

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΔΟΤΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΘΕΟΔΩΡΟΥ ΜΗΛΑ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και
Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του
Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ: 398

Σεπτέμβριος 2023

Μέθοδοι Αποδοτικής Διαχείρισης Ενέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Νικόλαος Μήλας

Copyright © 2023

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved

Τμήμα του έργου συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας – 2ος Κύκλος» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).



**Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση**

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Πιστοποίηση

Πιστοποιείται ότι η παρούσα διδακτορική διατριβή με θέμα

«Μέθοδοι Αποδοτικής Διαχείρισης Ενέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων»

του κ. Νικόλαου Μήλα, Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Τεχνολογίας Υπολογιστών, παρουσιάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών τη 12η Σεπτεμβρίου 2023 και εξετάστηκε και εγκρίθηκε από την ακόλουθη Εξεταστική Επιτροπή:

- 1) Εμμανουήλ Τατάκης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών.
- 2) Δημήτριος Μούρτζης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών.
- 3) Επαμεινώνδας Μητρονίκας, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών.
- 4) Σωτήριος Νικολετσέας, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών.
- 5) Νικόλαος Παπανικολάου, Αναπληρωτής Καθηγητής Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης.
- 6) Παναγιώτης Σταυρόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών.
- 7) Αναστάσιος Κυρίτσης, Επίκουρος Καθηγητής Ιονίου Πανεπιστημίου.

Πάτρα, 12 Σεπτεμβρίου 2023

Το Επιβλέπον Μέλος Δ.Ε.Π.

EMMANUEL TATAKIS
13/09/2023 12:00

Καθηγητής Εμμανουήλ Τατάκης

Ο Πρόεδρος του Τμήματος

ANTONIOS ALEXANDRIDIS
13/09/2023 12:50

Καθηγητής Αντώνιος Αλεξανδρίδης

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών.

Το συνεχές ενδιαφέρον που σχετίζεται με το έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και τα ηλεκτρικά οχήματα έχει πυροδοτήσει εντατική έρευνα για νέες τεχνολογίες και πρακτικές αποδοτικής διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας. Δομικά στοιχεία των έξυπνων δικτύων και των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές. Ιδιαίτερα για τα ηλεκτρικά οχήματα, οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές αποτελούν την πιο διαδεδομένη πηγή αποθήκευσης ενέργειας. Συνεπώς, η εύρεση μεθόδων για την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας των συσσωρευτών είναι ιδιαίτερης σημασίας. Όμως, η διαχείριση της ενέργειας των συσσωρευτών, δεν αφορά μόνο τη φόρτιση αυτών σαν ενιαία συστοιχία, αλλά και την επιμέρους διαχείριση της ενέργειας κάθε κελιού, ώστε να διασφαλιστεί ότι κάθε μεμονωμένο κελί λειτουργεί κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο, εντός των προδιαγραφών που τίθενται από τον κατασκευαστή.

Το ρόλο της διαχείρισης της ενέργειας των μεμονωμένων κελιών επιτελούν τα Συστήματα Διαχείρισης Συσσωρευτών (ΣΔΣ), που είναι ευρέως γνωστά με την αγγλική ορολογία Battery Management Systems (BMS). Τα BMS επιτελούν διττό ρόλο. Αφενός μεν επιτηρούν την κατάσταση των συσσωρευτών μέσω της συλλογής και της επεξεργασίας μετρήσεων, αφετέρου δε, πραγματοποιούν εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισής τους, ώστε να αποφεύγονται καταστάσεις υπερφόρτισης και υποφόρτισης που μπορεί να οδηγήσουν σε ραγδαία φθορά του συσσωρευτή.

Έχοντας εκτιμήσει την κατάσταση των συσσωρευτών με τη χρήση του BMS, προσδίδεται η δυνατότητα για το χρονοπρογραμματισμό της φόρτισης λαμβάνοντας υπόψη και τη διαδικασία της εξισορρόπησης. Ο χρονοπρογραμματισμός της φόρτισης πολλών ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθμούς φόρτισης που βρίσκονται σε μια σύγχρονη πόλη, είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την αποφυγή υπερφόρτισης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για την κάλυψη των αναγκών μετακίνησης των οδηγών, λόγω της χρονοβόρας διαδικασίας της φόρτισης σε σχέση με τον ταχύ ανεφοδιασμό των συμβατικών οχημάτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η παρούσα διδακτορική διατριβή τοποθετείται σε δύο άξονες που σχετίζονται με την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας των συσσωρευτών σε ηλεκτρικά οχήματα. Ο πρώτος άξονας αφορά τη μελέτη και κατασκευή αποδοτικών BMS για την ενεργητική εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών με τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπών. Κατά την ανάλυση των υπό διερεύνηση τοπολογιών εξάγονται αναλυτικές εξισώσεις για όλα τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του κάθε μετατροπέα, ώστε να εξαχθεί με ακρίβεια το σημείο λειτουργίας αυτού. Έπειτα, πραγματοποιείται μοντελοποίηση των απωλειών στα επιμέρους στοιχεία του μετατροπέα. Στη συνέχεια, εκτελείται μετα-ευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης προκειμένου να εξαχθούν οι τιμές των στοιχείων του μετατροπέα που μεγιστοποιούν την απόδοση. Στο τελικό στάδιο, πραγματοποιείται η κατασκευή του μετατροπέα και η πειραματική αξιολόγηση των θεωρητικών εκτιμήσεων.

Ο δεύτερος άξονας της διατριβής σχετίζεται με τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθμούς φόρτισης. Η λήψη αποφάσεων πραγματοποιείται σε δύο κατευθύνσεις. Η πρώτη κατεύθυνση αφορά το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος σε σταθμό φόρτισης. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη της φόρτισης του οχήματος με γνώμονα τις ανάγκες μετακίνησης των οδηγών με χαμηλό κόστος και φθορά των συσσωρευτών κατά τη φόρτιση, αλλά και τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του σταθμού, τηρώντας τους περιορισμούς που τίθενται από το διαχειριστή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η δεύτερη κατεύθυνση σχετίζεται με την υποβοήθηση των οδηγών κατά την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης, αξιολογώντας τις υπηρεσίες φόρτισης που προφέρονται από τους κοντινότερους σταθμούς και επιλέγοντας το σταθμό εκείνο που καλύπτει σε μεγαλύτερο βαθμό τα κριτήρια που τίθενται από τους οδηγούς.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προσεγγίζεται το πρόβλημα της διαχείρισης συσσωρευτών σε ηλεκτρικό όχημα ολιστικά, αφενός μεν μέσα από τη διερεύνηση του χαμηλού επιπέδου που αφορά μεμονωμένους συσσωρευτές, αφετέρου δε, μέσω της λήψης αποφάσεων που σχετίζονται με τη διαδικασία της φόρτισης. Η δομή του κειμένου αποτελείται από την εισαγωγή και επτά κεφάλαια, με σκοπό την παρουσίαση των εργασιών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής.

Στην **Εισαγωγή** περιγράφονται οι τρέχουσες προκλήσεις στο αντικείμενο της διαχείρισης της ενέργειας ενός ηλεκτρικού οχήματος και περιγράφονται ο σκοπός και οι στόχοι της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο **Κεφάλαιο 1** πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα αντικείμενα που πραγματεύεται η διατριβή. Αρχικά, διερευνάται η βιβλιογραφία που αναφέρεται στα BMS, τα οποία κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται η εξισορρόπηση της ενέργειας των συσσωρευτών. Έπειτα, εξετάζονται οι μέθοδοι για το βέλτιστο σχεδιασμό και λειτουργία διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Τέλος, πραγματοποιείται ανασκόπηση των μεθόδων χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του συνόλου των μεθόδων και τεχνολογιών που προτείνονται στην παρούσα διατριβή για την επίτευξη της αποδοτικής διαχείρισης της ενέργειας των συσσωρευτών ενός ηλεκτρικού οχήματος. Συγκεκριμένα, η συστοιχία των συσσωρευτών χωρίζεται σε ομάδες των οκτώ συσσωρευτών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η εξισορρόπηση πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα, εσωτερικά στην ομάδα και μεταξύ ομάδων. Για την εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης μεμονωμένων κελιών σε μια ομάδα επιλέγεται ο μετατροπέας Flyback, με τον οποίο μεταφέρεται ενέργεια, αμφίδρομα, μεταξύ ενός συσσωρευτή και μιας ομάδας συσσωρευτών της συστοιχίας. Για να επιτευχθεί εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης διαφορετικών ομάδων συσσωρευτών που ανήκουν σε μια συστοιχία, μελετάται ο αμφίδρομος μετατροπέας Quasi-resonant Flyback. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ευρύτερη προσέγγιση που χρησιμοποιείται για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθμό φόρτισης, καθώς και η μεθοδολογία για την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης από τον οδηγό.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται θεωρητικά η λειτουργία του μετατροπέα τύπου Flyback με μη ιδανικά στοιχεία, προκειμένου να εξαχθούν οι απαραίτητες εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία του. Ο μετατροπέας Flyback είναι αμφίδρομος και λειτουργεί σύμφωνα με την τεχνική της σύγχρονης ανόρθωσης. Για να επιτευχθεί ταχεία εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών, ο μετατροπέας που επιτελεί το ρόλο του BMS πρέπει να λειτουργεί με υψηλό ρεύμα στην πλευρά του κελιού και χαμηλή τάση, η οποία καθορίζεται από την τεχνολογία του κελιού. Συνεπώς, οι μη ιδανικότητες των στοιχείων του μετατροπέα επιδρούν έντονα στο θεωρητικό κέρδος τάσης αυτού, καθιστώντας την ανάλυση που βασίζεται στον ιδανικό μετατροπέα μη ακριβή. Έχοντας εξάγει αναλυτικές σχέσεις για τα λειτουργικά μεγέθη του μετατροπέα, πραγματοποιείται ανάλυση απωλειών στα επιμέρους στοιχεία του, προκειμένου να εκτελεστεί μετα-ευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης για την επιλογή των σχεδιαστικών παραμέτρων που οδηγούν σε μεγιστοποίηση της απόδοσης. Έπειτα, κατασκευάζεται εργαστηριακό πρωτότυπο για την αξιολόγηση της ακρίβειας της θεωρητικής ανάλυσης.

Στο **Κεφάλαιο 4** προτείνεται μέθοδος χρονοπρογραμματισμού για το συντονισμό των επιμέρους μετατροπέων Flyback που είναι εγκατεστημένοι σε μια συστοιχία συσσωρευτών, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ταχεία εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης των κελιών με μειωμένες ενεργειακές απώλειες. Για να επιτευχθεί ο χρονοπρογραμματισμός εξισορρόπησης, προτείνεται υβριδική μέθοδος βελτιστοποίησης που περιλαμβάνει μετα-ευρετικό αλγόριθμο και αλγόριθμο καθόδου κλίσης (gradient descent).

Στο **Κεφάλαιο 5** αναλύεται θεωρητικά η λειτουργία του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback για την εξισορρόπηση ομάδων συσσωρευτών. Ακολουθώντας τα ίδια βήματα με την περίπτωση του κλασσικού μετατροπέα Flyback, πραγματοποιείται ανάλυση του Quasi-resonant Flyback ώστε να εξαχθούν οι συναρτήσεις χρόνου που περιγράφουν τα λειτουργικά μεγέθη του μετατροπέα. Έπειτα, πραγματοποιείται ανάλυση απωλειών, βελτιστοποίηση σχεδιασμού με χρήση μετα-ευρετικού αλγορίθμου, καθώς και κατασκευή εργαστηριακού πρωτοτύπου για την επιβεβαίωση της θεωρητικής ανάλυσης.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται μεθοδολογία υποβοήθησης λήψης αποφάσεων, αφενός μεν για την επιλογή σταθμού φόρτισης από τον οδηγό, αφετέρου δε, για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθμό φόρτισης. Αξιοποιώντας την Analytic Hierarchy Process (AHP) ως μέθοδο υποβοήθησης λήψης αποφάσεων, εισάγονται οι προτεραιότητες του οδηγού σχετικά με τη φόρτιση του οχήματος λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια κόστους και χρόνου φόρτισης, καθώς και ρεύματος φόρτισης, προκειμένου να εξασφαλίζεται η υγιής λειτουργία των συσσωρευτών. Επιπλέον, για τη λύση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθμό φόρτισης αξιολογείται ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm) και ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization), ώστε να διαπιστωθεί ποιος είναι ο καταλληλότερος για την εύρεση της καλύτερης λύσης σε μικρότερο χρόνο. Έτσι, προτείνεται ένα συνολικό σύστημα για την επικοινωνία μεταξύ ηλεκτρικού οχήματος και σταθμού φόρτισης, με σκοπό την εύρεση του καταλληλότερου προφίλ φόρτισης σύμφωνα με τις προτεραιότητες που τίθενται από τον οδηγό και το διαχειριστή του σταθμού.

Ολοκληρώνοντας, στο **Κεφάλαιο 7** πραγματοποιείται μία ανακεφαλαίωση της διατριβής, συνοψίζονται τα πρωτότυπα σημεία αυτής και αναδεικνύεται η συμβολή της στον τομέα της διαχείρισης ενέργειας συσσωρευτών και του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Εμμανουήλ Τατάκη για την επιστημονική και ηθική υποστήριξή του όλα αυτά τα χρόνια, από την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας μέχρι και σήμερα. Η αμέριστη συμπαράστασή του, καθώς και η εμπιστοσύνη του, το ενδιαφέρον του και οι συμβουλές του σε όλα τα στάδια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής, διετέλεσαν σημαντικό ρόλο για την επίτευξη των στόχων που τέθηκαν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στα μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής Καθηγητή κ. Δημήτριο Μούρτζη και Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Επαμεινώνδα Μητρονίκα. Πέρα από τη συνεργασία στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αυτής, με τον κ. Μούρτζη έχουμε μακροχρόνια συνεργασία, στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων στα οποία εργάστηκα, καθώς και κατά την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου διπλωματικής εργασίας, στην οποία ήταν επιβλέπων καθηγητής. Ομοίως, με τον κ. Μητρονίκα, πέρα από τη συνεργασία στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αυτής, έχουμε επίσης άριστη συνεργασία από τα προπτυχιακά μου χρόνια κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, στην οποία ήταν συνεπιβλέπων καθηγητής.

Κάθε μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής έχει διατελέσει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωσή μου ως Επιστήμονα Μηχανικό, καθώς και στον τρόπο που αντιμετωπίζω ερευνητικά και μη θέματα.

Οφείλω θερμές ευχαριστίες σε όλους του συναδέλφους με τους οποίους συνεργάστηκα όλα αυτά τα χρόνια. Από το Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας θέλω να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Α. Μίρτσεβ και Θ. Μουσελίνο για τη φιλία και άριστη συνεργασία που αναπτύξαμε κατά τη συμβίωσή μας στο εργαστήριο για την εκπόνηση των διδακτορικών μας διατριβών. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω την προηγούμενη γενιά υποψήφιων διδασκόντων του εργαστηρίου, Γ. Χρηστίδη, Σ. Συρίγο, Δ. Παπαθανασόπουλο και Κ. Ζαοσκούφη για τη βοήθεια που μου έδωσαν στα πρώτα μου βήματα στο εργαστήριο και το ευχάριστο κλίμα που δημιούργησαν.

Ένα μεγάλο μέρος της μακροχρόνιας αυτής πορείας αποτέλεσε το διάστημα κατά το οποίο εργάστηκα στο Εργαστήριο Συστημάτων Παραγωγής και Αυτοματισμού (LMS). Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους συναδέλφους μου Κ. Βλάχου, Ν. Μπόλη και Σ. Φωτιά, καθώς και τους Χ. Γιαννούλη και Κ. Σμπαρούνη για την εξαιρετική φιλία και συνεργασία που αναπτύξαμε.

Ευχαριστίες

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Θεόδωρο και Κατερίνα, τον αδερφό μου Κωνσταντίνο, καθώς και τη σύζυγό μου Σοφία για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση που μου προσέφεραν. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στο γάτο μου Μίνι για την παρέα που μου κράτησε κατά τα στάδια συγγραφής του παρόντος κειμένου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
E.1 Εισαγωγή	1
E.2 Δομή συστήματος συσσωρευτών ηλεκτρικού οχήματος.....	2
E.2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας ηλεκτροχημικού συσσωρευτή	3
E.2.2 Το σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών (BMS)	4
E.3 Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και σύνδεση με το δίκτυο.....	7
E.3.1 Φόρτιση ηλεκτροχημικών συσσωρευτών.....	7
E.3.2 Σύνδεση ΗΟ με το έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.....	9
E.4 Σκοπός και στόχοι διδακτορικής διατριβής.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	15
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	15
1.1 Εισαγωγή	15
1.2 Συστήματα εξισορρόπησης στάθμης φόρτισης συσσωρευτών	15
1.3 Μετατροπείς τύπου Flyback και Quasi-resonant Flyback.....	17
1.4 Βέλτιστος σχεδιασμός διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος.....	20
1.5 Χρονοπρογραμματισμός Φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	24
1.6 Τοποθέτηση Διδακτορικής Διατριβής στην ακαδημαϊκή αιχμή.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	31
ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	31
2.1 Εισαγωγή	31
2.2 Δομή του προτεινόμενου συστήματος.....	32
2.3 Τοπολογία εξισορρόπησης σε επίπεδο κελιών	33
2.4 Τοπολογία εξισορρόπησης σε επίπεδο ομάδας κελιών	36

2.5 Μέθοδος χρονοπρογραμματισμού φόρτισης και επιλογής σταθμού	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	41
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ FLYBACK ΓΙΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ	41
3.1 Εισαγωγή	41
3.2 Ανάλυση Flyback με μη ιδανικά στοιχεία	41
3.2.1 Περιγραφή του επιλεγμένου μοντέλου Flyback	42
3.2.2 Ανάλυση διαστημάτων αγωγής	45
3.2.3 Τελικό σύστημα εξισώσεων Flyback με μη ιδανικά στοιχεία	49
3.3 Ανάλυση απωλειών μετατροπέα Flyback	51
3.3.1 Απώλειες στο μετασχηματιστή	51
3.3.2 Απώλειες στη δίοδο περιορισμού υπερτάσεων	54
3.3.3 Απώλειες στο ημιαγωγικό στοιχείο του πρωτεύοντος	56
3.3.4 Λοιπές απώλειες	56
3.3.5 Υπολογισμός απόδοσης μετατροπέα Flyback	57
3.4 Μεγιστοποίηση απόδοσης μετατροπέα Flyback	57
3.4.1 Μεταβλητές βελτιστοποίησης και περιορισμοί	58
3.4.2 Επιλογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης	59
3.4.3 Εφαρμογή GA κατά σχεδιασμό του μετατροπέα Flyback	61
3.4.4 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης	63
3.5 Πειραματική αξιολόγηση του μετατροπέα Flyback	67
3.5.1 Αξιολόγηση ακρίβειας εκτίμησης του σημείου λειτουργίας	68
3.5.2 Αξιολόγηση ακρίβειας εκτίμησης απόδοσης	74
3.5.3 Λειτουργία με μεταβλητή διακοπτική συχνότητα	79
3.6 Προσομοίωση λειτουργίας κατά την εξισορρόπηση	80

