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΩΝ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ .....	74
3.5 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	79

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ</b> .....	81
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	81
4.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	82
4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΛΥΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ .....	87
4.3.1 Έλεγχος στο πρωτεύον .....	89
4.3.2 Έλεγχος στο δευτερεύον .....	91
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	94
4.4.1 Μαγνητική διάταξη .....	94
4.4.2 Εφαρμογή του προβλήματος βελτιστοποίησης .....	95
4.4.3 Προσομοίωση του συστήματος ελέγχου .....	102
4.5 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΗΜ ΠΕΔΙΩΝ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	107
4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	114
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ &amp; ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ</b> .....	115
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	115
5.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΖΕΥΚΤΗ.....	115
5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	117
5.4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ & ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	119
5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	125
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ</b> .....	127
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	127
6.2 ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ.....	128
6.2.1 Στατική επαγωγική φόρτιση.....	128
6.2.2 Δυναμική φόρτιση .....	132
6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ .....	135
6.3.1 Επίδραση της στατικής επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής .....	137
6.3.2 Επίδραση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής.....	142
6.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΠΕ ΣΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΑΡΙΘΜΟ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΔΥΝΑΤΑΙ ΝΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΕΙ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	145
6.5 ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	148
6.5.1 Περιγραφή συστήματος διαχείρισης ενέργειας.....	148
6.5.2 Τροποποίηση συστημάτων επαγωγικής φόρτισης για την ενσωμάτωσή τους στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας .....	149
6.5.3 Εφαρμογή του συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας για την αποφυγή προβλημάτων του δικτύου.....	152
6.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	156

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΒΟΛΗ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ</b> .....	159
7.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	159
7.2 ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ .....	163
7.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	165
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Α .....	167
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Β .....	168
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Γ .....	173
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Δ .....	176
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Ε .....	180
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	184



# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1-1: ΒΑΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	2
ΕΙΚΟΝΑ 1-2: (Α) ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ (Β) ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	3
ΕΙΚΟΝΑ 1-3: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΟΠΟΥ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ «ΕΙΣΕΡΧΕΤΑΙ» ΣΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ [5]-[6]. .....	4
ΕΙΚΟΝΑ 1-4: (Α) ΠΡΩΙΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ, ΠΑΡΟΜΟΙΟ ΜΕ ΕΝΑ ΣΥΝΗΘΙΣΜΕΝΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ [7], (Β) ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΦΕΡΡΙΤΗ.....	4
ΕΙΚΟΝΑ 1-5: ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΣΥΖΕΥΚΤΕΣ (Α) ΔΙΠΛΗΣ-ΟΨΕΩΣ ΚΑΙ (Β) ΜΟΝΗΣ ΟΨΕΩΣ [4]. .....	5
ΕΙΚΟΝΑ 1-6: ΤΥΠΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΔΙΠΛΗΣ ΟΨΕΩΣ[11],[13]. .....	5
ΕΙΚΟΝΑ 1-7: ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΔΙΠΛΗΣ ΟΨΕΩΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΠΛΟΚΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ [14]. ..	6
ΕΙΚΟΝΑ 1-8: ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΜΟΝΗΣ ΟΨΗΣ: (Α) ΚΥΚΛΙΚΗ [15], (Β) ΟΒΑΛ [23] ΚΑΙ (Γ) ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ [24]. .....	6
ΕΙΚΟΝΑ 1-9: ΜΟΝΗΣ ΟΨΕΩΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΔΥΟ ΠΗΝΙΩΝ [24]: (Α) DD ΔΙΑΤΑΞΗ, (Β) DDQ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ (Γ) ΔΙΠΟΛΙΚΗ [24]. .....	6
ΕΙΚΟΝΑ 1-10: (Α) ΕΝΙΑΙΑ [25] ΚΑΙ (Β) ΤΜΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	7
ΕΙΚΟΝΑ 1-11: ΕΝΙΑΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (Α) ΤΥΠΟΥ-Ε, (Β) ΤΥΠΟΥ-Υ, (Γ) ΤΥΠΟΥ-Ω [27] .....	8
ΕΙΚΟΝΑ 1-12: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΥΠΟΥ-Ω ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΛΙΓΟΤΕΡΟΥ ΦΕΡΡΙΤΗ [27] .....	8
ΕΙΚΟΝΑ 1-13: ΕΝΙΑΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΥΠΟΥ-Ι [30]. .....	8
ΕΙΚΟΝΑ 1-14: ΚΑΤΑΤΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΙΑΙΑΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ [32] .....	9
ΕΙΚΟΝΑ 1-15: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΠΗΝΙΟΥ. ....	13
ΕΙΚΟΝΑ 1-16: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ BOMBARDIER ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ: (Α) ΛΕΩΦΟΡΕΙΩΝ [40] ΚΑΙ (Β) ΕΠΙΒΑΤΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ. ....	14
ΕΙΚΟΝΑ 1-17: ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗ ΤΟΥ ΟΔΗΓΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΠΗΝΙΟΥ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ [41]. .....	15
ΕΙΚΟΝΑ 2-1: (Α) ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΣΤΟ ΠΗΝΙΟ 1 ΠΑΡΑΓΕΙ ΜΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΗ ΣΤΟ ΠΗΝΙΟ 2 (Β) ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΣΤΟ ΠΗΝΙΟ 2 ΠΑΡΑΓΕΙ ΜΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΗ ΣΤΟ ΠΗΝΙΟ 1 [98] .....	25
ΕΙΚΟΝΑ 2-2: ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΗ ΠΟΥ ΔΙΕΡΧΕΤΑΙ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΗΝΙΟΥ ΜΕ Ν ΕΛΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑ Ι [98]... 27	
ΕΙΚΟΝΑ 2-3: (Α) ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΖΕΥΚΤΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ (Β) ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΖΕΥΚΤΗ.....	27
ΕΙΚΟΝΑ 2-4: (Α) ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ, ΛΟΓΩ (Α) ΤΟΥ ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ (Β) ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΓΓΥΤΗΤΑΣ [102] .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 2-5: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ LITZ .....	29
ΕΙΚΟΝΑ 2-6: ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΖΕΥΚΤΗ, ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ .....	30
ΕΙΚΟΝΑ 2-7: ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΖΕΥΚΤΗ, ΟΠΟΥ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ Η ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ $R_L$ .....	30
ΕΙΚΟΝΑ 2-8: ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .31	
ΕΙΚΟΝΑ 2-9: ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ: (Α) ΣΕΙΡΑ-ΣΕΙΡΑ, (Β) ΣΕΙΡΑ-ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ, (Γ) ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ-ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ (Δ) ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ-ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ. ....	31
ΕΙΚΟΝΑ 2-10: LCL ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ .....	35
ΕΙΚΟΝΑ 2-11: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ LCL ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΙΣ (2.59)-(2.62) [104] .....	37
ΕΙΚΟΝΑ 2-12: LCC ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ .....	37
ΕΙΚΟΝΑ 2-13: ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	44
ΕΙΚΟΝΑ 2-14: ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΝΙΑΙΟΥ ΦΕΡΡΙΤΗ: (Α) ΚΥΚΛΙΚΗ, (Β) ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ .....	45
ΕΙΚΟΝΑ 2-15: ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΡΑΒΔΩΝ ΦΕΡΡΙΤΗ. ....	46
ΕΙΚΟΝΑ 2-16: (Α) ΟΒΑΛ ΔΙΑΤΑΞΗ ΡΑΒΔΩΝ ΦΕΡΡΙΤΗ & (Β) ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΣΥΓΚΡΙΝΟΝΤΑΣ ΟΒΑΛ ΚΑΙ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΑΡΟΜΟΙΟΥ ΕΜΒΑΔΟΥ.....	47

ΕΙΚΟΝΑ 2-17: (Α) ΔΙΑΤΑΞΗ ΡΑΒΔΩΝ ΦΕΡΡΙΤΗ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ ΟΣΟ ΤΟ ΔΥΝΑΤΟΝ ΠΙΟ ΛΕΠΤΕΣ ΣΕ ΠΑΧΟΣ ΚΑΙ ΠΙΟ ΜΑΚΡΙΕΣ ΣΕ ΜΗΚΟΣ & (Β) ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΟΥ ΑΞΙΟΠΟΙΟΥΝ ΤΟΝ ΙΔΙΟ ΟΓΚΟ ΦΕΡΡΙΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥΣ .....	47
ΕΙΚΟΝΑ 2-18: ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΗ ΤΗΣ DD ΔΙΑΤΑΞΗΣ [19] .....	48
ΕΙΚΟΝΑ 2-19: (Α) ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ DD ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ (Β) ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΔΙΑΚΕΝΟ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	49
ΕΙΚΟΝΑ 2-20: ΑΝΟΧΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ DD ΓΙΑ ΕΝΑ ΔΙΑΚΕΝΟ ΙΣΟ ΜΕ 19 ΕΚΑΤΟΣΤΑ, ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ Q ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΜΙΑΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ 3.6kW, ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ (Α) X & (Β) Y .....	49
ΕΙΚΟΝΑ 2-21: (Α) ΔΙΑΤΑΞΗ DDQ ΚΑΙ (Β) ΑΝΟΧΗ ΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Y, ΓΙΑ ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ DD (ΠΡΩΤΕΥΟΝ) – DDQ (ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ) ΣΕ ΕΝΑ ΔΙΑΚΕΝΟ ΙΣΟ ΜΕ 19 ΕΚΑΤΟΣΤΑ. ....	50
ΕΙΚΟΝΑ 2-22: ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΟ Q ΠΗΝΙΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ [19] .....	50
ΕΙΚΟΝΑ 2-23: (Α) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΠΗΝΙΩΝ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ BP ΚΑΙ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ C ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΠΗΝΙΩΝ ΑΥΤΩΝ & (Β) ΑΝΟΧΗ ΣΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Y, ΓΙΑ ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ DD (ΠΡΩΤΕΥΟΝ) – BP (ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ) ΣΕ ΕΝΑ ΔΙΑΚΕΝΟ ΙΣΟ ΜΕ 19 ΕΚΑΤΟΣΤΑ. ....	52
ΕΙΚΟΝΑ 2-24: (Α) ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕ ΔΙΑΜΕΤΡΟ 68CM ΠΕΡΙΠΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΟΜΟΙΑ ΧΡΗΣΗ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΔΥΟ ΠΗΝΙΩΝ & (Β) ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΔΙΑΚΕΝΟ ΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΝΟΣ ΚΑΙ ΔΥΟ ΠΗΝΙΩΝ .....	53
ΕΙΚΟΝΑ 2-25: ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΜΗ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ $P_{su}$ ΚΑΙ ΑΝΑΛΟΓΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ Q ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ .....	53
ΕΙΚΟΝΑ 2-26: ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟ ΔΙΑΚΕΝΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ BP ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ. ....	55
ΕΙΚΟΝΑ 2-27: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΕΝΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ. ....	56
ΕΙΚΟΝΑ 2-28: (Α) DC/AC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ, (Β) ΠΑΛΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΑ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ, ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΜΕ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΜΕΣΩ ΑΠΑΛΟΙΦΗΣ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ .....	56
ΕΙΚΟΝΑ 2-29: ΈΛΕΓΧΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ: (Α) ΑΠΛΟΣ ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΛΕΓΚΤΗ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ [108], (Β) ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΣΤΟΝ ΑΝΟΡΘΩΤΗ, (Γ) ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΜΕ 4 ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	58
ΕΙΚΟΝΑ 2-30: ΈΛΕΓΧΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ & ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΜΕ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΥΟ ΠΛΕΥΡΩΝ [57].....	59
ΕΙΚΟΝΑ 2-31: (Α) ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΣΥΖΕΥΚΤΗΣ ΟΠΩΣ ΣΧΕΔΙΑΖΕΤΑΙ ΣΤΟ ANSYS ΚΑΙ (Β) ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ. ....	62
ΕΙΚΟΝΑ 2-32: (Α) ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ Z & (Β) ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ... 62	62
ΕΙΚΟΝΑ 3-1: (Α) ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ $x_1$ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ, ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΚΑΙ (Β) ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΖΕΥΚΤΗ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ $x_1$ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ. ....	66
ΕΙΚΟΝΑ 3-2: ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΥΖΕΥΚΤΗ ΣΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΕΙΡΑ-ΣΕΙΡΑ ΚΑΙ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ $x_1$ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ. ....	66
ΕΙΚΟΝΑ 3-3: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ $L_1, L_2$ ΚΑΙ $M$ ΜΕ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ. .69	69
ΕΙΚΟΝΑ 3-4: (Α) ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ (Β) ΌΡΟΣ Z ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΙΣΕΣ ΜΕ 0CM, 15CM ΚΑΙ 30CM (ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 0CM ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ).....	70
ΕΙΚΟΝΑ 3-5: ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ) ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ, ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ .....	70
ΕΙΚΟΝΑ 3-6: (Α) ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΚΑΙ (Β) ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΠΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΕΙ ΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΣΕ ΚΑΘΕ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ.....	71
ΕΙΚΟΝΑ 3-7: (Α) ΌΡΟΣ Z ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ, (Β) ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΟΝΤΑ ΣΤΟ ΜΗΔΕΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΡΟ Z. ....	71



ΕΙΚΟΝΑ 3-8: (Α) ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΙΣΗΣ ΜΕ 30kHz & (Β) ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ, $P_{OUT}$ , ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ. ....	72
ΕΙΚΟΝΑ 3-9: (Α) ΌΡΟΣ $Z$ ΚΑΙ (Β) ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ ΤΗΣ $P_{OUT}$ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ, ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ $f=32kHz$ Η $f=28kHz$ . ....	73
ΕΙΚΟΝΑ 3-10: ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ, $x$ , ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΙΣΗΣ ΜΕ (Α) $f=32kHz$ ΚΑΙ (Β) $f=28kHz$ . ....	73
ΕΙΚΟΝΑ 3-11: ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΠΥΚΝΩΤΗ $C_1$ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ (Α) $x_C=0cm$ ΚΑΙ (Β) $x_C=15cm$ ....	77
ΕΙΚΟΝΑ 3-12: ΠΟΣΟΣΤΟ ΜΕΙΩΣΗΣ, $P_{RED}$ , ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΞΟΔΟΥ $P_{OUT}$ , ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΕΥΞΙΜΗ, $P_{OUT\_MAX}$ , ΟΠΩΣ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΣΤΗΝ (3.17). ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΠΥΚΝΩΤΗ $C_2$ ΓΙΑ ΤΗ ΘΕΣΗ ΟΠΟΥ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΕΙΝΑΙ ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ( $x_C=60cm$ ). ....	77
ΕΙΚΟΝΑ 3-13: ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ, $P_{OUT}$ , ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ, ΕΠΙΛΕΓΟΝΤΑΣ ΤΟΝ ΠΥΚΝΩΤΗ $C_2$ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ $x_C$ . ....	78
ΕΙΚΟΝΑ 3-14: (Α) ΜΕΣΗ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ, $P_{OUT\_AVG}$ , ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΙΝ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ $C_2$ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΠΙΘΑΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ $x_C$ & (Β) ΜΕΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗ, $EFF_{AVG}$ , ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΙΝ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ $C_1$ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΠΙΘΑΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΟΥ $x_C$ . ....	78
ΕΙΚΟΝΑ 4-1: ΘΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ, ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ: (Α) ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΕΙΣΕΡΧΕΤΑΙ ΣΤΟ ΣΤΑΘΜΟ – ΠΧΑ, (Β) ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΑΚΡΙΒΩΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ - ΠΥΑ, (Γ) ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΕΞΕΡΧΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΣΤΑΘΜΟ – ΠΧΑ. ....	87
ΕΙΚΟΝΑ 4-2: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ. ....	90
ΕΙΚΟΝΑ 4-3: ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ. ....	90
ΕΙΚΟΝΑ 4-4: ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΕΛΕΓΧΟ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ. ....	91
ΕΙΚΟΝΑ 4-5: (Α) ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΕΛΕΓΧΟ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ & (Β) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ $\beta$ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ $S_1$ ΚΑΙ $S_2$ . ....	91
ΕΙΚΟΝΑ 4-6: ΠΑΛΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (Α) $S_1$ ΚΑΙ (Β) $S_2$ . ....	92
ΕΙΚΟΝΑ 4-7: ΚΥΚΛΙΚΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΣΥΖΕΥΚΤΗΣ ΠΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΘΗΚΕ ΣΤΟ ANSYS. ....	95
ΕΙΚΟΝΑ 4-8: ΤΙΜΕΣ ΕΠΑΓΩΓΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ. ....	95
ΕΙΚΟΝΑ 4-9: ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ $EFF_{TARGET}$ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ. ....	96
ΕΙΚΟΝΑ 4-10: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ $\{EFF_{FEAS}, E_{FEAS}\}$ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (ΠΥΑ). Η ΠΥΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ ΔΙΠΛΑ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ. ....	98
ΕΙΚΟΝΑ 4-11: ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ-ΕΞΟΔΟΥ & ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ, ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΙΣΗΣ ΜΕ 40cm. ....	98
ΕΙΚΟΝΑ 4-12: ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΣΤΟ ΟΧΗΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ 85kHz ΚΑΙ ΕΝΑ ΕΥΡΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ 81.38kHz – 90kHz Η 20kHz – 90kHz. ΤΑ ΣΗΜΕΙΑ ΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΥΝ ΤΙΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ $\{EFF_{FEAS}, E_{FEAS}\}$ ΣΕ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (ΠΥΑ). Η ΠΥΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ ΔΙΠΛΑ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ. ....	99
ΕΙΚΟΝΑ 4-13: ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ & ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ, ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΓΙΑ $R_L=2\Omega$ . ....	101
ΕΙΚΟΝΑ 4-14: ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ: (Α) ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΜΕ $I_1=10A$ ΚΑΙ (Β) ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕ $I_1=25A$ . ....	101
ΕΙΚΟΝΑ 4-15: ΡΕΥΜΑ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ. ....	103
ΕΙΚΟΝΑ 4-16: ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ. ....	103
ΕΙΚΟΝΑ 4-17: ΤΑΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ( $V_{BAT}$ ) ΚΑΙ ΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ Γ-Δ ( $V_{\Gamma\Delta}$ ) ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ 4-2. ....	104

ΕΙΚΟΝΑ 4-18: (Α) ΡΕΥΜΑ ΣΤΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΠΗΝΙΟ ΚΑΙ (Β) ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ $R_2$ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΙΣΧΥ ΕΙΣΟΔΟΥ ( $P_{losses}, R2/Pin$ ).....	104
ΕΙΚΟΝΑ 4-19: ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ $R_1$ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΙΣΧΥ ΕΙΣΟΔΟΥ ( $P_{losses}, R1/Pin$ ).....	105
ΕΙΚΟΝΑ 4-20: ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ, $S_{IN}$ , ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ, $S_{OUT}$ , ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ .....	106
ΕΙΚΟΝΑ 4-21: ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΕΞΟΔΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΧΑΜΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (Α) ΧΩΡΙΣ ΚΑΙ (Β) ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ.....	107
ΕΙΚΟΝΑ 4-22: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΟΤΑΝ ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ $I_1$ ΕΙΝΑΙ ΙΣΟ ΜΕ (Α) 25Α, (Β) 10Α ΚΑΙ (Γ) 5Α. ....	109
ΕΙΚΟΝΑ 4-23: ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΟΠΟΥ ΙΚΑΝΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΤΑ ΟΡΙΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΠΟΥ ΤΙΘΕΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΙΣ ΟΔΗΓΙΕΣ ICNIRP ΚΑΙ ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟ.....	109
ΕΙΚΟΝΑ 4-24: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΠΗΝΙΟ, ΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΜΕ $I_{1,MAX}=25A$ , ΣΕ ΜΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ 20CM ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Χ. ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΟΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΠΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΚΑΙ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ (Α) Χ ΚΑΙ (Β) Υ. ....	110
ΕΙΚΟΝΑ 4-25: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΠΗΝΙΟ, ΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΜΕ $I_{1,MAX}=25A$ , ΟΤΑΝ ΤΟ ΟΧΗΜΑ (Α) ΕΙΣΕΡΧΕΤΑΙ ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΜΕ ΜΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ -80CM ΚΑΙ (Β) ΕΞΕΡΧΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΜΕ ΜΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΙΣΗ ΜΕ +80CM. ....	111
ΕΙΚΟΝΑ 4-26: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΠΗΝΙΟ, ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΥ ΜΕΙΩΝΕΙ ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΣΕ ΜΙΑ ΤΙΜΗ $I_{1,LOW}=5A$ . ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΕΙΣΕΡΧΕΤΑΙ ΣΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ ΜΕ ΜΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΙΣΗ ΜΕ -80CM. ....	111
ΕΙΚΟΝΑ 4-27: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΠΗΝΙΟ, ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΜΕ ΕΝΑ ΡΕΥΜΑ $I_{1,MAX}=25A$ , ΓΙΑ ΜΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΙΣΗ ΜΕ (Α) -20CM ΚΑΙ (Β) +60CM.....	112
ΕΙΚΟΝΑ 4-28: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΠΗΝΙΟ, ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΜΕ ΕΝΑ ΡΕΥΜΑ $I_{1,MAX}=25A$ , ΓΙΑ ΜΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΙΣΗ ΜΕ (Α) -130CM ΚΑΙ (Β) +130CM.....	113
ΕΙΚΟΝΑ 4-29: ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΠΗΝΙΟ, ΓΙΑ ΜΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΙΣΗ ΜΕ -130CM, ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟ ΟΠΟΙΟ ΘΕΤΕΙ ΤΟ ΡΕΥΜΑ ΣΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ ΙΣΟ ΜΕ $I_{1,LOW}=5A$ . ....	113
ΕΙΚΟΝΑ 5-1: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ .....	116
ΕΙΚΟΝΑ 5-2: (Α) ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΡΑΒΔΟΥ ΦΕΡΡΙΤΗ, (Β) ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟΥ ΦΕΡΡΙΤΗ & (Γ) ΚΑΛΩΔΙΟ LITZ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.....	116
ΕΙΚΟΝΑ 5-3: ΤΙΜΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ: (Α) ΤΗΝ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ $L_1$ , (Β) ΤΗΝ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ $L_2$ , ΚΑΙ (Γ) ΤΗΝ ΑΜΟΙΒΑΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗ $M$ .....	117
ΕΙΚΟΝΑ 5-4: ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΛΟΠΟΙΟΥΜΕΝΟ ΣΥΖΕΥΚΤΗ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ $EFF_{TARGET}$ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ .....	118
ΕΙΚΟΝΑ 5-5: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ $\{EFF_{FEAS}, E_{FEAS}\}$ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (ΠΥΑ) ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΥΚΛΙΚΟ ΣΥΖΕΥΚΤΗ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.. Η ΠΥΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ ΔΙΠΛΑ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ .....	118
ΕΙΚΟΝΑ 5-6: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ .....	120
ΕΙΚΟΝΑ 5-7: ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ .....	120
ΕΙΚΟΝΑ 5-8: ΑΝΩ ΚΑΙ ΚΑΤΩ ΟΨΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.....	121
ΕΙΚΟΝΑ 5-9: ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ LTSR 6-NP ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ .....	121
ΕΙΚΟΝΑ 5-10: ΓΩΝΙΑ ΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ, ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΤΗΣ ΕΚΑΣΤΟΤΕ ΕΠΙΘΥΜΗΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ $I_1$ .....	122
ΕΙΚΟΝΑ 5-11: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	122
ΕΙΚΟΝΑ 5-12: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟ $I_{MAX}=3A$ ΣΕ $I_{LOW}=1A$ , ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΘΩΣ ΤΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΚΙΝΕΙΤΑΙ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ .....	123

ΕΙΚΟΝΑ 5-13: ΡΕΥΜΑ ΣΤΗΝ ΠΛΕΥΡΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΟΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ (Α) 0CM, (Β) 4CM & (Γ) 10CM.....	124
ΕΙΚΟΝΑ 5-14: ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ ΟΠΩΣ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΣΤΙΣ (5.1) ΚΑΙ (5.2) ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ .....	125
ΕΙΚΟΝΑ 6-1: ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ .....	128
ΕΙΚΟΝΑ 6-2: ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	129
ΕΙΚΟΝΑ 6-3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (ΗΟ).....	130
ΕΙΚΟΝΑ 6-4: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΩΝ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ .....	131
ΕΙΚΟΝΑ 6-5: ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΔΥΝΑΤΑΙ ΝΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΟΥΝ ΣΕ ΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	132
ΕΙΚΟΝΑ 6-6: ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΜΕΤΑΚΙΝΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟΥΣ ΔΡΟΜΟΥΣ .....	133
ΕΙΚΟΝΑ 6-7: ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΕ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥΣ ΦΟΡΤΙΣΤΕΣ .....	134
ΕΙΚΟΝΑ 6-8: (Α) ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗ Μ.Τ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΚΑΙ (Β) ΜΟΝΟΓΡΑΜΜΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	135
ΕΙΚΟΝΑ 6-9: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΦΙΞΗ ΤΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΗΟ ΣΤΟ ΣΠΙΤΙ, ΕΧΟΝΤΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΕΙ ΤΟ ΤΕΛΕΥΤΑΙΟ ΤΑΞΙΔΙ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ [127].....	136
ΕΙΚΟΝΑ 6-10: ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ Α ΚΑΙ Β .....	137
ΕΙΚΟΝΑ 6-11: ΣΕΝΑΡΙΑ Α ΚΑΙ Β: (Α) ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΗΝ ΩΡΑ ΛΙΧΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ, ΚΑΙ (Β) ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΩΣ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΟΡΙΟΥ ΚΑΘΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ. ....	138
ΕΙΚΟΝΑ 6-12: ΑΥΞΗΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Α (ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ) ΓΙΑ ΤΑ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΣΕΝΑΡΙΑ. ....	138
ΕΙΚΟΝΑ 6-13: ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ (Α) 100 ΧΡΗΣΤΩΝ (ΣΕΝΑΡΙΟ Γ-Ι) ΚΑΙ (Β) 300 ΧΡΗΣΤΩΝ (ΣΕΝΑΡΙΟ Γ-ΙΙ) ....	139
ΕΙΚΟΝΑ 6-14: (Α) ΖΗΤΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ Β, Γ-Ι ΚΑΙ Γ-ΙΙ ΚΑΙ (Β) ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΟΥΝ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ.....	139
ΕΙΚΟΝΑ 6-15: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ Γ-Ι ΚΑΙ Γ-ΙΙ .....	140
ΕΙΚΟΝΑ 6-16: ΑΥΞΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ Γ-Ι ΚΑΙ Γ-ΙΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Β. ....	140
ΕΙΚΟΝΑ 6-17: ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ (Α) Γ-Ι ΚΑΙ (Β) Γ-ΙΙ ...	141
ΕΙΚΟΝΑ 6-18: ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΖΥΓΟΥΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ Γ-Ι ΚΑΙ Γ-ΙΙ.....	141
ΕΙΚΟΝΑ 6-19: ΖΗΤΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ (Α) Δ-Ι ΚΑΙ (Β) Δ-ΙΙ. ....	142
ΕΙΚΟΝΑ 6-20: ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ Δ-Ι ΚΑΙ Δ-ΙΙ.....	143
ΕΙΚΟΝΑ 6-21: ΑΥΞΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ, ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Β, ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ Δ-Ι ΚΑΙ Δ-ΙΙ.....	143
ΕΙΚΟΝΑ 6-22: ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟΥΣ ΖΥΓΟΥΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ Δ-Ι ΚΑΙ Δ-ΙΙ.....	144
ΕΙΚΟΝΑ 6-23: ΗΜΕΡΗΣΙΟ, ΩΡΙΑΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΩΣ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΤΟΥΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	145
ΕΙΚΟΝΑ 6-24:ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ Φ/Β ΙΣΧΥΟΣ 10MW ΣΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΟΠΟΥ 300 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΑ ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΦΟΡΤΙΣΤΕΣ. ....	145
ΕΙΚΟΝΑ 6-25:(Α) ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΗΣ ΠΙΟ ΕΠΙΒΑΡΥΜΕΝΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ (Β) ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΤΙΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ Φ/Β ΙΣΧΥΟΣ 10MW ΣΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΟΠΟΥ 300 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΑ ΣΕ ΣΤΑΤΙΚΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΦΟΡΤΙΣΤΕΣ. ....	146
ΕΙΚΟΝΑ 6-26: ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΟΥΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΟΥ ΛΗΦΘΕΙ ΥΠΟΨΗΝ Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ 10MW Η 20 MW Φ/Β.....	146
ΕΙΚΟΝΑ 6-27:ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΥΞΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΤΑ 10 Η 20%. ....	147
ΕΙΚΟΝΑ 6-28:ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΘΟΥΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΤΑ 10 Η 20%, ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ 10MW Η 20 MW Φ/Β. ....	147
ΕΙΚΟΝΑ 6-29: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [129] .....	149

ΕΙΚΟΝΑ 6-30: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΙΣΟΔΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	151
ΕΙΚΟΝΑ 6-31: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΣΤΟ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ: (Α) Η ΣΗΜΕΙΩΜΕΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΖΕΤΑΙ ΚΑΙ (Β) Η ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΑΠΟΦΕΥΓΕΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ. ....	153
ΕΙΚΟΝΑ 6-32: (Α) ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΣΤΟΥΣ ΖΥΓΟΥΣ 17 ΚΑΙ 49, (Β) ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΟΥΣ ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΜΕΝΟΥΣ ΖΥΓΟΥΣ, (Γ) ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΕΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ (ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ Η ΣΤΑΤΙΚΩΝ).....	154
ΕΙΚΟΝΑ 6-33: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ 39. ....	155
ΕΙΚΟΝΑ 6-34: (Α) ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ (ΣΤΑΤΙΚΟΥΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥΣ) ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΟΙ ΣΕ ΖΥΓΟΥΣ ΠΟΥ ΕΠΟΝΤΑΙ ΤΗΣ ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΜΕΝΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΑΙ (Β) Η ΥΠΕΡΦΟΡΤΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΑΠΟΦΕΥΓΕΤΑΙ ΜΕ ΤΗ ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ. ....	156
ΕΙΚΟΝΑ Π-Γ-1: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ $P_{su}$ , ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ (Α) ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΦΕΡΡΙΤΗ ΚΑΙ (Β) ΤΟ ΑΝΟΙΓΜΑ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΦΕΡΡΙΤΗ, ΓΙΑ ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΠΕΡΙΠΟΥ 60CM. ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΔΙΠΛΑ ΣΕ ΚΑΘΕ ΔΕΙΚΤΗ ΥΠΟΔΕΙΚΝΥΕΙ ΤΗΝ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ (Η ΜΕΙΩΣΗ) ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ ΦΕΡΡΙΤΗ ΠΟΥ ΕΠΙΦΕΡΕΙ Η ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ Η ΤΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΦΕΡΡΙΤΗ.....	173
ΕΙΚΟΝΑ Π-Γ-2: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΟΣ ΦΕΡΡΙΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗ. ΣΕ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟ ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΜΒΑΔΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΕΙ ΣΤΑΘΕΡΟ. ....	173
ΕΙΚΟΝΑ Π-Γ-3: ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ $P_{su}$ ΣΕ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕ (Α) ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΦΕΡΡΙΤΗ ΚΑΙ (Β) ΤΟ ΑΝΟΙΓΜΑ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΦΕΡΡΙΤΗ, ΓΙΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 50,68CM X 50,68CM. ΤΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ ΔΙΠΛΑ ΣΕ ΚΑΘΕ ΔΕΙΚΤΗ ΥΠΟΔΕΙΚΝΥΕΙ ΤΗΝ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ (Η ΜΕΙΩΣΗ) ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ ΦΕΡΡΙΤΗ ΠΟΥ ΕΠΙΦΕΡΕΙ Η ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ Η ΤΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΦΕΡΡΙΤΗ.....	174
ΕΙΚΟΝΑ Π-Γ-4: (Α)-(Ε) ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΦΕΡΡΙΤΗ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΩΝ, (ΣΤ) ΚΑΤΑΛΛΗΛΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΦΕΡΡΙΤΗ ΓΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ [18]......	174
ΕΙΚΟΝΑ Π-Γ-5: ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΠΟΥ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ Π-Γ-4. ....	175
ΕΙΚΟΝΑ Π-Δ-1: ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ, ΓΕΦΥΡΑ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ & ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΤΑΙ ΣΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ....	176
ΕΙΚΟΝΑ Π-Δ-2: (Α) ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ LTSR 6-NP ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΕΞΟΔΟΥ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ & (Β) ΚΑΤΟΨΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΤΩΝ PIN ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ.....	177
ΕΙΚΟΝΑ Π-Δ-3: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	178
ΕΙΚΟΝΑ Π-Δ-4: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ RELAY ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ SIMULINK, ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ. ....	179

# ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1: ΣΥΜΒΑΤΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ .....	12
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-2: ΒΑΣΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΠΙΠΕΔΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ/ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ (F ΕΙΝΑΙ Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΣΕ Ηz).....	18
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1: ΧΡΗΣΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ LITZ ΚΑΙ ΑΝΟΧΗ ΣΕ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ. Ο ΟΓΚΟΣ ΦΕΡΡΙΤΗ ΕΙΝΑΙ ΙΔΙΟΣ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ. ....	54
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΩΝ $L_1$ , $L_2$ ΚΑΙ $M$ ΜΕ ΠΟΛΥΩΝΥΜΑ 2ΟΥ ΒΑΘΜΟΥ. ....	72
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΚΑΛΩΔΙΟΥ LITZ ΠΟΥ ΛΗΦΘΗΚΕ ΥΠΟΨΗΝ ΓΙΑ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ .....	95
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2: ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....	96
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3: ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΙΣΧΥ ΕΙΣΟΔΟΥ ΠΟΥ ΥΠΟΔΕΙΚΝΟΥΟΝ ΤΗΝ ΕΙΣΟΔΟ, $P_{IN,ENTER}$ , ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΞΟΔΟ, $P_{IN,LEAVE}$ , ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ $R_L$ .....	102
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-4: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	102
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1: ΜΕΓΙΣΤΕΣ ΚΑΙ ΕΛΑΧΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗ ΔΙΑΤΑΞΗ .....	118
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2: ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ, ΓΙΑ ΜΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΙΣΗ ΜΕ 6CM. ....	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ. ....	121
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΓΚΑΟΥΣΙΑΝΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΑΡΞΗΣ ΜΙΑΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	129
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-2: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΓΚΑΟΥΣΙΑΝΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΕΙ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	129
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ .....	135
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-4: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ....	136
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-5: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΗΣ ΓΚΑΟΥΣΙΑΝΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΦΙΞΗ ΤΩΝ ΧΡΗΣΤΩΝ ΗΘ ΣΤΟ ΣΠΙΤΙ, ΕΧΟΝΤΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΕΙ ΤΟ ΤΕΛΕΥΤΑΙΟ ΤΑΞΙΔΙ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ [127]	137
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-6: ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ...	142
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-7: ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΣΘΗΚΑΝ .....	144
ΠΙΝΑΚΑΣ Α-1: ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΗΜ ΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ. ....	167
ΠΙΝΑΚΑΣ Β-1: ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΠΥΚΝΩΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΩΤΕΥΟΝ, $C_1$ , ΣΤΙΣ ΒΑΣΙΚΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΙΝΟΥΜΕΝΗΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗΝ ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ. ΣΕ ΚΑΘΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ Ο ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ ΣΤΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ ΕΠΙΛΕΓΕΤΑΙ ΙΣΟΣ ΜΕ: $C2 = 1/\omega 2L2$ [49] .....	168
ΠΙΝΑΚΑΣ Β-2: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ, $Q$ , ΣΤΟ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝ, ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ [49]. ΟΙ ΤΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΠΥΚΝΩΤΕΣ $C_1$ ΚΑΙ $C_2$ , ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΥΤΗ, ΕΠΙΛΕΓΟΝΤΑΙ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ Β-1 .....	168
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ-1: ΤΙΜΕΣ/ΤΥΠΟΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΗΝ ΕΙΚΟΝΑ Π-Δ-1. ....	177
ΠΙΝΑΚΑΣ Δ-2: ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ $I_{PN}$ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΕΙΤΑΙ.....	177
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-1: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΤΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	180
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-2: “ΚΑΘΟΛΙΚΕΣ” ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ: ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΣΤΟΥΣ ΖΥΓΟΥΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΦΟΡΤΙΟ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ.....	180
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-3: “ΚΑΘΟΛΙΚΕΣ” ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ: ΦΟΡΤΙΟ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΣΤΑΘΜΟΥΣ ΚΑΤΑ 26%.....	180

ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-4: “ΚΑΘΟΛΙΚΕΣ” ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ: ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΟ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΑΚΟΠΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΟΥΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥΣ ΦΟΡΤΙΣΤΕΣ .....	181
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-5:“ΤΟΠΙΚΕΣ” ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ: ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΣΤΟΥΣ ΖΥΓΟΥΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΦΟΡΤΙΟ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ .....	181
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-6:“ΤΟΠΙΚΕΣ” ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΟ ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΥ: ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΥΠΕΡΦΟΡΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΖΥΓΩΝ ΣΕ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ.....	181
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-7: ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΜΙΑ "ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ" ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ: ΘΕΡΜΙΚΑ ΟΡΙΑ ΓΡΑΜΜΩΝ .....	182
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-8 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΜΙΑ "ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ" ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ: ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΣΤΟΥΣ ΖΥΓΟΥΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟ ΦΟΡΤΙΟ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ .....	182
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-9 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΜΙΑ "ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ" ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ: ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΕΤΑΙ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ (ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ) .....	182
ΠΙΝΑΚΑΣ Ε-10 ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΓΙΑ ΜΙΑ "ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΗ ΠΕΡΙΟΧΗ" ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ: ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΠΑΡΟΥΣΙΑΖΕΤΑΙ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ .....	183

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

α	Φάση μεταξύ των τετραγωνικών παλμών ελέγχου του αντιστροφέα DC/AC, στην πλευρά του πρωτεύοντος, που λειτουργεί με έλεγχο της εξόδου μέσω απαλοιφής της τάσης
δ	Επιδερμικό βάθος: απόσταση από την επιφάνεια ενός αγωγού εντός της οποίας ρέει το μεγαλύτερο ποσοστό του ρεύματος
ε	Ηλεκτρική διαπερατότητα
$e_{kj}$	Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (HEΔ) λόγω της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής στο πηνίο k, λόγω του χρονομεταβλητού ρεύματος στο πηνίο j
$e_L$	Αυτο-επαγόμενη Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (HEΔ) σε ένα πηνίο λόγω του χρονομεταβλητού ρεύματος που διαρρέει το πηνίο αυτό
θ	Φάση που αντιστοιχεί στον παλμό ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων του ανορθωτή του δευτερεύοντος, και υποδηλώνει το χρόνο ενεργοποίησής τους
$\theta_{V_{in}}$	γωνία του διανύσματος της τάσης $\widetilde{V}_{in}$
$\theta_{V_{out}}$	γωνία του διανύσματος της τάσης $\widetilde{V}_{out}$
κ	γωνία μεταξύ των $\widetilde{V}_{in}$ και $\widetilde{V}_{out}$
μ	μαγνητική διαπερατότητα
$\mu_i$	Μέση τιμή ενός συστατικού i σε μία γκαουσιανή κατανομή
σ	Ηλεκτρική αγωγιμότητα
$\sigma_i$	Τυπική απόκλιση ενός συστατικού i σε μία γκαουσιανή κατανομή
ΠΥΑ	Περιοχή Υψηλής Απόδοσης
ΠΧΑ	Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης
σ	Αγωγιμότητα ενός αγωγού
$\Sigma(t)$	Μέσος αριθμός οχημάτων που καταλαμβάνουν τους φορτιστές για ένα χρονικό διάστημα (timeslot), t
$\Phi_k$	Μαγνητική ροή που διέρχεται από ένα πηνίο k, λόγω του χρονομεταβλητού ρεύματος που διαρρέει το ίδιο πηνίο
$\Phi_{kj}$	Μαγνητική Ροή που διέρχεται από το πηνίο k, λόγω του χρονομεταβλητού ρεύματος που διαρρέει το πηνίο j
ω	Γωνιακή ταχύτητα
$\omega_{max}$	Μέγιστη τιμή στην οποία περιορίζεται η γωνιακή ταχύτητα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης
$\omega_{min}$	Ελάχιστη τιμή στην οποία περιορίζεται η γωνιακή ταχύτητα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης
$\omega_{P_{out\_max}}$	Γωνιακή ταχύτητα όπου μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου, $P_{out}$ , ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης
$\vec{A}$	Διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό
$a_k$	Συντελεστής του 2 <sup>ου</sup> όρου ενός πολυωνύμου 2 <sup>ου</sup> βαθμού για την έκφραση των αυτεπαγωγών πρωτεύοντος ( $k=L_1$ ) ή δευτερεύοντος ( $k=L_2$ ) και της αμοιβαίας επαγωγής ( $k=M$ )
$\vec{B}$	Πυκνότητα μαγνητικής ροής του πεδίου (ή μαγνητική επαγωγή)
b	Φάση που αντιστοιχεί στον παλμό ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων του ανορθωτή του δευτερεύοντος, και υποδηλώνει το χρόνο απενεργοποίησής τους
$b_k$	Συντελεστής του 1 <sup>ου</sup> όρου ενός πολυωνύμου 2 <sup>ου</sup> βαθμού για την έκφραση των αυτεπαγωγών πρωτεύοντος ( $k=L_1$ ) ή δευτερεύοντος ( $k=L_2$ ) και της αμοιβαίας επαγωγής ( $k=M$ )
$C_{DC,in}$	DC πυκνωτής στην είσοδο του αντιστροφέα DC/AC στην πλευρά του πρωτεύοντος
$C_{DC,out}$	DC πυκνωτής στην έξοδο του ανορθωτή AC/DC στην πλευρά του δευτερεύοντος
$C_{f_k}$	Τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή συντονισμού στην τοπολογία LCC
$C_k$	Τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή αντιστάθμισης (εν σειρά ή παράλληλα τοποθετημένος) στην πλευρά του πρωτεύοντος ( $k=1$ ) ή του δευτερεύοντος ( $k=2$ )

$C_{j,max}$	Μέγιστη τιμή στην οποία περιορίζεται η χωρητικότητα του πυκνωτή $j$ στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η μεταβλητή $j$ υποδεικνύει την πλευρά του πρωτεύοντος – 1, ή του δευτερεύοντος – 2
$C_{j,min}$	Ελάχιστη τιμή στην οποία περιορίζεται η χωρητικότητα του πυκνωτή $j$ στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η μεταβλητή $j$ υποδεικνύει την πλευρά του πρωτεύοντος – 1, ή του δευτερεύοντος – 2
$C_k$	Σταθερός όρος ενός πολυωνύμου 2 <sup>ου</sup> βαθμού για την έκφραση των αυτεπαγωγών πρωτεύοντος ( $k=L_1$ ) ή δευτερεύοντος ( $k=L_2$ ) και της αμοιβαίας επαγωγής ( $k=M$ )
$\vec{D}$	Ηλεκτρική μετατόπιση
$D_1$	Η διάμετρος των ανεξάρτητων αγωγών, εντός ενός καλωδίου Litz (μετρούμενη σε ίντσες)
$D_0$	Διάμετρος του συνολικού καλωδίου Litz, που περιέχει όλους τους ανεξάρτητους αγωγούς
$\vec{E}$	Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου
$E_{total}$	Ενέργεια που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος, καθώς το όχημα διέρχεται πάνω από το φορτιστή
$E_{feas}$	Μεταφορά ενέργειας στην μπαταρία του οχήματος, που αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή τιμή απόδοσης ώστε το πρόβλημα βελτιστοποίησης να έχει εφικτή λύση.
$E_{limit}$	Μεταφερόμενη ενέργεια για την επίτευξη μέγιστης απόδοσης
$eff$	Απόδοση σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης
$eff_{avg}$	Μέση απόδοση, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή
$eff_{energy}$	Ενεργειακή απόδοση μεταξύ των χρονικών σημείων $t_1$ και $t_2$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$eff_{exp,i}$	Η απόδοση της μεταφοράς ενεργού ισχύος μεταξύ της DC εισόδου στον αντιστροφέα του πρωτεύοντος και της αντίστασης φορτίου $R_L$ , όπως λαμβάνεται από πειραματικά αποτελέσματα, για μία μετατόπιση $x_i$
$eff_{feas}$	Μέγιστη δυνατή τιμή της απόδοσης, ώστε το πρόβλημα βελτιστοποίησης να έχει εφικτή λύση
$eff_i$	Απόδοση σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης, για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$eff_{limit}$	Απόδοση που αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή μεταφορά ενέργειας
$eff_{target}$	Επιθυμητή τιμή για την απόδοση του συστήματος, εφαρμόζοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης
$eff_{theoretical,i}$	Η θεωρητικά υπολογισμένη απόδοση μεταξύ της ισχύος στην ισοδύναμη αντίσταση φορτίου $P_{out,i}$ και της ισχύος στην έξοδο του αντιστροφέα του πρωτεύοντος $P_{in,i}$ , για μία μετατόπιση $x_i$
$f$	Συχνότητα λειτουργίας
$f_{max}$	Μέγιστη τιμή στην οποία περιορίζεται η συχνότητα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης
$f_{min}$	Ελάχιστη τιμή στην οποία περιορίζεται η συχνότητα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης
$G$	Μεταβλητή για τον υπολογισμό της αντίστασης ενός καλωδίου Litz
$h$	Ωρα της ημέρας που εξετάζεται για τον προσδιορισμό της πιθανότητας εξυπηρέτησης οχήματος από ένα φορτιστή
$h_{max}$	Ωρα της ημέρας όπου παρατηρείται η μέγιστη πιθανότητα φόρτισης
$\vec{H}$	Ένταση του μαγνητικού πεδίου
$H_s$	Αναλογία αντίστασης του κάθε ανεξάρτητου αγωγού σε ένα καλώδιο Litz
$I_c$	Ρεύμα Επαφής
$I_{C_k}$	Ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή $C_k$
$I_{in}$	Ρεύμα στην είσοδο του ισοδύναμου κυκλώματος επαγωγικής φόρτισης (πριν την τοπολογία αντιστάθμισης στο πρωτεύον)
$I_k$	Ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον ( $k=1$ ) ή το δευτερεύον ( $k=2$ ) πηνίο
$I_{k,i}$	Ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον ( $k=1$ ) ή το δευτερεύον ( $k=2$ ) πηνίο, για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$I_{k,max}$	Μέγιστη τιμή του ρεύματος που δύναται να διαρρέει το πηνίο πρωτεύοντος ( $k=1$ ) ή δευτερεύοντος ( $k=2$ )



$I_{1,EMS,max}$	Μέγιστη τιμή του ρεύματος που ορίζεται για τον έλεγχο στην πλευρά του πρωτεύοντος για την υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας
$I_{1,EMS,low}$	Χαμηλή τιμή του ρεύματος που ορίζεται για τον έλεγχο στην πλευρά του πρωτεύοντος για την υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας
$I_{1,low}$	Χαμηλή τιμή του ρεύματος του πρωτεύοντος για λειτουργία στην περιοχή χαμηλής απόδοσης
$I_L$	Ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση φορτίου $R_L$
$I_{sc}$	Ρεύμα βραχυκυκλώσεως στην πλευρά του δευτερεύοντος
$\vec{j}$	Πυκνότητα ρεύματος
$\vec{J}_o$	Επιβαλλόμενη πυκνότητα ρεύματος
$K_s$	Σταθερά που εξαρτάται από τον αριθμό $N_s$ των αγωγών σε όλο το καλώδιο Litz
$K_t$	Όρος που εκφράζει την εξάρτηση μεταξύ του ρεύματος δευτερεύοντος και του ρεύματος πρωτεύοντος, ανάλογα με τη συνδεσμολογία των πυκνωτών αντιστάθμισης στην πλευρά του πρωτεύοντος ( $t=\sigma$ : εν σειρά / $t=\pi$ : παράλληλα / $t=LCL$ : LCL τοπολογία / $t=LCC$ : LCC τοπολογία)
$k_1$ ή $k_2$	Όρος που εκφράζει την αύξηση ή μείωση της αυτεπαγωγής $L_{1_i}$ και $L_{2_i}$ σε σχέση με τις $L_{1_c}$ και $L_{2_c}$
$L_{1_c}$ ή $L_{2_c}$	Αυτεπαγωγές στη μετατόπιση $x_i=x_c$ , για τις οποίες υπολογίζονται οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης $C_1$ και $C_2$ , με στόχο μία μέγιστη ισχύ και απόδοση στη συγκεκριμένη μετατόπιση
$L_k$	Αυτεπαγωγή του πηνίου $k$
$L_{k,i}$	Αυτεπαγωγή του πηνίου $k$ , για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$L_{k,max}$	Μέγιστη τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου $k$ , καθώς το όχημα διέρχεται πάνω από το φορτιστή
$L_{k,min}$	Ελάχιστη τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου $k$ , καθώς το όχημα διέρχεται πάνω από το φορτιστή
$L_{fk}$	Αυτεπαγωγή του πηνίου συντονισμού στις τοπολογίες LCL και LCC
$M_{ki}/M_{jk}/M$	Αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των πηνίων $k$ και $j$
$M_i$	Αμοιβαία επαγωγή, για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$N_h$	Αριθμός δυναμικών φορτιστών που λειτουργούν την ώρα $h$
$N_k$	Ελίγματα στο πηνίο $k$ σε ένα σύστημα πηνίων
$N_m$	Μέγιστος αριθμός δυναμικών φορτιστών που είναι εγκατεστημένοι στο δίκτυο
$N_{samples}$	Αναλογικά δείγματα που λαμβάνει ο ADC μετατροπέας του DSP
$N_s$	Συνολικός αριθμός αγωγών σε ένα καλώδιο Litz
$q_1$	Συντελεστής που εκφράζει τη γραμμική μεταβολή της ισχύος εξόδου, $P_{out_i}$ , μεταξύ δύο σημείων
$q_2$	Σταθερός όρος που εκφράζει τη γραμμική μεταβολή της ισχύος εξόδου, $P_{out_i}$ , μεταξύ δύο σημείων
$p_i$	Μεταβλητή που ορίζει τη συμβολή ενός συστατικού $i$ σε μία γκαουσιανή κατανομή
$P_{dynamic}$	Πιθανότητα ένας δυναμικός φορτιστής να εξυπηρετεί ένα όχημα
$P_{emergency}$	Πιθανότητα ένας φορτιστής να είναι κατελημμένος λόγω έκτακτης ανάγκης φόρτισης
$P_{in}$	Ενεργός ισχύς στην είσοδο ενός κυκλώματος επαγωγικής φόρτισης (πριν την τοπολογία αντιστάθμισης στο πρωτεύον)
$P_{in,DC,exp_i}$	DC ισχύς προσδιοριζόμενη σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα στην είσοδο του αντιστροφέα της διάταξης, για μία μετατόπιση $x_i$
$P_{in,enter}$	Ενεργός ισχύς στην είσοδο ενός κυκλώματος επαγωγικής φόρτισης που υποδηλώνει την είσοδο στην περιοχή υψηλής απόδοσης
$P_{in,i}$	Ενεργός ισχύς εισόδου για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$P_{in,i,EMS}$	Ενεργός ισχύς εισόδου, για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή

$P_{in,leave}$	Ενεργός ισχύς στην είσοδο ενός κυκλώματος επαγωγικής φόρτισης που υποδηλώνει την έξοδο από την περιοχή υψηλής απόδοσης
$P_{in,enter\_EMS}$	Ενεργός ισχύς στην είσοδο ενός κυκλώματος επαγωγικής φόρτισης που υποδηλώνει την είσοδο στην περιοχή υψηλής απόδοσης, σε περίπτωση εφαρμογής ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας
$P_{in,leave\_EMS}$	Ενεργός ισχύς στην είσοδο ενός κυκλώματος επαγωγικής φόρτισης που υποδηλώνει την έξοδο από την περιοχή υψηλής απόδοσης, σε περίπτωση εφαρμογής ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας
$P_{losses,R_1}$	Ωμικές απώλειες στην αντίσταση του πρωτεύοντος πηνίου
$P_{losses,R_2}$	Ωμικές απώλειες στην αντίσταση του δευτερεύοντος πηνίου
$P_{out}$	Ενεργός ισχύς εξόδου, στην αντίσταση φορτίου $R_L$
$P_{out\_avg}$	Μέση μεταφερόμενη ισχύς, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή
$P_{out\_exp,i}$	Ισχύς στην ισοδύναμη αντίσταση φορτίου όπως προσδιορίζεται σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, για μία μετατόπιση $x_i$
$P_{out,t}$	Ενεργός ισχύς εξόδου, για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$P_{out,t\_EMS}$	Ενεργός ισχύς εξόδου, που επιτυγχάνεται με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$P_{red}$	Ποσοστό μείωσης της ισχύος για μία μετατόπιση $x_i \neq x_C$ , σε σχέση με τη μέγιστη ισχύ που επιτυγχάνεται με κατάλληλη επιλογή των πυκνωτών για τη θέση $x_C$
$P_{su}$	Μη αντισταθμισμένη ισχύς στην έξοδο ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης
$P_{su,left}$ & $P_{su,right}$	Μη αντισταθμισμένη ισχύς στο αριστερό και δεξιό πηνίο της BP διάταξης
$P_{su,Q}$ & $P_{su,DD}$	Μη αντισταθμισμένη ισχύς στα πηνία Q και DD στη DDQ διάταξη
$P_{su,total}$	Συνολική αντισταθμισμένη ισχύς για τις διατάξεις DDQ και BP
$P_{traffic}$	Πιθανότητα ένας δυναμικός φορτιστής να είναι κατειλημμένος λόγω κίνησης στους δρόμους
PF	Συντελεστής ισχύος στην είσοδο ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης
$PF_i$	Συντελεστής ισχύος στην είσοδο ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης, για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
Q	Συντελεστής ποιότητας στην πλευρά του δευτερεύοντος
$Q_{in}$	Άεργος ισχύς στην είσοδο ενός κυκλώματος επαγωγικής φόρτισης (πριν την τοπολογία αντιστάθμισης στο πρωτεύον)
$Q_{in,i}$	Ενεργός ισχύς εισόδου για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$r$	Ποσοστό των τιμών της ισχύος εισόδου και εξόδου που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του συστήματος διαχείρισης ενέργειας
$R_{AC}$	AC αντίσταση ενός καλωδίου Litz
$R_{DC,in}$	DC αντίσταση τροφοδοσίας στην είσοδο του αντιστροφέα DC/AC
$R_k$	Αντίσταση των καλωδίων Litz στο πρωτεύον ( $k=1$ ) ή το δευτερεύον ( $k=2$ )
$R_L$	Ισοδύναμη αντίσταση φορτίου που αντιπροσωπεύει το φορτίο της μπαταρίας του οχήματος
$R_{L,max}$	Μέγιστη τιμή στην οποία περιορίζεται η αντίσταση φορτίου στο πρόβλημα βελτιστοποίησης
$R_{s,bat}$	Εν σειρά αντίσταση της μπαταρίας του οχήματος
$R_1$	Αντίσταση πρωτεύοντος πηνίου
$R_2$	Αντίσταση δευτερεύοντος πηνίου
S	Ελάχιστος αριθμός απαιτούμενων στατικών σταθμών για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων
$S_{in}$	Φαινόμενη ισχύς στην είσοδο του ισοδύναμου κυκλώματος επαγωγικής φόρτισης (πριν την τοπολογία αντιστάθμισης στο πρωτεύον)

$S_{in,t}$	Φαινόμενη ισχύς εισόδου για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$S_{out}$	Φαινόμενη ισχύς εξόδου, στην αντίσταση φορτίου $R_L$
$S_{out,t}$	Φαινόμενη ισχύς εξόδου για μία μετατόπιση $x_i$ μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$t_i$	Χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της κίνησης πάνω από το φορτιστή, όπου η μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι ίση με $x_i$
$t_{enter}$	Χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην είσοδο του οχήματος στην περιοχή υψηλής απόδοσης
$t_{leave}$	Χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στην έξοδο του οχήματος από την περιοχή υψηλής απόδοσης
$v$	Ταχύτητα κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$V$	Ηλεκτρικό βαθμωτό δυναμικό
$V_{AB}$	Τάση στην έξοδο του αντιστροφέα στην είσοδο
$V_{bat}$	Τάση στα άκρα της μπαταρίας του οχήματος λαμβάνοντας υπόψιν και την εν σειρά αντίσταση $R_{s,bat}$
$V_{bat,min}$	Ελάχιστη δυνατή τιμή της τάσης στα άκρα της μπαταρίας του οχήματος λαμβάνοντας υπόψιν και την εν σειρά αντίσταση $R_{s,bat}$
$V_{DC,bat}$	DC τάση στην μπαταρία του οχήματος
$V_{dev}$	Απόκλιση τάσης σε ένα ζυγό ενός δικτύου διανομής
$V_{in}$	Τάση στην είσοδο του ισοδύναμου κυκλώματος επαγωγικής φόρτισης (πριν την τοπολογία αντιστάθμισης στο πρωτεύον)
$V_{in,DC}$	DC τάση στην είσοδο του αντιστροφέα εισόδου
$V_{L_k}$ ή $V_{L_j}$	Τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του πηνίου $k$ ή $j$ αντίστοιχα, λόγω της μεταξύ του επαγωγικής σύζευξης
$V_{min}$	Μέγιστη τιμή της τάσης σε ένα ζυγό ενός δικτύου διανομής
$V_{max}$	Ελάχιστη τιμή της τάσης σε ένα ζυγό ενός δικτύου διανομής
$V_{nom}$	Ονομαστική τιμή της τάσης σε ένα ζυγό ενός δικτύου διανομής
$V_{oc}$	Τάση ανοικτοκυκλώσεως στην πλευρά του δευτερεύοντος
$V_{out}$	Τάση στα άκρα της αντίστασης φορτίου $R_L$
$x_C$	Μετατόπιση του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον όπου οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης $C_1$ και $C_2$ υπολογίζονται με στόχο μία μέγιστη ισχύ και απόδοση στη συγκεκριμένη μετατόπιση
$x_{enter}$	Μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος που υποδηλώνει την είσοδο στην περιοχή υψηλής απόδοσης
$x_i$	Μετατόπιση του δευτερεύοντος ως προς το πρωτεύον τη χρονική στιγμή $t_i$ κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή
$x_{leave}$	Μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος που υποδηλώνει την έξοδο από την περιοχή υψηλής απόδοσης
$\gamma_{in,i}$	Συντελεστής για την έκφραση της ισχύος εισόδου, στη μετατόπιση $x_i$ , σύμφωνα με το ρεύμα στο πρωτεύον
$\gamma_{P_{out,i}}$	Συντελεστής για την έκφραση της ισχύος εξόδου, στη μετατόπιση $x_i$ , σύμφωνα με το ρεύμα στο πρωτεύον
$Z$	Συντελεστής για την έκφραση της απόδοσης σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή Στην Επαγωγική Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η χρήση ορυκτών καυσίμων από τους συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης αποτελεί έναν από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες για την όξυνση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, η αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση, σε συνδυασμό με στόχους που τίθενται, σήμερα για μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων, αποτελούν παράγοντες που ωθούν την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Ωστόσο, η περιορισμένη ενεργειακή αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για μία σημαντική διείσδυση των οχημάτων αυτών στην αγορά των μέσων μεταφοράς. Καθώς οι σημερινές τεχνολογίες μπαταριών δεν μπορούν να ικανοποιήσουν την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων, σημαντικός παράγοντας για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης είναι η ανάπτυξη κατάλληλων υποδομών φόρτισης, περιορίζοντας την ανησυχία των οδηγών σχετικά με τη μειωμένη αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων.

### 1.1 Τεχνολογίες υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Οι τεχνολογίες φόρτισης που διατίθενται σήμερα προσφέρουν στο χρήστη μία πληθώρα επιλογών σχετικά με τη μεταφερόμενη στο ηλεκτρικό όχημα ισχύ και, επομένως, τη διάρκεια φόρτισης του οχήματος. Οι τεχνολογίες για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τη φόρτιση με αγωγή σύνδεση και την ασύρματη φόρτιση

#### 1.1.1 Φόρτιση με αγωγή σύνδεση

Η φόρτιση με αγωγή σύνδεση απαιτεί τη χρήση ενός ειδικού καλωδίου φόρτισης που συνδέει το ηλεκτρικό όχημα με το φορτιστή. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με αγωγή σύνδεση, ανάλογα με το επίπεδο ισχύος φόρτισης [1]-[2]. Για παράδειγμα στο Επίπεδο 1 (Mode 1) απαιτείται η σύνδεση του οχήματος σε μονοφασική παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος, με μία μέγιστη ισχύ φόρτισης ίση με 3,2kW. Στην πλειονότητα των ηλεκτρικών οχημάτων διατίθεται το κατάλληλο καλώδιο φόρτισης με την αγορά του οχήματος απαιτώντας την απλή σύνδεση σε έναν οικιακό ρευματοδότη. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή ο χρόνος που απαιτείται για τη φόρτιση είναι ιδιαίτερα μεγάλος (σε ορισμένες περιπτώσεις δύναται να ξεπεράσει τις 8 ώρες), με το συγκεκριμένο τύπο φόρτιση να χρησιμοποιείται, συνήθως, για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων στο σπίτι.

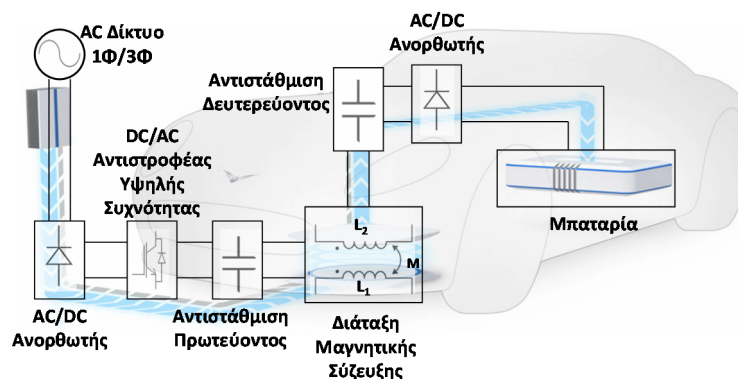
Μεγαλύτερη ισχύς φόρτισης δύναται να επιτευχθεί με τη φόρτιση στο Επίπεδο 2 (Mode 2), με μία μέγιστη μεταφορά ισχύος ίση με 7,2kW σε μονοφασική παροχή, μειώνοντας σημαντικά το χρόνο φόρτισης του οχήματος σε σχέση με το Επίπεδο 1. Επιπλέον, η φόρτιση στο Επίπεδο 3 (Mode 3) επιτρέπει την ταχεία φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, είτε σε τριφασική παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος είτε με τη χρήση DC ρεύματος. Στην περίπτωση εναλλασσόμενου ρεύματος η μέγιστη ισχύς φόρτισης μπορεί να φτάσει τα 42kW, ενώ στην περίπτωση χρήσης DC ρεύματος η μεταφερόμενη ισχύς δύναται να ξεπεράσει τα 100kW. Οι φορτιστές συνεχούς ρεύματος είναι ιδιαίτερα ελκυστικοί λόγω της ιδιαίτερα αυξημένης παρεχόμενης ισχύος, με αποτέλεσμα την ικανότητα φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος σε λίγα μόλις λεπτά.

Ωστόσο, η απαίτηση της ενσωμάτωσης ενός μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές στις υποδομές αυτές αυξάνει ιδιαίτερα την πολυπλοκότητα, καθώς και το κόστος της κατασκευής της υποδομής φόρτισης, το οποίο φτάνει τα δεκάδες χιλιάδες ευρώ [2].

### 1.1.2 Ασύρματη επαγωγική φόρτιση

Η επαγωγική φόρτιση επιτρέπει την ασύρματη μεταφορά ισχύος μεταξύ του ηλεκτρικού δικτύου και της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος. Αν και η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζει μία ιδιαίτερα μεγάλη ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία, η υλοποίηση εφαρμογών ασύρματης μεταφοράς ενέργειας έχει ξεκινήσει από τα τέλη του 19ου αιώνα. Ειδικότερα, ο Tesla επιχείρησε από τα τέλη της δεκαετίας του 1890 τη μεταφορά ισχύος σε μακρινές αποστάσεις με την αποστολή μικροκυματικών σημάτων σε αποστάσεις 50 χιλιομέτρων [3]. Την ίδια περίοδο, ο Tesla προχώρησε στη μεταφορά ισχύος, μέσω μαγνητικού πεδίου, (το αποκαλούμενο «πηνίο Tesla»), καταφέροντας να αντιμετωπίσει τις δυσκολίες της εποχής εκείνης λόγω της απουσίας ηλεκτρονικών ισχύος, και εισάγοντας τα θεμέλια σχετικά με την επαγωγική μεταφορά ισχύος [3].

Πολλές μελέτες ακολούθησαν καθ' όλη τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα σχετικά με την ασύρματη μεταφορά ισχύος. Ωστόσο, η ευρεία χρήση φορητών, επαναφορτιζόμενων συσκευών τη δεκαετία του 1990 οδήγησε στην εμφάνιση των πρώτων συστημάτων ασύρματης φόρτισης στην αγορά [3]. Επιπλέον, οι ιδιαίτερα σημαντικές εξελίξεις που εντοπίζονται σήμερα στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, επιτρέπουν τη μεταφορά ιδιαίτερα μεγάλων ποσών ισχύος, καθιστώντας τις εφαρμογές αυτές ιδιαίτερα ελκυστικές για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 1-1: Βασική Λειτουργία Συστήματος Επαγωγικής Φόρτισης

Η βασική λειτουργία ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων απεικονίζεται στην Εικόνα 1-1. Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης είναι παρόμοια με εκείνη των μετασχηματιστών όπου ενέργεια μεταφέρεται από ένα πρωτεύον σε ένα δευτερεύον πηνίο. Κατά την επαγωγική φόρτιση, ωστόσο, τα πηνία μετάδοσης και λήψης λειτουργούν σαν ένας ασθενώς συζευγμένος μετασχηματιστής που επιτρέπει την μετάδοση ισχύος μέσω ενός σχετικά μεγάλου διακένου αέρα. Λόγω των υψηλών απαιτήσεων μεταφοράς ισχύος, απαιτείται μία υψηλή συχνότητα (>20kHz) για το ρεύμα που διαρρέει το πρωτεύον τύλιγμα. Για την επίτευξη ενός τέτοιου ρεύματος είναι απαραίτητη η χρήση ενός AC/DC ανορθωτή, ο οποίος θα μετατρέψει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή, με παράλληλη χρήση ενός διορθωτή συντελεστή ισχύος [4]. Στη συνέχεια απαιτείται ένας DC/AC αντιστροφέας, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη, με στόχο ένα ρεύμα υψηλής συχνότητας στο πρωτεύον τύλιγμα. Το ρεύμα αυτό θα επάγει, στη συνέχεια, μία εναλλασσόμενη τάση στο δευτερεύον πηνίο της διάταξης, η οποία, με τη χρήση ενός AC/DC ανορθωτή, θα μετατραπεί σε συνεχή τάση για την παροχή στην μπαταρία του οχήματος. Για

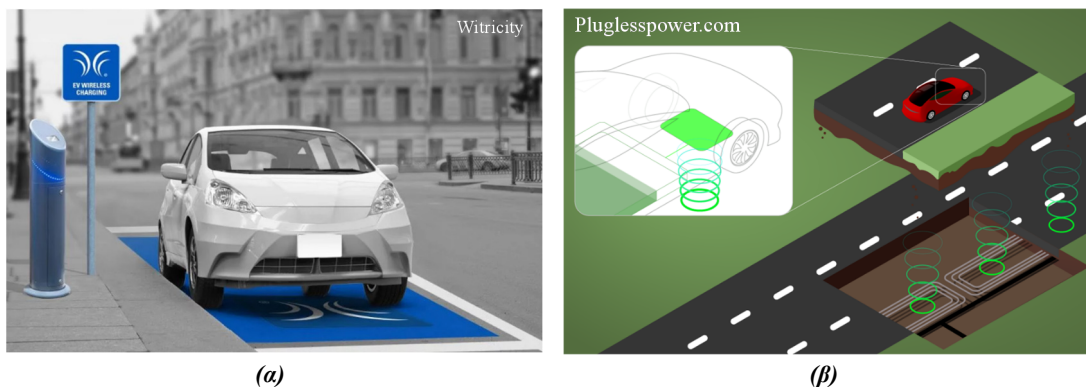
τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος στην μπαταρία του οχήματος, αλλά και για τον περιορισμό της αέργου ισχύος που διακινείται στο σύστημα, χρησιμοποιούνται πυκνωτές αντιστάθμισης τόσο στην πλευρά του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος.

Είναι σαφές ότι, σε σχέση με την αγωγή φόρτιση, απαιτείται η υλοποίηση ενός μαγνητικού συζεύκτη, που περιλαμβάνει το πρωτεύον στην πλευρά του σταθμού και το δευτερεύον στην πλευρά του οχήματος. Ο συζεύκτης αυτός αυξάνει το κόστος της κατασκευής, ενώ, επίσης, απαιτεί την εγκατάσταση ενός δευτερεύοντος συστήματος στο όχημα, το οποίο δύναται να έχει αυξημένες διαστάσεις και βάρος, ανάλογα με τις απαιτήσεις μεταφοράς ισχύος. Ο μαγνητικός συζεύκτης οδηγεί, επίσης, σε μία μείωση της απόδοσης του συστήματος σε σχέση με την αγωγή φόρτιση λόγω των μαγνητικών απωλειών.

Ωστόσο, οι σημαντικές εξελίξεις που παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια στην επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, έχουν επιτρέψει την επίτευξη απόδοσης σε συστήματα ασύρματα μεταφοράς ενέργειας η οποία δεν απέχει σημαντικά από την αντίστοιχη απόδοση ενός συστήματος αγωγικής σύνδεσης. Επιπλέον, η ασύρματη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων προσφέρει μια απλοποιημένη διαδικασία φόρτισης, πιο εύχρηστη και πιο φιλική προς το χρήστη. Οι επαγωγικοί σταθμοί φόρτισης εξαλείφουν, επίσης, κάθε είδους κίνδυνο σχετικό με τη χρήση καλωδίων, (χρήση φθαρμένων καλωδίων σε βροχερό ή χιονισμένο περιβάλλον κλπ.) απομονώνοντας ηλεκτρικά το όχημα από την παροχή τροφοδοσίας. Επιπλέον, η υπόγεια τοποθέτηση του πρωτεύοντος στο έδαφος αποτρέπει την έκθεσή του σε μη ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, αυξάνοντας το χρόνο ζωής της υποδομής φόρτισης. Η ικανότητα τοποθέτησης του πρωτεύοντος πηνίου εντός του εδάφους συμβάλλει, επίσης, στην αποφυγή βανδαλισμών των υποδομών φόρτισης (κλοπή του καλωδίου φόρτισης κλπ.). Τα πλεονεκτήματα αυτά, σε συνδυασμό με την πρόσφατη εμφάνιση οικονομικά ελκυστικών λύσεων ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με σημαντικά περιορισμένες διαστάσεις και βάρος του δευτερεύοντος, έχουν ως αποτέλεσμα ένα ιδιαίτερα αυξημένο ενδιαφέρον των οδηγών ηλεκτρικών οχημάτων προς αυτές τις υποδομές φόρτισης.

## 1.2 Κατηγορίες ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η επαγωγική φόρτιση διακρίνεται περαιτέρω σε δύο κατηγορίες: τη στατική φόρτιση, όπου το όχημα σταθμεύει πάνω από το φορτιστή (Εικόνα 1-2-α), ώστε να ξεκινήσει η φόρτιση της μπαταρίας του και τη δυναμική φόρτιση όπου το όχημα φορτίζει καθώς κινείται στο δρόμο (Εικόνα 1-2-β).

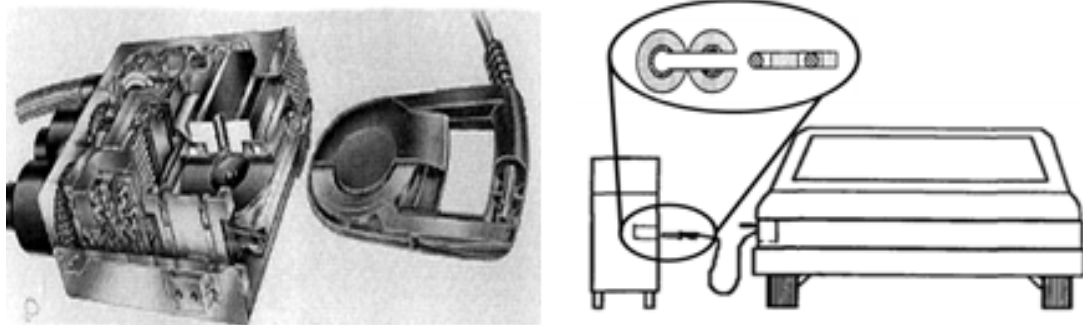


Εικόνα 1-2: (α) Στατική και (β) Δυναμική Επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

### 1.2.1 Στατική Φόρτιση

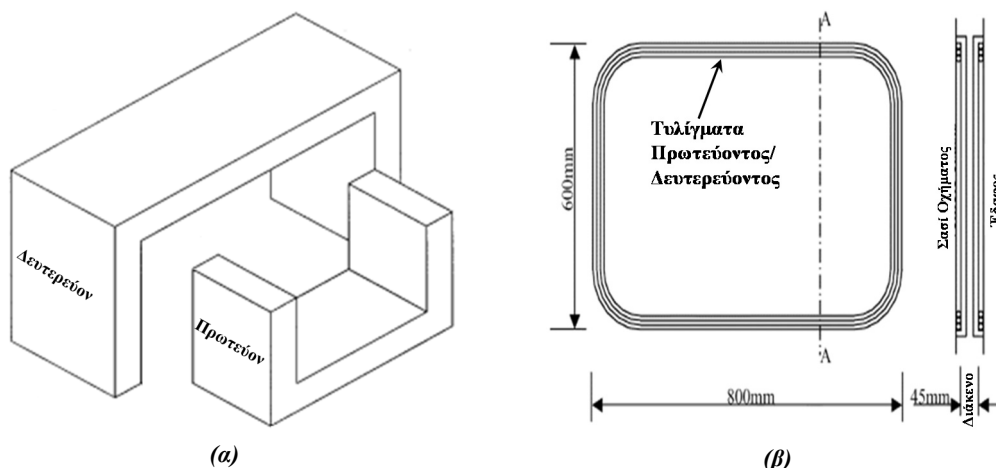
✓ **Πρώιμες διατάξεις επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων**

Διατάξεις επαγωγικής φόρτισης έχουν προταθεί από τα μέσα της δεκαετίας του '90. Ωστόσο, η μορφή τους απείχε αρκετά από τους μαγνητικούς συζεύκτες που αναπτύσσονται σήμερα, οι οποίοι επιτρέπουν την απλή στάθμευση του οχήματος πάνω από το φορτιστή και την έναρξη της φόρτισης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1-2-α. Ειδικότερα, οι επαγωγικοί συζεύκτες που προτάθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του '90 [5]-[6], υλοποιήθηκαν με ένα ειδικό σύστημα το οποίο απαιτούσε την είσοδο του καλωδίου φόρτισης στο φορτιστή, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1-3. Τέτοια συστήματα ωστόσο δεν εξάλειψαν την απαίτηση ύπαρξης καλωδίου φόρτισης και δύσκολα μπορούσαν να θεωρηθούν ασύρματα.



*Εικόνα 1-3: Σύστημα επαγωγικής Φόρτισης όπου το δευτερεύον «εισέρχεται» στο πρωτεύον [5]-[6].*

Άλλα παραδείγματα της πρώιμης μετάδοσης ενέργειας μέσω επαγωγικών συζευκτών περιλαμβάνουν συζεύκτες παρόμοιους με ένα πυρήνα μετασχηματιστή [7], όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1-4(α). Συνήθως, όμως, αυτό το είδος του σχεδιασμού μπορούσε να μεταφέρει ισχύ μέσω ενός πολύ μικρού διακένου αέρα. Μια διαφορετική σχεδίαση του συζεύκτη, παρόμοια με αυτούς που αναπτύσσονται σήμερα, προτείνεται στην αναφορά [8] και απεικονίζεται στην Εικόνα 1-4(β). Τέτοιες διατάξεις, ωστόσο, δε χρησιμοποιούν φερρίτη στην κατασκευή τους, με αποτέλεσμα τα πηνία να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στα γύρω σιδηρομαγνητικά υλικά. Επιπλέον, όταν ένα τέτοιο πηνίο μίας διάταξης επαγωγικής φόρτισης είναι συνδεδεμένο σε ένα ηλεκτρικό όχημα, η μαγνητική ροή, ενδέχεται να διέλθει μέσα από το σασί προκαλώντας υψηλές απώλειες δινορρευμάτων. Για να γίνει πιο πρακτική η φόρτιση ενός ΗΟ χρησιμοποιείται συνήθως φερρίτης στο σχεδιασμό, με σκοπό την ενίσχυση και την καθοδήγηση της μαγνητικής ροής [4].

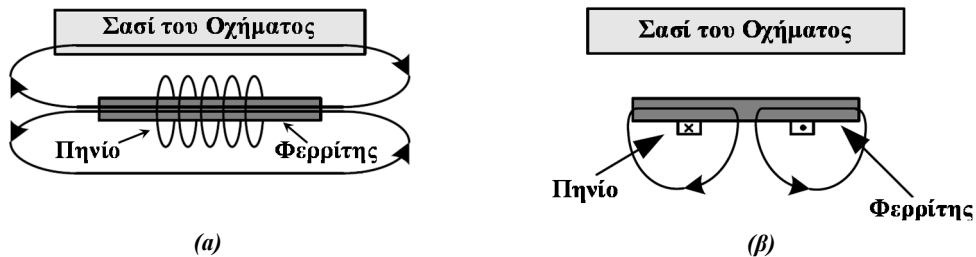


*Εικόνα 1-4: (α) Πρώιμο σύστημα επαγωγικής φόρτισης, παρόμοιο με ένα συνηθισμένο μετασχηματιστή [7], (β) Σχεδίαση διάταξης χωρίς τη χρήση φερρίτη.*



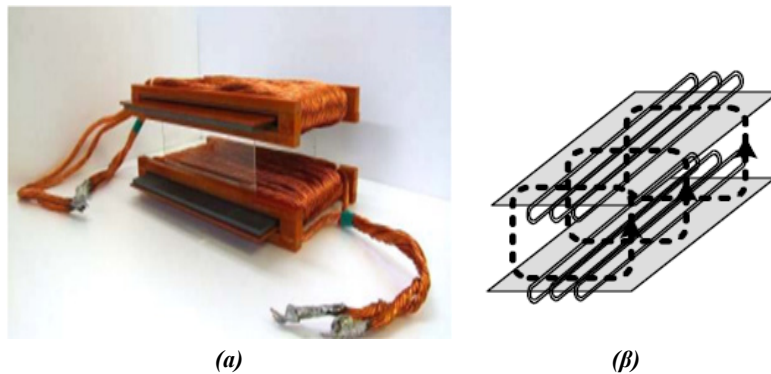
## ✓ Διατάξεις διπλής όψεως

Μαγνητικοί συζεύκτες που περιλαμβάνουν φερρίτη στο σχεδιασμό της διάταξης, χαρακτηρίζονται, ανάλογα με τον τρόπο κατανομής της μαγνητικής ροής, σε συζεύκτες διπλής ή μονής όψεως [4], όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 1-5-α και την Εικόνα 1-5-β αντίστοιχα. Ειδικότερα, στους συζεύκτες διπλής όψεως η μαγνητική ροή κατανέμεται και στις δύο πλευρές του συζεύκτη (Εικόνα 1-5-α). Τυπικά παραδείγματα συζευκτών διπλής όψεως απεικονίζονται στην Εικόνα 1-6, με το πηνίο να είναι τυλιγμένο γύρω από το φερρίτη.



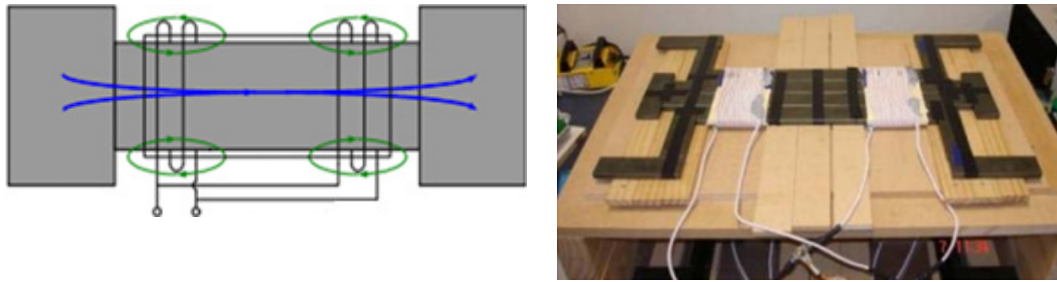
Εικόνα 1-5: Κατεύθυνση της μαγνητικής ροής σε συζεύκτες (α) διπλής-όψεως και (β) μονής όψεως [4].

Σε αυτές τις διατάξεις η μαγνητική ροή εκτείνεται και στις δύο πλευρές τόσο του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος πηνίου [9]-[12]. Για την ασύρματη μεταφορά ενέργειας, ωστόσο, απαιτείται μόνο η μία κατεύθυνση της μαγνητικής ροής (μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος), ενώ η άλλη θα μπορούσε να προκαλέσει υψηλές απώλειες δινορρευμάτων στο σασί του αυτοκινήτου. Μια θωράκιση αλουμινίου δύναται να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να καταστείλει το ανεπιθύμητο τμήμα της μαγνητικής ροής, ωστόσο, δεν επιτυγχάνει σημαντική μείωση των μαγνητικών απωλειών [4].



Εικόνα 1-6: Τυπικά παραδείγματα διατάξεων διπλής όψεως[11],[13].

Βελτιώσεις σε τέτοια συστήματα [13], περιλαμβάνουν, συνήθως, πιο πολύπλοκες διατάξεις όπως αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-7 [14]. Οι μαγνητικές απώλειες, ωστόσο, σε τέτοιες διατάξεις ανέρχονται σε 10% των απωλειών και είναι σημαντικά περισσότερες από ένα ποσοστό απωλειών 2-4%, που είναι συνήθως επιθυμητό [15]. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι στους διπλής όψεως συζεύκτες, η μαγνητική ροή δεν περιορίζεται μόνο στο πάνω και κάτω μέρος του πηνίου, αλλά εντοπίζεται και μια ισχυρή οριζόντια ροή στα πλάγια μέρη της διάταξης, (Εικόνα 1-5-α), η οποία είναι ιδιαίτερα δύσκολο να περιοριστεί, εγείροντας ανησυχίες σχετικά με τα εκπεμπόμενα μαγνητικά πεδία [15].

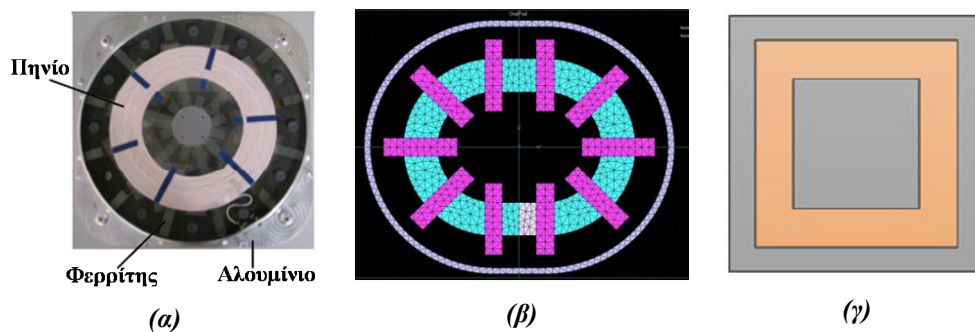


Εικόνα 1-7: Βελτίωση των διατάξεων διπλής όψεως με τη χρήση περίπλοκων γεωμετριών [14].

✓ Διατάξεις μονής όψεως

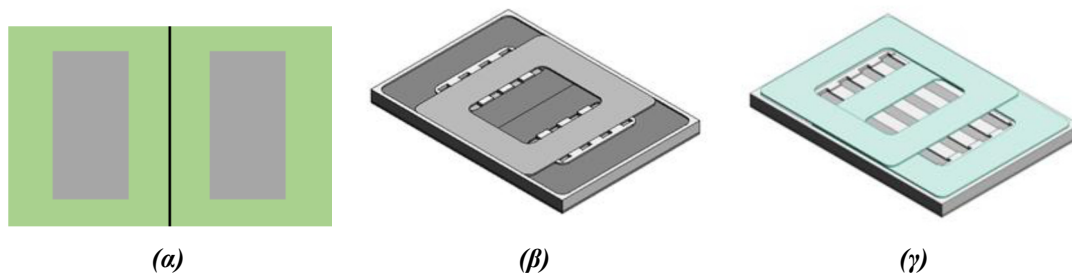
Στους “μονής όψεως” συζεύκτες, η κατεύθυνση της μαγνητικής ροής περιορίζεται κυρίως στη μία μόνο πλευρά του συζεύκτη, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1-5-β. Επιπλέον, η τοποθέτηση του πηνίου στη μία πλευρά του συζεύκτη, περιορίζει σημαντικά τη διαρρέουσα ροή στο πίσω μέρος των εν λόγω συζευκτών, έχοντας πολύ μικρότερες απαιτήσεις θωράκισης.

Τα σημαντικά αυτά πλεονεκτήματα των συζευκτών μονής όψεως, έχουν οδηγήσει στην επικράτησή τους σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων [15]-[24]. Μία πληθώρα συζευκτών αυτού του τύπου έχει κατασκευασθεί, περιλαμβάνοντας κυκλικές, οβάλ ή ορθογώνιες διατάξεις (Εικόνα 1-8).



Εικόνα 1-8: Διατάξεις μονής όψης: (α) κυκλική [15], (β) οβάλ [23] και (γ) ορθογώνια [24].

Οι διατάξεις στην Εικόνα 1-8 περιλαμβάνουν ένα πηνίο στο πρωτεύον και ένα στο δευτερεύον. Διατάξεις δύο πηνίων παρουσιάζονται, επίσης, στη βιβλιογραφία [15],[19],[24], όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 1-9-α. Στην κατηγορία αυτή των διατάξεων ανήκουν και διατάξεις με ένα επιπλέον (βοηθητικό) πηνίο στην υπάρχουσα μαγνητική διάταξη (Εικόνα 1-9-β), ή διατάξεις με αναδιαμόρφωση της τοποθέτησης των δύο πηνίων (Εικόνα 1-9-γ). Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε διάταξης που απεικονίζονται στην Εικόνα 1-8 και την Εικόνα 1-9, ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος και την ανοχή σε πλευρικές μετατοπίσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, θα μελετηθούν αναλυτικότερα στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

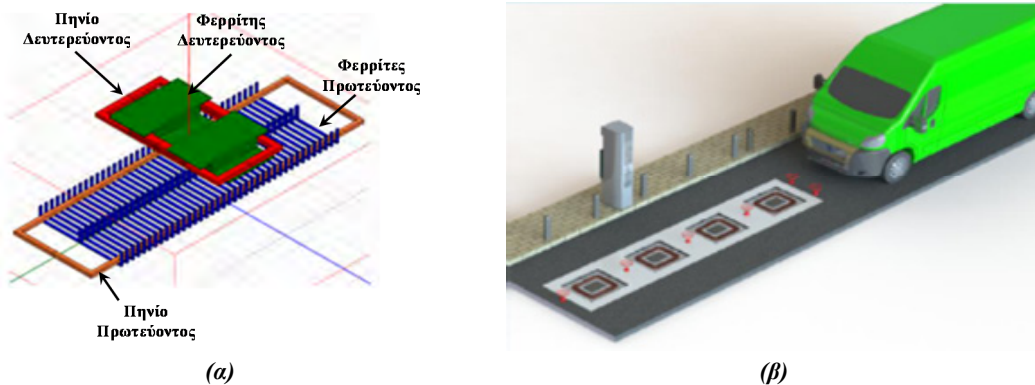


Εικόνα 1-9: Μονής όψεως διατάξεις δύο πηνίων [24]: (α) DD διάταξη, (β) DDQ διάταξη και (γ) διπολική [24].

### 1.2.2 Δυναμική Φόρτιση

Εκτός από τη στατική επαγωγική φόρτιση όπου το όχημα σταθμεύει πάνω από το φορτιστή, ασύρματη μεταφορά ενέργειας δύναται να επιτευχθεί και κατά τη διάρκεια που το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, υποδεικνύοντας υποδομές δυναμικής φόρτισης. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας οι οδηγοί έχουν τη δυνατότητα να φορτίζουν την μπαταρία του ηλεκτρικού τους οχήματος σε διάφορα σημεία κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους, μειώνοντας έτσι την ανάγκη στάθμευσης σε κάποια υποδομή φόρτισης. Η δυναμική φόρτιση, επομένως, δύναται να επιλύσει επιτυχώς τα όποια προβλήματα σχετίζονται με την περιορισμένη ικανότητα των ηλεκτρικών οχημάτων για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων, αυξάνοντας σημαντικά την αυτονομία τους [26].

Η βασική λειτουργία σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, είναι παρόμοια με τη στατική φόρτιση που περιγράφηκε προηγουμένως, περιλαμβάνοντας την ασύρματη μεταφορά ενέργειας μεταξύ ενός πρωτεύοντος πηνίου (συνήθως θαμμένο κάτω από το δρόμο) και ενός δευτερεύοντος πηνίου, που τοποθετείται στο ΗΟ. Υπάρχουν, κυρίως, δύο είδη πρωτεύοντος στη δυναμική φόρτιση: η *ενιαία* και η *τμηματική* διάταξη (Εικόνα 1-10-α και β αντίστοιχα).



Εικόνα 1-10: (α) *Ενιαία* [25] και (β) *Τμηματική*<sup>1</sup> διάταξη δυναμικής επαγωγικής φόρτισης

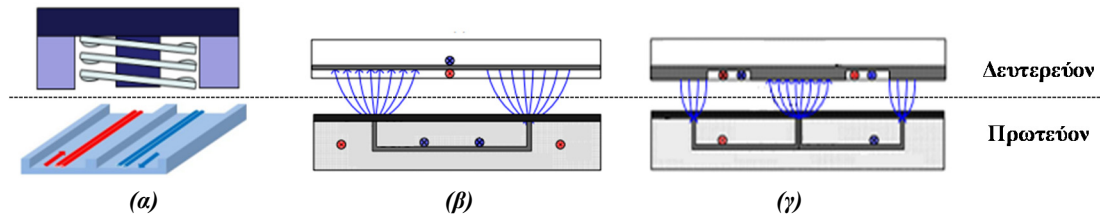
#### ✓ **Ενιαία διάταξη**

Στην ενιαία διάταξη το πρωτεύον είναι μία μεγάλη ράγα κατά μήκος του δρόμου, με το όνομα της ράγας να καθορίζεται από το σχηματισμό των φερριτών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της. Μία πρώιμη σχεδίαση ενιαίας διάταξης αποτελεί ο συζεύκτης τύπου Ε, που απεικονίζεται στην Εικόνα 1-11-α. Το συγκεκριμένο σύστημα, ωστόσο, είναι ιδιαίτερα επιρρεπές στην οριζόντια μετατόπιση και επιτυγχάνει τη μεταφορά ισχύος σε ένα πολύ μικρό διάκενο αέρα [27]. Μία βελτίωση του συζεύκτη αυτού αποτελεί μια επίπεδη και πολύ λεπτή ράγα ως πρωτεύον, που είναι γνωστή ως τύπου-Υ και απεικονίζεται στην Εικόνα 1-11-β [27]. Προκειμένου να μειωθεί η ποσότητα φερρίτη που χρησιμοποιείται στη διάταξη, προτάθηκε ο συζεύκτης τύπου-Υ, ο οποίος απεικονίζεται στην Εικόνα 1-11-γ. Κατάλληλη τοποθέτηση των φερριτών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-12, επιτρέπει τη χρήση 1/5 του φερρίτη που απαιτείται για τον τύπου-Υ συζεύκτη, ενώ επιτυγχάνει και αυξημένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος [27].

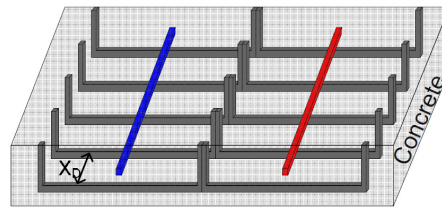
Ένα από τα μεγαλύτερα ζητήματα που εγείρει η χρήση της ενιαίας διάταξης για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι τα εκπεμπόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, λόγω του ρεύματος που διαρρέει τα πολύ μεγάλου μήκους καλώδια στο πρωτεύον. Τέτοια προβλήματα αντιμετωπίζονται, εν μέρει, με την υλοποίηση του τύπου-Ι συστήματος [28]-[30]. Η ονομασία του συστήματος αυτού οφείλεται στο σχήμα των πυρήνων φερρίτη στον πρωτεύον (Εικόνα

<sup>1</sup> FastInCharge project: [www.fastincharge.eu](http://www.fastincharge.eu)

1-13) και επιτυγχάνει τη μεταφορά ισχύος σε ένα ιδιαίτερα μεγάλο διάκενο, παράλληλα με μία ιδιαίτερα ικανοποιητική ανοχή σε πλευρικές μετατοπίσεις.

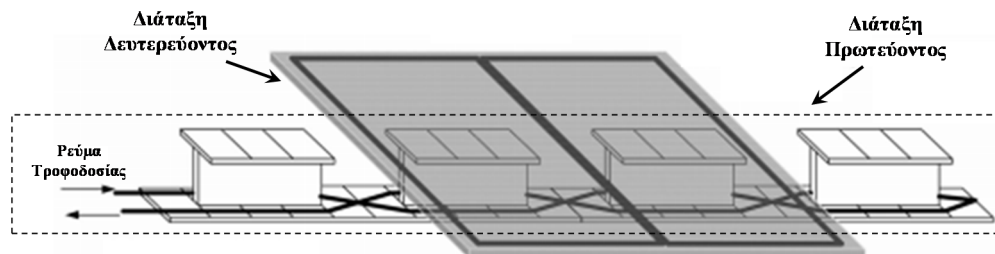


Εικόνα 1-11: Ενιαία διάταξη δυναμικής επαγωγικής φόρτισης (α) τύπου-E, (β) τύπου-U, (γ) τύπου-W [27]



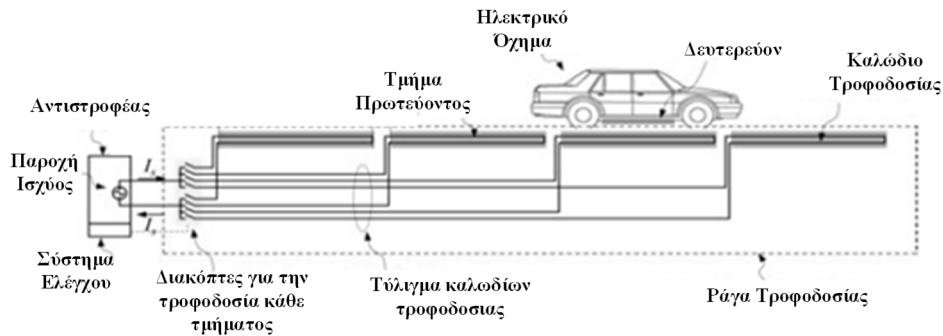
Εικόνα 1-12: Υλοποίηση της διάταξης τύπου-W για τη χρήση λιγότερου φερρίτη [27]

Ο τρόπος κατασκευής της διάταξης οδηγεί σε μία εναλλαγή της πολικότητας του ρεύματος σε δύο διαδοχικούς “πόλους” της διάταξης (ως πόλος εδώ θεωρείται το τμήμα της διάταξης σχήματος T, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1-13). Αν και η εναλλαγή αυτή της πολικότητας μειώνει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το πρωτεύον πηνίο, δεν έχει επαρκή αποτελέσματα, με αποτέλεσμα να απαιτούνται επιπλέον τεχνικές για τη μείωση των εκπεμπόμενων ΗΜ πεδίων. Για παράδειγμα, μία αρχιτεκτονική για την περαιτέρω μείωση του μαγνητικού πεδίου προτείνεται την αναφορά [31], η οποία ωστόσο απαιτεί τη χρήση επιπλέον “πηνίων απαλοιφής” στο δευτερεύον, αυξάνοντας έτσι το κόστος και το μέγεθος της διάταξης που τοποθετείται στο ηλεκτρικό όχημα.



Εικόνα 1-13: Ενιαία διάταξη δυναμικής επαγωγικής φόρτισης τύπου-I [30].

Επιπλέον, το γεγονός ότι το πηνίο του δευτερεύοντος καλύπτει μόνο ένα μικρό μέρος του πρωτεύοντος, εκτός του ότι εγείρει ζητήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών οδηγεί και σε σημαντικά ζητήματα σχετικά με την απόδοση κατά την ασύρματη μεταφοράς ισχύος [4]. Ένας τρόπος επίλυσης των ζητημάτων αυτών είναι η κατάτμηση του ενιαίου πρωτεύοντος σε μικρότερα τμήματα [32]-[33], τα οποία ενεργοποιούνται μόνο όταν ένα όχημα βρίσκεται πάνω από τα τμήματα αυτά (Εικόνα 1-14). Και πάλι, ωστόσο, απαιτείται η ανάγκη τροφοδοσίας τμημάτων του πρωτεύοντος που είναι σημαντικά μεγαλύτερα σε έκταση από όλο το μήκος του οχήματος, με αποτέλεσμα η απόδοση να παραμένει μειωμένη.



Εικόνα 1-14: Κατάτμηση της ενιαίας διάταξης δυναμικής επαγωγικής φόρτισης [32]

### ✓ Τμηματική διάταξη

Το δεύτερο είδος διάταξης δυναμικής επαγωγικής φόρτισης είναι η τμηματική διάταξη όπου το πρωτεύον αποτελείται από πολλά μικρά "τμήματα", όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1-10-β. Τα "τμήματα" αυτά είναι όμοια με τις διατάξεις που χρησιμοποιούνται στη στατική φόρτιση [15],[34],[35]. Στην περίπτωση αυτή, κάθε διάταξη του πρωτεύοντος οδηγείται, συνήθως, από έναν ανεξάρτητο μετατροπέα ισχύος και ενεργοποιείται μόνο όταν ένα όχημα περνά πάνω από αυτή. Με αυτή την υλοποίηση, παρατηρείται μία ιδιαίτερα αξιόλογη απόδοση, παράλληλα με ένα σημαντικό περιορισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, καθώς ένα μόνο τμήμα της διάταξης ενεργοποιείται κατά τη διέλευση ενός οχήματος. Μειονέκτημα, ωστόσο, στην περίπτωση αυτή αποτελεί το γεγονός ότι το κάθε πρωτεύον απαιτεί και ένα διαφορετικό μετατροπέα DC/AC ανεβάζοντας ιδιαίτερα το κόστος κατασκευής.

Μέθοδοι, ωστόσο, έχουν προταθεί για τον περιορισμό του κόστους ανάπτυξης των μετατροπέων σε παρόμοια συστήματα, όπως για παράδειγμα η οδήγηση περισσοτέρων του ενός πρωτευόντων από τον ίδιο μετατροπέα [34]-[35]. Επίσης, περιορισμός του αριθμού των διακοπτικών στοιχείων σε ένα τέτοιο σύστημα δύναται να πραγματοποιηθεί με τον τρόπο που περιγράφεται στο ερευνητικό πρόγραμμα FastInCharge<sup>1</sup>: μία κοινή συστοιχία δύο διακοπτικών στοιχείων, διαρκώς ενεργοποιημένη, δύναται να χρησιμοποιηθεί από κοινού για όλη τη διάταξη, ενώ κάθε τμήμα του πρωτεύοντος εξυπηρετείται από μία επιπλέον συστοιχία δύο διακοπτικών στοιχείων που ενεργοποιείται μόνο όταν το όχημα περάσει πάνω από το εκάστοτε τμήμα.

## 1.3 Πρότυπα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

### ✓ SAE J2954: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology

Το συγκεκριμένο πρότυπο ορίζει τις προδιαγραφές για την ανάπτυξη συστημάτων ασύρματης φόρτισης σε ελαφριού-τύπου οχήματα. Ορίζει τις διάφορες γεωμετρικές κατασκευές διατάξεων ασύρματης φόρτισης, παράλληλα με την ισχύ που δύναται να μεταφερθεί με τις διατάξεις αυτές. Ορίζει, επίσης, απαιτήσεις επαγωγικών συστημάτων για επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ τους.

Το πρότυπο SAE J2954 καλύπτει ενδελεχώς την ανάπτυξη συστημάτων για οχήματα ελαφριού τύπου, ορίζοντας τις προδιαγραφές για συστήματα έως και 22kVA. Ωστόσο, τα συστήματα μεταφοράς ισχύος 11,1 και 22kVA που περιγράφονται στο πρότυπο έχουν καθοριστεί προσωρινά και, σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρότυπο, βρίσκονται ακόμη στα αρχικά στάδια του ορισμού. Συστήματα ασύρματης φόρτισης για οχήματα βαρέων φορτίων

<sup>1</sup> www.FastInCharge.eu

δεν προσδιορίζονται, αλλά αναμένεται να καλυφθούν μελλοντικά στο δεύτερο μέρος του προτύπου: *SAE J2954/2*.

Από το πρότυπο απουσιάζουν, επίσης, συστήματα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης για οποιοδήποτε τύπο οχήματος. Το πρότυπο αναφέρει ότι εξέταση τέτοιων συστημάτων ενδέχεται να πραγματοποιηθεί μελλοντικά, ανάλογα με το ενδιαφέρον της βιομηχανίας στο συγκεκριμένο τομέα.

#### ✓ **ISO/PAS 19363:2017**

Το πρότυπο ISO/PAS 19363 που εκδόθηκε τον Ιανουάριο του 2017, ορίζει τις απαιτήσεις του εξοπλισμού που τοποθετείται στο όχημα ώστε να επιτρέπει την ασύρματη μεταφορά ισχύος μεταξύ φορτιστή και οχήματος. Το πρότυπο προορίζεται για τη χρήση εξοπλισμού σε επιβατικά αυτοκίνητα και ελαφριά επαγγελματικά οχήματα.

Το ISO/PAS 19363 εστιάζει κυρίως στον εξοπλισμό που τοποθετείται στο όχημα και ασχολείται με τα ακόλουθα ζητήματα:

- μεταφερόμενη ισχύς
- απόσταση του εξοπλισμού που τοποθετείται στο όχημα από το έδαφος
- απαιτήσεις διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών διατάξεων δευτερεύοντος καθώς και διαλειτουργικότητα με τις αντίστοιχες υποδομές των εκάστοτε φορτιστών
- απαιτήσεις απόδοσης υπό διάφορες συνθήκες, καθώς και απαιτήσεις απόδοσης μεταξύ συστημάτων διαφορετικών κατασκευαστών και διαφορετικών διατάξεων δευτερευόντων
- απαιτήσεις ασφαλείας
- διαδικασίες δοκιμών

Τον Οκτώβριο του 2016 ο διεθνής οργανισμός προτυποποίησης ISO μαζί με το Σύλλογο Αυτοκινητοβιομηχανίας SAE ανακοίνωσαν την πιλοτική συμφωνία για την κοινή ανάπτυξη τεχνικών προτύπων και των εναρμονισμό ήδη υπάρχοντων προτύπων, με στόχο την υποστήριξη της αυτοκινητοβιομηχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Στο πλαίσιο της συνεργασίας αυτής θα εξετασθούν και θα επαναπροσδιοριστούν τα πρότυπα SAE J2954 και ISO 19363, ώστε να προσδιοριστούν τα ελάχιστα κριτήρια απόδοσης και ασφάλειας σχετικά με την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και να καθιερωθεί μία κοινή προσέγγιση σχετικά με τις προτεινόμενες λύσεις.

#### ✓ **IEC 61980**

Η IEC (International Electrotechnical Commission) εξετάζει θέματα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στη σειρά προτύπων IEC 61980, που χωρίζεται σε 3 μέρη:

- *IEC 61980-1, “Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements”*
- *IEC 61980-2, “Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 2: specific requirements for communication between electric road vehicle (EV) and infrastructure with respect to wireless power transfer (WPT) systems”*
- *IEC 61980-3: “Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 3: Specific requirements for the magnetic field wireless power transfer systems”*

Το πρώτο μέρος του προτύπου (IEC 61980-1) εκδόθηκε το 2015, το 3<sup>ο</sup> μέρος αναμένεται αν εκδοθεί εντός του 2019, ενώ το 2<sup>ο</sup> μέρος αναμένεται να εκδοθεί το 2020 [36]. Το πρώτο μέρος του προτύπου καλύπτει τις γενικές απαιτήσεις συστημάτων

ασύρματης φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα, χωρίς να περιορίζεται μόνο στην επαγωγική φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο καλύπτει [37]:

- Μεταφορά ενέργειας με επαγωγή μέσω μαγνητικών πεδίων. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τεχνολογίες που χρησιμοποιούν το μαγνητικό συντονισμό.
- Τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ενέργειας μέσω πυκνωτών (Capacitive power transfer),
- Μεταφορά ισχύος με τη χρήση μικροκυμάτων και μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα εύρος συχνοτήτων 1 GHz - 300 GHz.
- Μεταφορά Ισχύος με χρήση υπέρυθρων, όπου η ενέργεια μεταφέρεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα εύρος συχνοτήτων 300 GHz – 400 THz.

Εξειδικευμένες απαιτήσεις αναμένεται να περιγραφούν σε επόμενα μέρη του προτύπου. Για παράδειγμα το 2ο μέρος καλύπτει τις απαιτήσεις επικοινωνίας μεταξύ οχήματος και υποδομών ασύρματης φόρτισης, ενώ το 3ο μέρος καλύπτει τις απαιτήσεις σχετικά με το εκπεμπόμενο μαγνητικό πεδίο διατάξεων επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Αν και η συγκεκριμένη σειρά προτύπων (με τα 3 μέρη που αναφέρονται προηγουμένως, καθώς και όποια επιπλέον πιθανά μέρη ενδέχεται να εκδοθούν) αναμένεται μελλοντικά να εξετάζει μία ευρεία γκάμα ζητημάτων που προκύπτουν σχετικά με τη λειτουργία υποδομών ασύρματης φόρτισης, προς το παρόν είναι ιδιαίτερα περιορισμένη.

Πρέπει, επίσης, να τονισθεί ότι η δυναμική φόρτιση λείπει τόσο από το πρώτο μέρος του προτύπου που έχει εκδοθεί, ενώ δεν αναμένεται κάποια αντίστοιχη μελέτη και στα δύο επόμενα μέρη.

Αν και η προτυποποίηση καλύπτει σε ένα μεγάλο βαθμό τα ελαφριού-τύπου και τα επιβατικά οχήματα (ιδιαίτερα σύμφωνα με το πρότυπο SAE J295), παρουσιάζονται, ωστόσο, σημαντικές ελλείψεις. Πιο συγκεκριμένα, δεν εξετάζονται, ενδελεχώς, οι προδιαγραφές σχετικά με οχήματα βαρέων φορτίων καθώς και οι απαιτήσεις για τη μεταφορά ιδιαίτερα υψηλών ποσών ισχύος. Επίσης, απουσιάζουν από όλες τις σειρές προτύπων οι προδιαγραφές σχετικά με τη δυναμική φόρτιση. Αν και τα συστήματα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης αναμένεται να παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες με τα αντίστοιχα συστήματα στατικής φόρτισης, οι ιδιαίτερες απαιτήσεις που προκύπτουν από την κίνηση του οχήματος σε υψηλές ταχύτητες πάνω από το φορτιστή, αναμένεται να απαιτήσουν τον ορισμό εξειδικευμένων προδιαγραφών.

#### 1.4 Επίπεδα μεταφοράς ισχύος στην επαγωγική φόρτιση

Σύμφωνα με τα πρότυπα SAE J2954 και IEC 61980 οι κατηγορίες ισχύος σε συστήματα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας (Wireless Power Transfer – WPT) για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων είναι οι ακόλουθες:

- **WPT-1:** Η κατηγορία αυτή αφορά συστήματα επαγωγικής φόρτισης με τη μικρότερη δυνατή μεταφορά ενέργειας. Η μέγιστη ισχύς εισόδου στα συστήματα αυτά είναι ίση με 3,7kVA. Σύμφωνα με το πρότυπο SAE J2954 η ελάχιστη δυνατή απόδοση των συστημάτων αυτών είναι ίση με 85% και δύναται να περιοριστεί σε 80% όταν παρατηρείται μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.
- **WPT-2:** Συστήματα επαγωγικής φόρτισης της κατηγορίας αυτής μεταφέρουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, με την ισχύ εισόδου να είναι ίση με 7,7kVA. Οι περιορισμοί σχετικά με την ελάχιστη απόδοση, σύμφωνα με το πρότυπο SAE J2954, είναι αυτές που ισχύουν και για την πρώτη κατηγορία (WPT-1).

