



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

Τίτλος

**Τεχνολογίες Ασύρματης Φόρτισης και Συστήματα Δυναμικής
Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σουζάν Ι. Φαχούρι



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

Τεχνολογίες Ασύρματης Φόρτισης και Συστήματα Δυναμικής Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σουζάν Ι. Φαχούρι

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7η Ιουλίου 2021

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής ΕΜΠ.

Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής ΕΜΠ

.Παύλος Γεωργιλάκης

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021

.....
Copyright © Σουζάν Ι. Φαχούρι

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία φιλοδοξεί να παρουσιάσει όλο το φάσμα των τεχνολογιών ασύρματης φόρτισης από την φόρτιση με μικροκυματική ακτινοβολία μέχρι την φόρτιση με επαγωγή αναδεικνύοντας πλήθος σύγχρονων καινοτόμων πειραματικών αλλά και εμπορικών εφαρμογών σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας με έμφαση στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται και συγκρίνονται όλες οι μέθοδοι ασύρματης φόρτισης και οι εφαρμογές τους. Υπό το φως του 7ου προγράμματος δράσης για το περιβάλλον και τις ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της ηλεκτροκίνησης, στα κεφάλαια 2 και 3 περιγράφονται όλα τα είδη ηλεκτρικών οχημάτων και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε αυτά. Επίσης, καταγράφονται οι τρόποι φόρτισής τους, τα πρότυπα ενσύρματης φόρτισης σε Ευρώπη και Αμερική αλλά και η Ευρωπαϊκή νομοθεσία που πλαισιώνει τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων.

Το δεύτερο κομμάτι της εργασίας που συγκροτούν τα κεφάλαια 4 και 5, εστιάζει στην επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων περιγράφοντας το φαινόμενο του συντονισμού, τοπολογίες κυκλωμάτων καθώς τα πρότυπα που αφορούν την στατική φόρτιση. Η επαγωγική φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος βασίζεται στις αρχές λειτουργίας του μετασχηματιστή· ενέργεια μεταφέρεται μέσω ενός διακένου, από το πρωτεύον τυλίγμα που είναι ενσωματωμένο στον σταθμό φόρτισης στο δευτερεύον που είναι εγκατεστημένο στο όχημα. Στη συνέχεια αναλύεται και προσομοιώνεται ένα σύστημα δυναμικής φόρτισης με δύο πρωτεύοντα τυλίγματα. Η δυναμική φόρτιση επιτρέπει στο αυτοκίνητο να λαμβάνει ενέργεια ενώ κινείται επάνω στο οδόστρωμα, λύνοντας έτσι το πρόβλημα του περιορισμένου εύρους οδήγησης. Οι παράμετροι του συστήματος έχουν επιλεχθεί με βάση ένα βελτιστοποιημένο σύστημα δυναμικής φόρτισης με ένα πρωτεύον. Το σύστημα δεν κάνει χρήση αισθητήρων και άλλων μηχανισμών και ανιχνεύει το όχημα μέσα από μία διαδικασία ελέγχου του πρωτεύοντος τυλίγματος. Τέλος ερευνάται η απόδοση του συστήματος σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας του.

Λέξεις – Κλειδιά :

Ασύρματη μεταφορά ισχύος, Μικροκύματα, Επαγωγή, Μαγνητικός συντονισμός, Φόρτιση Ηλεκτρικού Οχήματος, Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου, Δυναμική φόρτιση, Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου

Abstract

This dissertation aspires to present all scope of wireless power transfer technologies ranging from radiating to inductive wireless charging and demonstrating a variety of up-to-date innovative applications both experimental and commercial in all fields of industry, emphasizing at the same time in Electric Vehicle (EV). In chapter 1 all wireless charging methods and corresponding applications are presented and compared to each other. In the light of the 7th environment action programme and the rapid development in the field of electromobility, all types of electric vehicles and their energy storage systems are described in chapters 2 and 3. All EV charging practices are reported along with plug-in charging standards established in Europe and the U.S.A, as well as the European legislation framing EV charging.

The second part of the dissertation consisting of chapters 4 and 5, centers on the inductive charging of electric vehicles, describing magnetic resonance physics and static charging circuit topologies and standards. The inductive charging of EVs is based on the operating principles of a transformer' energy is transferred through an air gap from the Ground Assembly unit primary coil to the Vehicle Assembly unit secondary coil. Then, a dynamic charging system of EV with two primary coils is analysed and simulated. Dynamic charging allows the vehicle to receive energy during its movement on the road, tackling the problem of driving range limitations. System parameter values are set according to an optimized dynamic charging system with one primary coil. No sensors or other mechanisms are employed, the system detects the vehicle by properly by a control procedure of the primary coil. Finally, system efficiency is explored during varying operational conditions.

Keywords:

Wireless Power Transfer, Radiofrequency radiation, Induction, Magnetic Resonance, Electric Vehicle Charging, Lithium-Ion Batteries, Dynamic Charging, Greenhouse Gas Emissions

Ευχαριστίες

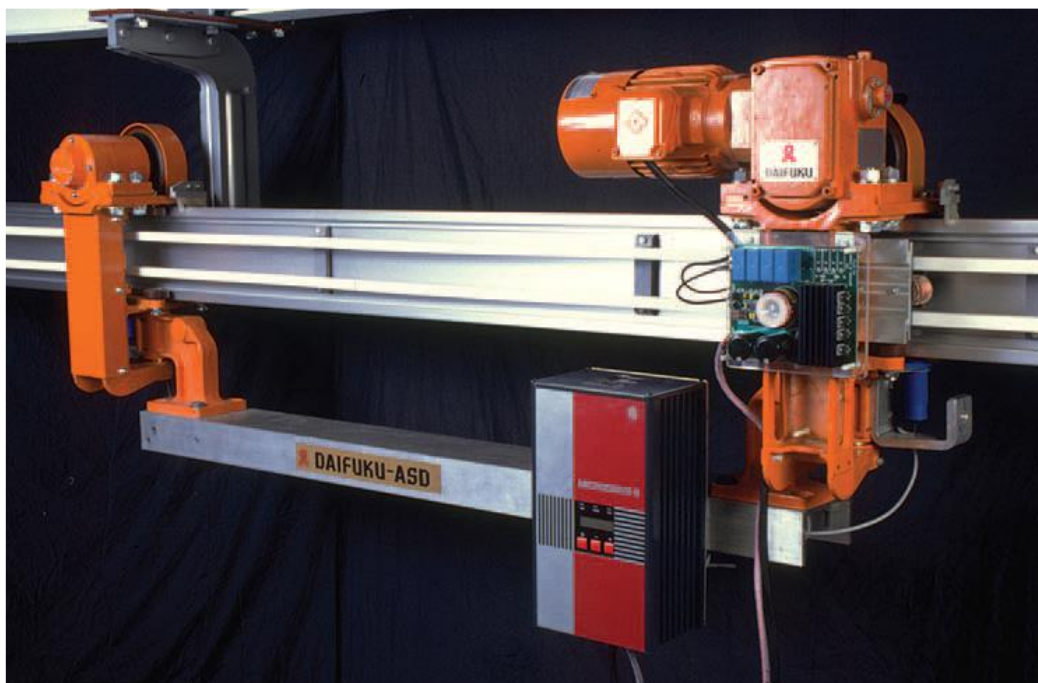
Η εργασία αυτή αφιερώνεται σε όσους συνεχίζουν να μάχονται κόντρα σε κάθε αντιξοότητα, για ένα καλύτερο αύριο. Ευχαριστώ τα αδέρφια μου Νιδάλ, Τζαμίλε, Κατερίνα, Άντζελα που με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα και συνεχίζουν να με εμπνέουν. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κύριο Ιωάννη Καρακίτσιο για το επιστημονικό υλικό που γενναιόδωρα μου παρείχε καθώς και για την άριστη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κύριο Νίκο Χατζηαργυρίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και τους καθηγητές μου κυρίους Ιωάννη Κλαδά, Ηλία Γλύτση, Δημήτριο Ασκούνη, Σταύρο Παπαθανασίου και Στέφανο Μανιά, οι οποίοι με την διδασκαλία και υποστήριξή τους συντέλεσαν στην συνέχιση των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1.Τεχνολογίες Ασύρματης Μεταφοράς Ισχύος	14
1.1. Φόρτιση μακρινού πεδίου (<i>Far – Field Charging</i>).....	19
1.2. Φόρτιση κοντινού πεδίου (<i>Near – Field Charging</i>)	34
1.3. Σύγκριση μεθόδων ασύρματης φόρτισης.....	52
2.Η φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος.....	54
2.1.Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων	54
2.2 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο.....	64
2.3. Τρόποι και πρότυπα φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος	86
2.4. Θεσμικό πλαίσιο και υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη	94
3. Στατική και δυναμική φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος	105
3.1 Η φυσική του συντονισμού	105
3.2 Δράσεις τυποποίησης ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος.....	123
3.3. Ανάλυση τοπολογίας σειρά - σειρά (<i>SS</i>) <i>WPT</i> συστήματος	132
3.3. Συστήματα δυναμικής φόρτισης.....	137
3.4. Ανάλυση τοπολογίας σειρά - σειρά (<i>SS</i>) <i>WPT</i> συστήματος στη δυναμική φόρτιση ..	140
4.Σύστημα δυναμικής φόρτισης με ένα πρωτεύον.....	144
4.1 Εισαγωγή.....	144
4.2. Σύρμα <i>Litz</i> και μαγνητικοί συζεύκτες του συστήματος	144
4.3. Βελτιστοποίηση του συστήματος δυναμικής φόρτισης.....	151
4.4 Λειτουργία ελέγχου στη δυναμική φόρτιση	155
4.5. Παραμετροποίηση του συστήματος	161
5.Λειτουργία δυναμικής φόρτισης με δύο πρωτεύοντα	166
5.1. Εισαγωγή.....	166
5.2.Λειτουργία του συστήματος με δύο ανεξάρτητους αντιστροφείς	168
5.3.Λειτουργία του συστήματος με δύο αντιστροφείς με τον δεύτερο εξαρτώμενο από τον πρώτο	182
5.4. Λειτουργία του συστήματος με έναν αντιστροφήα	189
6. Συμπεράσματα και επόμενα βήματα.....	200
Βιβλιογραφία-Πηγές	205

1.Τεχνολογίες Ασύρματης Μεταφοράς Ισχύος

Η **ασύρματη μεταφορά ισχύος (Wireless Power Transfer - WPT)** ή αλλιώς ασύρματη φόρτιση είναι η τεχνολογία που δίνει τη δυνατότητα σε μία πηγή ισχύος τη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε ένα ηλεκτρικό φορτίο διαμέσου διακένου αέρος, χωρίς διασυνδεδεμένα καλώδια. Σχεδόν από την εποχή των Faraday, Ampere και Oersted η ιδέα της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς καλώδια υπήρξε πάντα ένα όνειρο. Με την πάροδο των χρόνων έγινε εφικτή η μεταφορά σημάτων από κινούμενα τρένα σε στατικούς αποδέκτες όμως η μεταφορά πραγματικής ισχύος ήταν κάτι άπιαστο. Σήμερα μπορούμε να κατανοήσουμε την αιτία για αυτό – απλά δεν υπήρχαν οι κατάλληλες υποδομές για να υποστηρίξουν μια τέτοια τεχνολογία. Δεν υπήρχαν ηλεκτρονικά ισχύος και μικροελεγκτές. Τα διαθέσιμα μαγνητικά υλικά ήταν φερρομαγνητικά υλικά, κατάλληλα για συχνότητες δικτύου, που δεν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν με χαμηλές απώλειες σε υψηλότερες συχνότητες ενώ το σύρμα Litz ήταν διαθέσιμο σε μικρά μεγέθη. Όλες αυτές οι ελλείψεις σε συνδυασμό με την απουσία θεωρητικής βάσης πάνω στην ασύρματη μεταφορά ισχύος οδήγησαν στην αδυναμία υλοποίησης της τεχνολογίας, που θεωρήθηκε αδύνατη. Τα τελευταία 20 χρόνια η ανεπάρκεια υποδομών έχει καλυφθεί, μαγνητικά υλικά με χαρακτηριστικά που ήταν αδιανόητα ακόμα και πριν είκοσι χρόνια είναι πλέον ευρέως διαδεδομένα, τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν εξελιχθεί από SCRs σε IGBTs, SiC MOSFETS και σε ημιαγωγούς μεγάλου ενεργειακού διακένου με εκπληκτικές τιμές τάσης και ρεύματος σε ολοένα αυξανόμενες συχνότητες, και οι μικροελεγκτές συνεχίζουν να συρρικνώνονται ενώ γίνονται ταχύτεροι με βελτιωμένο σύνολο εντολών. Το τελευταίο εμπόδιο ήταν η συνειδητοποίηση ότι η μεταφορά ισχύος χωρίς καλώδια σε υψηλές συχνότητες μπορεί πράγματι να επιτευχθεί.



Σχήμα(1.1). Το πρωτότυπο IPT σύστημα που κατασκευάστηκε για την εταιρία Daifuku

Η τεχνολογία της ασύρματης μεταφοράς ισχύος με επαγωγή (IPT) άρχισε να αναπτύσσεται στο Πανεπιστήμιο του Auckland από τους John Boys, Andrew Green, Fred Nassenstein και

Grant Covic. Το 1990 έφτιαξαν το πρώτο IPT όχημα. ενώ συνεργάστηκαν με την εταιρία Daifuku κατασκευάζοντας ένα σύστημα μεταφοράς μονής σιδηροτροχιάς (monorail), σε μορφή κατάλληλη για εφαρμογές συναρμολόγησης αυτοκινήτων **σχήμα(1.1)**. Η Daifuku υιοθέτησε την IPT τεχνολογία σε εφαρμογές της όπως εγκαταστάσεις συναρμολόγησης αυτοκινήτων, όπου είναι επιθυμητή η ατρωσία στη ρύπανση, το νερό και τα χημικά. Ανέπτυξε επίσης μια σειρά εφαρμογών που ενσωματώνουν την IPT τεχνολογία, ειδικά για θαλάμους ελεγχόμενης ατμόσφαιρας (clean rooms) **σχήμα(1.2)**.



Σχήμα(1.2). Αριστερά: Σύστημα Clean Room της Daifuku, Δεξιά: Φορτωτής πλακών LCD σε Clean Room της Daifuku

Μία ακόμα εταιρία , η Wampfler Ag., ενσωμάτωσε την επαγωγική φόρτιση σε προϊόντα της όπως μεταφορείς με έδραση στο έδαφος, αξιοθέατα της Disneyworld, ηλεκτρικά λεωφορεία και άλλα [17] .Η τεχνολογία WPT προσελκύει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την χαμηλής ισχύος οδοντόβουρτσα έως το ηλεκτρικό αυτοκίνητο και αυτό λόγω της άνεσης και φιλικότητάς της προς το χρήστη. Σήμερα , η ασύρματη φόρτιση εξελίσσεται ραγδαία από τη θεωρία σε εμπορικά προϊόντα με πρότυπα χαρακτηριστικά και ιδιαίτερα σε κινητά τηλέφωνα και έξυπνες φορητές συσκευές **σχήματα(1.3-1.8)**. Το 2014, κορυφαίες εταιρίες κατασκευής έξυπνων κινητών τηλεφώνων όπως οι Samsung, Apple και Huawei, άρχισαν να κυκλοφορούν συσκευές νέας γενιάς με δυνατότητα ασύρματης φόρτισης. Έρευνες εκτιμούν ότι τα προϊόντα με WPT τεχνολογία θα ανέλθουν σε μια βιομηχανία της τάξης δισεκατομμυρίων δολαρίων.

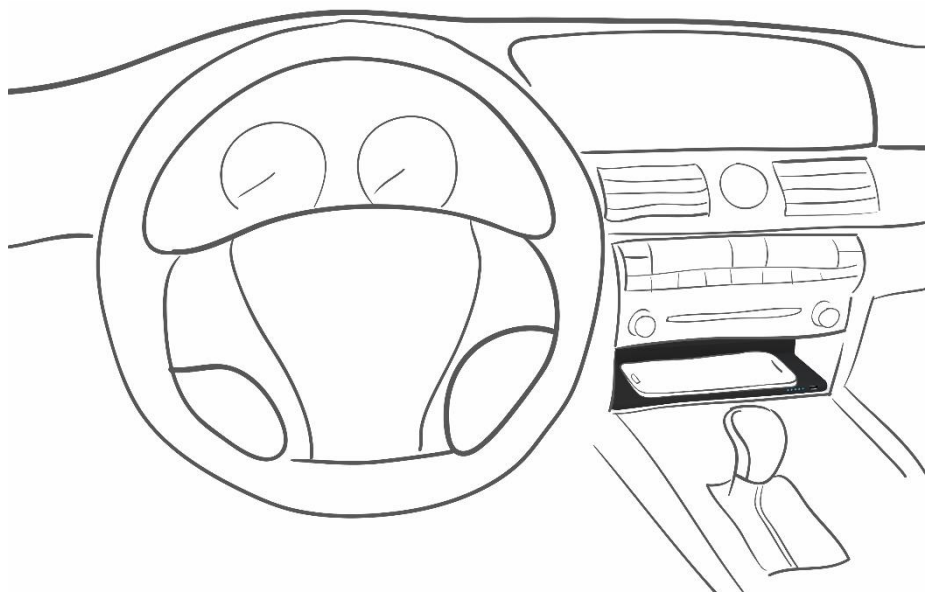
Συγκριτικά με την παραδοσιακή φόρτιση με καλώδια, η WPT συγκεντρώνει πολλά **πλεονεκτήματα:**

- Απαλλάσσει το χρήστη από τη σύνδεση της συσκευής με καλώδια ενώ ο ίδιος φορτιστής μπορεί να είναι κατάλληλος για διαφορετικά μοντέλα και μάρκες προϊόντων.
- Δίνει τη δυνατότητα σχεδιασμού και κατασκευής συσκευών πολύ μικρότερου μεγέθους χωρίς τοποθέτηση μπαταριών .



Σχήμα(1.3). Stand ασύρματης φόρτισης για κινητά (Αριστερά) και πλατφόρμα στήριξης κινητού Samsung για ασύρματη φόρτιση στο αυτοκίνητο (Δεξιά) [18]

- Αυξάνει την ευελιξία, ειδικά για συσκευές για τις οποίες η αντικατάσταση μπαταριών ή σύνδεση καλωδίων φόρτισης είναι μια διαδικασία δαπανηρή, επικίνδυνη ή ανέφικτη όπως (για παράδειγμα αισθητήρες εμφυτευμένοι στο σώμα).
- Παρέχει βελτιωμένη αντοχή στις συσκευές που είναι απαλλαγμένες από ηλεκτρικές συνδέσεις σε συνθήκες όπως υγρασία και σκόνη
- Δίνει την απαιτούμενη ισχύ στις συσκευές φόρτισης εάν και εφόσον ζητηθεί και έτσι είναι πιο ευέλικτες και ενεργειακά αποδοτικές.



Σχήμα(1.4). Ασύρματος φορτιστής αυτοκινήτου Zens με αντιολισθητική επιφάνεια για κινητά [16]



Σχήμα(1.5). Ασύρματα φορτιζόμενη εργαλειοθήκη Bosch I- BOXX Bay [14]

Παρόλα αυτά η ασύρματη φόρτιση παρουσιάζει αυξημένο κόστος εφαρμογής συγκριτικά με την φόρτιση με καλώδια. Ο συμβατικός φορτιστής πρέπει να αντικατασταθεί με έναν ασύρματο ενώ η συσκευή πρέπει να διαθέτει ασύρματο δέκτη. Επιπλέον οι ασύρματοι φορτιστές συχνά παράγουν περισσότερη θερμότητα γεγονός που επιφέρει πρόσθετο κόστος στα υλικά κατασκευής.



σχήμα(1.6). Ηλεκτρική οδοντόβουρτσα Philips με θήκη μεταφοράς USB και ποτήρι φόρτισης [15]



σχήμα(1.7). Φωτιστικό με ενσωματωμένη ασύρματη φόρτιση IKEA [19]



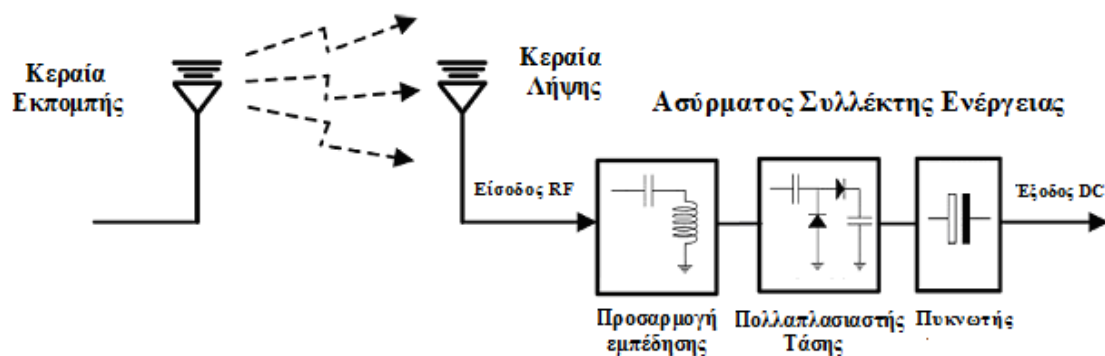
Σχήμα(1.8). Η επιφάνεια φόρτισης Airpower της Apple για ασύρματη φόρτιση i-phone, Apple Watch και AirPods [20]

Η ανάπτυξη των τεχνολογιών ασύρματης φόρτισης εξελίσσεται προς **δύο βασικές κατευθύνσεις**, τη φόρτιση μακρινού πεδίου και τη φόρτιση κοντινού πεδίου:

1.1. Φόρτιση μακρινού πεδίου (Far – Field Charging)

Ασύρματη φόρτιση με ακτινοβολία στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων (radiative wireless charging). Χρησιμοποιεί διαχεόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, συνήθως RF/μικροκύματα σαν μέσο μετάδοσης ενέργειας με τη μορφή ακτινοβολίας. Η μεταφερόμενη ενέργεια είναι αποθηκευμένη στο πεδίο του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που ακτινοβολεί. Το κύμα διαδίδεται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός συνήθως σε ευθεία οπτικής επαφής. Λόγω ζητημάτων ασφαλείας που προκύπτουν από την έκθεση σε RF ακτινοβολία, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε περιοχή χαμηλής ισχύος. Για παράδειγμα η RF ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις είναι κατάλληλη μόνο για εφαρμογές κόμβων δικτύου αισθητήρων με κατανάλωση ισχύος έως 10MW. Η μεταφορά ενέργειας μπορεί να γίνει και μέσω άλλων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων όπως υπέρυθρων ή ακτίνων X παρόλα αυτά δεν χρησιμοποιούνται ευρέως για λόγους ασφαλείας. Το εύρος συχνότητας RF/μικροκυμάτων τυπικά είναι από 300 MHz έως 300 GHz.

1.1.1. Η μη κατευθυνόμενη μετάδοση ενέργειας όπως φαίνεται στο **σχήμα(1.9)** ξεκινά με μία AC-to-DC μετατροπή, ακολουθεί η DC-to-RF μετατροπή μέσα από το μάγνητρο στην πλευρά του εκπομπού. Το κύμα διαδίδεται στο χώρο μέσω του αέρα και λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη, όπου μετατρέπεται πάλι σε ηλεκτρισμό με RF-to-DC μετατροπή από τον πολλαπλασιαστή τάσης. Η μη κατευθυνόμενη RF ακτινοβολία γίνεται χωρίς γραμμή οπτικής επαφής και είναι λιγότερο ευαίσθητη από την κατευθυνόμενη όσον αφορά τον προσανατολισμό και τη θέση σχετικά με την κεραία μετάδοσης όμως η απόδοση της φόρτισης είναι συγκριτικά χαμηλή [2].



Σχήμα(1.9). Ασύρματη φόρτιση μακρινού πεδίου

Ασύρματα συστήματα χαμηλής ισχύος όπως τα **ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ανανεώσιμης ενέργειας (Wireless Renewable Sensor Networks-WRSNs)** και τα **συστήματα ραδιοσυχνικής αναγνώρισης (Radio Frequency Identification-RFID)** αποτελούν ευρέως χρησιμοποιούμενες εφαρμογές της μεθόδου. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι στα WRSNs η παροχή ενέργειας είναι ανεξάρτητη από τη μετάδοση σημάτων και πραγματοποιείται σε διαφορετικές κλίμακες χρόνου, επίπεδα ισχύος και συχνότητες [2].

Τα **συστήματα ραδιοσυχνικής αναγνώρισης (Radio Frequency Identification-RFID)** συνήθως αποτελούνται από χαμηλού κόστους μικρές συσκευές χωρίς μπαταρία, τις αποκαλούμενες ετικέτες (*tags*), που χρησιμοποιούν το ραδιοσήμα ενός εξειδικευμένου RFID αναγνώστη για ισχύ και επικοινωνία (*απλά παθητικά tags*). Κάθε ετικέτα εφόσον ερωτηθεί, αποκρίνεται σε ένα μοναδικό αναγνωριστικό, ακτινοβολώντας ενέργεια πίσω στον αναγνώστη μέσω διαμόρφωσης οπισθοσκέδασης. Οι ετικέτες είναι συχνά συσκευές προκαθορισμένης λειτουργίας για συγκεκριμένες εφαρμογές και έχουν εύρος 10-50 cm για συσκευές επαγωγικά συζευγμένες και 3-10 m για ετικέτες υπερυψηλής συχνότητας (UHF) [44]. Ο αναγνώστης λαμβάνει τις πληροφορίες από όλα τα tags, τις αποκωδικοποιεί και τις αποστέλλει στον κεντρικό υπολογιστή, όπου επεξεργάζονται και τελικά αξιοποιούνται. Σε περίπτωση που απαιτείται από την εφαρμογή, ο αναγνώστης μπορεί ασύρματα να αλλάξει ή να προσθέσει νέες πληροφορίες σε συγκεκριμένα tags που βρίσκονται εντός της εμβέλειάς του (*read-write tags*). Σε αντίθεση με τα barcodes δεν απαιτείται οπτική επαφή του tag με τον reader. Η καρδιά ενός συστήματος RFID είναι ωστόσο το εξειδικευμένο λογισμικό ενδιάμεσου (RFID middleware), το οποίο αναλαμβάνει την επεξεργασία όλων των δεδομένων που διακινούνται από κάθε tag, ώστε να μετατραπούν σε αξιόπιστη και χρήσιμη πληροφορία **σχήμα(1.10)** [43].

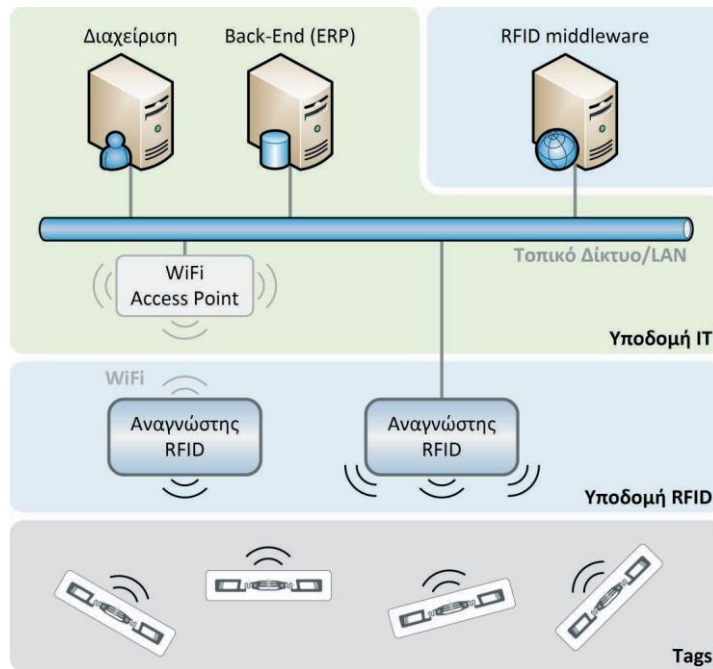
Παραδοσιακά, τα RFID tags χρησιμοποιήθηκαν σαν υποκατάστατο των barcodes σε **εφαρμογές όπως** έλεγχος αλυσίδων εφοδιασμού, διαχείριση κεφαλαίων και ασφάλεια κτιρίων. Γνωστές εφαρμογές της τεχνολογίας RFID είναι τα e-Pass της αττικής οδού, τα TEO-Pass των εθνικών οδών της χώρας και τα βιομετρικά διαβατήρια. Επίσης η Oyster Card που χρησιμοποιείται στα ΜΜΜ του Λονδίνου βασίζεται στην εν λόγω τεχνολογία, όπως και τα ηλεκτρονικά κλειδιά μηχανής στα αυτοκίνητα Toyota και Lexus από τα μοντέλα του 2004 [45].

Μερικές από τις εταιρίες που εφάρμοσαν RFID τεχνολογία πιλοτικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση:

- Metro Group – Διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας
- Lufthansa Technik Group- Παρακολούθηση και σωστή διακίνηση ανταλλακτικών
- Emirates Airlines – Διαχείριση αποσκευών
- Boekhandels Groep, Selexyz, Almere, Ολλανδία-Ιχνηλάτηση βιβλίων

και στην Ελλάδα:

- BIANOΞ Σβώλος Α.Ε.- Παρακολούθηση αποθήκης
- ΣΥΚΙΚΗ- Διαχείριση των προϊόντων αποθήκης, ιχνηλασιμότητα και διασφάλιση της ποιότητάς τους
- Έργο MIRTO σε συνεργασία με τις εταιρίες TREDIT AE και ANKO AE
- Αυτόματη παρακολούθηση φορτίων/οχημάτων στο πλαίσιο των δραστηριοτήτων του Οργανισμού Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ), του Οργανισμού Λιμένα Θεσσαλονίκης (ΟΛΘ) και του Οργανισμού Λιμένα Ηρακλείου (ΟΛΗ)
- STAFF JEANS- Διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας και διασφάλιση αυθεντικότητας (branding), διαδραστικό δοκιμαστήριο [46]



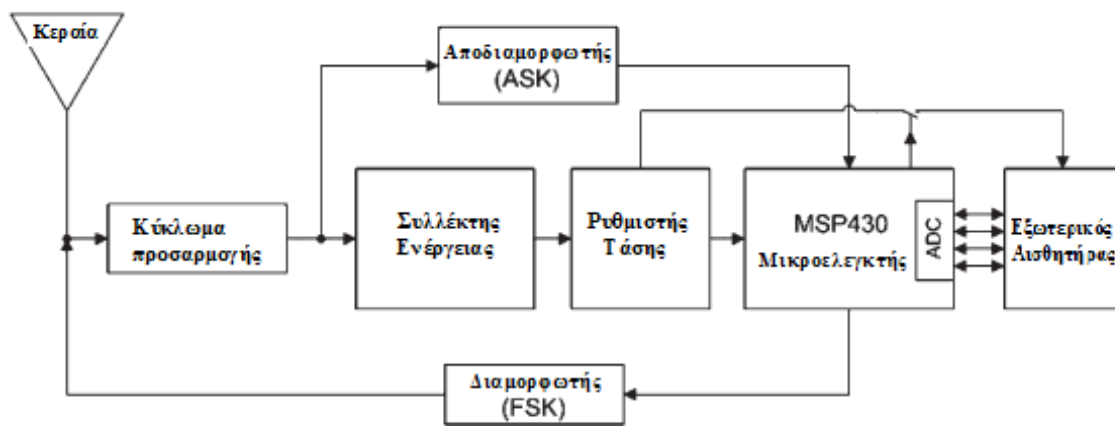
Σχήμα(1.10). Αρχιτεκτονική συστήματος RFID [43]

Προσπάθειες της βιομηχανίας για ανάπτυξη της RFID τεχνολογίας, δημιούργησαν ένα ισχυρό φυσικό στρώμα ικανό να τροφοδοτήσει και να υποβάλλει ερώτημα σε ένα tag **ασύρματα**. Η βασική αυτή τεχνολογία οδηγεί σε μια νέα σειρά ασύρματων συσκευών χωρίς μπαταρίες με ικανότητα επικοινωνίας, ανίχνευσης, υπολογισμού και αποθήκευσης δεδομένων. Απαλλαγμένες από μπαταρίες, έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν για χρόνια αν όχι για δεκαετίες.

Στη βιβλιογραφία συναντάμε αρχιτεκτονικές δικτύων για περιβάλλοντα με βελτιωμένα RFID tags, όπου αντικείμενα εντοπίζονται και ελέγχονται απρόσκοπτα. Ένα τέτοιο περιβάλλον θα μπορούσε να εφαρμοστεί στη βελτίωση της ποιότητας ζωής και ανεξαρτησίας ηλικιωμένων ατόμων. Οι συμμετέχοντες θα φορούν μικρά RFID βραχιόλια – αναγνώστες που θα αναφέρουν αλληλεπίδραση με αντικείμενα που φέρουν ετικέτα. Έτσι θα εξάγεται συμπέρασμα για το είδος της δραστηριότητας που εκτελούν οι ηλικιωμένοι και θα αναφέρεται στους φροντιστές τους. Συναντώνται επίσης συγκεκριμένες εφαρμογές βελτιωμένων RFID ετικετών με αισθητήρα σε τομείς όπως έργα υποδομής, αυτόματος εντοπισμός αλλοίωσης προϊόντων, αναγνώριση βλαβερών ουσιών, και βιοϊατρικές συσκευές για μη επεμβατικό έλεγχο.

Ένα ελκυστικό χαρακτηριστικό των παθητικών ετικετών αισθητήρων είναι η προοπτική της μόνιμης ενσωμάτωσής τους σε αντικείμενα, με σκοπό τον δομικό έλεγχο, την ιατρική παρακολούθηση **σχήμα(1.13)** ή τον έλεγχο προϊόντων. Ακόμα ένα πλεονέκτημα είναι η καταλληλότητά τους για εφαρμογές όπου η τοποθέτηση μπαταριών δεν είναι εφικτή αλλά ούτε και οι συνδέσεις με καλώδια για λόγους βάρους, κόστους, όγκου και άλλους. Οι καθαρά παθητικές ετικέτες περιορίζονται όμως από την απαίτηση να βρίσκονται κοντά σε RFID αναγνώστη. Παρόλα αυτά η μέθοδος συλλογής κινητικής, ηλιακής ή θερμικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δευτερεύουσα πηγή ενέργειας εάν χρειαστεί.

Στο **σχήμα(1.11)** παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμίδων μίας ασύρματης πλατφόρμας αναγνώρισης και ανίχνευσης (*Wireless Identification and Sensing Platform-WISP*), μίας προγραμματιζόμενης συσκευής RFID αισθητήρα χωρίς μπαταρία. Συμβατή με το πρωτόκολλο Ηλεκτρονικού Κωδικού Προϊόντος (EPC) Class 1 Generation 1, μπορεί να μεταδώσει 64 bits δεδομένων ανά ερώτημα και είναι πλήρως ρυθμιζόμενη χάρις στον πολύ χαμηλής ισχύος 16-bit μικροελεγκτή γενικού σκοπού. Όπως και τα συμβατικά παθητικά UHF RFID tags, η WISP φορτίζεται αποκλειστικά μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ραδιοσυχνότητας που μεταδίδονται από έναν RFID αναγνώστη. Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας επιτρέπει πρακτικά τη μέτρηση οποιουδήποτε χαμηλής ισχύος αισθητήρα επίσης ασύρματα φορτιζόμενου από τον αναγνώστη και έχει εύρος λειτουργίας αρκετών μέτρων. Μια κεραία και το κύκλωμα προσαρμογής προηγούνται του αναλογικού εμπρόσθιου άκρου. Το τμήμα συλλογής ενέργειας ανορθώνει την εισερχόμενη RF ακτινοβολία σε DC τάση που τροφοδοτεί το σύστημα. Ο αποδιαμορφωτής ακολουθεί την περιβάλλουσα του φέροντος κύματος ώστε να εξάγει τα δεδομένα που έχουν διαμορφωθεί με κλείδωμα μεταλλαγής πλάτους (ASK). Η κυματομορφή βασικής ζώνης που εξάγεται διαβάζεται από τον MSP430 μικροελεγκτή ώστε να λάβει δεδομένα από τον αναγνώστη. Δεδομένα αποστέλλονται μέσω του κυκλώματος διαμόρφωσης, που λειτουργεί αλλάζοντας την εμπέδηση της κεραίας. Τέλος, οι ενσωματωμένοι αισθητήρες τροφοδοτούνται και μετρώνται από τον μικροελεγκτή(MCU). Αυτός κωδικοποιεί τις μετρήσεις σε ένα αναγνωριστικό (ID) συμβατό με το πρωτόκολλο EPC Class 1 Generation 1 και υπολογίζει δυναμικά τον απαιτούμενο 16-bit κυκλικό έλεγχο πλεονασμού(CRC). Η πλατφόρμα εξομοιώνει το πρωτόκολλο EPC για να επικοινωνήσει το ID στον RFID αναγνώστη. [44]



Σχήμα(1.11). Διάγραμμα βαθμίδων WISP

Τα **δίκτυα αισθητήρων** έχουν αρχίσει να γίνονται μέρος της ζωής μας, και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σε σταδιακά όλο και περισσότερες εφαρμογές. Όσον αφορά τη φόρτιση των αισθητήρων κάνουμε διαχωρισμό σε τρεις κατηγορίες πηγών ενέργειας:

- i) Μπαταρία, που είναι και ο συνηθέστερος τρόπος φόρτισης,
- ii) Συλλέκτης, που μαζεύει ενέργεια από το γύρω περιβάλλον (για παράδειγμα δονήσεις, ηλιακή, θερμική, αιολική ή ηλεκτρομαγνητική ενέργεια), και
- iii) Τοπική τροφοδοσία, μέσω αδιάλειπτης παροχής ισχύος.

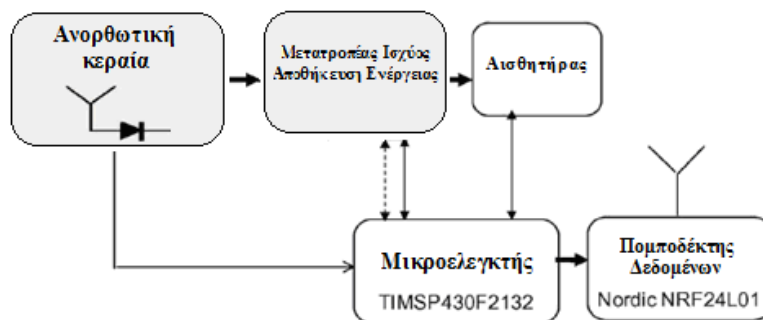
Σε κάποιες περιπτώσεις οι μπαταρίες συνδυάζονται με έναν ενεργειακό συλλέκτη. Η πλειοψηφία των εφαρμογών παρουσιάζει ενεργειακή κατανάλωση μικρότερη ή ίση των 50 mA, ενώ ελάχιστες από αυτές χρειάζονται περίπου στα 51 mA και 100 mA κατανάλωση-με τροφοδοσία 3.3V- λόγω υψηλότερου ρυθμού δειγματοληψίας. Αναφορικά με τον τύπο λειτουργίας που εκτελείται από τις διαφορετικές συσκευές στα WSNs, οι περισσότερες εφαρμογές αποτελούνται από κόμβους αισθητήρων, συγκεντρωτικούς κόμβους και ένα χρήστη. Κάποιες ήδη διαθέτουν μία πύλη επιτρέποντας τη σύνδεση στο διαδίκτυο και την διασπορά της συγκεντρωμένης πληροφορίας. Άλλες διαθέτουν ενεργοποιητές συνδεδεμένους με τους αισθητήρες, έτσι ώστε να εκτελούν εντολές που δίνονται από τον κεντρικό κόμβο. Το εύρος επικοινωνίας εξαρτάται από τον τύπο του πομποδέκτη, τη μεταδιδόμενη ισχύ και το περιβάλλον διάδοσης του σήματος στο οποίο εισέρχονται. Οι πιο πολλές εφαρμογές πετυχαίνουν ένα εύρος τουλάχιστον 50 μέτρων.

Παρακάτω αναφέρονται μερικοί **τομείς εφαρμογών των δικτύων ασύρματων αισθητήρων (WSN)** μαζί με συγκεκριμένα πρότζεκτ [4]:

- Έλεγχος συνόρων - SBInet [7]
- Εντοπισμός στόχου – VigilNet, Trio [5]
- Έλεγχος αυτοκινητόδρομου – TrafficDot [6]
- Γεωργία ακριβείας – HydroSense [8],[9]
- Έλεγχος κατασκευαστικής αρτιότητας – Sustainable Bridges [10]
- Έξυπνο εργοστάσιο – Anshan
- Ανίχνευση δασικής πυρκαγιάς – FireBug
- Παιχνίδι – Trove
- Δυναμικοί χώροι – CMUseum
- Έλεγχος οικότοπου – Great Duck Island
- Έλεγχος καιρού - Infoclima
- Έλεγχος ηφαιστειακών εκρήξεων – Reventador Volcano
- Τηλεϊατρική – Easimed
- Έξυπνο γραφείο – Haworth [11]
- Παρακολούθηση αποθήκης – Sensor- scheme
- Αυτοκίνηση – Intelligent Tires [12],[13]
- Τηλεαποκατάσταση – HipGuard
- Προνοσοκομειακή Ιατρική – CodeBlue
- Άθληση – DexterNet

Η τροφοδότηση των WSN με μπαταρίες συνεπάγεται περιορισμένο χρόνο ζωής τους και ανάγκη για αντικατάσταση των μπαταριών, διαδικασία ακριβή και συχνά δύσκολη λόγω μη εύκολης πρόσβασης στους αισθητήρες. Η τεχνολογία ασύρματης φόρτισης δίνει τη δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος στα WSN με χαμηλό κόστος, ενώ σε κάποια από αυτά οι αισθητήρες δεν έχουν μπαταρία - η ενέργεια αποθηκεύεται σε πυκνωτή - και χρησιμοποιούνται σε **εφαρμογές όπως ιατρική παρακολούθηση, έλεγχο δομικής ακεραιότητας [23], έξυπνο σπίτι [21]**.

Στο **σχήμα(1.12)**, παρουσιάζεται η δομή ενός **αισθητήρα ασύρματα φορτιζόμενου** με RF ακτινοβολία, που χρησιμοποιείται σε εμπορικά εξαρτήματα για ανίχνευση και μετάδοση πληροφοριών. Μία κεραία ενσωματωμένη σε ανορθωτή λαμβάνει τυχαία πολωμένη ακτινοβολία σε μία ή περισσότερες από τις επιλεγμένες συχνότητες σε επίπεδα κάτω από 200 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Μιλάμε για συχνότητες είτε σε μη αδειοδοτημένες βιομηχανικές- επιστημονικές - ιατρικές ζώνες [**industrial-science-medical (ISM)**] όπως 2.45 και 5.8 GHz, ή συχνότητες όπου ενέργεια που ακτινοβολείται για άλλες εφαρμογές μπορεί να συλλεχθεί (**energy harvesting**) όπως για παράδειγμα η 2 GHz ζώνη κυψελοειδών δικτύων. Η dc έξοδος ρυθμίζεται από έναν ψηφιακό μετατροπέα ισχύος, έτσι ώστε να είναι κοντά στο βέλτιστο dc φορτίο στη συσκευή αποθήκευσης, που παρέχει ενέργεια στο μικροελεγκτή, τον αισθητήρα και τον πομποδέκτη δεδομένων. Ο μικροελεγκτής ελέγχει το κύκλωμα διαχείρισης ισχύος, τον πομποδέκτη και τον αισθητήρα. Ο έλεγχος της διαθέσιμης αποθηκευμένης ενέργειας επιτρέπει την προσαρμοστική ρύθμιση του κύκλου λειτουργίας μετάδοσης των δεδομένων [**1],[3]**.

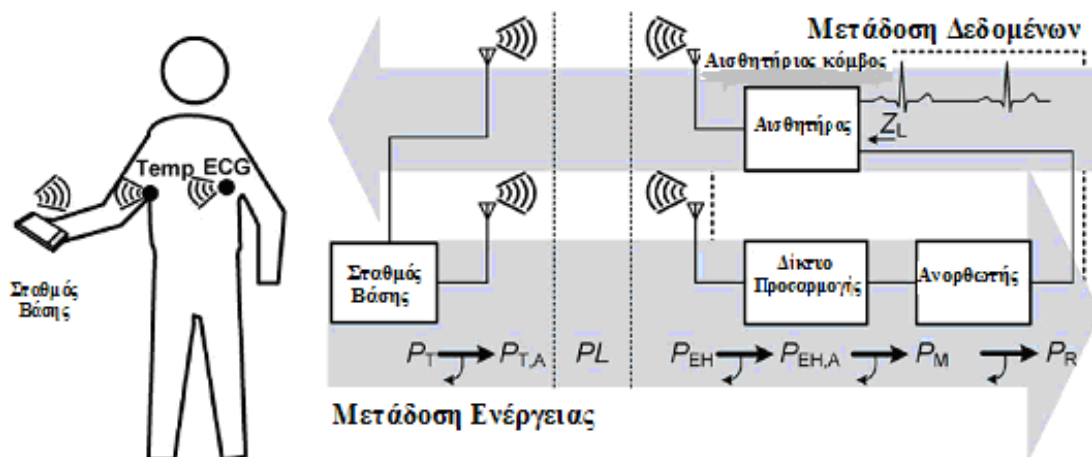


Σχήμα(1.12). Διάγραμμα βαθμίδων ασύρματου αισθητήρα RF-τροφοδοτούμενου μακρινού πεδίου

Στη βιβλιογραφία συναντάμε εφαρμογές *WSN με ασύρματη φόρτιση*, με ή χωρίς μπαταρία όπως για παράδειγμα :

- Πλατφόρμα αισθητήρων πολύ χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, ασύρματα φορτιζόμενων, με επαναφορτιζόμενη μπαταρία λεπτού υμενίου. Συγκεκριμένα πομπός και δέκτης καταναλώνουν 1.79 mW και 0.683 mW αντίστοιχα, για να επιτύχουν ρυθμό διαβίβασης δεδομένων 500 kbps [**22]**
- Σύστημα ασύρματης φόρτισης με κινητό φορέα -για παράδειγμα μη επανδρωμένο ελικόπτερο- δικτύου αισθητήρων τοποθετημένων σε γέφυρα, με σκοπό τον έλεγχο δομικής ακεραιότητας (**Structural Health Monitoring-SHM**) [**24]**

- Σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος για απομακρυσμένους ασύρματους αισθητήρες. Το σύστημα συλλέγει 3.3 V σε απόσταση 110 ποδιών για 4 W εκλυόμενη ισχύ από τον εκπομπό [25]
- Σύστημα παλμικής ασύρματης μεταφοράς ισχύος με μικροκύματα, για αισθητήρες ZigBee με βοηθητικό κύκλωμα ανόρθωσης για την ανακλώμενη από το κύριο κύκλωμα ακτινοβολία [27]



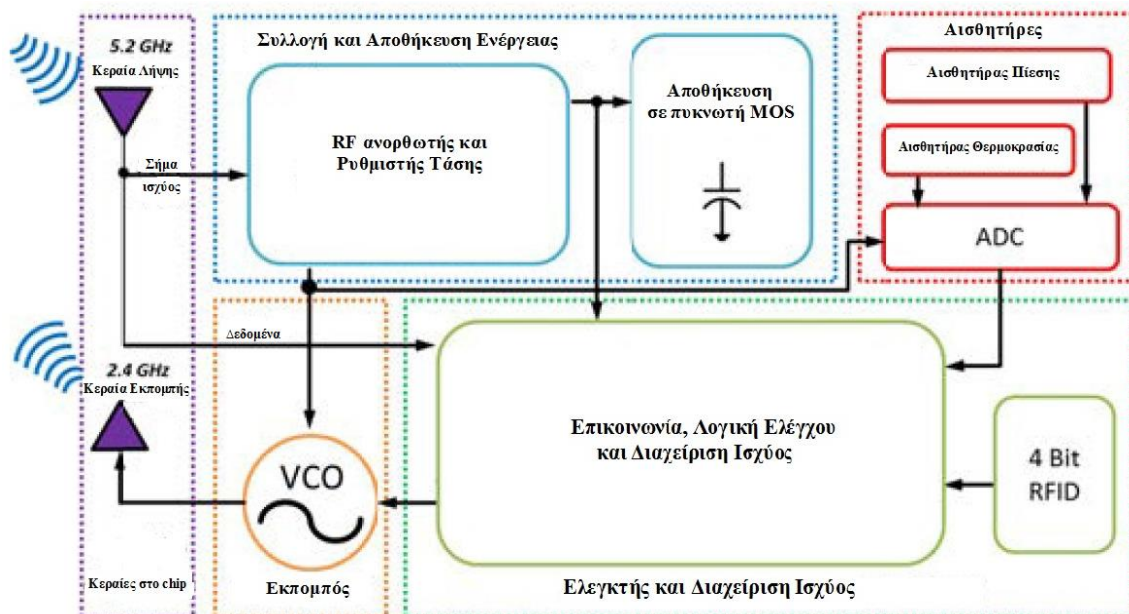
Σχήμα(1.13). Σύστημα αισθητήρων WBAN για έλεγχο της θερμοκρασίας (temp) και ηλεκτροκαρδιογραφικό έλεγχο (ECG monitoring), φορτιζόμενο με RF ακτινοβολία εκπεμπόμενη από ένα σταθμό βάσης (για παράδειγμα κινητό τηλέφωνο)

- Η RF-φόρτιση αισθητήρων συναντάται και στα ασύρματα δίκτυα περιοχής σώματος (**Wireless Body Area Networks-WBANs**) **σχήμα(1.12)** όπου οι εφαρμογές περιλαμβάνουν συσκευές που φοριούνται [26] ή εμφυτεύονται στο σώμα **σχήμα(1.13)** [28].

Συναντάμε επίσης συστήματα ασύρματης φόρτισης αισθητήρων που βασίζονται στη συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον (*energy harvesting*). Συλλέγουν RF σήματα προερχόμενα από τηλεοπτική μετάδοση, AM ραδιοφωνική εκπομπή, τις ζώνες συχνοτήτων (900/1800) του GSM (Παγκοσμίου Συστήματος Κινητών Επικοινωνιών), ασύρματους δρομολογητές (Wi-Fi routers), σταθμούς βάσης κυψελωτών δικτύων, για εφαρμογές όπως [2]:

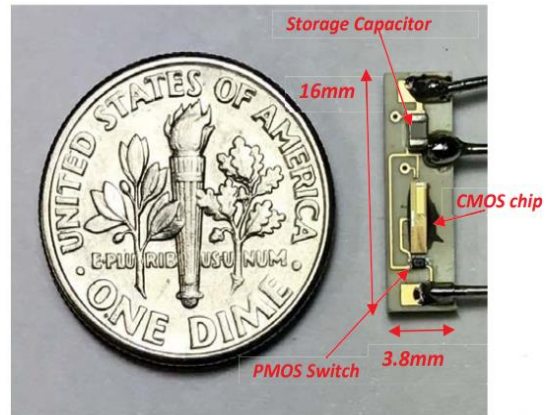
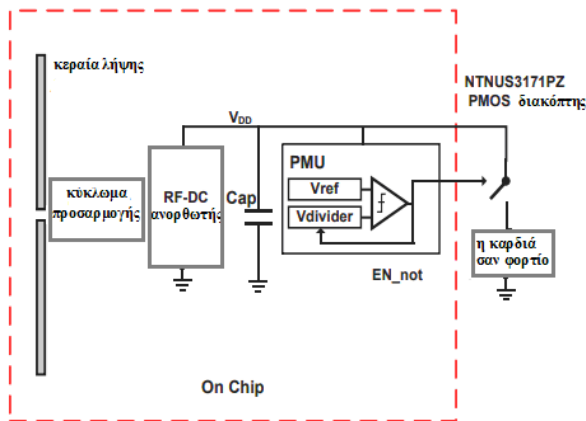
- Κυκλώματα συλλογής ενέργειας για τη φόρτιση αισθητήρων τοποθετημένων σε γεωστατικούς ραδιοηλεκτρονικούς δορυφόρους [29]
- Συλλέκτης ενέργειας υψηλής ακριβείας , σχεδιασμένος να δουλεύει σε συχνότητες AM εκπομπών, για τη φόρτιση αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο και παρακολούθηση έργων υποδομής (π.χ. δρόμοι, γέφυρες) [30]
- RF συλλέκτης ενέργειας με λειτουργία στα 2.4 GHz στο εύρος συχνοτήτων του τοπικού ασύρματου δικτύου (WLAN). Τροφοδοτεί αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, χημικών, ανίχνευσης ραδιενέργειας, χημικούς αισθητήρες, σε εσωτερικό οικιακό ή βιομηχανικό περιβάλλον [31]

- Πειραματική ανάπτυξη συστήματος ασύρματου δικτύου αισθητήρων επιτάχυνσης, με μπαταρία, φορτιζόμενο με RF συλλέκτη, τοποθετημένων σε ελικόπτερο Agusta Westland 139. Οι αισθητήρες και ο συλλέκτης είναι εμπορικά διαθέσιμοι [32].



Σχήμα(1.14). Διάγραμμα βαθμίδων συστήματος σε chip (SoC) εμφυτευμένο στο μάτι για έλεγχο της πίεσης, ασύρματα φορτιζόμενο από εισερχόμενα RF σήματα: Η κεραία λήψης λαμβάνει το σήμα RF με ενσωματωμένο ρολόι 20 GHz και ένα μοναδικό αναγνωριστικό (ID) από τον εξωτερικό αναγνώστη (ER). Η μονάδα συλλογής ενέργειας το μετατρέπει σε αξιοποιήσιμη DC τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του πυκνωτή MOS. Όταν έχει συλλεχθεί επαρκής ενέργεια, το σύστημα επικοινωνίας και ελέγχου ενεργοποιείται για να αποδιαμορφωθούν τα δεδομένα και να ανακτήσει το ρολόι και το ID του σήματος. Εάν αυτό ταιριάζει με αυτό που είναι αποθηκευμένο στο chip, ο αισθητήρας ενεργοποιείται και η έξοδος του μετατρέπεται σε ψηφιακή με χρήση αναλογικού/ψηφιακού μετατροπέα (ADC). Τα δεδομένα του αισθητήρα αλλά και το ID διαμορφώνονται και εκπέμπονται πίσω στον ER. Η επικοινωνία με τον ER πραγματοποιείται με πρωτόκολλο RFID.

Το 2017, ερευνητές από το πανεπιστήμιο του Rice και το Texas Heart Institute στο Χιούστον, παρουσίασαν μικροσίπ βηματοδότη χωρίς μπαταρία **σχήμα(1.15)**, ασύρματα φορτιζόμενο, με ενσωματωμένη κεραία. Το μικροσίπ συλλέγει RF ακτινοβολία από εξωτερική πηγή στη ζώνη ραδιοσυχνότητας X και έχει μέγεθος 4mm επί 1mm. **Ο βηματοδότης μπορεί να φορτιστεί ασύρματα** σε απόσταση 2cm και δημιουργεί παλμό διέγερσης με μία τάση των 1.3V. Το πείραμα δοκιμάστηκε επιτυχώς σε ζωντανή καρδιά χοίρου αλλάζοντας τη συχνότητά της από 1.67Hz σε 2.87Hz [98].

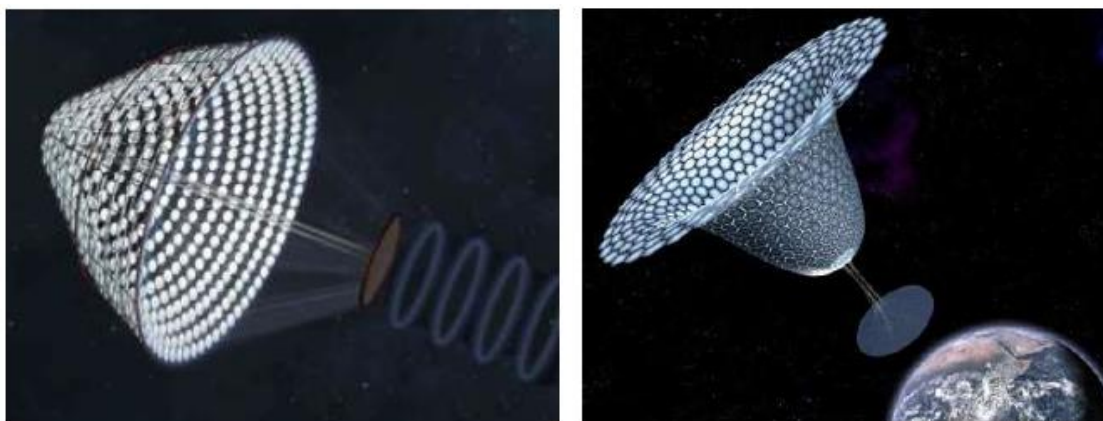


Σχήμα(1.15). Δομικό διάγραμμα μικροτσιπ βηματοδότη (αριστερά) και σύγκριση του μεγέθους του βηματοδότη με νόμισμα (δεξιά)

1.1.2. Κατευθυνόμενη μετάδοση ενέργειας

Η ενέργεια των μικροκυμάτων μπορεί να ακτινοβολείται και ιστροπικά ή **προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση μέσω σχηματισμού δέσμης**. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενισχύσει συσκευές με μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται από σημείο σε σημείο και η απόδοση ισχύος βελτιώνεται. Η δέσμη ενέργειας μπορεί να παραχθεί από μια στοιχειοκεραία ή κεραία ανοίγματος. Η διαπερατικότητα της δέσμης βελτιώνεται με τη χρήση πολύ μεγάλων στοιχειοκεραιών. Από το 1960, με την εξέλιξη της τεχνολογίας μικροκυμάτων, αναπτύχθηκαν συστήματα μεταφοράς πολύ υψηλών ποσών ισχύος ικανά να εκπέμπουν εκατοντάδες κιλοβάτ ακτινοβολίας. Με τεχνικές διαμόρφωσης δέσμης μικροκυμάτων, αποδίδεται μεγάλη ισχύ σε μεγάλη απόσταση. Για παράδειγμα το 1975 το πείραμα μετάδοσης ισχύος με μικροκύματα **Goldstone** που διεξήχθη σε συχνότητα 2.388 GHz πέτυχε να αποδώσει ισχύ 30 kW με δέσμη 450 kW σε απόσταση 1.54 χιλιομέτρων. Οι τεχνικές αυτές ώθησαν επίσης την ανάπτυξη μίας σειράς από ογκώδη συστήματα ασύρματης φόρτισης:

- Η ιδέα της **συλλογής ηλιακής ενέργειας από δορυφόρους στο διάστημα (SPS – Solar Power Satellites)** ερευνάται από τη δεκαετία του '70 έως και σήμερα[35]. Ωστόσο η τεχνολογία δεν έχει υλοποιηθεί κυρίως λόγω του πολύ υψηλού κόστους αλλά και της δυσκολίας κατασκευής και συντήρησης του δορυφόρου. Εκφράζεται επίσης ανησυχία όσον αφορά θέματα ασφαλείας [34]. Το έτος 2011-2012, το πρόγραμμα NIAC (NASA Innovative Advanced Concepts) της NASA ανέλαβε την πρώτη φάση ενός πρότζεκτ που ερευνά την εφαρμοσιμότητα της ιδέας κατασκευής ενός SPS δορυφόρου, το πρότζεκτ SPS-ALPHA: Ο δορυφόρος SPS-ALPHA θα τοποθετηθεί κατά κανόνα σε γεωστατική τροχιά (GEO – Geostationary Earth Orbit) όπου θα συγκεντρώνει ηλιακές ακτίνες χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από αιχμηρά κάτοπτρα λεπτού υμενίου, θα τις μετατρέπει μέσω μεγάλης RF κεραίας ανοίγματος, σε μια δέσμη μικροκυμάτων με συνοχή και θα εκπέμπει την ισχύ σε αγορές στη Γη ή στο διάστημα **σχήμα(1.16)**.



Σχήμα(1.16). Απεικόνιση δύο εναλλακτικών εκδοχών της ιδέας του SPS – ALPHA, 2011 (αριστερά) και 2012 (δεξιά)

Ο SPS-ALPHA συγκεντρώνει πλήθος σημαντικών νέων τεχνολογιών:

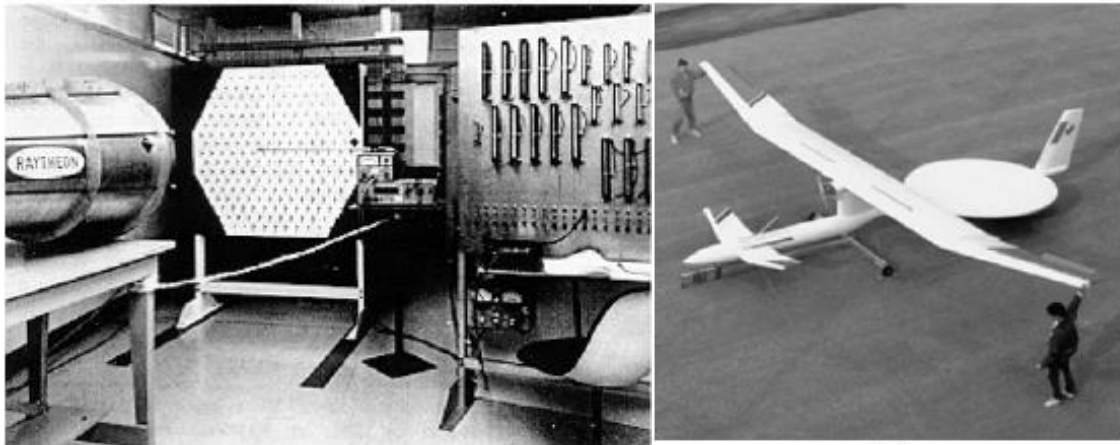
- WPT χρησιμοποιώντας μια RF οπισθοκατευθυντική κεραία ελεγχόμενη από φάση, με υψηλής απόδοσης ενισχυτή στερεάς κατάστασης
- υψηλής απόδοσης φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα πολλαπλών ενεργειακών διακένων, χρησιμοποιούμενα σε μια αρχιτεκτονική φωτοβολταϊκού συγκεντρωτή (CPV - Concentrator Photovoltaic) με ενσωματωμένη διαχείριση θερμότητας
- -Ελαφριά δομικά στοιχεία εφαρμοσμένα σε διάφορα συστήματα/υποσυστήματα
- Αυτόνομη ρομποτική σε ένα αυστηρώς δομημένο περιβάλλον
- Υψηλός βαθμός αυτονομίας μεταξύ των ξεχωριστών δομικών στοιχείων

Παρόλα αυτά δεν απαιτούνται σημαντικές ανακαλύψεις. Το κλειδί της καινοτομίας είναι το επίπεδο της αρχιτεκτονικής. Εάν το πρότζεκτ είναι επιτυχές ο SPS-ALPHA θα μπορεί να μεταφέρει σε αγορές στη γη και σε αποστολές στο διάστημα, ασύρματα, σε προσιτό κόστος, δεκάδες έως και χιλιάδες μεγαβάτ [33]

Παρά τα κωλύματα ενός τέτοιου εγχειρήματος, έχουν γίνει πολλά βήματα προς αυτή την κατεύθυνση και έρευνες βρίσκονται σε εξέλιξη, αφού το όφελος εάν καρποφορήσουν θα είναι μεγάλο [36]

• **Raytheon Airborne Microwave Platform (RAMP)**. Ιδέα που προτάθηκε από την εταιρία Raytheon στο υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ το 1959 σαν λύση για προβλήματα παρακολούθησης και επικοινωνίας. Η προτεινόμενη πλατφόρμα ήταν ένα μεγάλο ελικόπτερο τοποθετημένο στα 50000 πόδια τροφοδοτούμενο από τη γη με μικροκυματικό ενισχυτή. Μετά από συνεχείς έρευνες και βελτιώσεις το 1974 επετεύχθη συνολική απόδοση dc-to-dc μετατροπής $54\% \pm 1\%$ στο σύστημα- η μεγαλύτερη έως και σήμερα για διατερματική μετάδοση ισχύος με μικροκύματα- το οποίο λειτούργησε σε συχνότητα 2.446 GHz με αποδιδόμενη ισχύ 495 W

- Σύστημα φόρτισης με μικροκύματα μη επανδρωμένου αεροσκάφους (**UAV - Unmanned Aerial Vehicle**). Η ισχύς εκπέμπεται από παραβολική κεραία στο έδαφος και μετατρέπεται σε DC τάση από κεραία επάνω στο αεροσκάφος. Το σύστημα διαχείρισης και διανομής ισχύος τροφοδοτεί τον έλεγχο πτήσης, το σύστημα προώθησης και το ωφέλιμο φορτίο. Έτσι το αεροσκάφος είναι ικανό για μεγάλης χρονικής διάρκειας αποστολές σε μεγάλα ύψη με μικρές απαιτήσεις σε ισχύ. Κάποιες από αυτές μπορεί να είναι η ζεύξη επικοινωνίας, μελέτη της ατμόσφαιρας, γεωφυσικές έρευνες, έλεγχος της ρύπανσης, εναέρια βιντεοσκόπηση, έρευνα και διάσωση (SAR-Search And Rescue), αντιτυρική προστασία, ανθυποβρυχιακές επιχειρήσεις, εντοπισμός πυραύλων, με το κόστος να είναι σημαντικά μικρότερο σε σύγκριση με τους δορυφόρους [38]. Η ασύρματη φόρτιση με μικροκύματα μπορεί να εφαρμοστεί και σε ελαφριά drones(μικρού μεγέθους UAV), χρησιμοποιώντας κεραία λήψης διαρρεόντων κυμάτων με σάρωση συχνότητας για μεγαλύτερο κέρδος [39]. Η πλατφόρμα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος **SHARP (Stationary High Altitude Relay Program)** -προτάθηκε στον Καναδά το 1980-αποτελέσει το πρώτο μη επανδρωμένο άνευ καυσίμων ελαφρύ αεροπλάνο, ασύρματα τροφοδοτούμενο με μικροκύματα **σχήμα(1.17)**



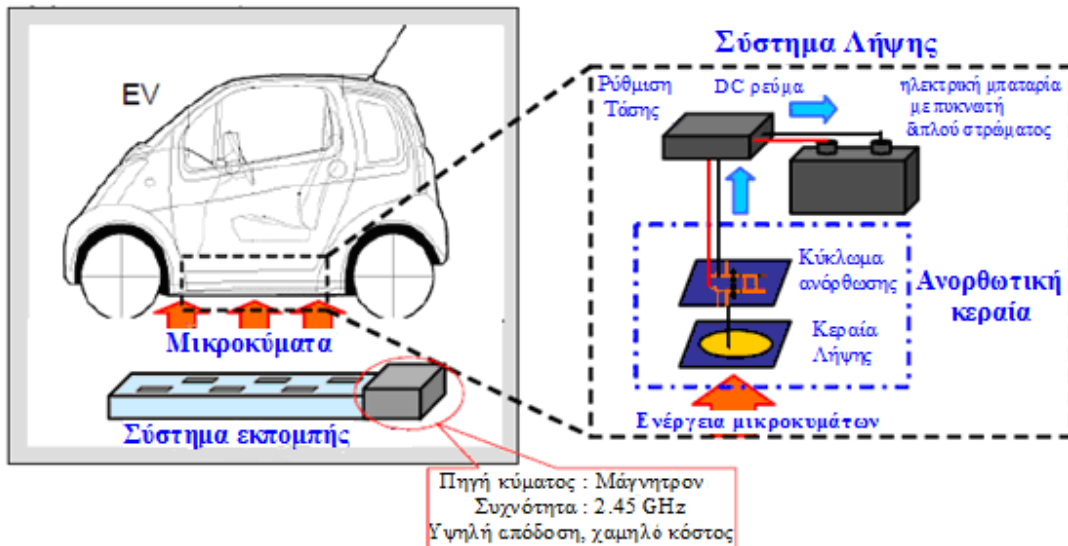
Σχήμα(1.17). (Αριστερά) Η διάταξη Raytheon που πέτυχε απόδοση 54.18% και (Δεξιά) Το αεροσκάφος του προγράμματος SHARP [41]

- Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον αναφορικά με τη δημιουργία συστημάτων φόρτισης με μικροκύματα, που θα μεταφέρουν μεγάλα ποσά ισχύος σε πλατφόρμες υψηλού υψομέτρου - στρατοσφαιρικές πλατφόρμες-(**HAPP - High Altitude Powered Platforms**), με σκοπό τη διατήρησή τους on -station και την τροφοδότηση του χρήσιμου φορτίου τους. Οι HAPP μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οπτική επιτήρηση ή ανίχνευση με ραντάρ σε μεγάλα ύψη, ραδιοφωνική μετάδοση και λειτουργίες αναμετάδοσης μικροκυμάτων. Ωστόσο η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος έχει πολλές και υψηλές απαιτήσεις που προκύπτουν από τα επίπεδα ισχύος και την αεροδυναμική των οχημάτων [40]

- Πρόσφατα, με την αυξανόμενη διείσδυση στην αγορά των ηλεκτρικών/υβριδικών αυτοκινήτων (**EV/PHEV**), η τεχνολογία διαμόρφωσης μικροκυματικής δέσμης έχει προταθεί σαν μέσο ασύρματης φόρτισης τέτοιου τύπου οχημάτων. Το πανεπιστήμιο του Κιότο ανέπτυξε δύο τέτοιους τύπους συστημάτων WPT φόρτισης:

- Την περίοδο 2003-2008 σε συνεργασία με τη Nissan Motors ανέπτυξε σύστημα για φόρτιση του EV από κοντινή απόσταση (10 cm) μεταξύ του σώματος του οχήματος και

του εκπομπού που εγκαταστάθηκε στο οδόστρωμα **σχήματα(1.18,1.19)**. Με την ανάπτυξη νέας διόδου GaN Schottky (2011) η απόδοση μετάδοσης ισχύος στο πείραμα έφτασε το 76% ενώ τα επίπεδα πυκνότητας διαρροής ήταν κάτω από το όριο των κανονισμών ασφαλείας ($1\text{mW}/\text{cm}^2$) εκτός συστήματος και μέσα στο αυτοκίνητο. Συνολικά μεταφέρθηκαν 1.4kW σε συχνότητα 2.45GHz . Παρατηρήθηκε απρόσμενη σύζευξη μεταξύ κεραίας εκπομπής και λήψης

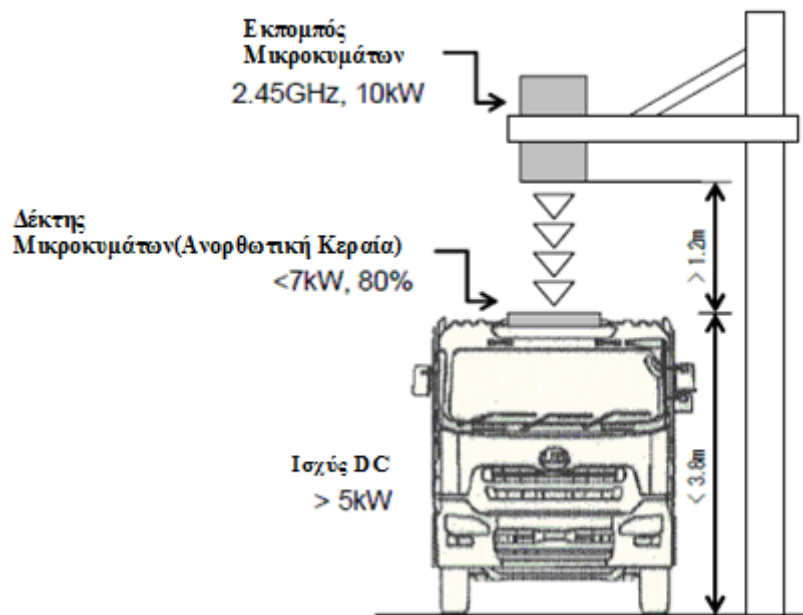


Σχήμα(1.18). Προτεινόμενη διάταξη ασύρματης φόρτισης του EV από το οδόστρωμα

Το 2013 προτάθηκε σύστημα για WPT φόρτιση φορτηγού της εταιρίας Volvo. Η μελέτη όπως φαίνεται στο **σχήμα(1.19)**, αφορά σύστημα μεταφοράς 10kW σε συχνότητα 2.45GHz , με απόδοση πάνω από 80% RF-to-DC μετατροπής της ελεγχόμενης από φάση ανορθωτικής κεραίας λήψης. Μικροκυματική ενέργεια εκπέμπεται πάνω από την οροφή του φορτηγού στην οποία είναι τοποθετημένη η κεραία λήψης. Το σύστημα είναι κατάλληλο για διάφορα ύψη φορτηγών που μπορεί να μην παρκάρουν στη βέλτιστη θέση για φόρτιση

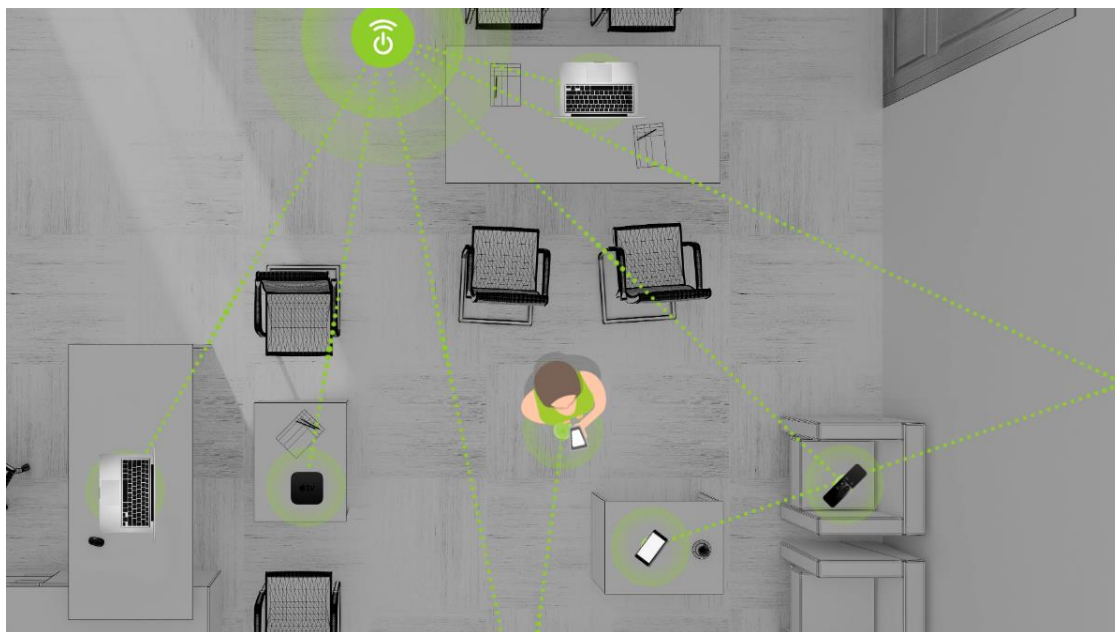


Σχήμα(1.19). Πειραματική διάταξη ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου με μικροκύματα από το πανεπιστήμιο του Κίτο



Σχήμα(1.20). Προτεινόμενο σύστημα ασύρματης φόρτισης φορτηγού με μικροκύματα [42]

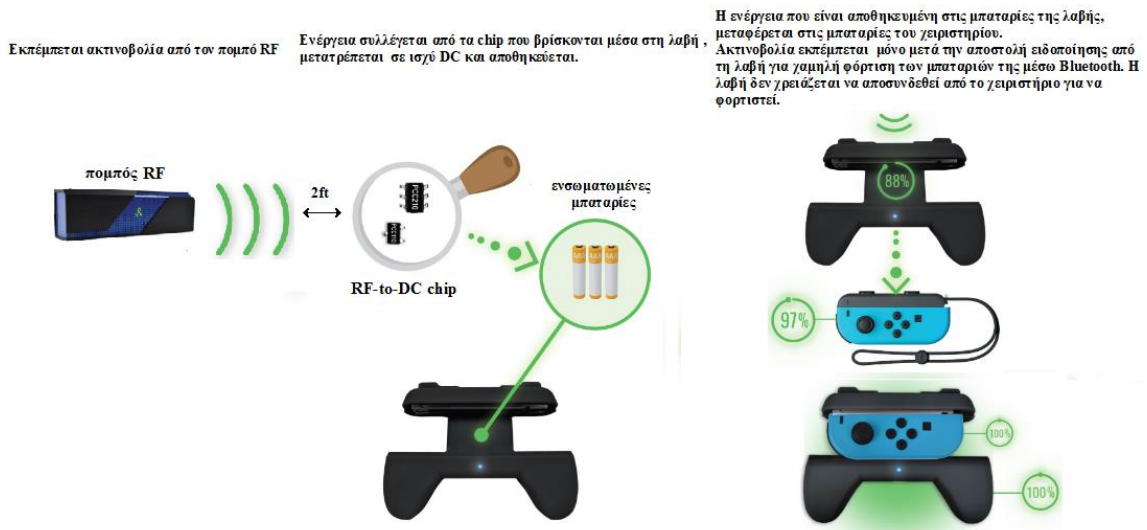
Η πρόσφατη ανάπτυξη έχει φέρει **εμπορικά προϊόντα** στην αγορά. Για παράδειγμα η εταιρία **Powercast** διαθέτει εκπομπούς και δέκτες που επιτρέπουν 1W ή 3W ιστροπική ασύρματη μεταφορά ισχύος, ενσωματώνοντας την τεχνολογία της ασύρματης φόρτισης με RF ακτινοβολία σε προϊόντα όπως RFID tags και χειριστήρια παιχνιδιών **σχήμα(1.22)** [47].



Σχήμα(1.21). Το σύστημα ασύρματης φόρτισης Cota της εταιρίας Ossia

Την περασμένη δεκαετία η κατευθυνόμενη RF διαμόρφωση δέσμης βρήκε μέσης ισχύος εφαρμογές για επαναφόρτιση κινητών ηλεκτρονικών συσκευών όπως το εμπορικά διαθέσιμο σύστημα ασύρματης φόρτισης Cota της εταιρίας **Ossia** [48]. Ο δέκτης Cota, ένα μικροσκοπικό chip σιλικόνης που ενσωματώνεται σε οποιαδήποτε ηλεκτρονική συσκευή θέλουμε να φορτίσουμε, στέλνει φωτεινό σήμα ώστε να εντοπίσει τον πομπό Cota, χρησιμοποιώντας

τοιχούς και αντικείμενα και αποφεύγοντας ανθρώπους και κατοικίδια. Ο πομπός στέλνει ισχύ πίσω στον δέκτη ακολουθώντας την ίδια ακριβώς διαδρομή με το σήμα. Το Cota έχει τη δυνατότητα να φορτίσει ταυτόχρονα πάνω από μια συσκευές, και ενώ αυτές κινούνται στο χώρο **σχήμα(1.21)**.



Σχήμα(1.22). Ασύρματα φορτιζόμενες λαβές για χειριστήρια Joy- Con της Nintendo

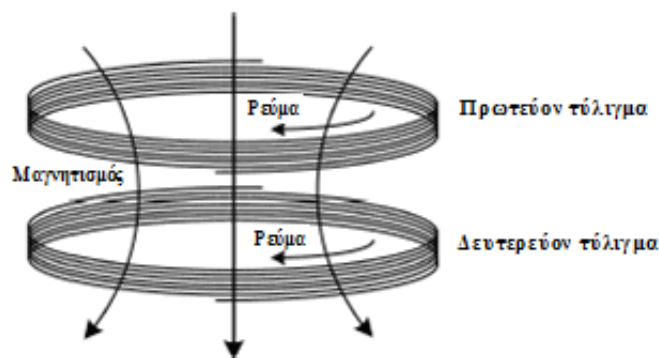
Εκτός από τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, η μικροκυματική ακτινοβολία δίνει το **πλεονέκτημα** της συμβατότητας με ήδη υπάρχοντα συστήματα επικοινωνίας. Υποστηρίζεται

ότι τα μικροκύματα μπορούν να παρέχουν ενέργεια και να μεταφέρουν πληροφορία ταυτόχρονα. Το πλάτος και η φάση τους χρησιμοποιούνται για να διαμορφώσουν την πληροφορία, ενώ η ακτινοβολία και ταλάντωσή τους για να μεταφέρουν ενέργεια. Η ιδέα αναφέρεται στη βιβλιογραφία σαν ταυτόχρονη ασύρματη μεταφορά πληροφορίας και ισχύος (***Simultaneous Wireless Information and Power Transfer – SWIPT***). Για την ρύθμιση της SWIPT, χρησιμοποιήθηκαν προηγμένες τεχνολογίες έξυπνων κεραιών στην πλευρά του δέκτη, ώστε να επιτευχθεί ένας ευνοϊκός συμβιβασμός μεταξύ επίδοσης συστήματος και πολυπλοκότητας. Αντιθέτως, η χρήση ειδικών δεσμών ισχύος καλυμμένων από το ήδη υπάρχον σύστημα επικοινωνίας, προτάθηκε σαν εναλλακτική εξαιτίας της οικονομικής της απόδοσης και πρακτικότητας. ***Μολαταύτα***, λόγω ανησυχίας για τη δημόσια υγεία, οι δέσμες ισχύος πρέπει να περιορίζονται σύμφωνα με τους κανονισμούς για την έκθεση σε RF ακτινοβολία, όπως ο κανονισμός της ***Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών (Federal Communications Commission – FCC)*** και τα μέγιστα επιτρεπτά όρια έκθεσης που προσδιορίζονται στο πρότυπο ***IEEE C95.1-2005 [2]***.

1.2. Φόρτιση κοντινού πεδίου (Near – Field Charging)

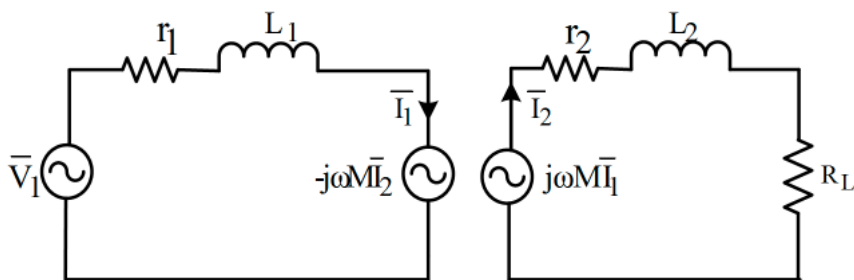
1.2.1. Μέθοδος Επαγωγικής Σύζευξης (Inductive Coupling)

Η επαγωγική σύζευξη βασίζεται στην επαγωγή μαγνητικού πεδίου που μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο τυλιγμάτων **σχήμα(1.23)**. Η επαγωγική μεταφορά ισχύος (**Inductive Power Transfer – IPT**) συμβαίνει όταν το πρωτεύον τύλιγμα ενός πομπού ενέργειας παράγει κυρίως μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που διαπερνά το δευτερεύον τύλιγμα του δέκτη ενέργειας που βρίσκεται εντός του, γενικά λιγότερο από ένα μήκος κύματος. Η μαγνητική ενέργεια του κοντινού πεδίου επάγει τάση/ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση ασύρματης συσκευής ή συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.