3.7 Έξυπνος συσσωρευτής με χρήση του OPC-UA	84
3.8 Συμπεράσματα	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	91
ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ	91
4.1 Εισαγωγή	91
4.2 Μαθηματική μοντελοποίηση	91
4.2.1 Μοντέλο μετατροπέα Flyback	92
4.2.2 Αντικειμενική συνάρτηση και περιοριστικές συνθήκες	97
4.3 Υβριδική μέθοδος χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης	99
4.4 Αξιολόγηση χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης μέσω προσομοίωσης	102
4.5 Συμπεράσματα	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	111
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ QUASI-RESONANT FLYBACK ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΟΜΑΔΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ	111
5.1 Εισαγωγή	111
5.2 Ανάλυση Quasi-resonant Flyback	111
5.2.1 Κυκλωματικό διάγραμμα του Quasi-resonant Flyback	112
5.2.2 Μέθοδος παλμοδότησης του Quasi-resonant Flyback	113
5.2.3 Ανάλυση διαστημάτων αγωγής	115
5.2.4 Σύστημα εξισώσεων για τη λειτουργία του Quasi-resonant Flyback	121
5.3 Ανάλυση απωλειών μετατροπέα Quasi-resonant Flyback	123
5.3.1 Ωμικές απώλειες στο μετασχηματιστή	123
5.3.2 Ωμικές απώλειες στο πηνίο ταλάντωσης	124
5.3.3 Απώλειες πυρήνα στο μετασχηματιστή	124

5.3.4	Απώλειες πυρήνα στο πηνίο ταλάντωσης	126
5.3.5	Απώλειες στα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία	129
5.3.6	Λοιπές απώλειες	129
5.3.7	Υπολογισμός απόδοσης μετατροπέα Quasi-resonant Flyback.....	130
5.4	Μεγιστοποίηση απόδοσης μετατροπέα Quasi-resonant Flyback	130
5.4.1	Προδιαγραφές λειτουργίας για το μετατροπέα Quasi-resonant Flyback.....	130
5.4.2	Μεταβλητές βελτιστοποίησης και περιορισμοί.....	131
5.4.3	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης.....	132
5.5	Πειραματική αξιολόγηση μετατροπέα Quasi-resonant Flyback.....	133
5.5.1	Αξιολόγηση λειτουργίας μετατροπέα.....	134
5.5.2	Εκτίμηση Κατάστασης Λειτουργίας.....	139
5.5.3	Σύγκριση με βιβλιογραφία.....	144
5.6	Συμπεράσματα	145
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6		147
ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....		147
6.1	Εισαγωγή	147
6.2	Μαθηματική μοντελοποίηση κριτηρίων χρονοπρογραμματισμού	148
6.2.1	Μαθηματική μοντελοποίηση χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος	148
6.3	Επιλογή μετα-ευρετικού αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού.....	154
6.3.1	Περιγραφή αλγορίθμου Particle Swarm Optimization (PSO).....	154
6.3.2	Σχεδιασμός πειραμάτων για τη σύγκριση των αλγορίθμων GA και PSO.....	155
6.3.3	Επιλογή παραμέτρων λειτουργίας του GA.....	158
6.3.4	Επιλογή παραμέτρων λειτουργίας του PSO	161
6.3.5	Σύγκριση μεταξύ GA και PSO	163

6.3.6	Σύγκριση μεταξύ PSO και εξαντλητικής διερεύνησης.....	166
6.4	Υποβοήθηση λήψης αποφάσεων για την επιλογή σταθμού φόρτισης	167
6.4.1	Μοντελοποίηση κριτηρίων και περιγραφή της AHP	167
6.5	Σενάριο λειτουργίας μεθόδων επιλογής σταθμού φόρτισης HO	172
6.6	Επικοινωνία οχήματος και σταθμού φόρτισης μέσω του προτύπου OPC-UA	175
6.7	Συμπεράσματα	175
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7		179
ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ		179
7.1	Ανακεφαλαίωση της διατριβής	179
7.2	Συμβολή της διατριβής	181
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		183
Πίνακας Συμβολισμών.....		193
Κεφάλαιο 3.....		193
Κεφάλαιο 4.....		196
Κεφάλαιο 5.....		197
Κεφάλαιο 6.....		200
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....		205
Πίνακας Taguchi τριών παραμέτρων με δέκα επίπεδα έκαστη		205
Περίληψη		207
Summary		211

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ε.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχει έρθει στο προσκήνιο η έννοια του έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (Smart Grid). Σε ένα έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας συνυπάρχουν συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), καθώς και παντός είδους ηλεκτρικά φορτία. Αυτή η σύγχρονη μεταμόρφωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει την πολυπλοκότητα αυτού και καθιστά δύσκολη την αποδοτική διαχείρισή του [1]. Ιδιαίτερα, η στοχαστική λειτουργία των ΑΠΕ καθιστά σύνθετο τον έλεγχο και τη διατήρηση της ευστάθειας του δικτύου. Συνεπώς, τα τελευταία χρόνια έχουν ενταθεί οι προσπάθειες για νέα ερευνητικά αποτελέσματα στους τομείς που σχετίζονται με το έξυπνο δίκτυο, τόσο από την ακαδημαϊκή κοινότητα, όσο και από τη βιομηχανία.

Σημαντικό ρόλο, ως φορτία ενός έξυπνου δικτύου, διαδραματίζουν τα Ηλεκτρικά Οχήματα (ΗΟ), τα οποία τείνουν να κυριαρχήσουν έναντι των συμβατικών οχημάτων, κυρίως λόγω της αποδοτικότερης λειτουργίας τους [2]. Η αποθήκευση της ενέργειας σε ένα ΗΟ γίνεται, ως επί το πλείστον, με ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η σωστή διαχείριση της ενέργειάς των συσσωρευτών και η επιτήρηση της κατάστασής τους, ώστε να διασφαλιστεί η μεγάλη διάρκεια ζωής τους [3]. Οι λειτουργίες αυτές επιτελούνται από το Σύστημα Διαχείρισης Συσσωρευτών (ΣΔΣ) που συναντάται με τον αγγλικό όρο Battery Management System (BMS).

Ένα μειονέκτημα των ΗΟ είναι η μικρότερη αυτονομία τους και ο αργός ανεφοδιασμός τους, σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα. Ως εκ τούτου δημιουργείται η ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σε μεθόδους αποδοτικής διαχείρισης της ενέργειάς τους. Συνεπώς, εντείνονται οι ερευνητικές προσπάθειες για ταχεία φόρτιση με υψηλή απόδοση, αλλά και για την εύρεση μεθόδων συντονισμού των σταθμών φόρτισης και των ΗΟ με σκοπό το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης, προκειμένου να μπορεί να εξυπηρετηθεί ο ολοένα και αυξανόμενος αριθμός ΗΟ με όσο το δυνατό μικρότερη καταπόνηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [2].

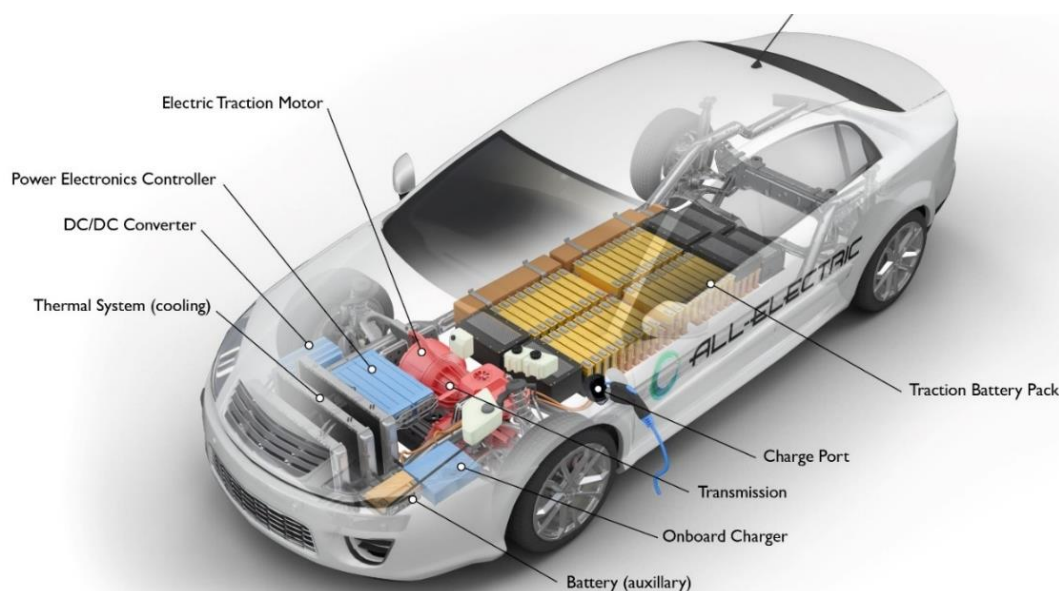
Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, πέρα από το ρόλο τους ως πηγή ενέργειας των ΗΟ, μπορούν να αξιοποιηθούν και ως μέσα εξομάλυνσης της καμπύλης φορτίου ενός έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα αυτή περιγράφεται από τον όρο Vehicle-to-Grid (V2G) και επιτυγχάνεται μέσα από την εφαρμογή αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού, την αξιοποίηση των δικτύων

επικοινωνιών και τη χρήση αμφίδρομων ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Έτσι το ΗΟ παύει να αποτελεί απλά ένα παθητικό φορτίο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά εξελίσσεται σε ένα ενεργό φορτίο, που μπορεί να απορροφήσει ενέργεια όταν υπάρχει περίσσεια στο δίκτυο και να αποδώσει ενέργεια στο δίκτυο όταν αυξάνεται η ζήτηση [2].

Αναγνωρίζοντας τις νέες απαιτήσεις και δυνατότητες που προκύπτουν από την έλευση των έξυπνων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και των ΗΟ, στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο περιγράφεται ένα μέρος από τις τρέχουσες προκλήσεις στον τομέα της διαχείρισης ενέργειας ΗΟ, καθώς και ο σκοπός και οι στόχοι της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ε.2 Δομή συστήματος συσσωρευτών ηλεκτρικού οχήματος

Το σύστημα μετάδοσης της ισχύος ενός ΗΟ απαρτίζεται από διάφορα επιμέρους υποσυστήματα, καθένα από τα οποία επιτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία, προκειμένου να μεταφερθεί η ενέργεια από το σύστημα αποθήκευσης στους κινητήριους τροχούς (Σχήμα Ε.1). Αξίζει να αναφερθεί ότι η χρήση ηλεκτροχημικών συσσωρευτών δεν είναι ο μόνος τρόπος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ηλεκτρικό όχημα. Τα τελευταία χρόνια εντείνεται η έρευνα για τη χρήση του υδρογόνου ως μέσο αποθήκευσης της ενέργειας σε ΗΟ και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου [4].



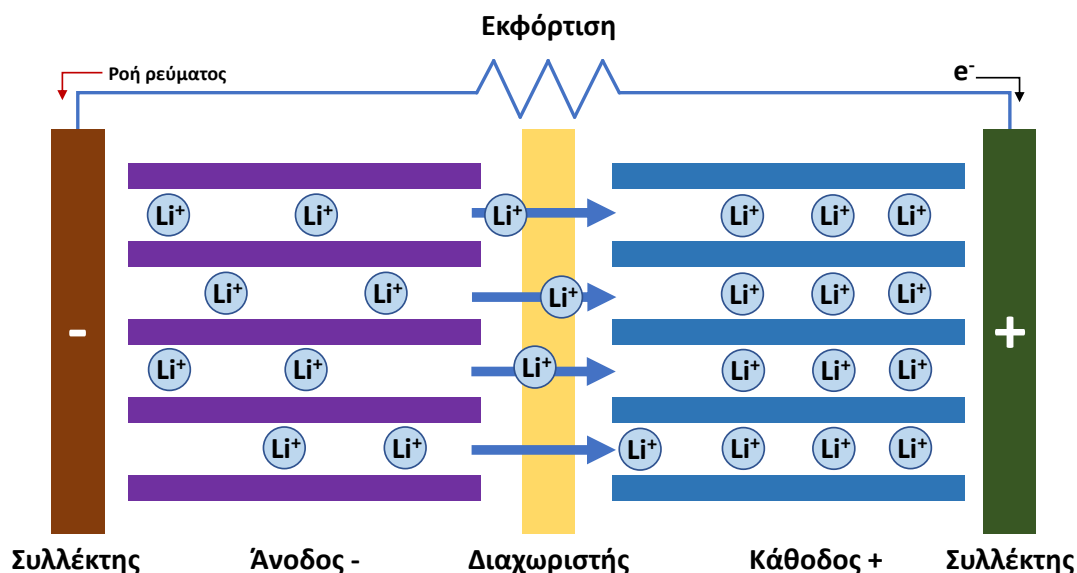
Σχήμα Ε.1: Βασικά υποσυστήματα του συστήματος μετάδοσης ισχύος ΗΟ ¹.

¹ <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>

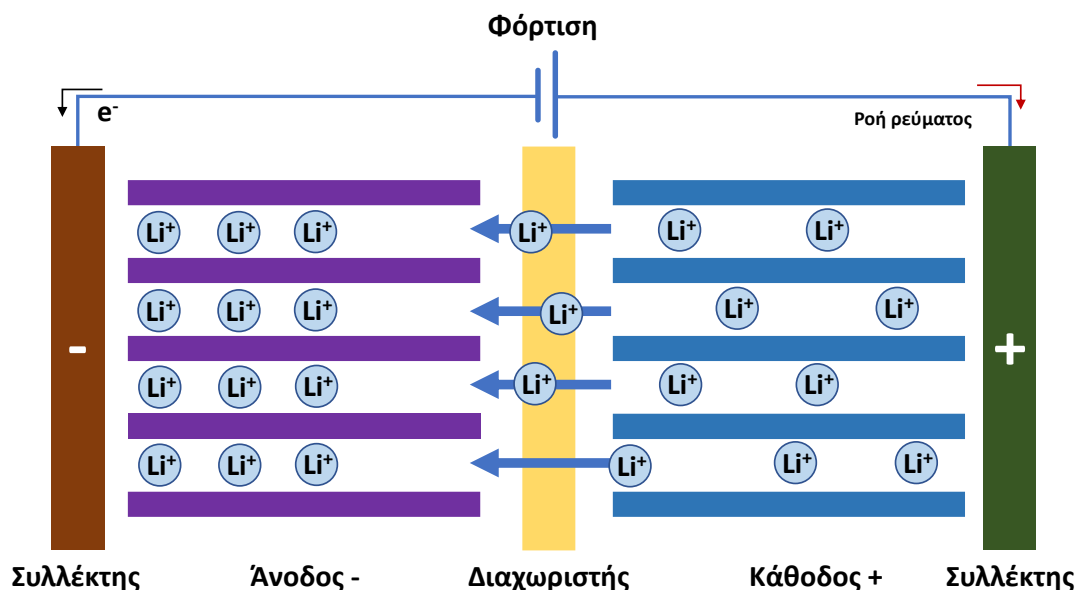
Ε.2.1 Βασικές αρχές λειτουργίας ηλεκτροχημικού συσσωρευτή

Η δομική μονάδα του συστήματος συσσωρευτών είναι το ηλεκτροχημικό στοιχείο (κελί). Ένα κελί λιθίου αποτελείται, στην απλούστερη του μορφή, από ένα θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (κάθοδος), ένα αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (άνοδος), τον ηλεκτρολύτη, το διαχωριστή και τους συλλέκτες [5]. Η βασική αρχή λειτουργίας ενός ηλεκτροχημικού στοιχείου λιθίου παρουσιάζεται στο Σχήμα Ε.2.

Κατά την εκφόρτιση, τα ιόντα λιθίου μεταφέρονται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο προς το θετικό ηλεκτρόδιο μέσω του ηλεκτρολύτη, δημιουργώντας έτσι ροή ηλεκτρονίων από το αρνητικό ηλεκτρόδιο προς το θετικό ηλεκτρόδιο στο εξωτερικό κύκλωμα [5]. Κατά τη φόρτιση, πραγματοποιείται η ανάποδη διαδικασία, κατά την οποία τα ιόντα λιθίου μεταφέρονται από το θετικό ηλεκτρόδιο προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο [5]. Ο διαχωριστής και οι ηλεκτρολύτες είναι ιοντικά αγωγάι, αλλά όχι ηλεκτρικά. Επομένως, επιτρέπουν τη διέλευση ιόντων και όχι ηλεκτρονίων, ώστε να μην πραγματοποιείται εσωτερικό βραχυκύκλωμα στο κελί. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή των υλικών κατασκευής του κελιού καθορίζει τις προδιαγραφές λειτουργίας του, όπως είναι η ονομαστική τάση, το ονομαστικό ρεύμα, η χωρητικότητα, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης κ.α.

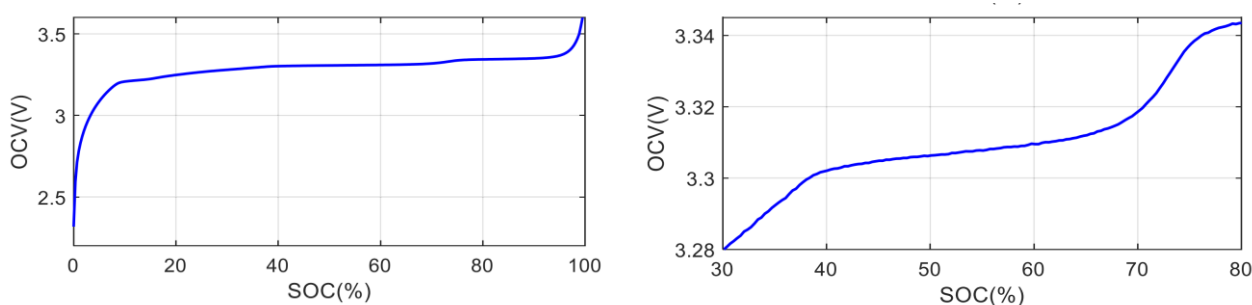


Σχήμα Ε.2: Αρχή λειτουργίας ηλεκτροχημικού στοιχείου ιόντων λιθίου κατά την εκφόρτιση. Βασισμένο στην [5].



Σχήμα Ε.3: Αρχή λειτουργίας ηλεκτροχημικού στοιχείου ιόντων λιθίου κατά τη φόρτιση. Βασισμένο στην [5].

Η τάση που εμφανίζεται στα άκρα του κελιού όταν αυτό δεν διαρρέεται από ρεύμα μπορεί να συσχετιστεί με τη στάθμη φόρτισής του. Μια τυπική μορφή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (Open Circuit Voltage, OCV) ως συνάρτηση της στάθμης φόρτισης (State of Charge, SoC) του κελιού παρουσιάζεται στο Σχήμα Ε.4.



Σχήμα Ε.4: Τυπική μορφή καμπύλης τάσης ανοιχτού κυκλώματος και στάθμης φόρτισης για κελί ιόντων λιθίου [6].

Ε.2.2 Το σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών (BMS)

Όπως αναφέρθηκε, το σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας σε ένα ΗΟ δεν περιλαμβάνει μόνο τους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές. Είναι ένα πλήρες σύστημα που αποτελείται από τη συστοιχία συσσωρευτών, το φορτιστή που βρίσκεται στο όχημα και το σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών

(Battery Management System, BMS). Το BMS επιτελεί διττό ρόλο. Αφενός μεν είναι υπεύθυνο για την επιτήρηση της κατάστασης των συσσωρευτών, αφετέρου δε, αναλαμβάνει την εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισής τους [3]. Η επιτήρηση της κατάστασης των συσσωρευτών πραγματοποιείται μέσω της μέτρησης της τάσης, του ρεύματος και της θερμοκρασίας τους. Συνεπώς, εξασφαλίζεται ότι η λειτουργία τους θα συμφωνεί με τις προδιαγραφές και τα όρια που τίθενται από τον κατασκευαστή. Επιπλέον, με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων και ισοδύναμων κυκλωμάτων, πραγματοποιείται εκτίμηση της SoC, ώστε να είναι εφικτή η περαιτέρω εκτίμηση της αυτονομίας του οχήματος και του απαιτούμενου χρόνου φόρτισης [7]. Πέρα από την εκτίμηση της SoC, το BMS πραγματοποιεί εκτίμηση και της κατάστασης της υγείας (State of Health, SoH) του συσσωρευτή. Η γνώση της SoH είναι ιδιαίτερα σημαντική για την πρόβλεψη του υπολειπόμενου ωφέλιμου χρόνου ζωής του συσσωρευτή και συνεπώς, την έγκαιρη αντικατάστασή του για τη διασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας του HO [3].