- **WPT-3:** Η κατηγορία αυτή αφορά συστήματα με μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Η ισχύς εισόδου στα συστήματα αυτά είναι ίση με 11,1kVA και οι περιορισμοί σχετικά με την απόδοση είναι ίδιοι με των κατηγοριών WPT-1 και WPT-2.
- **WPT-4:** Η ισχύς εισόδου στα συστήματα της κατηγορίας αυτής είναι ίση με 22kVA και επιτρέπει τη μεταφορά μεγάλων ποσών ενέργειας μεταξύ φορτιστή και οχήματος. Η απόδοση στα συστήματα αυτά δεν ορίζεται από τα υπάρχοντα πρότυπα και είναι υπό διαμόρφωση.

Αν και οι κατηγορίες WPT-1 και WPT-2 ορίζονται πλήρως στα πρότυπα IEC 61980 και SAE J2954, τα επίπεδα μεταφοράς ισχύος WPT3 και WPT4 έχουν καθοριστεί προσωρινά και βρίσκονται ακόμη στα αρχικά στάδια του ορισμού.

Ο Πίνακας 1-1 παρουσιάζει τις απαιτήσεις συμβατότητας μεταξύ των συστημάτων διαφόρων κατηγοριών, όπως ορίζονται στο πρότυπο SAE J2954. Ειδικότερα, δευτερεύοντα συστημάτων που ανήκουν στην κατηγορία WPT-2 είναι απαραίτητο να είναι συμβατά και με πρωτεύοντα της κατηγορίας WPT-1. Αντίστοιχη συμβατότητα απαιτείται και για τα πρωτεύοντα της κατηγορίας WPT-2 που πρέπει να είναι συμβατά και με δευτερεύοντα συστήματα της κατηγορίας WPT-1. Συμβατότητα των συστημάτων μεταφοράς ισχύος WPT3 και WPT4 με συστήματα παροχής μικρότερης ισχύος κρίνεται ως επιθυμητή. Πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που ένα πρωτεύον μίας συγκεκριμένης κατηγορίας μεταφέρει ενέργεια σε δευτερεύον διαφορετικής κατηγορίας η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς ορίζεται από την ελάχιστη ονομαστική ισχύ του πρωτεύοντος/δευτερεύοντος.

*Πίνακας 1-1: Συμβατότητα μεταξύ των συστημάτων επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας διαφορετικής ισχύος [24]*

		Δευτερεύον που τοποθετείται στο όχημα			
		WPT-1	WPT-2	WPT-3	WPT-4
Πρωτεύον στην πλευρά του φορτιστή	WPT-1	<i>Απαραίτητη</i>	<i>Απαραίτητη</i>	<i>Επιθυμητή</i>	<i>Επιθυμητή</i>
	WPT-2	<i>Απαραίτητη</i>	<i>Απαραίτητη</i>	<i>Επιθυμητή</i>	<i>Επιθυμητή</i>
	WPT-3	<i>Επιθυμητή</i>	<i>Επιθυμητή</i>	<i>Απαραίτητη</i>	<i>Επιθυμητή</i>
	WPT-4	<i>Επιθυμητή</i>	<i>Επιθυμητή</i>	<i>Επιθυμητή</i>	<i>Απαραίτητη</i>

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κατηγορίες φόρτισης που περιγράφηκαν αφορούν ελαφριού τύπου οχήματα στην περίπτωση της στατικής φόρτισης. Οι κατηγορίες WPT-1 και WPT-2 ορίζονται πλήρως, ενώ ανάλογα συστήματα για τη φόρτιση των οχημάτων είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμα, από εταιρίες όπως η Evatran/PluglessPower και η Witricity. Οι κατηγορίες μεταφοράς ισχύος WPT-3 και WPT-4 αν και αναφέρονται στα πρότυπα IEC 61980 και SAE J2954 ως συστήματα 11kVA και 22kVA, δεν περιγράφονται, ωστόσο, πλήρως στα πρότυπα αυτά. Επίσης, συστήματα ασύρματης μεταφοράς ισχύος που εγκαθίστανται σε οχήματα βαρέων φορτίων αναμένεται να έχουν την ικανότητα μεταφοράς ιδιαίτερα μεγάλων ποσών ισχύος, και αναφέρονται ως *WPT 5* στο πρότυπο SAE J2954, με επιπλέον πληροφορίες να αναμένεται να καλυφθούν μελλοντικά στο δεύτερο μέρος του προτύπου SAE J2954/2.

Αν και τα πρότυπα επαγωγικής φόρτισης περιγράφουν συστήματα με μικρή σχετικά ικανότητα μεταφοράς ισχύος, ωστόσο, μία πληθώρα ερευνητικών εφαρμογών υποστηρίζει τη μεταφορά ιδιαίτερα μεγάλων ποσών ισχύος. Για παράδειγμα τα Ευρωπαϊκά προγράμματα



FastInCharge<sup>1</sup>, Unplugged<sup>2</sup> και Fabric<sup>3</sup>, έχουν υλοποιήσει συστήματα επαγωγικής μεταφοράς ισχύος μεγαλύτερης των 30kW τόσο στην περίπτωση της στατικής όσο και της δυναμικής φόρτισης. Επιπλέον, συστήματα δυναμικής και στατικής επαγωγικής φόρτισης με ικανότητα μεταφοράς ισχύος ακόμα και ίσης με 50kW εντοπίζονται στη βιβλιογραφία [38]-[39].

### 1.5 Μηχανισμοί υποβοήθησης τοποθέτησης του δευτερεύοντος πάνω από το πρωτεύον

Τόσο η μεταφερόμενη ισχύς όσο και η απόδοση ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης εξαρτώνται σημαντικά από την κατακόρυφη τοποθέτηση του δευτερεύοντος πάνω από το πρωτεύον πηνίο, καθώς και από την μεταξύ τους πλευρική μετατόπιση. Στο πλαίσιο αυτό, χρησιμοποιούνται κινούμενοι μηχανισμοί για την κατάλληλη τοποθέτηση του δευτερεύοντος πηνίου πάνω από το πρωτεύον πηνίο του σταθμού φόρτισης.



*Εικόνα 1-15: Μηχανισμός Τοποθέτησης του δευτερεύοντος πηνίου.*

Για παράδειγμα ο μηχανισμός που αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα FastInCharge<sup>1</sup> και παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-15 τοποθετείται στην πίσω πλευρά του οχήματος. Όταν το όχημα σταθμεύσει πάνω από το σταθμό στατικής φόρτισης, ή πλησιάσει το σταθμό δυναμικής φόρτισης και ο οδηγός απαιτήσει τη φόρτιση του οχήματος, το δευτερεύον πηνίο κατεβαίνει μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό διάκενο. Ο μηχανισμός αυτός τοποθέτησης εγκαταστάθηκε σε ένα όχημα μεταφοράς εμπορευμάτων, οι μεγάλες διαστάσεις του οποίου απαιτούν τη μεταφορά μεγάλων ποσών ενέργειας μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, με αποτέλεσμα την υλοποίηση ενός μεγάλων διαστάσεων δευτερεύοντος.

Ένας μηχανισμός τοποθέτησης με αυτές τις διαστάσεις και το αντίστοιχα αυξημένο βάρος, δεν είναι κατάλληλος για επιβατικά οχήματα. Ωστόσο, στα επιβατικά οχήματα η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι μικρότερη, επομένως, μεταφορά ισχύος μικρότερης τιμής είναι αποδεκτή. Στα πλαίσια του προγράμματος FastInCharge<sup>1</sup> υπολογίστηκε ότι μία μείωση των διαστάσεων του δευτερεύοντος κατά 39%, καθιστά την προτεινόμενη λύση εφαρμόσιμη και σε επιβατικά οχήματα με μία μείωση της μεταφερόμενης ισχύος κατά 17%. Στο πλαίσιο αυτό, περαιτέρω βελτίωση του προτεινόμενου συστήματος τοποθέτησης μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση του στο σύστημα αναρτήσεων του αυτοκινήτου.

Ένας παρόμοιος μηχανισμός τοποθέτησης προτείνεται από την Bombardier και το πρόγραμμα Primove, και απεικονίζεται στην Εικόνα 1-16-α<sup>4</sup>. Οι ιδιαίτερα μεγάλες διαστάσεις του συγκεκριμένου μηχανισμού επιτρέπουν την εγκατάστασή του μόνο σε λεωφορεία. Ωστόσο, η Bombardier προτείνει έναν αντίστοιχο μηχανισμό τοποθέτησης για επιβατικά οχήματα (Εικόνα 1-16-β). Στην περίπτωση αυτή δεν τοποθετείται κάποιος επιπλέον

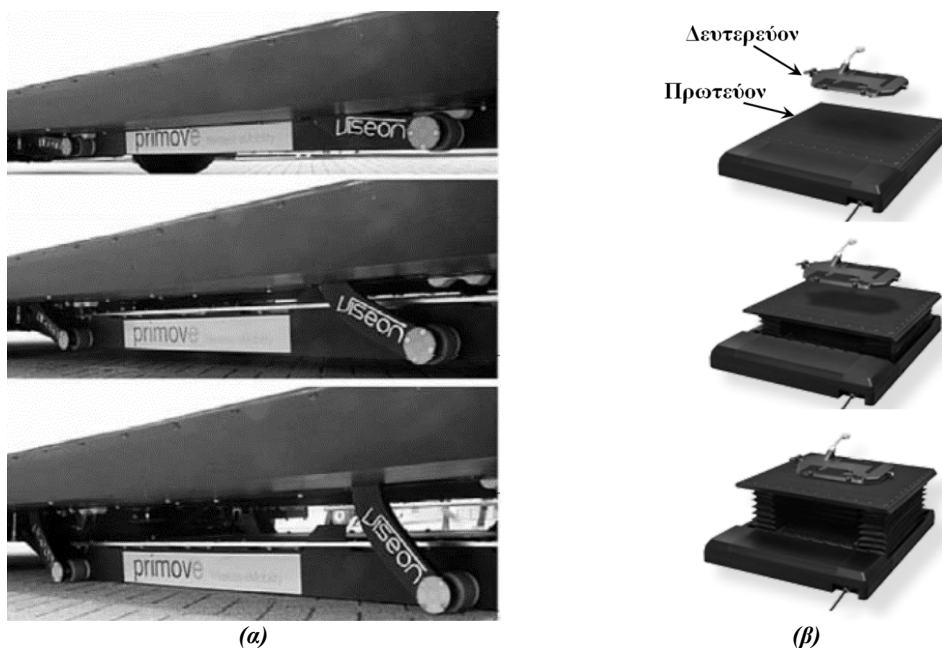
<sup>1</sup> <http://www.fastincharge.eu/>

<sup>2</sup> <http://unplugged-project.eu/>

<sup>3</sup> <https://www.fabric-project.eu/>

<sup>4</sup> <https://primove.bombardier.com>

μηχανισμός στο όχημα, αλλά ο μηχανισμός τοποθέτησης ενσωματώνεται στο φορτιστή. Για τη φόρτιση του οχήματος, το πρωτεύον πηνίο ανυψώνεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-16-β, με στόχο την επίτευξη του επιθυμητού διακένου μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.



Εικόνα 1-16: Υλοποίηση του μηχανισμού τοποθέτησης από την Bombardier για την περίπτωση: (α) λεωφορείων [40] και (β) επιβατικών οχημάτων<sup>1</sup>.

Το ερευνητικό πρόγραμμα Unplugged προτείνει μία μεθοδολογία υποβοήθησης του οδηγού για την κατάλληλη τοποθέτηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή χρησιμοποιώντας ένα σύστημα RFID, δεδομένα οδομετρίας του οχήματος και κάμερα που επιτρέπει στον οδηγό να έχει εικόνα του οχήματος σε σχέση με το φορτιστή [41]. Στο συγκεκριμένο σύστημα οι οδηγίες προς τον οδηγό δίνονται σε τρία στάδια: Στο πρώτο στάδιο (Εικόνα 1-17-α), και όταν το όχημα βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το φορτιστή, η εικόνα που παρέχει το σύστημα είναι παρόμοια με το οπτικό πεδίο του οδηγού, παρέχοντας μία καλύτερη αίσθηση για τη θέση του φορτιστή. Όταν το όχημα πλησιάσει σε απόσταση μικρότερη των 10 μέτρων στο σταθμό, η εικόνα που έχει ο οδηγός είναι αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 1-17-β, επιτρέποντας την κατάλληλη τοποθέτηση του οχήματος πάνω από το σταθμό. Στο τελευταίο στάδιο, και όταν η απόσταση του οχήματος από το φορτιστή γίνει μικρότερη από 3 μέτρα, η εικόνα που παρέχει το σύστημα (Εικόνα 1-17-γ) είναι μία κάτοψη του οχήματος, το οποίο πλέον είναι διάφανο ώστε να φαίνεται η ακριβής θέση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, επιτρέποντας έτσι λεπτούς χειρισμούς για την ελαχιστοποίηση οριζόντιων μετατοπίσεων [41].

<sup>1</sup>[https://primove.bombardier.com/fileadmin/primove/content/MEDIA/Publications/164140\\_Bomb\\_Primove\\_Auto\\_Ladesysteme\\_screen.pdf](https://primove.bombardier.com/fileadmin/primove/content/MEDIA/Publications/164140_Bomb_Primove_Auto_Ladesysteme_screen.pdf)



Εικόνα 1-17: Υποβοήθηση του οδηγού για την κατάλληλη τοποθέτηση του δευτερεύοντος πηνίου πάνω από το πρωτεύον [41].

## 1.6 Θέματα ασφάλειας σε ηλεκτρομαγνητικές διατάξεις

Τα Ηλεκτρομαγνητικά (ΗΜ) Πεδία έχουν αποτελέσει το πεδίο μίας ιδιαίτερα μεγάλης συζήτησης σχετικά με θέματα που αφορούν πιθανές επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων. Στην επαγωγική φόρτιση οι συχνότητες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που παράγεται λόγω του υψίσυχνου ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα κυμαίνονται μεταξύ 10 και 100kHz. Στο εύρος αυτών των συχνοτήτων, και στο πλαίσιο της έκθεσης σε ΗΜ πεδία, χρησιμοποιούνται συνήθως οι ακόλουθες παράμετροι<sup>1</sup> [42]:

- **Ρεύμα Επαφής ( $I_c$ )** μεταξύ ενός ατόμου και ενός αντικείμενου (σε Α). Ένα αγωγίμο αντικείμενο που βρίσκεται εντός ενός ηλεκτρικού πεδίου, ενδέχεται να φορτιστεί από το πεδίο αυτό.
- **Πυκνότητα Ρεύματος ( $J$ )**: Ορίζεται ως το ρεύμα που ρέει κάθετα προς μία διατομή σε έναν όγκο αγωγού, όπως το ανθρώπινο σώμα ή μέρος αυτού. Εκφράζεται σε Αμπέρ ανά τετραγωνικό μέτρο ( $A/m^2$ ).
- **Ένταση Ηλεκτρικού πεδίου**: Η διανυσματική ποσότητα ( $E$ ) που αντιστοιχεί στη δύναμη που ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο ανεξάρτητα από την κίνησή του στο χώρο. Εκφράζεται σε Volt ανά μέτρο ( $V/m$ ).
- **Ένταση Μαγνητικού Πεδίου**: Η διανυσματική ποσότητα ( $H$ ) που, μαζί με την πυκνότητα μαγνητικής ροής, χαρακτηρίζει ένα μαγνητικό πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου. Εκφράζεται σε Αμπέρ ανά μέτρο ( $A/m$ ).
- **Πυκνότητα Μαγνητικής Ροής**: Η διανυσματική ποσότητα ( $B$ ), που έχει ως αποτέλεσμα την άσκηση δύναμης σε κινούμενα φορτία και εκφράζεται σε Tesla ( $T$ ). Τόσο στο κενό όσο και σε βιολογικά υλικά, η ένταση του μαγνητικού πεδίου μπορεί να μετατραπεί σε πυκνότητα μαγνητικής ροής με βάση την ισοδυναμία:  $1A/m=4\pi 10^{-7} T$ .

Από τα παραπάνω μεγέθη, η πυκνότητα μαγνητικής ροής, το ρεύμα επαφής και η ένταση μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου είναι δυνατό να μετρηθούν άμεσα.

### 1.6.1 Διεθνείς και Ευρωπαϊκές Οδηγίες-Συστάσεις

Οι Βασικοί Περιορισμοί είναι περιορισμοί που αφορούν στην έκθεση σε χρόνο-μεταβλητά ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία και βασίζονται άμεσα σε αποδεδειγμένες

<sup>1</sup> Η πυκνότητα Ισχύος ( $S$ ) και τα μεγέθη *Specific energy Absorption (SA)* και *Specific energy Absorption Rate (SAR)* χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των επιπτώσεων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων αλλά σε συχνότητες μεγαλύτερες ή μικρότερες από αυτές που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης.

επιπτώσεις στην υγεία σύμφωνα με βιολογικές μελέτες. Τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των περιορισμών αυτών είναι η πυκνότητα της μαγνητικής ροής (B) και η πυκνότητα ρεύματος (J). Από τα δύο αυτά μεγέθη, η πυκνότητα μαγνητικής ροής μπορεί να μετρηθεί εύκολα σε κάποιο άτομο που εκτίθεται σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο [42].

Τα Όρια Αναφοράς παρέχονται για την πρακτική εκτίμηση της έκθεσης σε ΗΜ πεδία, ώστε να καθαρισθεί εάν οι βασικοί περιορισμοί αναμένεται να παραβιασθούν. Μερικά όρια αναφοράς προέρχονται από τους αντίστοιχους βασικούς περιορισμούς, χρησιμοποιώντας μετρήσεις και/ή υπολογιστικές τεχνικές, ενώ κάποια όρια αναφοράς διαχειρίζονται τις δυσμενείς επιπτώσεις της έμμεσης έκθεσης σε ΗΜ πεδία. Τα μεγέθη που προκύπτουν ως όρια αναφοράς είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E), η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H), η πυκνότητα μαγνητικής ροής (B), και το ρεύμα άκρων (Limb Current -  $I_L$ ). Επιπλέον, ένα μέγεθος σχετικό με την απορρόφηση ΗΜ πεδίων, το οποίο σχετίζεται και με άλλες έμμεσες επιδράσεις, είναι το ρεύμα επαφής ( $I_c$ ). Σε κάθε περίπτωση έκθεσης σε ΗΜ πεδία, οι μετρούμενες ή υπολογισθείσες τιμές των παραπάνω μεγεθών μπορούν να συγκριθούν με τα ανάλογα όρια αναφοράς. Σε περίπτωση που κάποιο μέγεθος είναι εντός των ορίων αναφοράς αυτό σημαίνει ότι θα είναι και εντός των αντίστοιχων βασικών περιορισμών. Σε περίπτωση όμως που η μετρούμενη τιμή είναι μεγαλύτερη από το επιτρεπτό όριο αναφοράς, αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι ο βασικός περιορισμός δε θα ισχύει. Υπό αυτές τις συνθήκες, ωστόσο, πρέπει να εξακριβωθεί, μέσω μετρήσεων ή υπολογισμών, εάν τηρείται ο ανάλογος βασικός περιορισμός [42].

Διαφορετικά όρια ασφαλείας τίθενται από επιμέρους οδηγίες, σχετικά με την ασφάλεια για το ευρύ κοινό και την ασφάλεια του επαγγελματικά εκτιθέμενου πληθυσμού σε χρόνο-μεταβλητά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Ειδικότερα, ο επαγγελματικά εκτιθέμενος πληθυσμός αποτελείται από ενήλικες που εκτίθενται σε ΗΜ πεδία κάτω από γνωστές συνθήκες και είναι εκπαιδευμένοι ώστε να γνωρίζουν πιθανούς κινδύνους και να παίρνουν τις ανάλογες προφυλάξεις. Αντίθετα, το ευρύ κοινό αποτελείται από άτομα όλων των ηλικιών και άτομα διαφόρων καταστάσεων υγείας, και πιθανώς περιλαμβάνει ιδιαίτερα ευάλωτες ομάδες. Σε πολλές περιπτώσεις μέλη που ανήκουν στο ευρύ κοινό δεν γνωρίζουν ότι εκτίθενται σε ΗΜ πεδία. Επίσης, μεμονωμένα άτομα από το ευρύ κοινό δεν είναι δυνατό να θεωρείται ότι παίρνουν προφυλάξεις ώστε να περιορίσουν ή να αποφύγουν την έκθεση σε ΗΜ πεδία. Επομένως, αυστηρότερα όρια θα πρέπει να τίθενται σχετικά με την έκθεση του ευρέος κοινού σε σχέση με τα ανάλογα όρια για τον επαγγελματικά εκτιθέμενο πληθυσμό [43].

### ✓ Οδηγίες της ICNIRP

Το 1998 η ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) εξέδωσε οδηγίες σχετικά με την έκθεση των ατόμων σε ΗΜ πεδία. Ο κύριος στόχος των οδηγιών αυτών είναι ο καθορισμός κατευθυντήριων γραμμών για τον περιορισμό της έκθεσης σε ΗΜ πεδία, παρέχοντας προστασία έναντι γνωστών αρνητικών επιπτώσεων στην υγεία των ατόμων [43]. Στο πλαίσιο αυτό ορίζονται τα απαιτούμενα όρια αναφοράς και οι βασικοί περιορισμοί για συχνότητες έως 300GHz (Πίνακας 1-2).

Για να αντικαταστήσει το κομμάτι της οδηγίας του 1998 που αναφέρεται στις χαμηλές συχνότητες, η ICNIRP εξέδωσε το 2010 οδηγίες σχετικά με την περιορισμένη έκθεση σε χρονομεταβλητά ηλεκτρικά, μαγνητικά και ΗΜ πεδία για το εύρος συχνοτήτων 1-100 kHz [44]. Ο Πίνακας 1-2 παρουσιάζει τα όρια αναφοράς και τους βασικούς περιορισμούς, όπως ορίζονται στις οδηγίες αυτές. Οι βασικοί περιορισμοί, αντίθετα με την επαγόμενη πυκνότητα ρεύματος που χρησιμοποιείται στις οδηγίες του 1998, βασίζονται στα επαγόμενα εσωτερικά ηλεκτρικά πεδία καθώς αυτά καθορίζουν την επίδραση των πεδίων σε βιολογικούς ιστούς. Προηγούμενες εκτιμήσεις σχετικά με τους κινδύνους στην υγεία βασίζονταν στην επαγόμενη

πυκνότητα ρεύματος, καθώς τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα βασίζονται σε αντίστοιχες μετρήσεις. Ωστόσο, νέα πειραματικά δεδομένα παρέχουν επαρκή όγκο πληροφοριών σχετικά με τα επαγόμενα εσωτερικά ηλεκτρικά πεδία, επιτρέποντας τη χρήση αυτού του μεγέθους στις οδηγίες [45].

Ενώ στις οδηγίες του 1998 οι δοσιμετρικές εκτιμήσεις για τον υπολογισμό των ορίων βασίζονται σε απλά γεωμετρικά μοντέλα, οι νέες οδηγίες του 2010 χρησιμοποιούν δεδομένα από υπολογιστικές προσομοιώσεις που βασίζονται σε ανατομικά λεπτομερή μοντέλα του ανθρωπίνου σώματος. Οι αναθεωρημένοι βασικοί περιορισμοί των οδηγιών του 2010, καθώς και τα νέα δοσιμετρικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται, έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικά επίπεδα αναφοράς. Ειδικότερα, σχετικά με τα επίπεδα αναφοράς που αφορούν στα μαγνητικά πεδία υπάρχει μία τάση για λιγότερο αυστηρά όρια, ενώ τα αντίστοιχα επίπεδα αναφοράς σχετικά με τα ηλεκτρικά πεδία είναι σχεδόν ίδια [45].

### ✓ Ευρωπαϊκή Ένωση

Σχετικά με την έκθεση του *Επαγγελματικά Εκτιθέμενου Πληθυσμού*, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει την οδηγία 2013/35/ΕΕ. Ο Πίνακας 1-2 παρουσιάζει τους βασικούς Περιορισμούς και τα επίπεδα αναφοράς όπως ορίζονται στην οδηγία αυτή. Επισημαίνεται ότι στη συγκεκριμένη οδηγία οι Βασικοί Περιορισμοί και τα Επίπεδα αναφοράς ορίζονται ως “*Οριακές Τιμές Έκθεσης*” και “*Επίπεδα Δράσης*” [46] αντίστοιχα. Και σε αυτή την περίπτωση, η συμμόρφωση με κάποιο επίπεδο δράσης εξασφαλίζει και τη συμμόρφωση με την αντίστοιχη οριακή τιμή έκθεσης, ενώ, εάν κάποιο επίπεδο δράσης είναι μεγαλύτερο από την αντίστοιχη επιτρεπόμενη τιμή, πρέπει να εξακριβωθεί, μέσω μετρήσεων ή υπολογισμών, εάν τηρείται η ανάλογη οριακή τιμή έκθεσης.

Σχετικά με τα επίπεδα αναφοράς της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E) στη συγκεκριμένη οδηγία, δίνονται *χαμηλές* και *υψηλές* τιμές για το μέγεθος αυτό (Πίνακας 1-2). Οι *χαμηλές* τιμές εξασφαλίζουν τον περιορισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε χαμηλότερα επίπεδα των αντίστοιχων επιτρεπόμενων βασικών περιορισμών αποφεύγοντας την εκδήλωση εκκενώσεων σπινθήρων στο περιβάλλον εργασίας [46]. Συμμόρφωση με τα αντίστοιχα *υψηλά όρια* εξασφαλίζει και πάλι ότι το ηλεκτρικό πεδίο δεν υπερβαίνει τους αντίστοιχους βασικούς περιορισμούς, και ότι προλαμβάνονται οι ενοχλητικές εκκενώσεις σπινθήρων, υπό την προϋπόθεση, ωστόσο, ότι λαμβάνονται επιπλέον μέτρα προστασίας που ορίζονται στη συγκεκριμένη οδηγία [46].

Σχετικά με την πυκνότητα της μαγνητικής ροής, δίνεται ένα επιπλέον όριο σχετικά με την έκθεση των άκρων στο αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο (Πίνακας 1-2). Το επίπεδο αυτό αναφοράς προκύπτει από τους αντίστοιχους βασικούς περιορισμούς σύμφωνα με επιπτώσεις στην υγεία από το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που σχετίζεται με ηλεκτρική διέγερση των ιστών των άκρων, λαμβάνοντας υπόψη ότι το μαγνητικό πεδίο συζευγνύεται ασθενέστερα με τα άκρα απ’ ό,τι με το σύνολο του σώματος [46].

Σχετικά με την έκθεση του *Ευρέος Κοινού* σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, έχει εκδοθεί η Σύσταση 1999/519/ΕΕ του Κοινοβουλίου [47]. Ο Πίνακας 1-2 παρουσιάζει τις τιμές για τους βασικούς περιορισμούς και τα επίπεδα αναφοράς όπως ορίζονται στη συγκεκριμένη σύσταση. Παρότι τα περισσότερα κράτη-μέλη της ΕΕ θεωρούν ότι η σύσταση επαρκεί για την παροχή ενός υψηλού επιπέδου προστασίας, έχοντας υιοθετήσει τα αντίστοιχα όρια, ορισμένα θέσπισαν αυστηρότερα όρια έκθεσης ενώ άλλα πρότειναν κάποιες τροποποιήσεις στη σύσταση. Η αναλυτική εφαρμογή της σύστασης από το κάθε κράτος-μέλος περιγράφεται στην αναφορά [48].

Όσον αφορά το ευρύ κοινό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή καθορίζει πολύ χαμηλότερα όρια για την πυκνότητα μαγνητικής ροής σε σύγκριση με τις κατευθυντήριες γραμμές της ICNIRP. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι οι κατευθυντήριες γραμμές της ICNIRP για το 2010 δεν

λαμβάνουν υπόψη τις επιπτώσεις σε ιατρικές συσκευές όπως βηματοδότες, μεταλλικά προσθετικά κλπ. [44]. Για παράδειγμα, το σχετικό όριο για τη σωστή λειτουργία των βηματοδοτών είναι ίσο με 15μT σύμφωνα με το πρότυπο SAE J2954 [24]. Συνεπώς, ίσως να μην είναι ασφαλές να υιοθετηθούν οι κατευθυντήριες γραμμές της ICNIRP όταν εξετάζεται η επίδραση των ΗΜ πεδίων στο ευρύ κοινό κοντά σε μαγνητικούς συζεύκτες για εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς οι επιβάτες εντός του οχήματος ή οι πεζοί κοντά στους σταθμούς θα μπορούσαν ενδεχομένως να περιλαμβάνουν άτομα με τα προαναφερθέντα ιατρικά βοηθήματα.

**Πίνακας 1-2: Βασικοί Περιορισμοί και Επίπεδα αναφοράς σύμφωνα με διάφορες οδηγίες/συστάσεις (f είναι η συχνότητα σε Hz).**

Ομάδα στην οποία απευθύνεται η οδηγία/σύσταση	Βασικοί Περιορισμοί	Επίπεδα Αναφοράς				Σύσταση/Οδηγία
	Πυκνότητα Ρεύματος – rms (mA/m <sup>2</sup> )	E (V/m)	H (A/m)	B (μT)	Μέγιστο Ρεύμα Επαφής (mA)	
Ευρύ Κοινό	f/500	87	5	6,25	0,2*10 <sup>3</sup> f	Σύσταση 1999/519/ΕΕ του Κοινοβουλίου
Ευρύ Κοινό	f/500	87	5	6,25	0,2*10 <sup>3</sup> f	ICNIRP 1998
Επαγγελματικά Εκτιθέμενος Πληθυσμός	f/100	610	24.4	30.7	0,4*10 <sup>3</sup> f	
Επαγγελματικά Εκτιθέμενος Πληθυσμός	<u>Εσωτερικό Ηλεκτρικό Πεδίο (V/m):</u> 3.8 X 10 <sup>-4</sup> f	170 / 610*	-	100/ 300†	0,4*10 <sup>3</sup> f	Οδηγία 2013/35/ΕΕ
Ευρύ Κοινό	1.35 X 10 <sup>-4</sup> f	83	21	27	0,2*10 <sup>3</sup> f	ICNIRP 2010
Επαγγελματικά Εκτιθέμενος Πληθυσμός	2.7 X 10 <sup>-4</sup> f	170	80	100	0,4*10 <sup>3</sup> f	

Σημειώσεις: \* Μέγιστη και ελάχιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όπως ορίζονται από την οδηγία 2013/35/ΕΕ

† Η τιμή των 300μT αφορά το επίπεδο αναφοράς για την πυκνότητα μαγνητικής ροής για την έκθεση των άκρων σε τοπικό μαγνητικό πεδίο.

### 1.6.2 Εκτίμηση και μέτρηση των ΗΜ πεδίων

Σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 50364, μία από τις ακόλουθες μεθόδους δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της έκθεσης σε ΗΜ πεδία:

- Μετρήσεις που υποδεικνύουν συμμόρφωση με τα όρια αναφοράς
- Μετρήσεις και ανάλυση που υποδεικνύει συμμόρφωση με τους Βασικούς Περιορισμούς
- Αριθμητικά μοντέλα που υποδεικνύουν συμμόρφωση με τους Βασικούς Περιορισμούς.

Σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 50357, οι παράμετροι των ορίων αναφοράς είναι δυνατό να μετρηθούν άμεσα και, επομένως, αποτελούν την πιο απλή μέθοδο εκτίμησης. Οι παράμετροι σχετικά με τους βασικούς περιορισμούς παρέχουν μια πιο θεμελιώδη εκτίμηση της έκθεσης σε ΗΜ πεδία, αλλά είναι ιδιαίτερα δύσκολο να μετρηθούν άμεσα, απαιτώντας, συχνά, περίπλοκους υπολογισμούς και τεχνικές αριθμητικών μοντέλων. Οι μέθοδοι αυτές, επομένως, είναι αρκετά εξειδικευμένες με μεγάλα επίπεδα πολυπλοκότητας.

Ειδικότερα, η μέθοδος εκτίμηση της έκθεσης σε ΗΜ πεδία που περιλαμβάνει ανάλυση και μετρήσεις που υποδεικνύουν συμμόρφωση με τους Βασικούς Περιορισμούς, βασίζεται σε μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τη μη-ομοιομορφία των πεδίων αλλά δε λαμβάνουν υπόψη τη μη-ομοιομορφία του ανθρώπινου ιστού. Αντίθετα, η χρήση ειδικών αριθμητικών μοντέλων για την υπόδειξη της συμμόρφωσης με Βασικούς Περιορισμούς, λαμβάνει υπόψη τη μη-ομοιομορφία τόσο των πεδίων όσο και των ιστών του ανθρώπινου σώματος, εξετάζοντας, επίσης, τις ανάλογες ιδιότητες των ιστών αυτών.

Ο Πίνακας Α-1 του παραρτήματος παρουσιάζει μία λίστα με διαθέσιμα πρότυπα που περιέχουν μεθόδους εκτίμησης της έκθεσης σε ΗΜ πεδία, καθώς και ανάλογες διαδικασίες μέτρησης.

## 1.7 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 1.7.1 Διαφοροποιήσεις στη λειτουργία δυναμικής & στατικής επαγωγικής φόρτισης

Αν και η λειτουργία συστημάτων στατικής και δυναμικής επαγωγικής φόρτισης έχει πολλά κοινά σημεία, η κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή, συχνά σε ιδιαίτερα μεγάλες ταχύτητες, επιβάλλει μία διαφορετική προσέγγιση μελέτης σε εφαρμογές δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, η οποία, δε συναντάται στη βιβλιογραφία. Ειδικότερα, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης στο φαινόμενο της διακλάδωσης [49], το οποίο υποδεικνύει την ύπαρξη πολλαπλών συχνοτήτων λειτουργίας που επιτυγχάνουν ελαχιστοποίηση της διακινούμενης αέργου ισχύος και αύξηση της απόδοσης. Ωστόσο η μεταφερόμενη ισχύς στην μπαταρία του οχήματος δύναται να μεγιστοποιηθεί μόνο σε μία από αυτές τις συχνότητες, λαμβάνοντας μηδενικές σχεδόν τιμές στις υπόλοιπες. Είναι, επομένως, σημαντικό να εξασφαλισθεί ότι το σύστημα λειτουργεί σε συχνότητες που επιτρέπουν αυξημένη μεταφορά ισχύος, παράλληλα με μία υψηλή απόδοση.

Συστήματα ελέγχου που αναπτύσσονται για εφαρμογές δυναμικής φόρτισης [35],[50],[51]. μελετούν συνήθως, το φαινόμενο της διακλάδωσης σύμφωνα με μία προσέγγιση παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται στη στατική επαγωγική φόρτιση, η οποία περιορίζεται στη μελέτη της συχνότητας του συστήματος. Ωστόσο, σε συστήματα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης η μεταφερόμενη ισχύς και η απόδοση του συστήματος επηρεάζονται όχι μόνο από τη συχνότητα λειτουργίας, αλλά και από την κίνηση του οχήματος.

Επιπλέον, κατά τη στατική φόρτιση, η στάθμευση του οχήματος πάνω από το φορτιστή για ένα ιδιαίτερα μεγάλο χρονικό διάστημα, εξασφαλίζει τον απαραίτητο χρόνο για την εφαρμογή περίπλοκων και απαιτητικών συστημάτων ελέγχου [52]-[57], που συχνά περιλαμβάνουν ασύρματη μεταφορά σημάτων πληροφοριών μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος απαιτώντας την ανάλογη προσαρμογή του συστήματος στα σήματα αυτά. Κατά τη δυναμική φόρτιση, ωστόσο, δεν υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης ελέγχων που απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα για την υλοποίησή τους, καθώς το όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα πάνω από το φορτιστή. Υπό τις συνθήκες πραγματοποίησης της δυναμικής φόρτισης, η φόρτιση διαρκεί μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου, με αποτέλεσμα οποιοσδήποτε έλεγχος εφαρμοστεί να πρέπει να ανταποκρίνεται στα στενά αυτά χρονικά πλαίσια.

Το είδος του ελέγχου που θα εφαρμοσθεί σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης εξαρτάται σημαντικά από τη διάταξη που χρησιμοποιείται: ενιαία ή τμηματική διάταξη όπως περιγράφονται στην ενότητα 1.2.2. Ειδικότερα, ο έλεγχος στην ενιαία διάταξη [58]-[62] επιδιώκει, συνήθως, ένα σταθερό ρεύμα κατά μήκος των καλωδίων στην πλευρά του πρωτεύοντος [30]. Τέτοια συστήματα, ωστόσο, απαιτούν τη συνεχή τροφοδότηση του πρωτεύοντος, το οποίο καταλαμβάνει ιδιαίτερα μεγάλη έκταση, μειώνοντας σημαντικά την

απόδοση του συστήματος [30],[58]-[59]. Ακόμη, στην περίπτωση της ενιαίας διάταξης απαιτούνται επιπλέον τεχνικές ελέγχου [32],[60] με στόχο τη μείωση των Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων που αναπτύσσονται, λόγω της συνεχούς τροφοδότησης της διάταξης. Επιπλέον, ενιαίες διατάξεις αποσκοπούν συνήθως σε ένα μικρό πλάτος στη διάταξη του πρωτεύοντος [60]-[62][60], λόγω του ιδιαίτερα μεγάλου μήκους της, γεγονός που απαιτεί ένα ιδιαίτερα μεγάλο δευτερεύον. Δευτερεύοντες διατάξεις τέτοιου μεγέθους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλα οχήματα επαγγελματικού σκοπού ή σε τραίνα [60]-[62] δεν είναι, ωστόσο, ιδιαίτερα πρακτικές για τη χρήση σε συμβατικά επιβατικά οχήματα.

Τα σημαντικά αυτά μειονεκτήματα, δεν ευνοούν τη χρήση της ενιαίας διάταξης σε εφαρμογές δυναμικής φόρτισης. Αντίθετα η τμηματική διάταξη δύναται να επιλύσει πολλά από τα προαναφερθέντα προβλήματα, μεταφέροντας ενέργεια σε διακριτά τμήματα κάθε φορά, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση του συστήματος [63]. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι κατά τη διέλευση του οχήματος πάνω από το φορτιστή, συγκεκριμένα μόνο τμήματα της κίνησης επιτρέπουν τη μεταφορά ισχύος με μεγάλη απόδοση. Η ενεργοποίηση του συστήματος, όταν το όχημα βρίσκεται εντός της ζώνης μεταφοράς ενέργειας με μεγάλη απόδοση, και αντίστοιχα η απενεργοποίησή του όταν το όχημα βρίσκεται εκτός αυτής, απαιτεί συνήθως ειδικούς μηχανισμούς ανίχνευσης της θέσης του οχήματος [64],[65], όπως για παράδειγμα αισθητήρες, οι οποίοι όμως αυξάνουν το κόστος του συστήματος. Λύσεις έχουν προταθεί για την ανίχνευση του οχήματος χωρίς τη χρήση ειδικών μηχανισμών [66], ωστόσο δεν λαμβάνουν σωστά υπόψιν τους περιορισμούς που σχετίζονται με την απόδοση του συστήματος και δύναται να αποτρέψουν τη σωστή λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης.

Επίσης, η ασύρματη μεταφορά σημάτων πληροφοριών μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι, συχνά, απαραίτητη σε διάφορες εφαρμογές δυναμικής φόρτισης [51]. Ωστόσο, οι σημαντικές καθυστερήσεις που επιφέρει η ανταλλαγή αυτή των σημάτων, καθώς και η καθυστερημένη απόκριση του συστήματος στα σήματα αυτά, περιορίζει τη λειτουργία ενός συστήματος δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε πολύ μικρές ταχύτητες [51].

Επιπλέον, η τιμή της αμοιβαίας επαγωγής μεταβάλλεται σημαντικά καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, ενώ μεταβολές παρατηρούνται, επίσης, στις αυτεπαγωγές του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου. Τεχνικές συντονισμού [50] έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση των μεταβολών αυτών, ωστόσο, περιορίζονται στη μελέτη μικρών μεταβολών του συντελεστή σύζευξης, καλύπτοντας μόνο ένα μέρος της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Παρόμοια με την αναφορά [50], πολλές μελέτες [51],[64],[65] περιορίζονται στη διερεύνηση των μεταβολών των επαγωγών σε ένα μόνο τμήμα κατά την κίνηση του οχήματος. Η μεταφορά ισχύος καθ' όλη την κίνηση του οχήματος δε λαμβάνεται υπόψιν, περιορίζοντας την εφαρμογή των προτεινόμενων λύσεων σε συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης που επιτρέπουν μικρές μόνο μετατοπίσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

Μέθοδοι έχουν προταθεί στις αναφορές [67]-[68] με στόχο την αντιμετώπιση των προβλημάτων που περιορίζουν τη λειτουργία του συστήματος σε μία μόνο μικρή περιοχή λειτουργίας κατά την κίνηση του οχήματος. Απαιτούν, ωστόσο, στοιχεία αντιστάθμισης (πυκνωτές-πηνία) επιλεγμένα σύμφωνα με την αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων. Η πρακτική αυτή είναι συνηθισμένη σε εφαρμογές στατικής επαγωγικής φόρτισης όπου τα στοιχεία αντιστάθμισης δύναται να επιλεγθούν σύμφωνα με την αυτεπαγωγή των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος [49], ώστε να αυξηθεί η μεταφερόμενη ισχύς στην μπαταρία του οχήματος επιτυγχάνοντας παράλληλα μία υψηλή απόδοση. Ωστόσο, σε εφαρμογές δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, η κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή επιφέρει μεταβολές στις τιμές των αυτεπαγωγών, οι οποίες δύναται να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της μεταφερόμενης ισχύος και της απόδοσης του συστήματος, λόγω μη σωστής επιλογής των πυκνωτών αντιστάθμισης.



Μία λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελεί η βελτιστοποίηση των στοιχείων αντιστάθμισης, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις πιθανές θέσεις του οχήματος καθώς αυτό κινείται πάνω από το φορτιστή, κάτι που ωστόσο δεν πραγματοποιείται στις αναφορές [67]-[68]. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι η βελτιστοποίηση των στοιχείων αντιστάθμισης κατά τη δυναμική φόρτιση θα πρέπει να μελετηθεί παράλληλα με τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, καθώς και την αντίσταση φορτίου. Ωστόσο μία τέτοια μέθοδος βελτιστοποίησης δεν έχει μελετηθεί ούτε στις αναφορές [67]-[68], αλλά ούτε και στις υπόλοιπες αναφορές που εξετάζουν διάφορες προσεγγίσεις για τη δυναμική φόρτιση [30],[32],[58]-[68]. Μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν προταθεί στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης [69]-[76], δεν μπορούν, ωστόσο, να εφαρμοσθούν σε εφαρμογές δυναμικής φόρτισης, καθώς δεν λαμβάνουν υπόψιν την κίνηση του οχήματος.

Η παρούσα διατριβή προτείνει μία μέθοδο βελτιστοποίησης για τον ορισμό των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών που καθορίζουν την ηλεκτρική λειτουργία ενός συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων: συχνότητα λειτουργίας, τιμές των στοιχείων αντιστάθμισης και αντίσταση φορτίου. Περιορισμοί που συνδέονται με την κίνηση του οχήματος πάνω από το σταθμό λαμβάνονται υπόψιν στην προτεινόμενη μέθοδο, με στόχο την επίτευξη της μέγιστης μεταφερόμενης ενέργειας στο όχημα, διατηρώντας, παράλληλα, μία υψηλή απόδοση.

Επιπλέον η παρούσα διατριβή προτείνει μία μέθοδο ανίχνευσης της θέσης του οχήματος η οποία δεν απαιτεί επιπλέον μηχανισμούς (όπως για παράδειγμα αισθητήρες) και, αντίθετα με παρόμοιες μεθόδους που προτείνονται στη βιβλιογραφία [66], μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά προβλήματα που σχετίζονται με την απόδοση του συστήματος. Η προτεινόμενη μέθοδος λειτουργίας του συστήματος στη δυναμική φόρτιση εξαλείφει, επίσης, απαιτήσεις επικοινωνίας μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, επιτρέποντας μεγαλύτερες ταχύτητες κατά τη φόρτιση. Η έλλειψη μηχανισμών ανίχνευσης και επικοινωνίας πρωτεύοντος-δευτερεύοντος, προϋποθέτει τη λειτουργία του συστήματος σε ένα τμήμα της κίνησης με χαμηλή απόδοση. Ωστόσο, η ανάπτυξη ενός ειδικού συστήματος ελέγχου που επιτρέπει μεταβολές στο ρεύμα εισόδου δύναται να μειώσει σημαντικά τις ενεργειακές απώλειες στη συγκεκριμένη ζώνη χαμηλής απόδοσης.

### 1.7.2 Επίδραση της επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής

Οι υποδομές επαγωγικής φόρτισης επιτρέπουν την ασύρματη μεταφορά μεγάλων ποσών ενέργειας μεταξύ του δικτύου και του ηλεκτρικού οχήματος. Η ισχύς, μάλιστα, που δύναται να μεταφερθεί ενδέχεται να ξεπερνά τα 30kW [77]. Μία τόσο μεγάλη ενεργειακή ζήτηση ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά την καμπύλη φορτίου σε ένα δίκτυο διανομής, επηρεάζοντας, παράλληλα, τη λειτουργία αλλά και το σχεδιασμό ανάπτυξης του δικτύου. Επομένως, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί ο αντίκτυπος των υποδομών επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής καθώς και ο ακριβής αριθμός των φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο διανομής, χωρίς να παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου αυτού.

Στη βιβλιογραφία παρατηρούνται αρκετές μελέτες σχετικά με την επίδραση της γρήγορης αγωγικής φόρτισης στο δίκτυο [78]-[92], ωστόσο, η βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση της επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής, είναι ιδιαίτερα περιορισμένη [93]-[97]. Επιπλέον, η βιβλιογραφία σχετικά με τη γρήγορη συμβατική φόρτιση παρουσιάζεται ιδιαίτερα ελλιπής σχετικά με τον ακριβή προσδιορισμό του αντίκτυπου των γρήγορων φορτιστών στο δίκτυο διανομής. Ειδικότερα, μελέτες που εξετάζουν την κατανομή γρήγορων φορτιστών σε ένα δίκτυο διανομής δε λαμβάνουν υπόψιν τους τις ενεργειακές ανάγκες των οχημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας [78]-[80]. Επιπλέον, μελέτες που εξετάζουν την επίδραση γρήγορων συμβατικών φορτιστών αγωγικής σύνδεσης στο δίκτυο, περιορίζονται συνήθως στη μελέτη της

λειτουργίας των σταθμών και την επίδραση στο δίκτυο σε πραγματικό χρόνο, είτε εξετάζοντας μεταβολές τάσης-ρεύματος, είτε διερευνώντας τη λειτουργία των φορτιστών στο δίκτυο σε περίπτωση σφαλμάτων [81]-[85].

Η επίδραση της γρήγορης συμβατικής φόρτισης στην καμπύλη φορτίου του δικτύου εξετάζεται στις αναφορές [86]-[92]. Ωστόσο, η έλλειψη δεδομένων σχετικά με τη φόρτιση σε πραγματικούς σταθμούς, οδηγεί σε εκτιμήσεις στις μελέτες αυτές που δεν ανταποκρίνονται σε ρεαλιστικές συνθήκες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Για παράδειγμα, οι μελέτες [86]-[87] θεωρούν ότι τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τα ηλεκτρικά οχήματα θα φτάνουν στους σταθμούς φόρτισης θα είναι παρόμοια με αυτά που συμβατικά οχήματα φτάνουν σε πρατήρια βενζίνης. Οι μελέτες αυτές δεν λαμβάνουν υπόψιν τους ότι οι ενεργειακές ανάγκες των οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι οποίες καθορίζουν και τη συμπεριφορά των χρηστών σχετικά με τον ανεφοδιασμό τους, απέχουν κατά πολύ από τις αντίστοιχες ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων. Αντίστοιχα, η αναφορά [88] θεωρεί ότι η άφιξη των οχημάτων στους σταθμούς γρήγορης φόρτισης θα είναι παρόμοια με την άφιξη των χρηστών των ηλεκτρικών οχημάτων στο σπίτι τους στο τέλος της ημέρας. Ωστόσο, η ανάγκη για γρήγορη φόρτιση, όταν οι χρήστες φτάνουν στο σπίτι τους στο τέλος της ημέρας θα είναι περιορισμένη, λόγω της μικρής ανάγκης για μετακίνηση του οχήματος τις αμέσως επόμενες ώρες, αλλά και λόγω της ικανότητας φόρτισης του οχήματος με συμβατικές και πιο οικονομικές μεθόδους στο σπίτι του εκάστοτε χρήστη.

Επίσης, μελέτες όπως αυτές της αναφοράς [89], εξετάζουν πραγματικά/στατιστικά δεδομένα σχετικά με μοτίβα κινητικότητας συμβατικών οχημάτων, θεωρώντας ότι οι ανάγκες για γρήγορη φόρτιση θα είναι μεγαλύτερες όταν τα οχήματα κινούνται στους δρόμους. Ωστόσο, αν και οι ενεργειακές ανάγκες αναμένεται να αυξηθούν μετά από μία μετακίνηση, πρέπει να εξετασθεί περαιτέρω ο τύπος της μετακίνησης αυτής. Για παράδειγμα όταν οι χρήστες μετακινούνται προς το σπίτι τους προς το τέλος της ημέρας, αναμένεται να επιλέξουν πιο απλές και οικονομικές λύσεις φόρτισης των οχημάτων τους μόλις φτάσουν στην οικία τους. Παρόμοιες μελέτες περιορίζονται στη διερεύνηση των ενεργειακών αναγκών λεωφορείων με τη μελέτη αντίστοιχων δρομολογίων [90]-[91]. Τα δεδομένα, ωστόσο, σχετικά με τη συμπεριφορά λεωφορείων, δεν μπορούν να θεωρηθούν ακριβή για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των χρηστών συμβατικών ηλεκτρικών οχημάτων σχετικά με τη χρήση λύσεων γρήγορης φόρτισης.

Μία διαφορετική προσέγγιση ακολουθείται στις αναφορές [92]-[93] για τον προσδιορισμό των ενεργειακών αναγκών της γρήγορης φόρτισης και του χρόνου άφιξης στους αντίστοιχους σταθμούς. Πιο συγκεκριμένα οι αναφορές αυτές θεωρούν ένα κατώτατο όριο του επιπέδου φόρτισης (SoC - State of Charge) της μπαταρίας του οχήματος σαν κριτήριο για έναρξη της φόρτισης σε σταθμούς ταχείας φόρτισης. Ωστόσο, αν και οι χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να φορτίσουν όταν έχουν ένα χαμηλό SoC, η φόρτιση δεν είναι βέβαιο ότι θα πραγματοποιηθεί σε σταθμό ταχείας φόρτισης, με τον οδηγό να είναι διατεθειμένος να επωμιστεί ένα αντίστοιχο αυξημένο οικονομικό κόστος. Αντίθετα, η επιλογή του οδηγού για φόρτιση σε σταθμό απλής ή ταχείας φόρτισης αναμένεται να εξαρτάται σημαντικά και από το διαθέσιμο χρόνο για φόρτιση: για παράδειγμα ο χρήστης δεν αναμένεται να φορτίσει σε σταθμό ταχείας φόρτισης ακόμα και αν έχει ένα χαμηλό SoC, σε περίπτωση που φτάσει στο χώρο εργασίας του, ή επιστρέψει στην οικία του, έχοντας διαθέσιμο ένα ιδιαίτερα μεγάλο χρονικό διάστημα για τη φόρτιση του οχήματος του.

Επιπλέον, ιδιαίτερα ελλιπής, παρουσιάζεται η βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση της επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής. Το προφίλ ζήτησης στατικών επαγωγικών φορτιστών και η επίδραση του στην ημερήσια καμπύλη φορτίου εξετάζεται στην αναφορά [93], σύμφωνα με τη διάθεση των οδηγών να παρέχουν V2G (Vehicle-to-Grid) υπηρεσίες. Ωστόσο, η διάθεση αυτή των οδηγών για την προσφορά υπηρεσιών ορίζεται αυθαίρετα, χωρίς να

λαμβάνει υπόψιν πραγματικά δεδομένα. Σχετικά με τη δυναμική επαγωγική φόρτιση, οι ενεργειακές ανάγκες των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών εξετάζονται στις αναφορές [94]-[95], ενώ οι αναφορές [96]-[97] μελετούν την παροχή V2G υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο. Πρέπει, ωστόσο, να αναφερθεί, ότι σε καμία από τις αναφορές [93]-[97] δεν εξετάζεται η επίδραση της καμπύλης φόρτισης των επαγωγικών φορτιστών στη λειτουργία του δικτύου διανομής. Παράλληλα σε καμία από τις αναφορές [93]-[97] δεν ορίζεται ο μέγιστος αριθμός υποδομών επαγωγικής φόρτισης που δύναται να εγκατασταθεί σε ένα δίκτυο, ώστε να μην εντοπίζονται προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου αυτού.

Γίνεται, επομένως, κατανοητό ότι θα πρέπει να προσδιοριστούν οι ενεργειακές ανάγκες των σταθμών επαγωγικής φόρτισης για εφαρμογές τόσο στατικής όσο και δυναμικής φόρτισης. Η διδακτορική αυτή διατριβή εισάγει μία μέθοδο για την εκτίμηση της ενεργειακής ζήτησης τόσο των στατικών όσο και των δυναμικών σταθμών ταχείας επαγωγικής φόρτισης, αξιολογώντας, επίσης, την επίδραση της ζήτησης αυτής στη λειτουργία ενός δικτύου διανομής, όσων αφορά στο προφίλ της τάσης, τη φόρτιση των γραμμών και τις απώλειες του δικτύου. Προτείνεται, επίσης, ένα εργαλείο υπολογισμού του μέγιστου αριθμού υποδομών επαγωγικής φόρτισης που δύναται να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο διανομής, με στόχο την αποφυγή προβλημάτων στη λειτουργία του δικτύου.



### Στατική Επαγωγική Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων

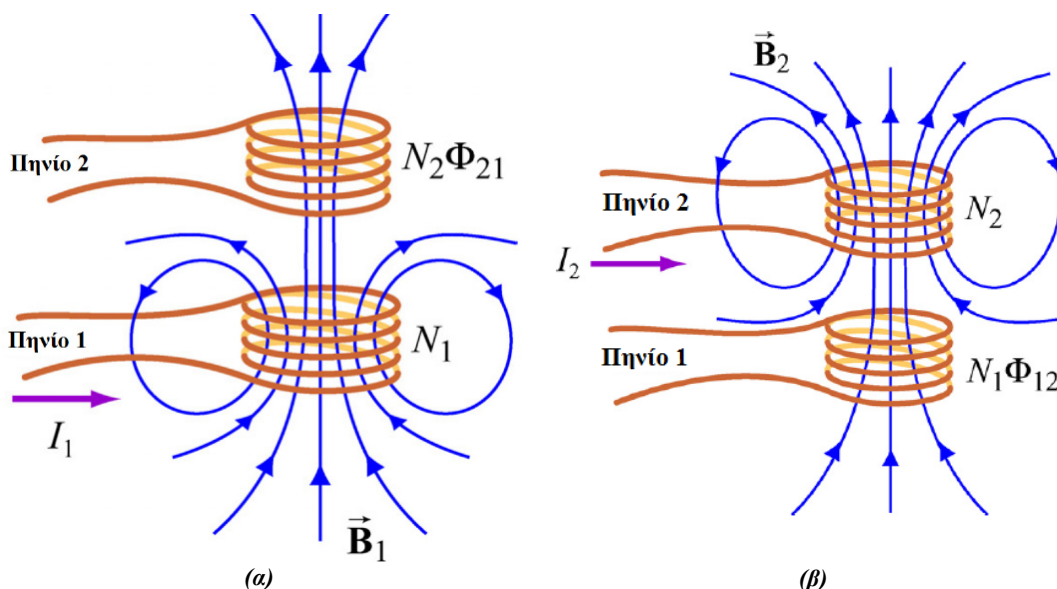
#### 2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας επαγωγικής φόρτισης

##### 2.1.1 Επαγωγική σύζευξη

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στηρίζεται στην επαγωγική σύζευξη μεταξύ δύο πηνίων. Στην Εικόνα 2-1-α τα δύο πηνία βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους με το πρώτο πηνίο να έχει  $N_1$  ελίσματα και να φέρει ένα ρεύμα  $I_1$  που παράγει ένα μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}_1$ . Στην περίπτωση που τα δύο πηνία είναι αρκούντως κοντά μεταξύ τους, μερικές από τις γραμμές της μαγνητικής ροής,  $\Phi_{21}$ , που διέρχονται από το 1<sup>ο</sup> πηνίο θα διέλθουν και από το 2<sup>ο</sup> πηνίο, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-1-α. Σε περίπτωση που το ρεύμα  $I_1$  μεταβάλλεται με το χρόνο, θα παρατηρηθεί μία επαγόμενη Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) λόγω της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής στο 2<sup>ο</sup> πηνίο [98]:

$$\varepsilon_{21} = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint_{\text{πηνίο 2}} \vec{B}_1 \cdot d\vec{S}_2 \quad (2.1)$$

όπου  $S_2$  η επιφάνεια του πηνίου 2 εντός της οποίας διέρχονται οι γραμμές της μαγνητικής ροής  $\Phi_{21}$ .



*Εικόνα 2-1: (α) Το ρεύμα στο Πηνίο 1 παράγει μία μαγνητική ροή στο πηνίο 2 (β) Το ρεύμα στο Πηνίο 2 παράγει μία μαγνητική ροή στο πηνίο 1 [98]*

Ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής  $\Phi_{21}$  στο 2<sup>ο</sup> πηνίο είναι ανάλογος του ρυθμού μεταβολής του ρεύματος στο πηνίο 1 [98]:

$$N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = M_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (2.2)$$

όπου ο συντελεστής αναλογίας  $M_{21}$  ονομάζεται αμοιβαία επαγωγή, μετρίεται σε Henry (H) και μπορεί, σύμφωνα με τη (2.2), να γραφεί ως:

$$M_{21} = N_2 \frac{\Phi_{21}}{I_1} \quad (2.3)$$

Η (2.1) μπορεί, επομένως, να γραφεί ως:

$$\varepsilon_{21} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (2.4)$$

Αντίστοιχα, έστω ότι το ρεύμα  $I_2$  μεταβάλλεται με το χρόνο στο πηνίο 2, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-1-β. Τότε η επαγόμενη ΗΕΔ στο πηνίο 1 δίνεται από τη σχέση (2.5), ενώ, παράλληλα, ένα ρεύμα επάγεται στο πηνίο 1 [98]. Στη σχέση (2.5),  $d\Phi_{12}/dt$  είναι ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής  $\Phi_{12}$  στο πηνίο 1 και  $S_1$  είναι η επιφάνεια του πηνίου 1 εντός της οποίας διέρχονται οι γραμμές της μαγνητικής ροής  $\Phi_{12}$ .

$$\varepsilon_{12} = -N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint_{\text{πηνίο 1}} \vec{B}_2 \cdot d\vec{S}_1 \quad (2.5)$$

Η μαγνητική ροή στο πηνίο 1 είναι ανάλογη του χρονομεταβλητού ρεύματος στο πηνίο 2:

$$N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = M_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (2.6)$$

Όπου ο συντελεστής αναλογίας  $M_{12}$  ονομάζεται, επίσης, αμοιβαία επαγωγή και μπορεί να γραφεί ως:

$$M_{12} = N_1 \frac{\Phi_{12}}{I_2} \quad (2.7)$$

Σύμφωνα με το θεώρημα της αμοιβαιότητας, που συνδυάζει το Νόμο του Ampere και το Νόμο Biot-Savart, μπορεί να αποδειχθεί ότι οι δύο σταθερές για την αμοιβαία επαγωγή είναι ίσες [98]:

$$M_{12} = M_{21} = M \quad (2.8)$$

Η (2.5) μπορεί, επομένως, σύμφωνα με τις (2.6) και (2.8), να γραφεί ως:

$$\varepsilon_{12} = -M \frac{dI_2}{dt} \quad (2.9)$$

Θεωρώντας ένα πηνίο με  $N$  ελίγματα που φέρει ένα ρεύμα  $I$  με αντιωρολογιακή κατεύθυνση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-2, σε περίπτωση σταθερού ρεύματος, η μαγνητική ροή,  $\Phi$ , μέσω του πηνίου θα παραμένει σταθερή. Ωστόσο, σε περίπτωση που το ρεύμα  $I$  μεταβάλλεται με το χρόνο, σύμφωνα με το Νόμο του Faraday, μία επαγόμενη ΗΕΔ θα δημιουργηθεί αντιτιθέμενη στη μεταβολή του ρεύματος. Στην περίπτωση αυτή, το επαγόμενο ρεύμα θα ρέει με ωρολογιακή ή αντιωρολογιακή κατεύθυνση εάν  $\frac{dI}{dt} > 0$  ή  $\frac{dI}{dt} < 0$  αντίστοιχα. Η ιδιότητα του πηνίου, σύμφωνα με την οποία το ίδιο το μαγνητικό του πεδίο αντιτίθεται στη μεταβολή του ρεύματος, ονομάζεται αυτεπαγωγή και η παραγομένη ΗΕΔ καλείται αυτό-επαγόμενη ΗΕΔ και συμβολίζεται με  $\varepsilon_L$  [98]:

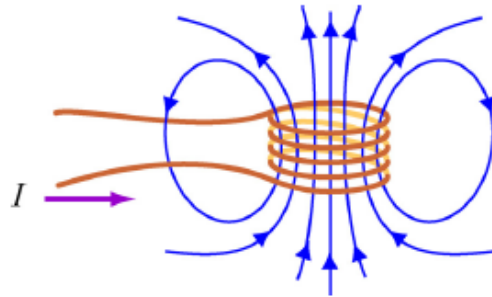
$$\varepsilon_L = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.10)$$

Και σχετίζεται με την αυτεπαγωγή  $L$  με τη σχέση:

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt} \quad (2.11)$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις (2.10) και (2.11) η αυτεπαγωγή μπορεί να γραφεί ως:

$$L = N \frac{\Phi_B}{I} \quad (2.12)$$



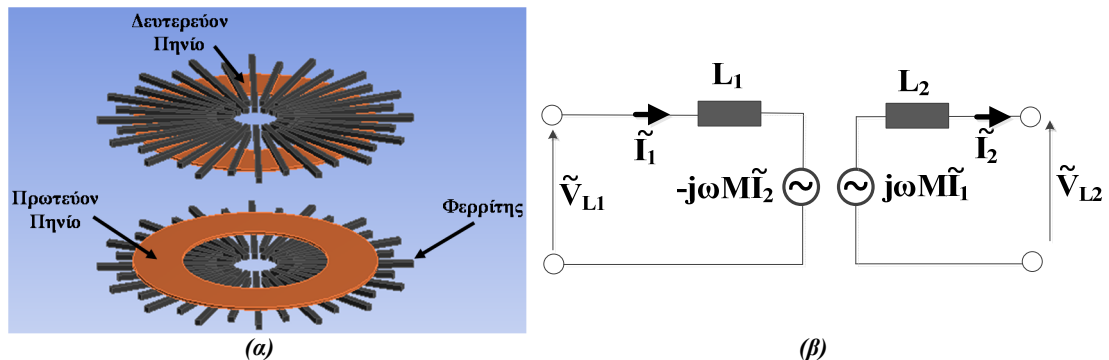
Εικόνα 2-2: Μαγνητική ροή που διέρχεται μέσω του πηνίου με  $N$  ελίγματα και ρεύμα  $I$  [98]

Ο μαγνητικός συζεύκτης σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης αποτελείται από ένα πηνίο στην πλευρά του πρωτεύοντος που διαρρέεται από ρεύμα υψηλής συχνότητας και επάγει μία τάση στο δευτερεύον πηνίο όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου θεωρείται ίση με  $L_1$  και  $L_2$  αντίστοιχα, ενώ τα δύο πηνία έχουν μία αμοιβαία επαγωγή ίση με  $M$ . Σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως για παράδειγμα φερρίτης, χρησιμοποιούνται συνήθως σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-3-α, ώστε να κατευθύνουν και να ενισχύσουν την παραγόμενη μαγνητική ροή που παράγεται από το πρωτεύον πηνίο [4].

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μαγνητικού συζεύκτη [8] δίνεται στην Εικόνα 2-3-β, όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.13)$$

Στη σχέση (2.13)  $f$  είναι η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος.



Εικόνα 2-3: (α) Παράδειγμα μαγνητικού συζεύκτη σε σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και (β) Ισοδύναμο κύκλωμα μαγνητικού συζεύκτη

Σύμφωνα με το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα η τάση στα άκρα των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θα είναι:

$$\tilde{V}_{L_1} = j\omega L_1 \tilde{I}_1 - j\omega M \tilde{I}_2 \quad (2.14)$$

$$\tilde{V}_{L_2} = j\omega M \tilde{I}_1 - j\omega L_2 \tilde{I}_2 \quad (2.15)$$

### 2.1.2 Καλώδια Litz

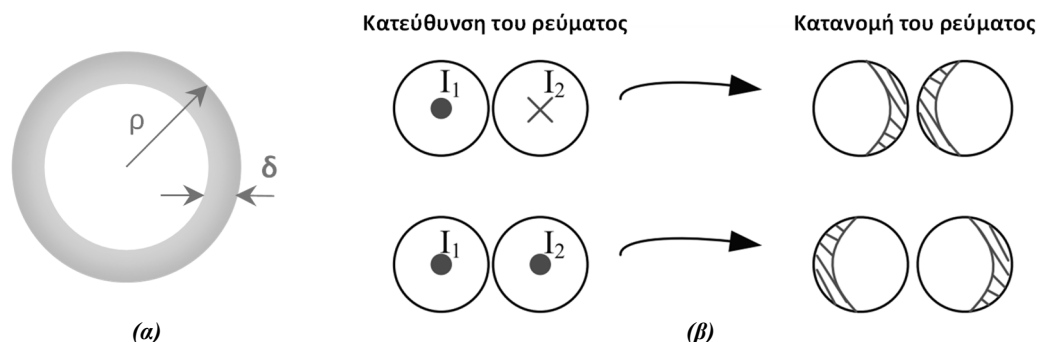
Σε εφαρμογές σταθερού (DC) ρεύματος, το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό είναι ισοκατανεμημένο σε όλη την επιφάνεια της διατομής του αγωγού. Αυτό δε συμβαίνει, ωστόσο,

σε εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος, λόγω του επιδερμικού φαινομένου και του φαινομένου εγγύτητας.

Πιο συγκεκριμένα, το επιδερμικό φαινόμενο, εκφράζει την τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος που διαρρέει έναν κυλινδρικό αγωγό να μεταδίδεται κοντά στην εξωτερική του επιφάνεια [99], όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-4-α. Το μεγαλύτερο ποσοστό του ρεύματος ρέει σε μία περιοχή κοντά στην επιφάνεια, η οποία έχει βάθος  $\delta$ , το οποίο ονομάζεται επιδερμικό βάθος (Εικόνα 2-4-α) και μπορεί να υπολογισθεί ως [99]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (2.16)$$

όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα του ρεύματος,  $\sigma$  είναι η αγωγιμότητα και  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού. Επομένως, το βάθος  $\delta$ , σύμφωνα με τη (2.16), εξαρτάται από τη γωνιακή συχνότητα  $\omega$  και, επομένως, από τη συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό. Μάλιστα, μεγάλες συχνότητες δύναται να οδηγήσουν σε ιδιαίτερα μικρές τιμές του βάθους  $\delta$ , αυξάνοντας σημαντικά τις ωμικές απώλειες του αγωγού [99].



Εικόνα 2-4: (α) Κατανομή ρεύματος σε αγωγούς, λόγω (α) του επιδερμικού φαινομένου και (β) του φαινομένου εγγύτητας [102]

Το φαινόμενο εγγύτητας εκφράζει την τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος να ρέει σε μη επιθυμητές διαδρομές κατά μήκος ενός αγωγού, λόγω της παρουσίας μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από κοντινούς σε αυτόν αγωγούς, αυξάνοντας έτσι τις απώλειες του αγωγού [100]-[101]. Για παράδειγμα, το φαινόμενο εγγύτητας σε δύο αγωγούς που διαρρέονται από ρεύμα ίδιας ή αντίθετης φοράς, οδηγεί στην κατανομή του ρεύματος που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-4-β.

Τόσο το επιδερμικό φαινόμενο όσο και το φαινόμενο εγγύτητας δύναται να περιοριστούν σημαντικά με τη χρήση καλωδίων Litz στα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Τα καλώδια Litz αποτελούνται από πολλά μικρότερα καλώδια, μεταξύ τους μονωμένα (Εικόνα 2-5). Η χρήση καλωδίων μικρής διατομής εξασφαλίζει ότι στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας το επιδερμικό βάθος  $\delta$ , όπως εκφράζεται από τη (2.16), θα είναι μεγαλύτερο από την ακτίνα  $\rho$  της διατομής του αγωγού (Εικόνα 2-4-α). Επίσης, οι μικρότεροι αυτοί αγωγοί δύναται να περιστραφούν κατάλληλα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-5, με στόχο την ισοκατανομή των ρευμάτων σε κάθε αγωγό και την αποφυγή του φαινομένου εγγύτητας.





Εικόνα 2-5: Κατασκευή καλωδίου Litz<sup>1</sup>

Σύμφωνα με δεδομένα που είναι διαθέσιμα για εμπορικά καλώδια Litz<sup>1</sup>, η AC αντίστασή τους εκφράζεται ως:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = H_s + K_s \left( \frac{N_s D_I}{D_0} \right)^2 G \quad (2.17)$$

όπου:

$H_s$  είναι η αναλογία αντίστασης του κάθε ανεξάρτητου αγωγού

$K_s$  είναι σταθερά που εξαρτάται από τον αριθμό  $N_s$  των αγωγών σε όλο το καλώδιο

$D_I$  είναι η διάμετρος των ανεξάρτητων αγωγών σε ίντσες

$D_0$  είναι η διάμετρος του συνολικού καλωδίου που περιέχει όλους τους αγωγούς,

Ο όρος  $G$  ισούται με:

$$G = \left( \frac{D_I \sqrt{f}}{10.44} \right)^4 \quad (2.18)$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα λειτουργίας σε Hz

### 2.1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικής φόρτισης

Η χρήση καλωδίων Litz περιορίζει σημαντικά τις ωμικές απώλειες σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης, ωστόσο, δεν τις εξαλείφει, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μίας μικρής ωμικής αντίστασης των καλωδίων στο πρωτεύον και δευτερεύον του συστήματος που μπορεί να θεωρηθεί ίση με  $R_1$  και  $R_2$  αντίστοιχα. Το ισοδύναμο κύκλωμα, λαμβάνοντας υπόψη και τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ , δίνεται στην Εικόνα 2-6 και οι (2.14) και (2.15) μετασχηματίζονται σε:

$$\widetilde{V}_{L_1} = j\omega L_1 \widetilde{I}_1 + R_1 \widetilde{I}_1 - j\omega M \widetilde{I}_2 \quad (2.19)$$

$$\widetilde{V}_{L_2} = j\omega M \widetilde{I}_1 - R_2 \widetilde{I}_2 - j\omega L_2 \widetilde{I}_2 \quad (2.20)$$

Το φορτίο που αντιπροσωπεύει την μπαταρία του οχήματος αναμένεται να συνδεθεί στα άκρα του δευτερεύοντος στην Εικόνα 2-6 μετά από έναν ανορθωτή και ένα κατάλληλο φίλτρο [49]. Η αντίσταση  $R_L$  παριστάνει το αντίστοιχο φορτίο της μπαταρίας του οχήματος [103] στο ισοδύναμο κύκλωμα στην Εικόνα 2-7. Η τάση επομένως στα άκρα της αντίστασης  $R_L$  θα είναι ίση με:

$$\widetilde{V}_{L_2} = R_L \widetilde{I}_2 \quad (2.21)$$

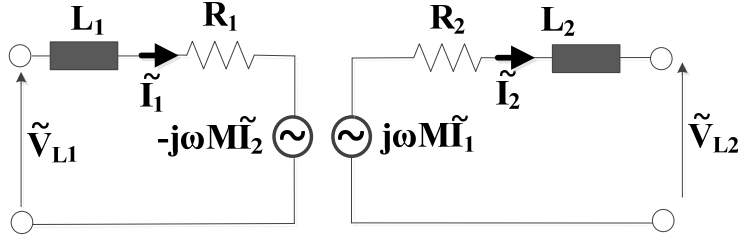
<sup>1</sup> New England Wire Technologies

Αντικαθιστώντας τη (2.21) στη (2.20) προκύπτει ότι:

$$\tilde{I}_2 = \frac{j\omega M}{R_L + R_2 + j\omega L_2} \tilde{I}_1 \quad (2.22)$$

Η ισχύς επομένως που μεταφέρεται στην αντίσταση φορτίου  $R_L$  θα είναι ίση με:

$$P = R_L |\tilde{I}_2|^2 = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{(R_L + R_2)^2 + (\omega L_2)^2} |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.23)$$



Εικόνα 2-6: Ισοδύναμο κύκλωμα μαγνητικού συζεύκτη, λαμβάνοντας υπόψιν και την αντίσταση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος

Με αντικατάσταση της (2.22) στη (2.19) προκύπτει ότι:

$$\tilde{V}_{L1} = \left\{ \left[ R_1 + \frac{\omega^2 M^2 (R_L + R_2)}{(R_L + R_2)^2 + \omega^2 L_2^2} \right] + j \left[ \omega L_1 - \frac{\omega^3 M^2 L_2}{(R_L + R_2)^2 + \omega^2 L_2^2} \right] \right\} \tilde{I}_1 \quad (2.24)$$

Επομένως, η φαινόμενη ισχύς στην είσοδο του κυκλώματος στην Εικόνα 2-7 θα είναι ίση με:

$$S = \tilde{V}_{L1} \tilde{I}_1^* \quad (2.25)$$

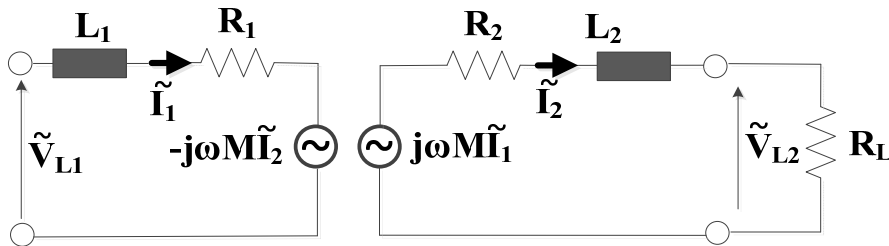
και, σύμφωνα με τη (2.24):

$$S_{in} = \left\{ \left[ R_1 + \frac{\omega^2 M^2 (R_L + R_2)}{(R_L + R_2)^2 + \omega^2 L_2^2} \right] + j \left[ \omega L_1 - \frac{\omega^3 M^2 L_2}{(R_L + R_2)^2 + \omega^2 L_2^2} \right] \right\} |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.26)$$

Επομένως η ενεργός και άεργος ισχύς στην είσοδο του κυκλώματος θα δίνονται από τις σχέσεις (2.27) και (2.28) αντίστοιχα.

$$P_{in} = Re\{S_{in}\} = \left[ R_1 + \frac{\omega^2 M^2 (R_L + R_2)}{(R_L + R_2)^2 + \omega^2 L_2^2} \right] |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.27)$$

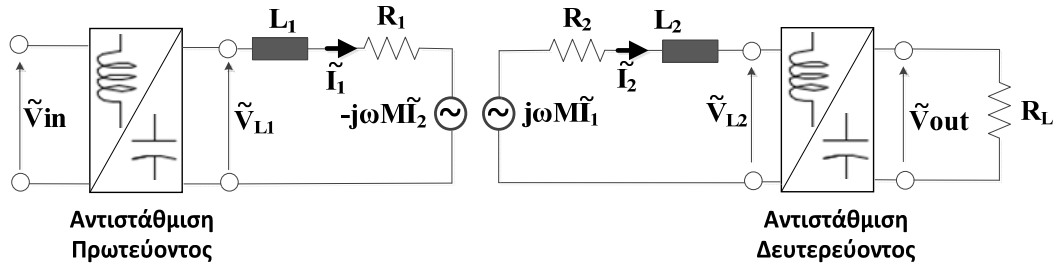
$$Q_{in} = Im\{S_{in}\} = \left[ \omega L_1 - \frac{\omega^3 M^2 L_2}{(R_L + R_2)^2 + \omega^2 L_2^2} \right] |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.28)$$



Εικόνα 2-7: Ισοδύναμο κύκλωμα μαγνητικού συζεύκτη, όπου απεικονίζεται η αντίσταση φορτίου  $R_L$

## 2.2 Τοπολογίες αντιστάθμισης

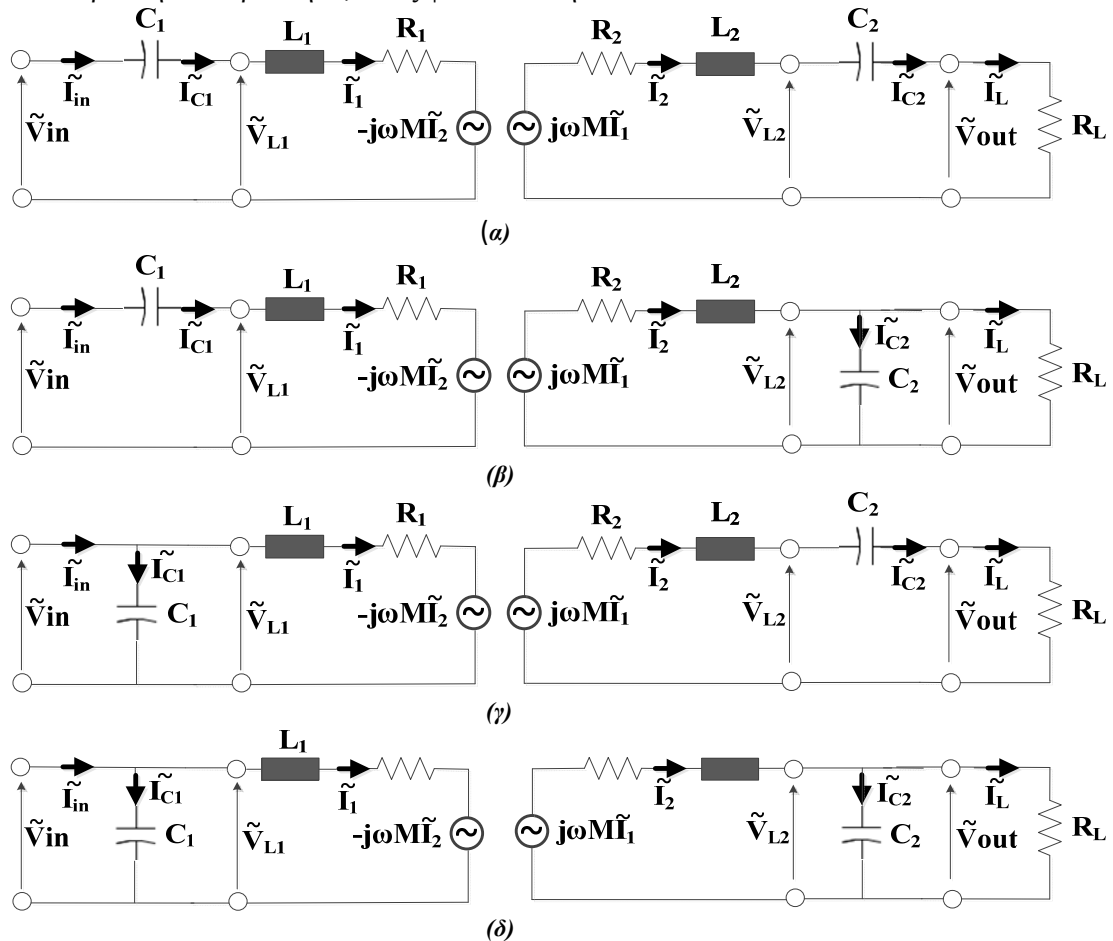
Σημαντική αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος στη σχέση (2.23), αλλά και μείωση της αέργου ισχύος (2.28) που διακινείται στο σύστημα επαγωγικής φόρτισης, δύναται να επιτευχθεί με τη χρήση στοιχείων αντιστάθμισης (πυκνωτές και/ή πηνία) στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-8.



Εικόνα 2-8: Χρήση στοιχείων αντιστάθμισης στο πρωτεύον και δευτερεύον του συστήματος

### 2.2.1 Τοπολογίες αντιστάθμισης ενός πυκνωτή

Βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης [8]-[14],[16]-[19],[21],[28]-[30],[33],[49], βασίζονται στη χρήση ενός πυκνωτή στο πρωτεύον και το δευτερεύον. Ο τρόπος σύνδεσης των πυκνωτών αντιστάθμισης (σε σειρά ή παράλληλα) στο πρωτεύον και το δευτερεύον του συστήματος καθορίζει και την ονομασία όπως τοπολογίας αντιστάθμισης: Σειρά-Σειρά, Σειρά Παράλληλα, Παράλληλα-Σειρά και Παράλληλα-Παράλληλα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-9.



Εικόνα 2-9: Βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης: (α) Σειρά-Σειρά, (β) Σειρά-Παράλληλα, (γ) Παράλληλα-Σειρά και (δ) Παράλληλα-Παράλληλα.

## ✓ Συνδεσμολογία Δευτερεύοντος

Στην περίπτωση εν σειράς συνδεσμολογίας του πυκνωτή αντιστάθμισης στο δευτερεύον (Εικόνα 2-9-α & γ), θα ισχύει:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{C_2} = \tilde{I}_L \quad (2.29)$$

$$\tilde{V}_{L_2} = \frac{1}{j\omega C_2} \tilde{I}_{C_2} + R_L \tilde{I}_L \quad (2.30)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας τη (2.30) στη (2.20) και λαμβάνοντας υπόψιν τη (2.29):

$$\begin{array}{l} \text{Συνδεσμολογία} \\ \text{δευτερεύοντος} \\ \text{σε σειρά} \end{array} \quad \tilde{I}_L = \tilde{I}_2 = \frac{j\omega M}{R_L + R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})} \tilde{I}_1 \quad (2.31)$$

Η ισχύς εξόδου, επομένως, στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$\begin{array}{l} \text{Συνδεσμολογία} \\ \text{δευτερεύοντος} \\ \text{σε σειρά} \end{array} \quad S_{out} = \tilde{V}_{out} \tilde{I}_L^* = R_L |\tilde{I}_L|^2 = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{(R_L + R_2)^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2} |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.32)$$

Στην περίπτωση παράλληλης συνδεσμολογίας του πυκνωτή αντιστάθμισης στο δευτερεύον (Εικόνα 2-9-β & δ) θα ισχύει:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{C_2} + \tilde{I}_L \quad (2.33)$$

$$\tilde{V}_{out} = \tilde{V}_{L_2} = \frac{1}{j\omega C_2} \tilde{I}_{C_2} = R_L \tilde{I}_L \quad (2.34)$$

Σύμφωνα με τη (2.34) προκύπτει ότι:

$$\tilde{I}_{C_2} = j\omega C_2 R_L \tilde{I}_L \quad (2.35)$$

Σύμφωνα με τη (2.33) και λαμβάνοντας υπόψιν τη (2.35):

$$\tilde{I}_L = \frac{1}{1 + j\omega C_2 R_L} \tilde{I}_2 \quad (2.36)$$

Αντικαθιστώντας τη (2.36) στη (2.34):

$$\tilde{V}_{L_2} = R_L \tilde{I}_L = \frac{R_L}{1 + j\omega C_2 R_L} \tilde{I}_2 \quad (2.37)$$

Αντικαθιστώντας τη (2.37) στη (2.20), προκύπτει:

$$\tilde{I}_2 = \frac{j\omega M - \omega^2 M C_2 R_L}{(R_L + R_2 - \omega^2 L_2 C_2 R_L) + j(\omega L_2 + \omega C_2 R_L R_2)} \tilde{I}_1 \quad (2.38)$$

Και σύμφωνα με τη (2.36):

$$\tilde{I}_L = \frac{j\omega M}{(R_L + R_2 - \omega^2 L_2 C_2 R_L) + j(\omega L_2 + \omega C_2 R_L R_2)} \tilde{I}_1 \quad (2.39)$$

Η ισχύς εξόδου επομένως στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$\begin{array}{l} \text{Παράλληλη} \\ \text{Συνδεσμολογία} \\ \text{δευτερεύοντος} \end{array} \quad \begin{aligned} S_{out} &= \tilde{V}_{out} \tilde{I}_L^* = R_L |\tilde{I}_L|^2 \\ &= \frac{\omega^2 M^2 R_L}{(R_L + R_2 - \omega^2 L_2 C_2 R_L)^2 + (\omega L_2 + \omega C_2 R_L R_2)^2} |\tilde{I}_1|^2 \end{aligned} \quad (2.40)$$

Η ισχύς που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος, θα είναι  $P_{out} = Re\{S_{out}\}$ , και θα δίνεται, ανάλογα με την εν σειρά ή παράλληλη συνδεσμολογία του πυκνωτή αντιστάθμισης στο δευτερεύον, σύμφωνα με την ακόλουθη έκφραση:

$$P_{out} = \begin{cases} \frac{\omega^2 M^2 R_L}{(R_L + R_2)^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2} |\tilde{I}_1|^2, & 2^{ov} \text{ σε σειρά} \\ \frac{\omega^2 M^2 R_L}{(R_L + R_2 - \omega^2 L_2 C_2 R_L)^2 + (\omega L_2 + \omega C_2 R_L R_2)^2} |\tilde{I}_1|^2, & 2^{ov} \text{ παράλληλα} \end{cases} \quad (2.41)$$

✓ **Συνδεσμολογία πρωτεύοντος**

Σύμφωνα με τις (2.31) και (2.38) προκύπτει:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_1 * \begin{cases} \frac{j\omega M}{R_L + R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})}, & 2^{ov} \text{ σε σειρά} \\ \frac{j\omega M - \omega^2 M C_2 R_L}{(R_L + R_2 - \omega^2 L_2 C_2 R_L) + j(\omega L_2 + \omega C_2 R_L R_2)}, & 2^{ov} \text{ παράλληλα} \end{cases} \quad (2.42)$$

Η (2.42) μπορεί να γραφεί ως:

$$\tilde{I}_2 = K * \tilde{I}_1 \quad (2.43)$$

με

$$\tilde{K} = \begin{cases} \tilde{K}_\sigma, & 2^{ov} \text{ σε σειρά, με } \tilde{K}_\sigma = \frac{j\omega M}{R_L + R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})} \\ \tilde{K}_\pi, & 2^{ov} \text{ παράλληλα, με } \tilde{K}_\pi = \frac{j\omega M - \omega^2 M C_2 R_L}{(R_L + R_2 - \omega^2 L_2 C_2 R_L) + j(\omega L_2 + \omega C_2 R_L R_2)} \end{cases} \quad (2.44)$$

Σύμφωνα με τη (2.19) και τη (2.43):

$$\tilde{V}_{L_1} = (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M \tilde{K}) \tilde{I}_1 \quad (2.45)$$

όπου το  $\tilde{K}$  δίνεται από τη (2.44) ανάλογα με τη συνδεσμολογία του δευτερεύοντος

Σε περίπτωση που ο πυκνωτής πρωτεύοντος συνδέεται *εν σειρά* στο κύκλωμα (Εικόνα 2-9-α & β), τότε:

$$\tilde{I}_{in} = \tilde{I}_{C_1} = \tilde{I}_1 \quad (2.46)$$

$$\tilde{V}_{in} = \frac{1}{j\omega C_1} \tilde{I}_1 + \tilde{V}_{L_1} = (\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + R_1 - j\omega M \tilde{K}) \tilde{I}_1 \quad (2.47)$$

Στην περίπτωση αυτή, επομένως, η φαινόμενη ισχύς στην είσοδο θα είναι:

$$\text{Ion σε σειρά} \quad \tilde{S}_{in} = \tilde{V}_{in} \tilde{I}_{in}^* = (\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + R_1 - j\omega M \tilde{K}) |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.48)$$

Σε περίπτωση που ο πυκνωτής πρωτεύοντος συνδέεται *παράλληλα* στο κύκλωμα (Εικόνα 2-9-γ & δ), τότε:

$$\tilde{I}_{in} = \tilde{I}_{C_1} + \tilde{I}_1 \quad (2.49)$$

$$\tilde{V}_{in} = \tilde{V}_{L_1} = \tilde{V}_{C_1} = \frac{1}{j\omega C_1} \tilde{I}_{C_1} \quad (2.50)$$

Σύμφωνα με τις (2.49) και (2.50):

$$\widetilde{I}_{in} = j\omega C_1 \widetilde{V}_{in} + \widetilde{I}_1 \quad (2.51)$$

Στην περίπτωση αυτή, επομένως, η φαινόμενη ισχύς στην είσοδο θα είναι:

$$\widetilde{S}_{in} = \widetilde{V}_{in} \widetilde{I}_{in}^* = \widetilde{V}_{in} (j\omega C_1 \widetilde{V}_{in} + \widetilde{I}_1)^* = -j\omega C_1 |\widetilde{V}_{in}|^2 + \widetilde{V}_{in} \widetilde{I}_1^* \quad (2.52)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τη (2.45) και δεδομένου ότι  $\widetilde{V}_{in} = \widetilde{V}_{L_1}$ , σύμφωνα με τη (2.50):

$$\text{1ov παράλληλα} \quad \widetilde{S}_{in} = \left\{ -j\omega C_1 \left| \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + R_1 - j\omega M \widetilde{K} \right|^2 + (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M \widetilde{K}) \right\} |\widetilde{I}_1|^2 \quad (2.53)$$

Επομένως, η ενεργός ισχύς,  $P_{in} = Re\{\widetilde{S}_{in}\}$ , και η άεργος ισχύς,  $Q_{in} = Im\{\widetilde{S}_{in}\}$ , στην είσοδο του κυκλώματος, σύμφωνα με τη (2.53), θα δίνονται από τις σχέσεις (2.54) και (2.55) αντίστοιχα. Στις σχέσεις αυτές,  $Re\{\widetilde{K}\}$  και  $Im\{\widetilde{K}\}$  είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του συντελεστή  $\widetilde{K}$ , ο οποίος δίνεται ανάλογα με τη συνδεσμολογία του δευτερεύοντος, σύμφωνα με τη σχέση (2.44).

$$P_{in} = |\widetilde{I}_1|^2 (R_1 + \omega M Im\{\widetilde{K}\}) \quad (2.54)$$

$$Q_{in} = \begin{cases} |\widetilde{I}_1|^2 \left\{ \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \omega M Re\{\widetilde{K}\} \right\}, & \text{1ov σε σειρά} \\ |\widetilde{I}_1|^2 \left\{ -\omega C_1 \left[ \left( \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \omega M * Re\{\widetilde{K}\} \right)^2 + (R_1 + \omega M Im\{\widetilde{K}\})^2 \right] \right\}, & \text{1ov παράλληλα} \end{cases} \quad (2.55)$$

#### ✓ Επιλογή στοιχείων αντιστάθμισης

Οι τιμές των στοιχείων αντιστάθμισης πραγματοποιούνται, συνήθως, με στόχο την αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος  $P_{out}$  και το μηδενισμό της άεργου ισχύος  $Q_{in}$ , ώστε να επιτευχθεί μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος.

Για παράδειγμα στην τοπολογία Σειρά-Σειρά, ο πυκνωτής δευτερεύοντος μπορεί να επιλεγεί ίσος με:

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2} \quad (2.56)$$

Στην περίπτωση αυτή, η ισχύς εξόδου δύναται να αυξηθεί και να γίνει ίση με:

$$P_{out} = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{(R_L + R_2)^2} |\widetilde{I}_1|^2 \quad (2.57)$$

Επιπλέον, η επιλογή του πυκνωτή  $C_2$  σύμφωνα με τη (2.56), οδηγεί στο μηδενισμό του πραγματικού μέρους του συντελεστή  $\widetilde{K}$ , σύμφωνα με τη (2.44). Με την επιλογή της τιμής για τον πυκνωτή συντονισμού  $C_1$ , σύμφωνα με τη (2.58), η άεργος ισχύς στη (2.55) μηδενίζεται και επιτυγχάνεται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος στην Εικόνα 2-8.

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1} \quad (2.58)$$

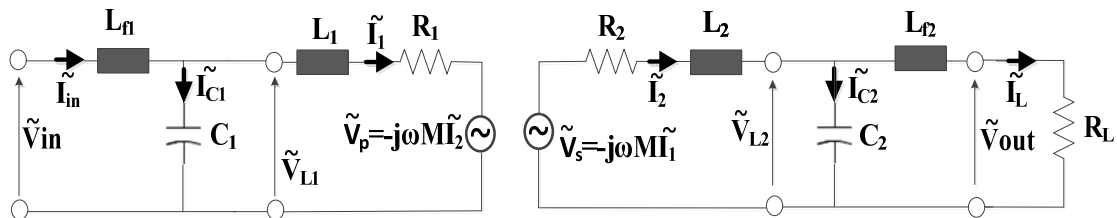
Αντίστοιχες τιμές για τους πυκνωτές στις υπόλοιπες βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης δίνονται στον Πίνακα Β-1 του παραρτήματος.

### 2.2.2 Τοπολογίες συνδυασμού στοιχείων

Εκτός από τις τοπολογίες που υλοποιούνται με έναν πυκνωτή στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, έχουν, επίσης, προταθεί τοπολογίες που υλοποιούνται με τη χρήση περισσότερων του ενός στοιχείων αντιστάθμισης, τόσο στην πλευρά του δευτερεύοντος όσο και του δευτερεύοντος. Μεταξύ αυτών η πιο διαδεδομένη τοπολογία είναι η LCL τοπολογία [65],[103],[104]. Παραπλήσια με την LCL τοπολογία, αλλά με την προσθήκη ενός επιπλέον πυκνωτή, είναι η τοπολογία LCC (ή LCCL) [56],[67],[68],[105],[106],[107].

#### 2.2.2.1 LCL τοπολογία αντιστάθμισης

Η LCL τοπολογία υλοποιείται με τη χρήση ενός πυκνωτή σε παράλληλη σύνδεση με το πηνίο της διάταξης, καθώς και τη χρήση ενός επιπλέον πηνίου αντιστάθμισης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-10.



Εικόνα 2-10: LCL τοπολογία αντιστάθμισης

Εκφράσεις σχετικά με την ισχύ εισόδου και εξόδου μπορούν και πάλι να εκφραστούν όπως και για τις τοπολογίες αντιστάθμισης ενός πυκνωτή. Η εισαγωγή των επιπλέον πηνίων  $L_{f1}$  και  $L_{f2}$  οδηγεί σε ιδιαίτερα περίπλοκες εκφράσεις, ο τρόπος εξαγωγής των οποίων περιγράφεται στο Παράρτημα Β.

Συνήθως, ωστόσο, πρακτική στη βιβλιογραφία [104] είναι η επιλογή της τιμής των πηνίων αντιστάθμισης  $L_{f1}$  και  $L_{f2}$  σύμφωνα με την τιμή της αυτεπαγωγής των πηνίων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος:

$$L_{f1} = L_1 \quad (2.59)$$

$$L_{f2} = L_2 \quad (2.60)$$

Επιπλέον οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  επιλέγονται ώστε να ικανοποιούν τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\omega^2 = \frac{1}{C_1 L_{f1}} \quad (2.61)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{C_2 L_{f2}} \quad (2.62)$$

Η χρήση καλωδίου Litz σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης οδηγεί σε ιδιαίτερα μικρές τιμές αντιστάσεων των πηνίων,  $R_1$  και  $R_2$ , οι οποίες, προς απλοποίηση των υπολογισμών, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες [49],[51]:  $R_1 \cong 0$  και  $R_2 \cong 0$ . Επομένως, σύμφωνα με το κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-10 και εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων και ρευμάτων Kirchhoff στην πλευρά του πρωτεύοντος:

$$\widetilde{V}_{in} = j\omega L_{f_1} \widetilde{I}_{in} + \frac{1}{j\omega C_1} \widetilde{I}_{C_1} \quad (2.63)$$

$$\frac{1}{j\omega C_1} \widetilde{I}_{C_1} = j\omega L_1 \widetilde{I}_1 - j\omega M \widetilde{I}_2 \quad (2.64)$$

$$\widetilde{I}_{in} = \widetilde{I}_{C_1} + \widetilde{I}_1 \quad (2.65)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις (2.59), (2.61) και (2.65), η (2.63) μπορεί να γραφεί ως:

$$\widetilde{I}_1 = -j \frac{\widetilde{V}_{in}}{\omega L_1} \quad (2.66)$$

Ενώ, λαμβάνοντας υπόψιν τις (2.59), (2.61) και (2.65), η (2.64) μπορεί να γραφεί ως:

$$\widetilde{I}_{in} = \frac{M}{L_1} \widetilde{I}_2 \quad (2.67)$$

Στην πλευρά του δευτερεύοντος θα ισχύει:

$$j\omega M \widetilde{I}_1 = j\omega L_2 \widetilde{I}_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \widetilde{I}_{C_2} \quad (2.68)$$

$$\frac{1}{j\omega C_2} \widetilde{I}_{C_2} = j\omega L_2 \widetilde{I}_L + \widetilde{V}_{out} \quad (2.69)$$

$$\widetilde{I}_2 = \widetilde{I}_{C_2} + \widetilde{I}_L \quad (2.70)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις (2.60), (2.62) και (2.70), η (2.68) μπορεί να γραφεί ως:

$$\widetilde{I}_L = \frac{M}{L_2} \widetilde{I}_1 \quad (2.71)$$

Και σύμφωνα με τη (2.66):

$$\widetilde{I}_L = -j \frac{M}{\omega L_1 L_2} \widetilde{V}_{in} \quad (2.72)$$

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψιν τις (2.60), (2.62) και (2.70), η (2.69) μπορεί να γραφεί ως:

$$\widetilde{I}_2 = j \frac{\widetilde{V}_{out}}{\omega L_2} \quad (2.73)$$

Η φαινόμενη ισχύς στην έξοδο, στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$\widetilde{S}_{out} = \widetilde{V}_{out} \widetilde{I}_L^* \quad (2.74)$$

Και σύμφωνα με τη (2.72):

$$\widetilde{S}_{out} = j \frac{M}{\omega L_1 L_2} \widetilde{V}_{out} \widetilde{V}_{in}^* \quad (2.75)$$

Αν η γωνία του διανύσματος των τάσεων  $\widetilde{V}_L$  και  $\widetilde{V}_{in}$  είναι  $\theta_{V_{out}}$  και  $\theta_{V_{in}}$  αντίστοιχα, τότε:

$$\widetilde{S}_{out} = \frac{M}{\omega L_1 L_2} |\widetilde{V}_{out}| |\widetilde{V}_{in}| \angle^{\theta_{V_{out}} - \theta_{V_{in}} + \pi/2} \quad (2.76)$$

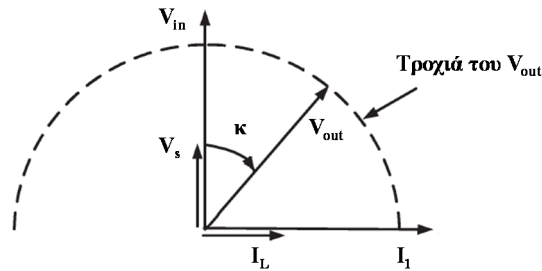
Η ενεργός ισχύς εξόδου θα είναι:



$$P_{out} = Re\{\widetilde{S}_{out}\} = \frac{M}{\omega L_1 L_2} |\widetilde{V}_{out}| |\widetilde{V}_{in}| \sin(\theta_{V_{out}} - \theta_{V_{in}}) \quad (2.77)$$

Αν η γωνία μεταξύ των  $\widetilde{V}_{in}$  και  $\widetilde{V}_{out}$  είναι ίση με  $\kappa$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-11, η ενεργός ισχύς εξόδου θα είναι:

$$P_{out} = Re\{\widetilde{S}_{out}\} = -\frac{M}{\omega L_1 L_2} |\widetilde{V}_{out}| |\widetilde{V}_{in}| \sin(\kappa) \quad (2.78)$$

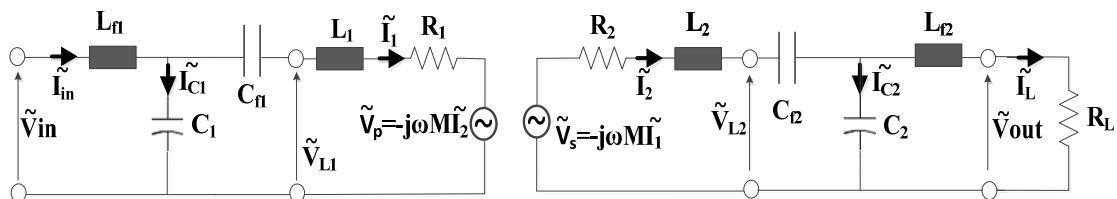


Εικόνα 2-11: Διάγραμμα φάσεων για την LCL τοπολογία αντιστάθμισης και την επιλογή των στοιχείων αντιστάθμισης σύμφωνα με τις (2.59)-(2.62) [104]

Σύμφωνα με τη (2.78) η ισχύς εξόδου στην LCL τοπολογία μπορεί να ελεγχθεί μέσω των μέτρων των τάσεων  $\widetilde{V}_{out}$  και  $\widetilde{V}_{in}$  καθώς και μέσω της μεταξύ τους γωνίας  $\kappa$ . Επιπλέον, ο έλεγχος της γωνίας  $\kappa$  επιτρέπει την αμφίδρομη μεταφορά ισχύος από το δευτερεύον στο δίκτυο, επιτρέποντας την υλοποίηση V2G (Vehicle-to-Grid) λειτουργίας. Ειδικότερα, αρνητικό ή θετικό πρόσημο για τη γωνία  $\kappa$ , σύμφωνα με τη (2.78), υποδεικνύει ότι το δευτερεύον δέχεται ή αποδίδει ισχύ αντίστοιχα.

### 2.2.2.2 LCC τοπολογία αντιστάθμισης

Η LCC (ή LCCL) τοπολογία αντιστάθμισης είναι παρόμοια με την LCL τοπολογία, με την προσθήκη, ωστόσο, των πυκνωτών  $C_{f1}$  και  $C_{f2}$  στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-12.



Εικόνα 2-12: LCC τοπολογία αντιστάθμισης

Εκφράσεις σχετικά με την ισχύ εισόδου και εξόδου μπορούν και σε αυτή την περίπτωση να εκφραστούν όπως και για τις προηγούμενες τοπολογίες αντιστάθμισης και περιγράφονται στο Παράρτημα Β.

Ωστόσο, συνήθης πρακτική για την LCC τοπολογία είναι η επιλογή των στοιχείων αντιστάθμισης ώστε να ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες [106]:

$$L_{f1} = \frac{1}{\omega^2 C_1} \quad (2.79)$$

$$L_{f2} = \frac{1}{\omega^2 C_2} \quad (2.80)$$

$$L_1 - L_{f_1} = \frac{1}{\omega^2 C_{f_1}} \quad (2.81)$$

$$L_2 - L_{f_2} = \frac{1}{\omega^2 C_{f_2}} \quad (2.82)$$

Σύμφωνα με το κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-12 και εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων και ρευμάτων Kirchoff στην πλευρά του πρωτεύοντος, θεωρώντας αμελητέες σχεδόν αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ :

$$\widetilde{V}_{in} = j\omega L_{f_1} \widetilde{I}_{in} + \frac{1}{j\omega C_1} \widetilde{I}_{C_1} \quad (2.83)$$

$$\frac{1}{j\omega C_1} \widetilde{I}_{C_1} = (j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_{f_1}}) \widetilde{I}_1 - j\omega M \widetilde{I}_2 \quad (2.84)$$

$$\widetilde{I}_{in} = \widetilde{I}_{C_1} + \widetilde{I}_1 \quad (2.85)$$

Σύμφωνα με τις (2.79),(2.83) και (2.85):

$$\widetilde{V}_{in} = j\omega L_{f_1} \widetilde{I}_1 \quad (2.86)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις (2.81),(2.84) και (2.85):

$$\widetilde{I}_{in} = \frac{M}{L_{f_1}} \widetilde{I}_2 \quad (2.87)$$

Στην πλευρά του δευτερεύοντος θα ισχύει:

$$j\omega M \widetilde{I}_1 = (j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_{f_2}}) \widetilde{I}_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \widetilde{I}_{C_2} \quad (2.88)$$

$$\frac{1}{j\omega C_2} \widetilde{I}_{C_2} = j\omega L_2 \widetilde{I}_L + \widetilde{V}_{out} \quad (2.89)$$

$$\widetilde{I}_2 = \widetilde{I}_{C_2} + \widetilde{I}_L \quad (2.90)$$

Σύμφωνα με τις (2.89),(2.90) και λαμβάνοντας υπόψιν τη (2.80):

$$\widetilde{V}_{out} = -j\omega L_{f_2} \widetilde{I}_2 \quad (2.91)$$

Αντικαθιστώντας τη (2.90) στη (2.88) και λαμβάνοντας υπόψιν τη (2.82):

$$\widetilde{I}_L = \frac{M}{L_{f_2}} \widetilde{I}_1 \quad (2.92)$$

Επιπλέον, σύμφωνα με τις (2.87) και (2.91):

$$\widetilde{I}_{in} = -\frac{M}{j\omega L_{f_1} L_{f_2}} \widetilde{V}_{out} \quad (2.93)$$

Ενώ, σύμφωνα με τις (2.86) και (2.92):

$$\tilde{I}_L = \frac{M}{j\omega L_{f_1} L_{f_2}} \tilde{V}_{in} \quad (2.94)$$

Επιπλέον, η τάση στα άκρα της αντίστασης  $R_L$  θα είναι ίση με:

$$\tilde{V}_{out} = R_L \tilde{I}_L \quad (2.95)$$

άρα, σύμφωνα με τις (2.93) και (2.94):

$$\tilde{V}_{in} = \frac{\omega^2 L_{f_1}^2 L_{f_2}^2}{M^2 R_L} \tilde{I}_{in} \quad (2.96)$$

Στην περίπτωση, επομένως, της LCC τοπολογίας, και εάν τα στοιχεία αντιστάθμισης επιλεγθούν σύμφωνα με τις (2.79)-(2.82), η τάση  $\tilde{V}_{in}$  είναι σε φάση με το ρεύμα  $\tilde{I}_{in}$  σύμφωνα με τη (2.96), υποδεικνύοντας μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος στην Εικόνα 2-12. Επιπλέον το μέτρο του ρεύματος εξόδου  $\tilde{I}_L$  εξαρτάται, σύμφωνα με τη (2.94) από την τάση εισόδου  $\tilde{V}_{in}$ , ενώ, το ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο  $\tilde{I}_1$  μπορεί, επίσης, να καθορισθεί από το μέτρο της τάσης εισόδου, σύμφωνα με τη (2.86). Καθώς η τάση εισόδου μπορεί να ορισθεί ανεξάρτητα του φορτίου της μπαταρίας του οχήματος, τόσο το ρεύμα  $\tilde{I}_1$  στο πρωτεύον τύλιγμα όσο και το ρεύμα εξόδου  $\tilde{I}_L$  μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα του φορτίου.

Είναι, επομένως, φανερό ότι η προσθήκη επιπλέον στοιχείων αντιστάθμισης δύναται να αποδειχθεί ιδιαίτερα ευνοϊκή, παρέχοντας τη δυνατότητα για αμφίδρομη μεταφορά ισχύος, ή παρέχοντας ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στο ρεύμα που διαρρέει τα διάφορα σημεία της διάταξης. Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι, λόγω των υψηλών τάσεων που δύναται να αναπτυχθούν στα άκρα των στοιχείων αντιστάθμισης, απαιτούνται, συνήθως, στοιχεία αντιστάθμισης με ένα ιδιαίτερα αυξημένο οικονομικό κόστος. Υλοποιώντας, επομένως, μία LCL ή LCC τοπολογία σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης δύναται να αυξηθεί σημαντικά το κόστος κατασκευής, σε σύγκριση με μία βασική τοπολογία αντιστάθμισης, λόγω της απαίτησης χρήσης πολλαπλάσιων στοιχείων αντιστάθμισης.