Σχήμα(1.23). Επαγωγική σύζευξη

Η συχνότητα λειτουργίας της επαγωγικής σύζευξης τυπικά βρίσκεται στο εύρος των **KHz**. Το δευτερεύον πηνίο πρέπει να ρυθμίζεται στη συχνότητα λειτουργίας για βελτίωση της απόδοσης φόρτισης. Ο συντελεστής ποιότητας Q συνήθως σχεδιάζεται σε μικρές τιμές (π.χ. κάτω από 10), επειδή η μεταφερόμενη ισχύς περιορίζεται γρήγορα για μεγαλύτερες τιμές του Q οπότε η απόσταση φόρτισης βρίσκεται συνήθως εντός των 20 cm. Τα RFID με τεχνολογία επαγωγικής σύζευξης είναι ένα παράδειγμα επέκτασης του ορίου απόστασης φόρτισης σε δεκάδες εκατοστά με κόστος την υποσκελισμένη απόδοση (1-2 %) και λαμβανόμενη ισχύ της τάξης των μW . Παρόλο τον περιορισμό του εύρους μετάδοσης, η αποδοτική ισχύς φόρτισης μπορεί να είναι πολύ υψηλή (σε επίπεδο kW) όπως στην περίπτωση επαναφόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.



Σχήμα(1.24). Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικής φόρτισης [102]

Στα **πλεονεκτήματα** της μαγνητικής επαγωγικής σύζευξης περιλαμβάνονται η ευκολία εφαρμογής, άνετη λειτουργία, υψηλή απόδοση σε κοντινή απόσταση (τυπικά μικρότερη της διαμέτρου του τυλίγματος) και εγγυημένη ασφάλεια. Συνεπώς είναι ευρέως εφαρμόσιμη στις **φορητές συσκευές [2]**.

Το 2014, επιστήμονες του MIT ανακοίνωσαν την εφεύρεση ενός καινοτόμου συστήματος ασύρματης φόρτισης του **MagMIMO σχήμα(1.25)**. Το MagMIMO δίνει τη δυνατότητα στα συστήματα ασύρματης φόρτισης να συγκεντρώσουν την μεταφερόμενη ισχύ και να την ακτινοβολήσουν στο κινητό τηλέφωνο με τρόπο ανάλογο με την τεχνική διαμόρφωσης δέσμης στις ασύρματες επικοινωνίες. Στην υπάρχουσα τεχνολογία ασύρματης φόρτισης κινητών με επαγωγική σύζευξη, χρησιμοποιείται ένα τύλιγμα σαν πηγή ενέργειας που βρίσκεται στο pad φόρτισης και παράγει το μαγνητικό πεδίο, και ένα πηνίο λήψης με το οποίο είναι εξοπλισμένο το κινητό. Το πηνίο μπορεί να είναι τοποθετημένο στη θήκη του κινητού ή σε ενσωματωμένο περίβλημα. Όταν το μαγνητικό πεδίο διαπεράσει το τύλιγμα του τηλεφώνου, παράγεται σε αυτό ρεύμα που φορτίζει τη μπαταρία. Τα δύο αυτά τυλίγματα αποτελούν τις κεραίες εκπομπής και λήψης του ασύρματου συστήματος. Τα υπάρχοντα συστήματα χρησιμοποιούν ένα και μόνο τύλιγμα εκπομπής με αποτέλεσμα το τύλιγμα λήψης στο τηλέφωνο να πρέπει να βρίσκεται κοντά και καλά ευθυγραμμισμένο με το τύλιγμα του pad έτσι ώστε να συλλέξει την ενέργεια του μαγνητικού πεδίου. Αντίθετα το MagMIMO χρησιμοποιεί πολλά τυλίγματα εκπομπής αντίστοιχα με τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών με πολλαπλές κεραίες. Τα ρεύματα των διαφόρων τυλιγμάτων συντονίζονται έτσι ώστε τα μαγνητικά πεδία να συνδυάζονται εποικοδομητικά προς την κατεύθυνση του τυλίγματος του τηλεφώνου, δημιουργούν δηλαδή μια δέσμη προς αυτό. Η προκύπτουσα δέσμη προσανατολίζεται χωρικά ανάλογα με τη θέση του τηλεφώνου. Όπως και στα παραδοσιακά συστήματα διαμόρφωσης δέσμης MIMO, για να συγκεντρωθεί η δέσμη του μαγνητικού πεδίου στο τηλέφωνο απαιτείται η πηγή να γνωρίζει τα κανάλια.

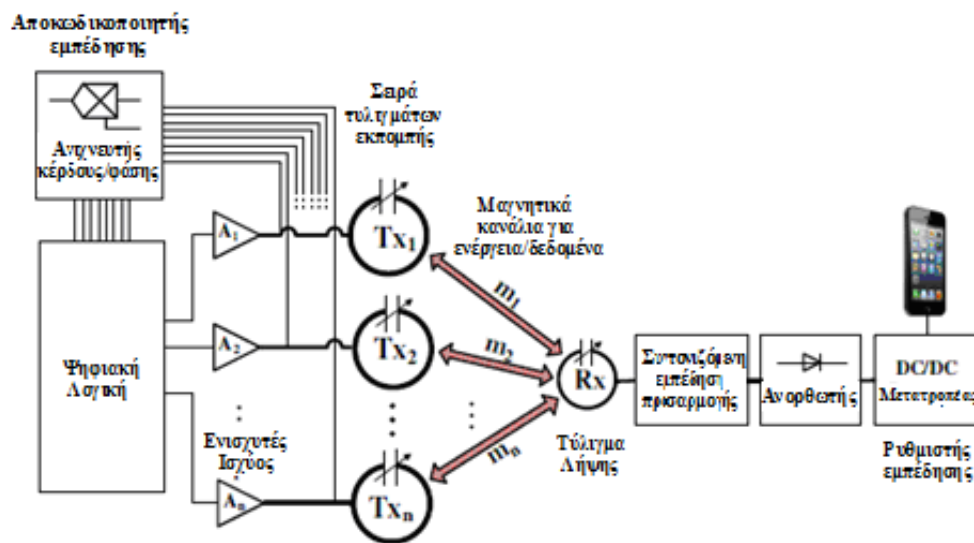


Σχήμα(1.25). Αριστερά: Πρότυπο του MagMIMO , Δεξιά: Ο πομπός αποτελείται από η όμοια τυλίγματα τοποθετημένα κάτω από την επιφάνεια ενός τυπικού γραφείου που υποθέτουμε ότι δεν είναι φτιαγμένο από αγώγιμα μέταλλα. Το πηνίο λήψης είναι ένα μικρό τύλιγμα που μπορεί να ενσωματωθεί εντός του κινητού τηλεφώνου ή στο περίβλημά του

Εξαιτίας της μαγνητικής σύζευξης μεταξύ πομπού και δέκτη, η πηγή μας μπορεί να υπολογίζει τις παραμέτρους για τη διαμόρφωση της δέσμης απλά και μόνο μετρώντας το φορτίο που επιβάλλει το κύκλωμα του δέκτη στο κύκλωμα του πομπού **σχήμα(1.26)**. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στο τηλέφωνο να διαβιβάζει την πληροφορία του καναλιού στην πηγή ισχύος χωρίς επιπλέον επίφορτο. Το πρότυπο MagMIMO -εικόνα 2.9- δοκιμάστηκε με το iPhone 4s και συγκρίθηκε με υπάρχοντες στο εμπόριο φορτιστές iPhone (Energizer Qi, Duracell, RAVpower) αλλά και με άλλες έρευνες που έχουν δημοσιευτεί (WiTricity 2000M, πρότυπο UW).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

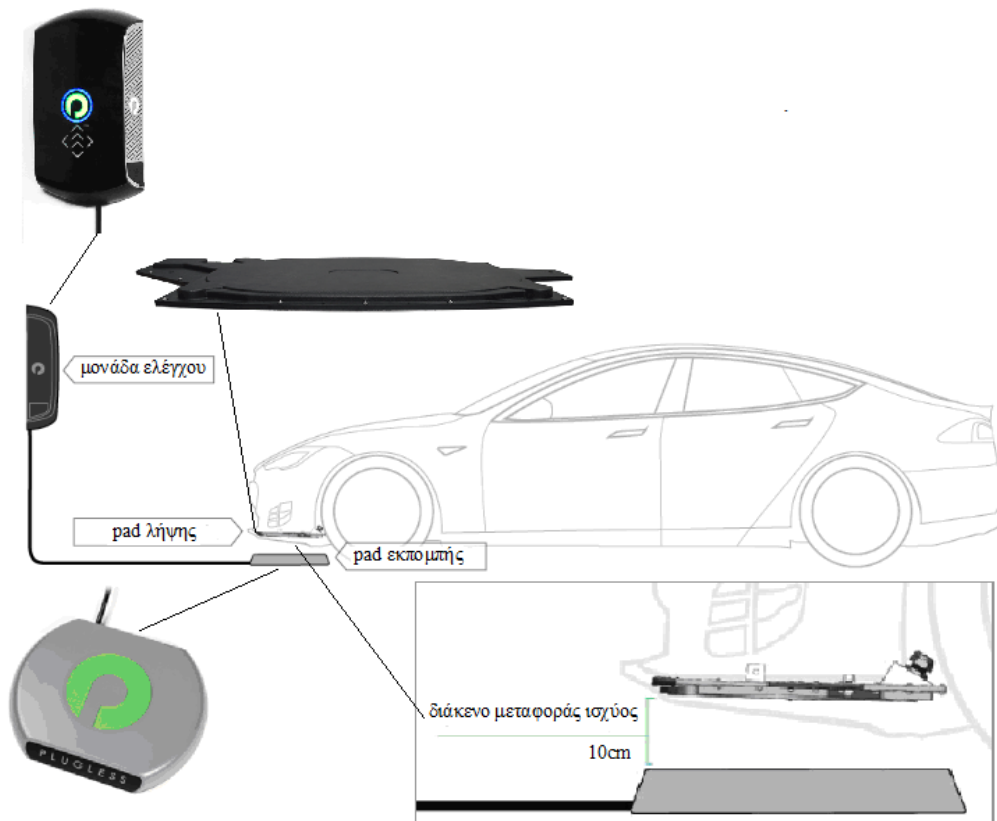
- Το MagMIMO μπορεί να φορτίσει το iPhone σε αποστάσεις μέχρι 40 cm, ενώ εμπορικοί φορτιστές και ακαδημαϊκά συστήματα περιορίζονται σε 1cm και 10 cm αντίστοιχα. Για τις ίδιες αποστάσεις ο απαιτούμενος χρόνος φόρτισης με το MagMIMO είναι συγκριτικά μικρότερος. Φυσικά ο χρόνος αυξάνεται για μεγαλύτερες αποστάσεις. Για παράδειγμα σε αποστάσεις των 30 cm, το MagMIMO φορτίζει το iPhone πλήρως από αρχικά άδεια μπαταρία μέσα σε κατά μέσο όρο 4 ώρες και 50 λεπτά, σε περίπου δηλαδή διπλάσιο χρόνο από όσο χρειάζεται για να φορτιστεί εάν συνδεθεί στην πρίζα.
- Το MagMIMO μπορεί να φορτίσει το iPhone όπως και αν αυτό είναι προσανατολισμένο σε σχέση με το πρώτο, από την απόλυτη ευθυγράμμιση 0 μοιρών μέχρι και την ορθογωνική 90 μοιρών. Αντίθετα οι υπόλοιπες συσκευές φόρτισης απέτυχαν στις 10 μοίρες ή και σε λιγότερες εκτός από την WiTricity 2000M που λειτουργεί για έως και 30 μοίρες.
- Σε πειράματα που διεξήχθησαν με πληθυσμό χρηστών που είχαν το κινητό τους μαζί ενώ δούλευαν σε γραφείο το MagMIMO πέτυχε να φορτίσει το τηλέφωνο ανεξάρτητα από το αν ο χρήστης το είχε μέσα σε μπλούζα, παντελόνι ή τσέπη μπουφάν. Επίσης πραγματοποιήθηκαν πειράματα στα οποία ο χρήστης είχε το τοποθετημένο το τηλέφωνό στο γραφείο σε τυχαία θέση, είτε επάνω σε αυτό, είτε μέσα σε σακίδιο πλάτης είτε επάνω σε άλλα αντικείμενα (π.χ. βιβλία). Σε όλες τις ανωτέρω περιπτώσεις το MagMIMO κατάφερε να φορτίσει το κινητό σε χρόνους φόρτισης που κυμάνθηκαν από 2h:53m έως 6h:15m ανάλογα με τη θέση του κινητού [51].



Σχήμα(1.26). Διάγραμμα βαθμίδων πρότυπου MagMIMO

Η επαγωγική μεταφορά ισχύος βρίσκει εφαρμογή στον **βιομηχανικό αυτοματισμό (eFA – electronic Factory Automation)** - συστήματα μεταφοράς και διαχείρισης υλικών **σχήματα(1.1, 1.2)** - σε **συστήματα φωτισμού, ηλεκτρονικά συστήματα, βιοϊατρικά εμφυτεύματα, συστήματα ασφαλείας** και σε **πλήθος οικιακών και φορητών συσκευών σχήματα(1.3-1.8)**. Όσον αφορά την βιομηχανία η εφαρμογή της IPT στα **αυτομάτως οδηγούμενα οχήματα (AGVs – Automated Guided Vehicles)** αλλά και άλλα βιομηχανικά οχήματα , δίνει τη δυνατότητα λειτουργίας ευέλικτων γραμμών παραγωγής σε εσωτερικό ή εξωτερικό χώρο, ακόμα και σε αντίξοες συνθήκες περιβάλλοντος όπως κρύο ή υγρασία.

Πρόσφατα η επαγωγική φόρτιση έχει επεκταθεί και στην **αυτοκινητοβιομηχανία** όπου λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ανάγκης ηλεκτροδότησης προσωπικών μέσων μεταφοράς μπορεί να προσφέρει σημαντικές δυνατότητες. Η εταιρία Evatran κατασκεύασε το Plugless σχήμα(1.27), ένα αυτόνομο σύστημα επαγωγικής φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα. Το σύστημα Plugless είναι συμβατό με τα μοντέλα Tesla Model S, BMW i3, Nissan Leaf και GEN 1 Chevy Volt και το κόστος του κυμαίνεται στα 4000 USD. Η φόρτιση είναι μονοφασική με ισχύ 3.3 kW ή 7.2 kW και ρεύμα 30 A (Nissan Leaf, Chevy Volt) ή 50 A (Tesla Model S, BMW i3) αντίστοιχα, ανάλογα με το μοντέλο του οχήματος. Διαθέτει σύστημα ανίχνευσης ξένων αντικειμένων και καθοδήγησης ευθυγράμμισης και είναι συμβατό με τα πρότυπα NEC 625 (NFPA 70), SAE J1772, UL2231, CSA170.1. Η απόσταση μεταξύ των τυλιγμάτων εκπομπής και λήψης είναι 10 cm [100]. Το 2014, το σύστημα υποβλήθηκε σε δοκιμές στο Εθνικό Εργαστήριο του Αϊντάχο (INL) του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν απόδοση συστήματος 88.8% για λειτουργία με απόσταση τυλιγμάτων 10cm και ονομαστική ισχύ εξόδου 3.3kW.



Σχήμα (1.27). Δομή συστήματος Plugless της Evatran

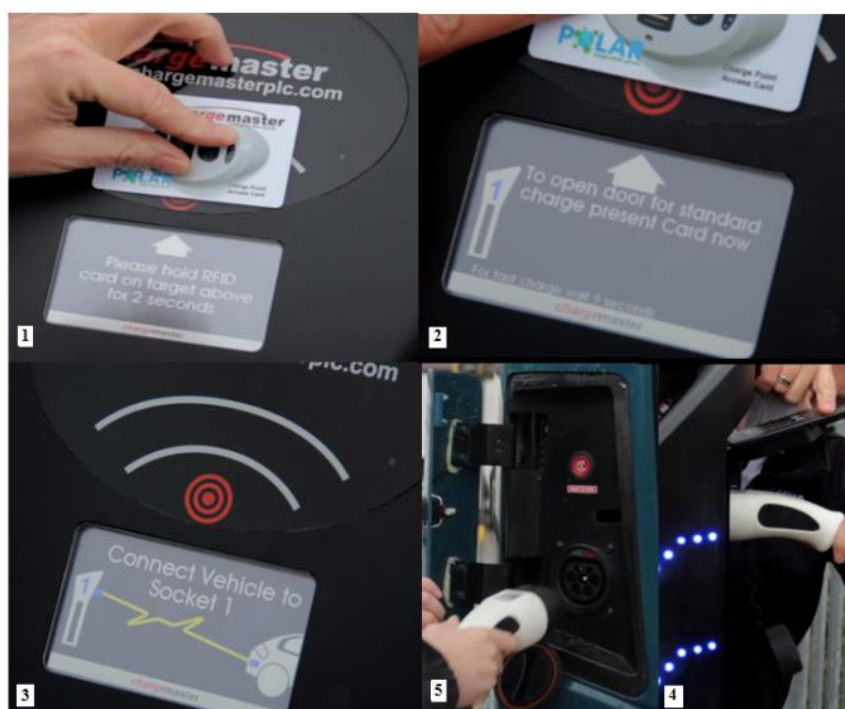
Επιπλέον μετρήθηκαν αποδόσεις πάνω από 90% για μειωμένα επίπεδα ισχύος εξόδου και απόσταση τυλιγμάτων 10cm. Η ένταση του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου μετρήθηκε στα 12.9 A/m (16.1 μ T) και 22.1 V/m αντίστοιχα, σε συνθήκες απόλυτης ευθυγράμμισης των τυλιγμάτων και ενώ ήταν σε απόσταση 10 cm, και για ονομαστική ισχύ εξόδου 3.3kW [101]. Τα βιομηχανικά όρια έκθεσης στο πεδίο είναι 21 A/m (27 μ T) και 83 V/m όπως ορίστηκαν το 2010 από την Διεθνή Επιτροπή για την Προστασία από τις Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Η οδηγία της ICNIRP για τα όρια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διασφαλίζει την ασφάλεια ανθρώπων που βρίσκονται κοντά σε συσκευές με συχνότητα λειτουργίας έως και 100kHz.



Σχήμα(1.28). Πλήρως ηλεκτρικό λεωφορείο με ασύρματη φόρτιση στο Μίλτον Κέινς

Η εταιρία *IPT Technology*, τεχνοβλαστός της *Conductix-Wampfler*, αναπτύσσει εφαρμογές επαγωγικής μεταφοράς ισχύος σε τομείς όπως η διαχείριση βιομηχανικών υλικών και η ηλεκτροκίνηση. *Ηλεκτρικά λεωφορεία (e-buses)* ασύρματα φορτιζόμενα με την τεχνολογία της IPT, είναι σε λειτουργία από το 2002 στη Γένοβα, από το 2003 στο Τορίνο, στην Ουτρέχτη και στο Μίλτον Κέινς από το 2014, στο Λονδίνο από το 2015, στο Χερτόργκενμπος και στο Μπρίστολ από το 2016, στη Μαδρίτη από το 2018.

Το 2014 η γραμμή 7 στο **Μίλτον Κέινς** Μπλέτσεϊ – Γούλβερτον, αντικατέστησε τα λεωφορεία ντίζελ της με οκτώ ηλεκτρικά. Τα ηλεκτρικά αυτά λεωφορεία συνδυάζουν ενσύρματη και ασύρματη φόρτιση ενώ η κατασκευή και η έναρξη πενταετούς δοκιμαστικής λειτουργίας τους ήταν αποτέλεσμα συνολικής προσπάθειας και συνεργασίας του *συμβουλίου του Μίλτον Κέινς* και των εταιριών **eFleet Integrated Service Ltd** (θυγατρικής της Mitsui & Co Europe και της Arup και επικεφαλής του προγράμματος), **Arriva UK Bus** (θυγατρική της Arriva, εταιρίας που διαχειρίζεται δημόσιες συγκοινωνίες στην Ευρώπη), **Wrightbus Limited** που ανέπτυξε και κατασκεύασε τα e-buses, Conductix-Wampfler (παρείχε την τεχνολογία), **Western Power Distribution** (διαχειριστής δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας), **Chargemaster** (εταιρία υποδομών φόρτισης) και **SSE plc** (εταιρία παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας). Τα e-buses είναι εξοπλισμένα με μπαταρία λιθίου 150kW 600V που τους επιτρέπει να διανύουν μία απόσταση 24km μεταξύ των δύο σταθμών επαγωγικής φόρτισης· διανύουν συνολικά 252km την ημέρα ενώ λειτουργούν 17 ώρες ημερησίως 7 ημέρες την εβδομάδα, απομακρύνοντας περίπου 500 τόνους εκπομπών εξατμίσεων CO_2 ετησίως, καθώς επίσης και 45 τόνους άλλων βλαβερών εκπομπών εξατμίσεων. Η τελική δοκιμή και η εκπαίδευση των οδηγών διεξάγεται στο Μίλτον Κέινς προτού η γραμμή ξεκινήσει επίσημα να εξυπηρετεί επιβάτες· υπολογίζεται ότι θα εξυπηρετεί 775,000 το χρόνο. Εκτός από τη φόρτιση με καλώδιο στο σταθμό φόρτισης, η μπαταρία του e-bus φορτίζεται ασύρματα στη στάσεις του λεωφορείου και στο τέλος της διαδρομής του. Η καθοδόν φόρτιση του οχήματος του δίνει τη δυνατότητα να λειτουργεί αμιγώς ηλεκτρικά καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας με μικρότερη και κατά συνέπεια ελαφρύτερη και φθηνότερη μπαταρία λιθίου.



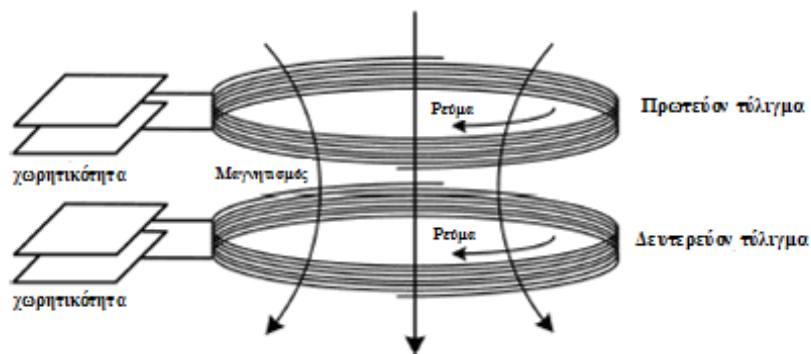
Σχήμα(1.29). Αργή φόρτιση του e-bus με καλώδιο στα 20kW

Κατά τη διάρκεια της νύχτας, τα λεωφορεία φορτίζονται με καλώδιο αργά για πέντε και μισή ώρες στα 20 kW **σχήμα(1.29)** πράγμα που επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ενώ δεν απαιτείται νέος υποσταθμός παροχής ηλεκτρισμού στο σταθμό φόρτισης που είναι

απαραίτητος, όταν ορισμένος αριθμός λεωφορείων φορτίζεται σε μία τοποθεσία. Για να φορτιστεί το όχημα ασύρματα, ο οδηγός τοποθετεί το λεωφορείο επάνω από την πλάκα φόρτισης που είναι εγκατεστημένη στη στάση κάτω από το οδόστρωμα (πρωτεύοντα τυλίγματα), χαμηλώνει την πλάκα που είναι τοποθετημένη κάτω από το όχημα (δευτερεύοντα τυλίγματα) 4cm πάνω από το έδαφος, και έτσι η μπαταρία φορτίζεται επαγωγικά **σχήμα(1.28)**. Το λεωφορείο βρίσκεται στη στάση για 13 λεπτά, με την ασύρματη φόρτιση να διαρκεί 10 λεπτά προτού επιβιβαστούν οι επιβάτες. Η επαγωγική φόρτιση στα 120kW παρέχει στην μπαταρία τα 2/3 της ενέργειας που χρειάζεται το όχημα για να καλύψει τη διαδρομή των 24km. Το 2016 το Μίλτον Κέινς έλαβε χρηματοδότηση 1.75 εκατομμυρίων για 11 νέα ηλεκτρικά λεωφορεία. Το πρόγραμμα δοκιμαστικής λειτουργίας έχει στόχο να αποδείξει ότι μεταφορές χαμηλών εκπομπών μπορεί να είναι οικονομικά αποδοτικές και αποτελεσματικές [112] [113] [114] [115] [116] .

1.2.2. Μέθοδος σύζευξης με μαγνητικό συντονισμό(Magnetic Resonance Coupling)

Η μέθοδος της σύζευξης με μαγνητικό συντονισμό όπως φαίνεται και στο **σχήμα(1.30)**, βασίζεται στη σύζευξη φθινόντων κυμάτων που παράγουν και μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια ανάμεσα σε δύο τυλίγματα σε συντονισμό μέσω μεταβαλλόμενων ή ταλαντουμένων μαγνητικών πεδίων. Καθώς τα δύο συντονιζόμενα τυλίγματα που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα συντονισμού είναι ισχυρά συζευγμένα, μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη απόδοση μετάδοσης ισχύος σε συντονιζόμενα εξωτερικά στοιχεία με μικρή διαρροή.

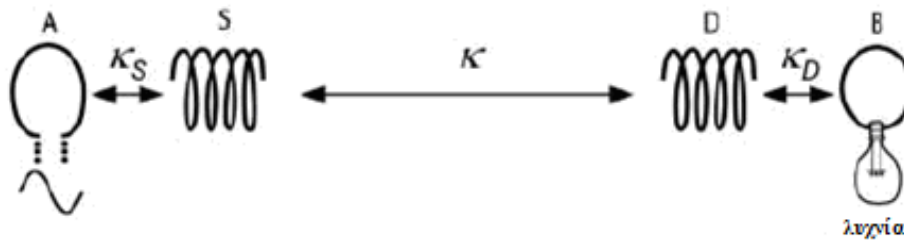


Σχήμα(1.30). Μαγνητικός συντονισμός

Λόγω της ιδιότητας του συντονισμού αυτή η μέθοδος ασύρματης φόρτισης έχει το **πλεονέκτημα** της ατρωσίας σε γειτονικά περιβάλλοντα και δεν απαιτείται ευθεία οπτικής επαφής για τη μεταφορά ενέργειας. Προηγούμενα παραδείγματα μαγνητικά συζευγμένων συντονιστών έχουν δείξει ικανότητα μεταφοράς ισχύος σε μεγαλύτερες αποστάσεις συγκριτικά με την επαγωγική μεταφορά ισχύος και την φόρτιση με RF ακτινοβολία. Επιπλέον μπορεί να εφαρμοστεί και μεταξύ ενός συντονιστή εκπομπής και πολλών συντονιστών λήψης. Έτσι δίνεται η δυνατότητα ταυτόχρονης φόρτισης πολλών συσκευών. Καθώς ο μαγνητικός συντονισμός κατά κανόνα λειτουργεί στο εύρος συχνότητας των **MHz**, οι **συντελεστές**

ποιότητας είναι συνήθως υψηλοί. Με την αύξηση της απόστασης φόρτισης, ο υψηλός συντελεστής ποιότητας αμβλύνει την απότομη μείωση του συντελεστή σύζευξης και κατά συνέπεια της απόδοσης φόρτισης. Συνεπώς είναι δυνατό να επεκτείνουμε αποτελεσματικά την απόσταση φόρτισης σε μερικά μέτρα [2]. Η μέθοδος παρουσιάζεται αναλυτικά σε επόμενα κεφάλαια.

Το 2007, επιστήμονες του MIT πρότειναν μια υψηλής απόδοσης τεχνολογία ασύρματης μεταφοράς ισχύος μεσαίου εύρους. Στην σχετική έρευνα που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Science παρουσιάστηκε πειραματικά η αποδοτική μεταφορά ισχύος - κατά προσέγγιση απόδοση 40% - με χρήση ιδιοσυντονιζόμενων τυλιγμάτων σε καθεστώς ισχυρής σύζευξης, σε αποστάσεις έως και 8 φορές την ακτίνα των τυλιγμάτων.



Σχήμα(1.31). Σχηματική αποτύπωση της πειραματικής διάταξης. Το A είναι μονός χάλκινος βρόχος ακτίνας 25 cm μέρος του κυκλώματος οδήγησης, με έξοδο ημιτονοειδές κύμα συχνότητας 9.9 MHz. Τα S και D είναι αντίστοιχα τα τυλίγματα πηγής και συσκευής λήψης. Το B είναι συρμάτινος βρόχος ενσωματωμένος στο φορτίο (λυχνία). Τα διάφορα k_s συμβολίζουν τις άμεσες συζεύξεις μεταξύ των αντικειμένων που υποδεικνύουν τα βέλη. Η γωνία μεταξύ του τυλιγματος D και του βρόχου A είναι ρυθμισμένη ώστε η άμεση σύζευξή τους να είναι μηδέν. Τα τυλίγματα S και D είναι ομοαξονικά ευθυγραμμισμένα. Οι άμεσες συζεύξεις μεταξύ των B και A και μεταξύ των B και S είναι αμελητέες [49]

Η πειραματική διάταξη - **σχήμα(1.31)** - αποτελούνταν από δύο χάλκινα τυλίγματα, κάθε τύλιγμα και ένα ιδιοσυντονιζόμενο σύστημα. Το ένα, συνδεδεμένο στην AC τροφοδοσία, ήταν η συντονιζόμενη πηγή. Το άλλο τύλιγμα, η συντονιζόμενη συσκευή λήψης, συνδέθηκε σε λυχνία 60 W. Η πηγή ισχύος και η συσκευή λήψης κρέμονταν στον αέρα από nylon κλωστή, σε μεταξύ τους αποστάσεις που κυμαίνονταν από λίγα εκατοστά έως και πάνω από 2.5 μέτρα. Η λυχνία άναψε, ενώ οι θεωρητικές προβλέψεις για υψηλή απόδοση μεταφοράς σε απόσταση επαληθεύτηκαν πειραματικά. Τοποθετώντας διάφορα αντικείμενα μεταξύ των τυλιγμάτων, η ομάδα έδειξε πως το κοντινό μαγνητικό πεδίο μπορεί να μεταφέρει ισχύ διαμέσου συγκεκριμένων υλικών και γύρω από μεταλλικά αντικείμενα.

Η εταιρία **WiTricity** που ιδρύθηκε το ίδιο έτος μετέφερε τη συγκεκριμένη τεχνολογία από το εργαστήριο στην εμπορική παραγωγή. Συγκεκριμένα, έχει προσανατολιστεί στα **συστήματα ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών αυτοκινήτων (EV/PHEV)** και παρέχει τα πρότυπα σχέδιά της σε Tier 1 προμηθευτές, κατασκευαστές αυτοκινήτων και προμηθευτές υποδομών φόρτισης. Η WiTricity έχει προχωρήσει επίσης και στην πώληση αδειών χρήσης της τεχνολογίας της σε εταιρίες όπως οι Delphi, Toyota, Intel, Daihen, Integer, TDK, BRUSA, ATC [50]. Σε σύγκριση με τους επαγωγικούς φορτιστές, τα συστήματα ασύρματης φόρτισης για ηλεκτρικά αυτοκίνητα βασισμένα στην τεχνολογία σύζευξης με μαγνητικό

συντονισμό επιτρέπουν μεγαλύτερη απόσταση φόρτισης και αποδοτικότητα. Πειράματα πέτυχαν απόδοση πάνω από 95 % σε διάκενο 22.5cm.

Το σύστημα αξιολόγησης DRIVE 11 είναι το διαθερματικό πρότυπο σύστημα της WiTricity για ασύρματη φόρτιση κατά τη διάρκεια στάθμευσης (Park-and-Charge) ηλεκτρικών και υβριδικών αυτοκινήτων.



Σχήμα(1.32). Σύστημα ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου από την WiTricity

Στον τοίχο είναι εγκατεστημένη η μονάδα οδήγησης του τυλίγματος πηγής (ηλεκτρονικά πηγής) μετατρέπει το AC ρεύμα της εγκατάστασης σε κατάλληλο ρεύμα RF συχνότητας. Το pad (βάση) φόρτισης - μονάδα εδάφους - είναι τοποθετημένο στο δάπεδο του γκαράζ και περιέχει τον συντονιστή πηγής που μεταφέρει την ενέργεια, ενώ το pad λήψης περιέχει τον συντονιστή συσκευής που συλλέγει την ενέργεια αυτή και είναι ενσωματωμένο στο κάτω μέρος του αυτοκινήτου. Η έξοδος του συντονιστή συσκευής συνδέεται με ηλεκτρονικά που μετατρέπουν την ενέργεια σε DC τάση κατάλληλη για τη φόρτιση της μπαταρίας του αυτοκινήτου **σχήματα(1.33, 1.34)**. Έτσι το αυτοκίνητο ενώ είναι σταθμευμένο - σε θέση τέτοια ώστε τα pad εκπομπής και λήψης να είναι ευθυγραμμισμένα - μπορεί να φορτίζει **σχήμα(1.32)**.



Σχήμα(1.33). Διάγραμμα βαθμίδων του συστήματος ασύρματης φόρτισης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου με μαγνητικό συντονισμό

Σύμφωνα με την εταιρία, είναι ικανό να φορτίσει τα οχήματα σε **επίπεδα ισχύος 3.6 kW, 7.7 kW ή 11 kW σύμφωνα και με τα διεθνή βιομηχανικά πρότυπα SAE TIR J2954™ και IEC/ISO**, έχει απόδοση (μετρημένη από το δίκτυο έως την μπαταρία) 90-93% και εκπομπές σύμφωνες με τα επιτρεπτά όρια (FCC, CISPR, ICNIRP). Η φόρτιση γίνεται απευθείας στην μπαταρία με σκοπό την εξάλειψη απωλειών του συστήματος που σχετίζονται με τους DC-DC μετατροπείς και φορτιστές επί του οχήματος. Ο χρόνος φόρτισης είναι ο ίδιος με τους συμβατικούς ενσύρματους φορτιστές. Το σύστημα είναι διαθέσιμο για όλα τα ύψη οχημάτων από το έδαφος:

- χαμηλό (sports cars) 10cm - 15cm (Z1 class)
- μεσαίο (sedan) 14cm - 21cm(Z2 class)
- υψηλό (SUV) 17cm – 25cm(Z3 class)

Το DRIVE 11 είναι κατάλληλο για οικιακή χρήση με το pad φόρτισης εγκατεστημένο επί του εδάφους (ιδιωτικός χώρος στάθμευσης) αλλά και για δημόσια χρήση (δημόσιος χώρος στάθμευσης) με το pad εγκατεστημένο κάτω από το οδόστρωμα σαν υποδομή κοινής ωφελείας. Έχει ανοχή στην κακή ευθυγράμμιση +/- 10cm για πλευρική απόκλιση και +/- 7.5cm για απόκλιση από εμπρός προς τα πίσω. Διαθέτει αισθητήρα ανίχνευσης ξένου σώματος - *Foreign Object Detection (FOD) sensor* -, αισθητήρα προστασίας έμβιων όντων – *Living Object Protection (LOP) sensor* – και αισθητήρα ανίχνευσης θέσης – *Position Detection (PD) sensor* [50].



Σχήμα(1.34). Αριστερά :DRIVE 11, Δεξιά: Συντονιστής συσκευής που περιέχεται στο pad λήψης

Το 2017, η Witricity ανακοίνωσε τη συμμετοχή της στο **project STILLE**. Το project ξεκίνησε το Μάιο του 2016 και ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2018. Χρηματοδοτήθηκε από το Ομοσπονδιακό Υπουργείο Οικονομικών και Ενέργειας της Γερμανίας (BMW) στα πλαίσια

προγράμματος **ELEKTRO POWER II** που στοχεύει στην υλοποίηση του εθνικού σχεδίου της Γερμανίας για ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Σκοπός του STILLE ήταν να συγκεντρώσει τεχνικά έγκυρες προτάσεις για την καθιέρωση διεθνών προτύπων που αφορούν διαλειτουργικά συστήματα ασύρματης μεταφοράς ενέργειας διαφόρων επιπέδων ισχύος (7.7kW - 22 kW) για ηλεκτρικά οχήματα, και να ενεργοποιήσει την διάθεσή τους στην αγορά από το 2020 και μετά. Συντονιστής του project ήταν η P3 Automotive GmbH σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο του Άαχεν (ika – RWTH), το Πολυτεχνείο του Braunschweig (IMAB – TU Braunschweig) και το Πανεπιστήμιο Zerpelin. Συμμετείχαν οι εταιρίες Audi AG, BMW AG, Robert BOSCH GmbH, Continental, Daimler AG, Qualcomm Technologies Inc., Toyota Motorsport GmbH και Toyota Motor Europe NV/SA, TÜV SÜD AG [99].

Τον Φεβρουάριο του 2019 η Witricity απέκτησε συγκεκριμένη πλατφόρμα και πνευματικά δικαιώματα της **Qualcomm** Incorporated και Qualcomm Technologies, με αποτέλεσμα πάνω από 1500 πατέντες και εφαρμογές της δεύτερης σχετικές με την ασύρματη φόρτιση, να έρχονται στην κατοχή της.

Η BMW είναι η πρώτη αυτοκινητοβιομηχανία που διαθέτει στην αγορά ηλεκτρικό όχημα με δυνατότητα ασύρματης φόρτισης. Το **BMW 530e iPerformance** είναι το πρώτο plug-in υβριδικό που ενσωματώνει τέτοια τεχνολογία σε συνεργασία με την Witricity και η παραγωγή του ξεκίνησε το 2018 **σχήμα(1.35)** [50][82].



Σχήμα(1.35). BMW 530e iPerformance με ισχύ 248 hp , κατανάλωση καυσίμου 2.1-2.9 l/ 100 km και εκπομπές CO2 49-44 g/km [82]

Το σύστημα ασύρματης φόρτισης με απόδοση 85%, έχει ισχύ 3.2 kW παρέχοντας τη δυνατότητα πλήρους φόρτισης της μπαταρίας (μπαταρία λιθίου 9.2 kWh) σε περίπου 3.5 ώρες. Η φόρτιση ξεκινά αυτόματα με τη διακοπή λειτουργίας του κινητήρα. Το σύστημα βοηθά τον οδηγό μέσω σύνδεσης WiFi μεταξύ του σταθμού φόρτισης και του οχήματος να κατευθύνει το όχημα στη σωστή θέση στάθμευσης **σχήμα (1.36)**. Η θέση μπορεί να αποκλίνει έως 7cm κατά μήκος του οχήματος και έως 14cm πλευρικά. Η βάση φόρτισης μπορεί να εγκατασταθεί και σε εξωτερικό χώρο και να χρησιμοποιηθεί ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών ενώ παρακολουθείται και τίθεται εκτός λειτουργίας σε περίπτωση ανίχνευσης ξένων σωμάτων.



Σχήμα (1.36). Καθοδήγηση του οδηγού στη σωστή θέση στάθμευσης του οχήματος από το σύστημα μέσω αισθητήρα ανίχνευσης θέσης

Το μέγεθος ενός WiTricity δέκτη είναι δύσκολο να μειωθεί, αφού για να λειτουργήσει απαιτείται κατανεμημένη χωρητικότητα τυλίγματος. Αυτό αποτελεί σημαντική **πρόκληση στην εφαρμογή της τεχνολογίας της σε φορητές συσκευές**. Η σύζευξη με μαγνητικό συντονισμό μπορεί να φορτίσει πολλές συσκευές ταυτόχρονα με συνολικά βελτιωμένη απόδοση του συστήματος σε σχέση με τη φόρτιση κάθε συσκευής ξεχωριστά. Η αμοιβαία σύζευξη των

πηνίων λήψης μπορεί να προκαλέσει παρεμβολή και γι'αυτό απαιτείται κατάλληλος συντονισμός του συστήματος [2].

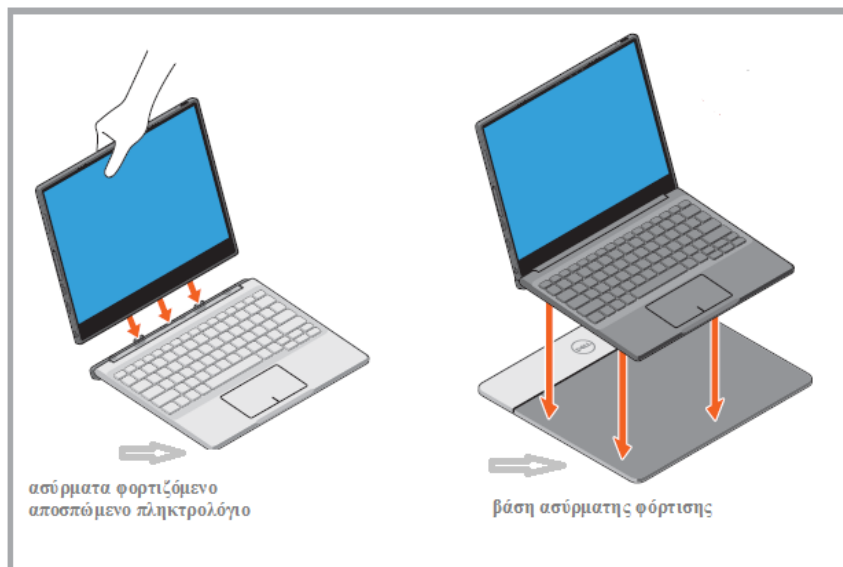
Η φόρτιση κοντινού πεδίου μεσαίας ισχύος (με ισχύ λειτουργίας που κυμαίνεται από μερικά έως δεκάδες watt), εφαρμόστηκε πρωτίστως σε **ιατρικές συσκευές και εφαρμογές της καθημερινότητας**. Στη βιβλιογραφία συναντάμε πολλά μοντέλα συσκευών βιοϊατρικών εμφυτευμάτων που λειτουργούν με επαγωγική φόρτιση, με σύγχρονες εφαρμογές τους να επιτυγχάνουν πάνω από 50% συνολική απόδοση φόρτισης σε διάκενο 10 mm. Ιατρικές εμφυτεύσιμες συσκευές με τη μέθοδο σύζευξης με μαγνητικό συντονισμό φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα διείσδυσης. Καθώς η απόσταση φόρτισης είναι πολύ μεγαλύτερη από τις διαστάσεις των τυλιγμάτων, η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα για μικρότερα μεγέθη εμφυτευμάτων με φυσιολογικό εύρος φόρτισης. Στη βιβλιογραφία συναντάται σύστημα ασύρματης μεταφοράς ισχύος για βιοϊατρικά εμφυτεύματα με 3cm τύλιγμα εκπομπής, 6cm τύλιγμα λήψης και 60 % απόδοση για 20cm απόσταση τυλιγμάτων.

Η Witricity έχει προσανατολιστεί και στον τομέα της ιατρικής με σκοπό τη χρήση της τεχνολογίας της για την ανάπτυξη εφαρμογών που θα βελτιώσουν δραματικά την εμπειρία του ασθενούς και την ποιότητα ζωής του. Σύμφωνα με την εταιρία, η συσκευή λήψης ενέργειας μπορεί να εμφυτευθεί βαθιά μέσα στο σώμα, αρκετά εκατοστά από το δέρμα και αντίστοιχα η πηγή ενέργειας μπορεί να απέχει αρκετά εκατοστά από την επιφάνεια του δέρματος με την υψηλή απόδοση ενέργειας να διατηρείται. Ιατρικές συσκευές που χρήζουν κινητικότητας και εύκολης διαδικασίας φόρτισης μπορούν να ενσωματώσουν την τεχνολογία ασύρματης φόρτισης :

- Ιατρικά εμφυτεύματα όπως διατάξεις υποβοήθησης κοιλίας, βηματοδότες, απινιδωτές
- Συσκευές νευροδιέγερσης
- Ιατρικά όργανα χειρός
- Τροχήλατα νοσηλείας εξοπλισμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή και άλλα εργαλεία διάγνωσης

Το 2015, οι εταιρίες Witricity και **Greatbatch** ανακοίνωσαν τα σχέδια της δεύτερης να σχεδιάσει και να αναπτύξει προηγμένες λύσεις ασύρματης φόρτισης για χειρουργικό και φορητό ιατρικό εξοπλισμό. Το 2016 η συνεργασία των δύο εταιριών διευρύνθηκε ώστε να καλύψει ένα μεγαλύτερο φάσμα ιατρικών συσκευών και συστημάτων όπως εμφυτεύσιμες συσκευές με μεγαλύτερη ευελιξία, καλύτερη επίδοση και υψηλότερα επίπεδα μεταφοράς ισχύος.

Το 2017, η εταιρία **Dell** ανακοίνωσε την κυκλοφορία του **Latitude 7285 2-in-1**, του πρώτου φορητού υπολογιστή (laptop) με δυνατότητα ενσύρματης αλλά και ασύρματης φόρτισης. Το laptop που ενσωματώνει την τεχνολογία της Witricity, έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί σε ασύρματα φορτιζόμενο πληκτρολόγιο (αποσπώμενο) και να τοποθετηθεί σε βάση ασύρματης φόρτισης (wireless charging mat) όπου θα φορτίζεται (ισχύς 30 W), ενώ ο χρήστης θα μπορεί παράλληλα να εργάζεται σε αυτό **σχήμα(1.37)**. Η βάση φόρτισης είναι κατάλληλη και για φόρτιση συσκευών με δέκτες πιστοποιημένους από την AirFuel (Category 5 AirFuel certified PRUs), σε ισχύ 20 W.

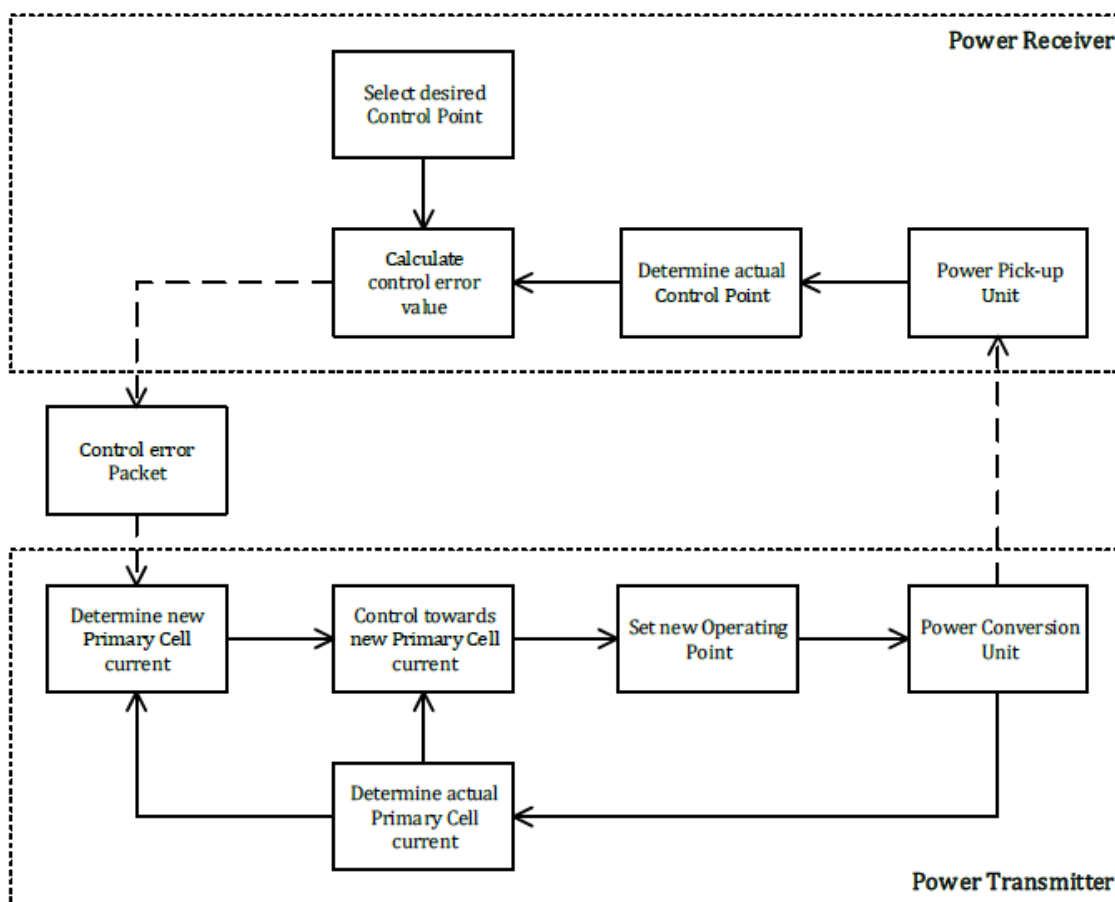


Σχήμα(1.37). Φορητός υπολογιστής με δυνατότητα ασύρματης φόρτισης από την Dell

1.2.3. Διεθνή πρότυπα ασύρματης φόρτισης φορητών συσκευών

Τα πρότυπα **Qi** και **A4WP** αποτελούν τα κύρια πρότυπα ασύρματης φόρτισης φορητών συσκευών, και υποστηρίζονται από μεγάλες εταιρίες κατασκευής έξυπνων τηλεφώνων:

Qi: Το πρότυπο δημιουργήθηκε από την **Κοινοπραξία Ασύρματης Φόρτισης (Wireless Power Consortium – WPC)** στην οποία είναι μέλη πάνω από 650 εταιρίες, με σκοπό την ασύρματη μεταφορά ισχύος με τιμές ≤ 5 W (Baseline Power Profile) και ≤ 15 (Extended Power Profile), σε μικρές ηλεκτρονικές συσκευές, κυρίως smartphones. Αυτή τη στιγμή στην αγορά κυκλοφορούν πάνω από 3500 προϊόντα με πιστοποίηση Qi ενώ η WPC σχεδιάζει να επεκτείνει το πρότυπο και σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος (30-60 W) ώστε να συμπεριλάβει συσκευές όπως laptop και tablet [103]. Το πρότυπο καθορίζει τη διαλειτουργική ασύρματη μεταφορά ισχύος και την επικοινωνία δεδομένων μεταξύ ενός ασύρματου φορτιστή και μίας φορτιζόμενης συσκευής. Το Qi επιτρέπει στη συσκευή να έχει τον έλεγχο της διαδικασίας φόρτισης. Ο φορτιστής έχει τη δυνατότητα να προσαρμόσει την πυκνότητα της μεταφερόμενης ισχύος όπως αιτείται η συσκευή μέσω αποστολής σήματος σε αυτόν. Κάποιες συσκευές με Baseline Power Profile υποστηρίζουν επέκταση FOD ενώ για αυτές με Extended Power Profile η επέκταση είναι υποχρεωτική. Η FOD χρησιμοποιεί αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του πομπού ισχύος (Power Transmitter) και του δέκτη ισχύος (Power Receiver) για τη βελτίωση των επιλογών που αφορούν την ανίχνευση ξένων σωμάτων (Foreign Object Detection).



Σχήμα(1.41). Βρόχος ελέγχου μεταφοράς ισχύος σε WPT σύστημα με πρότυπο Qi

Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς ισχύος, πομπός και δέκτης ελέγχουν το ποσό της μεταφερόμενης ισχύος **σχήμα(1.41)**. Ο δέκτης επιλέγει το επιθυμητό σημείο ελέγχου (desired Control Point) δηλαδή την επιθυμητή τάση ή το επιθυμητό ρεύμα εξόδου, τη θερμοκρασία συσκευής κτλ. Επιπλέον προσδιορίζει το πραγματικό σημείο ελέγχου της (actual Control Point). Χρησιμοποιώντας αυτά τα δύο σημεία, ο δέκτης υπολογίζει την τιμή του σφάλματος ελέγχου (control error value) – για παράδειγμα υπολογίζοντας τη σχετική διαφορά δύο τάσεων ή ρευμάτων εξόδου. Το αποτέλεσμα είναι αρνητικό εάν ο δέκτης απαιτεί λιγότερη ενέργεια ώστε να φτάσει το επιθυμητό σημείο ελέγχου, και θετικό εάν χρειάζεται περισσότερη. Ακολούθως ο δέκτης μεταδίδει την τιμή σφάλματος ελέγχου στον πομπό ισχύος. Ο πομπός χρησιμοποιεί την τιμή σφάλματος και την πραγματική τιμή του ρεύματος στο πρωτεύον τύλιγμα (actual Primary Cell current) για να προσδιορίσει ένα καινούριο ρεύμα πρωτεύοντος (new Primary Cell current). Έτσι ο πομπός προσεγγίζει ένα νέο σημείο λειτουργίας (new Operating Point) εφαρμόζοντας στο πρωτεύον τύλιγμα νέες τιμές πλάτους, συχνότητας και κύκλου λειτουργίας AC τάσης.

Το πρότυπο Qi χρησιμοποιεί τεχνολογία επαγωγικής σύζευξης με εύρος φόρτισης εντός των 40mm και σε συχνότητες 87-205 KHz. Υποστηρίζονται δύο μέθοδοι τοποθέτησης της συσκευής του κινητού τηλεφώνου επάνω στην επιφάνεια φόρτισης:

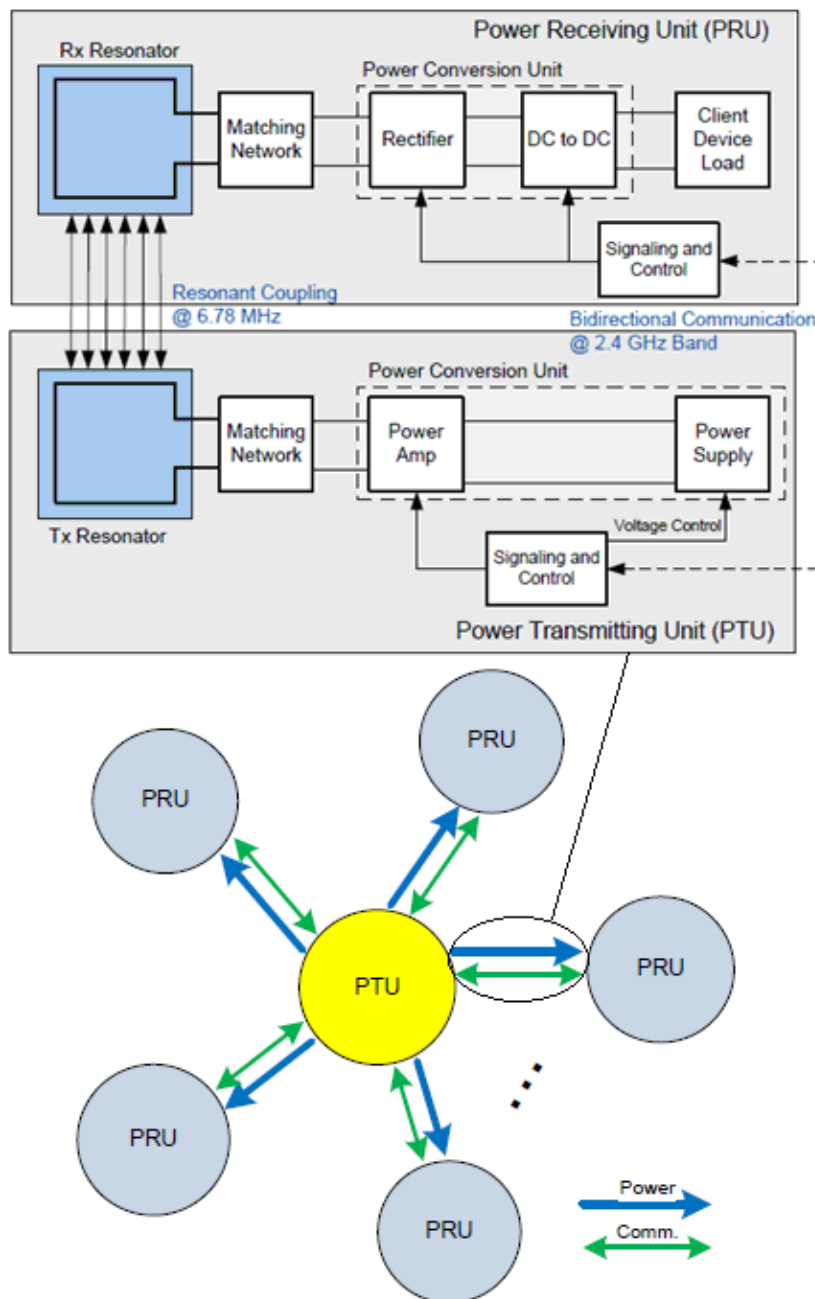
- Κατευθυνόμενη τοποθέτηση της συσκευής σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας φόρτισης
- Ελεύθερη τοποθέτηση της συσκευής σε τυχαία θέση της επιφάνειας φόρτισης καθώς η βάση φόρτισης μπορεί να παρέχει ισχύ διαμέσου οποιουδήποτε σημείου της επιφάνειάς της **[104]**

PRU	P_{max} εξόδου συντονιστή PRU	Παραδείγματα εφαρμογών
Category 1	για περαιτέρω έρευνα	BT Headset
Category 2	≤ 3.5	Feature Phone
Category 3	≤ 6.5	Smart Phone
Category 4	≤ 13	Tablet, Phablet
Category 5	≤ 25	Small Form Factor Laptop
Category 6	≤ 37.5	Regular Laptop
Category 7	≤ 50	

Κλάση PTU	P_{max} εξόδου συντονιστή PTU (W)	Ελάχιστες απαιτήσεις κατηγορίας PRU	Μικρότερος αριθμός υποστηριζόμενων συσκευών
Class 1	≥ 2	1 x Category 1	1 x Category 1
Class 2	≥ 10	1 x Category 3	2x Category 2
Class 3	≥ 16	1 x Category 4	2x Category 3
Class 4	≥ 33	1 x Category 5	2x Category 3
Class 5	≥ 50	1 x Category 6	2x Category 3
Class 6	≥ 70	1 x Category 7	2x Category 3

Σχήμα(1.42). Κατηγορίες PRU(επάνω), Ταξινόμηση PTU(κάτω)

A4WP: Το πρωτόκολλο A4WP (Alliance for Wireless Power), αναπτύχθηκε από την **Airfuel Alliance**, μία παγκόσμια ένωση ανάπτυξης προτύπων ασύρματης μεταφοράς ισχύος με τεχνολογία σύζευξης με μαγνητικό συντονισμό και RF ακτινοβολία. Στην ένωση συμμετέχουν εταιρίες από διάφορους κλάδους της βιομηχανίας σχετικούς με κάθε δραστηριότητα που συντελεί στην αλυσίδα αξίας της ασύρματης φόρτισης. Το σύστημα ασύρματης φόρτισης της Airfuel με μαγνητικό συντονισμό μεταφέρει ισχύ από μια μονάδα μεταφοράς ισχύος (*Power Transmission Unit – PTU*) σε μία ή περισσότερες μονάδες λήψης ισχύος (*Power Receiver Units – PRUs*). Η συχνότητα μεταφοράς ισχύος είναι 6.78 MHz ενώ μία μόνο PTU μπορεί να φορτίσει έως και οκτώ συσκευές ανάλογα με τη γεωμετρία πομπού και δέκτη καθώς και τα επίπεδα ισχύος **σχήμα (1.42)**.



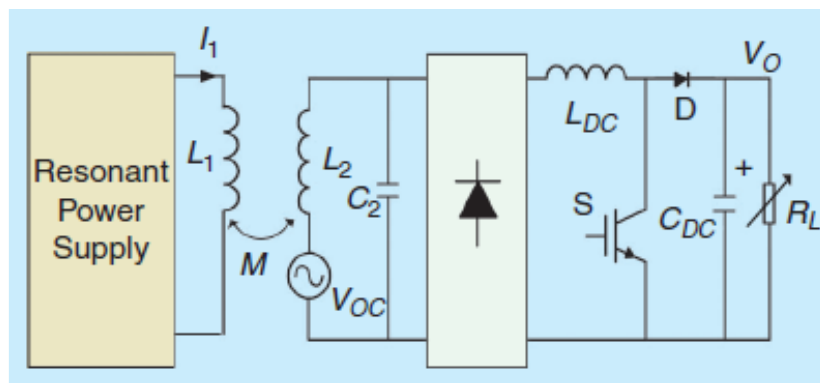
Σχήμα(1.43). Δομή WPT συστήματος της Airfuel

Η σύνδεση *bluetooth χαμηλής ενέργειας (Bluetooth Low Energy – BLE link)*, του συστήματος εξυπηρετεί τον έλεγχο των επιπέδων ισχύος και την αναγνώριση έγκυρων φορτίων. Οι PTU και PRU, αποτελούνται από τρεις κύριες λειτουργικές μονάδες, τη μονάδα συντονισμού και προσαρμογής (Resonator and Matching Network Unit), τη μονάδα μετατροπής ισχύος (Power Conversion Unit) και τη μονάδα σήματος και ελέγχου (Signaling and Control Unit). Το πρωτόκολλο ελέγχου και επικοινωνίας του WPT δικτύου υποστηρίζει ημιαμφίδρομη επικοινωνία και χρησιμοποιείται για την αποστολή μέσω σημάτων χαρακτηριστικών της PRU στην PTU, καθώς και για την παροχή ανατροφοδότησης ώστε να καταστεί δυνατή η βελτιστοποίηση της απόδοσης, η προστασία από υψηλή τάση και η αποφυγή μειωμένης τάσης. Η αμφίδρομη επικοινωνία PTU και PRUs επιτρέπει την αναγνώριση συμβατότητας της συσκευής και τη ανταλλαγή πληροφοριών διαπραγμάτευσης της ισχύος.

Βασικά *πλεονεκτήματα* του A4WP σε σχέση με το Qi είναι η μεγαλύτερη ευελιξία της διαδικασίας φόρτισης (δεν απαιτείται ακριβής ευθυγράμμιση των τυλιγμάτων εκπομπής και λήψης, η απόσταση φόρτισης είναι μεγαλύτερη) και κυρίως η δυνατότητα φόρτισης πολλών συσκευών διαφορετικής ισχύος ταυτόχρονα **σχήμα(1.43)** Επιπλέον, ξένα αντικείμενα μπορούν να τοποθετηθούν επάνω στον A4WP φορτιστή ενώ βρίσκεται σε λειτουργία, χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις. Έτσι μπορεί να επιτευχθεί μετάδοση ισχύος και μέσα από υλικά όπως ξύλο, πέτρα ή τσιμέντο, πράγμα που καθιστά εύκολη την εγκατάσταση της PTU [105] [106].

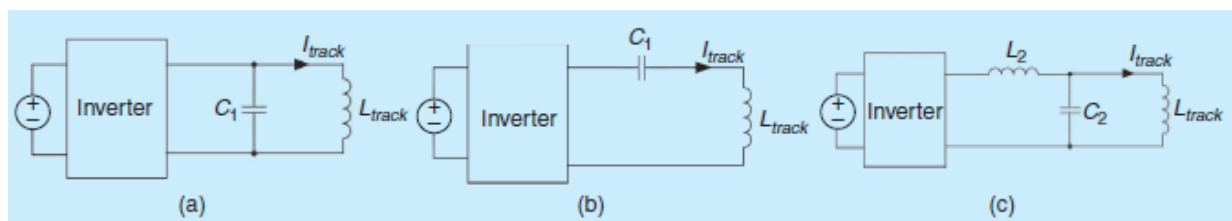
1.3. Σύγκριση μεθόδων ασύρματης φόρτισης

Οι μέθοδοι ασύρματης φόρτισης κοντινού πεδίου (επαγωγή σύζευξη και σύζευξη με μαγνητικό συντονισμό) βασίζονται στους ίδιους φυσικούς νόμους (Faraday, Lenz) και επί της ουσίας και στις δύο περιπτώσεις μιλάμε για φόρτιση με επαγωγή. Η ασύρματη φόρτιση με μαγνητικό συντονισμό αποτελεί την εξέλιξη των συστημάτων φόρτισης με επαγωγή, με την προσθήκη σε αυτά κυκλωμάτων συντονισμού για αντιστάθμιση και ρύθμιση του συντελεστή ισχύος **σχήματα(1.38,1.39)**.



Σχήμα(1.38). Ισοδύναμο κύκλωμα IPT συστήματος

Στη βιβλιογραφία συχνά αναφέρονται σαν δύο ξεχωριστές μέθοδοι, αντιθέτως σε κάποιες πηγές η έννοια της ασύρματης μεταφοράς ισχύος (*WPT*) και της επαγωγικής μεταφοράς ισχύος (*IPT*) είναι ταυτόσημες.



Σχήμα (1.39). Τροφοδοσίες σταθερής συχνότητας. (a) με συντονισμό παράλληλα (b) με συντονισμό σε σειρά (c) LCL αντιστάθμιση με χρήση επιπλέον πηνίου [17]

Στο **σχήμα(1.40)** γίνεται σύγκριση όλων των μεθόδων ασύρματης φόρτισης, κοντινού και μακρινού πεδίου.

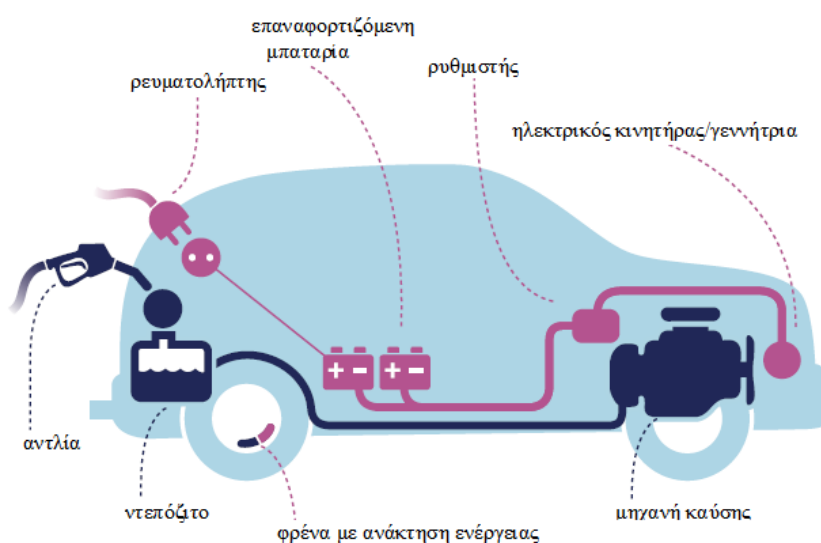
Τεχνική ασύρματης φόρτισης	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Αποδοτική απόσταση φόρτισης
Επαγωγική Σύζευξη	Ασφαλής για τον άνθρωπο, απλή εφαρμογή	Μικρή απόσταση φόρτισης, αύξηση θερμοκρασίας, αυστηρή ευθυγράμμιση τυλιγμάτων, ακατάλληλη για εφαρμογές που κινούνται στο χώρο	Από μερικά χιλιοστά έως μερικά εκατοστά
Σύζευξη με μαγνητικό συντονισμό	Χαλαρή ευθυγράμμιση τυλιγμάτων, ταυτόχρονη φόρτιση πολλών συσκευών, υψηλή απόδοση φόρτισης	Πολύπλοκη εφαρμογή, περιορισμός στην απόσταση φόρτισης, ακατάλληλη για εφαρμογές που κινούνται στο χώρο	Από μερικά εκατοστά έως μερικά μέτρα
RF ακτινοβολία	Μεγάλη απόσταση φόρτισης, κατάλληλη για εφαρμογές που κινούνται στο χώρο	Χαμηλή απόδοση φόρτισης, φόρτιση σε ευθεία οπτικής επαφής, κίνδυνοι για την υγεία σε περίπτωση έκθεσης σε υψηλής πυκνότητας RF ακτινοβολία	Από αρκετά μέτρα έως μερικά χιλιόμετρα

Σχήμα(1.40). Σύγκριση μεθόδων ασύρματης φόρτισης

2.Η φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος

2.1.Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων

Την τελευταία δεκαετία, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων παρουσίασαν μια σειρά από εναλλακτικές τεχνολογίες κινητήρων. Αυτές περιλαμβάνουν ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας με κάποια ειδικά εξαρτήματα όπως μπαταρία, ηλεκτρικός κινητήρας, ρυθμιστής κινητήρα και φρένα με ανάκτηση ενέργειας. Από την άλλη τα υβριδικά οχήματα περιλαμβάνουν τα ίδια κύρια μέρη όπως η μπαταρία καθώς επίσης κύριο ή βοηθητικό κινητήρα συμβατικής τεχνολογίας και συνδεδεμένο δοχείο καυσίμου (ρεζερβουάρ).



Σχήμα(2.1). Κύρια μέρη ενός ηλεκτρικού οχήματος

Τα κύρια μέρη ενός ηλεκτρικού οχήματος **σχήμα(2.1)** είναι:

Ηλεκτρικός κινητήρας: Ο ηλεκτρικός κινητήρας κινεί το όχημα χρησιμοποιώντας την ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη μπαταρία. Μπορεί να λειτουργήσει και σαν γεννήτρια για την μπαταρία παράγοντας ηλεκτρισμό κατά την επιβράδυνση του οχήματος. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών μηχανών καύσης. Σε αυτά περιλαμβάνονται η υψηλότερη απόδοση (ένα ηλεκτρικό όχημα μετατρέπει περίπου το 80% της ενέργειάς του σε αξιοποιήσιμη ενέργεια συγκριτικά με το 20% ενός συμβατικού οχήματος), υψηλή αντοχή, χαμηλότερα κόστη συντήρησης και χαμηλότερα επίπεδα θορύβου σε μικρές ταχύτητες. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα EV είναι επαγωγής και διάφοροι τύποι κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Σε γενικές γραμμές οι διάφορες τεχνολογίες που υποστηρίζουν τους ηλεκτρικούς κινητήρες θεωρούνται αρκετά ανεπτυγμένες από άποψη απόδοσης και αξιοπιστίας. Ωστόσο κάποια κόστη που σχετίζονται με την παραγωγή τους είναι πιθανόν να μειωθούν στο μέλλον χάρη σε πιο αποτελεσματικά συστήματα παραγωγής, βελτιωμένο σχεδιασμό και μικρότερα μεγέθη κινητήρα.

Μπαταρίες: Η μπαταρία σε ένα ηλεκτρικό όχημα αποθηκεύει την ενέργεια που χρησιμοποιεί ο κινητήρας για να του δώσει κίνηση. Τα περισσότερα EV χρησιμοποιούν μπαταρίες λιθίου οι οποίες έχουν σαφή πλεονεκτήματα σε σχέση με τα περισσότερα άλλα είδη μπαταριών όπως η μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας και διάρκεια ζωής. Παρόλα αυτά, τα σημερινά συστήματα μπαταριών είναι συνήθως βαριά και ακριβά. Επιπλέον, ακόμα και αν οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή, με την πάροδο του χρόνου χάνουν σε χωρητικότητα σαν αποτέλεσμα της γήρανσης και των επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης. Η βελτίωση των τεχνολογιών μπαταρίας αποτελεί σημαντική προτεραιότητα για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη.

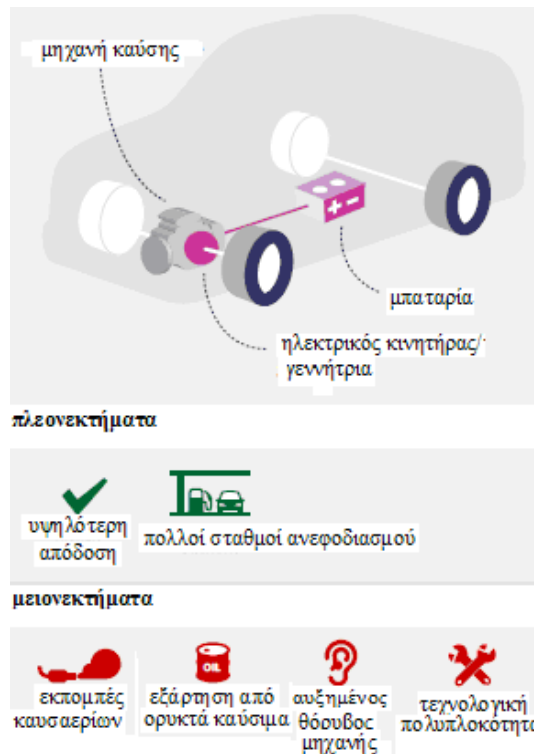
Ρυθμιστής: Ο ρυθμιστής ηλεκτρικού κινητήρα καθορίζει τη λειτουργία του κινητήρα, ρυθμίζοντας το παρεχόμενο σε αυτόν ποσό ενέργειας από τη μπαταρία.

Φρένα με ανάκτηση ενέργειας: Τα συστήματα πέδησης με ανάκτηση ενέργειας μετατρέπουν σε ηλεκτρισμό μεγάλο ποσοστό ενέργειας που θα χανόταν με τη μορφή θερμότητας κατά τη διάρκεια της πέδησης του οχήματος, βοηθώντας έτσι ώστε η μπαταρία να παραμείνει φορτισμένη. Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν και μία μικρή ηλεκτρική γεννήτρια και είναι απαραίτητο να λειτουργούν μαζί με τα συμβατικά φρένα τριβής. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των φρένων με ανάκτηση ενέργειας, εκτός από τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης της ενέργειας του οχήματος, είναι η επέκταση της διάρκειας ζωής του συστήματος πέδησης, καθώς αυτό δεν φθείρεται γρήγορα.

Βοηθητικός εξοπλισμός: Όπως και στα συμβατικά οχήματα, τα ηλεκτρικά οχήματα ενσωματώνουν διάφορους τύπους βοηθητικού εξοπλισμού όπως υδραυλικό τιμόνι (Electric Power Steering – EPS), υποβοήθηση πέδησης (Brake Support), φώτα, συστήματα ψύξης - θέρμανσης για τους επιβάτες και συστήματα ψύξης - θέρμανσης της μπαταρίας. Ειδικά κατά τη διάρκεια ψυχρών περιόδων, τα συστήματα αυτά μπορεί να καταναλώσουν μεγάλο μέρος χωρητικότητας της μπαταρίας και ενδεχομένως να μειώσουν το εύρος οδήγησης. Ως εκ τούτου η βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας βοηθητικού εξοπλισμού είναι σημαντική για τα ηλεκτρικά οχήματα.

Τα ηλεκτρικά οχήματα συνοψίζονται στις εξής κατηγορίες:

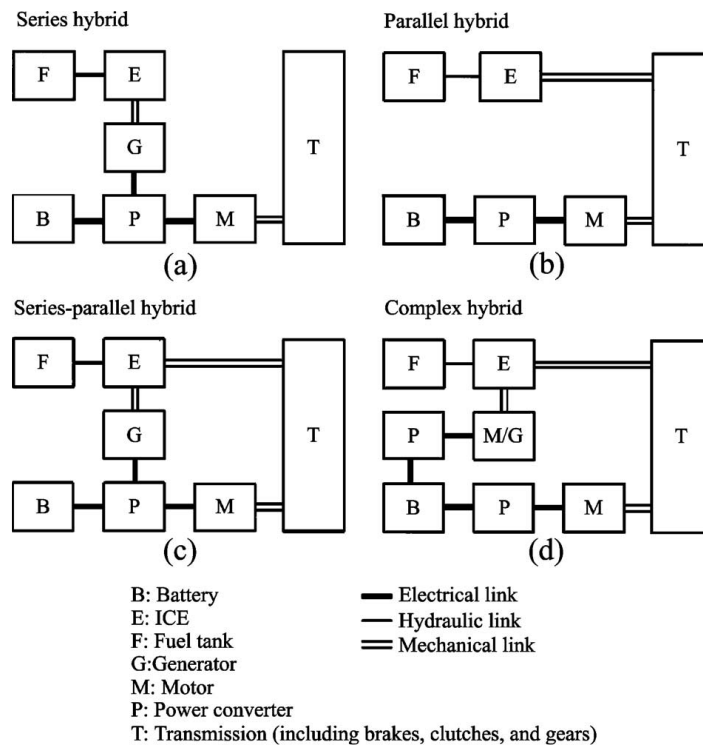
1. **Hybrid (HEV):** Τα υβριδικά οχήματα **οχήμα(2.2)** είναι εμπορικά διαθέσιμα για πάνω από 15 χρόνια. Συνδυάζουν μηχανή εσωτερικής καύσης (MEK - Internal Combustion Engine – ICE) και έναν ηλεκτρικό κινητήρα/ γεννήτρια (EM) εν σειρά ή σε παράλληλη διάταξη που λειτουργεί επικουρικά, για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης του οχήματος. Η μπαταρία του HEV δεν μπορεί να φορτιστεί από το δίκτυο αλλά συνήθως κατά τη διάρκεια της πέδησης με ανατροφοδότηση ή της κύλισης του οχήματος (κίνηση εξ αδρανείας). Ένα HEV κινείται κυρίως από τη συμβατική του μηχανή, οπότε η υβριδοποίηση σαν τεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί ως μια προσθήκη στα συμβατικά οχήματα με σκοπό την οικονομία καυσίμου και την μείωση εκπομπών CO₂ και όχι τη δημιουργία ενός εξ ολοκλήρου νέου τύπου αυτοκινήτου. Τα HEV κατά κανόνα έχουν χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και εκπομπές καυσαερίων από τα συμβατικά. Όσο πιο προηγμένο είναι ένα υβριδικό σύστημα τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα να έχει χαμηλότερες εκπομπές ρύπων.



Σχήμα(2.2). Υβριδικό ηλεκτρικό όχημα

Στα **series hybrid** οχήματα η ICE με την καύση της βενζίνης ή του diesel δίνει στην έξοδό τους μηχανική ενέργεια που αρχικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Η ηλεκτρική ενέργεια είτε φορτίζει τη μπαταρία του οχήματος, είτε την παρακάμπτει ώστε να δώσει κίνηση στους τροχούς μέσω του ηλεκτροκινητήρα. Ο κινητήρας χρησιμοποιείται για να δεσμεύσει κινητική ενέργεια κατά τη διάρκεια φρεναρίσματος του οχήματος (πέδηση με ανατροφοδότηση –regenerative braking). Ουσιαστικά είναι οχήματα υποβοηθούμενα από μηχανή εσωτερικής καύσης με διευρυμένη οδηγική εμβέλεια συγκριτικά με ένα συμβατικό όχημα. Λόγω της αποσύνδεσης μηχανής εσωτερικής καύσης και τροχών διαθέτουν το πλεονέκτημα του εύκολου εντοπισμού του συστήματος ICE-γεννήτριας. Παρόλη την απλότητα του συστήματος κίνησης, χρειάζονται ICE, ηλεκτρική γεννήτρια και κινητήρα για την πρόωσή τους πράγμα που οδηγεί σε μειωμένη απόδοσή τους. Τα εξαρτήματα αυτά σε συνδυασμό με τη μπαταρία που χρειάζεται το όχημα για να διανύσει μεγάλες αποστάσεις προσδίδουν βάρος και κόστος στα series HEV. Υπάρχουν έξι διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας του οχήματος:

- 1) Λειτουργία μόνο με μπαταρία
- 2) Λειτουργία μόνο με τη μηχανή
- 3) Συνδυασμένη λειτουργία: ICE-γεννήτρια και μπαταρία παρέχουν ισχύ στον κινητήρα έλξης
- 4) Λειτουργία διαίρεσης ισχύος: ICE-γεννήτρια φορτίζουν τη μπαταρία και δίνουν κίνηση στο όχημα
- 5) Λειτουργία φόρτισης κατά τη διάρκεια στάθμευσης του οχήματος
- 6) Λειτουργία πέδησης με ανατροφοδότηση



Σχήμα(2.3). Τέσσερις συνήθεις αρχιτεκτονικές HEV οχημάτων

Στην περίπτωση των **parallel hybrid** οχημάτων η ICE και ο ηλεκτροκινητήρας είναι από κοινού συζευγμένοι στον κινητήριο άξονα των τροχών με συμπλέκτες. Η διάταξη αυτή επιτρέπει και τους δύο μηχανές να μεταφέρουν ενέργεια ώστε να οδηγήσουν τους τροχούς συνδυασμένα ή σε ρύθμιση λειτουργίας μόνο τους ICE ή μόνο τους ηλεκτρικής μηχανής. Ο ηλεκτροκινητήρας τους χρησιμοποιείται για την πέδηση με ανατροφοδότηση αλλά και για τη δέσμευση επιπλέον ενέργειας τους ICE κατά τη διάρκεια ολίσθησης του οχήματος. Τα οχήματα αυτά χρειάζονται μόνο δύο συσκευές πρόωσης, την μηχανή εσωτερικής καύσης και τον ηλεκτροκινητήρα που χρησιμοποιείται και ως γεννήτρια για τη φόρτιση τους μπαταρίας. Σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα series είναι ότι ακόμα και για τη διάνυση μεγάλων αποστάσεων μόνο η ICE χρειάζεται να διαστασιολογηθεί για τη μέγιστη απαιτούμενη ισχύ ενώ το μέγεθος του ηλεκτροκινητήρα μπορεί να περιοριστεί στο μισό. Οι τύποι λειτουργίας των parallel HEV είναι:

- 1) Λειτουργία μόνο με ηλεκτροκινητήρα
- 2) Λειτουργία μόνο με την μηχανή εσωτερικής καύσης
- 3) Συνδυασμένη λειτουργία ICE και ΗΜ
- 4) Λειτουργία διαίρεσης ισχύος: η ισχύς τους ICE διαμοιράζεται στην κίνηση του οχήματος και τη φόρτιση τους μπαταρίας (ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια)
- 5) Λειτουργία φόρτισης κατά τη διάρκεια στάθμευσης του οχήματος
- 6) Λειτουργία πέδησης με ανατροφοδότηση (περιλαμβάνει λειτουργία υβριδικής πέδησης)

Τα **series-parallel hybrid** ενσωματώνουν τα χαρακτηριστικά των series (με μία επιπλέον μηχανική σύζευξη) και των parallel (με μία επιπλέον γεννήτρια) μαζί παρόλα αυτά είναι πολύ πιο περίπλοκα κατασκευαστικά και ακριβότερα.

Τα **complex HEV** τους μαρτυρά και η ονομασία τους περιλαμβάνουν μια διάταξη συστήματος που δεν εμπίπτει σε κανέναν από τους παραπάνω τύπους οχημάτων. Φαίνεται να μοιάζουν με τα series-parallel, η βασική τους διαφορά τους είναι ότι στα series-parallel έχουμε μονοκατευθυντική ροή ισχύος τους γεννήτριας ενώ στα complex η ροή ισχύος της γεννήτριας είναι αμφίδρομη επιτρέποντας ουσιαστικά τη χρήση τριών μηχανών πρόωσης του οχήματος (ICE και δύο ηλεκτρικών κινητήρων). Τους και τα series-parallel τα complex HEV οχήματα πάσχουν από αυξημένη πολυπλοκότητα και τιμή **σχήμα(2.3)**.

Σύμφωνα με τα επίπεδα ηλεκτρικής ισχύος και τη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα, τα HEVs μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

Micro hybrid: Ο ηλεκτρικός κινητήρας ενός επιβατικού αυτοκινήτου μικροϋβριδικής τεχνολογίας έχει μικρή ισχύ (περίπου 2.5 kW) και η χρήση του περιορίζεται στην εκκίνηση και παύση λειτουργίας του οχήματος. Στην οδήγηση εντός πόλης όπου υπάρχουν συχνές εκκινήσεις και στάσεις, η εξοικονομούμενη ενέργεια μπορεί να φτάσει έως και 15%. Το κόστος ενός τέτοιου οχήματος είναι ένα ποσοστό της τάξης του 30% ακριβότερο από αυτό ενός συμβατικού λόγω του μικρού μεγέθους του κινητήρα του και της απλής του δομής (**Citroen E-HDI microhybrid technology, Suzuki Swift GLX**) [77][80].