Ο δεύτερος ρόλος του BMS αφορά την εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών και αποτελεί ένα από τα κύρια αντικείμενα της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Όλοι οι συσσωρευτές έχουν μεταξύ τους διαφορές. Ακόμα και αν προέρχονται από την ίδια γραμμή παραγωγής, κατασκευαστικοί ή περιβαλλοντικοί παράγοντες επιδρούν στη σχέση που συνδέει τη SoC με την τάση του κελιού, στην απόδοση Coulomb, καθώς και στους μηχανισμούς γήρανσης [8]. Συνεπώς, παρόλο που εκ πρώτης όψεως οι συσσωρευτές ενός HO βρίσκονται πάντα στην ίδια κατάσταση, λόγω της μεταξύ τους σύνδεσης σε σειρά και της φόρτισης/εκφόρτισης όλων μαζί, στην πράξη παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στην κατάστασή τους. Οι διαφοροποιήσεις αυτές αντικατοπτρίζονται στη SoC του συσσωρευτή και τείνουν να γίνουν πιο έντονες σε βάθος χρόνου [8], που τα κελιά επιβαρύνονται με αρκετούς κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης σε διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες. Κατά τη λειτουργία της συστοιχίας, το BMS αναλαμβάνει να εξισορροπήσει τη SoC όλων των κελιών, ώστε να διασφαλιστεί ότι δεν δημιουργούνται μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ τους.

Στοχεύοντας στην υλοποίηση BMS για την εξισορρόπηση συσσωρευτών, η ακαδημαϊκή κοινότητα και η βιομηχανία έχουν προτείνει διάφορες τοπολογίες διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Οι μέθοδοι εξισορρόπησης χωρίζονται στις δύο βασικές κατηγορίες της εξισορρόπησης με διοχέτευση της ενέργειας στο περιβάλλον υπό μορφή θερμότητας, και στην ενεργητική εξισορρόπηση με εκμετάλλευση της ενέργειας [8], [9]. Η πρώτη περίπτωση αφορά τη χρήση ωμικών αντιστάσεων και ημιαγωγικών στοιχείων ως ηλεκτρονικά φορτία για τη μείωση της SoC από

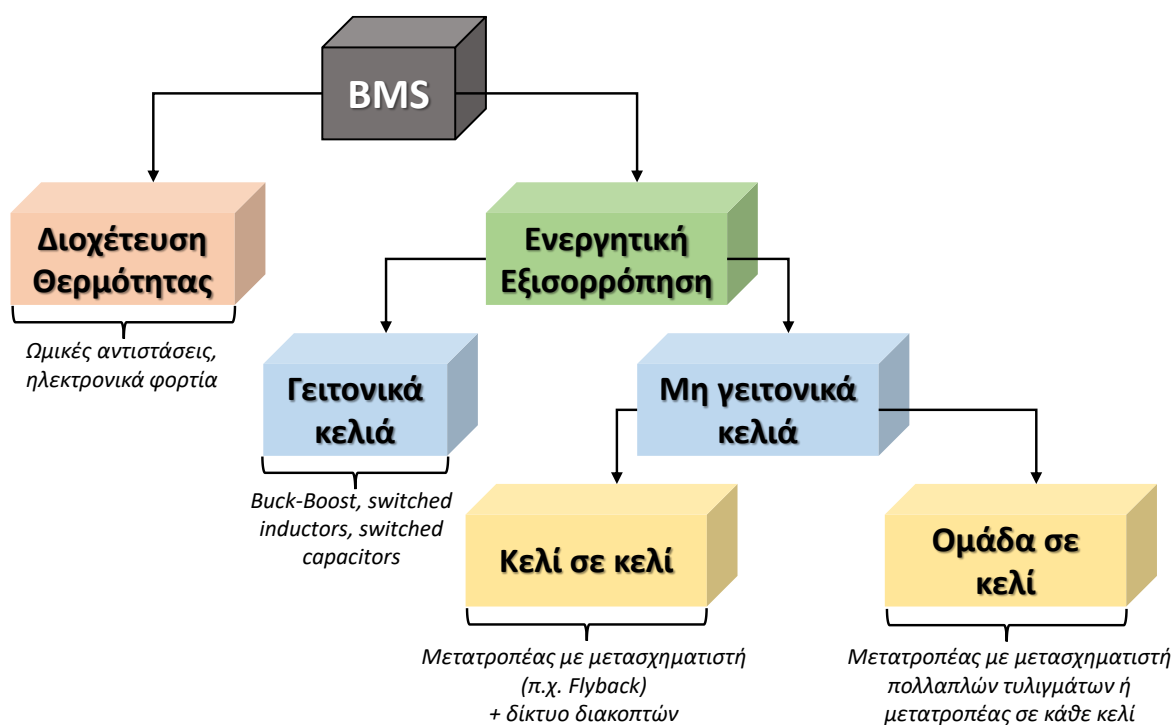
υπερφορτισμένα κελιά [10]. Η μέθοδος αυτή είναι η πιο οικονομική λόγω της απλότητάς της, αλλά είναι η πιο ενεργοβόρα καθώς όλη η περισσευούμενη ενέργεια δεν αξιοποιείται. Επιπλέον, εφαρμόζεται μόνο σε υπερφορτισμένα κελιά και δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για την περίπτωση των υποφορτισμένων κελιών.

Η κατηγορία της ενεργητικής εξισορρόπησης με εκμετάλλευση της ενέργειας αφορά τη μεταφορά ενέργειας από υπερφορτισμένα σε υποφορτισμένα κελιά εντός της συστοιχίας [9]. Είναι προφανές ότι υπάρχει πληθώρα ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που μπορούν να αξιοποιηθούν για την ενεργητική εξισορρόπηση. Επομένως, για την καλύτερη κατηγοριοποίηση των διατάξεων εξισορρόπησης, οι διατάξεις που προσφέρουν ενεργητική εξισορρόπηση κατηγοριοποιούνται με τη σειρά τους στις δύο κατηγορίες της εξισορρόπησης γειτονικών και της εξισορρόπησης μη γειτονικών κελιών.

Οι διατάξεις που επιτρέπουν αποκλειστικά τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ γειτονικών κελιών προσφέρουν ενεργητική εξισορρόπηση με αρκετά υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος. Όμως, όταν τα κελιά που συμμετέχουν στην εξισορρόπηση δεν είναι γειτονικά, είναι πιθανόν να απαιτηθούν πολλές μεταβάσεις κατά τη μεταφορά της ενέργειας από ένα υπερφορτισμένο σε ένα υποφορτισμένο κελί, καθώς και πιο σύνθετος χρονοπρογραμματισμός. Τυπικές τοπολογίες για την ενεργητική εξισορρόπηση γειτονικών κελιών είναι οι τοπολογίες των switched capacitors, switched inductors, καθώς και ο μετατροπέας Buck-Boost [8], [9].

Η εξισορρόπηση μη γειτονικών κελιών πραγματοποιείται με τη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που περιέχουν μετασχηματιστή. Η κατηγορία αυτή διαχωρίζεται περαιτέρω στις κατηγορίες της απευθείας εξισορρόπησης από κελί-σε-κελί (Direct Cell-to-Cell, D-C2C) και σε αυτήν της εξισορρόπησης από ομάδα-σε-κελί (Module-to-Cell, M2C). Κατά τη D-C2C εξισορρόπηση χρησιμοποιείται δίκτυο διακοπών για την απευθείας σύνδεση δύο συσσωρευτών μέσω ενός αμφίδρομου μετατροπέα ισχύος, προκειμένου να μεταφερθεί η περίσσεια ενέργειας από τον υπερφορτισμένο συσσωρευτή προς τον υποφορτισμένο [11].

Κατά την εξισορρόπηση M2C η ενέργεια μεταφέρεται μέσω μετατροπέα ισχύος είτε από ένα υπερφορτισμένο κελί προς το σύνολο της ομάδας, είτε από το σύνολο της ομάδας προς το υποφορτισμένο κελί [3]. Στην σπάνια περίπτωση που η συστοιχία συσσωρευτών περιέχει μικρό αριθμό κελιών, όλη η συστοιχία αποτελεί μία ομάδα. Στην περίπτωση αυτή, η εξισορρόπηση M2C μπορεί να αναφερθεί με τον όρο Pack-to-Cell (P2C) [12]. Η κατηγοριοποίηση των μεθόδων εξισορρόπησης ενέργειας συσσωρευτών που αναφέρθηκαν, παρουσιάζεται στο Σχήμα Ε.5.



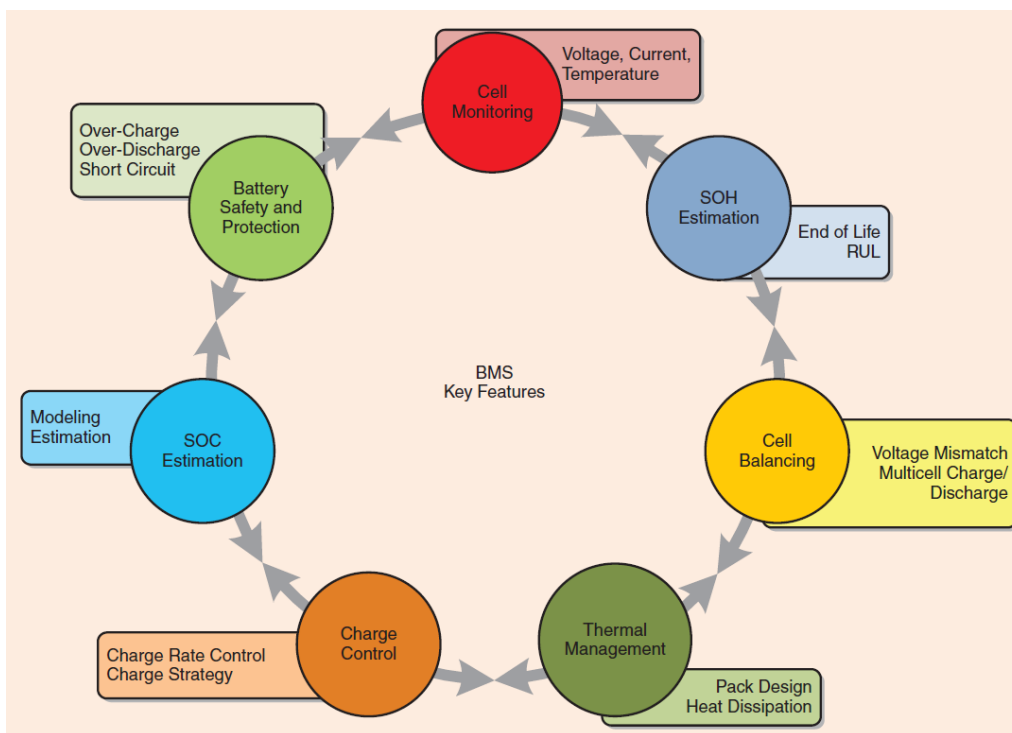
Σχήμα Ε.5: Κατηγοριοποίηση των BMS σχετικά με τον τρόπο που επιτυγχάνεται η εξισορρόπηση.

Είναι προφανές, ότι κάθε μέθοδος εξισορρόπησης έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που πρέπει να αξιολογηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις που τίθενται για κάθε εφαρμογή. Τα κριτήρια που συστήνεται να αξιολογηθούν κατά την επιλογή της διάταξης που θα χρησιμοποιηθεί για να επιτελέσει το ρόλο του BMS, σύμφωνα με την [8], είναι η προσφερόμενη ταχύτητα εξισορρόπησης, η ενεργειακή απόδοση, ο όγκος, το κόστος και οι επιπτώσεις που επιφέρει στη SoH του κελιού. Οι βασικές λειτουργίες που καλείται να επιτελέσει το BMS παρουσιάζονται στο Σχήμα Ε.6.

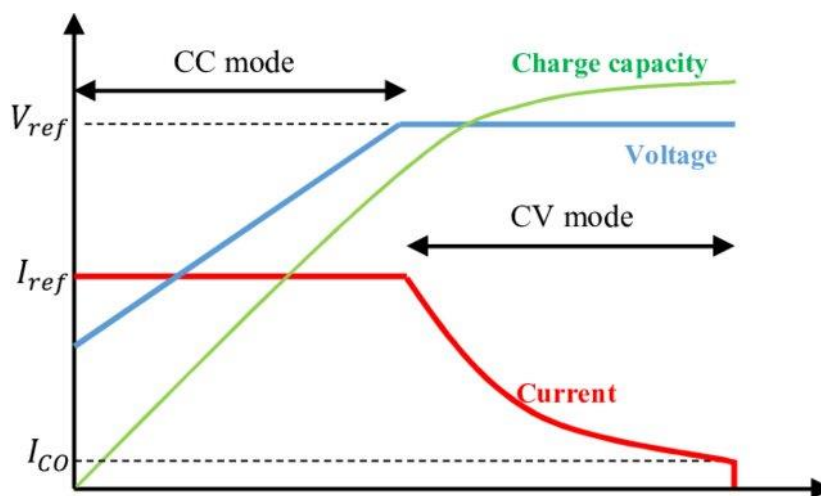
Ε.3 Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και σύνδεση με το δίκτυο

Ε.3.1 Φόρτιση ηλεκτροχημικών συσσωρευτών

Η φόρτιση συσσωρευτών πραγματοποιείται συνήθως σύμφωνα με το προφίλ σταθερού ρεύματος/σταθερής τάσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα Ε.7, αρχικά, ο συσσωρευτής φορτίζεται με σταθερό ρεύμα, το εύρος του οποίου καθορίζεται από τον κατασκευαστή. Μόλις η τάση στα άκρα του συσσωρευτή φτάσει την επιθυμητή τιμή, η φόρτιση συνεχίζεται διατηρώντας την τάση στα άκρα του συσσωρευτή σταθερή. Συνεπώς, στη φάση φόρτισης υπό σταθερή τάση, το ρεύμα φόρτισης μειώνεται σταδιακά. Μόλις το ρεύμα φόρτισης ελαττωθεί κάτω από κάποια οριακή τιμή, θεωρείται ότι η φόρτιση έχει ολοκληρωθεί [13].



Σχήμα Ε.6: Οι βασικές λειτουργίες που επιτελούνται μέσα από το BMS [3].



Σχήμα Ε.7: Τυπικό προφίλ φόρτισης σταθερού ρεύματος/σταθερής τάσης [13].

Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας ενός ηλεκτρικού οχήματος αποτελείται από πολλά κελιά συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια συστοιχία συσσωρευτών συνολικής τάσης 400-800 V [14]. Η φόρτιση της συστοιχίας συσσωρευτών ενός ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τύπους φορτιστών. Ανάλογα με την ισχύ του φορτιστή μεταβάλλεται ο απαιτούμενος χρόνος φόρτισης. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC-

61851-1, οι μέθοδοι φόρτισης κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις κατηγορίες, όπως περιγράφονται στον Πίνακα E.1 [15]. Οι μέθοδοι 1 και 2 αφορούν αποκλειστικά οικιακούς χώρους, αφού προϋποθέτουν την ύπαρξη οικιακού ρευματολήπτη και την κατάλληλη ηλεκτρολογική εγκατάσταση που μπορεί να υποστηρίξει το απαιτούμενο ρεύμα φόρτισης. Πέρα από τη μεγαλύτερη ισχύ που μπορεί να προσφερθεί κατά τη φόρτιση με τη μέθοδο 2, προσφέρεται και μεγαλύτερη ασφάλεια, καθώς χρησιμοποιείται διάταξη ασφάλειας μεταξύ του ρευματολήπτη και του ΗΟ². Οι μέθοδοι 3 και 4 αφορούν την εγκατάσταση ειδικών φορτιστών που είναι μόνιμα συνδεδεμένοι με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και προσφέρουν φόρτιση με μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με τις μεθόδους 1 και 2, καθώς και μεγαλύτερη ασφάλεια, λόγω των σύνθετων κυκλωμάτων προστασίας και της αμφίδρομης επικοινωνίας (μέσω προτύπου) με το ΗΟ. Το πρότυπο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται στις μεθόδους 3 και 4 προσδίδει τη δυνατότητα ελεγχόμενης και έξυπνης φόρτισης, γεγονός που καθιστά τις μεθόδους αυτές κατάλληλες για φόρτιση οχημάτων σε δημόσιους χώρους³. Η μέθοδος 3 αφορά AC φόρτιση, ενώ η μέθοδος 4 αφορά DC φόρτιση.

Πίνακας E.1: Σύντομη περιγραφή των μεθόδων φόρτισης σύμφωνα με το IEC-61851-1.

Μέθοδοι φόρτισης σύμφωνα με το IEC-61851-1					
Μέθοδος	Περιγραφή	Τύπος	Ρεύμα	Τάση	Ισχύς
1	Αργή AC οικιακή φόρτιση με χρήση οικιακών ρευματολήπτων	1Φ AC	16 A	250 V	4 kW
		3Φ AC	16 A	480 V	11 kW
2	Αργή AC οικιακή φόρτιση με ημι-ενεργητική σύνδεση φορτιστή και οχήματος για λόγους ασφάλειας	1Φ AC	32 A	250 V	7,4 kW
		3Φ AC	32 A	480 V	22 kW
3	AC φόρτιση με ενεργητική σύνδεση φορτιστή και οχήματος για λόγους ασφάλειας και έξυπνης φόρτισης	1Φ AC	63 A	250 V	14,5 kW
		3Φ AC	63 A	480 V	43,5 kW
4	DC γρήγορη φόρτιση με ενεργητική σύνδεση φορτιστή και οχήματος για λόγους ασφάλειας και έξυπνης φόρτισης	DC	400 A	600 V	170 kW

E.3.2 Σύνδεση ΗΟ με το έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε, μια ιδιαιτερότητα των ΗΟ είναι ότι δεν αποτελούν κοινά παθητικά φορτία ενός ηλεκτρικού δικτύου. Αντιθέτως, στα πλαίσια ενός έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, τα

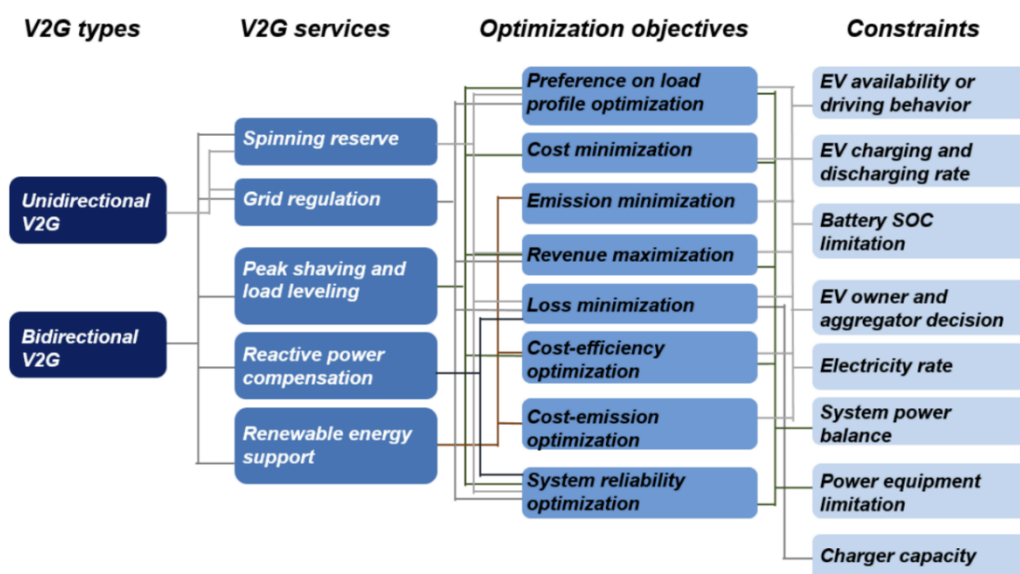
² <https://www.dazetechnology.com/charging-modes-for-ev/>

³ https://www.electrical-installation.org/enwiki/Electric_Vehicle_and_EV_charging_fundamentals

ΗΟ λειτουργούν ως ενεργά φορτία που μπορούν να συνεισφέρουν στην εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου του δικτύου. Συγκεκριμένα, με τη χρήση αμφίδρομων φορτιστών και αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού, μπορεί να επιτευχθεί συντονισμός της φόρτισης ενός μεγάλου πλήθους ΗΟ σε χρονικές περιόδους που υπάρχει περίσσεια ενέργειας από το δίκτυο. Αντίστοιχα, στις χρονικές περιόδους που το δίκτυο υπερφορτίζεται, τα ΗΟ μπορούν να προσφέρουν μέρος της ενέργειας που έχουν αποθηκευμένα, ώστε να εξυπηρετηθεί η αιχμή ζήτησης, χωρίς να εισαχθούν ακριβές πηγές ενέργειας.