### 2.3 Μελέτη του Μαγνητικού Συζεύκτη

Όπως αναφέρθηκε και στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, οι διατάξεις μονής όψεως (Εικόνα 1-5) τείνουν να επικρατήσουν σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, υπάρχει μία πληθώρα μαγνητικών διατάξεων μονής όψεως που δύναται να χρησιμοποιηθούν, με την ικανότητα μεταφοράς ισχύος σε ικανοποιητικές τιμές διακένου και μετατόπισης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, να αποτελεί το βασικό κριτήριο για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης. Σύμφωνα με τη (2.41), η ισχύς που αποδίδεται στην μπαταρία του οχήματος εξαρτάται τόσο από την αμοιβαία επαγωγή  $M$  και την αυτεπαγωγή  $L_2$ , που προσδιορίζονται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά της διάταξης, όσο και από την τιμή του πυκνωτή αντιστάθμισης  $C_2$ , το ρεύμα  $I_1$ , τη γωνιακή συχνότητα  $\omega=2\pi f$ , και την αντίσταση φορτίου  $R_L$ . Μία πιο απλή προσέγγιση, ωστόσο, για τον προσδιορισμό της ικανότητας μέγιστης μεταφοράς ισχύος σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης, αποτελεί η έκφραση της αποδιδόμενης ισχύος με την τάση ανοικτοκυκλώσεως  $V_{oc}$  και το ρεύμα βραχυκυκλώσεως  $I_{sc}$  στην πλευρά του δευτερεύοντος [18],[19],[108]. Ειδικότερα, όταν το ρεύμα στην πλευρά του πρωτεύοντος πηνίου διατηρείται σταθερό η τάση ανοικτοκυκλώσεως μπορεί να γραφεί ως:

$$V_{oc} = j\omega M I_1 \quad (2.97)$$

Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως αντικατοπτρίζει την τάση στη (2.97), περιοριζόμενη μόνο από την αυτεπαγωγή  $L_2$  του δευτερεύοντος πηνίου [108]:

$$I_{sc} = \frac{M}{L_2} I_1 \quad (2.98)$$

Η μεταφερόμενη ισχύς μπορεί, στην περίπτωση αυτή, να εκφραστεί ως [18]:

$$P_{out} = P_{su} * Q = V_{oc} I_{sc} Q = \omega M I_1 \frac{M}{L_2} I_1 = \omega I_1^2 \frac{M^2}{L_2} Q \quad (2.99)$$

όπου  $P_{su}$  είναι η μη αντισταθμισμένη ισχύς:

$$P_{su} = V_{oc} I_{sc} = \omega I_1^2 \frac{M^2}{L_2} \quad (2.100)$$

και  $Q$  ορίζεται ως ο συντελεστής ποιότητας του δευτερεύοντος, ο οποίος εξαρτάται από την επιλογή της τοπολογίας αντιστάθμισης στην πλευρά του δευτερεύοντος και την αντίσταση φορτίου:

$$Q = \frac{P_{out}}{P_{su}} \quad (2.101)$$

Συγκρίνοντας τη (2.99) με τη (2.41) παρατηρείται ότι η (2.41) μπορεί να γραφεί στη μορφή της (2.99) επιλέγοντας κατάλληλα το συντελεστή ποιότητας  $Q$ , ανάλογα με την τοπολογία που χρησιμοποιείται. Επιλέγοντας τιμές για τους πυκνωτές πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, σύμφωνα με τον Πίνακα B-1 του παραρτήματος B, αναλυτικές εκφράσεις για το συντελεστή ποιότητας για κάθε τοπολογία δίνονται στον Πίνακα B-2 του αντίστοιχου παραρτήματος [49].

Στη στατική επαγωγική φόρτιση, η σταθερή τιμή της αυτεπαγωγής  $L_2$ , καθώς το όχημα μένει σταθερό χωρίς να μετακινείται πάνω από το φορτιστή, μπορεί να οδηγήσει στον καθορισμό του συντελεστή ποιότητας  $Q$  σε μία επιθυμητή τιμή. Σε αυτό συμβάλει επίσης και η ανάπτυξη ειδικών συστημάτων ελέγχου στην πλευρά του δευτερεύοντος που καθορίζουν την τιμή του ρεύματος ή της τάσης στην μπαταρία του οχήματος, συμβάλλοντας έτσι στην επίτευξη μίας κατάλληλης τιμής για την αντίσταση φορτίου  $R_L$ , και καταλήγοντας σε μία επιθυμητή τιμή για το συντελεστή ποιότητας. Η μέγιστη ικανότητα ανοχής σε VA των διαφόρων στοιχείων περιορίζει πρακτικά το συντελεστή ποιότητας  $Q$  σε τιμές 4-6 [18],[19],[108].

Θεωρώντας στη στατική επαγωγική φόρτιση την επίτευξη ενός αρκετά μεγάλου και σταθερού συντελεστή ποιότητας, η μεταφερόμενη ισχύς, σύμφωνα με τη (2.99), εξαρτάται, από τη γωνιακή ταχύτητα  $\omega=2\pi f$ , το ρεύμα  $I_1$  και τον όρο  $\frac{M^2}{L_2}$ . Η συχνότητα  $f$  δύναται να λάβει ιδιαίτερα μεγάλες τιμές, ωστόσο, η μέγιστη τιμή της περιορίζεται από τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται στη διάταξη, καθώς και από πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για τη στατική επαγωγική φόρτιση και αφορούν συγκεκριμένες εφαρμογές [24]. Επιπλέον, η μέγιστη τιμή του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο  $I_1$  καθορίζεται από τις ιδιότητες του καλωδίου Litz που χρησιμοποιείται.

Καθοριστικής σημασίας σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης είναι, σύμφωνα με τη (2.99), η επίτευξη μίας μεγάλης τιμής για τον όρο  $\frac{M^2}{L_2}$ . Η αμοιβαία επαγωγή,  $M$ , και η αυτεπαγωγή του πηνίου στο δευτερεύον,  $L_2$ , εξαρτώνται σημαντικά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάταξης που χρησιμοποιείται κάθε φορά σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης και μπορούν να προσδιορισθούν με τη χρήση προγραμμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

### 2.3.1 Προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Η κατανομή του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου μέσα στα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα μπορεί να περιγραφεί με τις εξισώσεις Maxwell στη διαφορική τους μορφή:

$$\begin{array}{l} \text{Θεώρημα του} \\ \text{Ampere} \end{array} \quad \nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.102)$$

$$\begin{array}{l} \text{Νόμος του} \\ \text{Faraday} \end{array} \quad \nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2.103)$$

$$\begin{array}{l} \text{Νόμος του} \\ \text{Gauss} \end{array} \quad \nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (2.104)$$

Όπου  $H$  είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου,  $J$  η πυκνότητα ρεύματος,  $D$  η ηλεκτρική μετατόπιση,  $E$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και  $B$  η πυκνότητα μαγνητικής ροής του πεδίου.

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$  και η πυκνότητα της μαγνητικής ροής  $B$  σε ομογενή και ισότροπα μέσα συνδέονται με τη σχέση:

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (2.105)$$

όπου  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα.

Επίσης, σε ομογενή και ισότροπα μέσα είναι:

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} \quad (2.106)$$

όπου  $\varepsilon$  η ηλεκτρική διαπερατότητα

Επίσης, σύμφωνα με το νόμο του Ohm:

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (2.107)$$

Όπου  $\sigma$  η ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Η περιγραφή του μαγνητικού πεδίου από το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό  $\bar{A}$  σύμφωνα με τη (2.108) ικανοποιεί άμεσα τη (2.104), καθώς  $\nabla \cdot \nabla \times \bar{A} = 0$

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (2.108)$$

Σύμφωνα με τη (2.108) η (2.103) μπορεί να γραφεί ως:

$$\nabla \times \left( \bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.109)$$

Η (2.109) ικανοποιείται αυτόματα εάν:

$$\bar{E} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = -\nabla V \quad (2.110)$$

Όπου  $V$  είναι το ηλεκτρικό βαθμωτό δυναμικό, καθώς  $\nabla \times (\nabla V) = 0$

Επομένως, η (2.106), σύμφωνα με τη (2.110) μπορεί να γραφεί ως:

$$\bar{D} = \varepsilon \left( -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \nabla V \right) \quad (2.111)$$

Ενώ σύμφωνα με τη (2.110) η (2.107) μπορεί να γραφεί ως:

$$\bar{J} = \sigma \left( -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \nabla V \right) \quad (2.112)$$

Επιπλέον η (2.102), σύμφωνα με τη (2.105) και τη (2.108) μπορεί να γραφεί ως:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2.113)$$

Και αντικαθιστώντας στη (2.113) τις (2.111) και (2.112), προκύπτει:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V - \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} - \varepsilon \frac{\partial \nabla V}{\partial t} \quad (2.114)$$

### **Μαγνητοστατικό Πεδίο:**

Στη στατική περίπτωση η (2.114) μπορεί να γραφεί ως:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = -\sigma \nabla V \quad (2.115)$$

Η επιβαλλόμενη πυκνότητα ρεύματος συμβολίζεται με  $\bar{J}_o$ :

$$\bar{J}_o = -\sigma \nabla V \quad (2.116)$$

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψιν τη (2.116), η (2.115) μπορεί να γραφεί ως:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J}_o \quad (2.117)$$

### **Μαγνητοδυναμικό Πεδίο:**

Στις συχνότητες λειτουργίας των διατάξεων επαγωγικής φόρτισης μπορούμε να θεωρήσουμε ότι:

$$\frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \ll \bar{J} \quad (2.118)$$

Επομένως η (2.113) μπορεί να γραφεί ως:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J} \quad (2.119)$$

Αντικαθιστώντας τη (2.112) στη (2.119) προκύπτει:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \sigma \nabla V \quad (2.120)$$

Και αντικαθιστώντας τη (2.116) στη (2.120):

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = \bar{J}_o - \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (2.121)$$

Επομένως, είτε σε μαγνητοστατικά είτε σε μαγνητοδυναμικά πεδία η χρήση της (2.117) ή της (2.121) αντίστοιχα, επιτρέπει την έκφραση των συνθηκών του μαγνητικού πεδίου όχι από τις δύο εξισώσεις (2.102) και (2.103), αλλά μόνο από μία εξίσωση.

Σε περίπτωση απλών γεωμετριών, αναλυτικές τεχνικές μπορούν να προσδιορισθούν για την επίλυση της (2.117) ή της (2.121). Ωστόσο, περιπτώσεις πιο περίπλοκων γεωμετριών όπως είναι οι τρισδιάστατες διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, απαιτούν την επίλυση του προβλήματος με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Οι αριθμητικές αυτές μέθοδοι δεν επιλύουν το συνεχές πρόβλημα, όπως αυτό εκφράζεται από τις διαφορικές εξισώσεις του πεδίου, αλλά κάποιο αντίστοιχο διακριτό πρόβλημα. Αυτό έχει ως

αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μία προσεγγιστική λύση του προβλήματος, η οποία, ωστόσο, δύναται να είναι ιδιαίτερα ακριβής.

Πιο συγκεκριμένα, με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων η άγνωστη ποσότητα (π.χ. διανυσματικό δυναμικό) υπολογίζεται σε έναν αριθμό κατάλληλα επιλεγμένων σημείων (ή αλλιώς κόμβων) και όχι σε όλα τα σημεία του πεδίου ορισμού. Οι μέθοδοι αυτές μετατρέπουν τις διαφορικές εξισώσεις σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με αγνώστους τις τιμές του δυναμικού σε επιλεγμένους κόμβους και η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων που προκύπτει παρέχει την προσεγγιστική λύση. Η τιμή του δυναμικού για τα υπόλοιπα σημεία του χώρου ανάγεται με τη βοήθεια κατάλληλων συναρτήσεων παρεμβολής [109].

Η επίλυση ενός προβλήματος απαιτεί, επομένως, αρκετούς κόμβους, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ακρίβεια, με το διακριτό πρόβλημα να προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό, στην περίπτωση αυτή, το αντίστοιχο συνεχές. Ωστόσο, μεγάλος αριθμός κόμβων οδηγεί σε ένα σύστημα εξισώσεων που απαιτεί ιδιαίτερα μεγάλο υπολογιστικό χρόνο για την επίλυσή του από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Είναι, επομένως, φανερό, ότι απαιτείται ένας συμβιβασμός μεταξύ της ακρίβειας στην επιθυμητή λύση και του υπολογιστικού χρόνου για την εξαγωγή της λύσης αυτής.

Το σφάλμα στην προσέγγιση της λύσης δεν εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των κόμβων που επιλέγονται, αλλά και από το είδος της αριθμητικής μεθόδου που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος. Οι διαφορές των μεθόδων που χρησιμοποιούνται έγκεινται στον τρόπο διακριτοποίησης της προς επίλυσης διαφορικής εξίσωσης. Για παράδειγμα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων διακριτοποιεί κάποια ολοκληρωτική μορφή της διαφορικής εξίσωσης. Το διακριτό πρόβλημα προκύπτει χωρίζοντας το χώρο σε μικρότερους χώρους (στοιχεία). Η άγνωστη ποσότητα στο εσωτερικό των χώρων αυτών προσδιορίζεται με τη βοήθεια των τιμών στις κορυφές (κόμβους) και με τη βοήθεια συναρτήσεων παρεμβολής (ή αλλιώς συναρτήσεις μορφής). Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι η επικρατέστερη των αριθμητικών μεθόδων, καθώς προσαρμόζεται εύκολα σε περιπτώσεις που παρουσιάζουν πολύπλοκη γεωμετρία [109].

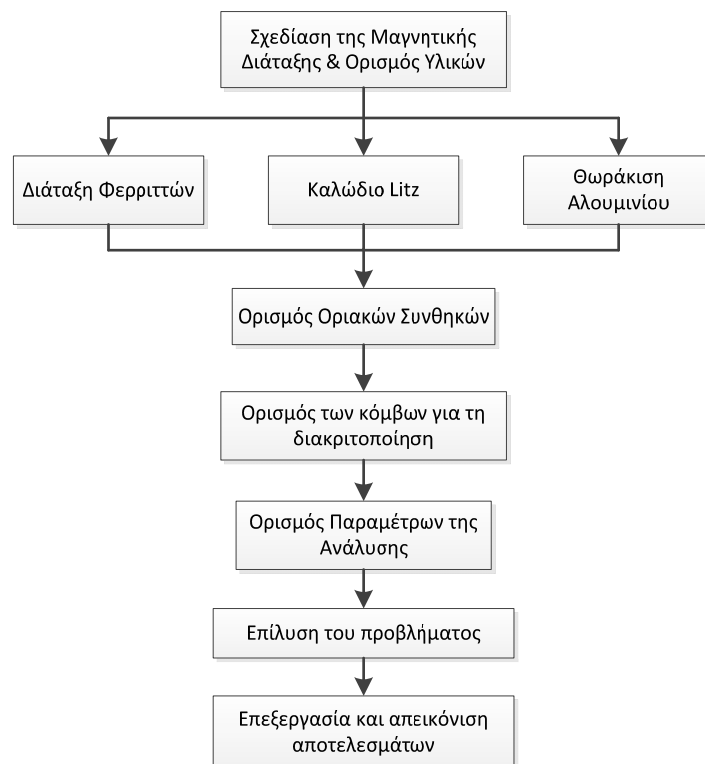
Υπάρχει μία πληθώρα προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων τόσο για προβλήματα σε δύο διαστάσεις (π.χ. FEMM) όσο και για προβλήματα τριών διαστάσεων (π.χ. Ansoft Maxwell, Ansys). Ωστόσο, η περιπλοκότητα των γεωμετριών που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, απαιτεί τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων που επιτρέπουν την ανάλυση σε τρεις διαστάσεις.

Τα βασικά στάδια σχεδίασης και ανάλυσης ενός προβλήματος σε προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, δίνονται στην Εικόνα 2-13. Το πρώτο στάδιο αποτελεί τη σχεδίαση της μαγνητικής διάταξης, που στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται, συνήθως, από τη διάταξη των φερριτών, το καλώδιο Litz και τη θωράκιση αλουμινίου.

Η επίλυση του προβλήματος δεν εκτείνεται σε άπειρη απόσταση από το μαγνητικό συζεύκτη αλλά περιορίζεται σε μία περιοχή κοντά στο φορτιστή. Για παράδειγμα το Ansoft Maxwell δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού μίας περιοχής (Region) που καλύπτει τη διάταξη που πρόκειται να μελετηθεί. Η μαγνητική ροή ορίζεται παράλληλα στις επιφάνειες της περιοχής που έχει σχεδιαστεί, επομένως δε χρειάζεται να οριστούν κάποιες επιπλέον οριακές συνθήκες.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, βασικό στάδιο για την επίλυση προβλημάτων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων είναι η διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων με την επιλογή κατάλληλων κόμβων. Η αυτόματη επιλογή των κόμβων που πραγματοποιείται από το ίδιο το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται (Ansys ή Maxwell) οδηγεί, συνήθως, σε ιδιαίτερα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα προγράμματα αυτά, βέβαια, επιτρέπουν την περαιτέρω

αλλαγή των παραμέτρων για την επιλογή των κόμβων, σε περιπτώσεις εξειδικευμένων προβλημάτων.



*Εικόνα 2-13: Στάδια ανάλυσης και επεξεργασίας σε προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.*

Το επόμενο στάδιο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-13, περιλαμβάνει τον ορισμό των παραμέτρων της ανάλυσης: Τα προγράμματα Ansys και Maxwell επιτρέπουν τον ορισμό της επιθυμητής ακρίβειας για συγκεκριμένα μεγέθη (π.χ. αυτεπαγωγές ή αμοιβαία επαγωγή). Στη συνέχεια το πρόβλημα επιλύεται και εξάγονται οι τιμές των ζητούμενων μεγεθών. Τα προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπουν τόσο την άμεση απεικόνιση αποτελεσμάτων (όπως για παράδειγμα η απεικόνιση της κατεύθυνσης και της έντασης του μαγνητικού πεδίου στην εξεταζόμενη διάταξη), όσο και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών.

### 2.3.2 Μαγνητικές διατάξεις στατικής επαγωγικής φόρτισης

Τα σημαντικά πλεονεκτήματα των συζευκτών μονής όψεως, με τον περιορισμό της μαγνητικής ροής μόνο μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος έχουν οδηγήσει στην επικράτησή τους σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, έναντι συζευκτών διπλής όψεως. Οι βασικότερες διατάξεις μονής όψεως που χρησιμοποιούνται, σήμερα, για την επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να διακριθούν περαιτέρω σε διατάξεις ενός ή περισσότερων πηνίων.

Σκοπός των ακόλουθων υποενοτήτων είναι μία ανασκόπηση των διατάξεων αυτών ώστε να διακριθούν οι διαφορές μεταξύ τους και τα πλεονεκτήματα της κάθε μίας. Στο πλαίσιο αυτό δεν εξετάζεται η βελτιστοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των διατάξεων αυτών (εύρεση βέλτιστων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του χρησιμοποιούμενου φερρίτη, κατάλληλη τοποθέτηση των τυλιγμάτων κλπ.). Η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών αυτών των διατάξεων μπορεί να αναζητηθεί στις αναφορές [18]-[19],[110]-[111] όπου μελετάται εκτενώς.



Σημειώνεται, επιπλέον, ότι δε λαμβάνεται υπόψιν η θωράκιση αλουμινίου που χρησιμοποιείται για τον περιορισμό των ΗΜ πεδίων σε διατάξεις επαγωγικής φόρτισης και επομένως δε λαμβάνονται υπόψιν οι απώλειες δινορρευμάτων. Χρησιμοποιείται, επομένως, μαγνητοστατική ανάλυση που προσφέρεται από την πλειονότητα των προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση που πραγματοποιείται στις ακόλουθες υποενότητες.

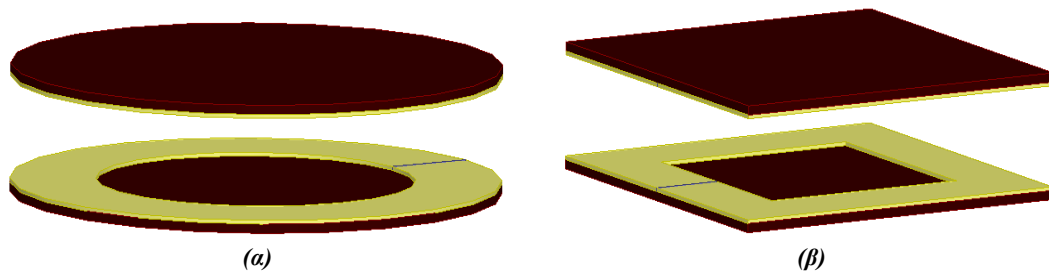
Για να ληφθούν υπόψιν τα δινορρεύματα στη θωράκιση αλουμινίου, και επομένως να ληφθεί υπόψιν ο όρος  $\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}$  στη (2.121), δεν αρκεί η μαγνητοστατική ανάλυση αλλά απαιτούνται επιπλέον τεχνικές για την επίλυση των εκάστοτε προσομοιώσεων. Για παράδειγμα, η μαγνητοστατική ανάλυση δύναται να επεκταθεί με τη θεώρηση προσεγγιστικών συνθηκών,  $\bar{A} = 0$  για το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό στο εξωτερικό πεδίο των μαγνητικών συζευκτών (στην περίπτωση αυτή ωστόσο δε λαμβάνονται υπόψιν οι απώλειες δινορρευμάτων στη θωράκιση). Εναλλακτικά η ανάπτυξη δινορρευμάτων δύναται να ληφθεί υπόψιν με επιλογές που προσφέρονται από διάφορα λογισμικά, όπως η ανάλυση δινορρευμάτων που προσφέρει το λογισμικό Ansoft Maxwell. Μία παρόμοια ανάλυση, πραγματοποιείται στις αναφορές [18]-[19],[110]-[111] που εξετάζουν τα βέλτιστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατάξεων λαμβάνοντας υπόψιν και τη θωράκιση αλουμινίου για τη σχεδίαση της διάταξης.

### 2.3.2.1 Διατάξεις ενός πηνίου

Στις διατάξεις ενός πηνίου, η γεωμετρία του πηνίου ποικίλει, ενώ διάφορες γεωμετρίες παρατηρούνται, επίσης, στη διάταξη των φερριτών. Οι πιο αντιπροσωπευτικές από αυτές τις διατάξεις περιγράφονται στη συνέχεια.

#### ✓ Διατάξεις ενιαίου φερρίτη

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν διατάξεις που χρησιμοποιούν μία ενιαία πλάκα φερρίτη στο πρωτεύον και το δευτερεύον [110],[112]-[113], όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-14. Ανάλογα με το σχήμα της πλάκας φερρίτη (και κατ' επέκταση και του πηνίου που χρησιμοποιείται) οι διατάξεις αυτές διακρίνονται, περαιτέρω, σε κυκλικές (Εικόνα 2-14-α) ή ορθογώνιες (Εικόνα 2-14-β) διατάξεις.



Εικόνα 2-14: Διάταξη Ενιαίου Φερρίτη: (α) Κυκλική, (β) Ορθογώνια

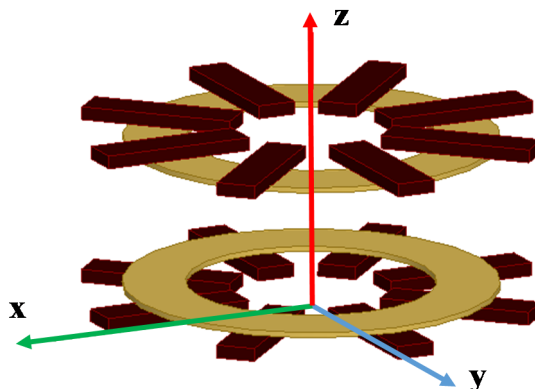
Το μεγάλο μειονέκτημα των διατάξεων αυτών είναι η μεγάλη ποσότητα φερρίτη που απαιτείται για την κατασκευή τους. Σαφώς, ο τρόπος με τον οποίο αξιοποιείται κάθε φορά ο διαθέσιμος φερρίτης διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος  $P_{su}$  (όπως ορίζεται στη (2.100)). Ειδικότερα, για την κυκλική διάταξη μείωση του χρησιμοποιούμενου φερρίτη δύναται να πραγματοποιηθεί με τη μείωση του πάχους του φερρίτη, χωρίς κάποια σημαντική μείωση στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος (Εικόνα Π-Γ-1-α του Παραρτήματος-Γ). Μείωση του χρησιμοποιούμενου φερρίτη μπορεί επίσης να επιτευχθεί με τη διάνοιξη ενός “ανοίγματος” φερρίτη στο εσωτερικό της διάταξης. Ειδικότερα, ένα μικρό άνοιγμα ίσο με περίπου 35% της συνολικής διαμέτρου, δε φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τη μεταφορά ισχύος της διάταξης (Εικόνα Π-Γ-1-β του Παραρτήματος-Γ). Ωστόσο, περαιτέρω

μείωση της χρήσης φερρίτη με ένα ακόμα μεγαλύτερο άνοιγμα μειώνει σημαντικά την ικανότητα μεταφοράς ισχύος της διάταξης.

Σχετικά με την ορθογώνια διάταξη ενιαίου φερρίτη, φαίνεται ότι τετράγωνα διατάξεις (διατάξεις ίδιου πλάτους και μήκους) αποδίδουν μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με αντίστοιχες ορθογώνιες ίδιου εμβαδού (Εικόνα Π-Γ-2 του Παραρτήματος-Γ). Παρόμοια με την κυκλική διάταξη, μείωση της χρήσης φερρίτη δύναται να επιτευχθεί με μείωση του πάχους της πλάκας φερρίτη, χωρίς σημαντική μεταβολή της μεταφερόμενης ισχύος (Εικόνα Π-Γ-3-α του Παραρτήματος-Γ). Περαιτέρω μείωση της χρήσης φερρίτη επιτυγχάνεται, παρόμοια με την κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη, με τη διάνοιξη ενός ανοίγματος φερρίτη στο εσωτερικό της πλάκας. Ωστόσο, σημαντικός περιορισμός του φερρίτη με τη διάνοιξη ενός μεγάλου ανοίγματος δύναται να περιορίσει σημαντικά τη μεταφερόμενη ισχύ (Εικόνα Π-Γ-3 του Παραρτήματος-Γ).

#### ✓ Διατάξεις ράβδων φερρίτη

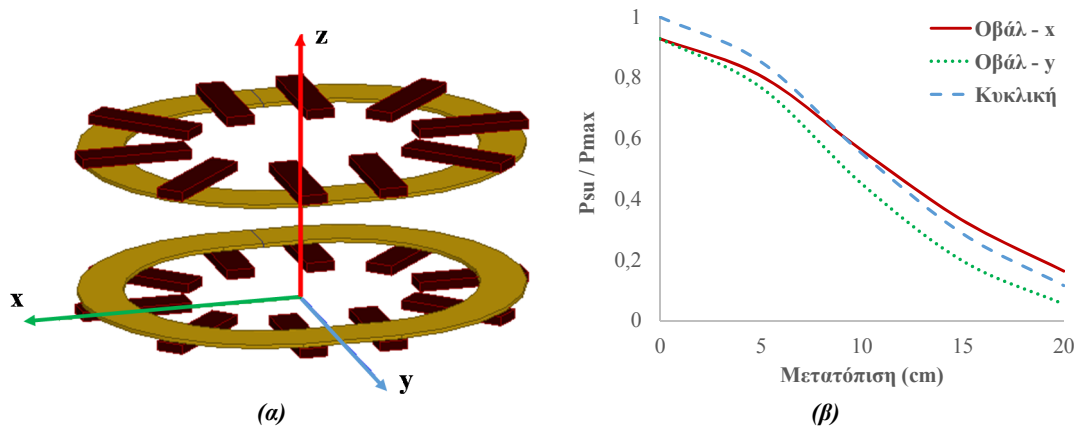
Διατάξεις που αξιοποιούν με ιδιαίτερα αξιόλογο τρόπο τη χρήση φερρίτη είναι κυκλικές διατάξεις με ράβδους φερρίτη, όπως η διάταξη που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-15-α. Η επίδραση των χαρακτηριστικών της διάταξης (μήκος, πλάτος, πάχος φερρίτη κλπ.) στη μεταφερόμενη ισχύ μελετάται αναλυτικά στην αναφορά [18].



*Εικόνα 2-15: Κυκλική Διάταξη ράβδων φερρίτη.*

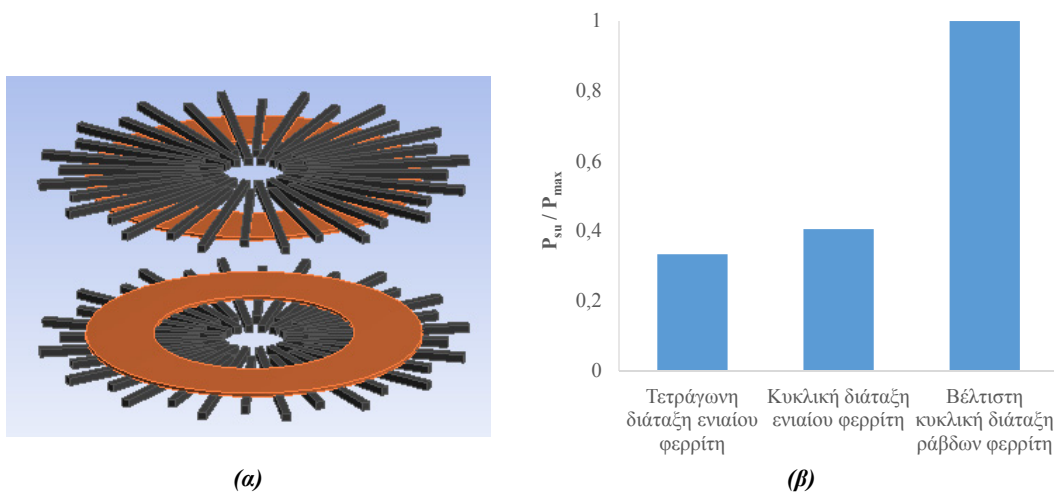
Διατάξεις σχήματος οβάλ [23] δύναται επίσης να κατασκευασθούν με τη χρήση ράβδων φερρίτη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-16-α. Στην Εικόνα 2-16-β παρουσιάζεται η ικανότητα μεταφοράς ισχύος μίας οβάλ διάταξης διαστάσεων περίπου 48cm X 40cm, εξετάζοντας μετατοπίσεις ως προς τους άξονες x και y (οι άξονες x και y απεικονίζονται στην Εικόνα 2-16-α). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την ικανότητα μεταφοράς ισχύος κυκλικής διάταξης παρόμοιου εμβαδού και διαμέτρου περίπου 46cm. Λόγω της συμμετρικότητας της κυκλικής διάταξης τα αποτελέσματα είναι ίδια για κάθε άξονα μετατόπισης. Για μετατοπίσεις έως και το 20% περίπου της διαμέτρου η κυκλική διάταξη υπερτερεί τόσο για μετατοπίσεις κατά τον y όσο και για τον x άξονα. Για μεγαλύτερες μετατοπίσεις η κυκλική διάταξη διατηρεί την καλύτερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος ως προς τον y άξονα, ωστόσο η οβάλ διάταξη φαίνεται να υπερτερεί ελαφρώς ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος όταν εξετάζονται μετατοπίσεις ως προς τον x άξονα. Για να αξιοποιηθεί ωστόσο αυτή η ανεκτικότητα ως προς τη μετατόπιση κατά τον άξονα x στην περίπτωση μίας οβάλ διάταξης το όχημα θα πρέπει να προσέλθει στην περιοχή του φορτιστή με κατάλληλο προσανατολισμό ως προς τον x και y άξονα. Αντίθετα, η συμμετρικότητα που παρουσιάζει η κυκλική διάταξη δεν απαιτεί παρόμοιους περιορισμούς. Επιπλέον, η ικανοποιητική μεταφορά ισχύος που παρουσιάζει η κυκλική διάταξη ως προς τον άξονα y για μεγάλες μετατοπίσεις, καθώς και η γενικότερα καλύτερη συμπεριφορά της για μικρότερες μετατοπίσεις και ως προς τους δύο άξονες, την

καθιστά πιο ικανοποιητική επιλογή σε σχέση με την οβάλ διάταξη για εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων [23].



Εικόνα 2-16: (α) Οβάλ διάταξη ράβδων φερρίτη & (β) Ικανότητα μεταφοράς ισχύος σε διάφορες μετατοπίσεις συγκρίνοντας οβάλ και κυκλικές διατάξεις παρόμοιου εμβαδού.

Οι ράβδοι φερρίτη μπορούν να τοποθετηθούν με διάφορους τρόπους στην κυκλική διάταξη, οδηγώντας σε διάφορους γεωμετρικούς σχεδιασμούς (Εικόνα Π-Γ-4 του Παραρτήματος-Γ). Όπως αναλύεται στην αναφορά [18] και όπως απεικονίζεται στην Εικόνα Π-Γ-5 του Παραρτήματος-Γ, ράβδοι όσο το δυνατόν πιο λεπτές σε πάχος και πιο μακριές σε μήκος επιτυγχάνουν μεγαλύτερη μεταφορά ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά αυτά, δύναται να κατασκευασθεί διάταξη, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-17-α [18], που επιτυγχάνει ακόμη καλύτερη χρήση του διαθέσιμου φερρίτη (Εικόνα Π-Γ-5 του Παραρτήματος-Γ).



Εικόνα 2-17: (α) Διάταξη ράβδων φερρίτη με ράβδους όσο το δυνατόν πιο λεπτές σε πάχος και πιο μακριές σε μήκος & (β) Μεταφορά Ισχύος για διατάξεις που αξιοποιούν τον ίδιο όγκο φερρίτη για την κατασκευή τους

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι οι διατάξεις ράβδων φερρίτη φαίνεται να αξιοποιούν πολύ καλύτερα το διαθέσιμο φερρίτη σε σχέση με τις διατάξεις ενιαίου φερρίτη. Ειδικότερα, εξετάζοντας τη μέγιστη δυνατή ισχύ που δύναται να μεταφερθεί συγκρίνοντας μία κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη όπως αυτή στην Εικόνα 2-17-α, με μία τετράγωνη διάταξη ενιαίου φερρίτη όπως αυτή στην Εικόνα 2-14-β, οι οποίες αξιοποιούν τον ίδιο όγκο φερρίτη για την κατασκευή τους, φαίνεται ότι η διάταξη ράβδων φερρίτη είναι ικανή να μεταφέρει 200% περίπου περισσότερη ισχύ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-17-β. Αντίστοιχα εξετάζοντας μία κυκλική διάταξη ενιαίου φερρίτη όπως αυτή στην Εικόνα 2-14-α, και μία κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη όπως αυτή στην Εικόνα 2-17-α, οι οποίες αξιοποιούν τον ίδιο όγκο φερρίτη,

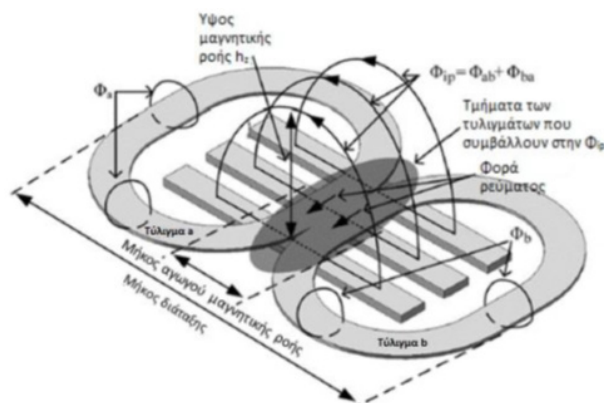
φαίνεται ότι η κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη έχει την ικανότητα να μεταφέρει περίπου 147% περισσότερη ισχύ (Εικόνα 2-17-β).

### 2.3.2.2 Διατάξεις δύο πηνίων

Η χρήση ενός επιπλέον πηνίου σε μία διάταξη μονής όψης δύναται να επιτρέψει μία μεγαλύτερη ανοχή σε πλευρικές μετατοπίσεις. Η πιο απλή διάταξη δύο πηνίων είναι η DD διάταξη [19]. Παραλλαγές της διάταξης αυτής είτε χρησιμοποιούν ένα επιπλέον βοηθητικό πηνίο (το βοηθητικό πηνίο ονομάζεται Q πηνίο και οδηγεί στην DDQ διάταξη), είτε βασίζονται στην αναδιάταξη της τοποθέτησης των δύο πηνίων (BiPolar - BP διάταξη) [19]. Οι διατάξεις αυτές περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

#### ✓ DD διάταξη

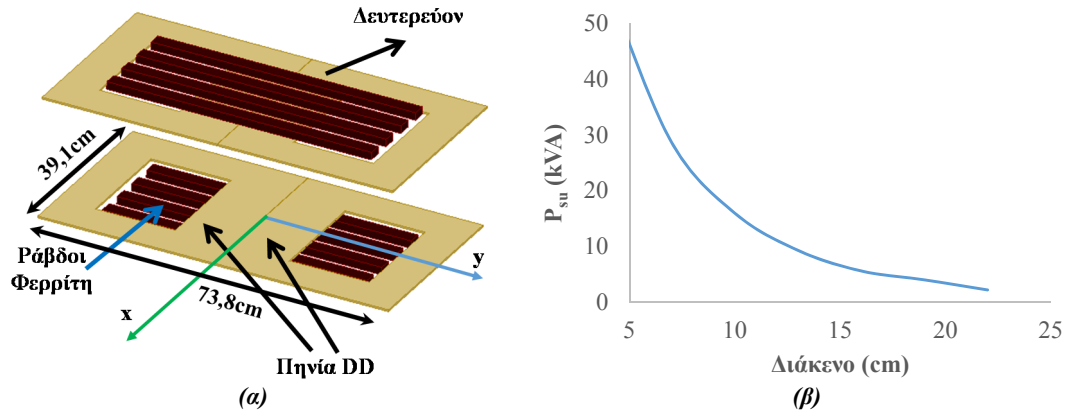
Η DD διάταξη αποτελείται από δύο πηνία τοποθετημένα με τον τρόπο που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-18 [19]. Η τοποθέτηση των πηνίων γίνεται σε σχήμα  $D$ , από όπου και προκύπτει η ονομασία της διάταξης:  $DD-pad$ . Στη συγκεκριμένη διάταξη το κύριο μέρος της μαγνητικής ροής προσδιορίζεται στο κέντρο της διάταξης (Εικόνα 2-18). Παρόμοια και με τις διατάξεις ενός πηνίου δεν είναι απαραίτητη η χρήση ενιαίου φερρίτη στη διάταξη, αλλά χρησιμοποιούνται ράβδοι φερρίτη κατάλληλα τοποθετημένοι [19].



Εικόνα 2-18: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και παραγόμενη μαγνητική ροή της DD Διάταξης [19]

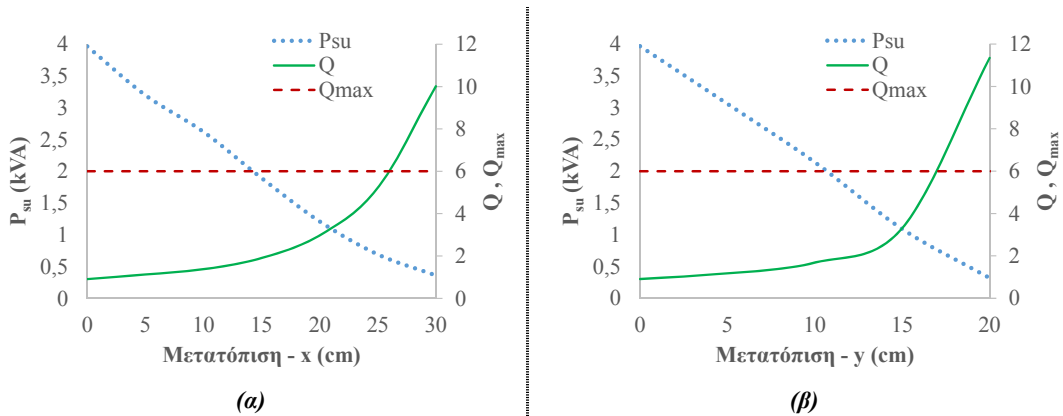
Η επίτευξη μέγιστης μεταφοράς ισχύος για τη διάταξη DD με κατάλληλη τοποθέτηση των ράβδων φερρίτη και των πηνίων περιγράφεται αναλυτικά στη βιβλιογραφία [19],[111]. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που περιγράφονται στην αναφορά [111], εξετάζεται ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης με μία ίδια διάταξη DD στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-19-α. Η συγκεκριμένη διάταξη κατασκευάστηκε λαμβάνοντας υπόψιν τη χρήση εμπορικά διαθέσιμων ράβδων φερριτών μήκους 93mm x 28mm x 16mm [111]. Διάφοροι συνδυασμοί τοποθέτησης των ράβδων αυτών είναι δυνατό να υλοποιηθούν ωστόσο, σύμφωνα με την αναφορά [19], η βέλτιστη τοποθέτηση των φερριτών οδηγεί σε ένα σχηματισμό με 4 σειρές των 6 ράβδων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-19-α.

Με τη συγκεκριμένη διάταξη μεγάλα ποσά ισχύος δύναται να μεταφερθούν, για την επίτευξή τους ωστόσο απαιτούνται σχετικά μικρά διάκενα λειτουργίας (Εικόνα 2-19-β). Για παράδειγμα, η μη αντισταθμισμένη ισχύς  $P_{su}$  στη (2.100) γίνεται ίση με 30kVA για ένα διάκενο ίσο με 7 εκατοστά. Ικανοποιητικά ποσά ισχύος μεταφέρονται, ωστόσο, ακόμα και σε μεγαλύτερα διάκενα. Ειδικότερα, μία ισχύς ίση με 3,6kVA δύναται να επιτευχθεί σε ένα διάκενο ίσο με 19 περίπου εκατοστά.



Εικόνα 2-19: (α) Κατασκευή DD διάταξης και (β) Μεταφερόμενη ισχύς σε σχέση με το διάκενο για τη συγκεκριμένη διάταξη

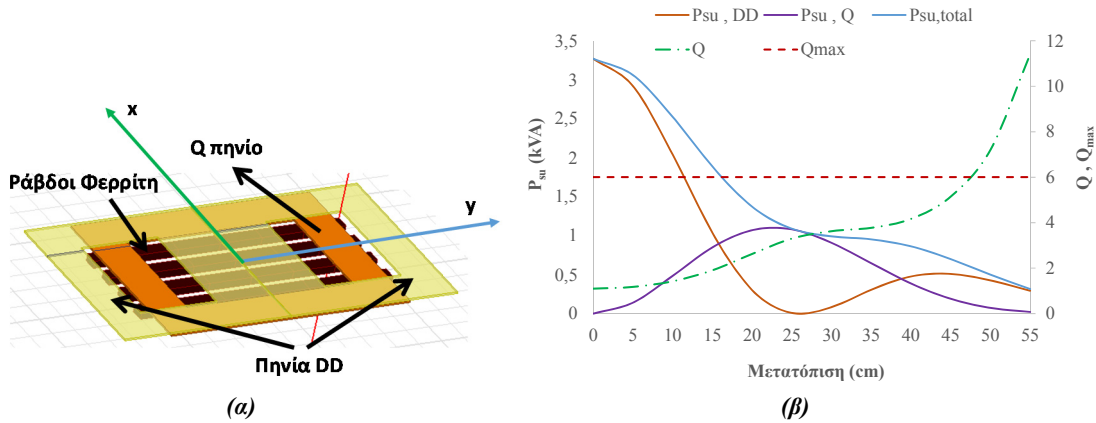
Για την επίτευξη μίας μεταφοράς ισχύος ίσης με 3,6kW, η τιμή που θα πρέπει να λάβει ο συντελεστής ποιότητας  $Q$  στη (2.99), εξετάζοντας διάφορες περιπτώσεις μετατόπισης, δίνεται στην Εικόνα 2-20. Ειδικότερα, σύμφωνα με τη (2.99), η μεταφερόμενη ισχύς στην μπαταρία του οχήματος είναι ίση με  $P_{su} * Q$ , όπου ο συντελεστής ποιότητας  $Q$  είναι δυνατό να λάβει μία μέγιστη τιμή ίση με 6 [18],[19],[108]. Λαμβάνοντας υπόψιν τη μέγιστη αυτή δυνατή τιμή για το συντελεστή  $Q$ , καθώς και την τιμή της μη αντισταθμισμένης ισχύος,  $P_{su}$ , στην Εικόνα 2-20, δύναται να υπολογισθεί η μέγιστη ανοχή σε μετατόπιση για την εξεταζόμενη διάταξη. Ειδικότερα, η ανοχή ως προς τον άξονα  $x$  είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική και ίση με 26 εκατοστά. Ωστόσο, η ανοχή ως προς τον  $y$  άξονα περιορίζεται σημαντικά στα 17 εκατοστά.



Εικόνα 2-20: Ανοχή της διάταξης DD για ένα διάκενο ίσο με 19 εκατοστά, και προσδιορισμός του συντελεστή ποιότητας  $Q$  για την επίτευξη μίας σταθερής ισχύος 3.6kW, για μετατόπιση κατά τον άξονα (α)  $x$  & (β)  $y$ .

### ✓ DDQ Διάταξη

Η συμπεριφορά της DD διάταξης σε οριζόντιες μετατοπίσεις δύναται να βελτιωθεί σημαντικά με την προσθήκη ενός επιπλέον πηνίου στο δευτερεύον της διάταξης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-21-α. Το πηνίο αυτό έχει τετράγωνη μορφή (Quadrature), από όπου προκύπτει και η ονομασία του ως  $Q$  πηνίο.



Εικόνα 2-21: (α) Διάταξη DDQ και (β) ανοχή στη μετατόπιση κατά τον άξονα y, για ένα σύστημα DD (πρωτεύον) – DDQ (δευτερεύον) σε ένα διάκενο ίσο με 19 εκατοστά.

Σχετικά με τον προσδιορισμό της μεταφερόμενης ισχύος, το πηνίο Q απαιτεί έναν επιπλέον ανορθωτή, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-22. Ο υπολογισμός της ισχύος γίνεται ξεχωριστά στα DD πηνία και στο Q πηνίο, αλλά η συνολική ισχύς εξόδου είναι το άθροισμά τους. Ο υπολογισμός της μη αντισταθμισμένης ισχύος για το πηνίο Q δίνεται και πάλι σύμφωνα με τη (2.99):

$$P_{su,Q} = \omega I_1^2 \frac{M_{Q-L1}^2}{L_{2,Q}} \quad (2.122)$$

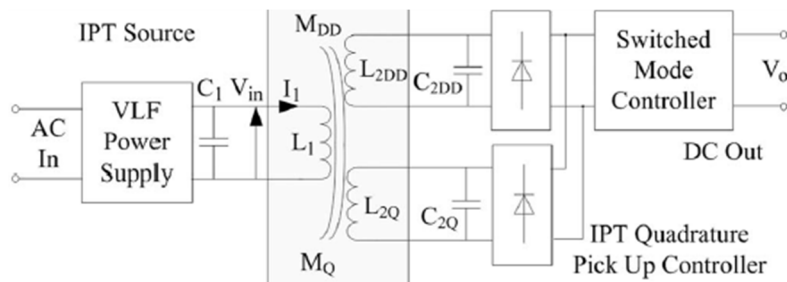
όπου  $L_{2,Q}$  είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου Q και  $M_{Q-L1}$  είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ του πηνίου Q και του πηνίου του πρωτεύοντος.

Η συνολική ισχύς στην περίπτωση αυτή θα είναι:

$$P_{su,total} = P_{su,Q} + P_{su,DD} \quad (2.123)$$

ενώ, η ισχύς που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος θα είναι:

$$P_{out} = P_{su,total} * Q \quad (2.124)$$



Εικόνα 2-22: κύκλωμα ελέγχου για το Q πηνίο της διάταξης [19]

Στην περίπτωση της DDQ διάταξης, παρόμοια με την DD διάταξη, η μεταφερόμενη ισχύς εξαρτάται από τον τρόπο τοποθέτησης των ράβδων φερρίτη καθώς και των πηνίων (τόσο των DD πηνίων όσο και του πηνίου Q). Οι μεταβολές αυτές μελετώνται στη βιβλιογραφία [19],[111], ορίζοντας τις προδιαγραφές για την κατασκευή DDQ διατάξεων.

Εξετάζοντας μηδενικές πλευρικές μετατοπίσεις, στην περίπτωση όπου μία διάταξη με ένα δευτερεύον DDQ βρίσκεται πάνω από ένα φορτιστή που υλοποιείται με μία DD διάταξη, το πηνίο Q δε φαίνεται να έχει κάποια επίδραση στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος, όσον αφορά το διάκενο λειτουργίας. Επίσης, το Q πηνίο δεν συμβάλλει σε ουσιαστική αύξηση της ανοχής

σε μετατόπιση ως προς τον άξονα x, καθώς για μηδενικές πλευρικές μετατοπίσεις ως προς τον άξονα y η ισχύς που μεταφέρει το Q πηνίο είναι, σχεδόν, μηδενική.

Ωστόσο, το Q πηνίο συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της ανοχής του συστήματος ως προς τη μετατόπιση κατά τον y άξονα. Ειδικότερα, η διάταξη στην Εικόνα 2-21-α έχει κατασκευασθεί με την προσθήκη ενός Q πηνίου στη διάταξη DD που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-19-α, και σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει η αναφορά [111]. Στην Εικόνα 2-21-β εξετάζεται η ανοχή σε μετατόπιση ενός συστήματος με μία DD διάταξη στην πλευρά του πρωτεύοντος και μία DDQ διάταξη στο δευτερεύον με ένα διάκενο λειτουργίας ίσο με 19 εκατοστά. Σε περίπτωση μηδενικής μετατόπισης κατά τον άξονα y, το σύνολο της ισχύος εξόδου προέρχεται από τα πηνία D, ενώ, για μεγαλύτερες τιμές μετατόπισης η ισχύς από τα D πηνία μειώνεται. Ωστόσο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-21-β, η ισχύς που παρέχεται από το Q πηνίο αυξάνεται σημαντικά για μεγάλες τιμές μετατόπισης. Μάλιστα, για μία μετατόπιση ίση με 24cm η συνεισφορά των πηνίων D στη συνολική ισχύ μηδενίζεται και το σύνολο της ισχύος προέρχεται από το Q πηνίο. Για μετατοπίσεις ακόμα μεγαλύτερες από 24 εκατοστά, η ισχύς που παρέχει το πηνίο Q μειώνεται, με μία ταυτόχρονη αύξηση της αντίστοιχης ισχύος από τα D πηνία.

Θεωρώντας μία επιθυμητή μεταφερομένη ισχύ ίση με  $P_{out} = 3,6kW$ , η τιμή που θα πρέπει να λάβει ο συντελεστής Q σε κάθε μετατόπιση, σύμφωνα με τη (2.124), δίνεται στην Εικόνα 2-21-β. Λαμβάνοντας υπόψη μία μέγιστη τιμή για το συντελεστή ποιότητας ίση με 6 [18],[19],[108] η μέγιστη ανεκτή μετατόπιση κατά τον άξονα y υπολογίζεται, σύμφωνα με την Εικόνα 2-21-β, ίση με 48 περίπου εκατοστά. Διακρίνεται, επομένως, μία σημαντικά βελτιωμένη συμπεριφορά της διάταξης DDQ ως προς την ανοχή σε μετατοπίσεις κατά τον άξονα y (+182% περίπου), σε σχέση με την αντίστοιχη DD διάταξη (Εικόνα 2-20-β).

### ✓ BP Διάταξη

Αν και η DDQ διάταξη αυξάνει σημαντικά την ανοχή ως προς τη μετατόπιση, απαιτεί, ωστόσο, τη χρήση ενός επιπλέον πηνίου, γεγονός που αυξάνει τη χρήση καλωδίου Litz και, επομένως, το κόστος της διάταξης. Παρόμοια αποτελέσματα μπορούν, ωστόσο, να επιτευχθούν αν δε χρησιμοποιηθεί το Q πηνίο, αλλά δύο μερικώς επικαλυπτόμενα και αμοιβαία αποσυνδεδεμένα πηνία τοποθετημένα με τον τρόπο που υποδεικνύεται στην Εικόνα 2-23-α.

Ειδικότερα, η επικάλυψη, C, μεταξύ των δύο πηνίων (Εικόνα 2-23-α) προσδιορίζεται ώστε να επιτυγχάνεται μηδενική, σχεδόν, αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των δύο πηνίων. Αυτή η αμοιβαία αποσύνδεση μεταξύ των δύο πηνίων επιτρέπει στα πηνία του δευτερεύοντος, να ελέγχονται ανεξάρτητα [111]. Παρόμοια με την DDQ διάταξη, ωστόσο, το κάθε ένα από τα δύο πηνία απαιτεί ένα ξεχωριστό ανορθωτή και ένα ξεχωριστό σύστημα αντιστάθμισης αυξάνοντας τόσο το κόστος κατασκευής, αλλά και την πολυπλοκότητα στη λειτουργία του συστήματος.

Ο υπολογισμός της μη αντισταθμισμένης ισχύος για το κάθε πηνίο του δευτερεύοντος θα δίνεται από τις (2.125) και (2.126), όπου  $L_{2\_left}$  και  $L_{2\_right}$  είναι η αυτεπαγωγή του αριστερού και του δεξιού πηνίου αντίστοιχα, ενώ  $M_{L_{2\_left}-L_1}$  και  $M_{L_{2\_right}-L_1}$  είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των πηνίων του δευτερεύοντος (αριστερό και δεξιά αντίστοιχα) και του πηνίου του πρωτεύοντος.

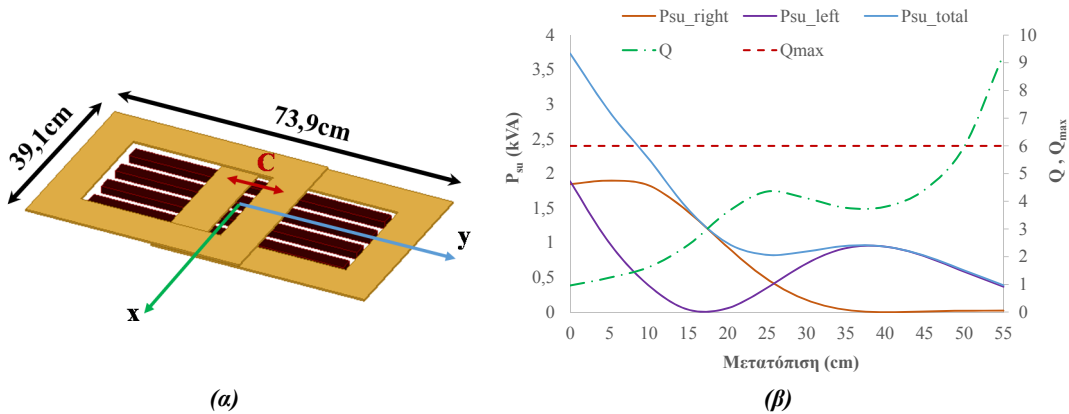
$$P_{su\_left} = \omega I_1^2 \frac{M_{L_{2\_left}-L_1}^2}{L_{2\_left}} \quad (2.125)$$

$$P_{su\_right} = \omega I_1^2 \frac{M_{L_{2\_right}-L_1}^2}{L_{2\_right}} \quad (2.126)$$

Επομένως, η ισχύς που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος θα είναι:

$$P_{out} = P_{su\_total} * Q = (P_{su\_left} + P_{su\_right}) * Q \quad (2.127)$$

Μεταβολές στην τοποθέτηση του φερριτή και των πηνίων, καθώς και στις διαστάσεις των ράβδων φερριτή δύναται να επηρεάσουν τη μεταφερόμενη ισχύ. Οι μεταβολές αυτές μελετώνται στη βιβλιογραφία [111], προσδιορίζοντας τα βέλτιστα χαρακτηριστικά για τη συγκεκριμένη διάταξη και ορίζοντας τις προδιαγραφές για την κατασκευή BP διατάξεων.



Εικόνα 2-23: (α) Τοποθέτηση των πηνίων της διάταξης BP και επικάλυψη C μεταξύ των πηνίων αυτών & (β) Ανοχή στη μετατόπιση κατά τον άξονα y, για ένα σύστημα DD (πρωτεύον) – BP (δευτερεύον) σε ένα διάκενο ίσο με 19 εκατοστά.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη διάταξη δεν εμφανίζει κάποιο πλεονέκτημα ως προς τις διατάξεις DD και DDQ, όσων αφορά στο διάκενο λειτουργίας. Επίσης, η αναδιάταξη των πηνίων λαμβάνει χώρα κατά τον y άξονα της BP διάταξης, επομένως, δεν παρατηρούνται μεταβολές ως προς την ανοχή στη μετατόπιση κατά τον x άξονα σε σχέση με την DDQ ή την DD διάταξη.

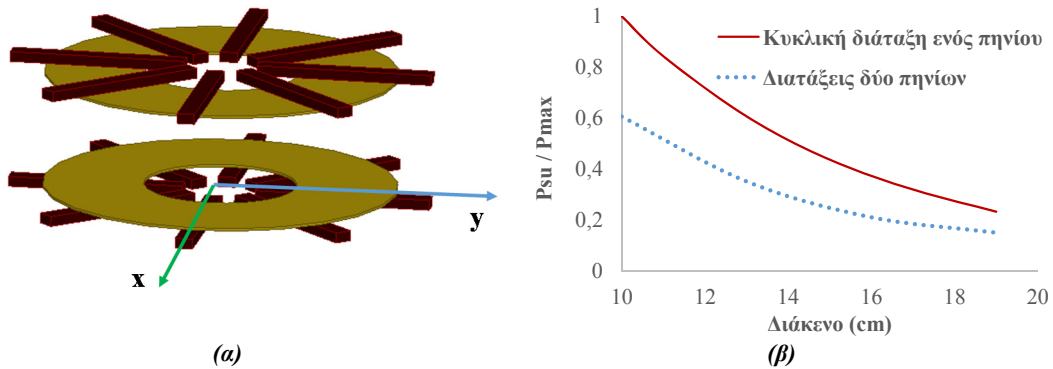
Ωστόσο, η BP διάταξη παρουσιάζει μία αυξημένη ανοχή στη μετατόπιση κατά τον y άξονα, η οποία είναι παρόμοια με την αντίστοιχη ανοχή σε μετατόπιση της διάταξης DDQ, χωρίς ωστόσο, να απαιτείται, στην περίπτωση αυτή, το επιπλέον Q πηνίο. Ειδικότερα, η BP διάταξη που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-23-α υλοποιείται με αναδιάταξη των πηνίων της DD διάταξης στην Εικόνα 2-19-α, και σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται στην αναφορά [111]. Εξετάζεται ένα σύστημα με μία DD διάταξη στην πλευρά του πρωτεύοντος και μία BP διάταξη στο δευτερεύον με ένα διάκενο λειτουργίας ίσο με 19 εκατοστά για την επίτευξη ισχύος ίσης με 3,6kW. Ο επιθυμητός συντελεστής Q, σύμφωνα με τη (2.127), παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-23-β, για μετατοπίσεις κατά τον y άξονα. Για ένα μέγιστο συντελεστή ίσο με 6, όπως προσδιορίζεται στις αναφορές [18],[19],[108], η μέγιστη ανεκτή μετατόπιση κατά τον εξεταζόμενο άξονα είναι ίση με 50 εκατοστά, σύμφωνα με την Εικόνα 2-23-β. Η κατάλληλη τοποθέτηση, επομένως, των πηνίων στην BP διάταξη αποτρέπει τη χρήση του Q πηνίου, παρέχοντας παρόμοια ανοχή στη μετατόπιση με την DDQ διάταξη.

### 2.3.2.3 Σύγκριση μεταξύ των διατάξεων ενός και δύο πηνίων

Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, η κυκλική διάταξη ράβδων φερριτή επιτυγχάνει την καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φερριτή μεταξύ των διατάξεων ενός πηνίου. Για τη σύγκριση των διατάξεων δύο πηνίων με την κυκλική διάταξη ράβδων φερριτή, εξετάζεται η

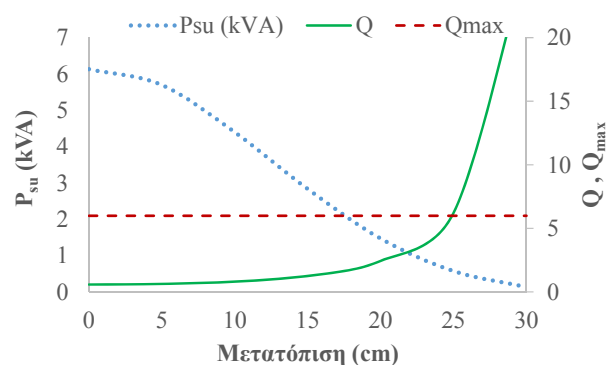


κυκλική διάταξη που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-24-α. Η διάταξη αυτή έχει διάμετρο 68cm περίπου και εμβαδό παρόμοιο με τις διατάξεις δύο πηνίων που μελετήθηκαν προηγουμένως (DD-διάταξη στην Εικόνα 2-19-α, DDQ διάταξη στην Εικόνα 2-21-α & BP διάταξη στην Εικόνα 2-23-α). Η κυκλική διάταξη στην Εικόνα 2-24-α χρησιμοποιεί ίδια ποσότητα φερρίτη με τις διατάξεις δύο πηνίων (DD, DDQ & BP), ενώ τα ελίγματα ορίζονται ώστε να επιτυγχάνεται παρόμοια χρήση καλωδίου Litz μεταξύ των εξεταζόμενων διατάξεων. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της διάταξης καθορίζονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζονται στην αναφορά [18].



Εικόνα 2-24: (α) Κυκλική Διάταξη με διάμετρο 68cm περίπου και παρόμοια χρήση υλικών με τις διατάξεις δύο πηνίων & (β) Σύγκριση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος ως προς το διάκενο για διατάξεις ενός και δύο πηνίων

Στην Εικόνα 2-24-β απεικονίζεται η ικανότητα μεταφοράς ισχύος για τις εξεταζόμενες διατάξεις ενός και δύο πηνίων σχετικά με το διάκενο λειτουργίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι τρεις διατάξεις δύο πηνίων που μελετώνται (DD, DDQ & BP) αν και παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους ως προς την ανοχή στη μετατόπιση, εντούτοις δεν παρουσιάζουν διαφορές σχετικά με το διάκενο λειτουργίας. Για το λόγο αυτό όλες οι εξεταζόμενες διατάξεις δύο πηνίων αντιπροσωπεύονται από την ίδια καμπύλη στην Εικόνα 2-24-β. Επιπλέον, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-24-β η κυκλική διάταξη φαίνεται να υπερτερεί ως προς τις διατάξεις δύο πηνίων όσον αφορά στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος σε σχέση με το διάκενο λειτουργίας. Ειδικότερα, οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή ισχύος επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερο διάκενο στην κυκλική διάταξη σε σχέση με τις διατάξεις δύο πηνίων.



Εικόνα 2-25: Τιμές της μη αντισταθμισμένης ισχύος  $P_{su}$  και ανάλογος υπολογισμός του συντελεστή  $Q$  για διάφορες περιπτώσεις μετατόπισης για την περίπτωση της εξεταζόμενης κυκλικής διάταξης

Για την κυκλική διάταξη στην Εικόνα 2-24-α λαμβάνεται υπόψιν το διάκενο λειτουργίας των 19cm που θεωρήθηκε στη μελέτη των διατάξεων DD, DDQ & BP στην υποενότητα 2.3.2.2. Για την επίτευξη μίας μεταφοράς ισχύος ίσης με 3,6kW οι τιμές του συντελεστή  $Q$  όπως υπολογίζονται για διάφορες περιπτώσεις μετατόπισης σύμφωνα με τη (2.99) δίνονται στην Εικόνα 2-25. Θεωρώντας και πάλι ότι είναι δυνατή η επίτευξη ενός μέγιστου συντελεστή ποιότητας  $Q$  ίσου με 6 [18],[19],[108], υπολογίζεται ότι η μέγιστη πλευρική μετατόπιση που

μπορεί να επιτευχθεί με τη συγκεκριμένη κυκλική διάταξη είναι ίση με 25 εκατοστά. Λόγω συμμετρικότητας της κυκλικής διάταξης, η πλευρική αυτή μετατόπιση είναι ίδια και για τον άξονα  $x$  και για τον άξονα  $y$ .

Συγκρίνοντας τη διάταξη αυτή με την αντίστοιχη DD διάταξη είναι φανερό ότι η ανοχή σε μετατοπίσεις κατά τον άξονα  $y$  είναι παραπλήσια για τις δύο διατάξεις (Πίνακας 2-1), ενώ η κυκλική διάταξη υπερτερεί ως προς την ανοχή σε μετατοπίσεις κατά τον  $x$  άξονα. Σημαντικά πλεονεκτήματα, ωστόσο, παρουσιάζονται με τις διατάξεις DDQ και BP, όσων αφορά στην ανοχή σε πλευρικές μετατοπίσεις στον άξονα  $x$ . Πιο συγκεκριμένα, οι διατάξεις DDQ και BP παρουσιάζουν μία σχεδόν διπλάσια ανοχή σε μετατόπιση κατά τον  $x$  άξονα, σε σχέση με την κυκλική διάταξη (Πίνακας 2-1).

**Πίνακας 2-1: Χρήση καλωδίου Litz και ανοχή σε πλευρική μετατόπιση για τις εξεταζόμενες διατάξεις. Ο όγκος φερριτή είναι ίδιος για όλες τις εξεταζόμενες διατάξεις.**

Διάταξη	Καλώδιο Litz (m)	Μετατόπιση – $x$ (cm)	Μετατόπιση – $y$ (cm)
Κυκλική	101	25	25
DD	105	17	26
DDQ	128	48	26
BP	108	50	26

Η χρήση επομένως ενός 2<sup>ου</sup> πηνίου στις διατάξεις μονής όψης επιτρέπει σημαντική αύξηση σχετικά με την ανοχή του συστήματος σε οριζόντιες μετατοπίσεις. Ωστόσο, για την επίτευξη της ανοχής αυτής είναι απαραίτητη η προσθήκη ενός επιπλέον πηνίου (DDQ διάταξη) ή η αναδιάταξη των δύο πηνίων της διάταξης (BP διάταξη). Και στις δύο αυτές περιπτώσεις η συνολική ισχύς που μεταφέρεται θα πρέπει να προκύπτει ως το άθροισμα των τιμών της ισχύος δύο διαφορετικών συστημάτων πηνίων. Το γεγονός αυτό επιβάλλει τη χρήση επιπλέον ανορθωτών στην πλευρά του δευτερεύοντος, αλλά και επιπλέον συστημάτων αντιστάθμισης, αυξάνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

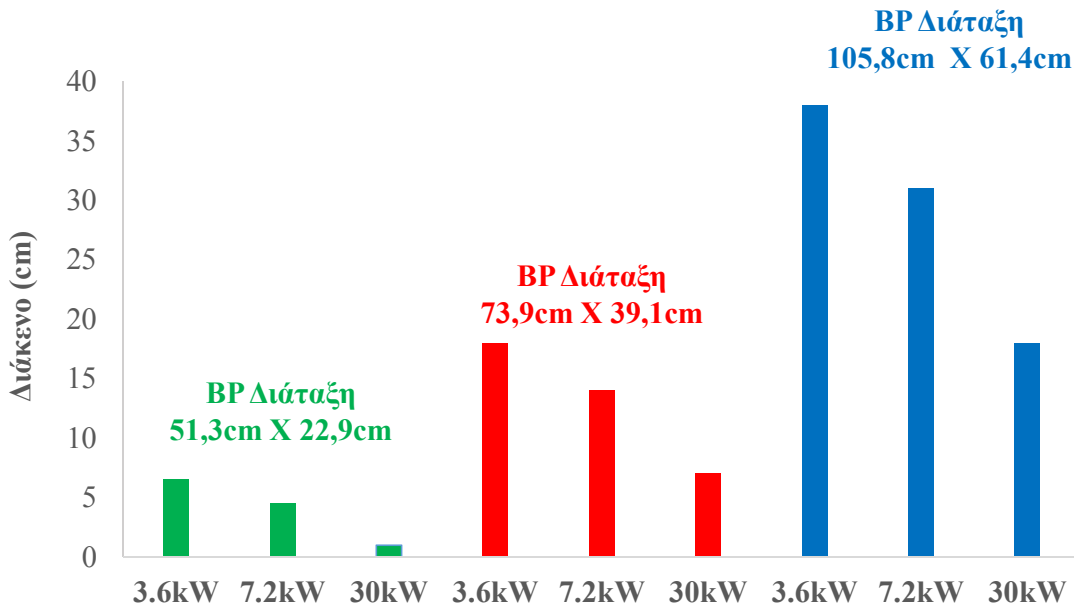
### 2.3.3 Επίδραση του μεγέθους της διάταξης στη μεταφερόμενη ισχύ

Ιδιαίτερα καθοριστικό ρόλο ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης διαδραματίζει το μέγεθος της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, μία διάταξη μικρών διαστάσεων είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τοποθέτηση σε ένα επιβατικό όχημα, αλλά και για τη μείωση του κόστους του συστήματος, ωστόσο περιορίζει σημαντικά τη μεταφερόμενη ισχύ, απαιτώντας παράλληλα τη λειτουργία σε πολύ μικρά κατακόρυφα διάκενα. Αντίθετα, μία διάταξη μεγάλου μεγέθους δύναται να αυξήσει σημαντικά τόσο το κατακόρυφο διάκενο λειτουργίας τους συστήματος αλλά και την μεταφερόμενη ισχύ.

Για παράδειγμα, η BP διάταξη διαστάσεων 73,9 x 39,1 εκατοστών, που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-23-α, δύναται να μεταφέρει μία ισχύ ίση με 3,6kW σε ένα διάκενο 18 εκατοστών. Η απαίτηση για μία μεγαλύτερη μεταφερόμενη ισχύ από τη συγκεκριμένη διάταξη, όπως για παράδειγμα 7,2kW, με στόχο τη μείωση του χρόνου φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος, οδηγεί σε περιορισμό του διακένου σε 14 εκατοστά. Η απαίτηση για ακόμα μεγαλύτερη μεταφερόμενη ισχύ, η οποία εξασφαλίζει ικανότητα “γρήγορης φόρτισης” (ή αλλιώς fast charging), απαιτεί τη λειτουργία του συστήματος σε ακόμη μικρότερα διάκενα. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2-26, η μεταφορά ισχύος ίσης με 30kW απαιτεί ένα διάκενο λειτουργίας ίσο με, μόλις, 7 εκατοστά.

Αντίθετα, μία διάταξη μεγαλύτερων διαστάσεων είναι δυνατό να αυξήσει σημαντικά το διάκενο λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα μία BP διάταξη διαστάσεων 105,8cm X 61,4cm επιτρέπει τη μεταφορά 3,6kW σε ένα διάκενο ίσο με 38 εκατοστά. Με τη συγκεκριμένη διάταξη είναι, επίσης, δυνατή η εφαρμογή γρήγορης φόρτισης και μεταφορά ισχύος 30kW, σε ένα

ιδιαίτερα ικανοποιητικό διάκενο ίσο με 18 εκατοστά. Πρέπει, ωστόσο, να τονισθεί ότι εκτός των ιδιαίτερα μεγάλων διαστάσεων της συγκεκριμένης διάταξης, απαιτείται, παράλληλα, και επιπλέον χρήση φερριτών και καλωδίου Litz, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος κατασκευής.



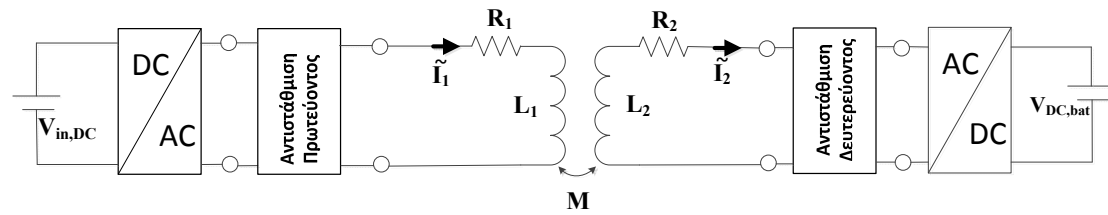
Εικόνα 2-26: Ικανότητα μεταφοράς ισχύος και απαιτούμενο διάκενο λειτουργίας για BP διατάξεις διαφόρων μεγεθών.

Σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης που απαιτείται ένας συζεύκτης περιορισμένων διαστάσεων, ικανοποιητική μεταφορά ισχύος είναι δυνατό να επιτευχθεί, ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, απαιτείται λειτουργία σε μικρότερα διάκενα. Πιο συγκεκριμένα, μία BP διάταξη διαστάσεων 51,3cm X 22,9cm είναι δυνατόν να κατασκευασθεί, με παράλληλη μείωση του κόστους κατασκευής, περιορίζοντας τη χρήση φερριτή και καλωδίου Litz. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-26, η μικρότερη αυτή διάταξη επιτρέπει τη μεταφορά 3,6kW σε ένα διάκενο ίσο με 6,5 εκατοστά. Η ανάγκη για μία μεγαλύτερη ισχύ ίση με 7,2kW απαιτεί τη λειτουργία σε ένα ακόμα μικρότερο διάκενο ίσο με 4,5 εκατοστά. Για τη μεταφορά ιδιαίτερα μεγάλων ποσών ισχύος, όπως για παράδειγμα 30kW για εφαρμογές γρήγορης φόρτισης, απαιτείται ένα διάκενο ενός εκατοστού το οποίο είναι μη ρεαλιστικό σε πραγματικές συνθήκες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

## 2.4 Συστήματα Ελέγχου στη Στατική Επαγωγική Φόρτιση

Η λειτουργία ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης απαιτεί την ανάπτυξη ενός ρεύματος υψηλής συχνότητας στην πλευρά του πρωτεύοντος. Το ρεύμα αυτό παρέχεται από έναν DC/AC μετατροπέα (Εικόνα 2-27) ο οποίος μετατρέπει την παρεχόμενη DC τάση σε AC υψηλής συχνότητας. Για τη φόρτιση της μπαταρίας του οχήματος, απαιτείται, επίσης, ένας AC/DC ανορθωτής στην πλευρά του δευτερεύοντος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-27.

Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με έναν απλό DC/AC μετατροπέα στην πλευρά του πρωτεύοντος και έναν AC/DC ανορθωτή στην πλευρά του δευτερεύοντος που αποτελείται από μία απλή γέφυρα τεσσάρων διόδων. Ωστόσο, οι απαιτήσεις για αυξημένη απόδοση και ανοχή σε μετατοπίσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος επιβάλλουν τη χρήση συστημάτων ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος ή/και του δευτερεύοντος.

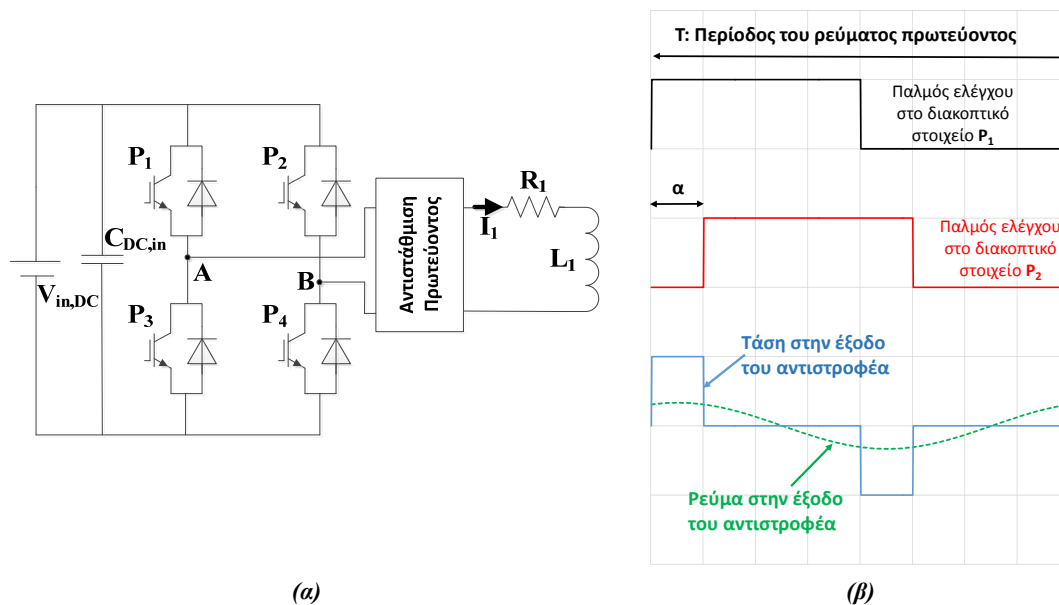


Εικόνα 2-27: Περιγραφή πλήρους κυκλώματος ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης.

### 2.4.1 Έλεγχος στο πρωτεύον

Η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός ρεύματος υψηλής συχνότητας στην πλευρά του πρωτεύοντος απαιτεί την ύπαρξη ενός DC/AC μετατροπέα όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-28-α. Μία συνηθισμένη τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι ο έλεγχος της εξόδου του αντιστροφέα μέσω απαλοιφής της τάσης (output control by voltage cancellation) [114] και μπορεί εύκολα να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας ως σήματα για τον έλεγχο των διακοπτικών στοιχείων δύο τετραγωνικούς παλμούς μετατοπισμένους κατά μία φάση  $\alpha$  μεταξύ τους όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-28-β. Στην περίπτωση αυτή, το μέτρο της θεμελιώδους τάσης μεταξύ των σημείων A και B στην έξοδο του αντιστροφέα (Εικόνα 2-28-α) προσδιορίζεται σύμφωνα με τη (2.128) [57].

$$|V_{AB}| = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{in,DC} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.128)$$



Εικόνα 2-28: (α) DC/AC μετατροπέας στην πλευρά του πρωτεύοντος, (β) Παλμοί ελέγχου στα διακοπτικά στοιχεία, παραγόμενη τάση και ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα με έλεγχο της εξόδου του αντιστροφέα μέσω απαλοιφής της τάσης

Σύμφωνα με το κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-8, η τάση στην έξοδο του αντιστροφέα  $V_{AB}$  θα είναι ίση με την τάση  $V_{in}$ . Επιπλέον, σύμφωνα με τη (2.47), το μέτρο του ρεύματος  $I_1$  μπορεί να προσδιορισθεί από την τάση  $V_{in}$ , οπότε:

$$|\tilde{I}_1| = \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\tilde{K}} |V_{AB}| \quad (2.129)$$

όπου ο συντελεστής  $\tilde{K}$  προσδιορίζεται σύμφωνα με τη (2.44), ανάλογα με τη συνδεσμολογία του δευτερεύοντος. Σύμφωνα, επομένως, με τις (2.128) και (2.129), το πλάτος του ρεύματος  $I_1$  μπορεί να ελεγχθεί σύμφωνα με τη φάση  $\alpha$  μεταξύ των παλμών ελέγχου στα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα.

Στην περίπτωση ελέγχου της εξόδου του αντιστροφέα μέσω απαλοιφής της τάσης, η περίοδος των τετραγωνικών παλμών καθορίζει την περίοδο (και, επομένως, και τη συχνότητα) της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα, και κατ' επέκταση και τη συχνότητα του ρεύματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-28-β.

Εκτός από τη μέθοδο ελέγχου που περιγράφεται στην Εικόνα 2-28-β, είναι δυνατός ο έλεγχος του πρωτεύοντος με στόχο τη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος [51]. Μεταβολές στη συχνότητα του συστήματος προσφέρουν τη δυνατότητα ελέγχου της ισχύος εξόδου, σύμφωνα με τη (2.41), και/ή μείωσης της αέργου ισχύος στην έξοδο του αντιστροφέα, σύμφωνα με τη (2.55).

#### 2.4.2 Έλεγχος στο δευτερεύον

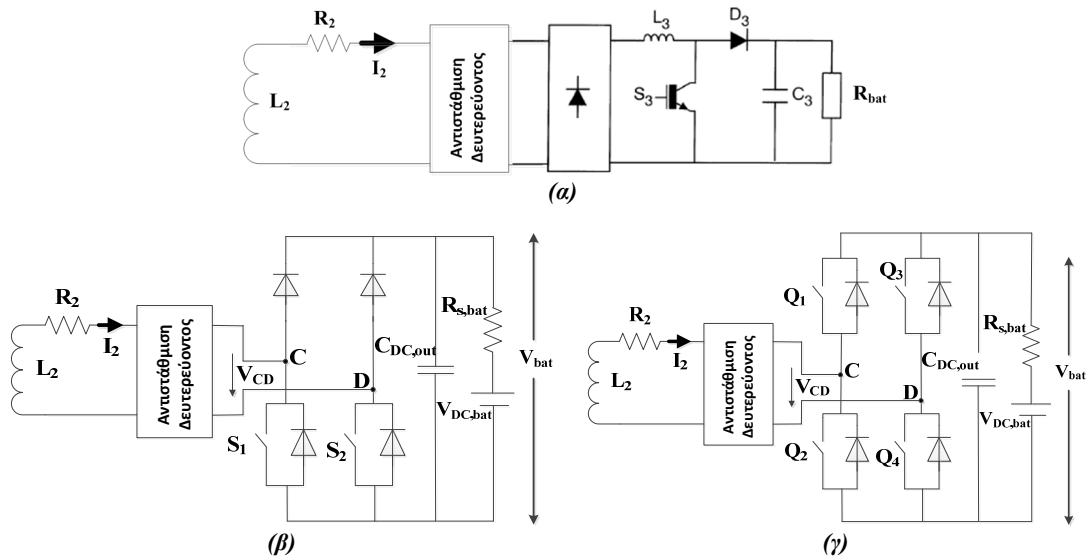
Αν και η τεχνική ελέγχου που περιγράφεται στην Εικόνα 2-28 επιτρέπει τον έλεγχο του πλάτους του ρεύματος στο πρωτεύον, καθώς και της συχνότητάς του, δεν είναι, συνήθως, αρκετή ώστε να εξασφαλίσει τις κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας στην πλευρά του δευτερεύοντος. Σύμφωνα με τη (2.42), η τιμή του ρεύματος  $I_2$  στην πλευρά του δευτερεύοντος εξαρτάται από τις τιμές της αμοιβαίας επαγωγής  $M$ , της αυτεπαγωγής  $L_2$ , του πυκνωτή αντιστάθμισης στο δευτερεύον, καθώς και της αντίστασης φορτίου  $R_L$ . Συγκεκριμένες τιμές των μεγεθών αυτών δύναται να οδηγήσουν σε ένα ρεύμα δευτερεύοντος το οποίο ενδέχεται να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του ρεύματος στο δευτερεύον πηνίο, οδηγώντας παράλληλα σε σημαντικές ωμικές απώλειες.

Επιπλέον, σύμφωνα με τη (2.41) η ισχύς εξόδου, μεταξύ άλλων, εξαρτάται και από την αντίσταση φορτίου  $R_L$ , η οποία, ακολούθως, καθορίζεται σύμφωνα με την τάση της μπαταρίας  $V_{DC,bat}$  (Εικόνα 2-27). Διαφορετικές μπαταρίες οχημάτων με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την τάση  $V_{DC,bat}$ , δύναται να οδηγήσουν σε αλλαγές της ισοδύναμης αντίστασης  $R_L$ , που, ακολούθως, θα επιφέρουν μεταβολές στην ισχύ που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος σύμφωνα με τη (2.41). Επιπλέον, η φόρτιση της ίδιας μπαταρίας σε ένα όχημα, αλλά σε διαφορετικό ποσοστό SoC (State of Charge), ενδέχεται να επιφέρει μεταβολές στην τάση  $V_{DC,bat}$  ή στο ρεύμα που απορροφάται από την μπαταρία του οχήματος, με ανάλογες μεταβολές στην τιμή της αντίστασης φορτίου.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι μεταβολές στην τιμή της αντίστασης φορτίου ή της συχνότητας λειτουργίας, δύναται να οδηγήσουν σε αλλαγές του συντελεστή ποιότητας  $Q$  στην πλευρά του δευτερεύοντος, επηρεάζοντας τη μεταφερόμενη ισχύ που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος, σύμφωνα με τη (2.99). Επομένως, συστήματα ελέγχου στην πλευρά του δευτερεύοντος είναι απαραίτητα ώστε να εξασφαλίσουν τη λειτουργία του συστήματος ασύρματης μεταφοράς ενέργειας υπό τις κατάλληλες συνθήκες, αποτρέποντας μεγάλες τιμές ρεύματος στο δευτερεύον και επιτρέποντας τη μεταφορά μεγάλων ποσών ισχύος στην μπαταρία του οχήματος.

Ένα σύστημα ελέγχου στην πλευρά του δευτερεύοντος που χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία [18],[19],[108] για τον έλεγχο του συντελεστή ποιότητας  $Q$  απεικονίζεται στην Εικόνα 2-29-α. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν μη ελεγχόμενο ανορθωτή στην πλευρά του δευτερεύοντος και έναν ελεγκτή διακοπτικής λειτουργίας (switched mode controller) [108],  $S_3$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-29-α. Ο έλεγχος του διακόπτη  $S_3$  επιτρέπει τον έλεγχο του συντελεστή ποιότητας  $Q$ , μέσω μεταβολών στην ισοδύναμη αντίσταση φορτίου  $R_L$ . Οι

μεταβολές αυτές στην αντίσταση φορτίου επιτυγχάνονται με τη διαμόρφωση επιθυμητής τάσης στα άκρα της  $R_L$ .



Εικόνα 2-29: Έλεγχος στην πλευρά του δευτερεύοντος: (α) απλός ανορθωτής με χρήση ελεγκτή διακοπτικής λειτουργίας [108], (β) χρήση δύο διακοπών στον ανορθωτή, (γ) μετατροπέας με 4 διακοπτικά στοιχεία

Ο εφαρμοζόμενος έλεγχος μπορεί, επίσης, να υλοποιηθεί με τη χρήση δύο διακοπτικών στοιχείων  $S_1$  και  $S_2$  στον ανορθωτή του δευτερεύοντος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-29-β. Ειδικότερα, ο κατάλληλος έλεγχος των διακοπών  $S_1$  και  $S_2$  δίνει τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης  $V_{CD}$  στην Εικόνα 2-29-β [57].

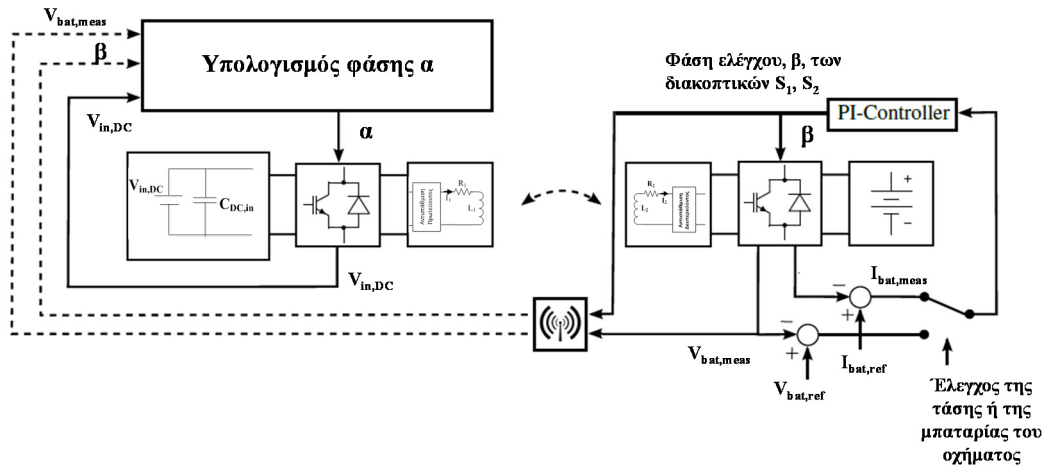
Εναλλακτικά, έλεγχος στην πλευρά του δευτερεύοντος δύναται να υλοποιηθεί με ένα πλήρη μετατροπέα όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-29-γ. Στην περίπτωση αυτή, η χρήση τεσσάρων διακοπτικών στοιχείων προσφέρει επιπλέον δυνατότητες ελέγχου. Η περιπλοκότητα, ωστόσο, του εφαρμοζόμενου ελέγχου, καθώς και η απαίτηση για επιπλέον διακοπτικά στοιχεία, καθιστά την εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου κατάλληλη σε εξειδικευμένες, μόνο, εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε συστήματα που επιτρέπουν τη μεταφοράς ισχύος από την μπαταρία του οχήματος προς το δίκτυο (Vehicle-to-Grid ή V2G λειτουργία) [104].

### 2.4.3 Έλεγχος και στις δύο πλευρές του συστήματος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο έλεγχος στην πλευρά του δευτερεύοντος δίνει τη δυνατότητα για έλεγχο παραμέτρων και τιμών στην αντίστοιχη πλευρά, όπως για παράδειγμα η τιμή του ρεύματος δευτερεύοντος, και/ή η αντίσταση φορτίου. Ωστόσο, είναι ιδιαίτερα σημαντικός και ο έλεγχος των χαρακτηριστικών του συστήματος στην πλευρά του πρωτεύοντος, όπως για παράδειγμα η συχνότητα του συστήματος και/ή η τιμή του ρεύματος πρωτεύοντος. Για το λόγο αυτό, η καλύτερη προσέγγιση σε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας σε ηλεκτρικά οχήματα είναι η χρήση ελέγχου και στις δύο πλευρές του συστήματος. Τα συστήματα αυτά ελέγχου συνδυάζουν τα συστήματα ελέγχου σε πρωτεύον και δευτερεύον που περιγράφηκαν προηγουμένως (Εικόνα 2-28 και Εικόνα 2-29).

Επιπλέον δυνατότητες ελέγχου σε τέτοια συστήματα παρέχονται με τη μεταφορά σημάτων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Για παράδειγμα, το σύστημα ελέγχου που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-30 συνδυάζει τον έλεγχο στην πλευρά του πρωτεύοντος που περιγράφεται στην Εικόνα 2-28 και τον έλεγχο στην πλευρά του δευτερεύοντος που περιγράφεται στην Εικόνα 2-29-β. Με τη μεταφορά σημάτων σχετικά με παραμέτρους λειτουργίας στην πλευρά του δευτερεύοντος επιτυγχάνει τον έλεγχο του ρεύματος τόσο στο

πρωτεύον αλλά και το δευτερεύον πηνίο, με στόχο την αύξηση της απόδοσης του συστήματος [57].



Εικόνα 2-30: Έλεγχος στην πλευρά του πρωτεύοντος & του δευτερεύοντος με μεταφορά σημάτων μεταξύ των δύο πλευρών [57]

Αν και η μεταφορά σημάτων μεταξύ δευτερεύοντος και πρωτεύοντος παρέχει επιπλέον δυνατότητες ελέγχου, απαιτεί, ωστόσο, επιπλέον συστήματα ασύρματης μεταφοράς πληροφοριών, τα οποία αυξάνουν το οικονομικό κόστος υλοποίησης ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, η μεταφορά σημάτων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πραγματοποιείται με μία μικρή χρονική καθυστέρηση. Ο χρόνος αυτός είναι αμελητέος στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης, όπου η διαδικασία της φόρτισης διαρκεί από μερικά λεπτά μέχρι αρκετές ώρες. Ωστόσο, στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, όπου το όχημα δύναται να περάσει πάνω από το φορτιστή σε μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου, ο χρόνος για τη μεταφορά των σημάτων πληροφοριών διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος, και πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν στην υλοποίηση του επιθυμητού ελέγχου.

## 2.5 Φαινόμενο Διακλάδωσης στη στατική επαγωγική φόρτιση

Σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ιδιαίτερα σημαντική είναι η μεταφορά όσο το δυνατό περισσότερης ισχύος στην μπαταρία του οχήματος, αλλά και η επίτευξη μίας ικανοποιητικής απόδοσης. Η απόδοση ενός επαγωγικού συστήματος μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με τη μείωση της αέργου ισχύος που διακινείται μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, γεγονός που οδηγεί στην προσπάθεια επίτευξης μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, ο οποίος δίνεται από τη (2.130), στην είσοδο του κυκλώματος που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-8.

$$PF = \frac{P_{in}}{|\tilde{S}_{in}|} = \frac{P_{in}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.130)$$

Η ενεργός και άεργος ισχύς,  $P_{in}$  και  $Q_{in}$  αντίστοιχα, δίνονται από τις σχέσεις (2.54) και (2.55).

Το φαινόμενο της διακλάδωσης, ωστόσο, υποδεικνύει ότι ενδέχεται να υπάρχουν έως και τρεις διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας που οδηγούν σε επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, αλλά μία μόνο συχνότητα που μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη ισχύ.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του καλωδίου Litz στην κατασκευή διατάξεων επαγωγικής φόρτισης, οδηγεί σε σημαντική μείωση των απωλειών χαλκού στα πηνία πρωτεύοντος και

δευτερεύοντος. Για την απλοποίηση της ανάλυσης και την καλύτερη επεξήγηση του φαινομένου της διακλάδωσης, οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος (Εικόνα 2-8) μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες [49],[51].

Η τοπολογία σειρά-σειρά είναι μία τοπολογία που χρησιμοποιείται συχνά σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων [30],[49],[51],[57],[60]. Για τη συγκεκριμένη τοπολογία, και λαμβάνοντας υπόψιν αμελητέες τιμές για τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$ , η ισχύς  $P_{out}$  θα είναι:

$$P_{out} = \frac{\omega^2 M^2}{R_L^2 + (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2} |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.131)$$

Για την ίδια τοπολογία, η ενεργός και άεργος ισχύς μπορούν να υπολογισθούν σύμφωνα με τις (2.54) και (2.55):

$$P_{in} = \left[ \frac{\omega^2 M^2 R_L}{(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2 + R_L^2} \right] |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.132)$$

$$Q_{in} = \left[ \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}) \omega^2 M^2}{(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})^2 + R_L^2} \right] |\tilde{I}_1|^2 \quad (2.133)$$

Στην περίπτωση αυτή η απόδοση του συστήματος που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-8 θα είναι ίση με:

$$eff = \frac{|\tilde{S}_{out}|}{|\tilde{S}_{in}|} \quad (2.134)$$

Και, καθώς  $\tilde{S}_{out} = P_{out}$  και  $|\tilde{S}_{in}| = \sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}$ , η απόδοση θα είναι:

$$eff = \frac{P_{out}}{\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}} \quad (2.135)$$

Ο ορισμός της απόδοσης σύμφωνα με τη (2.135), λαμβάνοντας υπόψιν μηδενικές ωμικές απώλειές στα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος ( $R_1=0$  &  $R_2=0$ ), ταυτίζεται με τον ορισμό του συντελεστή ισχύος στη (2.130). Η επίτευξη ενός μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος (και επομένως και μίας απόδοσης ίσης με τη μονάδα στη (2.135)) είναι ένας από τους βασικούς στόχους σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης [49], με στόχο τον περιορισμό της αέργου ισχύος.

Για την απλοποίηση της ανάλυσης, η απόδοση στη (2.135) μπορεί να γραφεί ως:

$$eff = \frac{1}{\sqrt{1 + Z^2}} \quad (2.136)$$

όπου ο συντελεστής  $Z$  είναι ίσος με:

$$Z = \frac{(\omega * L_1 - \frac{1}{\omega * C_1}) * \left[ (\omega * L_2 - \frac{1}{\omega * C_2})^2 + R_L^2 \right]}{\omega^2 * M^2} - \left( \omega * L_2 - \frac{1}{\omega * C_2} \right) \quad (2.137)$$



Η απόδοση, επομένως, του συστήματος μεγιστοποιείται, ή αλλιώς γίνεται ίση με ένα, όταν ο συντελεστής  $Z$  γίνει ίσος με μηδέν.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.2.1, στην περίπτωση της τοπολογίας αντιστάθμισης σειρά-σειρά, η ισχύς εξόδου στη (2.131) δύναται να μεγιστοποιηθεί επιλέγοντας την τιμή για τον πυκνωτή αντιστάθμισης στο δευτερεύον ίση με  $C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2}$ . Επίσης, η επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος επιτυγχάνεται με το μηδενισμό της  $Q_{in}$  στη (2.99) και με την επιλογή του πυκνωτή στο πρωτεύον ως:  $C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1}$ . Επομένως, μία προφανής γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  που μηδενίζει το συντελεστή  $Z$  στη (2.137), είναι η:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2.138)$$

Ωστόσο, η γενικότερη απαίτηση για μηδενική τιμή του συντελεστή  $Z$  στη (2.137) οδηγεί στην εύρεση των λύσεων ενός πολυωνύμου τρίτου βαθμού ως προς  $\omega$ . Επομένως, έως και τρεις τιμές για την τιμή του  $\omega$  και, κατ' επέκταση για τη συχνότητα λειτουργίας  $f$ , ενδέχεται να οδηγούν σε μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, υποδεικνύοντας το φαινόμενο διακλάδωσης.

Για την εύρεση της συχνότητας λειτουργίας που μεγιστοποιεί την απόδοση του συστήματος, αρκεί να τεθεί η παράγωγος  $\partial P_{out} / \partial \omega$  ίση με μηδέν, που, σύμφωνα με τη (2.131), οδηγεί στη σχέση:

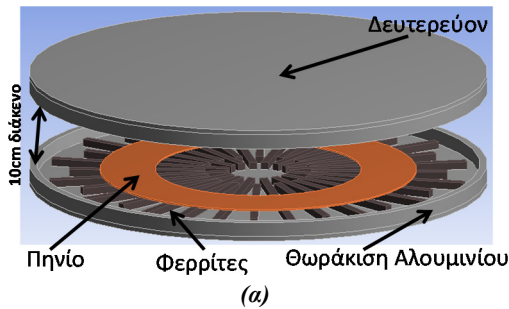
$$\omega_{P_{out\_max}} = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2 - \frac{R_L^2 C_2^2}{2}}} \quad (2.139)$$

Σύμφωνα με τη (2.139), μόνο μία τιμή για τη συχνότητα λειτουργίας μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη ισχύ.

#### ✓ Αποτελέσματα προσομοιώσεων σχετικά με το φαινόμενο της διακλάδωσης

Στην Εικόνα 2-31-α απεικονίζεται κυκλικός μαγνητικός συζεύκτης διαμέτρου 60 εκατοστών, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που περιγράφονται στην αναφορά [18]. Τα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αποτελούνται το καθένα από 18 ελίγματα, ενώ οι ράβδοι φερριτική έχουν μία μαγνητική διαπερατότητα ίση με 2300. Το σύστημα λειτουργεί σε ένα διάκενο ίσο με 10 εκατοστά, με ένα σταθερό ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο ίσο με 23A. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για το συγκεκριμένο συζεύκτη επιτυγχάνεται όταν το δευτερεύον βρίσκεται ακριβώς πάνω από το πρωτεύον με μηδενική μετατόπιση. Στην περίπτωση αυτή, οι τιμές για τις αυτεπαγωγές πρωτεύοντος και δευτερεύοντος  $L_1$ ,  $L_2$  καθορίζονται σύμφωνα με προσομοιώσεις ίσες με 300,6μH και 197,8μH αντίστοιχα, ενώ η τιμή της αμοιβαίας επαγωγής  $M$  υπολογίζεται ίση με 108,5μH.

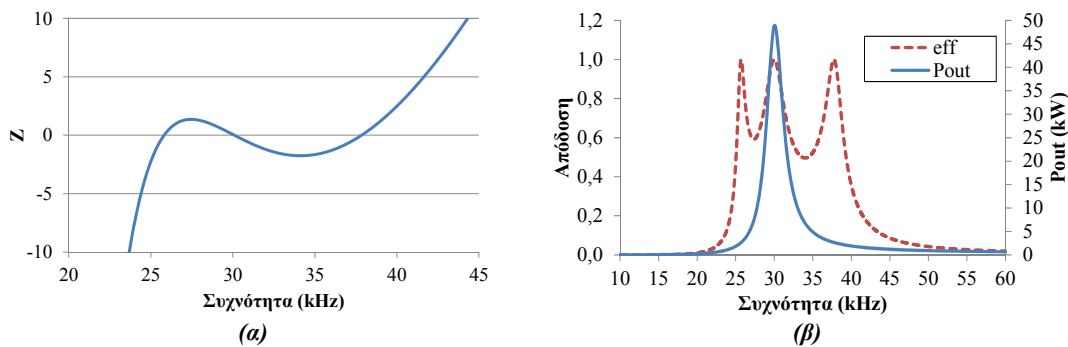
Το σύστημα που εξετάζεται λειτουργεί σε μία συχνότητα 30kHz και μεταφέρει ενέργεια σε μία μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος που αντιπροσωπεύεται από μία ισοδύναμη αντίσταση 5Ω. Για την επίτευξη μίας μέγιστης μεταφοράς ισχύος, η τιμή για τον πυκνωτή αντιστάθμισης  $C_2$  επιλέγεται ίση με  $C_2 = 1/\omega^2 L_2 = 136.1\text{nF}$ . Για την επίτευξη ενός μοναδιαίου συντελεστή ισχύος η τιμή για τον πυκνωτή αντιστάθμισης  $C_1$  επιλέγεται ίση με  $C_1 = 1/\omega^2 L_1 = 134.8\text{nF}$ .



Χαρακτηριστικό	Τιμή
Αριθμός Ελιγμάτων	18
Μαγνητική Διαπερατότητα	
Ράβδων Φερρίτη	2300
$I_1$	23A

Εικόνα 2-31: (α) Μαγνητικός συζεύκτης όπως σχεδιάζεται στο Ansys και (β) χαρακτηριστικά του αντίστοιχου συστήματος επαγωγικής φόρτισης.

Σύμφωνα με την επιλογή των τιμών των πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$ , μία προφανής λύση για το μηδενισμό του συντελεστή  $Z$  στην (2.137) και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης είναι η συχνότητα  $f=30\text{kHz}$ . Ο όρος  $Z$ , ωστόσο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-32-α μηδενίζεται και για τις συχνότητες 25.71 και 37.75 kHz. Το φαινόμενο της διακλάδωσης, επομένως, υποδεικνύει ότι η απόδοση του συστήματος δε μεγιστοποιείται μόνο στη συχνότητα των 30kHz, αλλά και σε δύο επιπλέον συχνότητες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-32-β.



Εικόνα 2-32: (α) Συντελεστής  $Z$  & (β) Ισχύς εξόδου και απόδοση σε σχέση με τη συχνότητα.

Αντίθετα, η μεταφερόμενη ισχύς σύμφωνα με τη (2.139), μεγιστοποιείται για μία συχνότητα ίση με 30.06kHz, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στη συχνότητα 30kHz που μεγιστοποιεί και την απόδοση. Όταν η συχνότητα είναι 25.71kHz ή 37.75kHz η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται, σύμφωνα με την Εικόνα 2-32-β, ωστόσο, η ισχύς εξόδου στην περίπτωση αυτή είναι μόλις 5.4% της μέγιστης δυνατής ισχύος. Λειτουργία, επομένως, του συστήματος κοντά στις συχνότητες αυτές θα πρέπει να αποφεύγεται.

## 2.6 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας ενός συστήματος στατικής επαγωγικής φόρτισης. Ειδικότερα, η στατική επαγωγική φόρτιση επιτρέπει την ασύρματη μεταφορά ενέργειας μεταξύ ενός πρωτεύοντος και ενός δευτερεύοντος πηνίου, μέσω της επαγωγικής τους σύζευξης. Περιγράφηκε, επίσης, το ισοδύναμο κύκλωμα που διέπει τη λειτουργία ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας, μελετώντας, παράλληλα, την ικανότητα των καλωδίων Litz να μειώσουν τις ωμικές αντιστάσεις του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου.

Σημαντική αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος, αλλά και μείωση της αέργου ισχύος που διακινείται σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης, δύναται να επιτευχθεί με τη χρήση στοιχείων αντιστάθμισης στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφηκαν οι τοπολογίες αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, εξάγοντας τις μαθηματικές εκφράσεις που

διέπουν τη λειτουργία του συστήματος σε κάθε μία τοπολογία. Ειδικότερα, περιγράφηκαν οι βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης, που περιλαμβάνουν τη χρήση ενός μόνο πυκνωτή αντιστάθμισης στο πρωτεύον και το δευτερεύον. Περιγράφηκαν, επίσης, πιο περίπλοκες τοπολογίες αντιστάθμισης που περιλαμβάνουν περισσότερα του ενός στοιχεία αντιστάθμισης (πυκνωτές και πηνία) στο πρωτεύον και το δευτερεύον του συστήματος. Η προσθήκη επιπλέον στοιχείων αντιστάθμισης δύναται να παρέχει τη δυνατότητα για αμφίδρομη μεταφορά ισχύος ή να προσδώσει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στις τιμές των ρευμάτων που διαρρέουν τα διάφορα σημεία της διάταξης. Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, δύναται να αυξηθεί σημαντικά το κόστος κατασκευής, λόγω της απαίτησης χρήσης πολλαπλάσιων στοιχείων αντιστάθμισης.

Μελετήθηκαν, επίσης, τα διάφορα είδη μαγνητικών συζευκτών που χρησιμοποιούνται για την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Ειδικότερα, με τη χρήση προγραμμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων μελετήθηκαν μαγνητικές διατάξεις ενός ή και περισσότερων πηνίων. Μεταξύ των διατάξεων ενός πηνίου, η κυκλική διάταξη ράβδων φερρίτη δύναται να μεταφέρει όσο το δυνατό περισσότερη ενέργεια με την καλύτερη αξιοποίηση του διαθέσιμου φερρίτη. Η απλή χρήση ενός δευτέρου πηνίου σε μία διάταξη επαγωγικής φόρτισης δε φαίνεται να αυξάνει σημαντικά την ανοχή του συστήματος σε πλευρικές μετατοπίσεις. Επιπλέον, διατάξεις δύο πηνίων φαίνεται να υστερούν ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος σχετικά με το διάκενο λειτουργίας, σε σχέση με κυκλικές διατάξεις ράβδων φερρίτη παρόμοιων χαρακτηριστικών.

Ωστόσο, διατάξεις δύο πηνίων με κατάλληλη αναδιαμόρφωση (προσθήκη ενός επιπλέον πηνίου ή αναδιάταξη των δύο πηνίων της διάταξης) επιτρέπουν σημαντική αύξηση της ανοχής του συστήματος σε πλευρικές μετατοπίσεις. Στις περιπτώσεις αυτές, ωστόσο, η συνολική ισχύς που μεταφέρεται είναι το άθροισμα των τιμών της ισχύος που προκύπτουν από δύο διαφορετικά συστήματα πηνίων. Το γεγονός αυτό επιβάλλει τη χρήση επιπλέον ανορθωτών στην πλευρά του δευτερεύοντος, αυξάνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Στα πλαίσια μελέτης των συζευκτών που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, εξετάστηκε, επίσης η επίδραση του μεγέθους της διάταξης στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν ότι μία διάταξη μικρών διαστάσεων (που θα ήταν ιδιαίτερα ευνοϊκή για την τοποθέτηση σε συνηθισμένα επιβατικά οχήματα), απαιτεί τη λειτουργία σε ιδιαίτερα μικρά κατακόρυφα διάκενα, ενώ επιτρέπει τη μεταφορά μόνο μικρών ποσών ισχύος. Μεγαλύτερα διάκενα λειτουργίας, αλλά και αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος είναι δυνατό να επιτευχθούν, απαιτούν, ωστόσο μία αύξηση του μεγέθους του μαγνητικού συζεύκτη.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφηκαν, επίσης, τα συστήματα ελέγχου που δύναται να υλοποιηθούν στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Ειδικότερα, τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν έλεγχο μόνο στη μία πλευρά του συστήματος (πρωτεύον ή δευτερεύον), ή συνδυασμό ελέγχου και στις δύο πλευρές του συστήματος. Η καλύτερη προσέγγιση σε ένα σύστημα επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας σε ηλεκτρικά οχήματα είναι η χρήση ελέγχου τόσο στην πλευρά του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος, δίνοντας τη δυνατότητα ελέγχου χαρακτηριστικών και στις δύο πλευρές του συστήματος.

Εξετάστηκε, τέλος, το φαινόμενο της διακλάδωσης, το οποίο υποδεικνύει ότι ενδέχεται να υπάρχουν έως και τρεις διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας που οδηγούν σε επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος (και κατ' επέκταση αυξημένη απόδοση του συστήματος) αλλά μία μόνο συχνότητα που μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη ισχύ. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης υποδεικνύουν ότι, σύμφωνα με το φαινόμενο της διακλάδωσης, συγκεκριμένες συχνότητες λειτουργίας δύναται να οδηγήσουν σε σημαντική αύξηση της απόδοσης αλλά μηδενική σχεδόν μεταφορά ισχύος. Η λειτουργία, επομένως, του συστήματος κοντά στις συχνότητες αυτές θα πρέπει να αποφεύγεται.



## Κεφάλαιο 3

### Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων:

#### Περιγραφή Λειτουργίας και Περιορισμοί

##### 3.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε η λειτουργία ενός συστήματος κατά τη στατική επαγωγική φόρτιση, όπου το όχημα παραμένει σταθμευμένο πάνω από το φορτιστή μέχρι να ολοκληρωθεί η φόρτιση. Στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, όπου το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, η λειτουργία του συστήματος είναι παρόμοια με τη στατική φόρτιση. Ωστόσο, η κίνηση του οχήματος επιφέρει μεταβολές στις τιμές των αυτεπαγωγών, οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στη μελέτη του ισοδύναμου κυκλώματος.

Το φαινόμενο διακλάδωσης θα ισχύει και στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, όσον αφορά στη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος. Ωστόσο, η κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή αναμένεται να προκαλέσει μεταβολές τόσο στην απόδοση όσο και στη μεταφερόμενη ισχύ. Είναι απαραίτητη επομένως η μελέτη του φαινομένου διακλάδωσης όχι μόνο σύμφωνα με τη συχνότητα λειτουργίας, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης, αλλά και σύμφωνα με τις μεταβολές μετατόπισης που παρατηρούνται μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος.