Σχήμα(2.4). Suzuki Swift με τεχνολογία Smart Hybrid και ισχύ 90hp, κατανάλωση καυσίμου μικτού κύκλου 4.1 l/100 km και εκπομπές CO₂ 94g/km

Το Suzuki swift **σχήμα(2.4)** είναι ένα μικρό όχημα εξοπλισμένο με ηλεκτρογεννήτρια (ISG-Integrated Starter Generator) και μπαταρία ιόντων λιθίου. Η ηλεκτρογεννήτρια που λειτουργεί και σαν μοτέρ βοηθά τον κινητήρα κατά την εκκίνηση ή επιτάχυνση του οχήματος περιορίζοντας την κατανάλωση καυσίμου.

Mild hybrid: Ο ηλεκτρικός κινητήρας ενός επιβατικού αυτοκινήτου ήπιας υβριδικής τεχνολογίας έχει μεγαλύτερη ισχύ από αυτόν ενός micro hybrid και μπορεί να λειτουργήσει παράλληλα με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για την πρόωση του οχήματος (parallel hybrid). Ο ηλεκτρικός κινητήρας τοποθετείται συνήθως ανάμεσα στην ICE και το κιβώτιο ταχυτήτων πράγμα το οποίο περιορίζει την ισχύ του και την αυτονομία του οχήματος.

Οδηγώντας στην πόλη η εξοικονόμηση ενέργειας κυμαίνεται στο 20 % έως 30% με το κόστος τους να ανεβαίνει αντίστοιχα (**Citroen hybrid4 technology, Audi**) [77], [79].



Σχήμα(2.5). Audi A8 (MHEV) με ισχύ 250 kW, κατανάλωση καυσίμου 7.8-7.5 l/ 100 km και εκπομπές CO2 152-145 g/km [79]

Το σύστημα κίνησης του A8 **σχήμα(2.5)** περιλαμβάνει μηχανή εσωτερικής καύσης, ηλεκτρική γεννήτρια /κινητήρα (εναλλάκτης εκκίνησης με μάντα-BAS- Belt Alternator Starter) και μπαταρία λιθίου 48 V.

Full hybrid: Ο ηλεκτρικός κινητήρας ενός πλήρως υβριδικού επιβατικού οχήματος έχει ισχύ περίπου 50-100 kW και συνυπάρχει με μια γεννήτρια και μια μηχανή εσωτερικής καύσης σε series-parallel ή complex hybrid αρχιτεκτονικές προσφέροντας εξοικονόμηση ισχύος περίπου 30% με 40% με το κόστος να ανεβαίνει αντίστοιχα. Το όχημα έχει τη δυνατότητα να κινηθεί μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα., μόνο με την μηχανή εσωτερικής καύσης ή με συνδυασμένη λειτουργία και των δύο. Τα full hybrid μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε *Synergy hybrid* και *Power hybrid*. Στα Synergy η μηχανή εσωτερικής καύσης είναι μικρότερη σε μέγεθος από αυτή του συμβατικού αυτοκινήτου με σκοπό τη μείωση των εκπομπών ενώ στα Power δεν μειώνεται το μέγεθός της αφού στόχος είναι η βέλτιστη οδηγική επίδοση (**Honda Accord Hybrid, Toyota Yaris hybrid**) [78],[81],[76].



Σχήμα(2.6). Honda Accord Hybrid με ισχύ 212 hp κατανάλωση καυσίμου 5 l/100km και εκπομπές καυσαερίων σύμφωνα με το πρότυπο Tier 3 bin 30

Το Honda Accord **σχήμα(2.6)** διαθέτει ηλεκτρικό σύστημα συνεχούς μεταβαλλόμενης σχέσης μετάδοσης (E- CVT – Electric- Continuously Variable Transmission) που διαχειρίζεται τις

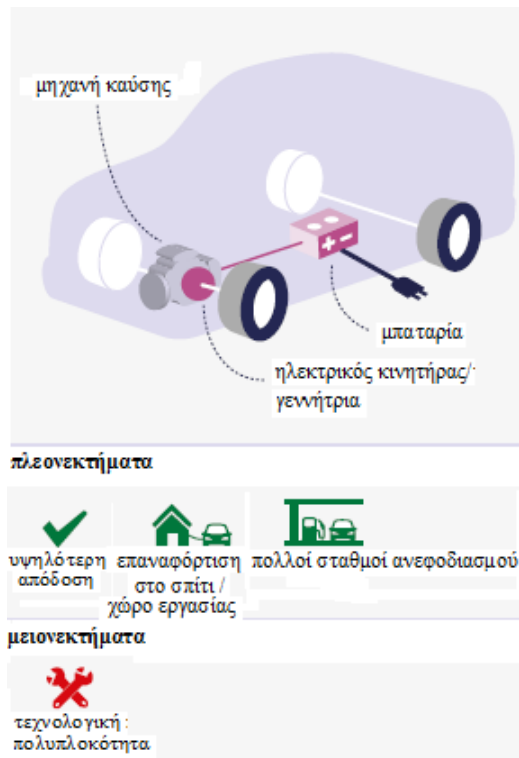
αλληλεπιδράσεις των δύο ηλεκτρικών μηχανών (γεννήτρια-κινητήρας) και του βενζινοκινητήρα. Το σύστημα μετάδοσης κίνησής του περιλαμβάνει βενζινοκινητήρα, δύο ηλεκτρικούς κινητήρες και μπαταρία λιθίου υψηλής τάσης [76].

Ενδεικτικά η οδηγική αυτονομία σε αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία είναι 0-10 km.

2. *PHEVs (Plug in hybrid electric vehicles): Τα εμβυσματώσιμα υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα σχήμα(2.8)* κινούνται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα και μία μηχανή εσωτερικής καύσης σχεδιασμένα να λειτουργούν ξεχωριστά ή ταυτόχρονα. Η μπαταρία που είναι τοποθετημένη στο όχημα έχει τη δυνατότητα να φορτιστεί από το ηλεκτρικό δίκτυο και η μηχανή καύσης υποστηρίζει τον ηλεκτροκινητήρα όταν απαιτείται περισσότερη ισχύ ή το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι χαμηλό. Η εμβέλεια οδήγησης είναι μικρότερη συγκριτικά με τα BEV, καθώς οι μπαταρίες των PHEV είναι μικρότερης χωρητικότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα PHEV δεν βασίζουν την τροφοδοσία τους αποκλειστικά στον ηλεκτρισμό. Η μπαταρία τους είναι σχεδιασμένη περισσότερο για διαδρομές εντός πόλης ενώ στα REV ο βενζινοκινητήρας επιτρέπει συνολικά μεγαλύτερη οδηγική αυτονομία. Οι μπαταρίες των υβριδικών, εμβυσματώσιμων και μη, τείνουν να είναι πιο ακριβές από αυτές των EV με μπαταρία με βάση την τιμή ανά kWh. Η υψηλότερη τιμή οφείλεται κυρίως στην μεγαλύτερη σχετικά με την ενέργεια απόδοση ισχύος που απαιτούν τα υβριδικά. Οι επιπτώσεις των PHEV στο περιβάλλον εξαρτώνται από τον τρόπο λειτουργίας τους. Λειτουργία του οχήματος αποκλειστικά με τη μηχανή εσωτερικής καύσης μπορεί να οδηγήσει σε κατανάλωση καυσίμου και επίπεδα εκπομπών ίδια ή μεγαλύτερα από αυτά ενός συμβατικού ενώ η πρόσθετη μπαταρία αυξάνει τον συνολικό όγκο του αυτοκινήτου. Τα PHEV είναι οικονομικά ελκυστικά στους οδηγούς εφόσον το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποιείται είναι φθηνότερο της βενζίνης ή του diesel. *Ενδεικτικά η οδηγική τους εμβέλεια σε αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία είναι 20-85 km (MINI Countryman σχήμα(2.7), Toyota Prius PHV, Hyundai ionic PHEV) [83][81][86].*



Σχήμα (2.7). MINI Countryman με ισχύ 165 kW, κατανάλωση καυσίμου 2.5-2.4 l/100km, 42 km αυτονομία ηλεκτροκίνησης και εκπομπές CO2 56g/km [83]



σχήμα(2.8). Εμβυσματώσιμο PHEV/REEV υβριδικό ηλεκτρικό όχημα

Τα ηλεκτρικά οχήματα εκτεταμένης εμβέλειας (REEVs Range Extended Electric Vehicles) έχουν σειριακή υβριδική διάταξη (*series hybrid electric vehicles*). Η μπαταρία που είναι τοποθετημένη στο όχημα έχει τη δυνατότητα φόρτισης από το ηλεκτρικό δίκτυο **σχήμα(2.7)**. Ένα πλεονέκτημα των REEV είναι ότι το μέγεθος της συμβατικής μηχανής μπορεί να ελαττωθεί καθώς χρειάζεται μόνο όταν ξεπεραστεί το εύρος οδήγησης σε ηλεκτρική λειτουργία. Αυτό κάνει το όχημα πιο ελαφρύ. Το πρόβλημα της περιορισμένης εμβέλειας οδήγησης μπορεί να ξεπεραστεί με ανεφοδιασμό καυσίμων του οχήματος. *Ενδεικτικό εύρος οδήγησης σε αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία είναι τα 70-145 km (BMW i3 με range extender σχήμα (2.9), Chevrolet Volt) [82][87]* .



Σχήμα(2.9). BMW i3 με range extender, ισχύ 170hp, αυτονομία 235-255 km(WLTP) και μηδενικές εκπομπές ρύπων έως και τα 200km [82]

3. Τα ηλεκτρικά οχήματα που λειτουργούν αποκλειστικά με μπαταρία (BEVs - Battery Electric Vehicles) σχήμα(2.12) οδηγούνται μόνο από ηλεκτρικό κινητήρα, τροφοδοτούμενο από την μπαταρία που είναι ενσωματωμένη σε αυτά. Η μπαταρία πρέπει να φορτίζεται τακτικά, συνδέοντας καλωδιακά το όχημα στο ηλεκτρικό δίκτυο σε κάποιο σταθμό φόρτισης. Τα BEV έχουν την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση από όλα τα συστήματα πρόωσης οχημάτων και είναι ικανά να μετατρέψουν συνήθως περίπου 80% ή και παραπάνω από την ενέργεια τους μπαταρίας σε κίνηση. Δεν υπάρχουν εκπομπές καυσαερίων οδηγώντας ένα BEV. Στα μειονεκτήματά τους είναι το μεγάλο μέγεθος της μπαταρίας που οδηγεί σε αυξημένο κόστος του οχήματος – ωστόσο το κόστος ανά kWh είναι χαμηλότερο για τα BEV- και οι μεγάλοι χρόνοι που απαιτούνται για τη φόρτισή της. Τα BEV συγκριτικά με τα συμβατικά οχήματα έχουν περιορισμένο εύρος οδήγησης, ενδεικτικά 80 – 400 km (Renault Zoe, Hyundai Ioniq Electric, VW e-Golf, Nissan Leaf σχήμα(2.10)) [85][86][84][88].



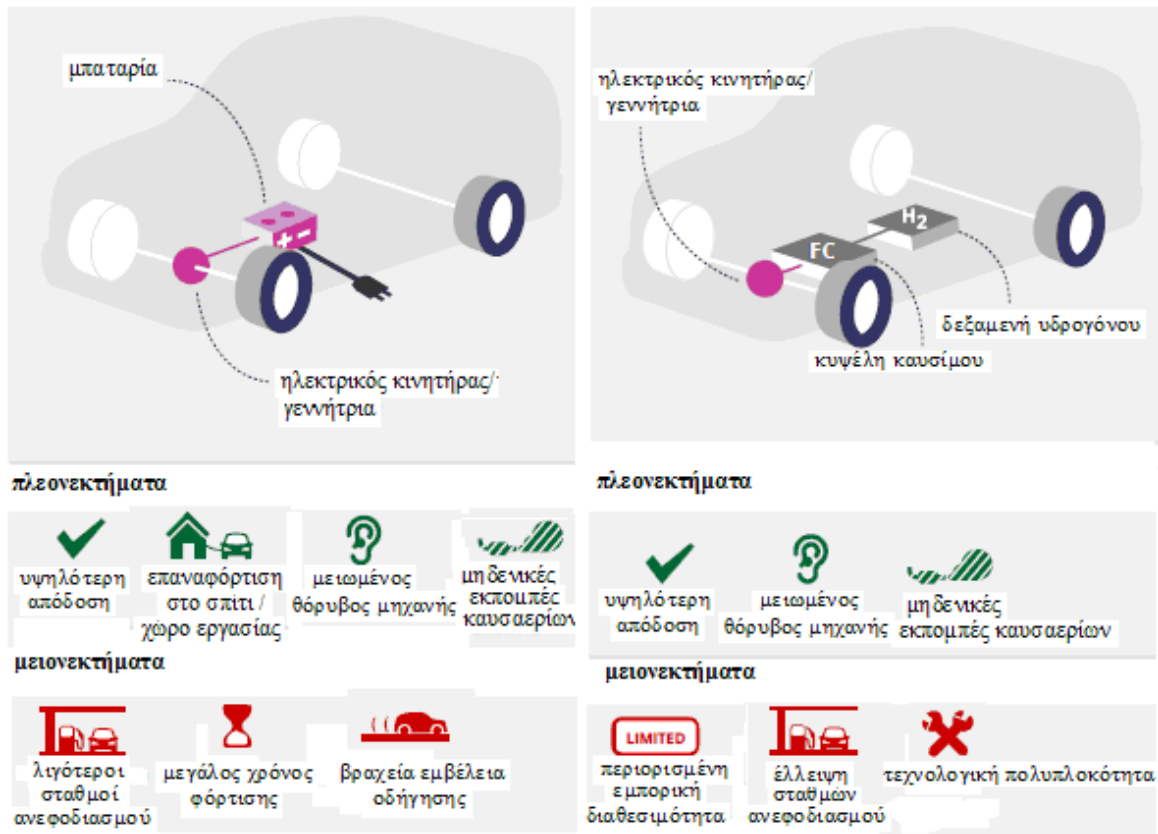
Σχήμα(2.10). Nissan Leaf με ισχύ 150 hp, αυτονομία και κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος (WLTP) συνδυασμένου κύκλου 270 km και 206 Wh/km αντίστοιχα [88]



Σχήμα(2.11). Toyota Mirai με ισχύ 113 kW, εύρος οδήγησης 550 km (NEDC) και κατανάλωση 0.76kg/km [81]

4. Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEVs – Fuel Cell Electric Vehicles)

κινούνται επίσης αποκλειστικά με ηλεκτρισμό **σχήμα(2.12)**. Στην περίπτωση των FCEV όμως η ηλεκτρική ενέργεια δεν αποθηκεύεται σε μεγάλα συστήματα μπαταριών αλλά παρέχεται από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιεί υδρογόνο από δεξαμενή τοποθετημένη στο όχημα, σε συνδυασμό με οξυγόνο από τον αέρα.



Σχήμα(2.12). Εμβυσματώσιμο BEV υβριδικό ηλεκτρικό όχημα (αριστερά), Ηλεκτρικό όχημα κυψελών καυσίμου (FCEV) (δεξιά)

Τα κύρια πλεονεκτήματα των FCEV συγκριτικά με τα BEV είναι το μεγαλύτερο εύρος οδήγησης και ο ταχύτερος ανεφοδιασμός όμοια με αυτά ενός συμβατικού αυτοκινήτου. Λόγω του υφιστάμενου μεγέθους και βάρους των συστοιχιών κυψελών καυσίμου, τα FCEV είναι καταλληλότερα για αυτοκίνητα μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους και για μεγαλύτερες αποστάσεις. Η τεχνολογία κυψελών καυσίμου βρίσκεται σε πρωταρχικό στάδιο σε σχέση με τις προαναφερθείσες τεχνολογίες και σήμερα λίγα μοντέλα είναι εμπορικά διαθέσιμα. Χρειάζεται επιπλέον τεχνολογική ανάπτυξη έτσι ώστε τα FCEV να βελτιώσουν την αντοχή τους, να μειωθούν τα κόστη και να καθιερωθεί μια υποδομή τροφοδοσίας υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένων αυτόνομων σταθμών ή αντλιών υδρογόνου. *Ενδεικτική οδηγική αυτονομία τα 160-500 km (Toyota Mirai σχήμα(2.11), Honda Clarity Fuel Cell [78]) [89].*

2.2 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο

2.2.1 Τύποι μπαταριών

Οι μπαταρίες είναι βασικό εξάρτημα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Ανάλογα με τον τύπο του υβριδικού ή ηλεκτρικού οχήματος, έχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν το ποσό της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και το πόσο γρήγορα αυτή εκλύεται ώστε να είναι διαθέσιμη για την κίνηση του οχήματος. Η επίδοση μιας μπαταρίας μπορεί να οριστεί μετρώντας:

Ενεργειακή πυκνότητα: Αποτελεί μέτρο του ποσού ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα όγκου ή μάζας της μπαταρίας και είναι ανάλογο του εύρους οδήγησης αφού μπαταρίες με μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα είναι ικανές να κινήσουν το όχημα για μεγαλύτερες αποστάσεις.

Πυκνότητα ισχύος: Είναι μέτρο της ισχύος ανά μονάδα όγκου και εκφράζει την ταχύτητα με την οποία η μπαταρία μπορεί να παράσχει ή να προσλάβει φορτίο. Η πυκνότητα ισχύος είναι περισσότερο σχετική με την οδηγική επίδοση, δηλαδή την επιτάχυνση, την ταχύτητα οδήγησης και τους χρόνους φόρτισης.



Σχήμα(2.13). Μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται στα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα

Τα ακόλουθα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα:

Μπαταρίες Μολύβδου - Οξέος (Lead-Acid Batteries)

Μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να είναι υψηλής ισχύος και να είναι φθηνές, ασφαλείς και αξιόπιστες. Παρόλα αυτά η χαμηλή ειδική ενέργεια (ενέργεια ανά μονάδα μάζας), η κακή επίδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες και η μικρή διάρκεια ζωής (calendar/cycle life) περιορίζουν την χρήση τους. Έχουν αναπτυχθεί εξελιγμένες μπαταρίες μολύβδου οξέος οι οποίες όμως χρησιμοποιούνται για βοηθητικά φορτία σε εμπορικά διαθέσιμα ηλεκτρικά οδικά οχήματα.

Μπαταρίες Νικελίου – Μετάλλου Υδριδίου (Nickel-Metal Hydride Batteries - NiMH)

Χρησιμοποιούνται συνήθως σε υπολογιστές και ιατρικό εξοπλισμό και προσφέρουν ικανοποιητικές δυνατότητες σε ενέργεια και ισχύ. Έχουν πολύ μεγαλύτερο κύκλο ζωής από τις μπαταρίες μολύβδου - οξέος και είναι ασφαλείς και ανθεκτικές σε κακή χρήση. Οι μπαταρίες NiMH χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στα υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα με βασικές προκλήσεις να αποτελούν το υψηλό τους κόστος, η μεγάλη αυτοεκφόρτισή τους και η παραγωγή θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και η ανάγκη ελέγχου της απώλειας υδρογόνου.

Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Lithium-Ion Batteries – Li-ion)

Χρησιμοποιούνται ήδη στις περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης όπως κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές λόγω της υψηλής τους ενέργειας ανά μονάδα μάζας σε σχέση με άλλα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης έχουν μεγάλη αναλογία ισχύος-βάρους, υψηλή ενεργειακή απόδοση, καλή επίδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή αυτοεκφόρτιση. Τα περισσότερα μέρη των μπαταριών ιόντων-λιθίου είναι ανακυκλώσιμα όμως το κόστος ανάκτησης των υλικών παραμένει μία πρόκληση για τη βιομηχανία. Σήμερα, τα περισσότερα εμβυσματώσιμα υβριδικά και πλήρως ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν μπαταρίες λιθίου **σχήμα(2.13)** αν και η ακριβής χημική τους σύσταση συχνά διαφέρει από αυτή των μπαταριών ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης. Έρευνα και ανάπτυξη βρίσκονται σε εξέλιξη για τη μείωση του κόστους και την αύξηση της ωφέλιμης διάρκειας ζωής τους.

Μια συμπακνωμένη μπαταρία ιόντων λιθίου που χρησιμοποιείται σε ένα μικρό ηλεκτρικό αυτοκίνητο (περίπου 900 kg) περιέχει γύρω στα 4 kg λίθιο. Οι μπαταρίες λιθίου μπορούν να διαρκέσουν περίπου 10 χρόνια και να φορτιστούν 2500-3500 φορές.

Παρόλο που μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος θερμοκρασιών είναι λιγότερο αποδοτικές σε πολύ κρύο ή ζέστη. Οι περισσότερες μπορούν να φορτιστούν μόνο μεταξύ 0 °C και 45 °C. Για την προστασία των μπαταριών κάποια οχήματα διαθέτουν σύστημα ψύξης και θέρμανσης προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η φόρτιση και λειτουργία της μπαταρίας πραγματοποιούνται εντός του βέλτιστου εύρους θερμοκρασίας. Το κόστος κατασκευής μπαταριών ιόντων λιθίου είναι υψηλό και αποτελεί σημαντικό ποσοστό της συνολικής τιμής ενός ηλεκτρικού οχήματος. Το πραγματικό κόστος πρώτης ύλης του λιθίου που χρησιμοποιείται είναι μόνο ένα μικρό ποσοστό του συνολικού κόστους της μπαταρίας, συνήθως έως 10%. Μια μπαταρία 10000 ευρώ για ένα PHEV περιέχει λίθιο αξίας περίπου 1000 ευρώ. Τα βασικά μειονεκτήματα των σύγχρονων τεχνολογιών μπαταριών ιόντων λιθίου είναι η ακόμα περιορισμένη ενεργειακή τους πυκνότητα και τα υψηλά κόστη κατασκευής. Ενώ η

λεπτομερής διάρθρωση κόστους κατασκευής τους είναι γενικά απόρρητη, εκτιμάται ότι κατανέμεται σε : κόστος υλικών (60 %), κόστος εργασίας (5 %), και το υπόλοιπο (35 %) αντιστοιχεί σε λειτουργικές δαπάνες κατασκευής και κέρδη. Ωστόσο στο σύνολο του βιομηχανικού τομέα τα εκτιμώμενα κόστη κατασκευής μπαταριών αναφέρεται ότι μειώθηκαν κατά περίπου 14 % ετησίως μεταξύ 2007 και 2014, μια συνολική μείωση κατά περίπου 60 %, και συνεχίζουν να μειώνονται. Επιπλέον μείωση κόστους μπορεί να επιτευχθεί δημιουργώντας τη λεγόμενη δεύτερη γενιά μπαταριών ιόντων λιθίου, καθώς και αναπτύσσοντας μεθόδους κατασκευής με οικονομίες κλίμακος, καινοτόμες διαδικασίες παραγωγής, μείωση των αποβλήτων και με χρήση ενδεχομένως εναλλακτικών φθηνότερων υλικών. Για να βελτιωθεί σημαντικά το εύρος οδήγησης σε ηλεκτρική λειτουργία, ερευνώνται τεχνολογίες όπως οι μπαταρίες **Λιθίου-Θείου (Li-S batteries)** και οι **μπαταρίες στερεάς κατάστασης (solid state batteries)**. Ωστόσο αυτές οι νέες τεχνολογίες βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο και δεν ανταποκρίνονται ακόμα στις απαιτήσεις για ασφάλεια και χρόνο ζωής της μπαταρίας. Η αντοχή τους αναμένεται να βελτιωθεί στο μέλλον όμως η επίδοσή τους σε διαφορετικές θερμοκρασίες παραμένει αβέβαιη.

Οι τρεις τύποι μπαταριών είναι εννοιολογικά και δομικά παρόμοιοι όμως αρκετά διαφορετικοί σε χημική σύσταση. Κάθε μπαταρία αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια (άνοδο και κάθοδο) με ενεργά υλικά σε πλέγματα ή ελάσματα που λειτουργούν σαν συλλέκτες ηλεκτρικού ρεύματος και έναν ηλεκτρολύτη που μεταφέρει το φορτίο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Τα δομικά αυτά στοιχεία βρίσκονται μέσα σε περίβλημα. Στο **σχήμα (2.14)** φαίνεται η διαφορετική σύσταση των στοιχείων για κάθε τύπο μπαταρίας.

Τύπος μπαταρίας	Pb-acid	Ni-MH	Li-ion
Κάθοδος	PbO ₂	Ni(OH) ₂	LiMO ₂
Πλάκα/Ελασμα Καθόδου	Pb	Ni foam	Al
Άνοδος	Pb	MH (AB ₅)	Γραφίτης
Πλάκα/Ελασμα Ανόδου	Pb	Ni-plated steel	Cu
Ηλεκτρολύτης	H ₂ SO ₄	KOH	Οργανικός διαλύτης + LiPF ₆
Διαχωριστής	PE or PVC w/silica	Πολυολεφίνη	PE/PP
Περίβλημα στοιχείου	PP	Ανοξειδωτος χάλυβας	Varies (metal or laminate)

PE = Πολυαιθυλένιο. PVC = Πολυβινυλοχλωρίδιο PP = Πολυπροπυλένιο Ni-plated steel = Επνικελωμένος χάλυβας

Σχήμα(2.14). Σύγκριση των υλικών των στοιχείων μπαταρίας [94]

Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σχετικά νεοεισερχόμενα στην αγορά αυτοκινήτων και έτσι λίγα από αυτά έχουν φτάσει στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους. Σαν αποτέλεσμα, ελάχιστες μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων είναι διαθέσιμες μετά την κατανάλωσή τους, περιορίζοντας έτσι την επέκταση των υποδομών ανακύκλωσης μπαταριών. Καθώς τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα γίνονται ολοένα και πιο συνήθη, η αγορά ανακύκλωσης μπαταριών είναι πιθανό να επεκταθεί. Η **ανακύκλωση μπαταριών** σε μεγάλη κλίμακα, θα απέτρεπε την είσοδο επικίνδυνων υλικών

στη ροή αποβλήτων, τόσο στο τέλος της ωφέλιμης ζωής της μπαταρίας όσο και κατά τη διάρκεια της παραγωγής της. Βρίσκεται σε εξέλιξη η ανάπτυξη διεργασιών ανακύκλωσης μπαταριών που ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις του κύκλου ζωής χρήσης μπαταριών ιόντων λιθίου αλλά και άλλων ειδών μπαταριών στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Οι διαδικασίες ανακύκλωσης μπαταριών όμως διαφέρουν:

Τήξη: Οι διαδικασίες τήξης ανακτούν βασικά στοιχεία ή άλατα. Τέτοιες διεργασίες λειτουργούν σήμερα σε ευρεία κλίμακα και μπορούν να συμπεριλάβουν πολλά είδη μπαταριών όπως ιόντων λιθίου και νικελίου μετάλλου υδριδίου. Η τήξη πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες, και οργανικά υλικά μεταξύ άλλων ηλεκτρολύτες και άνοδοι άνθρακα καίνονται σαν καύσιμα ή παράγοντες αναγωγής. Τα πολύτιμα μέταλλα ανακτώνται και αποστέλλονται για εξευγενισμό έτσι ώστε το προϊόν να είναι κατάλληλο για χρήση. Άλλα μέταλλα, μεταξύ αυτών και το λίθιο, περιέχονται στη σκωρία, που σήμερα χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο στο σκυρόδεμα.

Άμεση ανάκτηση: Στο άλλο άκρο, κάποιες διαδικασίες ανακύκλωσης ανακτούν άμεσα τα υλικά μπαταρίας. Τα συστατικά διαχωρίζονται από μία σειρά διαφόρων φυσικών και χημικών διεργασιών και όλα τα ενεργά υλικά και μέταλλα μπορούν να ανακτηθούν. Η άμεση ανάκτηση είναι μια διαδικασία χαμηλής θερμοκρασίας με ελάχιστες απαιτήσεις σε ενέργεια.

Ενδιάμεση επεξεργασία: Το τρίτο είδος επεξεργασίας βρίσκεται κάπου ανάμεσα στα δύο προηγούμενα. Τέτοιες διαδικασίες μπορούν να δεχτούν πολλαπλά είδη μπαταριών, σε αντίθεση με τη διαδικασία της άμεσης ανάκτησης, όμως τα υλικά ανακτώνται σε μεταγενέστερο στάδιο σε σχέση με την τήξη .

Ο διαχωρισμός των διαφορετικών τύπων υλικών μιας μπαταρίας είναι συχνά ανασταλτικός παράγοντας στην ανάκτηση υλικών υψηλής αξίας. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό ο σχεδιασμός της μπαταρίας να λαμβάνει υπόψη και την αποδόμησή της κατά τη διαδικασία της ανακύκλωσης, έτσι ώστε τα ηλεκτρικά οχήματα να είναι βιώσιμα. Επίσης η τυποποίηση μπαταριών, υλικών και σχεδίου στοιχείων των συσσωρευτών θα έκανε την ανακύκλωση ευκολότερη και οικονομικότερη [73][89].

Υπερπυκνωτές (Ultracapacitors)

Οι μπαταρίες δεν ακολουθούν τον νόμο του Moore αφού κανένα γνωστό υλικό δεν μπορεί συγκεντρώσει τεράστιο φορτίο σε μικρό όγκο. Οι μικρομπαταρίες από την άλλη είναι ακριβές λόγω του ότι κατασκευάζονται μέσα από περίπλοκες και χρονοβόρες διαδικασίες. Οι πυκνωτές διαθέτουν έναν διαφορετικό τρόπο αποθήκευσης ενέργειας. Ένας κλασσικός πυκνωτής είναι φτιαγμένος από δύο μεταλλικές πλάκες που διαχωρίζονται από λεπτό μονωτικό στρώμα. Αποθηκεύει φορτίο ηλεκτροστατικά στο πεδίο που δημιουργούν οι δύο αντίθετα φορτισμένες πλάκες. Το ποσό του φορτίου που μπορεί να αποθηκευτεί καθορίζεται από τη χωρητικότητα της διάταξης η οποία είναι συνάρτηση του εμβαδού της μεταλλικής πλάκας - συνήθως μικρότερου από ένα τετραγωνικό μέτρο - διαιρεμένου με την απόσταση μεταξύ των πλακών που είναι συνήθως γύρω στο ένα μικρόμετρο ή λιγότερο. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να αυξήσουμε το φορτίο, θα πρέπει να μεγιστοποιήσουμε το εμβαδό και να ελαχιστοποιήσουμε την απόσταση. Οι υπερπυκνωτές ελαχιστοποιούν την απόσταση δανειζόμενοι λίγη από την τεχνολογία των μπαταριών – τον ηλεκτρολύτη. Ο υπερπυκνωτής ορίζεται σαν ένας πυκνωτής

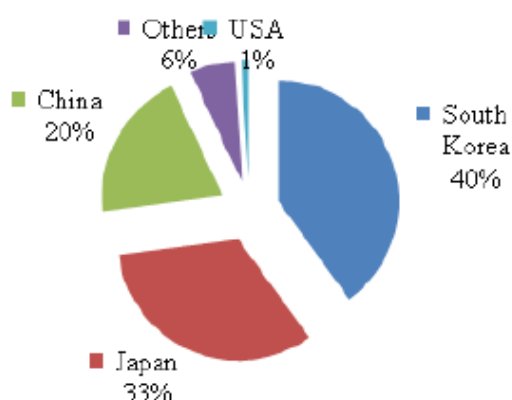
διπλού στρώματος. Αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια εμποτισμένα με υγρό ηλεκτρολύτη και διαχωρισμένα με μια μεμβράνη διαπερατή από ιόντα ώστε να εμποδίσει βραχυκυκλώσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων. Καθώς εφαρμόζεται τάση, ιόντα του ηλεκτρολύτη κινούνται προς επιφάνειες του ηλεκτροδίου με αντίθετο φορτίο. Το φορτίο συγκεντρώνεται στη διεπαφή ηλεκτροδίων και ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας δύο ηλεκτρικά φορτισμένα επίπεδα διπλού στρώματος διαχωρισμένα σε απόσταση περίπου ενός νανομέτρου [93].

Οι υπερπυκνωτές έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν στα οχήματα επιπλέον ισχύ κατά τη διάρκεια επιτάχυνσής τους και ανάβασής τους σε ύψωμα αλλά και να βοηθήσουν στην ανάκτηση ενέργειας πέδης. Μπορούν επίσης να είναι χρήσιμοι σαν δευτερεύουσες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα αφού βοηθούν τις ηλεκτροχημικές μπαταρίες να σταθεροποιήσουν την ισχύ στο φορτίο [73].

2.2.2. Σύγχρονη τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου

2.2.2.1. Χημική σύσταση χαρακτηριστικά και τύποι μπαταριών λιθίου

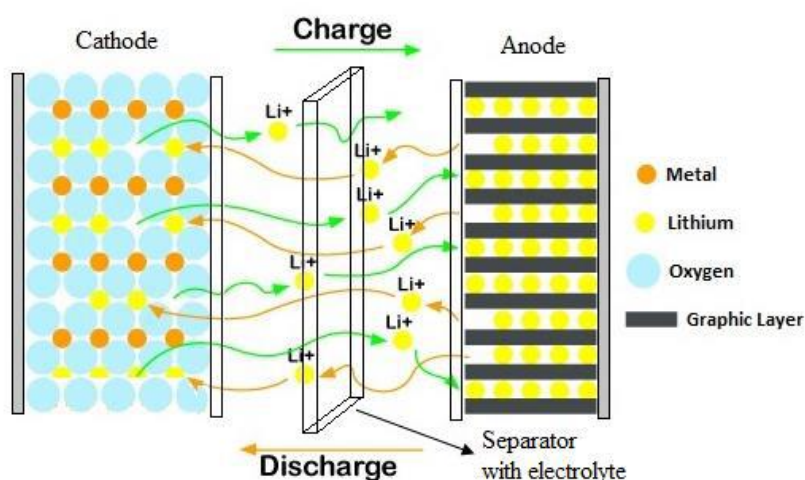
Οι περισσότεροι ερευνητές αυτή τη στιγμή ανά τον κόσμο έχουν προσανατολιστεί στην ανάπτυξη και μετατροπή της χημείας των μπαταριών ιόντων λιθίου ώστε να επιτευχθεί καλύτερη επίδοσή τους λαμβάνοντας υπόψη τα κόστη και άλλα φυσικά φαινόμενα. Η πρόκληση για διαχείριση της φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών εντός του ιδανικού εύρους λειτουργίας της *SOC (κατάσταση φόρτισης - State Of Charge)*, έχει γίνει σημαντικό αντικείμενο για προηγμένη έρευνα και τεχνολογία. Σήμερα, η παραγωγή και χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου εξελίσσεται πέραν των προσδοκιών όμως η κατασκευή τους για εφαρμογές σε οχήματα δεν συναντάται παντού εξαιτίας των υψηλών απαιτήσεων σε τεχνική υποστήριξη, διαχείριση πρώτων υλών και περιορισμών στον προϋπολογισμό. Μολαταύτα, λόγω της αυξανόμενης διείσδυσης των υβριδικών και αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά, οικονομικά αναπτυγμένες χώρες στοχεύουν σε επενδύσεις στην βιομηχανία μπαταριών **σχήμα(2.15)**.



Σχήμα(2.15). Βιομηχανίες κατασκευής μπαταριών ιόντων λιθίου για εφαρμογές σε οχήματα και μερίδιο αγοράς

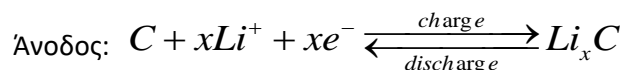
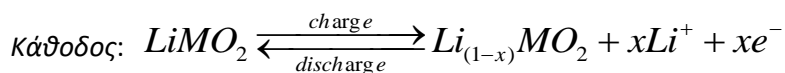
Η μπαταρία ιόντων λιθίου όμοια με άλλα είδη μπαταριών, αποτελείται από τέσσερα κύρια συστατικά στοιχεία: την κάθοδο, την άνοδο, τον ηλεκτρολύτη και τον διαχωριστή. Τα υλικά των

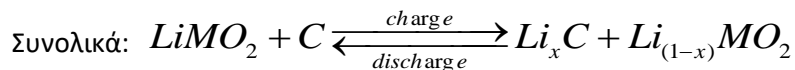
ηλεκτροδίων της μπαταρίας είναι το μεταλλικό οξείδιο του λιθίου ($LiMO_2$) για την *κάθοδο*, με στρωματοειδή δομή ή δομή σήραγγας επάνω σε συλλέκτη ρεύματος από αλουμίνιο (Al), και τυπικά για την *άνοδο* λιθωμένος γραφίτης (Li_xC), επίσης σε στρωματοειδή δομή επάνω σε συλλέκτη ρεύματος από χαλκό (Cu). Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από άλατα λιθίου και οργανικούς διαλύτες και επιτρέπει τη μεταφορά ιόντων λιθίου μεταξύ καθόδου και ανόδου αλλά όχι των ηλεκτρονίων. Ο διαχωριστής αποτελείται από μικροπορώδεις μεμβράνες διαμέσου των οποίων περνούν μόνο τα ιόντα λιθίου και έτσι αποτρέπει βραχυκύκλωμα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων **σχήμα(2.16)**.



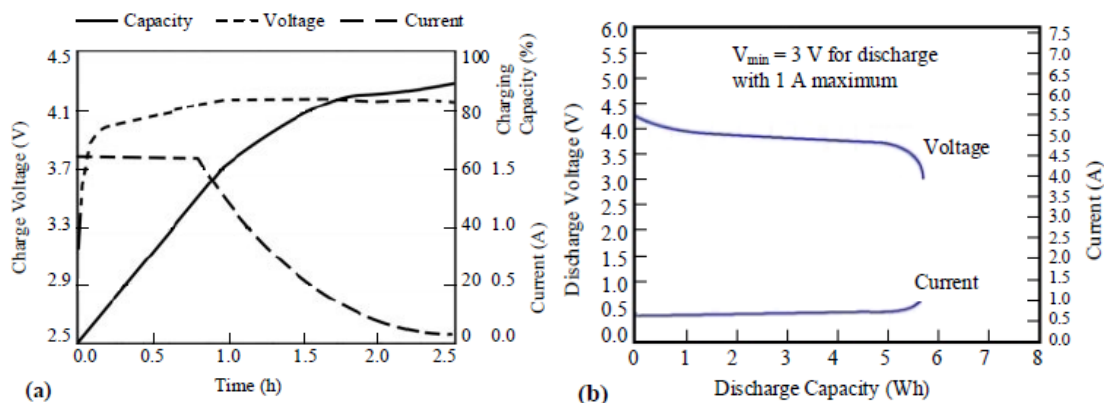
Σχήμα(2.16). Το φαινόμενο φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας ιόντων λιθίου

Κατά τη διαδικασία *εκφόρτισης* της μπαταρίας, το λίθιο στην *άνοδο* ιονίζεται και εκβάλλει στον ηλεκτρολύτη. Τα ιόντα κινούνται διαμέσου ενός πορώδους πλαστικού διαχωριστή και στη συνέχεια εισέρχονται στην *κάθοδο*. Την ίδια στιγμή ηλεκτρόνια απελευθερώνονται από την *άνοδο* και ηλεκτρικό ρεύμα οδεύει προς το εξωτερικό φορτίο. Κατά τη διάρκεια του *κύκλου φόρτισης*, ιόντα λιθίου εγκαταλείπουν την *κάθοδο* και περνώντας μέσα από τον διαχωριστή αποθηκεύονται στην *άνοδο*. Η διαδικασία απεικονίζεται στο **σχήμα(3.2)** και περιγράφεται στις παρακάτω ηλεκτροχημικές αντιδράσεις:



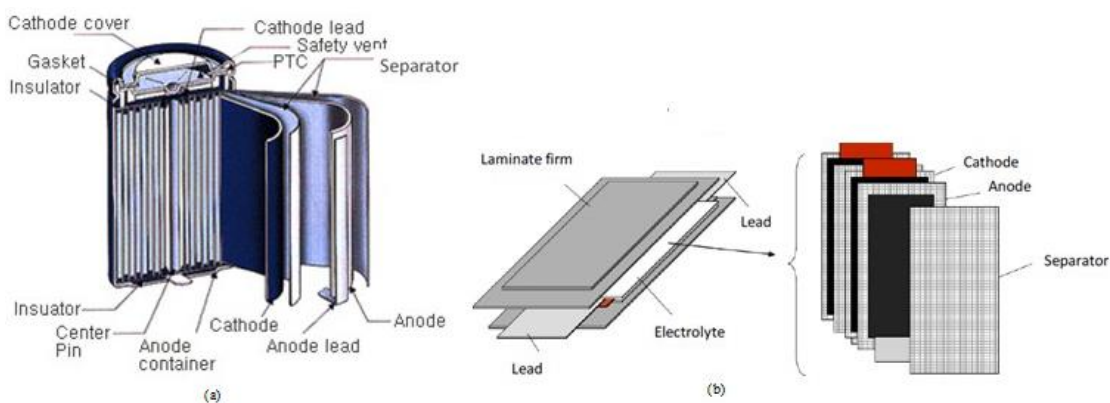


Η μπαταρία ιόντων λιθίου διαθέτει καλά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φόρτισης και εκφόρτισης όπως φαίνεται στο **σχήμα(2.17)**. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η χωρητικότητα φόρτισης βαθμιαία αυξάνει με την τάση, διατηρώντας σταθερό ρεύμα. Όταν η τάση φτάσει στο μέγιστο, το ρεύμα μειώνεται εκθετικά. Από την άλλη η χωρητικότητα εκφόρτισης διατηρεί σχεδόν σταθερό ρεύμα και τάση στο φορτίο, παρόλο που υπάρχει μια μικρή μείωση και αύξηση στις τιμές τάσης και ρεύματος αντίστοιχα, μέχρι η χωρητικότητα του κελιού να φτάσει το ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο, το οποίο ορίζεται από τον κατασκευαστή σαν *τάση τέλους φόρτισης (end-of-charge voltage)*.



Σχήμα(2.17). Τυπικά χαρακτηριστικά (α) φόρτισης και (β) εκφόρτισης μπαταρίας

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου κατασκευάζονται και συσκευάζονται σε δύο κύριους σχηματισμούς: μεταλλικά δοχεία σε κυλινδρικό σχήμα ή σχήμα πρίσματος και πολύστρωτοι μόνες (κελιά σε στοίβες), οι λεγόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου - πολυμερούς **σχήμα(2.18)**.



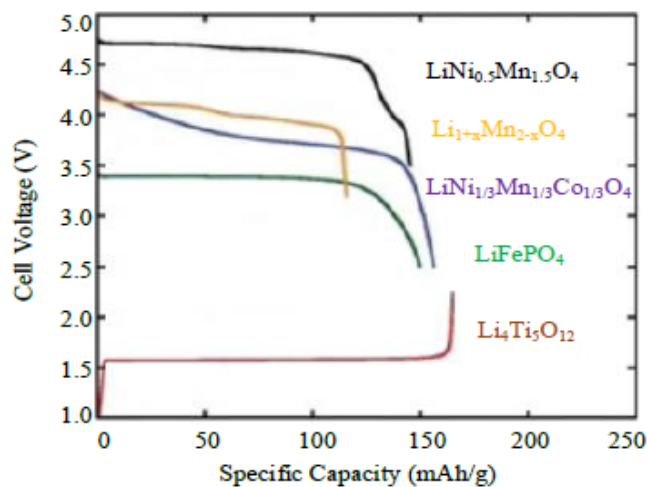
Σχήμα(1.18). Δομές μπαταριών λιθίου: (α) Σε κυλινδρική διαμόρφωση (β) Σε μορφή στοίβας

Όταν οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται σαν πηγή ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα, τα κελιά ιόντων λιθίου (*battery cells*) συγκεντρώνονται σε μονάδες (*battery modules*) οι οποίες ακολούθως συγκροτούν πακέτα μπαταριών (*battery racks*). Τα κελιά στα racks συνδέονται σε σειρά και παράλληλα ώστε να ικανοποιήσουν συγκεκριμένες απαιτήσεις σε ενέργεια και ισχύ **σχήμα(1.19)**.



Σχήμα(2.19). Κελί, μονάδα και πακέτο μπαταρίας ιόντων λιθίου

Οι βασικές διαφορές των μπαταριών ιόντων λιθίου, βρίσκονται στο υλικό που χρησιμοποιείται σαν θετικό ηλεκτρόδιο στη μπαταρία που είναι και η κύρια πηγή ενεργών ιόντων λιθίου. Τα υλικά καθόδου που χρησιμοποιούνται είναι **οξειδίο κοβαλτίου - λιθίου** ($LiCoO_2$, LCO), **οξειδίο μαγγανίου - λιθίου** ($LiMn_2O_4$, LMO), **φωσφορικό άλας σιδήρου - λιθίου** ($LiFePO_4$, LFP), **οξειδίο κοβαλτίου - μαγγανίου - νικελίου - λιθίου** ($LiNiMnCoO_2$, NMC), **οξειδίο αλουμινίου - κοβαλτίου - νικελίου - λιθίου** ($LiNiCoAlO_2$, LCA) και **τιτανικό λιθίο** ($Li_4Ti_5O_{12}$). Στο **σχήμα(2.20)** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά τάσης λειτουργίας των υλικών ηλεκτροδίου λιθίου.



Σχήμα(2.20). Τάση λειτουργίας υλικών καθόδου

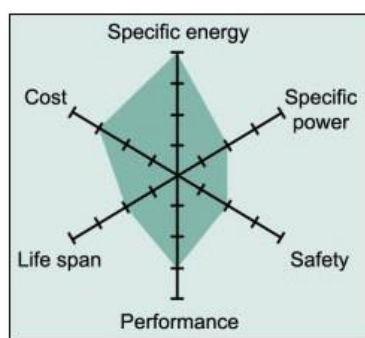
Όσον αφορά τα θετικά ηλεκτρόδια, το $LiCoO_2$ έχει καλή επίδοση, όμως χαμηλή χωρητικότητα και ακόμα υψηλό κόστος· το Co αποτελεί περιορισμένο πόρο.

Τα $LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O_2$ (LCA) και $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ (NMC) έχουν υψηλές χωρητικότητες και τάσεις, εξαιρετικές επιδόσεις, από την άλλη όμως υψηλά κόστη - Ni και Co αποτελούν περιορισμένους πόρους – με το NMC να είναι ασφαλέστερο από το LCA.

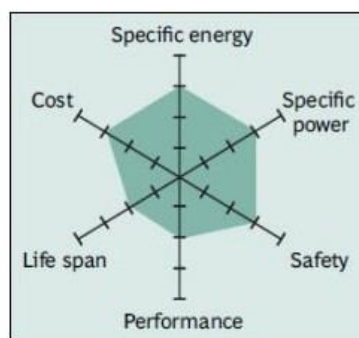
Τύποι μπαταριών ιόντων λιθίου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές
$LiCoO_2$	Υψηλή ειδική ενέργεια	Μικρή διάρκεια ζωής, περιορισμένη χωρητικότητα φορτίου και ασφάλεια	Κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές και ψηφιακές κάμερες
$LiMn_2O_4$	Ειδική ισχύς, ασφάλεια, χαμηλό κόστος	Μέτρια συνολική επίδοση, περιορισμένη διάρκεια ζωής	EVs, HEVs, ιατρική
$LiFePO_4$	Θερμική σταθερότητα, ανθεκτικότητα, υψηλή απόδοση ρεύματος, υψηλό επίπεδο ασφαλείας, χαμηλό κόστος και μεγάλη διάρκεια ζωής	Μέτρια επίπεδα ειδικής ενέργειας, χαμηλότερη τάση σε σχέση με άλλες μπαταρίες λιθίου, μειωμένη επίδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	EVs, ηλεκτρικά εργαλεία και φορητές συσκευές
$LiNiMnCoO_2$	Καλή συνολική επίδοση και υπεροχή σε ειδική ενέργεια	Υψηλό κόστος	Ηλεκτρικά οχήματα, ηλεκτρικά εργαλεία και αποθήκευση ενέργειας
$LiNiCoAlO_2$	Υψηλές πυκνότητες ισχύος και ενέργειας, διάρκεια ζωής	Υψηλό κόστος και χαμηλά επίπεδα ασφαλείας	Ηλεκτρικά οχήματα και ηλεκτρικά συστήματα κίνησης
$Li_4Ti_5O_{12}$	Εύρος θερμοκρασιών(-30-55°C) και απόδοση επαναφόρτισης 98%, κύκλος ζωής > 3000-7000 κύκλοι, υψηλά επίπεδα ασφαλείας και σταθερότητας, γρήγορη φόρτιση, φόρτιση σε ρυθμό >10C	Χαμηλή τάση (2.4V/κελί), χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, δύσκολη κατασκευή	Προηγμένες εφαρμογές ναυτεχνολογίας

Σχήμα(2.21). Σύγκριση επίδοσης και εφαρμογές διαφόρων τύπων μπαταριών λιθίου

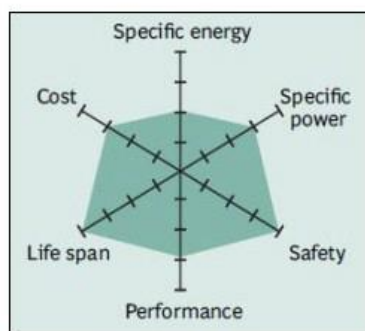
Οι διάφορες μορφές του $LiMn_2O_4$ (LMO) έχουν χαμηλό κόστος λόγω διαθεσιμότητας Mn , υψηλή τάση, μέτρια επίπεδα ασφαλείας και άριστη επίδοση όμως περιορισμένο κύκλο ζωής και ανεπαρκή χωρητικότητα. Το $LiFePO_4$ (LFP) διαθέτει ικανοποιητικά επίπεδα ασφαλείας, κύκλου ζωής και επιδόσεων γεμάτο με σίδηρο έχει χαμηλό κόστος και τοξικότητα, όμως χαμηλή τάση, χωρητικότητα και ενέργεια **σχήμα(2.21)**. Όσον αφορά τα αρνητικά ηλεκτρόδια, ο γραφίτης διαθέτει μεγάλο κύκλο ζωής, υπάρχει σε αφθονία όμως έχει σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και αστοχίες λόγω σχηματισμού στερεάς διεπαφής ηλεκτρολύτη. Το $Li_4Ti_5O_{12}$ είναι ένα υλικό με “μηδενική καταπόνηση”, έχει μεγάλο κύκλο ζωής και καλή απόδοση παρόλο που η τάση και η χωρητικότητά του έχουν χαμηλές τιμές. Στο **σχήμα (2.22)** γίνεται σύγκριση τεσσάρων τύπων μπαταριών λιθίου όσον αφορά χαρακτηριστικά τους όπως ειδική ενέργεια, ειδική ισχύς, κόστος, ασφάλεια, διάρκεια ζωής, επίδοση.



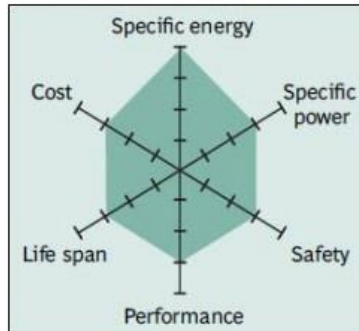
Lithium Cobalt Oxide (LCO)



Lithium Manganese Oxide (LMO)



Lithium Iron Phosphate (LFP)



Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)

Σχήμα(2.22). Διαγράμματα αράχνη τεσσάρων τύπων μπαταριών λιθίου

Όσον αφορά τη χρήση μπαταριών ιόντων λιθίου στα ηλεκτρικά οχήματα δίνεται έμφαση στην ασφάλεια και διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Στο **σχήμα(2.23)** παρουσιάζονται εταιρίες κατασκευής μπαταριών ιόντων λιθίου και μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων που ενσωματώνουν τους συγκεκριμένους τύπους μπαταριών.

Cathode Material Types	EVs Battery Packs Manufacturers	EVs Developers and EV Models	Battery Packs Usable Capacity (kWh)	Approx. Range under Normal Driving Conditions (miles)
Lithium Cobalt Oxide (LCO)	Panasonic, Telsa	Telsa-Roadster Daimler Benz-Smart EV	56 16.5	245 84
Lithium Manganese Oxide (LMO)	AESC, EnerDel, GS Yuasa, Hitachi, LG Chem, Toshiba	Think-Think EV Nissan-Leaf EV	23 24	99.4 105
Lithium Iron Phosphate (LFP)	A123, BYD, GS Yuasa, Lishen, Valence	BYD-E6 Mitsubishi-iMiEV	57 16	249 99.4
Lithium (Nickel-Manganese-Cobalt) Oxide (NMC)	Hitachi, LG Chem, Samsung	BMW-Mini E	35	150

Σχήμα(2.23). Επιλεγμένοι τύποι μπαταριών ιόντων λιθίου σε μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων του 21^{ου} αιώνα

2.2.2.2 Σύστημα διαχείρισης μπαταρίας ιόντων λιθίου

Η ασφαλής λειτουργία του **συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage System – ESS)** του οχήματος είναι ζωτικής σημασίας για την τεχνολογία των EV. Το **Σύστημα Διαχείρισης της Μπαταρίας (Battery Management System – BMS)** διευθύνει όλες τις μονάδες διαχείρισης και ελέγχου που αφορούν την αποθήκευση και μεταφορά ενέργειας στα συστήματα EV:

- Παρακολούθηση κυψέλης μπαταρίας
- Επιτήρηση τάσης και ρεύματος εισόδου/εξόδου
- Έλεγχος φόρτισης και εκφόρτισης
- Εκτίμηση κατάστασης (SOC, SOH, SOF)
- Προστασία μπαταρίας
- Εξισορρόπηση και ισοστάθμιση κυψελών
- Έλεγχος διαχείρισης ισχύος
- Έλεγχος θερμοκρασίας λειτουργίας
- Διαχείριση θερμότητας
- Δικτύωση και επικοινωνία
- Συλλογή δεδομένων
- Αποθήκευση δεδομένων

- Διάγνωση και αξιολόγηση σφαλμάτων

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των λειτουργιών του BMS.

Παρακολούθηση κυψέλης μπαταρίας

Τα EV χρησιμοποιούν μια σειρά κυψελών μπαταριών λιθίου μέσα στο πακέτο της μπαταρίας. Η κάθε κυψέλη μπορεί να συμπεριφέρεται διαφορετικά κατά τη διάρκεια λειτουργίας της επομένως η συνεχής επιτήρησή της είναι απαραίτητη ώστε να εξεταστούν οι συνθήκες στις οποίες βρίσκεται. Τα αποτελέσματα της παρακολούθησης αυτής συνδράμουν τις επιδόσεις του συστήματος μέσω λειτουργιών διαχείρισης, προστασίας, εξισορρόπησης και ελέγχου. Υποδεικνύουν την αναγκαιότητα του ελέγχου φόρτισης και εκφόρτισης, της προστασίας από κελιά σε συνθήκες υπερφόρτισης και υποφόρτισης, του ελέγχου θερμότητας και θερμοκρασίας, της επικοινωνίας και διεπαφής για την απόκτηση δεδομένων, της διάγνωσης και αξιολόγησης σφαλμάτων.

Επιτήρηση τάσης και ρεύματος εισόδου/εξόδου

Οι κυψέλες της μπαταρίας λιθίου χρειάζονται σταθερό ρεύμα φόρτισης ώστε να διατηρήσουν συνεχή τάση κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Αποκλίνουσες τιμές ρεύματος και τάσης φόρτισης μπορεί να προκαλέσουν σφάλμα ή καταστροφή του συστήματος και για το λόγο αυτό η επιτήρηση των επιπέδων ρεύματος και τάσης των κυψελών είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία του. Επιπλέον, οι καταγεγραμμένες τιμές τάσης-ρεύματος παρουσιάζουν την κατάσταση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, έτσι ώστε να μπορεί το EV να πάρει αποφάσεις για περαιτέρω δράση.

Έλεγχος φόρτισης και εκφόρτισης

Η επίδοση και αντοχή της μπαταρίας λιθίου εξαρτάται κυρίως από τη φόρτιση και εκφόρτισή της. Ποιοτική φόρτιση και αποφόρτιση της μπαταρίας βελτιώνει την απόδοση και τον κύκλο ζωής του συστήματος αποθήκευσης μπαταριών. Ο αποτελεσματικός έλεγχος φόρτισης και εκφόρτισής της απομακρύνει το **φαινόμενο μνήμης (memory effect)** και αυξάνει την περίοδο αποφόρτισης της μπαταρίας. Συνίσταται η φόρτιση με βελτιστοποιημένο PI ελεγκτή συνεχούς τάσης – συνεχούς ρεύματος (CC-CV) και ελεγχόμενη εκφόρτιση σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής ρεύματος (DCM).

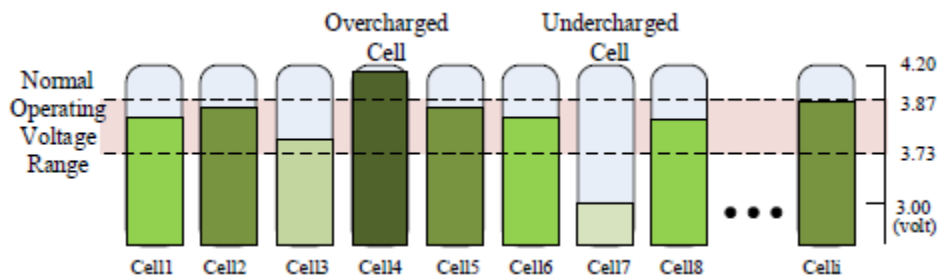
Εκτίμηση κατάστασης

Οι καταστάσεις μιας μπαταρίας περιλαμβάνουν την **κατάσταση φόρτισης (SOC – State Of Charge)**, την **κατάσταση της υγείας** της μπαταρίας (**SOH – State Of Health**) και την **κατάσταση λειτουργίας** της (**SOF – State Of Function**). Η SOC καθορίζει το επίπεδο φόρτισης και το βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας λιθίου. Υπολογίζεται με μεθόδους όπως είναι η δοκιμή εκφόρτισης, η μέτρηση τάσης ανοιχτού κυκλώματος, η μέτρηση coulomb, η μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης, ο αλγόριθμος ασαφούς λογικής (fuzzy logic), το φίλτρο Kalman, τα νευρωνικά δίκτυα κ.ά. Η SOH καθορίζει την παρούσα κατάσταση σε σχέση με την ιδανική κατάσταση της μπαταρίας η οποία εξαρτάται από την εσωτερική αντίσταση, τη χωρητικότητα, την πυκνότητα ισχύος και τον ρυθμό αυτοεκφόρτισής της. Δείχνει κατά πόσο έχει γίνει κακή χρήση της και εάν η επίδοσή της είναι υποβαθμισμένη. Η SOH εκτιμάται μέσω μεθόδου ανοικτού βρόχου

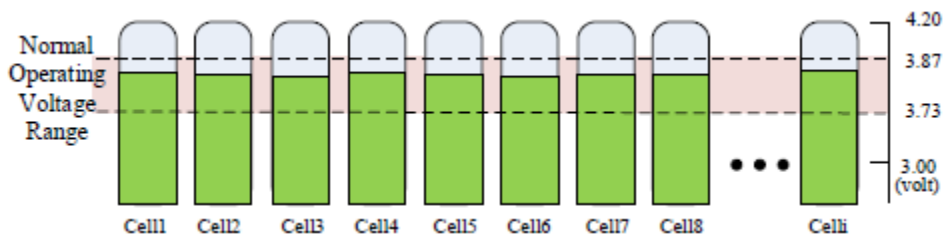
Βασισμένη σε μοντέλα αντοχής που πραγματοποιείται παρακολουθώντας το μηχανισμό απώλειας ιόντων, τις παράπλευρες αντιδράσεις, τη μείωση της χωρητικότητας και τη σταδιακή αύξηση της εσωτερικής αντίστασης. Εκτιμάται επίσης μέσω μεθόδου αναγνώρισης παραμέτρων κλειστού βρόχου, βασισμένης σε μοντέλα μπαταριών. Η SOF φανερώνει την επίδοση της μπαταρίας συγκριτικά με τις απαιτήσεις των συστημάτων EV και εκφράζεται σαν την αναλογία της εναπομείνουσας ενέργειας προς τη μέγιστη ενέργεια της μπαταρίας. Η SOF μπορεί να καθοριστεί από τις εκτιμώμενες τιμές των SOC και SOH, το προφίλ φόρτισης/εκφόρτισης και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Η τιμές SOC, SOH, SOF της μπαταρίας απεικονίζουν και προβλέπουν τη συνολική κατάσταση και επίδοση του ESS στο EV έτσι ώστε ακολούθως να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες.

Προστασία μπαταρίας

Οι διαδοχικοί κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας, μπορεί να προκαλέσουν ανισορροπία στην τάση και στο φορτίο μεταξύ των κυψελών της, εξαιτίας των αλλαγών που υφίστανται τα φυσικά χαρακτηριστικά της. Η ανισορροπία αυτή συμβαίνει λόγω προβλημάτων κατασκευής, θερμοκρασίας και γήρανσης των κελιών **σχήμα(2.24)**. Υπερφόρτιση των κυψελών μπορεί να προκαλέσει έκρηξη, ενώ η υποφόρτιση μπορεί να καταστρέψει τις χημικές ιδιότητες της μπαταρίας και να μειώσει τον χρόνο ζωής των κυψελών της. Το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας μπορεί να τερματίσει τη φόρτιση και εκφόρτισή της όταν αυτή βρίσκεται εκτός του εύρους λειτουργίας με αποτέλεσμα την πιθανή απώλεια του ονομαστικού επιπέδου φόρτισης που απαιτείται για τη λειτουργία της. Για τον λόγο αυτό ο *ελεγκτής εξίσωσης φόρτισης* είναι απαραίτητος για την προστασία των κυψελών και για τη διατήρηση της χωρητικότητας αποθήκευσης και των ονομαστικών συνθηκών λειτουργίας της μπαταρίας.



Σχήμα(2.24). Ανισορροπία στη φόρτιση των κυψελών της μπαταρίας



Σχήμα(2.25). Προστασία , παρακολούθηση και εξίσωση φόρτισης

Εξισορρόπηση και ισοστάθμιση κυψελών

Ο **ελεγκτής εξίσωσης φόρτισης (CEC – Charge Equalization Controller)**, επιτηρεί αδιάκοπα την τάση, το ρεύμα και τη θερμοκρασία των κελιών της μπαταρίας και ανιχνεύει ένα μη ισοσταθμισμένο κελί μέσω εκτίμησης της SOC τους. Η διαδικασία ισοστάθμισης πραγματοποιείται με τη μεταφορά περίσσειας φορτίου από το υπερφορτισμένο κελί σε ένα άλλο cell/module/rack ή μεταφέροντας το απαιτούμενο φορτίο από παρακείμενο cell/module/rack έτσι ώστε οι κυψέλες να έχουν το ίδιο επίπεδο τάσης και φορτίου εντός του εύρους λειτουργίας **σχήμα(2.25)**. Ο έλεγχος ισοστάθμισης μπορεί να προστατεύσει τις μπαταρίες από βλάβη, να βελτιώσει την απόδοση και να αυξήσει τη διάρκεια ζωής τους. Από την άλλη, ένα EV χρησιμοποιεί 90 ή και περισσότερα κελιά σε ένα series battery pack πράγμα που καθιστά δύσκολη τη διαχείριση της επιτήρησης και εξισορρόπησης καθενός από αυτά λόγω πολυπλοκότητας σχεδίου και ελέγχου και αυξημένου κόστους και βάρους. Επομένως είναι αναγκαίο το BMS να χρησιμοποιεί έναν απλό CEC.

Έλεγχος διαχείρισης ισχύος

Η ελαχιστοποίηση της κατάχρησης και των απωλειών ισχύος αποτελεί σήμερα ερευνητική πρόκληση όσον αφορά την ισορροπημένη και αποδοτική κατανομή και χρήση ισχύος στα EV. Απουσία διαχείρισης της ισχύος που οδηγεί το σύστημα και άλλα φορτία, η συνολική επίδοση του συστήματος μειώνεται. Επιπλέον, ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά μηχανήματα, εργαλεία και συσκευές γίνονται λιγότερο αποδοτικά λόγω ασυνήθιστης λειτουργίας και ασταθούς παροχής ισχύος. Το σύστημα διαχείρισης ισχύος επιτυγχάνει τη διανομή σταθερής ισχύος και τον αποδοτικό και έξυπνο έλεγχο του φορτίου των EV. Ο βέλτιστος έλεγχος και διαχείριση της ισχύος είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της επίδοσης, αντοχής, ασφάλειας και ποιότητας ισχύος του συστήματος όπως και για τη μείωση των απωλειών και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης.

Έλεγχος θερμοκρασίας λειτουργίας

Το σύστημα αποθήκευσης μπαταριών λιθίου των EV είναι απαραίτητο να λειτουργεί σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας παρακολουθεί τις συνθήκες λειτουργίας της μπαταρίας και διασφαλίζει ότι αυτή λειτουργεί εντός του θερμοκρασιακού εύρους λειτουργίας. Διαφορετικά, το πρόγραμμα ελέγχου θερμοκρασίας ενημερώνει το σύστημα διαχείρισης θέρμανσης και ψύξης. Ο διαρκής έλεγχος και εποπτεία της θερμοκρασίας της μπαταρίας υποστηρίζουν την αποδοτική λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης του EV, και προστατεύουν τη μπαταρία από έκρηξη.

Διαχείριση θερμότητας

Το pack μπαταριών λιθίου χρειάζεται ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια λειτουργίας του EV. Με βάση το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας του BMS, το σύστημα διαχείρισης θερμότητας αποφασίζει εάν θα θέσει σε λειτουργία το σύστημα ψύξης ή θέρμανσης και ρυθμίζει την ισχύ του, ενώ προβλέπει ακραίες συνθήκες λειτουργίας του ESS κατά τις οποίες αυτό χρειάζεται επείγουσα συντήρηση.

Δικτύωση και επικοινωνία

Το σύστημα του EV χρειάζεται επικοινωνία μεταξύ των υποσυστημάτων του οχήματος και των συστημάτων διαδικτύωσης. Είναι απαραίτητη η βελτιστοποίηση των επιδόσεων του EV και η επίτευξη διαδικτυακής επιτήρησης, επικοινωνίας, λήψης προγραμμάτων, επικαιροποίησης και ελέγχου των αλλαγών για τις οποίες πρέπει να είναι ενήμερο το BMS. Επιπλέον, η αναγνώριση του βέλτιστου σταθμού φόρτισης από το EV και η πρόβλεψη του εύρους οδήγησης γίνονται μέσω του GPS και του **CAN(Controller Area Network – Δίκτυο Περιοχής Ελεγκτών)** μέσω διαδικτυακών εκτιμήσεων των SOC και SOH του ESS.

Συλλογή δεδομένων

Το BMS αντλεί τα τρέχοντα χαρακτηριστικά της μπαταρίας λιθίου μέσω του συστήματος συλλογής δεδομένων το οποίο αποτελείται από αισθητήρες, υλικό μέτρησης, λογισμικό και επεξεργαστή. Συλλέγει και αποθηκεύει δεδομένα όπως τάση, ρεύμα και θερμοκρασία τα οποία επεξεργάζεται μέσω συναρτησιακών και ελεγκτικών αλγορίθμων.

Αποθήκευση δεδομένων

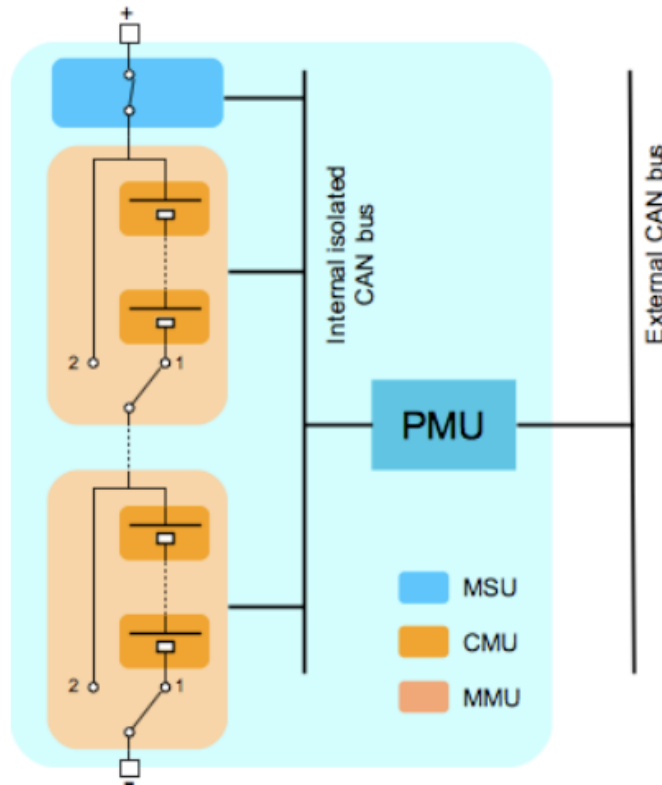
Το BMS απαιτεί αποθήκευση δεδομένων από το σύστημα αποθήκευσης μπαταριών του EV, όπως οι τιμές τάσης και SOC κάθε κελιού, ιστορικό αισθητήρων θερμοκρασίας, συνθήκες φόρτισης και εκφόρτισης, πρόγραμμα ελέγχου κ.λπ. Το BMS επεξεργάζεται τα αποθηκευμένα δεδομένα για την εξισορρόπηση των κυψελών της μπαταρίας, τη διαχείριση θερμότητας, τη διάγνωση σφαλμάτων και τον έλεγχο λοιπών λειτουργικών μερών μέσω του ελεγκτή του BMS. Ο ελεγκτής του BMS συνδέεται με τον κύριο ελεγκτή του EV ο οποίος εποπτεύει τις ενέργειες του BMS και υλοποιεί αποφάσεις.

Διάγνωση και αξιολόγηση σφαλμάτων

Το σύστημα μπαταριών ιόντων λιθίου αντιμετωπίζει προβλήματα όπως ανισορροπία, υποφόρτιση, υπερφόρτιση, υπερένταση και πολύ χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον το BMS αντιμετωπίζει σφάλματα συλλογής δεδομένων, ηλεκτρικών συνδέσεων, επικοινωνίας και δικτύου, σφάλματα προγραμμάτων, προβλήματα απομόνωσης κ.λπ. Το BMS απαιτείται να προσπελάσει και να διαγνώσει τα σφάλματα αυτά και να κάνει τις απαραίτητες ενέργειες χρησιμοποιώντας τεχνολογία διάγνωσης σφαλμάτων. Η τεχνολογία διάγνωσης και αξιολόγησης σφαλμάτων διεξάγεται με βάση κάποιο μοντέλο ανάλυσης και μεθόδους επεξεργασίας γνώσης και σημάτων. Η έρευνα πάνω στη διάγνωση σφαλμάτων εξελίσσεται ραγδαία ώστε να συντελέσει στην ασφάλεια και εξέλιξη των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας των EV.

Στο **σχήμα(2.26)** παρουσιάζεται η ιεραρχική δομή του BMS με τη **μονάδα παρακολούθησης κυψέλης (CMU – Cell Monitoring Unit)**, τη **μονάδα διαχείρισης ομάδας κυψελών (MMU - Module Management Unit)**, τη **μονάδα διαχείρισης πακέτου (PMU - Pack Management Unit)** και τη **μονάδα κεντρικού διακόπτη (MSU - Main Switch Unit)**. Η μπαταρία μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από τρία επίπεδα το ένα μέσα στο άλλο· βασικό στοιχείο της μπαταρίας είναι η κυψέλη, ανεβαίνοντας ιεραρχικά είναι η μονάδα της μπαταρίας που είναι μία ομάδα

κυψελών σε σειρά/παράλληλα, ενώ μια σειρά μονάδων συγκροτεί το πακέτο της μπαταρίας. Κάθε επίπεδο μπορεί να λειτουργήσει σαν μια έξυπνη πλατφόρμα για την αποτελεσματική εφαρμογή υποσυνόλου λειτουργιών του BMS. Στο εσωτερο επίπεδο φιλοξενείται η CMU, μία για κάθε κυψέλη της στοιχειοσειράς. Το μεσαίο στρώμα αποτελείται από τις MMU, μία για κάθε μία από τις μονάδες στις οποίες έχει διαμεριστεί η στοιχειοσειρά. Η MMU χρησιμοποιεί τις βασικές λειτουργίες παρακολούθησης που εκτελούν οι εσώτερες CMU και παρέχει υπηρεσίες σε υψηλότερο επίπεδο στην PMU, η οποία εποπτεύει όλη τη στοιχειοσειρά της μπαταρίας. Μία αποκλειστική και εξατομικευμένη



Σχήμα(2.26). Ιεραρχική δομή του BMU

θύρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση κάθε CMU με τη σχετική MMU. Μία κοινή, γαλβανικά απομονωμένη θύρα CAN προτιμάται για την υλοποίηση της επικοινωνίας μεταξύ των MMU και της PMU. Η εσωτερική θύρα CAN ενσωματώνει επίσης την διεπαφή μεταξύ της μπαταρίας και συστημάτων ελέγχου που αφορούν συγκεκριμένες εφαρμογές. Σε ένα ηλεκτρικό όχημα, η PMU συνδέεται με το **VMS (Vehicle Management System - Σύστημα Διαχείρισης Οχήματος)** μέσω εξωτερικής θύρας CAN ή άλλης ταχύτερης θύρας με ανοχή σφαλμάτων όπως η **FlexRay**. Στο **σχήμα(2.27)** παρουσιάζονται τεχνικές εξίσωσης φορτίου των κυψελών της μπαταρίας [107] [108] [109].

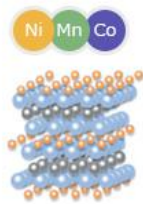
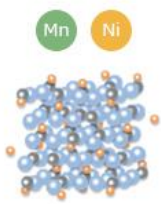



Τεχνική		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	
Παθητική	Cell-to-Heat (μία αντίσταση διαρροής και ένας διακόπτης για κάθε κελί, η επιπλέον ενέργεια στο κελί μετατρέπεται σε θερμότητα μέσω της αντίστασης)	<ul style="list-style-type: none"> Απλότητα Χαμηλό κόστος 	<ul style="list-style-type: none"> 0% απόδοση Αργή 	
Ενεργητική	Module-to-Cell (το φορτίο μεταφέρεται από μια μονάδα μπαταρίας σε ένα κελί μέσω γαλβανικά απομονωμένου DC/DC μετατροπέα)	<ul style="list-style-type: none"> Σχετικά απλή Καλή απόδοση Γρήγορη 	<ul style="list-style-type: none"> Δίκτυο διακοπών Υψηλή τάση απομόνωσης του DC/DC 	
	Cell-to-Cell	Distributed (Το φορτίο μεταφέρεται από γειτονικά κελιά)	<ul style="list-style-type: none"> Μέτρια απόδοση Μέτρια ταχύτητα 	<ul style="list-style-type: none"> Όγκος Πολυπλοκότητα ελέγχου
		Shared (Το φορτίο μεταφέρεται από το κελί Α και αποθηκεύεται, έπειτα μεταφέρεται στο κελί Β)	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή απόδοση Ταχύτητα 	<ul style="list-style-type: none"> Δίκτυο διακοπών
	Cell/Module Bypass (Αποσύνδεση κελιού/μονάδας από τη διαδρομή του ρεύματος)	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή απόδοση εξισορρόπησης Υψηλή ταχύτητα και ευελιξία 	<ul style="list-style-type: none"> Διακόπτες μεγάλου ρεύματος Πολυπλοκότητα εφαρμογής Μείωση απόδοσης της μπαταρίας σε κανονική λειτουργία 	

Σχήμα(2.27).Σύγκριση τεχνικών εξισορρόπησης κυψελών

2.2.2.2 Το παράδειγμα της μπαταρίας του Nissan Leaf

Η AESC (Automotive Energy Supply Corporation) ιδρύθηκε το 2007 σαν κοινή επιχείρηση μεταξύ της Nissan Motor Company, Ltd., της NEC Corporation και της NEC Tokin Corporation με σκοπό την ανάπτυξη και παραγωγή υψηλών επιδόσεων μπαταριών ιόντων λιθίου για αυτοκίνητα. Από το 2010 παρήγαγε μαζικά μπαταρίες λιθίου για το μοντέλο Nissan Leaf. Το πρώτο Leaf ήταν εξοπλισμένο με πακέτο μπαταριών των 24 kWh ενώ η χωρητικότητα της μπαταρίας του το 2017 έφτασε τις 40kWh. Το 2019 την AESC απέκτησε η Envision με στόχο την κατασκευή έξυπνων μπαταριών, κάνοντας χρήση ΑIoT τεχνολογίας. Τον Απρίλιο του 2019 η εταιρία ανακοίνωσε την κυκλοφορία της νέας γενιάς μπαταριών Gen5-811 με τεχνολογία ΑIoT στη 18η Διεθνή Έκθεση Αυτοκινήτου της Σανγκάης.

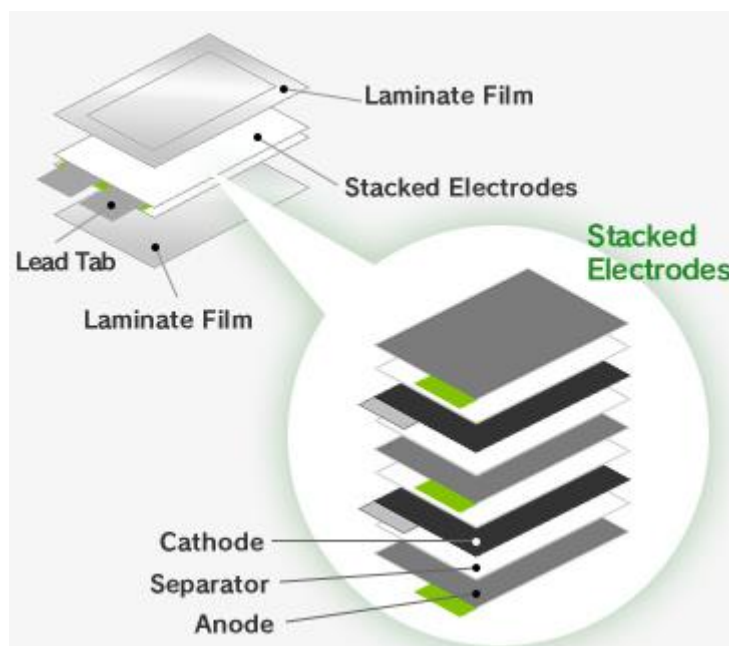
Battery	Cruising distance (WLTC/JC08 mode)	
24kWh	2010	(200km@JC08)
	2012	(228km@JC08)
30kWh	2015	(280km@JC08)
40kWh	2017	322km@WLTC Mode (400km@JC08 Mode)
62kWh	2019	458km@WLTC Mode (570km@JC08 Mode)

	LEAF e+ (62kWh) Newly-introduced	LEAF (40kWh) Second generation	LEAF (24kWh) First generation
Cathode material	 <p>Layer structure (NMC*) Lithium: ● Metal: ● Oxygen: ●</p>	<p>Optimized storage of Lithium ions</p>  <p>Spinel structure (LMO**) Lithium: ● Metal: ● Oxygen: ●</p>	
Module	<p>New module layout allows configuration flexibility to minimize battery pack size</p>  <p>Cell amount can be customized, resulting in a compact module</p>	 <p>8-cell module</p>	<p>Optimize structure to include 2 modules</p>  <p>4-cell module</p>

*Lithium Nickel Cobalt Manganese Oxide
**Lithium Manganese Oxide

Σχήμα(2.28). Εξέλιξη της μπαταρίας του Nissan Leaf

Στο **σχήμα(2.28)** φαίνεται η εξέλιξη της μπαταρίας του Nissan Leaf. Το battery pack των 24kWh, με υλικό καθόδου το LMO, ήταν δομημένο σε 48 modules των 4 cells ενώ αυτό των 40 kWh με υλικό καθόδου NMC, είναι δομημένο σε 24 modules των 8 cells. Τα κελιά των μπαταριών αποτελούνται από στοίβες καθόδων, ανόδων και διαχωριστών σφραγισμένες ανάμεσα σε δύο ελάσματα **σχήματα(2.28, 2.29)**.

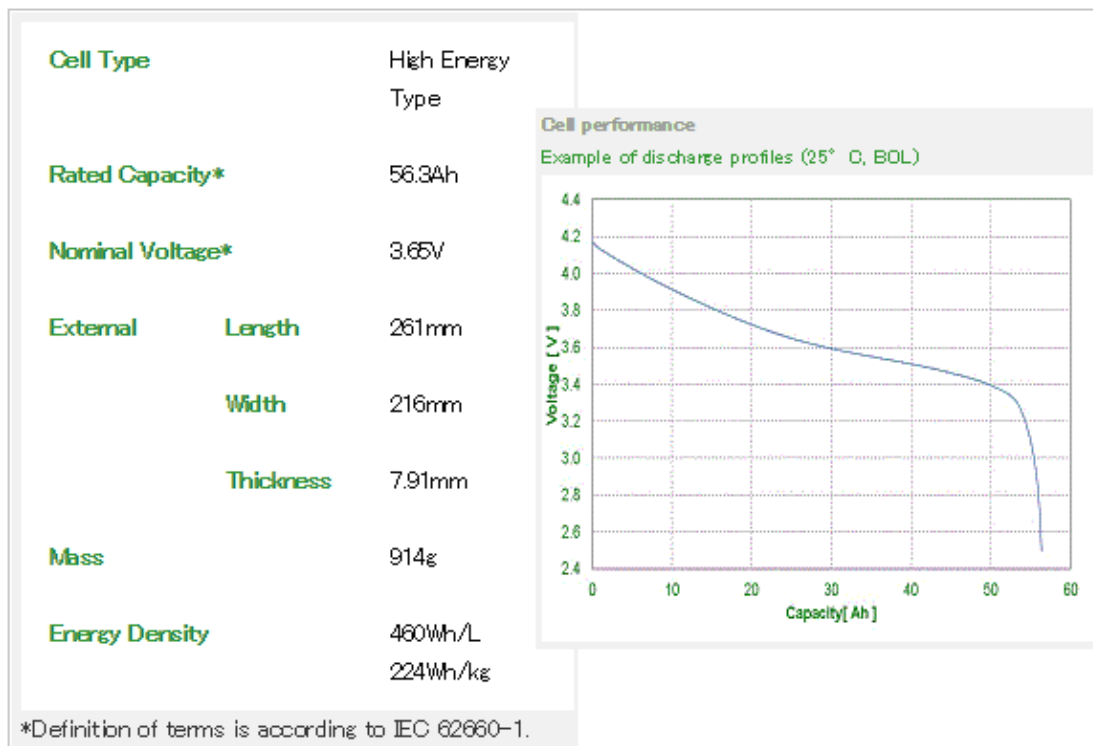


Σχήμα(2.29). Δομή κελιού μπαταρίας ιόντων λιθίου ηλεκτρικού αυτοκινήτου

Στα **σχήματα (2.30, 2.32, 2.33)** φαίνονται αντίστοιχα το κελί, η μονάδα και το πακέτο της μπαταρίας, του μοντέλου Nissan Leaf που κυκλοφόρησε το 2017.