Η αμφίδρομη αυτή διασύνδεση του ΗΟ με το έξυπνο δίκτυο περιγράφεται με τον όρο Vehicle-to-Grid (V2G). Πέρα από τη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ενέργειας που πρέπει να υποστηρίζουν οι φορτιστές, για την επίτευξη του V2G απαιτείται και ένα σύνολο τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, πρέπει να επιτευχθεί ψηφιακή αναβάθμιση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα κυβερνοφυσικό σύστημα (Cyber-Physical System), ώστε να είναι ανά πάσα στιγμή διαθέσιμη η κατάστασή του στον ψηφιακό κόσμο για να γίνεται δυνατή η λήψη αποφάσεων και η εκτέλεση αλγορίθμων βελτιστοποίησης της λειτουργίας του. Σε αυτούς τους αλγορίθμους εισάγονται πληροφορίες για κάθε ΗΟ, όπως είναι η κατάσταση της συστοιχίας συσσωρευτών, οι ενεργειακές απαιτήσεις και ο χρόνος ολοκλήρωσης της φόρτισης, προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες μετακίνησης του οδηγού.

Με την έλευση της φιλοσοφίας του V2G προκύπτουν νέα οικονομικά μοντέλα φόρτισης που μπορεί να προσδώσουν οικονομικά οφέλη στους οδηγούς που προσφέρουν ενέργεια από το ΗΟ τους για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου. Ιδιαίτερα, αν ληφθεί υπόψη ο μεγάλος χρόνος στάθμευσης των ΗΟ, συγκεντρώνεται ένα μεγάλος αριθμός συσσωρευτών που είναι συνδεδεμένοι με το ηλεκτρικό δίκτυο, είτε σε συννοικιακούς σταθμούς φόρτισης κατά τη διάρκεια των μη εργάσιμων ωρών, είτε σε σταθμούς φόρτισης σε χώρους εργασίας κατά τις εργάσιμες ώρες. Η ύπαρξη τόσο μεγάλου αριθμού κινητών συσσωρευτών που μπορούν να αξιοποιηθούν από το έξυπνο δίκτυο, είναι εφικτό να οδηγήσει σε μείωση του κόστους εγκατάστασης σταθερών συστημάτων αποθήκευσης. Στο Σχήμα Ε.8 απεικονίζεται η προοπτική του V2G σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα Ε.8: Η προοπτική του V2G σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [16].

Ε.4 Σκοπός και στόχοι διδακτορικής διατριβής

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιήθηκε μια σύντομη περιγραφή της τρέχουσας κατάστασης σχετικά με τη διαχείριση της ενέργειας των ΗΟ, τόσο στο εσωτερικό του οχήματος μέσω του BMS, όσο και στο επίπεδο του έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της προοπτικής του V2G. Όσον αφορά το BMS, απαιτούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς απλής κατασκευής και χαμηλού κόστους που μπορούν να προσφέρουν ταχεία εξισορρόπηση με υψηλή απόδοση. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα σημαντική η διερεύνηση μοντέλων εκτίμησης της στάθμης φόρτισης και της κατάστασης υγείας του συσσωρευτή, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια η διαθέσιμη αυτονομία του ΗΟ.

Σχετικά με τη διαχείριση της ενέργειας που ανταλλάσσεται μεταξύ ΗΟ και δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, χρήζει ιδιαίτερης σημασίας η ανάπτυξη αλγορίθμων που εξυπηρετούν τις προτιμήσεις τόσο των διαχειριστών του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και των σταθμών φόρτισης, όσο και των οδηγών των ηλεκτρικών οχημάτων. Λαμβάνοντας υπόψη τον υψηλό χρόνο που απαιτείται για τη φόρτιση των ΗΟ, απαιτείται η ανάπτυξη μεθόδων χρονοπρογραμματισμού φόρτισης, ώστε να εξασφαλισθεί ότι οι οδηγοί θα μπορούν να εξυπηρετηθούν για τις ανάγκες μετακίνησής τους.

Μέσα από την παρούσα διδακτορική διατριβή επιδιώκεται να προταθούν μέθοδοι για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που συναντώνται στον τομέα της διαχείρισης ενέργειας ΗΟ. Ο **βασικός σκοπός** της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η πρόταση μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας αποδοτικής διαχείρισης ενέργειας τόσο στο εσωτερικό του οχήματος μέσω διατάξεων

BMS, όσο και στη διασύνδεση του οχήματος με το σταθμό φόρτισης μέσω αλγορίθμων υποβοήθησης λήψης αποφάσεων. Για την επίτευξη του βασικού σκοπού της διατριβής, τίθενται επιμέρους στόχοι που παρουσιάζονται ως ακολούθως.

Πρώτο στόχο της διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη **BMS** για την ενεργητική εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών ενός ΗΟ. Πραγματοποιείται η θεώρηση ότι η συστοιχία των συσσωρευτών χωρίζεται σε επιμέρους ομάδες συσσωρευτών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, ο πρώτος στόχος της διατριβής είναι διττός. Αφενός μεν επιδιώκεται η εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης μεμονωμένων συσσωρευτών εντός μίας ομάδας, αφετέρου δε, επιδιώκεται η εξισορρόπηση της τάσης μεταξύ των επιμέρους ομάδων. Η εξισορρόπησης εντός μίας ομάδας πραγματοποιείται με την ανάπτυξη **αμφίδρομου μετατροπέα Flyback** με σκοπό την τοποθέτηση ενός μετατροπέα σε κάθε συσσωρευτή, ώστε να πραγματοποιηθεί αμφίδρομη ροή ενέργειας από την ομάδα προς τον κάθε συσσωρευτή. Για την εξισορρόπηση της τάσης μεταξύ ομάδων συσσωρευτών επιλέγεται ο αμφίδρομος μετατροπέας **Quasi-resonant Flyback**. Για την ανάπτυξη εργαστηριακών πρωτοτύπων των δύο μετατροπέων πραγματοποιείται λεπτομερής ανάλυση της λειτουργίας τους, καθώς και των ενεργειακών τους απωλειών, ώστε να υλοποιηθούν διατάξεις που προσφέρουν υψηλό ρεύμα εξισορρόπησης με υψηλή ενεργειακή απόδοση.

Δεύτερο στόχο της παρούσας διατριβής αποτελεί η ανάπτυξη **αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης** της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών ενός ΗΟ. Έχοντας λάβει υπόψη ότι κάθε συσσωρευτής έχει εγκατεστημένο ένα μετατροπέα Flyback για την εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισής του, απαιτείται ο συντονισμός όλων των διατάξεων, ώστε να επιτευχθεί εξισορρόπηση όλων των κελιών εντός μίας ομάδας. Ο αλγόριθμος που προτείνεται, αναλαμβάνει να ελαχιστοποιήσει τις ενεργειακές απώλειες του συνολικού συστήματος εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ταχεία εξισορρόπηση.

Τρίτο στόχο της διατριβής αποτελεί η πρόταση μεθόδου χρονοπρογραμματισμού φορτίσεων σε σταθμούς φόρτισης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται σύγκριση μετα-ευρετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης και επιλογή του αποτελεσματικότερου για την ανάθεση των φορτιστών του σταθμού στα σταθμευμένα ΗΟ. Η προτεινόμενη μέθοδος επιτρέπει την κάλυψη αναγκών φόρτισης μεγαλύτερου αριθμού ΗΟ από τον αριθμό των εγκατεστημένων φορτιστών, μέσω της τεχνικής του διαμοιρασμού πόρων. Έτσι, μεγιστοποιείται η αξιοποίηση των πόρων του σταθμού και μειώνεται το απαιτούμενο κεφάλαιο για την εγκατάσταση φορτιστών.

Τέταρτο και τελευταίο στόχο της παρούσας διατριβής αποτελεί η πρόταση μεθόδου υποβοήθησης λήψης αποφάσεων για την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης από τους οδηγούς. Η χρήση της μεθόδου Analytic Hierarchy Process (AHP) έρχεται να αποτρέψει την πιθανή σύγχυση των οδηγών ΗΟ κατά την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης. Τα κριτήρια που αξιολογούνται κατά την επιλογή του σταθμού φόρτισης είναι το κόστος φόρτισης, η διάρκεια φόρτισης, καθώς και το μέσο και μέγιστο ρεύμα φόρτισης. Το ύψος των ρευμάτων φόρτισης λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση προκειμένου να μην καταπονούνται οι συσσωρευτές και μειωθεί η διάρκεια ζωής της. Την επικοινωνία μεταξύ του ΗΟ και του σταθμού φόρτισης πλαισιώνει το πρότυπο Open Platform Communications–Unified Architecture (OPC–UA) που διευκολύνει τη δημιουργία μοντέλων δεδομένων με σημασιολογική αναπαράσταση, προκειμένου να καταστούν διαθέσιμες οι απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με το σταθμό φόρτισης και το ΗΟ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Έχοντας θέσει το σκοπό και τους στόχους της παρούσας διδακτορικής διατριβής στο εισαγωγικό κεφάλαιο, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μια ανασκόπηση της σχετικής με το αντικείμενο βιβλιογραφίας, ώστε να διαπιστωθούν σημεία που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση και να εξασφαλισθεί η τοποθέτηση της διατριβής στην επιστημονική αιχμή.

Αρχικά, διερευνώνται τοπολογίες BMS ενεργητικής εξισορρόπησης με εκμετάλλευση της ενέργειας, θέτοντας ως κριτήρια την ενεργειακή τους απόδοση, την ταχύτητα εξισορρόπησης που επιτυγχάνεται και την πολυπλοκότητα της τοπολογίας. Στη συνέχεια, έχοντας επιλέξει την τοπολογία Flyback ως την καταλληλότερη για την υλοποίηση του BMS (όπως θα αναλυθεί στα Κεφάλαια 2 και 3), εξετάζονται πρόσφατες εργασίες σχετικές με την υλοποίηση μετατροπέων τύπου Flyback με σκοπό την επίτευξη υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Έπειτα, παρουσιάζονται παραλλαγές της τοπολογίας Flyback στις οποίες αξιοποιείται κύκλωμα ταλάντωσης για την επίτευξη ομαλής μετάβασης (soft-switching). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται διερεύνηση των μεθόδων βέλτιστου σχεδιασμού διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος με σκοπό την επιλογή των στοιχείων και των λειτουργικών μεγεθών του μετατροπέα που ικανοποιούν τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Τέλος, παρουσιάζονται μέθοδοι χρονοπρογραμματισμού φόρτισης HO στα πλαίσια ενός έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

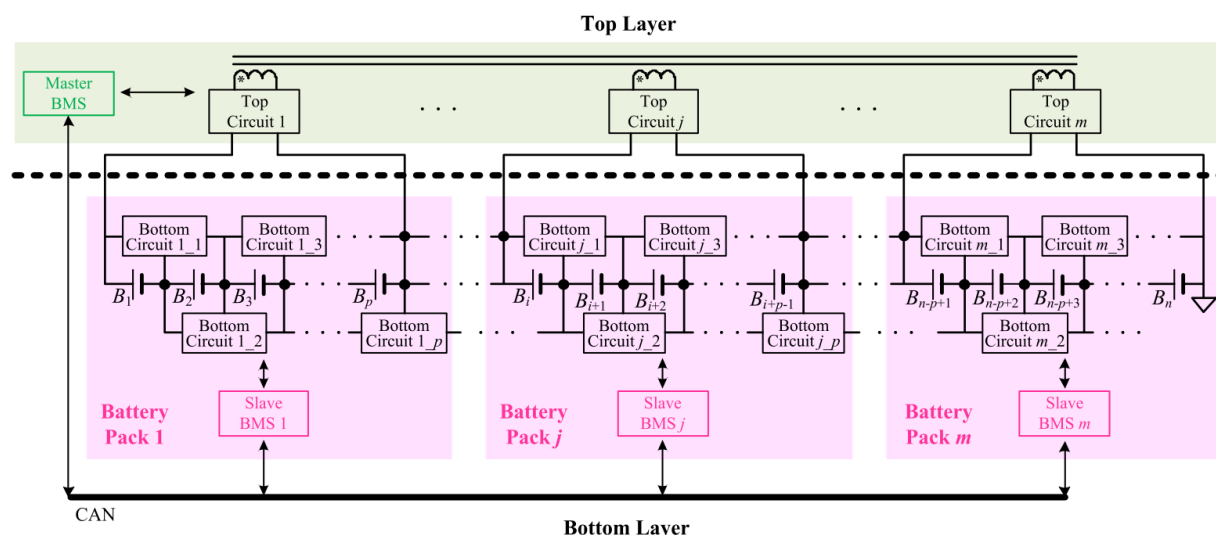
1.2 Συστήματα εξισορρόπησης στάθμης φόρτισης συσσωρευτών

Τα τελευταία χρόνια, το αντικείμενο της διαχείρισης της ενέργειας συσσωρευτών έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην ακαδημαϊκή κοινότητα. Ανάλογα με τις απαιτήσεις που τίθενται για κάθε εφαρμογή επιδιώκεται η πρόταση μιας πιο αποτελεσματικής τοπολογίας εξισορρόπησης σύμφωνα με τα κριτήρια της ταχύτητας εξισορρόπησης, της ενεργειακής απόδοσης, τον όγκο, το κόστος και τις επιπτώσεις που επιφέρει στη SoH του κελιού [8].

Η χρήση DC-DC ηλεκτρονικών μετατροπέων χωρίς τη χρήση μετασχηματιστή οδηγεί σε τοπολογίες ενεργητικής εξισορρόπησης γειτονικών κελιών. Στο πλαίσιο αυτό, στην [17] προτείνεται τοπολογία με συζευγμένα πηνία, με σκοπό τη μείωση των διακριτών μαγνητικών στοιχείων για την

εξισορρόπηση με απόδοση 90 % και ρεύμα εξισορρόπησης τα 3,7 A. Όμως, οι διατάξεις εξισορρόπησης γειτονικών κελιών υστερούν όταν απαιτείται μεταφορά ενέργειας μεταξύ μη γειτονικών κελιών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ενέργεια μεταφέρεται μέσω των μετατροπέων που βρίσκονται στα ενδιάμεσα κελιά με αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής απόδοσης του συστήματος εξισορρόπησης και την αύξηση του χρόνου εξισορρόπησης [18].

Λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελεί η μεταφορά ενέργειας από κελί σε κελί, μέσω της συστοιχίας. Έτσι, σε όλες τις περιπτώσεις εξισορρόπησης, η ενέργεια μεταφέρεται το πολύ σε δύο βήματα. Συνήθως, οι συστοιχίες συσσωρευτών χωρίζονται σε επιμέρους ομάδες τόσο για εργονομικούς λόγους, όσο και για λόγους διαχείρισης [19]. Έτσι, αποφεύγεται η χρήση σύνθετων μετατροπέων με υψηλό λόγο υποβιβασμού και χρησιμοποιούνται ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος με χαμηλότερη τιμή τάσης διάσπασης. Στην εργασία [8] προτείνεται ένα BMS δύο επιπέδων εξισορρόπησης (Σχήμα 1.1). Το πρώτο επίπεδο αφορά την εξισορρόπηση γειτονικών κελιών με ρεύμα 7,5 A και επιτυγχάνεται με τη χρήση του μετατροπέα τύπου Buck-Boost. Το δεύτερο επίπεδο αφορά την εξισορρόπηση μεταξύ ομάδων συσσωρευτών με 3,5 A και επιτυγχάνεται με τη χρήση μετατροπέων τύπου Half-Bridge με κοινό πυρήνα μετασχηματιστή. Η μέση απόδοση για την εξισορρόπηση ενέργειας μεταξύ δύο οποιονδήποτε κελιών είναι 89,7 %.



Σχήμα 1.1: Αναπαράσταση του BMS δύο επιπέδων εξισορρόπησης που προτείνεται στην [8].

Η χρήση μετασχηματιστή πολλαπλών τυλιγμάτων προτείνεται σε τοπολογία Forward/Flyback επιτυγχάνοντας ρεύμα εξισορρόπησης 4 A για ισχύ 15 W [20]. Η εν γένει αυξημένη σκέδαση που παρατηρείται σε μετασχηματιστές πολλαπλών τυλιγμάτων οδηγεί στη ροή ενέργειας σε κελιά που

δεν είναι επιθυμητό να συμμετέχουν στην εξισορρόπηση. Για τη μείωση αυτής της επίδρασης της σκέδασης προτείνεται βελτιωμένη μέθοδος παλμοδότησης [20].

Στην [21] προτείνεται η χρήση μετασχηματιστή πολλαπλών τυλιγμάτων σε μετατροπείς τύπου Half-Bridge για την επίτευξη εξισορρόπησης με 1,4 A και απόδοση 87 %. Όμως, το ρεύμα εξισορρόπησης εξαρτάται από τη διαφορά τάσης που έχουν τα κελιά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την αργή εξισορρόπηση όταν τα κελιά έχουν μικρές διαφορές στην στάθμη της τάσης τους. Στο ίδιο μήκος κύματος, στην [22] χρησιμοποιείται μετασχηματιστής πολλαπλών τυλιγμάτων για την επίτευξη εξισορρόπησης με απόδοση 80,4 % στα 0,78 W, ενώ στην [23] επιτυγχάνεται εξισορρόπηση με 2 A και ενεργειακή απόδοση 80,67 %.