Όπως αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ιδιαίτερα σημαντική σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι η χρήση πυκνωτών αντιστάθμισης. Ωστόσο, η τιμή των πυκνωτών αντιστάθμισης επιλέγεται, συνήθως, με βάση την τιμή των αυτεπαγωγών των πηνίων στο πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα ώστε να επιτευχθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για το σύστημα επαγωγικής φόρτισης, ανάλογα με την τοπολογία που επιλέγεται. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των βασικών τοπολογιών (με τη χρήση ενός μόνο πυκνωτή αντιστάθμισης σε πρωτεύον και δευτερεύον) οι πυκνωτές υπολογίζονται σύμφωνα με τις τιμές των επαγωγών σε μία συγκεκριμένη θέση με στόχο την ελαχιστοποίηση της διακινούμενης αέργου ισχύος στο σύστημα επαγωγικής φόρτισης και την αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος. Παρόμοια, στις τοπολογίες συνδυασμού στοιχείων αντιστάθμισης οι πυκνωτές και τα πηνία αντιστάθμισης επιλέγονται λαμβάνοντας, και πάλι, υπόψη συγκεκριμένες τιμές επαγωγών σε μία δεδομένη θέση, με στόχο να αποδοθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στο σύστημα επαγωγικής φόρτισης (ικανότητα αμφίπλευρης μεταφοράς ισχύος, ρεύμα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος επιθυμητής τιμής, μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην έξοδο του αντιστροφέα DC/AC κλπ.).

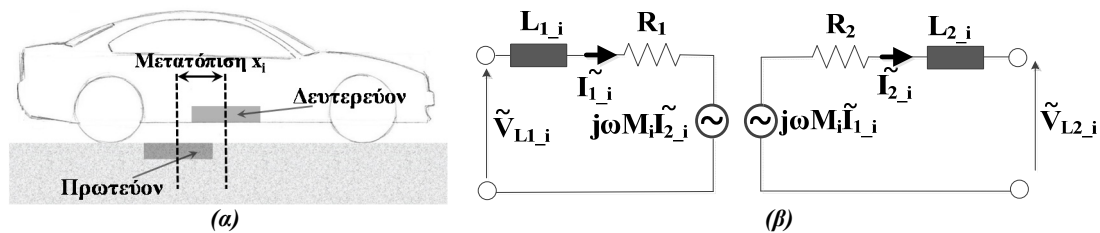
Μία παρόμοια προσέγγιση, όσον αφορά στην επιλογή των στοιχείων αντιστάθμισης, ακολουθείται συνήθως στη βιβλιογραφία σχετικά με τη δυναμική επαγωγική φόρτιση [51],[67],[68]. Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, δε λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές στις τιμές των αυτεπαγωγών κατά την κίνηση του οχήματος. Αν και οι μεταβολές αυτές δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες, δύναται, ωστόσο, να επιφέρουν σημαντικές μεταβολές στην ισχύ και την απόδοση του συστήματος, ανάλογα με την επιλογή των τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης. Στο πλαίσιο αυτό είναι απαραίτητη η μελέτη της μεταβολής των τιμών των αυτεπαγωγών στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, με στόχο την κατάλληλη επιλογή των

στοιχείων αντιστάθμισης για την εξασφάλιση μίας επαρκούς μεταφοράς ισχύος και μίας ικανοποιητικής απόδοσης καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος.

### 3.2 Λειτουργία ενός συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας στη δυναμική φόρτιση

Σε εφαρμογές δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων η λειτουργία του συστήματος είναι παρόμοια με τη στατική φόρτιση, με δύο κατηγορίες να διακρίνονται για το μαγνητικό συζεύκτη, την ενιαία και την τμηματική διάταξη, όπως περιγράφηκαν στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Ωστόσο, η περιορισμένη απόδοση της ενιαίας διάταξης, λόγω της συνεχούς τροφοδότησης ενός ιδιαίτερα μεγάλου αγωγού, σε αντίθεση με την αυξημένη απόδοση που επιτυγχάνεται με την τμηματική διάταξη [63], έχει οδηγήσει στην επικράτηση της τελευταίας σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Σχετικά με την τμηματική διάταξη, η γεωμετρική σχεδίαση του μαγνητικού συζεύκτη είναι παρόμοια με την αντίστοιχη σχεδίαση των μαγνητικών συζευκτών στη στατική φόρτιση, με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κάθε συζεύκτη που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.3.2.

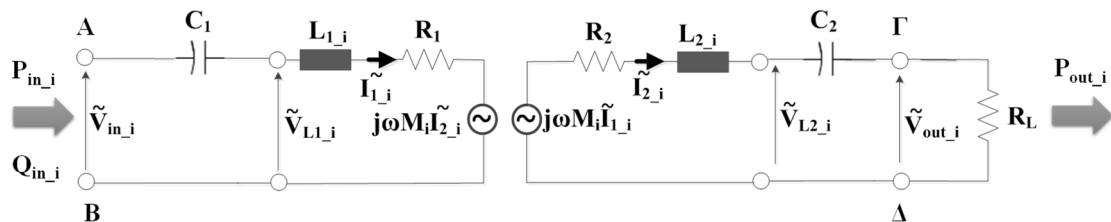
Στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης το ισοδύναμο κύκλωμα του συζεύκτη περιγράφεται και πάλι με το κύκλωμα στην Εικόνα 2-6. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, μία οριζόντια μετατόπιση  $x_i$  θα παρατηρείται μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος (Εικόνα 3-1-α) η οποία θα μεταβάλλεται διαρκώς.



Εικόνα 3-1: (α) Μετατόπιση  $x_i$  μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή και (β) ισοδύναμο κύκλωμα μαγνητικού συζεύκτη στη δυναμική επαγωγική φόρτιση για μετατόπιση  $x_i$  μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

Επομένως, τόσο η αμοιβαία επαγωγή  $M$ , όσο και οι αυτεπαγωγές πρωτεύοντος και δευτερεύοντος,  $L_1$  και  $L_2$ , μεταβάλλονται διαρκώς καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Πρέπει, επομένως, στο κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-6 να εισαχθούν τα μεγέθη  $L_{1_i}$ ,  $L_{2_i}$  και  $M_i$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1-β, όπου ο δείκτης  $i$  υποδεικνύει την τιμή της επαγωγής στη μετατόπιση  $x_i$ .

Λόγω της μεταβολής των τιμών των επαγωγών με την κίνηση του οχήματος, οι τιμές των ρευμάτων  $I_1$  και  $I_2$  καθώς και οι τάσεις  $V_{L1}$  και  $V_{L2}$ , αναμένεται να μην είναι σταθερές. Ακολούθως, και η μεταφερόμενη ισχύς καθώς και η απόδοση του συστήματος δε θα παραμένουν σταθερές αλλά θα μεταβάλλονται καθώς το όχημα κινείται.



Εικόνα 3-2: Ισοδύναμο κύκλωμα μαγνητικού συζεύκτη στη δυναμική επαγωγική φόρτιση στην περίπτωση τοπολογίας αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά και για μετατόπιση  $x_i$  μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

Για παράδειγμα, στην τοπολογία αντιστάθμισης σειρά-σειρά (S - S), η μεταφερόμενη ισχύς, σύμφωνα με τη (2.41), θα είναι ίση με:

$$P_{out_i} = \frac{\omega^2 M_i^2}{(R_L + R_2)^2 + (\omega L_{2,i} - \frac{1}{\omega C_2})^2} |\widetilde{I}_{1,i}|^2 \quad (3.1)$$

Επίσης, λαμβάνοντας υπόψιν τις (2.44) και (2.54), η ισχύς στην είσοδο του κυκλώματος που απεικονίζεται στην Εικόνα 3-2, θα είναι ίση με:

$$P_{in_i} = \left[ R_1 + \frac{\omega^2 M_i^2 (R_L + R_2)}{(\omega L_{2,i} - \frac{1}{\omega C_2})^2 + (R_L + R_2)^2} \right] |\widetilde{I}_{1,i}|^2 \quad (3.2)$$

Αντίστοιχα, η άεργος ισχύς στην είσοδο του κυκλώματος στην Εικόνα 3-2 θα είναι, σύμφωνα με τις (2.44), (2.55), ίση με:

$$Q_{in_i} = \left[ \omega L_{1,i} - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{(\omega L_{2,i} - \frac{1}{\omega C_2}) \omega^2 M_i^2}{(\omega L_{2,i} - \frac{1}{\omega C_2})^2 + (R_L + R_2)^2} \right] |\widetilde{I}_{1,i}|^2 \quad (3.3)$$

Ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο του συστήματος, για κάθε σημείο της κίνησης,  $x_i$ , δύναται να ορισθεί σύμφωνα με την (3.4). Η επίτευξη ενός μοναδιαίου συντελεστή ισχύος είναι ένας από τους βασικούς στόχους σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης με στόχο τον περιορισμό της αέργου ισχύος στην είσοδο του συστήματος [49].

$$PF_i = \frac{P_{in_i}}{\sqrt{P_{in_i}^2 + Q_{in_i}^2}} \quad (3.4)$$

Σε κάθε σημείο της κίνησης,  $x_i$ , η απόδοση του συστήματος  $\widetilde{S}_{out_i}/\widetilde{S}_{in_i}$ , δύναται να ορισθεί ως:

$$eff_i = \frac{P_{out_i}}{\sqrt{P_{in_i}^2 + Q_{in_i}^2}} = \frac{\frac{\omega^2 M_i^2}{(R_L + R_2)^2 + (\omega L_{2,i} - \frac{1}{\omega C_2})^2}}{\sqrt{\left[ R_1 + \frac{\omega^2 M_i^2 (R_L + R_2)}{(\omega L_{2,i} - \frac{1}{\omega C_2})^2 + (R_L + R_2)^2} \right]^2 + \left[ \omega L_{1,i} - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{(\omega L_{2,i} - \frac{1}{\omega C_2}) \omega^2 M_i^2}{(\omega L_{2,i} - \frac{1}{\omega C_2})^2 + (R_L + R_2)^2} \right]^2}} \quad (3.5)$$

Είναι, επομένως, φανερό ότι, στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, δεν αρκεί η μελέτη της λειτουργίας του συστήματος σε μία συγκεκριμένη θέση, αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η μεταφορά ισχύος, αλλά και η απόδοση, σε όλες τις θέσεις καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή.

### 3.3 Φαινόμενο Διακλάδωσης στη δυναμική φόρτιση

Το φαινόμενο διακλάδωσης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, θα ισχύει και στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, με τις (2.136) - (2.139) να αφορούν και πάλι στη συσχέτιση της απόδοσης και της μεταφερόμενης ισχύος με τη συχνότητα. Ωστόσο, η κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή αναμένεται να προκαλέσει μεταβολές τόσο στην απόδοση όσο και στη μεταφερόμενη ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των αυτεπαγωγών  $L_1$ ,  $L_2$  και  $M$  στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης θα πρέπει να θεωρηθούν ως συναρτήσεις της μεταβλητής  $x_i$ , η οποία υποδεικνύει την οριζόντια μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος κατά την κίνηση του οχήματος. Για παράδειγμα, εάν οι  $L_1$ ,  $L_2$  και  $M$  έχουν τη μορφή ενός πολυωνύμου 2<sup>ου</sup> βαθμού ως προς  $x_i$ , οι τιμές των αυτεπαγωγών και της αμοιβαίας επαγωγής μπορούν να γραφούν ως:

$$k = a_k x_i^2 + b_k x_i + c_k \quad (3.6)$$

όπου  $k$  αντιστοιχεί σε  $L_1$ ,  $L_2$  ή  $M$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο ακριβής προσδιορισμός των αυτεπαγωγών και της αμοιβαίας επαγωγής σε συνάρτηση με τη μετατόπιση  $x_i$  εξαρτάται σημαντικά από τη διάταξη που μελετάται (μέγεθος διάταξης, γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τρόπος τοποθέτηση του φερρίτη κλπ.) και δύναται να οδηγήσει σε πιο περίπλοκες εκφράσεις από την (3.6).

Για την απλοποίηση της ανάλυσης και την καλύτερη επεξήγηση του φαινομένου της διακλάδωσης, λαμβάνοντας, παράλληλα, υπόψιν τη χρήση καλωδίου Litz και τη μείωση των ωμικών απωλειών στα πηνία πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  των πηνίων στην Εικόνα 3-1-α μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες [49],[51].

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η τοπολογία Σειρά-Σειρά χρησιμοποιείται συχνά σε συστήματα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων τόσο στατικής όσο και δυναμικής επαγωγικής φόρτισης [30],[49],[51],[57],[60]. Στην τοπολογία αυτή, για μία σταθερή συχνότητα,  $f$ , και επομένως και μία σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega=2\pi f$ , η επίτευξη μίας μέγιστης απόδοσης, ή εναλλακτικά η επίτευξη μίας απόδοσης ίσης με τη μονάδα σύμφωνα με τη (2.136), απαιτεί ο όρος  $Z$  όπως εκφράζεται στη (2.137) να είναι ίσος με μηδέν. Η θεώρηση μηδενικών ωμικών απωλειών στα τυλίγματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ( $R_1=0$  &  $R_2=0$ ) υποδεικνύει ότι ο ορισμός της απόδοσης σύμφωνα με την (3.5) ταυτίζεται με τον ορισμό του συντελεστή ισχύος στην (3.4). Επομένως, μία μεγιστοποίηση της απόδοσης όπως ορίζεται στην υποενότητα αυτή ταυτίζεται με ένα μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, ο όρος  $Z$  λαμβάνοντας υπόψιν και τη μετατόπιση  $x_i$ , σύμφωνα με την κίνηση του οχήματος, θα είναι:

$$Z = \frac{\left(\omega * L_{1,i} - \frac{1}{\omega * C_1}\right) * \left[\left(\omega * L_{2,i} - \frac{1}{\omega * C_2}\right)^2 + R_L^2\right]}{\omega^2 * M_i^2} - \left(\omega * L_{2,i} - \frac{1}{\omega * C_2}\right) \quad (3.7)$$

Η απαίτηση μηδενισμού του όρου  $Z$ , λαμβάνοντας υπόψιν την έκφραση των  $L_1$ ,  $L_2$  και  $M$  σύμφωνα με την (3.6), οδηγεί στην εύρεση των ριζών ενός πολυωνύμου 6<sup>ου</sup> βαθμού ως προς  $x_i$ , υποδηλώνοντας πολλαπλά σημεία μεγιστοποίησης της απόδοσης κατά τη διάρκεια της κίνησης.

Λαμβάνοντας υπόψιν την κίνηση του οχήματος η ισχύς εξόδου,  $P_{out}$ , σύμφωνα με τη (2.131), θα γίνει:



$$P_{out\_i} = \frac{\omega^2 M_i^2}{R_L^2 + (\omega L_{2\_i} - \frac{1}{\omega C_2})^2} |\tilde{I}_1|^2 \quad (3.8)$$

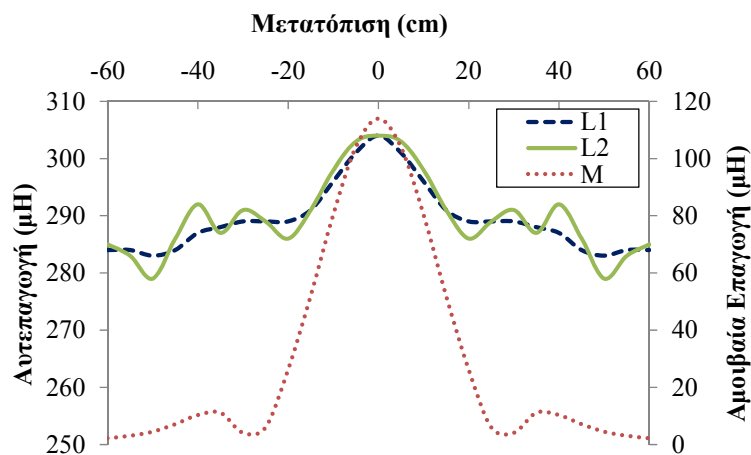
Η συχνότητα που μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη ισχύ, για μία συγκεκριμένη μετατόπιση  $x_i$ , σύμφωνα με τη (2.139), θα είναι:

$$\omega_{P_{out\_max}} = \sqrt{\frac{1}{L_{2\_i} C_2 - \frac{R_L^2 C_2^2}{2}}} \quad (3.9)$$

Για την εύρεση της ακριβούς θέσης, κατά τη διάρκεια της κίνησης όπου μεγιστοποιείται η μεταφερόμενη ισχύς απαιτείται η μελέτη του προσήμου της παραγώγου  $\partial P_{out}/\partial x$  κοντά στα σημεία όπου η παράγωγος  $\partial P_{out}/\partial x$  γίνεται ίση με μηδέν. Στην περίπτωση που οι τιμές των επαγωγών δύναται να εκφραστούν ως πολυώνυμα 2<sup>ου</sup> βαθμού, σύμφωνα με την (3.6), η αντικατάσταση των τιμών των  $L_{2\_i}$  και  $M_i$  στην (3.8) υποδεικνύει ότι μία αναλυτική έκφραση στο παραπάνω πρόβλημα είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Ωστόσο, αριθμητικοί υπολογισμοί μπορούν εύκολα να πραγματοποιηθούν για την εφαρμογή στο εκάστοτε πρόβλημα.

#### ✓ Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Το φαινόμενο της διακλάδωσης στη στατική φόρτιση εξετάστηκε στην ενότητα 2.5 με τη μελέτη του μαγνητικού συζεύκτη και του αντίστοιχου συστήματος επαγωγικής φόρτισης που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-31. Για μία συχνότητα λειτουργίας 30kHz και επιλέγοντας τους πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  σύμφωνα με τις (2.56) και (2.58), με στόχο την επίτευξη μίας μέγιστης μεταφοράς ισχύος και ενός μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στη θέση όπου το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτιστή, οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  επιλέγονται ίσοι με 134.8nF και 136.1nF αντίστοιχα. Το φαινόμενο διακλάδωσης σχετικά με τη συχνότητα, θα παρουσιάζεται και στη δυναμική φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα όταν το όχημα, κατά τη διάρκεια της κίνησής του, βρεθεί ακριβώς πάνω από το φορτιστή (δηλαδή, η μετατόπιση γίνει ίση με  $x=0$ cm), η μεταφερόμενη ισχύς και η απόδοση του συστήματος αναμένεται να μεταβάλλονται σύμφωνα με την Εικόνα 2-32.

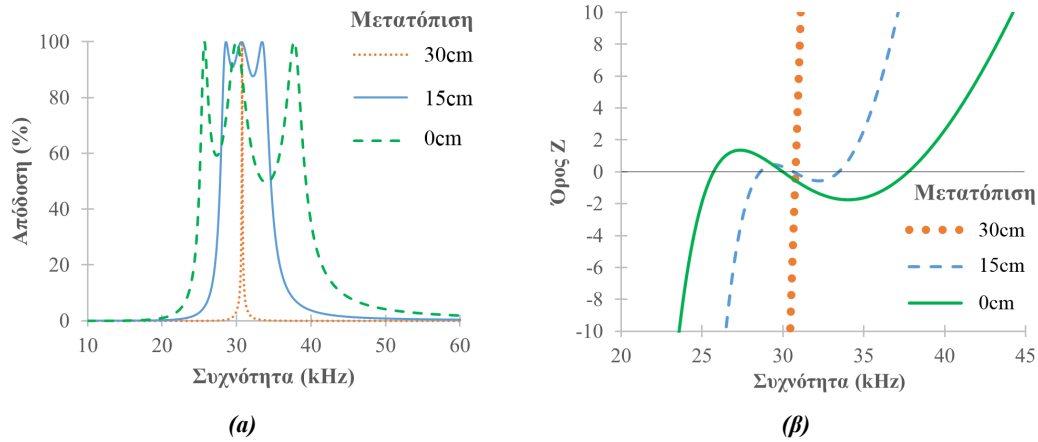


Εικόνα 3-3: Μεταβολή των  $L_1, L_2$  και  $M$  με την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή.

Ωστόσο, στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης οι τιμές των επαγωγών  $L_1$ ,  $L_2$  και  $M$  δεν παραμένουν σταθερές αλλά μεταβάλλονται με την κίνηση του οχήματος. Οι τιμές των αυτεπαγωγών για διάφορες μετατοπίσεις όπως προσδιορίστηκαν από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS απεικονίζονται στην Εικόνα 3-3.

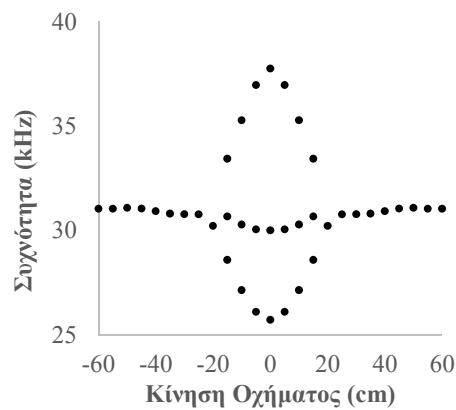
Το οφειλόμενο στη συχνότητα φαινόμενο διακλάδωσης θα παρουσιάζεται, επομένως, και για διάφορες άλλες περιπτώσεις μετατόπισης. Πιο συγκεκριμένα, για μία μετατόπιση ίση με

15cm, η απόδοση του συστήματος μεγιστοποιείται σε τρεις τιμές συχνοτήτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-4-α. Για τη συγκεκριμένη μετατόπιση των 15cm, ο όρος  $Z$ , όπως εκφράζεται στην (3.7), λαμβάνει μηδενικές τιμές, οδηγώντας σε μία μέγιστη απόδοση, για τιμές συχνοτήτων: 28.59kHz, 30.67kHz και 33.44kHz, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-4-β.



**Εικόνα 3-4: (α) Απόδοση και (β) Όρος  $Z$  σε σχέση με τη συχνότητα για μετατοπίσεις ίσες με 0cm, 15cm και 30cm (για μετατόπιση 0cm το δευτερεύον βρίσκεται ακριβώς πάνω από το πρωτεύον)**

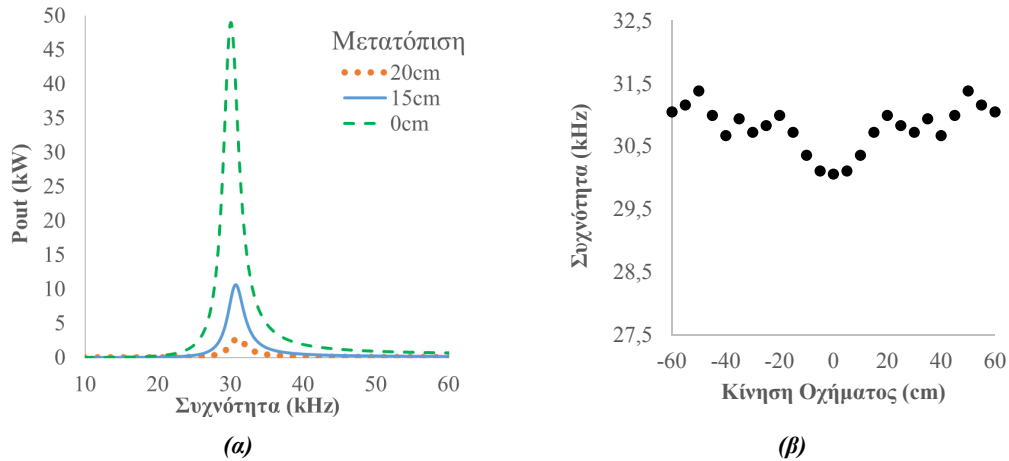
Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές μετατόπισης, όπως για παράδειγμα για 30cm, το φαινόμενο διακλάδωσης δεν είναι πλέον ορατό, καθώς ο όρος  $Z$  λαμβάνει μηδενική τιμή μόνο για μία συχνότητα (Εικόνα 3-4-β). Εξετάζοντας τη συχνότητα (ή συχνότητες) μεγιστοποίησης της απόδοσης, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή (Εικόνα 3-5), είναι φανερό ότι το φαινόμενο της διακλάδωσης παρατηρείται για μετατοπίσεις μεταξύ -15cm και 15cm. Αντίθετα, όταν το όχημα εισέρχεται στην περιοχή πάνω από το φορτιστή όπου η μετατόπιση  $x_i$  είναι μικρότερη από -15cm ή εξέρχεται από αυτόν με μετατοπίσεις  $x_i > +15cm$ , η απόδοση μεγιστοποιείται μόνο για μία τιμή της συχνότητας.



**Εικόνα 3-5: Συχνότητα (ή συχνότητες) μεγιστοποίησης της απόδοσης, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή**

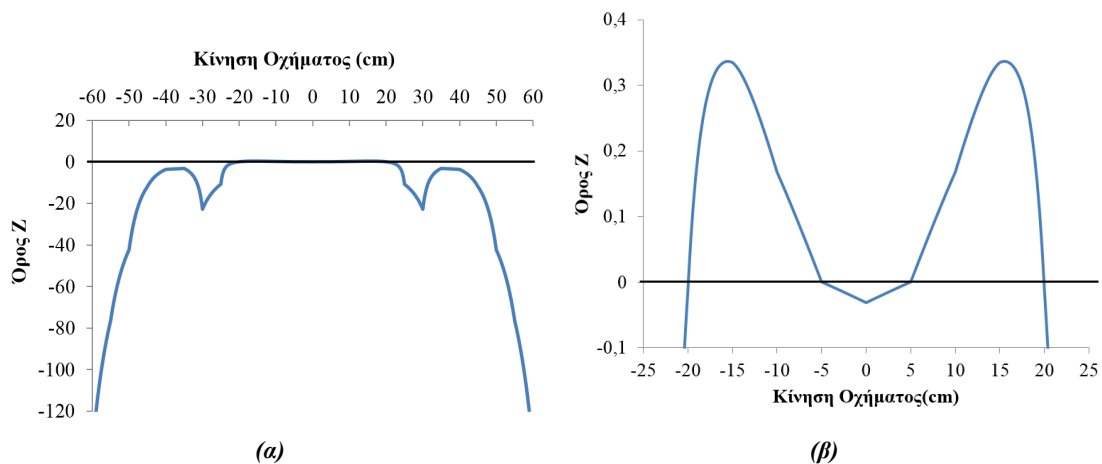
Η ισχύς εξόδου,  $P_{out}$ , του συστήματος για διάφορες περιπτώσεις μετατόπισης απεικονίζεται στην Εικόνα 3-6-α. Εξετάζοντας μία μετατόπιση ίση με 0cm, όπου το δευτερεύον βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτιστή, η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται για μία συχνότητα ίση με 30,06kHz. Στην περίπτωση, ωστόσο, μίας μετατόπισης ίσης με 15cm η συχνότητα που μεγιστοποιεί την ισχύ εξόδου διαφοροποιείται και γίνεται ίση με 30.74kHz. Ανάλογες μεταβολές στη συχνότητα μεγιστοποίησης της ισχύος παρουσιάζονται και για τις υπόλοιπες τιμές μετατοπίσεων (Εικόνα 3-6-β). Το γεγονός αυτό παρατηρείται καθώς η συχνότητα όπου μεγιστοποιείται η απόδοση εξαρτάται, σύμφωνα με την (3.9), από την τιμή της αυτεπαγωγής  $L_{2\_j}$ , η οποία μεταβάλλεται κάθε στιγμή με την κίνηση του οχήματος.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-6-α, μία σημαντική μείωση παρατηρείται στη μεταφερόμενη ισχύ με την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζοντας μία μετατόπιση ίση με 15cm στην Εικόνα 3-6-α, μία μείωση 78% παρατηρείται στη μέγιστη τιμή της ισχύος εξόδου σε σχέση με την περίπτωση που το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτιστή (μετατόπιση ίση με 0cm στην Εικόνα 3-6-α). Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-6-α, μία ακόμα μεγαλύτερη μείωση στην ισχύ εξόδου αναμένεται εξετάζοντας ακόμα μεγαλύτερες τιμές μετατόπισης.



Εικόνα 3-6: (α) Μεταφερόμενη ισχύς σε σχέση με τη συχνότητα για διάφορες μετατοπίσεις και (β) συχνότητα που μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη ισχύ σε κάθε μετατόπιση

Επίσης, στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, τόσο η απόδοση όσο και η ισχύς εξόδου, αναμένεται να μεταβάλλονται όχι μόνο ανάλογα με την τιμή της συχνότητας λειτουργίας, αλλά και με την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση θα μεγιστοποιείται κατά τη διάρκεια της κίνησης, όταν ο όρος  $Z$ , όπως εκφράζεται στην (3.9), γίνει ίσος με μηδέν. Σε περίπτωση μίας συχνότητας ίσης με 30kHz, ο όρος  $Z$  ως προς την κίνηση του οχήματος απεικονίζεται στην Εικόνα 3-7-α. Είναι φανερό ότι για ένα μέρος της κίνησης που καλύπτει μετατοπίσεις από -25 μέχρι +25 εκατοστά περίπου, ο όρος  $Z$  λαμβάνει σχεδόν μηδενικές τιμές. Μία πιο προσεκτική μελέτη της αντίστοιχης περιοχής (Εικόνα 3-7-β) υποδεικνύει ότι ο όρος αυτός γίνεται ακριβώς ίσος με μηδέν για τιμές μετατόπισης -20.05, -5, 5 και 19.95cm, γεγονός που αναμένεται να οδηγεί στη μεγιστοποίηση της απόδοσης στα αντίστοιχα σημεία (Εικόνα 3-8-α).



Εικόνα 3-7: (α) Όρος  $Z$  ως προς τη μετατόπιση, (β) Μεγέθυνση της περιοχής κοντά στο μηδέν για τον όρο  $Z$ .

Σύμφωνα με την Εικόνα 3-3, οι τιμές των επαγωγών  $L_1$ ,  $L_2$  και  $M$  δεν μπορούν να εκφραστούν στη μορφή που υποδεικνύει η (3.6) για όλο το εύρος της κίνησης. Ωστόσο, εξετάζοντας μικρότερες περιοχές της κίνησης, οι τιμές των επαγωγών μπορούν να εκφραστούν

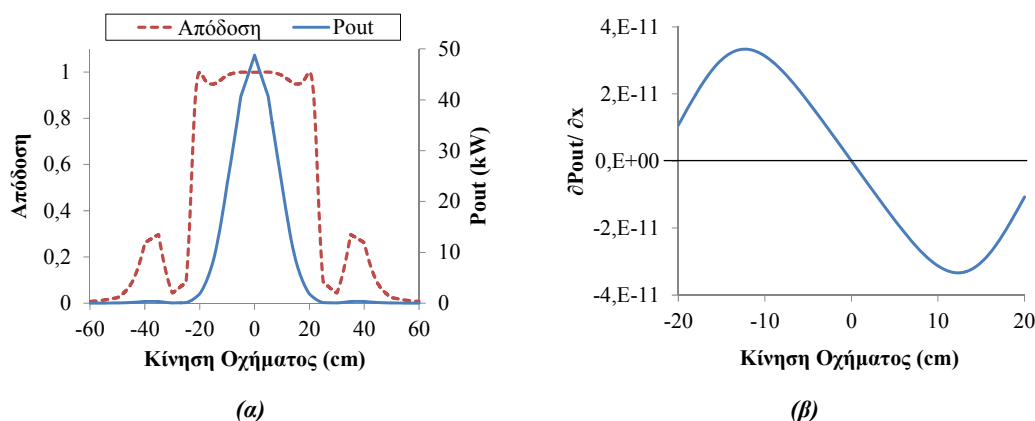
στη μορφή πολυωνύμων δευτέρου βαθμού. Για παράδειγμα, όταν η μετατόπιση μεταβάλλεται από -20cm μέχρι +20cm, οι επαγωγές  $L_1$ ,  $L_2$  και  $M$  μπορούν να εκφραστούν σύμφωνα με την (3.6), με τις τιμές των αντίστοιχων συντελεστών να δίδονται από τον Πίνακα 3-1.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα διατριβή δεν εξετάζεται ο αναλυτικός προσδιορισμός των μαθηματικών εκφράσεων των αυτεπαγωγών  $L_1, L_2, M$  για όλο το εύρος μετατοπίσεων. Αντίθετα, οι αριθμητικές τιμές των επαγωγών προσδιορίζονται στην Εικόνα 3-3, σύμφωνα με προσομοιώσεις στο υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS. Επιπλέον, δεν εξετάζεται η βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών του μαγνητικού συζεύκτη στην Εικόνα 2-31 (χαρακτηριστικά τυλιγμάτων-φερριτών, κατάλληλη τοποθέτησή τυλιγμάτων-φερριτών στο συζεύκτη κλπ.) μπορεί, ωστόσο, να αναζητηθεί στη βιβλιογραφία [18]. Στο πλαίσιο αυτό, η εξαγωγή των εκφράσεων για τις επαγωγές  $L_1$ ,  $L_2$  και  $M$ , σύμφωνα με τους συντελεστές στον Πίνακα 3-1 είναι προσεγγιστική και πραγματοποιείται σύμφωνα με τις αριθμητικές τιμές των επαγωγών στην Εικόνα 3-3.

**Πίνακας 3-1: Τιμές των συντελεστών για την προσέγγιση των  $L_1$ ,  $L_2$  και  $M$  με πολώνωμα 2ου βαθμού.**

	$L_1$	$L_2$	$M$
$a$	-3.429e-08	-4.589e-08	-2.124e-07
$b$	1.213e-21	-1.569e-21	-3.051e-22
$c$	3.01e-04	3.032e-04	1.064e-04

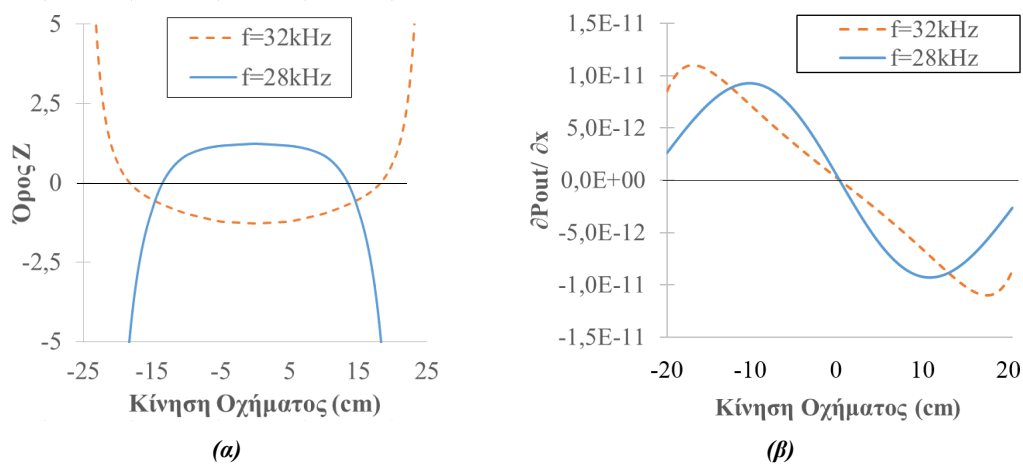
Σύμφωνα με την Εικόνα 3-8-β, η παράγωγος  $\partial P_{out}/\partial x_i$  γίνεται ίση με μηδέν όταν η μετατόπιση  $x_i$  είναι ίση με 0cm. Το πρόσημο της  $\partial P_{out}/\partial x_i$  για μετατοπίσεις κοντά σε 0cm (όταν το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτιστή) υποδεικνύει ότι ένα τοπικό μέγιστο αναμένεται στην ισχύ εξόδου,  $P_{out}$ , όταν  $x_i=0$ cm. Πράγματι, η μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιείται σε αυτή την τιμή μετατόπισης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-8-α.



**Εικόνα 3-8: (α) Μεταβολή της ισχύος εξόδου και της απόδοσης με την κίνηση του οχήματος για μία συχνότητα ίση με 30kHz & (β) Παράγωγος της ισχύος εξόδου,  $P_{out}$ , καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή.**

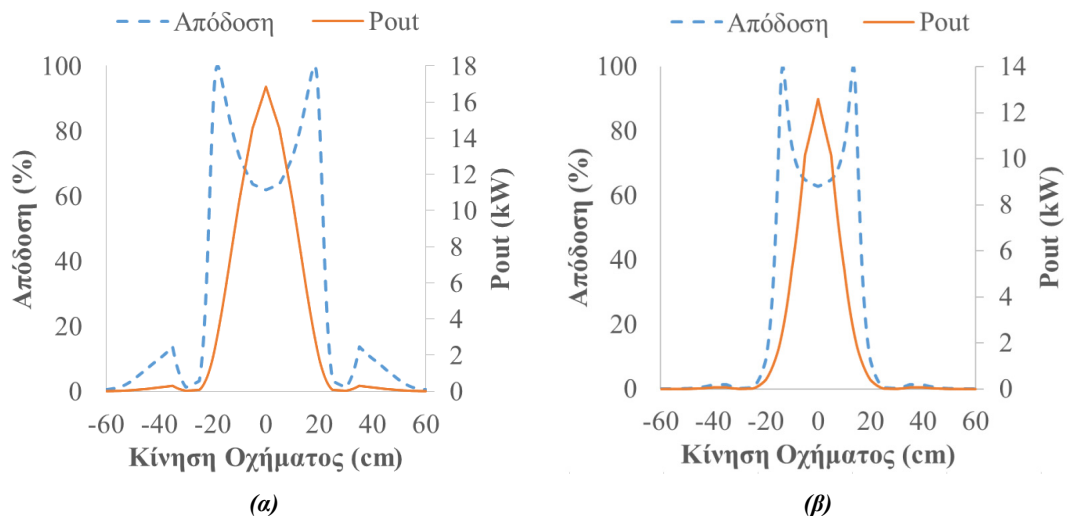
Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι μεταβολές αναμένονται στην απόδοση του συστήματος σε όλη την περιοχή κίνησης του οχήματος, σε περίπτωση μίας συχνότητας λειτουργίας, διαφορετικής των 30kHz που εξετάστηκε στην Εικόνα 3-8-α. Πιο συγκεκριμένα, για μία συχνότητα λειτουργίας ίση με 32kHz, ο όρος  $Z$  (Εικόνα 3-9-α), όπως ορίζεται στην (3.9), γίνεται ίσος με το μηδέν μόνο για δύο τιμές κατά την κίνηση του οχήματος ( $x=-18,18$  και  $x=18,18$ cm), με την απόδοση να μεγιστοποιείται στα σημεία αυτά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-10-α. Παρόμοια, για μία συχνότητα ίση με 28kHz ο όρος  $Z$  γίνεται ίσος με μηδέν για  $x=-13,47$ cm και  $x=13,47$ cm (Εικόνα 3-9-α), με μία αντίστοιχη μεγιστοποίηση της απόδοσης σε αυτά τα σημεία μετατόπισης (Εικόνα 3-10-β).

Ανάλογες μεταβολές αναμένονται στη μεταφερόμενη ισχύ του συστήματος όταν εξετάζονται συχνότητες λειτουργίας διαφορετικές των 30kHz. Πιο συγκεκριμένα, για μία συχνότητα λειτουργίας ίση με 28kHz ή 32kHz, το πρόσημο της παραγώγου  $\partial P_{out}/\partial x_i$  για μετατοπίσεις κοντά σε  $x_i=0\text{cm}$  (Εικόνα 3-9-β) υποδεικνύει ότι αναμένεται μία μέγιστη τιμή στη μεταφερόμενη ισχύ στη θέση αυτή. Ωστόσο, όπως είναι φανερό στην Εικόνα 3-10, μία σημαντική μείωση παρατηρείται στη μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος σε σύγκριση με την περίπτωση όπου η συχνότητα λειτουργίας είναι ίση με 30kHz (Εικόνα 3-8-α). Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση μίας συχνότητας λειτουργίας ίσης με 32kHz και 28kHz, η ισχύς εξόδου, όταν το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτιστή μειώνεται κατά 65.4% και 74.2% αντίστοιχα, σε σύγκριση με μία συχνότητα λειτουργίας ίσης με 30kHz.



Εικόνα 3-9: (α) Όρος  $Z$  και (β) παράγωγος της  $P_{out}$  ως προς την κίνηση του οχήματος, σε περίπτωση συχνοτήτων  $f=32\text{kHz}$  ή  $f=28\text{kHz}$ .

Επίσης, είναι φανερό από την Εικόνα 3-10 ότι για συχνότητες λειτουργίας 32kHz και 28kHz, η απόδοση του συστήματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από 65% όταν η ισχύς μεγιστοποιείται. Επομένως, συστήματα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που καλούνται να λειτουργήσουν σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης, θα πρέπει να αναλύσουν προσεκτικά το φαινόμενο της διακλάδωσης όχι μόνο ως προς τη συχνότητα, αλλά και ως προς την κίνηση του οχήματος, ώστε να εξασφαλίζουν υψηλά ποσοστά απόδοσης, αλλά και ικανοποιητικά ποσά μεταφερόμενης ισχύος, κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή.



Εικόνα 3-10: Απόδοση και ισχύς εξόδου ως προς τη μετατόπιση του οχήματος,  $x$ , σε περίπτωση συχνότητας λειτουργίας ίσης με (α)  $f=32\text{kHz}$  και (β)  $f=28\text{kHz}$ .

### 3.4 Μεταβολές των αυτεπαγωγών στη δυναμική φόρτιση

Στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης το όχημα σταθμεύει πάνω από το φορτιστή, με αποτέλεσμα να απαιτείται η λειτουργία του συστήματος σε μία συγκεκριμένη μετατόπιση ή λαμβάνοντας υπόψιν ένα μικρό εύρος μετατοπίσεων με αμελητέες μεταβολές στις αυτεπαγωγές. Η επιλογή, επομένως, των στοιχείων αντιστάθμισης στην περίπτωση αυτή μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί για συγκεκριμένες τιμές αυτεπαγωγών. Μία παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται, συνήθως, στη βιβλιογραφία σχετικά με τη δυναμική επαγωγική φόρτιση [51],[67],[68]. Ωστόσο, στη δυναμική φόρτιση, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, η οριζόντια μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος λαμβάνει ένα μεγάλο εύρος τιμών, οδηγώντας σε μεταβολές στις τιμές των αυτεπαγωγών οι οποίες είναι ικανές να επηρεάσουν τόσο τη μεταφερόμενη ισχύ, όσο και την απόδοση του συστήματος.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση της τοπολογίας σειρά-σειρά, η οποία χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές δυναμικής επαγωγικής φόρτισης [30],[51],[60] οι πυκνωτές αντιστάθμισης  $C_1$  και  $C_2$  υπολογίζονται, συνήθως, σύμφωνα με τις (2.56) και (2.58), με στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και της απόδοσης. Στην περίπτωση της στατικής φόρτισης οι (2.56) και (2.58) μπορούν να εφαρμοστούν θεωρώντας σταθερές τιμές για τις αυτεπαγωγές  $L_1$  και  $L_2$ , καθώς το όχημα είναι σταθμευμένο πάνω από το φορτιστή. Ωστόσο, στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης οι τιμές των αυτεπαγωγών μεταβάλλονται καθώς αλλάζει διαρκώς η μετατόπιση  $x_i$  μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

Επομένως, μία μέγιστη ισχύς, καθώς και η αντίστοιχη μέγιστη απόδοση του συστήματος, δύναται να επιτευχθεί για την επιλογή των πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$  σε μία συγκεκριμένη μετατόπιση  $x_i = x_C$ , όπου οι αυτεπαγωγές είναι ίσες με  $L_{1_i} = L_{1_C}$  και  $L_{2_i} = L_{2_C}$ :

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_{1_C}} \quad (3.10)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_{2_C}} \quad (3.11)$$

Ωστόσο η κίνηση του οχήματος κατά τη δυναμική φόρτιση επιφέρει συνεχείς αλλαγές στη μετατόπιση  $x_i$ . Επομένως, στις θέσεις όπου  $x_i \neq x_C$ , οι τιμές των αυτεπαγωγών  $L_{1_i}$  και  $L_{2_i}$  δε θα είναι ίσες με  $L_{1_C}$  και  $L_{2_C}$ , αλλά θα δίνονται από τις (3.12) και (3.13).

$$L_{1_i} = L_{1_C} + k_1 L_{1_C} \quad (3.12)$$

$$L_{2_i} = L_{2_C} + k_2 L_{2_C} \quad (3.13)$$

Οι τιμές των  $k_1$  και  $k_2$  εκφράζουν την αύξηση ή μείωση των αυτεπαγωγών  $L_{1_i}$  και  $L_{2_i}$  σε σχέση με τις  $L_{1_C}$  και  $L_{2_C}$ . Φυσικά, όταν η μετατόπιση  $x_i$  είναι ίση με  $x_C$  οι τιμές των  $k_1$  και  $k_2$  γίνονται ίσες με μηδέν.

Για την απλοποίηση των υπολογισμών, και λόγω χρήσης των καλωδίων Litz, οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  στα τυλίγματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες:  $R_1 \approx 0$  και  $R_2 \approx 0$ . Αντικαθιστώντας την (3.13) στην (3.1), και λαμβάνοντας υπόψιν την τιμή του πυκνωτή  $C_2$  που δίνεται από την (3.11), η μεταφερόμενη ισχύς μπορεί να γραφεί ως:

$$P_{out_i} = |\tilde{I}_1|^2 \frac{\omega^2 M_i^2 R_L}{(\omega k_2 L_{2_C})^2 + R_L^2} \quad (3.14)$$

Είναι φανερό ότι η ισχύς εξόδου μπορεί να λάβει τη μέγιστη τιμή της για την περίπτωση όπου η μετατόπιση  $x_i$  είναι ίση με  $x_C$  και η τιμή του  $k_2$  είναι ίση με μηδέν:

$$P_{out\_c} = P_{out\_max} = |\tilde{I}_1|^2 \frac{\omega^2 M_i^2}{R_L} \quad (3.15)$$

Συγκρίνοντας τις (3.14) και (3.15), προκύπτει ότι η ισχύς σε μία θέση μετατόπισης  $x_i$ , σε σχέση με τη μέγιστη επιτεύξιμη ισχύ,  $P_{out\_c}=P_{out\_max}$ , θα είναι:

$$P_{out\_i} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega k_2 L_{2\_i}}{R_L}\right)^2} P_{out\_max} \quad (3.16)$$

Επομένως, η επιλογή της τιμής του πυκνωτή  $C_2$  για μία μετατόπιση  $x_C$  θα έχει ως αποτέλεσμα η μεταφερόμενη ισχύς να λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή της στη θέση αυτή. Ωστόσο, σε οποιαδήποτε άλλη θέση, που εκφράζεται από τη μετατόπιση  $x_i \neq x_C$ , η μεταφερόμενη ισχύς θα είναι μειωμένη σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή κατά ένα ποσοστό μείωσης  $P_{red}$  το οποίο σύμφωνα με την (3.16) θα είναι ίσο με:

$$P_{red} (\%) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega k_2 L_{2\_i}}{R_L}\right)^2} 100 \quad (3.17)$$

Αντίστοιχα, η απόδοση σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, θα προκύπτει αντικαθιστώντας τις (3.12) και (3.13) στην (3.5) και λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές των πυκνωτών όπως δίνονται στις (3.10) και (3.11):

$$eff_i = \frac{\frac{\omega^2 M_i^2 R_L}{(\omega k_2 L_{2\_c})^2 + R_L^2}}{\sqrt{\left[ \frac{\omega^2 M_i^2 R_L}{(\omega k_2 L_{2\_c})^2 + R_L^2} \right]^2 + \left[ \omega k_1 L_{1\_c} - \frac{(\omega k_2 L_{2\_c}) \omega^2 M_i^2}{(\omega k_2 L_{2\_c})^2 + R_L^2} \right]^2}} \quad (3.18)$$

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η θεώρηση μηδενικών αντιστάσεων ( $R_1=0$  και  $R_2=0$ ) οδηγεί στην ταύτιση της απόδοσης με το συντελεστή ισχύος μεταξύ των σημείων A-B στην Εικόνα 3-2. Επομένως, η μέγιστη δυνατή απόδοση, όπως ορίζεται στην (3.18) υποδεικνύει και ένα συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα.

Σαφώς η απόδοση στην (3.18) γίνεται ίση με τη μονάδα όταν  $k_1=0$  και  $k_2=0$ , στη μετατόπιση δηλαδή  $x_C$  όπου οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  έχουν επιλεγεί κατάλληλα, σύμφωνα με τις (3.10) και (3.11). Η απόδοση του συστήματος θα μεταβάλλεται, ωστόσο σε θέσεις μετατόπισης όπου  $x_i \neq x_C$ , καθώς το όχημα κινείται πάνω από το σταθμό.

Πρέπει, επίσης, να επισημανθεί ότι οι (3.14) και (3.18) εκφράζουν τη μεταφερόμενη ισχύ και απόδοση για μία συγκεκριμένη θέση  $x_i$ . Ωστόσο, στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, πρέπει να μελετηθούν όλες οι θέσεις που παίρνει το δευτερεύον πάνω από το πρωτεύον τύλιγμα, λόγω της κίνησης του οχήματος. Είναι, επομένως, χρήσιμο να εκφραστεί η “μέση απόδοση” και η “μέση μεταφερόμενη ισχύς”, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Θεωρώντας ότι το όχημα εισέρχεται πάνω στο φορτιστή με μία μετατόπιση  $x_0$  και εξέρχεται από το φορτιστή με μία μετατόπιση  $x_N$ , και εξετάζοντας μετατοπίσεις  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , που δεν απέχουν σημαντικά μεταξύ τους με  $x_1 - x_0 = x_2 - x_1 = \dots = x_N - x_{N-1}$ , η μέση μεταφερόμενη ισχύς και η μέση απόδοση μπορούν να εκφραστούν σύμφωνα με τις (3.19) και (3.20), αντίστοιχα.

$$P_{out\_avg} = \frac{\sum_{i=0}^N P_{out\_i}}{N} \quad (3.19)$$

$$\text{eff}_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=0}^N \text{eff}_i}{N} \quad (3.20)$$

### ✓ Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

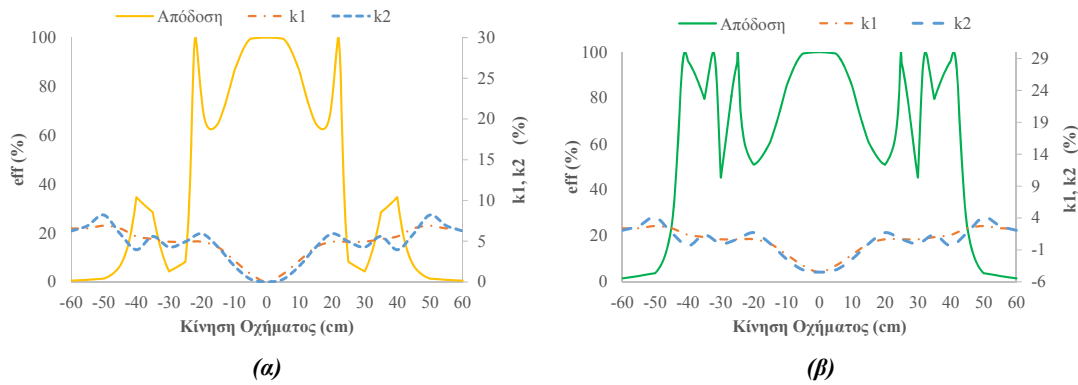
Για τη μελέτη της επίδρασης των μεταβολών στις αυτεπαγωγές κατά τη δυναμική φόρτιση εξετάζεται ο κυκλικός συζεύκτης διαμέτρου 60 εκατοστών που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-31. Το σύστημα λειτουργεί σε ένα διάκενο ίσο με 10 εκατοστά, με ένα σταθερό ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο ίσο με 23A, και μία συχνότητα λειτουργίας ίση με 80kHz, μεταφέροντας ενέργεια σε μία μπαταρία που αντιπροσωπεύεται από ισοδύναμη αντίσταση 5Ω. Ορίζοντας τη μετατόπιση όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-1, το όχημα εισέρχεται στο σταθμό με μία μετατόπιση ίση με -60cm, βρίσκεται ακριβώς πάνω από το σταθμό όταν  $x_i=0\text{cm}$  και εξέρχεται από αυτόν με μία μετατόπιση  $x_i=60\text{cm}$ . Διάφορες περιπτώσεις μετατοπίσεων προσομοιώθηκαν στο πρόγραμμα Ansys, δίνοντας τα αποτελέσματα για τις τιμές των αυτεπαγωγών  $L_1$  και  $L_2$  και της αμοιβαίας επαγωγής  $M$ , που φαίνονται στην Εικόνα 3-3.

Η μέγιστη τιμή της μεταφερόμενης ισχύος σε έναν κυκλικό συζεύκτη παρατηρείται όταν το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτιστή [18] (η μετατόπιση στη θέση αυτή είναι ίση με 0cm). Σε αυτή τη συγκεκριμένη θέση η απόδοση, όπως ορίζεται στην (3.5), μπορεί να γίνει ίση με 100% επιλέγοντας τις τιμές των πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$  σύμφωνα με τις (3.10) και (3.11) για  $x_c=0\text{cm}$ . Ωστόσο, για όλες τις υπόλοιπες θέσεις, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, η απόδοση του συστήματος αναμένεται να δίνεται σύμφωνα με την (3.18). Τα αποτελέσματα στην Εικόνα 3-11-α υποδεικνύουν ότι ακόμα και μικρές μεταβολές των  $k_1$  και  $k_2$  δύναται να εισάγουν σημαντική μείωση στην απόδοση του συστήματος. Για παράδειγμα, όταν η μετατόπιση  $x_i$  είναι ίση με -30cm, οι αυτεπαγωγές  $L_1$  και  $L_2$  μειώνονται μόλις κατά 4,9% και 4,3% αντίστοιχα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για μετατόπιση  $x_c=0\text{cm}$ . Για τη συγκεκριμένη μετατόπιση ( $x_i = -30\text{cm}$ ), ωστόσο, η απόδοση μειώνεται σημαντικά και γίνεται ίση με, μόλις, 6%, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-11-α.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης δεν ενδιαφέρει η απόδοση μόνο σε συγκεκριμένες θέσεις του οχήματος πάνω από το φορτιστή, αλλά πρέπει να εξετασθεί όλο το εύρος της κίνησης. Πιο συγκεκριμένα, όταν οι πυκνωτές αντιστάθμισης επιλέγονται για  $x_c=0\text{cm}$  (Εικόνα 3-11-α) η “μέση απόδοση”, σύμφωνα με την (3.20) είναι ίση με 39,4%. Για μία μετατόπιση ίση με 15cm, η αυτεπαγωγή  $L_1$  μειώνεται μόλις κατά 4,3%. Ωστόσο, η επιλογή του πυκνωτή  $C_1$  σύμφωνα με την (3.10), για τη συγκεκριμένη θέση ( $x_c=15\text{cm}$ ) μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην απόδοση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-11-β. Επίσης, στη συγκεκριμένη περίπτωση η μέση απόδοση αυξάνεται σημαντικά και γίνεται ίση με 59,8%.

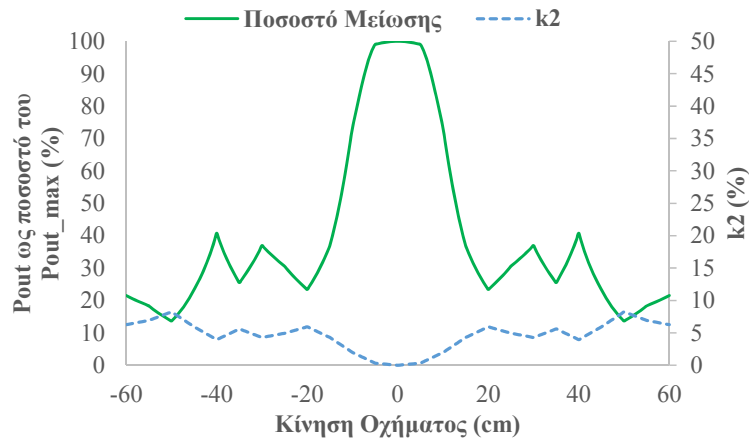
Ανάλογες μεταβολές αναμένονται, επίσης, και στη μεταφερόμενη ισχύ, λόγω της μη σταθερής τιμής της αυτεπαγωγής  $L_2$  και την επιλογή του πυκνωτή  $C_2$ . Για παράδειγμα, για την περίπτωση όπου το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτιστή με μία μετατόπιση 0cm, και επιλέγοντας τον πυκνωτή  $C_2$  σύμφωνα με την (3.11) για τη θέση αυτή ( $x_c=0\text{cm}$ ), η μέγιστη ισχύς που μπορεί να επιτευχθεί ( $P_{\text{out\_max}}$ ) θα λαμβάνεται για τη συγκεκριμένη αυτή θέση, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-12.





Εικόνα 3-11: Απόδοση με την επιλογή του πυκνωτή  $C_1$  για μετατόπιση (α)  $x_c=0\text{cm}$  και (β)  $x_c=15\text{cm}$

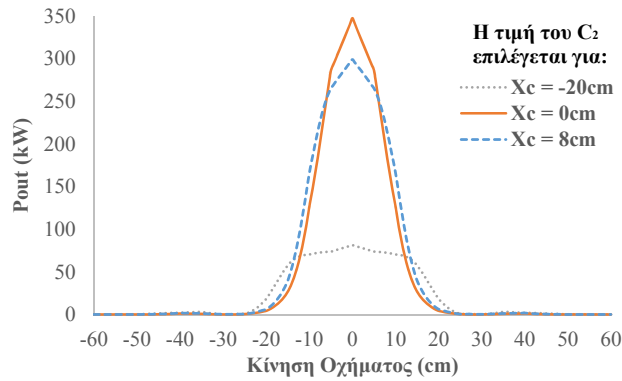
Ωστόσο, αναμένεται μία μείωση της μέγιστης επιτεύξιμης ισχύος,  $P_{out\_max}$ , για οποιαδήποτε άλλη θέση του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Για παράδειγμα, για μία θέση του οχήματος πάνω από το φορτιστή όπου  $x_i = -20\text{cm}$ , σύμφωνα με την Εικόνα 3-12, η αυτεπαγωγή του δευτερεύοντος πηνίου  $L_2$  μειώνεται μόνο κατά 6%, ωστόσο, μία ιδιαίτερα σημαντική μείωση παρατηρείται στη μεταφερόμενη ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη επιτεύξιμη μεταφερόμενη ισχύς,  $P_{out\_max}$ , στη θέση αυτή, σύμφωνα με την (3.15) είναι ίση με 18,35kW και μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας την τιμή του  $C_2$  σύμφωνα με την (3.11) για  $x_c = -20\text{cm}$ . Ωστόσο, η επιλογή της τιμής του  $C_2$  για την περίπτωση όπου το όχημα είναι ακριβώς πάνω από το φορτιστή ( $x_c=0\text{cm}$ ) θα έχει ως αποτέλεσμα η μεταφερόμενη ισχύς να μειωθεί σε 4,29kW ή αλλιώς στο 23,4% της μέγιστης επιτεύξιμης ισχύος, σύμφωνα με την (3.17).



Εικόνα 3-12: Ποσοστό μείωσης,  $P_{red}$ , της ισχύος εξόδου  $P_{outs}$ , σε σύγκριση με τη μέγιστη επιτεύξιμη,  $P_{out\_max}$ , όπως ορίζεται στην (3.17). Τα αποτελέσματα αφορούν στην επιλογή του πυκνωτή  $C_2$  για τη θέση όπου το δευτερεύον είναι ακριβώς πάνω από το πρωτεύον ( $x_c=60\text{cm}$ ).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η επιλογή του πυκνωτή  $C_2$  για μία μετατόπιση  $x_c = -20\text{cm}$  δύναται να αυξήσει σημαντικά τη μεταφερόμενη ισχύ στη θέση αυτή. Ωστόσο, αυτή η επιλογή του πυκνωτή  $C_2$  μειώνει σημαντικά τη μεταφερόμενη ισχύ σε κάθε άλλη θέση κατά την κίνηση του οχήματος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-13. Πιο συγκεκριμένα, η “μέση μεταφερόμενη ισχύς”,  $P_{out\_avg}$ , όπως ορίζεται στην (3.19), μειώνεται από 50,2kW σε 22,45kW με την επιλογή του  $C_2$  για  $x_c=0\text{cm}$  ή  $x_c = -20\text{cm}$  αντίστοιχα.

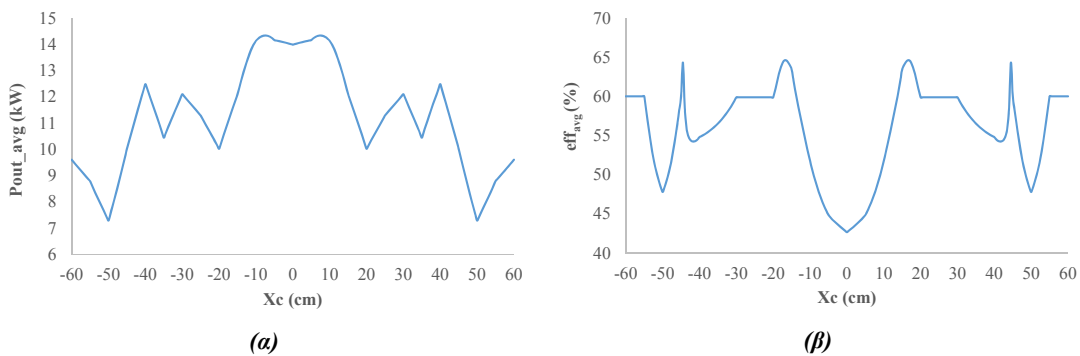
Αντίθετα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-13, αν η τιμή του πυκνωτή  $C_2$  υπολογιστεί σύμφωνα με την (3.11) για  $x_c=8\text{cm}$ , η ισχύς εξόδου για όλες τις θέσεις του οχήματος πάνω από το φορτιστή είναι παρόμοια με την περίπτωση που ο πυκνωτής  $C_2$  επιλεχθεί για  $x_c=0\text{cm}$ . Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, η μέση μεταφερόμενη ισχύς, όπως ορίζεται από την (3.19), αυξάνεται από 50,2kW σε 51,93kW.



Εικόνα 3-13: Ισχύς εξόδου,  $P_{out}$ , καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, επιλέγοντας τον πυκνωτή  $C_2$  για διάφορες τιμές του  $x_c$ .

Η μέση μεταφερόμενη ισχύς, φαίνεται επομένως να εξαρτάται από την επιλογή του πυκνωτή  $C_2$ , σύμφωνα με την (3.19). Ειδικότερα, η μέση μεταφερόμενη ισχύς, λαμβάνοντας υπόψη την επιλογή του  $C_2$  για διαφορετικές, κάθε φορά, θέσεις του οχήματος πάνω από το φορτιστή, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-14-α. Είναι φανερό ότι η μέση μεταφερόμενη ισχύς μεγιστοποιείται για  $x_c = -6.5\text{cm}$  ή  $x_c = 6.5\text{cm}$ . Τα δύο σημεία μεγιστοποίησης της μέσης μεταφερόμενης ισχύος υποδεικνύουν την ίδια τιμή για την αυτεπαγωγή  $L_2$  σε αυτές τις θέσεις, λόγω της συμμετρίας του κυκλικού συζεύκτη (Εικόνα 2-31) που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε. Η τιμή αυτής της  $L_2$  οδηγεί στην επιλογή ενός πυκνωτή συντονισμού  $C_2$ , ίσου με  $131.3\mu\text{F}$ , σύμφωνα με την (3.11), ώστε να επιτευχθεί μία μέση μεταφερόμενη ισχύς ίση με  $52,62\text{kW}$ . Επομένως, η κατάλληλη επιλογή του πυκνωτή συντονισμού  $C_2$  λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές της αυτεπαγωγής του δευτερεύοντος πηνίου δύναται να αυξήσει τη μέση ισχύ που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος, καθώς αυτό διέρχεται πάνω από το φορτιστή.

Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή μία αυξημένη απόδοση, παράλληλα με μία αυξημένη μέση μεταφερόμενη ισχύ, θα πρέπει να μελετηθεί η “μέση απόδοση”,  $eff_{avg}$ , όπως ορίζεται στην (3.20). Επιλέγοντας την τιμή του  $C_2$  ίση με  $131.3\mu\text{F}$  με στόχο τη μεγιστοποίηση της μέσης μεταφερόμενης ισχύος, όπως περιγράφηκε προηγουμένως, η μέση απόδοση,  $eff_{avg}$ , λαμβάνοντας υπόψη την επιλογή του  $C_1$  για όλες τις πιθανές τιμές του  $x_c$ , απεικονίζεται στην Εικόνα 3-14-β. Είναι φανερό στην Εικόνα 3-14-β ότι η μέση απόδοση μπορεί να λάβει τη μέγιστη τιμή της όταν ο πυκνωτής  $C_1$  επιλέγεται για μία μετατόπιση  $x_c = -16,5\text{cm}$  ή  $x_c = 16,5\text{cm}$ . Στις θέσεις αυτές η τιμή της αυτεπαγωγής  $L_1$  είναι ίση με  $291\mu\text{H}$  (ίδια και για τις δύο θέσεις, λόγω συμμετρίας του κυκλικού συζεύκτη στην Εικόνα 2-31), οδηγώντας στην επιλογή ενός πυκνωτή  $C_1$  ίσου με  $136\mu\text{F}$ , σύμφωνα με την (3.10).



Εικόνα 3-14: (α) Μέση ισχύς εξόδου,  $P_{out\_avg}$ , λαμβάνοντας υπόψη την επιλογή του  $C_2$  για όλες τις πιθανές τιμές του  $x_c$  & (β) Μέση απόδοση,  $eff_{avg}$ , λαμβάνοντας υπόψη την επιλογή του  $C_1$  για όλες τις πιθανές τιμές του  $x_c$ .

Είναι, επομένως, φανερό ότι οι μεταβολές των αυτεπαγωγών δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες στη δυναμική επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, θεώρηση σχεδόν μηδενικών μεταβολών στις αυτεπαγωγές  $L_1$  και  $L_2$ , όπως συνήθως γίνεται στη βιβλιογραφία [51],[67],[68] και επιλογή των πυκνωτών αντιστάθμισης λαμβάνοντας υπόψιν τη θέση όπου το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το σταθμό ( $x_c=0\text{cm}$ ), θα οδηγούσε σε μία μέση απόδοση 39,4% και μία μέση μεταφερόμενη ισχύ ίση με 50,2kW. Ωστόσο, η επιλογή των πυκνωτών αντιστάθμισης σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως, υποδεικνύει ότι ο πυκνωτής  $C_2$  μπορεί να επιλεγεί για τη θέση  $x_c = -6,5\text{cm}$  ή  $x_c = 6,5\text{cm}$ , ενώ ο πυκνωτής  $C_1$  μπορεί να επιλεγεί για τη θέση  $x_c = -16,5\text{cm}$  ή  $x_c = 16,5\text{cm}$ . Οι τιμές αυτές των πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$  θα οδηγήσουν σε μία μέση μεταφερόμενη ισχύ αυξημένη κατά 5% και μία μέση απόδοση σημαντικά αυξημένη κατά 64%.

### 3.5 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης κατά τη δυναμική λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα, οι βασικές αρχές λειτουργίας σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης κατά τη διάρκεια που το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή, είναι παρόμοιες με αυτές που διέπουν τη λειτουργία του συστήματος κατά τη στατική φόρτιση. Ωστόσο, στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλες οι θέσεις μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Το γεγονός αυτό επιβάλλει τη μελέτη του συστήματος εξετάζοντας τη μεταβολή των τιμών των επαγωγών κατά τη διάρκεια της κίνησης, εισάγοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις στο ισοδύναμο κύκλωμα για τη μελέτη του συστήματος.

Το φαινόμενο της διακλάδωσης παρατηρείται και στη δυναμική επαγωγική φόρτιση, με τη μεγιστοποίηση της απόδοσης να παρατηρείται σε συχνότητες διαφορετικές από αυτές που μεγιστοποιούν τη μεταφερόμενη ισχύ. Ωστόσο, στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης είναι σημαντικό να εξετασθεί όχι μόνο η επίδραση της συχνότητας, αλλά και η επίδραση της κίνησης του οχήματος στη μεταφερόμενη ισχύ και την απόδοση του συστήματος. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε υποδεικνύουν ότι εφαρμογές δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων δεν πρέπει να θεωρούν μία προσέγγιση σχετικά με το φαινόμενο της διακλάδωσης, η οποία περιορίζεται στη διερεύνηση αποκλειστικά της συχνότητας λειτουργίας, παρόμοια με τη στατική φόρτιση. Αντίθετα, μία μελέτη παρόμοια με αυτή που πραγματοποιείται στην ενότητα 3.3 θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν, ώστε να εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας ως προς την κίνηση του οχήματος, εξασφαλίζοντας ότι μία επαρκής τιμή μεταφερόμενης ισχύος εξασφαλίζεται παράλληλα με μία υψηλή απόδοση.

Μελετήθηκε, επίσης, η επίδραση των μεταβολών των αυτεπαγωγών των τυλιγμάτων στην απόδοση και τη μεταφερόμενη ισχύ κατά τη δυναμική επαγωγική φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, οι πυκνωτές αντιστάθμισης στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, αντίθετα με εφαρμογές στατικής φόρτισης, θα πρέπει να επιλέγονται μελετώντας τις μεταβολές των αυτεπαγωγών καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Επιπλέον, η προσομοίωση και μελέτη ενός κυκλικού συζεύκτη υπέδειξε ότι ακόμα και μικρές μεταβολές στις τιμές των αυτεπαγωγών δύναται να εισάγουν ιδιαίτερα μεγάλες μεταβολές στη μεταφερόμενη ισχύ αλλά και την απόδοση του συστήματος, ανάλογα με τον τρόπο επιλογής των τιμών των στοιχείων αντιστάθμισης. Επίσης, τα αποτελέσματα της ανάλυσης υποδεικνύουν ότι τόσο η μέση απόδοση όσο και η μέση μεταφερόμενη ισχύς πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την κίνηση του οχήματος. Επομένως, μία μελέτη παρόμοια με αυτή που παρουσιάζεται στην ενότητα 3.4

πρέπει να πραγματοποιείται σε εφαρμογές δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, με στόχο την κατάλληλη επιλογή των πυκνωτών αντιστάθμισης, σύμφωνα με τις μεταβολές των αυτεπαγωγών των τυλιγμάτων, ώστε να επιτευχθεί μία αυξημένη μεταφερόμενη ισχύς διατηρώντας, παράλληλα, μία αυξημένη απόδοση λειτουργίας.

## Κεφάλαιο 4

### Βελτιστοποίηση στη Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση

#### Ηλεκτρικών Οχημάτων

##### 4.1 Εισαγωγή

Η δυναμική επαγωγική φόρτιση φαίνεται να είναι μία ιδανική λύση για την αύξηση της περιορισμένης αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων, επιτρέποντας τη μεταφορά ενέργειας καθώς το όχημα κινείται. Ωστόσο, οι περιορισμοί που παρατηρούνται σε σχέση με τη στατική φόρτιση δεν επιτρέπουν την εύκολη εφαρμογή συστημάτων δυναμικής επαγωγικής φόρτισης σε περιπτώσεις όπου το όχημα κινείται με μεγάλη ταχύτητα πάνω από το φορτιστή. Ειδικότερα, οι μεταβολές της μεταφερόμενης ισχύος και της απόδοσης κατά τη διάρκεια της κίνησης εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως υποδεικνύει το φαινόμενο διακλάδωσης στη δυναμική επαγωγική φόρτιση. Επιπλέον, οι μεταβολές των τιμών των αυτεπαγωγών καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή επιβάλλουν την προσεκτική επιλογή των τιμών των στοιχείων αντιστάθμισης, ώστε να εξασφαλισθεί αυξημένη μεταφερόμενη ισχύ και απόδοση.

Μία λύση, ώστε να ληφθούν υπόψιν οι μεταβολές στη μεταφερόμενη ισχύ και την απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης είναι η βελτιστοποίηση των μεταβλητών που σχετίζονται με την ηλεκτρική λειτουργία ενός συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης (στοιχεία αντιστάθμισης, συχνότητα λειτουργίας και αντίσταση φορτίου). Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία βελτιστοποίησης των μεταβλητών αυτών, λαμβάνοντας, παράλληλα, υπόψιν περιορισμούς που σχετίζονται με τις συνθήκες λειτουργίας που επικρατούν στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, κατά τη δυναμική φόρτιση. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι ο ορισμός της περιοχής λειτουργίας όπου η μεταφερόμενη στο όχημα ενέργεια μεγιστοποιείται επιτυγχάνοντας παράλληλα μία ιδιαίτερα υψηλή απόδοση συστήματος.

Οι τιμές που εξάγονται επιλύοντας το αντίστοιχο πρόβλημα βελτιστοποίησης υλοποιούνται στην πλευρά του δευτερεύοντος με την ανάπτυξη του κατάλληλου ελέγχου. Προτείνεται, επίσης, ο κατάλληλος έλεγχος που πρέπει να εφαρμοσθεί στην πλευρά του πρωτεύοντος για την υλοποίηση της προτεινόμενης μεθόδου. Ειδικότερα, ο προτεινόμενος έλεγχος δεν απαιτεί επιπλέον μηχανολογικό εξοπλισμό (αισθητήρες κλπ.) για την ανίχνευση της θέσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή, μειώνοντας σημαντικά το κόστος κατασκευής. Παράλληλα η προτεινόμενη μέθοδος ανίχνευσης του οχήματος επιλύει αποτελεσματικά προβληματισμούς που εντοπίζονται σε ανάλογες μεθόδους στη βιβλιογραφία σχετικά με την απόδοση του συστήματος.

Η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης, καθώς και ο ανάλογος έλεγχος για την υλοποίηση της σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, δεν απαιτεί τη συνεχή μεταφορά σημάτων πληροφοριών μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, επιτρέποντας τη λειτουργία του συστήματος ακόμα και όταν το όχημα κινείται με ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες πάνω από το φορτιστή. Ωστόσο, η έλλειψη εξοπλισμού ανίχνευσης και απαιτήσεων επικοινωνίας μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, απαιτεί τη λειτουργία του σταθμού φόρτισης σε μία περιοχή χαμηλής απόδοσης κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος. Στην

περίπτωση αυτή, μεταβολές στο ρεύμα του πρωτεύοντος μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά, με στόχο τη μείωση των ενεργειακών απωλειών.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι ιδιαίτερα αυξημένα ΗΜ πεδία αναμένονται σε ορισμένες θέσεις του οχήματος πάνω από το φορτιστή κατά τη δυναμική φόρτιση, σε περίπτωση που ο σταθμός τροφοδοτείται με το μέγιστο δυνατό ρεύμα στα τυλίγματα του πρωτεύοντος. Ωστόσο, η προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου δύναται να περιορίσει σημαντικά τα ΗΜ πεδία που αναπτύσσονται σε αυτές τις περιπτώσεις.

Η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης εφαρμόζεται σε έναν κυκλικό συζεύκτη διαμέτρου 60 εκατοστών, ο οποίος σχεδιάστηκε στο υπολογιστικό πρόγραμμα ANSYS, ώστε να εξαχθούν οι βέλτιστες τιμές της αντίστασης φορτίου, των στοιχείων αντιστάθμισης στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, καθώς και της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος. Η σωστή λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου επιβεβαιώνεται με την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή.

## 4.2 Διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Η τοπολογία αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε εφαρμογές στατικής [49], [57] αλλά και δυναμικής επαγωγικής φόρτισης [30],[51],[60]. Επιπλέον, στην αναφορά [57] παρατηρείται ότι, στην περίπτωση που το ρεύμα πρωτεύοντος παραμένει σε ελέγξιμες χαμηλές τιμές, οι απώλειες του DC/AC αντιστροφέα που χρησιμοποιείται στη διάταξη κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα. Παρόμοια με τη μέθοδο που περιγράφεται στην αναφορά [57], η προτεινόμενη μέθοδος για τη λειτουργία του συστήματος, όπως θα περιγραφεί αναλυτικότερα στη συνέχεια αυτού του Κεφαλαίου, αποφεύγει την ανάπτυξη ιδιαίτερα μεγάλων ρευμάτων στο πρωτεύον πηνίο. Η τοπολογία αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά επιλέγεται, επομένως, για την εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό. Μία LCL τοπολογία αντιστάθμισης ή κάποια άλλη βασική τοπολογία αντιστάθμισης (Σειρά-Παράλληλα, Παράλληλα-Παράλληλα κλπ.) θα μπορούσε, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης, απαιτώντας, ωστόσο, διαφορετικούς περιορισμούς στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Όπως περιγράφηκε και στην υποενότητα 3.1, σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλες οι θέσεις του οχήματος πάνω από το φορτιστή, εισάγοντας τις αυτεπαγωγές  $L_{1_i}$ ,  $L_{2_i}$ , και  $M_i$  στο ισοδύναμο κύκλωμα, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-2. Οι εκφράσεις, για τη μεταφερόμενη ισχύ,  $P_{out}$ , και την ενεργό και άεργο ισχύ εισόδου,  $P_{in}$  και  $Q_{in}$  αντίστοιχα, για μία δεδομένη θέση  $x_i$  του οχήματος πάνω από το φορτιστή, θα δίνονται, σύμφωνα με τις (3.1)-(3.3). Η απόδοση του συστήματος,  $eff_i$ , δύναται να εκφραστεί σύμφωνα με την (3.5). Οι απώλειες ενεργού ισχύος στο σύστημα που απεικονίζεται στην Εικόνα 3-2 θα εντοπίζονται στις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  των τυλιγμάτων του μαγνητικού συζεύκτη ( $P_{losses,R_1}$  και  $P_{losses,R_2}$  αντίστοιχα). Επομένως, σύμφωνα με την (3.5) η απόδοση μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned}
 eff_i &= \frac{P_{out_i}}{\sqrt{P_{in_i}^2 + Q_{in_i}^2}} = \frac{P_{in_i} - (P_{losses,R_1} + P_{losses,R_2})}{\sqrt{P_{in_i}^2 + Q_{in_i}^2}} \\
 &= \frac{P_{in_i}}{\sqrt{P_{in_i}^2 + Q_{in_i}^2}} - \frac{(P_{losses,R_1} + P_{losses,R_2})}{\sqrt{P_{in_i}^2 + Q_{in_i}^2}} \quad (4.1)
 \end{aligned}$$

Η προσπάθεια, επομένως, επίτευξης μίας μεγάλης τιμής για την  $eff_i$  όπως εκφράζεται στην (4.1), επιτρέπει να ληφθεί υπόψιν η προσπάθεια αύξησης της τιμής του συντελεστή ισχύος στην (3.4) (περιορίζοντας την άεργο ισχύ στην είσοδο του συστήματος), αλλά και ο περιορισμός των ωμικών απωλειών στα τυλίγματα των πηνίων.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος αντίστοιχα, στις εκφράσεις (3.1)-(3.3) & (3.5). εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας,  $f$ , όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.1.2. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις (2.17) και (2.18), οι AC αντιστάσεις των  $R_1$  και  $R_2$  θα δίνονται από την (4.2), και υποδεικνύουν τις αναμενόμενες απώλειες χαλκού στα πηνία των τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

$$R_{AC} = R_{DC} \left( H_s + K_s \left( \frac{N_s D_l}{D_0} \right)^2 \right) \left( \frac{D_l \sqrt{f}}{10.44} \right)^4 \quad (4.2)$$

Επιπλέον απώλειες θα σχετίζονται με τη μαγνητική απόδοση του συστήματος που περιλαμβάνει τις απώλειες φερρίτη και τις απώλειες λόγω δινορρευμάτων. Οι απώλειες αυτές αναμένεται να μεταβάλλονται καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή και ανάλογα με τη μαγνητική τοπολογία που επιλέγεται, σύμφωνα με την αναφορά [115]. Μέθοδοι για την αύξηση της μαγνητικής απόδοσης έχουν προταθεί στην αναφορά [115] και μπορούν να εφαρμοσθούν κατά τη σχεδίαση του μαγνητικού συζεύκτη. Ωστόσο, η μαγνητική σχεδίαση και η μαγνητική απόδοση δεν είναι εντός του πεδίου μελέτης και εξέτασης του συγκεκριμένου κεφαλαίου.

Στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ορισθεί, όχι μόνο η μεταφερόμενη ισχύς, όπως εκφράζεται στην (3.1), αλλά και η μεταφερόμενη ενέργεια στην μπαταρία του οχήματος καθώς αυτό κινείται πάνω από το φορτιστή. Θεωρώντας δύο σημεία μετατόπισης  $x_1$  και  $x_2$  που αντιπροσωπεύονται από τιμές επαγωγών  $\{L_{1_1}, L_{2_1}, M_1\}$  και  $\{L_{1_2}, L_{2_2}, M_2\}$ , η μεταφερόμενη ισχύς σε κάθε σημείο μετατόπισης θα δίνεται από την (3.1) και θα είναι ίση με  $P_{out_1}$  και  $P_{out_2}$ , για κάθε σημείο μετατόπισης αντίστοιχα. Εάν η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων είναι αρκούντως μικρή με τη μεταφερόμενη ισχύ να θεωρείται ότι μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των δύο σημείων, θα ισχύει:

$$P_{out_i}(x_i) = q_1 x_i + q_2, \quad x_1 \leq x_i \leq x_2 \quad (4.3)$$

με τις τιμές των  $q_1$  και  $q_2$  στην (4.3) να δίνονται από τις (4.4) και (4.5).

$$q_1 = \frac{P_{out_2} - P_{out_1}}{x_2 - x_1} \quad (4.4)$$

$$q_2 = \frac{P_{out_1} x_2 - P_{out_2} x_1}{x_2 - x_1} \quad (4.5)$$

Θεωρώντας ότι το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή με μία σταθερή ταχύτητα  $v$ , τότε η μετατόπιση θα είναι ίση με:

$$x_i = vt_i \quad (4.6)$$

Αν το όχημα εισέρχεται πάνω από το φορτιστή τη χρονική στιγμή  $t_0=0$ , τότε η χρονική στιγμή  $t_i$  υποδεικνύει τη στιγμή που η μετατόπιση είναι ίση με  $x_i$ .

Σύμφωνα με τις (4.3) και (4.6), η μεταφερόμενη ισχύς κάθε χρονική στιγμή θα είναι ίση με:

$$P_{out_i}(t_i) = q_1 vt_i + q_2, \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (4.7)$$

Επομένως, η ενέργεια που θα μεταφέρεται στο όχημα θα είναι:

$$E_{1 \rightarrow 2} = \int_{t_1}^{t_2} P_{out\_i} dt = \int_{t_1}^{t_2} (q_1 vt + q_2) dt \quad (4.8)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των  $q_1$  και  $q_2$  στην (4.8) προκύπτει:

$$\begin{aligned} E_{1 \rightarrow 2} &= \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{P_{out_2} - P_{out_1}}{x_2 - x_1} vt + \frac{P_{out_1}x_2 - P_{out_2}x_1}{x_2 - x_1} \right) dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{P_{out_2} - P_{out_1}}{x_2 - x_1} vt \right) dt + \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{P_{out_1}x_2 - P_{out_2}x_1}{x_2 - x_1} \right) dt \\ &= \frac{P_{out_2} - P_{out_1}}{x_2 - x_1} v \int_{t_1}^{t_2} t dt + \left( \frac{P_{out_1}x_2 - P_{out_2}x_1}{x_2 - x_1} \right) \int_{t_1}^{t_2} dt \\ &= \frac{P_{out_2} - P_{out_1}}{x_2 - x_1} v [t^2]_{t_1}^{t_2} + \left( \frac{P_{out_1}x_2 - P_{out_2}x_1}{x_2 - x_1} \right) [t]_{t_1}^{t_2} \\ &= \frac{P_{out_2} - P_{out_1}}{x_2 - x_1} v \frac{1}{2} (t_2^2 - t_1^2) + \left( \frac{P_{out_1}x_2 - P_{out_2}x_1}{x_2 - x_1} \right) (t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Όμως, σύμφωνα με την (4.6):

$$t_1 = \frac{x_1}{v} \quad (4.10)$$

και

$$t_2 = \frac{x_2}{v} \quad (4.11)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας τις (4.10) και (4.11) στην (4.9), προκύπτει:

$$\begin{aligned} E_{1 \rightarrow 2} &= \frac{1}{2} \frac{P_{out_2} - P_{out_1}}{x_2 - x_1} v \left( \frac{x_2^2 - x_1^2}{v^2} \right) + \left( \frac{P_{out_1}x_2 - P_{out_2}x_1}{x_2 - x_1} \right) \left( \frac{x_2 - x_1}{v} \right) \\ &= \frac{1}{v} \left[ \frac{(P_{out_2} - P_{out_1})(x_2 + x_1)}{2} + P_{out_1}x_2 - P_{out_2}x_1 \right] \\ &= \frac{1}{2v} [P_{out_2}x_2 + P_{out_2}x_1 - P_{out_1}x_2 - P_{out_1}x_1 + 2P_{out_1}x_2 \\ &\quad - 2P_{out_2}x_1] = \frac{1}{2v} [P_{out_2}x_2 - P_{out_2}x_1 + P_{out_1}x_2 - P_{out_1}x_1] \\ &= \frac{1}{2v} [P_{out_2}x_2 - P_{out_2}x_1 + P_{out_1}x_2 - P_{out_1}x_1] \\ &= \frac{1}{2} \frac{x_2 - x_1}{v} (P_{out_2} + P_{out_1}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Η συνολική ενέργεια, επομένως, που μεταφέρεται στο όχημα, λαμβάνοντας υπόψιν μετατοπίσεις  $x_1, x_2, \dots, x_N$  θα είναι ίση με

$$E_{total} = \sum_{i=0}^{N-1} E_{i \rightarrow i+1} \quad (4.13)$$

Έστω ότι το όχημα εισέρχεται πάνω από το φορτιστή με μία μετατόπιση  $x_0$  και εξέρχεται από το φορτιστή με μία μετατόπιση  $x_N$ . Θεωρώντας ότι  $x_1 - x_0 = x_2 - x_1 = \dots = x_N - x_{N-1} = \Delta x$ , τότε η (4.13), λαμβάνοντας υπόψιν την (4.12), μπορεί να γραφεί ως:

$$E_{total} = \frac{1}{2} \frac{\Delta x}{v} \sum_{i=0}^{N-1} (P_{out\_i} + P_{out\_i+1}) = \frac{\Delta x}{v} \left[ \left( \sum_{i=0}^N P_{out\_i} \right) - \frac{P_{out\_0} + P_{out\_N}}{2} \right] \quad (4.14)$$

όπου οι τιμές των  $P_{out\_i} \dots P_{out\_N}$  δίνονται από την (3.1) για  $i=1 \dots N$ .



Οι εξισώσεις (3.5) και (4.14) υποδεικνύουν ότι η απόδοση ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης, αλλά και η ενέργεια που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος, επηρεάζονται από ένα σύνολο μεταβλητών. Επίσης, ένα σύνολο πολλαπλών σημείων μετατόπισης θα πρέπει να εξετασθούν καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Παρουσιάζεται, επομένως, η ανάγκη επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με στόχο τη μεγιστοποίηση της ενέργειας που μεταφέρεται στο όχημα, διατηρώντας, παράλληλα, μία αρκετά υψηλή απόδοση του συστήματος.

Ειδικότερα, σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.5) και (4.14), μία μεταβλητή που επηρεάζει τόσο την απόδοση, όσο και τη μεταφερόμενη ενέργεια είναι η γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  του συστήματος και, επομένως, η συχνότητα  $f$ , καθώς:

$$\omega = 2\pi f \quad (4.15)$$

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης στοχεύει στην εύρεση μίας βέλτιστης τιμής της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος. Το σύστημα σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί στη σταθερή αυτή συχνότητα καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Θεωρώντας μία ελάχιστη ( $f_{min}$ ) και μία μέγιστη ( $f_{max}$ ) συχνότητα, τότε η γωνιακή συχνότητα θα περιορίζεται μεταξύ  $\omega_{min}$  και  $\omega_{max}$ , όπου:

$$\omega_{min} = 2\pi f_{min} \quad (4.16)$$

$$\omega_{max} = 2\pi f_{max} \quad (4.17)$$

Επιπλέον, οι τιμές των πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$  επηρεάζουν τόσο την απόδοση, όσο και τη μεταφερόμενη ενέργεια, όπως είναι φανερό στις (3.5) και (4.14). Στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης, οι τιμές των πυκνωτών επιλέγονται συνήθως με στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος και την επίτευξη ενός μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην πλευρά του πρωτεύοντος. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά, και για μία συγκεκριμένη μετατόπιση  $x_i$ , ο πυκνωτής  $C_2$  μπορεί να υπολογισθεί σύμφωνα με την (4.18), με στόχο την αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος στην (3.1). Η επίτευξη ενός μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην είσοδο του κυκλώματος στην Εικόνα 3-2 επιβάλλει την επιδίωξη μηδενικής αέργου ισχύος στην (3.3), και, επομένως, τον υπολογισμό της τιμής του πυκνωτή αντιστάθμισης  $C_1$  σύμφωνα με την (4.19).

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_{2,i}} \quad (4.18)$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_{1,i}} \quad (4.19)$$

Στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης μία δεδομένη σταθερή μετατόπιση μπορεί να θεωρηθεί για τη λειτουργία του συστήματος, οδηγώντας σε συγκεκριμένες τιμές των  $C_1$  και  $C_2$ , σύμφωνα με τις (4.18) και (4.19). Στην περίπτωση, ωστόσο, της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, μία μη σωστή επιλογή των  $C_1$  και  $C_2$  δύναται να οδηγήσει σε πολύ μικρές τιμές της απόδοσης όπως περιγράφηκε πιο αναλυτικά στην ενότητα 3.4. Όπως περιγράφηκε, επίσης, στην ενότητα 3.4 όλη η κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή θα πρέπει να εξετασθεί, υποδεικνύοντας ένα σύνολο πιθανών τιμών για τους πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$ , οι οποίες θα μεταβάλλονται μεταξύ  $\{C_{1,min} - C_{1,max}\}$  and  $\{C_{2,min} - C_{2,max}\}$ , όπου:

$$C_{j,min} = \frac{1}{\omega_{max}^2 L_{j,max}} \quad (4.20)$$

$$C_{j,max} = \frac{1}{\omega_{min}^2 L_{j,min}} \quad (4.21)$$

όπου η μεταβλητή  $j$  υποδεικνύει την πλευρά του πρωτεύοντος – 1, ή του δευτερεύοντος – 2.

Ένας τρόπος για την εύρεση κατάλληλων τιμών των πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$  υποδείχθηκε στην ενότητα 3.4. Ωστόσο στην ενότητα αυτή εξετάστηκαν μόνο οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν και οι τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών που επηρεάζουν την απόδοση και τη μεταφερόμενη ισχύ ή ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα βελτιστοποίησης πρέπει να λαμβάνει υπόψιν και το φορτίο της μπαταρίας που αντιπροσωπεύεται από την αντίσταση  $R_L$  στην Εικόνα 3-2, καθώς η μεταβλητή αυτή επηρεάζει τόσο την απόδοση όσο και τη μεταφερόμενη ενέργεια όπως φαίνεται στις (3.5) και (4.14) αντίστοιχα. Επομένως, η διαδικασία βελτιστοποίησης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν και την εύρεση της βέλτιστης τιμής της  $R_L$  που επιτυγχάνει αυξημένη μεταφορά ενέργειας σε υψηλή απόδοση. Η μέγιστη τιμή της αντίστασης  $R_L$  σχετίζεται με τον έλεγχο που εφαρμόζεται στην πλευρά του δευτερεύοντος και θα ορισθεί περαιτέρω στην ενότητα 4.3.

Απαιτείται, επομένως, η επίλυση του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης:

#### Αντικειμενική Συνάρτηση:

$$E_{total} = \frac{\Delta x}{v} \left[ \left( \sum_{i=0}^N P_{out,i} \right) - \frac{P_{out,0} + P_{out,N}}{2} \right] = max \quad (4.22)$$

#### Περιορισμοί:

$$eff_i \geq eff_{target} \quad \forall i \quad (4.23)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{min} \\ C_{1,min} \\ C_{2,min} \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \omega \\ C_1 \\ C_2 \\ R_L \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \omega_{max} \\ C_{1,max} \\ C_{2,max} \\ R_{L,max} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

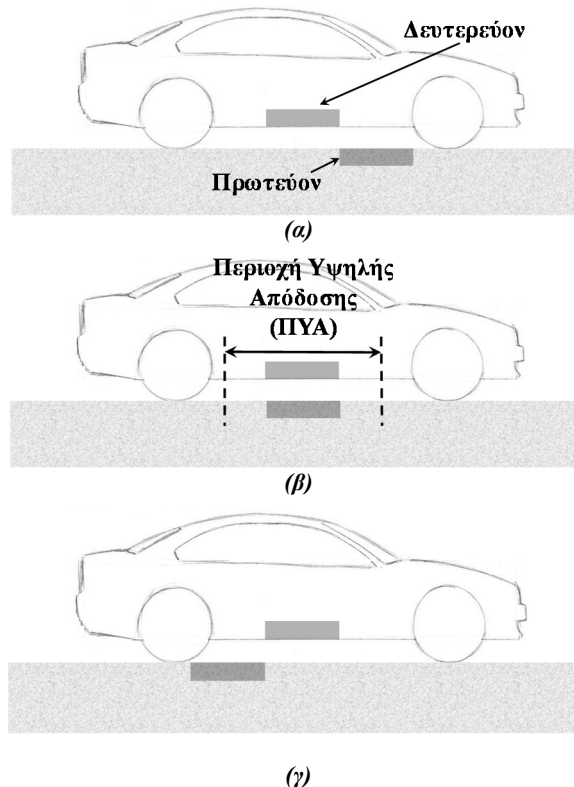
Πιο συγκεκριμένα, απαιτείται η μεγιστοποίηση της ενέργειας που μεταφέρεται στην μπαταρία του οχήματος στην (4.22), ενώ οι μεταβλητές  $\{\omega, R_L, C_1, C_2\}$  περιορίζονται εντός φυσικών ορίων, όπως φαίνεται στην (4.24). Πρέπει, επίσης, να τονισθεί ότι εκτός από τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική και η επίτευξη μίας υψηλής απόδοσης. Για το λόγο αυτό εισάγεται ο περιορισμός (4.23) στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που έχει στόχο τη διατήρηση της απόδοσης  $eff_i$  σε μία υψηλή τιμή για όλες τις περιπτώσεις μετατόπισης  $x_i$ .

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης δεν είναι δυνατή για πολύ μεγάλες τιμές της  $eff_{target}$ , σε περίπτωση που εξετάζεται όλο το εύρος κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Πρέπει, επομένως, να ορισθεί μία Περιοχή Υψηλής Απόδοσης (ΠΥΑ), όπου υψηλά ποσά ενέργειας δύναται να μεταφερθούν στο όχημα με την απόδοση του συστήματος να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, ενώ, ταυτόχρονα, εξασφαλίζεται η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Η μέγιστη ισχύς στα περισσότερα συστήματα επαγωγικής φόρτισης παρατηρείται όταν το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το φορτιστή [18], όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-1-β. Αντίθετα, η μεταφερόμενη στο όχημα ισχύς όταν αυτό εισέρχεται (Εικόνα 4-1-α) ή εξέρχεται (Εικόνα 4-1-γ) από το σταθμό φόρτισης είναι σχεδόν μηδενική. Επομένως, μία Περιοχή Υψηλής Απόδοσης (ΠΥΑ) δύναται να ορισθεί για μικρές μετατοπίσεις ως προς τη θέση που απεικονίζεται στην Εικόνα 4-1-β. Αντίθετα, δύο Περιοχές Χαμηλής Απόδοσης (ΠΧΑ) μπορούν να διακριθούν όταν το όχημα προσεγγίζει το σταθμό ή εξέρχεται από αυτόν (Εικόνα 4-1-α και Εικόνα 4-1-γ). Δεδομένου ότι το όχημα εισέρχεται και εξέρχεται από την ΠΥΑ με μία μετατόπιση  $x_{enter}$  και  $x_{leave}$ , αντίστοιχα:

$$ΠΥΑ = x_{leave} - x_{enter} \quad (4.25)$$

Η έκφραση της ΠΥΑ στην (4.25) θεωρεί ως περιοχή ένα τμήμα κατά την κατεύθυνση της κίνησης του οχήματος, επομένως η ΠΥΑ εκφράζεται σε μέτρα.



*Εικόνα 4-1: Θέση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το σταθμό: (α) το όχημα εισέρχεται στο σταθμό – ΠΧΑ, (β) Το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το σταθμό - ΠΥΑ, (γ) Το όχημα εξέρχεται από το σταθμό – ΠΧΑ.*

Ένας μηχανισμός τοποθέτησης, όπως περιγράφεται στην ενότητα 1.5, αναμένεται να χρησιμοποιηθεί με στόχο να εξασφαλισθεί ότι το όχημα τοποθετείται με τον κατάλληλο τρόπο (κάθετα και οριζόντια) πάνω από το σταθμό. Μία ανοχή, ωστόσο, σε μετατοπίσεις δύναται να ορισθεί εξετάζοντας διάφορες περιπτώσεις κάθετης και/ή οριζόντιας μετατόπισης και εφαρμόζοντας την προτεινόμενη μέθοδο βελτιστοποίησης, ώστε να υπολογισθεί η κατάλληλη τιμή της συχνότητας, των πυκνωτών αντιστάθμισής και της αντίστασης φορτίου που εξασφαλίζουν μία μεγάλη μεταφορά ενέργειας με μία ταυτόχρονα υψηλή απόδοση για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση.

### 4.3 Σύστημα ελέγχου για την εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης βελτιστοποίησης

Αν και η μέγιστη ενέργεια μεταφέρεται στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, η λειτουργία στις δύο περιοχές Χαμηλής Απόδοσης (Εικόνα 4-1-α και Εικόνα 4-1-γ) θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν, με στόχο την αύξηση της συνολικής απόδοσης καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Ένας απλός τρόπος για να αποφευχθεί η λειτουργία στις περιοχές αυτές είναι η λειτουργία μόνο πάνω από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, μην επιτρέποντας την παροχή ενέργειας όταν το όχημα βρίσκεται στις Περιοχές Χαμηλής Απόδοσης. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας, ωστόσο, απαιτεί την εισαγωγή μηχανισμών ανίχνευσης της θέσης του οχήματος (π.χ. αισθητήρων), ώστε να προσδιορίζεται η ακριβής θέση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος που υποδεικνύει την είσοδο και την έξοδο από κάθε Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης, γεγονός που θα αύξανε το κόστος κατασκευής του συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης.

Εναλλακτικά, η απόδοση του συστήματος  $eff_i = S_{out,i}/S_{in,i}$  θα μπορούσε να υπολογίζεται κάθε χρονική στιγμή, υποδεικνύοντας την είσοδο ή την έξοδο από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης. Για τον υπολογισμό αυτό, η τιμή της μεταφερόμενης ισχύος στην πλευρά του δευτερεύοντος, θα μπορούσε να μεταδίδεται ασύρματα στην πλευρά του πρωτεύοντος. Με τον τρόπο αυτό, και έχοντας, παράλληλα, στην πλευρά του πρωτεύοντος διαθέσιμες πληροφορίες σχετικά με την ισχύ,  $S_{in,i}$ , είναι δυνατό να υπολογισθεί η απόδοση,  $eff_i$ , κάθε χρονική στιγμή. Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, η καθυστέρηση για τη μεταφορά σημάτων περιορίζει την υλοποίηση του συστήματος επαγωγικής φόρτισης σε εφαρμογές που απαιτούν μικρή ταχύτητα κίνησης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

Διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί για την εκτίμηση της θέσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή χωρίς την ανάγκη χρήσης επιπλέον εξοπλισμού (όπως για παράδειγμα αισθητήρες), στην περίπτωση της *στατικής* φόρτισης [24],[116]. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι, ωστόσο, δεν μπορούν να προσδιορίσουν παραμέτρους, όπως η ακριβής θέση πάνω από το σταθμό, που είναι απαραίτητες στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, ώστε να προσδιοριστεί η ακριβής χρονική στιγμή που το όχημα αφήνει την περιοχή χαμηλής απόδοσης και εισέρχεται στην περιοχή υψηλής απόδοσης.

Μέθοδοι για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης του οχήματος έχουν προταθεί για την περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης [66],[117]. Απαιτούν, ωστόσο την ύπαρξη επιπλέον μηχανισμών για την ενεργοποίηση του πρώτου πηνίου σε μία σειρά πηνίων κατά μήκος του δρόμου [117] ή δεν εξετάζουν με το σωστό τρόπο την απόδοση του συστήματος [66], όπως θα αναλυθεί πιο λεπτομερώς στην ενότητα 4.4.

Αντίθετα, η μέθοδος που προτείνεται στο κεφάλαιο αυτό παρέρχεται τους περιορισμούς που εμφανίζονται στην περίπτωση της στατικής φόρτισης, ενώ μπορεί να εφαρμοσθεί αποτελεσματικά στη δυναμική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Ειδικότερα, η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να ανιχνεύσει τη θέση του οχήματος σύμφωνα με την ισχύ εισόδου, παρόμοια με τη μέθοδο που περιγράφεται στην αναφορά [66], χωρίς να απαιτεί κάποιον επιπλέον μηχανισμό για την κατάλληλη, χρονικά, ενεργοποίηση του πρωτεύοντος πηνίου. Επιπλέον, αντίθετα με την αναφορά [66], μπορεί να επιλύσει αποτελεσματικά ζητήματα που σχετίζονται με την απόδοση του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία βελτιστοποίησης που προτείνεται βασίζεται στην αρχική μέτρηση των τιμών των επαγωγών για μία ζητούμενη μαγνητική διάταξη. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η μέθοδος βελτιστοποίησης για την εξαγωγή των τιμών της συχνότητας λειτουργίας, των τιμών των πυκνωτών αντιστάθμισης και της αντίστασης φορτίου. Σύμφωνα με τις τιμές αυτές, η ισχύς εισόδου που υποδεικνύει ότι το όχημα εισέρχεται ( $P_{in,enter}$ ) ή εξέρχεται ( $P_{in,leave}$ ) από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, με μία μετατόπιση  $x_{enter}$  και  $x_{leave}$  αντίστοιχα, μπορεί να υπολογισθεί (ή να μετρηθεί) πριν την έναρξη της διαδικασίας φόρτισης.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η εκτίμηση της θέσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή σύμφωνα με την ισχύ εισόδου, απαιτεί τη λειτουργία του συστήματος καθώς το όχημα εισέρχεται στην Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης (Εικόνα 4-1-α). Επομένως, είναι σημαντικό σε αυτή την περιοχή λειτουργίας να προταθεί ένας τρόπος περιορισμού των απωλειών λειτουργίας του συστήματος. Εξετάζοντας την ενεργό ισχύ στην είσοδο και την έξοδο, όπως εκφράζονται στις (3.3) και (3.1) αντίστοιχα, είναι φανερό ότι είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος στο πρωτεύον. Επομένως, ένα μικρό ρεύμα στο πρωτεύον θα επιτρέπει τη λειτουργία στην Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης, εξασφαλίζοντας ότι η ισχύς στην είσοδο θα είναι σημαντικά μειωμένη, ενώ ένα ρεύμα υψηλότερης τιμής δύναται να εξασφαλίσει ότι η μέγιστη δυνατή ενέργεια μεταφέρεται στο όχημα στην περιοχή υψηλής απόδοσης.

Η λειτουργία επομένως στην περιοχή χαμηλής απόδοσης αλλά και στην περιοχή υψηλής απόδοσης είναι δυνατό να επιτευχθεί με την εναλλαγή της τιμής του ρεύματος στο πρωτεύον

μεταξύ μίας χαμηλής ( $I_{low}$ ) και μίας μέγιστης ( $I_{max}$ ) τιμής. Πρέπει να επισημανθεί ότι μία μέθοδος ανίχνευσης της θέσης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, που μεταβάλλει το ρεύμα στο πρωτεύον είτε άμεσα είτε έμμεσα (μέσω της DC τάσης πριν τον αντιστροφέα όπως η μέθοδος που προτείνεται στην αναφορά [66]), θα πρέπει να εξετάζει και τις μεταβολές που παρατηρούνται στην απόδοση του συστήματος, λόγω των αντιστοιχων μεταβολών του ρεύματος ή της τάσης. Ωστόσο, η έκφραση της απόδοσης σύμφωνα με την (3.5) υποδεικνύει ότι η απόδοση είναι ανεξάρτητη του ρεύματος στο πρωτεύον.

Αν και η απόδοση (ως ποσοστό της ισχύος εξόδου ως προς την ισχύ στην είσοδο) δεν εξαρτάται από το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα, οι απώλειες του συστήματος (σε VA) εξαρτώνται από το αντίστοιχο ρεύμα. Επομένως, μία μεγάλη τιμή του ρεύματος  $I_1$  στο πρωτεύον θα οδηγήσει σε αυξημένες απώλειες σε περίπτωση που η απόδοση είναι χαμηλή. Αυτός είναι ο λόγος που η προτεινόμενη λύση λειτουργίας βασίζεται στη λειτουργία στην περιοχή χαμηλής απόδοσης με ένα χαμηλό ρεύμα στο πρωτεύον (και επομένως μία χαμηλή ισχύ εισόδου, δεδομένου της χαμηλής απόδοσης). Αντίστοιχα το ρεύμα στο πρωτεύον πηγίο αυξάνεται όταν το όχημα εισέλθει στην περιοχή υψηλής απόδοσης, όπου μεγάλες τιμές για την απόδοση του συστήματος είναι δυνατό να επιτευχθούν.

### 4.3.1 Έλεγχος στο πρωτεύον

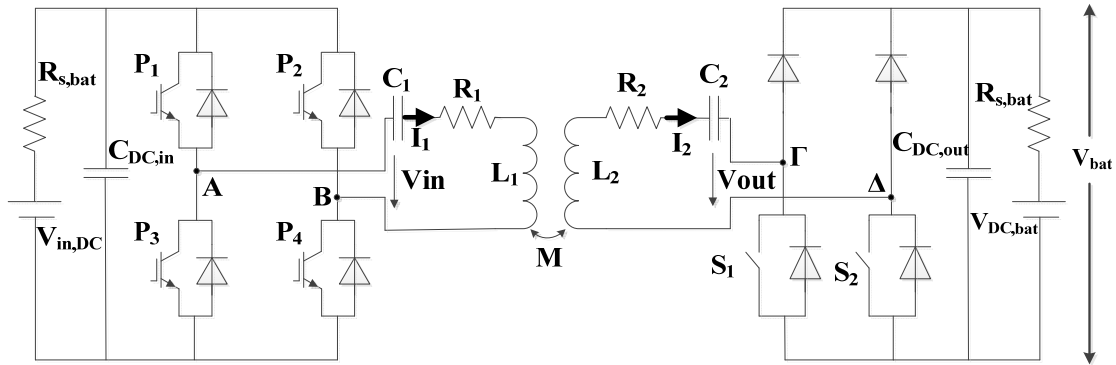
Η διάταξη ελέγχου που επιλέγεται για τη σχεδίαση του συστήματος απεικονίζεται στην Εικόνα 4-2. Η προτεινόμενη μέθοδος ελέγχου για την πλευρά του πρωτεύοντος, η οποία ρυθμίζει το ρεύμα στην επιθυμητή τιμή ( $I_{low}$  ή  $I_{max}$ ), σύμφωνα με τη θέση του οχήματος πάνω από το φορτιστή, απεικονίζεται στην Εικόνα 4-3. Πιο συγκεκριμένα, ο DC/AC αντιστροφέας λειτουργεί σύμφωνα με μία μέθοδο διαμόρφωσης της μετατόπισης φάσης (phase shift modulation) παρόμοια με αυτήν που περιγράφεται στην αναφορά [57]. Στην Εικόνα 4-3, α είναι η φάση μεταξύ των σημάτων ελέγχου που οδηγούν τα IGBT  $P_2$  και  $P_3$ . Τα σήματα ελέγχου για τα  $P_1$  και  $P_4$  ορίζονται με τρόπο ώστε ο συνδυασμός των  $P_1$ - $P_3$  και  $P_2$ - $P_4$  να μην είναι ποτέ κλειστός/ανοιχτός την ίδια χρονική στιγμή. Η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα,  $V_{in}$ , μεταξύ των σημείων A και B στην Εικόνα 4-2 θα είναι ίση με [57]:

$$|V_{in}| = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{in,DC} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.26)$$

Επιπλέον, αντικαθιστώντας στη (2.129) την τιμή του K από τη (2.44), για τη Σειρά-Σειρά τοπολογία αντιστάθμισης, προκύπτει:

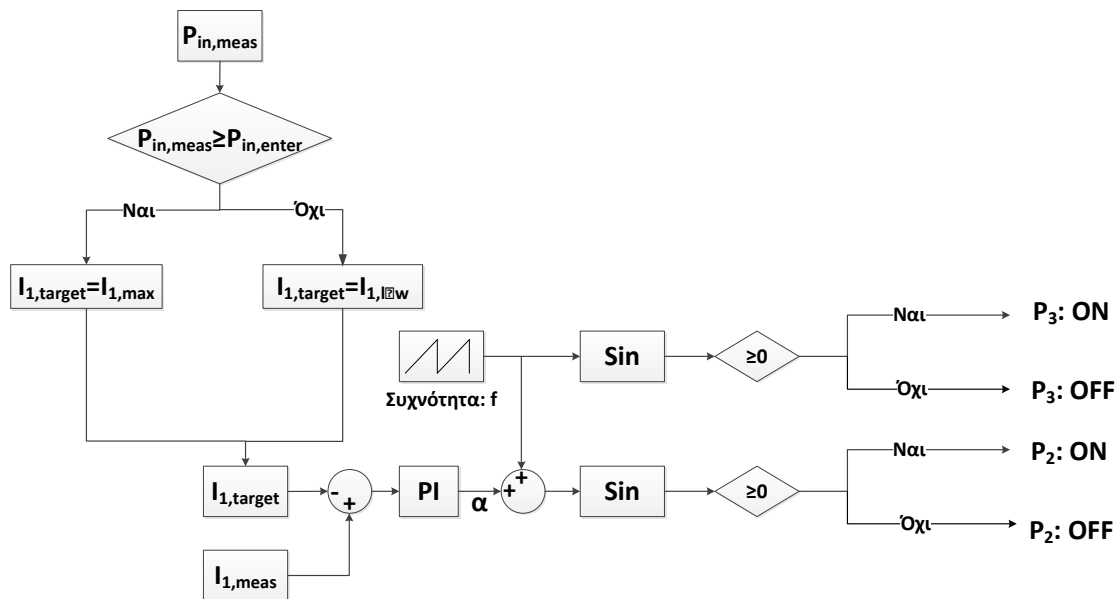
$$|\tilde{I}_1| = \frac{|V_{in}|}{\sqrt{\left[ R_1 + \frac{\omega^2 * M_i^2 * (R_L + R_2)}{\left(\omega * L_{2,i} - \frac{1}{\omega * C_2}\right)^2 + (R_L + R_2)^2} \right]^2 + \left[ \omega * L_{1,i} - \frac{1}{\omega * C_1} - \frac{\left(\omega * L_{2,i} - \frac{1}{\omega * C_2}\right) * \omega^2 * M_i^2}{\left(\omega * L_{2,i} - \frac{1}{\omega * C_2}\right)^2 + (R_L + R_2)^2} \right]^2}} \quad (4.27)$$

Επομένως, το ρεύμα στο πρωτεύον  $I_1$  δύναται να ελεγχθεί ρυθμίζοντας κατάλληλα την τάση  $V_{in}$  στην (4.27), μέσω της γωνίας  $\alpha$ , όπως φαίνεται στην (4.26), έχοντας ως αποτέλεσμα την κυματομορφή του ρεύματος που απεικονίζεται στην Εικόνα 4-4. Πιο συγκεκριμένα, η επιθυμητή τιμή του ρεύματος  $I_{1,target}$ , που είναι ίση με  $I_{1,max}$  ή  $I_{1,low}$  (αν το όχημα βρίσκεται στην περιοχή υψηλής ή χαμηλής απόδοσης αντίστοιχα), συγκρίνεται με την μετρούμενη τιμή του ρεύματος  $I_{1,meas}$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-3. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης τροφοδοτείται σε έναν PI ελεγκτή ώστε να υπολογισθεί η επιθυμητή μετατόπιση φάσης  $\alpha$ .