Σχήμα(2.30). Κελί μπαταρίας 40kWh του Nissan Leaf



Σχήμα(2.31). Γενικά χαρακτηριστικά και επίδοση κελιού μπαταρίας 40kWh του Nissan Leaf



Number of Cells	8	
Configuration	2 parallel, 2 series X 2 units	
Exterior Dimensions	Length	300mm (Excluding terminals and protrusions)
	Width	222mm
	Height	68mm
Mass	8.7 kg	

Σχήμα(2.32). Γενικά χαρακτηριστικά μονάδας μπαταρίας 40kWh του Nissan Leaf

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κελιού και της μονάδας της μπαταρίας που συνοψίζονται στα **σχήματα (2.31, 2.32)** και λαμβάνοντας υπόψη ότι το πακέτο συγκροτούν 24 μονάδες, η ονομαστική τάση της μπαταρίας των 40kWh θα είναι:

$$V_{batt} = 4 \cdot V_{cell} \cdot (\text{number of modules}) = 4 \times 3.65V \times 24 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{batt} = 350.4V$$

Εάν η τάση κελιού φθάσει τη μέγιστη τιμή της (περίπου 4.17V), η τάση μπαταρίας θα είναι:

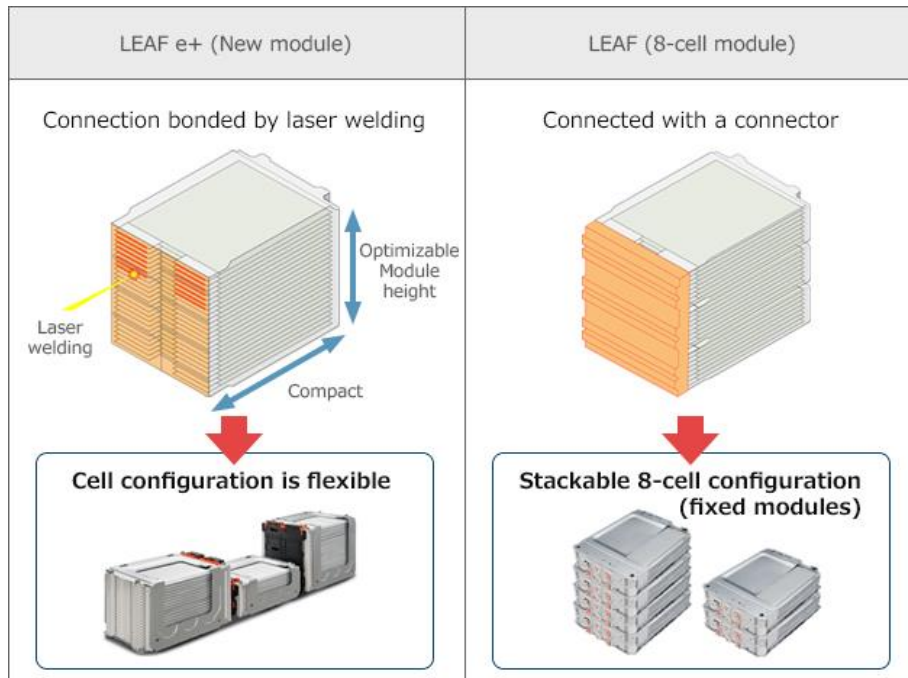
$$V_{max} = 4 \cdot 4.17 \cdot 24 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{max} = 400.32V$$



Σχήμα(2.33). Πακέτο μπαταριών 40kWh του Nissan Leaf

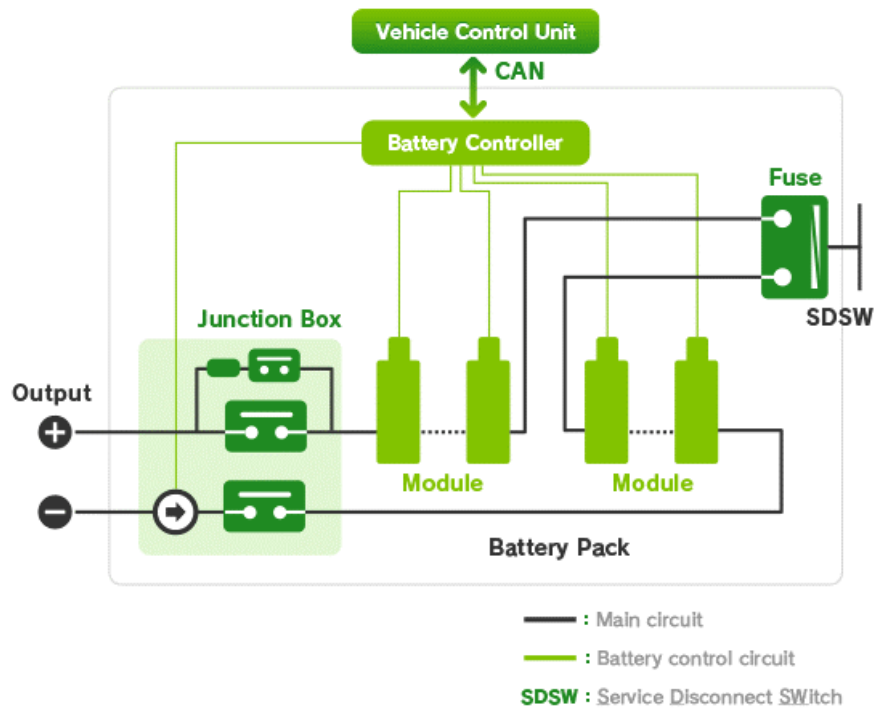
Το μοντέλο Leaf του 2019, LEAF e+, υιοθετεί μια πιο ευέλικτη δομή μονάδας μπαταρίας, που επιτρέπει την προσαρμογή του αριθμού κελιών. Χρησιμοποιώντας τη συγκόλληση με laser για την ένωση των κελιών, το συνολικό μήκος της μονάδας μπαταρίας γίνεται μικρότερο δίνοντάς της το κατάλληλο σχήμα και ύψος ανάλογα με την πλατφόρμα του οχήματος και τις ανάγκες του οδηγού **σχήμα(2.34)**.



Σχήμα(2.34). Σύγκριση της διάρθρωσης μονάδων μπαταρίας του νέου μοντέλου Leaf (LEAF e+) με αυτό του 2017

Στο **σχήμα(2.35)** παρουσιάζεται σχηματικά το BMS της μπαταρίας του Nissan Leaf. Το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας παρακολουθεί τάση, θερμοκρασία και κατάσταση της μπαταρίας

του οχήματος. Τα δεδομένα της μπαταρίας αποστέλλονται στη μονάδα ελέγχου του οχήματος μέσω θύρας CAN [88] [110] [111].



Σχήμα(2.35). Δομή του BMS του Nissan Leaf

2.3. Τρόποι και πρότυπα φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος

2.3.1 Τρόποι φόρτισης

Το είδος της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, και ο χρόνος που αυτή απαιτεί, είναι μείζονος σημασίας για τον καταναλωτή, δεδομένου του περιορισμένου εύρους οδήγησης πολλών οχημάτων σε αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία. Τα BEV και FCEV βασίζονται εξ ολοκλήρου τη λειτουργία τους στις υποδομές φόρτισης, ενώ για τα υβριδικά αυτές δεν είναι καθοριστικής σημασίας καθώς τα οχήματα περιλαμβάνουν και μηχανή εσωτερικής καύσης.

Οι κύριοι τρόποι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι με καλώδιο, ασύρματα και με αλλαγή μπαταρίας:

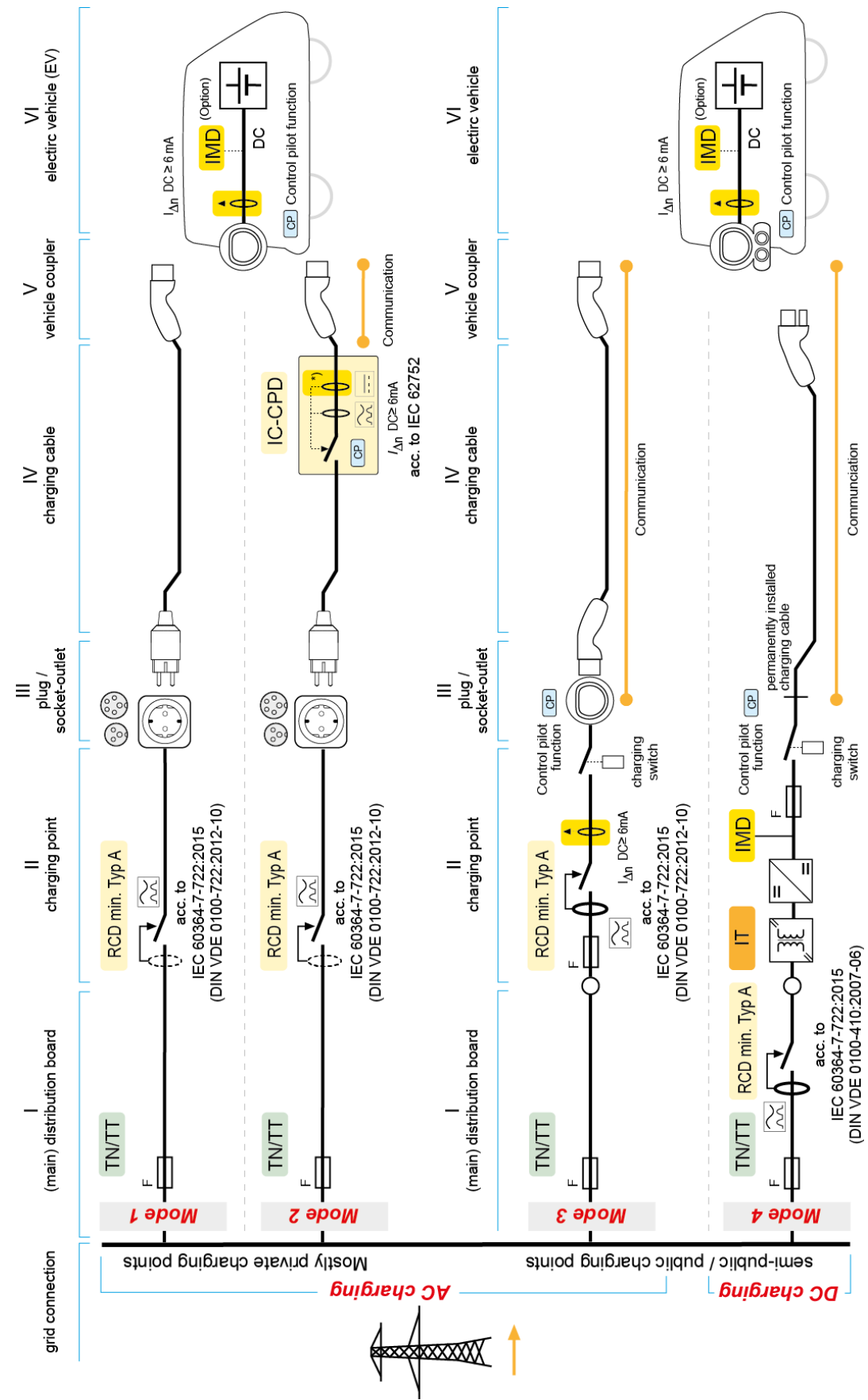
Φόρτιση με καλώδιο (Plug-in charging)

Η φόρτιση με καλώδιο χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των σύγχρονων BEV και PHEV. Τα οχήματα συνδέονται στο σημείο φόρτισης φυσικά, με χρήση ενός καλωδίου και μίας πρίζας. Η φόρτιση με καλώδιο μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιονδήποτε σταθμό φόρτισης, στο σπίτι, σε δημόσιους δρόμους, σε εμπορικούς ή ιδιωτικούς χώρους. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα εν γένει μπορούν να φορτιστούν και σε απλές οικιακές πρίζες με αργούς όμως ρυθμούς αφού αυτές παρέχουν μια μικρή μόνο ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος. Η φόρτιση σε οικιακή πρίζα διαρκεί κατά κανόνα περίπου οκτώ ώρες και για αυτό είναι καταλληλότερη για χρήση κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η ταχύτερη φόρτιση απαιτεί εξειδικευμένη υποδομή. Μέχρι σήμερα, οι περισσότεροι δημόσιοι σταθμοί καλωδιακής φόρτισης εγκατεστημένοι στις πόλεις σε τοπικό ή εθνικό επίπεδο, προσφέρουν φόρτιση σε κανονικές ταχύτητες.

Τα διάφορα επίπεδα φόρτισης στην **Αμερική** σύμφωνα με το πρότυπο J1772 της SAE παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα [72]:

Επίπεδο φόρτισης	Ονομαστική Τάση(V)	Ρεύμα(A)	Ισχύς(kW)	Εκτιμώμενος Χρόνος Φόρτισης
AC - 1	120 (1φ)	12	1.4	PHEV: 7hr (SOC*-0%-full)
		16	1.9	BEV: 17hr (SOC-20%-full) (Φορτιστής επί του οχήματος)
AC - 2	240 (1φ)	≤80	≤19.2	Φορτιστής 3.3kW PHEV: 3hr (SOC*-0%-full) BEV :7hr (SOC-20%-full)
				Φορτιστής 7kW PHEV: 1.5hr (SOC*-0%-full) BEV: 3.5hr (SOC-20%-full)
				Φορτιστής 20kW PHEV: 22min (SOC*-0%-full) BEV: 1.2hr (SOC-20%-full) (Φορτιστής επί του οχήματος)
AC - 3*	1φ/3φ		>20	
DC - 1*	200-450 V _{DC}	≤80	≤36	Φορτιστής 20kW PHEV: 22min (SOC*-0%-80%) BEV: 1.2hr (SOC-20%-full) Φορτιστής εκτός του οχήματος
DC - 2*	200-450 V _{DC}	≤200	≤90	Φορτιστής 45kW PHEV: 10min (SOC*-0%-80%) BEV: 20min (SOC-20%-80%) Φορτιστής εκτός του οχήματος
DC - 3*	200-600 V _{DC}	≤400	≤240	Φορτιστής 45kW BEV: <10min (SOC*-0%-80%) Φορτιστής εκτός του οχήματος

*Δεν έχει οριστικοποιηθεί



Σχήμα(2.36). Οι τέσσερις τρόποι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με το πρότυπο της IEC 61851 – 1

Στην **Ευρώπη** και σύμφωνα με το πρότυπο της **IEC (International Electrotechnical Commission - Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή) 61851 – 1**, υπάρχουν τέσσερις λειτουργίες φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα **σχήμα(2.36)**. Κάθε λειτουργία περιγράφει την ταχύτητα με την οποία φορτίζεται το όχημα, ορίζει την απαιτούμενη τάση, το ρεύμα και την ισχύ που πρέπει να παρέχουν τα καλώδια φόρτισης σε αυτή τη μέθοδο φόρτισης, και καθορίζει το επίπεδο επικοινωνίας μεταξύ του οχήματος και της εξόδου ισχύος.

Ορίζονται οι εξής **μέθοδοι φόρτισης (charging modes)**:

Mode 1: Αργή φόρτιση σε οικιακές πρίζες με εναλλασσόμενο ρεύμα μονοφασικό ή τριφασικό. Ο φορτιστής είναι ενσωματωμένος στο όχημα χωρίς να έχει επικοινωνία με αυτό ενώ δεν υπάρχει δυνατότητα ελέγχου της φόρτισης και προστασίας του οχήματος. Η μέθοδος **δεν συνίσταται** καθώς δεν υπάρχει η βεβαιότητα ότι υπάρχει διάταξη προστασίας ρεύματος διαρροής (RCD) εγκατεστημένη στο κτίριο. Η συναντάται συχνά σε σπίτια και κτίρια γραφείων συνήθως με επίπεδο ισχύος φόρτισης τα 3.3 kW.

Mode 2: Αργή ή κανονική φόρτιση (σε ιδιωτικά σημεία) με εναλλασσόμενο ρεύμα μονοφασικό ή τριφασικό και με ενσωματωμένη συσκευή επικοινωνίας με το όχημα στο καλώδιο για λόγους ασφαλείας της ηλεκτρικής εγκατάστασης (ημιενεργή σύνδεση με το ηλεκτρικό όχημα) . Το ειδικό καλώδιο φόρτισης παρέχεται από τον κατασκευαστή του οχήματος. Η σύνδεση στο δίκτυο γίνεται μέσω πρίζας ενώ η φόρτιση είναι μη ελεγχόμενη.

Mode 3: Κανονική ή ταχεία φόρτιση(σε ημιδημόσιες/δημόσιες υποδομές) με εναλλασσόμενο ρεύμα μονοφασικό ή τριφασικό με χρήση ειδικής πρίζας και αποκλειστικού κυκλώματος. Η φόρτιση είναι ελεγχόμενη (smart charging) ενώ ο φορτιστής επικοινωνεί με το όχημα διασφαλίζοντας την προστασία του (ενεργή σύνδεση με το ηλεκτρικό όχημα). Η διάταξη προστασίας είναι ενσωματωμένη στον σταθμό φόρτισης. Η φόρτιση μπορεί να γίνει είτε μέσω ενός κουτιού που είναι τοποθετημένο στον τοίχο (wall box), χρησιμοποιούμενο συνήθως σε χώρους κατοικιών, είτε σε αυτόνομους στύλους φόρτισης σε δημόσιους χώρους.

Mode 4: Ταχεία ή υπερταχεία φόρτιση(σε δημόσιες υποδομές) με συνεχές ρεύμα και μόνιμη σύνδεση του καλωδίου στο δίκτυο. Η φόρτιση είναι ελεγχόμενη (smart charging) ενώ ο φορτιστής επικοινωνεί με το όχημα διασφαλίζοντας την προστασία του (ενεργή σύνδεση με το ηλεκτρικό όχημα). Στη φόρτιση με συνεχές ρεύμα ο μετατροπέας AC/DC βρίσκεται στο σταθμό φόρτισης (off- board charging) και όχι στο όχημα όπως στη φόρτιση με εναλλασσόμενο ρεύμα (on- board charging). Συναντάται σε δημόσιες υποδομές.

Η ισχύς εξόδου, η τάση και το ρεύμα φόρτισης για την κάθε λειτουργία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Λειτουργία φόρτισης	Ονομαστική Τάση(V)	Μέγιστο Ρεύμα(A)	Μέγιστη ισχύς(kW)	Εκτιμώμενος Χρόνος Φόρτισης*
1	230(1φ)/400(3φ)	16	3.7/11	Φορτιστής 3.3kW (1φ) 6-8 ώρες
2	230(1φ)/400(3φ)	32	7.4/22	Φορτιστής 7.4kW (1φ) 3-4 ώρες
3	230(1φ)/400(3φ)	63	14.5/43.5	Φορτιστής 10kW (3φ) 2-3 ώρες Φορτιστής 22kW (3φ) 1-2 ώρες
4	V_{DC}^{**}	I_{max}^{**}	38-400	Φορτιστής 50kW (DC) 20-30 λεπτά Φορτιστής 120kW (DC) 10 λεπτά

*Ο χρόνος φόρτισης αντιστοιχεί σε 100km οδήγησης σε ηλεκτρική λειτουργία

** Η τάση και το ρεύμα φόρτισης εξαρτώνται από το σύστημα

Η φόρτιση με τριφασικό ρεύμα συνήθως χρησιμοποιείται σε δημόσιους χώρους καθώς παρέχει μεγαλύτερη ισχύ.

Στο **σχήμα (2.37)** φαίνονται οι συνηθέστεροι τύποι AC και DC βυσμάτων που συνδέουν το όχημα με το σημείο φόρτισης για κάθε μέθοδο ενσύρματης φόρτισης.

<p>▪ Mode 3</p> <p>Type 2 (IEC 62196-2)</p> <p>✓ Κανονική ή ταχεία φόρτιση</p> <p>✓ 1Φ / 3Φ AC φόρτιση</p>		<p>▪ Mode 4</p> <p>Combo 2 (IEC 62196-3)</p> <p>✓ Ταχεία ή υπερ-ταχεία φόρτιση</p> <p>✓ DC φόρτιση</p>	
<p>Type 1 (J1772)</p> <p>✓ Κανονική φόρτιση</p> <p>✓ 1Φ AC φόρτιση</p>		<p>CHAdeMO</p> <p>✓ Ταχεία ή υπερ-ταχεία φόρτιση</p> <p>✓ DC φόρτιση</p>	

Σημεία φόρτισης χαμηλής ισχύος έως 3.7 kVA μπορεί να διαθέτουν και συνήθεις ή βιομηχανικού τύπου 1Φ ρευματοδότες 16 A

Σχήμα (2.37). Ελάχιστες απαιτήσεις για τα σημεία φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με την ευρωπαϊκή οδηγία 2014/94/EU (AFID) μετά την 18.11.2017.

[89] [95] [96]

Η ταχεία φόρτιση με συνεχές ρεύμα (**DC fast charging**), παρέχει υψηλότερα ποσά ισχύος από τις περισσότερες μεθόδους φόρτισης με εναλλασσόμενο ρεύμα. Ένας σταθμός φόρτισης DC παρέχει φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος σε πολύ σύντομο χρόνο, παρόλα αυτά κοστίζει σημαντικά πιο πολύ από έναν σταθμό AC φόρτισης **σχήμα(2.38)**. Οι περισσότεροι φορτιστές DC παρέχουν ισχύ 50 kW, με εξαίρεση κάποιους χαμηλότερης ισχύος, περίπου 20-25 kW. Σημαντική είναι και η προώθηση σήμερα DC φορτιστών υψηλότερου επιπέδου ισχύος, 100-150 kW ακόμα και μέχρι 400 kW, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες για ισχύ της επόμενης γενιάς PEV με μεγαλύτερες μπαταρίες (80 kWh και άνω). Η τεχνολογία DC φόρτισης έχει σαν στόχο τη φόρτιση της μπαταρίας ενός PEV σε ποσοστό 80% μέσα σε 20 λεπτά ή λιγότερο. Με τη χωρητικότητα των μπαταριών να αυξάνεται, η φόρτιση DC θα συνεχίσει να κινείται προς υψηλότερα επίπεδα ισχύος. Εκτός από το υψηλό κόστος, στα μειονεκτήματα της τεχνολογίας ταχείας φόρτισης με συνεχές ρεύμα, είναι η μειωμένη απόδοση ενέργειας λόγω απωλειών και η μεγάλη καταπόνηση που υφίστανται οι μπαταρίες. Επιπλέον, η φόρτιση σε ισχύ μεγαλύτερη των 150 kW απαιτεί και διαφορετικά πρότυπα τεχνικού εξοπλισμού στο ηλεκτρικό όχημα [89][95].

Ανταλλαγή συσσωρευτών (Battery Swapping)

Η ανταλλαγή συσσωρευτών περιλαμβάνει την αντικατάσταση της χρησιμοποιημένης μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος με μια πλήρως φορτισμένη, σε ειδικό σταθμό αντικατάστασης. Η μέθοδος παρακάμπτει τον χρόνο που χρειάζεται η φόρτιση του οχήματος καθώς και το πρόβλημα περιορισμού του εύρους οδήγησης αφού ο οδηγός έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει τη συστοιχία μπαταριών μέσα σε λίγα λεπτά. Η ιδέα προσέλκυσε μεγάλο ενδιαφέρον και επενδύσεις τα πρώτα χρόνια της αγοράς των PEV, την περίοδο 2008-2014. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου κάποιες χώρες ακολούθησαν την εγκατάσταση σταθμών ανταλλαγής μπαταριών, ανάμεσά τους η Κίνα, η Δανία και το Ισραήλ. Προς το παρόν δεν υπάρχει στην Ευρώπη βασικός πάροχος υπηρεσιών ανταλλαγής συσσωρευτών.

Τεχνολογία φόρτισης	Έξυπνο κουτί φόρτισης		Σταθμός φόρτισης		Σταθμός φόρτισης	
Τύπος Τάσης	AC		AC		DC	
Έξυπνος μετρητής και διαχείριση ενέργειας	συμπεριλαμβάνεται		συμπεριλαμβάνεται		συμπεριλαμβάνεται	
Σημείο φόρτισης	1		2		1	
Χωρητικότητα φόρτισης (kW)	> 3.7		11 ή 22		50	
	2015	Πρόβλεψη 2020	2015	Πρόβλεψη 2020	2015	Πρόβλεψη 2020
Πλήρης εξοπλισμός (συμπερ. υλικού επικοινωνίας και έξυπνου μετρητή)	€1,200 ¹	€700	€5,000	€2,500	€25,000	€15,000
Κόστος σύνδεσης δικτύου	€0-2,000	€0-2,000	€2,000	€2,000	€5,000 ²	€5,000
Κόστος άδειας/σχεδιασμού/ εύρεσης τοποθεσίας	€500	€500	€1,000	€1,000	€1,500	€1,500
Κόστος εγκατάστασης/ κατασκευής/ σήμανσης	€500	€500	€2,000	€2,000	€3,500	€3,500
Συνολική επένδυση (CAPEX)	€2,200	€1,700	€10,000	€7,500	€35,000³	€24,000
Ειδική χρήση						
Γραμμή επικοινωνίας, συντήρηση, κόστος διάθεσης						
Κόστη επικοινωνίας						
Διαχείριση σύμβασης/ τιμολόγηση						
IT συστήματα						
Λειτουργικά έξοδα (€/α) (OPEX)	€1,000	€500	€1,500	€750	€3,000	€1,500

Σχήμα (2.38). Ενδεικτικό κόστος υποδομών επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με στοιχεία της Εθνικής Πλατφόρμας για την Ηλεκτροκίνηση στην Γερμανία [97]

Η μέθοδος προϋποθέτει σχεδιασμό των οχημάτων με εύκολη πρόσβαση στην μπαταρία καθώς και κοινά πρότυπα κατασκευής ηλεκτρικών οχημάτων μεταξύ των εταιριών. Αυτό συχνά δεν

ισχύει και αποτελεί σοβαρό εμπόδιο στην ευρεία εφαρμογή της μεθόδου. Επιπλέον, οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών είναι δαπανηροί με το κόστος εγκατάστασής τους σύμφωνα με εκτιμήσεις να φτάνει τα 400,000 ευρώ περίπου. Ένα ακόμα εμπόδιο στην ανάπτυξη τέτοιων σταθμών, είναι η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των μπαταριών των PEV. Η ανάγκη των σταθμών να υποστηρίξουν την πιο σύγχρονη κάθε φορά τεχνολογία θα προσέθετε σε αυτούς επιπλέον κόστος. Όλες αυτές οι προκλήσεις δεν άφησαν την ανταλλαγή συσσωρευτών να αποτελέσει μια εμπορικά βιώσιμη εναλλακτική έναντι της φόρτισης. Αξιοσημείωτη εξαίρεση αποτελεί η Κίνα, που εξακολουθεί να βλέπει τη μέθοδο αυτή σαν επιλογή ανάμεσα σε άλλες λύσεις φόρτισης των PEV, με την State Grid Corporation of China (SGCC) (την κρατική εταιρία ηλεκτροδότησης της Κίνας) να σχεδιάζει την επέκταση του υπάρχοντος δικτύου της σταθμών ανταλλαγής συσσωρευτών. Η κινέζικη αυτοκινητοβιομηχανία **Nio** το 2018 παρουσίασε το μοντέλο **ES8**, ένα BEV SUV με δυνατότητα ανταλλαγής μπαταρίας. Η Αμερικανική Tesla έχει επίσης αναπτύξει τέτοια τεχνολογία τα τελευταία χρόνια. Η τεχνολογία ανταλλαγής συσσωρευτών πιθανόν να ήταν καταλληλότερη για εφαρμογές που αφορούν στόλο συγκεκριμένης αυτοκινητοβιομηχανίας. Με τον τρόπο αυτό η διαδικασία θα ήταν αυτοματοποιημένη και επομένως γρήγορη και θα δινόταν η δυνατότητα στην κατασκευάστρια εταιρία να επιτηρεί, να συντηρεί και να ανακυκλώνει τις μπαταρίες καθώς και να αξιοποιεί τις εκτός οχημάτων μπαταρίες σε αγορές τεχνικής υποστήριξης δικτύου.

Ασύρματη Φόρτιση (Wireless Charging)

Ανερχόμενη τεχνολογία που επιτρέπει τη φόρτιση του οχήματος επαγωγικά, χωρίς τη σύνδεσή του με καλώδιο στον σταθμό φόρτισης. Η τεχνολογία ασύρματης φόρτισης παρουσιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο καθώς και εμπορικές και πιλοτικές εφαρμογές της στον τομέα της ηλεκτροκίνησης. Παρά τα πλεονεκτήματά της (ευκολία στη χρήση, αντοχή σε συνθήκες όπως υγρασία και σκόνη, ευελιξία, αισθητική υπεροχή) , προς το παρόν είναι μια τεχνολογία σε διαδικασία ανάπτυξης όσον αφορά την ευρεία εφαρμογή της σε εμπορικά προϊόντα, με κύριο μειονέκτημά της να αποτελεί το **αυξημένο κόστος** της σε σχέση με την ενσύρματη φόρτιση. Επιπλέον υπάρχουν σύνθετα ζητήματα λειτουργίας και ασφάλειας που πρέπει να επιλυθούν. Για να μπορέσει η ασύρματη φόρτιση να ανταγωνιστεί την φόρτιση με καλώδιο, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη βιομηχανικών προτύπων που θα επιτρέψει την εφαρμογή της σε όλο το φάσμα των PEV, αλλά και η μείωση του κόστους της από τους κατασκευαστές ή η απορρόφησή του σαν μέρος της τιμής αγοράς του αυτοκινήτου. Η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων διακρίνεται σε στατική και δυναμική. Στη **στατική φόρτιση** το όχημα σταθεμεύει πάνω από το φορτιστή προκειμένου να ξεκινήσει η φόρτιση της μπαταρίας, ενώ στη **δυναμική φόρτιση** το όχημα φορτίζει καθώς κινείται στο δρόμο. Οι σταθμοί δυναμικής φόρτισης προσφέρουν τη δυνατότητα ασύρματης μεταφοράς ισχύος στα οχήματα κατά τη διάρκεια σύντομων στάσεων – για παράδειγμα κοντά σε ένα φανάρι – ή ακόμα και δυναμικά καθώς κινείται το όχημα. Η ικανότητα φόρτισης της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων σε πολλαπλά σημεία κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής, επιτρέπει τη διάνυση μεγάλων αποστάσεων καθώς και τη χρήση μπαταριών μικρότερης χωρητικότητας που έχει σαν συνέπεια τη μείωση του βάρους και του κόστους των οχημάτων. Η τεχνολογία **δεν βρίσκεται ακόμα πολύ κοντά στην εμπορική βιωσιμότητα** κυρίως όσον αφορά τα PEV λόγω του κόστους υποδομών κατά μήκος του οδοστρώματος. Επιδιώκεται η εφαρμογή της κυρίως

σε μέσα μαζικής μεταφοράς που εκτελούν συγκεκριμένα δρομολόγια, όπου το κόστος εγκατάστασης εξοπλισμού στο οδόστρωμα είναι περιορισμένο.

2.4. Θεσμικό πλαίσιο και υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη

2.4.1 Το 7ο πρόγραμμα δράσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το περιβάλλον και η αναγκαιότητα εξηλεκτισμού των μεταφορών

Τα συστήματα μεταφορών αποτελούν θεμέλιο λίθο για την κοινωνία μας. Συνδέουν ανθρώπους, πόλεις, χώρες και οικονομίες, ενισχύοντας την εργασία και την ανάπτυξη. Ωστόσο, είναι επιβλαβείς για το κλίμα, το περιβάλλον και την υγεία του ανθρώπου. Για να μειωθούν οι αρνητικές αυτές επιπτώσεις, η Ευρώπη είναι αναγκαίο να κινηθεί στο μονοπάτι προς μια πιο βιώσιμη κυκλική οικονομία και ένα σύστημα μεταφορών απαλλαγμένο από άνθρακα. Παρ' όλες τις προηγούμενες τεχνολογικές βελτιώσεις, **ο τομέας των μεταφορών είναι υπεύθυνος για το ένα τέταρτο περίπου των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG- greenhouse gas) στην Ευρώπη, συμβάλλοντας στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Οι εκπομπές των οδικών οχημάτων επίσης συμβάλλουν στην υψηλή περιεκτικότητα ατμοσφαιρικών ρύπων σε πολλές ευρωπαϊκές πόλεις, που συχνά δεν πληρούν τα πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα που έχουν οριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.). Επιπλέον οι οδικές μεταφορές είναι η κύρια πηγή ατμοσφαιρικής ηχορρύπανσης βλάπτοντας την υγεία και ευημερία. Η ΕΕ έχει δεσμευτεί να αναπτύξει μια κυκλική οικονομία, ανταγωνιστική, πράσινη, χαμηλών εκπομπών άνθρακα, που μεταξύ άλλων επιδιώκει την αύξηση της αποδοτικότητας των πόρων και αποτελεί τον δεύτερο κύριο στόχο του 7ου προγράμματος δράσης για το περιβάλλον (ΕΕ 2013) [90].**

Εστιάζοντας σε αυτή τη μεταβολή μια σειρά στόχων έχει τεθεί για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μεταφορών στην Ευρώπη. Για παράδειγμα η μείωση των GHG εκπομπών του τομέα μεταφορών αποσκοπεί στο να συνεισφέρει στην επίτευξη του γενικού στόχου της ΕΕ για μείωση των GHG εκπομπών κατά 80-95% μέχρι το 2050. Στη λευκή βίβλο (EU White Paper) για τις μεταφορές το 2011, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υπέδειξε έναν οδικό χάρτη για την επίτευξη ενός πιο βιώσιμου συστήματος μεταφορών με τη μείωση της εξάρτησης της Ευρώπης από το πετρέλαιο. Το White Paper επίσης υποστηρίζει την υιοθέτηση και ανάπτυξη νέων διατηρήσιμων πηγών καυσίμων και συστημάτων πρόωσης και περιγράφει στόχους όπως:

- Περιορισμός κατά το ήμισυ των συμβατικών οχημάτων στις αστικές μεταφορές μέχρι το 2030 και ολοκληρωτική εξάλειψή τους από τις πόλεις έως το 2050.
- Ρύθμιση της απαίτησης για χρήση διατηρήσιμων χαμηλών σε άνθρακα καυσίμων στις αερομεταφορές σε ποσοστό 40%.
- Μετατόπιση του ποσού των οδικώς μεταφερόμενων εμπορευμάτων σε άλλους τρόπους μεταφοράς, 30% έως το 2030 και 50% έως το 2050, για αποστάσεις πάνω από 300 km.

Το 2016, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε τη στρατηγική της Ευρώπης για μετακινήσεις χαμηλών εκπομπών, με μακροπρόθεσμο στόχο τη μείωση της εξάρτησης από τις εισαγωγές πετρελαίου και την αύξηση καινοτομίας και ανταγωνιστικότητας που θα ενισχύσουν την εργασία και την ανάπτυξη. Επιπλέον επισημαίνει τη σπουδαιότητα άρσης των εμποδίων για τον εξηλεκτρισμό των μεταφορών και τη βελτίωση της απόδοσής τους προσεγγίζοντας οχήματα χαμηλών ή και μηδενικών εκπομπών και κλιμακώνοντας τη χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας όπως ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Είναι ξεκάθαρο ότι στο μέλλον ένα μεγάλο μέρος των προγραμματισμένων μειώσεων GHG εκπομπών θα πρέπει να προέλθει από τις οδικές μεταφορές μέσα από τη χρήση ανανεώσιμων βιοκαυσίμων, τη στροφή σε μη μηχανοκίνητες μεταφορές και τις δημόσιες συγκοινωνίες και την αλλαγή στον τρόπο που χρησιμοποιούμε τα συστήματα μεταφοράς. **Αντικαθιστώντας τα συμβατικά οχήματα με ηλεκτρικά, οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν, αυτό όμως εξαρτάται σημαντικά και από τον τρόπο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την φόρτιση των οχημάτων αυτών, δηλαδή από το αν η ενέργεια προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, πυρηνική ενέργεια ή ορυκτά καύσιμα. Παρ' όλα αυτά, μόνο η αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων δεν θα λύσει προβλήματα όπως η διογκούμενη κυκλοφοριακή συμφόρηση ή η αυξανόμενη απαίτηση για οδικές υποδομές και χώρους στάθμευσης. Φαίνεται ότι βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, η Ευρώπη θα πρέπει να βασιστεί στα συμβατικά οδικά οχήματα ενώ νέες καθαρότερες τεχνολογίες θα αναπτύσσονται.**

Σε ψήφισμα της 17ης Απριλίου 2018 [90] σχετικά με την εφαρμογή του 7ου προγράμματος δράσης για το περιβάλλον (ΠΔΠ), το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο μεταξύ άλλων :

- Υπενθυμίζει ότι η ΕΕ και τα κράτη μέλη της έχουν υπογράψει τη Συμφωνία του Παρισιού(2016) [91] και ως εκ τούτου έχουν δεσμευτεί για την εκπλήρωση των στόχων της και έχουν υποβάλλει εθνικά καθορισμένη συνεισφορά για την επίτευξη μείωσης κατά 40% των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου σε όλους τους τομείς της οικονομίας της Ένωσης ως το 2030` υπογραμμίζει την ανάγκη πλήρους ενσωμάτωσης του στόχου του 2030 και του μακροπρόθεσμου στόχου για καθαρές μηδενικές εκπομπές σε όλες τις πολιτικές και τα προγράμματα χρηματοδότησης της Ένωσης ` καλεί την Επιτροπή να επανεξετάζει συνεχώς τους στόχους για το κλίμα και την ενέργεια, στο πλαίσιο του διαλόγου διευκόλυνσης του 2018 και του πενταετούς παγκόσμιου απολογισμού, και να θέσει σε εφαρμογή στρατηγική μηδενικών εκπομπών έως τα μέσα του αιώνα για την ΕΕ, η οποία θα χαράσσει μια οικονομικά αποδοτική πορεία προς την επίτευξη του στόχου καθαρών μηδενικών εκπομπών που εγκρίθηκε στο πλαίσιο της Συμφωνίας του Παρισιού.

- Υπενθυμίζει τη δέσμευση της Επιτροπής του 2016, για την ενσωμάτωση των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΣΒΑ)[92] στις πολιτικές και τις πρωτοβουλίες της ΕΕ` αναγνωρίζει ότι η δέσμευση αυτή δεν συνοδεύεται από σαφή στρατηγική και συγκεκριμένες προτάσεις για θεσμικές δομές και ένα πλαίσιο διακυβέρνησης που θα διασφαλίζει την ενσωμάτωση των ΣΒΑ στις πολιτικές της ΕΕ, τις νομοθετικές προτάσεις, την εφαρμογή και την επιβολή τους ` θεωρεί σημαντικό να δεσμευτεί πλήρως η ΕΕ, ως πρωτοπόρος, ως προς την επίτευξη των στόχων της Ατζέντας του 2030 και της βιώσιμης ανάπτυξης` υπογραμμίζει επίσης ότι το ίδιο το ΠΔΠ αποτελεί μέσο-κλειδί για την υλοποίηση των ΣΒΑ.

- Εκφράζει ικανοποίηση για τις βελτιώσεις που επήλθαν από ορισμένα έργα που χρηματοδοτούνται από την ΕΕ, αλλά εκφράζει τη λύπη του για τις χαμένες ευκαιρίες όσον αφορά την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων, όπως τονίζεται από το Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο (ΕΕΣ)· τονίζει ότι το πολυετές δημοσιονομικό πλαίσιο με ορίζοντα το 2020 πρέπει να αναπροσανατολιστεί προς τη βιώσιμη ανάπτυξη και να διασφαλίζει την ενισχυμένη ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής πολιτικής σε όλους τους χρηματοδοτικούς μηχανισμούς και τις γραμμές του προϋπολογισμού· τονίζει την ανάγκη να αυξηθούν οι πράσινες επενδύσεις, η καινοτομία και η βιώσιμη ανάπτυξη, χρησιμοποιώντας νέα εργαλεία χρηματοδότησης, τόσο δημόσια όσο και ιδιωτικά, και διαφορετικές προσεγγίσεις της τρέχουσας επενδυτικής πολιτικής, όπως η σταδιακή κατάργηση των επιβλαβών για το περιβάλλον επιδοτήσεων προκειμένου να επιτευχθεί η μακροπρόθεσμη προοπτική του 7ου ΠΔΠ· τονίζει ότι απαιτείται οριζόντια εφαρμογή των σαφώς καθορισμένων κριτηρίων βιωσιμότητας και των στόχων με γνώμονα τις επιδόσεις για όλα τα διαρθρωτικά και επενδυτικά ταμεία της ΕΕ· απευθύνει έκκληση για πιο αποτελεσματική και στοχευμένη χρήση του τρέχοντος ΠΔΠ και των κονδυλίων από την πολιτική για τη συνοχή και την περιφερειακή ανάπτυξη, και για να αντιμετωπιστούν επειγόντως τα προαναφερθέντα προβλήματα που μνημονεύει το Ελεγκτικό Συνέδριο· καλεί την Επιτροπή και τα κράτη μέλη να στηρίξουν τη διατήρηση και την ενδεχόμενη αύξηση του προβλεπόμενου προϋπολογισμού της ΕΕ για δράσεις για το περιβάλλον και την αλλαγή του κλίματος.

- Επισημαίνει ότι οι μεγαλύτερες περιβαλλοντικές απειλές κατά της υγείας είναι πιο εμφανείς στις αστικές περιοχές αλλά πλήττουν επίσης τις περιφερειακές ζώνες και προαστιακούς οικισμούς, και ότι, έως το 2020, το 80% του πληθυσμού αναμένεται να κατοικεί σε αστικές και προαστιακές περιοχές· υπογραμμίζει το γεγονός ότι οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων, σε συνδυασμό με τον ανεπαρκή σχεδιασμό και τις υποδομές, έχουν δραματικές οικονομικές, κοινωνικές, υγειονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες· **επισημαίνει ότι η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί ετησίως περισσότερους από 400.000 πρόωρους θανάτους στην ΕΕ και ότι το εξωτερικό κόστος της υγείας κυμαίνεται από 330 δισεκατομμύρια ευρώ έως 940 δισεκατομμύρια ευρώ.**

- **Σημειώνει ότι τουλάχιστον 10.000 πρόωροι θάνατοι στην ΕΕ οφείλονται σε ασθένειες που προκαλούνται εξαιτίας του θορύβου, ενώ το 2012 το ένα τέταρτο του ευρωπαϊκού πληθυσμού έχει εκτεθεί σε επίπεδα θορύβου άνω των ορίων**· ζητεί από τα κράτη μέλη να δώσουν προτεραιότητα στην παρακολούθηση των επιπέδων θορύβου σύμφωνα με την οδηγία 2002/49/ΕΚ για να διασφαλίσουν την τήρηση των ισχυουσών οριακών τιμών για το εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον.

- Αναγνωρίζει την πρόοδο στη μείωση ορισμένων ατμοσφαιρικών ρύπων, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, αλλά εκφράζει την αποδοκιμασία του για τα διαρκή προβλήματα όσον αφορά την ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, στα οποία συμβάλλουν σημαντικά οι εκπομπές από τις οδικές μεταφορές και τη γεωργία· αναγνωρίζει τη δέσμη μέτρων για την κινητικότητα που παρουσίασε η Επιτροπή το Νοέμβριο του 2017 και την Ευρωπαϊκή στρατηγική για την καθαρή κινητικότητα που υπεβλήθη το 2016, η οποία ανοίγει το δρόμο για την κινητικότητα με χαμηλές ανθρακούχες εκπομπές στην Επικράτεια της Ένωσης.

2.3.3. Διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά και υποδομές φόρτισης

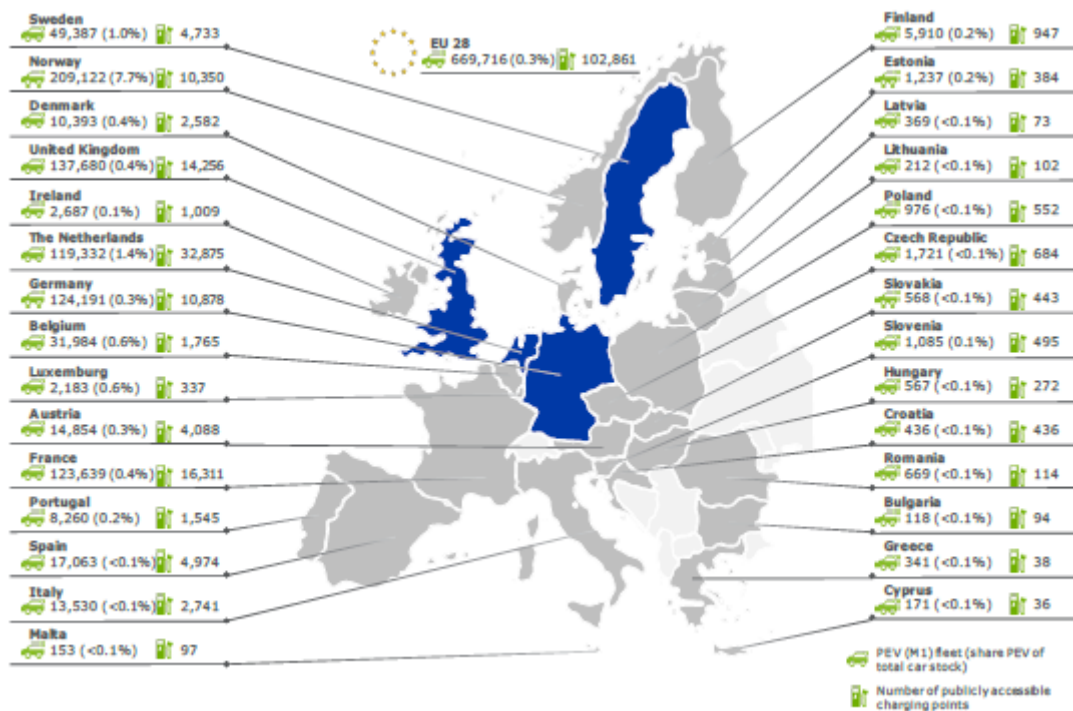
Η **Ευρωπαϊκή Οδηγία του 2014** για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων δίνει μία εκτίμηση για την επιθυμητή αναλογία των σημείων φόρτισης προς τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων' χρειάζεται τουλάχιστον **ένα δημόσιο σημείο φόρτισης για κάθε δέκα οχήματα**, πάντα λαμβάνοντας υπόψη νέες τεχνολογικές εξελίξεις στα οχήματα, τις μπαταρίες και τις υποδομές φόρτισης και με την προϋπόθεση ότι η πλειοψηφία των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων εγκαθιστούν τα δικά τους ιδιωτικά σημεία φόρτισης. Η ευρωπαϊκή στρατηγική για τις μετακινήσεις χαμηλών εκπομπών που δημοσιεύτηκε το 2016, υπογραμμίζει ακόμα περισσότερο τη σημασία των δημόσια διαθέσιμων σημείων επαναφόρτισης. Προκειμένου να επιτευχθεί η μαζική αποδοχή και διαδεδομένη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων αναγνωρίζεται ότι υποδομές φόρτισης και συντήρησης είναι αναγκαίο να γίνουν ευρέως διαθέσιμες. Η τάση που κυριαρχεί όσον αφορά την δημιουργία τέτοιων υποδομών – η δημόσια χρηματοδότηση είναι συχνά περιορισμένη ώστε να υλοποιηθεί σε ένα μόνο στάδιο ένα ολοκληρωμένο δίκτυο φόρτισης – είναι η σταδιακή ανάπτυξη και επέκτασή τους, καθώς οι απαιτήσεις των χρηστών αυξάνονται με το πέρασμα του χρόνου. Η έλλειψη ενός μεγάλου δικτύου υποδομών φόρτισης λειτουργεί αποτρεπτικά για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων. Στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες υπάρχουν μόνο μερικές χιλιάδες δημόσια σημεία φόρτισης – συνήθως για αργή φόρτιση – ενώ κάποιες επικεντρώνονται στην επέκταση υποδομών ταχείας φόρτισης. Το 2016 η ΕΕ θέσπισε το πρόγραμμα **TEN-T (Trans-European Transport Network)** με σκοπό την ενίσχυση της κατασκευής και αναβάθμισης της υποδομής μεταφορών στην περιοχή. Όσον αφορά την υποδομή για τα ηλεκτρικά οχήματα, το πρόγραμμα επένδυσε σε διάφορα έργα ανάμεσα σε αυτά στην πιλοτική εγκατάσταση 115 σημείων επαναφόρτισης υψηλής ισχύος σε κεντρικούς ευρωπαϊκούς δρόμους, ώστε να καταστήσει δυνατή την οδήγηση ηλεκτρικών οχημάτων σε μεγάλες αποστάσεις και να προωθήσει τις βιώσιμες μεταφορές. Στην Ευρώπη, πρωτοπόρες χώρες στην ηλεκτροκίνηση είναι η Ολλανδία, η Νορβηγία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Γαλλία ενώ στον υπόλοιπο κόσμο η Κίνα και οι Η.Π.Α **σχήμα(2.39)**.

	THE NL	NORWAY	GERMANY	THE UK	FRANCE
PEV market share [%]	2.2	39.19	1.56	1.91	1.75
PEV share of total car stock [%]	1.43	7.69	0.27	0.42	0.38
Ratio PEV to charging point	3.63	15.23	6.69	9.66	7.58
Publicly accessible normal power charging points (<=22kW)	32,120	8,292	10,878	11,497	14,407
Publicly accessible high power charging points (>22kW)	755	2,058	566	2,759	1,904

Σχήμα(2.39). Σύγκριση σημαντικών παραμέτρων ηλεκτροκίνησης πρωτοπόρων χωρών το 2017

Ολοένα περισσότερες ιστοσελίδες και εφαρμογές έξυπνων κινητών, προσφέρουν υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο που υποδεικνύουν στους οδηγούς ηλεκτρικών οχημάτων την τοποθεσία και τη διαθεσιμότητα σημείων φόρτισης στην πόλη τους. Κάποιες εφαρμογές παρέχουν πληροφορίες για σημεία φόρτισης συγκεκριμένων παρόχων ή δικτύων φόρτισης EV ενώ άλλες παρουσιάζουν πλήρη εικόνα των διαθέσιμων σημείων φόρτισης στην εκάστοτε τοποθεσία. Μια

τέτοια εφαρμογή είναι το **ChargeMap** που δημιουργήθηκε το 2011 - λειτουργεί κοινοτικά αντλώντας πληροφορίες από οδηγούς EV σε όλη την Ευρώπη - και έχει σαν στόχο την καταγραφή όλων των διαθέσιμων δημόσιων και ημιδημόσιων σταθμών φόρτισης σε όλο τον κόσμο. Κάθε σημείο φόρτισης καταχωρείται στο χάρτη και συνοδεύεται από πληροφορίες για τη λειτουργία φόρτισης και τον τύπο βύσματος που υποστηρίζει, το σύστημα ελέγχου ταυτότητας, το δίκτυο φόρτισης αλλά και πληροφορίες για την ευρύτερη περιοχή. Στην Ελλάδα το πρώτο δίκτυο σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων δημιουργήθηκε από την εταιρία **FORTISIS** το 2013, ενώ το 2017 εγκαινιάστηκε ο **πρώτος σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών λεωφορείων** στην περιοχή της Ραφήνας. Ο νέος σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, που κατασκευάστηκε στον εξωτερικό χώρο του Δημαρχείου Ραφήνας-Πικερμίου, αποτελεί το αποτέλεσμα της συνεργασίας του ΔΕΔΔΗΕ με την ερευνητική ομάδα SmartRue της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος **SHAR-Q [119]**. Στη χώρα μας ο αριθμός των δημόσια προσβάσιμων σημείων πρόσβασης ανέρχεται σε μόνο μερικές δεκάδες ενώ το 2017 πωλήθηκαν 163 αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (ετήσια αύξηση 246%). Ο **ΔΕΔΔΗΕ** σχεδιάζει την πιλοτική εγκατάσταση 100-150 σταθμών φόρτισης Mode 3 σε ελληνικά νησιά και Ηπειρωτική Ελλάδα έως το 2019, καθώς και την εγκατάσταση 1000-1500 σταθμών φόρτισης Mode 3 και Mode 4 στην Ηπειρωτική Ελλάδα έως το 2020.



Σχήμα(2.40). Αριθμός των PEV τύπου M1 και των δημόσια προσβάσιμων σημείων φόρτισής τους στην Ευρώπη (EU28 και Νορβηγία) (2017) [95]

2.3.4. Το θεσμικό πλαίσιο για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων στην Ευρώπη και η κατάσταση στην Ελλάδα

1. Σύμφωνα με την **οδηγία 2014/94/ΕΕ** της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων:

- Ο αριθμός των σημείων επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να προσδιοριστεί λαμβανομένου υπόψη του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων που εκτιμάται ότι θα είναι ταξινομημένα έως το τέλος του 2020 σε κάθε κράτος μέλος. Ενδεικτικά, ο επαρκής μέσος αριθμός σημείων επαναφόρτισης θα πρέπει να αντιστοιχεί σε τουλάχιστον ένα σημείο επαναφόρτισης ανά 10 αυτοκίνητα, λαμβανομένων επίσης υπόψη του τύπου των αυτοκινήτων, της τεχνολογίας φόρτισης και των διαθέσιμων ιδιωτικών σημείων επαναφόρτισης. Θα πρέπει να κατασκευαστεί επαρκής αριθμός δημοσίως προσβάσιμων σημείων επαναφόρτισης, ιδίως στους σταθμούς των δημόσιων μέσων μεταφοράς, όπως οι λιμενικοί τερματικοί σταθμοί επιβατών, τα αεροδρόμια ή οι σιδηροδρομικοί σταθμοί. Οι ιδιώτες κάτοχοι αυτών των ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την πρόσβαση σε σημεία επαναφόρτισης σε κοινούς χώρους στάθμευσης, όπως πολυκατοικίες, κτίρια γραφείων και εγκαταστάσεις επιχειρήσεων. Οι δημόσιες αρχές θα πρέπει να λάβουν μέτρα που θα βοηθήσουν τους χρήστες οχημάτων εξασφαλίζοντας ότι οι επιχειρηματικοί φορείς και οι διαχειριστές παρέχουν κατάλληλες υποδομές με επαρκή σημεία επαναφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα κράτη μέλη θα πρέπει να λάβουν επίσης μέτρα, στα εθνικά πλαίσια πολιτικής τους, για να ενθαρρύνουν και να διευκολύνουν την προώθηση σημείων επαναφόρτισης τα οποία δεν είναι δημοσίως προσβάσιμα.

- Η ηλεκτροκίνηση αποτελεί τομέα που εξελίσσεται ραγδαία. Οι τρέχουσες τεχνολογίες διεπαφής επαναφόρτισης περιλαμβάνουν καλωδιακές συνδέσεις, αλλά **είναι ανάγκη επίσης να εξεταστούν μελλοντικές τεχνολογίες διεπαφής όπως η ασύρματη επαναφόρτιση ή η ανταλλαγή συσσωρευτών**. Η νομοθεσία είναι ανάγκη να εξασφαλίσει ότι διευκολύνεται η τεχνολογική καινοτομία. Η Ένωση θα επιδιώξει την ανάπτυξη, από τους ενδεδειγμένους οργανισμούς τυποποίησης, ευρωπαϊκών προτύπων που θα περιέχουν λεπτομερείς τεχνικές προδιαγραφές για ασύρματη φόρτιση και για αντικατάσταση συσσωρευτών μηχανοκίνητων οχημάτων, καθώς και για τα σημεία επαναφόρτισης μηχανοκίνητων οχημάτων κατηγορίας L και ηλεκτρικών λεωφορείων. Η παρούσα οδηγία θα πρέπει συνεπώς να επικαιροποιείται κατάλληλα ώστε να λαμβάνονται υπόψη μελλοντικά πρότυπα για τεχνολογίες όπως η ασύρματη επαναφόρτιση και η ανταλλαγή συσσωρευτών.

- Για την επαναφόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων στα σημεία επαναφόρτισης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται, εφόσον είναι τεχνικά και οικονομικά εύλογο, **ευφυή συστήματα μέτρησης** ώστε να ενισχυθεί η σταθερότητα του ηλεκτρικού συστήματος με την επαναφόρτιση των μπαταριών από το δίκτυο τις ώρες χαμηλής γενικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και να επιτραπεί ο ασφαλής και ευέλικτος χειρισμός δεδομένων. Μακροπρόθεσμα θα μπορούσαν έτσι τα οχήματα να διοχετεύουν ηλεκτρισμό από τις μπαταρίες τους στο δίκτυο κατά τις ώρες υψηλής γενικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ευφυή συστήματα μέτρησης όπως ορίζονται στην οδηγία 2012/27/ΕΕ καθιστούν δυνατή την παραγωγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο τα οποία είναι απαραίτητα για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα του δικτύου και να ενθαρρυνθεί η ορθολογική χρήση των υπηρεσιών επαναφόρτισης. Τα ευφυή συστήματα μέτρησης παρέχουν

- ακριβείς και διαφανείς πληροφορίες σχετικά με το κόστος και τη διαθεσιμότητα υπηρεσιών επαναφόρτισης, ενθαρρύνοντας την επαναφόρτιση σε περιόδους εκτός των ωρών αιχμής, δηλαδή περιόδους χαμηλής γενικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και χαμηλών τιμών ενέργειας. Η χρήση ευφυών συστημάτων μέτρησης βελτιστοποιεί την επαναφόρτιση, πράγμα που αποφέρει οφέλη στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και στους καταναλωτές.

- Οι **διαχειριστές των συστημάτων διανομής** διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε ό,τι αφορά τα σημεία επαναφόρτισης. Κατά την ανάπτυξη των καθηκόντων τους, οι διαχειριστές των συστημάτων διανομής, ορισμένοι εκ των οποίων μπορεί να αποτελούν τμήμα κάθετα ολοκληρωμένης επιχείρησης που έχει στην ιδιοκτησία της ή διαχειρίζεται σημεία επαναφόρτισης, **οφείλουν να συνεργάζονται χωρίς διακρίσεις με όλους τους υπόλοιπους ιδιοκτήτες ή διαχειριστές σημείων επαναφόρτισης, ιδίως παρέχοντάς τους τις πληροφορίες που απαιτούνται για την αποτελεσματική πρόσβαση και χρήση του συστήματος.** Κατά την ανάπτυξη υποδομών για τα ηλεκτρικά οχήματα η αλληλεπίδραση μεταξύ των υποδομών αυτών και του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και της πολιτικής της Ένωσης στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να είναι σύμφωνη με τις αρχές της οδηγίας 2009/72/EK. **Η εγκατάσταση και η λειτουργία σημείων επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να αναπτυχθούν ως ανταγωνιστική αγορά με ανοικτή πρόσβαση σε όλους όσοι ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη ή διαχείριση υποδομών επαναφόρτισης.**

- Τα κράτη μέλη πρέπει να μεριμνήσουν ώστε οι **διαχειριστές δημοσίως προσβάσιμων σημείων επαναφόρτισης να είναι ελεύθεροι να αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια από οποιονδήποτε προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας της Ένωσης**, με την επιφύλαξη συμφωνίας του προμηθευτή. Οι διαχειριστές σημείων επαναφόρτισης έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υπηρεσίες επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στους πελάτες βάσει συμβολαίου, μεταξύ άλλων και εξ ονόματος και για λογαριασμό άλλων παρόχων υπηρεσιών.

- Όλα τα δημοσίως προσβάσιμα σημεία επαναφόρτισης θα πρέπει να προβλέπουν επίσης δυνατότητα **χρέωσης επί τούτω (ad hoc)** για τους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων χωρίς τη σύναψη συμβολαίου με τον σχετικό προμηθευτή ή διαχειριστή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τιμές που χρεώνονται από τους διαχειριστές δημοσίως προσβάσιμων σημείων επαναφόρτισης οφείλουν να είναι εύκολα και άμεσα συγκρίσιμες, διαφανείς και χωρίς διακρίσεις.

- Τα σημεία επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων **«κανονικής ισχύος» (έως 20 kW) εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)** εξαιρέσει των ασύρματων ή επαγωγικών μονάδων, τα οποία θα αναπτυχθούν ή θα ανανεωθούν από τις 18 Νοεμβρίου 2017, πρέπει να είναι εξοπλισμένα, για σκοπούς διαλειτουργικότητας, τουλάχιστον με ρευματολήπτες ή συνδετήρες οχημάτων **τύπου 2**, όπως περιγράφονται στο πρότυπο EN62196-2. Διατηρώντας παράλληλα τη συμβατότητα τύπου 2, οι εν λόγω ρευματολήπτες μπορούν να είναι εξοπλισμένοι με χαρακτηριστικά όπως τα κλείστρα ασφαλείας. Τα σημεία επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων **«υψηλής ισχύος» (υψηλότερης των 20 kW) εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)** πρέπει να είναι εξοπλισμένα, για σκοπούς διαλειτουργικότητας, τουλάχιστον με συνδετήρες **τύπου 2**, όπως περιγράφονται στο πρότυπο EN62196-2 ενώ τα σημεία επαναφόρτισης **«υψηλής ισχύος» συνεχούς ρεύματος (DC)** τουλάχιστον με σύστημα φόρτισης **«Combo 2»** με συνδυασμό, όπως περιγράφονται στο αντίστοιχο πρότυπο EN62196-3.

2. Η οδηγία 2014/94/ΕΕ ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία με τον νόμο **N.4439/2016**.

3. Σύμφωνα με τον νόμο **N. 4001/2011**, όπως τροποποιήθηκε από τον **N. 4277/2014**:

- **Τελικός πελάτης** ορίζεται ως το φυσικό ή νομικό πρόσωπο που αγοράζει φυσικό αέριο ή ηλεκτρική ενέργεια αποκλειστικά για δική του χρήση **και το φυσικό ή νομικό πρόσωπο που αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό την παροχή υπηρεσιών φόρτισης ηλεκτροκίνητων οχημάτων** (Η/Ο).

- **Φορέας Εκμετάλλευσης Υποδομών Φόρτισης Η/Ο (ΦΕΥΦΗΟ)** ορίζεται ως το φυσικό ή νομικό πρόσωπο που δραστηριοποιείται στην εκμετάλλευση υποδομών φόρτισης για τις οποίες προμηθεύεται ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό την παροχή υπηρεσιών φόρτισης Η/Ο.

- **Οι ΦΕΥΦΗΟ εξαιρούνται από την υποχρέωση λήψης άδειας προμήθειας ή εμπορίας ηλεκτρικής ενέργειας.**

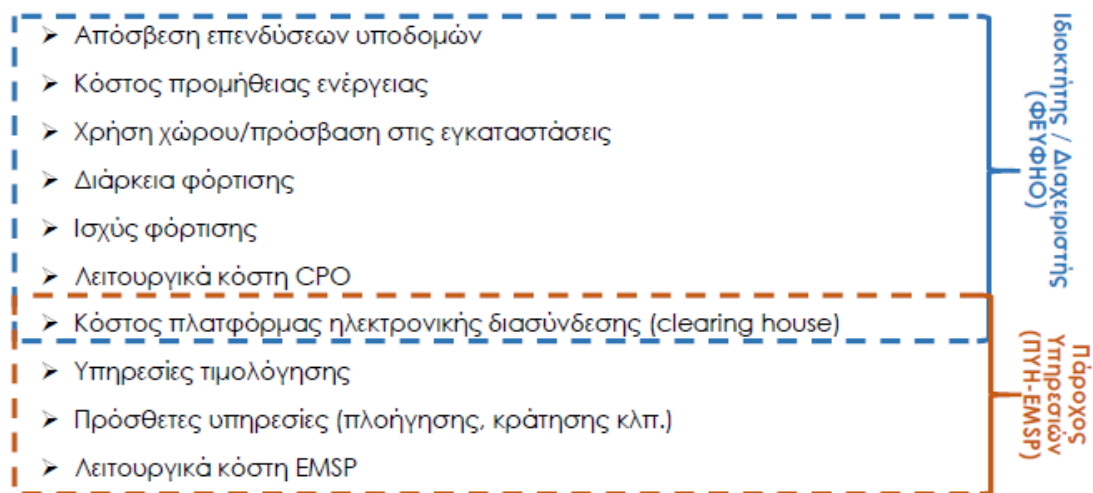
4. Με τον νόμο **N. 4513/2018** επιτρέπεται πλέον η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης σε δημόσιους κοινόχρηστους χώρους και εισάγεται για πρώτη φορά στην Ελλάδα ο θεσμός των **«Ενεργειακών Κοινοτήτων»**.

Σε ό,τι αφορά τη λειτουργία των δημοσίως προσβάσιμων υποδομών επαναφόρτισης Η/Ο, υπάρχουν **ρόλοι και αρμοδιότητες** που είτε καθορίζονται από τη νομοθεσία, είτε διαμορφώνονται σε μεγάλο βαθμό βάσει πρακτικών της αγοράς καθώς και ορισμένων διεθνών προτύπων (π.χ. ISO 15118). Οι βασικοί ρόλοι που χρησιμοποιούνται σήμερα στα περισσότερα κράτη μέλη της ΕΕ παρουσιάζονται στο **σχήμα(2.41)**.

Φορείς ηλεκτροκίνησης	Φορείς αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας
<p>Ιδιοκτήτης υποδομών επαναφόρτισης</p> <ul style="list-style-type: none"> ο Κυριότητα υποδομών επαναφόρτισης ο Ανάπτυξη υποδομών επαναφόρτισης (σε συνεργασία με ΦΕΥΦΗΟ) ο Σύμβαση με ΦΕΥΦΗΟ για ανάθεση διαχείρισης σταθμών 	<p>Προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας</p> <ul style="list-style-type: none"> ο Προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας στον ΦΕΥΦΗΟ
<p>Διαχειριστής σημείου επαναφόρτισης – ΦΕΥΦΗΟ (CPO)</p> <ul style="list-style-type: none"> ο Λειτουργία (διαχείριση) υποδομών επαναφόρτισης ο Σύνδεση με Δίκτυο (ως τελικός πελάτης) ο Επιλογή προμηθευτή ΗΕ για το σταθμό επαναφόρτισης ο Παροχή υπηρεσιών επαναφόρτισης, ad hoc και για λογαριασμό ΠΥΗ 	<p>Διαχειριστής Δικτύου</p> <ul style="list-style-type: none"> ο Διασύνδεση σταθμών επαναφόρτισης στο Δίκτυο ο Μέτρηση κατανάλωσης ενέργειας σταθμών ο Μελλοντικά: Προμήθεια υπηρεσιών διαχείρισης φορτίου Η/Ο για ανάγκες Δικτύου, ενδεχομένως άμεση διαχείριση σε έκτακτες καταστάσεις
<p>Πάροχος υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης – ΠΥΗ (EMSP)</p> <ul style="list-style-type: none"> ο Τιμολόγηση χρηστών Η/Ο για την επαναφόρτιση ο Παροχή συνοδευτικών υπηρεσιών με προστιθέμενη αξία (mobile apps, navigation, κράτηση κλπ.) 	<p>Διαχειριστής Συστήματος / Λειτουργός Αγοράς</p> <ul style="list-style-type: none"> ο Προμήθεια υπηρεσιών απόκρισης ζήτησης, ευελιξίας και επικουρικών υπηρεσιών για ανάγκες Συστήματος
<p>Φορέας Διεκπεραίωσης Συναλλαγών – Πλατφόρμα ηλεκτρονικής διασύνδεσης (e-roaming & clearing house)</p> <ul style="list-style-type: none"> ο Εξασφάλιση διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφόρων CPOs και EMSPs ο Διαχείριση και εκκαθάριση συναλλαγών μεταξύ φορέων της αγοράς 	<p>Aggregator</p> <ul style="list-style-type: none"> ο Εκπροσώπηση φορτίου Η/Ο για παροχή πάσης φύσεως υπηρεσιών προς το Δίκτυο, το Σύστημα και την Αγορά ΗΕ (διακοψιμότητα, ευελιξία, επικουρικές)

Σχήμα(2.41). Εμπλεκόμενοι φορείς στις δημόσιες υποδομές φόρτισης Η/Ο (όπου CPO:Charging Point Operator και EMSP:Electromobility Service Provider)

Ο χρήστης του ηλεκτρικού οχήματος (ΧΗΟ) απολαμβάνει ολοκληρωμένες υπηρεσίες ηλεκτροκίνησης που διακρίνονται σε υπηρεσίες φόρτισης και υπηρεσίες ενέργειας. **Υπηρεσίες φόρτισης** αποτελούν η αναζήτηση υποδομών φόρτισης ανά τεχνολογία ή/και διαθεσιμότητα, ο υπολογισμός της βέλτιστης διαδρομής βάσει των ενεργειακών αναγκών μετακίνησης και διαθεσιμότητας υποδομών φόρτισης, η κράτηση υποδομών φόρτισης (booking), η ταυτοποίηση χρήστη (authentication) μέσω έξυπνων εφαρμογών (κάρτα RFID/NFC), η έξυπνη φόρτιση (smart charging) κ.τ.λ. Οι **υπηρεσίες ενέργειας** αναφέρονται στην πώληση ηλεκτρικής ενέργειας για τη φόρτιση της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος. Επομένως, η χρέωση του ΧΗΟ αφορά σε ένα σύνολο παρεχόμενων υπηρεσιών και όχι μόνο στην κατανάλωση ενέργειας **σχήμα(2.42)**.



Σχήμα(2.42). Υπηρεσίες που περιλαμβάνονται στο κόστος επαναφόρτισης Η/Ο

Σε ό,τι αφορά την **ανάπτυξη δημοσίως προσβάσιμων υποδομών επαναφόρτισης Η/Ο**, εντός της ΕΕ χρησιμοποιούνται διαφορετικά μοντέλα, τα οποία μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες:

Ανταγωνιστικό μοντέλο αγοράς: Πρόκειται για την ανάπτυξη των δημοσίως προσβάσιμων υποδομών επαναφόρτισης Η/Ο από τον ιδιωτικό τομέα και στη βάση μιας ελεύθερης και ανταγωνιστικής αγοράς. Το ανταγωνιστικό μοντέλο αγοράς αποτελεί το προεπιλεγμένο μοντέλο για την ανάπτυξη δημοσίως προσβάσιμων υποδομών επαναφόρτισης Η/Ο, το οποίο προβλέπεται σε επίπεδο ΕΕ σύμφωνα με την αιτιολογική σκέψη 30 της οδηγίας 2014/94/ΕΕ (AFID): “Η εγκατάσταση και η λειτουργία σημείων επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να αναπτυχθεί ως ανταγωνιστική αγορά με ανοικτή πρόσβαση σε όλους όσους ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη ή διαχείριση υποδομών επαναφόρτισης.” Αυτό το μοντέλο έχει υιοθετηθεί σήμερα από τα περισσότερα κράτη μέλη της ΕΕ και ιδιαίτερα από τις μεγαλύτερες αγορές Η/Ο (π.χ. Γαλλία, Γερμανία, Ολλανδία, Σουηδία, Ηνωμένο Βασίλειο).

Μοντέλο Διαχειριστή Συστήματος Διανομής (DSO): Πρόκειται για την ανάπτυξη των δημοσίως προσβάσιμων υποδομών επαναφόρτισης Η/Ο που συντελείται μέσω πρωτοβουλίας του Διαχειριστή Συστήματος Διανομής (DSO). Η οδηγία 2014/94/ΕΕ (AFID) δεν περιλαμβάνει διατάξεις που αποκλείουν την εμπλοκή του DSO σε αυτόν τον τομέα. Ωστόσο, η πρόταση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την υπό αναθεώρηση οδηγία για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας

(COM (2016) 864) προβλέπει ότι τα κράτη μέλη επιτρέπουν στους διαχειριστές συστημάτων διανομής να έχουν στην ιδιοκτησία τους, να αναπτύσσουν, να διαχειρίζονται ή να λειτουργούν σημεία επαναφόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα, μόνον εφόσον πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις: α) τα λοιπά μέρη, έπειτα από ανοικτή και διαφανή διαδικασία πρόσκλησης υποβολής προσφορών, δεν εξέφρασαν ενδιαφέρον για ιδιοκτησία, ανάπτυξη, διαχείριση ή λειτουργία σημείων επαναφόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα β) η ρυθμιστική αρχή έχει παράσχει την έγκρισή της. Το μοντέλο Διαχειριστή Συστήματος Διανομής υιοθετήθηκε από ορισμένα κράτη μέλη της ΕΕ, όπως η Ιρλανδία, το Βέλγιο και το Λουξεμβούργο στα πρώιμα στάδια ανάπτυξης της ηλεκτροκίνησης, ως εναλλακτική λύση, στον βαθμό που η δημιουργία υποδομών δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί μέσω της αγοράς.

Μοντέλο διαγωνισμού και παραχώρησης: Πρόκειται για την ανάπτυξη των δημοσίων προσβάσιμων υποδομών επαναφόρτισης Η/Ο μέσω διαγωνισμών που διοργανώνονται από δημόσιο φορέα σε εθνικό, περιφερειακό ή τοπικό επίπεδο. Στο πλαίσιο των εν λόγω προσφορών, η παραχώρηση για την εγκατάσταση ή/και τη λειτουργία ενός ορισμένου αριθμού σημείων επαναφόρτισης Η/Ο σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή χορηγείται σε μία ή περισσότερες ιδιωτικές εταιρείες. Η οδηγία 2014/94/ΕΕ (AFID) δεν περιλαμβάνει διατάξεις που αποκλείουν την εφαρμογή ενός μοντέλου υποβολής προσφορών και παραχώρησης. Το μοντέλο παραχώρησης έχει υιοθετηθεί σε πολλά κράτη μέλη της ΕΕ, ιδίως σε επίπεδο μεμονωμένων δήμων (π.χ. Άμστερνταμ, Λονδίνο, Βερολίνο) και συνιστά εφαρμογή κεντρικού σχεδιασμού στην ανάπτυξη των υποδομών ηλεκτροκίνησης, όπου η δυνατότητα ή και οι θέσεις ανάπτυξης των υποδομών αποτελούν αγαθό που διαχειρίζεται κεντρικά η Πολιτεία, αλλά οι υποδομές καθ' εαυτές υλοποιούνται και λειτουργούν από ιδιωτικούς φορείς, εν είδει παραχώρησης (concession) έναντι ανταλλάγματος ή άλλων υποχρεώσεων.

Μοντέλο εθνικού φορέα εκμετάλλευσης: Πρόκειται για την ανάπτυξη των δημοσίων προσβάσιμων υποδομών επαναφόρτισης Η/Ο μέσω ειδικού δημόσιου φορέα. Ο φορέας μπορεί να αναλάβει την ευθύνη είτε μόνο για την εγκατάσταση και την ιδιοκτησία των υποδομών επαναφόρτισης Η/Ο ή και για τη λειτουργία τους, συμπεριλαμβανομένης της παροχής υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης. Το εθνικό μοντέλο φορέα εκμετάλλευσης αντιμετωπίζει τις υποδομές επαναφόρτισης ως «φυσικό μονοπώλιο», το οποίο αναπτύσσει ή/και λειτουργεί το ίδιο το κράτος, και δεν συνάδει με την οδηγία 2014/94/ΕΕ (AFID), η οποία ορίζει ρητώς ότι «η εγκατάσταση και η λειτουργία σημείων επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να αναπτυχθούν ως ανταγωνιστική αγορά με ανοικτή πρόσβαση σε όλους όσοι ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη ή διαχείριση υποδομών επαναφόρτισης. Το εθνικό μοντέλο φορέα εκμετάλλευσης υιοθετήθηκε από λίγα κράτη μέλη της ΕΕ, κατά βάση από την Πορτογαλία (MOBI.E), πριν από την έκδοση της οδηγίας 2014/94/ΕΕ και πλέον δεν αποτελεί βίσιμη εναλλακτική επιλογή.

Υβριδικό μοντέλο: Πρόκειται για ένα μικτό μοντέλο που συνδυάζει στοιχεία τουλάχιστον δύο από τα παραπάνω μοντέλα. Διαφορετικοί συνδυασμοί αυτών των μοντέλων είναι δυνατοί και έχουν εφαρμοστεί από διαφορετικά κράτη **μέλη της ΕΕ.**

Ο ΔΕΔΔΗΕ προτίθεται να εγκαταστήσει δημόσιες υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε δημόσιους χώρους ακολουθώντας το DSO model της Eurelectric κατόπιν σύμφωνης γνώμης του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας και την έγκριση της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ). Σύμφωνα με το «DSO model», οι Διαχειριστές Δικτύου Διανομής (DSO) αναπτύσσουν και

λειτουργούν δίκτυο σταθμών φόρτισης ΗΟ δημόσιας πρόσβασης σαν επέκταση της ρυθμιζόμενης υπηρεσίας που παρέχουν. Με την υιοθέτηση του «DSO model», οι ρυθμιζόμενες υπηρεσίες που παρέχει ο ΔΕΔΔΗΕ επεκτείνονται στους χρήστες ηλεκτροκίνησης κατ' αναλογία των χρηστών δικτύου που ισχύει σήμερα. Με την ωρίμανση της αγοράς αναμένεται η ανάληψη επενδυτικών πρωτοβουλιών και από τον ιδιωτικό τομέα και η μετάβαση στο μοντέλο απελευθερωμένης αγοράς όσον αφορά την ηλεκτροκίνηση.

Το συγκεκριμένο μοντέλο ανάπτυξης δικτύου δημόσιων υποδομών φόρτισης διασφαλίζει τη δυνατότητα φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος από οποιονδήποτε χρήστη χωρίς διακρίσεις και ανεξαρτήτως Φορέα Εκμετάλλευσης Υποδομών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (ΦΕΥΦΟ) με τον οποίο έχει συμβόλαιο ο χρήστης.

Οι υποδομές φόρτισης σε δημόσιους χώρους απαιτούν νέους ρόλους και εισάγουν νέες δυναμικές σχέσεις μεταξύ φορέων της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την παροχή καινοτόμων υπηρεσιών και την εξυπηρέτηση των αναγκών των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων, δημιουργώντας ανταγωνισμό μεταξύ:

- Φορέων Εκμετάλλευσης Υποδομών Φόρτισης (ΦΕΥΦΟ), με την έννοια του Ν. 4277/2014, και τελικών καταναλωτών καθώς και

- ΦΕΥΦΟ και Προμηθευτών Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Το στρατηγικό πλάνο ανάπτυξης υποδομών φόρτισης σε δημόσιους χώρους του ΔΕΔΔΗΕ περιλαμβάνει, σε πρώτη φάση την εγκατάσταση 150 περίπου σταθμών φόρτισης σε Ελληνικά νησιά και σε δεύτερη φάση 1.500 σταθμών φόρτισης στην Ηπειρωτική Ελλάδα. Σκοπός του εγχειρήματος είναι η εξυπηρέτηση της φόρτισης των ΗΟ σε αστικούς δημόσιους χώρους (22kW, 3 φάσεων, AC Mode 3), καθώς και η εγκατάσταση υποδομών ταχείας φόρτισης (DC Mode 4) στις κεντρικές οδικές αρτηρίες, με στόχο την ανάπτυξη ενός κρίσιμου πανελλαδικού δικτύου υποδομών δημόσιας φόρτισης που θα συμβάλει σημαντικά στην προώθηση της ηλεκτροκίνησης [95] [120] [121] [122] [123].

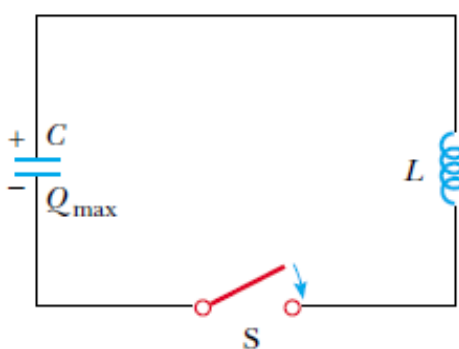
3. Στατική και δυναμική φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος

3.1 Η φυσική του συντονισμού

Ο **συντονιστής (resonator)** μπορεί να οριστεί σαν μία συντονιζόμενη δομή ικανή να αποθηκεύσει ενέργεια σε τουλάχιστον δύο διαφορετικές μορφές και στην οποία η αποθηκευμένη ενέργεια ταλαντώνεται μεταξύ αυτών των μορφών. Η συντονιζόμενη δομή έχει συγκεκριμένο ρυθμό ταλάντωσης με συχνότητα συντονισμού f και ένα πεδίο συντονισμού. Η γωνιακή συχνότητα συντονισμού ω ορίζεται $\omega = 2\pi f$, η περίοδος συντονισμού T ορίζεται ως $T = 1/f = 2\pi/\omega$, το μήκος κύματος συντονισμού λ ως $\lambda = c/f$, όπου c είναι η ταχύτητα των πεδιακών κυμάτων (η ταχύτητα του φωτός για ηλεκτρομαγνητικούς συντονιστές). Απουσία μηχανισμών απωλειών, σύζευξης, εξωτερικής παροχής ή απορρόφησης ενέργειας, το συνολικό ποσό ενέργειας W που είναι αποθηκευμένο στον συντονιστή θα παραμείνει σταθερό, όμως θα ταλαντώνεται ανάμεσα σε δύο μορφές ενέργειας με τη μια να γίνεται μέγιστη όταν η άλλη είναι ελάχιστη και το αντίστροφο. Για παράδειγμα ένας συντονιστής μπορεί να κατασκευαστεί έτσι ώστε οι δύο μορφές αποθηκευμένης ενέργειας να είναι ηλεκτρική και μαγνητική (**LC κύκλωμα**). Η ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται από το ηλεκτρικό πεδίο είναι αρχικά περιορισμένη εντός της δομής ενώ η μαγνητική βρίσκεται στην περιοχή γύρω από τον συντονιστή. Με άλλα λόγια οι ενέργειες θα είναι ίσες όμως με διαφορετική τοποθέτηση. Ανάμεσα σε τουλάχιστον δύο τέτοιες δομές μπορεί να γίνει συναλλαγή ενέργειας μέσω του συντονιζόμενου κοντινού μαγνητικού πεδίου τους. Τέτοιοι τύποι δομών αναφέρονται ως **μαγνητικοί συντονιστές**.

Το LC κύκλωμα

Όταν ένας πυκνωτής συνδέεται με ένα πηνίο -**σχήμα 3.1**- ο συνδυασμός είναι ένα LC κύκλωμα.