Όσον αφορά τα BMS στα οποία αξιοποιείται δίκτυο διακοπών για την επιλογή κελιών, χρήζει ιδιαίτερης σημασίας η εφαρμογή βελτιωμένων τοπολογιών ηλεκτρονικών μετατροπέων με σκοπό τη μείωση του αριθμού των διακοπών στο δίκτυο. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, στην [24] προτείνεται μια τοπολογία κασκοδικού αμφίδρομου DC-DC μετατροπέα με απομόνωση. Ο μετατροπέας αποτελείται από οκτώ ημιαγωγικά στοιχεία και προσφέρει εξισορρόπηση με 3 A κατά την εκφόρτιση του συσσωρευτή και 2 A κατά τη φόρτιση. Η μέγιστη απόδοση που επιτυγχάνεται είναι 85,1 %. Επίσης, στην [11] προτείνεται η χρήση του κλασσικού αμφίδρομου μετατροπέα Flyback σε συνδυασμό με δίκτυο διακοπών. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, ο μετατροπέας Flyback διαμοιράζεται μεταξύ των κελιών της συστοιχίας για να επιτευχθεί αμφίδρομη ροή ενέργειας από τα κελιά που βρίσκονται σε άρτιο αριθμό θέσης στη συστοιχία προς τα κελιά που βρίσκονται σε περιττό αριθμό θέσης στη συστοιχία. Με το εν λόγω BMS επιτυγχάνεται εξισορρόπηση με 1,5 A και μέγιστη απόδοση 89,8 %. Επιπλέον στην εργασία [25], ο μετατροπέας Flyback έχει αξιοποιηθεί ως τροφοδοτικό 8 W με ενσωματωμένες δυνατότητες εξισορρόπησης και ενεργειακή απόδοση 85 %.

Από την [11] διαφαίνεται ότι ο μετατροπέας Flyback μπορεί να αποτελέσει μια ελκυστική επιλογή για τη χρήση του ως BMS, καθώς είναι μια διάταξη που μπορεί να προσφέρει γαλβανική απομόνωση με απλή κατασκευή. Για το λόγο αυτό, στην επόμενη ενότητα πραγματοποιείται διερεύνηση βελτιώσεων της τοπολογίας Flyback, με σκοπό την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

1.3 Μετατροπείς τύπου Flyback και Quasi-resonant Flyback

Πέρα από τις ερευνητικές δραστηριότητες που αποσκοπούν τη βελτιστοποίηση των BMS, έχουν προταθεί βελτιώσεις της κλασσικής τοπολογίας Flyback με κύριο στόχο την αύξηση της απόδοσης. Στην [26] προτείνονται δύο παραλλαγές της τοπολογίας Flyback με ενεργό κύκλωμα περιορισμού

υπερτάσεων με σκοπό να αυξηθεί το κέρδος τάσης και η απόδοση του μετατροπέα. Μέσω της αξιοποίησης της ενέργειας που αποθηκεύεται στον πυκνωτή του κυκλώματος περιορισμού υπερτάσεων επιτυγχάνεται απόδοση 94,75 % στα 20 W και 95,68 % στα 300 W. Μια διαφοροποίηση του Flyback με ενεργό κύκλωμα περιορισμού υπερτάσεων και σύγχρονη ανόρθωση προτείνεται στην [27]. Το κύκλωμα σχεδιάζεται με σκοπό τη σβέση του ημιαγωγικού διακόπτη υπό μηδενικό ρεύμα στο δευτερεύον επιτυγχάνοντας απόδοση 94,5 % στα 45 W.

Το κύριο μειονέκτημα του μετατροπέα Flyback είναι η μειωμένη απόδοση που παρουσιάζει αφενός μεν λόγω της ενέργειας που αποθηκεύεται στη σκέδαση του μετασχηματιστή, αφετέρου δε, λόγω των διακοπτικών απωλειών στα ημιαγωγικά στοιχεία. Η εφαρμογή μετατροπέων που εμπίπτουν στην οικογένεια των μετατροπέων ημισυντονισμού (quasi-resonant) επιδιώκει την εξάλειψη των μειονεκτημάτων αυτών.

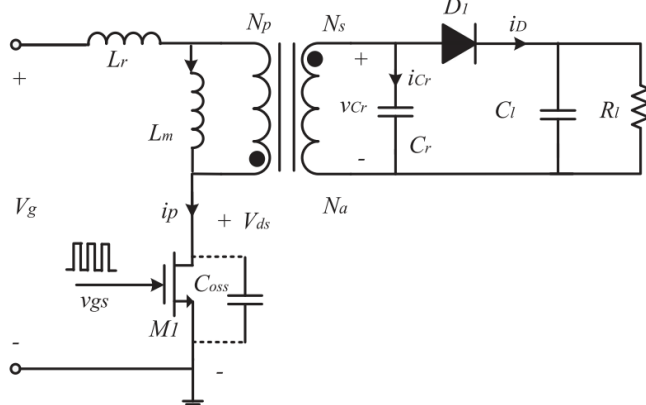
Σε αυτή την κατεύθυνση προτείνεται στην [28] μια τοπολογία Flyback ημισυντονισμού με καινοτόμο κύκλωμα έναυσης του κύριου ημιαγωγικού στοιχείου για την επίτευξη έναυσης υπό μηδενική τάση. Όμως οι απώλειες σβέσης του ημιαγωγικού στοιχείου, καθώς και οι απώλειες που οφείλονται στην ενέργεια της σκέδασης παραμένουν. Στο κύκλωμα επιτυγχάνεται απόδοση 90 % για ισχύ εξόδου 30 W. Στοχεύοντας τη λειτουργία του κυκλώματος σε μεγάλο εύρος τάσης εισόδου, στην [29] προτείνεται η χρήση τριτεύοντος τυλίγματος για την παλμοδότηση μετατροπέα Flyback με σύγχρονη ανόρθωση σε υβριδική λειτουργία συνεχούς/ασυνεχούς αγωγής με απόδοση 91,7 %.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των παραπάνω τοπολογιών είναι ότι δεν επιτρέπουν αμφίδρομη ροή ενέργειας που είναι μείζονος σημασίας στις εφαρμογές BMS. Η τοπολογία αμφίδρομου Flyback με συζευγμένα κυκλώματα περιορισμού υπερτάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος προτείνεται στην [30]. Τα κυκλώματα περιορισμού υπερτάσεων αποτελούνται από επαγωγή, πυκνωτή και δίοδο (LCD). Με το μετατροπέα αυτό επιτυγχάνεται 85 % απόδοση στα 20 W.

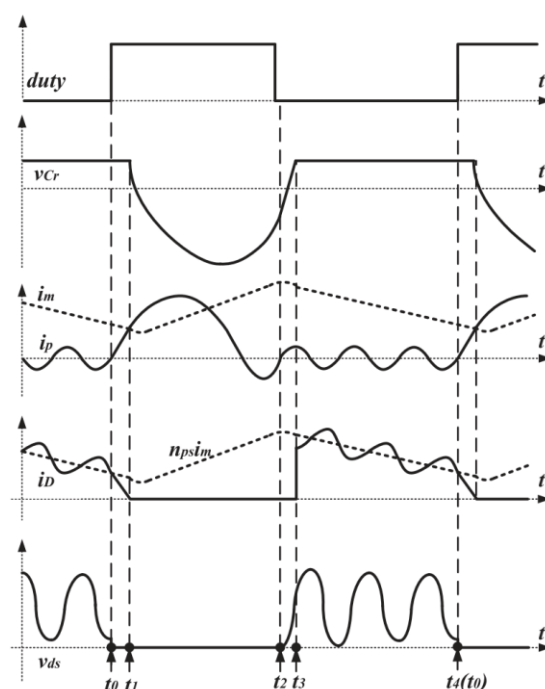
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι βελτιωμένες τοπολογίες Flyback στις οποίες πραγματοποιείται σβέση του ημιαγωγικού στοιχείου του πρωτεύοντος υπό μηδενικό ρεύμα. Με αυτό τον τρόπο μηδενίζονται οι διακοπτικές απώλειες που οφείλονται στη σβέση του στοιχείου, καθώς και αυτές που οφείλονται στην απώλεια της ενέργειας που συσσωρεύεται στη σκέδαση. Σε αυτή την κατεύθυνση στην [31] προτείνεται μια παραλλαγή του Flyback με την οποία επιτυγχάνεται ομαλή μετάβαση σε όλα τα ημιαγωγικά στοιχεία με την προσθήκη ενός επιπλέον ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου και μιας διόδου. Η μέγιστη απόδοση που επιτυγχάνεται είναι 90 % για μετατροπέα 60 W, που λειτουργεί με διακοπτική συχνότητα 20 kHz.

Η χρήση μετασχηματιστή με τριτεύον τυλίγμα και αμφίδρομο ημιαγωγικό διακόπτη για την επίτευξη σβέσης του πρωτεύοντος υπό μηδενικό ρεύμα προτάθηκε στην [32]. Σημαντικό μειονέκτημα της τοπολογίας αυτής είναι η σύνθετη παλμοδότηση του τριτεύοντος τυλίγματος, καθώς ο υπολογισμός της χρονικής στιγμής που δίνεται ο παλμός προκύπτει μόνο από τη θεωρητική ανάλυση του κυκλώματος και όχι από κάποιον αισθητήρα που τοποθετείται στο κύκλωμα. Επιπλέον, το στενό εύρος του παλμού του τριτεύοντος τυλίγματος απαιτεί παλμοδότηση μεγάλης ακρίβειας, ώστε να εξασφαλιστεί η σβέση του ημιαγωγικού στοιχείου του πρωτεύοντος υπό μηδενικό ρεύμα. Ένα ακόμα μειονέκτημα της τοπολογίας αυτής είναι ότι, με βάση τη θεωρητική ανάλυση που έχει παρουσιαστεί, απαιτείται επαγωγή μαγνήτισης υψηλής τιμής. Η απόδοση που επιτυγχάνεται είναι 80 % στα 70 W.

Μια παραλλαγή του Flyback που δεν έχει μελετηθεί επαρκώς αφορά την επίτευξη της σβέσης του ημιαγωγικού στοιχείου του πρωτεύοντος υπό μηδενικό ρεύμα με χρήση πυκνωτή παράλληλα με την επαγωγή μαγνήτισης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή [33] (Σχήματα 1.2 και 1.3). Με την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν από την ανάλυση του κυκλώματος προκύπτουν συναρτήσεις χρόνου για ορισμένα λειτουργικά μεγέθη του μετατροπέα.



Σχήμα 1.2: Η τοπολογία του Quasi-resonant Flyback που προτείνεται στην [33].

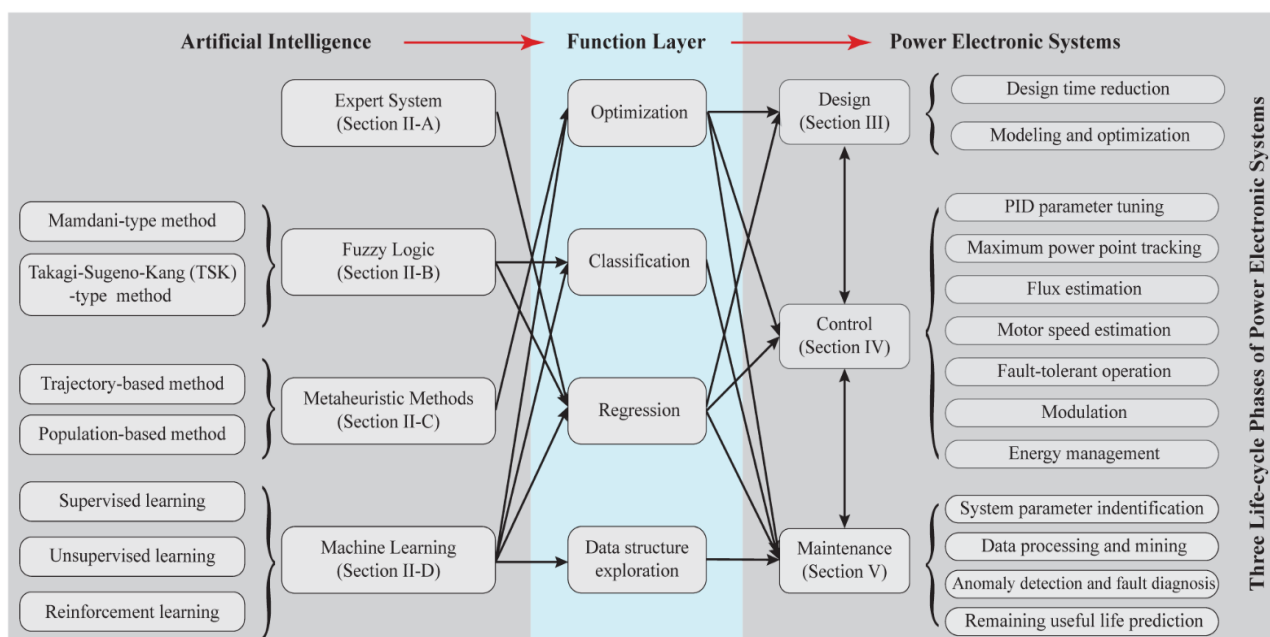


Σχήμα 1.3: Βασικές κυματομορφές της τοπολογίας του Quasi-resonant Flyback που προτείνεται από την [33].

Η ανάλυση που πραγματοποιείται δεν οδηγεί σε πλήρες σύστημα εξισώσεων για την περιγραφή όλων των μεγεθών λειτουργίας του μετατροπέα. Προτείνεται όμως μέθοδος για την έναυση του ημιαγωγικού στοιχείου του πρωτεύοντος υπό χαμηλή τάση, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες έναυσης και να επιτευχθεί απόδοση 90,3 % για ισχύ εξόδου 36 W και διακοπτική συχνότητα το 1 MHz.

1.4 Βέλτιστος σχεδιασμός διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος

Πέρα από την πρόταση παραλλαγών των κλασικών τοπολογιών ηλεκτρονικών μετατροπέων και την επινόηση καινοτόμων τοπολογιών με σκοπό την υλοποίηση αποδοτικών και χαμηλού κόστους διατάξεων για εφαρμογές BMS, είναι ιδιαίτερα σημαντική η μεθοδολογία επιλογής των τιμών των στοιχείων που θα συνθέσουν το μετατροπέα, καθώς ο υπολογισμός και των λειτουργικών του μεγεθών. Στην ακαδημαϊκή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι σχετικά με το βέλτιστο σχεδιασμό, λειτουργία και συντήρηση ηλεκτρονικών μετατροπέων. Μια ταξινόμηση των σχετικών μεθόδων στις κατηγορίες των έμπειρων συστημάτων, ασαφούς λογικής, μετα-ευρετικών μεθόδων και μηχανικής μάθησης πραγματοποιείται στην [34] (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4: Κατηγοριοποίηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων σχετικά με την εφαρμογή τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης στο γνωστικό αντικείμενο των ηλεκτρονικών ισχύος [34].

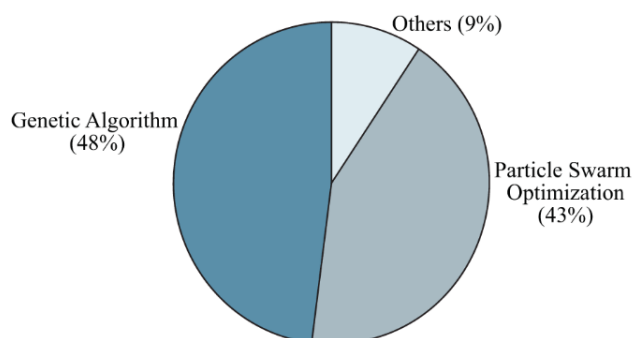
Μία από τις βασικές χρήσεις των αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence, AI) είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος υπό τους περιορισμούς που τίθενται [34]. Στο

αντικείμενο των ηλεκτρονικών μετατροπών ένα τυπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης κατά το σχεδιασμό αποτελεί η εύρεση των σχεδιαστικών και λειτουργικών παραμέτρων που μεγιστοποιούν την απόδοση διατηρώντας τον όγκο και το βάρος του μετατροπέα χαμηλό. Μια άλλη κατηγορία αποτελούν οι αλγόριθμοι κατηγοριοποίησης που εμπίπτουν στην ευρύτερη οικογένεια της τεχνητής νοημοσύνης και μέσα από τη χρήση τους επιδιώκεται η εύρεση της κατάστασης του μετατροπέα με βάση μετρούμενα μεγέθη. Οι αλγόριθμοι παλινδρόμησης αξιοποιούνται για την εύρεση συναρτήσεων που συνδέουν διάφορα μεγέθη του μετατροπέα, όπως στην περίπτωση της εκτίμησης των μεταβλητών που αξιοποιούνται για τον έλεγχο του και εξάγονται μέσα από μετρούμενες ηλεκτρικές ποσότητες. Τέλος οι αλγόριθμοι ανάλυσης δεδομένων αξιοποιούνται για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων μέσα από πρωτογενή δεδομένα που συλλέγονται κατά τη λειτουργία του μετατροπέα.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια ανασκόπηση των εργασιών που πραγματεύονται το βέλτιστο σχεδιασμό διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Στις περιπτώσεις που οι παράμετροι βελτιστοποίησης έχουν περιορισμένο αριθμό και λαμβάνουν διακριτές τιμές, μπορεί να πραγματοποιηθεί εξαντλητική αξιολόγηση όλων των πιθανών λύσεων με σκοπό την επιλογή της βέλτιστης, ιδιαίτερα όταν η εφαρμογή έχει υψηλή κρισιμότητα [35]. Όμως, η εξαντλητική αξιολόγηση δεν είναι αποδοτική στην περίπτωση που οι σχεδιαστικές παράμετροι λαμβάνουν συνεχείς τιμές ή όταν μπορούν να λάβουν μεγάλο πλήθος διακριτών τιμών. Κατά τη διαδικασία του βέλτιστου σχεδιασμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι διαδικασίες κατασκευής πρωτοτύπων και οι περιορισμοί που εισάγουν οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται. Σε αυτή την κατεύθυνση, στην [36] διαμορφώθηκε κατάλληλα το σύνολο των αποδεκτών λύσεων, ώστε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης να μπορέσει να καταλήξει σε μια λύση με υψηλή απόδοση που ταυτόχρονα να είναι και υλοποιήσιμη.

Οι μέθοδοι καθόδου κλίσης (gradient descent) προσφέρουν εξαιρετικά αποτελέσματα κατά την εύρεση τοπικών ακροτάτων και είναι κατάλληλες για τις περιπτώσεις που η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζεται σε κλειστή μαθηματική μορφή [37], [38]. Η γνώση της κυρτότητας του προβλήματος οδηγεί στην εύρεση του ολικού βέλτιστου μέσω των μεθόδων καθόδου κλίσης. Όμως, όταν δεν υπάρχει μοναδικό ακρότατο, υπάρχει ο κίνδυνος εγκλωβισμού του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε τοπικό ακρότατο. Ένας τρόπος να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση της μεθόδου multistart, κατά την οποία πραγματοποιούνται πολλαπλές εκτελέσεις μεθόδων καθόδου κλίσης με διαφορετικές αρχικές τιμές κάθε φορά. Με αυτό τον τρόπο εντοπίζονται πολλά τοπικά βέλτιστα από τα οποία επιλέγεται το ολικό βέλτιστο.

Μια δημοφιλή κατηγορία αλγορίθμων βελτιστοποίησης αποτελούν οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι και χρησιμοποιούνται σε πληθώρα προβλημάτων για τα οποία είτε δεν υπάρχει λεπτομερής μοντελοποίηση, είτε η συνάρτηση βελτιστοποίησης δεν εκφράζεται σε κλειστή μαθηματική μορφή. Οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι προσφέρουν έναν αφηρημένο, αλλά αποδοτικό τρόπο διερεύνησης του χώρου των πιθανών λύσεων, προκειμένου να καταλήξουν σε πολύ καλές λύσεις, κοντά στη βέλτιστη. Η διερεύνηση του χώρου των λύσεων πραγματοποιείται με στοχαστικό τρόπο που βασίζεται συνήθως σε μια διεργασία εμπνευσμένη από τη φύση [39]. Για το λόγο αυτό δεν αποδεικνύεται η ύπαρξη του ολικού βέλτιστου, όπως μπορεί να γίνει στις μεθόδους καθόδου κλίσης. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια υποκατηγορία των μετα-ευρετικών αλγορίθμων και προσπαθούν να αντιγράψουν τις μεθόδους της φυσικής εξέλιξης και αντιμετωπίζουν τις υποψήφιες λύσεις σαν φυσικές οντότητες που ανταγωνίζονται σε ένα εικονικό περιβάλλον. Η χρήση των μετα-ευρετικών αλγορίθμων στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, με τον Γενετικό Αλγόριθμο (Genetic Algorithm, GA) να είναι ο πιο δημοφιλής (Σχήμα 1.5), [34].