Εικόνα 4-2: Τοπολογία έλεγχου του προτεινόμενου συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης.

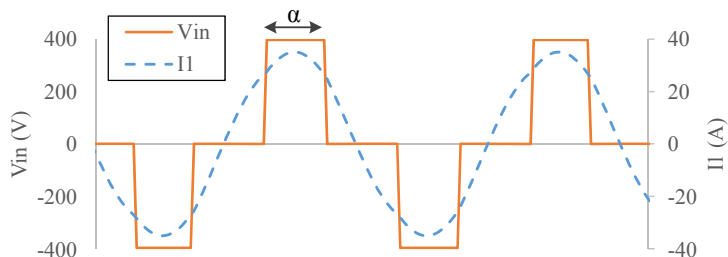
Επομένως, το όχημα εισέρχεται στον σταθμό ο οποίος λειτουργεί με ένα χαμηλό ρεύμα ( $I_{1,low}$ ) εξασφαλίζοντας ότι η ισχύς εισόδου διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και ότι οι απώλειες ισχύος είναι μικρές στην περιοχή χαμηλής απόδοσης. Μόλις το σύστημα ελέγχου ανιχνεύσει ότι η ισχύς εισόδου γίνει ίση με  $P_{in,enter}$ , υποδεικνύοντας ότι το όχημα εισέρχεται στην περιοχή υψηλής απόδοσης, το ρεύμα εισόδου αυξάνεται στη μέγιστη δυνατή τιμή του ( $I_{1,max}$ ) εξασφαλίζοντας ότι η μέγιστη ενέργεια μεταφέρεται στο όχημα. Μόλις το σύστημα ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος ανιχνεύσει ότι η ισχύς εισόδου γίνει ίση με  $P_{in,leave}$ , υποδεικνύοντας ότι το όχημα εξέρχεται από την περιοχή υψηλής απόδοσης, παύει να παρέχεται ισχύς στο σύστημα και η διαδικασία φόρτισης τερματίζεται.



Εικόνα 4-3: Προτεινόμενος έλεγχος στην πλευρά του πρωτεύοντος.

Η μέθοδος έλεγχου για την πλευρά του πρωτεύοντος που περιγράφεται σε αυτή την ενότητα λαμβάνει υπόψιν μία συγκεκριμένη μαγνητική διάταξη πρωτεύοντος και δευτερεύοντος σε ένα δεδομένο κατακόρυφο διάκενο, που θεωρείται ότι επιτυγχάνεται με μηχανισμούς τοποθέτησης όπως περιγράφονται στην ενότητα 1.5. Λειτουργία μεταξύ διαφόρων επιθυμητών μαγνητικών διατάξεων μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας την προτεινόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης για περιπτώσεις μαγνητικών τοπολογιών διαφόρων μεγεθών, λαμβάνοντας υπόψιν τη λειτουργία σε διάφορα διάκενα, όπως αυτά ορίζονται από τους κατασκευαστές αυτοκινήτων. Με τον τρόπο αυτό η διαδικασία βελτιστοποίησης δύναται να παρέχει τις τιμές της συχνότητας, των πυκνωτών αντιστάθμισης και της αντίστασης φορτίου που εξασφαλίζουν μία υψηλή μεταφορά ενέργειας με μία αυξημένη απόδοση για όλες τις εξεταζόμενες τοπολογίες. Στη συνέχεια η ισχύς εισόδου,  $P_{in,enter}$ , που υποδεικνύει τη μετάβαση μεταξύ της περιοχής χαμηλής

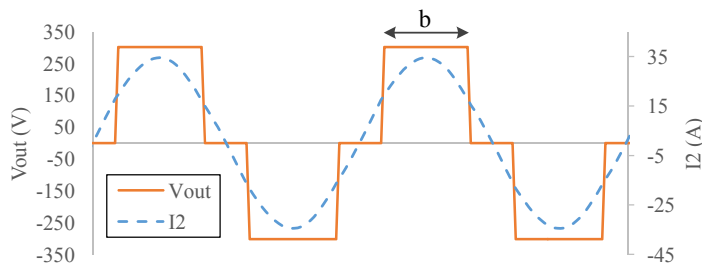
και υψηλής απόδοσης, μπορεί να οριστεί πριν την έναρξη της φόρτισης για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις τιμές της  $P_{in,enter}$ , ένα δεδομένο όριο μπορεί να οριστεί για την ισχύ εισόδου που να υποδεικνύει ότι το όχημα εισέρχεται στην περιοχή υψηλής απόδοσης. Η τεχνική αυτή δύναται να επιτρέψει την ανίχνευση της μετάβασης του οχήματος στην περιοχή υψηλής απόδοσης για όλες τις εξεταζόμενες τοπολογίες.



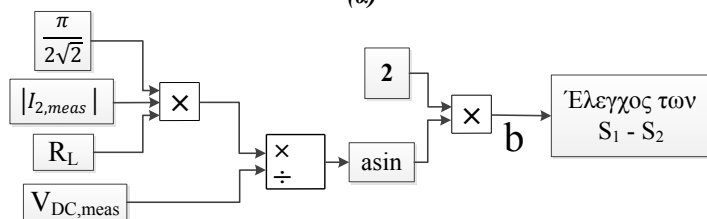
Εικόνα 4-4: Κομματομορφές τάσης και ρεύματος με τον προτεινόμενο έλεγχο στην πλευρά του πρωτεύοντος

### 4.3.2 Έλεγχος στο δευτερεύον

Για να εξασφαλισθεί ότι το σύστημα εισέρχεται στην περιοχή υψηλής απόδοσης και να εφαρμοσθεί με αποτελεσματικό τρόπο η προτεινόμενη μέθοδος ανίχνευσης του οχήματος σχετικά με την είσοδο και έξοδο του από την περιοχή χαμηλής απόδοσης, είναι σημαντικό το σύστημα να λειτουργεί με μία σταθερή τιμή αντίστασης φορτίου. Ειδικότερα, μεταβολές στην τιμή της αντίστασης φορτίου δύναται να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος, όπως θα περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα 4.4.2.1. Ωστόσο, οι μεταβολές στην αντίσταση φορτίου δεν εξετάζονται σε αναφορές που υλοποιούν μεθόδους ανίχνευσης παρόμοιους με την προτεινόμενη, όπως για παράδειγμα η μέθοδος που περιγράφεται στην αναφορά [66].



(α)



(β)

Εικόνα 4-5: (α) Κομματομορφές τάσης και ρεύματος με τον προτεινόμενο έλεγχο στην πλευρά του δευτερεύοντος & (β) Υπολογισμός της γωνίας b για τον έλεγχο των διακοπτικών στοιχείων  $S_1$  και  $S_2$ .

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που εκφράζεται από τις (4.22)-(4.24) εξάγει μία συγκεκριμένη τιμή για την αντίσταση φορτίου  $R_L$ . Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ένας απλός μη ελεγχόμενος AC/DC ανορθωτής στην πλευρά του δευτερεύοντος, η τάση  $V_{bat}$  (Εικόνα 4-2), η οποία μεταβάλλεται σύμφωνα με το επίπεδο φόρτισης (State Of Charge – SoC) της μπαταρίας του οχήματος, δύναται να επηρεάσει την τιμή της αντίστασης φορτίου  $R_L$ . Ωστόσο, το σύστημα έλεγχου που περιγράφεται σε αυτή την ενότητα εξασφαλίζει ότι η

αντίσταση  $R_L$  μπορεί να παραμείνει σταθερή, παρά τις όποιες διακυμάνσεις του επιπέδου φόρτισης (SoC) της μπαταρίας του οχήματος.

Ειδικότερα, μία μέθοδος παρόμοια με αυτή που περιγράφεται στην αναφορά [57], μπορεί να υιοθετηθεί για την υλοποίηση του ελέγχου στην πλευρά του δευτερεύοντος, με στόχο να επιτευχθεί μία σταθερή τιμή για την αντίσταση  $R_L$ . Πιο συγκεκριμένα, η τιμή της αντίστασης  $R_L$  δύναται να ελεγχθεί εισάγοντας τους διακόπτες  $S_1$  και  $S_2$  στον ανορθωτή του δευτερεύοντος (Εικόνα 4-2). Όταν και οι δύο διακόπτες είναι κλειστοί το ρεύμα  $I_2$  κυκλοφορεί στην πλευρά του δευτερεύοντος με την τάση μεταξύ των σημείων  $\Gamma$  και  $\Delta$  στην Εικόνα 4-2 να είναι μηδενική. Όταν ο διακόπτης  $S_1$  είναι ανοιχτός, και το ρεύμα στην πλευρά του δευτερεύοντος λαμβάνει θετικές τιμές, η τάση μεταξύ των σημείων  $\Gamma$  και  $\Delta$  στην Εικόνα 4-2 λαμβάνει τη μέγιστη θετική τιμή. Αντίστοιχα, όταν ο διακόπτης  $S_2$  είναι ανοιχτός, με το ρεύμα  $I_2$  να λαμβάνει αρνητικές τιμές, η τάση μεταξύ των σημείων  $\Gamma$  και  $\Delta$  λαμβάνει τη μέγιστη αρνητική τιμή της. Το πλάτος  $b$  της τάσης στο δευτερεύον  $V_{out}$  (Εικόνα 4-5-α) αντιστοιχεί στο χρόνο απενεργοποίησης του διακοπτικού στοιχείου  $S_1$  ή  $S_2$  και μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να μειώσει την τάση  $V_{out}$ , η οποία, σύμφωνα με την αναφορά [57], είναι ίση με:

$$|V_{out}| = \frac{2 * \sqrt{2}}{\pi} * V_{bat} * \sin\left(\frac{b}{2}\right) \quad (4.28)$$

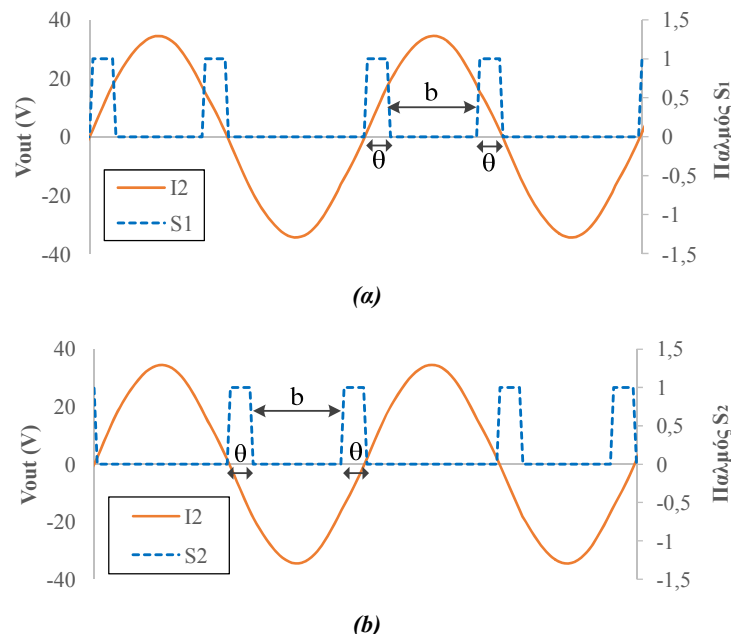
Ωστόσο, το μέτρο της τάσης  $|V_{out}|$ , σύμφωνα και με το ισοδύναμο κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 3-2, είναι ίσο με  $R_L * |I_2|$ , οπότε:

$$R_L |I_2| = \frac{2 * \sqrt{2}}{\pi} * V_{bat} * \sin\left(\frac{b}{2}\right) \quad (4.29)$$

και από την επίλυση της (4.29) ως προς  $b$  προκύπτει:

$$b = 2 * \arcsin\left(\frac{R_L * I_2}{V_{bat}} * \frac{\pi}{2 * \sqrt{2}}\right) \quad (4.30)$$

Η γωνία αυτή, επομένως είναι η επιθυμητή γωνία για τη λειτουργία των διακοπών  $S_1$  και  $S_2$ , ο τρόπος υπολογισμού της οποίας απεικονίζεται στην Εικόνα 4-5-β.



Εικόνα 4-6: Παλμοί ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων (α)  $S_1$  και (β)  $S_2$ .

Οι διακόπτες  $S_1$  και  $S_2$  ελέγχονται με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται μηδενική μετατόπιση φάσης μεταξύ των κυματομορφών ρεύματος και τάσης στο δευτερεύον ( $V_2$  και  $I_2$ ) όπως



απεικονίζεται στην Εικόνα 4-5-α. Για να επιτευχθεί η μηδενική μετατόπιση φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης, οι παλμοί που απεικονίζονται στην Εικόνα 4-6 εφαρμόζονται στα διακοπτικά στοιχεία  $S_1$  και  $S_2$ . Πιο συγκεκριμένα, μόλις το ρεύμα στο δευτερεύον,  $I_2$ , γίνει ίσο με μηδέν μεταβαίνοντας από αρνητικές σε θετικές τιμές, ο έλεγχος στο δευτερεύον κλείνει το διακόπτη  $S_1$  για ένα χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί σε μια γωνία  $\theta$  (Εικόνα 4-6-α). Καθώς:

$$b + 2\theta = \pi \quad (4.31)$$

η γωνία  $\theta$  μπορεί εύκολα να υπολογισθεί σύμφωνα με τις (4.30) και (4.31):

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{R_L * I_2}{V_{bat}} * \frac{\pi}{2 * \sqrt{2}}\right) \quad (4.32)$$

Μετά το πέρασμα της χρονικής διάρκειας που αντιστοιχεί στη γωνία  $\theta$ , ο διακόπτης  $S_1$  ανοίγει για ένα χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί σε μία γωνία  $b$ , ώστε η τάση να λάβει τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 4-5. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και ο έλεγχος του διακόπτη  $S_2$  (Εικόνα 4-6-β), ο οποίος, ωστόσο, τώρα λαμβάνει χώρα για αρνητικές τιμές του ρεύματος  $I_2$ .

Καθώς ο έλεγχος στην πλευρά του δευτερεύοντος στοχεύει στη διατήρηση μίας σταθερής τιμής για την αντίσταση  $R_L$ , δεν είναι δυνατό να ρυθμιστεί η ακριβής τιμή του ρεύματος στην πλευρά του δευτερεύοντος. Αν και μία συγκεκριμένη τιμή δεν είναι απαραίτητη για το ρεύμα  $I_2$ , η τιμή του ρεύματος στο δευτερεύον πηνίο θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από το μέγιστο δυνατό ρεύμα  $I_{2,max}$ , το οποίο δύναται να διαρρέει το δευτερεύον πηνίο, σύμφωνα με τις λειτουργικές προδιαγραφές του πηνίου αυτού. Ειδικότερα, σύμφωνα με τη (2.42):

$$|I_{2,i}| = \frac{\omega * M_l}{\sqrt{\left(\omega * L_{2,i} - \frac{1}{\omega * C_2}\right)^2 + (R_L + R_2)^2}} * |I_{1,i}| \leq I_{2,max} \quad \forall i \quad (4.33)$$

Η (4.33) θα πρέπει να ισχύει σε κάθε μετατόπιση  $x_i$  καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Η σχεδίαση του συστήματος επαγωγικής φόρτισης πραγματοποιείται για συγκεκριμένα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα πηνία τα οποία αναμένεται να λειτουργούν για συγκεκριμένο διάκενο αέρα. Επομένως, η (4.33) μπορεί να εισαχθεί ως ένας επιπλέον περιορισμός στο πρόβλημα βελτιστοποίησης, ώστε να εξασφαλισθεί ότι το ρεύμα στο δευτερεύον δε θα ξεπεράσει τη μέγιστη δυνατή τιμή  $I_{2,max}$  καθώς το όχημα κινείται πάνω από το σταθμό. Καθώς το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται στην περιοχή υψηλής απόδοσης, το ρεύμα στο πρωτεύον στην περιοχή αυτή θα είναι ίσο με:

$$|I_{1,i}| = |I_{1,max}| \quad \forall i \text{ στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης} \quad (4.34)$$

Επομένως, για την περιοχή υψηλής απόδοσης, σύμφωνα με τις (4.33) και (4.34):

$$|I_{2,i}| = \frac{\omega * M_l}{\sqrt{\left(\omega * L_{2,i} - \frac{1}{\omega * C_2}\right)^2 + (R_L + R_2)^2}} * |I_{1,max}| \leq I_{2,max} \quad \forall i \quad (4.35)$$

Πρέπει να τονισθεί ότι, σε περίπτωση που δε ληφθεί υπόψιν η (4.35), το ρεύμα στο δευτερεύον δύναται να λάβει ιδιαίτερα μεγάλες τιμές, λόγω μη σωστής επιλογής των μεταβλητών  $f$ ,  $C_2$  και  $R_L$ . Η (4.35), επομένως, θα πρέπει να εισαχθεί ως ένας επιπλέον περιορισμός στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίζεται από τις (4.22)-(4.24).

Πρέπει, επιπλέον, να σημειωθεί ότι υπάρχει μία μέγιστη τιμή για την αντίσταση φορτίου  $R_L$  που μπορεί να επιτευχθεί από το σύστημα ελέγχου στο δευτερεύον. Πιο συγκεκριμένα, στην (4.28) θα ισχύει  $\sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \leq 1$ , επομένως:

$$R_L I_2 \leq \frac{2 * \sqrt{2}}{\pi} * V_{bat} \quad (4.36)$$

Η τάση  $V_{bat}$  στην Εικόνα 4-2 μεταβάλλεται μεταξύ μίας ελάχιστης ( $V_{bat,min}$ ) και μίας μέγιστης ( $V_{bat,max}$ ) τιμής, σύμφωνα με το επίπεδο φόρτισης (State of Charge) της μπαταρίας του οχήματος. Η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης, παρέχει μία τιμή για την αντίσταση  $R_L$  η οποία θα πρέπει να επιτυγχάνεται για όλες τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας. Σύμφωνα με την (4.36), η μέγιστη τιμή της  $R_L$  μπορεί να προσδιορισθεί όταν  $V_{bat}=V_{bat,min}$  και  $I_2=I_{2,max}$ :

$$R_{L,max} = \frac{2\sqrt{2}V_{bat,min}}{\pi I_{2,max}} \quad (4.37)$$

#### 4.4 Εφαρμογή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Στην ενότητα αυτή, η μέθοδος βελτιστοποίησης εφαρμόζεται σε μία κυκλική μαγνητική διάταξη, ώστε να εξαχθούν οι βέλτιστες τιμές για την αντίσταση φορτίου, τη συχνότητα και τους πυκνωτές αντιστάθμισης που θα εξασφαλίσουν τη μέγιστη μεταφορά ενέργειας στην μπαταρία του οχήματος, διατηρώντας παράλληλα μία υψηλή απόδοση λειτουργίας. Στη συνέχεια, σύμφωνα με τις τιμές αυτές, το σύστημα επαγωγικής φόρτισης προσομοιώνεται καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή, με στόχο να εξετασθεί η σωστή λειτουργία του προτεινόμενου ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος.

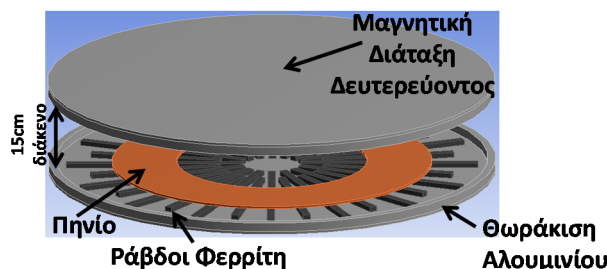
##### 4.4.1 Μαγνητική διάταξη

Ο κυκλικός μαγνητικός συζεύκτης που απεικονίζεται στην Εικόνα 4-7 σχεδιάστηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον ANSYS, σύμφωνα με τις προδιαγραφές κυκλικών διατάξεων που ορίζονται στην αναφορά [18]. Το σύστημα περιλαμβάνει δύο πανομοιότυπα σχεδιασμένες μαγνητικές τοπολογίες στο πρωτεύον και το δευτερεύον, που αποτελούνται από τη θωράκιση αλουμινίου, τις ράβδους φερρίτη με μία μαγνητική διαπερατότητα ίση με 2300, καθώς επίσης και τα πηνία (καθένα από τα οποία αποτελείται από 18 ελίγματα). Το διάκενο αέρα μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θεωρείται ίσο με 15 εκατοστά. Για τη σχεδίαση των τυλιγμάτων ένα εμπορικά διαθέσιμο καλώδιο Litz<sup>1</sup> λαμβάνεται υπόψιν. Το καλώδιο αυτό έχει μία διάμετρο 4.8mm και αποτελείται από 1050 μικρότερα καλώδια διαμέτρου 0.1016mm, που έχουν ως αποτέλεσμα μία συνολική επιφάνεια διατομής ίση με 8,51 mm<sup>2</sup>. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα για το πηνίο πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ορίζεται ίσο με  $I_{1,max}=I_{2,max}=25A$  ώστε να επιτευχθεί μία πυκνότητα ρεύματος που εξασφαλίζει επαρκώς μειωμένες απώλειες χαλκού [19].

Η DC αντίσταση του καλωδίου Litz που λαμβάνεται υπόψιν για τη σχεδίαση της διάταξης προσδιορίζεται ίση με 0,00227 Ω/m, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του συγκεκριμένου καλωδίου<sup>1</sup>. Οι προδιαγραφές για τη σχεδίαση της κυκλικής διάταξης που απεικονίζεται στην Εικόνα 4-7, απαιτούν ένα κυκλικό πηνίο με διάμετρο ίση με το 57% της συνολικής διαμέτρου της διάταξης [18]. Θεωρώντας 18 ελίγματα καλωδίου, το συνολικό μήκος του καλωδίου Litz υπολογίζεται ίσο με 19,61 μέτρα. Επομένως η DC αντίσταση του καλωδίου Litz,  $R_{DC}$ , θα είναι:

$$R_{DC} = 0,00227 \frac{\Omega}{m} * 19,61m = 0,0445\Omega \quad (4.38)$$

<sup>1</sup> <https://www.newenglandwire.com>



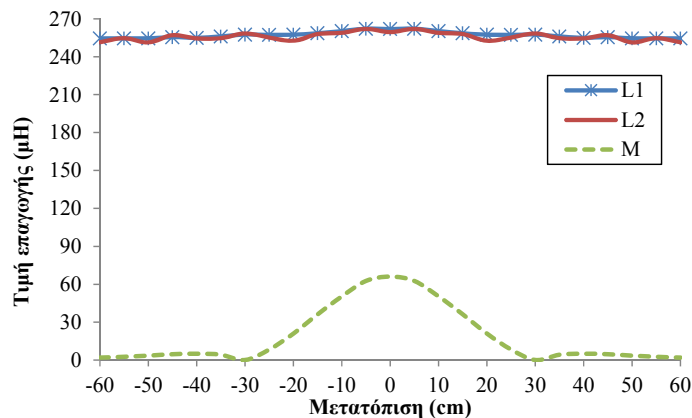
Εικόνα 4-7: Κυκλικός μαγνητικός συζεύκτης που σχεδιάστηκε στο ANSYS.

Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του καλωδίου Litz που απαιτούνται για τον υπολογισμό της AC αντίστασης του καλωδίου στο πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο,  $R_1$  και  $R_2$  αντίστοιχα, σύμφωνα με την (4.2).

Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά του καλωδίου Litz που λήφθηκε υπόψιν για τη σχεδίαση της διάταξης

Παράμετρος	Τιμή
$H_s$	1
$K_s$	2
$N_s$	1050
$D_I$ (ίντσες)	0.004
$D_O$ (ίντσες)	0.189

Όταν το όχημα βρίσκεται ακριβώς πάνω από το σταθμό, η μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος θεωρείται ίση με μηδέν. Το όχημα, επομένως, εισέρχεται στο φορτιστή με μία μετατόπιση ίση με  $-60\text{cm}$  και εξέρχεται από αυτόν με μία μετατόπιση  $+60\text{cm}$ . Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, εξετάζοντας διάφορες περιπτώσεις οριζόντιας μετατόπισης, απεικονίζονται στην Εικόνα 4-8.



Εικόνα 4-8: Τιμές επαγωγών για διάφορες περιπτώσεις μετατόπισης

#### 4.4.2 Εφαρμογή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης στοχεύει στη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ενέργειας (4.22), με τους περιορισμούς (4.23)-(4.24) και (4.35). Για να ορισθεί η μεταφερόμενη ενέργεια στην (4.22) η ταχύτητα διέλευσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή θεωρείται ίση με  $v = 50 \text{ km/h}$ . Επιπλέον, οι διάφορες μετατοπίσεις,  $x_i$ , που εξετάζονται απέχουν μεταξύ τους  $5\text{cm}$ , επομένως  $\Delta x = 5\text{cm}$  στην (4.22).

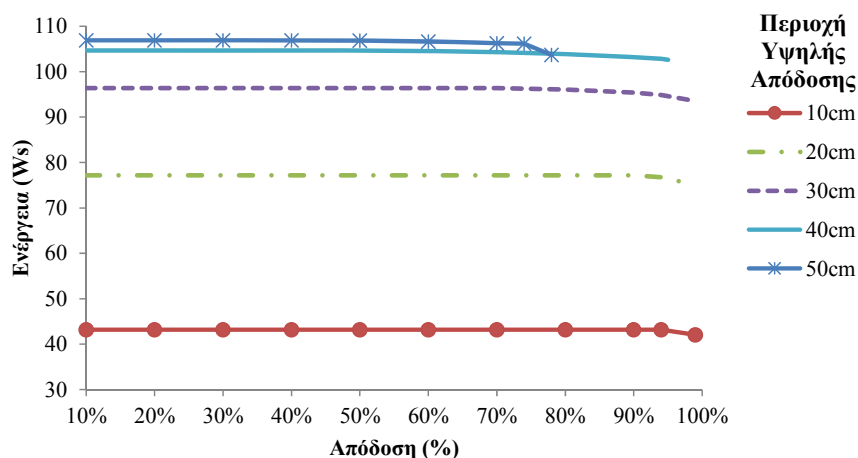
Ο Πίνακας 4-2 παρουσιάζει τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των μεταβλητών του προβλήματος βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, σχετικά με τη συχνότητα, η αναφορά [18] θεωρεί την πρακτική σχεδίαση ενός κυκλικού συζεύκτη παρόμοιου με τον εξεταζόμενο που απεικονίζεται στην Εικόνα 4-7 σε μία συχνότητα 20 ή 50kHz. Λαμβάνοντας υπόψιν πιθανούς

περιορισμούς σχετικά με τη μαγνητική σχεδίαση της διάταξης και τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά ισχύος, τα ίδια όρια των 20kHz και 50kHz θεωρούνται σχετικά με την ελάχιστη και μέγιστη συχνότητα ( $f_{\min}$  και  $f_{\max}$ ) αντίστοιχα. Οπότε, σύμφωνα με τις (4.16) και (4.17), η ελάχιστη και μέγιστη γωνιακή ταχύτητα θα είναι  $\omega_{\min}=125.600\text{rad/s}$  και  $\omega_{\max}=314.000\text{rad/s}$ . Λαμβάνοντας υπόψιν τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή των αυτεπαγωγών  $L_1$  και  $L_2$ , και σύμφωνα με τις (4.20)-(4.21), υπολογίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης στο πρωτεύον και το δευτερεύον:  $C_{1,\min}=38,7\text{nF}$ ,  $C_{1,\max}=249,1\text{nF}$ , και  $C_{2,\min}=38,7\text{nF}$ ,  $C_{2,\max}=252,3\text{nF}$ . Η μπαταρία που περιγράφεται στην αναφορά [118] λαμβάνεται υπόψιν στη σχεδίαση του συστήματος, σύμφωνα με την οποία η ελάχιστη τάση της μπαταρίας είναι  $V_{\text{bat},\min}=270\text{V}$ . Επομένως, σύμφωνα με την (4.37), η μέγιστη τιμή που δύναται να λάβει η αντίσταση φορτίου,  $R_{L,\max}$ , εφαρμόζοντας το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου στην πλευρά του δευτερεύοντος, υπολογίζεται ίση με  $9,72\Omega$ .

Πίνακας 4-2: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των μεταβλητών του προβλήματος

Μεταβλητή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή
Συχνότητα, $f$	20kHz	50kHz
Γωνιακή Ταχύτητα, $\omega$	125600rad/s	314000rad/s
Πυκνωτής Αντιστάθμισης Πρωτεύοντος, $C_1$	38,7nF	249,1nF
Πυκνωτής Αντιστάθμισης Δευτερεύοντος, $C_2$	38,7nF	252,3nF
Αντίσταση Φορτίου, $R_L$	0 $\Omega$	9.72 $\Omega$

Στην Εικόνα 4-9 παρουσιάζεται η μέγιστη μεταφερόμενη ενέργεια θεωρώντας διάφορες περιπτώσεις σχετικά με την περιοχή υψηλής απόδοσης, καθώς και διάφορες τιμές σχετικά με την επιθυμητή απόδοση  $\text{eff}_{\text{target}}$ . Το πρόβλημα βελτιστοποίησης για όλες αυτές τις περιπτώσεις επιλύθηκε με το λογισμικό GAMS, χρησιμοποιώντας το solver "LINDOGLOBAL". Περιοχές Υψηλής Απόδοσης μέχρι και 50 εκατοστά έχουν ληφθεί υπόψιν στην Εικόνα 4-9, καθώς για μεγαλύτερες περιοχές το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται μόνο για πολύ μικρές τιμές της  $\text{eff}_{\text{target}}$ . Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση μίας περιοχής υψηλής απόδοσης ίσης με 60 εκατοστά η μέγιστη τιμή  $\text{eff}_{\text{target}}$  που οδηγεί σε μία εφικτή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ίση με 0,048%. Η απαίτηση για μία μεγαλύτερη τιμή της  $\text{eff}_{\text{target}}$  στον περιορισμό (4.23) οδηγεί σε μη εφικτή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Είναι, επομένως, φανερό ότι ιδιαίτερα μεγάλες τιμές για την περιοχή υψηλής απόδοσης, πόσο μάλλον περιοχές που καλύπτουν όλο το εύρος της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή, δεν είναι δυνατό να ληφθούν υπόψιν για τη λειτουργία του συστήματος, καθώς οδηγούν σε πολύ χαμηλή απόδοση.



Εικόνα 4-9: Μέγιστη μεταφερόμενη ενέργεια για διάφορες τιμές της  $\text{eff}_{\text{target}}$  και διάφορες περιπτώσεις μετατόπισης.

Για κάθε Περιοχή Υψηλής Απόδοσης παρατηρείται στην Εικόνα 4-9 ότι για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση η μεταφερόμενη ενέργεια παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή της απόδοσης, μετά την οποία παρουσιάζει μία μικρή μείωση. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί παρατηρώντας τις εξισώσεις (4.22)-(4.24), καθώς και τον περιορισμό (4.35), που διαμορφώνουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης: καθώς η μεταβλητή  $C_1$  επηρεάζει μόνο την απόδοση του συστήματος στην (4.23), η μέγιστη μεταφερόμενη ενέργεια  $E_{limit}$ , δύναται να ληφθεί για συγκεκριμένες τιμές των μεταβλητών  $C_{2,limit}$ ,  $f_{limit}$  and  $R_{L,limit}$  χωρίς να ληφθεί υπόψιν ο περιορισμός σχετικά με την απόδοση στην (4.23).

Για την εύρεση της μέγιστης δυνατής απόδοσης που δύναται να επιτευχθεί για τη μεταφορά της ενέργειας  $E_{limit}$  στην μπαταρία του οχήματος, ένα νέο πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να ορισθεί. Το πρόβλημα αυτό έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, με την ενέργεια να περιορίζεται στην τιμή  $E_{limit}$ , σύμφωνα με την (4.40). Πιο συγκεκριμένα η ελάχιστη τιμή όλων των τιμών  $eff_i$ , στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης πρέπει να μεγιστοποιηθεί, όπως φαίνεται στην (4.39), εξασφαλίζοντας τη μέγιστη δυνατή απόδοση σε κάθε σημείο μετατόπισης  $x_i$ .

Νέο Πρόβλημα Βελτιστοποίησης:

**Αντικειμενική Συνάρτηση:**

$$\min\{eff_i\} = \max \quad (4.39)$$

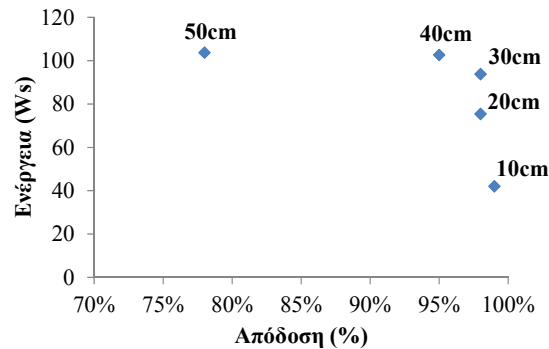
**Περιορισμός:**

$$E_{total} = E_{limit} \quad (4.40)$$

Η επίλυση του νέου αυτού προβλήματος παρέχει μία τιμή  $eff_{limit}$  που αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια  $E_{limit}$  με τις ίδιες βέλτιστες τιμές  $\{C_{2,limit}, f_{limit}, R_{L,limit}\}$ , αλλά ορίζοντας παράλληλα και τη βέλτιστη τιμή του πυκνωτή στην πλευρά του πρωτεύοντος  $C_{1,limit}$ .

Επομένως, για οποιαδήποτε τιμή της  $eff_{target}$  μικρότερη της  $eff_{limit}$  η ίδια ενέργεια  $E_{limit}$  θα μεταφέρεται στο όχημα. Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές της  $eff_{target}$ , η τιμή της μεταβλητής  $C_1$  καθώς και οι τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών  $\{C_2, f, R_L\}$  θα πρέπει να ληφθούν από τη βελτιστοποίηση της (4.22), ώστε να εξασφαλισθεί η επιθυμητή  $eff_{target}$ , εις βάρος, ωστόσο, της μεταφερόμενης ενέργειας όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-9. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης  $eff_{feas}$  για κάθε Περιοχή Υψηλής Απόδοσης στην Εικόνα 4-9 υποδεικνύει τη μέγιστη δυνατή τιμή για την  $eff_{target}$  ώστε το πρόβλημα βελτιστοποίησης να έχει εφικτή λύση.

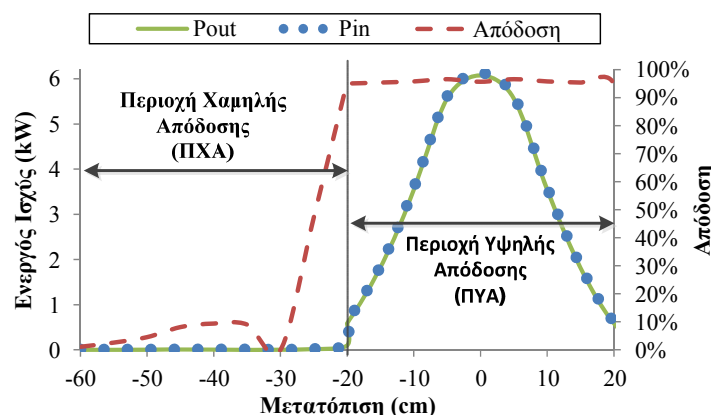
Για παράδειγμα, θεωρώντας μία Περιοχή Υψηλής Απόδοσης (ΠΥΑ) ίση με 30cm (θεωρώντας, δηλαδή, μία μετατόπιση από το κέντρο του σταθμού ίση με  $\pm 15$ cm) και αφαιρώντας τον περιορισμό (4.23) σχετικά με την απόδοση από το πρόβλημα βελτιστοποίησης, μία μέγιστη ενέργεια ίση με  $E_{limit}=96.36$ Ws δύναται να επιτευχθεί για  $C_{2,limit}=38.71$ nF,  $f_{limit}=45.57$ kHz,  $R_{L,limit}=9.72$ Ω. Η μέγιστη απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί για τη συγκεκριμένη ενέργεια  $E_{limit}$  (στη συγκεκριμένη ΠΥΑ των 30cm), σύμφωνα με το νέο πρόβλημα βελτιστοποίησης που ορίζεται από τις (4.39)-(4.40), υπολογίζεται ίση με  $eff_{limit}=0.71$  για  $C_{1,limit}=42.79$ nF. Η απαίτηση για μία τιμή απόδοσης μεγαλύτερη από την  $eff_{limit}$  θα μειώσει τη μεταφερόμενη ενέργεια στο όχημα. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης οδηγεί σε εφικτές λύσεις μέχρι μία μέγιστη επιτρεπτή απόδοση ίση με  $eff_{feas}=0.98$ , όπου η μεταφερόμενη ενέργεια είναι ίση με  $E_{feas}=93.78$ Ws.



**Εικόνα 4-10:** Τιμές των  $\{eff_{feas}, E_{feas}\}$  για κάθε Περιοχή Υψηλής Απόδοσης (PYA). Η PYA για κάθε περίπτωση απεικονίζεται δίπλα σε κάθε σημείο στο διάγραμμα.

Στο προηγούμενο παράδειγμα, συγκρίνοντας τις  $E_{feas}$  και  $E_{limit}$  για την τιμή της επιθυμητής απόδοσης,  $eff_{target}$ , ίσης με 0.71 και 0.98 αντίστοιχα, παρατηρείται μία μείωση μόνο 2,68% στη μεταφερόμενη ενέργεια, ενώ η αντίστοιχη απόδοση αυξάνεται κατά 38%. Παρόμοια αποτελέσματα αναμένονται, σύμφωνα με την Εικόνα 4-9, και για τις υπόλοιπες Περιοχές Υψηλής Απόδοσης (PYA). Ειδικότερα, για όλες τις PYA στην Εικόνα 4-9, η ενέργεια  $E_{feas}$  μειώνεται λιγότερο από 3.1% σε σύγκριση με την  $E_{limit}$ , ενώ η αντίστοιχη απόδοση αυξάνεται σημαντικά. Επομένως, το σύνολο τιμών  $\{eff_{feas}, E_{feas}\}$  μπορεί να θεωρηθεί ως το ενδεικτικό σύνολο για τις τιμές της απόδοσης και της μεταφερόμενης ενέργειας σε κάθε Περιοχή Υψηλής Απόδοσης και απεικονίζεται στην Εικόνα 4-10.

Σχετικά με την επιλογή των τιμών  $\{eff_{feas}, E_{feas}\}$  μεταξύ όλων των Περιοχών Υψηλής Απόδοσης, είναι φανερό στην Εικόνα 4-10 ότι υπάρχει ένας συμβιβασμός μεταξύ της μεταφερόμενης ενέργειας και της απόδοσης του συστήματος. Τιμές της απόδοσης κοντά στο 100% είναι δυνατό να επιτευχθούν, ωστόσο, στην περίπτωση αυτή η μεταφερόμενη ενέργεια μειώνεται σημαντικά. Στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης όπου το όχημα περνά με πολύ μεγάλη ταχύτητα πάνω από το σταθμό είναι σημαντικό να εξασφαλισθεί ότι μεγάλα ποσά ενέργειας μεταφέρονται στο όχημα. Όπως είναι φανερό στην Εικόνα 4-10 μεγάλα ποσά ενέργειας επιτυγχάνονται για Περιοχές Υψηλής Απόδοσης ίσες με 40 ή 50 εκατοστά. Αν και η ενέργεια είναι σχεδόν ίδια και για τις δύο αυτές περιπτώσεις, η απόδοση μεταβάλλεται σημαντικά από 95% για μια PYA ίση με 40cm σε 78% για μία PYA 50cm. Επομένως, μία Περιοχή Υψηλής Απόδοσης ίση με 40cm λαμβάνεται υπόψιν για τη σχεδίαση του συστήματος.



**Εικόνα 4-11:** Ισχύς εισόδου-εξόδου & απόδοση του συστήματος, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή για την περίπτωση μίας Περιοχής Υψηλής Απόδοσης ίσης με 40cm.

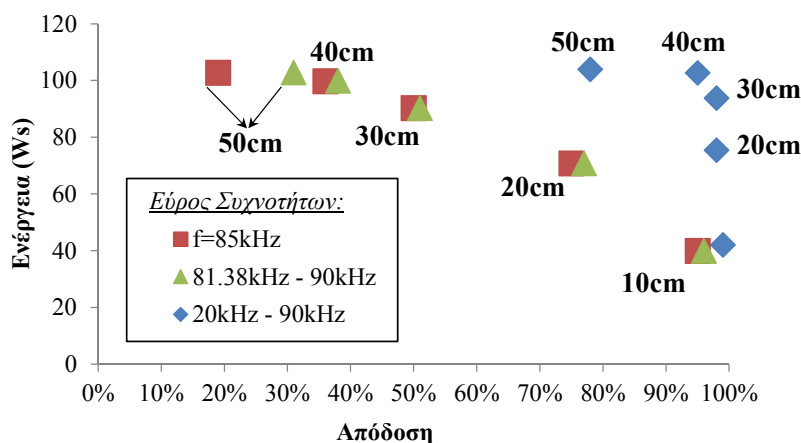
Για την επιλεχθείσα Περιοχή Υψηλής Απόδοσης των 40cm η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης παρέχει μία αντίσταση φορτίου  $R_L$  ίση με  $9.72\Omega$ , μία συχνότητα ίση με 24.1kHz και τιμές για τους πυκνωτές αντιστάθμισης  $C_1$  και  $C_2$  ίσες με 168.08nF και 159.24nF, αντίστοιχα. Η απόδοση και η ισχύς εξόδου καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή απεικονίζονται στην Εικόνα 4-11. Καθώς το όχημα εισέρχεται στο φορτιστή, το σύστημα

λειτουργεί στην Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης (ΠΧΑ) με ένα ρεύμα πρωτεύοντος που ορίζεται ίσο με  $I_{1,low}=10A$ , το οποίο είναι σημαντικά μικρότερο από τη μέγιστη τιμή του ρεύματος  $I_{1,max}=25A$ . Το όχημα εισέρχεται στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης όταν η μετατόπιση είναι ίση με  $-20cm$ , και όταν η ισχύς εισόδου είναι ίση με  $P_{in,enter}=98W$ , σύμφωνα με την Εικόνα 4-11. Επομένως, το σύστημα ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος παρακολουθεί την ισχύ εισόδου και αυξάνει το ρεύμα πρωτεύοντος στη μέγιστη δυνατή τιμή του  $I_{1,max}=25A$ , μόλις  $P_{in}=P_{in,enter}$ . Η λειτουργία του συστήματος διακόπτεται μόλις το όχημα εγκαταλείψει την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης ή, σύμφωνα με την Εικόνα 4-11, όταν η ισχύς εισόδου γίνει μικρότερη από την τιμή  $P_{in,leave}=618W$ .

#### 4.4.2.1 Επιλογή της συχνότητας λειτουργίας

Τα όρια σχετικά με τη συχνότητα ( $f_{min}=20kHz$  και  $f_{max}=50kHz$ ) επιλέχθηκαν προηγουμένως λαμβάνοντας υπόψιν πιθανούς περιορισμούς σχετικά με τη μαγνητική σχεδίαση της διάταξης και τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά ισχύος, σύμφωνα με την αναφορά [18]. Σύμφωνα με τα όρια αυτά και με την επιλογή μίας Περιοχής Υψηλής Απόδοσης ίσης με  $40cm$ , το πρόβλημα βελτιστοποίησης δίνει τη βέλτιστη τιμή της συχνότητας λειτουργίας που είναι ίση με  $24.1kHz$ .

Πρότυπα σχετικά με επαγωγική φόρτιση προτείνουν μία ιδιαίτερα αυξημένη συχνότητα λειτουργίας. Για παράδειγμα, μία σταθερή συχνότητα  $85kHz$  προτείνεται από το πρότυπο SAE J2954 [24] για την περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης ελαφριού τύπου ηλεκτρικών οχημάτων. Η συχνότητα αυτή εξετάζεται για την εφαρμογή του προβλήματος βελτιστοποίησης και το συζεύκτη που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-7. Στην περίπτωση αυτή η γωνιακή ταχύτητα,  $\omega$ , παύει να είναι πλέον μεταβλητή στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και θεωρείται σταθερή και ίση με  $\omega=2\pi f=533800 \text{ rad/s}$ , λόγω της σταθερής συχνότητας  $f=85kHz$ . Στην Εικόνα 4-12 απεικονίζονται οι τιμές των  $eff_{feas}$  και  $E_{feas}$  σχετικά με την απόδοση και τη μεταφερόμενη ενέργεια για διάφορες περιπτώσεις Περιοχών Υψηλής Απόδοσης. Λαμβάνοντας υπόψιν τη συχνότητα λειτουργίας  $f=85kHz$ , είναι φανερό στην Εικόνα 4-12 ότι υψηλά ποσά ενέργειας είναι δυνατό να επιτευχθούν μόνο σε πολύ μικρές τιμές απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, μία απόδοση 95% είναι δυνατό να επιτευχθεί με τη μεταφορά μίας ενέργειας ίσης με  $40Ws$ . Αντίθετα η ίδια απόδοση δύναται να επιτευχθεί με μία μεταφορά ενέργειας  $103Ws$  εάν θεωρηθούν μικρότερες συχνότητες λειτουργίας (εύρος συχνοτήτων  $20kHz-50kHz$  στην Εικόνα 4-10).



Εικόνα 4-12: Μεταφερόμενη στο όχημα ενέργεια και απόδοση συστήματος για μία σταθερή συχνότητα  $85kHz$  και ένα εύρος συχνοτήτων  $81.38kHz - 90kHz$  ή  $20kHz - 90kHz$ . Τα σημεία στα διαγράμματα απεικονίζουν τις τιμές των  $\{eff_{feas}, E_{feas}\}$  σε κάθε Περιοχή Υψηλής Απόδοσης (ΠΥΑ). Η ΠΥΑ για κάθε περίπτωση απεικονίζεται δίπλα σε κάθε σημείο στο διάγραμμα.

Στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης ελαφριού τύπου οχημάτων, το πρότυπο SAE J2954 [24] προτείνει επίσης ένα εύρος συχνοτήτων  $81.34 - 90kHz$  σχετικά με συστήματα

που χρησιμοποιούν μεθόδους συντονισμού συχνότητας (frequency-tuning), για την περίπτωση της στατικής φόρτισης ελαφριού τύπου ηλεκτρικών οχημάτων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται, επίσης, λαμβάνοντας υπόψιν τις συγκεκριμένες συχνότητες ως ελάχιστες ( $f_{\min}=81.34\text{kHz}$ ) και μέγιστες ( $f_{\max}=90\text{kHz}$ ), παρατηρώντας μία σχετική αύξηση στη μεταφερόμενη ενέργεια σχετικά με την επιλογή μίας σταθερής συχνότητας 85kHz, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-12. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψιν και αυτή την αύξηση στη μεταφερόμενη ενέργεια, οι τιμές της ενέργειας που επιτυγχάνονται είναι πολύ μικρότερες των υψηλών τιμών που παρατηρούνται όταν λαμβάνονται υπόψιν μικρότερες συχνότητες στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (εύρος συχνοτήτων 20kHz-50kHz στην Εικόνα 4-10).

Για να διερευνηθεί εάν υψηλότερες συχνότητες είναι, γενικότερα, ευνοϊκές στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, το αρχικό εύρος συχνοτήτων 20-50kHz στο πρόβλημα βελτιστοποίησης επεκτείνεται σε 20-90kHz (επομένως  $f_{\min}=20\text{kHz}$  και  $f_{\max}=90\text{kHz}$ ). Τα αποτελέσματα στην Εικόνα 4-12 και την Εικόνα 4-10 υποδεικνύουν ότι το ζεύγος τιμών  $\{\text{eff}_{\text{feas}}, E_{\text{feas}}\}$  είναι ίδιο είτε λαμβάνεται υπόψιν ένα εύρος συχνοτήτων 20-50kHz είτε ένα εύρος 20-90kHz. Επιπλέον για μία Περιοχή Υψηλής Απόδοσης ίσης με 40cm (όπου επιτυγχάνεται μία ιδιαίτερα αυξημένη μεταφορά ενέργειας με ταυτόχρονα υψηλή απόδοση όπως εξηγήθηκε προηγουμένως) η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης υποδεικνύει μία βέλτιστη συχνότητα ίση με 24.1kHz και στις δύο περιπτώσεις.

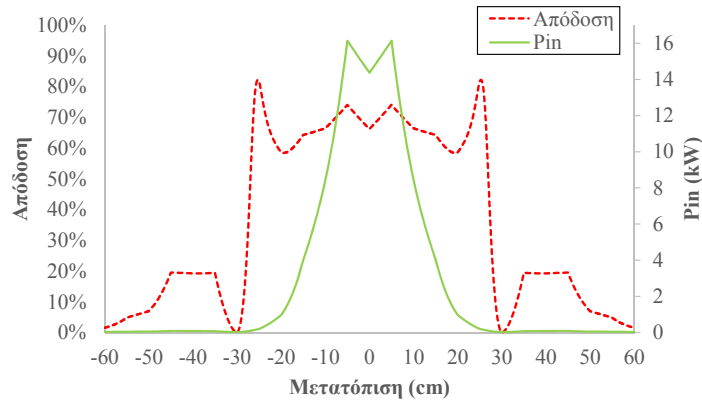
Επομένως, για την περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης και της εξεταζόμενης κυκλικής διάταξης, φαίνεται ότι συχνότητες λειτουργίας μικρότερες από τη συχνότητα που προτείνεται στο πρότυπο SAE J2954 [24] είναι πιο ευνοϊκές σχετικά με τη μεταφερόμενη ενέργεια και την απόδοση. Πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί ότι οι συχνότητες που προτείνονται στο συγκεκριμένο πρότυπο αναφέρονται στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης ελαφριού τύπου ηλεκτρικών οχημάτων. Η συγκεκριμένη συχνότητα δεν επιβάλλεται από το πρότυπο SAE J2954 σχετικά με μεγαλύτερου μεγέθους οχήματα, για τα οποία αναμένεται νέα έκδοση του προτύπου, όπου αναμένεται να εξετασθεί η εφαρμογή μικρότερων συχνοτήτων [24]. Πρέπει, επίσης, να αναφερθεί ότι η περίπτωση της δυναμικής φόρτισης απουσιάζει από το συγκεκριμένο πρότυπο αλλά και από τα υπόλοιπα πρότυπα που έχουν ήδη αναπτυχθεί σχετικά με την επαγωγική φόρτιση, όπως αναφέρεται και στην ενότητα 1.3. Ωστόσο, σύμφωνα με τα αποτελέσματα στην Εικόνα 4-12, είναι φανερό ότι η τιμή της συχνότητας λειτουργίας δύναται να επηρεάσει σημαντικά την τιμή της απόδοσης και της μεταφερόμενης ενέργειας στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, και πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα.

Πρέπει, βέβαια, να επισημανθεί ότι η συγκεκριμένη συχνότητα των 24.1kHz είναι το αποτέλεσμα της επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης για την κυκλική διάταξη με τα χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στην Εικόνα 4-7. Η εφαρμογή του προβλήματος βελτιστοποίησης σε έναν διαφορετικό μαγνητικό συζεύκτη ενδέχεται να οδηγήσει σε μία συχνότητα διαφορετική από τη βέλτιστη συχνότητα των 24.1kHz που επιλέγεται για τη συγκεκριμένη κυκλική διάταξη.

#### 4.4.2.2 Επίδραση της Αντίστασης Φορτίου, $R_L$ , στη λειτουργία του συστήματος

Πρέπει να σημειωθεί ότι η αντίσταση φορτίου σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων δεν παραμένει σταθερή, εκτός και εάν εφαρμοσθεί ένα κατάλληλο σύστημα ελέγχου στην πλευρά του δευτερεύοντος, όπως, για παράδειγμα αυτό που περιγράφηκε προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα, μεταβολές στο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας δύναται να οδηγήσουν σε μία διαφορετική τάση ή/και ρεύμα στα άκρα της μπαταρίας, μεταβάλλοντας την ισοδύναμη αντίσταση φορτίου. Επιπλέον, οι διαφορετικές τιμές της αμοιβαίας επαγωγής, αλλά και των αυτεπαγωγών, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή δύναται να επηρεάσουν σημαντικά την τιμή του ρεύματος που διαρρέει την πλευρά του δευτερεύοντος, μεταβάλλοντας αντίστοιχα και την ισοδύναμη αντίσταση φορτίου.

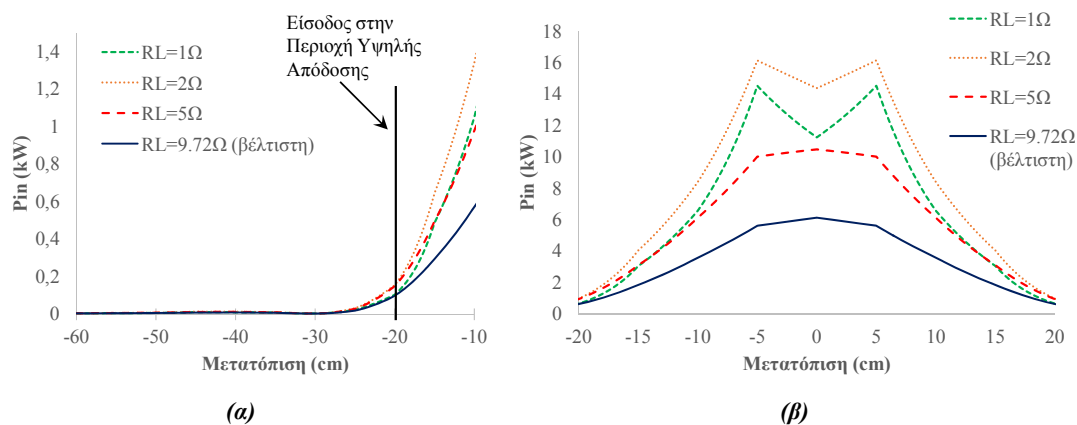




Εικόνα 4-13: Ισχύς εισόδου & απόδοση του συστήματος, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή για  $R_L=2\Omega$ .

Σε περίπτωση που το σύστημα λειτουργεί με μία αντίσταση φορτίου  $R_L$  διαφορετική από τη βέλτιστη ( $R_L=9,72\Omega$ ) που έχει υποδειχθεί από τη μέθοδο βελτιστοποίησης, η απόδοση του συστήματος δύναται να μεταβληθεί σημαντικά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-13. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση όπου  $R_L=2\Omega$ , η απόδοση του συστήματος παρουσιάζει δύο κορυφές, καμία από τις οποίες δε συμπίπτει με τη θέση του οχήματος ακριβώς πάνω από το φορτιστή. Αντίθετα, η ισχύς εισόδου αυξάνεται όταν το όχημα πλησιάζει το κέντρο του σταθμού. Το χαρακτηριστικό αυτό, κατά το οποίο η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται σε θέσεις του οχήματος όπου παρατηρείται χαμηλή απόδοση, υποδεικνύει το φαινόμενο διακλάδωσης που περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 3.3.

Επομένως, η εφαρμογή του συστήματος ελέγχου στο πρωτεύον για την ανίχνευση της θέσης του οχήματος με την παρακολούθηση της ισχύος εισόδου δε θα λειτουργήσει αποτελεσματικά στην περίπτωση μίας μη βέλτιστης τιμής για την αντίσταση φορτίου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-13. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του ρεύματος λειτουργίας στο σύστημα μόλις η ισχύς εισόδου γίνει μεγαλύτερη από μία συγκεκριμένη τιμή, υποδηλώνοντας ότι το όχημα εισέρχεται σε περιοχές με αυξημένη μεταφερόμενη ισχύ (Εικόνα 4-13), θα οδηγήσει σε λειτουργία με ιδιαίτερα χαμηλή απόδοση.



Εικόνα 4-14: Ισχύς εισόδου για διάφορες τιμές της αντίστασης φορτίου: (α) Είσοδος του οχήματος στο φορτιστή με  $I_1=10A$  και (β) Λειτουργία στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης με  $I_1=25A$ .

Επιπλέον, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-14-α, η ισχύς εισόδου μεταβάλλεται σημαντικά σε περίπτωση που η αντίσταση  $R_L$  λαμβάνει μεταβλητές τιμές καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση που το σύστημα λειτουργεί με  $I_1=I_{1,low}=10A$  όταν το όχημα εισέρχεται στο φορτιστή είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προσδιορισθεί η ακριβής τιμή της ισχύος εισόδου,  $P_{in,enter}$ , που υποδεικνύει τη μετάβαση στην περιοχή υψηλής απόδοσης σε περίπτωση μεταβλητής αντίστασης φορτίου. Η ακριβής τιμή της ισχύος εισόδου,  $P_{in,enter}$ , για

διαφορετικές τιμές της αντίστασης φορτίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-3. Επομένως, σε περίπτωση που η αντίσταση φορτίου δε διατηρείται σταθερή, η ισχύς εισόδου  $P_{in,enter}=98W$  που υποδεικνύει την είσοδο στην ΠΥΑ για τη βέλτιστη  $R_L=9,72\Omega$ , δεν υποδεικνύει, αντίστοιχα, την είσοδο στην ΠΥΑ για τις υπόλοιπες τιμές της αντίστασης φορτίου.

Παρόμοια, σε περίπτωση που το σύστημα λειτουργεί στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, με ένα ρεύμα πρωτεύοντος  $I_1=I_{1,max}=25A$ , δεν είναι δυνατό να προσδιορισθεί η ακριβής τιμή που υποδεικνύει την έξοδο από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης σε περίπτωση μη σταθερής αντίστασης φορτίου. Πιο συγκεκριμένα, τιμές της αντίστασης φορτίου διαφορετικές της βέλτιστης ( $9.72\Omega$ ) στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-14-β, οδηγούν σε μεταβολές της ισχύος εισόδου,  $P_{in}$ , με ανάλογες μεταβολές στην τιμή της ισχύος εισόδου που υποδεικνύει την έξοδο από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης,  $P_{in,leave}$ , όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-3.

**Πίνακας 4-3: Τιμές για την ισχύ εισόδου που υποδεικνύουν την είσοδο,  $P_{in,enter}$ , και την έξοδο,  $P_{in,leave}$ , από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης για διάφορες τιμές της αντίστασης φορτίου  $R_L$ .**

	$R_L=1\Omega$	$R_L=2\Omega$	$R_L=5\Omega$	$R_L=9.72\Omega$ (βέλτιστη)
$P_{in,enter}$ (W)	104	157	151	<b>98</b>
$P_{in,leave}$ (W)	652	973	943	<b>618</b>

Επομένως μία απλή μέτρηση της ισχύος εισόδου δεν υποδεικνύει την είσοδο και την έξοδο από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, εκτός αν η αντίσταση φορτίου  $R_L$  ορίζεται κατάλληλα από το πρόβλημα βελτιστοποίησης και διατηρείται σταθερή κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή, σύμφωνα με ένα σύστημα ελέγχου παρόμοιο με αυτό που περιγράφεται στην ενότητα 4.3.2.

#### 4.4.3 Προσομοίωση του συστήματος ελέγχου

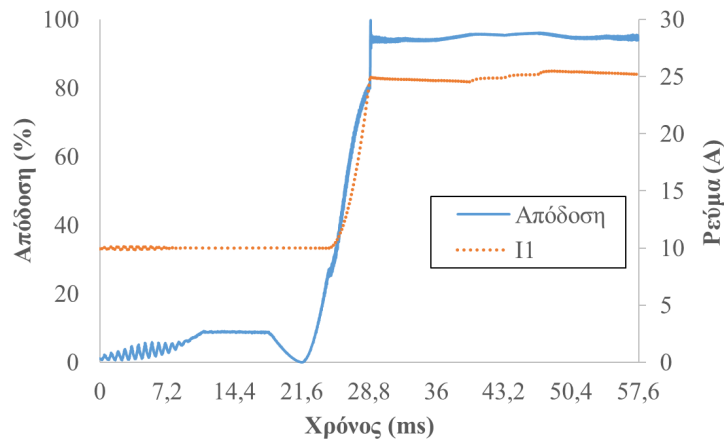
Προκειμένου να εξετασθεί η αποτελεσματική λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου, το σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-2, σχεδιάστηκε στο Matlab-Simulink. Οι τιμές των αυτεπαγωγών των τυλιγμάτων και της μεταξύ τους αμοιβαίας επαγωγής είναι οι τιμές που παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-8, ενώ οι τιμές των μεταβλητών  $\{f, C_1, C_2, R_L\}$  είναι οι βέλτιστες τιμές για μία Περιοχή Υψηλής Απόδοσης ίση με 40cm, όπως αυτές εξάγονται από τη μέθοδο βελτιστοποίησης.

**Πίνακας 4-4: Τιμές των στοιχείων του συστήματος**

Στοιχείο	Τιμή
DC πυκνωτές ( $C_{DC,in}, C_{DC,out}$ )	5mF
DC τάση εισόδου, $V_{in,DC}$	400V
DC αντίσταση τροφοδοσίας στην είσοδο, $R_{DC,in}$	0.2 $\Omega$
Τάση Μπαταρίας, $V_{DC,bat}$	300V
Αντίσταση σειράς μπαταρίας, $R_{s,bat}$	0.08 $\Omega$
Συχνότητα λειτουργίας, $f$	24.1kHz
Πυκνωτής αντιστάθμισης πρωτεύοντος, $C_1$	168.08nF
Πυκνωτής αντιστάθμισης δευτερεύοντος, $C_2$	159.24nF
Αντίσταση Φορτίου, $R_L$	9.72 $\Omega$
Αντίσταση των καλωδίων Litz ( $R_1, R_2$ )	0.0451 $\Omega$

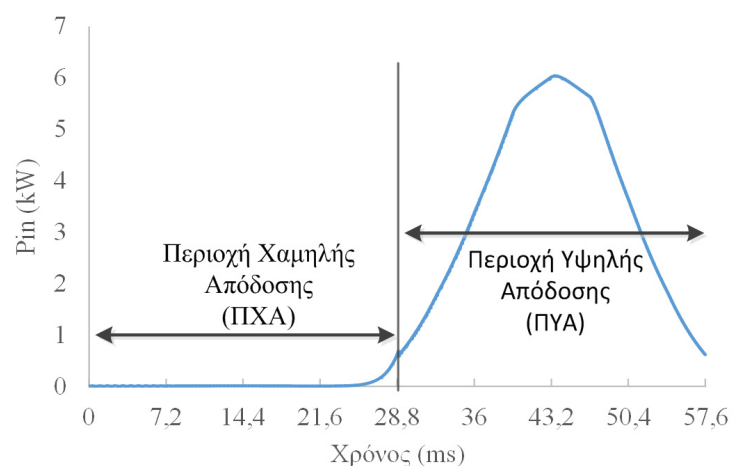
Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των καλωδίων Litz που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-1, προσδιορίζεται ότι για τη συχνότητα των 24.1kHz, η αντίσταση του πηνίου είναι ίση με  $R_1=R_2=0.0451\Omega$ . Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές για την εξεταζόμενη τοπολογία μπαταριών [118], η αντίσταση σειράς  $R_{S,bat}$  της μπαταρίας (Εικόνα 4-2) μπορεί να καθοριστεί

ίση με περίπου 0.08Ω. Οι υπόλοιπες τιμές των στοιχείων του συστήματος απεικονίζονται στον Πίνακα 4-4.



**Εικόνα 4-15:** Ρεύμα πρωτεύοντος και απόδοση του συστήματος σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

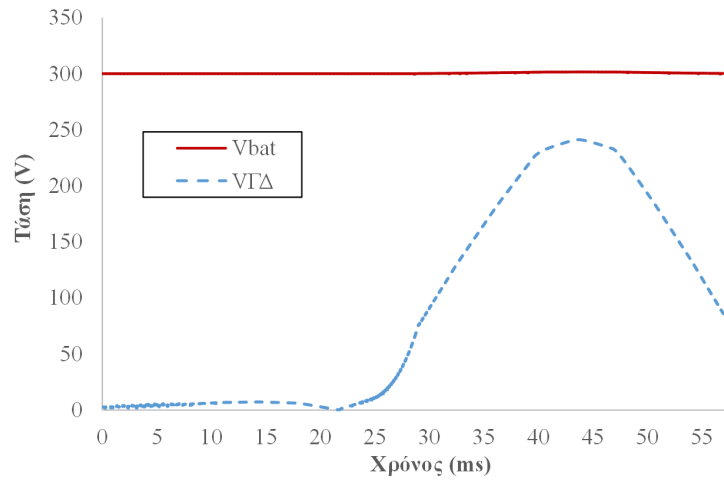
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με την απόδοση του συστήματος και το ρεύμα πρωτεύοντος παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-15, όπου φαίνεται ότι το όχημα εισέρχεται στο σταθμό και την Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης με ένα ρεύμα πρωτεύοντος ίσο με  $I_{1,low}=10A$ . Το σύστημα ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος παρακολουθεί την ισχύ εισόδου,  $P_{in}$ , η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-16 και μεταβάλλει το ρεύμα στη μέγιστη δυνατή τιμή,  $I_{1,max}=25A$ , μόλις η ισχύς εισόδου γίνει ίση με  $P_{in,enter}=98W$ , υποδεικνύοντας ότι το όχημα εισέρχεται στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης. Παρατηρήθηκε, ωστόσο, ότι το σύστημα απαιτεί ένα σημαντικό χρονικό διάστημα για να προσαρμοστεί στη στιγμιαία αλλαγή του ρεύματος από  $I_{1,low}=10A$  σε  $I_{1,max}=25A$ . Καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν όταν η επιθυμητή τιμή του ρεύματος  $I_{target}$  (Εικόνα 4-3) μεταβάλλεται σταδιακά από  $I_{1,low}$  σε  $I_{1,max}$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-15. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα πρωτεύοντος ακολουθεί ομαλά την τιμή-στόχο,  $I_{target}$ , και φτάνει γρήγορα στην επιθυμητή τιμή  $I_{1,max}$ . Όταν το όχημα κινείται κατά μήκος της Περιοχής Υψηλής Απόδοσης μία ισχύς εισόδου  $P_{in,leave}=618W$  (Εικόνα 4-16) υποδεικνύει ότι το όχημα εξέρχεται από την ΠΥΑ υποδηλώνοντας τη διακοπή της λειτουργίας του συστήματος.



**Εικόνα 4-16:** Ισχύς εισόδου του συστήματος επαγωγικής φόρτισης

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σύστημα ελέγχου στο δευτερεύον μεταβάλλει την τάση μεταξύ των σημείων Γ-Δ στην Εικόνα 4-2, σύμφωνα με τις (4.28)-(4.32), ώστε να επιτευχθεί μία σταθερή τιμή για την αντίσταση φορτίου  $R_L$ . Επομένως, το σύστημα ελέγχου στην πλευρά του δευτερεύοντος δεν παρεμβαίνει στην τάση της μπαταρίας, η οποία μπορεί να παραμείνει

σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης. Ειδικότερα, είναι εμφανές στην Εικόνα 4-17 ότι η τάση  $V_{\Gamma\Delta}$  μεταξύ των σημείων  $\Gamma$ - $\Delta$  παρουσιάζει μία διακύμανση καθώς το όχημα μεταβαίνει από την Περιοχή Υψηλής στην Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης, ωστόσο η τάση της μπαταρίας  $V_{bat}$  παραμένει σχεδόν σταθερή.

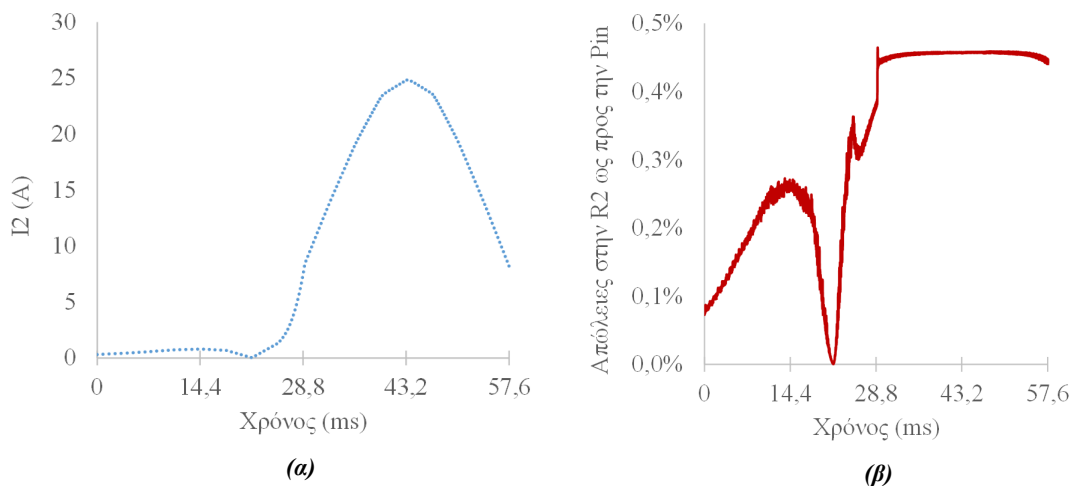


Εικόνα 4-17: Τάση Μπαταρίας ( $V_{bat}$ ) και τάση μεταξύ των σημείων  $\Gamma$ - $\Delta$  ( $V_{\Gamma\Delta}$ ) στην Εικόνα 4-2

Οι απώλειες στην αντίσταση του δευτερεύοντος πηνίου,  $R_2$ , μπορούν να υπολογισθούν ως:

$$P_{losses,R_2} = R_2 * I_{2,RMS}^2 \quad (4.41)$$

Η τιμή του ρεύματος στο δευτερεύον πηνίο,  $I_2$ , καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή δίνεται στην Εικόνα 4-18-α. Η μέγιστη επιτρεπόμενη RMS τιμή για το ρεύμα  $I_2$  στο δευτερεύον που είναι ίση με 25A, καθώς και η τιμή της αντίστασης  $R_2=0.0451\Omega$ , υποδεικνύουν, σύμφωνα και με την (4.41), μία μέγιστη τιμή απωλειών στην αντίσταση  $R_2$  ίση με  $0.451 * 25^2 = 28.2W$ . Στο σημείο της κίνησης όπου η τιμή του  $I_2$  είναι ίση με 25A η ισχύς εισόδου  $P_{in}$  είναι ίση με περίπου 6kW, οπότε οι απώλειες στην αντίσταση  $R_2$  είναι, μόλις, 0.47%, ως προς την ισχύ εισόδου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-18-β, καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης οι απώλειες της αντίστασης  $R_2$  παραμένουν πολύ μικρότερες από 0.5% της ισχύος εισόδου.



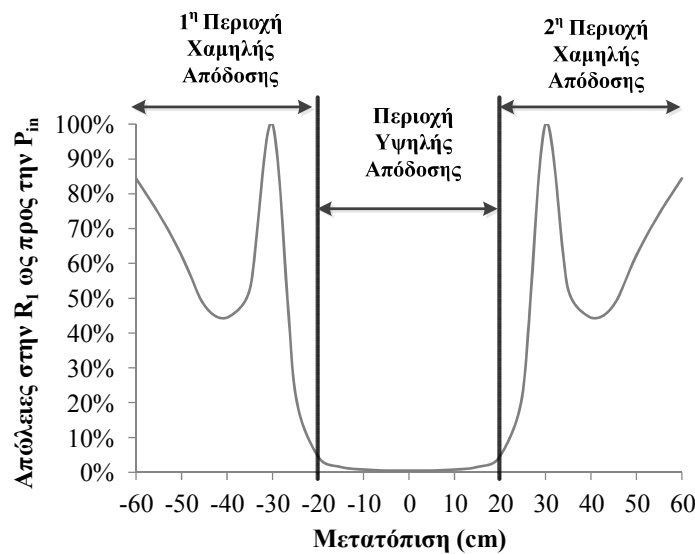
Εικόνα 4-18: (α) Ρεύμα στο δευτερεύον πηνίο και (β) απώλειες στην αντίσταση  $R_2$  ως προς την ισχύ εισόδου ( $P_{losses,R_2}/P_{in}$ )

Ένα σύστημα ελέγχου όπου η τάση στην πλευρά του δευτερεύοντος ελέγχεται παρόμοια με τον τρόπο που περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται και στην αναφορά [57], όπου

οι απώλειες στους διακόπτες  $S_1$  και  $S_2$  είναι μικρότερες από 1%. Επομένως, η λειτουργία των διακοπών στην πλευρά του δευτερεύοντος, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό αλλά και στην αναφορά [57], δεν υποδεικνύει σημαντικές απώλειες ούτε στο ζεύγος των διακοπών ούτε στην αντίσταση  $R_2$  του δευτερεύοντος πηνίου (Εικόνα 4-18-β).

Αν και οι απώλειες στην αντίσταση  $R_2$  διατηρούνται σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα, οι απώλειες στην αντίσταση  $R_1$  του πρωτεύοντος τυλίγματος δύναται να καταλάβουν αρκετά μεγάλο μέρος των συνολικών απωλειών στις περιοχές χαμηλής απόδοσης. Ειδικότερα, οι απώλειες στην αντίσταση  $R_1$  θα είναι ίσες με:

$$P_{losses,R_1} = R_1 * I_{1,RMS}^2 \quad (4.42)$$



Εικόνα 4-19: Απώλειες στην αντίσταση  $R_1$  ως προς την ισχύ εισόδου ( $P_{losses,R_1}/P_{in}$ )

Λόγω των μικρών ποσών ισχύος που μεταφέρονται στις περιοχές χαμηλής απόδοσης, οι απώλειες στην αντίσταση  $R_1$  αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος εισόδου,  $P_{in}$ , όπως αυτή ορίζεται στην (3.2). Είναι φανερό στην Εικόνα 4-19 ότι για ορισμένα σημεία μετατόπισης εντός της περιοχής χαμηλής απόδοσης, η ισχύς που παρέχεται στο σύστημα καταναλώνεται αποκλειστικά σχεδόν στην αντίσταση  $R_1$ . Η παροχή, επομένως, μεγάλων ποσών ισχύος στις περιοχές αυτές, με ένα μεγάλο ρεύμα  $I_{1,max}$ , θα έχει ως αποτέλεσμα ιδιαίτερα μεγάλες απώλειες ίσες με:

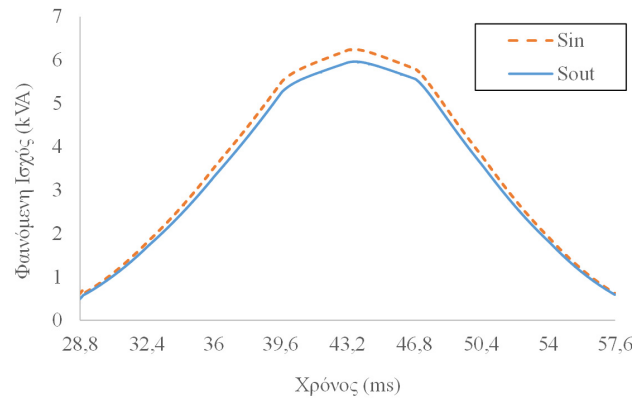
$$\text{Μη Εφαρμογή του συστήματος ελέγχου} \quad P_{losses,R_1} = R_1 * I_{1,max}^2 \quad (4.43)$$

Αντίθετα, με την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου το ρεύμα στις περιοχές αυτές περιορίζεται σε μία μικρότερη τιμή,  $I_{1,low}$ , με τις απώλειες στην αντίσταση  $R_1$  να είναι ίσες με:

$$\text{Εφαρμογή του συστήματος ελέγχου} \quad P_{losses,R_1} = R_1 * I_{1,low}^2 \quad (4.44)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις (4.43) και (4.44) είναι φανερό ότι η μη εφαρμογή του συστήματος ελέγχου θα έχει ως αποτέλεσμα απώλειες αυξημένες κατά  $(I_{1,max}/I_{1,low})^2$ . Για την περίπτωση που εξετάζεται με  $I_{1,max}=25A$  και  $I_{1,low}=10A$ , οι απώλειες στην αντίσταση  $R_1$  θα είναι αυξημένες κατά  $(25/10)^2 = 6.25$  φορές στην 1<sup>η</sup> περιοχή χαμηλής απόδοσης. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι χωρίς τον προτεινόμενο έλεγχο το σύστημα θα έπρεπε να λειτουργήσει και στη 2<sup>η</sup> περιοχή χαμηλής απόδοσης, αναμένεται διπλασιασμός των απωλειών αυτών (12.5 φορές μεγαλύτερες).

Οι απώλειες αυτές ισχύος στην αντίσταση  $R_1$  αναμένονται σε κάθε σημείο της κίνησης όταν το όχημα βρίσκεται στις περιοχές χαμηλής απόδοσης (-60cm έως -20cm & 20cm έως 60cm), με αποτέλεσμα μία παρόμοια αύξηση και στις αντίστοιχες απώλειες ενέργειας. Ειδικότερα στην περίπτωση που εξετάζεται, η μη εφαρμογή του συστήματος ελέγχου θα είχε ως αποτέλεσμα απώλειες ενέργειας στην αντίσταση  $R_1$  αυξημένες κατά περισσότερο από 10 φορές στις περιοχές χαμηλής απόδοσης.



**Εικόνα 4-20: Φαινόμενη ισχύς εισόδου,  $S_{in}$ , και εξόδου,  $S_{out}$ , στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης**

Για τη μελέτη της απόδοσης καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης και όχι σε μία μόνο συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ορίζεται η “ενεργειακή απόδοση” ως:

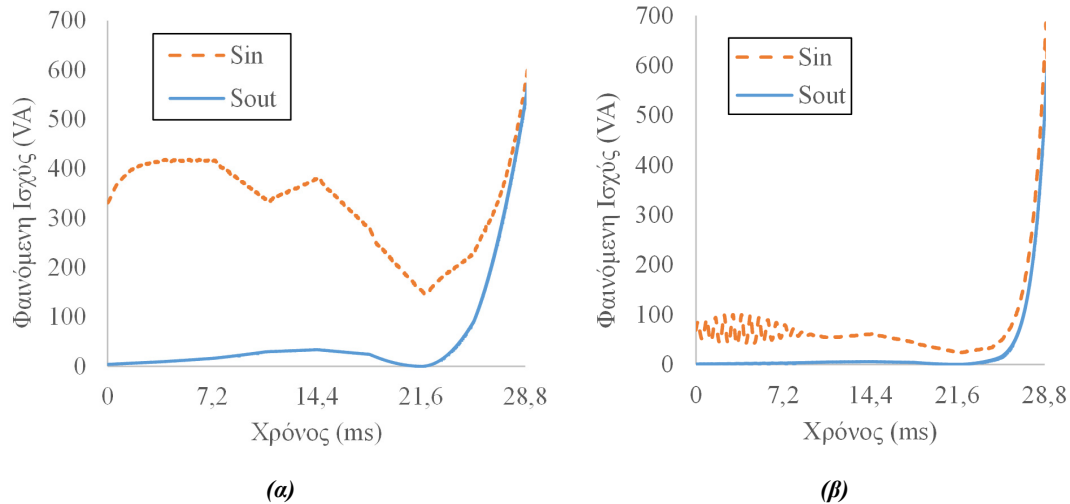
$$eff_{energy} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} |\widetilde{S}_{out}| dt}{\int_{t_1}^{t_2} |\widetilde{S}_{in}| dt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{out} dt}{\int_{t_1}^{t_2} \sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2} dt} \quad (4.45)$$

Η προσομοίωση του συστήματος στο Matlab-Simulink επιτρέπει την εύρεση των τιμών για τους όρους  $P_{out}$  και  $\sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2}$  καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης. Ειδικότερα, υπολογίζονται οι τιμές των  $P_{out}$ ,  $P_{in}$  και  $Q_{in}$  λαμβάνοντας υπόψιν δεδομένα για το χρονικό διάστημα μίας περιόδου λειτουργίας του συστήματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας των 24,1kHz. Στη συνέχεια, ο υπολογισμός των όρων  $\int_{t_1}^{t_2} P_{out} dt$  και  $\int_{t_1}^{t_2} \sqrt{P_{in}^2 + Q_{in}^2} dt$  στην (4.45), πραγματοποιείται σύμφωνα με τα αριθμητικά δεδομένα που εξάγονται για τις τιμές των  $P_{out}$ ,  $P_{in}$  και  $Q_{in}$ .

Ειδικότερα, η φαινόμενη ισχύς εισόδου  $|\widetilde{S}_{in}|$  και εξόδου  $|\widetilde{S}_{out}|$  για την περιοχή Υψηλής Απόδοσης απεικονίζονται στην Εικόνα 4-20. Η “ενεργειακή απόδοση”, σύμφωνα με την (4.45), για την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης μεταξύ των χρονικών διαστημάτων  $t_{enter}$  και  $t_{leave}$ , για τις μετατοπίσεις  $x_{enter}$  and  $x_{leave}$  αντίστοιχα, υπολογίζεται ίση με 95,14%.

Σε περίπτωση που το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου δεν εφαρμοζόταν στην πλευρά του πρωτεύοντος δε θα υπήρχε η δυνατότητα ελέγχου του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο, το οποίο θα έμενε σταθερό και ίσο με 25A καθ' όλη τη διάρκεια κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Η διαδικασία φόρτισης θα ξεκίναγε με τη λειτουργία στην Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης, με την ισχύ εισόδου (Εικόνα 4-21-α) να είναι ιδιαίτερα μεγάλη λόγω του αυξημένου ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο. Σαφώς, λόγω της ιδιαίτερα χαμηλής απόδοσης στην περιοχή αυτή, η ισχύς που μεταφέρεται στο όχημα είναι πολύ μικρότερη της αντίστοιχης ισχύος εισόδου (Εικόνα 4-21-α). Επιπλέον, χωρίς τη δυνατότητα ανίχνευσης της θέσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή με τη χρήση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου δε θα ήταν δυνατό να ανιχνευθεί η μετάβαση από την Περιοχή Υψηλής στην Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης (ΠΧΑ), με αποτέλεσμα τη συνέχιση λειτουργίας του συστήματος καθώς το όχημα εισέρχεται στη 2<sup>η</sup>

αυτή ΠΧΑ. Η λειτουργία του συστήματος σε δύο Περιοχές Χαμηλής Απόδοσης με τη μέγιστη δυνατή ισχύ στην είσοδο μειώνει σημαντικά τη συνολική “ενεργειακή απόδοση”, η οποία καθ’ όλη τη διάρκεια της κίνησης υπολογίζεται ίση με 83%, σύμφωνα με την (4.45).



**Εικόνα 4-21: Φαινόμενη ισχύς εισόδου και εξόδου στην Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης (α) χωρίς και (β) με την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος.**

Με την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου στην πλευρά του πρωτεύοντος, μία ιδιαίτερα χαμηλή απόδοση παρουσιάζεται και πάλι καθώς το όχημα εισέρχεται πάνω στο φορτιστή (εισέρχεται, δηλαδή, στην πρώτη Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης). Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, η ισχύς εισόδου διατηρείται σε πολύ μικρά επίπεδα (Εικόνα 4-21-β), λόγω του χαμηλού ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο. Επιπλέον, η εκτίμηση της θέσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή επιτρέπει τον τερματισμό της διαδικασίας φόρτισης μόλις το όχημα εξέλθει από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται μία σημαντική αύξηση στη συνολική “ενεργειακή απόδοση”, η οποία, σύμφωνα με την (4.45), υπολογίζεται ίση με 93.9%.

#### 4.5 Περιορισμός των ΗΜ πεδίων στη δυναμική φόρτιση

Σύμφωνα με τον ορισμό της μεταφερόμενης ενέργειας στην (4.14), αλλά και τον ορισμό της ισχύος στην (3.1), είναι σημαντικό ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης να λειτουργεί με ένα ρεύμα υψηλής τιμής στην πλευρά του πρωτεύοντος, ώστε όσο το δυνατό υψηλότερα ποσά ενέργειας να μεταφέρονται στην μπαταρία του οχήματος. Το ρεύμα αυτό, ωστόσο δύναται να παράγει ιδιαίτερα ισχυρά ΗΜ πεδία γύρω από το φορτιστή. Λαμβάνοντας υπόψιν τη δυναμική φόρτιση, όπου το όχημα λαμβάνει διάφορες θέσεις πάνω από το φορτιστή κατά τη διάρκεια της κίνησης, αναμένεται να παρουσιαστούν περιπτώσεις όπου τα ΗΜ πεδία δε τηρούν τα όρια που τίθενται από τις αντίστοιχες οδηγίες-συστάσεις προκειμένου να αποφευχθούν πιθανές βιολογικές επιδράσεις τόσο για τους επιβάτες εντός του οχήματος όσο και για τους διερχόμενους πεζούς κοντά στον φορτιστή.

Ειδικότερα, ένα από τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται συχνά για την αξιολόγηση της ασφάλειας των ατόμων που εκτίθενται σε ΗΜ πεδία σχετικά με τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής [49],[103],[57]. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.6.1 το όριο που προτείνεται από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο για το ευρύ κοινό σχετικά με το μέγεθος αυτό είναι ίσο με 6,25μΤ. Αντίθετα ένα πολύ μεγαλύτερο όριο τίθεται από τις οδηγίες της ICNIRP (27μΤ). Οι οδηγίες αυτές δε λαμβάνουν, ωστόσο, υπόψιν τους αλληλεπιδράσεις του μαγνητικού πεδίου με ιατρικά εμφυτεύματα ή ιατρικές συσκευές, όπως για παράδειγμα

βηματοδότες, για την ασφαλή λειτουργία των οποίων απαιτείται μία μικρότερη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής [24],[45].

Για τον υπολογισμό των ΗΜ πεδίων είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ληφθεί υπόψιν η θωράκιση αλουμινίου που χρησιμοποιείται στην περίπτωση διατάξεων επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, το σασί του οχήματος που είναι συνήθως κατασκευασμένο από ατσάλι ή/και αλουμίνιο περιορίζει σημαντικά τα ΗΜ πεδία που αναπτύσσονται όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα της ανάλυσης στη συνέχεια. Για το λόγο αυτό, δεν αρκεί η μαγνητοστατική ανάλυση για τη μελέτη των ΗΜ πεδίων, αλλά είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψιν η ανάπτυξη δινορρευμάτων τόσο στο σασί του οχήματος, όσο και στη θωράκιση αλουμινίου της διάταξης. Στην ενότητα αυτή, επομένως, οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται στο Ansoft Maxwell, χρησιμοποιώντας τη δυνατότητα που δίνει το ίδιο πρόγραμμα για ανάλυση δινορρευμάτων. Η μεταβολή των ρευμάτων στη διάρκεια μίας περιόδου λειτουργίας του συστήματος, απαιτεί τη γνώση τόσο της τιμής των ρευμάτων στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος όσο και της φάσης μεταξύ τους.

Σύμφωνα με τη (2.42), το ρεύμα στην πλευρά του δευτερεύοντος για κάθε μετατόπιση  $x_i$  του δευτερεύοντος πάνω από το πρωτεύον καθώς το όχημα κινείται (Εικόνα 3-1-α) θα είναι ίσο με:

$$\widetilde{I}_{2-i} = \frac{j\omega M_i}{R_L + R_2 + j(\omega L_{2-i} - \frac{1}{\omega C_2})} \widetilde{I}_{1-i} \quad (4.46)$$

Γράφοντας το ρεύμα  $\widetilde{I}_{2-i}$  σύμφωνα με την (4.47) και λαμβάνοντας υπόψιν την (4.46), το μέτρο του ρεύματος στην πλευρά του δευτερεύοντος θα δίνεται από την (4.48).

$$\widetilde{I}_{2-i} = |\widetilde{I}_{2-i}|^{<math>\angle\varphi_i</math> \quad (4.47)$$

$$|\widetilde{I}_{2-i}| = \frac{\omega M}{\sqrt{(\omega L_{2-i} - \frac{1}{\omega C_2})^2 + (R_L + R_2)^2}} |\widetilde{I}_{1-i}| \quad (4.48)$$

Θεωρώντας μηδενική φάση για το ρεύμα  $\widetilde{I}_{1-i}$ , η φάση του ρεύματος  $\widetilde{I}_{2-i}$  θα είναι  $\varphi_i = \tan^{-1}(\text{Im}\{\widetilde{I}_{2-i}\}/\text{Re}\{\widetilde{I}_{2-i}\})$  και σύμφωνα με την (4.46):

$$\varphi_i = \tan^{-1}\left(\frac{R_L + R_2}{\omega L_{2-i} - \frac{1}{\omega C_2}}\right) \quad (4.49)$$

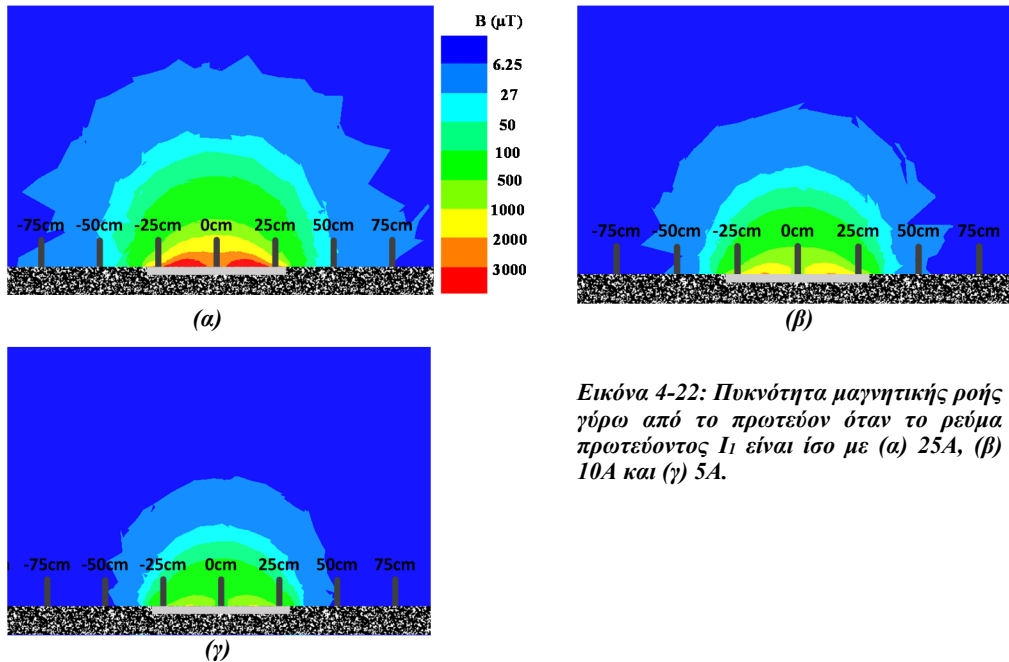
Λαμβάνοντας υπόψιν το μαγνητικό συζεύκτη που περιγράφηκε στην υποενότητα 4.4.1, και τις τιμές για την αντίσταση φορτίου, τους πυκνωτές αντιστάθμισής και τη συχνότητα ίσες με αυτές που προκύπτουν από την εφαρμογή του προβλήματος βελτιστοποίησης στην υποενότητα 4.4.2, το μέτρο και η φάση του ρεύματος  $\widetilde{I}_2$  δύναται να υπολογισθούν σύμφωνα με τις (4.48) και (4.49) για κάθε μετατόπιση  $x_i$  της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή.

#### ✓ Λειτουργία Μόνο Πρωτεύοντος

Η λειτουργία του φορτιστή με ένα ιδιαίτερα μεγάλο ρεύμα στην πλευρά του πρωτεύοντος που θα εξασφαλίσει μεταφορά υψηλών ποσών ενέργειας, προϋποθέτει ότι ο φορτιστής θα λειτουργεί με το ρεύμα αυτό αναμένοντας την άφιξη του οχήματος. Σε περίπτωση μη εφαρμογής κάποιου ειδικά σχεδιασμένου συστήματος ελέγχου, όταν κάποιο όχημα δε βρίσκεται πάνω από το φορτιστή αναμένεται ένα μεγάλο ΗΜ πεδίο γύρω από το φορτιστή, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-22-α. Το σκούρο μπλε χρώμα στην Εικόνα 4-22-α

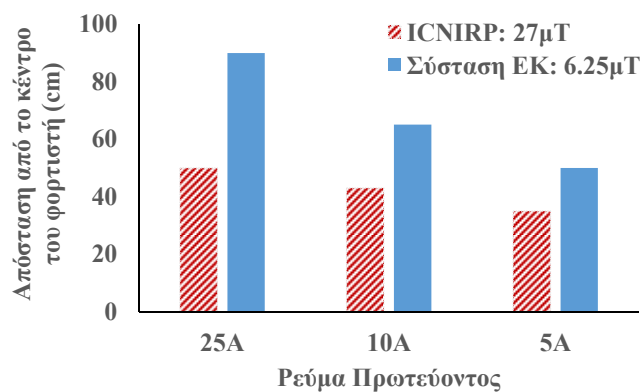


απεικονίζει τις περιοχές όπου η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι εντός του ορίου που προτείνεται από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (6,25μT). Ένα πιο ανοιχτό μπλε χρώμα στην εικόνα υποδεικνύει τις αντίστοιχες περιοχές όπου η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι εντός του ορίου των 27μT που ορίζεται από τις οδηγίες της ICNIRP. Τα υπόλοιπα χρώματα υποδεικνύουν πολύ μεγαλύτερες τιμές για την πυκνότητα μαγνητικής ροής.



Εικόνα 4-22: Πυκνότητα μαγνητικής ροής γύρω από το πρωτεύον όταν το ρεύμα πρωτεύοντος  $I_1$  είναι ίσο με (α) 25A, (β) 10A και (γ) 5A.

Είναι φανερό στην Εικόνα 4-22-α ότι το όριο που τίθεται από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο ικανοποιείται σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 90 εκατοστών δεξιά και αριστερά του πρωτεύοντος. Η αντίστοιχη απόσταση σχετικά με το όριο που τίθεται από τις οδηγίες της ICNIRP είναι ίση με 50cm. Ωστόσο, το γεγονός ότι οι οδηγίες αυτές δε λαμβάνουν υπόψιν τους αλληλεπιδράσεις του μαγνητικού πεδίου με ιατρικές συσκευές δεν τις κάνει εύκολα εφαρμόσιμες στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Είναι επομένως φανερό στην Εικόνα 4-22-α ότι το HM πεδίο λόγω της λειτουργίας του φορτιστή θα μπορούσε να επηρεάσει πεζούς που διέρχονται από ένα κοντινό στο φορτιστή πεζοδρόμιο.



Εικόνα 4-23: Αποστάσεις αριστερά και δεξιά από το κέντρο του φορτιστή όπου ικανοποιούνται τα όρια σχετικά με την πυκνότητα μαγνητικής ροής που τίθενται από τις οδηγίες ICNIRP και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο.

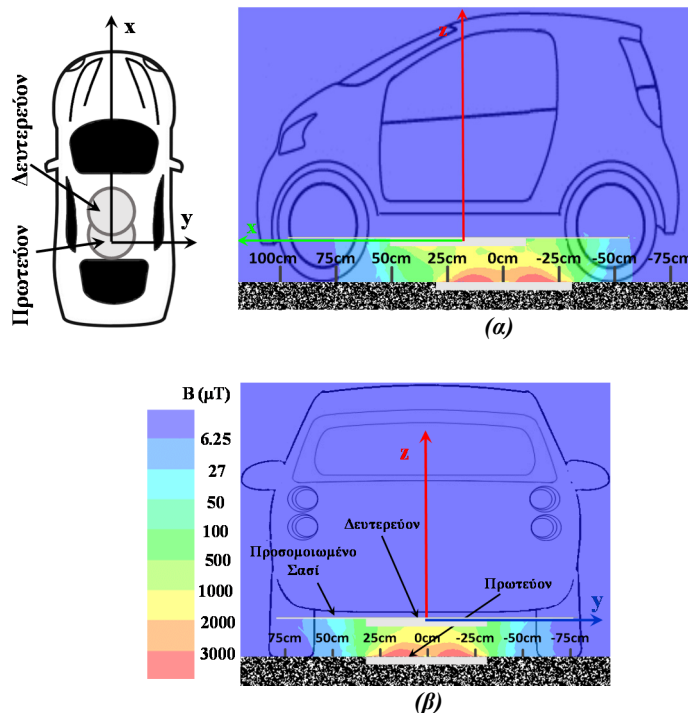
Ωστόσο, τα HM πεδία γύρω από το φορτιστή μπορούν να περιορισθούν σημαντικά σε περίπτωση που το πρωτεύον λειτουργεί με ένα χαμηλότερο ρεύμα (Εικόνα 4-22-β & γ). Η λειτουργία αυτή μπορεί εύκολα να επιτευχθεί με τη χρήση του συστήματος ελέγχου που περιγράφηκε στην ενότητα 4.3 αυτού του κεφαλαίου. Ειδικότερα, το ρεύμα του πρωτεύοντος λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του,  $I_{max}$ , όταν το όχημα εισέρχεται στην περιοχή υψηλής απόδοσης

(Εικόνα 4-1-β). Όταν δεν υπάρχει κάποιο όχημα πάνω από το σταθμό φόρτισης, ο φορτιστής λειτουργεί στην περιοχή χαμηλής απόδοσης, οπότε το ρεύμα στο πρωτεύον λαμβάνει μία χαμηλότερη τιμή  $I_{low}$ . Είναι φανερό στην Εικόνα 4-23 ότι χρήση του προτεινόμενου ελέγχου με τον περιορισμό του ρεύματος του πρωτεύοντος σε 5 ή 10Α δύναται να εξασφαλίσει ότι τα όρια που τίθενται από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, αλλά και τις οδηγίες της ICNIRP, τηρούνται σε μικρότερες αποστάσεις από το κέντρο του φορτιστή.

Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι ακόμα και για πολύ μικρές τιμές του ρεύματος η πυκνότητα μαγνητικής ροής ακριβώς πάνω από το πρωτεύον λαμβάνει ιδιαίτερα μεγάλες τιμές (Εικόνα 4-22-γ). Επομένως, επιπλέον μέτρα θα πρέπει να ληφθούν, ώστε να αποφεύγεται η διέλευση πεζών πάνω από τον εν λειτουργία φορτιστή (τοποθέτηση του φορτιστή σε σημεία του δρόμου όπου δεν αναμένεται να διέλθουν πεζοί κλπ.)

✓ **ΗΜ Πεδία σε οχήματα μικρών διαστάσεων**

Το σασί του οχήματος το οποίο κατασκευάζεται συνήθως από ατσάλι ή/και αλουμίνιο δύναται να επηρεάσει σημαντικά τα ΗΜ πεδία που παράγονται λόγω των ρευμάτων που διαρρέουν το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα του μαγνητικού συζεύκτη. Μία συνήθης πρακτική στη βιβλιογραφία είναι η προσομοίωση του κάτω μέρους του σασί του οχήματος με μία τετράγωνη πλάκα διαστάσεων 1.5m X 1.5m ώστε να ληφθούν υπόψιν ακόμα και οχήματα ιδιαίτερα μικρών διαστάσεων [24], [119]-[120]. Για τη μελέτη που πραγματοποιείται σε αυτή την υποενότητα λαμβάνεται υπόψιν το σασί που περιγράφεται στην αναφορά [24]. Ειδικότερα το σασί αποτελείται από μία πλάκα ατσάλι 1.1m X 1.1m και μία πλάκα αλουμινίου 1.5m X 1.5m. Λαμβάνοντας υπόψιν τις μελέτες στις αναφορές [24],[119]-[121], το πάχος κάθε πλάκας ορίζεται σε 1mm.

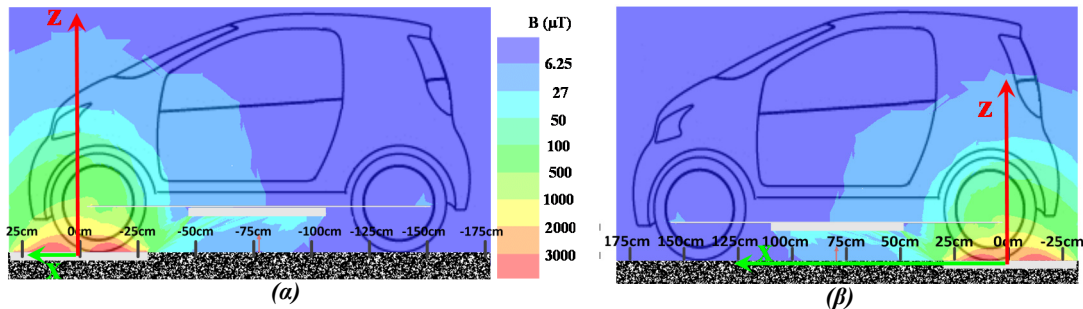


Εικόνα 4-24: Πυκνότητα μαγνητικής ροής γύρω από το πρωτεύον πηνίο, που λειτουργεί με  $I_{1,max}=25A$ , σε μία οριζόντια μετατόπιση 20cm κατά τον άξονα x. Απεικονίζονται οι επιφάνειες που ορίζονται από τον άξονα z και τον άξονα (α) x και (β) y.

Για μικρές μετατοπίσεις κατά τον άξονα κίνησης (άξονας x στην Εικόνα 4-24) το σασί του οχήματος καλύπτει πλήρως το πρωτεύον του συζεύκτη. Επομένως, ακόμα και όταν το σύστημα λειτουργεί με ένα μέγιστο ρεύμα στην πλευρά του πρωτεύοντος το σασί περιορίζει σημαντικά

την πυκνότητα μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του οχήματος. Ειδικότερα, είναι φανερό στην Εικόνα 4-24-α ότι υψηλές τιμές για την πυκνότητα της μαγνητικής ροής περιορίζονται στο κάτω μέρος του οχήματος μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος.

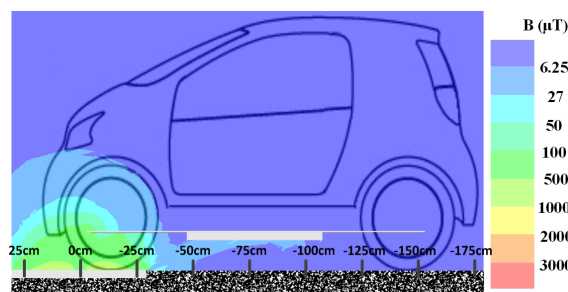
Επιπλέον, το σασί του οχήματος περιορίζει την πυκνότητα μαγνητικής ροής στα δεξιά και αριστερά του οχήματος όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-24-β. Ειδικότερα, όταν ένα όχημα βρίσκεται πάνω από το φορτιστή τα HM πεδία που αναπτύσσονται φαίνεται να περιορίζονται μόνο στην περιοχή που καλύπτεται από το όχημα, χωρίς να παρουσιάζεται κάποιος κίνδυνος για διερχόμενους πεζούς.



Εικόνα 4-25: Πυκνότητα μαγνητικής ροής γύρω από το πρωτεύον πηνίο, που λειτουργεί με  $I_{1,max}=25A$ , όταν το όχημα (α) εισέρχεται στο φορτιστή με μία μετατόπιση  $-80cm$  και (β) εξέρχεται από το φορτιστή με μία μετατόπιση ίση με  $+80cm$ .

Ωστόσο, καθώς το όχημα κινείται στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, αναμένονται θέσεις του οχήματος πάνω από το φορτιστή, όπου το σασί δεν καλύπτει πλήρως το πρωτεύον της διάταξης. Για παράδειγμα, όταν το όχημα εισέρχεται στο φορτιστή με μία μετατόπιση ίση με  $-80cm$  (Εικόνα 4-25-α) μία μεγάλης έντασης πυκνότητα μαγνητικής ροής αναμένεται ακόμα και μέσα στην καμπίνα επιβατών του οχήματος. Παρόμοια, μία αυξημένη πυκνότητα μαγνητικής ροής αναμένεται όταν το όχημα εξέρχεται από το σταθμό με μία μετατόπιση  $+80cm$  (Εικόνα 4-25-β).

Ωστόσο, οι υψηλές αυτές τιμές των HM πεδίων μπορούν να περιορισθούν σημαντικά με την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου. Ειδικότερα, για μία μετατόπιση ίση με  $-80cm$ , το όχημα δεν έχει εισέλθει ακόμα στην περιοχή υψηλής απόδοσης (η οποία όπως περιγράφηκε στην υποενότητα 4.4.2 ορίζεται μεταξύ  $-20cm$  και  $+20cm$ ). Επομένως, το σύστημα λειτουργεί με ένα μικρότερο ρεύμα στο πρωτεύον ίσο με  $I_{1,low}$ . Σε περίπτωση που το ρεύμα αυτό ορίζεται ίσο με  $5A$ , και για την περίπτωση μίας μετατόπισης ίσης με  $-80cm$  η πυκνότητα μαγνητικής ροής λόγω της λειτουργίας του επαγωγικού φορτιστή περιορίζεται σημαντικά (Εικόνα 4-26) και είναι πλέον εντός των ορίων που θέτει το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο.



Εικόνα 4-26: Πυκνότητα μαγνητικής ροής γύρω από το πρωτεύον πηνίο, με την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου που μειώνει το ρεύμα πρωτεύοντος σε μία τιμή  $I_{1,low}=5A$ . Το όχημα εισέρχεται στο φορτιστή με μία μετατόπιση ίση με  $-80cm$ .