Σχήμα(3.1). LC κύκλωμα

Εφόσον ο πυκνωτής είναι αρχικά φορτισμένος και ο διακόπτης κλείσει, διαπιστώνουμε ότι το ρεύμα του κυκλώματος καθώς και το φορτίο του πυκνωτή ταλαντώνονται ανάμεσα σε μέγιστες θετικές και αρνητικές τιμές. Αν η αντίσταση του κυκλώματος είναι μηδενική, δεν μετατρέπεται καθόλου ενέργεια σε εσωτερική. Στο συγκεκριμένο κύκλωμα αμελούμε την αντίσταση. Υποθέτουμε επίσης ιδανικά ότι δεν ακτινοβολείται ενέργεια από το κύκλωμα. Με αυτές τις

παραδοχές οι ταλαντώσεις του κυκλώματος συνεχίζονται αέναα με την ενέργεια να ταλαντώνεται ανάμεσα στην ηλεκτρική του πυκνωτή και στη μαγνητική του πηνίου- σχήμα 3.2.

Η συνολική ενέργεια του κυκλώματος είναι:

$$U = U_L + U_C \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U = \frac{1}{2} Li^2 + \frac{Q^2}{2C} \quad (3.1)$$

και παραμένει σταθερή στο χρόνο δηλαδή:

$$\frac{dU}{dt} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow LI \frac{dI}{dt} + \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

Οι ταλαντώσεις του LC κυκλώματος είναι το ηλεκτρομαγνητικό ανάλογο των μηχανικών ταλαντώσεων ενός συστήματος μάζας-ελατηρίου.

Φορτίο	$Q \leftrightarrow x$	Θέση
Ρεύμα	$I \leftrightarrow u_x$	Ταχύτητα
Χωρητικότητα	$C \leftrightarrow 1/k$	(k σταθερά ελατηρίου)
Αυτεπαγωγή	$L \leftrightarrow m$	Μάζα

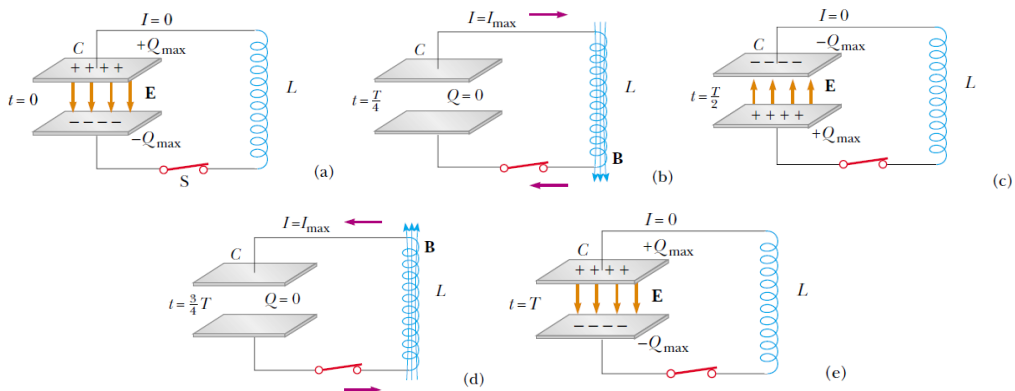
$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x = -\omega^2x, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \leftrightarrow \quad \frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{1}{LC}Q = -\omega^2Q$$

Η γωνιακή συχνότητα ω προκύπτει ότι είναι

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (3.3)$$

και εξαρτάται αποκλειστικά από την αυτεπαγωγή και τη χωρητικότητα του κυκλώματος. Αυτή είναι η **φυσική συχνότητα** ταλάντωσης του κυκλώματος.

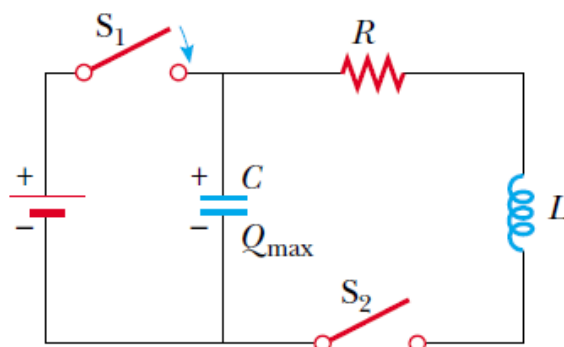
Ασκώντας εξωτερική δύναμη σε ένα μηχανικό ταλαντωτή παρατηρούμε το φαινόμενο του συντονισμού (**resonance**). Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και σε ένα LC κύκλωμα. Για παράδειγμα ένας συντονιστής ραδιοσυχνοτήτων έχει LC κύκλωμα με μια φυσική συχνότητα. Όταν το κύκλωμα ταλαντωθεί από ένα ραδιοκύμα που ανίχνευσε η κεραία, αυτό αποκρίνεται με μεγάλο πλάτος ηλεκτρικής ταλάντωσης μόνο για τη συχνότητα του σταθμού που ταυτίζεται με την φυσική συχνότητα. Έτσι το σήμα μόνο ενός σταθμού περνάει στον ενισχυτή, παρόλο που σήματα από όλους τους σταθμούς οδηγούν ταυτόχρονα το κύκλωμα. Όταν γυρνάμε το κουμπί του ραδιοφώνου για να αλλάξουμε σταθμό, στην ουσία αλλάζουμε τη φυσική συχνότητα του κυκλώματος έτσι ώστε να παρουσιάσει συντονισμό σε μια διαφορετική συχνότητα οδήγησης.



Σχήμα (3.2). Μεταφορά ενέργειας σε μη ακτινοβόλο RC κύκλωμα. Ο πυκνωτής έχει φορτίο Q_{\max} όταν $t=0$, δηλαδή τη στιγμή που κλείνει ο διακόπτης

Το RLC κύκλωμα

Στην πραγματικότητα, το κύκλωμα θα παρουσιάζει και κάποια αντίσταση – *σχήμα 3.3*. Έτσι, η συνολική ενέργεια του κυκλώματος δεν θα είναι πια σταθερή αφού η αντίσταση προκαλεί μετατροπή της σε εσωτερική ενέργεια. Και πάλι αγνοούμε εδώ την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του κυκλώματος.



Σχήμα (3.3). RLC κύκλωμα σε σειρά. Ο διακόπτης S_1 είναι κλειστός και ο πυκνωτής φορτίζει. Έπειτα ανοίγει και τη χρονική στιγμή $t=0$, κλείνει ο διακόπτης S_2 .

Η συνολική ενέργεια του κυκλώματος είναι:

$$U = U_L + U_C \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U = \frac{1}{2} Li^2 + \frac{Q^2}{2C} \quad (3.4)$$

Ο ρυθμός μετατροπής της ενέργειας σε εσωτερική ενέργεια στην αντίσταση είναι $I^2 R$ οπότε:

$$\frac{dU}{dt} = -I^2 R \Rightarrow LI \frac{dI}{dt} + \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} = -I^2 R \Rightarrow$$

$$LI \frac{dI}{dt} + \frac{Q}{C} I = -I^2 R \Rightarrow LI \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{Q}{C} I = -I^2 R \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{1}{C} Q = -IR \quad (3.5)$$

Το RLC κύκλωμα είναι το ανάλογο του απλού αρμονικού ταλαντωτή με απόσβεση

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0 \rightarrow m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

Αντίσταση $R \rightarrow b$ Συντελεστής ιξώδους απόσβεσης

Όταν η αντίσταση είναι μικρή το φορτίο του πυκνωτή ταλαντώνεται φθίνοντας με αργό ρυθμό:

$$Q = Q_{\max} e^{-Rt/2L} \cos \omega_d t \quad (3.6)$$

όπου η γωνιακή συχνότητα ταλάντωσης του κυκλώματος ω_d , δίνεται από τον τύπο

$$\omega_d = \left[\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

$$\Rightarrow \omega_d = (\omega^2 - \Gamma^2)^{1/2} \quad (3.8)$$

όπου Γ είναι ο συντελεστής απόσβεσης, $\Gamma = \frac{R}{2L}$ (3.9)

Όταν το κύκλωμα συνδέεται σε AC πηγή τάσης – σχήμα (3.4)- η τάση που εφαρμόζεται σε αυτό θα είναι :

$$V = V_{\max} \sin \omega t, \quad (3.10)$$

ενώ το ρεύμα που το διαρρέει θα είναι:

$$I = I_{\max} \sin(\omega t - \phi), \quad (3.11)$$

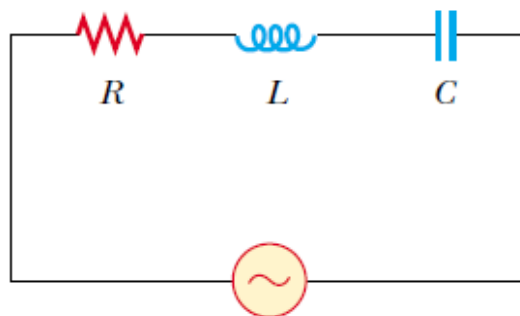
με διαφορά φάσης $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right)$

Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος δίνεται από τον τύπο

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad (3.12)$$

όπου $X_L = \omega L$ και $X_C = \frac{1}{\omega C}$

Σε υψηλές συχνότητες το κύκλωμα παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά με $X_L > X_C$ και $\phi > 0$.



Σχήμα (3.4). Κύκλωμα RLC εν σειρά με εναλλασσόμενη πηγή τάσης

Η μέση ενεργός ισχύς που αποδίδεται στο κύκλωμα από την πηγή είναι

$$P_{av} = V_{rms} I_{rms} \cos \phi \quad (3.13)$$

και μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια μέσω της αντίστασης (ωμικές απώλειες):

$$P_{av} = I_{rms}^2 R \quad (3.14)$$

Το φαινόμενο του συντονισμού σε κύκλωμα RLC εν σειρά

Ένα RLC κύκλωμα εν σειρά βρίσκεται σε συντονισμό όταν το ρεύμα που το διαρρέει έχει τη μέγιστη τιμή του. Το μέτρο του ρεύματος δίνεται από τον τύπο:

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow I_{rms} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (3.15)$$

Το ρεύμα για να λάβει τη μέγιστη τιμή του όπως φαίνεται και από τον τύπο, θα πρέπει να παρουσιάζει ωμική συμπεριφορά δηλαδή να ισχύει

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (3.16)$$

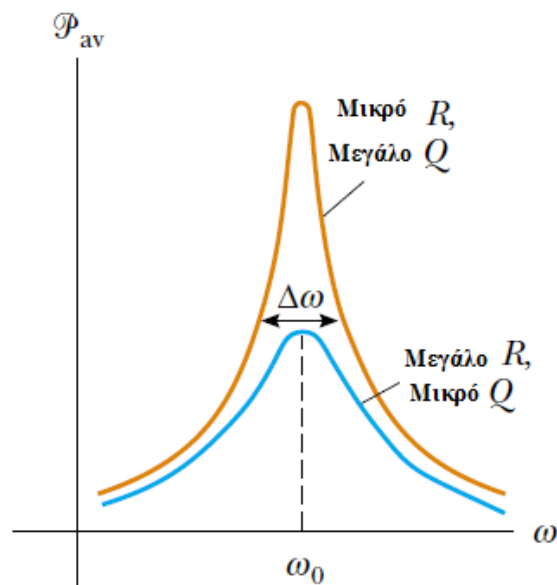
η συχνότητα δηλαδή του κυκλώματος να αντιστοιχεί στην **φυσική συχνότητα συντονισμού ενός LC κυκλώματος**.

Η μέση ισχύς θα γίνει μέγιστη:

$$P_{av} = I_{rms}^2 R \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{av} = \frac{V_{rms}^2 R}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \xrightarrow{\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}} P_{av} = \frac{V_{rms}^2}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{av} = \frac{V_{max}^2}{2R} \quad (3.17)$$



Σχήμα(3.5). Μέση ισχύς του κυκλώματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Στην συχνότητα συντονισμού ω_0 η μέση ισχύς P_{av} γίνεται μέγιστη. Το πλάτος $\Delta\omega$ κάθε καμπύλης μετράται μεταξύ των δύο σημείων όπου η ισχύς έχει τιμή ίση με το μισό της μέγιστης τιμής της.

Η αιχμηρότητα της καμπύλης – σχήμα 3.5 – περιγράφεται από μία αδιάστατη παράμετρο, τον **συντελεστή ποιότητας Q**:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}, \quad (3.18)$$

όπου ω_0 η συχνότητα συντονισμού

Ο συντελεστής ποιότητας ορίζεται επίσης ως ο λόγος $Q = \frac{2\pi E}{\Delta E}$, όπου E η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο ταλαντούμενο σύστημα και ΔE η καταλισκόμενη ενέργεια στην αντίσταση ανά περίοδο.

$$\begin{aligned}
 E &= E_L + E_C \Rightarrow E = \frac{1}{2}LI^2 + \frac{1}{2}CV_c^2 = \frac{1}{2}L\left(\frac{V}{R}\right)^2 + \frac{1}{2}CV_c^2 \Rightarrow \\
 \Rightarrow E &= \frac{1}{2}L\frac{V_{\max}^2 \sin^2 \omega t}{R^2} + \frac{1}{2}CV_c^2 = \frac{1}{2}L\frac{V_{\max}^2 \sin^2 \omega_o t}{R^2} + \frac{1}{2}C\left(\frac{1}{C}\int \frac{V_{\max} \sin \omega_o t}{R} dt\right)^2 \Rightarrow \\
 \Rightarrow E &= \frac{1}{2}L\frac{V_{\max}^2 \sin^2 \omega_o t}{R^2} + \frac{1}{2}C\left(-\frac{V_{\max}}{RC\omega_o} \cos \omega_o t\right)^2 \Rightarrow \\
 \Rightarrow E &= \frac{1}{2}L\frac{V_{\max}^2 \sin^2 \omega_o t}{R^2} + \frac{1}{2}C\frac{V_{\max}^2 LC \cos^2 \omega_o t}{R^2 C^2} \Rightarrow \\
 \Rightarrow E &= \frac{LV_{\max}^2}{2R^2} \tag{3.19}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta E &= P_{av} T = I_{rms}^2 R \frac{2\pi}{\omega_o} = \frac{V_{rms}^2}{R} \cdot \frac{2\pi}{\omega_o} = \frac{V_{\max}^2}{2R} \cdot \frac{2\pi}{\omega_o} \Rightarrow \\
 \Rightarrow \Delta E &= \frac{\sqrt{LC}\pi V_{\max}^2}{R} \tag{3.20}
 \end{aligned}$$

$$Q = 2\pi \frac{\frac{LV_{\max}^2}{2R^2}}{\frac{\sqrt{LC}\pi V_{\max}^2}{R}} \Rightarrow Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{3.21}$$

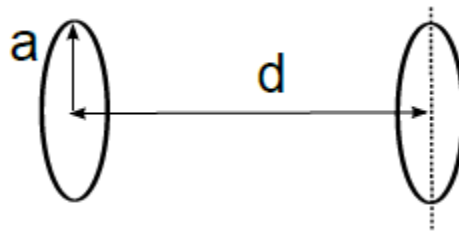
$$\Rightarrow Q = \frac{\omega_o L}{R} \tag{3.22}$$

$$\Gamma = \frac{R}{2L} = \frac{\omega_o}{2Q} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = \frac{\omega_o}{2\Gamma} \quad (3.23)$$

Όπως φαίνεται και στο *σχήμα 3.5*, ένα κύκλωμα με υψηλό συντελεστή ποιότητας αποκρίνεται σε ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων, είναι δηλαδή «επιλεκτικό» ενώ ένα κύκλωμα με χαμηλό Q μπορεί να ανιχνεύσει ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων. Οι συνήθεις τιμές του Q στα ηλεκτρονικά κυκλώματα κυμαίνονται από 10 έως 100. Αρκετά σήματα παρουσιάζουν συχνά ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Για αυτό το λόγο είναι σημαντικό ένα κύκλωμα να σχεδιαστεί με **υψηλό συντελεστή ποιότητας** έτσι ώστε να μπορεί να εξαλείψει ανεπιθύμητα κύματα[53].

Ο συντελεστής ποιότητας ουσιαστικά χαρακτηρίζει την απώλεια ενέργειας στο κύκλωμα- είναι αντιστρόφως ανάλογος των απωλειών του συντονιστή. Υψηλό Q δείχνει την ικανότητα του συντονιστή να αποθηκεύσει ενέργεια για σχετικά μεγάλο διάστημα.



Σχήμα(3.6). Ομοαξονική διάταξη βρόχων με ένα τύλιγμα

Η αντίσταση απωλειών του πηνίου $R = R_L = R_D$ στις *υψηλές συχνότητες*, περιλαμβάνει την θερμική αντίσταση R_o και την αντίσταση ακτινοβολίας R_r :

$$R = R_o + R_r \quad (3.24)$$

Για το οιονεί στατικό όριο $a = d = \lambda$, και για **ομοαξονική τοποθέτηση των δύο τυλιγμάτων** *σχήμα 3.6*[61] η θερμική αντίσταση R_o και η αντίσταση ακτινοβολίας R_r είναι για τον κάθε βρόχο:

$$R_o = \sqrt{\frac{\omega\mu_o}{2\sigma}} \frac{\alpha}{b} \quad (3.25)$$

$$R_r ; \frac{\mu_o\pi(\omega\alpha)^4}{12c^3} \quad \{60\} \quad (3.26)$$

εφόσον $\alpha < \lambda / 6\pi$

Ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M και ο συντελεστής αυτεπαγωγής L πηνίων N σπειρών ορίζονται από τους τύπους:

$$M = \frac{\mu_o\pi\alpha^4 N}{2d^3} \quad \{9\} \quad (3.27)$$

$$L = \mu_o\alpha N^2 \left[\ln\left(\frac{8a}{b}\right) - 2 \right] \quad \{10\}, \quad (3.28)$$

όπου $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} H / m$ και $\sigma = 5.8 \times 10^7 \Omega^{-1} / m$

Στους ανωτέρω τύπους μ_o είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού, α η ακτίνα του πηνίου, b η ακτίνα του αγωγού, N ο αριθμός τυλιγμάτων του πηνίου. Με A συμβολίζεται η διατομή του τυλίγματος ενώ λ είναι το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας του πηνίου. d είναι η απόσταση μεταξύ των δύο τυλιγμάτων την οποία αποκαλούμε απόσταση μετάδοσης και όπως φαίνεται και από τον τύπο {9} καθορίζει τον M .

Το μήκος κύματος είναι:

$$\lambda = c / f \quad (3.29)$$

όπου $c = 3 \times 10^8 m / s$ η ταχύτητα του φωτός στο κενό [58]

Η αμοιβαία επαγωγή M μεταξύ των τυλιγμάτων εκφράζεται σαν το γινόμενο της διατομής του πηνίου και της μαγνητικής επαγωγής του πεδίου. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι:

$$H = F / l = NI / l \quad (At / m) \quad (3.30)$$

και η αμοιβαία επαγωγή:

$$M = \frac{\lambda}{I} = \frac{N \cdot \varphi}{I} = \frac{N \cdot F}{I \cdot R} = \frac{N \cdot F \cdot \mu_o \cdot A}{l} = N \mu_o HA = NBA \quad (3.31)$$

οπότε η μαγνητική επαγωγή γράφεται:

$$\Rightarrow B = \frac{M}{N \cdot A} \quad (Tesla) \quad (3.32)$$

όπου

F μαγνητεγερτική δύναμη (At)

φ μαγνητική ροή (Wb)

l μέσο ενεργό μήκος μαγνητικού κυκλώματος (m)

$\mu_o = 4\pi \times 10^{-7} H / m$ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού

A η διατομή του τυλίγματος

Δεδομένης της αμοιβαίας επαγωγής , μεγαλύτερη διατομή τυλίγματος οδηγεί σε μείωση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και επομένως σε τήρηση των κανόνων ασφαλείας που αφορούν στην έκθεση του ανθρώπινου σώματος στην ακτινοβολία του πεδίου μέσα και έξω από το όχημα. Επομένως προτιμάται κατασκευή πηνίου με μικρότερο αριθμό τυλιγμάτων και μεγαλύτερη διατομή με το μήκος της ακτίνας να περιορίζεται από το μέγεθος του ηλεκτρικού οχήματος [66] [67].

Ο συντελεστής σύζευξης k , λαμβάνει τιμές $0 \leq k \leq 1$ και μπορεί να είναι ανεξάρτητος (ή σχεδόν ανεξάρτητος) της συχνότητας συντονισμού των τυλιγμάτων εκπομπής και λήψης, όταν αυτά είναι τοποθετημένα σε αποστάσεις μικρότερες του μήκους κύματος. Αντίθετα, προσδιορίζεται περισσότερο από την γεωμετρία των τυλιγμάτων και τη μεταξύ τους απόσταση που αυξανόμενη φθίνει την μεταξύ τους σύζευξη.

Σε αντίθεση με ένα μετασχηματιστή όπου το πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα έχουν συντελεστή σύζευξης k κοντά στη μονάδα, τα συστήματα WPT πρέπει να λειτουργούν με πολύ μικρότερο συντελεστή, $k \approx 0.1 - 0.3$, λόγω των περιορισμών στο μέγεθος των τυλιγμάτων και στην απαιτούμενη απόσταση και μεταξύ τους μετατόπιση. Η χρήση συντονισμού επιτρέπει υψηλή απόδοση μεταφοράς ενέργειας (> 90% διατετακτικά) ακόμα και σε αυτά τα χαμηλά επίπεδα μαγνητικής σύζευξης[65].

Στην θεωρία σύζευξης τρόπων (CMT), χρησιμοποιείται ο ρυθμός σύζευξης των τυλιγμάτων k_w που σχετίζεται με τον k και υποδηλώνει ο ρυθμό ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των συντονιστών:

$$k_w = \frac{k\sqrt{\omega_s\omega_D}}{2} \xrightarrow{\omega_s = \omega_D = \omega} k_w = \frac{k\omega}{2} \quad (3.33)$$

Δεδομένου ότι :

$$M = k\sqrt{L_S L_D} \quad \underline{L_S = L_D = L} \quad M = kL \quad (3.34)$$

Ο k_w θα είναι:

$$k_w = \frac{\omega M}{2L} \quad (3.35)$$

Η απόδοση του συστήματος δίνεται από τον τύπο (3.36) και είναι :

$$n = \frac{R_L (\omega M)^2}{(R_g + R_s)(R_D + R_L)^2 + (R_D + R_L)(\omega M)^2} \quad R_s = R_D = R$$

$$n = \frac{R_L (\omega M)^2}{(R_g + R)(R + R_L)^2 + (R + R_L)(\omega M)^2} \quad (3.36)$$

Σε εφαρμογές ασύρματης μεταφοράς ισχύος που κάνουν χρήση των **κοντινών πεδίων** των συντονιστών, είναι επιθυμητό το μέγεθός τους να **είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος της συχνότητας συντονισμού** λ , έτσι ώστε οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας να είναι μειωμένες. Επίσης ο συντονισμός του συστήματος σε **υψηλές συχνότητες** (MHz) με αποτέλεσμα υψηλό συντελεστή ποιότητας Q των τυλιγμάτων συμβάλει ώστε αυτό να έχει χαμηλές ωμικές απώλειες και επομένως χαμηλές απώλειες ενέργειας[56].

Πέρα από τη συχνότητα λειτουργίας, τη γεωμετρία του συστήματος που ορίζεται από το σχήμα και το μέγεθος των δομών πομπού και δέκτη, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζουν η σχετική τους ευθυγράμμιση, η διάταξή τους και η μεταξύ τους απόσταση καθώς επηρεάζουν το βαθμό σύζευξης των τυλιγμάτων και τις εγγενείς απώλειες του συστήματος. Στην ασύρματη μεταφορά ενέργειας κοντινού πεδίου, η αναλογία σύζευξης - απωλειών καλείται **βαθμός ποιότητας** (*figure of merit*) και ορίζεται από τον τύπο :

$$U = \frac{k_w}{\sqrt{\Gamma_s \Gamma_D}}, \quad (3.37)$$

όπου Γ_s, Γ_D οι συντελεστές απόσβεσης τυλιγμάτων λήψης και εκπομπής.

Αντικαθιστώντας τα k_w, Γ_s, Γ_D ο U γίνεται:

$$U = \frac{\frac{\omega M}{2\sqrt{L_S L_D}}}{\sqrt{\frac{R_S}{2L_S} \frac{R_D}{2L_D}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U = \frac{\omega M}{\sqrt{R_S R_D}} \quad (3.38)$$

Η μεγιστοποίηση αυτής της αδιάστατης ποσότητας είναι μία από τις προϋποθέσεις για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση στα WPT συστήματα μεσαίου εύρους.

Έχει παρατηρηθεί ότι σε σταθερές συνθήκες συντονισμού, η θεωρία σύζευξης τρόπων (CMT) είναι ισοδύναμη με τη θεωρία κυκλωμάτων (CT). Η CT ουσιαστικά παρέχει το απαραίτητο φυσικό πλαίσιο στην CMT διατύπωση του WPT κοντινού πεδίου. Για ένα τέτοιο σύστημα που λειτουργεί σε συντονισμό, η απόδοση σύμφωνα με την CMT δίδεται από τον τύπο:

$$n_{CMT} = \frac{\Gamma_L k_w^2}{\Gamma_S (\Gamma_D + \Gamma_L)^2 + (\Gamma_D + \Gamma_L) k_w^2} \quad (3.39)$$

Η συνθήκη προσαρμογής του φορτίου είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί όσο είναι δυνατόν η μέγιστη μεταφορά ισχύος στην έξοδο του συστήματος, και έτσι να βελτιωθεί η συνολική απόδοση σε άκρο απόδοσή του. Η συνθήκη προκύπτει από την μεγιστοποίηση της απόδοσης n_{CMT} , επιλύοντας ως προς το Γ_L :

$$\frac{\partial n_{CMT}}{\partial \Gamma_L} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Gamma_L = \sqrt{1 + \frac{k_w^2}{\Gamma_S \Gamma_D}} \quad (3.40)$$

Αντικαθιστώντας το Γ_L στον τύπο {11} θα είναι:

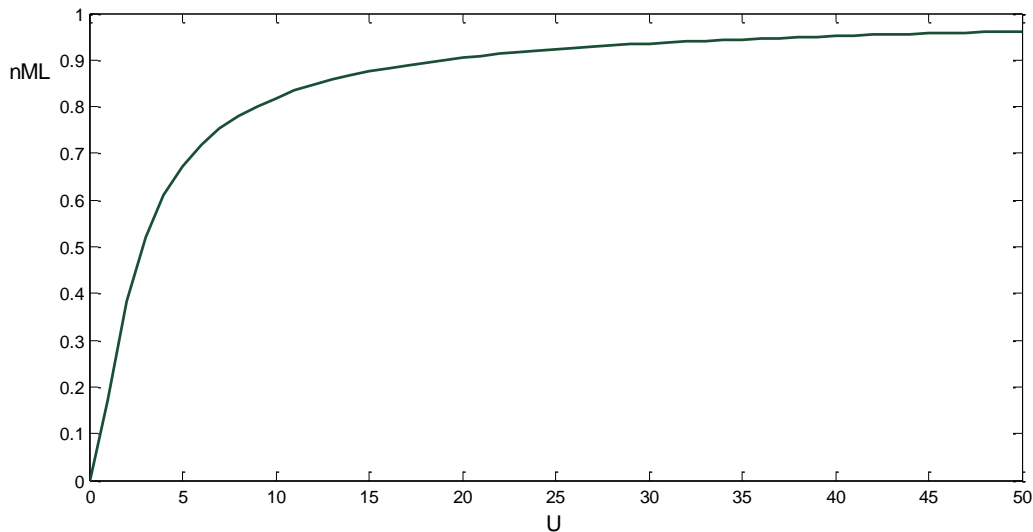
$$n_{CMT} = \frac{\frac{k_w^2}{\Gamma_S \Gamma_D} \sqrt{1 + \frac{k_w^2}{\Gamma_S \Gamma_D}}}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{k_w^2}{\Gamma_S \Gamma_D}}\right) \frac{k_w^2}{\Gamma_S \Gamma_D} + \left(1 + \sqrt{1 + \frac{k_w^2}{\Gamma_S \Gamma_D}}\right)^2} \quad U = k_w / \sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}$$

$$n_{CMT} = \frac{U^2 \sqrt{1+U^2}}{(1+\sqrt{1+U^2})U^2 + (1+\sqrt{1+U^2})^2} \Rightarrow$$

$$n_{CMT} \Rightarrow n_{ML} = \frac{U^2}{(1+\sqrt{1+U^2})^2} \quad (3.41)$$

Συστήματα με $U \gg 1$ λέγεται ότι είναι ισχυρά συζευγμένα ενώ όταν ισχύει $U = 1$ ασθενώς συζευγμένα. Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της απόδοσης με προσαρμογή φορτίου n_{ML} σε συνάρτηση με τον βαθμό ποιότητας U .

Είναι φανερό ότι υψηλή απόδοση WPT επιτυγχάνεται με υψηλό U , όπου για τιμές του πάνω από 20 ($U > 20$) η απόδοση ξεπερνά το 90%.



Σχήμα(3.7). Μεταβολή της απόδοσης με προσαρμογή φορτίου n_{ML} σε συνάρτηση με τον βαθμό ποιότητας U

$$U = \frac{\omega M}{\sqrt{R_S R_D}} \xrightarrow{R_S = R_D = R} U = \frac{\omega M}{R} = \frac{\omega M}{R_0 + R_r} \quad (3.42)$$

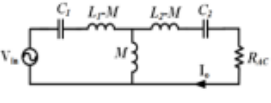
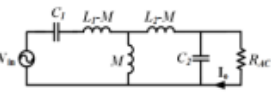
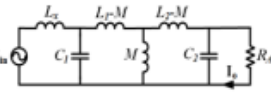
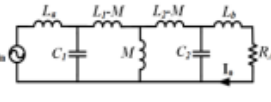
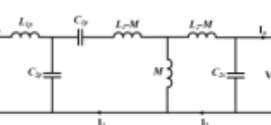
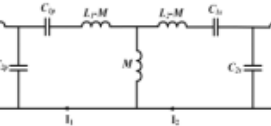
Μεγιστοποιώντας τον βαθμό ποιότητας U και επιλύοντας ως προς τη συχνότητα f , λαμβάνουμε τη συχνότητα συντονισμού f_{\max} :

$$\frac{\partial U}{\partial f} = 0 \Rightarrow$$

$$f_{\max} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{c^3}{8\pi a^3 b \sqrt{\mu_o \sigma}} \right)^{2/7} \quad (3.43)$$

Όπως φαίνεται από τον τύπο {14}, **η συχνότητα που μεγιστοποιεί τον βαθμό ποιότητας είναι ανεξάρτητη από την απόσταση d μεταξύ των τυλιγμάτων**. Αυτή είναι μια χρήσιμη διαπίστωση, αφού για βρόχο προκαθορισμένης ακτίνας δεν χρειάζεται ρύθμιση της απόστασης ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη πιθανή απόδοση.

Οι συντονιστές, συζευγμένοι μέσω οποιασδήποτε περιοχής των κοντινών τους πεδίων, μπορούν να αλληλεπιδράσουν και να ανταλλάξουν ενέργεια. Η απόδοση αυτής της μεταφοράς ενέργειας μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά εάν οι συντονιστές λειτουργούν στην ίδια συχνότητα συντονισμού[56]. Οι συντονιστές μπορούν να σχεδιαστούν με βάση την θεωρία σύζευξης τρόπων (CMT - Coupled Mode Theory), τη θεωρία κυκλωμάτων (CT- Circuit Theory), τη θεωρία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου έτσι ώστε να έχουν ρυθμιζόμενο χαρακτηριστικό μέγεθος και να μπορούν να χειριστούν διαφορετικά επίπεδα ισχύος[53]. Η θεωρία σύζευξης τρόπων είναι αρκετά περίπλοκη και εφαρμόζεται γενικά μόνο σε καταστάσεις όπου υπάρχουν μικρές διαταραχές. Έτσι μπορεί να αναλυθεί μόνο κοντά στην συχνότητα συντονισμού που δεν αντικατοπτρίζει την συνολική εικόνα της κατάστασης. Υπό το πρίσμα της θεωρίας κυκλωμάτων (ισοδύναμα κυκλώματα), υπάρχουν επτά διαδεδομένες τοπολογίες συστημάτων ασύρματης μετάδοσης ενέργειας σχήμα(3.8) σειρά-σειρά (SS - Series-Series), σειρά-παράλληλα (SP – Series-Parallel), παράλληλα-σειρά (PS Parallel– Series), παράλληλα- παράλληλα (PP – Parallel-Parallel), LCL-LCL, LCC-P και LCC-LCC [124]. Οι τοπολογίες διαφέρουν ανάλογα με τον τρόπο χρήσης του πυκνωτή αντιστάθμισης στο κύκλωμα. Οι παράλληλα συντονιζόμενες τοπολογίες όπως η LCL παρουσιάζουν ανοχή στην μη ευθυγράμμιση των πηνίων οπότε και χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, από την άλλη κάνουν χρήση στοιχείων αντιστάθμισης που επιλέγονται με βάση την αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων η τιμή η οποίας όμως μεταβάλλεται καθώς το όχημα κινείται.

Topology	Independent resonant frequency	ZPA condition	Robustness of output current with M	Number of parameters to adjust output current	Number of resonant components	Additional resonant inductors value
 <p>Series-series topology [29]</p>	<p>Yes</p> $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ $= \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$	Yes	<p>No</p> $I_o = \frac{V_{in}}{\omega_o M}$	Two: ω_o and M	4	Not applicable
 <p>Series-parallel topology [30]</p>	<p>No</p> $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{(L_1 \pm M) C_1}}$ $= \frac{1}{\sqrt{(L_2 \pm M) C_2}}$	No	<p>Yes</p> $I_o = \frac{V_{in}}{\omega_o (L_2 \pm M)}$	Three: ω_o , M and L_2	4	Not applicable
 <p>Parallel-parallel topology [31], where: $L_x = L_1 - \frac{M^2}{L_2}$</p>	<p>No</p> $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_s}}$ $= \frac{1}{\sqrt{1-k^2}} \frac{1}{\sqrt{L_1 C_p}}$ <p>Where $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$</p>	Yes	<p>Not determinable</p> $I_o = \frac{M V_{in}}{\omega_o (L_1 - M^2/L_2) L_2}$	Four: ω_o , M , L_1 and L_2	5	$L_x = L_1 - M^2/L_2$
 <p>LCL-LCL topology [7], where: $L_a = L_1, L_b = L_2$</p>	<p>Yes</p> $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ $= \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$	Yes	<p>Yes</p> $I_o = \frac{M V_{in}}{\omega_o L_1 L_2}$	Four: ω_o , M , L_1 and L_2	6	$L_a = L_1,$ $L_b = L_2$
 <p>LCC-P topology [27]</p>	<p>Yes</p> $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{1p} C_{2p}}}$ $= \frac{1}{\sqrt{L_2 C_{2s}}}$	No	<p>Yes</p> $I_o = \omega^3 C_{2p} C_{2s} M V_{in}$	Four: ω_o , M , C_{2p} and C_{2s}	6	$L_{1p} = \omega_o^2 C_{2p}$
 <p>LCC-LCC topology [10],[25]</p>	<p>Yes</p> $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{1p} C_{2p}}}$ $= \frac{1}{\sqrt{L_{1s} C_{2s}}}$ $= \sqrt{\frac{(C_{1p} + C_{2p})}{C_{1p} C_{2p} L_1}}$ $= \sqrt{\frac{(C_{1s} + C_{2s})}{C_{1s} C_{2s} L_2}}$	Yes	<p>Yes</p> $I_o = \omega^3 C_{2p} C_{2s} M V_{in}$	Four: ω_o , M , C_{2p} and C_{2s}	8	$L_{1p} = \omega_o^2 C_{2p}$ and $L_{1s} = \omega_o^2 C_{2s}$

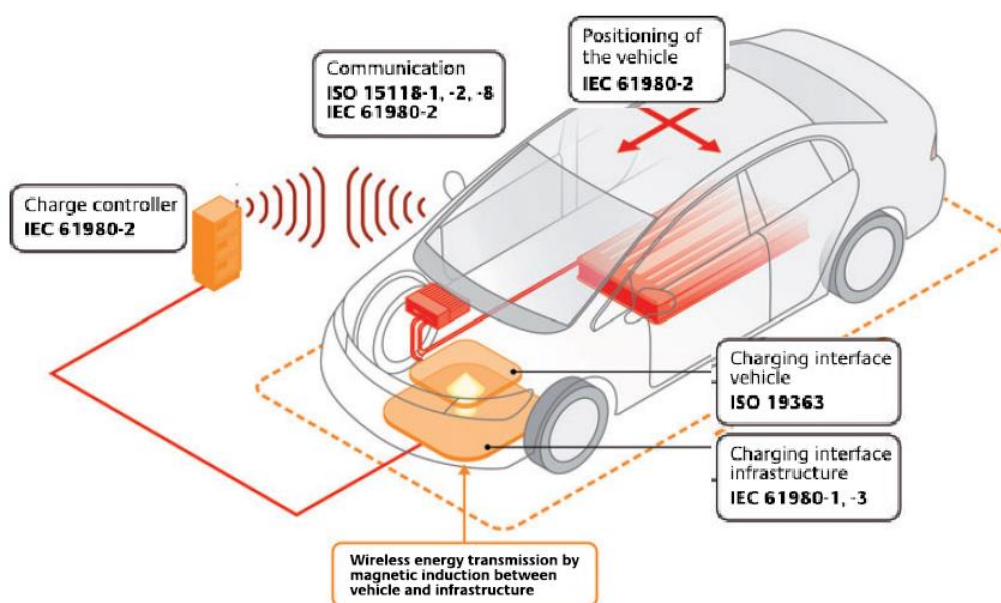
Σχήμα(3.8). Τοπολογίες IPT συστημάτων

Η τοπολογία SS, λειτουργεί καλά κατά των παρεμβολών παρασιτικών συχνοτήτων και είναι κατάλληλη για μικρά ωμικά φορτία (π.χ. μπαταρία αυτοκινήτου)[54]. Οι τοπολογίες PS και PP απαιτούν ένα επιπλέον πηνίο σε σειρά για να ρυθμίσουν το ρεύμα του αντιστροφέα που ρέει στο παράλληλο κύκλωμα συντονισμού, γεγονός το οποίο οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους του μετατροπέα και κατά συνέπεια του κόστους του συνολικού συστήματος. Επιπλέον οι δύο αυτές υλοποιήσεις έχουν μεταβαλλόμενες τιμές της συντονιζόμενης χωρητικότητας ανάλογα με τους συντελεστές σύζευξης και ποιότητας. Ένα σημαντικό **πλεονέκτημα της SS τοπολογίας** είναι ότι η πρωτεύουσα χωρητικότητα είναι ανεξάρτητη από τον συντελεστή σύζευξης και το φορτίο. Αντίθετα, η SP εξαρτάται από τον συντελεστή σύζευξης και απαιτεί υψηλότερη τιμή χωρητικότητας για ισχυρότερη μαγνητική σύζευξη[2].

3.2 Δράσεις τυποποίησης ασύρματης φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος

Το 2010, η **SAE International (International Society of Automotive Engineers-Διεθνής Κοινότητα Μηχανικών Αυτοκινήτου)** συγκρότησε την επιτροπή J2954 με σκοπό να εργαστεί επάνω στην ανάπτυξη ενός προτύπου για την ασύρματη φόρτιση ελαφρών ηλεκτρικών οχημάτων. Η **IEC (International Electrotechnical Commission-Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή)** και η **ISO (International Organization for Standardization-Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης)**, έχουν επίσης ενεργές ομάδες δημιουργίας προτύπων και για την πλευρά του εδάφους και του οχήματος αντίστοιχα όσον αφορά την ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων[65].

Το 2016, η SAE δημοσίευσε την αναφορά τεχνικών πληροφοριών J2954 ασύρματης φόρτισης για ελαφρά ενβυσματώσιμα/ηλεκτρικά οχήματα και μεθοδολογίας ευθυγράμμισης “**SAE TIR J2954 Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Alignment Methodology**”. Πρόκειται για μια βιομηχανική οδηγία ορόσημο που τυποποιεί τις προδιαγραφές του οχήματος και της υποδομής του εδάφους και καθιερώνει την ασύρματη μεταφορά ισχύος στις υποδομές, τους προμηθευτές αυτοκινήτων και τις κατασκευάστριες εταιρίες ηλεκτρικών οχημάτων (PH/EV). Με την ασύρματη μεταφορά ισχύος (WPT) να γίνεται γρήγορα δημοφιλής στους καταναλωτές ηλεκτρονικών συσκευών και εφαρμογών χαμηλής ισχύος, η τυποποίηση είναι αναγκαία για την WPT υψηλής ισχύος των PH/EVs.



Σχήμα(3.9). Ευρωπαϊκά πρότυπα ασύρματης φόρτισης

Η TIR J2954 ορίζει αποδεκτά κριτήρια για διαλειτουργικότητα, ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ελάχιστη απόδοση και ασφάλεια της WPT αλλά και καλωδιακής φόρτισης ελαφρών ηλεκτρικών οχημάτων. Τα κριτήρια αυτά είναι απαραίτητα για να είναι εφικτή η εμπορευματοποίηση της WPT και δίνουν τη δυνατότητα σε οποιοδήποτε συμβατό όχημα να

φορτιστεί ασύρματα στο σπίτι , τη δουλειά ή το εμπορικό κέντρο απλά και μόνο παρκάροντάς το στο κατάλληλο σημείο.

Η οδηγία J2954 παρουσιάστηκε στο 4^ο Ετήσιο Συνέδριο για Ηλεκτρικούς Δρόμους και Οχήματα (*CERV- Annual Conference for Electric Roads and Vehicles*) τον Μάιο του 2016 στην πόλη Logan της Utah από τον Jesse Schneider, πρόεδρο της επιτροπής ασύρματης φόρτισης της SAE και διαχειριστή ανάπτυξης κυψελών καυσίμου, ηλεκτρικών οχημάτων και προτύπων της BMW Βόρειας Αμερικής.

Συγκεκριμένα η οδηγία θεσπίζει μια κοινή ζώνη συχνοτήτων (81.39 – 90 kHz) ορίζοντας τα 85 kHz σαν ονομαστική συχνότητα λειτουργίας για όλα τα συστήματα ελαφρών οχημάτων. Επιπλέον ορίζει τέσσερις κλάσεις επιπέδου ασύρματης μεταφοράς ισχύος σε PH/EVs.

- 3.7 kW (WPT 1)
- 7.7 kW (WPT 2)
- 11 kW (WPT 3) (Προσδιορίστηκε το 2017 σε αναθεώρηση της J2954)
- 22 kW (WPT 4) (Θα προσδιοριστεί μελλοντικά σε αναθεώρηση της J2954)

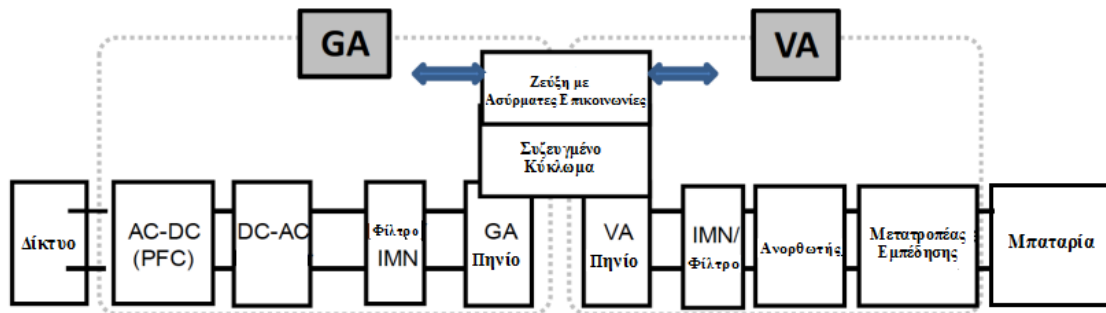
Το 2017 ακολούθησε αναθεώρηση της J2954 και δημοσιεύτηκε η συνιστώμενη πρακτική J2954 (RP) που περιγράφει τις απαιτήσεις WPT συστημάτων σε επίπεδα ισχύος 3.7 kW, 7.7kW, 11kW (WPT 1, WPT 2, WPT 3 αντίστοιχα) για οχήματα με ύψος από το έδαφος 100mm - 250mm και για πλευρική απόκλιση ευθυγράμμισης +/- 100mm.

Η αναθεώρηση αυτή καθορίζει αποδεκτά κριτήρια για διαλειτουργικότητα, ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC), ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (EMF), κατώτατο όριο απόδοσης, ασφάλειας και δοκιμών για την ασύρματη φόρτιση ελαφρών ηλεκτρικών οχημάτων και εμβυσματώσιμων ηλεκτρικών οχημάτων. Αφορά φόρτιση μονοκατευθυντικής ροής (από το δίκτυο στην μπαταρία του οχήματος) και προορίζεται για χρήση στατικών εφαρμογών (όταν το όχημα είναι ακίνητο). Τα διάφορα επίπεδα φόρτισης βασίζονται στα AC επίπεδα καλωδιακής φόρτισης 1, 2, 3 που καθορίζονται από το πρότυπο SAE J1772 με κάποιες αλλαγές. Στο εγγύς μέλλον οχήματα με δυνατότητα ασύρματης φόρτισης, θα μπορούν επίσης να φορτιστούν με εμβυσματώσιμους φορτιστές (plug-in chargers) σύμφωνα με το J1772 πρότυπο. Οι προδιαγραφές που καθορίζονται αφορούν ασύρματη φόρτιση στο σπίτι αλλά και σε δημόσιους χώρους.

Η RP παρέχει ένα τυποποιημένο πάγκο δοκιμής (αρχικά μέχρι και για WPT 2 επίπεδα ισχύος) που δίνει τη δυνατότητα τόσο σε κατασκευαστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων όσο και σε εταιρίες υποδομών να εξετάσουν την επίδοση και εγκυρότητα νέων προϊόντων και επιτευγμάτων. Ο πρότυπος πάγκος δοκιμών βασίζεται στην τοπολογία κυκλικών πηνίων δίνει όμως τη δυνατότητα ελέγχου συμβατότητας και με άλλες τοπολογίες όπως τα πηνία double D.

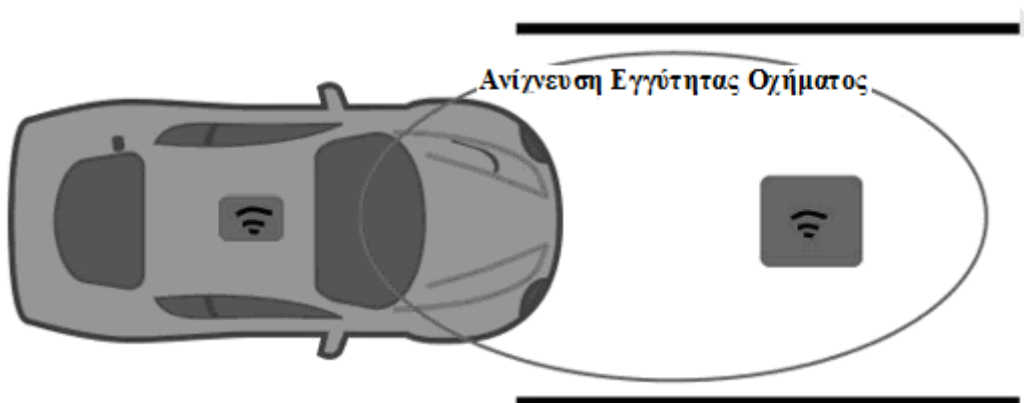
Τα WPT συστήματα έχουν δύο βασικά δομικά στοιχεία : τη μονάδα εξαρτημάτων εδάφους (GA - Ground Assembly Unit) και τη μονάδα εξαρτημάτων οχήματος (VA- Vehicle Assembly Unit). Η μονάδα GA περιλαμβάνει ένα μετατροπέα ισχύος με διόρθωση συντελεστή ισχύος (PFC Converter), ακολουθεί αντιστροφείας DC-AC, φίλτρο και δίκτυο προσαρμογής εμπέδησης (IMN) που συνδέεται στο πρωτεύον τύλιγμα (έδαφος).

Το τυλίγμα της μονάδας VA (δευτερεύον) συνδέεται σε IMN. Ακολουθεί φίλτρο, ανορθωτής και προαιρετικά ένας μετατροπέας εμπέδησης που παράγει κατάλληλες τάσεις και ρεύματα για τη φόρτιση της μπαταρίας του οχήματος **σχήμα (3.10)**.



Σχήμα (3.10). Διάγραμμα βαθμίδων WPT συστήματος φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος

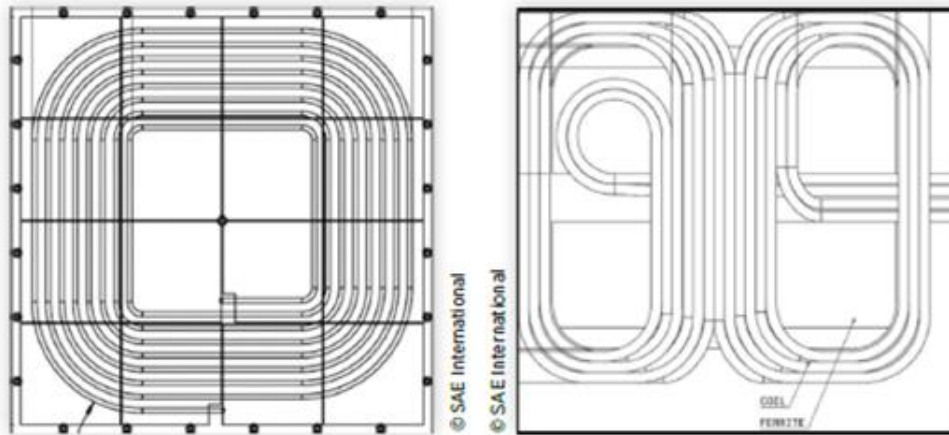
Η J2954 RP καθιερώνει μια νέα μέθοδο ευθυγράμμισης του οχήματος με αισθητήρα θέσης μαγνητικού τριγωνισμού έτσι ώστε ο οδηγός του EV να παρκάρει εύκολα το όχημα στην κατάλληλη θέση για βέλτιστη φόρτιση και χωρίς να είναι απαραίτητη δική του επαφή με το σύστημα[74] **σχήμα(3.11)**.



Σχήμα(3.11). Μέθοδος ευθυγράμμισης του οχήματος με διέγερση του GA τυλίγματος με μικρό ρεύμα έτσι ώστε να επάγει σήμα ανιχνεύσιμο από τη μονάδα VA

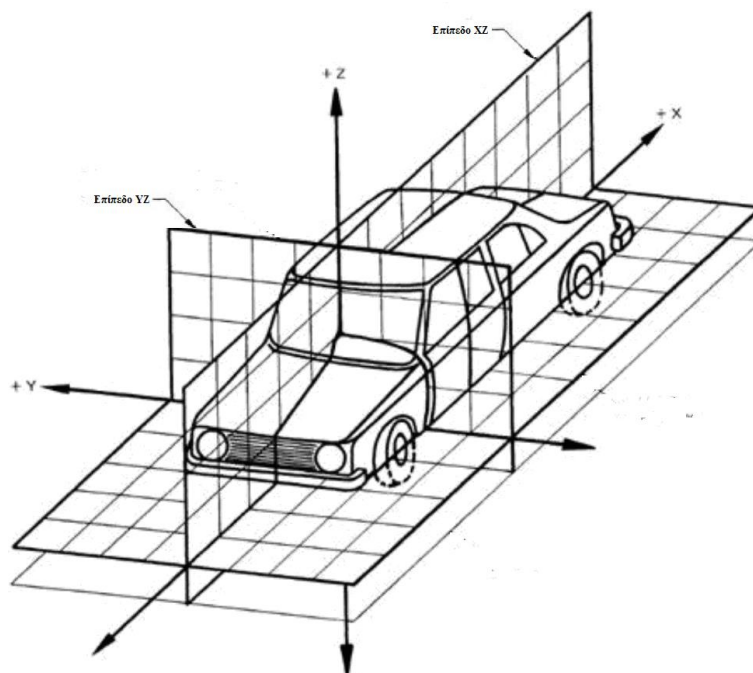
Το 2016 η SAE σε συνεργασία με το Εθνικό Εργαστήριο του Αϊντάχο (INL) του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. και την TDK Βορείου Αμερικής ολοκλήρωσε μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών για την TIR J2954. Η τυποποίηση της WPT βασίστηκε στην επίδοση των συστημάτων προσδιορίζοντας τα τυλίγματα εδάφους και της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε σε ένα δοκιμαστικό πάγκο (ανά κλάση Z). Στόχος ήταν να επαληθευτεί η διαλειτουργικότητα WPT συστημάτων με διαφορετικές τοπολογίες πηνίων **σχήμα(3.13)** και να εκτιμηθεί η απόδοση,

ποιότητα ισχύος, ικανότητα μεταφοράς ισχύος και ασφάλειά τους (ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές). Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε οκτώ συστήματα για WPT1 και WPT2 τάξεις ισχύος (είσοδος 3.7kVA και 7.7kVA αντίστοιχα), τάση εξόδου 280, 350, 420 V_{DC} και για κυκλική και DD διάταξη τυλιγμάτων.



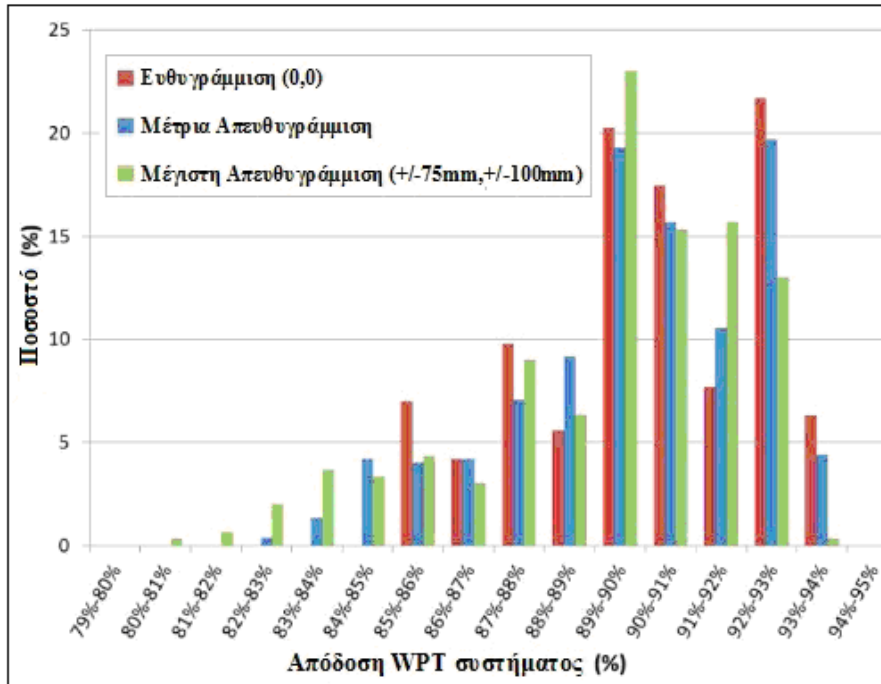
Σχήμα(3.12). Κυκλική διάταξη πηνίου (αριστερά) και πηνίο διάταξης double-D (δεξιά)

Η έρευνα διεξήχθηκε για συμβατά (*matched*) αλλά και ασύμβατα WPT (*interoperable*) συστήματα. Η συμβατή λειτουργία περιλαμβάνει μεταφορά ισχύος από την GA στην VA μονάδα οι οποίες είναι κατασκευασμένες από την ίδια εταιρία. Κατά την ασύμβατη λειτουργία οι μονάδες GA και VA είναι φτιαγμένες από διαφορετικές εταιρίες ενώ οι συνδυασμοί που γίνονται μπορεί να είναι ανάμεσα σε διαφορετικές τοπολογίες τυλιγμάτων και για διαφορετικές κλάσεις ισχύος και απόστασης από το έδαφος. Τα συστήματα παρείχαν οι εταιρείες Nissan-Witricity, Toyota και Daimler-Jaguar-Qualcomm ενώ πολλοί άλλοι κατασκευαστές υποστήριξαν την έρευνα.

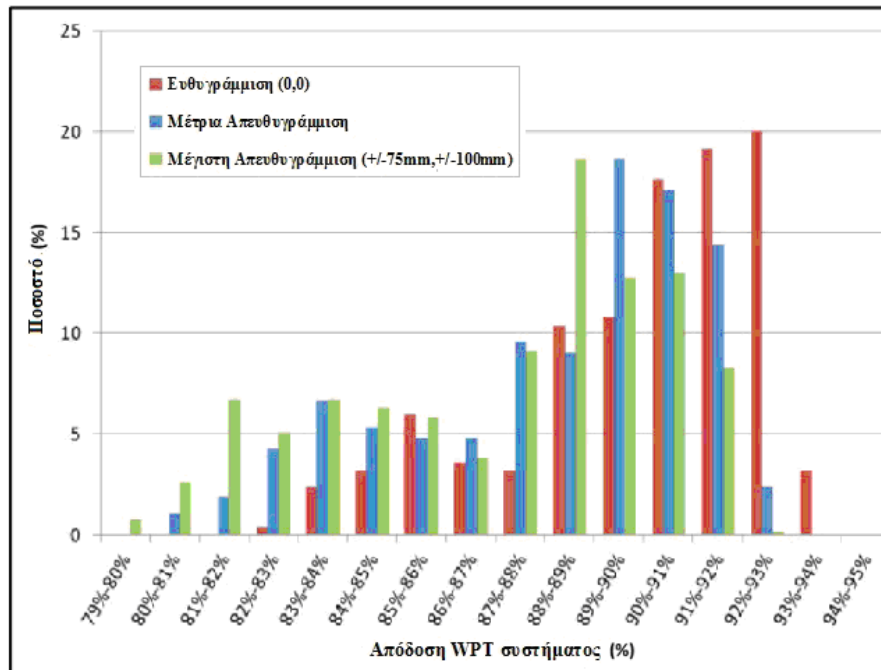


Σχήμα(3.13). Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε από την SAE

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η ασύρματη μεταφορά ισχύος δεν παρουσιάζει μόνο διαλειτουργικότητα αλλά και αποδοτικότητα. Η πλειοψηφία των WPT συστημάτων με συμβατότητα παρουσίασε απόδοση AC-to-DC μεγαλύτερη του 89% με κάποια αποτελέσματα να ξεπερνούν το 93%. Για τα περισσότερα διαλειτουργικά WPT συστήματα η απόδοση ξεπέρασε το 87% και σε κάποια το 93%. Επιπλέον ο συντελεστής ισχύος ήταν μεγαλύτερος του 0.95 σε όλες τις εκτιμώμενες συνθήκες λειτουργίας.

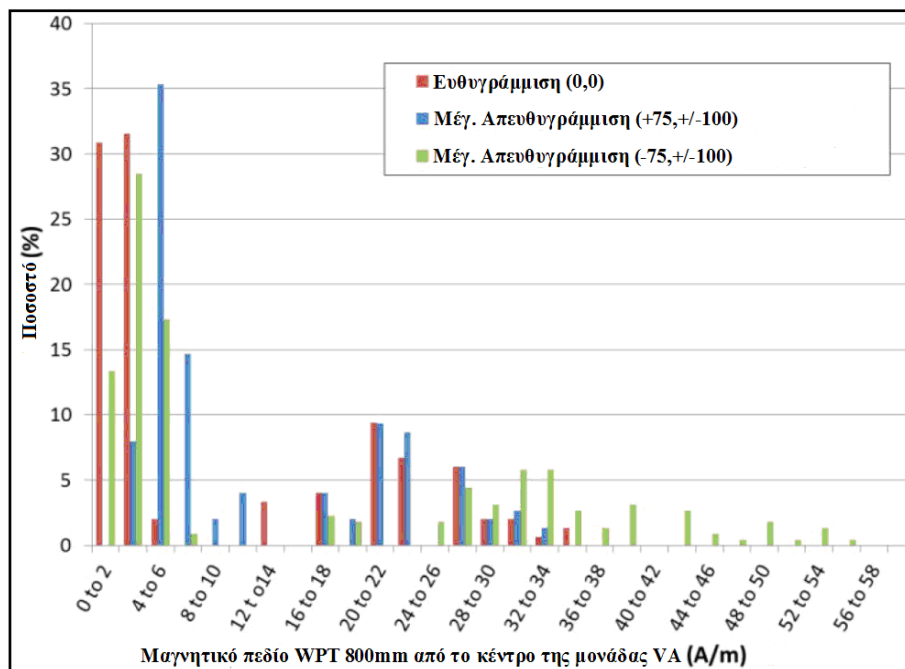


Σχήμα(3.14). Απόδοση WPT συστημάτων με συμβατές μονάδες VA και GA



Σχήμα(3.15).Απόδοση WPT συστημάτων με μη συμβατές μονάδες VA και GA

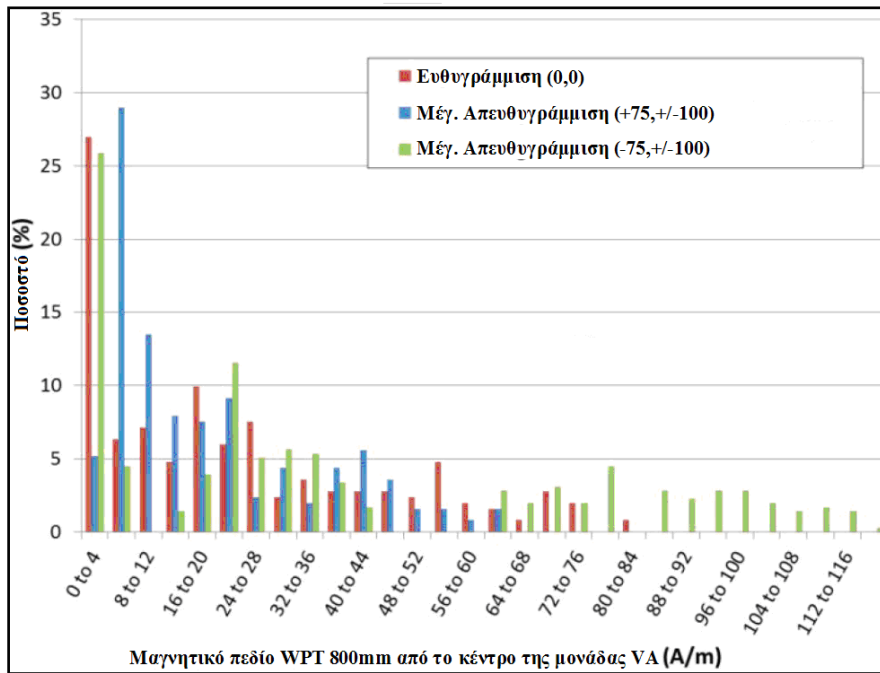
Η ένταση του ΗΜ-πεδίου μετρήθηκε κάτω από όλες τις συνθήκες δοκιμών σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του WPT συστήματος για να εκτιμηθεί εάν η τιμή της βρίσκεται εντός των ορίων δημόσιας ασφάλειας. Τα βιομηχανικά όρια έκθεσης στο πεδίο είναι 21 A/m (27μT) και 83 V/m όπως ορίστηκαν το 2010 από την Διεθνή Επιτροπή για την Προστασία από τις Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Η οδηγία της ICNIRP για τα όρια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου διασφαλίζει την ασφάλεια ανθρώπων που βρίσκονται κοντά σε συσκευές με συχνότητα λειτουργίας έως και 100kHz. Το σημείο λήψης των μετρήσεων αντιπροσωπεύει την περιοχή μπροστά από το όχημα στην οποία αναμένεται τοπικό μέγιστο του πεδίου και υπάρχει πιθανότητα ανθρώπινης έκθεσης στην εκπεμπόμενη από αυτό ακτινοβολία.



Σχήμα(3.16). Ένταση μαγνητικού πεδίου WPT συστημάτων με συμβατές μονάδες VA και GA

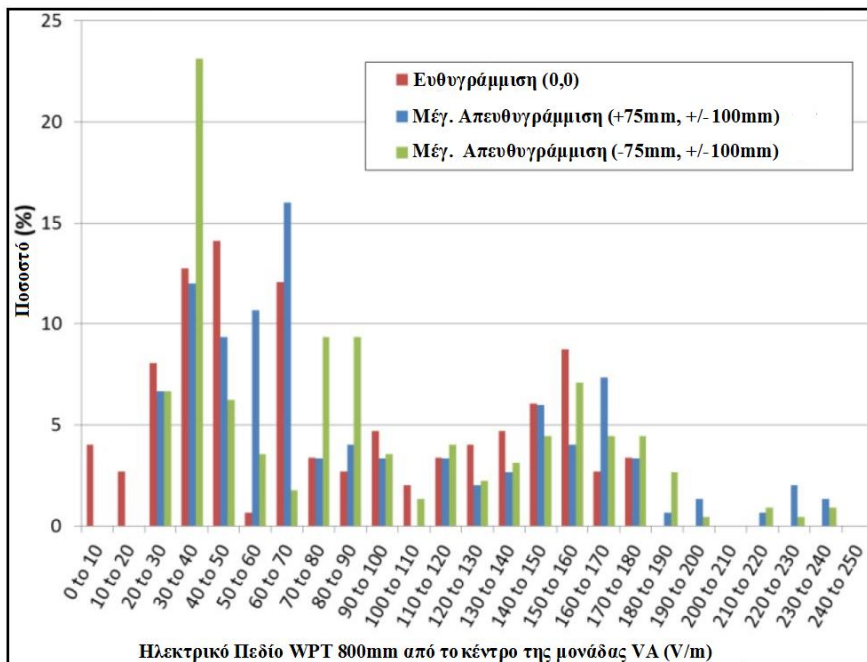
Η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων έδειξε ένταση μαγνητικού πεδίου κάτω από 8 A/m για όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Σε ένα μικρότερο ποσοστό αποτελεσμάτων η μετρούμενη ένταση ήταν μεταξύ 16 A/m και 36 A/m σε κατάσταση ευθυγράμμισης όπως επίσης και για μέγιστη απευθυγράμμιση (+75,+/-100). Ωστόσο για μέγιστη απευθυγράμμιση (-75, +/-100), δηλαδή όταν το σημείο λήψης μέτρησης είναι πιο κοντά στην μονάδα GA, κάποια αποτελέσματα παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές πεδίου έως και 56 A/m σχήμα(3.16).

Όσον αφορά τα διαλειτουργικά WPT συστήματα, όπως και στα συμβατά οι περισσότερες μετρήσεις έχουν τιμές πεδίου μικρότερες των 14 A/m όμως ένα σημαντικό μεγάλο ποσοστό αποτελεσμάτων παρουσιάζουν τιμές έντασης πεδίου μεγαλύτερες του 21 A/m (όριο ασφαλείας) σε συνθήκες ευθυγράμμισης με τη μεγαλύτερη μετρούμενη τιμή να φτάνει τα 80A/m. Σε συνθήκες μέγιστης απευθυγράμμισης (-75, +/-100), η ένταση πεδίου φτάνει ακόμα και τα 120 A/m.



Σχήμα(3.17). Ένταση μαγνητικού πεδίου WPT συστημάτων με μη συμβατές μονάδες VA και GA

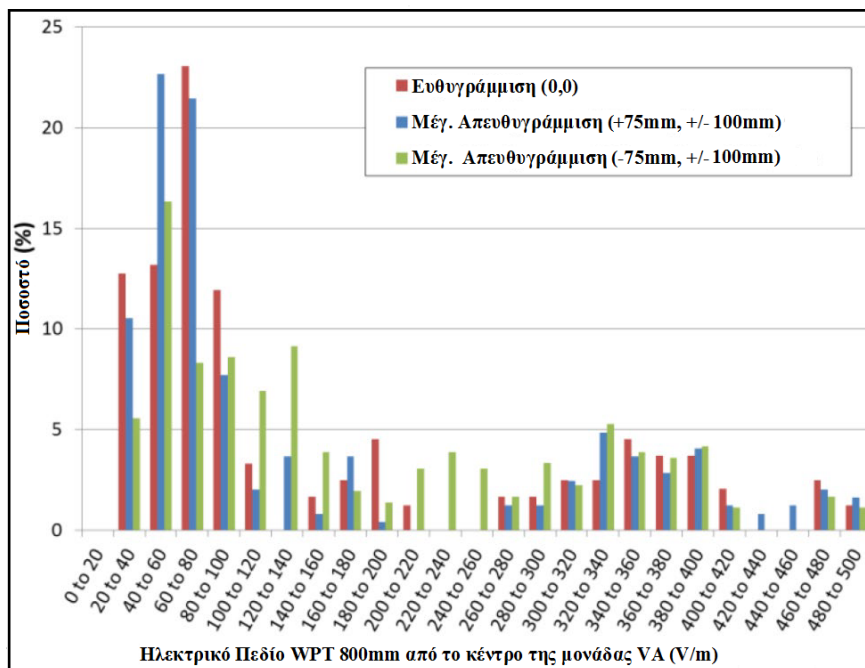
Κατά τον ίδιο τρόπο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικού πεδίου σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας. Για τα WPT συστήματα με συμβατά μέρη, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάτω από τα 100 V/m στις περισσότερες περιπτώσεις παρόλα αυτά αρκετές μετρήσεις έδειξαν τιμές πεδίου μεταξύ 110 V/m και 180 V/m και κάποιες πάνω από 230 V/m σχήμα (3.18).



Σχήμα(3.18). Ένταση ηλεκτρικού πεδίου WPT συστημάτων με συμβατές μονάδες VA και GA

Στα WPT συστήματα με μη συμβατά μέρη η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων παρουσίασε τιμές πεδίου κάτω από 140 V/m ενώ ένας σημαντικός αριθμός κυμάνθηκε από 280 έως 400 V/m. Επιπλέον κάποιες τιμές αντιστοιχούσαν σε 500 V/m σχήμα (3.19).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών της SAE στο INL δείχνουν ότι η ένταση του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου είναι εντός των ορίων της ICNIRP 2010 για πολλές συνθήκες λειτουργίας στα διάφορα WPT συστήματα που δοκιμάστηκαν. Ωστόσο σε αρκετές μετρήσεις που έγιναν πως σε άλλες συνθήκες λειτουργίας των συστημάτων αυτών οι τιμές του ΗΜ-πεδίου ξεπερνούν κατά πολύ τα βιομηχανικά πρότυπα ασφαλείας. Αυτό φανερώνει την ανάγκη πραγματοποίησης τεχνικών αναθεωρήσεων και εύρεσης τρόπων μείωσης των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών κυρίως για τα μη συμβατά συστήματα (interoperable systems) έτσι ώστε να τηρούνται οι συνθήκες ασφαλείας.



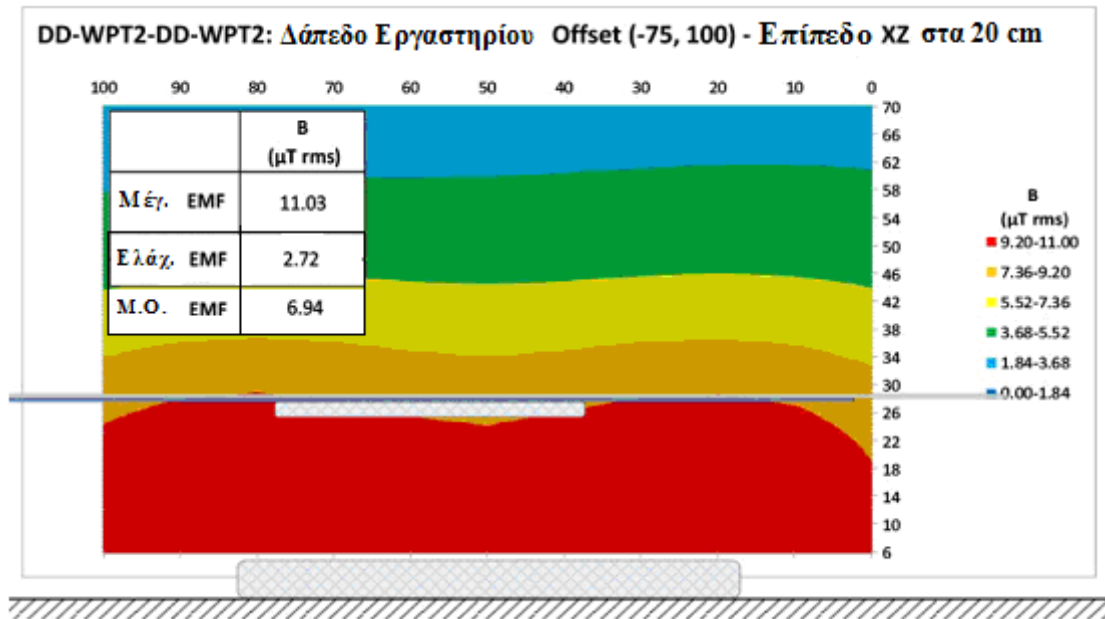
Σχήμα(3.19):Ένταση ηλεκτρικού πεδίου WPT συστημάτων με μη συμβατές μονάδες VA και GA

Με βάση την έρευνα της SAE, η TDK πραγματοποίησε μετρήσεις του ΗΜ-πεδίου σε κάποια WPT συστήματα και σε συνθήκες όπου αναμένονται οι μέγιστες ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές . Ενδεικτικά οι μετρήσεις πυκνότητας πεδίου στο επίπεδο xz ήταν:

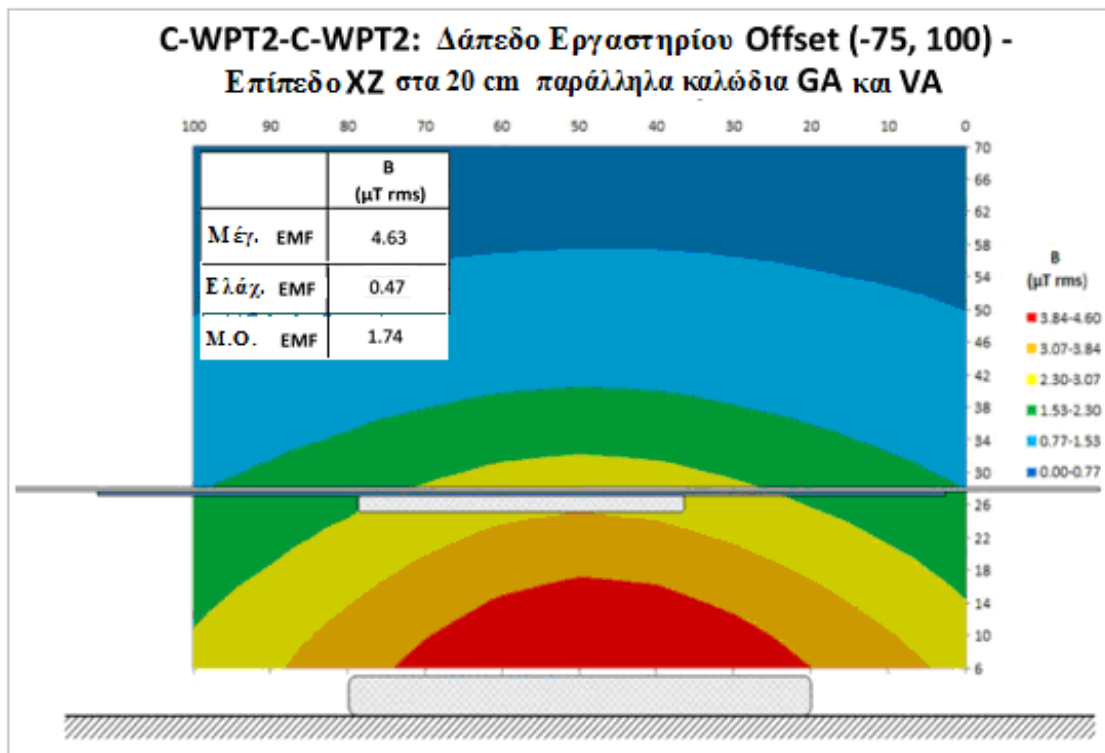
WPT 1 - 2.88μT (rms) μέγιστο (κυκλικά τυλίγματα)

WPT 2 - 4.63μT (rms) (κυκλικά τυλίγματα), 11.03μT (rms) μέγιστο (DD τυλίγματα)

Οι τιμές είναι εντός των ορίων ασφαλείας(Σχήματα(3.20),(3.21)).Οι τιμές του πεδίου για διάταξη τυλιγμάτων DD είναι μεγαλύτερες από αυτές για κυκλική (C) τοπολογία.

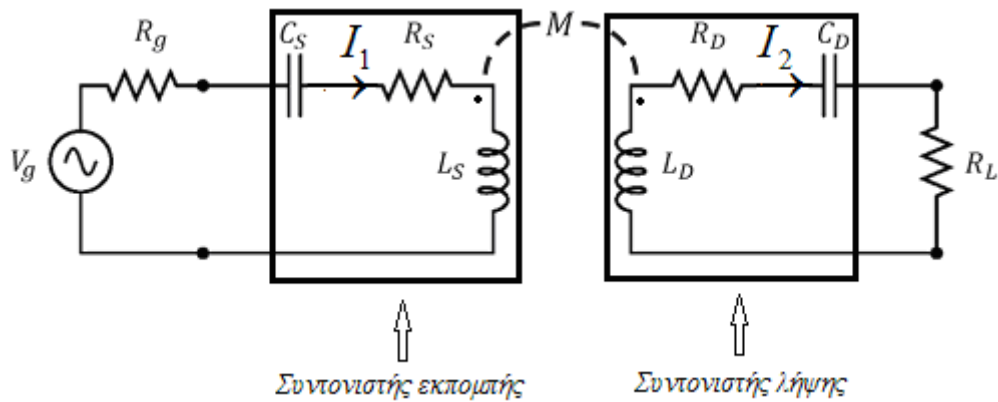


Σχήμα (3.20).HM-πεδίο WPT2 τυλιγμάτων τοπολογίας DD



Σχήμα(3.21). HM-πεδίο WPT2 κυκλικής τοπολογίας τυλιγμάτων [75]

3.3. Ανάλυση τοπολογίας σειρά - σειρά (SS) WPT συστήματος



Σχήμα (3.22). Μοντέλο WPT συστήματος με μαγνητικό συντονισμό δύο τυλιγμάτων. Οι συντονιστές λήψης και εκπομπής είναι δύο κυκλώματα RLC εν σειρά[55]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.22, ο συντονιστής εκπομπής είναι ένα εν σειρά RLC κύκλωμα με στοιχεία τα R_s , L_s , C_s , και ο συντονιστής λήψης είναι επίσης ένα κύκλωμα RLC εν σειρά με στοιχεία τα R_D , L_D , C_D . Οι δύο συντονιστές ανταλλάσσουν ενέργεια μέσω της μαγνητικής σύζευξης των πηνίων L_s και L_D . Τα V_g , R_g , συμβολίζουν αντίστοιχα την ημιτονοειδή τάση της πηγής και την αντίσταση της πηγής ενώ R_L είναι η αντίσταση του φορτίου. Ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής συμβολίζεται με M . Οι εξισώσεις του συστήματος είναι:

$$-\dot{V}_g + \dot{I}_1 R_g - \dot{I}_1 \frac{j}{\omega C_s} + \dot{I}_1 R_s + \dot{I}_1 j \omega L_s - \dot{I}_2 j \omega M_{12} = 0 \quad (3.44)$$

$$\dot{I}_2 R_D - \dot{I}_2 \frac{j}{\omega C_D} + \dot{I}_2 R_L + \dot{I}_2 j \omega L_D - \dot{I}_1 j \omega M_{21} = 0 \quad (3.45)$$

$$\text{όπου } M_{12} = M_{21} = M = k \sqrt{L_s L_D}, \quad 0 \leq k \leq 1$$

$$(3.44) \Rightarrow \dot{V}_g = \dot{I}_1 \left(R_g - \frac{j}{\omega C_s} + R_s + j\omega L_s \right) + \dot{I}_2 (-j\omega M)$$

$$(3.45) \Rightarrow 0 = \dot{I}_1 (-j\omega M) + \dot{I}_2 \left(R_D - \frac{j}{\omega C_D} + R_L + j\omega L_D \right)$$

Για λόγους απλότητας θέτουμε:

$$\dot{Z}_1 = R_g - \frac{j}{\omega C_s} + R_s + j\omega L_s = (R_g + R_s) + j \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right) \Rightarrow \dot{Z}_1 = R_1 + jX_1 \quad (3.46)$$

$$\dot{Z}_2 = R_D - \frac{j}{\omega C_D} + R_L + j\omega L_D = (R_D + R_L) + j \left(\omega L_D - \frac{1}{\omega C_D} \right) \Rightarrow \dot{Z}_2 = R_2 + jX_2 \quad (3.47)$$

και επιλύοντας τις δύο εξισώσεις λαμβάνουμε αντίστοιχα τα ρεύματα των κυκλωμάτων εκπομπής και λήψης:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{Z}_2 \dot{V}_g}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + (\omega M)^2} \quad (3.48)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{j\omega M \dot{V}_g}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + (\omega M)^2} \quad (3.49)$$

Η ισχύς εισόδου είναι :

$$P_{\epsilon\iota\sigma} = R_e \{ \dot{I}_1^* \dot{V}_g \} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{\varepsilon\sigma} = R_e \left\{ \left[\frac{\dot{Z}_2 \dot{V}_g}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + (\omega M)^2} \right]^* \dot{V}_g \right\} \quad (3.50)$$

και η ισχύς εξόδου:

$$P_{\varepsilon\xi} = |\dot{I}_2|^2 R_L \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{\varepsilon\xi} = \frac{(\omega M)^2 |\dot{V}_g|^2 R_L}{\left[\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + (\omega M)^2 \right]^2} \quad (3.51)$$

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις (3.50) και (3.51) τα \dot{Z}_1, \dot{Z}_2 θα έχουμε :

$$P_{\varepsilon\sigma} = R_e \left\{ \left[\frac{(R_2 + jX_2) \dot{V}_g}{[(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2) + (\omega M)^2]} \right]^* \dot{V}_g \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{\varepsilon\sigma} = \frac{R_1 R_2^2 + R_2 (\omega M)^2 + R_1 X_2^2}{\left[R_1 R_2 + (\omega M)^2 - X_1 X_2 \right]^2 + \left[R_1 X_2 + R_2 X_1 \right]^2} V_g^2 \Rightarrow$$

$$P_{\varepsilon\sigma} = \frac{(R_g + R_s)(R_D + R_L)^2 + (R_D + R_L)(\omega M)^2 + (R_g + R_s)X_2^2}{\left[(R_g + R_s)(R_D + R_L) + (\omega M)^2 - X_1 X_2 \right]^2 + \left[(R_g + R_s)X_2 + (R_D + R_L)X_1 \right]^2} V_g^2 \quad (3.52)$$

$$\text{και } P_{\varepsilon\xi} = \left| \frac{j\omega M \dot{V}_g}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + (\omega M)^2} \right|^2 R_L = \left| \frac{j\omega M}{\left[(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2) + (\omega M)^2 \right]} \right|^2 R_L V_g^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_{\varepsilon\xi} = \frac{(\omega M)^2}{\left[R_1 R_2 + (\omega M)^2 - X_1 X_2 \right]^2 + \left[R_1 X_2 + R_2 X_1 \right]^2} R_L V_g^2 \Rightarrow$$

$$P_{\varepsilon\xi} = \frac{R_L (\omega M)^2}{\left[(R_g + R_S)(R_D + R_L) + (\omega M)^2 - X_1 X_2 \right]^2 + \left[(R_g + R_S)X_2 + (R_D + R_L)X_1 \right]^2} V_g^2 \quad (3.53)$$

Η απόδοση του συστήματος θα είναι επομένως:

$$n = \frac{P_{\varepsilon\xi}}{P_{\varepsilon\sigma}} \Rightarrow n = \frac{R_L (\omega M)^2}{(R_g + R_S)(R_D + R_L)^2 + (R_D + R_L)(\omega M)^2 + (R_g + R_S)X_2^2} \quad (3.54)$$

Στο σύστημά μας οι δύο συντονιστές είναι πανομοιότυποι δηλαδή $L_S = L = L$ και $C_L = C_D = C$. Όταν το κύκλωμα είναι σε κατάσταση συντονισμού θα ισχύει:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_S C_S}} = \sqrt{\frac{1}{L_D C_D}} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \Rightarrow C = \frac{1}{\omega^2 L} \Rightarrow C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (3.55)$$

$$(3.52) \xrightarrow{X_1 = X_2 = 0} P_{\varepsilon\sigma} = \frac{(R_g + R_s)(R_D + R_L)^2 + (R_D + R_L)(\omega M)^2}{[(R_g + R_s)(R_D + R_L) + (\omega M)^2]^2} V_g^2 \quad (3.56)$$

$$(3.53) \xrightarrow{X_1 = X_2 = 0} P_{\varepsilon\xi} = \frac{R_L(\omega M)^2}{[(R_g + R_s)(R_D + R_L) + (\omega M)^2]^2} V_g^2 \quad (3.57)$$

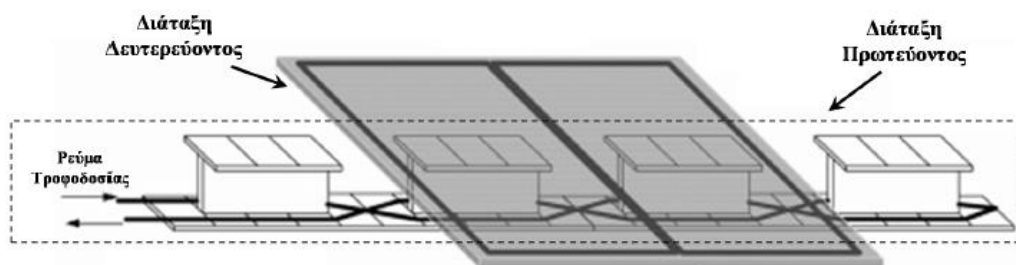
$$n = \frac{P_{\varepsilon\xi}}{P_{\varepsilon\sigma}} \Rightarrow n = \frac{R_L(\omega M)^2}{(R_g + R_s)(R_D + R_L)^2 + (R_D + R_L)(\omega M)^2} \quad (3.58)$$

Δεδομένης της τιμής της τάσης εισόδου V_g , βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ισχύ εξόδου και την απόδοση μεταφοράς ισχύος είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M , η αντίσταση φορτίου R_L και η συχνότητα συντονισμού f [54], [57].