Σχήμα 1.5: Ποσοστά επιλογής μετα-ευρετικών αλγορίθμων στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος [34].

Παραλλαγές των κλασικών μετα-ευρετικών αλγορίθμων χρησιμοποιούνται στα προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων. Στην [40] πραγματοποιήθηκε σύγκριση του Γενετικού Αλγορίθμου, του αλγορίθμου βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO), καθώς και του αλγορίθμου της Διαφορικής Εξέλιξης για το βέλτιστο σχεδιασμό κυκλώματος περιορισμού υπερτάσεων τύπου αντίστασης-πυκνωτή-διόδου (RCD) σε μετατροπέα Flyback. Συγκεκριμένα, τέθηκαν δύο κριτήρια βελτιστοποίησης, το πρώτο κριτήριο αφορά τη μείωση της υπέρτασης, ενώ το δεύτερο κριτήριο αφορά τη μείωση της δαπανώμενης ενέργειας στο κύκλωμα περιορισμού υπερτάσεων. Η επιλογή των παραμέτρων λειτουργίας των μετα-ευρετικών αλγορίθμων δεν πραγματοποιήθηκε αυθαίρετα, αλλά με τη μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi. Όμως, η

προσέγγιση αυτή ήταν περιορισμένη στην επιλογή των στοιχείων που συνθέτουν το RCD και όχι το συνολικό σχεδιασμό του μετατροπέα. Επομένως, η υπέρταση που οφείλεται στη σκέδαση μειώθηκε, αλλά η συνολική απόδοση είναι χαμηλή (81 %).

Άλλες εργασίες έχουν εμβαθύνει στο βέλτιστο σχεδιασμό του υψίσυχνου μετασχηματιστή που χρησιμοποιείται σε διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος [37], [41]-[43]. Σε αυτές τις εργασίες βελτιστοποιείται ο αριθμός των σπειρών και τη διατομή του καλωδίου, αλλά οι λειτουργικές παράμετροι του μετατροπέα, όπως η διακοπτική συχνότητα, η επαγωγή μαγνήτισης και ο λόγος των σπειρών δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Επιπλέον, κατά το σχεδιασμό του υψίσυχνου μετασχηματιστή υπάρχουν φαινόμενα που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν. Συνεπώς, είναι πιθανό να προκύψουν λύσεις από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που οδηγούν σε υποβέλτιστη λειτουργία του μετατροπέα, λόγω αυτών των φαινομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η επίδραση του τρόπου περιέλιξης στην τιμή της σκέδασης. Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, στην [44] εκτελείται ανάλυση του μετασχηματιστή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε κάθε εκτέλεση της ρουτίνας βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός του μετασχηματιστή βελτιστοποιείται με τη χρήση Γενετικού Αλγορίθμου. Στη συνέχεια, εκτελείται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων για να εκτιμηθούν με ακρίβεια οι λειτουργικές παράμετροι του μετασχηματιστή, οι οποίες εισάγονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Simplex για την επιλογή των λειτουργικών παραμέτρων του μετατροπέα.

Στο αντικείμενο της βελτιστοποίησης συστημάτων εξισορρόπησης της ενέργειας συσσωρευτών υπάρχει περιορισμένος αριθμός επιστημονικών εργασιών. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τη βελτίωση της τοπολογίας του μετατροπέα που χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση της ενέργειας των συσσωρευτών. Στα άρθρα που εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία δεν χρησιμοποιείται κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης, αλλά είτε προτείνονται νέες τοπολογίες ηλεκτρονικών μετατροπέων είτε προτείνονται βελτιώσεις σε υπάρχουσες τοπολογίες [12], [21], [45].

Η δεύτερη κατηγορία άρθρων αφορά τη βελτιστοποίηση κατά το σχεδιασμό του μετατροπέα, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις που τίθενται για την εκάστοτε εφαρμογή. Στην [46], οι συγγραφείς προτείνουν μια επιταχυνόμενη μέθοδο εξαντλητικής διερεύνησης των πιθανών λύσεων, για να επιλέξουν τα κατάλληλα ημιαγωγικά στοιχεία και επαγωγές, με στόχο το βέλτιστο σχεδιασμό και λειτουργία του μετατροπέα. Τα διαθέσιμα στοιχεία προς αξιολόγηση επιλέγονται μέσα από βάση δεδομένων. Συνεπώς, ο σχεδιαστικός χώρος περιορίζεται από το μέγεθος της βάσης δεδομένων. Αν

η βάση δεδομένων αποκτήσει πολλές εγγραφές, η εξαντλητική μέθοδος είναι μη αποτελεσματική λόγω του μεγάλου αριθμού συνδυασμών που πρέπει να αξιολογηθούν ένας προς έναν. Στην [46], η μέγιστη απόδοση που επιτυγχάνεται είναι 88,41 % για ρεύμα εξισορρόπησης ίσο με 3 A.

Η τρίτη κατηγορία αφορά την πρόταση αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την εξισορρόπηση του SoC των επιμέρους κελιών της συστοιχίας. Στην [47] προτείνεται μέθοδος βέλτιστης εξισορρόπησης συστοιχίας συσσωρευτών με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά την εξισορρόπηση. Η μοντελοποίηση που προτείνεται είναι γενικευμένη και έχει ως στόχο την αξιολόγηση διάφορων αρχιτεκτονικών εξισορρόπησης. Συνεπώς, η μοντελοποίηση των απωλειών αγωγής του μετατροπέα πραγματοποιείται με τη χρήση ωμικής αντίστασης, ενώ οι διακοπτικές, οι μαγνητικές και οι απώλειες στα κυκλώματα οδήγησης θεωρούνται σταθερές.

Στην [48] προτείνεται ένας φορτιστής πολλών μονάδων βασισμένος στον μετατροπέα Forward που προσδίδει τη δυνατότητα ανεξάρτητης φόρτισης κάθε κελιού. Μεταβάλλοντας το ρεύμα φόρτισης κάθε κελιού πραγματοποιείται εξισορρόπηση της SoC όλων των κελιών της συστοιχίας. Ο χρονοπρογραμματισμός φόρτισης που προτείνεται, επιλύεται σαν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλών κριτηρίων, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής SoC για όλα τα κελιά και τη διατήρηση της θερμοκρασίας των κελιών σε χαμηλά επίπεδα μειώνοντας το ρεύμα φόρτισης.

Στην [49] παρουσιάζεται μέθοδος βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού συστήματος εξισορρόπησης δύο επιπέδων. Συγκεκριμένα, η συστοιχία συσσωρευτών χωρίζεται σε επιμέρους ομάδες, έτσι δημιουργείται το επίπεδο των κελιών (χαμηλό επίπεδο) και το επίπεδο των ομάδων (υψηλό επίπεδο). Για την εξισορρόπηση και των δύο επιπέδων αξιοποιείται ο αμφίδρομος μετατροπέας Cuk. Στόχος της εργασίας είναι η επιλογή των ρευμάτων για τη βελτιστοποίηση της εξισορρόπησης θέτοντας ως κριτήρια τη μείωση του χρόνου εξισορρόπησης και τη μείωση της θερμικής καταπόνησης των κελιών επιδιώκοντας εξισορρόπηση με χαμηλό ρεύμα.

1.5 Χρονοπρογραμματισμός Φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Το υψηλότερο επίπεδο διαχείρισης της ενέργειας ΗΟ σχετίζεται με τη φόρτισή τους. Σε ένα έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας άμεσα εμπλεκόμενοι με τη φόρτιση του ΗΟ είναι ο οδηγός, ο διαχειριστής του σταθμού φόρτισης και ο διαχειριστής του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν θα παγιωθεί η χρήση ΗΟ ως καθημερινών μέσων μετακίνησης, για την αποφυγή υπερφόρτισης του ηλεκτρικού δικτύου, ο διαχειριστής του πρέπει να θέτει όρια κατανάλωσης προς τους διαχειριστές

των σταθμών φόρτισης. Από την άλλη πλευρά, οι οδηγοί των ΗΟ πρέπει να μπορούν να φορτίσουν το όχημά τους, ώστε να καλύψουν τις ανάγκες τους για μετακίνηση.

Στην παρούσα φάση, η χρήση των ΗΟ είναι αρκετά περιορισμένη. Από τη μία πλευρά, οι οδηγοί είναι διστακτικοί στην απόκτηση ενός ΗΟ λόγω της ύπαρξης ελάχιστων σημείων ανεφοδιασμού. Από την άλλη πλευρά, οι πιθανοί επενδυτές στον τομέα της κατασκευής και διαχείρισης σταθμών φόρτισης είναι διστακτικοί σε τέτοιου είδους επενδύσεις λόγω του χαμηλού αριθμού ΗΟ [50].

Στη λύση των προαναφερθέντων προβληματισμών μπορούν να συμβάλουν οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού, προτείνοντας τρόπους φόρτισης μεμονωμένων ΗΟ ή ολόκληρου στόλου, ώστε να μην επιβαρύνεται το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά να υποστηρίζεται μέσω μεθόδων εξομάλυνσης φορτίου. Επιπλέον είναι σημαντικό να μπορούν να υποστηριχτούν οι οδηγοί των ΗΟ κατά την επιλογή του κατάλληλου σταθμού φόρτισης για να καλύψουν τις ανάγκες τους για μετακίνηση. Στο αντικείμενο του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ υπάρχει μεγάλος αριθμός άρθρων στη βιβλιογραφία. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιείται στην παρούσα διατριβή επικεντρώνεται σε πτυχές του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ που σχετίζεται με την κάλυψη των αναγκών των οδηγών για μετακίνηση.

Η βιβλιογραφία στο αντικείμενο του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ έχει διερευνηθεί στην [51], στην οποία τα σχετικά άρθρα ταξινομούνται στις κατηγορίες του κεντρικού και του αποκεντρωμένου χρονοπρογραμματισμού, καθώς και σε άλλες δύο κατηγορίες, ανάλογα με τη ροή της ενέργειας κατά τη φόρτιση, οπότε έχουμε τη μονοκατευθυντήρια και την αμφίδρομη ροής ενέργειας. Οι συγγραφείς στην [52] ταξινομούν τα προβλήματα χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ σε τέσσερις κατηγορίες, που αφορούν τα προβλήματα που επικεντρώνονται στο έξυπνο δίκτυο, στη φόρτιση ΗΟ, στο σχεδιασμό σταθμών φόρτισης, καθώς και προβλήματα δρομολόγησης ΗΟ για κάλυψη αναγκών ταξιδιού. Επίσης, στην [52] προτείνονται δύο ευρετικοί αλγόριθμοι για να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται από τον αλγόριθμο μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (mixed-integer linear programming).

Το μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας αφορά την πρόταση μεθόδων χρονοπρογραμματισμού που στοχεύουν στην υποστήριξη του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το πνεύμα, οι συγγραφείς της [53] προτείνουν μέθοδο χρονοπρογραμματισμού για την αξιοποίηση των ΗΟ με σκοπό την παροχή έργου ισχύος μέσω τεχνολογιών V2G, διασφαλίζοντας την προσφορά της απαιτούμενης ενέργειας για τη φόρτιση των ΗΟ. Κριτήρια βελτιστοποίησης που σχετίζονται με τους σταθμούς φόρτισης ενσωματώθηκαν στην [54] για την πρόταση μεθόδου χρονοπρογραμματισμού

φόρτισης με κεντρικό έλεγχο βασισμένη σε πολυκριτηριακό εξελικτικό αλγόριθμο. Η κάλυψη των αναγκών των οδηγών για μετακίνηση εισάγεται σαν προτεραιότητα στη μέθοδο χρονοπρογραμματισμού με κεντρικό έλεγχο που προτείνεται από την [55], όπου όλοι οι φορτιστές που λαμβάνονται υπόψη θεωρούνται ίδιου τύπου.

Η στοχαστική φύση του προβλήματος του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ έχει διερευνηθεί στην [56], στην οποία οι συγγραφείς εφάρμοσαν μέθοδο βελτιστοποίησης δύο επιπέδων βασισμένη στον αλγόριθμο του μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Στην εργασία αυτή, κάθε σταθμός φόρτισης αντιμετωπίστηκε σαν αυτόνομο υποσύστημα. Επιπλέον, λήφθηκαν υπόψη οι ανάγκες των χρηστών για μετακίνηση και η στοχαστική φύση του έξυπνου δικτύου. Στο αντικείμενο της υποστήριξης λήψης αποφάσεων, στην [57] χρησιμοποιείται η μέθοδος Analytic Hierarchy Process (AHP) και προτείνεται στρατηγική φόρτισης ΗΟ με τρία διακριτά επίπεδα ισχύος, επιτρέποντας αμφίδρομη V2G φόρτιση.

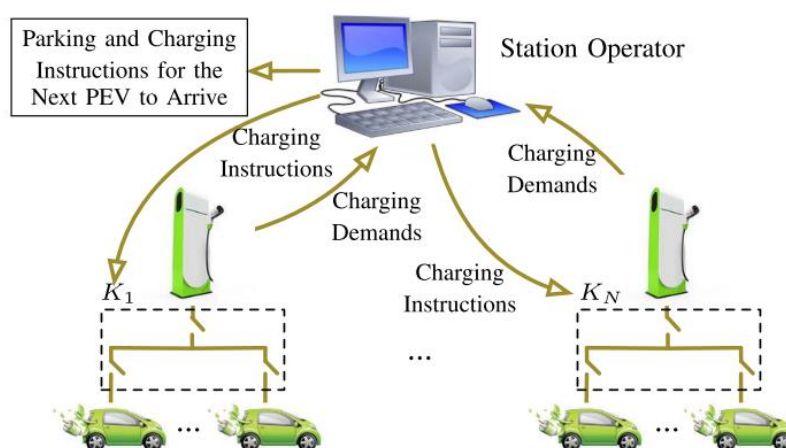
Οι συγγραφείς στην [58] διαπιστώνουν ότι η αρχιτεκτονική χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ με κεντρικό έλεγχο προσφέρει περιορισμένη επεκτασιμότητα. Συνεπώς, πρέπει να διερευνηθούν καταναεμημένοι αλγόριθμοι που λειτουργούν σε ιεραρχική δομή. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι ο χρονοπρογραμματισμός δύο επιπέδων [58], [59]. Στο υψηλότερο επίπεδο, τίθενται τα όρια ισχύος που πρέπει να υπακούει κάθε σταθμός φόρτισης. Στο χαμηλό επίπεδο, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού θα πρέπει να διασφαλίζει ότι τα όρια αυτά ακολουθούνται, καθώς και ότι τα χρονοδιαγράμματα που εξάγονται καλύπτουν τις ανάγκες των οδηγών για μετακίνηση και τους στόχους των διαχειριστών σταθμών φόρτισης.

Ιεραρχικός χρονοπρογραμματισμός φόρτισης δύο επιπέδων προτείνεται και στην [60]. Στην εν λόγω εργασία χρησιμοποιείται ο Γενετικός Αλγόριθμος (GA) στο υψηλό επίπεδο χρονοπρογραμματισμού για την εύρεση των βέλτιστων σημείων λειτουργίας των σταθμών φόρτισης με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους του διαχειριστή του δικτύου. Στο χαμηλό επίπεδο χρησιμοποιείται ο μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός για την κάλυψη των αναγκών των οδηγών.

Με την αύξηση της πολυπλοκότητας του προβλήματος επιλέγονται μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, όπως ο GA που αξιοποιήθηκε στην [61] για να αντικαταστήσει τον μεικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι οι συναρτήσεις που περιγράφουν τα προβλήματα χρονοπρογραμματισμού συχνά μπορεί να μην είναι γραμμικές ή τετραγωνικές, οι κλασσικές μέθοδοι βελτιστοποίησης που βασίζονται σε γνωστή κυρτότητα πιθανόν να μην μπορούν

να εφαρμοστούν αποτελεσματικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι και να οδηγήσουν στην εύρεση λύσεων πολύ κοντά στη βέλτιστη [62]. Επιπρόσθετα, αλγόριθμοι που εμπίπτουν στην κατηγορία της θεωρίας παιγνίων έχουν προταθεί με σκοπό να ξεπεραστούν οι υπολογιστικοί περιορισμοί που τίθενται από τον ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό [63], [64].

Μια ενδιαφέρουσα πρακτική για τη μείωση του απαιτούμενου κόστους για την εγκατάσταση φορτιστών σε ένα σταθμό είναι ο διαμοιρασμός πόρων. Στην [65] χρησιμοποιείται ο εξελικτικός υβριδικός μεικτός αλγόριθμος βελτιστοποίησης σε σταθμό φόρτισης που με χρήση αυτοματισμών διαμοιράζει φορτιστές στις θέσεις στάθμευσης, με τον αριθμό φορτιστών να είναι μικρότερος από τον αριθμό των θέσεων (Σχήμα 1.6). Στην [66], οι συγγραφείς προτείνουν ένα σχήμα διαχείρισης σταθμού φόρτισης με έναν τύπο φορτιστών που μπορούν να διαμοιραστούν σε διάφορες θέσεις στάθμευσης.



Σχήμα 1.6: Η μέθοδος διαμοιρασμού πόρων που προτείνεται στην [65].

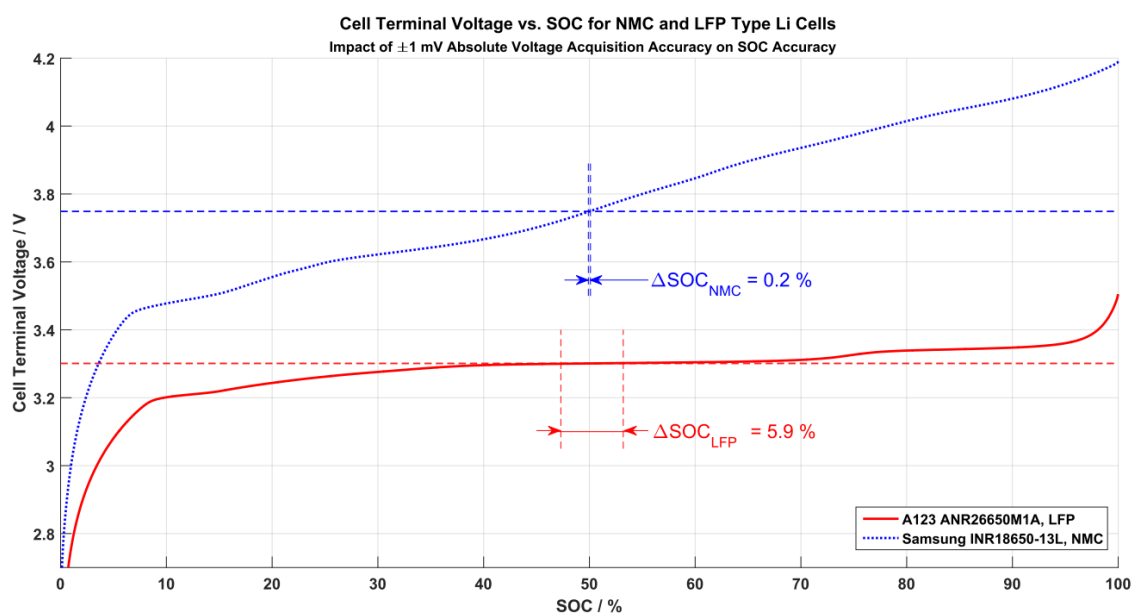
Ο χρονοπρογραμματισμός σταθμού φόρτισης με παραπάνω από έναν τύπο φορτιστών προτείνεται στην [67], με τους συγγραφείς να χρησιμοποιούν τους μετα-ευρετικούς αλγορίθμους GA και PSO. Στην [68] διαπιστώνεται ότι η υπάρχουσα βιβλιογραφία στοχεύει στο χρονοπρογραμματισμό φόρτισης σύμφωνα με κριτήρια που εξυπηρετούν τους διαχειριστές των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και των σταθμών φόρτισης. Για το λόγο αυτό, στην [68] ενισχύεται το κριτήριο της κάλυψης των αναγκών των οδηγών για μετακίνηση μέσα από μέθοδο θεωρίας παιγνίων, στην οποία ενσωματώνεται δείκτης αξιολόγησης των σταθμών φόρτισης σε μια λογική κοινωνικής δικτύωσης. Μία ακόμα μέθοδος που αναδεικνύει την ανάγκη ενσωμάτωσης κριτηρίων που εξυπηρετούν τους

οδηγούς, όπως η απαιτούμενη αυτονομία με το πέρας της φόρτισης και το χρόνο στάθμευσης, παρουσιάζεται στην [69].