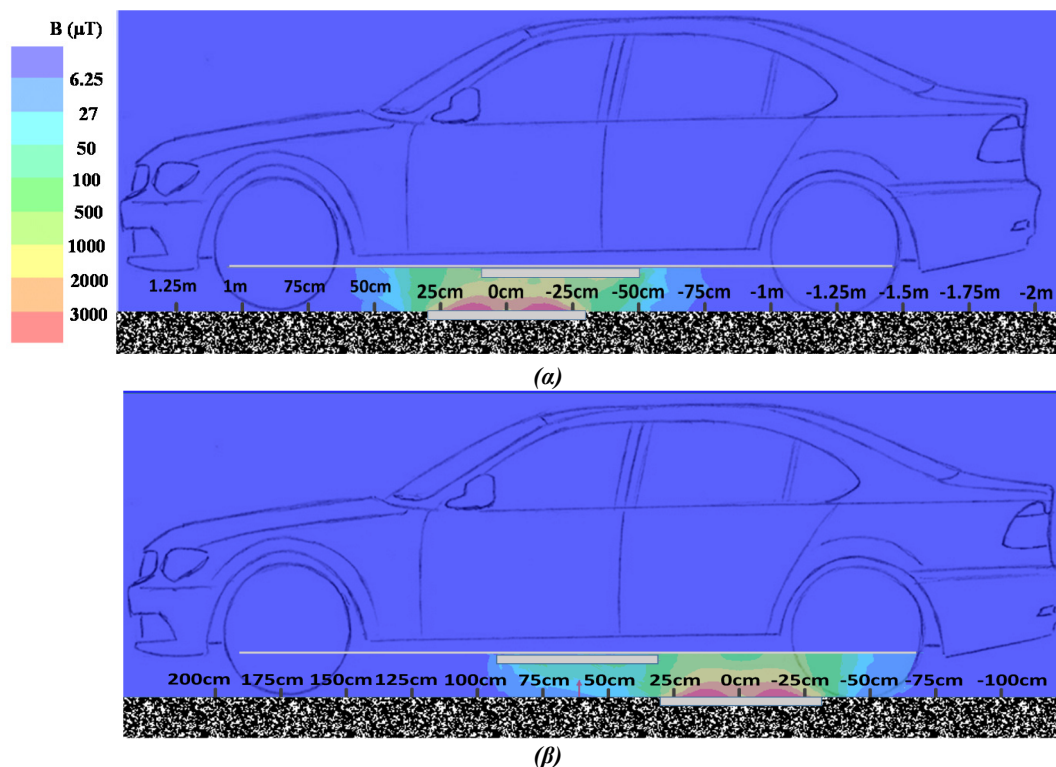
Επιπλέον με την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου, όταν το όχημα εξέλθει από την περιοχή υψηλής απόδοσης (μετατοπίσεις μεγαλύτερες των  $+20cm$ ), ισχύς παύει να

παρέχεται στο πρωτεύον, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται οι ιδιαίτερα μεγάλες τιμές για την πυκνότητα μαγνητικής ροής που εμφανίζονται για μεγαλύτερες μετατοπίσεις, όπως για παράδειγμα η μετατόπιση των +80cm που απεικονίζεται στην Εικόνα 4-25-β.

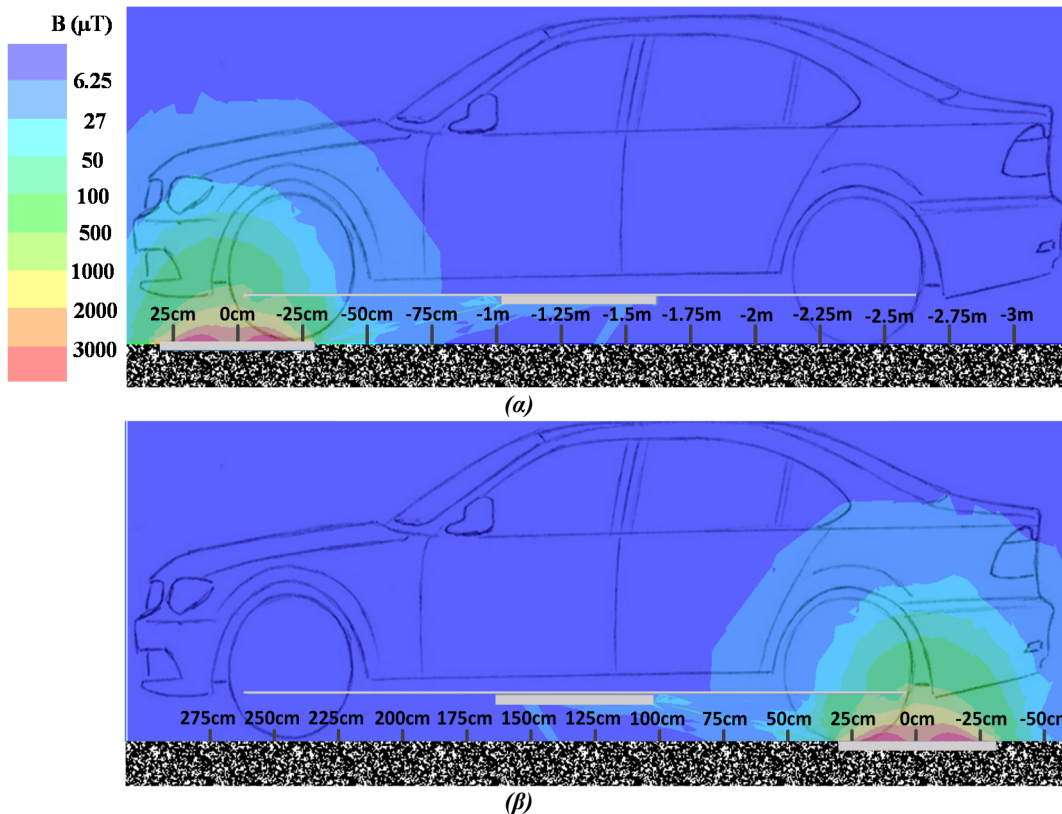
#### ✓ ΗΜ Πεδία σε οχήματα μεγαλύτερων διαστάσεων

Για να εξετασθούν τα ΗΜ πεδία που αναπτύσσονται στην περίπτωση επαγωγικής φόρτισης οχημάτων μεγαλύτερων διαστάσεων το μήκος του σασί επεκτείνεται σε 2.5m. Σε μικρότερων διαστάσεων οχήματα, όταν το σασί καλύπτει πλήρως το πρωτεύον του μαγνητικού συζεύκτη (Εικόνα 4-24) η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι εντός των ορίων που τίθενται από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο τόσο εντός της καμπίνας επιβατών όσο και στο εξωτερικό του οχήματος όσον αφορά στους διερχόμενους πεζούς. Μία παρόμοια κατάσταση αναμένεται και στην περίπτωση οχημάτων μεγαλύτερων διαστάσεων με ένα μεγαλύτερο σασί (Εικόνα 4-27-α). Βέβαια, στην περίπτωση αυτή το μεγαλύτερο σασί εξασφαλίζει ότι η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων ακόμα και για σχετικά μεγάλες μετατοπίσεις, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-27-β.

Ακόμα και για την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψιν ένα μεγαλύτερο σασί, κατά την κίνηση του οχήματος αναμένονται περιπτώσεις όπου το σασί δε θα καλύπτει πλήρως το πρωτεύον. Για παράδειγμα στην περίπτωση που το όχημα εισέρχεται ή εξέρχεται από το φορτιστή με μία μετατόπιση -130cm ή +130cm αντίστοιχα (Εικόνα 4-28), τα ΗΜ πεδία που αναπτύσσονται είναι ιδιαίτερα αυξημένα όταν το πρωτεύον λειτουργεί με το μέγιστο ρεύμα  $I_{1,max}$ . Είναι φανερό στην Εικόνα 4-28 ότι το όριο που τίθεται από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο σχετικά με την πυκνότητα μαγνητικής ροής (6.25 $\mu$ T), δεν ικανοποιείται σε αρκετά σημεία εντός της καμπίνας των επιβατών.

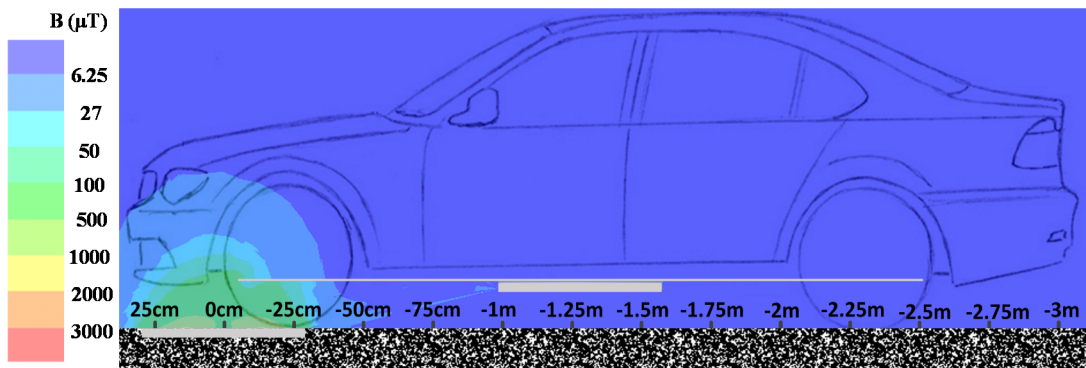


Εικόνα 4-27: Πυκνότητα μαγνητικής ροής γύρω από το πρωτεύον πηνίο, το οποίο λειτουργεί με ένα ρεύμα  $I_{1,max}=25A$ , για μία μετατόπιση μεταξύ πρωτεοντος και δευτεροντος ίση με (α) -20cm και (β) +60cm



Εικόνα 4-28: Πυκνότητα μαγνητικής ροής γύρω από το πρωτεύον πηνίο, το οποίο λειτουργεί με ένα ρεύμα  $I_{1,max}=25A$ , για μία μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ίση με (α)  $-130cm$  και (β)  $+130cm$ .

Ωστόσο, το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου δύναται να περιορίσει τα ΗΜ πεδία που αναπτύσσονται θέτοντας το ρεύμα σε μία μικρότερη τιμή, προτού το όχημα εισέλθει στο φορτιστή, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4-29. Ειδικότερα, σύμφωνα με το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου, η λειτουργία του συστήματος ξεκινάει με ένα ρεύμα  $I_{1,low}$  με το φορτιστή να αναμένει την άφιξη του οχήματος. Όταν το όχημα εισέλθει στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης (μετατοπίσεις μεταξύ  $-20cm$  και  $+20cm$ ) τότε το σύστημα ελέγχου θέτει το ρεύμα στη μέγιστη δυνατή τιμή,  $I_{1,max}$ . Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως και όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-27-α τα ΗΜ πεδία είναι εντός των επιτρεπτών ορίων για αυτές τις μετατοπίσεις μεταξύ  $-20cm$  και  $+20cm$ . Μόλις το όχημα εξέλθει από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης (μετατοπίσεις μεγαλύτερες από  $+20cm$ ) το σύστημα ελέγχου διακόπτει την παροχή ενέργειας στο πρωτεύον, με αποτέλεσμα καταστάσεις λειτουργίας όπως αυτή που απεικονίζονται στην Εικόνα 4-28-β να αποφεύγονται.



Εικόνα 4-29: Πυκνότητα μαγνητικής ροής γύρω από το πρωτεύον πηνίο, για μία μετατόπιση ίση με  $-130cm$ , με την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου το οποίο θέτει το ρεύμα στο πρωτεύον ίσο με  $I_{1,low}=5A$ .

## 4.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό προτάθηκε μία μέθοδος βελτιστοποίησης με στόχο τη μεγιστοποίηση της ενέργειας που μεταφέρεται στο όχημα κατά τη λειτουργία ενός συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, επιτυγχάνοντας παράλληλα μία ιδιαίτερα υψηλή απόδοση. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε σε έναν κυκλικό συζεύκτη διαμέτρου 60 εκατοστών υποδεικνύοντας την ανάγκη για συμβιβασμό μεταξύ της ενέργειας που μεταφέρεται και της απόδοσης που είναι δυνατό να επιτευχθεί. Ωστόσο, μία προσεκτική επιλογή της Περιοχής Υψηλής Απόδοσης, επιτρέπει τη μεταφορά μίας σημαντικής ποσότητας ενέργειας, με μία απόδοση μεγαλύτερη από 95%.

Προτάθηκε, επίσης, μία μέθοδος ανίχνευσης της θέσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή, η οποία δεν απαιτεί τη χρήση επιπλέον εξοπλισμού (αισθητήρες κλπ.), εξαλείφοντας επίσης την ανάγκη για ασύρματη επικοινωνία μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Ειδικότερα, η προτεινόμενη μέθοδος επιτρέπει την ανίχνευση της θέσης του οχήματος χρησιμοποιώντας την ισχύ εισόδου στην πλευρά του πρωτεύοντος. Αντίθετα με παρόμοιες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία, η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί αποτελεσματικά λαμβάνοντας υπόψιν περιορισμούς που σχετίζονται με την απόδοση του συστήματος.

Εξετάστηκε, επίσης, η επίδραση της τιμής της συχνότητας λειτουργίας και της αντίστασης φορτίου στον εξεταζόμενο κυκλικό συζεύκτη. Σχετικά με τη συχνότητα λειτουργίας, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι υψηλές συχνότητες (περίπου 85kHz) που προτείνονται σε πρότυπα για ελαφριού τύπου οχήματα και συστήματα στατικής επαγωγική φόρτισης είναι δυνατό να εφαρμοσθούν και στην περίπτωση του εξεταζόμενου συζεύκτη, ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι χαμηλότερες τιμές συχνότητων δύναται να οδηγήσουν σε αυξημένη απόδοση. Η αντίσταση φορτίου επιδρά, επίσης, καθοριστικά στη διαμόρφωση της απόδοσης του συστήματος αλλά και στη μορφή της καμπύλης της ισχύος εισόδου καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Ειδικότερα τα αποτελέσματα της ανάλυσης στο παρόν κεφάλαιο υποδεικνύουν ότι η επίτευξη μίας υψηλής ισχύος σε μία υψηλή απόδοση προϋποθέτει την κατάλληλη επιλογή της τιμής αντίστασης φορτίου, η βέλτιστη τιμή της οποίας δύναται να υποδειχθεί από την εφαρμογή της προτεινόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της δυναμικής λειτουργίας του συστήματος υποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου, μπορεί να εφαρμοσθεί αποτελεσματικά στην περίπτωση του εξεταζόμενου κυκλικού μαγνητικού συζεύκτη. Πιο συγκεκριμένα, ο έλεγχος της ισχύος εισόδου, μέσω της ρύθμισης του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο, επιτρέπει την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος τόσο στην Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης όσο και στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, αυξάνοντας σημαντικά τη συνολική ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Επιπλέον ο προτεινόμενος έλεγχος με τις εναλλαγές στο ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος επιτρέπει τη σημαντική μείωση των αναπτυσσόμενων ΗΜ πεδίων. Ειδικότερα, ένα υψηλό ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα δύναται να οδηγήσει σε ΗΜ πεδία με ιδιαίτερα μεγάλες τιμές καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή. Ιδιαίτερα, μάλιστα, για θέσεις του οχήματος πάνω από το φορτιστή που το σασί δεν καλύπτει πλήρως το πρωτεύον, η τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής δύναται να λάβει τιμές που ξεπερνούν τα επιβαλλόμενα όρια σε περιοχές εντός και εκτός οχήματος. Ωστόσο, ο προτεινόμενος έλεγχος, μειώνοντας το ρεύμα πρωτεύοντος πηνίου σε αυτές τις περιοχές της κίνησης δύναται να περιορίσει σημαντικά τα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία, εξασφαλίζοντας ότι τα ανάλογα όρια τηρούνται.

## Κεφάλαιο 5

# Πειραματική Επαλήθευση της Μεθόδου Βελτιστοποίησης & του Προτεινόμενου Ελέγχου

### 5.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο προτάθηκε μία μέθοδος βελτιστοποίησης για την περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης καθώς και ο απαιτούμενος έλεγχος για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής. Η αποτελεσματική εφαρμογή του ελέγχου εξετάστηκε με την προσομοίωση του συστήματος επαγωγικής φόρτισης καθ' όλη τη διάρκεια κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή.

Στο κεφάλαιο αυτό τόσο η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης όσο και ο προτεινόμενος έλεγχος επαληθεύονται και πειραματικά. Στο πλαίσιο αυτό κατασκευάζεται, αρχικά, ο μαγνητικός συζεύκτης και πιο συγκεκριμένα το πρωτεύον και το δευτερεύον του συστήματος. Επιλέγεται ο κυκλικός συζεύκτης υλοποιούμενος με ράβδους φερρίτη και τα κατάλληλα καλώδια Litz, όπως θα περιγραφεί αναλυτικότερα στην ενότητα 5.2.

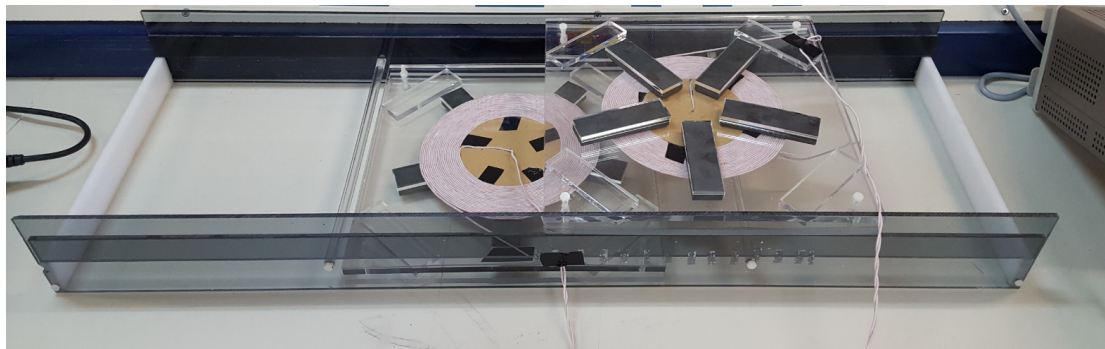
Οι τιμές των αυτεπαγωγών των τυλιγμάτων στο πρωτεύον και το δευτερεύον, καθώς και η μεταξύ τους αμοιβαία επαγωγή μετριοούνται πειραματικά και σύμφωνα με τις τιμές αυτές εφαρμόζεται η μέθοδος βελτιστοποίησης όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης και η κατάλληλη επιλογή της Περιοχής Υψηλής Απόδοσης υποδεικνύει τις τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης, την αντίσταση φορτίου και τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος. Οι βέλτιστες αυτές τιμές των παραπάνω μεγεθών λαμβάνονται υπόψιν για την πειραματική υλοποίηση του συστήματος επαγωγικής φόρτισης.

Υλοποιείται στη συνέχεια ο DC/AC αντιστροφέας, ο οποίος επιτρέπει τη λειτουργία του συστήματος στη βέλτιστη συχνότητα, και επιτρέπει επίσης την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζονται τροποποιήσεις που απαιτούνται για την πειραματική εφαρμογή του συστήματος ελέγχου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.

### 5.2 Κατασκευή του μαγνητικού συζεύκτη

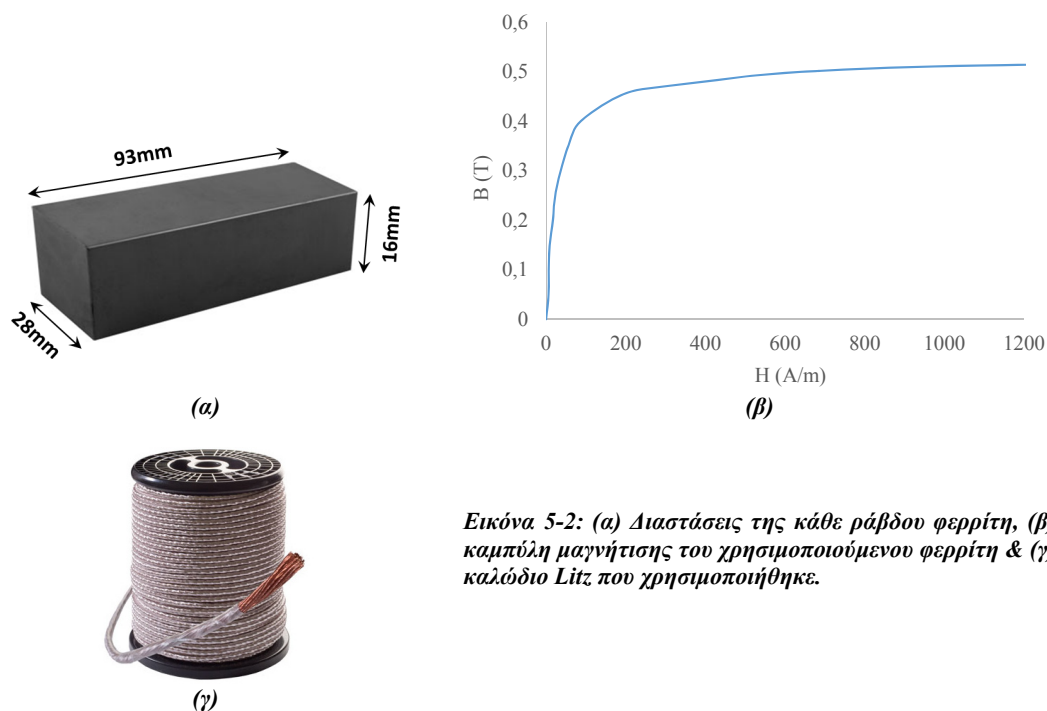
Ο συζεύκτης που υλοποιήθηκε ανήκει στην κατηγορία των κυκλικών συζευκτών με ράβδους φερρίτη. Τα βέλτιστα χαρακτηριστικά για την κατασκευή παρόμοιων κυκλικών συζευκτών, όσων αφορά στην τοποθέτηση και τα χαρακτηριστικά των φερριτών, τα χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων και την κατάλληλη τοποθέτησή τους, περιγράφονται στην αναφορά [18]. Σύμφωνα, επομένως, με την αναφορά αυτή επιλέγονται τα κατάλληλα χαρακτηριστικά για την κατασκευή ενός κυκλικού συζεύκτη διαμέτρου περίπου 25 εκατοστών, ο οποίος απεικονίζεται στην Εικόνα 5-1. Για να εξετασθεί η κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή το σύστημα

που υλοποιήθηκε επιτρέπει την κίνηση του δευτερεύοντος πάνω από το πρωτεύον, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-1.



Εικόνα 5-1: Υλοποίηση του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος

Το πρωτεύον και το δευτερεύον είναι πανομοιότυπα κατασκευασμένα, με διάμετρο 24,6 cm και αποτελούνται από 5 ράβδους φερρίτη RDZEN I93/28/16 F-887 οι διαστάσεις των οποίων δίνονται στην Εικόνα 5-2-α. Η καμπύλη μαγνήτισης του φερρίτη απεικονίζεται στην Εικόνα 5-2-β. Το κάθε πηνίο αποτελείται από 22 ελίγματα κυκλικού καλωδίου Litz (Εικόνα 5-2-γ) το οποίο είναι κατασκευασμένο από 180 μικρότερα καλώδια διαμέτρου 0.1mm. Το μέγιστο ρεύμα για το πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο ορίζεται ίσο με  $I_{1,max}=I_{2,max}=3A$ . Οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου αντίστοιχα μετρούνται ίσες με 0.16Ω.

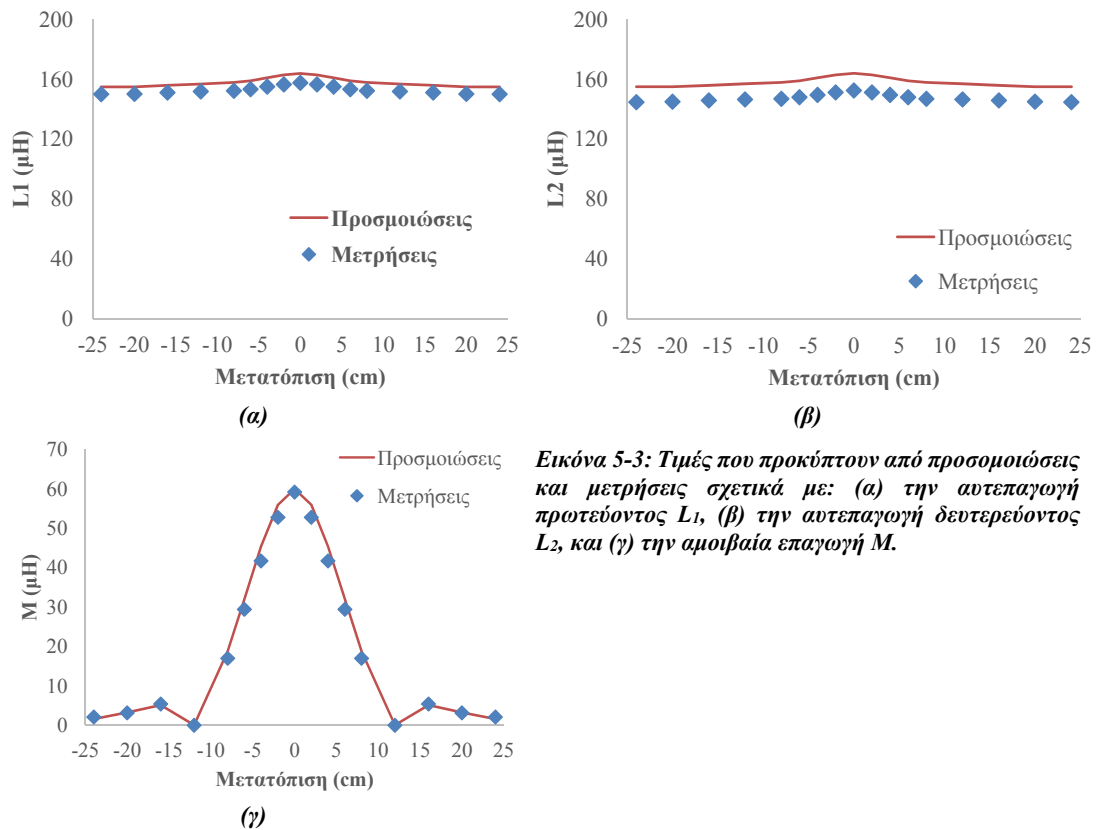


Εικόνα 5-2: (α) Διαστάσεις της κάθε ράβδου φερρίτη, (β) καμπύλη μαγνήτισης του χρησιμοποιούμενου φερρίτη & (γ) καλώδιο Litz που χρησιμοποιήθηκε.

Οι μετρούμενες τιμές των αυτεπαγωγών του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου, καθώς και της μεταξύ τους αμοιβαίας επαγωγής, απεικονίζονται στην Εικόνα 5-3. Ο κυκλικός συζεύκτης που κατασκευάστηκε υλοποιήθηκε επίσης στο πρόγραμμα προσομοιώσεων Ansoft Maxwell, ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια μεταξύ μετρήσεων και προσομοιώσεων, όσον αφορά στις επαγωγές των τυλιγμάτων. Στην Εικόνα 5-3 φαίνεται ότι οι τιμές των προσομοιώσεων είναι ιδιαίτερα κοντά στις μετρούμενες όσον αφορά στην αυτεπαγωγή  $L_1$  και την αμοιβαία επαγωγή,  $M$ . Μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται σχετικά με την αυτεπαγωγή  $L_2$ , οι οποίες ωστόσο δεν ξεπερνούν το 8%. Τα αποτελέσματα, επομένως, υποδεικνύουν ότι τα προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να προσφέρουν μία σημαντική



ακρίβεια για τις τιμές των αυτεπαγωγών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τη μελέτη διατάξεων επαγωγικής φόρτισης.



Εικόνα 5-3: Τιμές που προκύπτουν από προσομιώσεις και μετρήσεις σχετικά με: (α) την αυτεπαγωγή πρωτεύοντος  $L_1$ , (β) την αυτεπαγωγή δευτερεύοντος  $L_2$ , και (γ) την αμοιβαία επαγωγή  $M$ .

### 5.3 Εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών της συχνότητας λειτουργίας, των πυκνωτών αντιστάθμισης στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αλλά και της αντίστασης φορτίου εφαρμόζεται το πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται η μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ενέργειας στην (4.22) με τους περιορισμούς (4.23)-(4.24) και (4.35). Η μεταφερόμενη στο όχημα ενέργεια στην (4.22) ορίζεται θεωρώντας μία ταχύτητα διέλευσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή ίση με  $v = 50 \text{ km/h}$ . Οι μετατοπίσεις,  $x_i$ , που εξετάζονται απέχουν μεταξύ τους  $2 \text{ cm}$ , επομένως  $\Delta x = 2 \text{ cm}$  στην (4.22).

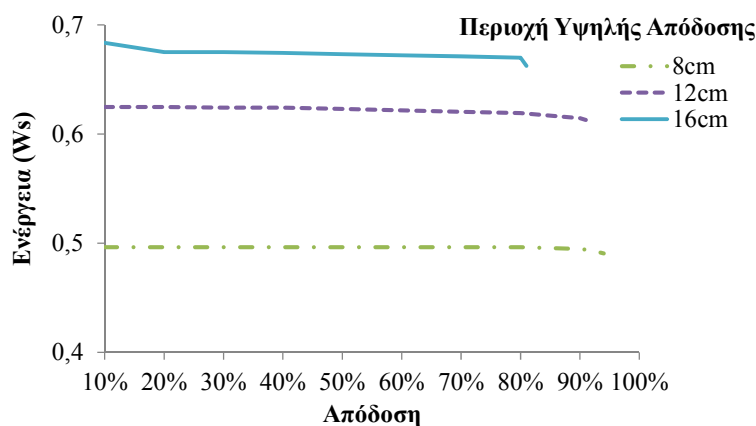
Θεωρώντας μία μέγιστη και ελάχιστη συχνότητα ίση με  $f_{\min}=20 \text{ kHz}$  και  $f_{\max}=50 \text{ kHz}$ , και λαμβάνοντας υπόψη τις μετρούμενες τιμές των αυτεπαγωγών  $L_1$  και  $L_2$  κατά την κίνηση του οχήματος (Εικόνα 5-3-α & β), προσδιορίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης (Πίνακας 5-1), σύμφωνα με τις (4.20) και (4.21). Η μέγιστη τιμή της αντίστασης φορτίου στον Πίνακα 5-1 προσδιορίζεται σύμφωνα με την (4.37), λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα πραγματικών μπαταριών<sup>1</sup> για εφαρμογές παρόμοιες με αυτή της υλοποιούμενης διάταξης.

<sup>1</sup> <https://www.dhgate.com>

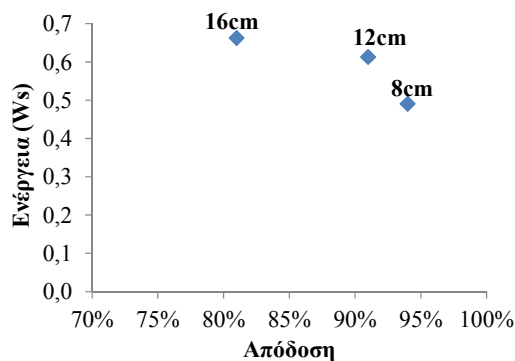
Πίνακας 5-1: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, για την υλοποιούμενη διάταξη

Μεταβλητή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή
Συχνότητα, $f$	20kHz	50kHz
Γωνιακή Ταχύτητα, $\omega$	125600rad/s	314000rad/s
Πυκνωτής Αντιστάθμισης Πρωτεύοντος, $C_1$	64,2nF	422nF
Πυκνωτής Αντιστάθμισης Δευτερεύοντος, $C_2$	66,5nF	437,8nF
Αντίσταση Φορτίου, $R_L$	0 $\Omega$	8,65 $\Omega$

Θεωρώντας διάφορες περιπτώσεις σχετικά με την περιοχή υψηλής απόδοσης, καθώς και διάφορες τιμές σχετικά με την επιθυμητή απόδοση  $eff_{target}$  όπως αυτή ορίζεται στην (4.22), η μέγιστη ενέργεια που δύναται να μεταφερθεί στο όχημα, σύμφωνα με την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, απεικονίζεται στην Εικόνα 5-4. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύθηκε με το λογισμικό GAMS και χρησιμοποιώντας το solver “LINDOGLOBAL”.

Εικόνα 5-4: Μέγιστη μεταφερόμενη ενέργεια για τον υλοποιούμενο συζεύκτη εξετάζοντας διάφορες τιμές της  $eff_{target}$  και διάφορες περιπτώσεις μετατόπισης

Όπως περιγράφηκε και στο Κεφάλαιο 4, για κάθε Περιοχή Υψηλής Απόδοσης στην Εικόνα 5-4 η μεταφερόμενη ενέργεια παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή της απόδοσης ( $eff_{limit}$ ). Η τιμή αυτή υποδηλώνει (όπως αναλύεται στην ενότητα 4.4.2) τη μέγιστη δυνατή ενέργεια,  $E_{limit}$ , που δύναται να επιτευχθεί. Επιπλέον, για κάθε εξεταζόμενη Περιοχή Υψηλής Απόδοσης στην Εικόνα 5-4, η μεταφερόμενη ενέργεια παρουσιάζει μία μικρή μείωση, καταλήγοντας στην ενέργεια,  $E_{feas}$ , που επιτυγχάνεται για τη μέγιστη δυνατή απόδοση  $eff_{feas}$ . Το πρόβλημα βελτιστοποίησης για τιμές απόδοσης μεγαλύτερες της  $eff_{feas}$  είναι μη επιλύσιμο.

Εικόνα 5-5: Τιμές των  $\{eff_{feas}, E_{feas}\}$  για κάθε Περιοχή Υψηλής Απόδοσης (ΠΥΑ) για τον κυκλικό συζεύκτη που υλοποιήθηκε.. Η ΠΥΑ για κάθε περίπτωση απεικονίζεται δίπλα σε κάθε σημείο στο διάγραμμα

Όπως παρατηρείται και στην ενότητα 4.4.2, η μείωση της  $E_{feas}$  συγκριτικά με την  $E_{limit}$  είναι ιδιαίτερα περιορισμένη. Πιο συγκεκριμένα για όλες τις εξεταζόμενες περιοχές υψηλής

απόδοσης στην Εικόνα 5-4 η μείωση αυτή είναι μικρότερη από 3.1%. Ωστόσο, η αύξηση που επιτυγχάνεται στην απόδοση συγκρίνοντας τις  $eff_{limit}$  και  $eff_{feas}$  είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Επομένως, το σύνολο τιμών  $\{eff_{feas}, E_{feas}\}$  μπορεί να θεωρηθεί ως ενδεικτικό για τις τιμές της απόδοσης και της μεταφερόμενης ενέργειας σε κάθε Περιοχή Υψηλής Απόδοσης και απεικονίζεται στην Εικόνα 5-5.

Είναι φανερό στην Εικόνα 5-5 ότι υπάρχει ένας συμβιβασμός ως προς την ενέργεια που δύναται να μεταφερθεί και την αντίστοιχη επιτεύξιμη απόδοση. Λόγω της δυναμικής φόρτισης απαιτούνται σχετικά μεγάλα ποσά ενέργειας που παρατηρούνται για περιοχές υψηλής απόδοσης 16 και 12cm. Ωστόσο, η αντίστοιχη απόδοση αυξάνεται από 81% για μία περιοχή υψηλής απόδοσης 16cm σε 91% για μία περιοχή υψηλής απόδοσης 12cm. Επομένως, για την ανάπτυξη του συστήματος με το συγκεκριμένο κυκλικό συζεύκτη επιλέγεται μία Περιοχή Υψηλής Απόδοσης ίση με 12cm. Για τη συγκεκριμένη Περιοχή Υψηλής Απόδοσης οι βέλτιστες τιμές για τη συχνότητα λειτουργίας, τους πυκνωτές αντιστάθμισης και την αντίσταση φορτίου, όπως υποδεικνύονται από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, δίνονται στον Πίνακα 5-2.

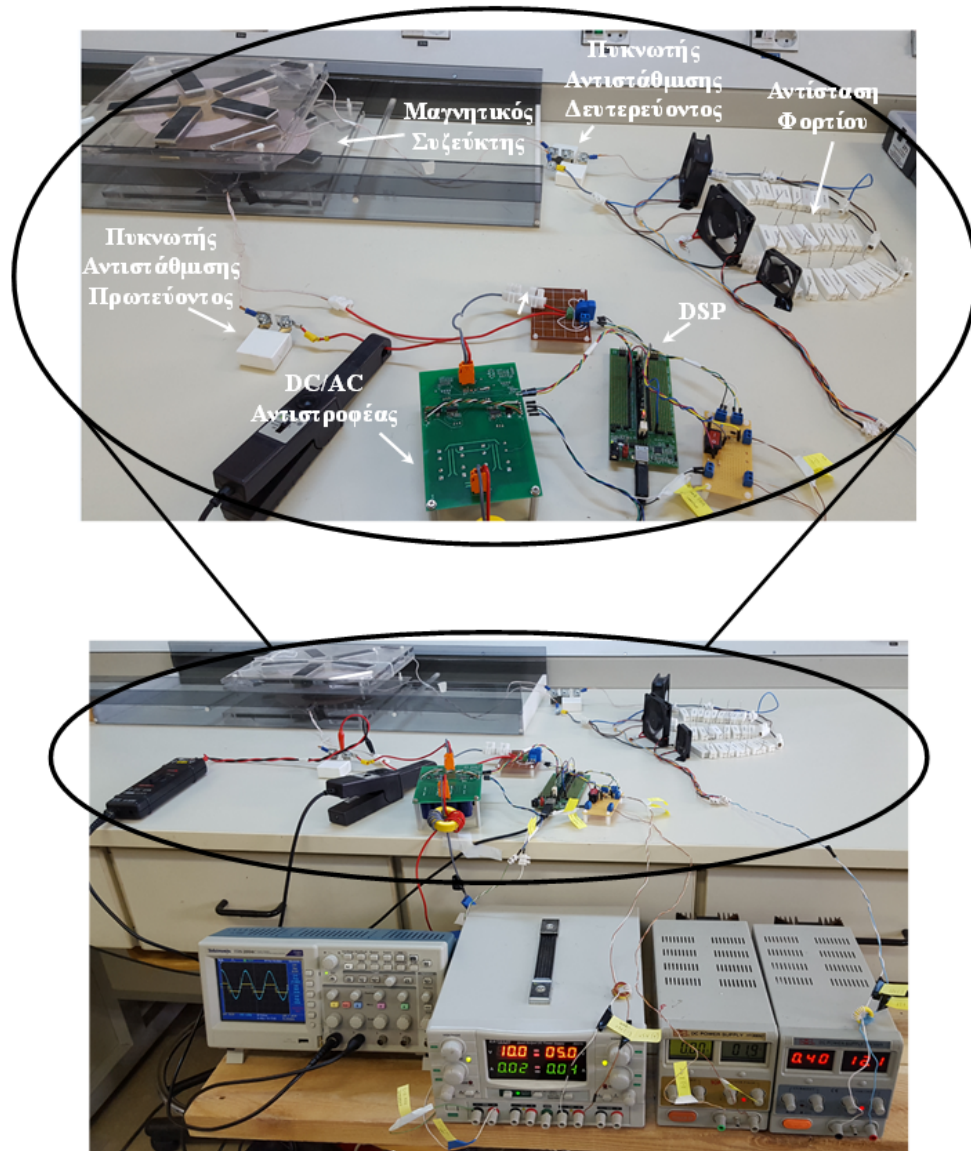
*Πίνακας 5-2: Βέλτιστες τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, για μία Περιοχή Υψηλής Απόδοσης ίση με 12cm.*

Μεταβλητή	Βέλτιστη Τιμή
Συχνότητα, $f$	27.91 kHz
Πυκνωτής Αντιστάθμισης Πρωτεύοντος, $C_1$	0,23 $\mu$ F
Πυκνωτής Αντιστάθμισης Δευτερεύοντος, $C_2$	0.27 $\mu$ F
Αντίσταση Φορτίου, $R_L$	8,65 $\Omega$

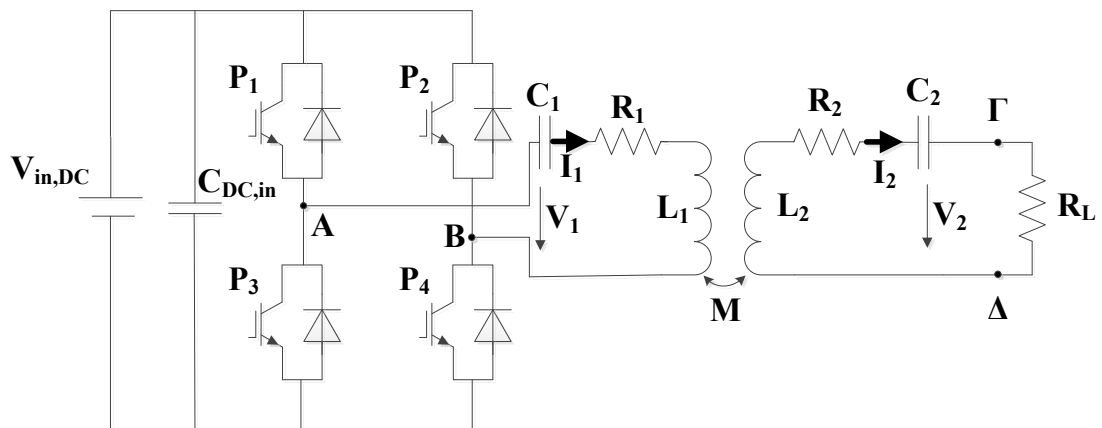
#### 5.4 Υλοποίηση του αντιστροφέα & του συστήματος ελέγχου

Η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε απεικονίζεται στην Εικόνα 5-6 και περιλαμβάνει τον αντιστροφέα τύπου-H, το μαγνητικό συζεύκτη και τους πυκνωτές αντιστάθμισης. Το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα δίνεται στην Εικόνα 5-7. Τα διακοπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην γέφυρα τύπου-H του αντιστροφέα (Εικόνα 5-8) είναι τα Mosfets ισχύος IRFI4228PbF με μικρή αντίσταση αγωγής, επιτυγχάνοντας τη διατήρηση χαμηλών απωλειών αγωγής. Η οδήγηση των διακοπτικών στοιχείων πραγματοποιείται με τον driver Si8274 της Silicon Labs. Μία αναλυτικότερη περιγραφή σχετικά με την υλοποίηση του αντιστροφέα δίνεται στην Εικόνα Π-Δ-1 του παραρτήματος Π-Δ.

Η συστοιχία πυκνωτών που χρησιμοποιείται μεταξύ της DC τάσης εισόδου και της γέφυρας τύπου-H των διακοπτικών στοιχείων ( $C_{DC,in}$  στην Εικόνα 5-7), αποτελείται από 8 ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές 2.2mF Panasonic ECA-1JM συνδεδεμένους παράλληλα. Οι παλμοί οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων στέλνονται στον αντιστροφέα από το DSP που απεικονίζεται στην Εικόνα 5-6, το οποίο αποτελείται από το C2000 Experimenter kit της Texas Instrument και περιλαμβάνει την κάρτα ελέγχου Delfino F28335. Σχετικά με τους πυκνωτές συντονισμού, επιλέγεται η τοπολογία αντιστάθμισης Σειρά-Σειρά η οποία έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά τόσο σε εφαρμογές στατικής [49],[57] όσο και δυναμικής επαγωγικής φόρτισης [30],[51],[60]. Χρησιμοποιούνται οι πυκνωτές C4BSPBX της Kemet, που είναι ανεκτικοί σε υψηλά AC ρεύματα και τάσεις. Η παροχή DC τάσεως στον inverter πραγματοποιείται μέσω της ελεγχόμενης DC τροφοδοσίας Regatron, TopCon Quadro. Η αντίσταση φορτίου στην πλευρά του δευτερεύοντος αποτελείται από μία συστοιχία κεραμικών αντιστάσεων, κατάλληλες για τις απαιτήσεις ισχύος της πειραματικής κατασκευής. Ο Πίνακας 5-3 απεικονίζει συνοπτικά τις τιμές των παραμέτρων λειτουργίας και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 5-6: Υλοποίηση της πειραματικής διάταξης



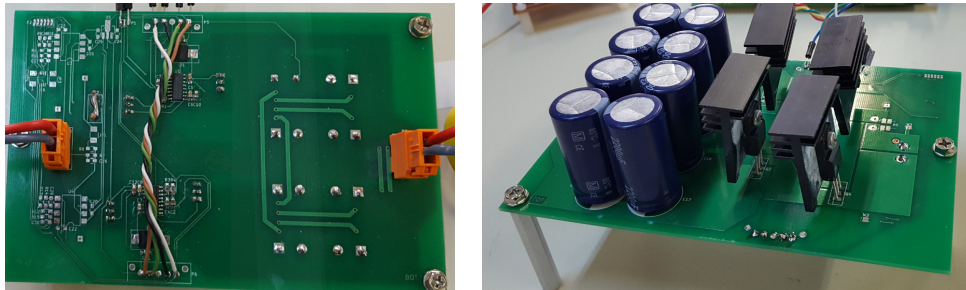
Εικόνα 5-7: Ισοδύναμο κύκλωμα της πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε

Για τη μέτρηση του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα και την είσοδο της αντίστοιχης μέτρησης στο DSP χρησιμοποιείται ο μετατροπέας ρεύματος (Current Transducer) LTSR 6-

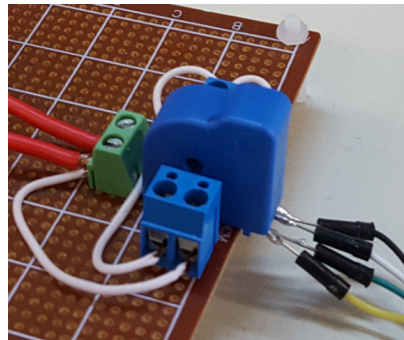
NP1 που απεικονίζεται στην Εικόνα 5-9. Κατάλληλη συνδεσμολογία των pin του μετατροπέα όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Δ, επιτρέπει την επίτευξη επιθυμητής ακρίβειας για τη μέτρηση του ρεύματος.

**Πίνακας 5-3: Παράμετροι λειτουργίας και τιμές των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική κατασκευή.**

Υλικό/Παράμετρος	Τιμή/Τύπος υλικού
$C_1$	0.22 $\mu$ F (C4BSWBX3220ZBFJ)
$C_2$	0.28 $\mu$ F (C4BSPBX3680ZBFJ & C4BSWBX3470ZBFJ)
Συχνότητα, $f$	27.9 kHz
Συστοιχία πυκνωτών DC	17.6mF (Συστοιχία ECA-1JM222)
Mosfets	IRFI4228PbF
Αντίσταση Φορτίου	9.6 $\Omega$
DC Τροφοδοσία	Regatron, TopCon Quadro (30 $\Omega$ V)
DSP	Κάρτα Ελέγχου F28335 Delfino
Καλώδια Litz	180 νήματα διαμέτρου 0.10mm
Ράβδοι Φερρίτη	RDZEN I93/28/16 F-887, MnZn



**Εικόνα 5-8: Άνω και κάτω όψη του αντιστροφέα που υλοποιήθηκε**

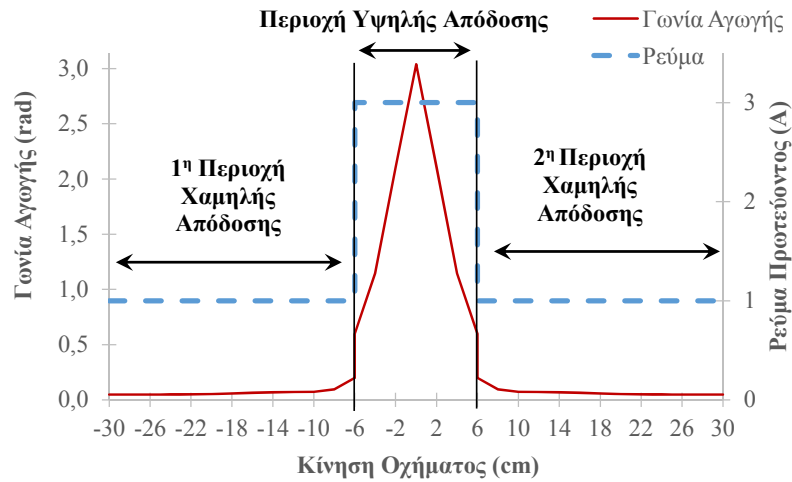


**Εικόνα 5-9: Μετατροπέας ρεύματος LTSR 6-NP για τη μέτρηση της τιμής του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα**

Για τον περιορισμό των πραγματοποιούμενων υπολογισμών στο DSP, η μετάβαση μεταξύ των περιοχών χαμηλής και υψηλής απόδοσης πραγματοποιείται παρακολουθώντας την τιμή της γωνίας αγωγής των διακοπτικών στοιχείων και όχι την ισχύ στην έξοδο του αντιστροφέα, όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.3. Η γωνία αγωγής των διακοπτικών στοιχείων υπολογίζεται από το σύστημα ελέγχου και, επομένως, δε χρειάζεται να μετρηθεί από την πειραματική διάταξη, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για επιπλέον μετρητικά στοιχεία και υπολογισμούς από το DSP. Η γωνία αγωγής των διακοπτικών στοιχείων που επιτυγχάνει το επιθυμητό ρεύμα στην πλευρά του πρωτεύοντος για κάθε θέση της κίνησης του οχήματος δύναται να προσδιορισθεί πριν την έναρξη της φόρτισης. Ειδικότερα σύμφωνα με την Εικόνα

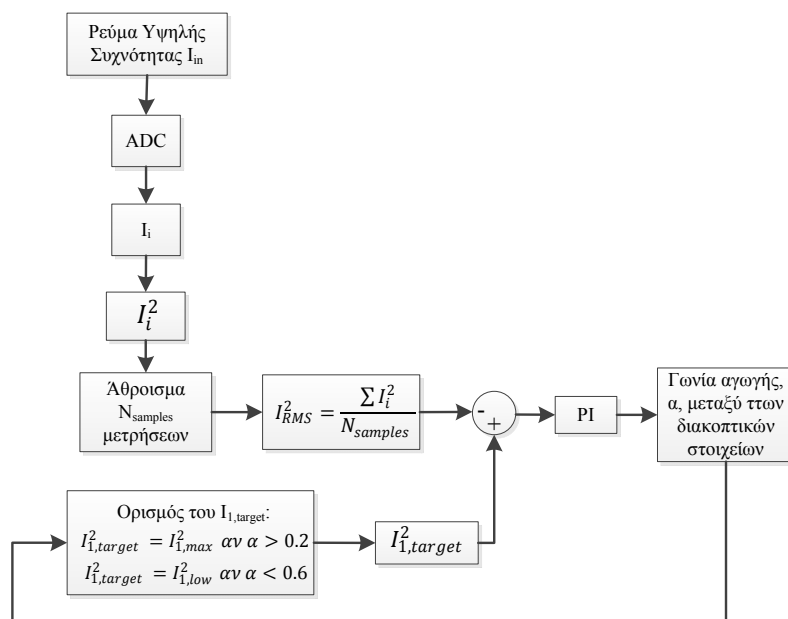
<sup>1</sup> [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/ltsr\\_6-np.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/ltsr_6-np.pdf)

5-10 προσδιορίζεται ότι μία γωνία ίση με 0,2rad και 0,6rad αντίστοιχα υποδεικνύει την είσοδο και την έξοδο από την περιοχή υψηλής απόδοσης.



Εικόνα 5-10: Γωνία αγωγής των διακοπτικών στοιχείων για τις διάφορες θέσεις μετατόπισης του οχήματος πάνω από το φορτιστή, με στόχο την επίτευξη της εκάστοτε επιθυμητής τιμής του ρεύματος πρωτεύοντος  $I_1$ .

Μία συνοπτική περιγραφή του ελέγχου που υλοποιήθηκε απεικονίζεται στην Εικόνα 5-11. Ειδικότερα για την επίτευξη μίας σταθερής τιμής ρεύματος στην πλευρά του πρωτεύοντος είναι σημαντικό να μετρηθεί η RMS τιμή του ρεύματος  $I_1$ . Για το λόγο αυτό η μέτρηση του μετατροπέα ρεύματος στην Εικόνα 5-9 εισάγεται στον αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (Analog to Digital Converter - ADC) του DSP. Για να περιορισθούν περαιτέρω οι υπολογισμοί που εκτελούνται στο DSP, παραλείπεται η τετραγωνική ρίζα στον υπολογισμό της RMS τιμής, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5-11. Ο ADC μετατροπέας του DSP που χρησιμοποιείται στην πειραματική υλοποίηση έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει αναλογικά δείγματα ( $N_{samples}$ ) με μία συχνότητα 12,5MHz. Επομένως, δύναται να λάβει εκατοντάδες δείγματα  $N_{samples}$  σε μία περίοδο λειτουργίας του συστήματος με συχνότητα 27,9kHz. Ωστόσο μία ιδιαίτερα μεγάλη αύξηση του  $N_{samples}$  θα οδηγήσει σε πολύ μεγάλη αύξηση του αριθμού των υπολογισμών που καλείται να εκτελέσει το DSP. Ωστόσο, με μία επιλογή του  $N_{samples}$  ίση με 40 προσδιορίζεται ότι λαμβάνεται μία ιδιαίτερα καλή μέτρηση της τιμής του ρεύματος με μία ικανοποιητική ταχύτητα.

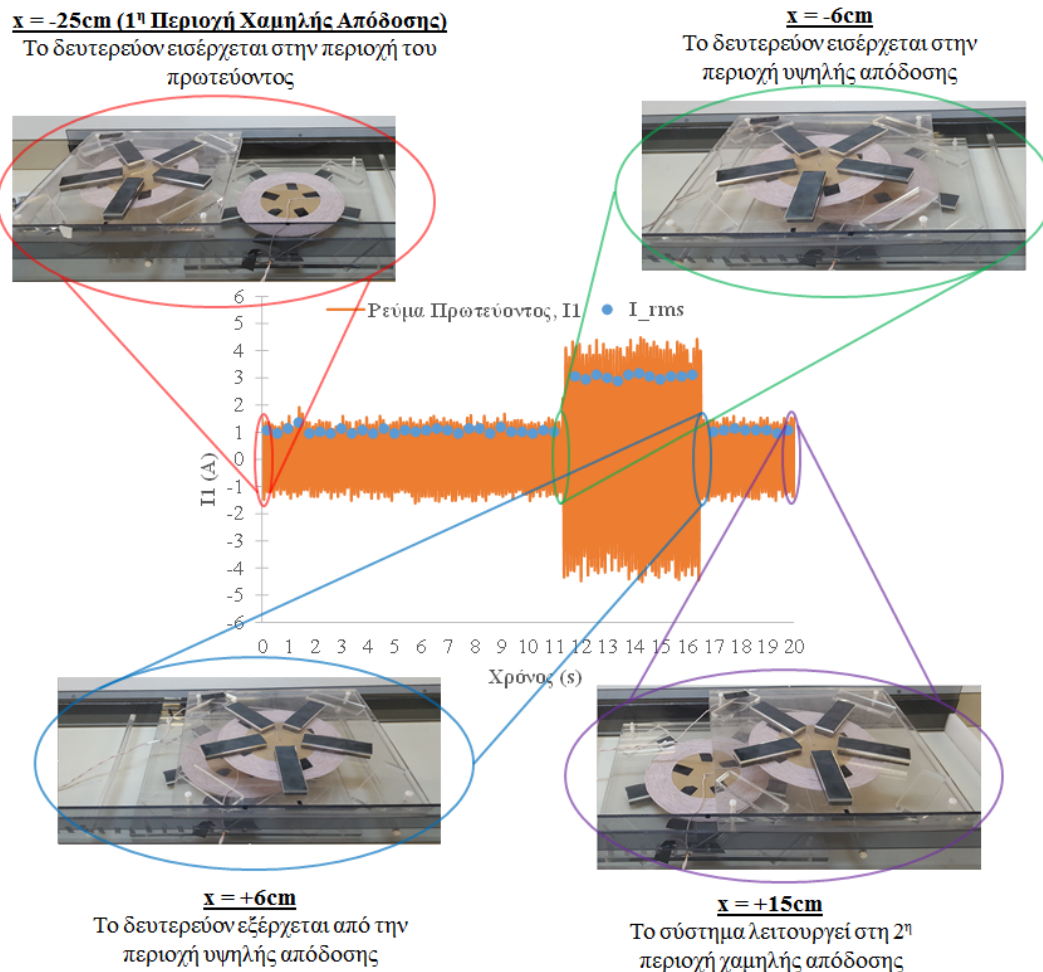


Εικόνα 5-11: Υλοποίηση του προτεινόμενου ελέγχου

Το τετράγωνο της RMS τιμής του ρεύματος αφαιρείται στη συνέχεια από το τετράγωνο της επιθυμητής τιμής του ρεύματος  $I_{1,target}$  (που είναι ίσο με  $I_{1,max}$  ή  $I_{1,low}$  ανάλογα με το αν το όχημα βρίσκεται στην περιοχή υψηλής ή χαμηλής απόδοσης αντίστοιχα) και το αποτέλεσμα εισάγεται σε έναν PI ελεγκτή για τον προσδιορισμό της γωνίας αγωγής,  $\alpha$ , των διακοπτικών στοιχείων. Η ίδια αυτή γωνία  $\alpha$  καθορίζει την επιθυμητή τιμή του ρεύματος  $I_{1,target}$ , σύμφωνα με την Εικόνα 5-10. Μια πιο λεπτομερής περιγραφή της υλοποίησης του ελέγχου, η οποία περιλαμβάνει τον ακριβή τρόπο καθορισμού της τιμής του επιθυμητού ρεύματος ανάλογα με τη γωνία  $\alpha$ , δίνεται στο Παράρτημα Δ.

Στην πειραματική υλοποίηση που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό, υλοποιήθηκε μια πιο ρεαλιστική εφαρμογή δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Ειδικότερα, αντίθετα με το Κεφάλαιο 4, μόλις το όχημα εξέλθει από την περιοχή υψηλής απόδοσης η λειτουργία του συστήματος δεν τερματίζεται αλλά το ρεύμα στο πρωτεύον τίθεται και πάλι ίσο με  $I_{low}$  (Εικόνα 5-10). Η λειτουργία αυτή θα επιτρέψει στο φορτιστή να είναι έτοιμος για τη διέλευση ενός νέου οχήματος μόλις το αρχικό όχημα απομακρυνθεί από αυτόν.

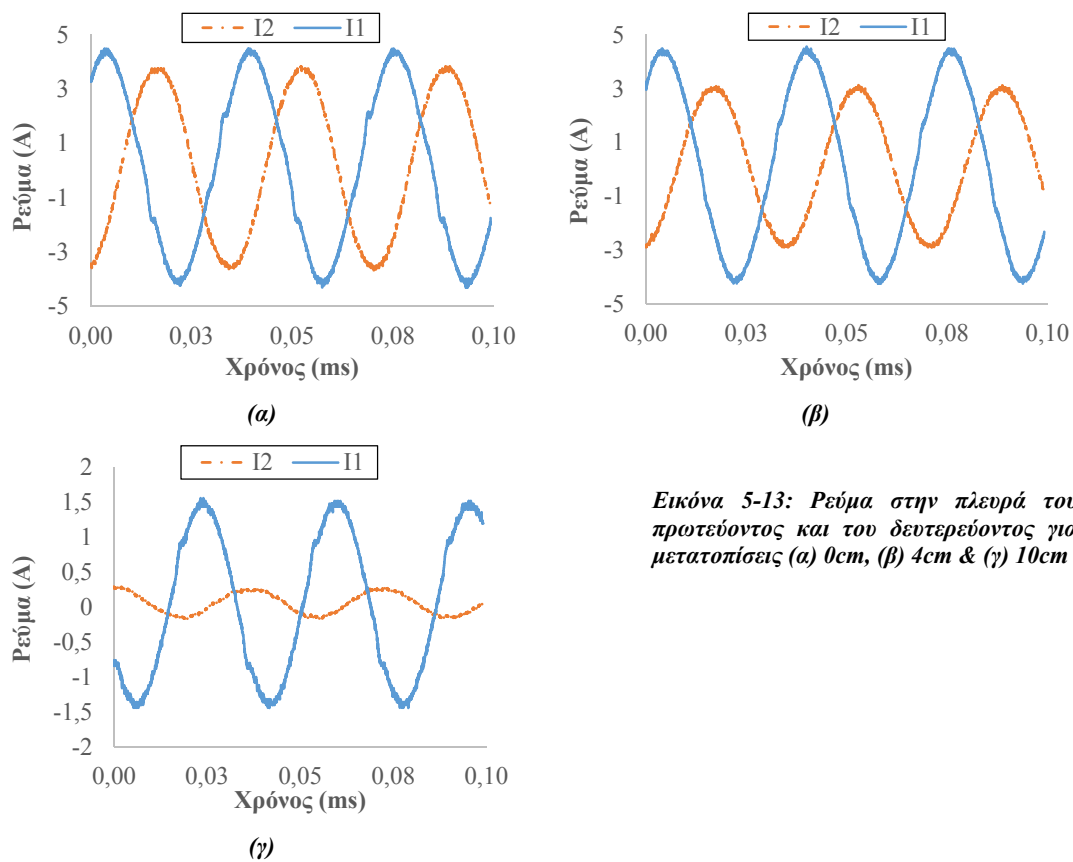
Το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα, καθώς το δευτερεύον κινείται πάνω από το φορτιστή απεικονίζεται στην Εικόνα 5-12. Ειδικότερα, η λειτουργία του συστήματος ξεκινά με ένα ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα ίσο με 1A, αναμένοντας τη διέλευση του δευτερεύοντος. Όταν το δευτερεύον εισέλθει στην περιοχή του φορτιστή (1<sup>η</sup> περιοχή χαμηλής απόδοσης) το ρεύμα του πρωτεύοντος διατηρείται ίσο με  $I_{low}=1A$ , ώστε να μειωθούν οι απώλειες στην περιοχή αυτή.



Εικόνα 5-12: Μεταβολή του ρεύματος από  $I_{max}=3A$  σε  $I_{low}=1A$ , με την εφαρμογή του προτεινόμενου ελέγχου καθώς το δευτερεύον κινείται πάνω από το πρωτεύον

Είναι φανερό στην Εικόνα 5-12 ότι ο έλεγχος που εφαρμόζεται στον αντιστροφέα του πρωτεύοντος είναι ικανός να ανιχνεύσει το σημείο της κίνησης όπου το δευτερεύον εισέρχεται στην περιοχή υψηλής απόδοσης. Στο σημείο αυτό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-12, ο εφαρμοζόμενος έλεγχος αυξάνει το ρεύμα του πρωτεύοντος σε  $I_{max}=3A$  ώστε να μεταφερθεί η μέγιστη δυνατή ενέργεια στην περιοχή αυτή. Μόλις το όχημα εξέλθει από την περιοχή υψηλής απόδοσης το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα τίθεται και πάλι ίσο με  $I_{low}=1A$ .

Οι κυματομορφές των ρευμάτων στο πρωτεύον και το δευτερεύον του συστήματος για διάφορες μετατοπίσεις απεικονίζονται στην Εικόνα 5-13. Για μία μετατόπιση ίση με 0cm (το δευτερεύον βρίσκεται ακριβώς πάνω από το πρωτεύον) και μία μετατόπιση ίση με 4cm όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-13-α & Εικόνα 5-13-β, το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή υψηλής απόδοσης με την RMS τιμή του ρεύματος,  $I_1$ , να είναι ίση με 3A. Όταν το δευτερεύον κινείται σε μετατοπίσεις εντός της 1<sup>ης</sup> ή της 2<sup>ης</sup> περιοχής χαμηλής απόδοσης (Εικόνα 5-13-γ) η RMS τιμή του ρεύματος στο πρωτεύον είναι ίση με 1A.



Εικόνα 5-13: Ρεύμα στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος για μετατοπίσεις (α) 0cm, (β) 4cm & (γ) 10cm

Η απόδοση της μεταφοράς ενεργού ισχύος μεταξύ της DC εισόδου στον αντιστροφέα του πρωτεύοντος ( $P_{in,DC\_exp\_i}$ ) και της αντίστασης φορτίου  $R_L$  ( $P_{out\_exp\_i}$ ), όπως ορίζεται στην (5.1) για διάφορες περιπτώσεις μετατόπισης  $x_i$ , σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα δίνεται στην Εικόνα 5-14. Είναι φανερό στην Εικόνα 5-14 ότι μία ελάχιστη απόδοση ίση με 84,8% παρατηρείται στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης.

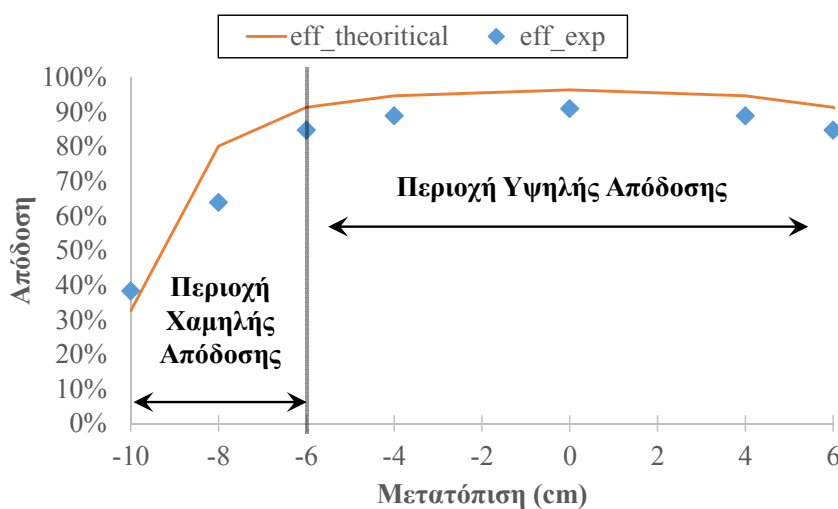
$$eff_{exp,i} = \frac{P_{out\_exp\_i}}{P_{in,DC\_exp\_i}} \quad (5.1)$$

Η θεωρητικά υπολογισμένη απόδοση σχετικά με τη μεταφορά ενεργού ισχύος μεταξύ των σημείων A-B & Γ-Δ στην Εικόνα 5-7 δύναται να υπολογισθεί σύμφωνα με την (5.2), όπου οι  $P_{out\_i}$  και  $P_{in\_i}$  δίνονται από τις (3.1) και (3.2) αντίστοιχα. Η θεωρητικά υπολογισμένη απόδοση,



$eff_{theoretical}$ , για διάφορα σημεία μετατόπισης του δευτερεύοντος πάνω από το πρωτεύον, όπως ορίζεται στην (5.2) δίνεται στην Εικόνα 5-14. Πρέπει να σημειωθεί ότι η  $eff_{theoretical}$  δεν περιλαμβάνει τις απώλειες του inverter DC/AC στην πλευρά του πρωτεύοντος, οι οποίες ωστόσο συμπεριλαμβάνονται στην  $eff_{exp}$  όπως αυτή ορίζεται στην (5.1). Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 5-14 η  $eff_{exp}$  μειώνεται λιγότερο από 6.6% σε σχέση με την  $eff_{theoretical}$  υποδεικνύοντας χαμηλές απώλειες τόσο στο μαγνητικό συζεύκτη όσο και στον αντιστροφέα στην πλευρά του πρωτεύοντος.

$$eff_{theoretical,i} = \frac{P_{out,i}}{P_{in,i}} \quad (5.2)$$



Εικόνα 5-14: Απόδοση σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα και θεωρητικούς υπολογισμούς όπως ορίζεται στις (5.1) και (5.2) αντίστοιχα

Μία αμελητέα ωμική αντίσταση μετρήθηκε με τη χρήση ενός RLC μετρητή στους πυκνωτές αντιστάθμισης. Η μέτρηση αυτή είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές των στοιχείων αυτών και υποδεικνύει αμελητέες απώλειες ενεργού ισχύος στους πυκνωτές αντιστάθμισης. Η κατανομή των απωλειών στα υπόλοιπα μέρη της διάταξης μεταβάλλεται σύμφωνα με τη θέση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Ειδικότερα, όταν το δευτερεύον εισέρχεται στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης (όταν δηλαδή η οριζόντια μετατόπιση είναι ίση με -6cm) οι απώλειες στον αντιστροφέα του πρωτεύοντος είναι ίσες με περίπου 65% των συνολικών απωλειών, ενώ το υπόλοιπο 35% των απωλειών παρατηρείται στο μαγνητικό συζεύκτη. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι απώλειες στο μαγνητικό συζεύκτη περιλαμβάνουν τόσο τις μαγνητικές απώλειες όσο και τις απώλειες στο καλώδιο Litz πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Καθώς το δευτερεύον κινείται προς το κέντρο του πρωτεύοντος παρατηρείται μία αύξηση στην απόδοση του αντιστροφέα. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει μία μείωση στο ποσοστό των απωλειών που εντοπίζονται στον αντιστροφέα, καθώς και μία αντίστοιχη αύξηση στο ποσοστό των απωλειών του μαγνητικού συζεύκτη.

## 5.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό κατασκευάστηκε ένα μαγνητικός συζεύκτης με στόχο την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης. Η μέτρηση των αυτεπαγωγών των τυλιγμάτων του μαγνητικού συζεύκτη καθώς και της μεταξύ τους αμοιβαίας επαγωγής υποδεικνύει ότι τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων πλησιάζουν ικανοποιητικά τις μετρούμενες τιμές.

Επιπλέον η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης για το μαγνητικό συζεύκτη που κατασκευάστηκε υποδεικνύει ότι υπάρχει ένας συμβιβασμός μεταξύ της απόδοσης και της ενέργειας που δύναται να μεταφερθεί σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, η κατάλληλη επιλογή της Περιοχής Υψηλής Απόδοσης δύναται να εξασφαλίσει μία ικανοποιητική απόδοση λειτουργίας αλλά και μία αυξημένη μεταφορά ενέργειας.

Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης δύναται να εξασφαλίσει υψηλές τιμές για την απόδοση του συστήματος όταν το δευτερεύον βρίσκεται στην περιοχή υψηλής απόδοσης. Επιπλέον χαμηλές απώλειες παρατηρούνται τόσο στο μαγνητικό συζεύκτη όσο και τον αντιστροφέα του πρωτεύοντος όταν το σύστημα λειτουργεί στην περιοχή υψηλής απόδοσης.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης εξάγει επίσης τις βέλτιστες τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης και της αντίστασης φορτίου, καθώς και τη βέλτιστη συχνότητα λειτουργίας. Οι τιμές αυτές λαμβάνονται υπόψιν για την κατασκευή ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης, το οποίο επιτρέπει την κίνηση του πρωτεύοντος πάνω από το δευτερεύον, ώστε να εξετασθεί η κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή σε συνθήκες δυναμικής φόρτισης.

Εκτός από το μαγνητικό συζεύκτη το σύστημα φόρτισης που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει επίσης τον απαραίτητο DC/AC αντιστροφέα στον οποίο εφαρμόστηκε ο έλεγχος που προτείνεται στο Κεφάλαιο 4. Τροποποιήσεις δύναται να εφαρμοσθούν στο προτεινόμενο σύστημα ελέγχου, ώστε να εξετασθούν ρεαλιστικές συνθήκες δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, μειώνοντας παράλληλα τους υπολογισμούς που απαιτούνται από το DSP που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του προτεινόμενου ελέγχου. Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, ο έλεγχος που προτείνεται δύναται να εφαρμοσθεί αποτελεσματικά όταν το δευτερεύον κινείται πάνω από το πρωτεύον, ανιχνεύοντας επιτυχώς τις μεταβάσεις μεταξύ των περιοχών χαμηλής και υψηλής απόδοσης.

## Κεφάλαιο 6

### Επίδραση της Επαγωγικής Φόρτισης στο Δίκτυο Διανομής

#### 6.1 Εισαγωγή

Τεχνολογίες επαγωγικής φόρτισης δύναται να επιτρέψουν την ασύρματη μεταφορά μεγάλων ποσών ισχύος (>20kW) μεταξύ ηλεκτρικού οχήματος και ηλεκτρικού δικτύου. Η ζήτηση αυτή δύναται να μεταβάλει σημαντικά την καμπύλη φορτίου ενός δικτύου διανομής, επηρεάζοντας τη λειτουργία του. Οι ενδεχόμενες αυτές μεταβολές στην καμπύλη φορτίου θα πρέπει να ληφθούν, επίσης, υπόψιν για το μελλοντικό σχεδιασμό του δικτύου. Επομένως, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξετασθεί η πιθανή επίδραση των επαγωγικών φορτιστών στο δίκτυο διανομής, ορίζοντας, παράλληλα, τη μέγιστη επιτρεπόμενη διείσδυση φορτιστών η οποία δεν παραβιάζει τους τεχνικούς περιορισμούς του δικτύου.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η μεθοδολογία για την εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων των στατικών και δυναμικών επαγωγικών φορτιστών. Αξιολογείται, παράλληλα, η επίδραση των ενεργειακών αυτών αναγκών στη λειτουργία ενός δικτύου διανομής, όσον αφορά στο προφίλ τάσης, τη φόρτιση των γραμμών και τις απώλειες δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η υπολογισθείσα ενεργειακή ζήτηση για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων προστίθεται στην πραγματική ζήτηση μίας γραμμής διανομής ενός αστικού δικτύου διανομής Μέσης Τάσης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία ανάλυσης εφαρμόζεται για το συγκεκριμένο δίκτυο, εξετάζοντας τα αποτελέσματα της επίδρασης των επαγωγικών φορτιστών στη λειτουργία του δικτύου. Ορίζεται, παράλληλα, ο μέγιστος αριθμός δυναμικών επαγωγικών φορτιστών που δύναται να εγκατασταθεί στο εξεταζόμενο δίκτυο, χωρίς να παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου αυτού.

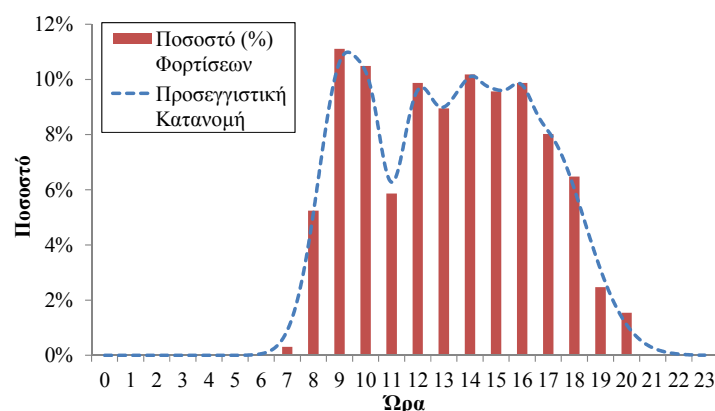
Σε περίπτωση που, μελλοντικά, παρουσιαστεί μία σημαντική διείσδυση επαγωγικών φορτιστών, παράλληλα με μία πιθανή αύξηση του φορτίου του συστήματος, ο μέγιστος αριθμός φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν στο δίκτυο αναμένεται να είναι σημαντικά περιορισμένος. Ωστόσο, η διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο σύστημα διανομής δύναται να παρουσιάσει ιδιαίτερα ευνοϊκά αποτελέσματα προς την κατεύθυνση αυτή. Στο πλαίσιο αυτό, θα εξετασθεί η πιθανή επίδραση της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, και ειδικότερα φωτοβολταϊκών, στο μέγιστο αριθμό επαγωγικών φορτιστών που μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο διανομής.

Ωστόσο, σε περίπτωση που ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο ξεπερασθεί σημαντικά, προβλήματα αναμένεται να παρουσιασθούν στη λειτουργία του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας της ζήτησης των επαγωγικών φορτιστών, ώστε τα προβλήματα αυτά να εξαλειφθούν, χωρίς να απαιτούνται ενέργειες για την επέκταση των υποδομών του δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό θα περιγραφεί ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας των επαγωγικών φορτιστών, εξετάζοντας, παράλληλα, τις τροποποιήσεις που απαιτούνται σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων για την εφαρμογή του συγκεκριμένου συστήματος διαχείρισης.

## 6.2 Εργαλείο εκτίμησης ενεργειακών απαιτήσεων επαγωγικών φορτιστών

### 6.2.1 Στατική επαγωγική φόρτιση

Η επαγωγική φόρτιση είναι μία προσφάτως ανεπτυγμένη τεχνολογία με περιορισμένες πραγματικές εφαρμογές. Επομένως, δεδομένα σχετικά με την πραγματική λειτουργία επαγωγικών φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων είναι ιδιαίτερα περιορισμένα. Ωστόσο, για την ανάπτυξη του εργαλείου που περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό, η λειτουργική συμπεριφορά των στατικών επαγωγικών φορτιστών γρήγορης φόρτισης μπορεί να θεωρηθεί παρόμοια με αυτή των συμβατικών αγωγίμων φορτιστών γρήγορης φόρτισης. Επομένως, η ανάλυση του προφίλ ισχύος μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση ένα ισοδύναμο προφίλ ζήτησης που προέρχεται από πραγματικούς σταθμούς γρήγορης αγωγίμης φόρτισης. Στο πλαίσιο αυτό, επεξεργάστηκαν δεδομένα για περισσότερους από 20 πραγματικούς σταθμούς γρήγορης αγωγίμης φόρτισης για μία χρονική περίοδο ενός μήνα, προκειμένου να αναλυθούν οι ώρες της ημέρας που αναμένεται να πραγματοποιηθούν φορτίσεις, καθώς και η διάρκεια των φορτίσεων αυτών. Τα στοιχεία σχετικά με τις φορτίσεις προέρχονται από τη γαλλική εταιρεία κατασκευής σταθμών φόρτισης DBT, στο πλαίσιο του έργου FastInCharge<sup>1</sup>. Λόγω του εμπορικού χαρακτήρα των πληροφοριών αυτών, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και επεξεργασμένα δεδομένα στην Εικόνα 6-1 και την Εικόνα 6-2.



Εικόνα 6-1: Φορτίσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας και η αντίστοιχη προσεγγιστική κατανομή

Οι φορτίσεις που πραγματοποιούνται κάθε ώρα της ημέρας, ως ποσοστό όλων των φορτίσεων που πραγματοποιούνται κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο, απεικονίζονται στην Εικόνα 6-1. Είναι φανερό ότι όλες οι φορτίσεις πραγματοποιούνται μεταξύ 7:00πμ και 9:00μμ, ενώ δύο κορυφές παρατηρούνται στις φορτίσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας: μία κατά τις πρωινές ώρες (8.00–10.00) και μία κατά της μεσημεριανές ώρες (12.00–18.00).

Για να προσδιορισθεί η χρονική στιγμή που αναμένεται να πραγματοποιηθεί μία φόρτιση κατά τη διάρκεια της ημέρας, λαμβάνεται υπόψιν μία Γκαουσιανή κατανομή. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μιας τέτοιας κατανομής, με  $n$  συστατικά, ορίζεται ως:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n p_i * \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (6.1)$$

όπου  $\mu_i$  και  $\sigma_i$  είναι η μέση τιμή και τυπική απόκλιση αντίστοιχα καθενός από τα  $n$  συστατικά (η διακύμανση, επομένως, είναι  $\sigma_i^2$ ), και η μεταβλητή  $p_i$  ορίζει τη συμβολή του καθενός από τα συστατικά. Μία γκαουσιανή κατανομή με 8 συστατικά, φαίνεται να είναι μία ιδιαίτερα καλή

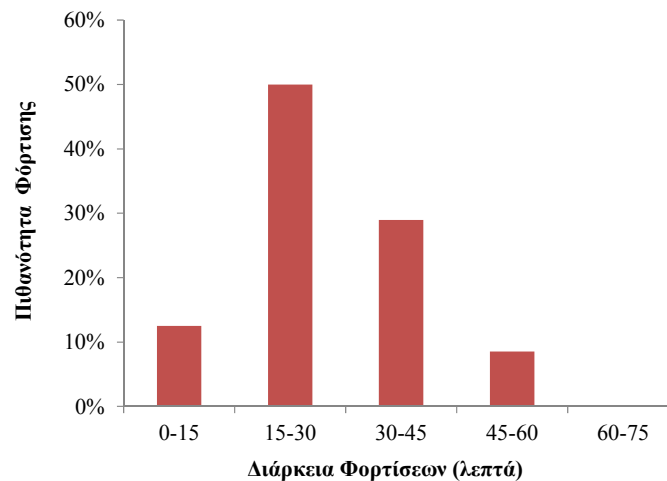
<sup>1</sup> <http://www.fastincharge.eu/>

προσέγγιση για την εξεταζόμενη κατανομή, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6-1. Ο Πίνακας 6-1 παρουσιάζει τις τιμές για κάθε ένα από τα 8 συστατικά της κατανομής.

**Πίνακας 6-1: Τιμές των παραμέτρων της Γκαουσιανής κατανομής σχετικά με την εκτίμηση της έναρξης μίας διαδικασίας φόρτισης**

Συστατικό	Παράμετρος		
	$\rho$	$\mu$	$\sigma$
1	0,267656	9,197	0,987121
2	0,032443	10,3	0,443215
3	0,000872	14,05	0,179605
4	0,333774	16,73	1,636245
5	0,137854	11,93	0,697561
6	0,015256	15,95	0,429638
7	0,036219	15,05	0,640073
8	0,177336	13,66	0,909339

Για την εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών των στατικών επαγωγικών φορτιστών, εκτός από την ώρα της ημέρας που αναμένεται να πραγματοποιηθεί μία φόρτιση, θα πρέπει, επίσης, να ορισθεί και η διάρκεια της κάθε φόρτισης. Τα διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με συμβατικούς φορτιστές γρήγορης φόρτισης (Εικόνα 6-2) υποδεικνύουν ότι το 50% των ηλεκτρικών οχημάτων παραμένουν στους σταθμούς για μισή περίπου ώρα, ενώ κανένα όχημα δεν παραμένει πάνω στο φορτιστή για περισσότερο από μία ώρα. Περίπου 30% των οχημάτων φορτίζουν για 30-45 λεπτά, ενώ ένας μικρός αριθμός φορτίσεων έχει χρονική διάρκεια 0-15 και 45-60 λεπτά. Η Γκαουσιανή κατανομή της διάρκειας των φορτίσεων μπορεί να προσεγγισθεί με τις τέσσερις παραμέτρους που παρουσιάζει ο Πίνακας 6-2



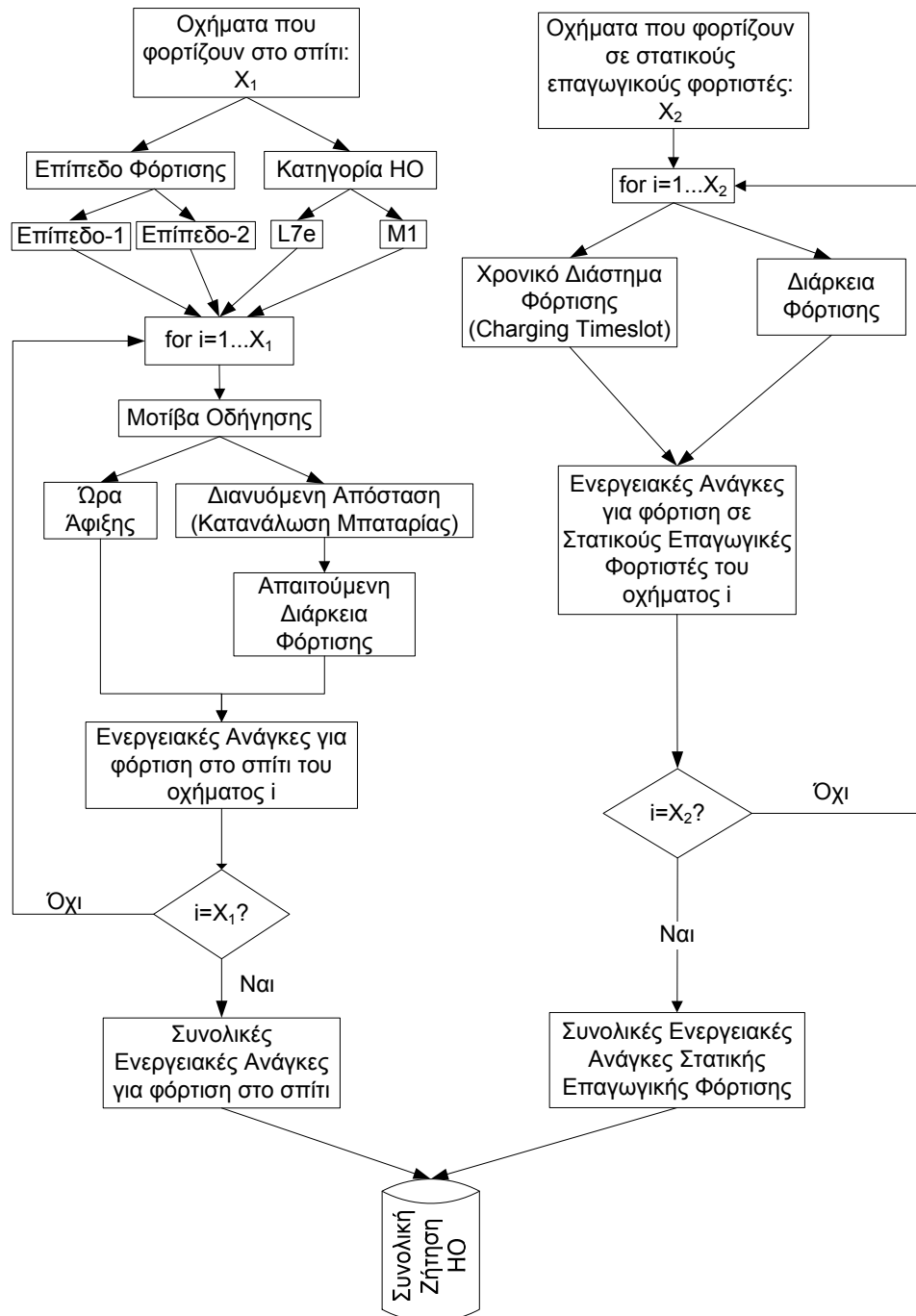
**Εικόνα 6-2: Αναμενόμενη διάρκεια φόρτισης**

**Πίνακας 6-2: Τιμές των παραμέτρων της Γκαουσιανής κατανομής που αντιπροσωπεύει τη διάρκεια μίας φόρτισης**

Συστατικό	Παράμετρος		
	$\rho$	$\mu$	$\sigma$
1	0,300336	1,8590	0,553311
2	0,017057	2,0100	0,133643
3	0,667935	2,6190	0,927724
4	0,020148	0,5588	0,238436

Το εργαλείο που αναπτύχθηκε για τον ορισμό της ενεργειακής ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων (HO) παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-3. Δύο κατηγορίες χρηστών HO μπορούν να διακριθούν:

1. Χρήστες που φορτίζουν στο σπίτι ( $X_1$ )
2. Χρήστες που αξιοποιούν λύσεις φόρτισης σε επαγωγικούς φορτιστές γρήγορης στατικής φόρτισης ( $X_2$ )

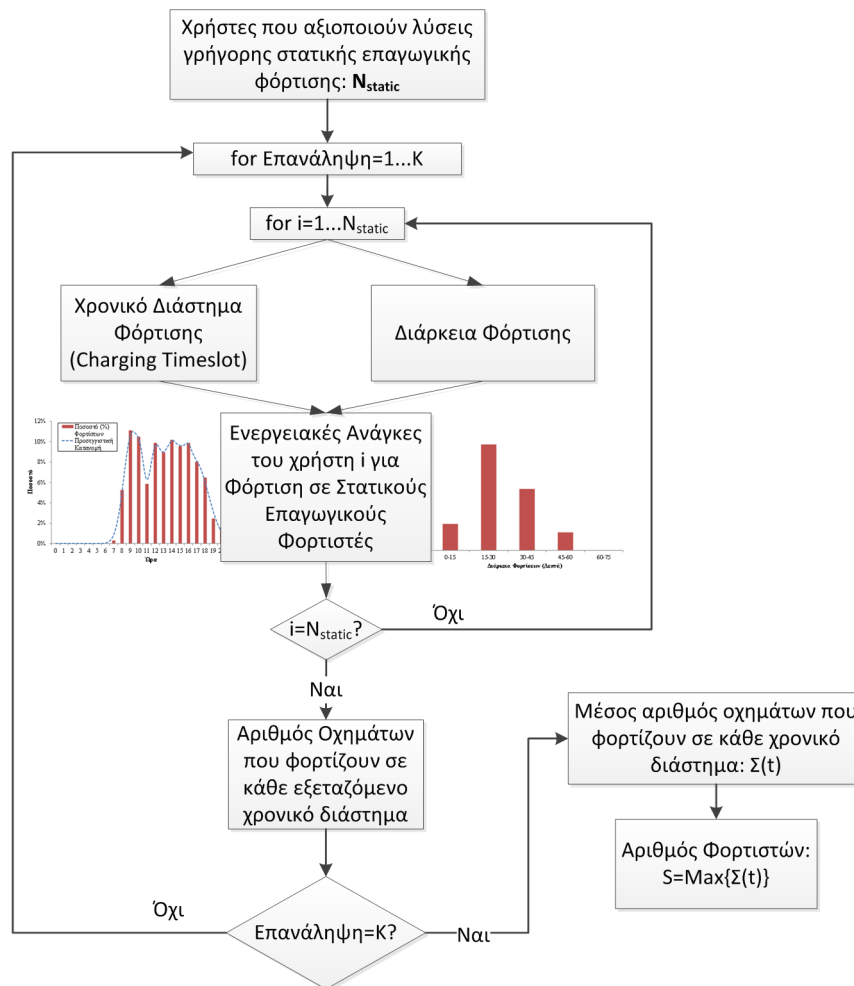


Εικόνα 6-3: Υπολογισμός της συνολικής ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων (HO)

Η εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών για τη *φόρτιση στο σπίτι* πραγματοποιείται με τη διαδικασία που απεικονίζεται στην αριστερή πλευρά του διαγράμματος ροής στην Εικόνα 6-3 και είναι παρόμοια με τη διαδικασία που περιγράφεται στην αναφορά [122]. Δύο επίπεδα φόρτισης λαμβάνονται υπόψη: Επίπεδο-1 και Επίπεδο-2 με φόρτιση σε ισχύ 3.6kW και 11kW

αντίστοιχα. Εξετάζονται οχήματα που ανήκουν στις κατηγορίες L7e και M1, όπως αυτές ορίζονται στις Οδηγίες 2002/24/EK [123] και 2007/46/EK [124]. Η φόρτιση στο σπίτι πραγματοποιείται μόλις το όχημα έχει ολοκληρώσει και την τελευταία διαδρομή της ημέρας. Η διάρκεια της φόρτισης εξαρτάται από την ημερήσια διανύσιμη απόσταση και, ακολούθως, την κατανάλωση της μπαταρίας. Η ώρα άφιξης του οχήματος στο σπίτι και η ημερήσια διανύσιμη απόσταση ορίζονται σύμφωνα με την κατηγορία του οχήματος. Λόγω της стоχαστικής φύσης των παραμέτρων που αφορούν στην κίνηση των ηλεκτρικών οχημάτων, η μέθοδος Monte Carlo εφαρμόζεται για την εξαγωγή της εκτιμώμενης ημερήσιας ζήτησης των οχημάτων.

Οι ενεργειακές ανάγκες των στατικών επαγωγικών φορτιστών προσδιορίζονται σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στη δεξιά πλευρά του διαγράμματος ροής στην Εικόνα 6-3. Ειδικότερα, η άφιξη του κάθε οχήματος στους σταθμούς φόρτισης και η διάρκεια της φόρτισης ορίζονται τυχαία σύμφωνα με τις αντίστοιχες κατανομές που περιγράφηκαν προηγουμένως.



**Εικόνα 6-4:** Διαδικασία υπολογισμού του αριθμού των απαιτούμενων στατικών φορτιστών για την κάλυψη των αντίστοιχων ενεργειακών αναγκών

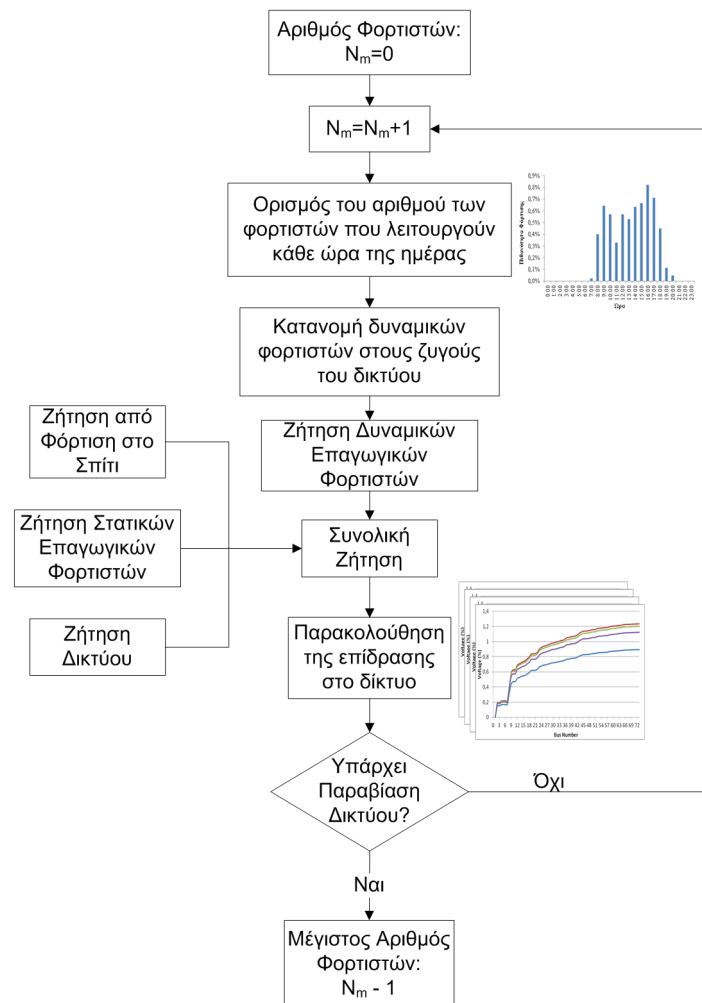
Μία παράμετρος που πρέπει, επίσης, να ορισθεί για τη μελέτη της επίδρασης της στατικής επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής, είναι ο αριθμός των φορτιστών που απαιτούνται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων που φορτίζουν σε αυτούς. Η μέθοδος για τον προσδιορισμό του αριθμού των απαιτούμενων φορτιστών παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-4. Ειδικότερα, η ώρα της ημέρας που κάθε όχημα φτάνει σε ένα σταθμό, καθώς και η διάρκεια της φόρτισης, ορίζονται σύμφωνα με τις αντίστοιχες κατανομές (Πίνακας 6-1 και Πίνακας 6-2), ενώ η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα οχήματα  $N_{static}$

που αναμένεται να φορτίσουν σε στατικούς φορτιστές. Με την εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo για  $K$  επαναλήψεις, ένας μέσος αριθμός  $\Sigma(t)$  οχημάτων, που καταλαμβάνουν τους φορτιστές δύναται να ορισθεί για κάθε εξεταζόμενο χρονικό διάστημα (timeslot). Επομένως, ο ελάχιστος αριθμός απαιτούμενων σταθμών,  $S$ , για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων, μπορεί να ορισθεί ως:

$$S = \text{maximum}\{\Sigma(t)\} \quad (6.2)$$

### 6.2.2 Δυναμική φόρτιση

Στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, ο ακριβής ορισμός των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτεί τη γνώση αρκετών στοχαστικών παραμέτρων: διαδρομές που πραγματοποιούνται από κάθε ηλεκτρικό όχημα κάθε μέρα, ανάγκες για φόρτιση σε δυναμικούς φορτιστές, κίνηση στους δρόμους, ταχύτητα του οχήματος κλπ. Επίσης, ενδέχεται να υπάρχουν περισσότεροι του ενός τύπου δυναμικοί φορτιστές, καθένας με τις δικές του παραμέτρους. Για παράδειγμα, σταθμοί που είναι τοποθετημένοι σε διασταυρώσεις ή κοντά σε φωτεινούς σηματοδότες δύναται να επιτρέπουν πολύ μικρές ταχύτητες διέλευσης. Αντίστοιχα σταθμοί τοποθετημένοι σε δρόμους εντός αστικής περιοχής θα επιτρέπουν τη φόρτιση με σχετικά μικρές ταχύτητες, ενώ, αντίθετα, σταθμοί σε αυτοκινητοδρόμους θα επιτρέπουν την ανάπτυξη ιδιαίτερα υψηλών ταχυτήτων.

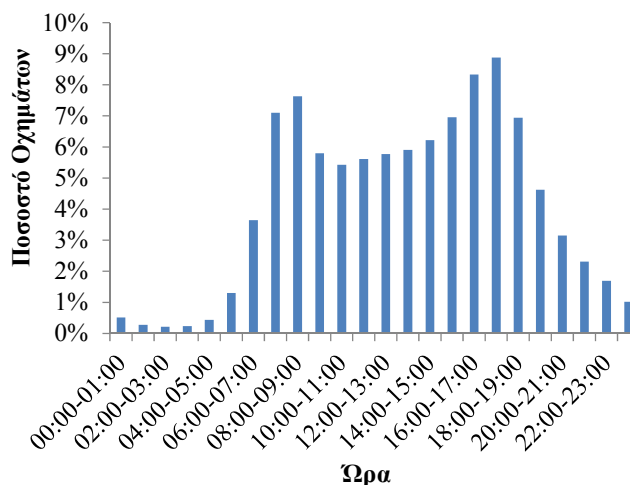


Εικόνα 6-5: Διαδικασία Ορισμού του μέγιστου αριθμού δυναμικών φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο διανομής



Μία τόσο λεπτομερής ανάλυση, από την άποψη της μελέτης του δικτύου διανομής, δεν είναι δυνατή σε περίπτωση σεναρίων υψηλής διείσδυσης επαγωγικών φορτιστών. Στο πλαίσιο αυτό, υιοθετείται μια προσέγγιση για τον ορισμό του *μέγιστου αριθμού* δυναμικών επαγωγικών σταθμών φόρτισης που μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο, χωρίς να προκαλείται κάποιο πρόβλημα δικτύου. Η αντίστοιχη διαδικασία περιγράφεται στην Εικόνα 6-5. Ειδικότερα, σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας, ο αριθμός των δυναμικών φορτιστών,  $N_m$ , αυξάνεται κατά έναν, ενώ ο αριθμός των φορτιστών που λειτουργούν σε κάθε ώρα της ημέρας καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψιν τις ανάγκες φόρτισης και την κίνηση στους δρόμους.

Πιο συγκεκριμένα, οι χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να χρησιμοποιούν τους δυναμικούς επαγωγικούς σταθμούς φόρτισης σε περίπτωση που το όχημά τους έχει ένα ιδιαίτερα χαμηλό επίπεδο φόρτισης (SoC) κατά τη διάρκεια της ημέρας και σε περίπτωση που κάποια πιο οικονομική μέθοδος φόρτισης δεν είναι άμεσα διαθέσιμη. Για παράδειγμα, οι χρήστες δεν αναμένεται να χρησιμοποιούν τους φορτιστές είτε αμέσως πριν, είτε αμέσως μετά, τη φόρτιση στο σπίτι, ή αλλιώς πολύ νωρίς το πρωί ή πολύ αργά το βράδυ. Επομένως, προκειμένου να εκτιμηθούν οι ανάγκες φόρτισης των οδηγών, ενώ βρίσκονται μακριά από το σπίτι τους και σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, δύναται να χρησιμοποιηθεί η κατανομή στην Εικόνα 6-1, η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά των οδηγών ως προς την αναζήτηση λύσεων γρήγορης φόρτισης.



Εικόνα 6-6: Ποσοστό Οχημάτων που μετακινούνται στους δρόμους

Σχετικά με την κίνηση στους δρόμους, ο αριθμός των οχημάτων που κινούνται στους δρόμους συγκεκριμένες ώρες της ημέρας υπολογίζεται σύμφωνα με πραγματικά δεδομένα που παρέχονται από το Υπουργείο μεταφορών της Μεγάλης Βρετανίας<sup>1</sup>. Ο μέσος αριθμός οχημάτων που μετακινούνται στους δρόμους για μία εργάσιμη ημέρα απεικονίζεται στην Εικόνα 6-6. Αν  $P_{emergency}$  είναι η πιθανότητα ένας φορτιστής να είναι κατειλημμένος λόγω έκτακτης ανάγκης φόρτισης, όπως αυτή ορίζεται στην Εικόνα 6-1, και  $P_{traffic}$  είναι η πιθανότητα ένας φορτιστής να είναι κατειλημμένος λόγω κίνησης στους δρόμους, σύμφωνα με την Εικόνα 6-6, τότε η πιθανότητα ένας δυναμικός φορτιστής να εξυπηρετεί ένα όχημα,  $P_{dynamic}$ , θα είναι:

$$P_{dynamic}(h) = P_{emergency}(h) * P_{traffic}(h) \quad (6.3)$$

όπου  $h$  είναι η ώρα της ημέρας που εξετάζεται. Η πιθανότητα  $P_{dynamic}$  για κάθε ώρα της ημέρας απεικονίζεται στην Εικόνα 6-7. Είναι φανερό ότι μόνο ένας μικρός αριθμός φορτιστών αναμένεται να λειτουργεί πολύ νωρίς το πρωί και πολύ αργά το βράδυ, ενώ ένας αυξημένος αριθμός οχημάτων αναμένεται να φορτίζει μεταξύ 9 και 10 π.μ. και μεταξύ 2 μ.μ. και 6 μ.μ. Σε

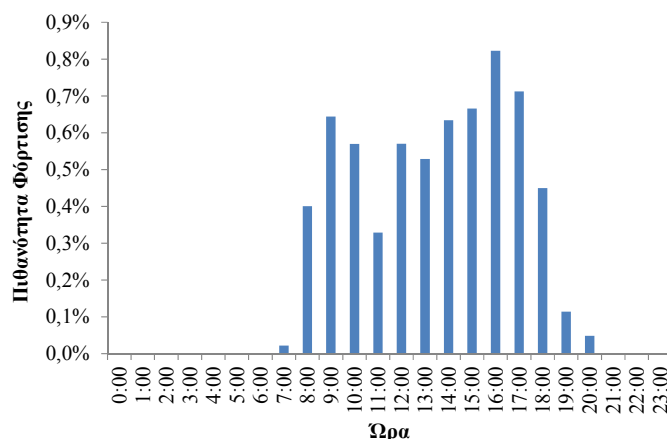
<sup>1</sup> <https://www.gov.uk/government/collections/road-traffic-statistics>

αυτά τα χρονικά διαστήματα η κίνηση στους δρόμους αυξάνεται (Εικόνα 6-6), ενώ παρατηρείται επίσης αυξημένη ανάγκη για γρήγορη φόρτιση (Εικόνα 6-1).

Αν  $N_m$  είναι ο μέγιστος αριθμός δυναμικών φορτιστών που είναι εγκατεστημένοι στο δίκτυο, ο αριθμός φορτιστών  $N_h$ , που αναμένεται να λειτουργούν την ώρα  $h$  θα είναι:

$$N_h = \frac{P_{dynamic}(h)}{P_{dynamic}(h_{max})} * N_m \quad (6.4)$$

όπου  $h_{max}$  είναι η ώρα της ημέρας όπου παρατηρείται η μέγιστη πιθανότητα φόρτισης.



Εικόνα 6-7: Πιθανότητα Φόρτισης σε δυναμικούς φορτιστές

Για τον υπολογισμό της συνολικής ζήτησης στην Εικόνα 6-5, η ζήτηση δυναμικής φόρτισης προστίθεται στη ζήτηση δικτύου μαζί με τη ζήτηση για οικιακή φόρτιση, καθώς και τη ζήτηση για στατική επαγωγική φόρτιση. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση ροής φορτίου, ώστε να εξετασθούν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

- θερμικά όρια φόρτισης γραμμών και μετασχηματιστών
- όρια τάσης όσον αφορά τις μέγιστες ( $V_{max}$ ) και ελάχιστες ( $V_{min}$ ) τάσεις σε όλους τους ζυγούς ( $\pm 5\%$  της ονομαστικής τιμής,  $V_{nom}$ )
- απόκλιση τάσης ( $V_{dev}$ )

Η απόκλιση τάσης ορίζεται σύμφωνα με την (6.5) και πρέπει να είναι μικρότερη από 3%.

$$V_{dev} = 100 * \frac{V_{max} - V_{min}}{2 * V_{nom}} \% \quad (6.5)$$

Η ανάλυση ροής φορτίου που χρησιμοποιείται είναι η μέθοδος σχετικά με ακτινικά δίκτυα διανομής που αναπτύχθηκε στην αναφορά [125].

Σε περίπτωση που παραβιαστεί οποιοσδήποτε από τους παραπάνω περιορισμούς, η διαδικασία υπολογισμού τερματίζεται, ορίζοντας, παράλληλα, το μέγιστο αριθμό δυναμικών επαγωγικών φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν στο δίκτυο (Εικόνα 6-5).

Τα προτεινόμενα εργαλεία προσομοιώσεων ενημερώνουν το προφίλ ζήτησης των ζυγών του εξεταζόμενου κάθε φορά δικτύου διανομής, σύμφωνα με τις ενεργειακές ανάγκες επαγωγικής φόρτισης. Η επιπλέον ζήτηση των επαγωγικών φορτιστών προστίθεται στην καμπύλη φορτίου του δικτύου, επιτρέποντας στη συνέχεια την υλοποίηση της ανάλυσης ροής φορτίου. Επομένως, τα προτεινόμενα εργαλεία για εκτίμηση της ζήτησης επαγωγικής φόρτισης δύναται να χρησιμοποιηθούν ως είσοδος σε οποιοδήποτε εργαλείο ανάλυσης ροής φορτίου, είτε εμπορικά διαθέσιμο είτε κατασκευασμένο για εξειδικευμένες εφαρμογές.

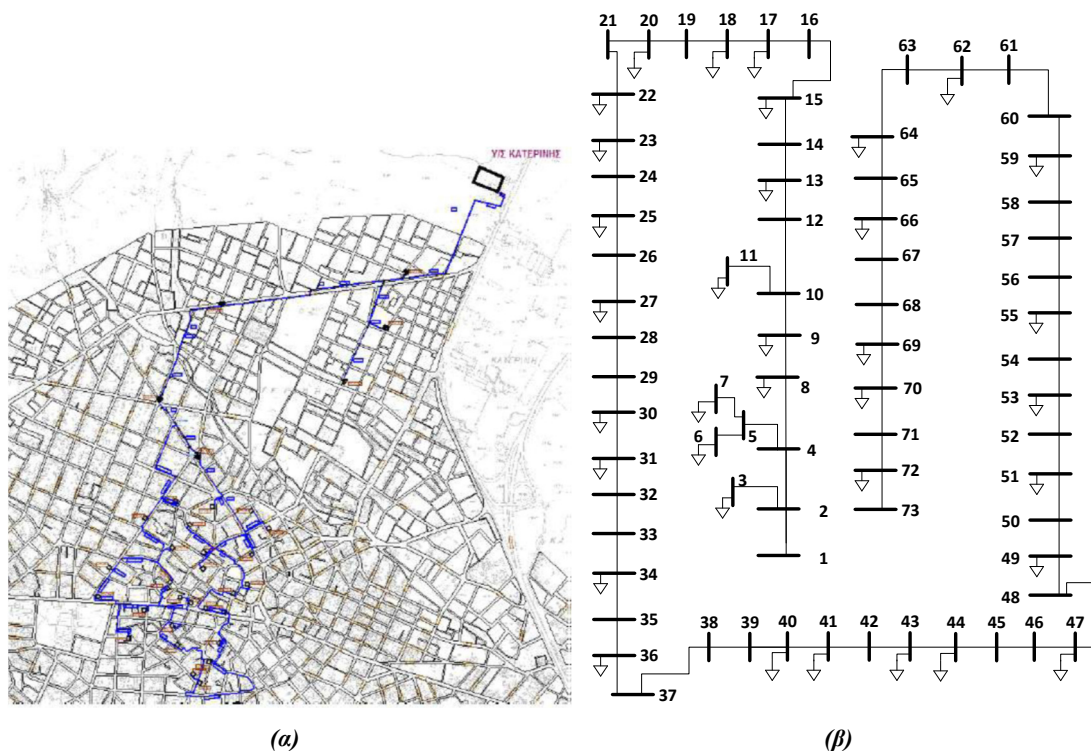
### 6.3 Εφαρμογή του προτεινόμενου εργαλείου για τη μελέτη της επίδρασης της επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής

Για τη μελέτη της επίδρασης των επαγωγικών φορτιστών στο δίκτυο διανομής εξετάζεται μία γραμμή διανομής που αποτελεί τμήμα του αστικού δικτύου διανομής Μέσης Τάσης (Μ.Τ.) της Κατερίνης (Εικόνα 6-8-α). Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 35 υποσταθμούς φορτίου ΜΤ/ΧΤ με ονομαστική ισχύ: 3 των 160 kVA, 1 των 250kVA, 3 των 400 kVA, 1 των 500 kVA, 22 των 630 kVA, 1 των 1000 kVA και 4 των 1260 kVA. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του κεντρικού μετασχηματιστή ΜΤ/ΥΤ είναι 25MVA. Το μονογραμμικό διάγραμμα της γραμμής διανομής απεικονίζεται στην Εικόνα 6-8-β.

Τα εξεταζόμενα σενάρια απεικονίζονται στον Πίνακα 6-3. Στο σενάριο αναφοράς (Σενάριο - Α) θεωρείται ότι δεν υπάρχουν ηλεκτρικά οχήματα στο δίκτυο.