3.3. Συστήματα δυναμικής φόρτισης

Ο στόχος για μείωση των εκπομπών άνθρακα στις μετακινήσεις έχει οδηγήσει σε αυξημένο ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα τα τελευταία χρόνια με ένα από τα κύρια εμπόδια για την ευρεία διείσδυση στην αγορά και αποδοχή τους να αποτελεί το περιορισμένο εύρος οδήγησης. Η **δυναμική φόρτιση** επιτρέπει στο όχημα να φορτίζει καθώς κινείται, αυξάνοντας σημαντικά την οδική απόσταση. Στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, υπάρχουν δύο διαφορετικές κατασκευαστικές προσεγγίσεις όσον αφορά το πρωτεύον τυλίγμα φόρτισης: η ενιαία και η τμηματική διάταξη.

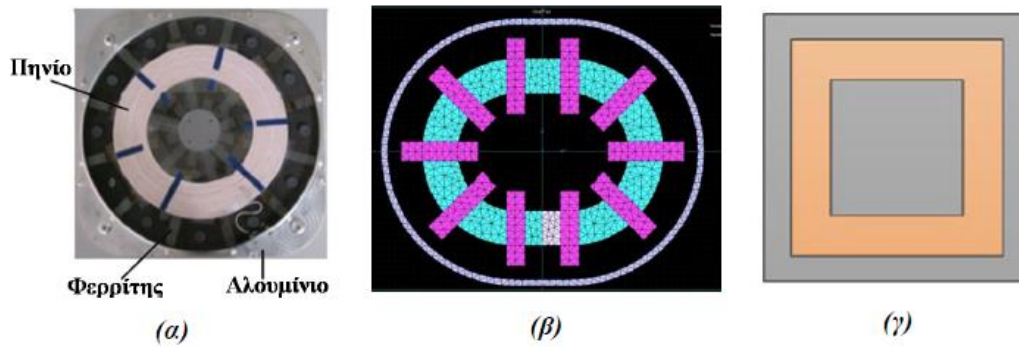
Στην **ενιαία διάταξη**, το πρωτεύον συνθέτει ένας αγωγός που τροφοδοτεί αδιάλειπτα ισχύ κατά μήκος μίας ράγας μεγάλου μήκους από ράβδους φερριτή τοποθετημένης στο οδόστρωμα. Η ράγα είναι μικρού πλάτους ώστε να ελαχιστοποιείται το μέγεθός της γεγονός που οδηγεί στην απαίτηση για δευτερεύοντα τυλίγματα μεγάλου μεγέθους με σκοπό να επιτευχθεί η μεταφορά μεγάλων ποσών ισχύος στα ηλεκτρικά οχήματα.



Σχήμα(3.23). Ενιαία διάταξη δυναμικής επαγωγικής φόρτισης τύπου – I

Τυλίγματα λήψης τέτοιου μεγέθους είναι ενσωματώσιμα σε βαρέα οχήματα ή τραίνα, η χρήση τους όμως σε συμβατικά επιβατικά οχήματα δεν θα ήταν πρακτική. Επιπλέον εμπόδιο στην ευρεία εφαρμογή μιας τέτοιας δομής IPT συστήματος στη δυναμική φόρτιση ΗΟ, αποτελεί η χαμηλή απόδοσή του σε συνδυασμό με τις μεθόδους που απαιτούνται για την απαλοιφή των υψηλών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που παράγονται από το πρωτεύον.

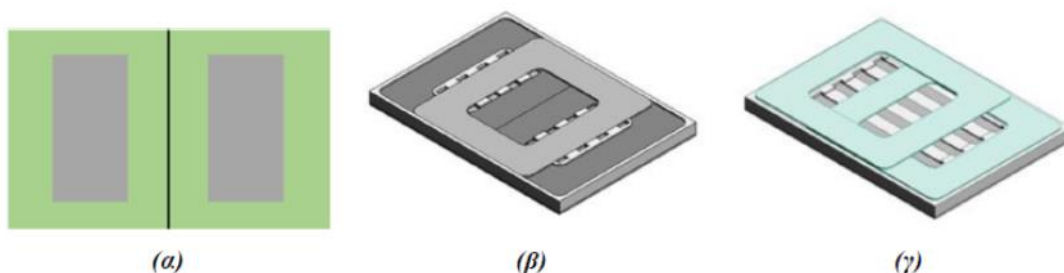
Στην **τμηματική διάταξη** πρωτεύοντος τυλίγματος, το πρωτεύον συνιστούν πολλά μικρότερα τυλίγματα όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στην στατική φόρτιση, τα οποία μεταφέρουν ισχύ σε διακριτές θέσεις. κατασκευής.



Σχήμα(3.24). Διατάξεις συζευκτών μονής όψης (α) κυκλική (β) οβάλ (γ) ορθογώνια

Η διάταξη αυτή επιτρέπει υψηλότερη απόδοση συστήματος ενώ περιορίζει τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Κάθε πρωτεύον τυλίγμα, ενεργοποιείται μόνο όταν το όχημα διέρχεται από αυτό. Μειονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι η χρήση πολλαπλών μετατροπέων – απαιτείται ένας για κάθε πρωτεύον τυλίγμα- αφού οδηγεί σε αύξηση του κόστους.

Ωστόσο έχουν προταθεί συγκεντρωμένα IPT συστήματα με μειωμένο κόστος, στα οποία είτε γίνεται χρήση της μεθόδου οδήγησης πολλών πρωτευόντων από τον ίδιο μετατροπέα είτε ο αριθμός των διακοπτικών στοιχείων στο κύκλωμα είναι περιορισμένος. Η ερευνητική ομάδα **Smart RUE (Smart grids Research Unit of the Electrical and Computer Engineering School)** του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ συμμετείχε στο Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα **FastinCharge** (01/10/2012 – 30/09/2015). Στα πλαίσια του προγράμματος, στόχος του οποίου ήταν η προώθηση της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων, στην πόλη Douai της Γαλλίας αναπτύχθηκε μια απλή και εύχρηστη υποδομή επαγωγικής φόρτισης. Το σύστημα υλοποιήθηκε με μία τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος η οποία αποτελείται από ένα ζεύγος IGBT που είναι κοινό για όλη τη διάταξη και τέσσερα ζεύγη IGBT, ένα για κάθε ένα από τα τέσσερα πρωτεύοντα πηνία εκπομπής. Το κοινό ζευγάρι, είναι σε διαρκή λειτουργία ενώ κάθε ένα από τα υπόλοιπα, ενεργοποιείται μόνο όταν το όχημα περάσει από επάνω.



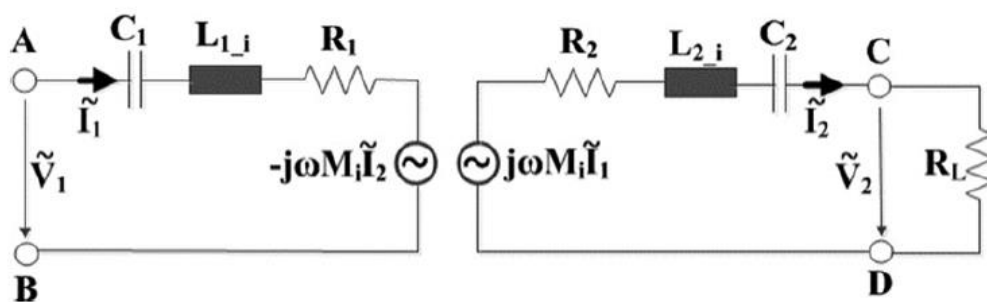
Σχήμα(3.25). Διατάξεις συζευκτών μονής όψης δύο πηνίων (α) DD διάταξη (β) DDQ διάταξη και (γ) διπολική

Η λειτουργία ενός συστήματος δυναμικής φόρτισης είναι παρόμοια με αυτή ενός συστήματος στατικής φόρτισης με τη διαφορά ότι στην πρώτη περίπτωση, καθώς το όχημα κινείται πάνω από το πρωτεύον, η αμοιβαία επαγωγή, καθώς και οι αυτεπαγωγές των δύο τυλιγμάτων,

μεταβάλλονται σημαντικά. Σε ένα στατικό σύστημα, το όχημα σταθμεύει πάνω από το τύλιγμα εκπομπής η φόρτιση πραγματοποιείται σε συγκεκριμένη θέση του οχήματος και για συγκεκριμένες μετατοπίσεις που όμως έχουν μικρή επίδραση στις τιμές των αυτεπαγωγών. Οι τιμές των στοιχείων αντιστάθμισης επιλέγονται επομένως με βάση συγκεκριμένες τιμές αυτεπαγωγών. ανάλογα με την επιλεγμένη κάθε φορά τοπολογία. Η σωστή επιλογή των πυκνωτών αντιστάθμισης σε ένα σύστημα επαγωγικής φόρτισης, εξασφαλίζει τη μέγιστη μεταφορά ισχύος στο όχημα. Στη βιβλιογραφία, το ζήτημα της επιλογής αυτών σε ένα σύστημα δυναμικής φόρτισης προσεγγίζεται με τρόπο παρόμοιο με αυτό της στατικής, χωρίς δηλαδή να λαμβάνονται υπόψη το γεγονός ότι καθώς το όχημα κινείται, η οριζόντια μετατόπιση μεταξύ των τυλιγμάτων εκπομπής και λήψης λαμβάνει πολλές διαφορετικές τιμές οδηγώντας σε μεταβολές στις αυτεπαγωγές τους ικανές να επηρεάσουν την ισχύ εξόδου αλλά και την απόδοση του συστήματος. Είναι λοιπόν σημαντικό οι μεταβολές αυτές να ληφθούν υπόψη καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος.

3.4. Ανάλυση τοπολογίας σειρά - σειρά (SS) WPT συστήματος στη δυναμική φόρτιση

Η τοπολογία σειρά-σειρά έχει χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά τόσο σε εφαρμογές στατικής όσο και δυναμικής επαγωγικής φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι εφόσον το ρεύμα στο πρωτεύον ελέγχεται ώστε να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, οι απώλειες στον μετατροπέα δεν είναι σημαντικές. Στο σύστημα που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, εφαρμόζεται η SS τοπολογία αφού επιτρέπει την σωστή επιλογή των στοιχείων αντιστάθμισης σύμφωνα με την διαδικασία βελτιστοποίησης και την ανάπτυξη του επιθυμητού συστήματος ελέγχου όπως αυτό περιγράφεται στην [127] διατηρώντας χαμηλές τις απώλειες στον μετατροπέα DC/AC.



Σχήμα(3.26). Τοπολογία σειρά-σειρά IPT συστήματος

Καθώς το όχημα κινείται επάνω από τον σταθμό φόρτισης, θεωρούμε οριζόντια μετατόπιση x_i , μεταξύ του σταθμού και του οχήματος για κάθε σημείο της κίνησης. Θεωρούμε επίσης ότι το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα u οπότε η μετατόπιση θα είναι :

$$x_i = ut_i \quad (3.59)$$

Υποθέτουμε ότι το όχημα εισέρχεται στην περιοχή φόρτισης την χρονική στιγμή $t_0 = 0$, ενώ με t_i συμβολίζεται η χρονική στιγμή κατά την οποία η μετατόπιση του οχήματος είναι ίση με x_i . Με L_{1_i} και L_{2_i} συμβολίζονται οι αυτεπαγωγές των δύο τυλιγμάτων και με M_i η αμοιβαία επαγωγή τους που αντιστοιχούν σε μετατόπιση x_i . Στην πράξη, στα σημεία C και D, συνδέεται ένας ανορθωτής με φίλτρο και ακολουθεί η μπαταρία. Η αντίσταση R_L , αντιπροσωπεύει το ισοδύναμο φορτίο της μπαταρίας μεταξύ των σημείων C και D όπως αυτό υποδεικνύεται στο σχήμα (5.4). Όπως έχει αναλυθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο και σύμφωνα με τους νόμους του Kirchhoff η τάση V_1 μεταξύ των σημείων A και B στην πλευρά του πρωτεύοντος όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα (3.26) θα είναι :

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_1 \left(-\frac{j}{\omega C_1} + j\omega L_{1_i} + R_1 \right) - j\dot{I}_2 \omega M_{i_i} \quad (3.60)$$

Η τάση μεταξύ των σημείων C και D στην πλευρά του δευτερεύοντος είναι:

$$\dot{V}_2 = \dot{I}_2 R_L \quad (3.61)$$

και η φαινόμενη ισχύς εξόδου:

$$\dot{S}_{out_i} = \dot{V}_2 \dot{I}_2^* \quad (3.62)$$

Επομένως η φαινόμενη ισχύς που μεταφέρεται στο φορτίο της μπαταρίας τη χρονική στιγμή t_i και για μετατόπιση x_i θα είναι :

$$\dot{S}_{out_i} = |\dot{I}_2|^2 R_L \quad (3.63)$$

η οποία είναι και η ενεργός ισχύς εξόδου:

$$P_i = |\dot{I}_2|^2 R_L \quad (3.64)$$

Σύμφωνα και πάλι με τους νόμους του Kirchhoff θα ισχύει ότι:

$$j\omega M \dot{I}_1 = \left(R_2 + j\omega L_{2_i} - \frac{j}{\omega C_2} + R_L \right) \dot{I}_2 \quad (3.65)$$

Επιλύοντας την (5.6) ως προς \dot{I}_2 και αντικαθιστώντας στην (5.5) η **ισχύς εξόδου** θα είναι:

$$P_i = |\dot{I}_1|^2 \frac{\omega^2 M_i^2 R_L}{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_2 + R_L)^2} \quad (3.66)$$

Η **φαινόμενη ισχύς εισόδου** είναι:

$$\dot{S}_{in_i} = \dot{V}_1 \dot{I}_1^* \quad (3.67)$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3.60) , (3.65) και (3.67) η φαινόμενη ισχύς εισόδου είναι:

$$S_{in_i} = \left[R_1 + \frac{\omega^2 M_i^2 (R_L + R_2)}{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_2 + R_L)^2} \right] |\dot{I}_1|^2 + j \left[\omega L_{1_i} - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right) \omega^2 M_i^2}{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_2 + R_L)^2} \right] |\dot{I}_1|^2 \quad (3.68)$$

Επομένως η **απόδοση του συστήματος** για μετατόπιση x_i του οχήματος υπολογίζεται:

$$eff_i = \frac{\left| \dot{S}_{out_i} \right|}{\left| \dot{S}_{in_i} \right|} \quad (3.69)$$

και σύμφωνα με τις (3.63) και (3.64) η (3.69) γράφεται:

$$eff_i = \frac{P_i}{\left| \dot{S}_{in_i} \right|} \quad (3.70)$$

$$eff_i = \frac{\frac{\omega^2 M_i^2 R_L}{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_2 + R_L)^2}}{\sqrt{\left[R_1 + \frac{\omega^2 M_i^2 (R_L + R_2)}{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_2 + R_L)^2} \right]^2 + \left[\omega L_{1_i} - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right) \omega^2 M_i^2}{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_2 + R_L)^2} \right]^2}} \quad (3.71)$$

Σε αντίθεση με την στατική φόρτιση, στην δυναμική εκτός από την ισχύ είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε και την ενέργεια που μεταφέρεται στη μπαταρία του αυτοκινήτου. Για δύο μετατοπίσεις x_1 και x_2 στις οποίες αντιστοιχούν τα ζεύγη επαγωγών (L_{1_1}, L_{2_1}, M_1) , (L_{1_2}, L_{2_2}, M_2) η ισχύς εξόδου θα είναι αντίστοιχα P_1 και P_2 όπως αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (5.7). Αν θεωρηθεί ότι η απόσταση μεταξύ των μετατοπίσεων x_1 και x_2 είναι επαρκώς μικρή και η ενεργός ισχύς εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ των δύο σημείων, τότε αυτή εκφράζεται:

$$P(x) = ax + b, \quad x_1 \leq x \leq x_2 \quad (3.72)$$

$$\text{όπου } a = \frac{P_2 - P_1}{x_2 - x_1} \text{ και } b = \frac{P_1 x_2 - P_2 x_1}{x_2 - x_1}$$

Σύμφωνα με τις (3.59) και (3.72) θα ισχύει:

$$P(t) = aut + b, \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (3.73)$$

Συνεπώς η ενέργεια που μεταφέρεται στο όχημα όταν αυτό μεταβεί από το σημείο 1 στο σημείο 2 είναι:

$$E_{1 \rightarrow 2} = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} (aut + b) dt \quad (3.74)$$

Αντικαθιστώντας τα a και b και θέτοντας $t_1 = \frac{x_1}{u_1}$ και $t_2 = \frac{x_2}{u_2}$ η (3.74) γίνεται:

$$E_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2} \frac{x_2 - x_1}{u} (P_2 + P_1) \quad (3.75)$$

Εφόσον το ηλεκτρικό όχημα εισέρχεται στο σταθμό φόρτισης σε μια μετατόπιση x_0 και εξέρχεται από αυτόν σε μετατόπιση x_N , το συνολικό ποσό ενέργειας που παρέχεται σε αυτό είναι :

$$E = \sum_{i=0}^{N-1} E_{i \rightarrow i+1} \quad (3.76)$$

Θεωρώντας ότι ισχύει $x_1 - x_0 = x_2 - x_1 = \dots = x_N - x_{N-1} = \Delta x$, η (3.76) γράφεται:

$$E = \frac{1}{2} \frac{\Delta x}{u} \sum_{i=0}^{N-1} (P_i + P_{i+1}) = \frac{\Delta x}{u} \left[\left(\sum_{i=0}^N P_i \right) - \frac{P_0 + P_N}{2} \right] \quad (3.77)$$

4. Σύστημα δυναμικής φόρτισης με ένα πρωτεύον

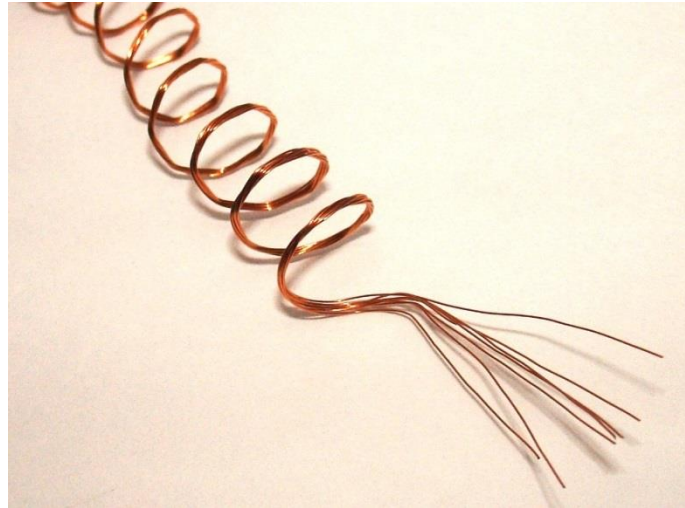
4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται και προσομοιώνεται ένα IPT σύστημα δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου ισχύος 6kW, με ένα πρωτεύον τύλιγμα φόρτισης. Το σύστημα έχει αναπτυχθεί μέσα από μια διαδικασία βελτιστοποίησης των μεταβλητών εκείνων που εμπλέκονται στην ηλεκτρική λειτουργία του (**συχνότητα, στοιχεία αντιστάθμισης, αντίσταση φορτίου**) και περιγράφεται στα επόμενα κεφάλαια. Οι προκύπτουσες βέλτιστες τιμές υλοποιούνται στο δευτερεύον τύλιγμα μέσω ενός συστήματος ελέγχου και έτσι επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός μιας περιοχής λειτουργίας του φορτιστή όπου η ισχύς εξόδου του γίνεται μέγιστη παράλληλα με μία υψηλή απόδοσή του. Κατάλληλος έλεγχος εφαρμόζεται και στο πρωτεύον τύλιγμα για την βέλτιστη λειτουργία του αφού για την ανίχνευση του οχήματος όταν αυτό βρίσκεται πάνω από το φορτιστή, δεν γίνεται χρήση αισθητήρων και άλλων μηχανισμών. Σε αντίθετη περίπτωση, το κόστος θα ήταν αυξημένο ενώ η ανάγκη για συνεχή μεταφορά σημάτων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δεν θα επέτρεπε την κίνηση του οχήματος με μεγάλες ταχύτητες. **Για να μεταφερθεί ικανή ποσότητα ισχύος από το πρωτεύον στο δευτερεύον πηνίο, είναι αναγκαίο το σύστημα να λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα.** Για τον λόγο αυτό, το εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου ανορθώνεται σε συνεχές ενώ στη συνέχεια μετατρέπεται σε ένα υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω ενός DC/AC μετατροπέα. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο του πρωτεύοντος, επάγει AC τάση στο δευτερεύον τύλιγμα που τελικά ανορθώνεται ώστε να παρέχει DC τάση στη μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος.

4.2. Σύρμα Litz και μαγνητικοί συζεύκτες του συστήματος

Οι δύο πανομοιότυπες βάσεις (rad) φόρτισης του συστήματος είναι βέλτιστα σχεδιασμένες σύμφωνα με την [128], κυκλικού σχήματος, διαμέτρου 60cm και διαχωρίζονται με διάκενο 15cm. Πιο συγκεκριμένα, κάθε μία αποτελείται από θωράκιση αλουμινίου, μπάρες φερριτή διαπερατότητας 2300 και πηνίο 18 σπειρών. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου κυκλικού rad η διάμετρος του τυλίγματος απαιτείται να είναι ίση με το 57% της διαμέτρου του rad. Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου έχει οριστεί στα 25A ώστε να επιτυγχάνεται μια πυκνότητα ρεύματος που να εξασφαλίζει μειωμένες απώλειες χαλκού. Τα πηνία είναι κατασκευασμένα από σύρμα Litz.

Το **σύρμα Litz**, είναι κατασκευασμένο από ξεχωριστά μονωμένα μαγνητικά νήματα συνεστραμμένα ή πλεγμένα μεταξύ τους ομοιόμορφα **σχήμα (4.1)**.

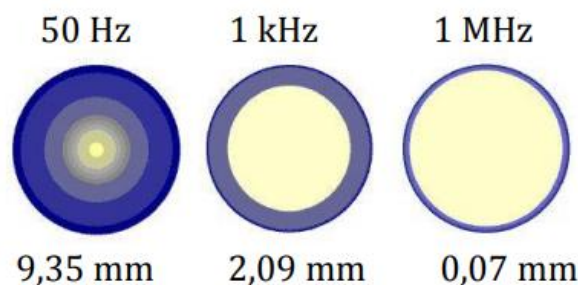


Σχήμα(4.1). Κλώνος σύρματος Litz με οκτώ νήματα

Το σχέδιο περίπλεξης είναι τέτοιο έτσι ώστε να εξισορροπείται ο χρόνος έκθεσης του κάθε κλώνου στο εξωτερικό τμήμα του αγωγού. Σε αντίθεση με τη διάταξη αγωγού όπου οι κλώνοι είναι απλώς συνεστραμμένοι, κλώνοι ξεχωριστά μονωμένοι ωθούν το ρεύμα να διαμοιράζεται ομαλά και εξίσου σε όλη τη διατομή του αγωγού **σχήμα (4.3)**. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του επιδερμικού φαινομένου κατά μήκος του αγωγού, επιτρέποντας στα νήματα να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές συχνότητες έως και 1 MHz περίπου[62]. Η αναλογία AC προς DC αντίστασης τότε τείνει στη μονάδα, επιθυμητή αναλογία για εφαρμογές σε κυκλώματα με υψηλό συντελεστή ποιότητας Q.

Το **επιδερμικό φαινόμενο (skin effect)** είναι ένα φαινόμενο κατά το οποίο το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) κατανέμεται σε έναν αγωγό έτσι ώστε το μεγαλύτερο μέρος του να συγκεντρώνεται στο εξωτερικό τμήμα του, αφήνοντας το εσωτερικό του ανεκμετάλλευτο. Με την αύξηση της συχνότητας αυξάνεται και η πυκνότητα του ρεύματος κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Το επιδερμικό βάθος δ είναι αντιστρόφως ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας της συχνότητας του ρεύματος:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}, \text{ mm} \quad (5.32)$$



Σχήμα(4.2). Επιδερμικό βάθος αγωγού χαλκού σε διάφορες συχνότητες

Δεδομένου ότι η αντίσταση R_{DC} ενός αγωγού είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του υλικού A , έχοντας υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα αντί για DC, η αντίσταση αυξάνεται σημαντικά και επομένως και οι θερμικές απώλειες στον αγωγό:

$$R_{DC} = R_{DC20}[1 + a_{20}(\theta_L - 20^\circ C)], \quad (4.1)$$

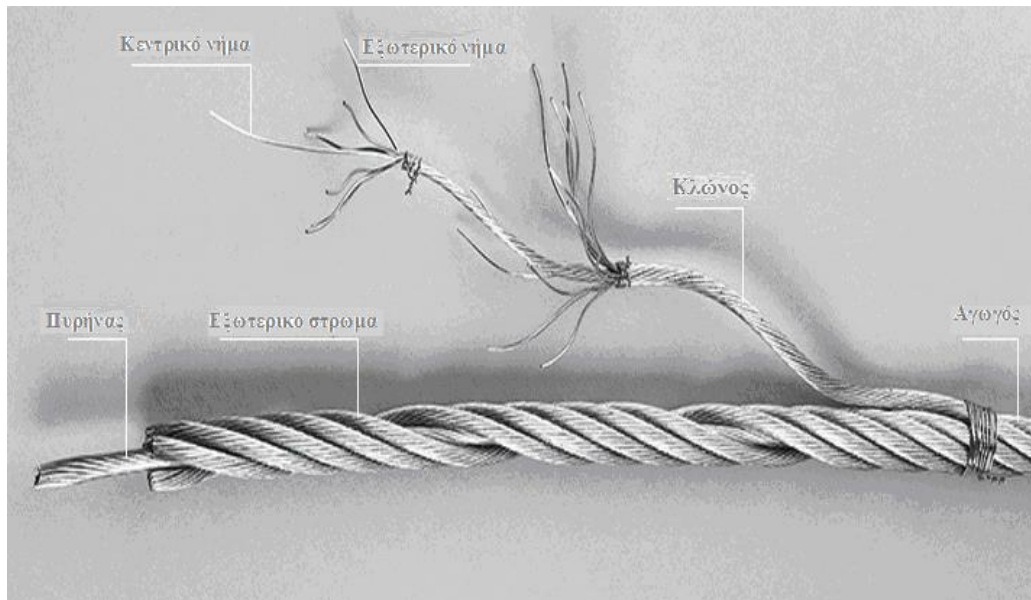
$$\text{όπου } R_{DC20} = \frac{\rho \cdot l}{A} \text{ και:}$$

$a_{20} = 3.93 \cdot 10^{-3} [1/^\circ C]$ είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής του χαλκού στους $20^\circ C$,

θ_L η θερμοκρασία του αγωγού σε $^\circ C$,

$\rho = 1.7241 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot mm^2 / m$ η ειδική αντίσταση του χαλκού

και l το μήκος του αγωγού σε m



Σχήμα(4.3). Περίπλεξη κλώνων σε αγωγό Litz [63]

Η αντίσταση του αγωγού για εναλλασσόμενο ρεύμα είναι:

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot F_s \quad (4.2)$$

όπου F_s συντελεστής που προκύπτει από πεδιακούς υπολογισμούς και μπορεί να υπολογιστεί με πολύ καλή ακρίβεια ακόμα και για συχνότητες της τάξης των εκατοντάδων MHz με τη βοήθεια των συναρτήσεων Bessel.

Επίδραση στην αντίσταση R_{AC} του αγωγού έχει και το **φαινόμενο γειτνίασης (proximity effect)**. Όταν δύο αγωγοί που διαρρέονται από εναλλασσόμενα ρεύματα, βρίσκονται κοντά, ο ένας επάγει δινορρεύματα στον άλλο. Τα δινορρεύματα αυτά αλλάζουν την κατανομή των συνολικών ρευμάτων στους αγωγούς. Αν τα συνολικά ρεύματα των αγωγών έχουν την ίδια φορά, τότε το αποτέλεσμα θα είναι αυξημένη πυκνότητα ρεύματος στις απομακρυσμένες πλευρές των αγωγών. Αν έχουν αντίθετη φορά, τότε το αποτέλεσμα θα είναι αυξημένη πυκνότητα ρεύματος στις πλευρές των αγωγών που γειτνιάζουν **σχήμα (4.4)**.



Σχήμα (4.4). Επίδραση δινορρευμάτων σε γειτονικούς αγωγούς

Το φαινόμενο γειτνίασης λαμβάνεται υπόψη με τη βοήθεια ενός διορθωτικού συντελεστή F_p που προκύπτει επίσης από πεδιακούς υπολογισμούς:

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot F_s \cdot F_p \quad [64] \quad (4.3)$$

Η χρήση σύρματος Litz, επιτυγχάνει πολύ χαμηλές απώλειες τυλιγμάτων σε εύρος συχνοτήτων δεκάδων έως και εκατοντάδων KHz . Απαιτείται προσεκτική σχεδίαση γιατί ακόμα και για διάμετρο κλώνου μικρότερης από το επιδερμικό βάθος, η σωρευτική επίδραση απωλειών λόγω μικρού φαινομένου γειτνίασης σε κάθε έναν από πολλούς κλώνους μπορεί να οδηγήσει σε υψηλές απώλειες και σε κάποιες περιπτώσεις ακόμα υψηλότερες από αυτές ενός απλού συμπαγούς αγωγού. Σχεδιαστικές προσεγγίσεις έχουν καθιερωθεί και δείχνουν ότι κλώνοι με διάμετρο σημαντικά μικρότερη από το επιδερμικό βάθος, είναι απαραίτητοι για μια άριστη επίδοση. Παρόλα αυτά, για συχνότητες της τάξεως των MHz το επιδερμικό βάθος δ γίνεται συγκρίσιμο ακόμα και με τη μικρότερη διαθέσιμη διάμετρο κλώνου και έτσι γίνεται δυσκολότερο να επωφεληθούμε από τη χρήση καλωδίου Litz[68].

Οι αγωγοί Litz χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές ισχύος, υψηλών συχνοτήτων όπως πηνία υψηλής συχνότητας, μετασχηματιστές, μετατροπείς, εξοπλισμό επικοινωνίας, εξοπλισμό υπερήχων, ραδιοτηλεοπτικό εξοπλισμό, εξοπλισμό ηχοεντοπισμού (sonar), εγκαταστάσεις επαγωγικής θέρμανσης. Με το νεοεμφανιζόμενο ενδιαφέρον για την ασύρματη φόρτιση, οι επαγωγικοί φορτιστές όπως αυτοί που υπάγονται στο πρότυπο Qi , είναι ακόμα μια εφαρμογή με σύρμα Litz. Τα μεγέθη του σύρματος Litz συχνά συμβολίζονται με δύο αριθμούς, τον N και τον AWG, όπου N είναι το πλήθος των κλώνων και AWG το μέγεθος κάθε κλώνου στην Αμερικανική Κλίμακα Αγωγών (American Wire Gauge) για παράδειγμα ένα σύρμα 45/33 σημαίνει 45 κλώνοι αγωγού 33 AWG συνεστραμμένοι μεταξύ τους.

Για να είναι αποδοτικό το σύρμα σε υψηλές συχνότητες, κάθε κλώνος πρέπει να έχει διάμετρο το πολύ ίση με το επιδερμικό βάθος.

$$d_c \leq \delta \quad (4.4)$$

Στην πραγματικότητα, όσο μικρότερος είναι σε μέγεθος ο αγωγός, τόσο πιο ακριβό είναι το σύρμα Litz και δυσκολότερο να αγοραστεί. Όταν το μέγεθος του σύρματος μικραίνει, το πάχος της μόνωσης γύρω από κάθε κλώνο, αρχίζει να γίνεται συγκρίσιμο με αυτό και έτσι υποβαθμίζεται η χρηστικότητα της διατομής του αγωγού. Η εταιρία New England Wire Technologies ειδικεύεται σε σύρματα και καλώδια μέχρι 48 AWG που είναι σχεδιασμένα για λειτουργία σε συχνότητες 1.4 MHz έως 2.8 MHz[62].

Το σύρμα που επιλέγεται στη διάταξη είναι 8 AWG, επιφάνειας 16800 Circular Mils και αποτελείται από 1050 κλώνους 38 AWG όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Η διάμετρός του είναι:

$$d = \sqrt{16800} = 129.614814 \text{mils} = 0.129614814 \text{inches} \simeq 3.2922 \text{mm} \quad (4.5)$$

και επομένως η διατομή του σε mm^2 :

$$S = \pi(d/2)^2 = 8.51 \text{mm}^2 \quad (4.6)$$

Equivalent AWG	Circular Mil Area	Number of Wires	AWG of Wire	Film Coating ¹	Construction Type	Outer Insulation ²	Nominal OD	Nominal LBS./1000 FT	Direct Current Resistance OHMS/1000 FT ^Λ	Construction
RECOMMENDED OPERATING FREQUENCY - 50 KHZ TO 100 KHZ										
30	112	7	38	S	1	SN	.017	.380	99.360	7/38
28	160	10	38	S	1	SN	.019	.542	69.550	10/38
26	256	16	38	S	1	SN	.024	.850	43.470	16/38
24	400	25	38	S	1	SN	.029	1.320	27.820	25/38
22	640	40	38	S	1	SN	.036	2.060	17.390	40/38
20	1056	66	38	S	1	SN	.045	3.380	10.750	3/22/38
18	1600	100	38	S	2	SN	.059	5.250	7.160	5X20/38
16	2592	162	38	S	2	SN	.069	8.270	4.380	3/54/38
14	4160	260	38	S	2	SN	.093	13.470	2.760	5X52/38
12	6720	420	38	S	2	SN	.117	21.690	1.740	5X3/28/38
10	10560	660	38	S	2	DN	.149	33.980	1.110	5X3/44/38
8	16800	1050	38	S	2	DN	.200	58.940	.700	5X542/38
6	26400	1650	38	S	2	DN	.249	91.200	.450	5X566/38
4	42000	2625	38	S	2	DN	.320	143.450	.290	5X53/35/38
2	66240	4140	38	S	5	SNB	.494	247.000	.180	6(5X3/46/38)
1	84000	5250	38	S	5	SNB	.551	311.000	.141	6(5X535/38)
1/0	105600	6600	38	S	5	SNB	.613	389.000	.112	6(5X544/38)
2/0	136000	8500	38	S	5	SNB	.749	522.000	.087	10(5X534/38)
3/0	168000	10500	38	S	5	SNB	.828	642.000	.070	10(5X542/38)
4/0	211200	13200	38	S	5	SNB	.966	824.000	.056	12(5X544/38)

Σχήμα (4.5). Πίνακας διαθέσιμων μεγεθών σύρματος Litz της εταιρίας New England Wire Technologies για συχνότητες 50-100 KHz [69]

Η αντίσταση DC του σύρματος που είναι κατασκευής 5X5X42/38 υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$R_{DC} = \frac{R_S (1.015)^{N_B} (1.025)^{N_C}}{N_S} = \frac{681.9 (1.015)^1 (1.025)^2}{1050}; 0.69254\Omega / 1000 ft = 0.002272\Omega / m \quad (4.7)$$

όπου

R_S είναι η μέγιστη αντίσταση DC του κάθε κλώνου

N_C είναι ο αριθμός πράξεων / (καλώδιο)

N_B είναι ο αριθμός πράξεων X (δέσμη κλώνων)

N_S είναι ο αριθμός κλώνων

Υπολογίζοντας το μήκος του σύρματος σε 19.61m, η αντίσταση DC θα είναι 0.0445Ω.

Η αναλογία αντίστασης AC προς DC υπολογίζεται από την σχέση:

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = H + K \left(\frac{N_S D_1}{D_o} \right)^2 G \quad (4.8)$$

όπου

H είναι η αναλογία των αντιστάσεων για κάθε έναν απομονωμένο κλώνα

K είναι η σταθερά που εξαρτάται από τον αριθμό των κλώνων N_S στο καλώδιο

D_1 είναι η διάμετρος του κάθε κλώνου σε ίντσες

D_o είναι η διάμετρος του καλωδίου σε ίντσες

Το G είναι ίσο με:

$$G = \left(\frac{D_1 \sqrt{f}}{10.44} \right)^4 \quad (4.9)$$

AWG gauge	Conductor Diameter inches	Conductor Diameter mm	Conductor cross section in mm ²	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper	Breaking force Soft Annealed Cu 37000 PSI
0000	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	390	302	125 Hz	6120 lbs
000	0.4096	10.40384	84.9	0.0618	0.202704	328	239	160 Hz	4860 lbs
00	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	283	190	200 Hz	3860 lbs
0	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	245	150	250 Hz	3060 lbs
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	211	119	325 Hz	2430 lbs
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	181	94	410 Hz	1930 lbs
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	158	75	500 Hz	1530 lbs
4	0.2043	5.18922	21.1	0.2485	0.81508	135	60	650 Hz	1210 lbs
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	118	47	810 Hz	960 lbs
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	101	37	1100 Hz	760 lbs
7	0.1443	3.66522	10.6	0.4982	1.634096	89	30	1300 Hz	605 lbs
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	73	24	1650 Hz	480 lbs
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	64	19	2050 Hz	380 lbs
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	55	15	2600 Hz	314 lbs
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	47	12	3200 Hz	249 lbs
12	0.0806	2.05232	3.31	1.588	5.20864	41	9.3	4150 Hz	197 lbs
13	0.072	1.8288	2.63	2.003	6.56984	35	7.4	5300 Hz	150 lbs
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	32	5.9	6700 Hz	119 lbs
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	28	4.7	8250 Hz	94 lbs
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	22	3.7	11 k Hz	75 lbs
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	19	2.9	13 k Hz	59 lbs
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	16	2.3	17 kHz	47 lbs
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	14	1.8	21 kHz	37 lbs
20	0.032	0.8128	0.519	10.15	33.292	11	1.5	27 kHz	29 lbs
21	0.0285	0.7239	0.412	12.8	41.984	9	1.2	33 kHz	23 lbs
22	0.0253	0.64516	0.327	16.14	52.9392	7	0.92	42 kHz	18 lbs
23	0.0226	0.57404	0.259	20.36	66.7808	4.7	0.729	53 kHz	14.5 lbs
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	3.5	0.577	68 kHz	11.5 lbs
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	2.7	0.457	85 kHz	9 lbs
26	0.0159	0.40386	0.128	40.81	133.8568	2.2	0.361	107 kHz	7.2 lbs
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	1.7	0.288	130 kHz	5.5 lbs
28	0.0126	0.32004	0.080	64.9	212.872	1.4	0.226	170 kHz	4.5 lbs
29	0.0113	0.28702	0.0647	81.83	268.4024	1.2	0.182	210 kHz	3.6 lbs
30	0.01	0.254	0.0507	103.2	338.496	0.96	0.142	270 kHz	2.75 lbs
31	0.0089	0.22606	0.0401	130.1	426.728	0.7	0.113	340 kHz	2.25 lbs
32	0.008	0.2032	0.0324	164.1	538.248	0.53	0.091	430 kHz	1.8 lbs
Metric 2.0	0.00787	0.200	0.0314	169.39	555.61	0.51	0.088	440 kHz	
33	0.0071	0.18034	0.0255	206.9	678.632	0.43	0.072	540 kHz	1.3 lbs
Metric 1.8	0.00709	0.180	0.0254	207.5	680.55	0.43	0.072	540 kHz	
34	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.33	0.056	690 kHz	1.1 lbs
Metric 1.6	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.33	0.056	690 kHz	
35	0.0056	0.14224	0.0159	329	1079.12	0.27	0.044	870 kHz	0.92 lbs
Metric 1.4	0.00551	0.140	0.0154	339	1114	0.26	0.043	900 kHz	
36	0.005	0.127	0.0127	414.8	1360	0.21	0.035	1100 kHz	0.72 lbs
Metric 1.25	0.00492	0.125	0.0123	428.2	1404	0.20	0.034	1150 kHz	
37	0.0045	0.1143	0.0103	523.1	1715	0.17	0.0289	1350 kHz	0.57 lbs
Metric 1.12	0.00441	0.112	0.00985	533.8	1750	0.163	0.0277	1400 kHz	
38	0.004	0.1016	0.00811	659.6	2163	0.13	0.0228	1750 kHz	0.45 lbs
Metric 1.0	0.00394	0.1000	0.00785	670.2	2198	0.126	0.0225	1750 kHz	
39	0.0035	0.0889	0.00621	831.8	2728	0.11	0.0175	2250 kHz	0.36 lbs
40	0.0031	0.07874	0.00487	1049	3440	0.09	0.0137	2900 kHz	0.29 lbs

Σχήμα(4.6). Πίνακας μεγεθών και μέγιστων επιτρεπόμενων ρευμάτων σύρματος Litz [70]

Επομένως οι αντιστάσεις R_1 και R_2 πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος εξαρτώνται από τη συχνότητα του συστήματος και αντιπροσωπεύουν τις απώλειες χαλκού στις βάσεις εκπομπής και λήψης. Επιπλέον απώλειες παρουσιάζονται στο σύστημα – απώλειες πυρήνα φερριτή, δινορρευμάτων- οι οποίες μεταβάλλονται καθώς το όχημα κινείται πάνω από τον σταθμό φόρτισης και ποικίλλουν ανάλογα με την μαγνητική τοπολογία που έχει επιλεγεί.

4.3. Βελτιστοποίηση του συστήματος δυναμικής φόρτισης

Όπως είναι φανερό από τις σχέσεις (3.66) και (3.77), η γωνιακή συχνότητα του συστήματος ω και ως εκ τούτου η **συχνότητα λειτουργίας** του, επηρεάζει τόσο την ισχύ όσο και την ενέργεια που μεταφέρεται στη μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος. Το προτεινόμενο IPT σύστημα λειτουργεί με σταθερή συχνότητα. Ορίζοντας μία ελάχιστη f_{\min} και μία μέγιστη τιμή f_{\max} συχνότητας ορίζονται αντίστοιχα και η ελάχιστη και μέγιστη τιμή γωνιακής συχνότητας:

$$\omega_{\min} = 2\pi f_{\min} \quad (4.10)$$

$$\omega_{\max} = 2\pi f_{\max} \quad (4.11)$$

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση και μεταφερόμενη ενέργεια είναι οι **πυκνωτές αντιστάθμισης** C_1 και C_2 . Όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3, οι τιμές των πυκνωτών επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς εξόδου καθώς και μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στην πλευρά του πρωτεύοντος σύμφωνα με τους τύπους:

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_1} \quad (4.12)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega^2 L_2} \quad (4.13)$$

Ο **συντελεστής ισχύος εισόδου** για μετατόπιση x_i του οχήματος ορίζεται ως:

$$PF_i = \frac{P_{in-i}}{|\dot{S}_{in-i}|} = \frac{P_{in-i}}{\sqrt{P_{in-i}^2 + Q_{in-i}^2}} \quad (4.14)$$

όπου

$$P_{in-i} = \operatorname{Re} \left\{ \dot{S}_{in-i} \right\} = \left[R_1 + \frac{\omega^2 M_i^2 (R_L + R_2)}{\left(\omega L_{2-i} - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_2 + R_L)^2} \right] \left| \dot{I}_1 \right|^2 \quad (4.15)$$

$$Q_{in_i} = \text{Im} \left\{ \dot{S}_{in_i} \right\} = \left[\omega L_{1_i} - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right) \omega^2 M_i^2}{\left(\omega L_{2_i} - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_2 + R_L)^2} \right] \left| \dot{I}_1 \right|^2 \quad (4.16)$$

όπως προκύπτει από τη σχέση (3.68).

Σε ένα σύστημα δυναμικής φόρτισης με τοπολογία σειρά-σειρά, οι πυκνωτές αντιστάθμισης υπολογίζονται και πάλι σύμφωνα με τους τύπους (4.12) και (4.13) με την διαφορά όμως ότι οι αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων δεν θεωρούνται πλέον σταθερές αλλά μεταβάλλονται καθώς το όχημα κινείται στην περιοχή φόρτισης. Για μετατόπιση x_i οι τύποι των πυκνωτών θα είναι:

$$C_1 = \frac{1}{\omega^2 L_{1_i}} \quad (4.17)$$

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

Στην περίπτωση της στατικής φόρτισης, θεωρώντας συγκεκριμένη τη μετατόπιση του οχήματος, οι τιμές των πυκνωτών αντιστάθμισης μπορούν να εξαχθούν με ακρίβεια. Στην δυναμική φόρτιση όμως, μία κακή επιλογή των στοιχείων αυτών, δύναται να οδηγήσει σε υψηλές απώλειες αέργου ισχύος και χαμηλή απόδοση σε περίπτωση μειωμένης σύζευξης των δύο τυλιγμάτων. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να εξετασθεί όλο το εύρος της κίνησης του οχήματος, μέσα από τις τιμές των C_1 και C_2 , όπως αυτές μεταβάλλονται μεταξύ μίας ελάχιστης και μίας μέγιστης τιμής $\{C_{1,\min} - C_{1,\max}\}$ και $\{C_{2,\min} - C_{2,\max}\}$ αντίστοιχα, όπου:

$$C_{j,\min} = \frac{1}{\omega_{\max}^2 L_{j_max}} \quad (4.19)$$

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

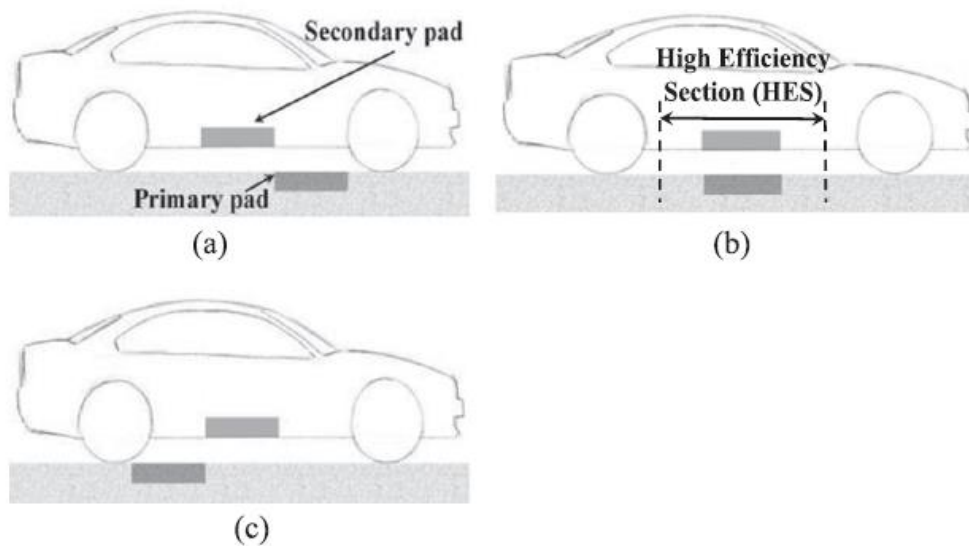
το j δηλώνει την πλευρά του πρωτεύοντος -1 ή του δευτερεύοντος -2. Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση και την μεταφερόμενη στο όχημα ενέργεια είναι το φορτίο της μπαταρίας που εκφράζεται με την ισοδύναμη αντίσταση R_L . Για το λόγο αυτό είναι επίσης σημαντικό να καθοριστεί η τιμή της μέσα από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Συνοψίζοντας, στόχος είναι η μεγιστοποίηση της εξερχόμενης από το σύστημα ενέργειας μέσα από τον προσδιορισμό των παραμέτρων $\{\omega, R_L, C_1, C_2\}$ που υφίστανται κάποιους φυσικούς περιορισμούς ανάλογα με το πώς είναι σχεδιασμένο το σύστημα όπως θα περιγραφεί αναλυτικότερα παρακάτω. Περιορισμός υπάρχει και όσον αφορά την τιμή της απόδοσης του

συστήματος που πρέπει να διατηρηθεί πάνω από κάποια τιμή eff_{target} για όλες τις θέσεις μετατόπισης του οχήματος. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$E = \frac{\Delta x}{u} \left[\left(\sum_{i=0}^N P_i \right) - \frac{P_0 + P_N}{2} \right] = \max \quad (4.21)$$

$$eff_i \geq eff_{target} \quad \forall i \quad (4.22)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{min} \\ C_{1,min} \\ C_{2,min} \\ 0 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \omega \\ C_1 \\ C_2 \\ R_L \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \omega_{max} \\ C_{1,max} \\ C_{2,max} \\ R_{L,max} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$



Σχήμα (4.7). Σχετική θέση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος pad καθώς το ηλεκτρικό όχημα κινείται πάνω από τον σταθμό φόρτισης: (a) Το όχημα εισέρχεται στον σταθμό-LES (b) Το όχημα βρίσκεται ακριβώς επάνω από τον σταθμό-HES (c) Το όχημα εξέρχεται από τον σταθμό φόρτισης-LES

Η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης δεν είναι εφικτή για υψηλές τιμές του eff_{target} , εφόσον εξετάζεται όλο το μήκος της κίνησης του οχήματος πάνω από το σταθμό. Είναι επομένως σημαντικό να ορίσουμε ένα τμήμα της κίνησης όπου υψηλά ποσά ενέργειας δύναται να μεταφερθούν στο όχημα σε υψηλή απόδοση συστήματος ενώ διασφαλίζεται η λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η μέγιστη ισχύς στα περισσότερα IPT συστήματα μεταφέρεται στο όχημα όταν αυτό βρίσκεται ακριβώς πάνω από τη βάση φόρτισης δηλαδή όταν η μετατόπιση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος pad είναι μηδενική. Έτσι ορίζεται το τμήμα υψηλής απόδοσης **HES (High Efficiency Section)** που περιλαμβάνει τις μετατοπίσεις του

οχήματος που είναι κοντά στο μηδέν. Ορίζονται επίσης δύο τμήματα χαμηλής απόδοσης **LES (Low Efficiency Section)** ένα κατά την είσοδο και ένα κατά την έξοδο του οχήματος από τον σταθμό σχήμα (5.11). Θεωρώντας ότι το όχημα μπαίνει στο HES σε μετατόπιση x_{enter} και βγαίνει από αυτό σε μετατόπιση x_{leave} , θα ισχύει:

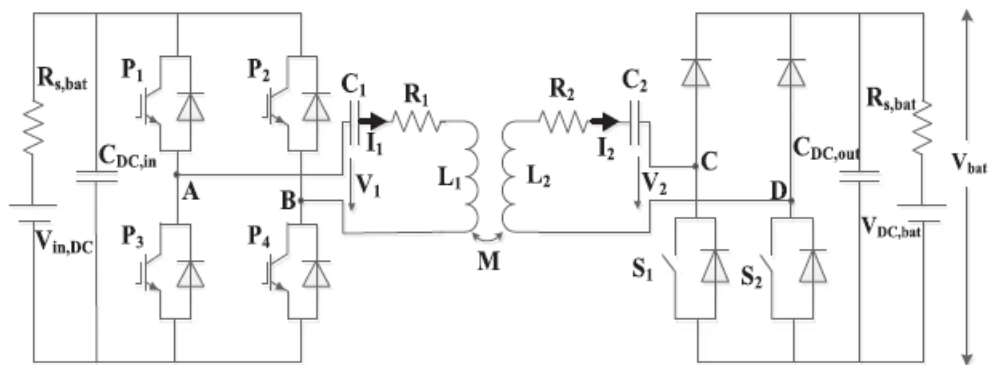
$$HES = x_{leave} - x_{enter} \quad (4.24)$$

Αρχικά μετρώνται οι τιμές των επαγωγών για τη ζητούμενη μαγνητική διάταξη ενώ στην συνέχεια εξάγονται οι βέλτιστες τιμές συχνότητας, επαγωγών και αντίστασης φορτίου. Με βάση αυτές τις τιμές είναι δυνατό να προσδιοριστεί η ισχύς εισόδου την στιγμή που το όχημα εισέρχεται στο τμήμα υψηλής απόδοσης HES ($P_{in,enter}$) αλλά και την στιγμή που εξέρχεται από αυτό ($P_{in,leave}$) πριν ξεκινήσει η διαδικασία φόρτισης. Συνεπώς παρακολουθώντας την τιμή της ισχύος εισόδου P_1 κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης του οχήματος, και για όλο το μήκος της κίνησής του, είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την θέση του. Η παρακολούθηση της εισερχόμενης στο σύστημα ισχύος απαιτεί την λειτουργία του καθώς το όχημα εισέρχεται στην περιοχή φόρτισης (LES). Κατά τη διάρκεια παραμονής του οχήματος στο τμήμα χαμηλής απόδοσης το πρωτεύον τροφοδοτείται με ρεύμα μικρής έντασης έτσι ώστε η ισχύς εισόδου στο σύστημα να διατηρείται σε χαμηλή τιμή και το σύστημα να λειτουργεί με μικρές απώλειες. Τη στιγμή που το όχημα εισέρχεται στο HES, το ρεύμα αυξάνεται έτσι ώστε να μεταφερθεί σε αυτό η μέγιστη ενέργεια. Η λειτουργία του συστήματος και στις δύο περιοχές επομένως επιτυγχάνεται με τον έλεγχο του ρεύματος στο πρωτεύον όπως περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν και η απόδοση του συστήματος δεν εξαρτάται από το ρεύμα του πρωτεύοντος όπως παρατηρείται και από τη σχέση 3.71, οι απώλειες του συστήματος σε VA εξαρτώνται από αυτό. Σε περίπτωση που το όχημα βρίσκεται στην LES, μια μεγάλη τιμή ρεύματος στο πρωτεύον θα οδηγήσει σε αυξημένες απώλειες του συστήματος. Η τοπολογία σειρά-σειρά που έχει επιλεγεί για το κύκλωμα επιτρέπει στην ηλεκτρική απόδοση του συστήματος να είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα στο πρωτεύον και επομένως στον μηχανισμό ανίχνευσης του οχήματος που περιγράφεται στην παρούσα εργασία να εφαρμοστεί.

4.4 Λειτουργία ελέγχου στη δυναμική φόρτιση

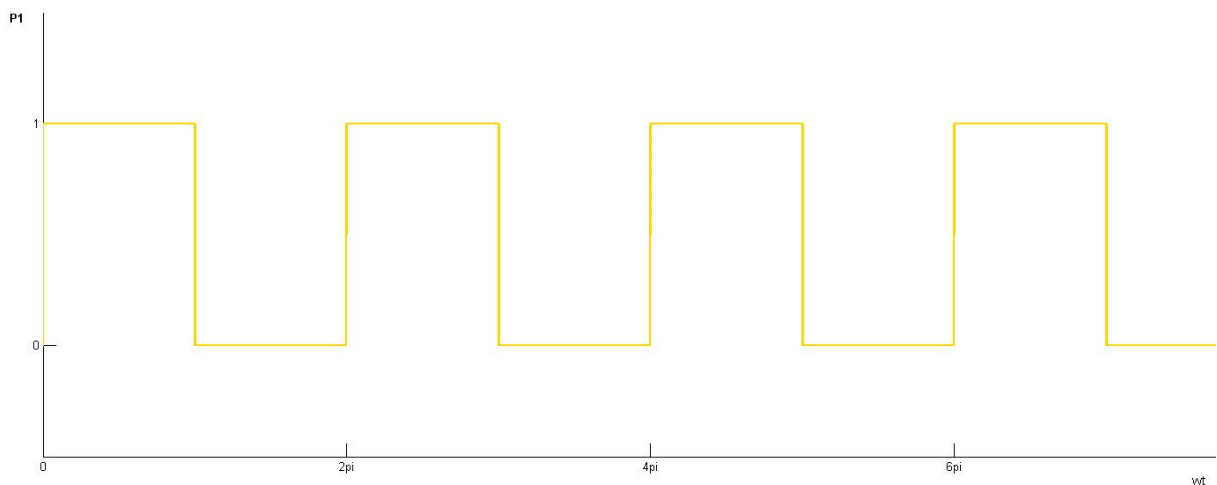
4.4.1 Έλεγχος στο πρωτεύον

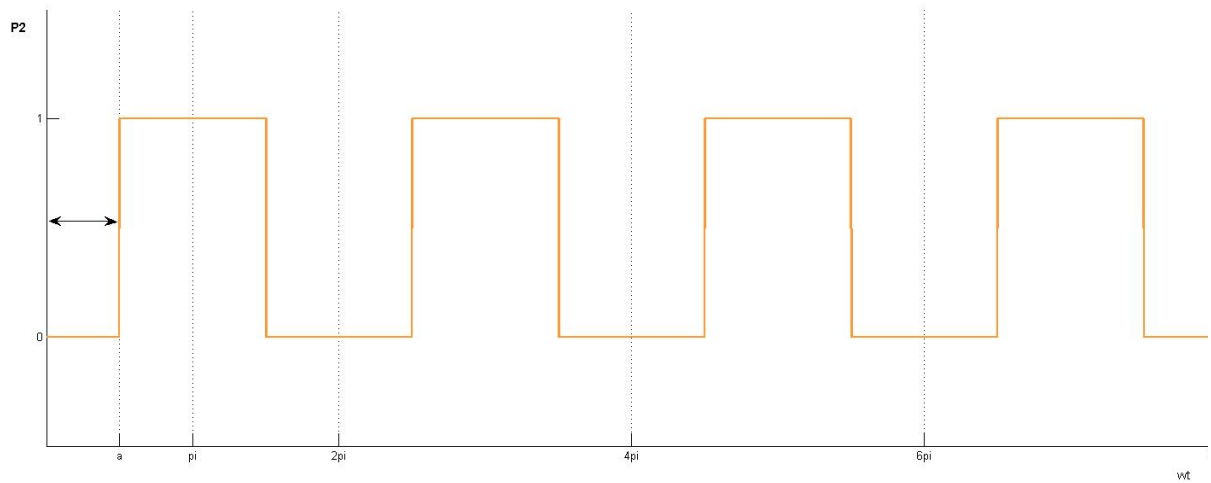
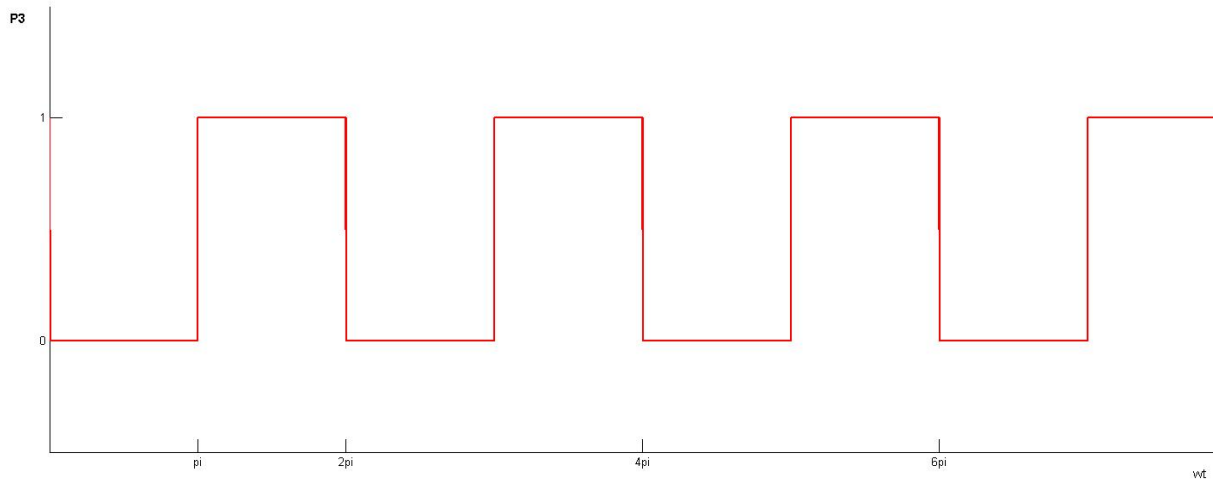
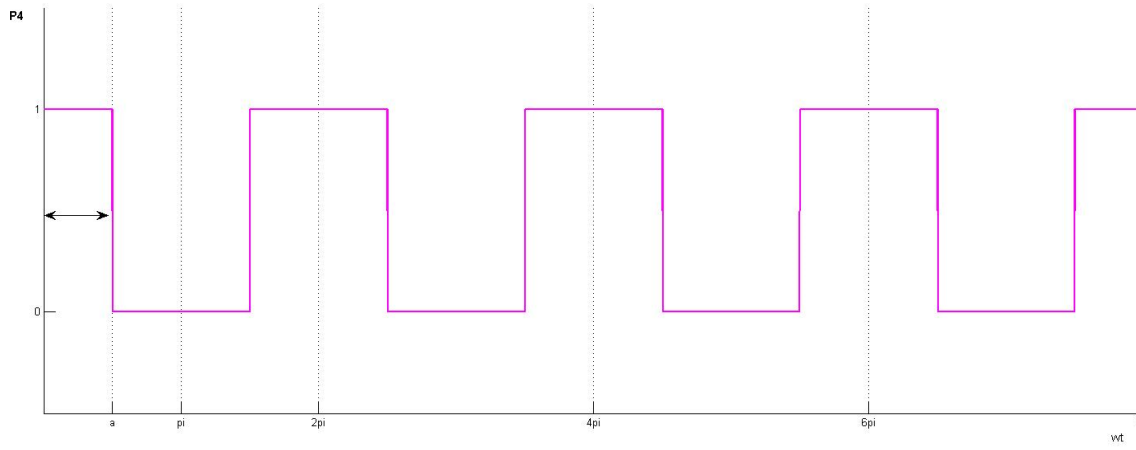
Η τοπολογία του συστήματος δυναμικής φόρτισης με ένα πρωτεύον τύλιγμα παρουσιάζεται στο **σχήμα 4.8**. Το ρεύμα εισόδου I_1 στο σύστημα ελέγχεται με μονοφασικό αντιστροφέα τάσης πλήρους γέφυρας. Ο αντιστροφέας αποτελείται από τέσσερις διακόπτες IGBT P1,P2, P3,P4. Η τάση εξόδου του V_{AB} ελέγχεται με ολίσθηση φάσης (*phase shift modulation*).

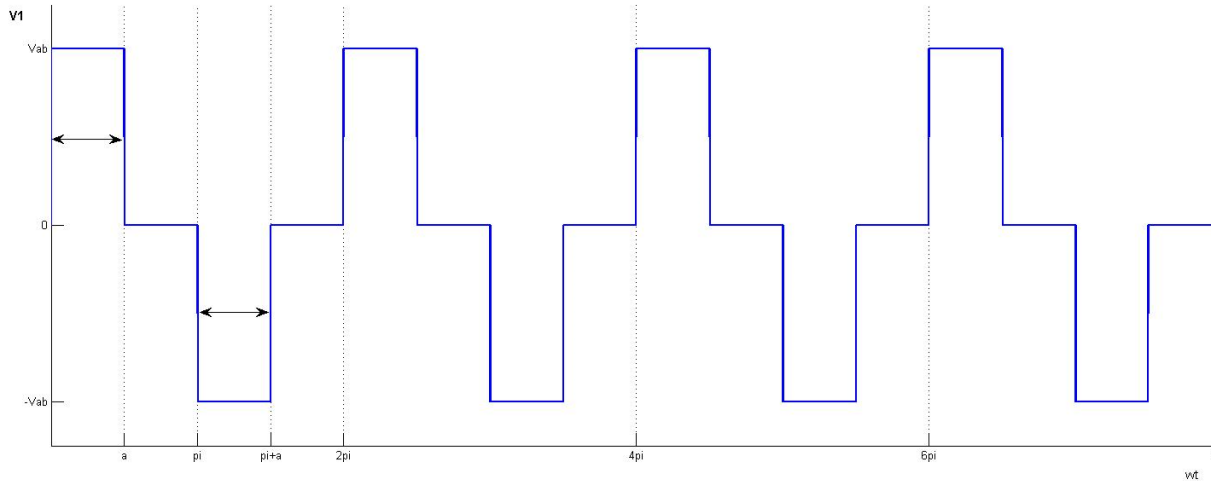


Σχήμα (4.8). Σύστημα Ελέγχου του IPT συστήματος με ένα πρωτεύον τύλιγμα

Οι παλμοί που οδηγούν τους διακόπτες P1 και P4 έχουν οριστεί έτσι ώστε να μην είναι ποτέ κλειστοί ή ανοιχτοί ταυτόχρονα οι P1-P3 και P2-P4:







Η συνάρτηση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα παρουσιάζει περιττή συμμετρία ημίσεως κύματος και μπορεί να αναλυθεί σε σειρά ημιτονική σειρά Fourier ως εξής:

$$\dot{V}_{ab}(t) = \sum_{h=1,3,5..}^{\infty} \dot{V}_{ab,h} \sin(h\omega t) \quad (4.25)$$

Όπου το πλάτος της κάθε αρμονικής ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\dot{V}_{ab,h} = \dot{V}_{1,h} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{in,DC} \sin(h\omega t) d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi-\alpha}{2}}^{\frac{\pi+\alpha}{2}} V_{in,DC} \sin(h\omega t) d\omega t \Rightarrow$$

$$\dot{V}_{1,h} = \frac{4}{h\pi} V_{in,DC} \sin\left(h\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.26)$$

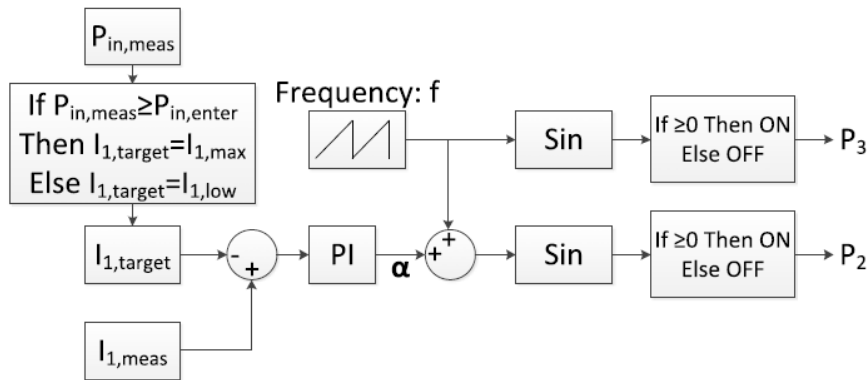
Η ενδεικνύμενη τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα θα είναι επομένως:

$$\dot{V}_{1,1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{in,DC} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.27)$$

Είναι φανερό ότι ελέγχοντας την φάση α ελέγχουμε την τάση V_1 που εφαρμόζεται στο πρωτεύον τύλιγμα και κατά συνέπεια το ρεύμα στο πρωτεύον που ορίζεται ως εξής:

$$|I_1| = \frac{|V_1|}{\sqrt{\left[R_1 + \frac{\omega^2 M^2 (R_L + R_2)}{\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_L + R_2)^2} \right]^2 + \left[\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) + \omega^2 M^2}{\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right)^2 + (R_L + R_2)^2} \right]^2}} \quad (4.28)$$

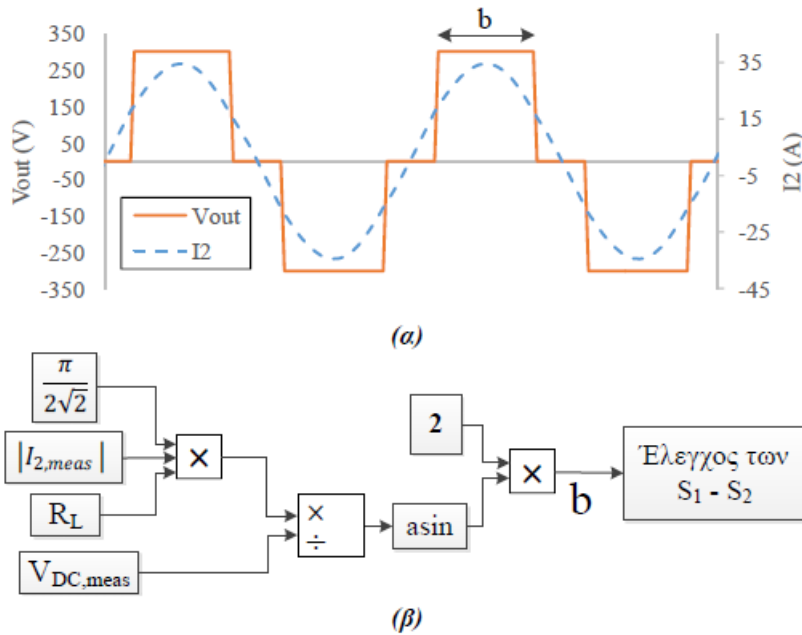
Το επιθυμητό ρεύμα $I_{1,target}$ συγκρίνεται με το μετρούμενο ρεύμα εισόδου I_1 . Η διαφορά τους διοχετεύεται σε έναν PI ελεγκτή ο οποίος και υπολογίζει την επιθυμητή γωνία φάσης α *σχήμα (4.9)*. Όταν το όχημα κινείται στην περιοχή χαμηλή απόδοσης (LES) προκειμένου να επιτύχουμε χαμηλές απώλειες τυλιγμάτων, στόχος είναι το ρεύμα εισόδου στο σύστημα να διατηρηθεί σε μια χαμηλή τιμή ($I_{1,low}$). Τη στιγμή που το όχημα εισέρχεται στην περιοχή υψηλής απόδοσης HES η ισχύς εισόδου λαμβάνει μια συγκεκριμένη τιμή $P_{in,enter}$ την οποία ανιχνεύει το σύστημα ελέγχου του πρωτεύοντος και στη συνέχεια αυξάνει την τιμή του ρεύματος στο μέγιστο επιτρεπτό όριο ($I_{1,max}$). Με τον τρόπο αυτό το όχημα λαμβάνει την μέγιστη δυνατή ισχύ. Αντίστοιχα την στιγμή που το όχημα εξέρχεται της HES, η ισχύς εισόδου παίρνει μια τιμή $P_{in,leave}$. Το σύστημα ελέγχου, ανιχνεύοντας την τιμή αυτή, αυτομάτως διακόπτει την παρεχόμενη στο όχημα ισχύ και η διαδικασία φόρτισης τερματίζεται.



Σχήμα(4.9). Σχήμα ελέγχου του πρωτεύοντος

4.4.2 Έλεγχος στο δευτερεύον

Προκειμένου να είναι δυνατή η ορθή εφαρμογή του μηχανισμού ανίχνευσης του οχήματος όταν αυτό εισέρχεται και εξέρχεται από την ζώνη υψηλής απόδοσης HES, είναι απαραίτητο η τιμή της αντίστασης του φορτίου να παραμείνει σταθερή καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Καθώς η μπαταρία φορτίζεται, η τάση της V_{bat} μεταβάλλεται ανάλογα με την SoC γεγονός το οποίο οδηγεί και σε μεταβολές στην τιμή της αντίστασης της μπαταρίας R_L .



Σχήμα 4.10. (α) Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου (β) Σχήμα ελέγχου του δευτερεύοντος

Στον ανορθωτή AC/DC στην πλευρά του δευτερεύοντος όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.8, εισάγονται δύο ελεγχόμενοι διακόπτες S1 και S2 με στόχο να διατηρηθεί η αντίσταση R_L σε μία σταθερή τιμή. Με τον τρόπο αυτό, η R_L παραμένει σταθερή παρόλες τις διακυμάνσεις της V_{bat} .

Όταν οι δύο διακόπτες S1 και S2 είναι κλειστοί, τα σημεία C και D βραχυκυκλώνουν, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου V_2 να γίνει μηδέν και το ρεύμα I_2 να κυκλοφορεί στην πλευρά του δευτερεύοντος χωρίς να μεταφέρεται ισχύ στην μπαταρία. Όταν το ρεύμα μηδενίζει μεταβαίνοντας από αρνητικές σε θετικές τιμές, ο S1 κλείνει για διάστημα που αντιστοιχεί σε γωνία θ . Μετά το πέρας του διαστήματος αυτού, ο S1 απενεργοποιείται παραμένοντας ανοιχτός για διάστημα που αντιστοιχεί σε γωνία b . Αντίστοιχα, όταν το ρεύμα μηδενίζει πηγαίνοντας από θετικές σε αρνητικές τιμές, ο διακόπτης S2 κλείνει για διάστημα γωνίας θ . ενώ μετά το πέρας αυτού ανοίγει για διάστημα γωνίας b . Όταν το ρεύμα I_2 είναι θετικό και οι S1, S2 ανοιχτοί, η τάση V_2 λαμβάνει τη μέγιστη θετική τιμή της. Όταν το I_2 είναι αρνητικό με τους S1 και S2 ανοιχτούς, η τάση V_2 λαμβάνει τη μέγιστη αρνητική τιμή της. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μηδενική μετατόπιση ρεύματος και τάσης εξόδου. Όπως φαίνεται και στα σχήματα 4.10 και 4.11, ελέγχοντας τον χρόνο που οι δύο διακόπτες παραμένουν ανοιχτοί, δηλαδή την γωνία b , ελέγχεται η τάση εξόδου V_2 . Ισχύουν:

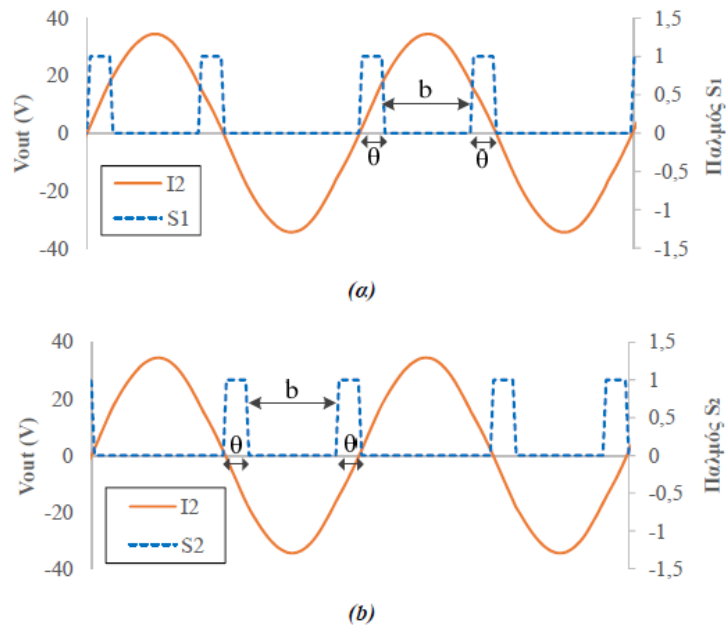
$$b + 2\theta = \pi \quad (4.29)$$

$$|V_2| = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{bat} \sin\left(\frac{b}{2}\right) \quad (4.30)$$

$$R_L |I_2| = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{bat} \sin\left(\frac{b}{2}\right) \quad (4.31)$$

Επιλύοντας την σχέση 4.31 ως προς b αυτό δίνεται από τη σχέση:

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



Σχήμα 4.11. Παλμοί οδήγησης των διακοπών (α) S1 και (β) S2

Το σύστημα ελέγχου στο δευτερεύον μπορεί να εξασφαλίσει μια σταθερή τιμή της αντίστασης φορτίου όχι όμως και να ρυθμίσει το ρεύμα στο δευτερεύον. Είναι σημαντικό να οριστεί μια μέγιστη τιμή για το ρεύμα I_2 ανάλογα με την μέγιστη επιτρεπτή τιμή αντοχής του τυλίγματος. Μία λάθος επιλογή των μεταβλητών f , C_2 , R_L μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να εισαχθεί και ο παρακάτω περιορισμός στο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$|I_2| = \frac{\omega M}{\sqrt{\left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2 + (R_L + R_2)^2}} I_1 \leq I_{2,\max} \quad (4.33)$$

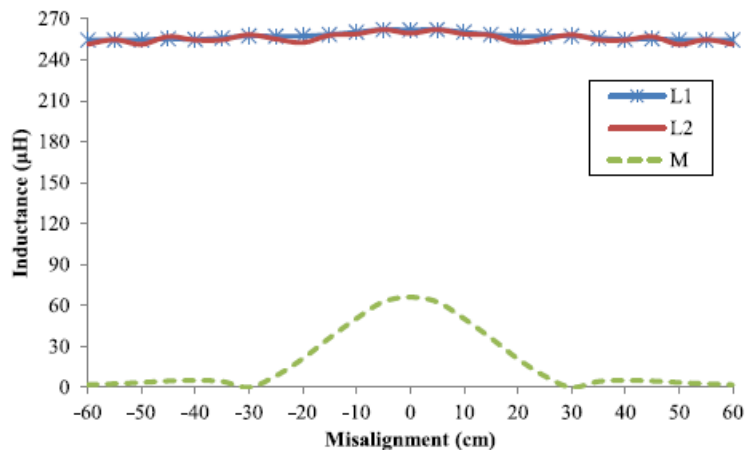
Επιπλέον, υπάρχει μία μέγιστη τιμή αντίστασης φορτίου που εφαρμόζεται στο δευτερεύον. Δεδομένου ότι $\sin\left(\frac{b}{2}\right) \leq 1$, θα ισχύει ότι:

$$R_L I_2 \leq \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{bat} \quad (4.34)$$

Η τάση της μπαταρίας κυμαίνεται από μια ελάχιστη τιμή ($V_{bat,min}$) έως μία μέγιστη ($V_{bat,max}$) ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης στην οποία βρίσκεται. Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή της αντίστασης R_L ορίζεται για ελάχιστη τάση μπαταρίας $V_{bat,min}$ και μέγιστο ρεύμα δευτερεύοντος τυλίγματος $I_{2,max}$:

$$R_{L,max} = \frac{2\sqrt{2}V_{bat,min}}{\pi I_{2,max}} \quad (4.35)$$

Όταν το όχημα βρίσκεται ακριβώς επάνω από τον σταθμό φόρτισης, η μετατόπιση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος rad φόρτισης είναι μηδενική. Θεωρούμε ότι το όχημα εισέρχεται στην περιοχή φόρτισης όταν η μετατόπιση μεταξύ των τυλιγμάτων είναι $-60cm$ ενώ εξέρχεται από αυτόν όταν η μετατόπιση είναι $+60cm$. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος δίνουν τις τιμές των επαγωγών για τις διάφορες τιμές οριζόντιας μετατόπισης μεταξύ των δύο τυλιγμάτων όπως φαίνεται στο **σχήμα 4.12**.

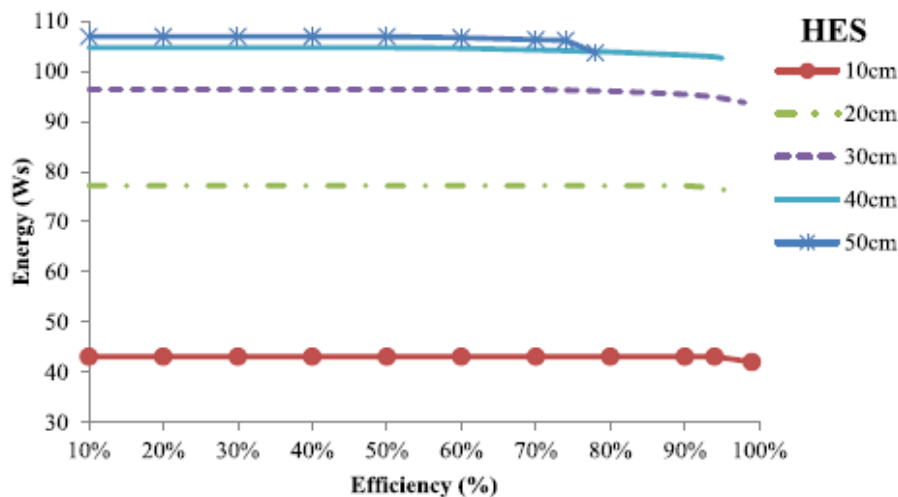


Σχήμα(4.12). Τιμές επαγωγών για διαφορετικές μετατοπίσεις

4.5. Παραμετροποίηση του συστήματος

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης όπως αυτό περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.3, έχει σαν στόχο τη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης στο όχημα ενέργειας όπως αυτή ορίζεται στην *σχέση 4.21* υπό τους περιορισμούς που περιγράφονται στις *σχέσεις 4.22 και 4.23*. Η ταχύτητα u του οχήματος στην *4.21* ορίζεται ίση με $50km/h$ ενώ η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων κίνησης Δx θεωρείται $5cm$. Στην βιβλιογραφία συναντάμε μαγνητικές διατάξεις κυκλικών rads παρόμοιων με αυτών του συστήματος που περιγράφεται στην παρούσα εργασία σε σταθερές

συχνότητες από $20kHz$ έως $50kHz$. Αυτά τα όρια θεωρούνται και εδώ $f_{min} = 20kHz$ και $f_{max} = 50kHz$ ώστε να ληφθούν υπόψη πιθανοί ηλεκτρικοί και μαγνητικοί περιορισμοί. Από τις σχέσεις 4.10 και 4.11 προκύπτει ότι $\omega_{min} = 125600rad/sec$ και $\omega_{max} = 314000rad/sec$. Για τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές των επαγωγών L_1, L_2 οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές των χωρητικοτήτων C_1, C_2 υπολογίζονται από τις σχέσεις 4.19 και 4.20 και είναι $C_{1,min} = 38.7nF$, $C_{1,max} = 249.1nF$, $C_{2,min} = 38.7nF$ και $C_{2,max} = 252.3nF$. Η μπαταρία που εξετάζεται στο παρόν σύστημα έχει ελάχιστη τάση $V_{bat,min} = 270V$, επομένως η μέγιστη τιμή της αντίστασης φορτίου για μέγιστο ρεύμα τυλίγματος $I_{2,max} = 25A$ υπολογίζεται από τη σχέση 5.54 $R_{L,max} = 9.72\Omega$. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.13, το πρόβλημα επιλύεται θεωρώντας HES έως $50cm$ αφού για μεγαλύτερες τιμές το πρόβλημα είναι επιλύσιμο για πολύ μικρές τιμές της eff_{target} .