Για την επίτευξη του οράματος της αμφίδρομης μεταφοράς ενέργειας V2G και του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο τα πρότυπα επικοινωνιών [70]. Επιπλέον, τα ζητήματα διαλειτουργικότητας μεταξύ των υποσυστημάτων του έξυπνου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας κρίνονται ιδιαίτερα σημαντικά [71], καθώς πρέπει να συμφωνηθούν κοινά αποδεκτά πρότυπα για την επικοινωνία μεταξύ συστημάτων που κατασκευάζονται από διαφορετικούς κατασκευαστές. Σε αυτά τα πλαίσια, το πρότυπο Open Platform Communications–Unified Architecture (OPC–UA) έχει σημειωθεί ως μια πιθανή τεχνολογία επικοινωνιών μεταξύ των υποσυστημάτων του έξυπνου δικτύου [72], [73]. Η σημασιολογική αναπαράσταση δεδομένων μπορεί να συνεισφέρει στην επικοινωνία ετερογενών συστημάτων για την επίτευξη του V2G, μέσα από κοινά αποδεκτές ονομασίες μεταβλητών και του κατάλληλου σχεσιακού μοντέλου, χωρίς να είναι πλήρως γνωστή η δομή των δεδομένων εκ των προτέρων [74], [75].

1.6 Τοποθέτηση Διδακτορικής Διατριβής στην ακαδημαϊκή αιχμή

Έχοντας μελετήσει τη σχετική με το αντικείμενο βιβλιογραφία, διαπιστώνονται σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Στο αντικείμενο του BMS απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στη μέτρηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του κελιού, ώστε να πραγματοποιηθεί εκτίμηση της SoC. Η εκτίμηση αυτή είναι ιδιαίτερα δύσκολη κατά τη λειτουργία του HO, καθώς το κελί βρίσκεται σε δυναμική κατάσταση και το περιβάλλον μέτρησης είναι θορυβώδες. Η καμπύλη της τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε σχέση με τη SoC τείνει να γίνεται ολοένα και περισσότερο επίπεδη για τις νέες τεχνολογίες συσσωρευτών, με μια απόκλιση στη μέτρηση της τάσης της τάξης του 1 mV να οδηγεί σε απόκλιση κατά την εκτίμηση της SoC κατά 5 % (Σχήμα 1.7) [19]. Συνεπώς, κατά τη λειτουργία ενός HO είναι πιθανό να ανιχνευθούν τα κελιά που χρήζουν εξισορρόπησης όταν η SoC τους φτάσει σε επίπεδα πάνω από 70 % κατά τη φόρτιση και κάτω από 30 % κατά την εκφόρτιση. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η περαιτέρω διερεύνηση διατάξεων εξισορρόπησης τάσης συσσωρευτών που προσφέρουν ταχεία εξισορρόπηση με υψηλή απόδοση. Τα BMS που προσφέρουν ταχεία εξισορρόπηση έχουν ιδιαίτερη σημασία για εφαρμογές που χρησιμοποιούνται συσσωρευτές μεγάλης χωρητικότητας (π.χ. > 50 Ah έκαστος).



Σχήμα 1.7: Η αβεβαιότητα κατά την εκτίμηση της SoC για ± 1 mV ακρίβεια στη μέτρηση της τάσης του κελιού για δύο τύπους κελιών [19].

Όσον αφορά το βέλτιστο σχεδιασμό διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, απαιτείται η πρόταση μεθόδων οι οποίες, αφενός μεν ενσωματώνουν ακριβές μοντέλο του υπό διερεύνηση μετατροπέα κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, αφετέρου δε, μπορούν να οδηγήσουν σε βέλτιστες, ή κοντά σε βέλτιστη, λύσεις που μπορούν να υλοποιηθούν στη πράξη. Η εισαγωγή του μοντέλου του μετατροπέα και ο ακριβής υπολογισμός των απωλειών του είναι ιδιαίτερα σημαντικός και κατά το χρονοπρογραμματισμό εξισορρόπησης συσσωρευτών, ώστε να εξασφαλίζεται γρήγορη εξισορρόπηση με μειωμένες απώλειες όχι μόνο σε επίπεδο μετατροπέα, αλλά και στο επίπεδο του συνολικού συστήματος.

Στο αντικείμενο του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ και την επικοινωνία αυτών με τα υπόλοιπα συστήματα του έξυπνου δικτύου απαιτείται η πρόταση αποκεντρωμένων μεθόδων χρονοπρογραμματισμού, στις οποίες θα λαμβάνονται υπόψη και οι προτεραιότητες των οδηγών σχετικά με τον τρόπο φόρτισης. Επιπλέον, μέθοδοι που αξιοποιούν διαφορετικού τύπου φορτιστές και προσδίδουν δυνατότητα διαμοιρασμού των πόρων ενός σταθμού έχουν ιδιαίτερη σημασία. Τέλος, δεν έχει προταθεί από την υπάρχουσα βιβλιογραφία μέθοδος για την υποστήριξη του οδηγού κατά τη λήψη της απόφασης για την επιλογή του σταθμού που θα φορτίσει το ΗΟ.

Μέσα από την παρούσα διδακτορική διατριβή επιδιώκεται η συνεισφορά στην επιστημονική αιχμή που συνοψίζεται στα ακόλουθα σημεία:

- Πρόταση συνολικής μεθοδολογίας για την αποδοτική διαχείριση ενέργειας ΗΟ, τόσο σε επίπεδο συσσωρευτών, όσο και σε επίπεδο σταθμού φόρτισης.
- Πρόταση συστήματος εξισορρόπησης ενέργειας μεμονωμένων συσσωρευτών για ενσωμάτωση σε BMS, βασισμένο στην τοπολογία αμφίδρομου Flyback με υψηλή απόδοση και υψηλό ρεύμα εξισορρόπησης. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος προτείνεται μοντελοποίηση του μετατροπέα λαμβάνοντας υπόψη τα μη ιδανικά στοιχεία που τον απαρτίζουν. Η συστοιχία των συσσωρευτών χωρίζεται σε επιμέρους ομάδες και η εξισορρόπηση πραγματοποιείται εσωτερικά της ομάδας.
- Πρόταση μεθόδου χρονοπρογραμματισμού πολλών διατάξεων BMS για την εξισορρόπηση της SoC συσσωρευτών συστοιχίας, λαμβάνοντας υπόψη αναλυτική μοντελοποίηση του μετατροπέα, με σκοπό τη μείωση των απωλειών του συνολικού συστήματος και την ταχεία εξισορρόπηση.
- Πρόταση συστήματος εξισορρόπησης ενέργειας μεταξύ ομάδων συσσωρευτών για ενσωμάτωση σε BMS, βασισμένο στην τοπολογία αμφίδρομου Quasi-resonant Flyback με υψηλή απόδοση και ρεύμα εξισορρόπησης. Πραγματοποιείται πλήρης ανάλυση του μετατροπέα όσον αφορά τη λειτουργία του, καθώς και όσον αφορά τις ενεργειακές του απώλειες.
- Προτείνεται μέθοδος χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ σε σταθμό φόρτισης λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικού τύπου φορτιστές και εφαρμόζοντας τη μέθοδο του διαμοιρασμού πόρων. Αξιολογούνται οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι GA και PSO και επιλέγεται ο κατάλληλος με βάση την ικανότητα προσέγγισης της βέλτιστης λύσης στο μικρότερο χρόνο. Οι παράμετροι λειτουργίας των αλγορίθμων επιλέγονται με βάση τη μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi.
- Πρόταση της Analytic Hierarchy Process (AHP) για την υποβοήθηση των οδηγών των ΗΟ κατά την επιλογή σταθμού φόρτισης σύμφωνα με τις προτιμήσεις των οδηγών σχετικά με το προφίλ φόρτισης.
- Διερεύνηση του προτύπου επικοινωνίας OPC-UA σαν υποψήφιο πρότυπο για την επικοινωνία μεταξύ του σταθμού φόρτισης και των ΗΟ, ώστε να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα ετερογενών συστημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

2.1 Εισαγωγή

Έχοντας θέσει τους στόχους για την παρούσα διδακτορική διατριβή και έχοντας επισημάνει τα σημεία τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης στις θεματικές περιοχές που αυτή πραγματεύεται, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το σύνολο των μεθόδων που προτείνονται για την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας ΗΟ. Οι μέθοδοι που προτείνονται αφορούν αφενός μεν την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας εντός της συστοιχίας συσσωρευτών ενός ΗΟ, αφετέρου δε, αφορούν τη διαχείριση των φορτιστών σε ένα σταθμό φόρτισης, καθώς και την υποβοήθηση του οδηγού κατά την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης. Επομένως, προτείνεται ένα συνολικό σύστημα δύο επιπέδων.

Αρχικά, περιγράφεται σε υψηλό επίπεδο η αρχιτεκτονική του συνολικού συστήματος σύμφωνα με τους επιμέρους στόχους που τίθενται. Σε ένα πρώτο βήμα, προτείνεται ο διαχωρισμός των συσσωρευτών μιας συστοιχίας σε ομάδες. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική που προτείνεται για την εξισορρόπηση της ενέργειας μεμονωμένων συσσωρευτών με βάση το μετατροπέα Flyback. Πέρα από τη μελέτη και το σχεδιασμό του μετατροπέα Flyback, προτείνεται και μέθοδος χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών εντός μιας ομάδας. Έπειτα, περιγράφεται η αρχιτεκτονική εξισορρόπησης ενέργειας ομάδων συσσωρευτών που βασίζεται στο μετατροπέα Quasi-resonant Flyback. Τέλος, παρουσιάζεται η μέθοδος χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ σε σταθμό φόρτισης με δύο τύπους φορτιστών και σύνδεση των φορτιστών με περισσότερες από μία θέσεις στάθμευσης, καθώς και η μέθοδος υποστήριξης του οδηγού κατά την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης με βάση προσωπικές προτιμήσεις.

Σημειώνεται ότι οι μέθοδοι εξισορρόπησης της ενέργειας που προτείνονται δεν περιορίζονται μόνο για την εφαρμογή σε ΗΟ, αλλά μπορούν να αξιοποιηθούν σε όλες τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται συσσωρευτές, όπως τα σταθερά συστήματα συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή τα συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος.

Μέσα από το κεφάλαιο αυτό, επιδιώκεται να παρουσιαστεί στον αναγνώστη ο γενικός σκοπός της διδακτορικής διατριβής και να αναφερθούν οι μέθοδοι που ακολουθούνται για την επίτευξη κάθε επιμέρους στόχου. Οι μέθοδοι αυτές θα αναλυθούν διεξοδικά στα επόμενα κεφάλαια.

2.2 Δομή του προτεινόμενου συστήματος

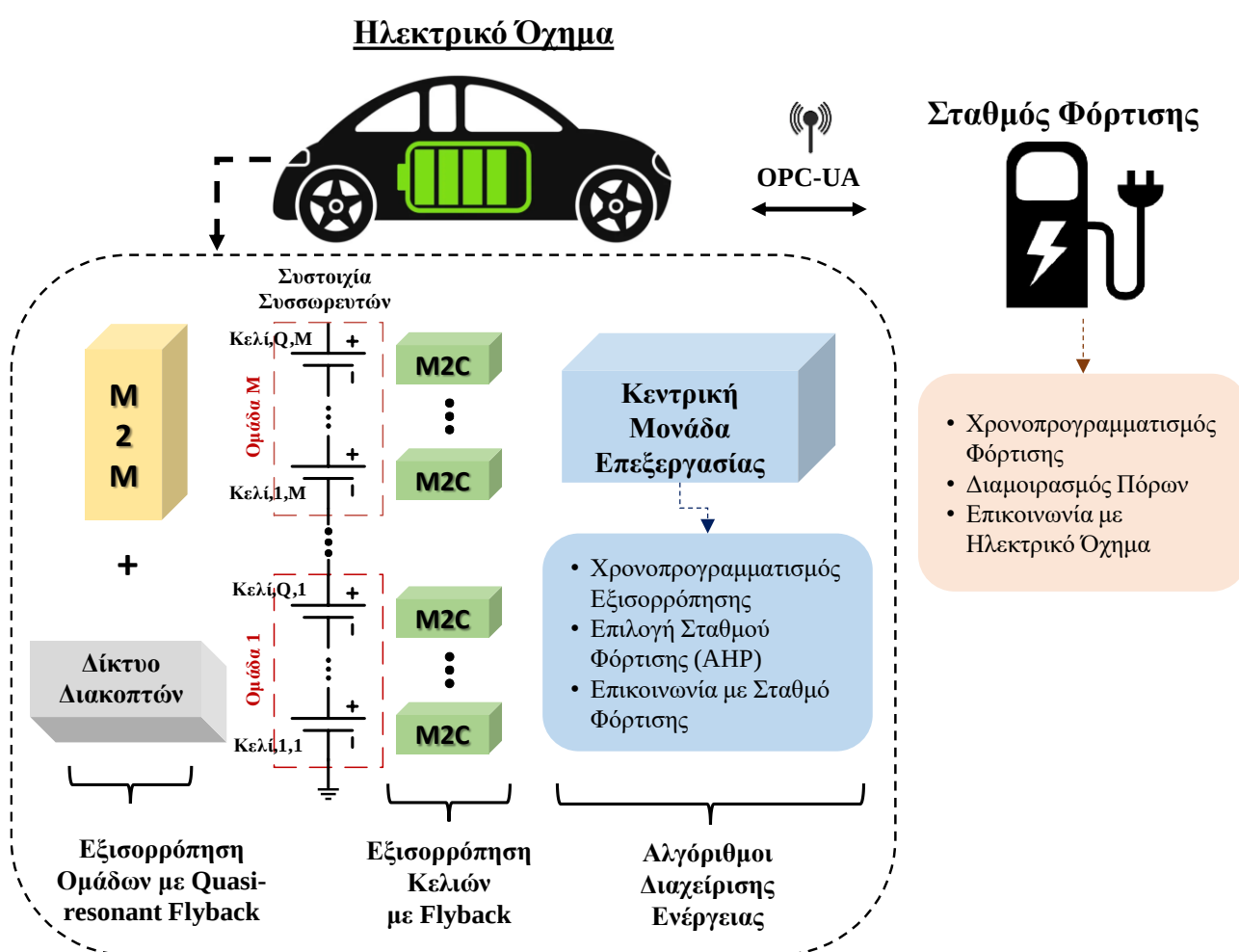
Το συνολικό σύστημα περιλαμβάνει δύο επίπεδα διαχείρισης ενέργειας ΗΟ. Όπως έχει αναφερθεί, το πρώτο επίπεδο αφορά την εξισορρόπηση της ενέργειας των συσσωρευτών που αποτελούν τη μονάδα αποθήκευσης ενέργειας του ΗΟ, ενώ το δεύτερο επίπεδο αφορά τη διαχείριση της φόρτισης του ΗΟ σε σταθμό φόρτισης. Για κάθε ένα από τα δύο επίπεδα διαχείρισης ενέργειας προτείνονται δύο υποσυστήματα.

Στην παρούσα διατριβή, θεωρείται ότι η συστοιχία των συσσωρευτών ενός ΗΟ χωρίζεται σε ομάδες των οκτώ συσσωρευτών η κάθε μία. Για το επίπεδο της εξισορρόπησης της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών εντός μιας ομάδας, προτείνεται αμφίδρομος μετατροπέας Flyback που τοποθετείται σε κάθε συσσωρευτή για την επίτευξη της αμφίδρομης ροής ενέργειας μεταξύ ομάδας και μεμονωμένου συσσωρευτή (Module-to-Cell, M2C). Αυτή η διαμόρφωση έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την ταυτόχρονη εξισορρόπηση μη γειτονικών κελιών χωρίς πολλαπλές μεταβάσεις, κάτι που είναι σημαντικό για να επιτευχθεί ταχεία εξισορρόπηση σε ένα BMS. Από την πλευρά του ηλεκτρονικού μετατροπέα, το πλεονέκτημα της M2C είναι η μειωμένη καταπόνηση των ημιαγωγικών στοιχείων με υψηλή τάση σε σχέση με την τοπολογία Pack-to-Cell, κατά την οποία η μία πλευρά του μετατροπέα συνδέεται στα άκρα ολόκληρης της συστοιχίας.

Για την εξισορρόπηση της ενέργειας μεταξύ ομάδων συσσωρευτών (Module-to-Module, M2M) προτείνεται ο αμφίδρομος μετατροπέας Quasi-resonant Flyback. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης χρονικής διάρκειας που απαιτείται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας εξισορρόπησης είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο συντονισμός των επιμέρους BMS εντός της συστοιχίας, μέσω μεθόδων βέλτιστου χρονοπρογραμματισμού, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών. Η μελέτη εφαρμογής για το αντικείμενο της εξισορρόπησης της ενέργειας συσσωρευτών έχει πραγματοποιηθεί με βάση το όχημα τύπου Buggy που έχει κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας (EHME) [76]-[78].

Σχετικά με το επίπεδο της διαχείρισης φόρτισης ΗΟ, θεωρείται σταθμός φόρτισης με φορτιστές διαφορετικών τύπων, ανάλογα με την ισχύ που μπορούν να προσφέρουν. Επιπλέον, κάθε φορτιστής συνδέεται σε περισσότερες από μία θέσεις φόρτισης. Με τον τρόπο αυτό, ένα ΗΟ μπορεί να μένει σταθμευμένο στο σταθμό, χωρίς να δεσμεύει πόρους φόρτισης και οι φορτιστές να εναλλάσσονται μεταξύ των σταθμευμένων οχημάτων. Ο χρονοπρογραμματισμός φόρτισης επιτυγχάνεται μέσα από τη χρήση μετα-ευρετικού αλγορίθμου.

Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική, λαμβάνονται υπόψη και οι προσωπικές προτιμήσεις των οδηγών των οχημάτων σχετικά με την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης. Για το σκοπό αυτό, εκτελείται αλγόριθμος υποβοήθησης λήψης αποφάσεων βασισμένος στη μέθοδο Analytic Hierarchy Process (AHP), ώστε να συμπεριληφθούν κριτήρια όπως το κόστος φόρτισης και η φθορά των συσσωρευτών. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα επιμέρους συστήματα, διαμοιράζονται στον εξωτερικό κόσμο μέσω του προτύπου OPC-UA. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική για την αποδοτική διαχείριση ενέργειας ΗΟ.