Πίνακας 6-3: Περιγραφή των εξεταζόμενων σεναρίων

Σενάριο	Περίπτωση	Χρήστες που φορτίζουν στο σπίτι	Χρήστες που βασίζονται σε λύσεις γρήγορης επαγωγικής φόρτισης	Δυναμική Επαγωγική Φόρτιση
Σενάριο Α		0	0	Όχι
Σενάριο Β		1000	0	Όχι
Σενάριο Γ	I	1000	100	Όχι
	II	1000	300	Όχι
Σενάριο Δ	I	1000	100	Ναι
	II	1000	300	Ναι



Εικόνα 6-8: (α) Γραμμή διανομή Μ.Τ του δικτύου της Κατερίνης και (β) μονογραμμικό διάγραμμα της γραμμής διανομής

Στο Σενάριο Β λαμβάνεται υπόψιν ένας στόλος 1000 ηλεκτρικών οχημάτων ο οποίος αξιοποιεί την οικιακή φόρτιση. Η πλειοψηφία των οχημάτων (Πίνακας 6-4) είναι επιβατικά οχήματα τύπου Μ1, ενώ λαμβάνεται, επίσης, υπόψιν και ένας μικρότερος αριθμός οχημάτων L7e (μικρά οχήματα πόλης). Οι χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων αξιοποιούν δύο επίπεδα φόρτισης: Επίπεδο 1 (Level-1) στα 3.6kW και Επίπεδο-2 (Level-2) στα 11kW. Ο Πίνακας 6-4

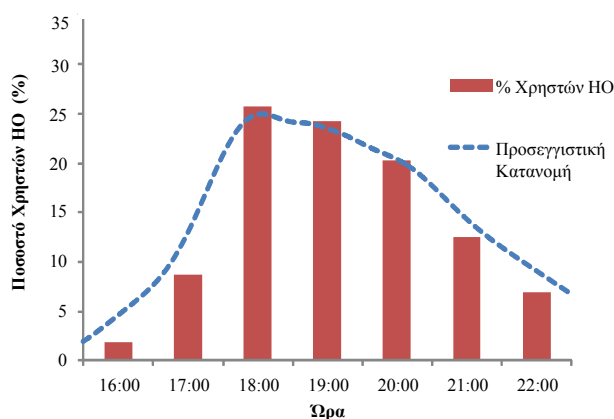
παρουσιάζει την πιθανότητα ένας χρήστης να φορτίσει σε ένα από τα δύο επίπεδα, ενώ απεικονίζει, επίσης, την κατανάλωση της κάθε κατηγορίας οχήματος.

Πίνακας 6-4: Παράμετροι για την εκτίμησή των ενεργειακών αναγκών οικιακής φόρτισης

Παράμετρος	Κατηγορία			
	L7e		M1	
Ποσοστό Ηλεκτρικών Οχημάτων	20%		80%	
Πιθανότητα για κάθε επίπεδο φόρτισης	<i>Level1</i>	<i>Level2</i>	<i>Level1</i>	<i>Level2</i>
	90%	10%	85%	15%
Κατανάλωση (kWh/km)	0.13		0.16	
Διανύμενη Απόσταση (km)	<i>Μέση Τιμή</i>		<i>Τυπική Απόκλιση</i>	
	34,2		5	
Ωρα Αφίξης	<i>Η πιθανότητα ορίζεται σύμφωνα με την κατανομή στην Εικόνα 6-9</i>			

Η διάρκεια της φόρτισης βασίζεται στην ημερήσια διανύμενη απόσταση και, ακολούθως, στην κατανάλωση της μπαταρίας του οχήματος. Σύμφωνα με πραγματικά δεδομένα σχετικά με τη συμπεριφορά οδηγών στην πόλη Douai της Γαλλίας [126], η ημερήσια διανύμενη απόσταση μπορεί να θεωρηθεί στοχαστική παράμετρος που ορίζεται από κανονική κατανομή με μέση τιμή 34,2 km και τυπική απόκλιση 5 km. Η φόρτιση στο σπίτι αναμένεται να ξεκινήσει μόλις το όχημα επιστρέψει στο σπίτι, έχοντας πραγματοποιήσει το τελευταίο ταξίδι της ημέρας. Σύμφωνα με πραγματικά δεδομένα για την πόλη Douai της Γαλλίας [126], οι περισσότεροι χρήστες αναμένεται να επιστρέφουν σπίτι στις 18:00, ενώ ένας, επίσης, μεγάλος αριθμός χρηστών επιστρέφει σπίτι στις 19:00 το απόγευμα (Εικόνα 6-9). Μία γκαουσιανή κατανομή, όπως ορίζεται στην (6.1), με 6 συστατικά (Πίνακας 6-5), φαίνεται να είναι μία αρκετά καλή προσέγγιση για τη ζητούμενη κατανομή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-9.

Οι υποδομές γρήγορης επαγωγικής φόρτισης αναμένεται να αποδίδουν μία μέση ισχύ 30kW στα ηλεκτρικά οχήματα, όπως περιγράφεται στην αναφορά [128]. Μία μέση απόδοση 90% και 85% λαμβάνεται υπόψιν για τους στατικούς και δυναμικούς φορτιστές αντίστοιχα. Για την περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης (Σενάριο Γ στον Πίνακα 5-3) λαμβάνονται υπόψιν δύο υποπεριπτώσεις. Στην πρώτη, 100 χρήστες φορτίζουν το όχημά τους καθημερινά σε υποδομές γρήγορης στατικής επαγωγικής φόρτισης (Σενάριο Γ-I). Μία μεγαλύτερη διείσδυση στατικών επαγωγικών φορτιστών λαμβάνεται υπόψιν στη δεύτερη περίπτωση, όπου 300 χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων αξιοποιούν καθημερινά τις αντίστοιχες υποδομές (Σενάριο Γ-II). Η ώρα της ημέρας που κάθε όχημα αναμένεται να εισέλθει σε έναν στατικό επαγωγικό φορτιστή, καθώς και η διάρκεια της φόρτισης ορίζονται σύμφωνα με τις κατανομές που περιγράφονται στην ενότητα 6.2.1.



Εικόνα 6-9: Κατανομή πιθανότητας σχετικά με την άφιξη των χρηστών ΗΟ στο σπίτι, έχοντας πραγματοποιήσει το τελευταίο ταξίδι της ημέρας [127].

Η δυναμική επαγωγική φόρτιση λαμβάνεται υπόψιν στο *Σενάριο Δ*. Για την εκτίμηση του μέγιστου αριθμού επαγωγικών φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν στο δίκτυο διανομής, εφαρμόζεται το εργαλείο που περιγράφεται στην Εικόνα 6-5, θεωρώντας τις δύο υποπεριπτώσεις σχετικά με τους στατικούς επαγωγικούς φορτιστές που περιγράφηκαν προηγουμένως. Ειδικότερα, στα *Σενάρια Δ-I* και *Δ-II* (Πίνακας 6-3), 100 και 300 χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων αντίστοιχα αξιοποιούν καθημερινά υποδομές στατικής φόρτισης.

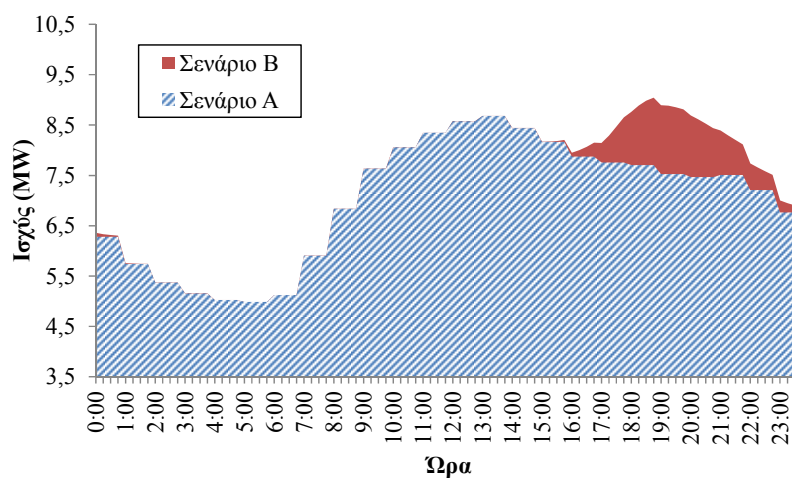
*Πίνακας 6-5: Τιμές των παραμέτρων της Γκαουσιανής κατανομής σχετικά με την άφιξη των χρηστών ΗΟ στο σπίτι, έχοντας πραγματοποιήσει το τελευταίο ταξίδι της ημέρας*

Συστατικό	Παράμετρος		
	$\rho$	$\mu$	$\sigma$
1	0,200857	18,06	0,647639
2	0,003561	18,77	0,201738
3	0,013127	19,11	0,300308
4	0,085756	19,64	0,641204
5	0,246303	20,48	1,394415
6	0,027204	16,62	0,497308

Η παρούσα ανάλυση της επίδρασης των επαγωγικών φορτιστών στο δίκτυο έχει ως στόχο να προσδιορίσει τα όρια του υφιστάμενου δικτύου σχετικά με την εγκατάσταση υποδομών επαγωγικής φόρτισης. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται το χειρότερο δυνατό σενάριο, υποθέτοντας ότι οι επαγωγικοί φορτιστές τοποθετούνται ομοιόμορφα στους πιο φορτισμένους ζυγούς του δικτύου.

### 6.3.1 Επίδραση της στατικής επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής

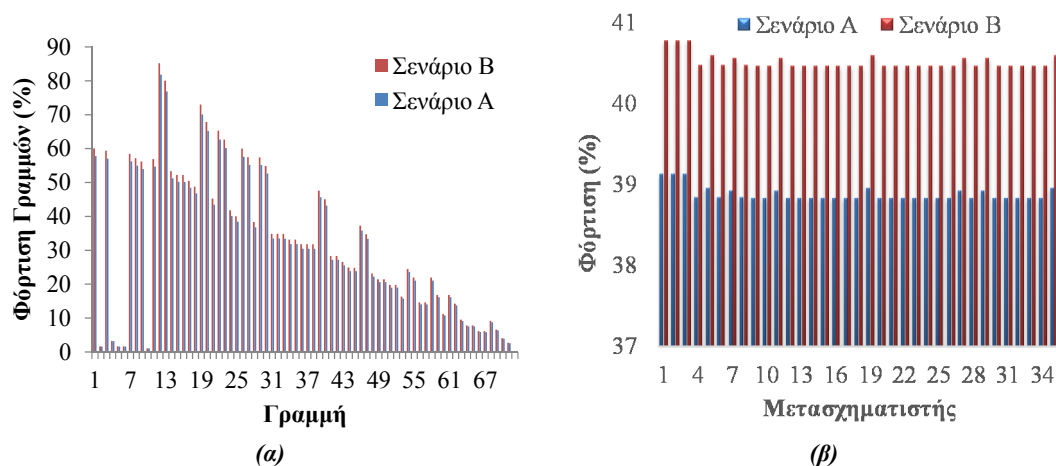
Η καμπύλη φορτίου για τα σενάρια Α και Β απεικονίζεται στην Εικόνα 6-10. Για το Σενάριο Α (σενάριο αναφοράς χωρίς την είσοδο ηλεκτρικών οχημάτων) λαμβάνεται υπόψιν η θερινή καμπύλη φορτίου του δικτύου της Κατερίνης, η οποία παρουσιάζει μία ιδιαίτερα υψηλή ζήτηση τις μεσημεριανές ώρες. Για το σενάριο αυτό, η κορυφή της καμπύλης φορτίου (8,68MW) παρατηρείται μεταξύ 13:00 και 14:00 το μεσημέρι. Στο Σενάριο Β παρατηρείται μία αύξηση στην απογευματινή και βραδινή ζήτηση λόγω των επιπλέον ενεργειακών αναγκών για την οικιακή φόρτιση 1000 οχημάτων. Η αιχμή του φορτίου παρατηρείται τώρα μεταξύ 18:45-19:00 το απόγευμα, λόγω της υψηλής ζήτησης για οικιακή φόρτιση, αλλά και λόγω της ήδη υψηλής ζήτησης του δικτύου που παρατηρείται το χρονικό αυτό διάστημα.



*Εικόνα 6-10: Καμπύλη φορτίου για τα Σενάρια Α και Β*

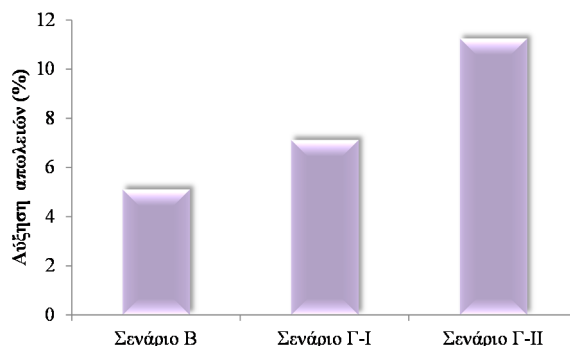
Η μέγιστη φόρτιση των γραμμών, ως ποσοστό του θερμικού τους ορίου, στα Σενάρια Α και Β απεικονίζεται στην Εικόνα 6-11-α. Η αύξηση της ζήτησης που εισάγεται στο δίκτυο λόγω της οικιακής φόρτισης στο Σενάριο Β έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση στη φόρτιση των

γραμμών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-11-α. Η υψηλότερη φόρτιση γραμμής στο Σενάριο Β αγγίζει το 85,2% και παρατηρείται στη γραμμή 12 (η οποία συνδέει τους ζυγούς 12 και 13). Επιπλέον, οι γραμμές που βρίσκονται πιο κοντά στον κεντρικό υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ φορτίζονται περισσότερο συγκριτικά με τις γραμμές που βρίσκονται πιο μακριά από αυτόν, καθώς επιβαρύνονται με τη συνολική ζήτηση όλων σχεδόν των ζυγών του εξεταζόμενου δικτύου.



Εικόνα 6-11: Σενάρια Α και Β: (α) Φόρτιση των γραμμών την ώρα αιχμής φορτίου, και (β) μέγιστη φόρτιση των μετασχηματιστών ως ποσοστό του θερμικού ορίου κάθε μετασχηματιστή.

Επίσης, λόγω της επιπλέον ζήτησης από τη φόρτιση των οχημάτων στο σπίτι στο Σενάριο Β, παρατηρείται μία αύξηση 5,1% στις συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς (Σενάριο Α), όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-12.



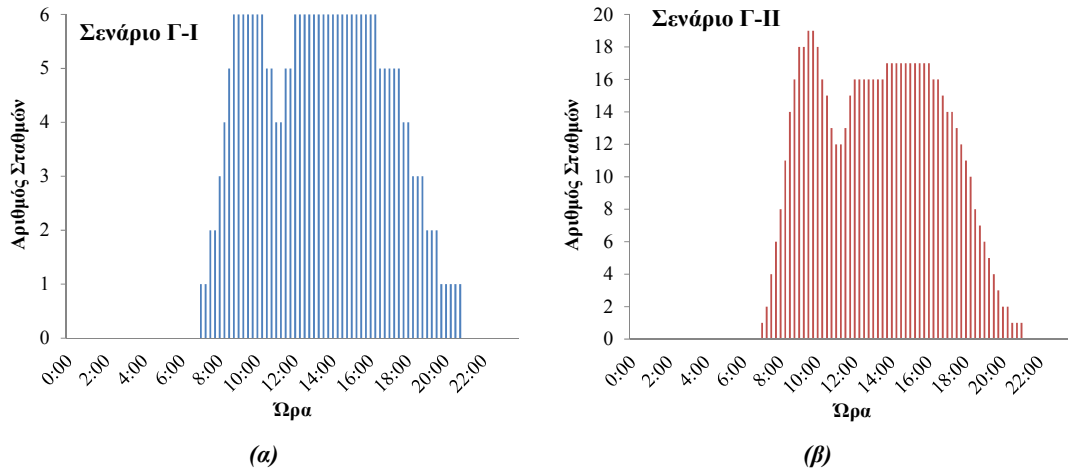
Εικόνα 6-12: Αύξηση απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με το Σενάριο Α (σενάριο αναφοράς) για τα εξεταζόμενα σενάρια.

Σχετικά με το Σενάριο Α, η μέγιστη φόρτιση των μετασχηματιστών (Εικόνα 6-11-β) είναι αισθητά μικρότερη από το μέγιστο θερμικό όριο τους. Οι ενεργειακές ανάγκες για οικιακή φόρτιση στο Σενάριο Β αν και αυξάνουν τη φόρτιση των μετασχηματιστών όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-11-β, δεν οδηγούν, ωστόσο, σε σημαντικές μεταβολές σχετικά με το μέγιστο θερμικό όριο των μετασχηματιστών. Ειδικότερα, η μέγιστη φόρτιση των μετασχηματιστών αυξάνεται από 39,1% στο Σενάριο Α σε 40,8% στο σενάριο Β.

Στο σενάριο Β, η φόρτιση των οχημάτων στο σπίτι προκαλεί μία πτώση στις τιμές των τάσεων όλων των ζυγών τις βραδινές και απογευματινές ώρες, χωρίς, ωστόσο, να παραβιάζονται τα επιτρεπόμενα όρια. Ειδικότερα, στο Σενάριο Β, η ελάχιστη τιμή της τάσης (0,96 α.μ.) και η μέγιστη απόκλιση τάσης (0,92%) παρατηρούνται στους ζυγούς 72 και 73 οι οποίοι είναι οι πιο απομακρυσμένοι ζυγοί από τον κεντρικό υποσταθμό του δικτύου (Εικόνα 6-8-β).

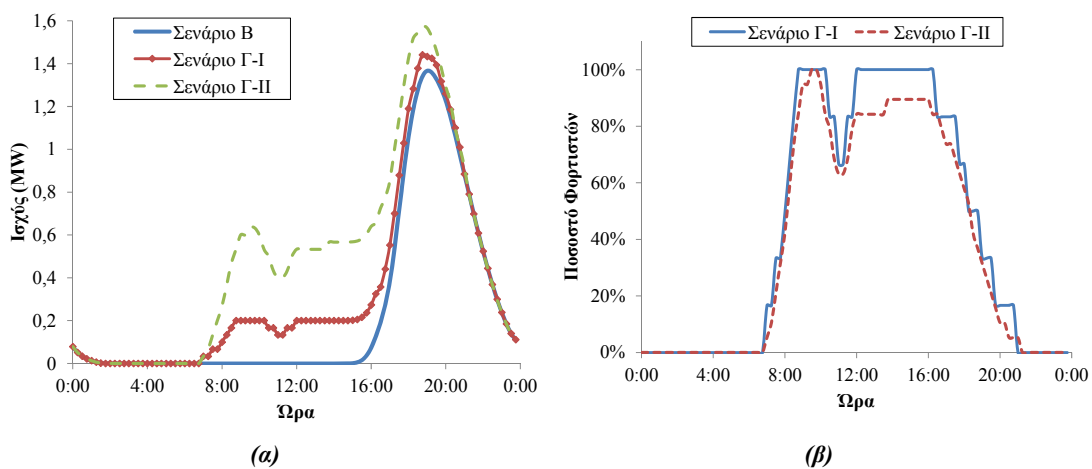
Η εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην ενότητα 6.2.1 για την εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών στατικής επαγωγικής φόρτισης στις δύο υποπεριπτώσεις του Σεναρίου

Γ (Σενάριο Γ-I και Γ-II), υποδεικνύει ότι ο αριθμός των στατικών φορτιστών που λειτουργούν κάθε ώρα της ημέρας θα είναι αυτός που δίνεται στην Εικόνα 6-13. Πιο συγκεκριμένα, όπως είναι φανερό στην Εικόνα 6-13-α και β, ένας αριθμός 6 και 19 σταθμών απαιτείται για την εξυπηρέτηση 100 ή 300 χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων αντίστοιχα στα Σενάρια Γ-I και Γ-II.



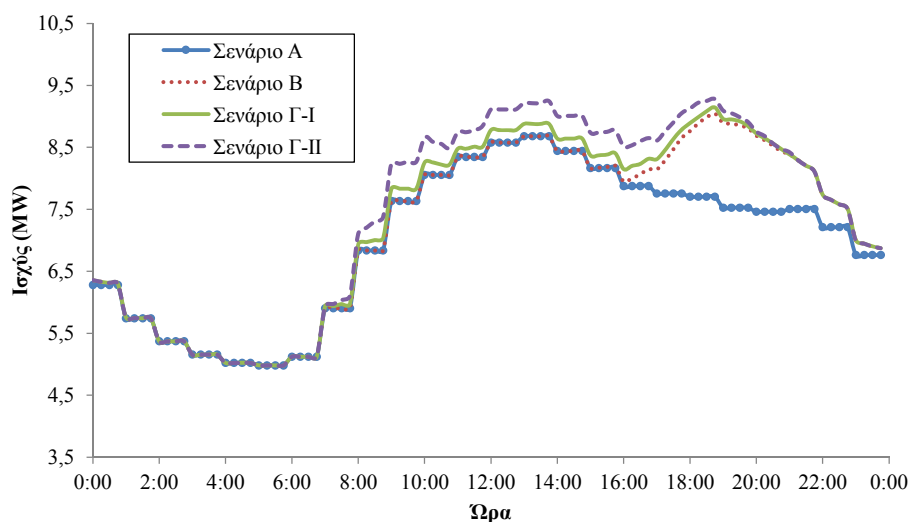
Εικόνα 6-13: Αριθμός στατικών επαγωγικών φορτιστών που απαιτούνται για την κάλυψη των ημερήσιων αναγκών (α) 100 χρηστών (Σενάριο Γ-I) και (β) 300 χρηστών (Σενάριο Γ-II)

Η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων για τα Σενάρια Γ-I και Γ-II απεικονίζεται στην Εικόνα 6-14-α. Η εξυπηρέτηση οχημάτων σε στατικούς επαγωγικούς φορτιστές εισάγει μία επιπλέον ζήτηση κατά τη διάρκεια των πρωινών και μεσημεριανών ωρών, η οποία προστίθεται στην απογευματινή ζήτηση που απαιτείται για την οικιακή φόρτιση των οχημάτων στο Σενάριο Β. Πιο συγκεκριμένα, όταν όλοι οι σταθμοί στατικής επαγωγικής φόρτισης λειτουργούν την ίδια χρονική στιγμή μεταξύ 9:30 και 10:00 το πρωί (Εικόνα 6-14-β), η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται κατά 0.2MW και 0.63MW στα Σενάρια Γ-I και Γ-II αντίστοιχα. Επιπλέον, η λειτουργία ενός αυξημένου αριθμού στατικών επαγωγικών φορτιστών τις απογευματινές ώρες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-14-β, προκαλεί μία αύξηση στη συνολική ζήτηση των οχημάτων το αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Πιο συγκεκριμένα, το χρονικό διάστημα μεταξύ 18:45 και 19:00 το ποσοστό λειτουργίας των στατικών επαγωγικών φορτιστών κυμαίνεται στο 50% και 37% για τα Σενάρια Γ-I και Γ-II αντίστοιχα (Εικόνα 6-14-β), με αποτέλεσμα η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων να αυξάνεται κατά 6,1% και 15,2% σε σχέση με το Σενάριο Β.



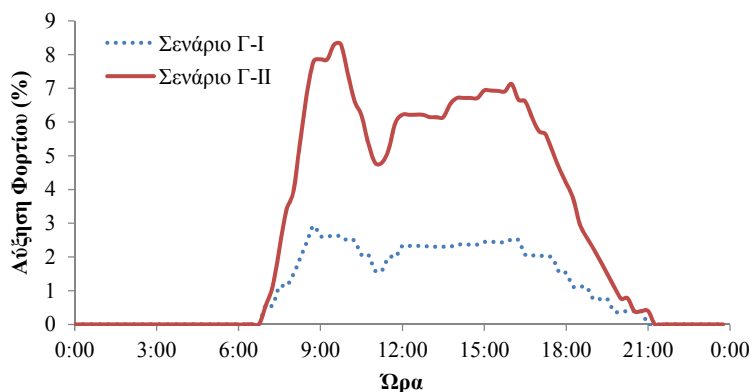
Εικόνα 6-14: (α) Ζήτηση Ηλεκτρικών Οχημάτων για τα Σενάρια Β, Γ-I και Γ-II και (β) Ποσοστό στατικών επαγωγικών φορτιστών που λειτουργούν κάθε ώρα της ημέρας

Η μεταβολή που επιφέρει η φόρτιση σε στατικούς επαγωγικούς φορτιστές στην καμπύλη φορτίου του δικτύου απεικονίζεται στην Εικόνα 6-15. Η λειτουργία των στατικών επαγωγικών φορτιστών δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την καμπύλη φορτίου τις απογευματινές ώρες. Ειδικότερα παρατηρείται μία μικρή αύξηση 1,11% και 2,58% (σε σχέση με το Σενάριο Β) το χρονικό διάστημα 18:45-19:00 για τα Σενάρια Γ-I και Γ-II αντίστοιχα. Επιπλέον, είναι φανερό στην Εικόνα 6-15 ότι η λειτουργία των στατικών επαγωγικών φορτιστών κατά τη διάρκεια της ημέρας εισάγει μία σημαντική αύξηση στο φορτίο του δικτύου κατά τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες. Λόγω της ιδιαίτερα αυξημένης ζήτησης του δικτύου (Σενάριο Α) το αντίστοιχο χρονικό διάστημα, παρατηρείται μία επιπλέον αιχμή στο φορτίο τις ώρες αυτές.



Εικόνα 6-15: Καμπύλες φορτίου για τα Σενάρια Γ-I και Γ-II.

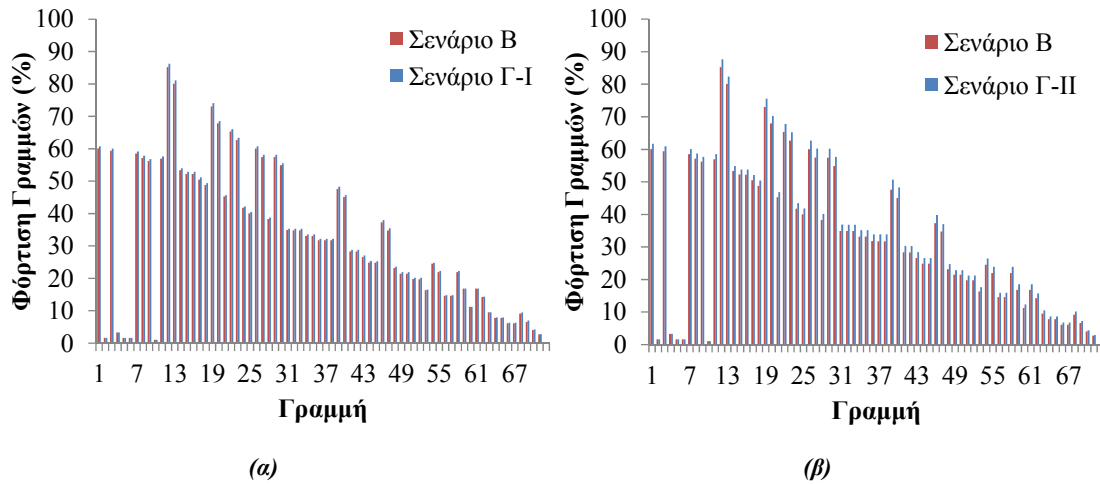
Για παράδειγμα, στην περίπτωση που ένας μικρός αριθμός φορτίσεων σε στατικούς επαγωγικούς φορτιστές λαμβάνεται υπόψιν (Σενάριο Γ-I και 100 φορτίσεις κάθε μέρα), παρατηρείται μία αύξηση 2,3% στο φορτίο του δικτύου μεταξύ 13:00 και 14:00 (Εικόνα 6-16). Ωστόσο, η ήδη μεγάλη ζήτηση του δικτύου το χρονικό αυτό διάστημα οδηγεί σε μία συνολική ζήτηση που αγγίζει τα 8.9MW. Μία ακόμα πιο έντονη μεταβολή παρατηρείται στην αύξηση του φορτίου τις μεσημεριανές ώρες σε περίπτωση που ληφθεί υπόψιν ένας αυξημένος αριθμός καθημερινών φορτίσεων σε στατικούς επαγωγικούς φορτιστές. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του Σεναρίου Γ-II, μία αύξηση περίπου 8,3% παρατηρείται στο φορτίο του δικτύου μεταξύ 9:30 και 10:00 το πρωί, ενώ η αντίστοιχη αύξηση μεταξύ 13:45 και 14:00 το μεσημέρι είναι ίση με 6,5%, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-16. Η μεσημβρινή αυτή αύξηση στη ζήτηση συμπίπτει με την ιδιαίτερα υψηλή ζήτηση του δικτύου, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται μία νέα αιχμή στην καμπύλη φορτίου, ίση με 9,25MW.



Εικόνα 6-16: Αύξηση Φορτίου για τα Σενάρια Γ-I και Γ-II συγκριτικά με το Σενάριο Β.



Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-17, η γραμμή που φορτίζεται περισσότερο στο Σενάριο Γ είναι η γραμμή 12, η οποία συνδέει τους ζυγούς 12 και 13. Σε σχέση με το Σενάριο Β, μία σχετικά μικρή αύξηση παρατηρείται στη μέγιστη φόρτιση της γραμμής 12. Ωστόσο, η ιδιαίτερα αυξημένη φόρτιση της γραμμής που παρατηρείται ακόμη και χωρίς να ληφθεί υπόψιν η στατική επαγωγική φόρτιση έχει ως αποτέλεσμα η μέγιστη φόρτιση της συγκεκριμένης γραμμής να γίνεται ίση με το 88.3% και 89.4% του θερμικού της ορίου στα Σενάρια Γ-I και Γ-II αντίστοιχα.

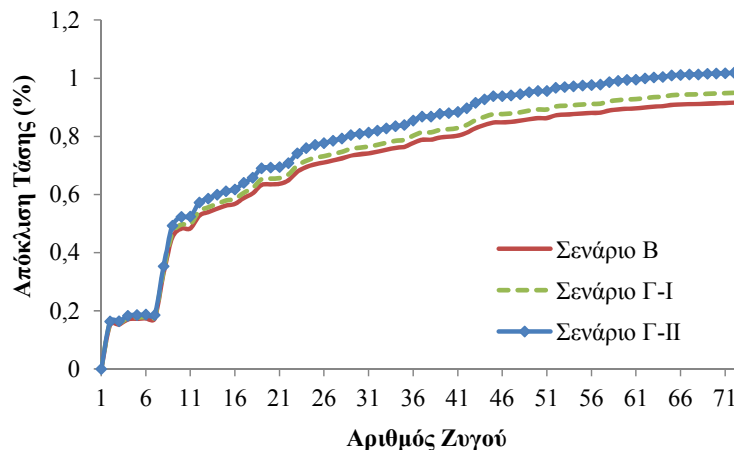


Εικόνα 6-17: Μέγιστη Φόρτιση των γραμμών του δικτύου για τα σενάρια (α) Γ-I και (β) Γ-II

Επίσης, η επιπλέον ζήτηση των στατικών επαγωγικών φορτιστών αυξάνει τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου κατά 7.12% και 11.25% για τα Σενάρια Γ-I και Γ-II αντίστοιχα, σε σύγκριση με το Σενάριο Α, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-12.

Η τοποθέτηση στατικών επαγωγικών φορτιστών σε ζυγούς του δικτύου αυξάνει τη φόρτιση στους αντίστοιχους μετασχηματιστές. Ωστόσο, η φόρτιση των μετασχηματιστών παραμένει και στις δύο υποπεριπτώσεις του σεναρίου Γ σημαντικά χαμηλότερη από τα αντίστοιχα μέγιστα θερμικά όρια. Ειδικότερα η μέγιστη φόρτιση που παρατηρείται στους μετασχηματιστές είναι ίση με 44,1% και 45,8% για τα Σενάρια Γ-I και Γ-II αντίστοιχα.

Οι μέγιστες/ελάχιστες τιμές της τάσης καθώς και η απόκλιση της τάσης στους ζυγούς του δικτύου παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων, παρά την επιπλέον ζήτηση των στατικών επαγωγικών φορτιστών. Ειδικότερα, η ελάχιστη τιμή της τάσης στον ζυγούς 72 και 73 (οι πιο απομακρυσμένοι ζυγοί του δικτύου) είναι ίση με περίπου 0,96 α.μ. για τα Σενάρια Γ-I και Γ-II.



Εικόνα 6-18: Απόκλιση της τάσης στους ζυγούς του Δικτύου για τα Σενάρια Γ-I και Γ-II

Η απόκλιση της τάσης αν και παρουσιάζει μία αύξηση και για τις δύο υποπεριπτώσεις του Σεναρίου Γ (Εικόνα 6-18), λόγω της ζήτησης των στατικών φορτιστών, παραμένει, ωστόσο, εντός των επιτρεπόμενων ορίων (μικρότερη από 3%).

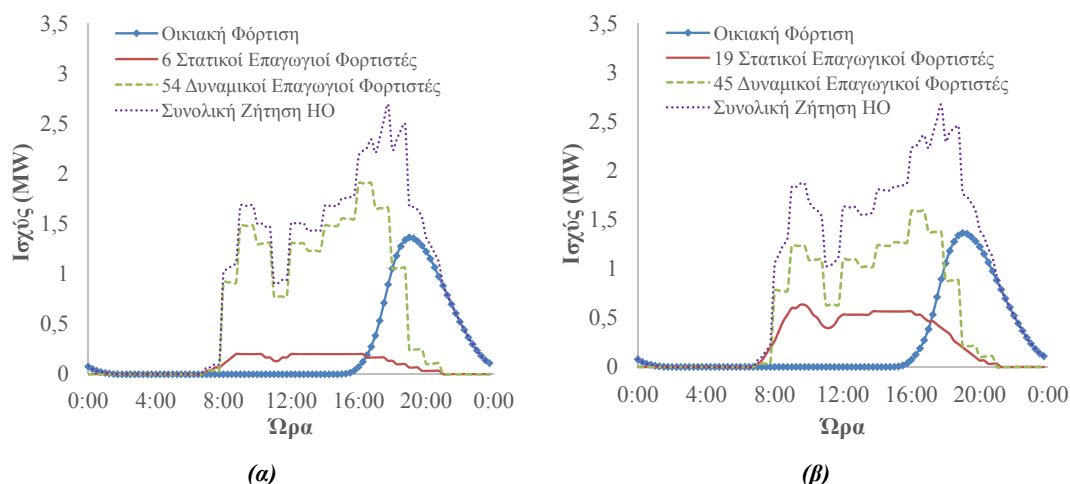
### 6.3.2 Επίδραση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής

Η επίδραση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης στο εξεταζόμενο δίκτυο διανομής μελετάται στο Σενάριο Δ. Ειδικότερα, για τις δύο περιπτώσεις του Σεναρίου Δ, όπου 100 και 300 χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιούν καθημερινά υποδομές στατικής επαγωγικής φόρτισης (Πίνακας 6-3), έχει υπολογισθεί ότι απαιτούνται 6 και 19 *στατικοί* επαγωγικοί φορτιστές αντίστοιχα, για την εξυπηρέτηση των αντίστοιχων ενεργειακών αναγκών. Ο μέγιστος αριθμός *δυναμικών* φορτιστών που δύναται να λειτουργούν ταυτόχρονα, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στην Εικόνα 6-5, προσδιορίζεται ίσος με 54 και 45 φορτιστές για τα Σενάρια Δ-I και Δ-II αντίστοιχα (Πίνακας 6-6).

Πίνακας 6-6: Αριθμός στατικών και δυναμικών φορτιστών για κάθε εξεταζόμενο σενάριο

	Στατικοί Φορτιστές για την εξυπηρέτηση των χρηστών	Μέγιστος Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	Συνολικός Αριθμός Επαγωγικών Φορτιστών
Σενάριο Δ-I	6	54	60
Σενάριο Δ-II	19	45	64

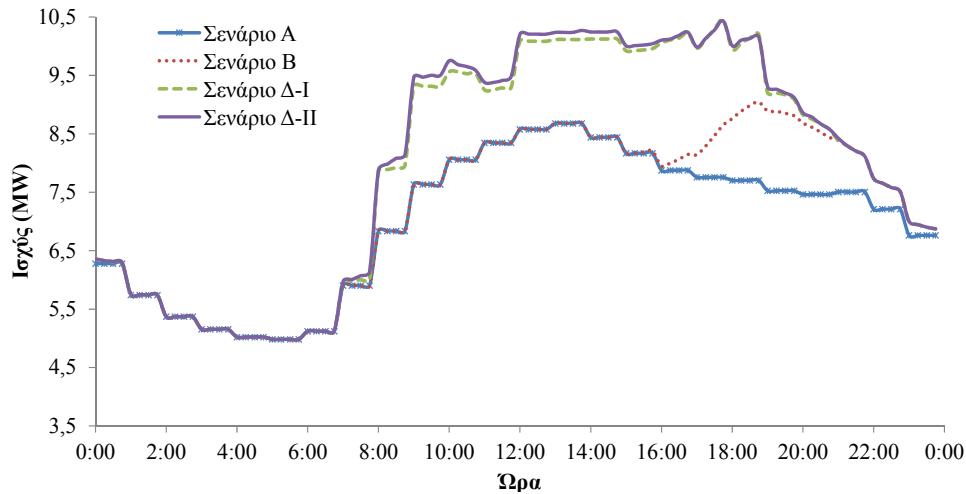
Η δυναμική επαγωγική φόρτιση εισάγει μία ιδιαίτερα υψηλή ζήτηση τόσο τις πρωινές όσο και τις απογευματινές ώρες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-19. Ειδικότερα, μεταξύ 9:00 και 10:00 το πρωί η ζήτηση των δυναμικών φορτιστών στα σενάρια Δ-I και Δ-II είναι ίση με 1,5MW και 1,2MW. Επιπλέον, η ζήτηση παραμένει υψηλή και τις απογευματινές ώρες: το χρονικό διάστημα 17:00 - 18:00 παρατηρείται μία αυξημένη λειτουργία δυναμικών φορτιστών απαιτώντας μία ισχύ ίση με 1,7MW και 1,4MW για τις δύο περιπτώσεις του Σεναρίου Δ. Η ζήτηση αυτή των δυναμικών φορτιστών συμπίπτει με την ήδη αυξημένη ζήτηση λόγω οικιακής φόρτισης, με αποτέλεσμα μία σημαντική αιχμή στη συνολική ζήτηση των ΗΟ. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-19, η συνολική ζήτηση των ΗΟ το χρονικό διάστημα 17:45-18:00 γίνεται ίση με 2,7MW περίπου για τα Σενάρια Δ-I και Δ-II.



Εικόνα 6-19: Ζήτηση Ηλεκτρικών Οχημάτων για τα Σενάρια (α) Δ-I και (β) Δ-II.

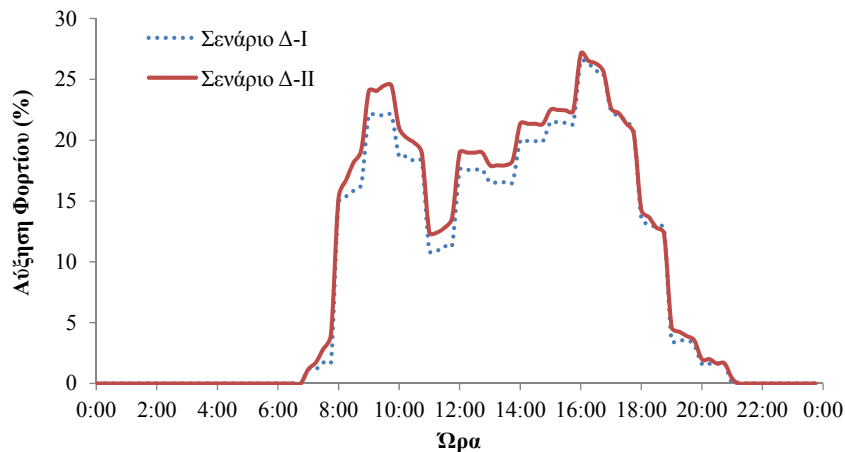
Η καμπύλη φορτίου για τα σενάρια Δ-I και Δ-II απεικονίζεται στην Εικόνα 6-20. Η υψηλή ζήτηση των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών κατά τη διάρκεια της ημέρας οδηγεί σε μία ιδιαίτερα αυξημένη ζήτηση φορτίου, η οποία παραμένει υψηλή για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Ειδικότερα, για το διάστημα 12:00-19:00 η ζήτηση του δικτύου παραμένει υψηλότερη από 9,9MW και για τις δύο περιπτώσεις του σεναρίου Δ, με τη ζήτηση να αγγίζει

τα 10,4MW μεταξύ 17:45 και 18:00. Η ιδιαίτερα αυξημένη αυτή ζήτηση οφείλεται τόσο στη ζήτηση των επαγωγικών φορτιστών (δυναμικών και στατικών) αλλά και στην υψηλή ζήτηση λόγω οικιακής φόρτισης το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.



**Εικόνα 6-20: Καμπύλες Φορτίου για τα Σενάρια Δ-I και Δ-II.**

Συγκρίνοντας την αύξηση του φορτίου που εισάγεται στα Σενάρια Δ-I και Δ-II με το αντίστοιχο φορτίο που παρατηρείται στο Σενάριο B (Εικόνα 6-21) είναι φανερό ότι η λειτουργία των επαγωγικών φορτιστών ευθύνεται για τη σημαντική αύξηση στην πρωινή ζήτηση (9:00-10:00). Το χρονικό αυτό διάστημα το φορτίο του δικτύου αυξάνεται κατά 22% και 24%, σε σχέση με το Σενάριο B, για τα Σενάρια Δ-I και Δ-II. Επιπλέον, η ζήτηση των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών αυξάνει σημαντικά την καμπύλη φορτίου του δικτύου το μεσημέρι και νωρίς το απόγευμα. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ 16:00 και 17:00 μία μέση αύξηση περίπου 26% παρατηρείται στο φορτίο και στις δύο υποπεριπτώσεις του Σεναρίου Δ, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-21.

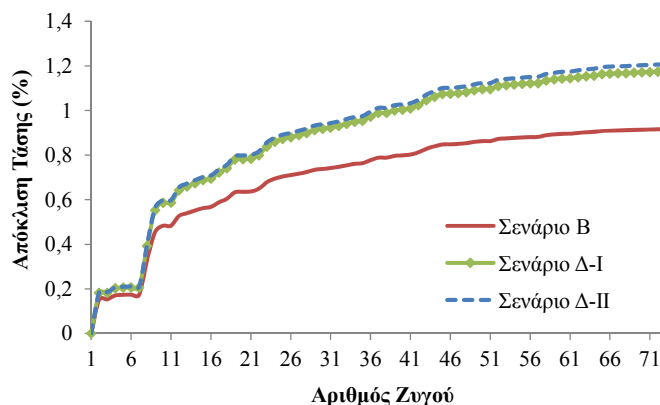


**Εικόνα 6-21: Αύξηση φορτίου του δικτύου, σε σύγκριση με το Σενάριο B, για τα Σενάρια Δ-I και Δ-II.**

Η σημαντικά αυξημένη ζήτηση των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών αυξάνει, επίσης, το φορτίο των μετασχηματιστών του δικτύου. Ωστόσο, η εγκατάσταση επαγωγικών φορτιστών δεν οδηγεί σε κάποια παραβίαση των αντίστοιχων θερμικών ορίων των μετασχηματιστών. Ειδικότερα η φόρτιση των μετασχηματιστών παραμένει σημαντικά μικρότερη από τα αντίστοιχα μέγιστα θερμικά όρια, καθώς η μέγιστη φόρτιση που παρατηρείται στους μετασχηματιστές είναι ίση με 59% για το Σενάριο Δ.

Οι ιδιαίτερα αυξημένες ενεργειακές ανάγκες των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών εισάγουν μία αύξηση στην απόκλιση τάσης (Εικόνα 6-22). Ωστόσο, η απόκλιση της τάσης

παραμένει σημαντικά χαμηλότερη από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο (3%). Ομοίως, παραβιάσεις δεν παρατηρούνται στις μέγιστες-ελάχιστες τιμές της τάσης, λόγω της επιπλέον ζήτησης των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών. Ειδικότερα, μία αύξηση μικρότερη από 0,7% σε σύγκριση με το Σενάριο Α (σενάριο αναφοράς), παρατηρείται στην ελάχιστη τιμή της τάσης για τους ζυγούς 72 και 73 (οι πιο “απομακρυσμένοι” ζυγοί του εξεταζόμενου δικτύου).



Εικόνα 6-22: Απόκλιση της Τάσης στους ζυγούς του Δικτύου για τα Σενάρια Δ-I και Δ-II

Ιδιαίτερα αυξημένη είναι στην περίπτωση του σεναρίου Δ η επιβάρυνση των γραμμών του δικτύου. Μάλιστα, η φόρτιση των γραμμών είναι ο περιορισμός που καθορίζει το μέγιστο αριθμό των δυναμικών φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν στο δίκτυο. Επιπλέον, οι ημερήσιες απώλειες ενεργού ισχύος αυξάνονται κατά 24,5% και 26,2% για τα Σενάρια Δ-I και Δ-II, σε σύγκριση με το Σενάριο Α, λόγω της λειτουργίας των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών.

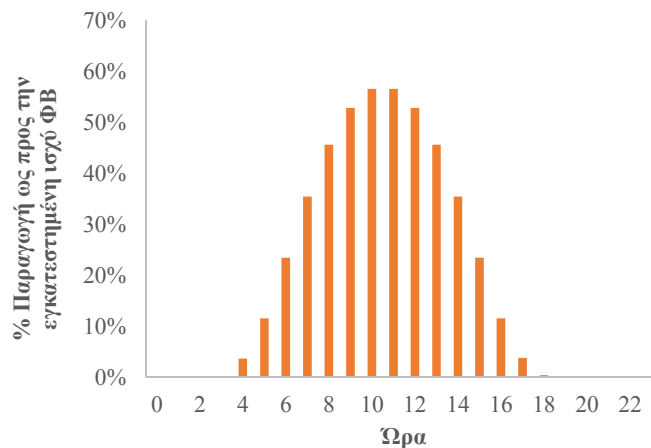
Ο Πίνακας 6-7 απεικονίζει συνοπτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν.

Πίνακας 6-7: Συνοπτικά Αποτελέσματα για τα σενάρια που εξετάστηκαν

Παράμετρος	Σενάριο						
	A	B	Γ-I	Γ-II	Δ-I	Δ-II	
<i>Συνολική</i>	8,68	9,05	9,15	9,28	10,45	10,43	
Αιχμή Φορτίου	Αιχμή ΗΟ	0,00	1,34	1,44	1,57	2,69	3,17
	Ωρα Αιχμής	13:00 - 14:00	18:45 - 19:00	18:45 - 19:00	18:45 - 19:00	17:45 - 18:00	17:45 - 18:00
Ημερήσιες Απώλειες Ισχύος (MW)	17,6	18,5	18,8	19,6	21,9	22,2	
Μέγιστη Απόκλιση Τάσης (%)	0,92	0,92	0,95	1,02	1,17	1,21	
Ελάχιστη Τιμή Τάσης (α.μ.)	0,958	0,958	0,957	0,956	0,953	0,952	
Μέγιστη Φόρτιση Γραμμών (%)	81,85	85,23	86,25	87,64	99,85	99,70	

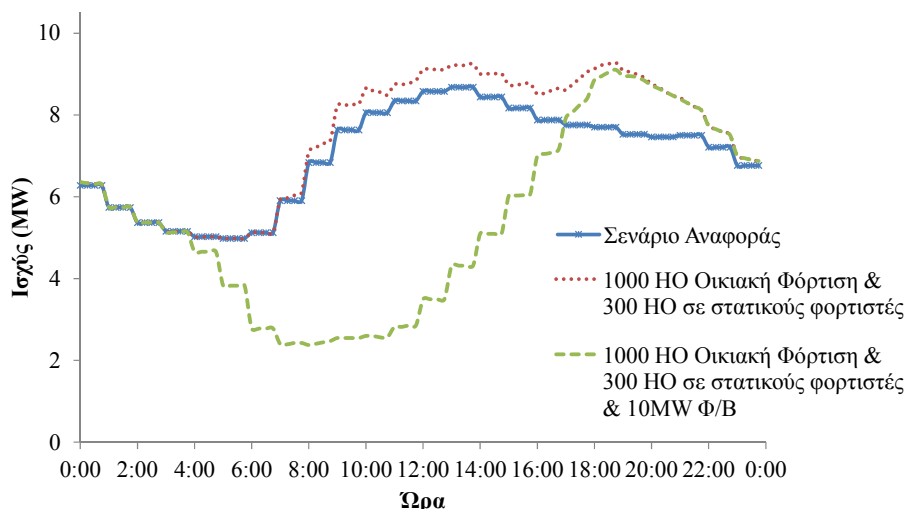
#### 6.4 Επίδραση ΑΠΕ στο μέγιστο αριθμό επαγωγικών φορτιστών που δύνανται να εγκατασταθεί στο δίκτυο

Στην υποενότητα αυτή εξετάζεται η επίδραση της εγκατάστασης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (ΦΒ), στην ικανότητα του δικτύου διανομής να ενσωματώσει υποδομές επαγωγικής φόρτισης. Σχετικά με τη φωτοβολταϊκή παραγωγή λαμβάνεται υπόψιν το ημερήσιο ωριαίο προφίλ παραγωγής, ως ποσοστό της εγκατεστημένης ΦΒ ισχύος, που απεικονίζεται στην Εικόνα 6-23.



Εικόνα 6-23: Ημερήσιο, ωριαίο προφίλ παραγωγής των φωτοβολταϊκών ως ποσοστό της εγκατεστημένης τους ισχύος.

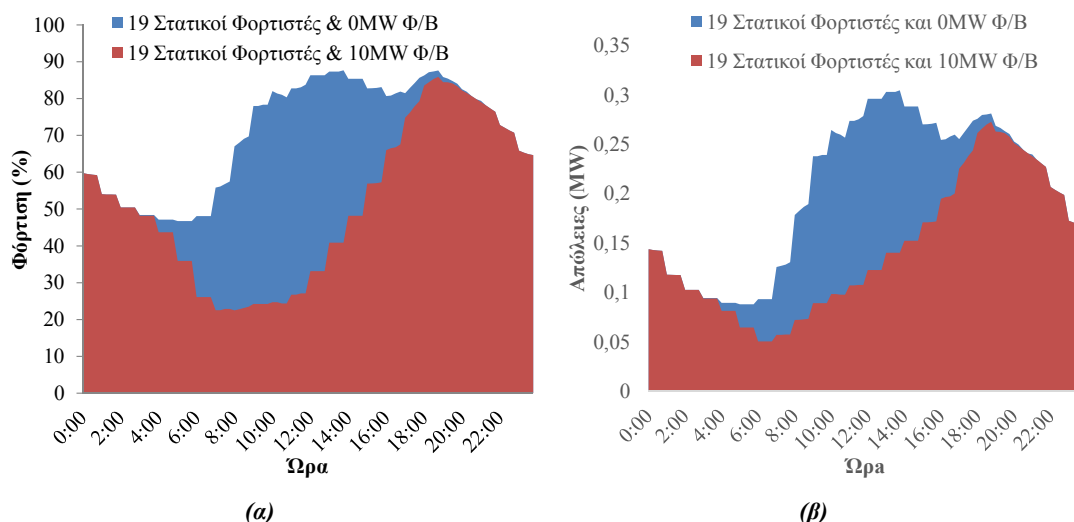
Για το εξεταζόμενο δίκτυο της Κατερίνης έχει προσδιορισθεί ότι απαιτούνται 19 στατικοί επαγωγικοί φορτιστές για να ικανοποιηθούν τις καθημερινές ανάγκες φόρτισης 300 χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων (Σενάριο Γ-II). Για το σενάριο αυτό λαμβάνεται υπόψιν η εγκατάσταση Φ/Β ισχύος 10MW, η παραγωγή των οποίων καθορίζεται σύμφωνα με την Εικόνα 6-23. Είναι φανερό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-24, ότι η παραγωγή των φωτοβολταϊκών δύναται να καλύψει ένα σημαντικό μέρος των ενεργειακών αναγκών τόσο του αρχικού φορτίου του δικτύου όσο και των ενεργειακών αναγκών των στατικών επαγωγικών φορτιστών.



Εικόνα 6-24: Καμπύλη Φορτίου για την περίπτωση εγκατάστασης Φ/Β ισχύος 10MW στο σενάριο όπου 300 φορτίσεις πραγματοποιούνται καθημερινά σε στατικούς επαγωγικούς φορτιστές.

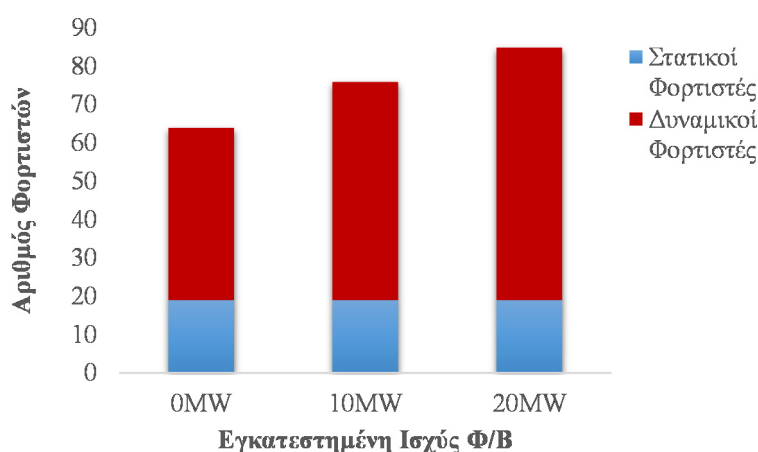
Αν και το φορτίο του δικτύου μειώνεται σημαντικά τις ώρες παραγωγής των φωτοβολταϊκών, συνεχίζει να παρατηρείται μία αιχμή φορτίου τις απογευματινές-βραδινές ώρες, όπου η παραγωγή των Φ/Β είναι μηδενική. Επομένως, αν και η φόρτιση των γραμμών

περιορίζεται τις ώρες παραγωγής των Φ/Β, εντούτοις την ώρα αιχμής φορτίου (18:45-19:00) η φόρτιση των γραμμών κινείται σε υψηλά επίπεδα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-25-α. Ωστόσο η σημαντική μείωση της φόρτισης των γραμμών τις μεσημεριανές και πρωινές ώρες, οδηγεί σε μία σημαντική μείωση των απωλειών ισχύος στο δίκτυο το χρονικό αυτό διάστημα (Εικόνα 6-25-β), με αποτέλεσμα οι συνολικές ημερήσιες απώλειες να περιορίζονται κατά 29%.



**Εικόνα 6-25:**(α) Φόρτιση της πιο επιβαρυνμένης γραμμής του δικτύου και (β) απώλειες στις γραμμές του δικτύου κατά τη διάρκεια της ημέρας για την περίπτωση εγκατάστασης Φ/Β ισχύος 10MW στο σενάριο όπου 300 φορτίσεις πραγματοποιούνται καθημερινά σε στατικούς επαγωγικούς φορτιστές.

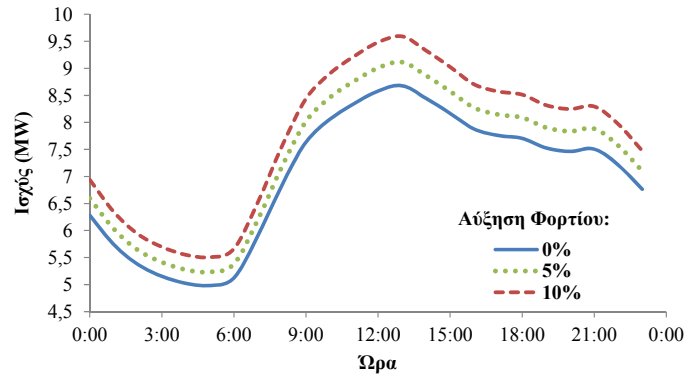
Σύμφωνα και με τα αποτελέσματα της ενότητας 5.2.2, θεωρώντας τη λειτουργία 19 στατικών επαγωγικών φορτιστών στο δίκτυο της Κατερίνης και εφαρμόζοντας το εργαλείο που περιγράφεται στην Εικόνα 6-5, έχει προσδιορισθεί ότι ένας μέγιστος αριθμός 45 φορτιστών δύναται να εγκατασταθεί στο δίκτυο. Ωστόσο, όταν εγκατασταθούν στο δίκτυο φωτοβολταϊκά με εγκατεστημένη ισχύ 10MW, ο μέγιστος αυτός αριθμός δυναμικών φορτιστών αυξάνεται κατά 27% περίπου (Εικόνα 6-26). Ακόμα πιο σημαντική δύναται να είναι η αύξηση του αριθμού των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών στην περίπτωση μίας μεγαλύτερης διείσδυσης ΦΒ. Ειδικότερα, ΦΒ εγκατεστημένης ισχύος 20MW αυξάνουν το μέγιστο αριθμό δυναμικών επαγωγικών φορτιστών κατά 47% (Εικόνα 6-26).



**Εικόνα 6-26:** Αριθμός φορτιστών που μπορούν να εγκατασταθούν στο δίκτυο σε περίπτωση που ληφθεί υπόψη η παραγωγή 10MW ή 20 MW Φ/Β.

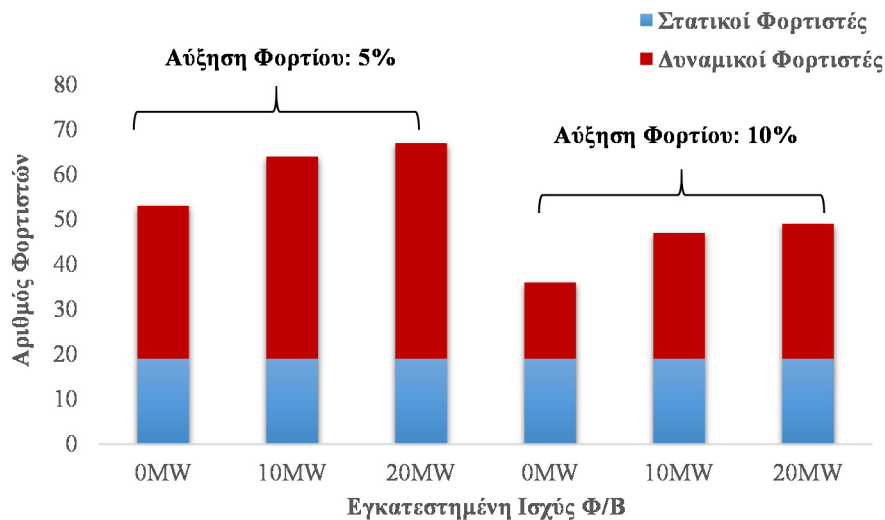
Ιδιαίτερα ευνοϊκή αποδεικνύεται, επίσης, η επίδραση των Φ/Β στην περίπτωση μίας πιθανής μελλοντικής αύξησης φορτίου του δικτύου (Εικόνα 6-27). Ειδικότερα, θεωρώντας το σενάριο όπου 300 χρήστες φορτίζουν καθημερινά το όχημά τους σε στατικούς φορτιστές, μία αύξηση

φορτίου κατά 5% θα απαιτήσει τη μείωση του μέγιστου αριθμού δυναμικών επαγωγικών φορτιστών που δύναται να λειτουργήσουν στο δίκτυο κατά 24% (Εικόνα 6-28). Ωστόσο, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών ισχύος 10MW, επιτρέπει την επαναφορά του μέγιστου αριθμού δυναμικών επαγωγικών φορτιστών στον αρχικό αριθμό δυναμικών φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν στο δίκτυο, όταν δε λαμβάνεται υπόψιν η αύξηση φορτίου (Εικόνα 6-28). Μια περαιτέρω εγκατάσταση φωτοβολταϊκών (Φ/Β ισχύος 20MW) επιτρέπει την περαιτέρω αύξηση του αριθμού των φορτιστών κατά 7% περίπου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-28.



Εικόνα 6-27:Μελλοντική αύξηση του φορτίου κατά 10 ή 20%.

Μία ακόμα μεγαλύτερη αύξηση φορτίου ίση με 10% (Εικόνα 6-27), δύναται να μειώσει κατά 62% το μέγιστο δυνατό αριθμό δυναμικών επαγωγικών φορτιστών του δικτύου. Ωστόσο, η εγκατάσταση ΦΒ ισχύος 10MW, δύναται να περιορίσει τη μείωση των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών σε 38%, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-28. Περαιτέρω αύξηση των εγκατεστημένων ΦΒ στο εξεταζόμενο δίκτυο δύναται να αυξήσει ακόμη περισσότερο το μέγιστο αριθμό των δυναμικών επαγωγικών φορτιστών, περιορίζοντας την αντίστοιχη μείωση των φορτιστών σε 33% (Εικόνα 6-28).



Εικόνα 6-28:Αριθμός φορτιστών που μπορούν να εγκατασταθούν στο δίκτυο σε περίπτωση αύξησης του φορτίου κατά 10 ή 20%, λαμβάνοντας υπόψιν και την παραγωγή 10MW ή 20 MW Φ/Β.

## 6.5 Σύστημα διαχείρισης ενέργειας στην επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Μία ιδιαίτερα μεγάλη διείσδυση επαγωγικών φορτιστών σε ένα δίκτυο διανομής ενδέχεται να οδηγήσει στην εγκατάσταση περισσότερων φορτιστών από όσους μπορεί το δίκτυο να εξυπηρετήσει με τις παρούσες δικτυακές υποδομές. Στην περίπτωση αυτή, για να αποφευχθεί μία επέκταση των υποδομών του δικτύου ώστε να εξυπηρετηθεί η επιπλέον ζήτηση λόγω επαγωγικής φόρτισης, δύναται να αναπτυχθεί ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας, το οποίο θα καλύπτει τις ανάγκες των χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων, λαμβάνοντας επίσης υπόψιν τις ανάγκες του δικτύου διανομής.

### 6.5.1 Περιγραφή συστήματος διαχείρισης ενέργειας

Ένα σύστημα διαχείρισης, που δύναται να υιοθετηθεί για την περίπτωση υποδομών επαγωγικής φόρτισης έχει αναπτυχθεί για το πρόγραμμα FastInCharge [129]. Το σύστημα αυτό διαχείρισης λαμβάνει υπόψιν τόσο τις ανάγκες φόρτισης των χρηστών ΗΟ όσο και τους περιορισμούς σχετικά με την ικανότητα των υποδομών του δικτύου να υποστηρίζουν τις απαιτούμενες ενεργειακές ανάγκες.

Ειδικότερα, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ικανοποιεί τις ακόλουθες λειτουργίες:

- **Παρακολούθηση της λειτουργίας των σταθμών φόρτισης:** Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δίνει τη δυνατότητα στον διαχειριστή των σταθμών φόρτισης να παρακολουθεί την κατανάλωση των σταθμών σε πραγματικό χρόνο, όχι μόνο για σκοπούς χρέωσης, αλλά και για τον προσδιορισμό της ευελιξίας της ζήτησης που μπορεί να διατεθεί για την υποστήριξη της λειτουργίας του δικτύου.
- **Απομακρυσμένος έλεγχος της μέγιστης ισχύος φόρτισης των σταθμών υπό έκτακτες συνθήκες λειτουργίας του δικτύου:** Σε περίπτωση που η λειτουργία του δικτύου είναι κοντά στα μέγιστα επιτρεπτά όρια, λόγω της αυξημένης ζήτησης των σταθμών επαγωγικής φόρτισης, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα πρέπει να επιτρέπει τον απομακρυσμένο έλεγχο του μέγιστου ορίου φόρτισης των σταθμών που βρίσκονται στο σημείο εκείνο του δικτύου όπου παρατηρείται το πρόβλημα.
- **Ενημέρωση των χρηστών σχετικά με την τοποθεσία και τη διαθεσιμότητα των σταθμών επαγωγικής φόρτισης:** Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα πρέπει να ενημερώνει τους οδηγούς ΗΟ για τις θέσεις και τη διαθεσιμότητα των υφιστάμενων υποδομών επαγωγικής φόρτισης, προκειμένου να είναι σε θέση να επιλέξουν το κατάλληλο μέρος για τη φόρτιση του οχήματός τους, λαμβάνοντας υπόψιν και τον προορισμό τους.

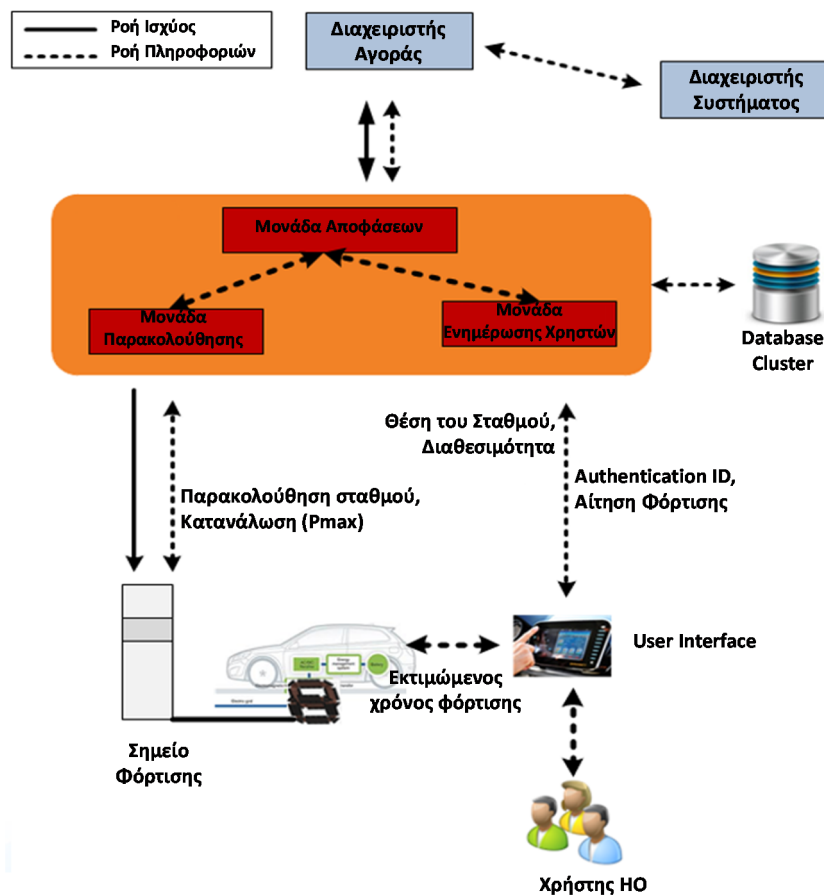
Μία συνοπτική περιγραφή του συστήματος διαχείρισης ενέργειας παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-29. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων παραγόντων απεικονίζονται με διακεκομμένες γραμμές, ενώ η ροή ισχύος απεικονίζεται με συνεχόμενες γραμμές. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-29, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποτελείται από τρία δομικά στοιχεία: τη μονάδα (module) ενημέρωσης χρηστών ΗΟ, τη μονάδα παρακολούθησης και τη μονάδα αποφάσεων.

Όταν ένας χρήστης ΗΟ θέλει να φορτίσει το όχημά του, θα πρέπει να οδηγήσει στο κοντινότερο διαθέσιμο σημείο φόρτισης. Ωστόσο, το σημείο αυτό φόρτισης ενδέχεται να είναι κατειλημμένο από κάποιον άλλο χρήστη ή να μην είναι διαθέσιμο, λόγω πιθανών ζητημάτων στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό η μονάδα ενημέρωσης χρηστών ενημερώνει τους ιδιοκτήτες ΗΟ για τη διαθεσιμότητα των σταθμών επαγωγικής φόρτισης. Επομένως, ο κάθε χρήστης, σύμφωνα με τις ανάγκες φόρτισης, τον προορισμό του και τη θέση των διαθέσιμων σταθμών έχει τη δυνατότητα να φορτίσει στο πιο βολικό σημείο φόρτισης.



Η μονάδα παρακολούθησης είναι υπεύθυνη για την αλληλεπίδραση μεταξύ του σταθμού φόρτισης και του συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Επικοινωνεί με τη μετρητική διάταξη του σταθμού και συγκεντρώνει τα δεδομένα σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση. Επιπλέον, η μονάδα παρακολούθησης είναι υπεύθυνη για τον απομακρυσμένο έλεγχο του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου φόρτισης όλων των σταθμών. Το πραγματικό επίπεδο φόρτισης του οχήματος ορίζεται από το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας του ΗΟ και, σαφώς, δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το επίπεδο φόρτισης που ορίζεται από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας.

Η μονάδα αποφάσεων είναι υπεύθυνη για την αγορά και προμήθεια ενέργειας με στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των οδηγών ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον η μονάδα αποφάσεων είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία αιτημάτων φόρτισης των χρηστών ΗΟ. Προσφέρει επίσης υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου (demand-response services). Για παράδειγμα, σε περίπτωση λειτουργικών προβλημάτων του δικτύου (π.χ. παραβίαση των ορίων τάσης ή υπερφόρτιση υποδομών του δικτύου), η μονάδα αποφάσεων μπορεί να υποστηρίξει την προβληματική περιοχή του δικτύου, μειώνοντας το επίπεδο φόρτισης συγκεκριμένων σταθμών.



Εικόνα 6-29: Περιγραφή του συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας [129]

### 6.5.2 Τροποποίηση συστημάτων επαγωγικής φόρτισης για την ενσωμάτωσή τους στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας

Καθώς η μονάδα παρακολούθησης δύναται να καθορίσει το μέγιστο επίπεδο φόρτισης των σταθμών ( $P_{max}$ ), θα πρέπει το σύστημα ελέγχου των συστημάτων επαγωγικής φόρτισης (στην πλευρά του πρωτεύοντος και/ή του δευτερεύοντος) να τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε να παρέχεται αυτή η δυνατότητα.

Το σύστημα ελέγχου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 για την εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης, δύναται να τροποποιηθεί με στόχο τη ρύθμιση της μέγιστης ισχύος που παρέχεται στο σταθμό φόρτισης. Ειδικότερα, σε κάθε μετατόπιση  $x_i$  καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή (Εικόνα 3-1-α) η ισχύς,  $P_{out_i}$ , που παρέχεται στην αντίσταση  $R_L$  στην Εικόνα 3-2 και η ενεργός ισχύς στην έξοδο του αντιστροφέα,  $P_{in_i}$ , είναι, σύμφωνα με τις (3.1)-(3.2), ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος στο πρωτεύον.

Ορίζοντας τους συντελεστές  $Y_{P_{in}}$  και  $Y_{P_{out}}$  σύμφωνα με τις (6.6) και (6.7), και λαμβάνοντας υπόψη τις (3.1)-(3.2), οι  $P_{in_i}$  και  $P_{out_i}$  μπορούν να εκφραστούν σύμφωνα με τις (6.8) και (6.9).

$$Y_{P_{out_i}} = \frac{\omega^2 * M_l^2}{\left(\omega * L_{2_i} - \frac{1}{\omega * C_2}\right)^2 + (R_L + R_2)^2} \quad (6.6)$$

$$Y_{P_{in_i}} = R_1 + \frac{\omega^2 M_i^2 (R_L + R_2)}{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2 + (R_L + R_2)^2} \quad (6.7)$$

$$P_{out_i} = Y_{P_{out_i}} |\tilde{I}_1|^2 \quad (6.8)$$

$$P_{in_i} = Y_{P_{in_i}} |\tilde{I}_1|^2 \quad (6.9)$$

Για την υιοθέτηση ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας, το ρεύμα  $I_1$  δύναται να ορισθεί σε μία τιμή  $I_{1\_EMS}$ , ώστε οι τιμές των  $P_{out_i}$  και  $P_{in_i}$  να γίνονται ίσες με ένα ποσοστό  $r$  των αρχικών τιμών τους:

$$P_{out_i\_EMS} = Y_{P_{out_i}} |\widetilde{I_{1\_EMS}}|^2 = r P_{out_i} \quad (6.10)$$

$$P_{in_i\_EMS} = Y_{P_{in_i}} |\widetilde{I_{1\_EMS}}|^2 = r P_{in_i} \quad (6.11)$$

Αντικαθιστώντας τις (6.8)-(6.9) στις (6.10)-(6.11), η τιμή που θα πρέπει να λάβει το ρεύμα  $I_1$ , ώστε η τιμή της ισχύος να μειωθεί σε ένα ποσοστό  $r$  της αρχικής, υπολογίζεται ως:

$$\widetilde{I_{1\_EMS}} = \sqrt{r} * \tilde{I}_1 \quad (6.12)$$

Όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 4, το ρεύμα  $I_1$  μεταβάλλεται μεταξύ δύο διακριτών τιμών  $I_{1,max}$  και  $I_{1,low}$  για την επίτευξη του επιθυμητού ελέγχου και τη μετάβαση από την Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης. Σε περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη η υιοθέτηση ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας που δύναται να μειώσει τη μεταφερόμενη ισχύ σε μία συγκεκριμένη τιμή σύμφωνα με την (6.12), η νέα τιμή του ρεύματος θα μεταβάλλεται μεταξύ  $\widetilde{I_{1\_EMS\_low}}$  και  $\widetilde{I_{1\_EMS\_max}}$ :

$$\widetilde{I_{1\_EMS\_max}} = \sqrt{r} * I_{1,max} \quad (6.13)$$

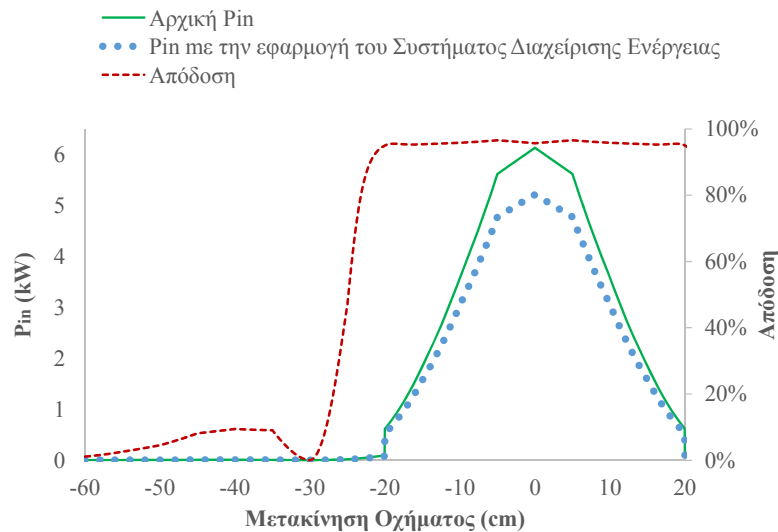
$$\widetilde{I_{1\_EMS\_low}} = \sqrt{r} * I_{1,low} \quad (6.14)$$

Η μεταβολή στην ισχύ εισόδου θα απαιτήσει νέες τιμές για τις  $P_{in,enter}$  και  $P_{in,leave}$ , που υποδηλώνουν την είσοδο και την έξοδο στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης. Σύμφωνα με τις (6.10) και (6.11) οι τιμές αυτές μπορούν να υπολογισθούν ως:

$$P_{in,enter\_EMS} = rP_{in,enter} \quad (6.15)$$

$$P_{in,leave\_EMS} = rP_{in,leave} \quad (6.16)$$

Για παράδειγμα, για τον κυκλικό συζεύκτη διαμέτρου 60 εκατοστών που μελετήθηκε στην υποενότητα 4.4, ορίστηκε ένα μέγιστο ρεύμα λειτουργίας  $I_{1,max}=25A$ . Το σύστημα ελέγχου μεταβάλλει το ρεύμα αυτό μεταξύ  $I_{1,low}=10A$  και  $I_{1,max}=25A$ , ώστε να επιτευχθεί η μετάβαση από την Περιοχή Χαμηλής στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης χωρίς να αυξάνονται σημαντικά οι απώλειες του συστήματος. Στην περίπτωση που υιοθετείται ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας το οποίο κάποια δεδομένη χρονική στιγμή, λόγω ζητημάτων που εντοπίζονται στο δίκτυο, απαιτεί τη μείωση της παρεχόμενης ισχύος στο σταθμό σε ένα ποσοστό  $r=85\%$  της αρχικής ισχύος, το ρεύμα στο πρωτεύον, σύμφωνα με την (6.12), θα πρέπει να γίνει ίσο με  $I_{1\_EMS\_max} = 23,05A$ . Αντίστοιχα, σύμφωνα με την (6.14), το ρεύμα στην περιοχή χαμηλής απόδοσης αρκεί να γίνει ίσο με  $I_{1\_EMS\_low} = 9,22A$ . Οι μεταβολές αυτές στις τιμές του ρεύματος επιτυγχάνουν μία μείωση της παροχής ισχύος στο 85% της αρχικής, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6-30. Η ισχύς εισόδου που υποδεικνύει τώρα την είσοδο του οχήματος στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, σύμφωνα με την (6.15) θα είναι ίση με:  $P_{in,enter\_EMS} = 0,85 * P_{in,enter} = 0,85 * 98 = 83W$ . Αντίστοιχα, σύμφωνα με την (6.16), το όχημα θα εξέρχεται από την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, όταν:  $P_{in,leave\_EMS} = 0,85 * P_{in,leave} = 0,85 * 618 = 525W$ .



Εικόνα 6-30: Μεταβολή της ισχύος εισόδου με την εφαρμογή του συστήματος διαχείρισης ενέργειας.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 για την περίπτωση της δυναμικής φόρτισης έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ενέργειας στο όχημα στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης. Η επίλυσή, επομένως, του προβλήματος βελτιστοποίησης οδηγεί σε ιδιαίτερα μεγάλες τιμές για τη μεταφερόμενη ισχύ στην περιοχή αυτή. Ένα αντίστοιχο σύστημα επαγωγικής φόρτισης δύναται να υλοποιηθεί για συνθήκες στατικής φόρτισης, εξασφαλίζοντας τη μεταφορά μεγάλων ποσών ισχύος στην μπαταρία του οχήματος στην περιοχή υψηλής απόδοσης, διατηρώντας, παράλληλα, μία ιδιαίτερα υψηλή απόδοση. Η λειτουργία στην περιοχή υψηλής απόδοσης δύναται να εξασφαλισθεί με τη χρήση μηχανισμών, όπως αυτοί που περιγράφονται στην υποενότητα 1.5, για την κατάλληλη τοποθέτηση του δευτερεύοντος πάνω από το πρωτεύον.

Σαφώς στην περίπτωση της στατικής φόρτισης το σύστημα ελέγχου στο πρωτεύον δεν απαιτείται να μεταβάλλει το ρεύμα μεταξύ μίας μέγιστης και μίας ελάχιστης τιμής, καθώς το όχημα είναι σταθερό πάνω από το φορτιστή και η χρήση ενός μηχανισμού τοποθέτησης εξασφαλίζει τη λειτουργία στην περιοχή υψηλής απόδοσης. Επομένως, στην περίπτωση αυτή, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας απαιτεί τη μεταβολή του ρεύματος από  $I_{1\_max}$  σε  $I_{1\_EMS\_max}$ , σύμφωνα με την (6.13), με στόχο τη μεταβολή της ισχύος σε ένα ποσοστό ίσο με  $r$  της αρχικής.

Για παράδειγμα, για το εξεταζόμενο σύστημα του κυκλικού συζεύκτη διαμέτρου 60 εκατοστών, όταν το πρωτεύον βρίσκεται ακριβώς πάνω από το πρωτεύον η ισχύς εισόδου στο φορτιστή είναι ίση με 6,13kW όταν  $I_1=I_{1,max}=25A$  (Εικόνα 6-30). Η απαίτηση μείωσης της ισχύος από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον σύμφωνα με την (6.12). Για παράδειγμα, μείωση της ισχύος εισόδου σε ένα ποσοστό  $r=85\%$  ( $P_{in\_EMS}=5,21kW$ ) της αρχικής δύναται να επιτευχθεί με τη μεταβολή του ρεύματος στο πρωτεύον σε  $I_{1\_EMS\_max}=23,05A$ .

### 6.5.3 Εφαρμογή του συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας για την αποφυγή προβλημάτων του δικτύου

Για την αποφυγή μίας ενίσχυσης των υποδομών του δικτύου σε μελλοντικά σενάρια υψηλής διεύθυνσης επαγωγικών φορτιστών στο δίκτυο, δύναται να υιοθετηθεί ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας, όπως αυτό που περιγράφηκε προηγουμένως. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζονται τα ακόλουθα σενάρια διαχείρισης φορτίου (demand-response):

- “Καθολικές” υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου
- “Τοπικές” υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου σε επίπεδο υποσταθμού
- Υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου για μία “Περιορισμένη Περιοχή” του δικτύου

Για κάθε ένα από αυτά τα σενάρια εξετάζονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις με στόχο την αποφυγή παραβιάσεων των ορίων του δικτύου:

- Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας παρέχει λιγότερη ενέργεια σε όλους τους σταθμούς (δυναμικούς και στατικούς) για την αποφυγή του προβλήματος.
- Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας παρέχει μηδενική ισχύ σε συγκεκριμένους στατικούς ή δυναμικούς σταθμούς φόρτισης. Όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί στην περίπτωση αυτή λειτουργούν με την ονομαστική τους ισχύ.

Το δίκτυο που εξετάζεται είναι η γραμμή διανομής που αποτελεί τμήμα του αστικού δικτύου διανομής Μέσης Τάσης (Μ.Τ.) της Κατερίνης (Εικόνα 6-8). Δεν εξετάζεται το φορτίο όλης της ημέρας όπως στην υποενότητα 6.3, αλλά μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή όπου δύναται να παρουσιασθεί κάποιο πρόβλημα στο δίκτυο. Ο Πίνακας E-1 του παραρτήματος παρουσιάζει το φορτίο του δικτύου σε κάθε ζυγό τη χρονική αυτή στιγμή.

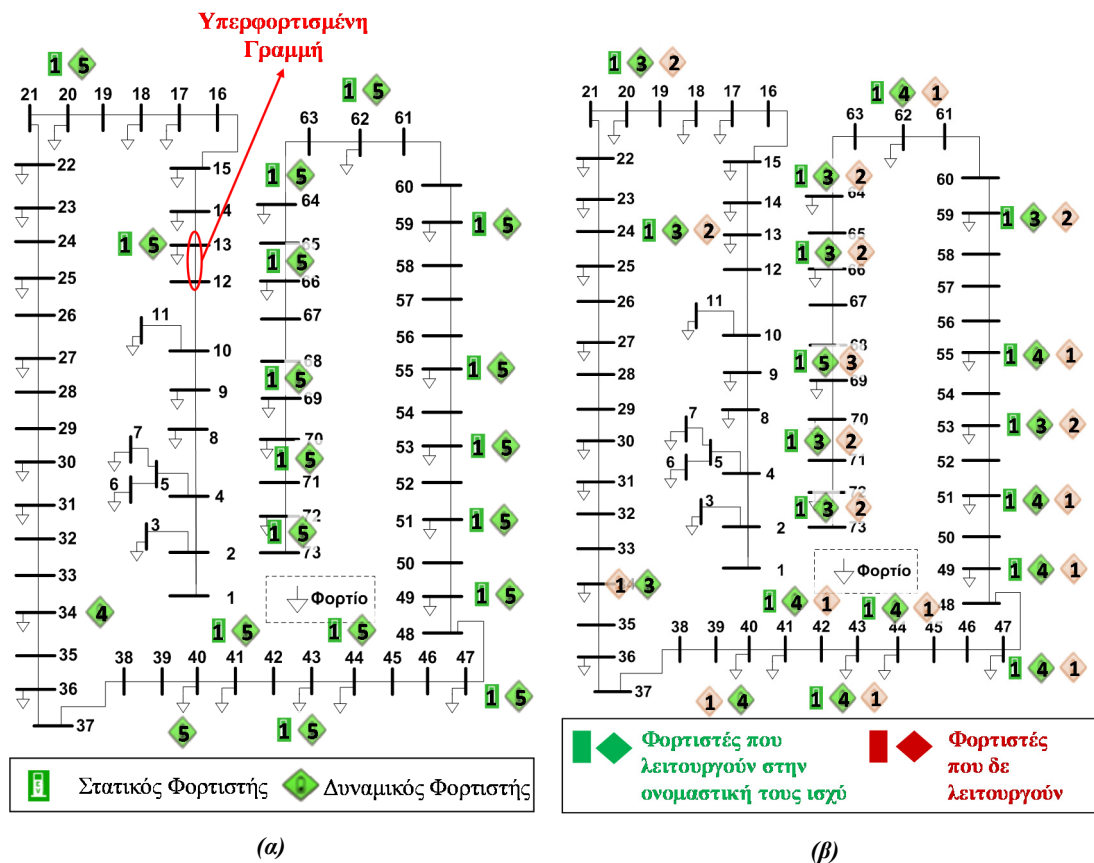
#### ✓ “Καθολικές” υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου

Θεωρώντας ότι οι φορτιστές κατανέμονται στο δίκτυο με τον τρόπο που απεικονίζεται στην Εικόνα 6-31 (ο Πίνακας E-2 του παραρτήματος απεικονίζει την αντίστοιχη ζήτηση των φορτιστών), η φόρτιση της γραμμής που συνδέει τους ζυγούς 12 και 13 ξεπερνά το επιτρεπόμενο θερμικό όριο. Η γραμμή αυτή βρίσκεται στην αρχή του δικτύου, με όλους τους σταθμούς επαγωγικής φόρτισης να βρίσκονται συνδεδεμένοι σε ζυγούς που έπονται της γραμμής αυτής. Επομένως, οι αποφάσεις του συστήματος διαχείρισης ενέργειας θα πρέπει να αφορούν όλους τους σταθμούς του δικτύου.

Η φόρτιση της συγκεκριμένης γραμμής δύναται να γίνει μικρότερη από το 90% του θερμικού της ορίου σε περίπτωση που η ισχύς όλων των σταθμών επαγωγικής φόρτισης (στατικών και

δυναμικών), μειωθεί κατά 26% (Ο Πίνακας E-3 του παραρτήματος παρουσιάζει τη φόρτιση των σταθμών στην περίπτωση αυτή).

Επίσης, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δύναται να μηδενίσει την παρεχόμενη ισχύ σε συγκεκριμένους δυναμικούς σταθμούς φόρτισης, ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτιση της γραμμής (Ο Πίνακας E-4 του παραρτήματος παρουσιάζει τον αριθμό των εν λειτουργία σταθμών σε κάθε ζυγό και την αντίστοιχη ζήτηση). Με τον τρόπο αυτό, ορισμένοι δυναμικοί σταθμοί δε θα παρέχουν ισχύ στα διερχόμενα οχήματα (σταθμοί που απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα στην Εικόνα 6-31-β), ωστόσο όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί (στατικοί και δυναμικοί) λειτουργούν παρέχοντας τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Στην περίπτωση αυτή η φόρτιση της προβληματικής γραμμής περιορίζεται σε λιγότερο από 90% του θερμικού της ορίου.



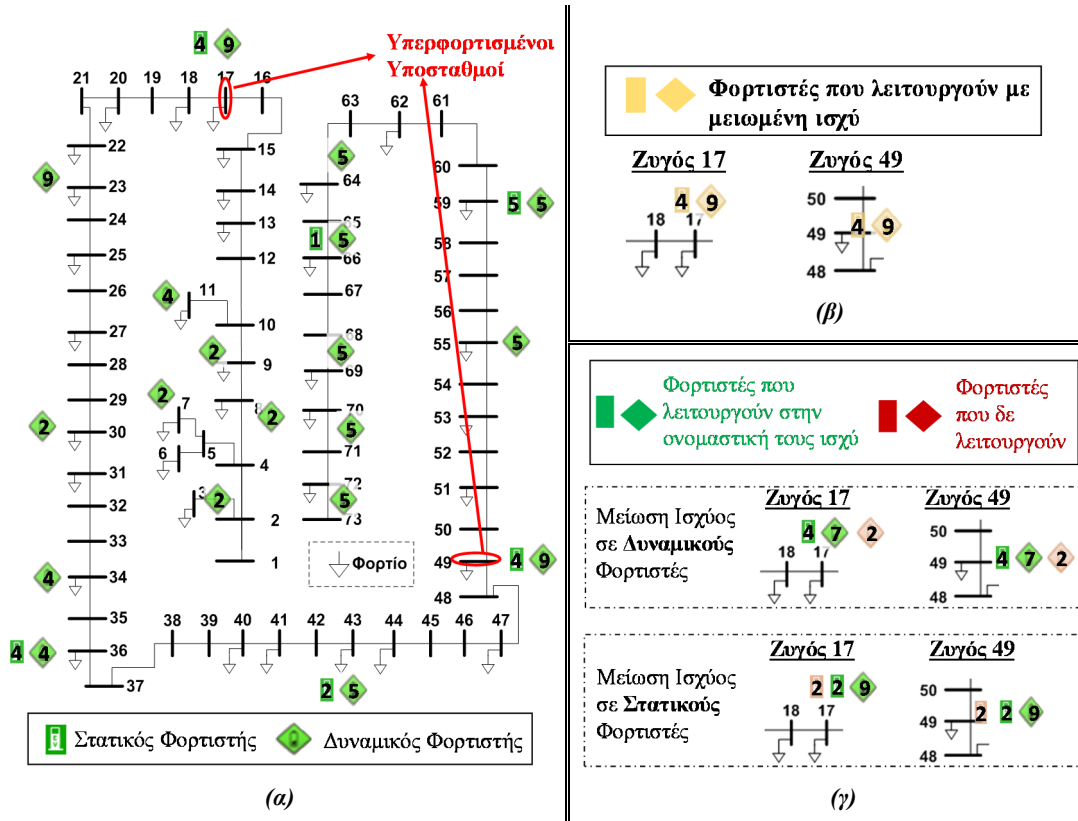
Εικόνα 6-31: Κατανομή των επαγωγικών φορτιστών στο εξεταζόμενο δίκτυο διανομής: (α) η σημειωμένη γραμμή υπερφορτίζεται και (β) η φόρτιση της γραμμής αποφεύγεται με τη μη λειτουργία συγκεκριμένων δυναμικών σταθμών.

✓ “Τοπικές” υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου σε επίπεδο υποσταθμού

Στο προηγούμενο σενάριο εξετάστηκε η περίπτωση όπου οι φορτιστές κατανέμονται σε ένα μεγάλο αριθμό ζυγών του δικτύου, με τον αριθμό των φορτιστών να επιμερίζεται, σχεδόν, στους εξεταζόμενους ζυγούς. Ωστόσο, ενδέχεται μεγάλος αριθμός φορτιστών να εντοπίζεται εγκατεστημένοι σε συγκριμένους ζυγούς του δικτύου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που οι φορτιστές είναι κατανεμημένοι στους ζυγούς του δικτύου με τον τρόπο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-32-α (ο Πίνακας E-5 του παραρτήματος παρουσιάζει τη φόρτιση των σταθμών στην περίπτωση αυτή), ένας μεγάλος αριθμός σταθμών εντοπίζεται στους ζυγούς 17 και 49. Λόγω του ιδιαίτερα υψηλού φορτίου στους ζυγούς αυτούς, η φόρτιση των αντίστοιχων μετασχηματιστών ξεπερνά τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια.

Στο υπόλοιπο δίκτυο, ωστόσο, δεν εντοπίζεται κάποιο πρόβλημα, με τη φόρτιση των υπόλοιπων υποσταθμών, καθώς και τη φόρτιση όλων των γραμμών του δικτύου, να είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Επομένως, καθώς το πρόβλημα δικτύου στην περίπτωση αυτή εντοπίζεται μόνο στους ζυγούς 17 και 49, οι αποφάσεις του συστήματος διαχείρισης ενέργειας θα πρέπει να αφορούν μόνο στους σταθμούς που είναι εγκατεστημένοι στους ζυγούς αυτούς.

Μειώνοντας την ισχύ που παρέχεται σε όλους τους σταθμούς των ζυγών 17 και 49, κατά 15% η φόρτιση των μετασχηματιστών στους αντίστοιχους ζυγούς μειώνεται σε λιγότερο από 90% του μέγιστου ορίου τους. Στην περίπτωση αυτή οι φορτιστές στους ζυγούς 17 και 49 λειτουργούν με ελαφρώς μειωμένη ισχύ (Εικόνα 6-32-β), ωστόσο όλοι οι υπόλοιποι σταθμοί του δικτύου λειτουργούν στη μέγιστη δυνατή ισχύ.



Εικόνα 6-32: (α) κατανομή των φορτιστών στο δίκτυο διανομής και υπερφόρτιση των μετασχηματιστών στους ζυγούς 17 και 49, (β) Μείωση της ισχύος στους υπερφορτισμένους ζυγούς, (γ) μείωση του αριθμού των εν λειτουργία φορτιστών (δυναμικών ή στατικών)

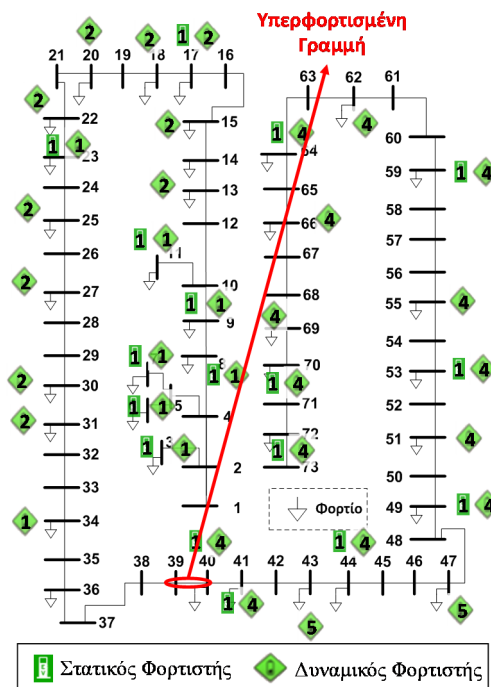
Το πρόβλημα της υπερφόρτισης των σταθμών μπορεί επίσης να επιλυθεί με τη μη παροχή ενέργειας σε συγκεκριμένους σταθμούς δυναμικής επαγωγικής φόρτισης στους υπερφορτισμένους μετασχηματιστές, όπως φαίνεται Εικόνα 6-32-γ. Πιο συγκεκριμένα η φόρτιση των αντίστοιχων μετασχηματιστών μειώνεται σε λιγότερο από 90%, σε περίπτωση που παρέχεται μηδενική ισχύ σε 2 από τους 9 δυναμικούς επαγωγικούς φορτιστές που είναι εγκατεστημένοι σε κάθε ζυγό. Για την αποφυγή του προβλήματος της υπερφόρτισης των μετασχηματιστών, δύναται, επίσης, να μειωθεί ο αριθμός των στατικών επαγωγικών φορτιστών που λειτουργούν στους αντίστοιχους ζυγούς. Πιο συγκεκριμένα, μη παρέχοντας ισχύ στους 2 από τους 4 στατικούς φορτιστές που είναι εγκατεστημένοι σε κάθε ένα από τους ζυγούς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-32-γ, δύναται να αποφευχθεί η υπερφόρτιση των αντίστοιχων μετασχηματιστών.

Ο Πίνακας E-6 του παραρτήματος παρουσιάζει τον αριθμό των εν λειτουργία φορτιστών στους ζυγούς 17 και 49 σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση.

### ✓ Υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου για μία "Περιορισμένη Περιοχή" του δικτύου

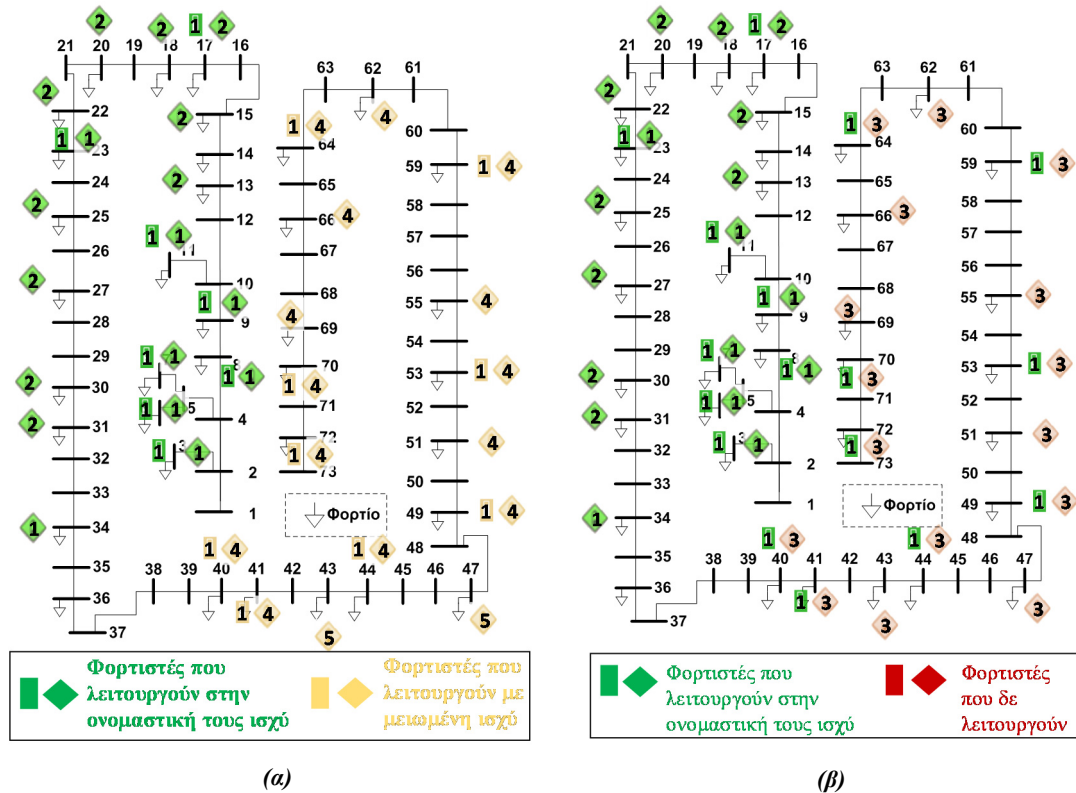
Στα προηγούμενα σενάρια εξετάστηκαν περιπτώσεις όπου πιθανές αποφάσεις του συστήματος διαχείρισης ενέργειας αφορούν σταθμούς που βρίσκονται σε όλη την περιοχή του δικτύου είτε σε συγκεκριμένους ζυγούς. Ωστόσο, ενδέχεται κάποιο πρόβλημα στο δίκτυο να απαιτεί ενέργειες που αφορούν σταθμούς που βρίσκονται συγκεντρωμένοι σε μια περιοχή του δικτύου.

Για παράδειγμα, θεωρώντας τα όρια γραμμών που απεικονίζει ο Πίνακας Ε-7 του παραρτήματος, και με την κατανομή των φορτιστών στο δίκτυο όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6-33, η γραμμή 39 του δικτύου (η σημειωμένη γραμμή στην Εικόνα 6-33) φορτίζεται πέραν του θερμικού της ορίου. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας, επομένως, θα πρέπει να μεταβάλλει το φορτίο των σταθμών που βρίσκονται πέραν της γραμμής 39. Ειδικότερα, εάν το φορτίο όλων των σταθμών (στατικών και δυναμικών) που είναι εγκατεστημένοι σε ζυγούς που έπονται της γραμμής 39, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6-34-α, μειωθεί κατά 24%, τότε η φόρτιση της γραμμής μειώνεται σε λιγότερο από 90%.



Εικόνα 6-33: Κατανομή των φορτιστών στο δίκτυο διανομής και υπερφόρτιση της γραμμής 39.

Εναλλακτικά, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας δύναται να παρέχει μηδενική ισχύ σε συγκεκριμένους δυναμικούς σταθμούς, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6-34-β. Στην περίπτωση αυτή, μην παρέχοντας ισχύ στο 19% των δυναμικών σταθμών του δικτύου η φόρτιση της γραμμής 39 περιορίζεται και πάλι σε λιγότερο από 90% του θερμικού της ορίου.



Εικόνα 6-34: (α)Μείωση της ισχύος σε όλους τους σταθμούς (στατικούς και δυναμικούς) που είναι εγκατεστημένοι σε ζυγούς που έπονται της υπερφορτισμένης γραμμής και (β) η υπερφόρτιση της γραμμής αποφεύγεται με τη μη λειτουργία συγκεκριμένων δυναμικών σταθμών.

Οι Πίνακες E-8 – E-10 του παραρτήματος παρουσιάζουν τον αριθμό των εν λειτουργία στατικών και δυναμικών φορτιστών στους ζυγούς του δικτύου και το αντίστοιχο φορτίο των σταθμών αυτών για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

## 6.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό προτάθηκε μία μεθοδολογία για τη μελέτη της επίδρασης υποδομών επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής, λαμβάνοντας, παράλληλα, υπόψη και την οικιακή φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Λόγω της έλλειψης δεδομένων σχετικά με τη λειτουργία πραγματικών επαγωγικών σταθμών, για την εξαγωγή του προφίλ φόρτισης των οχημάτων σε γρήγορους στατικούς επαγωγικούς φορτιστές, η αναμενόμενη ώρα άφιξης στο σταθμό και η διάρκεια της φόρτισης εκτιμήθηκαν σύμφωνα με δεδομένα σχετικά με τη λειτουργία πραγματικών γρήγορων αγωγίμων φορτιστών. Η ζήτηση των δυναμικών φορτιστών υπολογίζεται σύμφωνα με δεδομένα που αφορούν τόσο στην ανάγκη των οδηγών για φόρτιση κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά και την κίνηση των οχημάτων στους δρόμους. Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά προτάθηκε το απαραίτητο εργαλείο για την εκτίμηση του μέγιστου αριθμού φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο, χωρίς να παρατηρούνται παραβιάσεις των ορίων του δικτύου αυτού.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία για την εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών υποδομών επαγωγικής φόρτισης εφαρμόστηκε σε ένα ρεαλιστικό μοντέλο αστικού δικτύου διανομής μέσης τάσης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης υποδεικνύουν ότι η οικιακή φόρτιση αυξάνει το φορτίο του δικτύου τις απογευματινές ώρες. Η επαγωγική φόρτιση επηρεάζει το φορτίο του δικτύου κατά τη διάρκεια των πρωινών αλλά και των μεσημεριανών ωρών. Ειδικότερα, για την περίπτωση που εξετάστηκε, οι ιδιαίτερα αυξημένες ενεργειακές ανάγκες για τη φόρτιση των οχημάτων στο σπίτι εισάγουν μία νέα αιχμή στο δίκτυο κατά τη διάρκεια των απογευματινών



ορών. Οι ανάγκες των στατικών επαγωγικών φορτιστών οδηγούν σε μία αύξηση της αιχμής του φορτίου τις μεσημεριανές ώρες, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περίπτωση που λαμβάνεται υπόψιν η εξυπηρέτηση ενός μεγάλου αριθμού χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων από στατικούς επαγωγικούς φορτιστές. Η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων σε δυναμικούς επαγωγικούς φορτιστές οδηγεί σε μία ιδιαίτερα αυξημένη ενεργειακή ζήτηση, με αποτέλεσμα το φορτίο του δικτύου να παραμένει σε υψηλά επίπεδα για πολλές ώρες της ημέρας.

Τόσο η στατική όσο και η δυναμική επαγωγική φόρτιση δεν προκαλεί κάποιο πρόβλημα σχετικά με τα όρια τάσεων (μέγιστη-ελάχιστη τιμή και απόκλιση της τάσης) στους ζυγούς του εξεταζόμενου δικτύου. Παρόμοια, αν και η ζήτηση των επαγωγικών φορτιστών αυξάνει τη φόρτιση των μετασχηματιστών του δικτύου, εντούτοις η φόρτιση δεν ξεπερνάει τα αντίστοιχα μέγιστα επιτρεπτά όρια. Αντίθετα, οι ιδιαίτερα αυξημένες ενεργειακές ανάγκες των επαγωγικών σταθμών οδηγούν σε μία σημαντική αύξηση της φόρτισης των γραμμών του δικτύου, καθώς και των απωλειών ισχύος του δικτύου.

Εξετάσθηκε επίσης η επίδραση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στο μέγιστο αριθμό φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν στο εξεταζόμενο δίκτυο. Καθώς η παραγωγή των φωτοβολταϊκών συμπίπτει αρκετές ώρες της ημέρας με τη ζήτηση των επαγωγικών σταθμών, ο μέγιστος αριθμός υποδομών επαγωγικής φόρτισης μπορεί να αυξηθεί με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο. Ιδιαίτερα ευεργετική αποδεικνύεται, επίσης, η χρήση φωτοβολταϊκών για ένα πιθανό μελλοντικό σενάριο αύξησης του φορτίου του δικτύου. Ειδικότερα, μία αύξηση του φορτίου κατά 5 ή 10% δύναται να μειώσει σημαντικά τον αριθμό των επαγωγικών φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν στο δίκτυο, ωστόσο ο αριθμός αυτός αυξάνεται με την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών.

Σε περίπτωση μίας ιδιαίτερα αυξημένης διείσδυσης επαγωγικών φορτιστών στο δίκτυο, ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός υποδομών επαγωγικής φόρτισης που δύναται να εγκατασταθούν στο δίκτυο ενδέχεται να ξεπερασθεί. Στην περίπτωση αυτή, για να αποφευχθεί η επέκταση των υποδομών του δικτύου για την εξυπηρέτηση των νέων ενεργειακών αναγκών, δύναται να υιοθετηθεί ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας, το οποίο ρυθμίζει κατάλληλα τη φόρτιση των σταθμών, περιορίζοντας την ισχύ τους σε επιθυμητά επίπεδα. Τροποποιήσεις στο σύστημα ελέγχου που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δύναται να υλοποιηθούν, ώστε οι επαγωγικοί σταθμοί φόρτισης να ενταχθούν στο σύστημα διαχείρισης. Εξετάσθηκαν, επίσης περιπτώσεις παροχής υπηρεσιών διαχείρισης φορτίου, που αφορούν σε όλη την έκταση του δικτύου, μία περιορισμένη περιοχή του δικτύου ή μεμονωμένους ζυγούς σε επίπεδο υποσταθμού. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι τα προβλήματα που παρουσιάζονται στο δίκτυο δύναται να εξαλειφθούν είτε μειώνοντας κατά ένα μικρό ποσοστό την ισχύ σε στατικούς και δυναμικούς φορτιστές, είτε διακόπτοντας την παροχή ισχύος σε ένα μικρό μέρος των στατικών ή δυναμικών φορτιστών.



## Κεφάλαιο 7

### Συμπεράσματα – Συμβολή – Προοπτικές

#### 7.1 Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα

Η στατική επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων, επιτρέπει την ασύρματη μεταφορά ενέργειας μεταξύ του ηλεκτρικού δικτύου και της μπαταρίας του οχήματος, καθώς το όχημα είναι σταθμευμένο πάνω από το φορτιστή. Η ασύρματη μεταφορά ενέργειας απλοποιεί τη διαδικασία φόρτισης εξαλείφοντας, παράλληλα, κινδύνους που σχετίζονται με τη χρήση καλωδίων. Επιπλέον, η δυναμική επαγωγική φόρτιση παρέχει τη δυνατότητα φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος σε διάφορα σημεία κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, επιλύοντας προβλήματα που σχετίζονται με την περιορισμένη ικανότητα των ηλεκτρικών οχημάτων για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Η ικανότητα φόρτισης σε πολλαπλά σημεία κατά τη διάρκεια κίνησης του οχήματος επιτρέπει τη χρήση μπαταριών μικρότερης χωρητικότητας, συμβάλλοντας σε σημαντική μείωση του κόστους των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στηρίζεται στην επαγωγική σύζευξη μεταξύ δύο πηνίων: του πρωτεύοντος που βρίσκεται στην πλευρά του σταθμού και του δευτερεύοντος που ενσωματώνεται στο όχημα. Σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως για παράδειγμα φερρίτης, χρησιμοποιούνται, συνήθως, σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, ώστε να κατευθύνουν και να ενισχύσουν την παραγόμενη μαγνητική ροή που παράγεται από το πρωτεύον πηνίο. Σε εφαρμογές επαγωγικής φόρτισης, το εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής συχνότητας που διαρρέει το πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο απαιτεί τη χρήση καλωδίου Litz για την αποφυγή του επιδερμικού φαινομένου και του φαινομένου εγγύτητας, επιτυγχάνοντας χαμηλές ωμικές απώλειες στους αγωγούς της διάταξης.