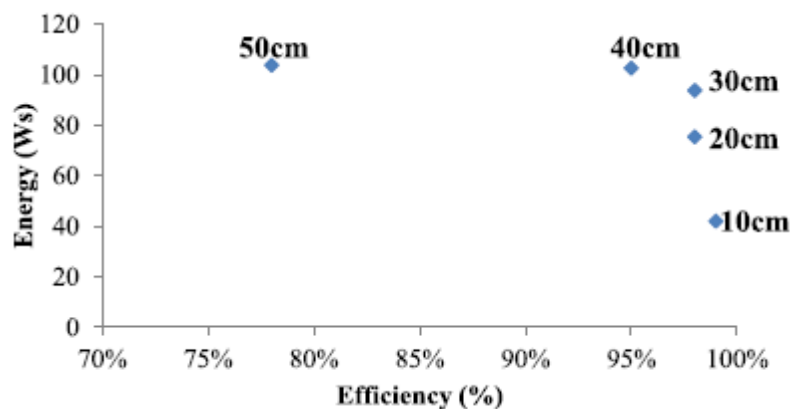


Σχήμα (4.13). Μέγιστη μεταφερόμενη ενέργεια για διάφορες τιμές της eff_{target}

Στο γράφημα που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13 παρατηρείται ότι για κάθε επιλεγμένο μήκος HES η μεταφερόμενη στο όχημα ενέργεια παραμένει σχεδόν σταθερή με την αύξηση της απόδοσης μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της eff_{limit} για την οποία η ενέργεια αρχίζει να μειώνεται. Η τιμή της eff_{limit} αντιστοιχεί σε μια τιμή E_{limit} που είναι και η μέγιστη τιμή της ενέργειας. Έτσι για όλες τις τιμές απόδοσης eff_{target} που είναι μικρότερες από την eff_{limit} , στο όχημα μεταφέρεται το ίδιο ποσό ενέργειας E_{limit} που προκύπτει από τις παραμέτρους $C_{2,limit}$, f_{limit} και $R_{L,limit}$.

Για μεγαλύτερες τιμές της eff_{target} από την eff_{limit} η προσφερομένη από το σύστημα ενέργεια μειώνεται. Για παράδειγμα στην περίπτωση που η HES είναι 30cm, η μέγιστη ενέργεια

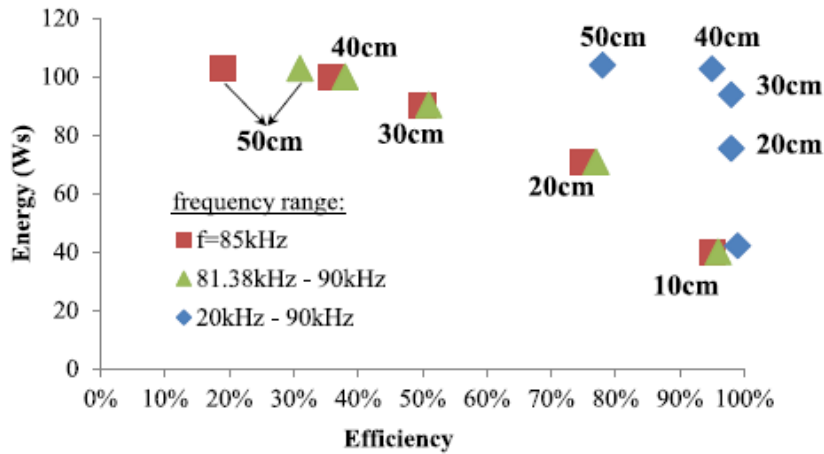
$E_{\text{limit}} = 96.36Ws$ επιτυγχάνεται για $C_{2,\text{limit}} = 38.71nF$, $f_{,\text{limit}} = 45.57kHz$ και $R_{L,\text{limit}} = 9.72\Omega$. Η μέγιστη απόδοση που αντιστοιχεί σε αυτή την ενέργεια είναι $eff_{\text{limit}} = 0.71$ για $C_{1,\text{limit}} = 42.79nF$. Απαιτώντας την υψηλότερη δυνατή απόδοση πέρα από την οποία η ενέργεια δεν θα μειωθεί σημαντικά - πράγμα το οποίο συμβαίνει σε αποδόσεις κοντά στο 100%) – έχουμε την μέγιστη απόδοση $eff_{\text{feas}} = 0.98$. Η ενέργεια που αντιστοιχεί σε αυτή την απόδοση είναι $E_{\text{feas}} = 93.78Ws$. Παρατηρείται ότι για μία σημαντική αύξηση της τάξεως του 38% στην απόδοση του συστήματος, η αποδιδόμενη στο όχημα ενέργεια μειώνεται μόνο κατά 2,68%. Για όλες τις περιπτώσεις της HES (σχήμα 4.14) ενώ η eff_{feas} αυξάνεται σημαντικά, η E_{feas} δεν παρουσιάζει μείωση πάνω από 3,1% σε σχέση με την eff_{limit} . Επομένως γίνεται ένας συμβιβασμός ως προς την τιμή της ενέργειας προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση του συστήματος. Σύμφωνα με τα δεδομένα επιλέγεται η HES των 40cm ως καταλληλότερη για το σύστημά μας.



Σχήμα (4.14). Ενδεικτικά ζεύγη τιμών ($eff_{\text{feas}}, E_{\text{feas}}$) για διάφορα μήκη HES

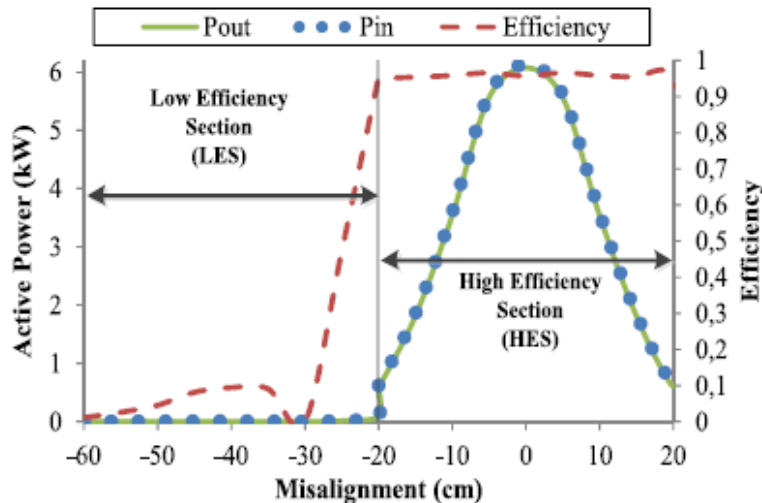
Η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας για εφαρμογές στατικής ασύρματης φόρτισης ελαφρών οχημάτων είναι τα $85kHz$ όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Παρόλα αυτά επιλύοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης για το σύστημά μας με αυτήν τη συχνότητα είναι φανερό (σχήμα 4.15) ότι για απόδοση συστήματος κοντά στο 95% μόλις $40Ws$ ενέργειας μεταφέρονται στο όχημα ενώ για το εύρος συχνοτήτων $20kHz - 50kHz$ μεταφέρονται αντίστοιχα $103Ws$. Δοκιμάζοντας ένα εύρος $81.34kHz - 90kHz$ όπως αυτό προτείνεται στην βιβλιογραφία για στατικά IPT συστήματα με ρύθμιση συχνότητας, παρατηρείται μια ολύμικρή αύξηση στην προσφερόμενη ενέργεια σε σχέση με την σταθερή συχνότητα των $85kHz$.

Δοκιμάζοντας τη διεύρυνση του εύρους συχνοτήτων $20kHz - 50kHz$ σε $20kHz - 90kHz$, τα αποτελέσματα είναι ίδια με αυτά που δίνει το αρχικό εύρος. Κάνοντας σύγκριση μεταξύ των προαναφερθέντων συχνοτήτων, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το εύρος $20kHz - 50kHz$ είναι το ευνοϊκότερο για το σύστημα μας. Για την επιλεγμένη HES των 40cm επιλέγονται σαν βέλτιστες παράμετροι του συστήματος η συχνότητα των $24.134kHz$, αντίσταση φορτίου $R_L = 9.72\Omega$ και χωρητικότητες C_1 και C_2 ίσες με $168.08nF$ και $159.24nF$ αντίστοιχα.



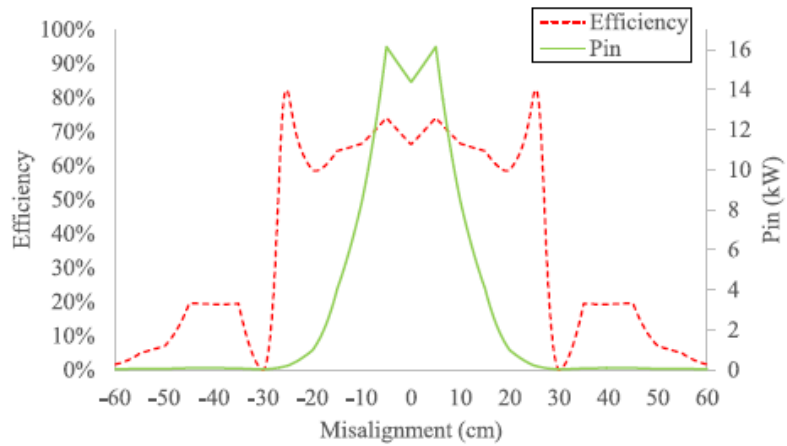
Σχήμα (4.15). Ενδεικτικά ζεύγη τιμών (eff_{feas} , E_{feas}) για διάφορα μήκη HES και συχνότητες

Στο σχήμα 5.20 φαίνεται η απόδοση του συστήματος καθώς και η ισχύς εξόδου καθώς το όχημα κινείται πάνω από τον σταθμό φόρτισης. Το όχημα εισέρχεται στο σταθμό σε μετατόπιση $-60cm$ (θεωρούμε μηδενική μετατόπιση όταν τα rad εκπομπής και λήψης είναι απολύτως ευθυγραμμισμένα) και κινείται στη ζώνη χαμηλής απόδοσης LES ενώ το πρωτεύον τύλιγμα τροφοδοτείται με ρεύμα $I_{1,low} = 10A$. Το όχημα εισέρχεται στη ζώνη υψηλής απόδοσης HES όταν η ισχύς εισόδου γίνει ίση με $P_{in,enter} = 98W$. Εκείνη την χρονική στιγμή - όταν δηλαδή $P_{in} = P_{in,enter}$ - το σύστημα ελέγχου του πρωτεύοντος που παρακολουθεί την ισχύ εισόδου, αυξάνει το ρεύμα σε $I_{1,max} = 25A$. Το όχημα εξέρχεται της HES σε μετατόπιση $20cm$ και για ισχύ εισόδου $P_{in,leave} = 618W$. Όταν $P_{in} = P_{in,leave}$, το σύστημα ελέγχου του πρωτεύοντος μηδενίζει το ρεύμα εισόδου, τερματίζοντας τη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα (5.20). Ισχύς εισόδου-εξόδου και απόδοση συστήματος φόρτισης για HES 40cm

Καθόλη τη διάρκεια της φόρτισης, το σύστημα ελέγχου του δευτερεύοντος διατηρεί την αντίσταση φορτίου σταθερή στα 9.72Ω . Σε αντίθετη περίπτωση, η απόδοση του συστήματος θα ήταν τελείως διαφορετική όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.21.



Σχήμα (5.21). Ισχύς εισόδου-εξόδου και απόδοση συστήματος φόρτισης όταν $R_L=2\Omega$

Παρατηρείται ότι για τιμή της R_L διαφορετική από τη βέλτιστη, η απόδοση δεν μεγιστοποιείται όταν το όχημα βρίσκεται στην HES, αλλά σε δύο σημεία έξω από αυτήν. Επιπλέον η ισχύς εισόδου παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προσδιοριστεί με βάση αυτήν πότε ακριβώς το όχημα βρίσκεται στην HES.

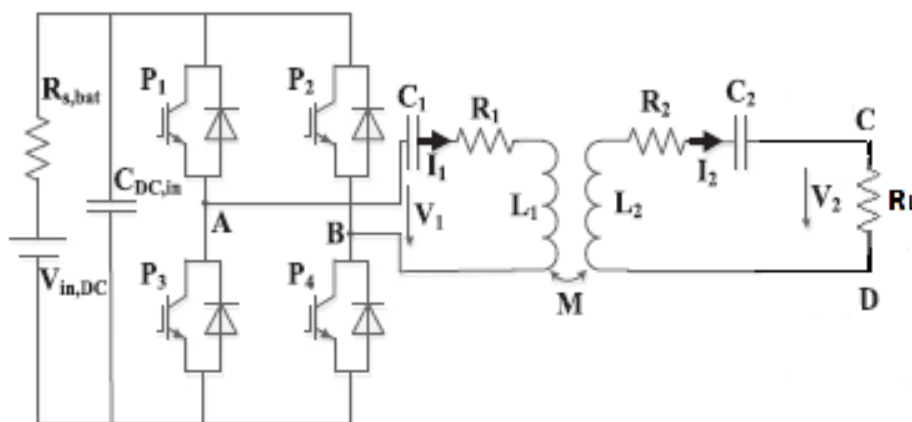
5.Λειτουργία δυναμικής φόρτισης με δύο πρωτεύοντα

5.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το σύστημα δυναμικής φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος όπως αυτό περιγράφηκε στο τέταρτο κεφάλαιο εισάγοντας όμως ένα δεύτερο πρωτεύον τυλιγμά φόρτισης. Το δυναμικό σύστημα φόρτισης με δύο πρωτεύοντα έχει σχεδιαστεί στο λογισμικό Matlab ενώ η λειτουργία του προσομοιώθηκε και αναλύθηκε για τις εξής περιπτώσεις:

- Λειτουργία με δύο ανεξάρτητους αντιστροφείς
- Λειτουργία με δύο αντιστροφείς με τον δεύτερο εξαρτώμενο από τον πρώτο
- Λειτουργία με έναν αντιστροφήα

Για λόγους σχεδιαστικής απλότητας και λειτουργικής ευκολίας το σύστημα έχει σχεδιαστεί και προσομοιωθεί παραλείποντας το κύκλωμα ελέγχου του δευτερεύοντος και θέτοντας στην έξοδο του μεταξύ των σημείων C και D αντίσταση φορτίου R_L βέλτιστης σταθερής τιμής 9.72Ω (σχήμα 5.1).



Σχήμα (5.1). Σχεδίαση του συστήματος με σταθερή αντίσταση φορτίου στην έξοδο

Οι τιμές των στοιχείων του συστήματος έχουν εξαχθεί από τη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.5 και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 5.2. Το σύστημα θεωρείται ότι λειτουργεί σε σταθερή συχνότητα $f = 24.134kHz$. Η προσομοίωση λειτουργίας είναι διακριτού χρόνου με βήμα $s_time = 5 \times 10^9$ sec ενώ η απόσταση μεταξύ των δύο πρωτευόντων τυλιγμάτων θεωρείται ίση με $120cm$ ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες αλληλεπαγωγές μεταξύ των δύο πηνίων.

Στοιχείο	Τιμή
V_{DC}	400V
$C_{DC,m}$	5mF
$R_{DC,m}$	0.2Ω
C_1	168.08nF
C_2	159.24nF
R_1, R_2	0.0451Ω

Σχήμα(5.2). Βασικά στοιχεία του κυκλώματος φόρτισης

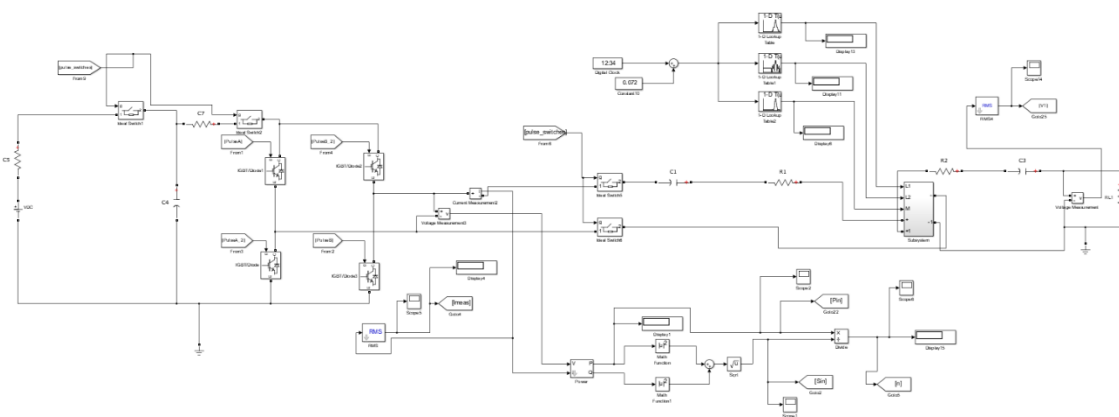
Οι τιμές των επαγωγών του συστήματος για τις διάφορες τιμές οριζόντιας μετατόπισης μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος φαίνονται στο σχήμα 4.12 ενώ στον πίνακα 5.3 δίνονται οι τιμές τους για μετατόπιση X από $-65cm$ έως $65cm$ με χρονικό βήμα δειγματοληψίας $t = 0.0036sec$ που αντιστοιχεί σε διανυόμενη από το όχημα απόσταση $5cm$ έχοντας σαν δεδομένο ότι κινείται με σταθερή ταχύτητα $50km/h$:

X (cm)	L1 (H)	L2 (H)	M (H)
-65	0.000254	0.000255	1.54E-06
-60	0.000254	0.000251	1.99E-06
-55	0.000255	0.000255	2.68E-06
-50	0.000255	0.000251	3.60E-06
-45	0.000255	0.000257	4.70E-06
-40	0.000255	0.000254	5.11E-06
-35	0.000256	0.000255	4.33E-06
-30	0.000257	0.000258	9.90E-08
-25	0.000257	0.000255	8.41E-06
-20	0.000257	0.000253	2.10E-05
-15	0.000259	0.000258	3.62E-05
-10	0.00026	0.000259	5.04E-05
-5	0.000262	0.000262	6.26E-05
0	0.000262	0.000259	6.60E-05
5	0.000262	0.000262	6.26E-05
10	0.00026	0.000259	5.04E-05
15	0.000259	0.000258	3.62E-05
20	0.000257	0.000253	2.10E-05
25	0.000257	0.000255	8.41E-06
30	0.000257	0.000258	9.90E-08
35	0.000256	0.000255	4.33E-06
40	0.000255	0.000254	5.11E-06
45	0.000255	0.000257	4.70E-06
50	0.000255	0.000251	3.60E-06
55	0.000255	0.000255	2.68E-06
60	0.000254	0.000251	1.99E-06
65	0.000254	0.000255	1.54E-06

Σχήμα(5.3). Τιμές επαγωγών για διάφορες μετατοπίσεις του δευτερεύοντος σε σχέση με το πρωτεύον. Η περιοχή φόρτισης θεωρείται από $X=-60cm$ έως $X=+60cm$

5.2.Λειτουργία του συστήματος με δύο ανεξάρτητους αντιστροφείς

Στην περίπτωση των δύο ανεξάρτητων αντιστροφέων, το κάθε πρωτεύον τύλιγμα οδηγείται από έναν αντιστροφέα που λειτουργεί τελείως ανεξάρτητα από τον πρώτο. Το σύστημα ελέγχου του κάθε πρωτεύοντος είναι ακριβώς αυτό που περιγράφηκε εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια. Το ρεύμα πρωτεύοντος I_1 διατηρείται στα 10A μέχρι η ισχύς εισόδου στο σύστημα να φτάσει τα 98W πράγμα που σηματοδοτεί την είσοδο του οχήματος στην HES και την αύξηση του I_1 στα 25A .



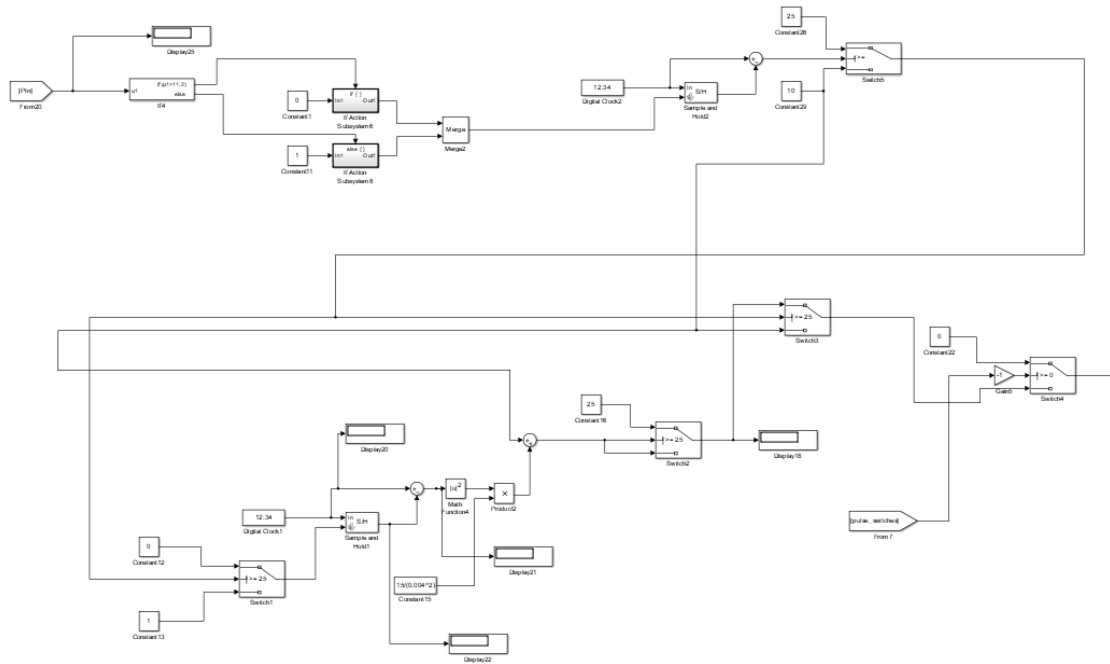
Σχήμα(5.4.1). Μέρος του κυκλώματος φόρτισης

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι προκειμένου να αποφευχθεί η απότομη μεταβολή του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον αυξάνουμε το ρεύμα σταδιακά από τα 10 στα 25A σύμφωνα με την

συνάρτηση $I_{rms}(t) = \frac{15}{(0.004)^2}t + 10$. Η σταδιακή αύξηση της τιμής του ρεύματος ξεκινά όταν

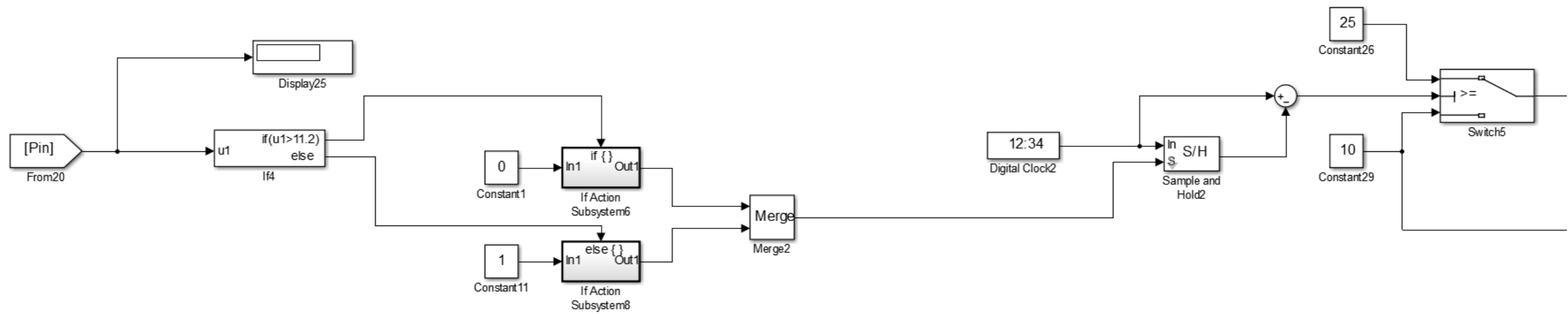
η ισχύς εισόδου ξεπεράσει τα 11.2W . Κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος κοντά στα πρωτεύοντα η ισχύς εισόδου παρουσιάζει πολλές αυξομειώσεις. Για το λόγο αυτό η τιμή της ισχύος θα πρέπει να παραμείνει πάνω από αυτό το όριο για τουλάχιστον 1msec ώστε να είναι βέβαιο ότι πλησιάζει την HES.

Τη στιγμή που το ρεύμα εισόδου φτάνει τα 25A και $P_{in,enter} = 98W$, το όχημα μπαίνει στην HES. Όταν η ισχύς εισόδου λάβει τιμή μικρότερη από $P_{in,enter} = 618W$ ενώ ρεύμα εισόδου λαμβάνει τιμές $I_1 \geq 25A$, το κύκλωμα ελέγχου ανιχνεύει την έξοδο του οχήματος από την HES τερματίζοντας τη φόρτιση ($I_1_ref = 0$, pulse_switches=0).

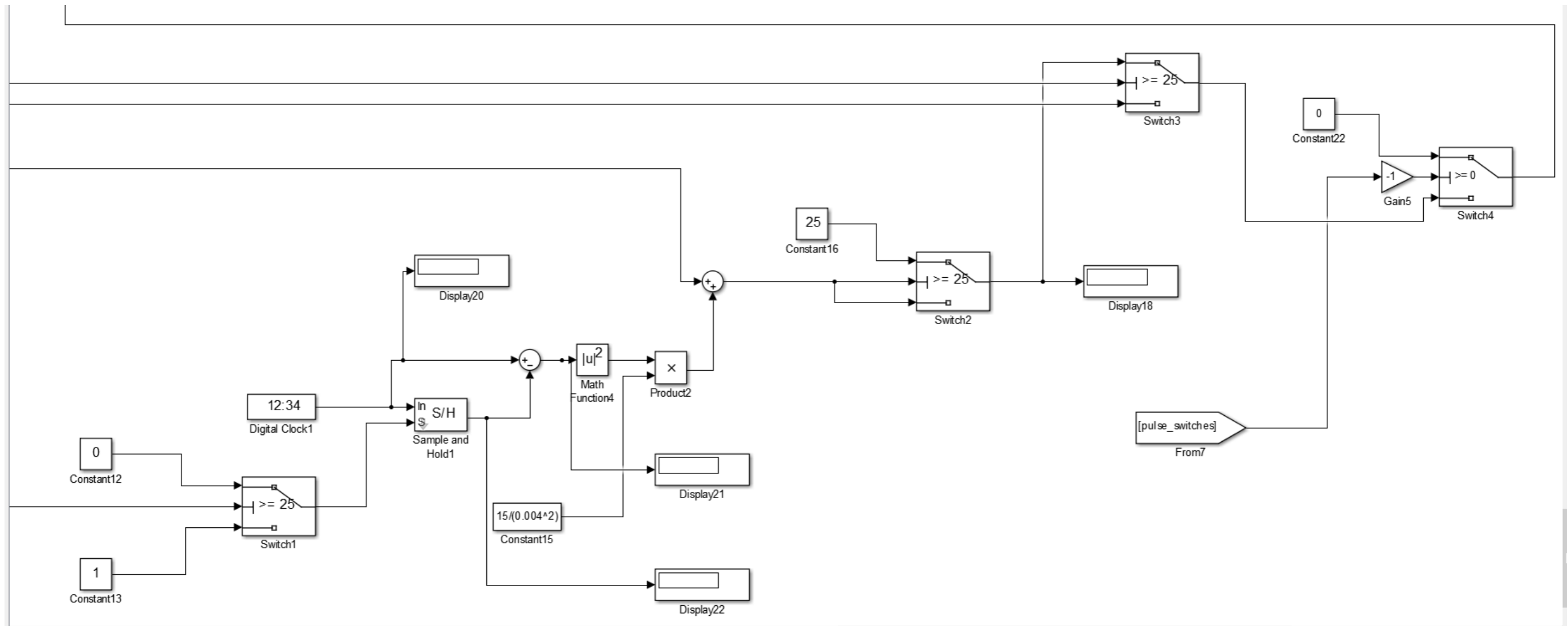


Σχήμα(5.5). Ανίχνευση εισόδου του οχήματος στην HES και σταδιακή αύξηση του ρεύματος στο πρωτεύον

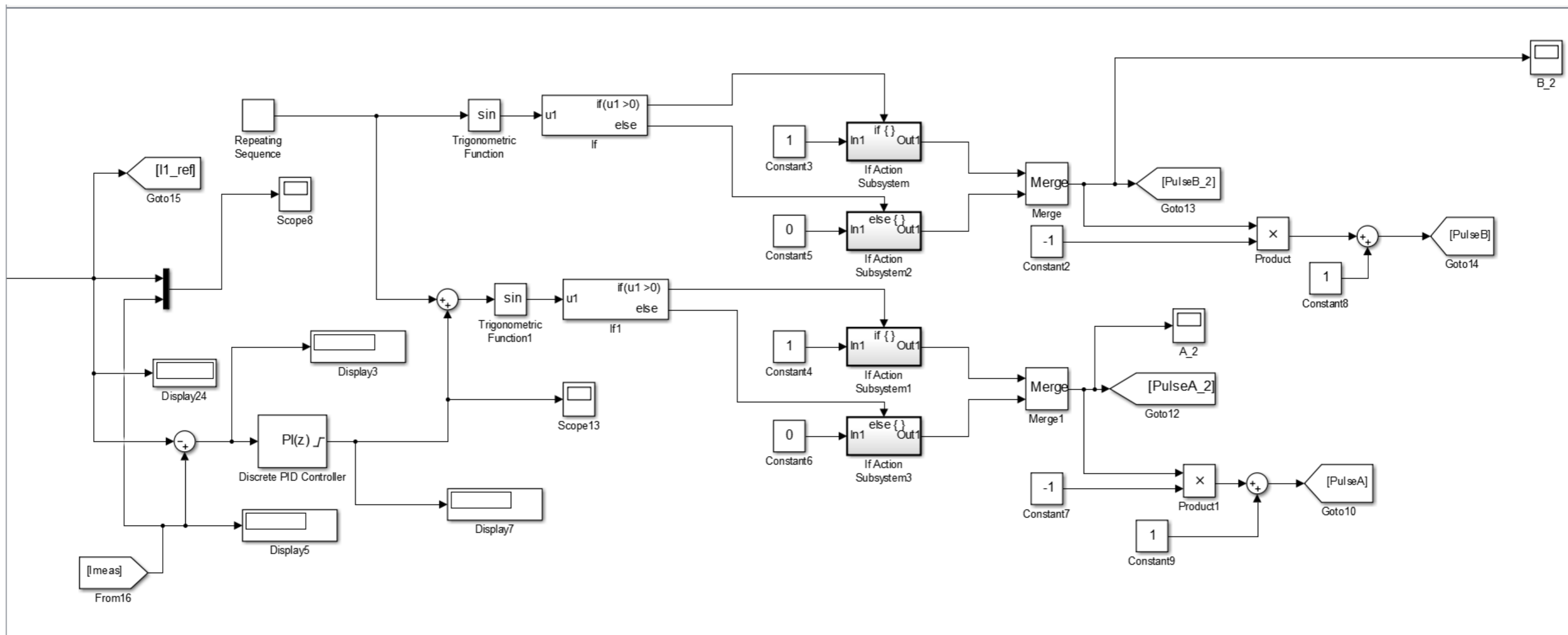
Στα σχήματα 5.7 και 5.13 παρουσιάζονται δύο πίνακες με τις τιμές των επαγωγών L_1, L_2, M με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις του οχήματος και διανύσιμη απόσταση, ένας για κάθε πρωτεύον. Οι τιμές δίνονται με χρονικό βήμα δειγματοληψίας $t = 0.0036 \text{ sec}$ ενώ οι ενδιαμέσες τιμές υπολογίζονται από το πρόγραμμα με γραμμική παρεμβολή. Ουσιαστικά προσομοιώνουμε το ίδιο κύκλωμα δύο φορές εισάγοντας τις τιμές των επαγωγών όπως αυτές μεταβάλλονται κατά την κίνηση του οχήματος στην περιοχή φόρτισης του αντίστοιχου πρωτεύοντος. Το πρώτο θεωρούμε ότι είναι εγκατεστημένο σε απόσταση 60 cm από την αφετηρία της κίνησης του οχήματος ενώ το δεύτερο βρίσκεται σε απόσταση 180 cm . Το ρεύμα εισόδου μετράται και συγκρίνεται με το επιθυμητό ρεύμα αναφοράς I_{1_ref} . Η διαφορά τους διοχετεύεται σε έναν PID ελεγκτή που δίνει στην έξοδο την κατάλληλη γωνία φάσης.



Σχήμα 5.5.1 Ανίχνευση εισόδου του οχήματος στην HES (λεπτομέρεια)



Σχήμα 5.5.2. Σταδιακή αύξηση του ρεύματος στο πρωτεύον (λεπτομέρεια)

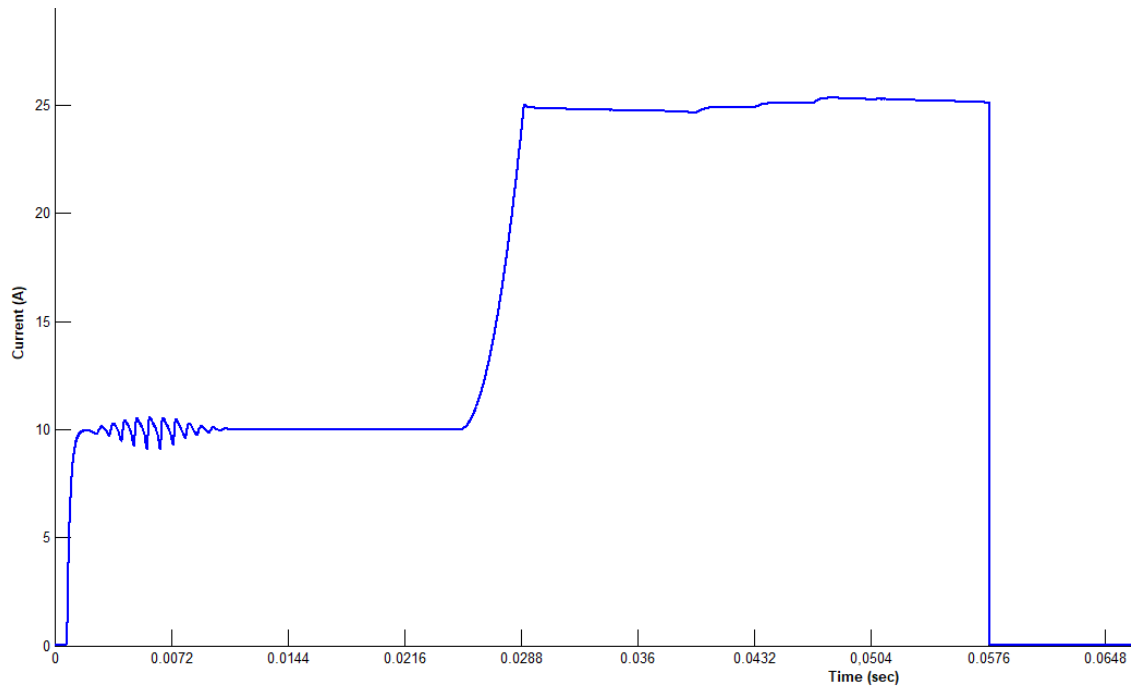


Σχήμα(5.6). Έλεγχος τάσης πρωτεύοντος με ρύθμιση γωνίας φάσης

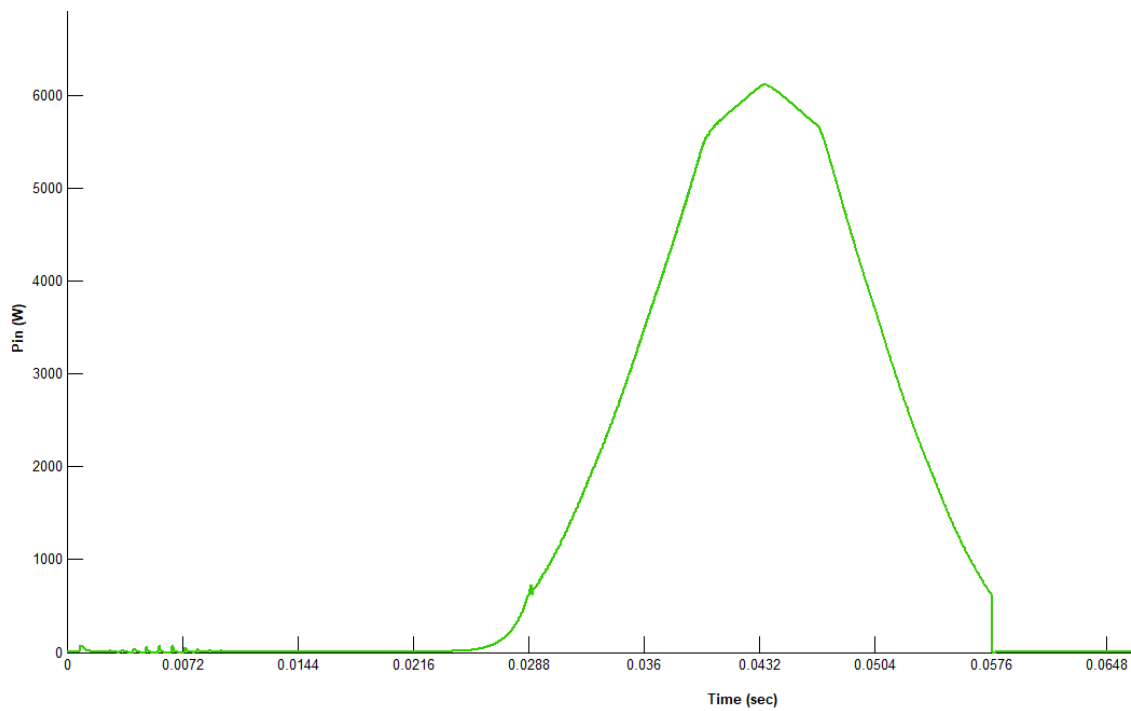
	Distance (cm)	Displacement (cm)	Time (s)	L1	L2	M	Iref
	-5	-65	-0.0036	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
LES_1	0	-60	0	0.000254	0.000251	1.99E-06	10
	5	-55	0.0036	0.000255	0.000255	2.68E-06	10
	10	-50	0.0072	0.000255	0.000251	3.60E-06	10
	15	-45	0.0108	0.000255	0.000257	4.70E-06	10
	20	-40	0.0144	0.000255	0.000254	5.11E-06	10
	25	-35	0.018	0.000256	0.000255	4.33E-06	10
	30	-30	0.0216	0.000257	0.000258	9.90E-08	10
	35	-25	0.0252	0.000257	0.000255	8.41E-06	10
HES_1	40	-20	0.0288	0.000257	0.000253	2.10E-05	25
	45	-15	0.0324	0.000259	0.000258	3.62E-05	25
	50	-10	0.036	0.00026	0.000259	5.04E-05	25
	55	-5	0.0396	0.000262	0.000262	6.26E-05	25
	60	0	0.0432	0.000262	0.000259	6.60E-05	25
	65	5	0.0468	0.000262	0.000262	6.26E-05	25
	70	10	0.0504	0.00026	0.000259	5.04E-05	25
	75	15	0.054	0.000259	0.000258	3.62E-05	25
80	20	0.0576	0.000257	0.000253	2.10E-05	25	
LES_1	85	25	0.0612	0.000257	0.000255	8.41E-06	0
	90	30	0.0648	0.000257	0.000258	9.90E-08	0
	95	35	0.0684	0.000256	0.000255	4.33E-06	0
	100	40	0.072	0.000255	0.000254	5.11E-06	0
	105	45	0.0756	0.000255	0.000257	4.70E-06	0
	110	50	0.0792	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	115	55	0.0828	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	120	60	0.0864	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	125	65	0.09	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	130	70	0.0936	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	135	75	0.1008	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	140	80	0.1044	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	145	85	0.108	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	150	90	0.1116	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	155	95	0.1152	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	160	100	0.1188	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	165	105	0.1224	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	170	110	0.126	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	175	115	0.1296	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	180	120	0.1332	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	185	125	0.1368	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	190	130	0.1404	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	195	135	0.144	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	200	140	0.1476	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	205	145	0.1512	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	210	150	0.1548	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	215	155	0.1584	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	220	160	0.162	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	225	165	0.1656	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	230	170	0.1692	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	235	175	0.1728	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	240	180	0.1764	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	245	185	0.18	0.000255	0.000251	3.60E-06	0

Σχήμα(5.7). Τιμές επαγωγών και ρεύματος αναφοράς $I_{1,ref}$ του κυκλώματος ελέγχου για την προσομοίωση της φόρτισης του οχήματος από το πρώτο πρωτεύον

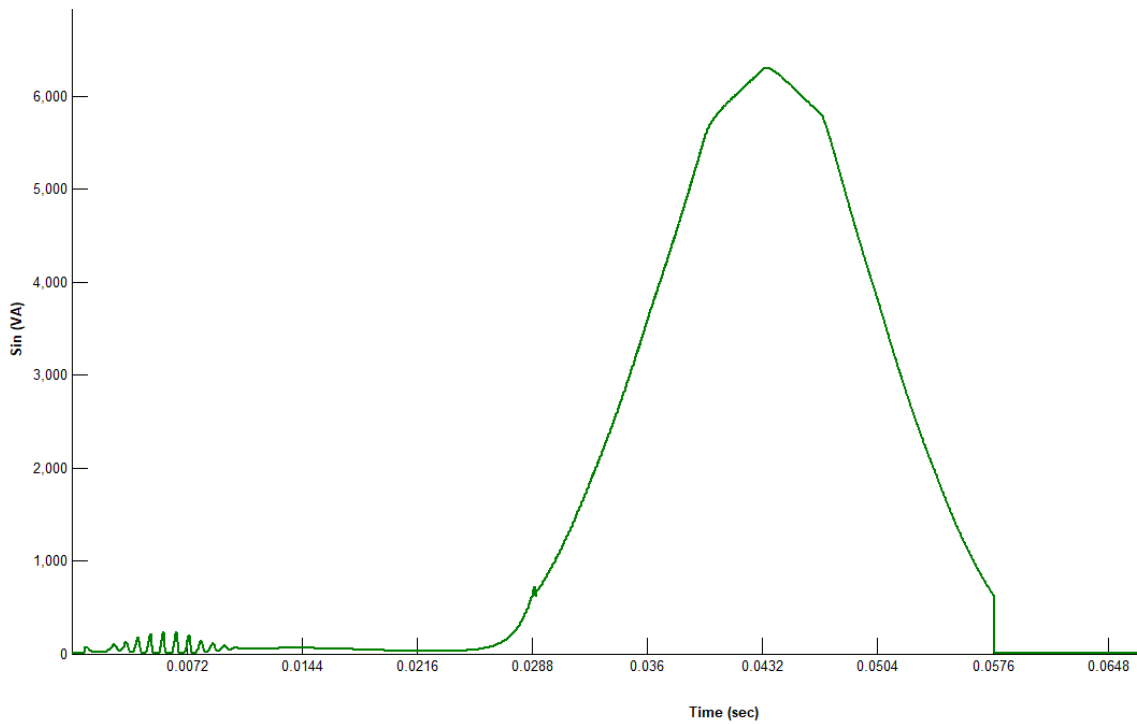
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα ισχύος, ρεύματος που προκύπτουν από την προσομοίωση φόρτισης του δευτερεύοντος από το πρώτο πρωτεύον:



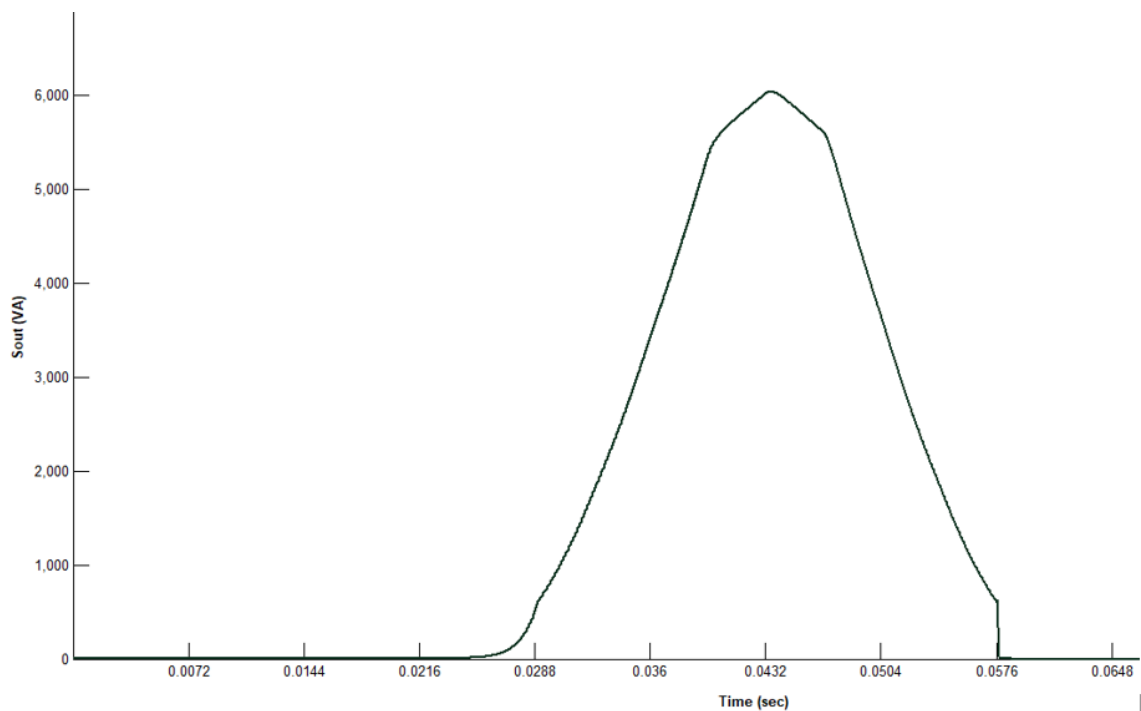
Σχήμα(5.8). Ρεύμα λειτουργίας πρώτου πρωτεύοντος τυλίγματος



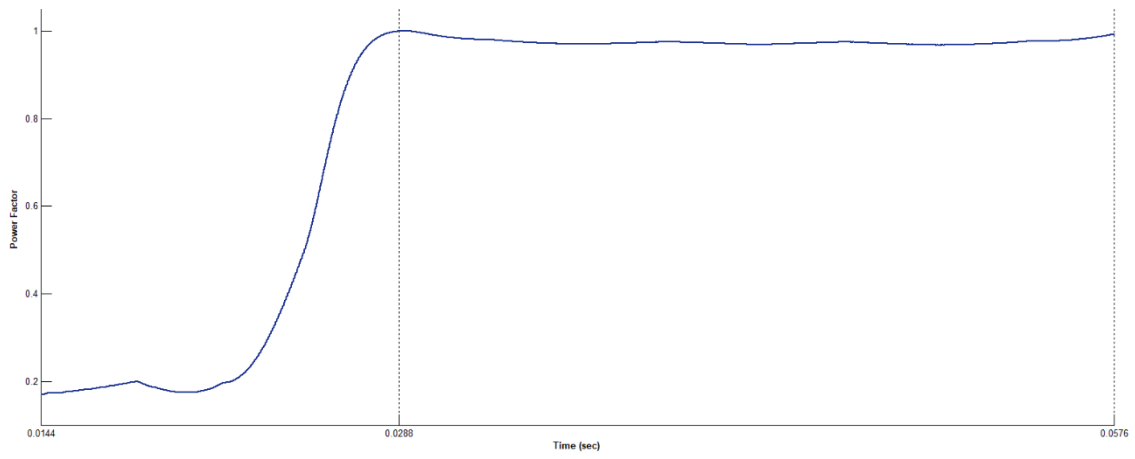
Σχήμα(5.9). Ενεργός ισχύς εισόδου στο σύστημα φόρτισης καθώς το όχημα περνάει πάνω από το πρώτο πρωτεύον



Σχήμα(5.10). Φαινόμενη ισχύς εισόδου στο σύστημα φόρτισης καθώς το όχημα περνάει πάνω από το πρώτο πρωτεύον



Σχήμα(5.11). Φαινόμενη ισχύς εξόδου στο σύστημα φόρτισης καθώς το όχημα περνάει πάνω από το πρώτο πρωτεύον

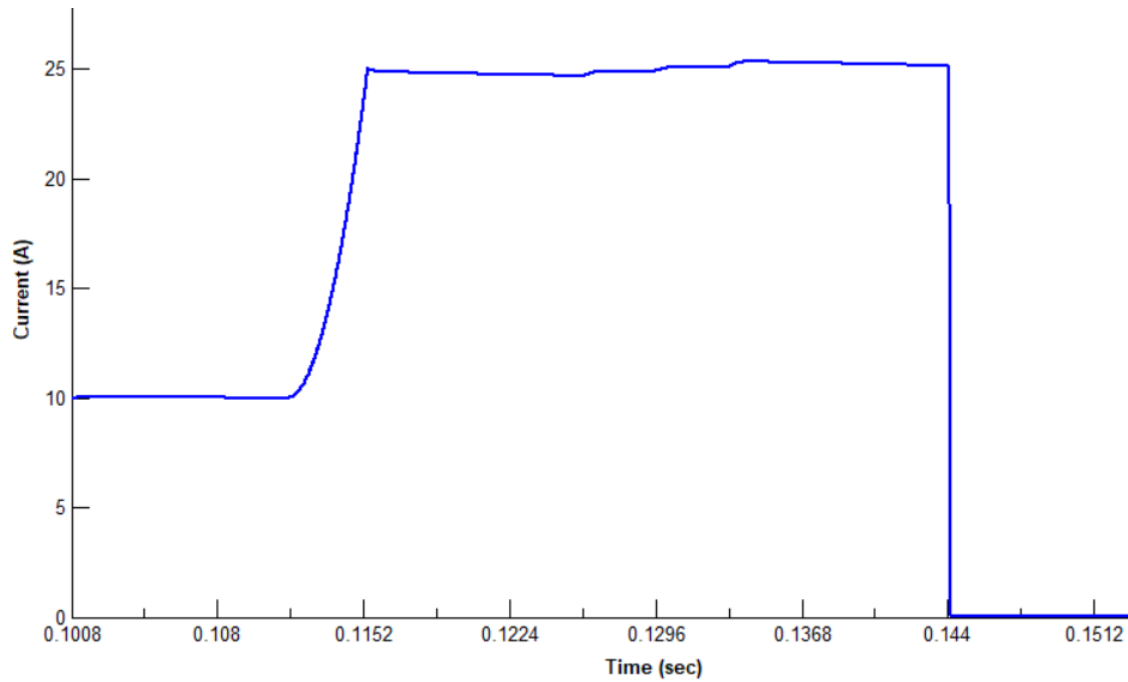


Σχήμα(5.12). Συντελεστής απόδοσης ισχύος εισόδου στο πρώτο πρωτεύον

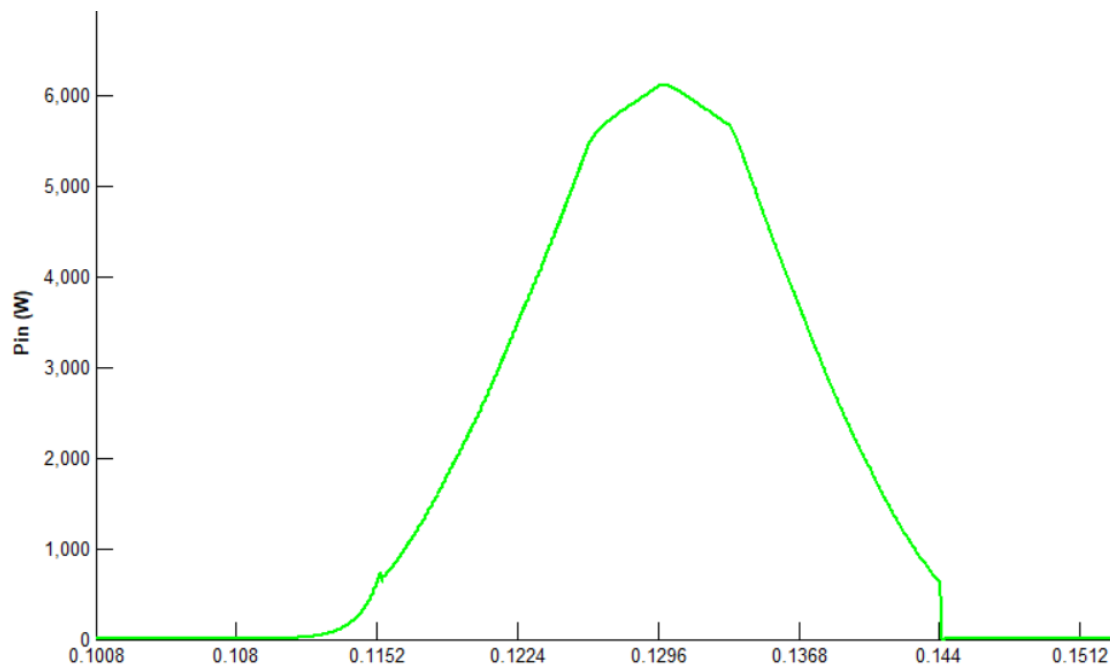
	Distance (cm)	Displacement (cm)	Time (s)	L1	L2	M	Iref
	-5	-185	-0.0036	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	0	-180	0	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	5	-175	0.0036	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	10	-170	0.0072	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	15	-165	0.0108	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	20	-160	0.0144	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	25	-155	0.018	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	30	-150	0.0216	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	35	-145	0.0252	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	40	-140	0.0288	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	45	-135	0.0324	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	50	-130	0.036	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	55	-125	0.0396	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	60	-120	0.0432	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	65	-115	0.0468	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	70	-110	0.0504	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	75	-105	0.054	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	80	-100	0.0576	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	85	-95	0.0612	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	90	-90	0.0648	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	95	-85	0.0684	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	100	-80	0.072	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	105	-75	0.0756	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	110	-70	0.0792	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
	115	-65	0.0828	0.000254	0.000255	1.54E-06	10
LES_2	120	-60	0.0864	0.000254	0.000251	1.99E-06	10
	125	-55	0.09	0.000255	0.000255	2.68E-06	10
	130	-50	0.0936	0.000255	0.000251	3.60E-06	10
	135	-45	0.0972	0.000255	0.000257	4.70E-06	10
	140	-40	0.1008	0.000255	0.000254	5.11E-06	10
	145	-35	0.1044	0.000256	0.000255	4.33E-06	10
	150	-30	0.108	0.000257	0.000258	9.90E-08	10
	155	-25	0.1116	0.000257	0.000255	8.41E-06	10
HES_2	160	-20	0.1152	0.000257	0.000253	2.10E-05	25
	165	-15	0.1188	0.000259	0.000258	3.62E-05	25
	170	-10	0.1224	0.00026	0.000259	5.04E-05	25
	175	-5	0.126	0.000262	0.000262	6.26E-05	25
	180	0	0.1296	0.000262	0.000259	6.60E-05	25
	185	5	0.1332	0.000262	0.000262	6.26E-05	25
	190	10	0.1368	0.00026	0.000259	5.04E-05	25
	195	15	0.1404	0.000259	0.000258	3.62E-05	25
200	20	0.144	0.000257	0.000253	2.10E-05	25	
LES_2	205	25	0.1476	0.000257	0.000255	8.41E-06	0
	210	30	0.1512	0.000257	0.000258	9.90E-08	0
	215	35	0.1548	0.000256	0.000255	4.33E-06	0
	220	40	0.1584	0.000255	0.000254	5.11E-06	0
	225	45	0.162	0.000255	0.000257	4.70E-06	0
	230	50	0.1656	0.000255	0.000251	3.60E-06	0
	235	55	0.1692	0.000255	0.000255	2.68E-06	0
	240	60	0.1728	0.000254	0.000251	1.99E-06	0
	245	65	0.1764	0.000254	0.000255	1.54E-06	0

Σχήμα(5.13). Τιμές επαγωγών και ρεύματος αναφοράς $I_{1,ref}$ του κυκλώματος ελέγχου για την προσομοίωση της φόρτισης του οχήματος από το δεύτερο πρωτεύον

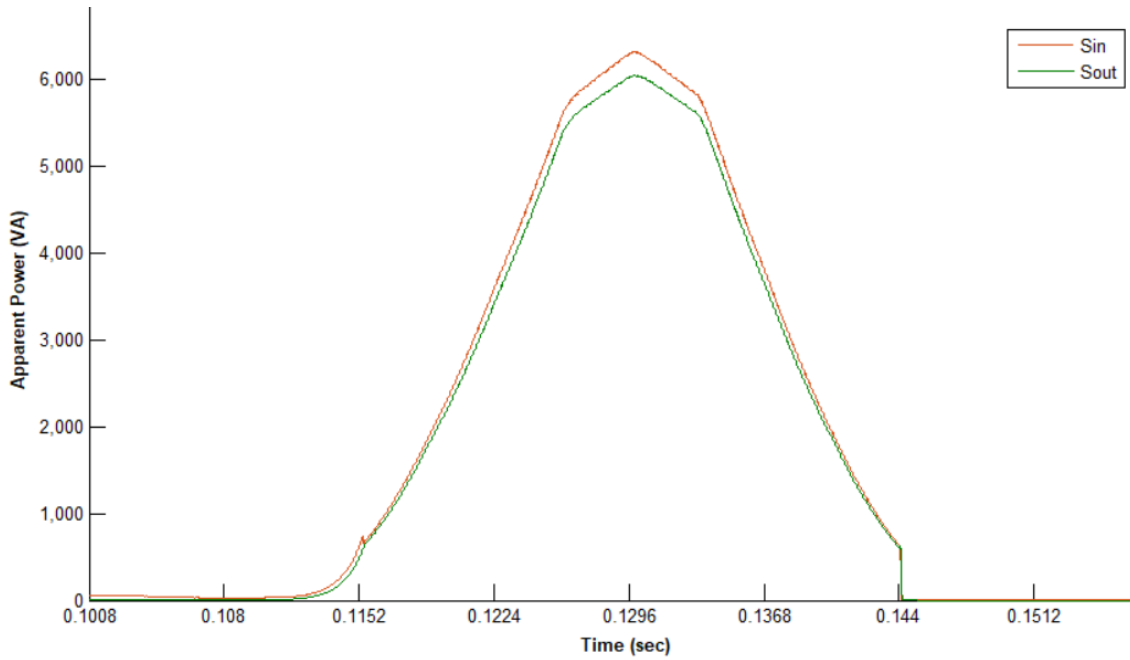
Τα διαγράμματα ισχύος, ρεύματος που προκύπτουν από την προσομοίωση φόρτισης του δευτερεύοντος από το δεύτερο πρωτεύον διαμορφώνονται ως εξής:



Σχήμα(5.14). Ρεύμα λειτουργίας δευτέρου πρωτεύοντος τυλίγματος



Σχήμα(5.15). Ενεργός ισχύς εισόδου στο σύστημα φόρτισης καθώς το όχημα περνάει πάνω από το δεύτερο πρωτεύον



Σχήμα(5.16). Φαινόμενη ισχύς εισόδου και εξόδου στο σύστημα φόρτισης καθώς το όχημα περνάει πάνω από το δεύτερο πρωτεύον

Η απόδοση ενέργειας του συστήματος για τις περιοχές υψηλής απόδοσης του πρώτου και του δεύτερου πρωτεύοντος τυλίγματος HES1, HES2 υπολογίζεται ως εξής:

$$eff_{energy} = \frac{\int_{t_{enter}(HES1)}^{t_{leave}(HES1)} S_{out1}(t)dt + \int_{t_{enter}(HES2)}^{t_{leave}(HES2)} S_{out2}(t)dt}{\int_{t_{enter}(HES1)}^{t_{leave}(HES1)} S_{in1}(t)dt + \int_{t_{enter}(HES2)}^{t_{leave}(HES2)} S_{in2}(t)dt} \quad (4.36)$$

$$eff_{energy} = \frac{\int_{0.0288}^{0.0576} S_{out1}(t)dt + \int_{0.1152}^{0.144} S_{out2}(t)dt}{\int_{0.0288}^{0.0576} S_{in1}(t)dt + \int_{0.1152}^{0.144} S_{in2}(t)dt} = \frac{(101.3139 + 101.3114)VA \cdot s}{(105.7474 + 105.7478)VA \cdot s} \Rightarrow$$

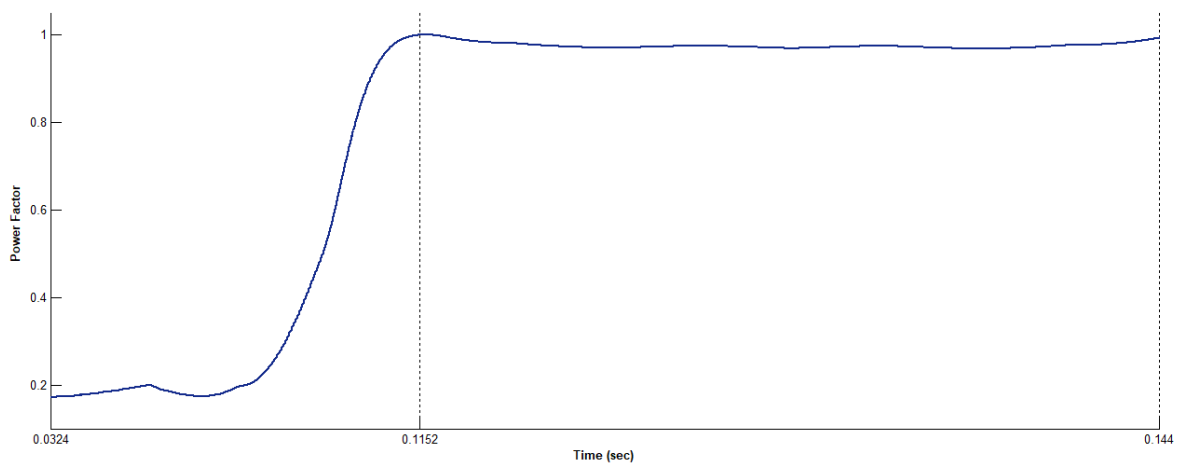
$$\Rightarrow eff_{energyHES} \simeq 95.81\% \quad (4.37)$$

Η συνολική απόδοση ενέργειας του συστήματος είναι:

$$eff_{energytotal} = \frac{\int S_{out1}(t)dt + \int S_{out2}(t)dt}{\int S_{in1}(t)dt + \int S_{in2}(t)dt} \quad (4.38)$$

$$eff_{energytotal} = \frac{(101.9661+101.9988)VA \cdot s}{(107.7154+107.8857)VA \cdot s} \Rightarrow$$

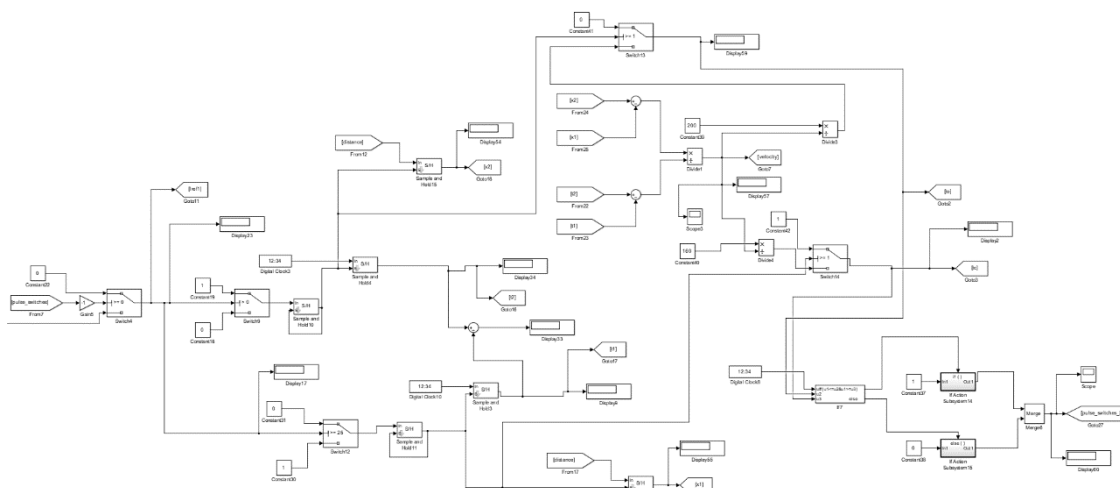
$$eff_{energytotal} \simeq 94.60\% \quad (4.39)$$



Σχήμα(5.17). Συντελεστής απόδοσης ισχύος εισόδου στο δεύτερο πρωτεύον

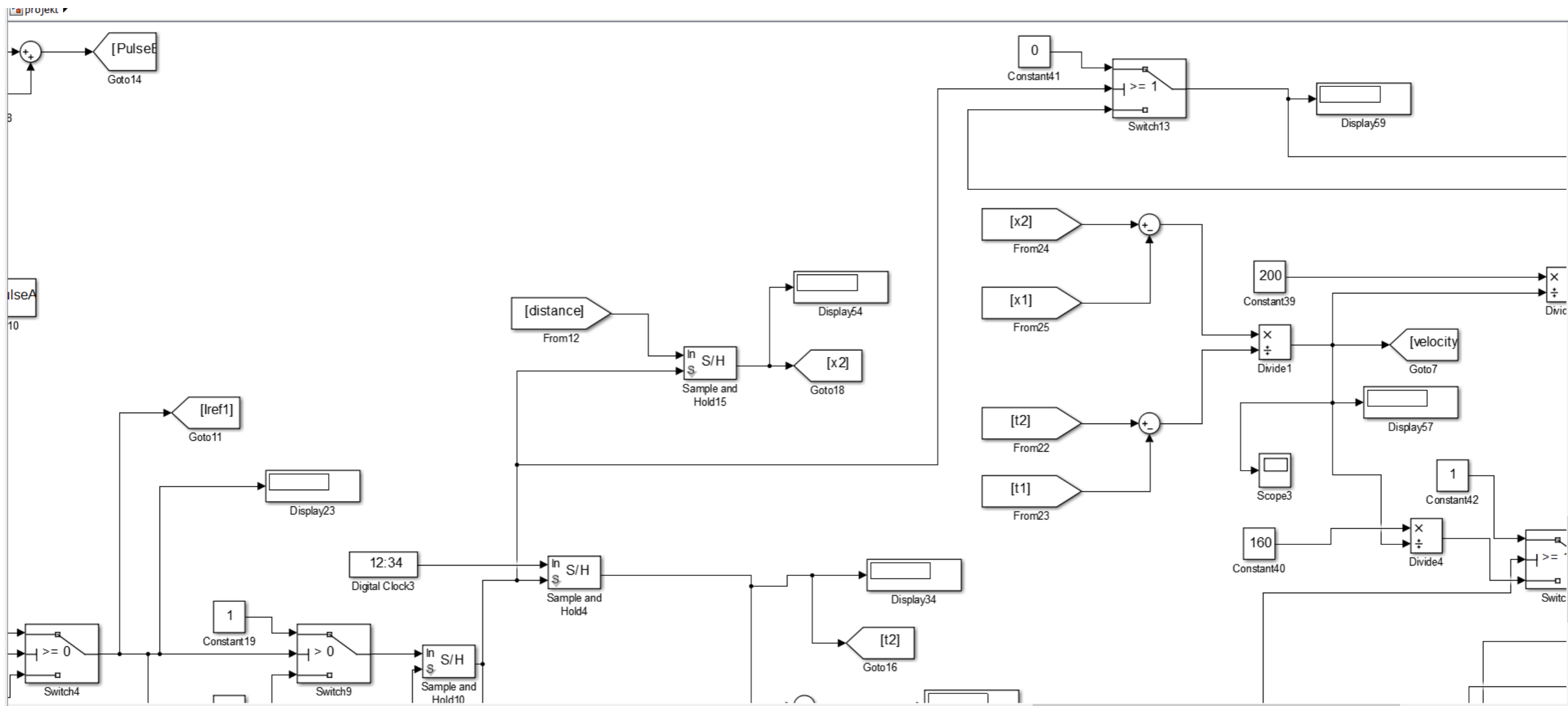
5.3.Λειτουργία του συστήματος με δύο αντιστροφείς με τον δεύτερο εξαρτώμενο από τον πρώτο

Αν και η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος δεν εξαρτάται από το ρεύμα του πρωτεύοντος όπως παρατηρείται και από τη σχέση 3.71, οι απώλειες του συστήματος σε VA εξαρτώνται από αυτό. Για το λόγο αυτό είναι επιθυμητό το δεύτερο πρωτεύον να λειτουργεί μόνο στην περιοχή υψηλής απόδοσης με ρεύμα 25A. Με τον τρόπο αυτό περιορίζονται οι απώλειες αέργου ισχύος. Εφόσον η θέση του κάθε πρωτεύοντος είναι γνωστή, γνωρίζοντας την ταχύτητα μπορούμε να ξέρουμε την χρονική στιγμή που το όχημα εισέρχεται στην HES του δεύτερου πρωτεύοντος αλλά και την χρονική στιγμή που εξέρχεται από αυτήν. Λαμβάνοντας την πληροφορία αυτή από το πρώτο πρωτεύον ελέγχουμε κατάλληλα τη λειτουργία του δεύτερου αντιστροφέα έτσι ώστε το δεύτερο πρωτεύον να τροφοδοτείται με 25A όταν το όχημα βρίσκεται στην HES ενώ στις LES το ρεύμα του να είναι μηδέν.

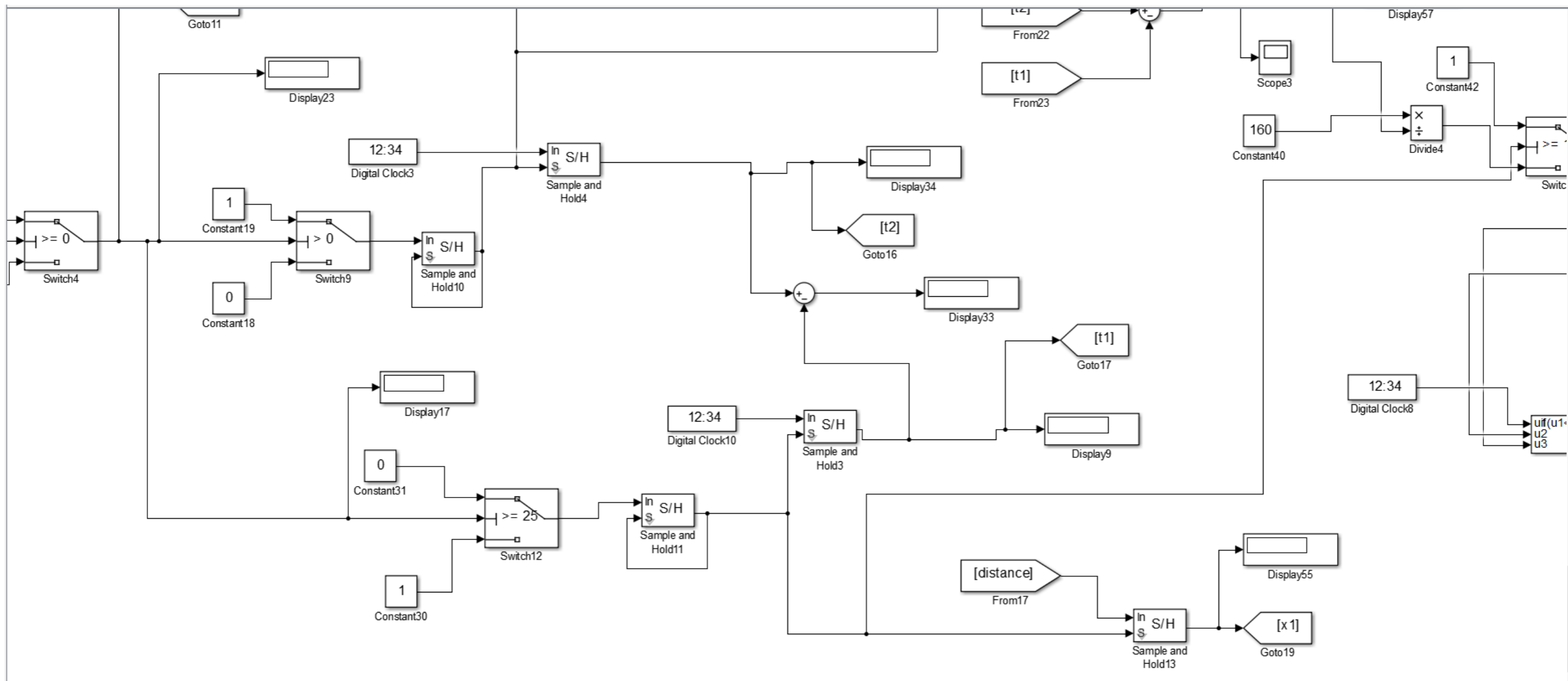


Σχήμα(5.18). Υπολογισμός της ταχύτητας του οχήματος και έλεγχος διακοπών κυκλώματος του δεύτερου πρωτεύοντος

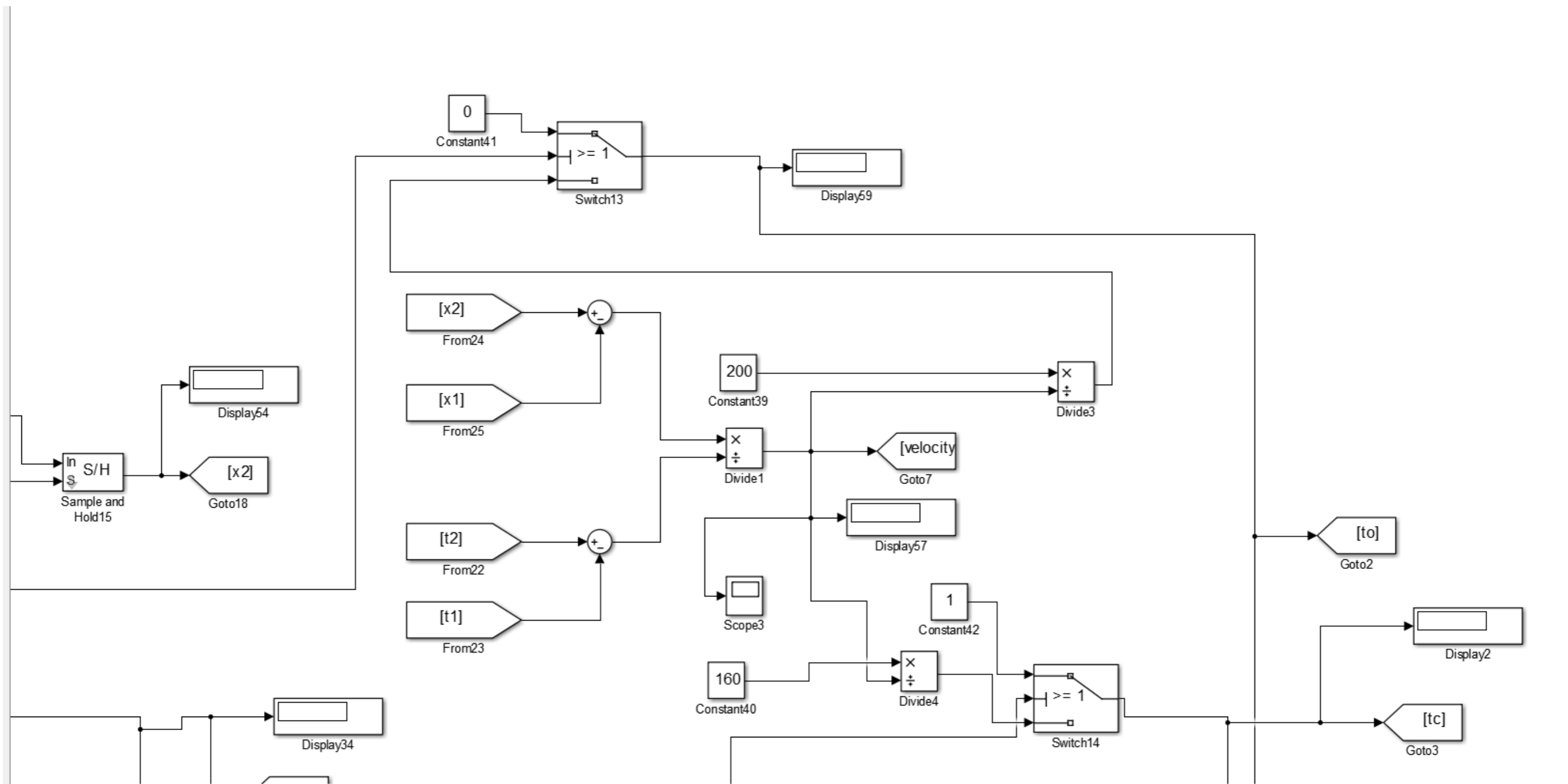
Τα διαγράμματα ισχύος ρεύματος για τη φόρτιση του οχήματος από το πρώτο πρωτεύον θα όμοια με αυτά στην περίπτωση των ανεξάρτητων αντιστροφών.