Ο τρόπος τοποθέτησης των φερριτών και του καλωδίου Litz οδηγεί σε μία πληθώρα γεωμετρικών διατάξεων όσον αφορά στους μαγνητικούς συζεύκτες που χρησιμοποιούνται στην επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής, μελετήθηκαν οι διατάξεις αυτές ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος με τη χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης επικρατέστεροι είναι οι μαγνητικοί συζεύκτες “μονής όψεως”, όπου η κατεύθυνση της μαγνητικής ροής περιορίζεται κυρίως μεταξύ των πηνίων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Οι διατάξεις μονής όψεως διακρίνονται περαιτέρω σε διατάξεις ενός ή περισσότερων πηνίων. Μεταξύ των διατάξεων ενός πηνίου, φαίνεται ότι καλύτερα χαρακτηριστικά ως προς την ικανότητα μεταφοράς ισχύος παρουσιάζουν κυκλικές διατάξεις με κατάλληλη αξιοποίηση ράβδων φερρίτη. Η απλή χρήση ενός δεύτερου πηνίου στη διάταξη δεν έχει κάποιο ιδιαίτερο αποτέλεσμα στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος, ούτε στην ανοχή του συστήματος σε πλευρικές μετατοπίσεις. Πλεονεκτήματα παρατηρούνται σε διατάξεις δύο πηνίων μόνο στην περίπτωση που υλοποιείται μία αναδιαμόρφωση των πηνίων της διάταξης, είτε με προσθήκη ενός επιπλέον πηνίου είτε με την αναδιάταξη των δύο πηνίων της διάταξης. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή, επιβάλλεται η χρήση επιπλέον ελεγκτών στην πλευρά του δευτερεύοντος, αυξάνοντας το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Σημαντική αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος στην μπαταρία του οχήματος, καθώς και μείωση της αέργου ισχύος που διακινείται σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης δύναται να επιτευχθεί με τη χρήση στοιχείων αντιστάθμισης (πυκνωτές και/ή πηνία). Βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης βασίζονται στη χρήση ενός πυκνωτή, τόσο στο πρωτεύον όσο και στο δευτερεύον και επιτυγχάνουν ικανοποιητική αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος αλλά και σημαντικό περιορισμό της διακίνησης αέργου ισχύος στο σύστημα. Τοπολογίες που υλοποιούνται με τη χρήση περισσοτέρων του ενός στοιχείων αντιστάθμισης, τόσο στην πλευρά του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος αποδίδουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στο σύστημα, όπως ικανότητα αμφίδρομης μεταφοράς ισχύος ή κατάλληλη διαμόρφωση του ρεύματος στα διάφορα σημεία του συστήματος. Ωστόσο, υλοποιώντας μία τέτοια τοπολογία σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης δύναται να αυξηθεί σημαντικά το κόστος κατασκευής, λόγω του απαιτούμενου μεγάλου αριθμού στοιχείων αντιστάθμισης.

Σχετικά με τα συστήματα ελέγχου σε ένα σύστημα στατικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, η καλύτερη προσέγγιση φαίνεται να είναι η χρήση ελεγκτών τόσο στην πλευρά του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος, επιτρέποντας τον έλεγχο χαρακτηριστικών και στις δύο πλευρές του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, η σχεδίαση τόσο του συστήματος ελέγχου αλλά και όλου του συστήματος επαγωγικής φόρτισης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν το φαινόμενο της διακλάδωσης. Το φαινόμενο αυτό υποδεικνύει ότι ενδέχεται να υπάρχουν έως και τρεις διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας που οδηγούν σε επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος (και κατ' επέκταση ιδιαίτερα αυξημένης απόδοσης) αλλά μία μόνο συχνότητα που μεγιστοποιεί τη μεταφερόμενη ισχύ. Η λειτουργία, επομένως, του συστήματος κοντά στις συχνότητες που αυξάνουν σημαντικά την απόδοση αλλά επιτρέπουν μηδενική σχεδόν μεταφορά ισχύος, θα πρέπει να αποφεύγεται.

Κατά τη δυναμική φόρτιση δύο είναι οι πιο αντιπροσωπευτικές κατηγορίες μαγνητικών διατάξεων: η ενιαία και η τμηματική διάταξη. Η *ενιαία διάταξη*, με το καλώδιο του πρωτεύοντος να διατρέχει μία μεγάλη διάταξη φερρίτη, απαιτεί, συνήθως, μία ιδιαίτερα μεγάλη διάταξη στο δευτερεύον του συστήματος. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή μειώνεται σημαντικά η απόδοση του συστήματος, καθώς απαιτείται η συνεχής παροχή ενέργειας σε ένα πηνίο ιδιαίτερα μεγάλου μεγέθους. Αντίθετα, οι *τμηματικές διατάξεις* διαθέτουν στην πλευρά του πρωτεύοντος διατάξεις παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στη στατική επαγωγική φόρτιση, τοποθετημένες διαδοχικά κατά μήκος του δρόμου. Οι τμηματικές διατάξεις δύναται να αυξήσουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος με την ενεργοποίηση ενός μόνο πρωτεύοντος πηνίου κάθε φορά, ανάλογα με τη θέση του οχήματος.

Οι βασικές αρχές λειτουργίας σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης είναι παρόμοιες με αυτές που διέπουν τη λειτουργία κατά τη στατική φόρτιση. Ωστόσο, πρέπει να ληφθούν υπόψιν όλες οι θέσεις κατά τη διάρκεια της κίνησης, επιβάλλοντας τροποποιήσεις στο αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα που διέπει τη λειτουργία του συστήματος. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία υποδεικνύουν ότι, σχετικά με το φαινόμενο της διακλάδωσης, δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν μία προσέγγιση ανάλογη με τη στατική φόρτιση η οποία περιορίζεται μόνο στη διερεύνηση της συχνότητας λειτουργίας. Αντίθετα, θα πρέπει να εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος επαγωγικής μεταφοράς ενέργειας και ως προς την κίνηση του οχήματος, εξασφαλίζοντας ότι μία επαρκής τιμή μεταφερόμενης ισχύος εξασφαλίζεται σε μία ταυτόχρονα υψηλή απόδοση, καθώς το όχημα διέρχεται πάνω από το φορτιστή.

Επιπλέον, η συνήθης επιλογή των στοιχείων αντιστάθμισης σύμφωνα με συγκεκριμένες τιμές των αυτεπαγωγών δε φαίνεται να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε εφαρμογές δυναμικής επαγωγικής φόρτισης. Ειδικότερα, ακόμα και μικρές μεταβολές στις τιμές των αυτεπαγωγών κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος δύναται να εισάγουν ιδιαίτερα μεγάλες μεταβολές στη μεταφερόμενη ισχύ, αλλά και την απόδοση του συστήματος, λόγω μη κατάλληλης επιλογής

των στοιχείων αντιστάθμισης. Επίσης, στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης τόσο η μέση απόδοση όσο και η μέση μεταφερόμενη ισχύς πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την κατάλληλη επιλογή των πυκνωτών αντιστάθμισης, ώστε να επιτευχθεί μία αυξημένη μεταφορά ισχύος διατηρώντας, παράλληλα, μία αυξημένη απόδοση λειτουργίας.

Εκτός από την επιλογή των στοιχείων αντιστάθμισης, παράγοντες που επηρεάζουν επίσης τη μεταφορά ισχύος και την απόδοση σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, είναι η συχνότητα λειτουργίας και η ισοδύναμη αντίσταση φορτίου της μπαταρίας του οχήματος. Στην περίπτωση, επομένως, της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, είναι σημαντική η ανάπτυξη μίας μεθόδου βελτιστοποίησης για τον ορισμό των βέλτιστων μεταβλητών του συστήματος που επιτρέπουν τη μεταφορά μεγάλων ποσών ισχύος με αυξημένη απόδοση. Στο πλαίσιο αυτό, η μέθοδος βελτιστοποίησης που προτείνεται στην παρούσα διατριβή ορίζει τις βέλτιστες τιμές της συχνότητας λειτουργίας, των πυκνωτών αντιστάθμισης, και της αντίστασης φορτίου. Εξετάζοντας επιπλέον περιορισμούς που σχετίζονται με την κίνηση του ηλεκτρικού οχήματος πάνω από το φορτιστή, η προτεινόμενη μέθοδος ορίζει μία Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, όπου η ενέργεια που μεταφέρεται στο όχημα μεγιστοποιείται επιτυγχάνοντας παράλληλα μία μεγάλη απόδοση λειτουργίας.

Επιπλέον, η κατάλληλη σχεδίαση του ελέγχου, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται, εξαλείφει την ανάγκη μετάδοσης δεδομένων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, επιτρέποντας τη λειτουργία του συστήματος σε ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες διέλευσης του οχήματος. Επίσης, προτείνεται μία μέθοδος ανίχνευσης της θέσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή, η οποία δεν απαιτεί τη χρήση επιπλέον εξοπλισμού (αισθητήρες κλπ.), μειώνοντας έτσι το οικονομικό κόστος ανάπτυξης της υποδομής φόρτισης. Αντίθετα με παρόμοιες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία, η προτεινόμενη μέθοδος ανίχνευσης λαμβάνει υπόψιν περιορισμούς που σχετίζονται με την απόδοση του συστήματος και δύναται να εφαρμοσθεί αποτελεσματικά σε συστήματα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης.

Η εφαρμογή της μεθόδου βελτιστοποίησης σε έναν κυκλικό συζεύκτη διαμέτρου 60 εκατοστών υποδεικνύει την ανάγκη για συμβιβασμό μεταξύ της ενέργειας που μεταφέρεται και της απόδοσης που είναι δυνατό να επιτευχθεί. Ωστόσο, μία προσεκτική επιλογή της Περιοχής Υψηλής Απόδοσης, επιτρέπει τη μεταφορά μίας σημαντικής ποσότητας ενέργειας, με μία απόδοση συστήματος μεγαλύτερη από 95%. Επιπλέον, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων υποδεικνύουν ότι ο έλεγχος της ισχύος εισόδου, μέσω της ρύθμισης του ρεύματος στο πρωτεύον πηνίο επιτρέπει την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος τόσο στην Περιοχή Χαμηλής Απόδοσης όσο και στην Περιοχή Υψηλής Απόδοσης, αυξάνοντας σημαντικά τη συνολική “ενεργειακή απόδοση” του συστήματος.

Επιπλέον ο προτεινόμενος έλεγχος επιτρέπει τη σημαντική μείωση των αναπτυσσόμενων ΗΜ πεδίων που δύναται να αναπτυχθούν λόγω ενός υψηλού ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα. Ειδικότερα, σε περίπτωση που το σασί του οχήματος δεν καλύπτει πλήρως το πρωτεύον, η τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής δύναται να λάβει τιμές που ξεπερνούν τα επιβαλλόμενα όρια σε περιοχές εντός και εκτός του οχήματος. Ωστόσο, ο προτεινόμενος έλεγχος, μειώνοντας το ρεύμα του πρωτεύοντος πηνίου σε αυτές τις περιοχές της κίνησης δύναται να εξασφαλίσει ότι η τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής διατηρείται εντός των επιτρεπτών ορίων.

Η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε επίσης σε έναν κυκλικό μαγνητικό συζεύκτη ράβδων φερρίτη διαμέτρου περίπου 25 εκατοστών, ο οποίος υλοποιήθηκε πειραματικά. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν μία ιδιαίτερα καλή απόδοση του συστήματος για σημεία κίνησης του δευτερεύοντος εντός της περιοχής υψηλής απόδοσης. Στο πλαίσιο αυτό, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που εξάγονται από το πρόβλημα βελτιστοποίησης (συχνότητα λειτουργίας, πυκνωτές αντιστάθμισης και τιμή της αντίστασης φορτίου) λήφθηκαν υπόψιν ώστε να κατασκευασθεί ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Ο προτεινόμενος έλεγχος εφαρμόστηκε σε αυτό το σύστημα

επαγωγικής φόρτισης, υλοποιώντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις που απαιτούνται λαμβάνοντας υπόψη ρεαλιστικές εφαρμογές κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το σύστημα ελέγχου αναγνωρίζει επιτυχώς τις μεταβάσεις μεταξύ των περιοχών χαμηλής και υψηλής απόδοσης, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το φορτιστή.

Οι υποδομές επαγωγικής φόρτισης, αν και προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, απαιτούν συχνά τη μεταφορά μεγάλων ποσών ισχύος μεταξύ του δικτύου και του οχήματος. Αυτή η ζήτηση μπορεί να τροποποιήσει σημαντικά το προφίλ φορτίου ενός δικτύου διανομής και να επηρεάσει τη λειτουργία και το σχεδιασμό του. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται μία μεθοδολογία για τη μελέτη της επίδρασης υποδομών επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής. Ειδικότερα, εξάγεται το προφίλ φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε στατικούς και δυναμικούς επαγωγικούς φορτιστές, λαμβάνοντας, παράλληλα, υπόψη και τις ενεργειακές ανάγκες των οχημάτων κατά την οικιακή φόρτιση. Προτείνεται, επίσης, το απαραίτητο εργαλείο για την εκτίμηση του μέγιστου αριθμού επαγωγικών φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο διανομής, χωρίς να παρατηρούνται παραβιάσεις των ορίων του δικτύου.

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε ένα ρεαλιστικό μοντέλο αστικού δικτύου διανομής μέσης τάσης, υποδεικνύει ότι η οικιακή φόρτιση αυξάνει το φορτίο του δικτύου τις απογευματινές ώρες, ενώ η επαγωγική φόρτιση επηρεάζει το φορτίο του δικτύου κατά τη διάρκεια των πρωινών αλλά και των μεσημεριανών ωρών. Ειδικότερα, για την περίπτωση του δικτύου που εξετάστηκε, οι ανάγκες των στατικών επαγωγικών φορτιστών οδηγούν σε μία αύξηση της αιχμής του φορτίου τις μεσημεριανές ώρες, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη σε περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη η εξυπηρέτηση ενός μεγάλου αριθμού χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων από στατικούς επαγωγικούς φορτιστές. Η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων σε δυναμικούς επαγωγικούς φορτιστές οδηγεί σε μία αυξημένη ενεργειακή ζήτηση, με αποτέλεσμα το φορτίο του δικτύου να παραμένει ιδιαίτερα υψηλό για πολλές ώρες της ημέρας. Τόσο η στατική όσο και η δυναμική επαγωγική φόρτιση δεν προκαλεί κάποιο πρόβλημα σχετικά με τα όρια τάσεων (μέγιστη-ελάχιστη τιμή και απόκλιση της τάσης) ή τα θερμικά όρια των μετασχηματιστών στο εξεταζόμενο δίκτυο. Ωστόσο, οι ιδιαίτερα αυξημένες ενεργειακές ανάγκες των επαγωγικών φορτιστών οδηγούν σε μία σημαντική αύξηση τόσο της φόρτισης των γραμμών του δικτύου, όσο και των απωλειών ισχύος του δικτύου.

Ιδιαίτερα ευεργετική αποδεικνύεται η χρήση φωτοβολταϊκών, ως προς την αύξηση του μέγιστου αριθμού υποδομών επαγωγικής φόρτισης που δύναται να εγκατασταθεί στο δίκτυο, καθώς η φωτοβολταϊκή παραγωγή συμπίπτει αρκετές ώρες της ημέρας με τη ζήτηση των επαγωγικών σταθμών. Σε περίπτωση, ωστόσο, μίας ιδιαίτερα αυξημένης διείσδυσης επαγωγικών φορτιστών στο δίκτυο, ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός φορτιστών ενδέχεται να ξεπεραστεί. Στην περίπτωση αυτή, για να αποφευχθεί η επέκταση των υποδομών του δικτύου για την εξυπηρέτηση των νέων ενεργειακών αναγκών, δύναται να υιοθετηθεί ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας, το οποίο, ρυθμίζει κατάλληλα τη φόρτιση των σταθμών, περιορίζοντας την ισχύ τους σε επιθυμητά επίπεδα. Ειδικότερα, τροποποιήσεις στο σύστημα ελέγχου επαγωγικών φορτιστών δύναται να επιτρέψουν σε συστήματα διαχείρισης ενέργειας να παρέχουν υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου που αφορούν σε όλη την έκταση του δικτύου, μία περιορισμένη περιοχή του δικτύου, ή μεμονωμένους ζυγούς. Τα προβλήματα που παρουσιάζονται στο δίκτυο δύναται να εξαλειφθούν είτε μειώνοντας κατά ένα μικρό ποσοστό την ισχύ σε όλους τους φορτιστές, είτε διακόπτοντας την παροχή ισχύος σε συγκεκριμένους στατικούς ή δυναμικούς φορτιστές εντός της προβληματικής περιοχής

## 7.2 Συμβολή της Διατριβής

Η συνεισφορά της διατριβής συνοψίζεται, ως ακολούθως:

➤ Κεφάλαιο 2:

- Πραγματοποιήθηκε μία ανασκόπηση των μαγνητικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση της στατικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, διάφορες διατάξεις ενός ή περισσοτέρων πηνίων εξετάστηκαν ως προς την ικανότητά τους για μεταφορά ισχύος, καθώς και ως προς την ανοχή που παρουσιάζουν στη μετατόπιση.
- Πραγματοποιήθηκε, επίσης, μία ανασκόπηση όλων των τοπολογιών αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης. Εξετάστηκαν βασικές τοπολογίες με έναν πυκνωτή στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος, καθώς και πιο περίπλοκες τοπολογίες που απαιτούν περισσότερα στοιχεία αντιστάθμισης για την υλοποίησή τους.

➤ Κεφάλαιο 3:

- Εξετάστηκαν οι απαιτούμενες τροποποιήσεις, σε σχέση με τη στατική επαγωγική φόρτιση, που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για τη μελέτη ενός συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.
- Το φαινόμενο διακλάδωσης εξετάστηκε για την περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψιν όχι μόνο τη συχνότητα λειτουργίας, αλλά και την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή.
- Μελετήθηκε, επίσης, η επίδραση των μεταβολών των αυτεπαγωγών στη δυναμική επαγωγική φόρτιση, λόγω της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, παρουσιάζεται η ανάγκη επιλογής των στοιχείων αντιστάθμισης λαμβάνοντας υπόψιν τη μέση απόδοση και μέση μεταφερόμενη ισχύ στην περίπτωση της επαγωγικής φόρτισης.

➤ Κεφάλαιο 4:

- Προτάθηκε μία μέθοδος βελτιστοποίησης για την περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με στόχο τον ορισμό των βέλτιστων τιμών για τη συχνότητα λειτουργίας, τους πυκνωτές αντιστάθμισης και την ισοδύναμη αντίσταση φορτίου. Λαμβάνοντας υπόψιν περιορισμούς που σχετίζονται με την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή, η μέθοδος βελτιστοποίησης ορίζει την Περιοχή Υψηλής Απόδοσης όπου επιτυγχάνεται μέγιστη μεταφορά ενέργειας, παράλληλα με μία ιδιαίτερα υψηλή απόδοση.
- Προτάθηκε μία μέθοδος ελέγχου που επιτρέπει την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης σε ένα σύστημα δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Ο έλεγχος που προτείνεται δεν απαιτεί τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, επιτρέποντας τη λειτουργία του συστήματος ακόμη και για μεγάλες ταχύτητες διέλευσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή. Επίσης, ο προτεινόμενος έλεγχος δεν απαιτεί κάποιον μηχανισμό ανίχνευσης της θέσης του οχήματος πάνω από το φορτιστή (όπως π.χ. αισθητήρες), μειώνοντας το κόστος ανάπτυξης των υποδομών επαγωγικής φόρτισης. Αντίθετα με παρόμοιες μεθόδους ανίχνευσης που προτείνονται στη βιβλιογραφία, ο έλεγχος στην παρούσα διατριβή αντιμετωπίζει αποτελεσματικά ζητήματα σχετικά με την απόδοση του συστήματος.

- Η σωστή λειτουργία του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου επιβεβαιώθηκε με την προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος δυναμικής επαγωγικής φόρτισης καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή.
- Μελετήθηκαν τα ΗΜ πεδία που δύναται να αναπτυχθούν στην περίπτωση της δυναμικής επαγωγικής φόρτισης. Σε περιπτώσεις που τα αντίστοιχα επιβαλλόμενα όρια για την ασφάλεια των ατόμων εντός και εκτός οχήματος δεν τηρούνται, το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου δύναται να μειώσει επιτυχώς τα εκπεμπόμενα ΗΜ πεδία.

➤ Κεφάλαιο 5:

- Η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης εφαρμόστηκε σε έναν κυκλικό μαγνητικό συζεύκτη ο οποίος κατασκευάστηκε πειραματικά, υποδεικνύοντας υψηλά ποσοστά απόδοσης κατά τη διάρκεια κίνησης του δευτερεύοντος πάνω από το πρωτεύον.
- Υλοποιήθηκε πειραματικά ο προτεινόμενος έλεγχος και εφαρμόστηκε στην κυκλική διάταξη που κατασκευάστηκε, εφαρμόζοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις που απαιτούνται για μία πραγματική εφαρμογή δυναμικής επαγωγικής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο προτεινόμενος έλεγχος δύναται να εφαρμοσθεί επιτυχώς, μεταβάλλοντας κατάλληλα το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα ανάλογα με τη θέση του οχήματος πάνω από το φορτιστή.

➤ Κεφάλαιο 6:

- Προτάθηκε μία μεθοδολογία για τη μελέτη της επίδρασης υποδομών επαγωγικής φόρτισης στο δίκτυο διανομής. Ειδικότερα, προτάθηκε η μεθοδολογία για την εξαγωγή του προφίλ φόρτισης των οχημάτων σε γρήγορους στατικούς επαγωγικούς φορτιστές. Παράλληλα, προτάθηκε το απαραίτητο εργαλείο για την εκτίμηση του μέγιστου αριθμού δυναμικών επαγωγικών φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο, χωρίς να παρατηρούνται παραβιάσεις των ορίων του δικτύου αυτού.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε ένα ρεαλιστικό μοντέλο αστικού δικτύου διανομής μέσης τάσης, εξάγοντας ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της επαγωγικής φόρτισης (στατικής και δυναμικής) στη λειτουργία των δικτύων διανομής.
- Εξετάστηκε η επίδραση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών στο μέγιστο αριθμό φορτιστών που δύναται να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο διανομής. Επιπλέον, εξετάστηκε η επίδραση της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σε ένα πιθανό μελλοντικό σενάριο αύξησης του φορτίου του δικτύου.
- Περιγράφηκε ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας επαγωγικών φορτιστών, προτείνοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις σε συστήματα ελέγχου υποδομών επαγωγικής φόρτισης, ώστε να μπορέσουν να ενταχθούν σε ένα τέτοιο σύστημα διαχείρισης. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάστηκαν σενάρια παροχής υπηρεσιών διαχείρισης φορτίου για την αντιμετώπιση προβλημάτων που εντοπίζονται σε ένα δίκτυο διανομής.



### 7.3 Μελλοντικές επεκτάσεις της διατριβής

Από τη διατριβή αυτή διακρίνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα:

- Επέκταση του προβλήματος βελτιστοποίησης ώστε να ληφθούν υπόψιν και οι απώλειες στον DC/AC αντιστροφέα. Οι μαθηματικές εκφράσεις σχετικά με το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορούν να συμπεριληφθούν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που λαμβάνει επίσης υπόψιν και τις απώλειες του DC/AC αντιστροφέα κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος πάνω από το φορτιστή.
- Εξέταση μίας διαφορετικής υλοποίησης του προβλήματος βελτιστοποίησης ώστε να υλοποιηθεί ένα πιο απλοποιημένο σύστημα ελέγχου στην πλευρά του δευτερεύοντος. Ιδανικά στην πλευρά του δευτερεύοντος μία απλή ανόρθωση θα εξασφάλιζε ένα πιο οικονομικό σύστημα για την ενσωμάτωση στο όχημα. Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, η μεταβολή της αντίστασης φορτίου, η τιμή της οποίας πλέον δεν θα ήταν δυνατό να ελεγχθεί, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν στη διαμόρφωση του προβλήματος βελτιστοποίησης.
- Εξέταση της λειτουργίας του συστήματος σε περίπτωση που τοποθετείται στο δρόμο μία σειρά από πρωτεύοντα. Στο πλαίσιο αυτό δύναται να εξετασθούν τροποποιήσεις στο προτεινόμενο σύστημα ελέγχου ώστε ένας κοινός αντιστροφέας να παρέχει ισχύ σε περισσότερα του ενός πρωτεύοντα, μελετώντας παράλληλα πιθανές απαιτήσεις επικοινωνίας μεταξύ των πρωτευόντων κατά τη διέλευση του οχήματος.
- Αν και τοπολογίες αντιστάθμισης με περισσότερα του ενός στοιχεία αντιστάθμισης στην πλευρά του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος αυξάνουν το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος, εντούτοις, παρουσιάζει ενδιαφέρον η εξέτασή τους για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης. Στο πλαίσιο αυτό η μέθοδος βελτιστοποίησης δύναται να εφαρμοσθεί για τις τοπολογίες LCC και LCCL που περιγράφονται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, ώστε να εξετασθεί εάν παρέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την απόδοση και τη μεταφορά ισχύος, ώστε να δικαιολογούν το αυξημένο κόστος και πολυπλοκότητα που επιβάλλουν με την εφαρμογή τους.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Α

*Πίνακας Α-1: Διαθέσιμα πρότυπα με μεθόδους εκτίμησης της έκθεσης σε ΗΜ πεδία και διαδικασίες μέτρησης.*

Πρότυπο	Τίτλος Προτύπου
BS EN 50364-2010	Limitation of human exposure to electromagnetic fields from devices operating in the frequency range 0 Hz to 300 GHz, used in electronic article surveillance (EAS), radio frequency identification (RFID) and similar applications
BS EN 50357:2001	Evaluation of human exposure to electromagnetic fields from devices used in electronic article surveillance (EAS), radio frequency identification (RFID) and similar applications
IEC 61786 (1998-08) Ed. 1.0	Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings - Special requirements for instruments and guidance for measurements
IEC 61983 Ed. 1.0	Measurement and evaluation of high frequency (9 kHz to 300 GHz) electromagnetic fields with regard to human exposure
BS EN 61786-1	Measurement of DC magnetic fields, AC magnetic and electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings. Part 1. Special requirements for instruments
BS EN 50413:2009	Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)
IEC 62110:2009	Electric and magnetic field levels generated by AC power systems, Measurement procedures with regard to public exposure
BS EN 62311:2008	Assessment of electronic and electrical equipment related to human exposure restrictions for electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)
BS EN 62226-1:2005	Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range. Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body. General
BS EN 62226-2-1:2005	Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range. Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body. Exposure to magnetic fields. 2D models
BS EN 62226-3-1:2007	Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range. Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body. Exposure to electric fields. Analytical and 2D numerical models
IEC 62226-1 ed1.0	Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 1: General
IEC 62226-2-1 ed1.0	Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 2-1: Exposure to magnetic fields - 2D models
IEC 62226-3-1 ed1.0	Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body - Part 3-1: Exposure to electric fields - Analytical and 2D numerical models
BS EN 50499-2008	Procedure for the assessment of the exposure of workers to electromagnetic fields
BS EN 50527-1:2010	Procedure for the assessment of the exposure to electromagnetic fields of workers bearing active implantable medical devices. General
BS EN 50527-2-1:2011	Procedure for the assessment of the exposure to electromagnetic fields of workers bearing active implantable medical devices. Specific assessment for workers with cardiac pacemakers

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-B

**Πίνακας B-1:** Επιλογή του πυκνωτή αντιστάθμισης στο πρωτεύον,  $C_1$ , στις βασικές τοπολογίες αντιστάθμισης για την ελαχιστοποίηση της διακινούμενης στο σύστημα αέργου ισχύος και την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος στην μπαταρία του οχήματος. Σε κάθε περίπτωση ο πυκνωτής αντιστάθμισης στο δευτερεύον επιλέγεται ίσος με:  $C_2 = 1/\omega^2 L_2$  [49]

Τοπολογία	Τιμή του Πυκνωτή $C_1$
Σειρά- Σειρά	$\frac{1}{\omega^2 L_1}$
Σειρά- Παράλληλα	$\frac{1}{\omega^2 (L_1 - M^2/L_2)}$
Παράλληλα- Παράλληλα	$\frac{L_1 - M^2/L_2}{\left(\frac{\omega^2 M^2}{L_2^2}\right)^2 + \omega^2 (L_1 - M^2/L_2)^2}$
Παράλληλα- Σειρά	$\frac{L_1}{\left(\frac{\omega^2 M^2}{R_L}\right)^2 + \omega^2 L_1^2}$

**Πίνακας B-2:** Συντελεστής ποιότητας,  $Q$ , στο δευτερεύον, ανάλογα με την τοπολογία που χρησιμοποιείται [49]. Οι τιμές για τους πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$ , στην περίπτωση αυτή, επιλέγονται σύμφωνα με τον Πίνακα B-1

Συνδεσμολογία του πυκνωτή δευτερεύοντος	Τιμή του συντελεστή ποιότητας δευτερεύοντος $Q$
Εν σειρά συνδεσμολογία δευτερεύοντος	$\frac{\omega L_2}{R_L}$
Παράλληλη συνδεσμολογία δευτερεύοντος	$\frac{R_L}{\omega L_2}$

### Εξαγωγή των εκφράσεων για την ισχύ εισόδου και εξόδου για την περίπτωση της LCL τοπολογίας:

Σύμφωνα με το νόμο ρευμάτων του Kirchhoff στο κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-10 και την πλευρά του δευτερεύοντος:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{C_2} + \tilde{I}_L \quad (\text{Π-B- 1})$$

Και σύμφωνα με το νόμο τάσεων του Kirchhoff για την πλευρά του δευτερεύοντος:

$$\tilde{V}_{L2} = \tilde{V}_{out} + j\omega L_{f_2} \tilde{I}_L \quad (\text{Π-B- 2})$$

Όμως

$$\tilde{V}_{out} = R_L \tilde{I}_L \quad (\text{Π-B- 3})$$

και

$$\tilde{V}_{L2} = \frac{1}{j\omega C_2} \tilde{I}_{C_2} \quad (\text{Π-B- 4})$$

Επομένως, σύμφωνα με την (Π-B- 2):

$$\tilde{I}_{C_2} = j\omega C_2 (R_L + j\omega L_{f_2}) \tilde{I}_L \quad (\text{Π-B- 5})$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις (Π-B- 1) και (Π-B- 5):

$$\tilde{I}_L = \frac{1}{1 + j\omega C_2(R_L + j\omega L_{f_2})} \tilde{I}_2 \quad (\text{Π-B- 6})$$

Επομένως, σύμφωνα με την (Π-B- 2) και την (Π-B- 6):

$$\tilde{V}_{L_2} = \frac{(R_L + j\omega L_{f_2})}{1 + j\omega C_2(R_L + j\omega L_{f_2})} \tilde{I}_2 \quad (\text{Π-B- 7})$$

Αντικαθιστώντας την (Π-B- 7) στη (2.20), προκύπτει:

$$\tilde{I}_2 = \frac{j\omega M}{\frac{(R_L + j\omega L_{f_2})}{1 + j\omega C_2(R_L + j\omega L_{f_2})} + R_2 + j\omega L_2} \tilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 8})$$

Και σύμφωνα με τις (Π-B- 6) και (Π-B- 8):

$$\tilde{I}_L = \frac{j\omega M}{R_L + j\omega L_{f_2} + (R_2 + j\omega L_2)(1 + j\omega C_2(R_L + j\omega L_{f_2}))} \tilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 9})$$

Η ισχύς εξόδου, επομένως, θα είναι:

$$\begin{aligned} S_{out} &= \tilde{V}_{out} \tilde{I}_L^* = R_L |\tilde{I}_L|^2 \\ &= \frac{\omega^2 M^2 R_L}{[R_L + R_2 - \omega^2 C_2(L_{f_2} R_2 + L_2 R_L)]^2 + \omega^2 [L_2 + L_{f_2} + C_2(R_L R_2 + \omega^2 L_2 L_{f_2})]^2} |\tilde{I}_1|^2 \end{aligned} \quad (\text{Π-B- 10})$$

Η ισχύς που μεταφέρεται στη μπαταρία του οχήματος, θα είναι

$$\begin{aligned} P_{out} &= Re\{S_{out}\} \\ &= \frac{\omega^2 M^2 R_L}{[R_L + R_2 - \omega^2 C_2(L_{f_2} R_2 + L_2 R_L)]^2 + \omega^2 [L_2 + L_{f_2} + C_2(R_L R_2 + \omega^2 L_2 L_{f_2})]^2} |\tilde{I}_1|^2 \end{aligned} \quad (\text{Π-B- 11})$$

Θέτοντας

$$\tilde{K}_{LCL} = \frac{j\omega M}{\frac{(R_L + j\omega L_{f_2})}{1 + j\omega C_2(R_L + j\omega L_{f_2})} + R_2 + j\omega L_2} \quad (\text{Π-B- 12})$$

η (Π-B- 8) μπορεί να γραφεί ως:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{K}_{LCL} \tilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 13})$$

Σύμφωνα με τη (2.19)

$$\tilde{V}_{L_1} = (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M \tilde{K}_{LCL}) \tilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 14})$$

Όμως

$$\tilde{V}_{L_1} = \tilde{V}_{C_1} = \frac{1}{j\omega C_1} \tilde{I}_{C_1} \quad (\text{Π-B- 15})$$

Επομένως, σύμφωνα με τις (Π-B- 14) και (Π-B- 15):

$$\tilde{I}_{C_1} = j\omega C_1 (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M \tilde{K}_{LCL}) \tilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 16})$$

Σύμφωνα με το νόμο ρευμάτων και τάσεων του Kirchhoff στο κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-10 και την πλευρά του πρωτεύοντος:

$$\widetilde{I}_{in} = \widetilde{I}_{C_1} + \widetilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 17})$$

$$\widetilde{V}_{in} = \widetilde{V}_{L_1} + j\omega L_{f_1} \widetilde{I}_{in} \quad (\text{Π-B- 18})$$

Αντικαθιστώντας την (Π-B- 16) στην (Π-B- 17):

$$\widetilde{I}_{in} = [1 + j\omega C_1(j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}})]\widetilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 19})$$

Και αντικαθιστώντας την (Π-B- 14) στην (Π-B- 18):

$$\widetilde{V}_{in} = (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}})\widetilde{I}_1 + j\omega L_{f_1}\widetilde{I}_{in} \quad (\text{Π-B- 20})$$

Η φαινόμενη ισχύς στην είσοδο θα είναι:

$$\begin{aligned} \widetilde{S}_{in} &= \widetilde{V}_{in}\widetilde{I}_{in}^* = (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}})\widetilde{I}_1\widetilde{I}_{in}^* + j\omega L_{f_1}|\widetilde{I}_{in}|^2 \\ &= (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}})\widetilde{I}_1\widetilde{I}_{in}^* + j\omega L_{f_1}|\widetilde{I}_{in}|^2 \end{aligned} \quad (\text{Π-B- 21})$$

Και σύμφωνα με την (Π-B- 19):

$$\begin{aligned} \widetilde{S}_{in} &= (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}})\widetilde{I}_1\widetilde{I}_{in}^* + j\omega L_{f_1}|\widetilde{I}_{in}|^2 = \\ &= (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}})[(1 - j\omega C_1(j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}}))]|\widetilde{I}_1|^2 \\ &\quad + j\omega L_{f_1}[|1 + j\omega C_1(j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}})]|^2|\widetilde{I}_1|^2 = \\ &= |\widetilde{I}_1|^2 \left\{ (j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}}) - j\omega C_1[j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}}] \right\}^2 + j\omega L_{f_1} \left\{ 1 + \right. \\ &\quad \left. j\omega C_1(j\omega L_1 + R_1 - j\omega M\overline{K_{LCL}}) \right\}^2 = \\ &= |\widetilde{I}_1|^2 \left\{ j \left[ \begin{array}{l} [R_1 + \omega M \text{Im}\{\overline{K_{LCL}}\}] + \\ \omega L_1 (1 - \omega^2 C_1(L_1 - M \text{Re}\{\overline{K_{LCL}}\})) + \\ \omega(\omega^2 L_1 C_1 - 1) * \\ [(\omega^2(L_1 - M \text{Re}\{\overline{K_{LCL}}\})^2 + (R_1 + \omega M \text{Im}\{\overline{K_{LCL}}\})^2)C_1 - L_1 - M \text{Re}\{\overline{K_{LCL}}\}] \end{array} \right] \right\} \end{aligned} \quad (\text{Π-B- 22})$$

Επομένως, η ενεργός ισχύς  $P_{in} = \text{Re}\{\widetilde{S}_{in}\}$  και η άεργος ισχύς  $Q_{in} = \text{Im}\{\widetilde{S}_{in}\}$  στην είσοδο του κυκλώματος, σύμφωνα με την (Π-B- 22), θα δίνονται από τις σχέσεις (Π-B- 23) και (Π-B- 24) αντίστοιχα. Στις σχέσεις αυτές  $\text{Re}\{\overline{K_{LCL}}\}$  και  $\text{Im}\{\overline{K_{LCL}}\}$  είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του συντελεστή  $\overline{K}$ , ο οποίος δίνεται από την (Π-B- 12).

$$P_{in} = |\widetilde{I}_1|^2 (R_1 + \omega M \text{Im}\{\overline{K_{LCL}}\}) \quad (\text{Π-B- 23})$$

$$Q_{in} = |\widetilde{I}_1|^2 * \left\{ \begin{array}{l} \omega L_1 (1 - \omega^2 C_1(L_1 - M \text{Re}\{\overline{K_{LCL}}\})) + \\ \omega(\omega^2 L_1 C_1 - 1)[(\omega^2(L_1 - M \text{Re}\{\overline{K_{LCL}}\})^2 + (R_1 + \omega M \text{Im}\{\overline{K_{LCL}}\})^2)C_1 - L_1 - M \text{Re}\{\overline{K_{LCL}}\}] \end{array} \right\} \quad (\text{Π-B- 24})$$

**Εξαγωγή των εκφράσεων για την ισχύ εισόδου και εξόδου για την περίπτωση της LCC τοπολογίας:**

Σύμφωνα με το νόμο τάσεων και ρευμάτων του Kirchhoff στο κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-12 και την πλευρά του δευτερεύοντος:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{C_2} + \tilde{I}_L \quad (\text{Π-B- 25})$$

$$j\omega M\tilde{I}_1 = (R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_{f_2}})\tilde{I}_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\tilde{I}_{C_2} \quad (\text{Π-B- 26})$$

$$\frac{1}{j\omega C_2}\tilde{I}_{C_2} = (R_L + j\omega L_{f_2})\tilde{I}_L \quad (\text{Π-B- 27})$$

Σύμφωνα με τις (Π-B- 25) και (Π-B- 27):

$$\frac{1}{j\omega C_2}\tilde{I}_2 = (R_L + j\omega L_{f_2} + \frac{1}{j\omega C_2})\tilde{I}_L \quad (\text{Π-B- 28})$$

Αντικαθιστώντας την (Π-B- 25) στην (Π-B- 26):

$$j\omega M\tilde{I}_1 = \left( R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_{f_2}} + \frac{1}{j\omega C_2} \right) \tilde{I}_2 - \frac{1}{j\omega C_2} \tilde{I}_L \quad (\text{Π-B- 29})$$

Και σύμφωνα με τις (Π-B- 28) και (Π-B- 29):

$\tilde{I}_L =$

$$\frac{j\omega M}{\left\{ R_2(1 - \omega^2 L_{f_2} C_2) - \omega C_2 R_L (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_{f_2}} - \frac{1}{\omega C_2}) \right\} + j \left\{ \omega C_2 R_L R_2 + \left( \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_{f_2}} - \frac{1}{j\omega C_2} \right) (1 - \omega^2 L_{f_2} C_2) - \frac{1}{\omega C_2} \right\}} \tilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 30})$$

Η ισχύς εξόδου θα είναι:

$$S_{out} = \tilde{V}_{out} \tilde{I}_L^* \quad (\text{Π-B- 31})$$

Όμως

$$\tilde{V}_{out} = R_L \tilde{I}_L \quad (\text{Π-B- 32})$$

Αντικαθιστώντας την (Π-B- 32) στην (Π-B- 31):

$$S_{out} = R_L |\tilde{I}_L|^2 \quad (\text{Π-B- 33})$$

Και σύμφωνα με την (Π-B- 30)

$$P_{out} = Re\{S_{out}\} = |\tilde{I}_1|^2 * \frac{\omega^2 M^2 R_L}{\left[ R_2(1 - \omega^2 L_{f_2} C_2) - \omega C_2 R_L (\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_{f_2}} - \frac{1}{\omega C_2}) \right]^2 + \left[ \omega C_2 R_L R_2 + \left( \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_{f_2}} - \frac{1}{j\omega C_2} \right) (1 - \omega^2 L_{f_2} C_2) - \frac{1}{\omega C_2} \right]^2} \quad (\text{Π-B- 34})$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις (Π-B- 28) και (Π-B- 29) το ρεύμα  $\tilde{I}_2$  του δευτερεύοντος πηνίου μπορεί να γραφεί ως:

$$\tilde{I}_2 = \tilde{K}_{LCC} \tilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 35})$$

όπου:

$$\widetilde{K}_{LCC} = \frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_{f_2}} + \frac{1}{j\omega C_2} - \frac{1}{j\omega C_2(\omega^2 L_{f_2} C_2 + j\omega C_2 R_L + 1)}} \quad (\text{Π-B- 36})$$

Σύμφωνα με το νόμο ρευμάτων και τάσεων του Kirchhoff στο κύκλωμα που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-12 και την πλευρά του πρωτεύοντος:

$$\widetilde{I}_{in} = \widetilde{I}_{C_1} + \widetilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 37})$$

$$\widetilde{V}_{in} = j\omega L_{f_1} \widetilde{I}_{in} + \frac{1}{j\omega C_1} \widetilde{I}_{C_1} \quad (\text{Π-B- 38})$$

$$\frac{1}{j\omega C_1} \widetilde{I}_{C_1} = \left( \frac{1}{j\omega C_{f_1}} + j\omega L_1 + R_1 \right) \widetilde{I}_1 - j\omega M \widetilde{I}_2 \quad (\text{Π-B- 39})$$

Σύμφωνα με τις (Π-B- 35), (Π-B- 37) και (Π-B- 39) το ρεύμα  $\widetilde{I}_{in}$  μπορεί να γραφεί ως:

$$\widetilde{I}_{in} = j\omega C_1 \left( \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_{f_1}} + j\omega L_1 + R_1 - j\omega M \widetilde{K}_{LCC} \right) \widetilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 40})$$

Η (Π-B- 38), λαμβάνοντας υπόψη την (Π-B- 37), μπορεί να γραφεί ως:

$$\widetilde{V}_{in} = \left( j\omega L_{f_1} + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \widetilde{I}_{in} - \frac{1}{j\omega C_1} \widetilde{I}_1 \quad (\text{Π-B- 41})$$

Η φαινόμενη ισχύς στην είσοδο θα είναι:

$$\widetilde{S}_{in} = \widetilde{V}_{in} \widetilde{I}_{in}^* \quad (\text{Π-B- 42})$$

και αντικαθιστώντας την (Π-B- 41) στην (Π-B- 42):

$$\widetilde{S}_{in} = |\widetilde{I}_1|^2 \left\{ \left( j\omega L_{f_1} + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \left| j\omega C_1 \left( \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_{f_1}} + j\omega L_1 + R_1 - j\omega M \widetilde{K}_{LCC} \right) \right|^2 + R_1 - \frac{1}{j\omega C_1} - \frac{1}{j\omega C_{f_1}} - j\omega L_1 + j\omega M \widetilde{K}_{LCC} \right\} \quad (\text{Π-B- 43})$$

Επομένως, η ενεργός ισχύς  $P_{in}$  και η άεργος ισχύς  $Q_{in}$  στην είσοδο του κυκλώματος, θα είναι:

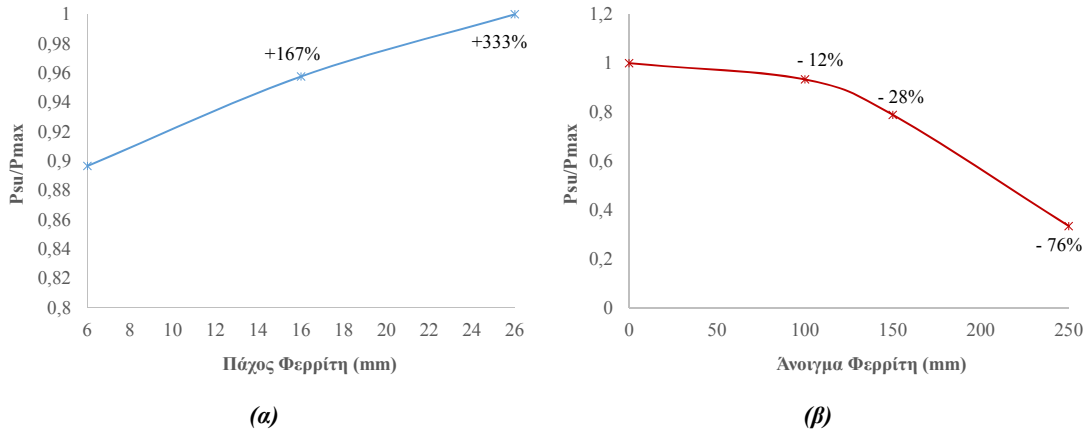
$$P_{in} = \text{Re}\{\widetilde{S}_{in}\} \quad (\text{Π-B- 44})$$

$$Q_{in} = \text{Im}\{\widetilde{S}_{in}\} \quad (\text{Π-B- 45})$$



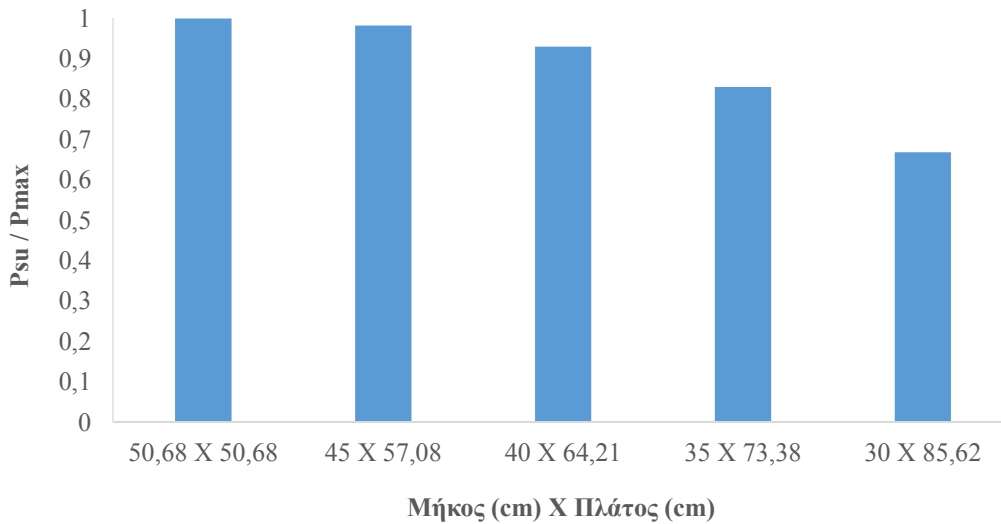
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Γ

### ✓ Κυκλική Διάταξη Ενιαίου Φερρίτη

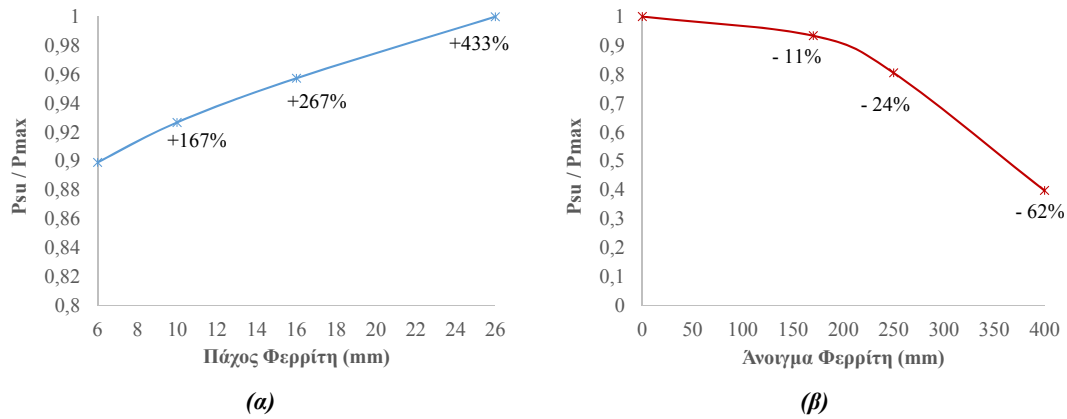


Εικόνα Π-Γ-1: Μεταβολή της ισχύος  $P_{su}$ , σε συνάρτηση με (α) το πάχος της πλάκας φερρίτη και (β) το άνοιγμα στο εσωτερικό της πλάκας φερρίτη, για κυκλική διάταξη διαμέτρου περίπου 60cm. Το ποσοστό που εμφανίζεται δίπλα σε κάθε δείκτη υποδεικνύει την ποσοστιαία αύξηση (ή μείωση) του όγκου φερρίτη που επιφέρει η μεταβολή του πάχους ή του ανοίγματος φερρίτη

### ✓ Ορθογώνια Διάταξη Ενιαίου Φερρίτη

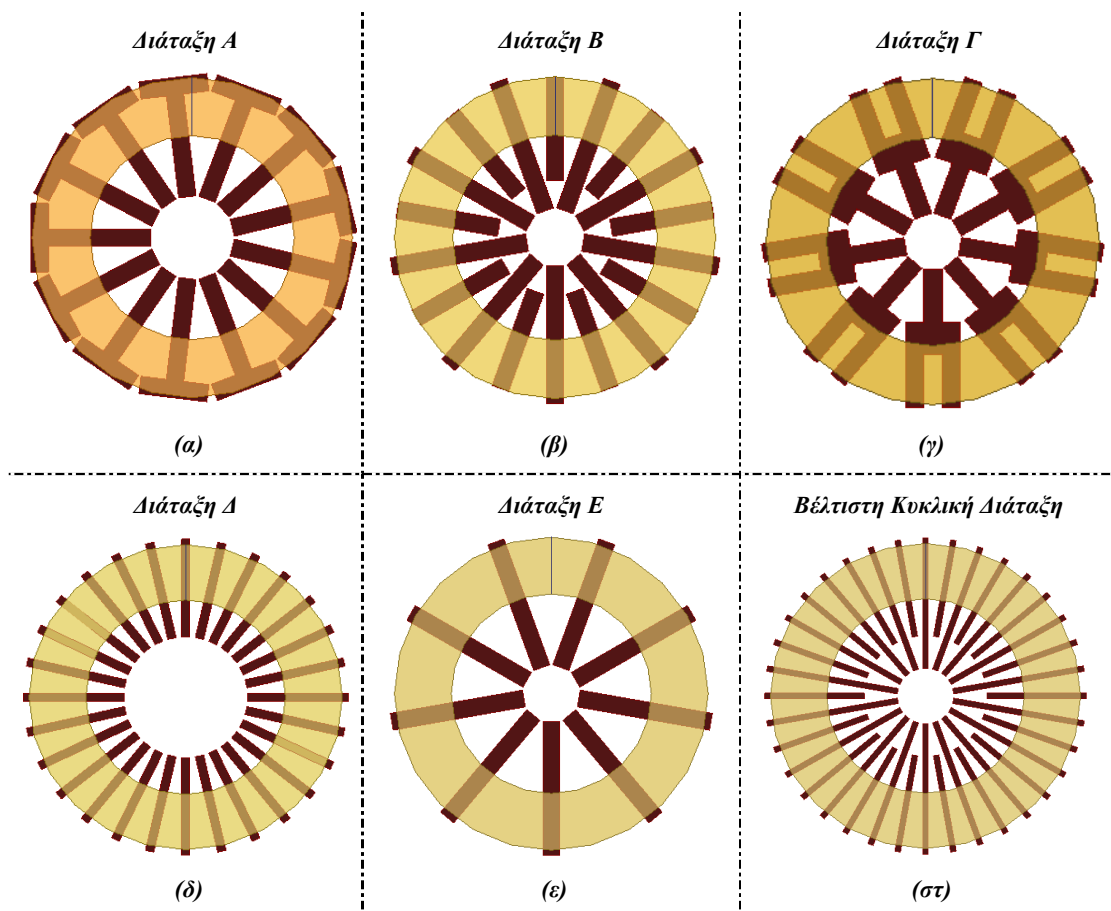


Εικόνα Π-Γ-2: Αποτελέσματα σχετικά με το μήκος και πλάτος φερρίτη για την ορθογώνια διάταξη. Σε κάθε περίπτωση το συνολικό εμβαδό της διάταξης παραμένει σταθερό.

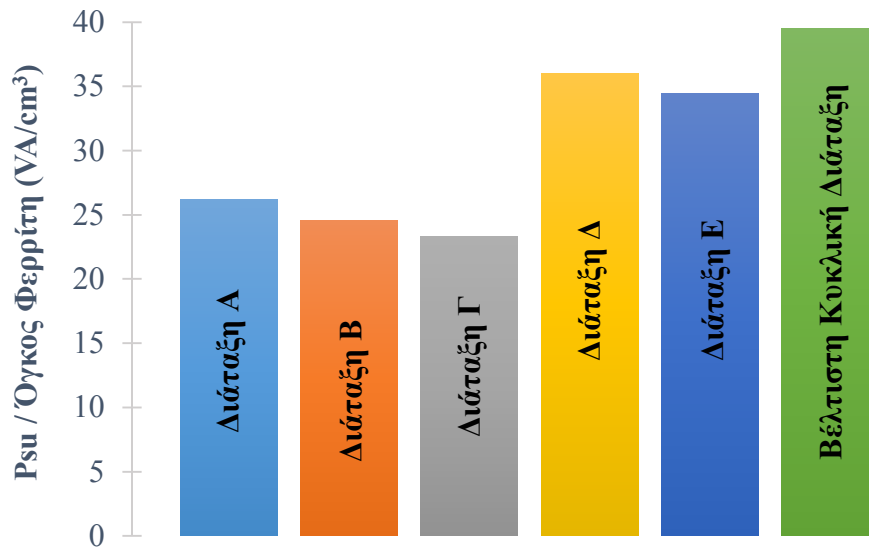


**Εικόνα Π-Γ-3:** Μεταβολή της ισχύος  $P_{su}$  σε συνάρτηση με (α) το πάχος της πλάκας φερρίτη και (β) το άνοιγμα στο εσωτερικό της πλάκας φερρίτη, για τετράγωνη διάταξη διαστάσεων  $50,68cm \times 50,68cm$ . Το ποσοστό που εμφανίζεται δίπλα σε κάθε δείκτη υποδεικνύει την ποσοστιαία αύξηση (ή μείωση) του όγκου φερρίτη που επιφέρει η μεταβολή του πάχους ή του ανοίγματος φερρίτη

- ✓ Τοποθέτηση ράβδων φερρίτη σε διάφορους γεωμετρικούς σχεδιασμούς, στην περίπτωση της κυκλικής διάταξης



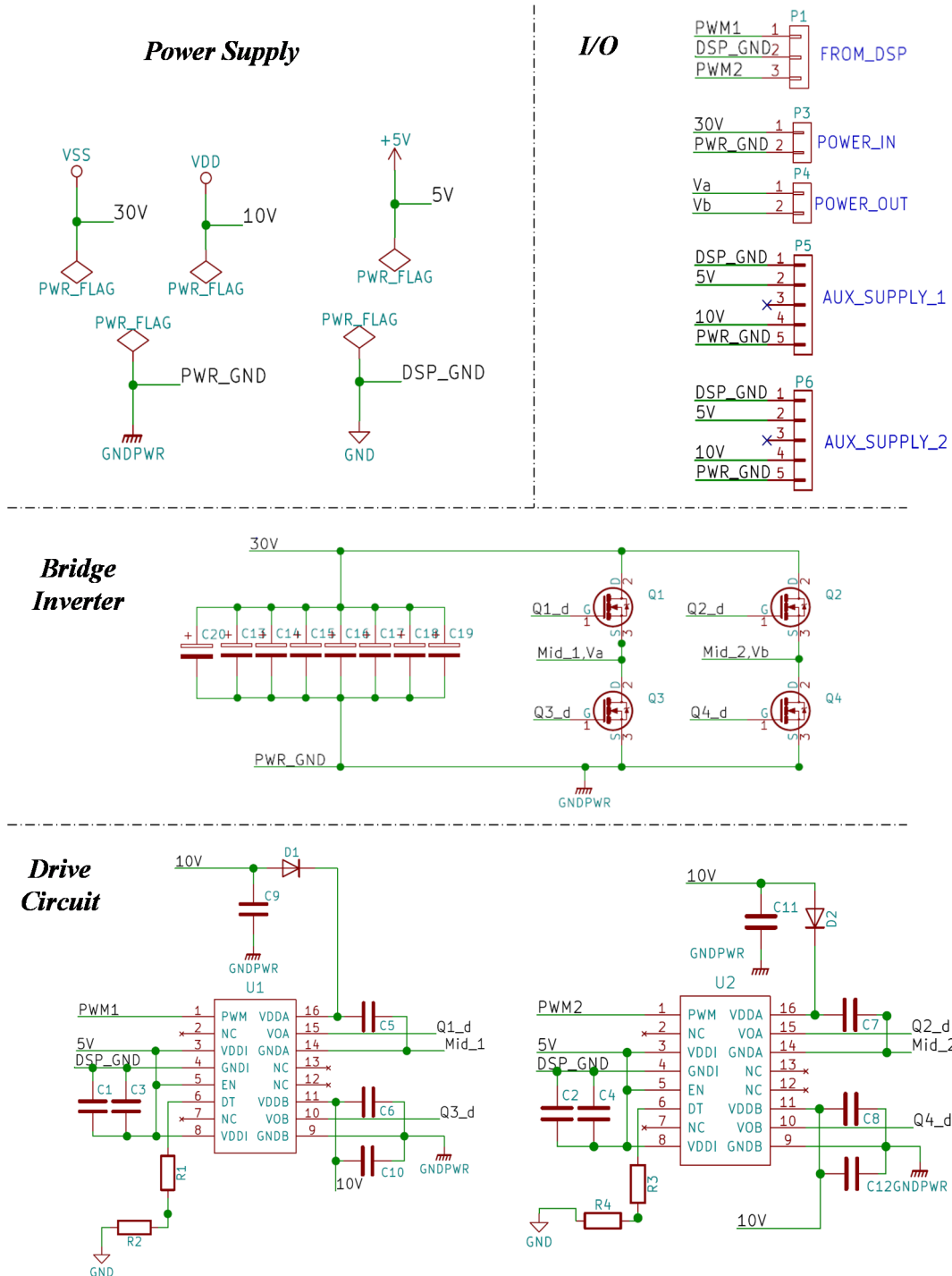
**Εικόνα Π-Γ-4:** (α)-(ε) Τοποθέτηση των ράβδων φερρίτη και δημιουργία διαφόρων γεωμετρικών σχεδιασμών, (στ) Κατάλληλη τοποθέτηση των ράβδων φερρίτη για αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος [18].



*Εικόνα Π-Γ-5: Ίκανότητα μεταφοράς ισχύος για τις διατάξεις που απεικονίζονται στην Εικόνα Π-Γ-4.*

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Δ

✓ Υλοποίηση του αντιστροφέα



*Εικόνα Π-Δ-1: Τροφοδοσία του αντιστροφέα, γέφυρα διακοπτικών στοιχείων & κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5.*

Πίνακας Δ-1: Τιμές/Τύπος των υλικών που απεικονίζονται στην Εικόνα Π-Δ-1.

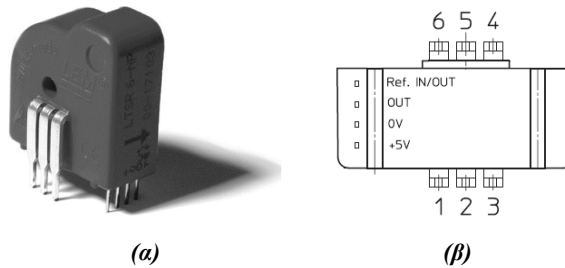
Υλικό	Τιμή/Τύπος υλικού
$C_{13} - C_{20}$	0.22 $\mu$ F (C4BSWBX3220ZBFJ)
$Q_1 - Q_4$	IRFI4228PbF
$D_1 - D_2$	VS-30BQ015-M3/9AT
$C_1 - C_2, C_9 - C_{12}$	1 $\mu$ F (GRM219R71E105KA88D)
$C_3 - C_4$	0.1 $\mu$ F (GRM21BR71E104KA01L)
$C_5 - C_8$	0.47 $\mu$ F (08053D474KAT2A)
$R_1 - R_4$	2.67k $\Omega$ (RR1220P-2671-D-M)
$U_1 - U_2$	Si8274AB4D-IS1

✓ **Μέτρηση του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα<sup>1</sup>**

Η τάση εξόδου,  $V_{out}$ , του μετατροπέα στην Εικόνα Π-Δ-2-α είναι ίση με:

$$V_{out} = V_{ref} + 0.625 \frac{I_P}{I_{PN}} \quad (\text{Π-Δ-1})$$

όπου  $I_P$  είναι το μετρούμενο ρεύμα και  $I_{PN}$  είναι το ονομαστικό ρεύμα που δίνεται σύμφωνα με τη συνδεσμολογία των pin 1-6 (Εικόνα Π-Δ-2-β) του μετατροπέα, όπως απεικονίζει ο Πίνακας Δ-2. Η τάση  $V_{ref}$  είναι η τάση αναφοράς που εφαρμόζεται στον αντιστροφέα και σύμφωνα με τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά δύναται να κυμαίνεται μεταξύ 1,9V και 2,7V.



Εικόνα Π-Δ-2: (α) Μετατροπέας ρεύματος LTSR 6-NP για τη μέτρηση της τιμής του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα & (β) Κάτοψη και αρίθμηση των pin του αντιστροφέα

Για την πειραματική υλοποίηση που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5 η τάση  $V_{ref}$  επιλέγεται ίση με 1.9V. Επιλέγεται επίσης η συνδεσμολογία (β) που απεικονίζεται στον Πίνακα Π-Δ-1, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια (208mV/A) στη μέτρηση της τιμής του ρεύματος.

Πίνακας Δ-2: Καθορισμός του ρεύματος  $I_{PN}$  ανάλογα με τη συνδεσμολογία που πραγματοποιείται

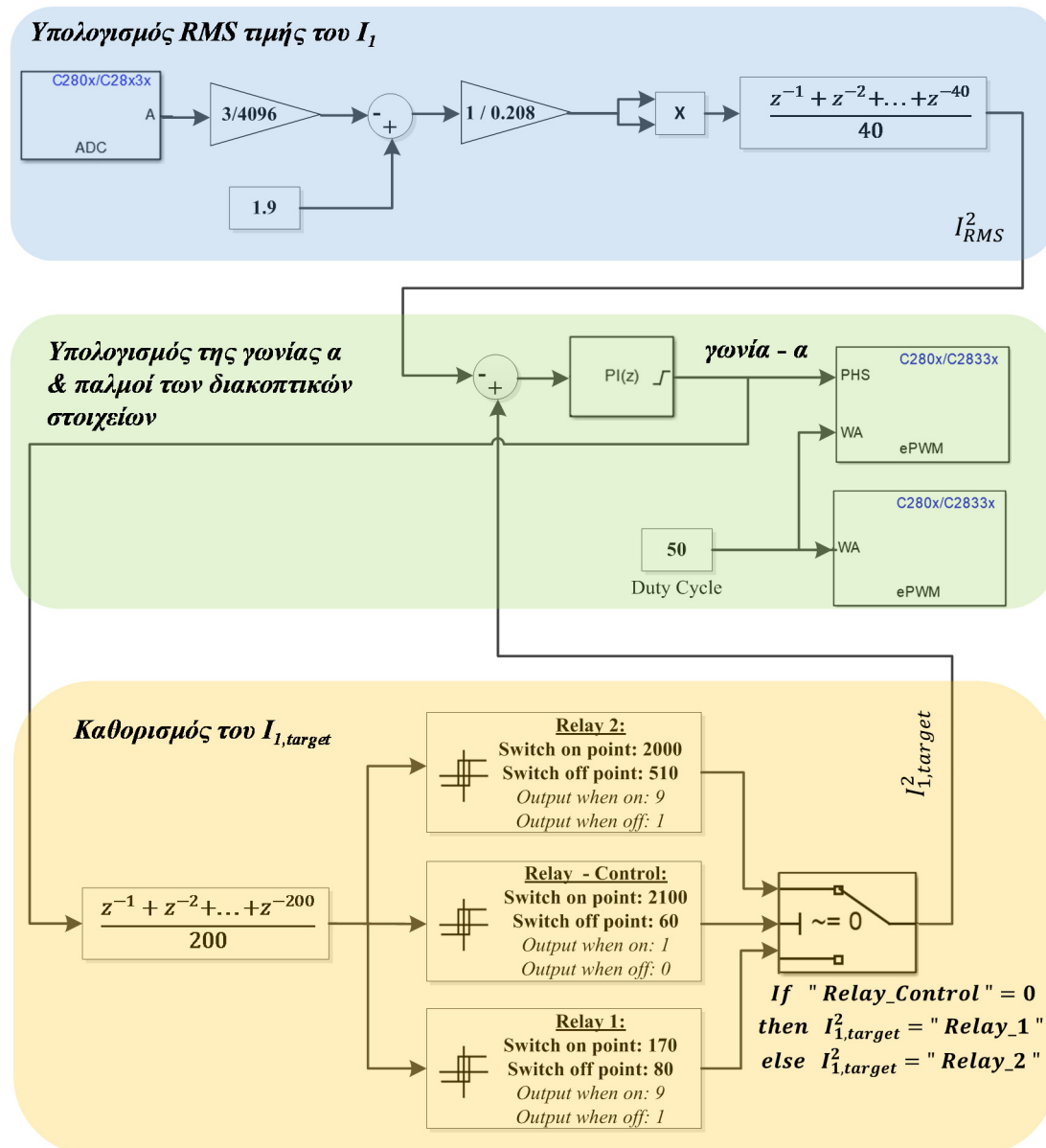
Συνδεσμολογία	$I_{PN}$
(α)	6
(β)	3
(γ)	2

<sup>1</sup> [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datsheets/ltsr\\_6-np.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datsheets/ltsr_6-np.pdf)

### ✓ Υλοποίηση του ελέγχου του DSP

Το DSP που χρησιμοποιήθηκε είναι συμβατό με το Matlab-Simulink. Ο έλεγχος που εφαρμόζεται στην πειραματική διάταξη υλοποιήθηκε, επομένως, στο Simulink και μέσω του αντίστοιχου compiler εφαρμόστηκε στο DSP που χρησιμοποιείται στη διάταξη. Η εφαρμογή του ελέγχου στο DSP πραγματοποιήθηκε μέσω του υπολογιστικού προγράμματος Code Composer.

Ο υπολογισμός της RMS τιμής του ρεύματος στο πρωτεύον της διάταξης υλοποιείται σύμφωνα με το μπλε γραμμοσκιασμένο τμήμα στην Εικόνα Π-Δ-3. Ειδικότερα η τιμή της τάσης που προκύπτει από τον μετατροπέα ρεύματος στην Εικόνα Π-Δ-2 εισάγεται στον ADC μετατροπέα του DSP. Υπολογίζεται, στη συνέχεια το τετράγωνο της RMS τιμής του ρεύματος, με στόχο τον περιορισμό των υπολογισμών του DSP, λαμβάνοντας υπόψιν 40 σημεία μέτρησης του ρεύματος.

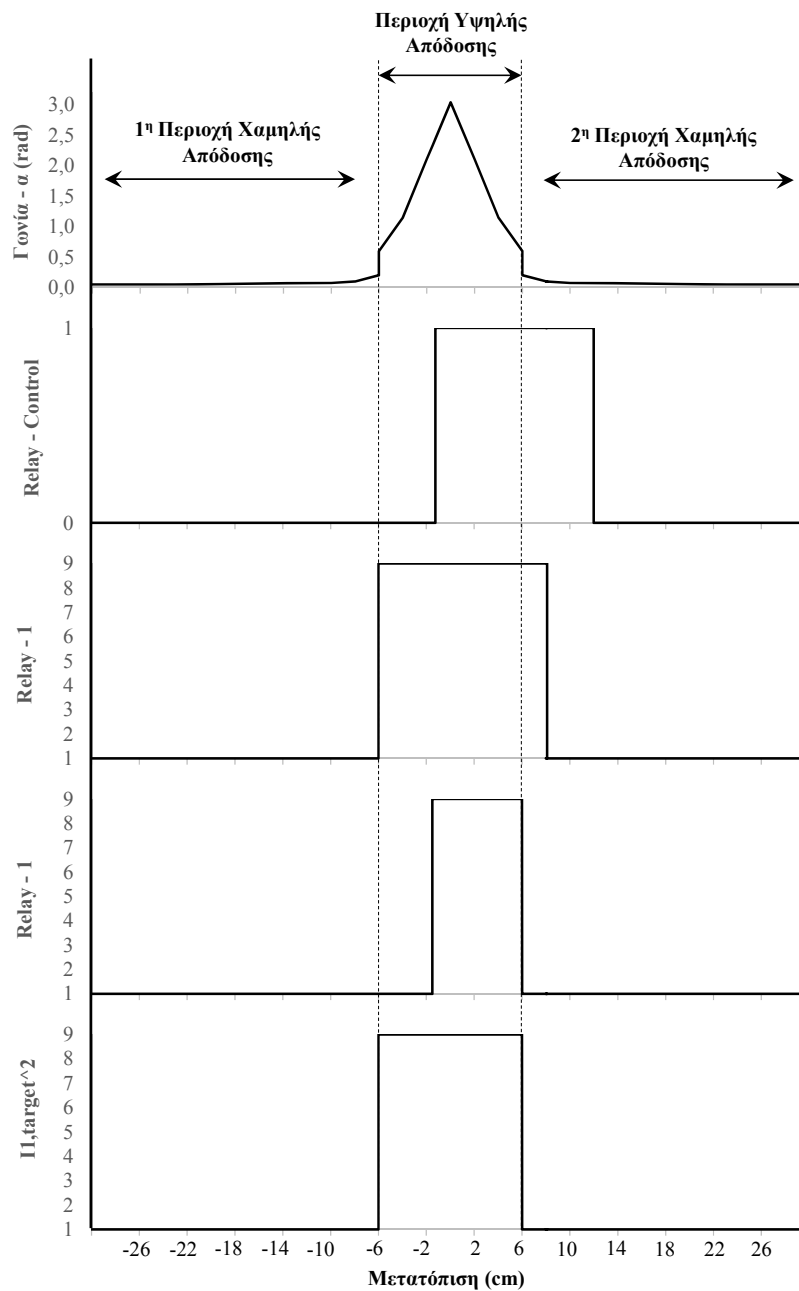


Εικόνα Π-Δ-3: Υλοποίηση του προτεινόμενου ελέγχου

Στη συνέχεια η υπολογισμένη τιμή  $I_{RMS}^2$  αφαιρείται από την επιθυμητή τιμή του ρεύματος  $I_{1,target}^2$  και το αποτέλεσμα εισάγεται σε έναν PI ελεγκτή, όπως φαίνεται στο πράσινα γραμμοσκιασμένο τμήμα στην Εικόνα Π-Δ-3. Η έξοδος του PI ελεγκτή δίνει τη γωνία  $\alpha$ , η

οποία είναι η μετατόπιση φάσης των παλμών οδήγησης μεταξύ των διακοπτικών στοιχείων  $P_1$  και  $P_2$  στην Εικόνα 5-7.

Η ίδια αυτή γωνία  $\alpha$  χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του επιθυμητού ρεύματος  $I_{1,target}^2$  (κίτρινο γραμμοσκιασμένο τμήμα στην Εικόνα Π-Δ-3). Για τον έλεγχο χρησιμοποιείται το block “*relay*” του Simulink το οποίο έχει ως έξοδο μία ορισμένη τιμή “*on-value*” ή “*off-value*”. Η τιμή αυτή δίνεται συγκρίνοντας την είσοδο με συγκεκριμένες οριακές τιμές “*switch on point-value*” και “*switch off point-value*”. Η κατάσταση “*on*” ή “*off*” του relay δεν επηρεάζεται όταν η είσοδος κυμαίνεται μεταξύ των άνω και κάτω οριακών τιμών. Επιλέγοντας κατάλληλα τις οριακές τιμές “*switch on point-value*” και “*switch off point-value*” για τα relay στην Εικόνα Π-Δ-3, είναι δυνατό να επιτευχθεί η ομαλή μετάβαση μεταξύ των περιοχών χαμηλής και υψηλής απόδοσης (Εικόνα Π-Δ-4).



Εικόνα Π-Δ-4: Λειτουργία των relay που υλοποιούνται στο Simulink, κατά την κίνηση του οχήματος πάνω από το φορτιστή.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Ε

**Πίνακας Ε-1: Κατανομή Φορτίων στο δίκτυο της Κατερίνης τη χρονική στιγμή εφαρμογής του συστήματος διαχείρισης ενέργειας**

Ζυγός	Φορτίο (MW)	Ζυγός	Φορτίο (MW)	Ζυγός	Φορτίο (MW)	Ζυγός	Φορτίο (MW)
3	0,046	18	0,181	36	0,144	55	0,181
6	0,046	20	0,363	40	0,181	59	0,363
7	0,046	22	0,181	41	0,181	62	0,181
8	0,115	23	0,181	43	0,181	64	0,181
9	0,072	25	0,181	44	0,181	66	0,181
11	0,115	27	0,181	47	0,181	69	0,181
13	0,363	30	0,181	49	0,181	70	0,181
15	0,115	31	0,181	51	0,181	72	0,289
17	0,181	34	0,181	53	0,363		

**Πίνακας Ε-2: “Καθολικές” υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου: αριθμός στατικών και δυναμικών φορτιστών στους ζυγούς του δικτύου και αντίστοιχο φορτίο των σταθμών**

Αριθμός Ζυγού	3	6	7	8	9	11	13	15	17
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	0	0	0	0	0	5	0	0
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,176	0,000	0,000
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>34</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	5	0	0	0	0	0	0	4
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,176	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,141
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>49</b>	<b>51</b>	<b>53</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	5	5	5	5	5	5	5	5
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>55</b>	<b>59</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>66</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>73</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	1	1	1	1	1	1	1	1	
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	5	5	5	5	5	5	5	5	
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	

**Πίνακας Ε-3: “Καθολικές” υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου: Φορτίο των σταθμών μετά από μείωση της ισχύος σε όλους τους σταθμούς κατά 26%**

Αριθμός Ζυγού	3	6	7	8	9	11	13	15	17
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	0	0	0	0	0	5	0	0
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,131	0,000	0,000
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>34</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	5	0	0	0	0	0	0	4
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,131	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,104
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>49</b>	<b>51</b>	<b>53</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	5	5	5	5	5	5	5	5
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>55</b>	<b>59</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>66</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>73</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	1	1	1	1	1	1	1	1	
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	5	5	5	5	5	5	5	5	
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	



**Πίνακας E-4: “Καθολικές” υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου: Αριθμός εν λειτουργία επαγωγικών σταθμών και φορτίο των σταθμών μετά τη διακοπή της παροχής ισχύος σε συγκεκριμένους δυναμικούς φορτιστές.**

<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>17</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	0	0	0	0	0	3	0	0
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,106	0,000	0,000
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>34</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,025	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	3	0	0	0	0	0	0	3
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,106	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,106
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>49</b>	<b>51</b>	<b>53</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	4	4	4	4	4	4	4	3
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,106
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>55</b>	<b>59</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>66</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>73</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	1	1	1	1	1	1	1	1	
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	4	3	4	3	3	3	3	3	
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,141	0,106	0,141	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	

**Πίνακας E-5: “Τοπικές” υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου σε επίπεδο υποσταθμού: αριθμός στατικών και δυναμικών φορτιστών στους ζυγούς του δικτύου και αντίστοιχο φορτίο των σταθμών**

<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>17</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,133
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	2	2	2	2	2	4	0	0	9
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,141	0,000	0,000	0,318
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>34</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	0	0	9	0	0	2	0	4
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,318	0,000	0,000	0,071	0,000	0,141
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>49</b>	<b>51</b>	<b>53</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	4	0	0	2	0	0	4	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,133	0,000	0,000	0,067	0,000	0,000	0,133	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	4	0	0	5	0	0	9	0	0
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,141	0,000	0,000	0,176	0,000	0,000	0,318	0,000	0,000
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>55</b>	<b>59</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>66</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>73</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	5	0	0	1	0	0	0	
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,167	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	5	5	0	5	5	5	5	5	
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,176	0,176	0,000	0,176	0,176	0,176	0,176	0,176	

**Πίνακας E-6: “Τοπικές” υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου σε επίπεδο υποσταθμού: Αντιμετώπιση του προβλήματος υπερφόρτωσης των ζυγών σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση**

	<b>Μείωση της ισχύος σε όλους τους σταθμούς των ζυγών 17 &amp; 49</b>		<b>Μηδενική παροχή ισχύος σε συγκεκριμένους δυναμικούς σταθμούς των ζυγών 17 &amp; 49</b>		<b>Μηδενική παροχή ισχύος σε συγκεκριμένους στατικούς σταθμούς των ζυγών 17 &amp; 49</b>	
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>17</b>	<b>49</b>	<b>17</b>	<b>49</b>	<b>17</b>	<b>49</b>
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	2	2	4	4	2	2
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,113	0,113	0,133	0,133	0,067	0,067
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	9	9	7	7	9	9
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,27	0,27	0,247	0,247	0,318	0,318

**Πίνακας E-7: Υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου για μία "Περιορισμένη Περιοχή" του δικτύου: Θερμικά όρια γραμμών**

<b>Γραμμή</b> Θερμικό Όριο (MVA)	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
	15,5	4	15,5	4	4	4	15,5	15,5	15,5	15,5	15	10	10	15	15	15	15	15
<b>Γραμμή</b> Θερμικό Όριο (MVA)	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>
	10	10	15	10	10	15	15	10	10	15	10	10	15	15	15	15	15	15
<b>Γραμμή</b> Θερμικό Όριο (MVA)	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>52</b>	<b>53</b>	<b>54</b>
	15	15	10	10	15	15	15	15	15	10	10	15	15	15	15	15	15	10
<b>Γραμμή</b> Θερμικό Όριο (MVA)	<b>55</b>	<b>56</b>	<b>57</b>	<b>58</b>	<b>59</b>	<b>60</b>	<b>61</b>	<b>62</b>	<b>63</b>	<b>64</b>	<b>65</b>	<b>66</b>	<b>67</b>	<b>68</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>71</b>	<b>72</b>
	10	15	15	10	10	15	10	10	15	15	15	15	15	10	10	10	15	15

**Πίνακας E-8 Υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου για μία "Περιορισμένη Περιοχή" του δικτύου: αριθμός στατικών και δυναμικών φορτιστών στους ζυγούς του δικτύου και αντίστοιχο φορτίο των σταθμών**

<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,000	0,000	0,033
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,071	0,071	0,071
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>34</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,071	0,071	0,071	0,035	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,035
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>49</b>	<b>51</b>	<b>53</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,033	0,033	0,000	0,033	0,000	0,033	0,000	0,033	0,033
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	4	4	5	4	5	4	4	4	4
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,141	0,141	0,176	0,141	0,176	0,141	0,141	0,141	0,141
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>55</b>	<b>59</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>66</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>73</b>		
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	1	0	1	0	0	1	1		
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,033	0,000	0,033	0,000	0,000	0,033	0,033		
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	4	4	4	4	4	4	4	4		
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141		

**Πίνακας E-9 Υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου για μία "Περιορισμένη Περιοχή" του δικτύου: Επίλυση του προβλήματος που παρουσιάζεται στο δίκτυο με μείωση του φορτίου όλων των σταθμών (στατικών και δυναμικών)**

<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>17</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,000	0,000	0,033
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,071	0,071	0,071
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>34</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,071	0,071	0,071	0,035	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,035
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>49</b>	<b>51</b>	<b>53</b>	
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,025	0,025	0,000	0,025	0,000	0,025	0,000	0,025	0,025
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	0	4	4	5	4	5	4	4	4	4
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,107	0,107	0,134	0,107	0,134	0,107	0,107	0,107	0,107
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>55</b>	<b>59</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>66</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>73</b>		
Αριθμός Στατικών Φορτιστών	0	1	0	1	0	0	1	1		
Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)	0,000	0,025	0,000	0,025	0,000	0,000	0,025	0,025		
Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών	4	4	4	4	4	4	4	4		
Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107	0,107		

**Πίνακας E-10 Υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου για μία "Περιορισμένη Περιοχή" του δικτύου: Επίλυση του προβλήματος που παρουσιάζεται στο δίκτυο με μείωση του φορτίου συγκεκριμένων δυναμικών σταθμών**

<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>15</b>	<b>17</b>
<i>Αριθμός Στατικών Φορτιστών</i>	1	1	1	1	1	1	0	0	1
<i>Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)</i>	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,000	0,000	0,033
<i>Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών</i>	1	1	1	1	1	1	2	2	2
<i>Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)</i>	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,071	0,071	0,071
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>27</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>34</b>
<i>Αριθμός Στατικών Φορτιστών</i>	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)</i>	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<i>Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών</i>	2	2	2	1	2	2	2	2	1
<i>Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)</i>	0,071	0,071	0,071	0,035	0,071	0,071	0,071	0,071	0,035
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>36</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>47</b>	<b>49</b>	<b>51</b>	<b>53</b>
<i>Αριθμός Στατικών Φορτιστών</i>	0	1	1	0	1	0	1	0	1
<i>Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)</i>	0,000	0,033	0,033	0,000	0,033	0,000	0,033	0,000	0,033
<i>Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών</i>	0	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)</i>	0,000	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106
<b>Αριθμός Ζυγού</b>	<b>55</b>	<b>59</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>66</b>	<b>69</b>	<b>70</b>	<b>73</b>	
<i>Αριθμός Στατικών Φορτιστών</i>	0	1	0	1	0	0	1	1	
<i>Ζήτηση Στατικής Φόρτισης (MW)</i>	0,000	0,033	0,000	0,033	0,000	0,000	0,033	0,033	
<i>Αριθμός Δυναμικών Φορτιστών</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	
<i>Ζήτηση Δυναμικής Φόρτισης (MW)</i>	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	

## Βιβλιογραφία

- [1] A. M. Foley, I. J. Winning and B. P. Ó Gallachóir, "State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure," 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, 2010, pp. 1-6.
- [2] E. Καρφόπουλος, "Συμβολή Στη Διαχείριση Των Ηλεκτρικών Οχημάτων Για Την Αποδοτικότερη Ενσωμάτωση Τους Στα Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, 2017
- [3] E. Γατή. "Μελέτη, κατασκευή και έλεγχος συστημάτων επαγωγικής μεταφοράς ισχύος", Διδακτορική Διατριβή, 2016
- [4] Siqi Li and Chunting Chris Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Volume 3, Issue 1, March 2015.
- [5] Klontz, K.W. ; Esser, A. ; Bacon, R.R. ; Divan, D.M. ; Novotny, D.W. ; Lorenz, R.D., "An electric vehicle charging system with 'universal' inductive interface", Power Conversion Conference, 1993 Yokohama, Page(s): 227 – 232
- [6] Severns, R. ; Yeow, E. ; Woody, G. ; Hall, J. ; Hayes, J., "An ultra-compact transformer for a 100 W to 120 kW inductive coupler for electric vehicle battery charging" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1996. APEC '96. Conference Proceedings, Eleventh Annual Volume: 1, Page(s): 32 - 38 vol.1
- [7] D. A. G. Pedder, A. D. Brown, and J. A. Skinner, "A contactless electrical energy transmission system," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 46, pp. 23-30, 1999
- [8] Chwei-Sen Wang ; Stielau, O.H. ; Covic, G.A., "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger", Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 52, Issue: 5, 2005 , Page(s): 1308 – 1314
- [9] Takanashi, H. ; Sato, Y. ; Kaneko, Y. ; Abe, S. ; Yasuda, T. , "A Large Air Gap 3 kW Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012, Page(s): 269 – 274
- [10] Covic, G.A. ; Boys, J.T. ; Kissin, M.L.G. ; Lu, H.G., "A Three-Phase Inductive Power Transfer System for Roadway-Powered Vehicles", Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 54, Issue: 6, 2007 , Page(s): 3370 – 3378
- [11] Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, S. Abe, and T. Yasuda, "Compact contactless power transfer system for electric vehicles," in Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, 2010, pp. 807-813.
- [12] G. A. J. Elliot, J. T. Boys, and G. A. Covic, "A Design Methodology for Flat Pick-up ICPT Systems," in Industrial Electronics and Applications, 2006 1ST IEEE Conference on, 2006, pp. 1-7.
- [13] Chigira, M. ; Nagatsuka, Y. ; Kaneko, Y. ; Abe, S. ; Yasuda, T. ; Suzuki, A., "Small-Size Light-Weight Transformer with New Core Structure for Contactless Electric Vehicle Power Transfer System", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, Page(s): 260 – 266
- [14] M. Budhia, G. Covic, and J. Boys, "A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems," in IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010, pp. 2487-2492
- [15] Covic, G.A. ; Boys, J.T., "Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications", Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of, Volume: 1, Issue: 1, 2013, Page(s): 28 – 41
- [16] R. Mecke and C. Rathge, "High frequency resonant inverter for contactless energy transmission over large air gap," in Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, 2004, pp. 1737-1743 Vol.3.
- [17] F. Nakao, Y. Matsuo, M. Kitaoka, and H. Sakamoto, "Ferrite core couplers for inductive chargers," in Proc. Power Convers. Conf., vol. 2. 2002, pp. 850–854.
- [18] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, 2011
- [19] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, and H. Chang-Yu, "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 60, pp. 318-328, 2013.
- [20] G. A. Covic, M. L. G. Kissin, D. Kacprzak, N. Clausen, and H. Hao, "A bipolar primary pad topology for EV stationary charging and highway power by inductive coupling," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011, pp. 1832-1838.

- [21] M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys, and H. Chang-Yu, "Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011, pp. 614-621.
- [22] G. A. Covic, M. L. G. Kissin, D. Kacprzak, N. Clausen, and H. Hao, "A bipolar primary pad topology for EV stationary charging and highway power by inductive coupling," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE, 2011, pp. 1832-1838.
- [23] M Budhia, G.A.Covic, J.T. Boys, "Design and optimisation of magnetic structures for lumped Inductive Power Transfer systems", 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, 2009, pp. 2081-2088.
- [24] "Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Alignment Methodology," ed: SAE TIR J2954\ \_201605, 2016
- [25] J. Shin et al., "Contactless power transfer systems for On-Line Electric Vehicle (OLEV)," 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference, Greenville, SC, 2012, pp. 1-4.
- [26] Chopra, S., Bauer, P.: "Driving Range Extension of EV with On-Road Contactless Power Transfer- A Case Study", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60 no. 1, Jan. 2013
- [27] L. Sungwoo, H. Jin, P. Changbyung, C. Nam-Sup, C. Gyu-Hyeong, and R. Chun-Taek, "On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, 2010, pp. 1598-1601.
- [28] H. Jin, L. Wooyoung, C. Gyu-Hyeong, L. Byunghun, and R. Chun-Taek, "Characterization of novel Inductive Power Transfer Systems for On-Line Electric Vehicles," in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, 2011, pp. 1975-1979
- [29] H. Jin, L. Sungwoo, P. Changbyung, C. Gyu-Hyeong, and R. Chun-Taek, "High performance inductive power transfer system with narrow rail width for On-Line Electric Vehicles," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, 2010, pp. 647-651.
- [30] J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, and C. T. Rim, "Narrow-Width Inductive Power Transfer System for Online Electrical Vehicles," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 26, pp. 3666-3679, 2011.
- [31] Sungwoo Lee ; Wooyoung Lee ; Jin Huh ; Hyun-Jae Kim ; Changbyung Park ; Gyu-Hyeong Cho ; Chun-Taek Rim, "Active EMF cancellation method for I-type pickup of On-Line Electric Vehicles", Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE, Page(s): 1980 - 1983
- [32] S. Choi, J. Huh, W. Y. Lee, S. W. Lee, and C. T. Rim, "New Cross-Segmented Power Supply Rails for Roadway-Powered Electric Vehicles," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 5832-5841, 2013
- [33] Seungyong Shin ; Jaegue Shin ; Yangsu Kim ; Seokhwan Lee ; Boyune Song ; Guho Jung ; Seongjeub Jeon, "Hybrid inverter segmentation control for Online Electric Vehicle", Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, Page(s): 1 - 6
- [34] G. R. Nagendra, J. T. Boys, G. A. Covic, B. S. Riar, and A. Sondhi, "Design of a double coupled IPT EV highway," in Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, 2013, pp. 4606-4611
- [35] K. Lee, Z. Pantic, and S. Lukic, "Reflexive Field Containment in Dynamic Inductive Power Transfer Systems," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. PP, pp. 1-1, 2013.
- [36] W. Radasky presenting for J. Delaballe, and J.Bärenfänger, "EMC for E-mobility, FR-PM-1-5", IEEE EMC Conference Long Beach, 2018
- [37] Morand Fachot, "EVs charging wirelessly, Future EVs may not need to plug in to charge their batteries", IEC e-tech, <https://iecetech.org/issue/2015-06/EVs-charging-wirelessly>
- [38] R. Bosshard, J. W. Kolar, "All-SiC 9.5 kW/dm<sup>3</sup> On-Board Power Electronics for 50 kW/85 kHz Automotive IPT System," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 5, no. 1, pp. 419-431, March 2017
- [39] R. Bosshard, U. Iruretagoyena and J. W. Kolar, "Comprehensive Evaluation of Rectangular and Double-D Coil Geometry for 50 kW/85 kHz IPT System," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 4, no. 4, pp. 1406-1415, Dec. 2016
- [40] H. Perik, "Practical EV Integration Cases for Static and Dynamic Wireless Power Transfer," in IETEV, 2013
- [41] J. Hudecek, J. Küfen, O. Langen, J. Dankert and L. Eckstein, "A system for precise positioning of vehicles aiming at increased inductive charging efficiency," MedPower 2014, Athens, 2014, pp. 1-6.

- [42] Council recommendation 1999/519/EC on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)
- [43] ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300GHz), HEALTH PHYSICS 74(4):494-522;1998
- [44] ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (1-100kHz), HEALTH PHYSICS 99(6):818-836; 2010
- [45] ICNIRP, Fact Sheet on the Guidelines for Limitng Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1Hz – 100kHz)”, Health Phys 99(6): 818-835, 2010
- [46] ΟΔΗΓΙΑ 2013/35/ΕΕ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 26ης Ιουνίου 2013 περί των ελαχίστων απαιτήσεων υγείας και ασφάλειας όσον αφορά την έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (ηλεκτρομαγνητικά πεδία) (20ή ειδική οδηγία κατά την έννοια του άρθρου 16 παράγραφος 1 της οδηγίας 89/391/ΕΟΚ) και περί καταργήσεως της οδηγίας 2004/40/ΕΚ
- [47] ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 12ης Ιουλίου 1999 περί του περιορισμού της έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0 Hz — 300 GHz)
- [48] ΕΚΘΕΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ ΤΗΣ 12ΗΣ ΙΟΥΛΙΟΥ 1999 (1999/519/ΕΚ) ΠΕΡΙ ΤΟΥ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ (0 Hz - 300 GHz), Δεύτερη έκθεση εφαρμογής 2002-2007
- [49] C.S. Wang; G.A. Covic; O.H. Stielau, “Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems”, IEEE Trans. Ind. El., Vol. 51 no.1 pp.148-157, 2004
- [50] Abhilash Kamineni; Grant A. Covic; John T. Boys: “Self-Tuning Power Supply for Inductive Charging”, IEEE Transactions on Power Electronics, July 2015
- [51] E. Gati; G. Kampitsis; S. Manias: “Variable Frequency Controller for Inductive Power Transfer in Dynamic Conditions”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, Issue 2, Feb. 2017
- [52] Thrimawithana, D.J, Madawala, U.K., “A primary side controller for inductive power transfer systems”, Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, pp. 661 – 666, 2010
- [53] S. Krishnan, S. Bhuyan, V. P. Kumar, W. Wenjiang, J. A. Afif, and L. Khoon Seong, "Frequency agile resonance-based wireless charging system for Electric Vehicles," in Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012, pp. 1-4.
- [54] J. U. W. Hsu, A. P. Hu, and A. Swain, "A Wireless Power Pickup Based on Directional Tuning Control of Magnetic Amplifier," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 56, pp. 2771-2781, 2009.
- [55] Z. Pantic and S. M. Lukic, “Framework and topology for active tuning of parallel compensated receivers in power transfer systems,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4503–4513, Nov. 2012.
- [56] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, and D. Bronson, “A high efficiency 5 kW inductive charger for EVs using dual side control”, IEEE Trans. Ind. Inf., vol. 8, no. 3, pp. 585–595, Aug. 2012
- [57] Tobias Diekhans, Rik W. De Doncker, “A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, Issue 11, Nov. 2015
- [58] Zaheer, A., Covic G.A., Kacprzak, D.: “A Bipolar Pad in a 10-kHz 300-W Distributed IPT System for AGV Applications”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, no. 7, July 2014
- [59] Su Y. Choi, Beom W. Gu, Seog Y. Jeong, and Chun T. Rim, “Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electron., vol. 3, no. 1, pp. 18-36, March 2015.
- [60] J. Shin; S. Shin; Y. Kim; S. Ahn; S. Lee; G. Jung; S.-Jeub Jeon; D.-Ho Cho: “Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, Issue 3, March 2014
- [61] Seung Lee; Seungyoung Ahn; In Jang: “Simulation-Based Feasibility Study on the Wireless Charging Railway System with a Ferriteless Primary Module”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, May 2016
- [62] J.H. Kim; B.-S. Lee; J.-Ho Lee; S.-Hwan Lee; C.-Bae Park; S.-Myung Jung; S.-Gil Lee; K.-Pyo Yi; J. Baek “Development of 1-MW Inductive Power transfer system for a high-speed train”, IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, Issue 10, Oct. 2015
- [63] Kibok Lee; Zeljko Pantic; Srdjan M. Lukic: "Reflexive Field Containment in Dynamic Inductive Power Transfer Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, Issue 9, Sept. 2014
- [64] Jinbo Zhao; Tao Cai; Shanxu Duan; Hao Feng; Changsong Chen; Xiaoming Zhang: "A General Design Method of Primary Compensation Network for Dynamic WPT System Maintaining Stable Transmission Power", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, Issue 12, Dec. 2016
- [65] Liang Chen; Ganesh R. Nagendra; John T. Boys; Grant A. Covic, "Double Coupled Systems for IPT Roadway Applications", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, Issue 1, March 2015
- [66] N. Hasan, H. Wang, T. Saha, and Z. Pantic, "A novel position sensorless power transfer control of lumped coil-based in-motion wireless power transfer systems," in 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sept 2015, pp. 586–593.
- [67] A. Zaheer, M. Neath, H.Z.Z. Beh, & G.A. Covic "A Dynamic EV Charging System for Slow Moving Traffic Applications". IEEE Trans. on Transport. Electrification, pp. 1-18. DOI:10.1109/TTE.2016.2628796
- [68] Fei Lu; Hua Zhang; Heath Hofmann; Chunting Chris Mi: "A Dynamic Charging System with Reduced Output Power Pulsation for Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, Issue 10, Oct. 2016
- [69] Kunwar Aditya; Sheldon Williamson : "A Review of Optimal Conditions for Achieving Maximum Power Output and Maximum Efficiency for a Series-Series Resonant Inductive Link", IEEE Transactions on Transportation Electrification, June 2016
- [70] Zhijian Fang; Tao Cai; Shanxu Duan; Changsong Chen : "Optimal Design Methodology for LLC Resonant Converter in Battery Charging Applications Based on Time-Weighted Average Efficiency", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, Issue 10, Oct. 2015
- [71] W. X. Zhong; S. Y. R. Hu: "Maximum Energy Efficiency Tracking for Wireless Power Transfer Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, Issue 7, July 2015
- [72] Minfan Fu; He Yin; Xinen Zhu; Chengbin Ma: "Analysis and Tracking of Optimal Load in Wireless Power Transfer Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, Issue: 7, July 2015
- [73] Chang-Yu Huang; Jason E. James; Grant A. Covic, "Design Considerations for Variable Coupling Lumped Coil Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, Issue 2, Feb. 2015
- [74] Wei Zhang; Siu-Chung Wong; Chi K. Tse; Qianhong Chen: "Design for Efficiency Optimization and Voltage Controllability of Series-Series Compensated Inductive Power Transfer Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, Issue 1, Jan. 2014
- [75] Linhui Chen; Shuo Liu; Yong Chun Zhou; Tie Jun Cui: "An Optimizable Circuit Structure for High-Efficiency Wireless Power Transfer", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, Issue 1, Jan. 2013
- [76] Jesús Sallan; Juan L. Villa; Andrés Llombart; José Fco. Sanz: "Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, Issue: 6, June 2009
- [77] Nikolay D. Madzharov – Anton T. Tonchev, "INDUCTIVE HIGH POWER TRANSFER TECHNOLOGIES FOR ELECTRIC VEHICLES", Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 65, No. 2, pp. 125–128, 2014
- [78] Dharmakeerthi, C.H. ; Mithulanathan, N. ; Saha, T.K. , "Modeling and planning of EV fast charging station in power grid", Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-12, 2012
- [79] Cruz-Zambrano, M. ; Corchero, C. ; Igualada-Gonzalez, L. ; Bernardo, V., "Optimal location of fast charging stations in Barcelona: A flow-capturing approach", European Energy Market (EEM), 2013 10th International Conference on the, pp. 1-6, 2013
- [80] P. Phonrattanasak and N. Leeprechanon, "Optimal Location of Fast Charging Station on Residential Distribution Grid," International Journal of Innovation, Management and Technology vol. 3, no. 6, pp. 675-681, 2012.
- [81] Jia Ying Yong ; Ramachandaramurthy, V.K. ; Kang Miao Tan ; Arulampalam, A. ; Selvaraj, J., "Modeling of electric vehicle fast charging station and impact on network voltage", IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT), pp. 399 - 404, 2013
- [82] Shi, R. ; Zhang, X.P. ; Kong, D.C. ; Deng, N. ; Wang, P.Y., "Dynamic impacts of fast-charging stations for electric vehicles on active distribution networks", Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), pp. 1 – 6, 2012
- [83] Etezadi-Amoli, M. ; Choma, K. ; Stefani, J., "Rapid-Charge Electric-Vehicle Stations", IEEE

- Transactions on Power Delivery, Volume: 25, Issue: 3, pp. 1883 – 1887, 2010
- [84] Seljeseth, H. ; Taxt, H. ; Solvang, T., “Measurements of network impact from electric vehicles during slow and fast charging”, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), pp. 1-4
- [85] Aggeler, D. ; Canales, F. ; Zelaya-De La Parra, H. ; Coccia, A. ; Butcher, N. ; Apeldoorn, O., “Ultra-fast DC-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids”, Innovative 2010 IEEE PES Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), pp. 1-8.
- [86] Pea-da, B. ; Dechanupaprittha, S., “Impact of fast charging station to voltage profile in distribution system”, 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON), pp. 1 – 4, 2014
- [87] Yunus, K. ; De La Parra, H.Z. ; Reza, M., “Distribution grid impact of Plug-In Electric Vehicles charging at fast charging stations using stochastic charging model”, Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), pp. 1 – 11, 2011
- [88] Corchero, C. ; Cruz-Zambrano, M. ; Heredia, F.-J. ; Cairo, J.-I. ; Igalada-Gonzalez, L. ; Romero-Ortega, A., “Optimal sizing of microgrids: A fast charging station case”, 2012 9th International Conference on the European Energy Market (EEM), pp. 1-6, 2012
- [89] Mauri, G. ; Valsecchi, A. “Fast charging stations for electric vehicle: The impact on the mv distribution grids of the milan metropolitan area” Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), pp. 1055 – 1059, 2012
- [90] Bayram, I.S. ; Michailidis, G. ; Devetsikiotis, M. ; Granelli, F. “Electric Power Allocation in a Network of Fast Charging Stations” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, Vol. 31, Issue 7, pp. 1235-1246, 2013
- [91] Bayram, I.S. ; Michailidis, G. ; Papapanagiotou, I. ; Devetsikiotis, M. “Decentralized control of electric vehicles in a network of fast charging stations” Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE, pp. 2785-2790, 2013
- [92] G. Celli, F. Lacu, S. Mocci, N. Natale, F. Pilo, G.G. Soma, “Aggregated Electric Vehicles load profiles with fast charging stations”, PSCC conference, Wroclaw, Poland, 2014.
- [93] Xueliang Huang ; Hao Qiang ; Zhenchen Huang ; Yi Sun ; Jun Li “The Interaction Research of Smart Grid and EV Based Wireless Charging”, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2013 IEEE, pp. 1-5, 2013
- [94] Stamati, T.-E. ; Bauer, P. , “On-road charging of electric vehicles”, Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE, Pp.: 1-8
- [95] Stamati, T.-E. ; Bauer, P., “Green energy for on-road charging of electric vehicles”, MECHATRONIKA, 15th International Symposium, Pp. 1-9, 2012
- [96] Javanbakht, P. ; Mohagheghi, S. ; Parkhideh, B. ; Dutta, S. ; Chattopadhyay, R. ; Bhattacharya, S., “Vehicle-to-grid scheme based on inductive power transfer for advanced distribution automation”, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, pp. 3250- 3257, 2013
- [97] Mohagheghi, S. ; Parkhideh, B. ; Bhattacharya, S., “Inductive power transfer for electric vehicles: Potential benefits for the distribution grid”, Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, pp. 1-8, 2012
- [98] “Inductance and Magnetic Energy”, Chapter 11 [online]. Course Notes. MIT Boston, USA: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/coursenotes/modules/guide11.pdf>
- [99] S. O. Kasap, “Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων”, 2η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2004.
- [100] C. R. Sullivan, “Optimal Choice for Number of Strands in a Litz-Wire Transformer Winding”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 2, pp. 283–291, 1999
- [101] A. Roßkopf, E. Bar, C. Joffe, “Influence of Inner Skin- and Proximity Effects on Conduction in Litz Wires”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 10, 2014
- [102] U.S.Gudmundsdottir, “Proximity effect in fast transient simulations of an underground transmission cable”, Elsevier, Electric Power Systems Research Volume 115, pp. 50-56, 2014
- [103] G. Buja; M. Bertoluzzo; H. K. Dashora, “Lumped Track Layout Design for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, issue 10, pp. 6631 – 6640, Oct. 2016
- [104] U. K. Madawala, D. J. Thrimawithana, “A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems”, IEEE transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 10, 2011
- [105] K. Song, C. Zhu, K.-E. Koh, D. Kobayashi, T. Imura, Y. Hori “Modeling and Design of Dynamic Wireless Power Transfer System for EV Applications” IECON 2015 Yokohama November 9-12, pp 5229-5234, 2015



- [106] W. Li, H. Zhao, J. Deng, S. Li and C. C. Mi, "Comparison Study on SS and Double-Sided LCC Compensation Topologies for EV/PHEV Wireless Chargers," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 6, pp. 4429-4439, June 2016.
- [107] S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen and C. C. Mi, "A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 6, pp. 2261-2273, June 2015.
- [108] J. T. Boys, G. A. Covic, and A. W. Green, "Stability and control of inductively coupled power transfer systems," in Proc. IEE Electr. Power Appl., Jan., 2000, vol. 147, no. 1, pp. 37-43.
- [109] Α. Κλαδάς, Σημειώσεις μαθήματος «Ανάλυση Πεδίων Χαμηλής Συχνότητας με H/Y»
- [110] R. Bosshard, J. Mühlethaler, J. W. Kolar, I. Stevanović, "Optimized magnetic design for inductive power transfer coils", Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013
- [111] A. Zaheer, D. Kacprzak, G.A. Covic, "A bipolar receiver pad in a lumped IPT system for electric vehicle charging applications", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp: 283 – 290, 2012
- [112] Zed (Zhangjun)Tang, Mark Christini, Takahiro Koga , "Wireless Power Transfer using Maxwell and Simplorer", Automotive Simulation World Congress 2012
- [113] T.D. Nguyen, S. Li., W. Li, C.C. Mi, "Feasibility Study on Bipolar Pads for Efficient Wireless Power Chargers", IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, 2014
- [114] José R. Espinoza, "Inverters", Chapter 15, Power Electronics Handbook, second edition, Elsevier 2007
- [115] F.Y. Lin, G.A. Covic, J.T. Boys "Evaluation of Magnetic pad sizes and topologies for electric vehicle charging", IEEE Trans. Power Electronics Society, 30 no. 11, Nov. 2015, pp. 6391-6407
- [116] Z. H. Wang, Y. P. Li, Y. Sun, C. S. Tang, and X. Lv, "Load Detection Model of Voltage-Fed Inductive Power Transfer System," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 11, pp. 5233-5243, Nov 2013
- [117] A. Kamineneni, M.J. Neath, A. Zaheer, G.A. Covic, & J.T. Boys, "Interoperable EV detection for dynamic wireless charging with existing hardware and free resonance". IEEE Trans. on Transport. Electrification, 2016 pp.1-12. DOI:10.1109/TTE.2016.2631607
- [118] Mike Marcel, Tony Knakal, Terry Stifflemire, Bob Lock, "Testing of Nanophosphate™ Prismatic Battery Cells in the XM1124 Hybrid Electric HMMWV", NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium, Power and Mobility (P&M) Mini Symposium, August 9-11 Dearborn, Michigan, 2011
- [119] P. Ding, L. Bernard, L. Pichon and A. Razek, "Evaluation of Electromagnetic Fields in Human Body Exposed to Wireless Inductive Charging System," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 2, pp. 1037-1040, Feb. 2014
- [120] M. Ibrahim, L. Pichon, L. Bernard, A. Razek, J. Houivet and O. Cayol, "Advanced Modeling of a 2-kW Series-Series Resonating Inductive Charger for Real Electric Vehicle," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 2, pp. 421-430, Feb. 2015.
- [121] T. Campi, S. Cruciani, V. De Santis, F. Maradei and M. Feliziani, "EMC and EMF safety issues in wireless charging system for an electric vehicle (EV)," 2017 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, Torino, pp.
- [122] N. Hatziargyriou, E.L. Karfopoulos, K. Tsatsakis, "The impact of EV charging on the System Demand", Chapter 3 of book entitled "Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks", Springer, 2012, ISBN 978-1-4614-0134-6.
- [123] Οδηγία 2002/24/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 18ης Μαρτίου 2002 για την έγκριση τύπου δικύκλων ή τρικύκλων οχημάτων με κινητήρα και την κατάργηση της οδηγίας 92/61/EOK του Συμβουλίου (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0024&from=CS>)
- [124] ΟΔΗΓΙΑ 2007/46/EK ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ της 5ης Σεπτεμβρίου 2007, για τη θέσπιση πλαισίου για την έγκριση των μηχανοκίνητων οχημάτων και των ρυμουλκούμενων τους, και των συστημάτων, κατασκευαστικών στοιχείων και χωριστών τεχνικών μονάδων που προορίζονται για τα οχήματα αυτά. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007L0046&from=EN>)
- [125] M. Papadopoulos, N.D. Hatziargyriou, M. Papadakis, Graphics aided interactive analysis of radial distribution networks, IEEE Trans. Power Deliv. PWRD-2, October, 1987.
- [126] Rapport d'exploitation sur le territoire du SCOT, Enquête Ménages Déplacements Standard Certu

du Grand Douaisis, 2012

- [127] EU FastInCharge Project, Deliverable D5.2, “Report on the technical impact of the implementation”
- [128] N.D. Madzharov, R.T. Ilarionov, A.T. Tonchev, System for dynamic inductive power transfer, Ind. J. Appl. Res. 4 (7), 2014.
- [129] EU FastInCharge Project, Deliverable D3.2, “Demand management system report”

## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

### Σε επιστημονικά περιοδικά:

- A1. **I. Karakitsios**, F. Palaiogiannis, A. Markou and N. D. Hatziargyriou, "Optimizing the Energy Transfer, With a High System Efficiency in Dynamic Inductive Charging of EVs," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 6, pp. 4728-4742, June 2018
- A2. **Karakitsios I.**, Karfopoulos E., Hatziargyriou N., "Impact of dynamic and static fast inductive charging of electric vehicles on the distribution network", Electric Power Systems Research, vol. 140, 2016
- A3. **Karakitsios I.**, Karfopoulos E., Madjarov N., Bustillo A., Ponsar M., Del Pozo D., Marengo L., "An Integrated Approach for Dynamic Charging of Electric Vehicles by Wireless Power Transfer - Lessons Learned from Real-Life Implementation", SAE International Journal of Alternative Powertrains, vol. 6, issue 1, 2017
- A4. **I. Karakitsios**, E. Karfopoulos. N. Hatziargyriou, "An EV Management System Exploiting the Charging Elasticity of EV Users", International Journal of Distributed Energy Resources and Smart Grids, Volume 11, Number 3, 2015

### Σε επιστημονικά συνέδρια με κριτές:

- B1. **Karakitsios I.**, Hatziargyriou N., "Reducing the Electromagnetic Fields in Dynamic Inductive Charging of Electric Vehicles", Turin, Italy, International Conference for Electrical and Electronic Technologies – Automotive, 2019 (Το άρθρο έχει γίνει δεκτό για παρουσίαση)
- B2. **Karakitsios I.**, Hatziargyriou N., "Self-inductance Variations in Dynamic Inductive Charging of EVs", Dubrovnik, Croatia, MedPower Conference, 2018
- B3. Anastasiou, I. Kouveliotis-Lysikatos, **I. Karakitsios**, N. Hatziargyriou "Comparing a Simplified Decentralized with an Optimal Centralized Technique for After Fault Reconfiguration of Radial Distribution Grids", Dubrovnik, Croatia, MedPower Conference, 2018
- B4. **Karakitsios I.**, Hatziargyriou N., "Bifurcation in dynamic inductive charging of electric vehicles", Powertech, Manchester, 2017
- B5. **Karakitsios I.**, Karfopoulos E., Hatziargyriou N., "Static and dynamic fast inductive charging: The FastInCharge project concept", Medpower Conference, Athens, IET Conference Publications, issue CP665, 2014
- B6. Karfopoulos E., Hatzoplaki E., **Karakitsios I.**, Hatziargyriou N., Safalidis G., Kamarinopoulos A., "Energy management system for fast inductive charging network: The FastInCharge project", Medpower Conference, Athens, IET Conference Publications, vol. 2014