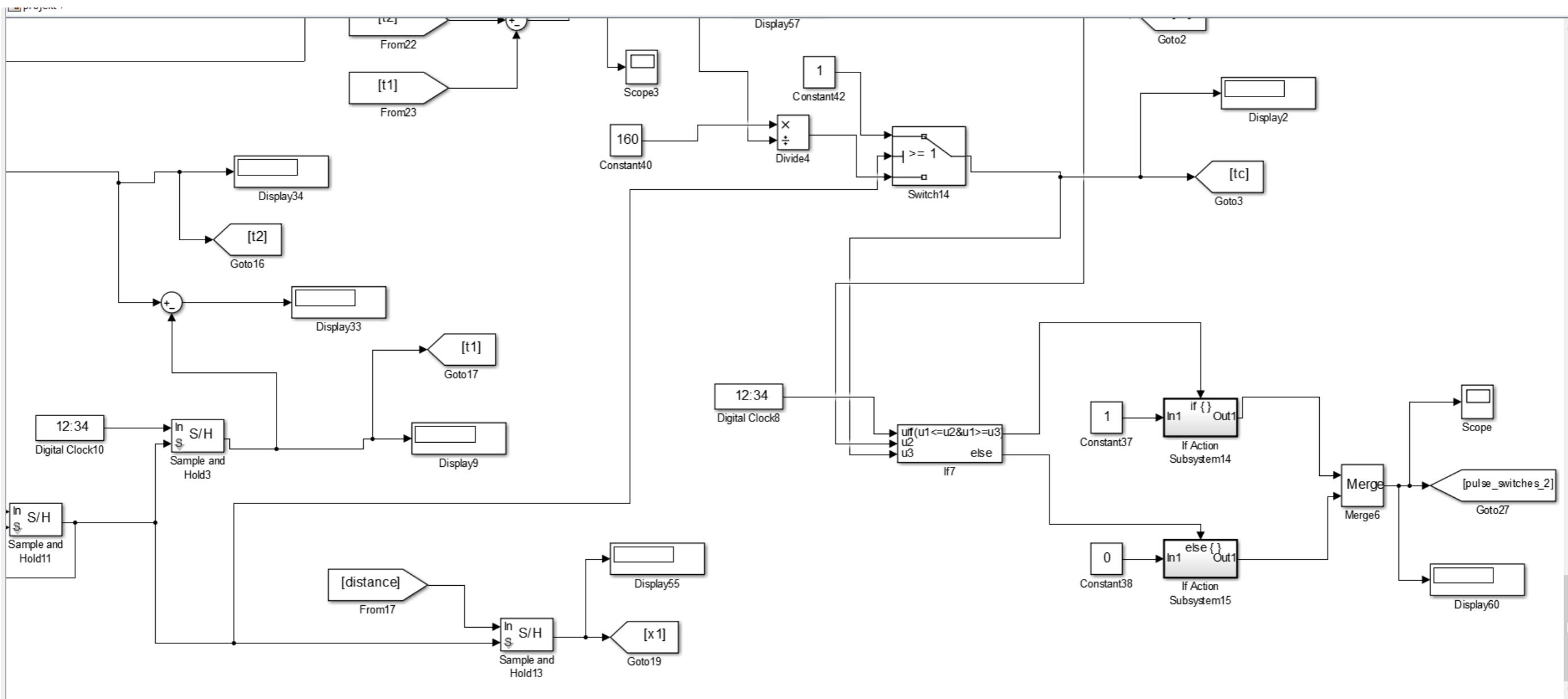
Σχήμα(5.18.1). Υπολογισμός της ταχύτητας του οχήματος και έλεγχος διακοπών κυκλώματος του δεύτερου πρωτεύοντος (λεπτομέρεια)



Σχήμα(5.18.2). Υπολογισμός της ταχύτητας του οχήματος και έλεγχος διακοπών κυκλώματος του δεύτερου πρωτεύοντος (λεπτομέρεια)

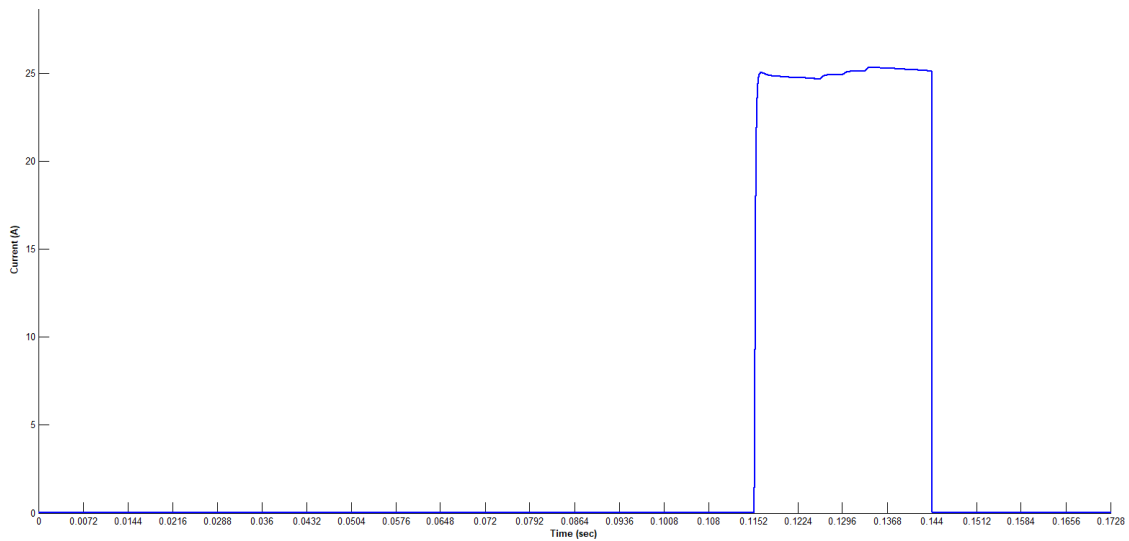


Σχήμα(5.18.3). Υπολογισμός της ταχύτητας του οχήματος και έλεγχος διακοπών κυκλώματος του δεύτερου πρωτεύοντος (λεπτομέρεια)

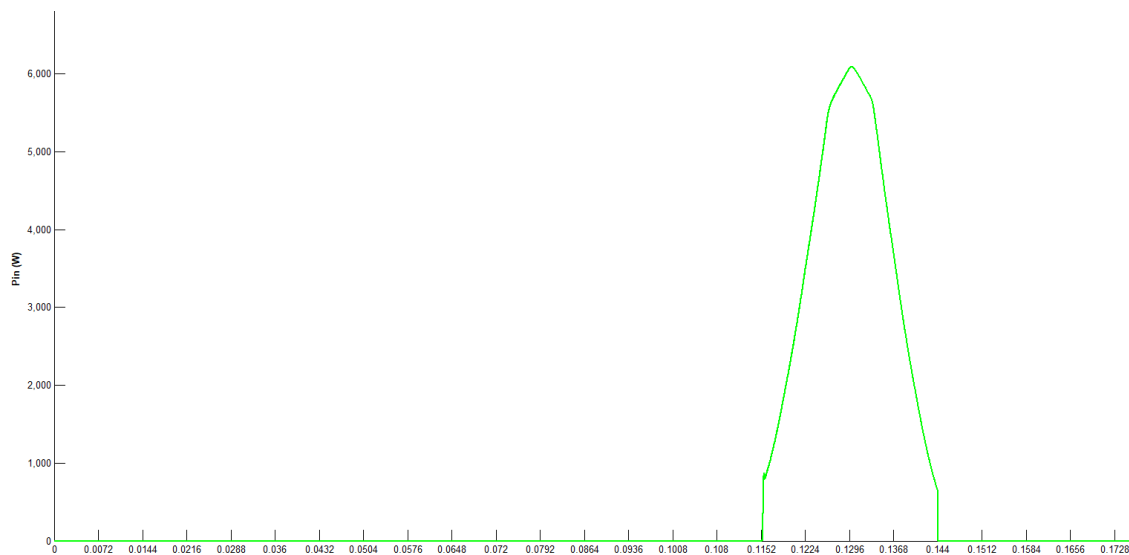


Σχήμα(5.18.4). Υπολογισμός της ταχύτητας του οχήματος και έλεγχος διακοπών κυκλώματος του δεύτερου πρωτεύοντος (λεπτομέρεια)

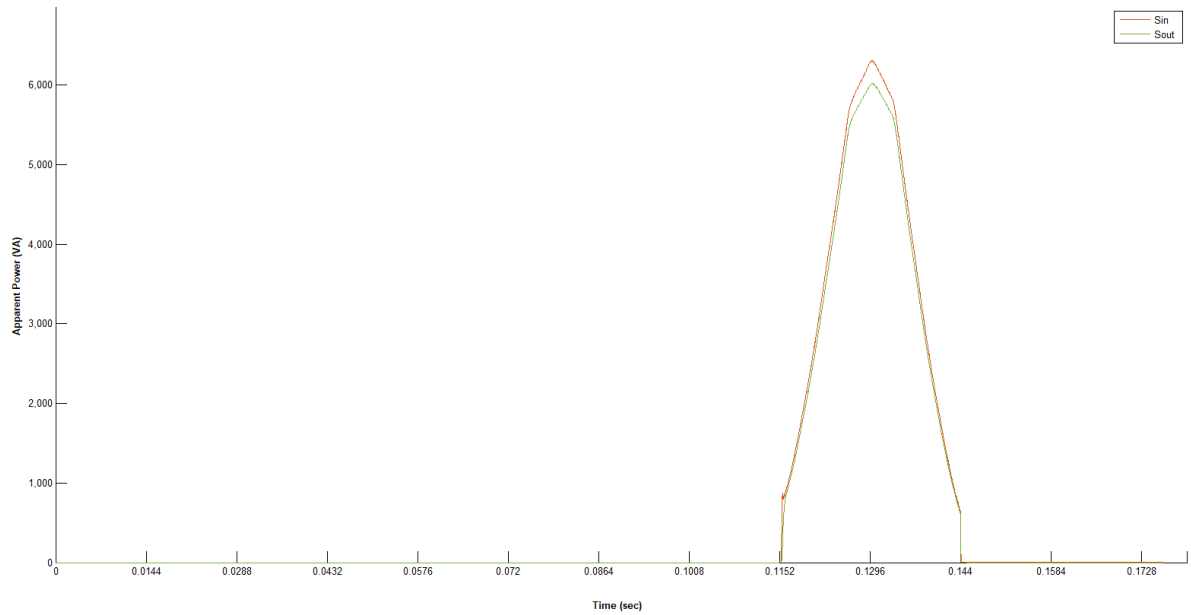
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα ισχύος, ρεύματος που προκύπτουν από την προσομοίωση φόρτισης του δευτερεύοντος από το δεύτερο πρωτεύον:



Σχήμα(5.19). Ρεύμα λειτουργίας δεύτερου πρωτεύοντος τυλίγματος



Σχήμα(5.20). Ενεργός ισχύς εισόδου στο σύστημα φόρτισης καθώς το όχημα περνάει πάνω από το δεύτερο πρωτεύον



Σχήμα(5.21). Φαινόμενη ισχύς εισόδου και εξόδου στο σύστημα φόρτισης καθώς το όχημα περνάει πάνω από το δεύτερο πρωτεύον

Ακολούθως υπολογίζεται η συνολική απόδοση ενέργειας του συστήματος για τις περιοχές υψηλής απόδοσης του πρώτου και του δεύτερου πρωτεύοντος τυλίγματος HES1, HES2:

$$\begin{aligned}
 eff_{energyHES} &= \frac{\int_{0.0288}^{0.0576} S_{out1}(t)dt + \int_{0.1152}^{0.144} S_{out2}(t)dt}{\int_{0.0288}^{0.0576} S_{in1}(t)dt + \int_{0.1152}^{0.144} S_{in2}(t)dt} = \frac{(101.3139 + 101.0199)VA \cdot s}{(105.7474 + 105.6071)VA \cdot s} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow eff_{energyHES} = 95.73\% \quad (4.40)
 \end{aligned}$$

Η συνολική απόδοση ενέργειας του συστήματος θα είναι:

$$\begin{aligned}
 eff_{energytotal} &= \frac{\int S_{out1}(t)dt + \int S_{out2}(t)dt}{\int S_{in1}(t)dt + \int S_{in2}(t)dt} = \frac{(101.9661 + 101.0199)VA \cdot s}{(107.7154 + 105.6071)VA \cdot s} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow eff_{energytotal} \simeq 95.15\% \quad (4.41)
 \end{aligned}$$

5.4. Λειτουργία του συστήματος με έναν αντιστροφέα

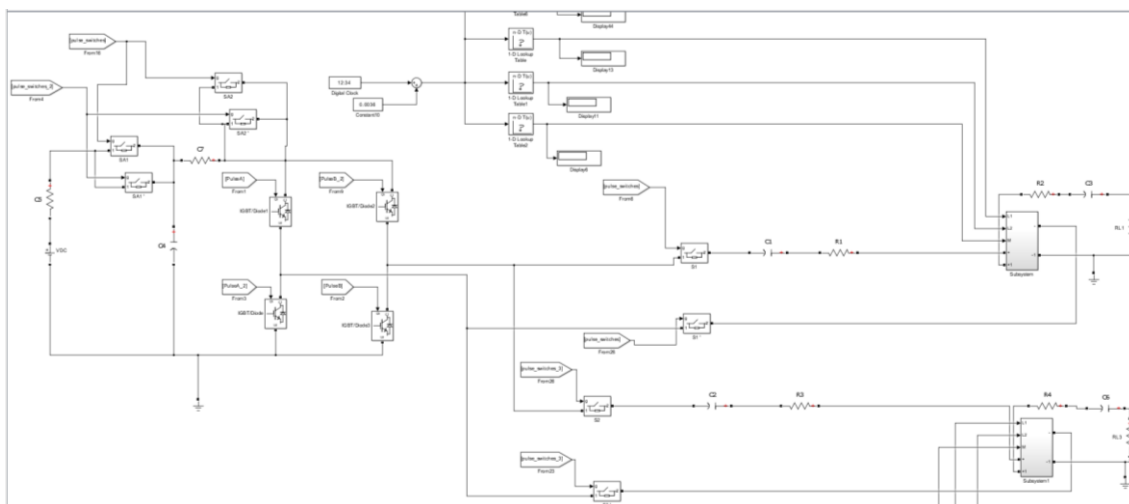
Στην περίπτωση λειτουργίας του συστήματος με κοινό αντιστροφέα και για τα δύο πρωτεύοντα, το σύστημα λειτουργεί με δύο ζεύγη παράλληλων διακοπών στην DC πλευρά του αντιστροφέα. Στο σχήμα (5.22), παρουσιάζεται σχηματικά η διάταξη του συστήματος.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του πρώτου πρωτεύοντος:

- Οι διακόπτες SA1 , SA2, S1 και S1' είναι κλειστοί
- Οι διακόπτες SA1' , SA2' , S2 και S2' είναι ανοιχτοί

Για την λειτουργία του δεύτερου πρωτεύοντος:

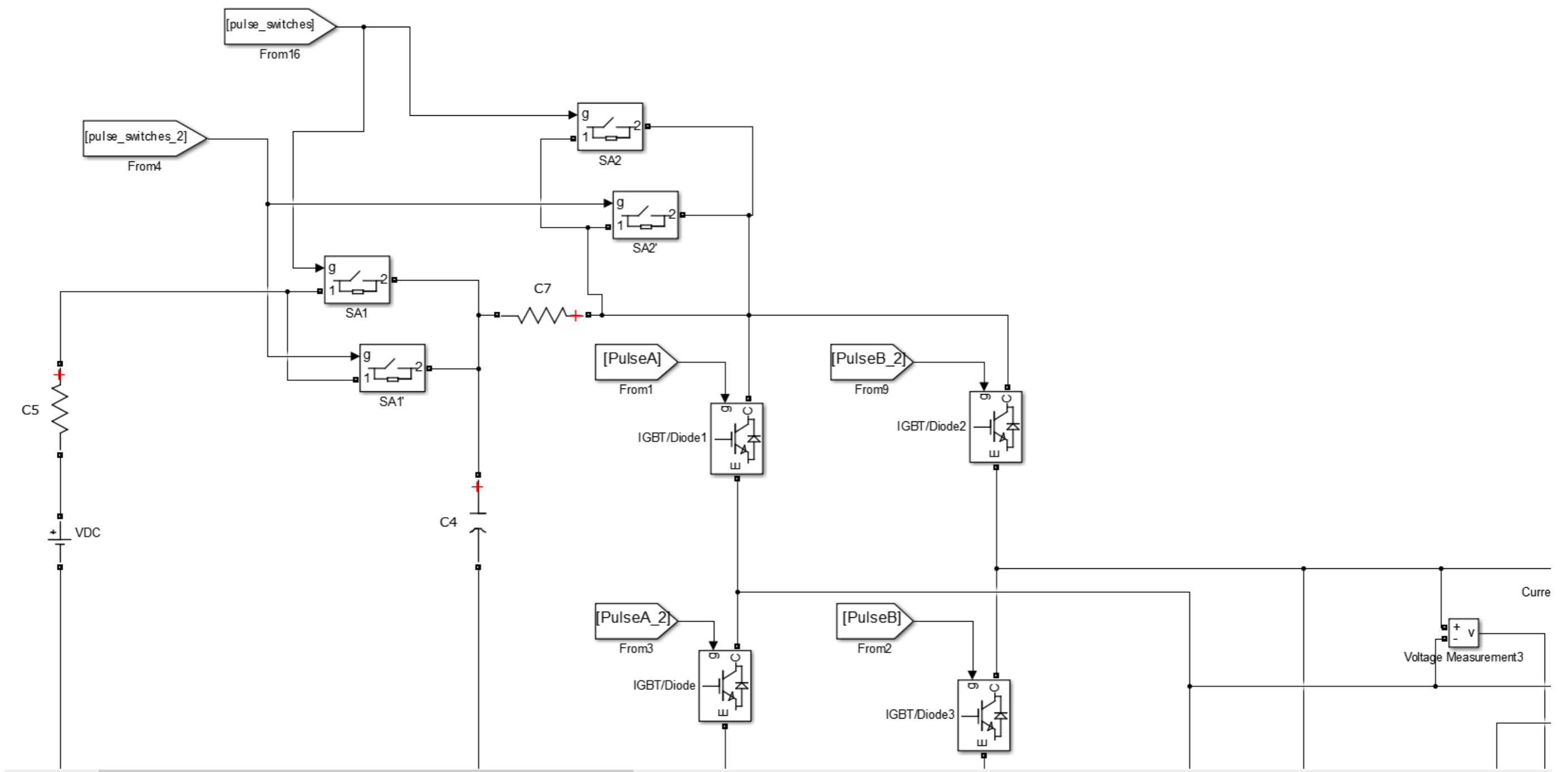
- Όταν το όχημα εξέλθει της HES1 του πρώτου πρωτεύοντος, οι διακόπτες S2 και S2' κλείνουν
- Οι διακόπτες SA1' και SA2', θα κλείσουν μόνο όταν το όχημα εισέλθει στην περιοχή HES2 του δεύτερου πρωτεύοντος και θα ανοίξουν πάλι όταν το όχημα εξέλθει αυτής
-



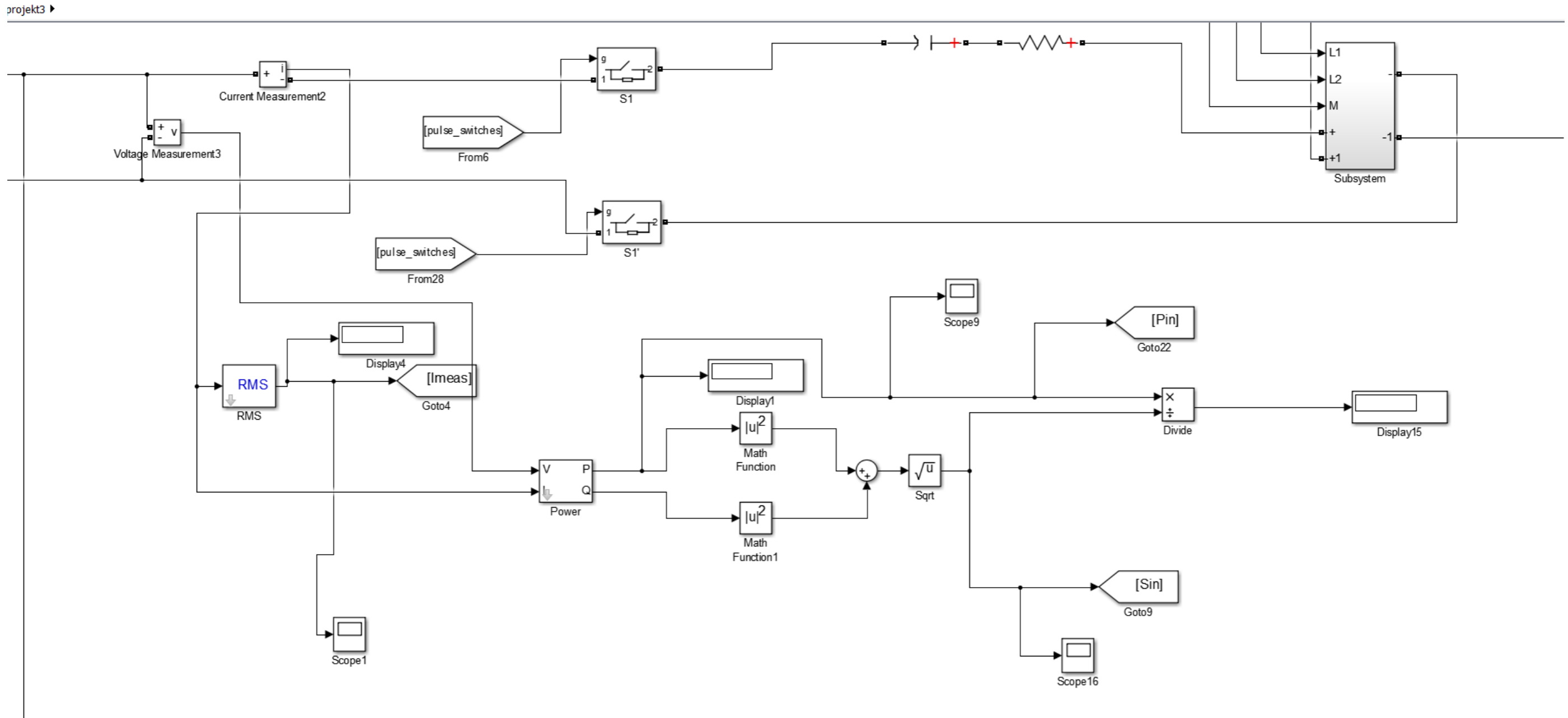
Σχήμα (5.22). Τμήμα συστήματος φόρτισης με έναν αντιστροφέα

Όσον αφορά τον έλεγχο στο κύκλωμα:

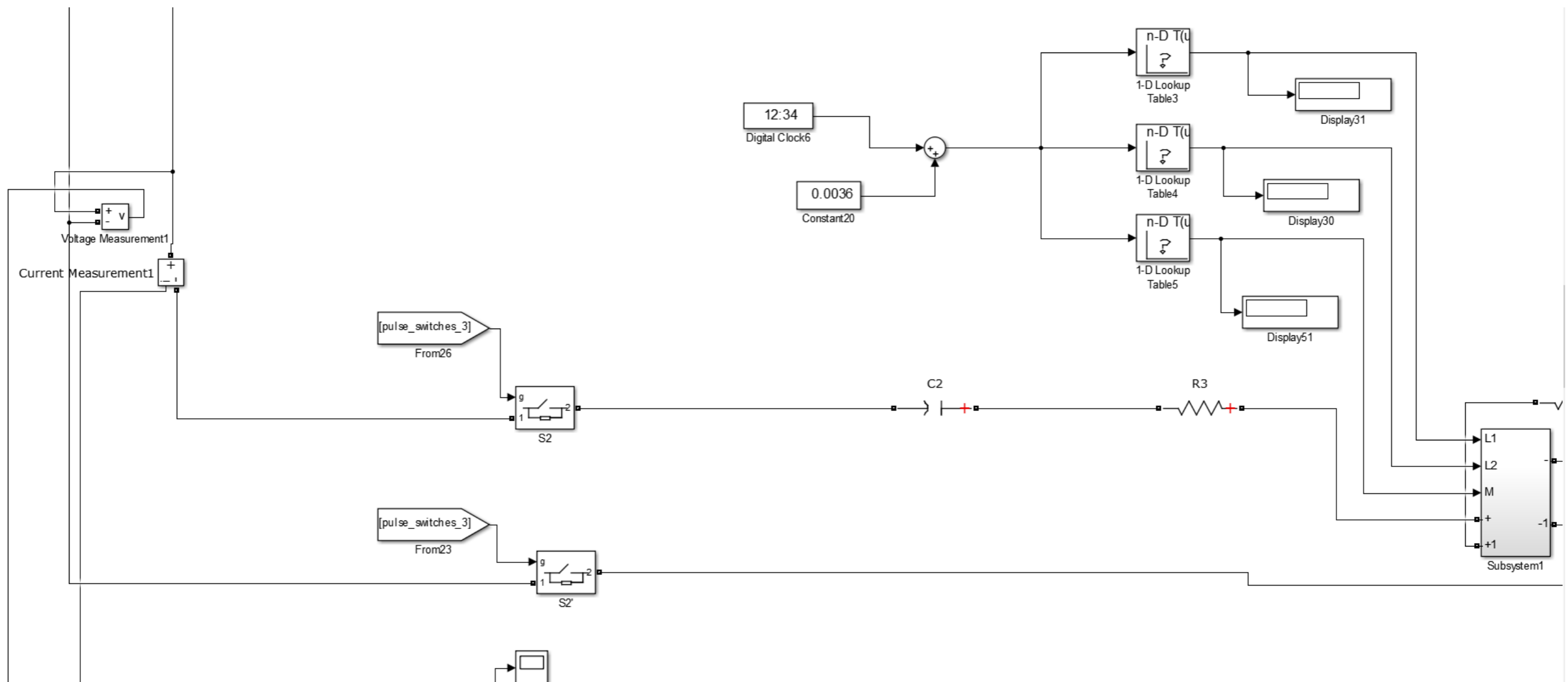
Όταν το όχημα εγκαταλείπει την περιοχή υψηλής φόρτισης του πρώτου πρωτεύοντος τυλίγματος όταν δηλαδή έχει διανύσει απόσταση μεγαλύτερη των 80cm από τη αφετηρία της κίνησης - το σήμα pulse_switches_3 που ελέγχει τους διακόπτες S2 και S2' γίνεται ίσο με ένα, οι διακόπτες κλείνουν και ακολούθως το σήμα control γίνεται ίσο με τη μονάδα. Όταν το σήμα control γίνεται ένα, πλέον ελέγχεται το ρεύμα του δεύτερου πρωτεύοντος I_{meas2}. Επομένως ισχύει ότι:



Σχήμα (5.22.1). Τμήμα συστήματος φόρτισης με έναν αντιστροφέα (λεπτομέρεια)

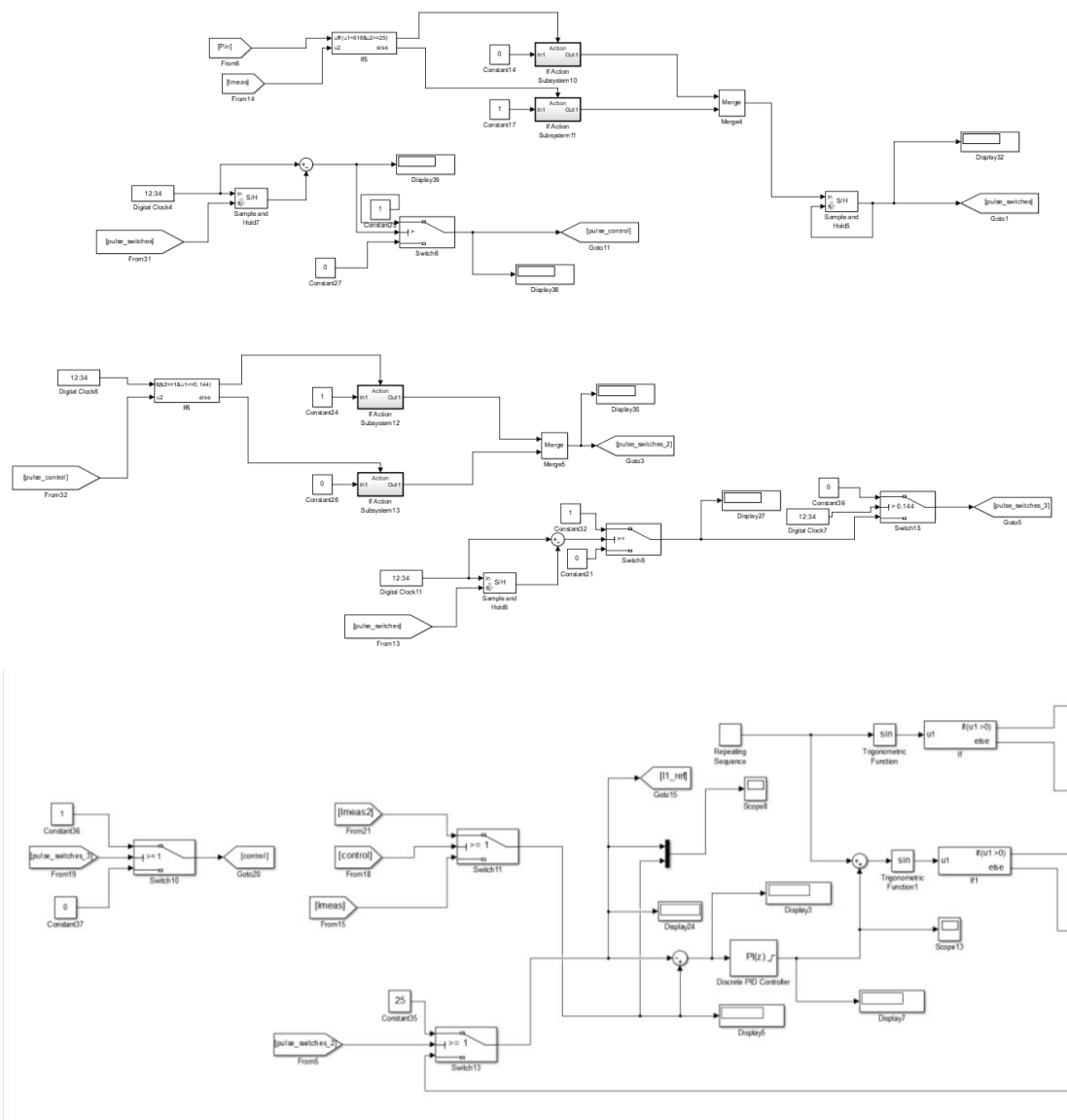


Σχήμα (5.22.2). Τμήμα συστήματος φόρτισης με έναν αντιστροφέα (λεπτομέρεια στην πλευρά του πρώτου πρωτεύοντος)



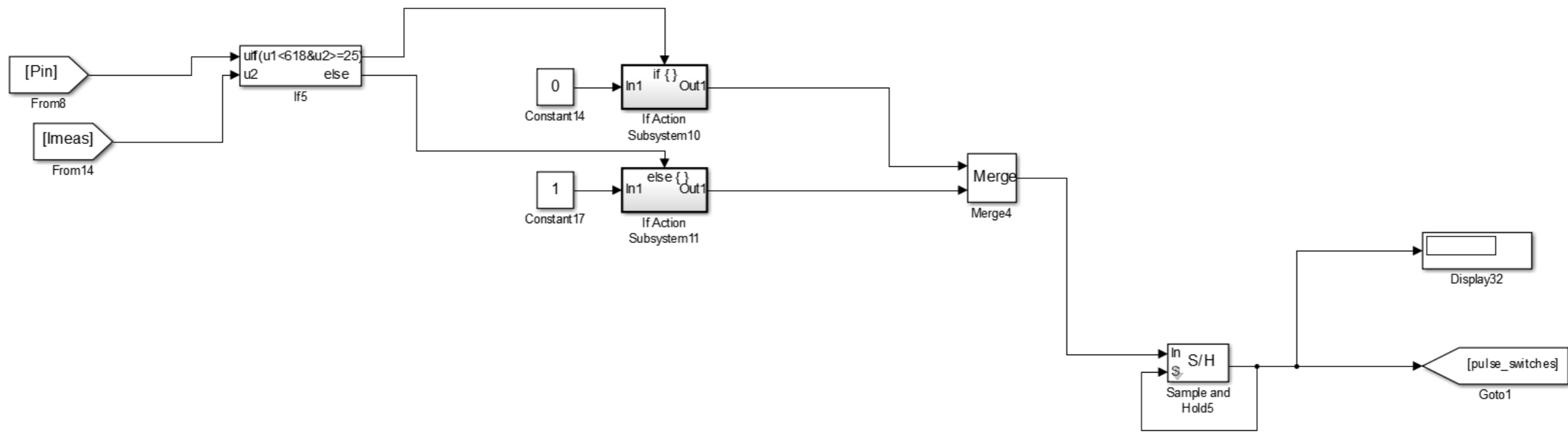
Σχήμα (5.22.3). Τμήμα συστήματος φόρτισης με έναν αντιστροφέα (λεπτομέρεια στην πλευρά του δεύτερου πρωτεύοντος)

- Όταν $control=0$, η λειτουργία του του πρώτου πρωτεύοντος πραγματοποιείται ακριβώς όπως και πριν.
- Όταν $control=1$, θα λειτουργεί το δεύτερο πρωτεύον με ρεύμα 25 A μόνο στην περιοχή υψηλής απόδοσής του.

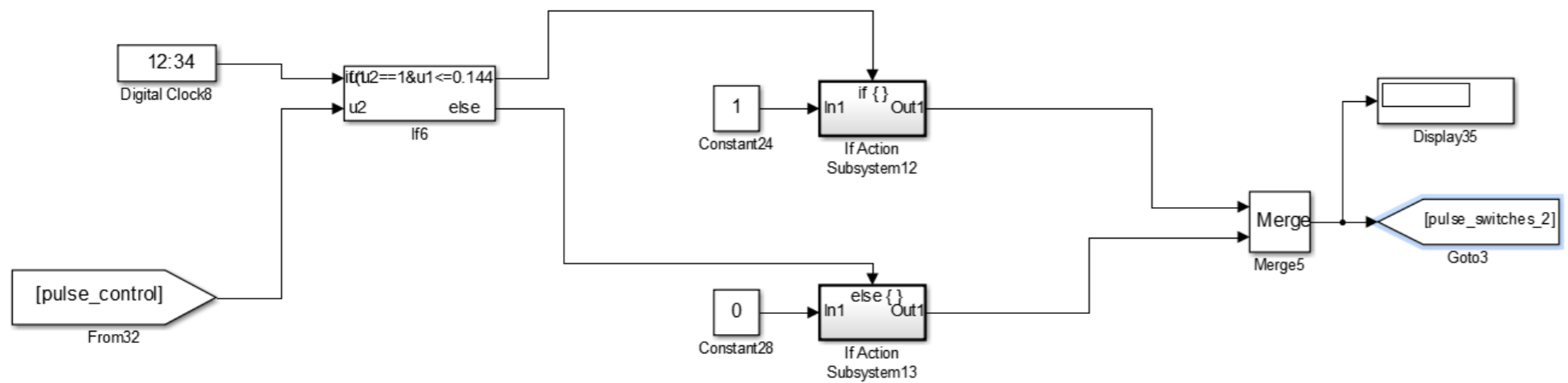
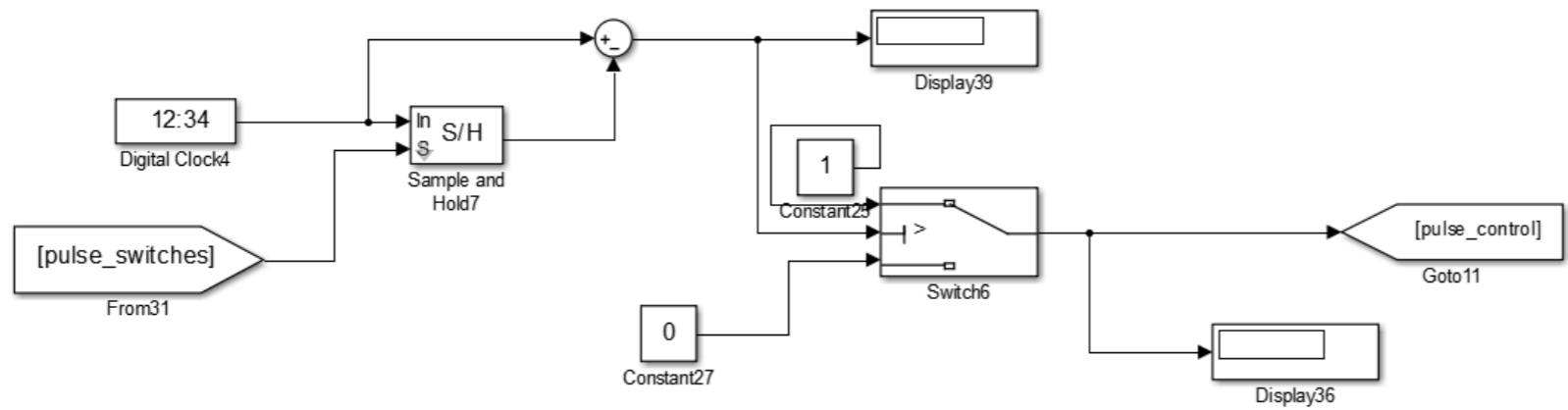


Σχήμα (5.23). Τμήμα του κυκλώματος ελέγχου

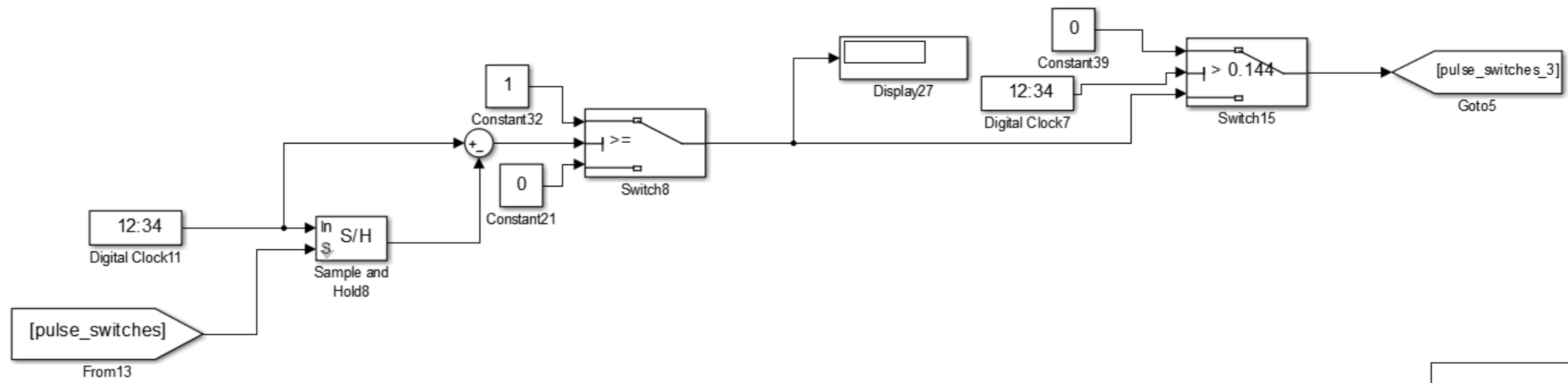
Τα διαγράμματα ισχύος ρεύματος για τη φόρτιση του οχήματος από το πρώτο πρωτεύον θα όμοια με αυτά στην περίπτωση των ανεξάρτητων αντιστροφών.



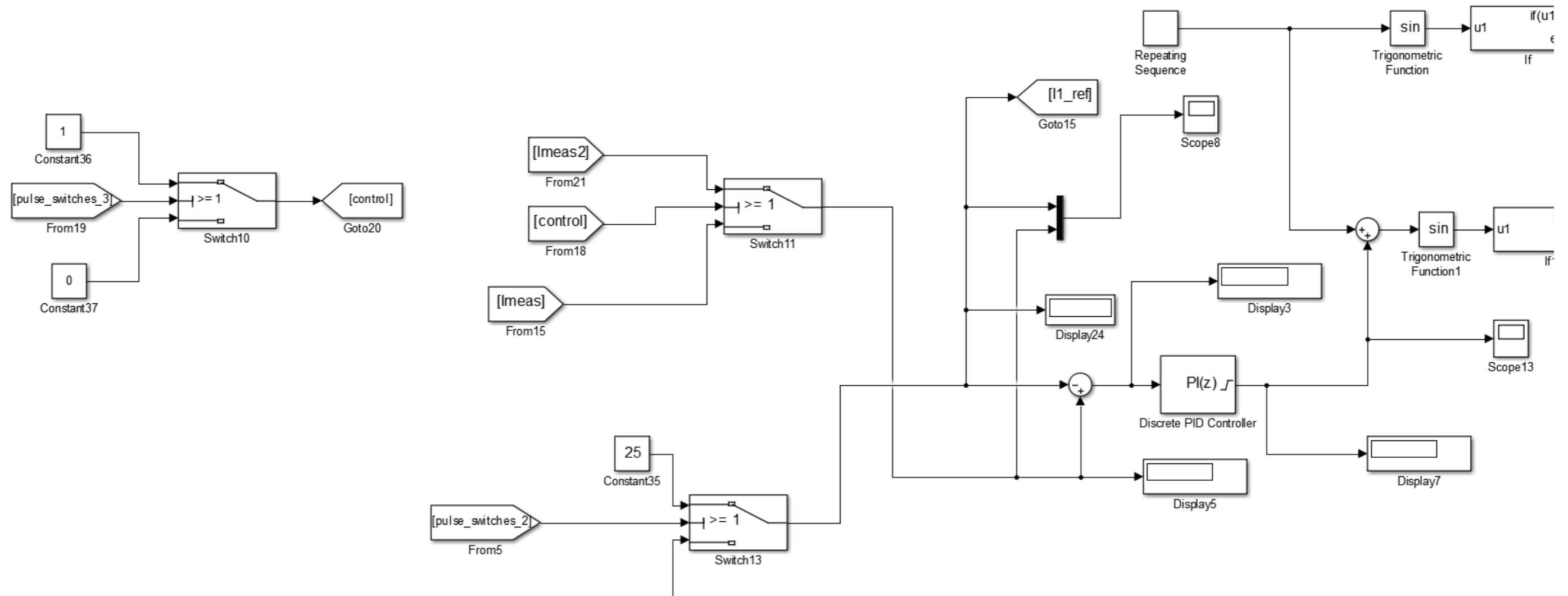
Σχήμα (5.23.1). Τμήμα του κυκλώματος ελέγχου (λεπτομέρεια)



Σχήμα (5.23.2). Τμήμα του κυκλώματος ελέγχου (λεπτομέρεια)

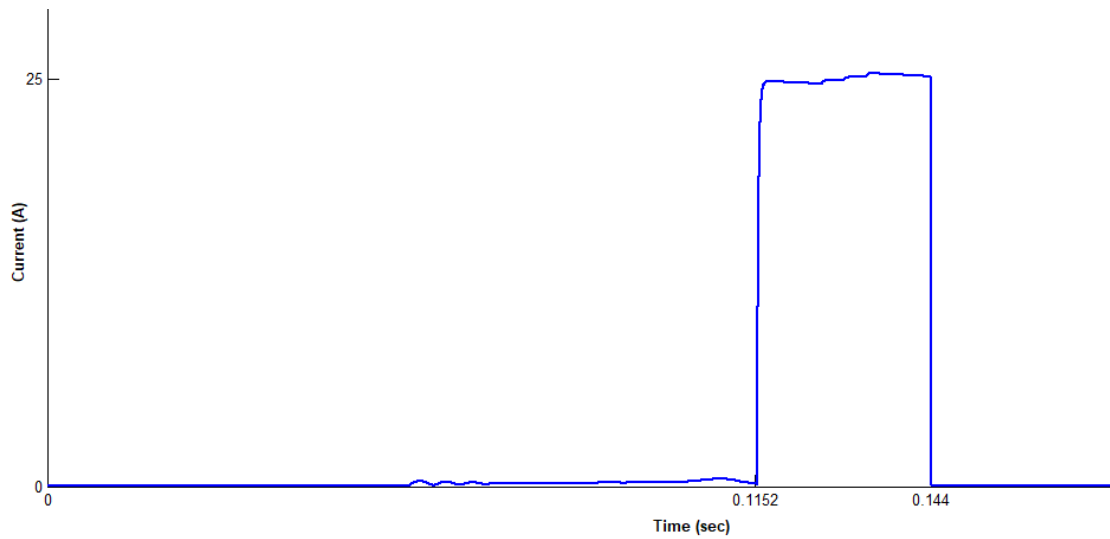


Σχήμα (5.23.3). Τμήμα του κυκλώματος ελέγχου (λεπτομέρεια)

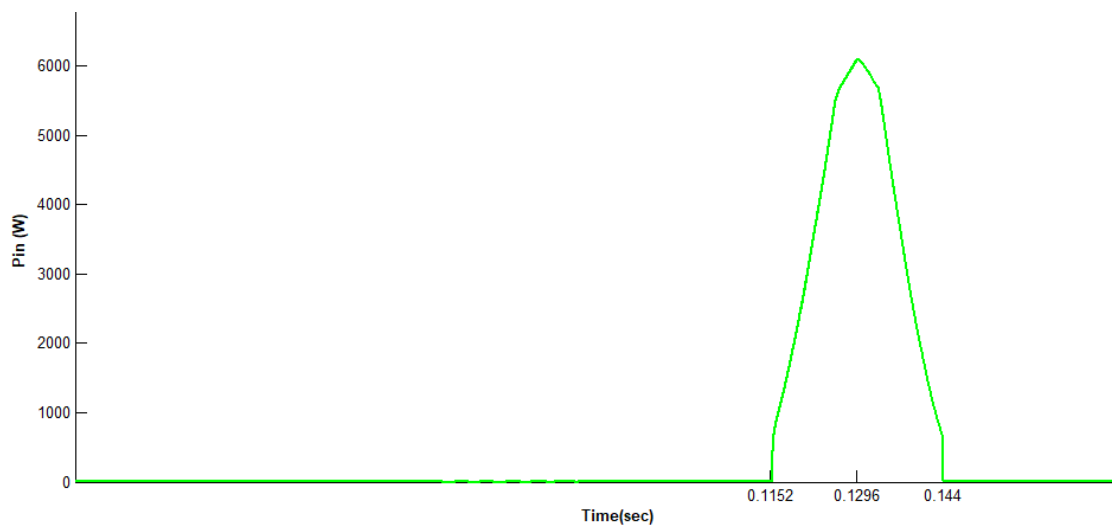


Σχήμα (5.23.4). Τμήμα του κυκλώματος ελέγχου (λεπτομέρεια)

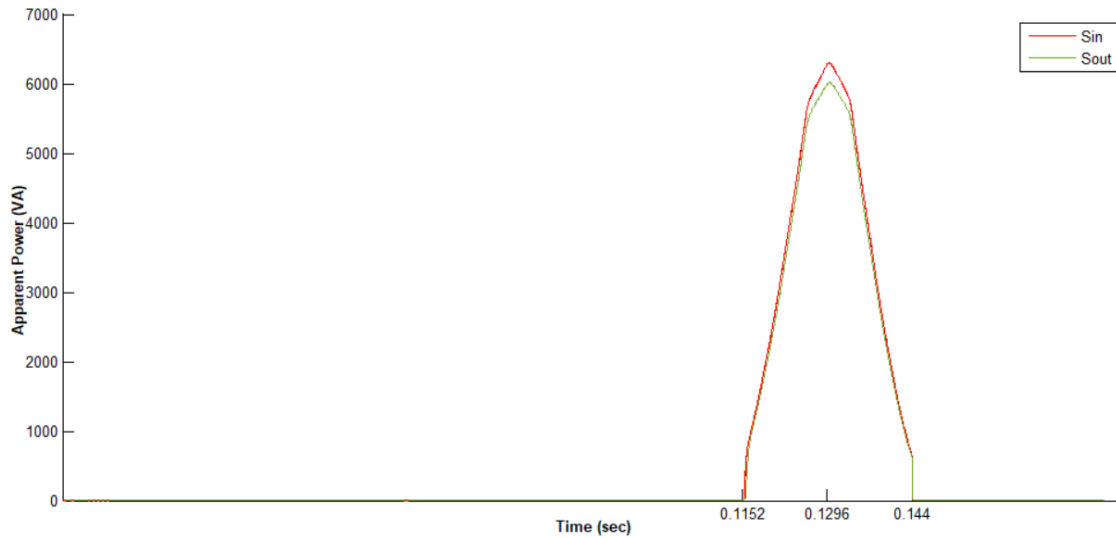
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα ισχύος, ρεύματος που προκύπτουν από την προσομοίωση φόρτισης του δευτερεύοντος από το δεύτερο πρωτεύον:



Σχήμα(5.24). Ρεύμα λειτουργίας δεύτερου πρωτεύοντος τυλίγματος



Σχήμα(5.25). Ενεργός ισχύς εισόδου στο σύστημα φόρτισης καθώς το όχημα περνάει πάνω από το δεύτερο πρωτεύον



Σχήμα(5.26). Φαινόμενη ισχύς εισόδου και εξόδου στο σύστημα φόρτισης καθώς το όχημα περνάει πάνω από το δεύτερο πρωτεύον

Ακολούθως υπολογίζεται η συνολική απόδοση ενέργειας του συστήματος για τις περιοχές υψηλής απόδοσης του πρώτου και του δεύτερου πρωτεύοντος τυλίγματος HES1, HES2:

$$\begin{aligned}
 eff_{energyHES} &= \frac{\int_{0.0288}^{0.0576} S_{out1}(t)dt + \int_{0.1152}^{0.144} S_{out2}(t)dt}{\int_{0.0288}^{0.0576} S_{in1}(t)dt + \int_{0.1152}^{0.144} S_{in2}(t)dt} = \frac{(101.3139 + 100.7846)VA \cdot s}{(105.7474 + 105.3521)VA \cdot s} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow eff_{energyHES} \simeq 95.74\% \quad (4.42)
 \end{aligned}$$

Η συνολική απόδοση ενέργειας του συστήματος θα είναι:

$$\begin{aligned}
 eff_{energytotal} &= \frac{\int S_{out1}(t)dt + \int S_{out2}(t)dt}{\int S_{in1}(t)dt + \int S_{in2}(t)dt} = \frac{(101.9661 + 100.8149)VA \cdot s}{(107.7154 + 105.3732)VA \cdot s} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow eff_{energytotal} \simeq 95.16\% \quad (4.43)
 \end{aligned}$$

6. Συμπεράσματα και επόμενα βήματα

Η τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί σήμερα μας επιτρέπει να συνειδητοποιήσουμε ότι η ασύρματη μεταφορά ισχύος -κάτι που φάνταζε κάποτε αδιανόητο - είναι κάτι που μπορεί να επιτευχθεί. Η ανεπάρκεια υποδομών έχει πλέον καλυφθεί, μαγνητικά υλικά με υψηλή διαπερατότητα σε μεγάλες συχνότητες είναι διαθέσιμα, τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν εξελιχθεί από SCRs σε IGBTs, SiC MOSFETS και σε ημιαγωγούς μεγάλου ενεργειακού διακένου με εκπληκτικές τιμές τάσης και ρεύματος σε ολοένα αυξανόμενες συχνότητες, και οι μικροελεγκτές συνεχίζουν να συρρικνώνονται ενώ γίνονται ταχύτεροι με βελτιωμένο σύνολο εντολών.

Ξεκινώντας από το πανεπιστήμιο του Auckland το 1990 και την εφαρμογή της στο πρώτο λειτουργικό IPT όχημα που κατασκευάστηκε, η τεχνολογία WPT συναντάται πλέον σε πλήθος πειραματικών αλλά και εμπορικών εφαρμογών σε σημαντικούς τομείς όπως η Ιατρική και η Βιομηχανία. Έρευνες εκτιμούν ότι τα προϊόντα με WPT τεχνολογία θα ανέλθουν σε μια βιομηχανία της τάξης δισεκατομμυρίων δολαρίων.

Αναφορικά με την φόρτιση μακρινού πεδίου, η μη κατευθυνόμενη μετάδοση ενέργειας, είναι κατάλληλη μόνο για εφαρμογές χαμηλής ισχύος ενώ η κατευθυνόμενη μετάδοση ενέργειας με μικροκύματα είναι ικανή να μεταφέρει μεγάλα ποσά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις και αφορά ογκώδη συστήματα με μεγάλο κόστος κατασκευής. Και στις δύο περιπτώσεις εγείρονται ζητήματα ασφαλείας σε περίπτωση έκθεσης σε υψηλής πυκνότητας RF ακτινοβολία οπότε και συναντώνται εκτενώς σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος. Πρέπει να σημειωθεί ότι η απόδοση της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι χαμηλή συγκριτικά με την φόρτιση κοντινού πεδίου.

Αναφορικά με την φόρτιση κοντινού πεδίου στην βιβλιογραφία διαχωρίζεται σε επαγωγική φόρτιση και φόρτιση με μαγνητικό συντονισμό. Ουσιαστικά όμως δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός αφού και οι δύο βασίζονται στο νόμο της επαγωγής. Παρόλα αυτά με τη προσθήκη κυκλωμάτων συντονισμού το κύκλωμα γίνεται ποιοτικά καλύτερο αποκτώντας ατρωσία σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και ικανό να αποθηκεύει μεγαλύτερα ποσά ενέργειας με μικρότερες απώλειες. Με πομπό και δέκτη να λειτουργούν στην φυσική συχνότητα συντονισμού το ρεύμα στο κύκλωμα μεγιστοποιείται. Σε αντίθεση με ένα μετασχηματιστή όπου το πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα έχουν συντελεστή σύζευξης k κοντά στη μονάδα, τα συστήματα WPT πρέπει να λειτουργούν με πολύ μικρότερο συντελεστή, $k \approx 0.1-0.3$, λόγω των περιορισμών στο μέγεθος των τυλιγμάτων και στην απαιτούμενη απόσταση και μεταξύ τους μετατόπιση. Η χρήση συντονισμού επιτρέπει υψηλή απόδοση μεταφοράς ενέργειας (> 90% διατελεσματικά) ακόμα και σε αυτά τα χαμηλά επίπεδα μαγνητικής σύζευξης.

Σε εφαρμογές ασύρματης μεταφοράς ισχύος που κάνουν χρήση των κοντινών πεδίων των συντονιστών, είναι επιθυμητό το μέγεθός τους να είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος της συχνότητας συντονισμού, έτσι ώστε οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας να είναι μειωμένες. Επίσης ο συντονισμός του συστήματος σε υψηλές συχνότητες με αποτέλεσμα υψηλό συντελεστή ποιότητας των τυλιγμάτων συμβάλει ώστε αυτό να έχει χαμηλές ωμικές απώλειες και επομένως χαμηλές απώλειες ενέργειας.

Παρουσιάστηκαν τεχνολογίες φόρτισης μακρινού και κοντινού πεδίου δίνοντας έμφαση στις φορητές συσκευές , τα RFID tags, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και κυρίως στην ηλεκτροκίνηση με την τελευταία να αποτελεί τον τομέα που πραγματεύεται στο μεγαλύτερο μέρος της η παρούσα διπλωματική εργασία.

Ο τομέας των μεταφορών είναι υπεύθυνος για το ένα τέταρτο περίπου των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG- greenhouse gas) στην Ευρώπη, συμβάλλοντας στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Οι εκπομπές των οδικών οχημάτων επίσης συμβάλλουν στην υψηλή περιεκτικότητα ατμοσφαιρικών ρύπων σε πολλές ευρωπαϊκές πόλεις, που συχνά δεν πληρούν τα πρότυπα ποιότητας του ατμοσφαιρικού αέρα που έχουν οριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.).

Οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων, σε συνδυασμό με τον ανεπαρκή σχεδιασμό και τις υποδομές, έχουν δραματικές οικονομικές, κοινωνικές, υγειονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες. Η ατμοσφαιρική ρύπανση προκαλεί ετησίως περισσότερους από 400.000 πρόωρους θανάτους στην ΕΕ ενώ το εξωτερικό κόστος της υγείας κυμαίνεται από 330 δισεκατομμύρια ευρώ έως 940 δισεκατομμύρια ευρώ. Τουλάχιστον 10.000 πρόωροι θάνατοι στην Ευρώπη οφείλονται σε ασθένειες που προκαλούνται εξαιτίας του θορύβου, ενώ το 2012 το ένα τέταρτο του ευρωπαϊκού πληθυσμού έχει εκτεθεί σε επίπεδα θορύβου άνω των ορίων.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα δεδομένα καθώς και τους στόχους που έχει θέσει η ΕΕ για μείωση των GHG εκπομπών κατά 80-95% μέχρι το 2050 , περιορισμό κατά το ήμισυ των συμβατικών οχημάτων στις αστικές μεταφορές μέχρι το 2030 και ολοκληρωτική εξάλειψή τους από τις πόλεις έως το 2050, γίνεται σαφές πως η ηλεκτροκίνηση είναι μονόδρομος σε συνδυασμό με την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

Αναλύονται τύποι και τρόποι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων καθώς επίσης διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο με τις μπαταρίες λιθίου να κερδίζουν έδαφος. Παρόλο που διαθέτουν ποιοτικά χαρακτηριστικά και καλές επιδόσεις έχουν προς το παρόν περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα και υψηλά κόστη κατασκευής. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σχετικά νεοεισερχόμενα στην αγορά αυτοκινήτων και έτσι λίγα από αυτά έχουν φτάσει στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους. Σαν αποτέλεσμα, ελάχιστες μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων είναι διαθέσιμες μετά την κατανάλωσή τους, περιορίζοντας έτσι την επέκταση των υποδομών ανακύκλωσης μπαταριών. Τα περισσότερα μέρη των μπαταριών ιόντων-λιθίου είναι ανακυκλώσιμα όμως το κόστος ανάκτησης των υλικών παραμένει μία πρόκληση για τη βιομηχανία.

Η έλλειψη ενός μεγάλου δικτύου υποδομών φόρτισης λειτουργεί αποτρεπτικά για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων. Στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες υπάρχουν μόνο μερικές χιλιάδες δημόσια σημεία φόρτισης - συνήθως για αργή φόρτιση- με την Ελλάδα να διαθέτει μόλις 38 σημεία φόρτισης και πρωτοπόρες χώρες τις Ολλανδία, Νορβηγία, Ηνωμένο Βασίλειο και Γαλλία ενώ στον υπόλοιπο κόσμο τις Κίνα και Η.Π.Α.

Η οδηγία 2014/94/ΕΕ αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων θέτοντας το απαραίτητο τεχνικό και θεσμικό πλαίσιο για την ανάπτυξη και λειτουργία τους.

Οι τρέχουσες τεχνολογίες διεπαφής επαναφόρτισης ΗΟ περιλαμβάνουν καλωδιακές συνδέσεις, αλλά είναι ανάγκη επίσης να εξεταστούν μελλοντικές τεχνολογίες διεπαφής όπως η ασύρματη επαναφόρτιση ή η ανταλλαγή συσσωρευτών. Η νομοθεσία είναι ανάγκη να εξασφαλίσει ότι διευκολύνεται η τεχνολογική καινοτομία καθώς η ηλεκτροκίνηση είναι ένας τομέας που αναπτύσσεται ραγδαία με τα δεδομένα να αλλάζουν διαρκώς. Έχουν γίνει σημαντικά βήματα προς αυτή την κατεύθυνση με την ανάπτυξη και καθιέρωση προτύπων ασύρματης φόρτισης τόσο στην Αμερική (SAE) όσο και στην Ευρώπη (IEC) με εμπορικά προϊόντα να είναι πλέον διαθέσιμα. Τα πρότυπα ακολουθούν αυτά που αφορούν τη φόρτιση με καλώδιο όσον αφορά τα επίπεδα και τον χρόνο φόρτισης. Θα πρέπει επίσης να εξεταστούν και πρότυπα V2G τεχνολογίας καθώς τα υπάρχοντα αφορούν μονοκατευθυντική ροή ισχύος.

Παρά τα πλεονεκτήματά της (ευκολία στη χρήση, αντοχή σε συνθήκες όπως υγρασία και σκόνη, ευελιξία, αισθητική υπεροχή), η ασύρματη φόρτιση είναι μια τεχνολογία σε διαδικασία ανάπτυξης όσον αφορά την ευρεία εφαρμογή της σε εμπορικά προϊόντα, με κύριο μειονέκτημά της να αποτελεί το αυξημένο κόστος της σε σχέση με την ενσύρματη φόρτιση. Επιπλέον υπάρχουν σύνθετα ζητήματα λειτουργίας και ασφάλειας που πρέπει να επιλυθούν. Σε αρκετές συνθήκες λειτουργίας οι τιμές του ΗΜ-πεδίου ξεπερνούν κατά πολύ τα βιομηχανικά πρότυπα ασφαλείας. Αυτό φανερώνει την ανάγκη πραγματοποίησης τεχνικών αναθεωρήσεων και εύρεσης τρόπων μείωσης των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών κυρίως για τα μη συμβατά συστήματα (interoperable systems) έτσι ώστε να τηρούνται οι συνθήκες ασφαλείας.

Για να μπορέσει η ασύρματη φόρτιση να ανταγωνιστεί την φόρτιση με καλώδιο, είναι απαραίτητη η μείωση του κόστους της από τους κατασκευαστές ή η απορρόφησή του σαν μέρος της τιμής αγοράς του αυτοκινήτου.

Πρέπει επίσης να τονιστεί πως η ασύρματη φόρτιση ΗΟ δεν μπορεί προς το παρόν να ανταγωνιστεί την ταχεία φόρτιση όσον αφορά τους χρόνους φόρτισης.

Η ταχεία φόρτιση με συνεχές ρεύμα παρέχει υψηλότερα ποσά ισχύος από τις περισσότερες μεθόδους φόρτισης με εναλλασσόμενο ρεύμα. Ένας σταθμός φόρτισης DC παρέχει φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος σε πολύ σύντομο χρόνο, παρόλα αυτά κοστίζει σημαντικά πιο πολύ. Οι περισσότεροι φορτιστές DC παρέχουν ισχύ 50 kW, με εξαίρεση κάποιους χαμηλότερης ισχύος, περίπου 20-25 kW. Σημαντική είναι και η προώθηση σήμερα DC φορτιστών υψηλότερου επιπέδου ισχύος, 100-150 kW ακόμα και μέχρι 400 kW, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες για ισχύ της επόμενης γενιάς PEV με μεγαλύτερες μπαταρίες (80 kWh και άνω). Με τη χωρητικότητα των μπαταριών να αυξάνεται, η φόρτιση DC θα συνεχίσει να κινείται προς υψηλότερα επίπεδα ισχύος. Εκτός από το υψηλό κόστος, στα μειονεκτήματα της τεχνολογίας ταχείας φόρτισης με συνεχές ρεύμα, είναι η μειωμένη απόδοση ενέργειας λόγω απωλειών και η μεγάλη καταπόνηση που υφίστανται οι μπαταρίες. Επιπλέον, η φόρτιση σε ισχύ μεγαλύτερη των 150 kW απαιτεί και διαφορετικά πρότυπα τεχνικού εξοπλισμού στο ηλεκτρικό όχημα.

Η ασύρματη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων διακρίνεται σε στατική και δυναμική. Αναλύονται και τα δύο συστήματα φόρτισης για τοπολογία SS. Οι παράλληλα συντονιζόμενες τοπολογίες όπως η LCL παρουσιάζουν ανοχή στην μη ευθυγράμμιση των πηνίων οπότε και χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές δυναμικής επαγωγικής φόρτισης, από την άλλη κάνουν χρήση στοιχείων αντιστάθμισης που επιλέγονται με βάση την αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων η τιμή η οποίας όμως μεταβάλλεται καθώς το όχημα κινείται. Η τοπολογία SS,

λειτουργεί καλά κατά των παρεμβολών παρασιτικών συχνοτήτων και είναι κατάλληλη για μικρά ωμικά φορτία (π.χ. μπαταρία αυτοκινήτου).

Δεδομένης της αμοιβαίας επαγωγής επιλέγεται μεγαλύτερη διατομή τυλίγματος αφού οδηγεί σε μείωση της έντασης του μαγνητικού πεδίου και επομένως σε τήρηση των κανόνων ασφαλείας που αφορούν στην έκθεση του ανθρώπινου σώματος στην ακτινοβολία του πεδίου μέσα και έξω από το όχημα. Επομένως προτιμάται κατασκευή πηνίου με μικρότερο αριθμό τυλιγμάτων και μεγαλύτερη διατομή με το μήκος της ακτίνας να περιορίζεται από το μέγεθος του ηλεκτρικού οχήματος.

Δεδομένης της τιμής της τάσης εισόδου V_g , βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ισχύ εξόδου του WPT συστήματος και την απόδοση μεταφοράς ισχύος είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής M , η αντίσταση φορτίου R_L και η συχνότητα συντονισμού f .

Παρουσιάζεται και προσομοιώνεται στο Simulink σύστημα δυναμικής μεταφοράς ισχύος τμηματικής διάταξης με δύο πρωτεύοντα τυλίγματα. Στο σύστημα εφαρμόζεται η SS τοπολογία κυκλώματος αφού επιτρέπει την σωστή επιλογή των στοιχείων αντιστάθμισης σύμφωνα με την διαδικασία βελτιστοποίησης και την ανάπτυξη του επιθυμητού συστήματος ελέγχου όπως αυτό περιγράφεται στην [127] διατηρώντας χαμηλές τις απώλειες στον μετατροπέα DC/AC σε σύστημα με ένα πρωτεύον.

Κατάλληλος έλεγχος εφαρμόζεται και στο πρωτεύον τύλιγμα για την βέλτιστη λειτουργία του αφού για την ανίχνευση του οχήματος όταν αυτό βρίσκεται πάνω από το φορτιστή, δεν γίνεται χρήση αισθητήρων και άλλων μηχανισμών. Παρακολουθώντας την τιμή της ισχύος εισόδου P_i κατά τη διάρκεια της δυναμικής φόρτισης του οχήματος, και για όλο το μήκος της κίνησής του, είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την θέση του. Σε αντίθετη περίπτωση, το κόστος θα ήταν αυξημένο ενώ η ανάγκη για συνεχή μεταφορά σημάτων μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δεν θα επέτρεπε την κίνηση του οχήματος με μεγάλες ταχύτητες. Για να μεταφερθεί ικανή ποσότητα ισχύος από το πρωτεύον στο δευτερεύον πηνίο, είναι αναγκαίο το σύστημα να λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα. Για τον λόγο αυτό, το εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου ανορθώνεται σε συνεχές ενώ στη συνέχεια μετατρέπεται σε ένα υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω ενός DC/AC μετατροπέα. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο του πρωτεύοντος, επάγει AC τάση στο δευτερεύον τύλιγμα που τελικά ανορθώνεται ώστε να παρέχει DC τάση στη μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος.

Σε ένα σύστημα δυναμικής φόρτισης οι αυτεπαγωγές των τυλιγμάτων δεν θεωρούνται πλέον σταθερές αλλά μεταβάλλονται καθώς το όχημα κινείται στην περιοχή φόρτισης. Στην δυναμική φόρτιση μία κακή επιλογή των στοιχείων αυτών, δύναται να οδηγήσει σε υψηλές απώλειες αέργου ισχύος και χαμηλή απόδοση σε περίπτωση μειωμένης σύζευξης των δύο τυλιγμάτων.

Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση και την μεταφερόμενη στο όχημα ενέργεια είναι το φορτίο της μπαταρίας που εκφράζεται με την ισοδύναμη αντίσταση R_L . Για λόγους σχεδιαστικής απλότητας και λειτουργικής ευκολίας το σύστημα έχει σχεδιαστεί και προσομοιωθεί παραλείποντας το κύκλωμα ελέγχου του δευτερεύοντος και θέτοντας στην έξοδό του αντίσταση φορτίου R_L βέλτιστης σταθερής τιμής.

Η λειτουργία του προσομοιώθηκε και αναλύθηκε για τις εξής περιπτώσεις:

- Λειτουργία με δύο ανεξάρτητους αντιστροφείς. Η ενέργεια του συστήματος στις περιοχές υψηλής απόδοσης του πρώτου και του δεύτερου πρωτεύοντος και η συνολική απόδοση του συστήματος θα είναι αντίστοιχα:

$$eff_{energyHES} \simeq 95.81\% \text{ και } eff_{energytotal} \simeq 94.60\% .$$

- Λειτουργία με δύο αντιστροφείς με τον δεύτερο εξαρτώμενο από τον πρώτο:

$$eff_{energyHES} = 95.73\% \text{ και } eff_{energytotal} \simeq 95.15\%$$

Η συνολική απόδοση του συστήματος είναι βελτιωμένη σε σχέση με την περίπτωση των ανεξάρτητων αντιστροφέων ενώ η απόδοση HES είναι στα ίδια επίπεδα.

- Λειτουργία με έναν αντιστροφήα:

$$eff_{energyHES} \simeq 95.74\% \text{ και } eff_{energytotal} \simeq 95.16\%$$

Παρατηρείται ότι η απόδοση είναι περίπου ίδια με την δεύτερη περίπτωση που έχουμε έναν αντιστροφήα για κάθε τύλιγμα.

Συγκρίνοντας την τιμή της απόδοσης και για τις τρεις περιπτώσεις επιβεβαιώνεται ότι ότι αν και η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος δεν εξαρτάται από το ρεύμα του πρωτεύοντος, οι απώλειες του συστήματος σε VA εξαρτώνται από αυτό γιατί και η συνολική απόδοση του συστήματος βελτιώθηκε σε μικρό ποσοστό στην περίπτωση των εξαρτώμενων αντιστροφέων αφού το δεύτερο πρωτεύον ενεργοποιείται μόνο όταν το όχημα εισέρχεται στην HES. Αντίθετα στην HES η τιμή της απόδοσης κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα και στις τρεις περιπτώσεις. Η χρήση ενός αντιστροφήα και για τα δύο τυλίγματα μειώνει το κόστος κατασκευής του συστήματος.

Σε μελλοντικό χρόνο θα είχε ενδιαφέρον να προσομοιωθεί το κύκλωμα και για άλλες τοπολογίες κυκλωμάτων.

Η ικανότητα φόρτισης της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων σε πολλαπλά σημεία κατά τη διάρκεια μιας διαδρομής, επιτρέπει τη διάνυση μεγάλων αποστάσεων καθώς και τη χρήση μπαταριών μικρότερης χωρητικότητας που έχει σαν συνέπεια τη μείωση του βάρους και του κόστους των οχημάτων. Η τεχνολογία δεν βρίσκεται ακόμα πολύ κοντά στην εμπορική βιωσιμότητα κυρίως όσον αφορά τα PEV λόγω του κόστους υποδομών κατά μήκος του οδοστρώματος. Επιδιώκεται η εφαρμογή της κυρίως σε μέσα μαζικής μεταφοράς που εκτελούν συγκεκριμένα δρομολόγια, όπου το κόστος εγκατάστασης εξοπλισμού στο οδόστρωμα είναι περιορισμένο.

Βιβλιογραφία-Πηγές

- [1] **Far- field RF-Powered Variable Duty Cycle Wireless Sensor Platform**
Erez Falkenstein; Daniel Costinett; Regan Zane; Zoya Popovic
2011
- [2] **Wireless Charging Technologies :Fundamentals, Standards, and Network Applications**
Xiao Lu; Ping Wang; Dusit Niyato; Dong In Kim; Zhu Han
2016
- [3] **Low-Power Far-Field Wireless Powering for Wireless Sensors**
Zoya Popović; Erez Avigdor Falkenstein; Daniel Costinett; Regan Zane
2013
- [4] **Survey on the Characterization and Classification of Wireless Sensor Network Applications**
Luis M.Borges; Fernando J. Veles; Antonio S. Lebres
2014
- [5] <http://vigilnet.com/gps-tracking>
- [6] <http://sensysnetworks.com/>
- [7] https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/recovery/CBP_SBI-net_Program_Final_2010_9-05-15.pdf
- [8] <http://www.nagref.gr/journals/ethg/images/44/ethg44p18-21.pdf>

- [9] http://www.ismc.gr/pdf/Summary%20of%20project_hydrosense.pdf
- [10] <http://www.sustainablebridges.net/projectweb/portalproject/WP5.html>
- [11] <http://eu.haworth.com/docs/default-source/white-papers/emerging-technologies-that-focus-on-people-not-just-space.pdf>
- [12] **Intelligent Tires? A Review of Tire Characterization Literature**
Hojong Lee; Saied Taheri
2017
- [13] <https://www.continental-tires.com/transport/products/continental-itire>
- [14] <https://www.bosch-professional.com/static/specials/wireless-charging/gb/en/#goto:produkte-car-charger>
- [15] https://www.philips.gr/c-p/HX9372_04/sonicare-diamondclean-sonic-electric-toothbrush
- [16] <https://www.makezens.com/shop/zens-car-charger-anti-slip-battery-5200-mha/>
- [17] **The Inductive Power Transfer Story at the University of Auckland**
John T. Boys, Grant A.Covic
2015

- [18] <https://www.samsung.com/us/mobile/mobile-accessories/phones/wireless-charging-vehicle-dock-gi-w-2a-cla-ep-hn910ibusta/>
<https://www.samsung.com/us/mobile/mobile-accessories/phones/fast-charge-wireless-charging-stand-black-sapphire-ep-ng930tbugus/>
- [19] http://www.ikea.com/us/en/catalog/categories/departments/wireless_charging/30611/
- [20] <https://www.apple.com/gr/iphone-x/>
- [21] https://static.tue.nl/fileadmin/content/faculteiten/ee/Onderzoek/Technologische_Centra/Centre_for_Wireless_Technology/2012_Retreat_Hao_Gao_-_CWTe2012GH_2.pdf
- [22] **Ultra-low power sensor platform with wireless charging system**
Young-Jun Hong; Joonseong Kang; Seong Joong Kim; Sang Joon Kim; Ui-Kun Kwon
2012
- [23] **Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks : A Comprehensive Survey**
Adam B.Noel; Abderrazak Abdaoui; Tarek Elfouly; Mohamed Hossam Ahmed; Ahmed Badawy; Mohamed S. Shehata
2017
- [24] **A Mobile Host Approach for Wireless Powering and Interrogation of Structural Health Monitoring Sensor Networks**
David Mascarenas; Eric Flynn; Charles Farrar; Gyuhae Park; Michael Todd
2009

[25] UHF far-field wireless power transfer for remotely powering wireless sensors

Cameron Cato; Sungkyun Lim

2014

[26] 0.56-20dBm RF-Powered, Multi-Node Wireless Body Area Network System on a chip With Harvesting Efficiency Tracking Loop

Lingli Xia; Jiao Cheng; Neil E. Glover; Patrick Chiang

2014

[27] Coexistence of Wireless Power Transfer via microwaves and wireless communication for batteryless ZigBee sensors

Naoki Shinohara; Takuyia Ichihara

2014

[28] A 5.2 GHz, 0.5mW RF powered wireless sensor with dual on-chip antennas for implantable intraocular pressure monitoring

M. Arsalan; M.H. Ouda; L.Marnat; T. J. Ahmad; A.Shamim; K. N. Salama

2013

[29] K-band energy harvesting circuits for satellite application

A. Takacs; H. Aubert; S. Fredon; L. Despoisse

2013

[30] High sensitivity RF energy harvesting from AM broadcasting stations for civilian infrastructure degradation monitoring

Xiaoyu Wang; Amir Mortazawi

2013

- [31] **2.4 GHz WLAN RF energy harvester for passive indoor sensor nodes**
Fatima Alneyadi; Maitha Alkaabi; Salama Alketbi; Shamsa Hajraf; Rashad Ramzan
2014
- [32] **RF energy harvesting in wireless sensor networks for critical aircraft systems - An experimental approach**
Charalambos Sergiou; Vasos Vassiliou; Konstantinos Christou
2016
- [33] https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/mankins_sps_alpha.html
- [34] <https://energy.gov/articles/space-based-solar-power>
- [35] <http://www.nss.org/settlement/ssp/library/doe.htm>
- [36] <https://www.nrl.navy.mil/media/news-releases/2016/NRL-Space-Based-Solar-Power-Concept-Wins-Secretary-of-Defense-Innovative-Challenge>
- [37] <http://www.powercastco.com/wp-content/uploads/2016/11/powerharvester-brochure.pdf>
- [38] **Microwave-powered aircraft: U.S. Patent 5,503,350[P].**
H. A. Foote
1996

[39] Design of Ku-band wireless power transfer system to empower light drones

José Luis Gómez-Tornero; Miguel Poveda-García; Raúl Guzmán-Quirós; Juan Carlos Sánchez-Arnause
2016

[40] Power in the sky: Requirements for microwave wireless power beamers for powering high altitude platforms

Richard M. Dickinson
2013

[41] Microwave Power Transmission: Historical Milestones and System Components

Bernd Strassner; Kai Chang
2013

[42] Wireless charging for electric vehicle with microwaves

Naoki Shinohara; Yuta Kubo; Hiroshi Tonomura
2013

[43] <https://www.trinitysystems.gr/el/axiki/>

[44] Design of an RFID-Based Battery-Free Programmable Sensing Platform

Alanson P. Sample; Daniel J. Yeager; Pauline S. Powledge; Alexander V. Mamishev; Joshua R. Smith
2008

[45] http://library.tee.gr/digital/m2142/m2142_mavis.pdf

- [46] **Νέες κατευθύνσεις στην αυτόματη ταυτοποίηση αντικειμένων- Επιχειρηματικές προκλήσεις**
Παπαδάτος Παναγιώτης
Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010
- [47] <http://www.powercastco.com/>
- [48] <http://www.ossia.com/>
- [49] **Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances**
A. Kurs, A.Karalis, R.Moffatt, J.D. Joannopoulos, P.Fischer, M. Soljagic
Science, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, June 2007
- [50] <http://witricity.com/>
- [51] **Magnetic MIMO: How to Charge Your Phone in Your Pocket**
J. Jadidian, D. Katabi
2014
- [52] <http://www.dell.com/en-us>
- [53] **Physics for Scientists and Engineers**
Raymond A. Serway, John W. Jewett
2004, 6th edition

[54] Simulation Study on Series Model of Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling

Yang Liu, Jiaqi Fan, Tongbin Zuo

2017

**[55] Highly Resonant Wireless Power Transfer:
Safe, Efficient and over Distance**

WiTricity white paper

2017

[56] Tunable Wireless Power Architectures

US20180048188A1

Aristeidis Karalis, Morris P. Kesler, Katherine L. Hall, Nathan Andrew Pallo

2018

[57] Engineering Circuit Analysis

William H. Hayt, Jr. , Jack E. Kemmerly, Steven M. Durbin

2012, 8th edition

[58] Antenna Theory Analysis and Design

Constantine A. Balanis

2005, 3rd edition

[59] Investigation of High Efficiency Wireless Power Transfer Criteria of Resonantly-Coupled Loops and Dipoles through Analysis of the Figure of Merit

Charles Moorey, William Holderbaum, Ben Potter

2015

[60] Power Transfer Through Strongly Coupled Resonances

Andre Kurs

2007

[61] Efficient Wireless non-Radiative mid-Range Energy Transfer

Aristeidis Karalis, J.D. Joannopoulos, Marin Soljacic

2007

[62] Introduction to the Physics of Energy

Prof. Robert B. Laughlin

Department of Physics Stanford University

2016 course

[63] <https://www.carlstahl-technocables.com/>

[64] Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας II

Λαμπρίδης Δημήτρης, Ανδρέου Γεώργιος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Διαλέξεις 2014

[65] Feasibility Study of Bi-directional Wireless Charging for Vehicle-to-Grid

Kosuke Tachikawa, Morris Kessler, Oguz Atasoy

SAE Technical Paper 2018-01-0669

[66] Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Μέρος Α΄

Ι.Λ. Βομβορίδης

2008

[67] Design of a Wireless Charging System with a Phase-Controlled Inverter under Varying Parameters

Qijun Deng , Jiangtao Liu, Dariusz Czarkowski, Mariusz Bojarski, Erdem Asa, Francisco de Leon

2016

[68] Litz Wire in the MHz Range: Modelling and Improved Designs

Bradley A. Reese, Charles R. Sullivan

2017

[69] <https://www.newenglandwire.com/service/litz-wire/>

[70] <https://www.powerstream.com/>

[71] <https://cervconference.org/>

[72] <https://www.sae.org/>

[73] <https://afdc.energy.gov/>

- [74] **Magnetic triangulation based position sensor**
EP2362189A3E
Damián Poveda Verdú, César Orgilés Barceló, Gaspar Morey Klapsing, Jesús Arregui de Juan-Gutiérrez
2017
- [75] **Bench Testing Validation of Wireless Power Transfer up to 7.7kW Based on SAE J2954**
J. Schneider, K. Kamichi, D. Mikat, R. Sutton et al.
2018
- [76] **The State of the Art of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles**
C.C. Chan
2007
- [77] <https://www.citroen.co.uk/>
- [78] <https://www.honda.ca/>
- [79] <https://www.audi-technology-portal.de/en/>
<http://www.audi.gr/gr/web/el.html>
- [80] <https://www.globalsuzuki.com>
<https://auto.suzuki.gr/>
- [81] <https://blog.toyota.co.uk/>
<https://www.toyota-europe.com>

- [82] <https://www.bmw.gr/el/>
<https://www.bmwblog.com/>
<https://www.youtube.com/watch?v=GlrPrzuPMM>
<https://www.bmwusa.com/>
- [83] https://www.mini.com.gr/el_GR/home/range/electric.html
- [84] <https://www.volkswagen.gr/el.html>
- [85] <https://www.renault.com.gr/>
- [86] <https://www.hyundaiusa.com>
- [87] <https://www.chevrolet.com/>
- [88] <https://www.nissan.gr/>
https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/li_ion_ev.html
- [89] **Electrical Vehicles in Europe**
European Environment Agency
2016
- [90] **Εφαρμογή του 7ου προγράμματος δράσης για το περιβάλλον**
Ψήφισμα του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου της 17ης Απριλίου 2018

- [91] **Συμφωνία του Παρισιού**
Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης
19.10.2016
- [92] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- [93] <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/materials/how-a-microscopic-supercapacitor-will-supercharge-mobile-electronics>
- [94] **The Future of Automotive Lithium-ion Battery Recycling: Charting a Sustainable Course**
Linda Gaines
2014
- [95] **Research for TRAN Committee – Charging infrastructure for electric road vehicles**
Spöttle, M., Jörling, K., Schimmel, M., Staats, M., Grizzel L., Jerram, L., Drier, W., Gartner, J.
European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels,
2018
- [96] **Προτάσεις για τη Λειτουργία της Αγοράς Ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα**
Παπαθανασίου Σταύρος, Σχινά Όλγα
ΡΑΕ,
2019
- [97] <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/en/>

- [98] **Wirelessly Powered Implantable Pacemaker with On-Chip Antenna**
Y. Sun, B. Greet, D. Burkland, M. John, M. Razavi, A. Babakhani
2017
- [99] <https://www.p3-group.com/en/>
- [100] <https://www.pluglesspower.com/>
- [101] **Test Results of the PLUGLESS Inductive Charging System from Evatran Group, Inc.**
R. Carlson, B. Normann
2014
- [102] **Review on Contactless Power Transfer for Electric Vehicle Charging**
Ravikiran Vaka, Ritesh Kumar Keshri
2017
- [103] <https://www.wirelesspowerconsortium.com/qi/>
- [104] **The Qi Wireless Power Transfer System Power Class 0 specification**
Parts 1 and 2: Interface Definitions
Wireless Power Consortium
2016
- [105] <https://www.airfuel.org/>
- [106] **AirFuel Resonant Wireless Power Transfer (WPT) System Baseline System Specification (BSS)**
AirFuel Alliance
2017

[107] An Overview of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles

X. Chen, W. Shen, T. T. Vo, Z. Cao, A. Kapoor

2012

[108] State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations

M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, P. J. Ker

2018

[109] Batteries and Battery Management Systems for Electric Vehicles

M. Brandl, H. Gall, M. Wenger, V. Lorentz, M. Giegerich, F. Baronti, G. Fantechi, L. Fanucci, R. Roncella, R. Saletti, S. Saponara, A. Thaler,

M. Cifrain, W. Prochazka

2012

[110] <https://www.envision-aesc.com/en/index.html>

<http://www.eco-aesc-lb.com/en/>

[111] Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and fuel Cell Vehicles

John G. Hayes, G. Abas Goodarzi

2017

[112] <http://www.ipt-technology.com/index.php/en/>

[113] <https://www.youtube.com/watch?v=p4L20yc4JxE>

[114] <https://www.conductix.com/en/news/2012-09-28/milton-keynes-lead-way-wirelessly-charged-electric-buses>

[115] <https://www.milton-keynes.gov.uk/pressreleases/2016/jul/more-electric-buses-destined-for-mk>

<https://www.milton-keynes.gov.uk/highways-and-transport-hub/bus-and-taxi/bus-projects/electric-bus>

[116] <https://spectrum.ieee.org/tech-talk/transportation/infrastructure/another-transit-system-tests-inductive-charging-buses>

[117] <https://chargemap.com/>

[118] <https://www.fortisis.eu/>

[119]

<https://www.deddie.gr/Documents2/DELTA%20TYPOU%202017/%CE%95%CE%93%CE%9A%CE%91%CE%99%CE%9D%CE%99%CE%91%20%CE%A3%CE%A4%CE%91%CE%98%CE%9C%CE%9F%CE%A5%20%CE%A6%CE%9F%CE%A1%CE%A4%CE%99%CE%A3%CE%97%CE%A3%20%CE%97%CE%9B%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%A9%CE%9D%20%CE%9F%CE%A7%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%A9%CE%9D.pdf>

<https://www.deddie.gr/el/stratigiki-eksugxronismos/kainotomia/ilektrokinisi/>

[120] **Σχέδιο Ανάπτυξης Δικτύου Σταθμών Φόρτισης σε Δημόσιους Χώρους**
Ηρακλής Μενεγάτος
ECO Mobility Conference
2018

[121] **ΟΔΗΓΙΑ 2014/94/ΕΕ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ**
της 22ας Οκτωβρίου 2014 για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών
καυσίμων
Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης
28.10.2014

[122] **Πρόταση επί της δημόσιας διαβούλευσης ΡΑΕ για το ρυθμιστικό πλαίσιο**
εγκατάστασης και λειτουργίας υποδομών επαναφόρτισης ηλεκτρικών
οχημάτων στην Ελλάδα
Ευάγγελος Καρφόπουλος
2018

- [123] **Δημόσια Διαβούλευση της ΡΑΕ για το ρυθμιστικό πλαίσιο εγκατάστασης και λειτουργίας υποδομών επαναφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα**
Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
14.11.2018
- [124] **Multiple Output Inductive Charger for Electric Vehicles**
V.B. Vu, V.T. Phan, M. Dahidah, V. Pickert
2018
- [125] **Ασύρματη Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων**
Ιωάννης Καρακίτσιος, Ευάγγελος Καρφόπουλος, Νίκος Χατζηαργυρίου
- [126] **Optimizing the Energy Transfer, With a High System Efficiency in Dynamic Inductive Charging of EVs**
I. Karakitsios, F. Palaiogiannis, A. Markou, N. Hartziargyriou
2018
- [127] **Συμβολή στην Ανάπτυξη Συστημάτων Ασύρματης Επαγωγικής Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων**
Ιωάννης Καρακίτσιος
Διδακτορική Διατριβή, 2019
- [128] **Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems**
M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys
2011