2.3 Τοπολογία εξισορρόπησης σε επίπεδο κελιών

Για την εξισορρόπηση μεμονωμένων κελιών ακολουθείται η τοπολογία αμφίδρομης ροής ενέργειας M2C, κατά την οποία οι συσσωρευτές της συστοιχίας χωρίζονται σε αριθμό M ομάδων συνδεδεμένων σε σειρά και η εξισορρόπηση πραγματοποιείται εσωτερικά των ομάδων. Η ροή

ενέργειας M2C με ενσωματωμένο ηλεκτρονικό μετατροπέα σε κάθε κελί επιτρέπει την ταυτόχρονη εξισορρόπηση της ενέργειας συσσωρευτών που δεν είναι γειτονικοί, ανεξάρτητα από τη θέση τους στην ομάδα.

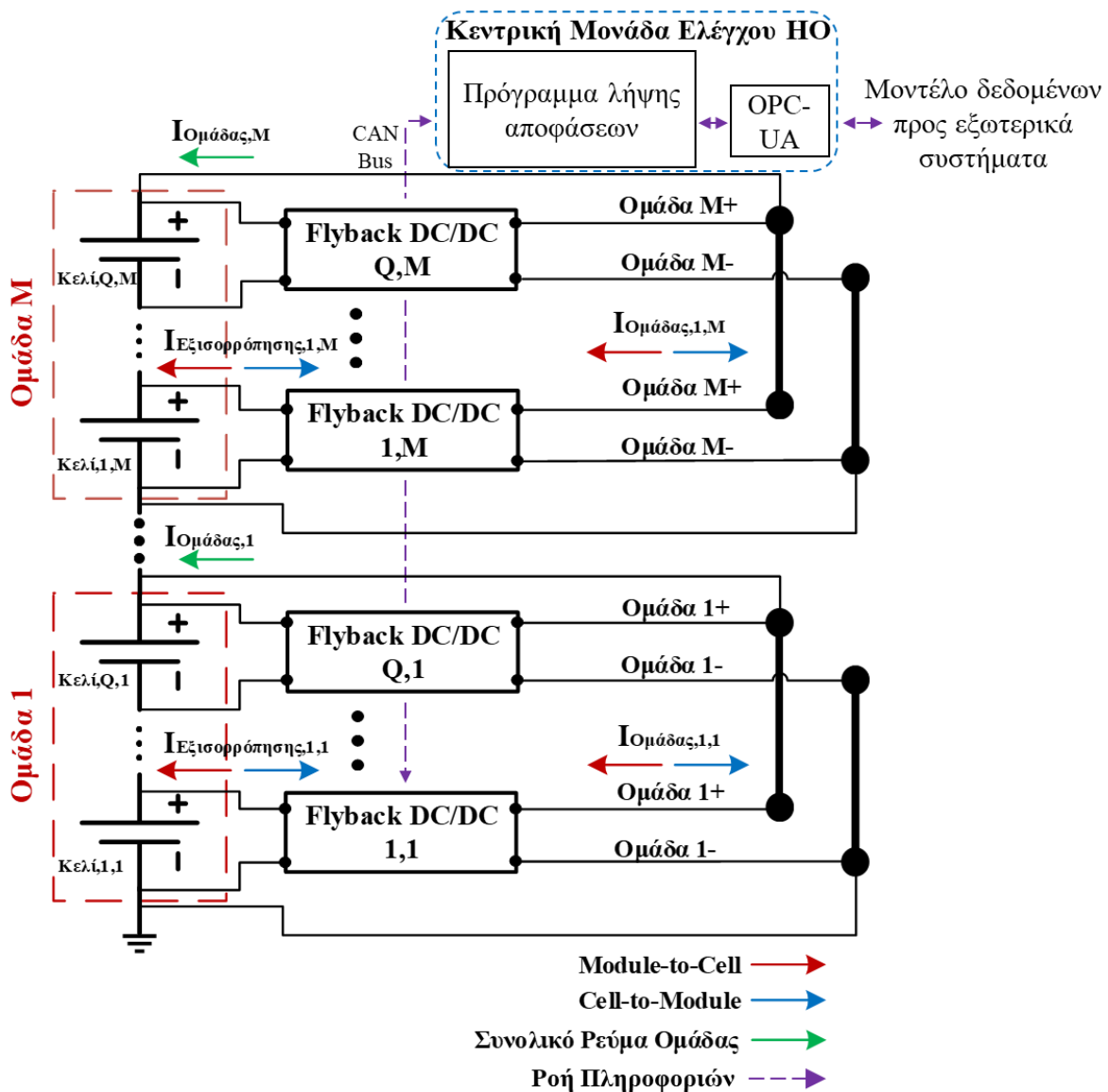
Έστω ότι κάθε ομάδα συσσωρευτών αποτελείται από αριθμό Q συσσωρευτών. Για την παρούσα εργασία το Q ισούται με οκτώ συσσωρευτές. Σε κάθε ένα κελί τοποθετείται ένας αμφίδρομος μετατροπέας DC/DC τύπου Flyback που λειτουργεί αυτόνομα. Η επιλογή της τοπολογίας του Flyback έχει πραγματοποιηθεί με γνώμονα το χαμηλό αριθμό στοιχείων σε σχέση με άλλες τοπολογίες, τον απλό του σχεδιασμό, τη γαλβανική απομόνωση που προσφέρει, καθώς και τη δυνατότητα αμφίδρομης λειτουργίας. Συνεπώς, είναι κατάλληλος για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Η αμφίδρομη λειτουργία επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση της διόδου του δευτερεύοντος με ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακόπτη, σύμφωνα με την τεχνική της σύγχρονης ανόρθωσης. Η μία πλευρά του μετατροπέα συνδέεται στον συσσωρευτή, ενώ η άλλη πλευρά συνδέεται στα άκρα της ομάδας [79].

Οι στόχοι που τίθενται για τον ηλεκτρονικό μετατροπέα εξισορρόπησης μεμονωμένων κελιών αφορούν τη δυνατότητα εξισορρόπησης με υψηλό ρεύμα και υψηλή απόδοση. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται να επιτευχθεί ρεύμα εξισορρόπησης 5 A με απόδοση μεγαλύτερη του 90 %. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τις περιπτώσεις συσσωρευτών με χωρητικότητα μεγαλύτερη των 50 Ah. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις οχημάτων βαρέως τύπου (π.χ. φορτηγά και λεωφορεία), καθώς και οχημάτων που πραγματοποιούν συχνά δρομολόγια με σύντομες στάσεις, η ταχεία εξισορρόπηση είναι σημαντική, καθώς δεν διατίθεται ο απαραίτητος χρόνος για την εφαρμογή αργών μεθόδων εξισορρόπησης (<1 A).

Προκειμένου να υλοποιηθεί μετατροπέας Flyback με υψηλότερη απόδοση και ρεύμα εξισορρόπησης σε σύγκριση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, η πρόταση μιας μεθοδολογίας σχεδιασμού που περιλαμβάνει τις μη ιδανικότητες των στοιχείων που απαρτίζουν το μετατροπέα είναι απαραίτητη. Η μεθοδολογία αυτή παρουσιάζεται με λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 3. Ο μετατροπέας προτείνεται να λειτουργεί στην περιοχή ασυνεχούς λειτουργίας (Discontinuous Conduction Mode, DCM), ώστε να μπορέσει να ελεγχθεί σαν πηγή ρεύματος και να μειωθούν οι διακοπτικές απώλειες στα ημιαγωγικά του στοιχεία.

Πλέον του μετατροπέα Flyback, κάθε BMS αποτελείται από μικροελεγκτή και τα κατάλληλα περιφερειακά για τη μέτρηση της τάσης και του ρεύματος του κελιού, καθώς και τη μέτρηση της τάσης της ομάδας. Το σύστημα κελιού και BMS δημιουργεί ένα έξυπνο κελί που συλλέγει δεδομένα

σχετικά με τη λειτουργία του και μπορεί να τα μεταφέρει σε άλλα συστήματα μέσω προτύπων επικοινωνιών (π.χ. SPI, CAN bus, I2C), ώστε να ληφθούν οι απαραίτητες αποφάσεις για την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας στη συστοιχία, όπως είναι ο χρονοπρογραμματισμός εξισορρόπησης. Ο χρονοπρογραμματισμός εξισορρόπησης είναι μια ιδιαίτερα σημαντική λειτουργία κατά την οποία συντονίζονται όλα τα BMS εντός μιας ομάδας (και κατ' επέκταση συστοιχίας), ώστε να επιτευχθεί μείωση των συνολικών απωλειών του συστήματος εξισορρόπησης τόσο κατά τη φόρτιση, αλλά και την εκφόρτιση της συστοιχίας. Η αρχιτεκτονική για την εξισορρόπηση σε επίπεδο κελιών απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Η αρχιτεκτονική για την εξισορρόπηση σε επίπεδο κελιών.

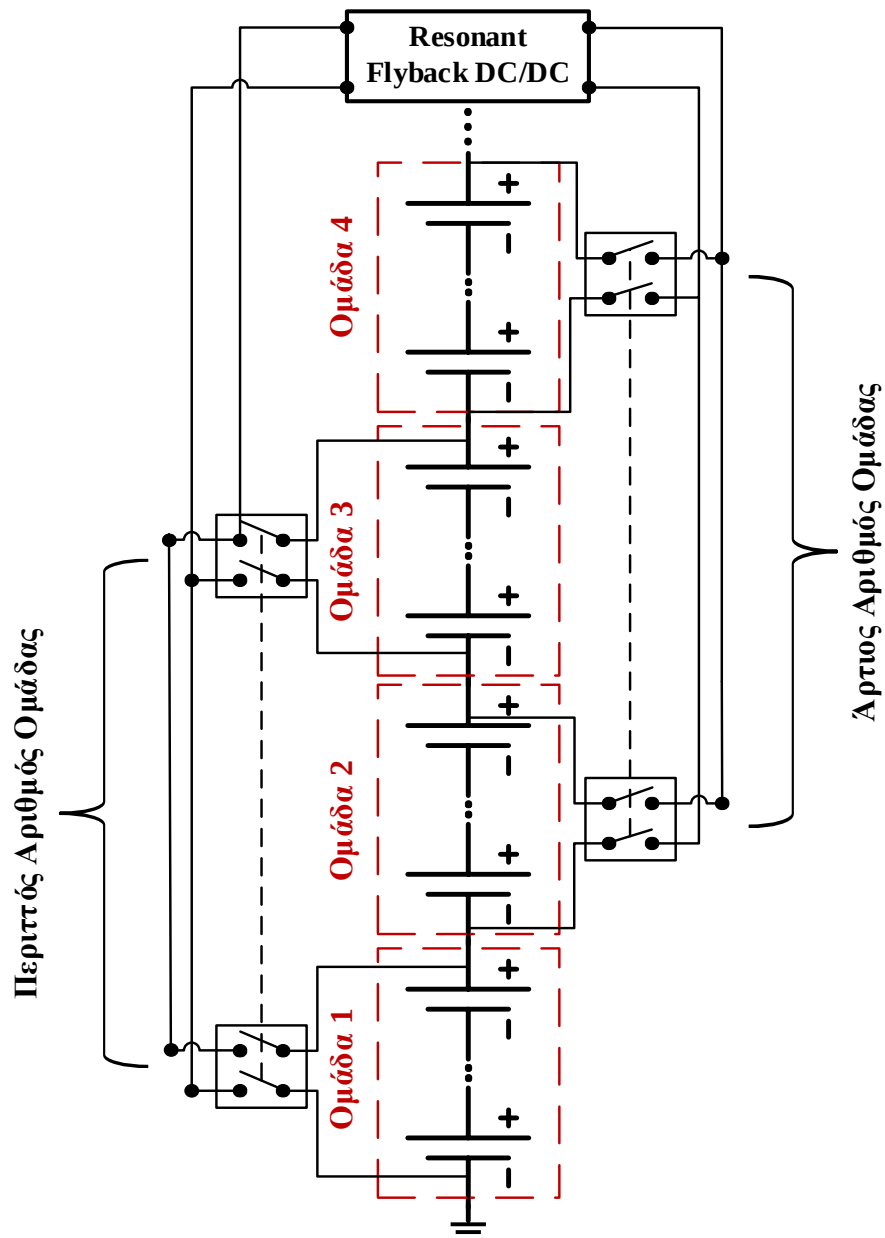
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2, το BMS λειτουργεί σε δύο καταστάσεις. Στην περίπτωση συσσωρευτή με χαμηλή SoC ο μετατροπέας Flyback που συνδέεται στο συσσωρευτή μεταφέρει ενέργεια από την ομάδα στο κελί (ροή Module-to-Cell, M2C). Στην περίπτωση κελιού με υψηλή SoC, ο Flyback μεταφέρει ενέργεια από το κελί στην ομάδα (ροή Cell-to-Module, C2M). Η αμφίδρομη λειτουργία του μετατροπέα επιτρέπει και τις δύο ροές ενέργειας M2C και C2M, αλλά για λόγους απλούστευσης η προτεινόμενη τοπολογία θα αναφέρεται ως M2C. Στο Σχήμα 2.2, για κάθε πλευρά (υψηλής και χαμηλής τάσης) κάθε μετατροπέα Flyback τα κόκκινα βέλη σηματοδοτούν τη ροή M2C, ενώ τα μπλε βέλη σηματοδοτούν τη ροή C2M. Το αλγεβρικό άθροισμα όλων των ρευμάτων των μετατροπέων στις πλευρές υψηλής τάσης δίνει το ρεύμα που ρέει στην ομάδα και οφείλεται στην εξισορρόπηση.

2.4 Τοπολογία εξισορρόπησης σε επίπεδο ομάδας κελιών

Για την εξισορρόπηση της ενέργειας μεταξύ των ομάδων συσσωρευτών επιλέγεται η αμφίδρομη ροή ενέργειας από ομάδα σε ομάδα (Module-to-Module, M2M). Για το σκοπό αυτό επιλέγεται ο αμφίδρομος μετατροπέας τύπου Quasi-resonant Flyback. Στον μετατροπέα Quasi-resonant Flyback χρησιμοποιούνται τέσσερις ημιαγωγικοί διακόπτες, εκ των οποίων οι δύο λειτουργούν στη διακοπτική συχνότητα, ενώ οι άλλοι δύο είναι συμπληρωματικά μεταξύ τους σε μόνιμη αγωγή και μόνιμη αποκοπή, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής ενέργειας που είναι επιθυμητή. Η λειτουργία και ο σχεδιασμός του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 5. Με τον μετατροπέα αυτό, επιδιώκεται εξισορρόπηση ομάδων με ρεύμα 5 A και μέγιστη απόδοση 95 %. Σημαντικό πλεονέκτημα του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback είναι η λειτουργία των ημιαγωγικών στοιχείων με ομαλή μετάβαση (soft-switching). Συγκεκριμένα, σε αντίθεση με τον κλασικό μετατροπέα Flyback, το ημιαγωγικό στοιχείο του πρωτεύοντος στον Quasi-resonant Flyback σβήνει υπό μηδενικό ρεύμα.

Θέτοντας την παραδοχή ότι οι τάσεις μεταξύ των ομάδων δεν θα έχουν μεταξύ τους έντονες διαφοροποιήσεις, όπως ενδεχομένως έχουν οι τάσεις των μεμονωμένων συσσωρευτών, για την περίπτωση της εξισορρόπησης τάσης μεταξύ ομάδων χρησιμοποιείται η αρχιτεκτονική του ενός μετατροπέα που διαμοιράζεται μεταξύ των ομάδων με χρήση δικτύου διακοπών. Συγκεκριμένα, υιοθετείται η λογική που χρησιμοποιείται στην [11], κατά την οποία η μία πλευρά του μετατροπέα συνδέεται σε ομάδα μονού αριθμού, ενώ η άλλη πλευρά του μετατροπέα συνδέεται σε μονάδα ζυγού

αριθμού. Έτσι, μειώνεται ο συνολικός αριθμός των διακοπών που χρησιμοποιούνται. Η αρχιτεκτονική εξισορρόπησης σε επίπεδο ομάδων συσσωρευτών παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Η αρχιτεκτονική εξισορρόπησης σε επίπεδο ομάδων συσσωρευτών.

2.5 Μέθοδος χρονοπρογραμματισμού φόρτισης και επιλογής σταθμού

Στο επίπεδο της φόρτισης του ΗΟ προτείνεται ένα σύνολο μεθόδων για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης των οχημάτων στο σταθμό, την υποστήριξη του οδηγού κατά την επιλογή του

καταλληλότερου σταθμού φόρτισης, καθώς και το σχετικό πρότυπο επικοινωνιών. Η προσέγγιση που ακολουθείται παρουσιάζεται μέσα από ένα ενδεικτικό σενάριο εφαρμογής.

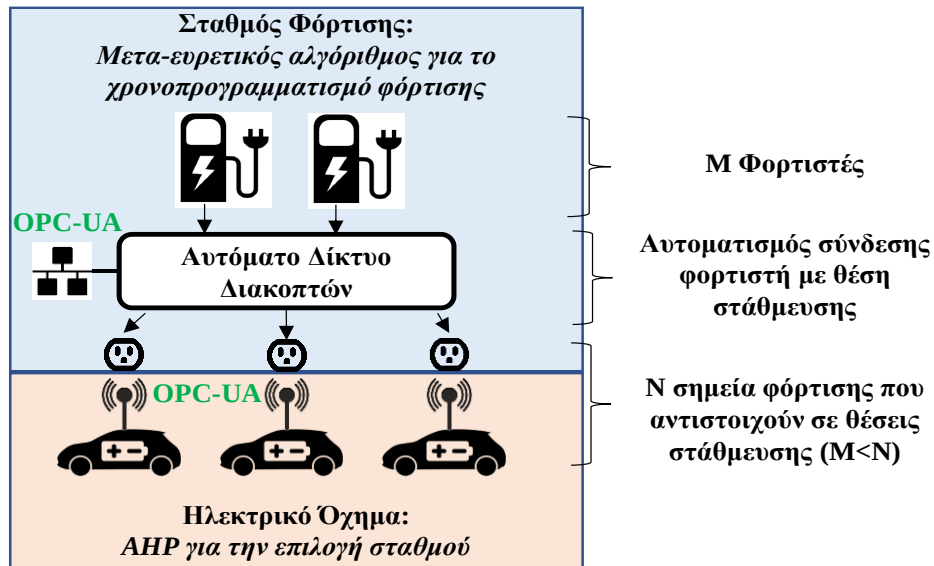
Έστω ότι απαιτείται η φόρτιση ενός ΗΟ. Τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη κατά τη φόρτιση είναι το κόστος, η διάρκεια φόρτισης, καθώς και η φθορά των συσσωρευτών που οφείλεται στη φόρτιση με αυξημένο ρεύμα. Τα κριτήρια αυτά αφορούν εξατομικευμένες προτιμήσεις του οδηγού που εισάγονται στο σύστημα με τη μορφή συντελεστών βαρύτητας. Μέσω του προτύπου OPC-UA μεταδίδονται οι απαιτήσεις φόρτισης προς τους γειτονικούς σταθμούς, καθώς και οι προτιμήσεις του οδηγού. Τα δεδομένα που μεταδίδονται σχετίζονται με την απαιτούμενη ενέργεια φόρτισης, τις προδιαγραφές των συσσωρευτών, καθώς και τον απαιτούμενο χρόνο ολοκλήρωσης της φόρτισης.

Μόλις ληφθούν τα δεδομένα αυτά από τους σταθμούς φόρτισης, σε κάθε έναν από αυτούς εκτελείται ένας μετα-ευρετικός αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού για την πρόταση μιας προσφοράς φόρτισης. Κάθε φορτιστής του σταθμού δεν είναι δεσμευμένος σε μια θέση φόρτισης, αλλά μέσω αυτόματου δικτύου διακοπών μπορεί να διατεθεί σε περισσότερες από μία θέσεις φόρτισης σύμφωνα με τη λογική του διαμοιρασμού πόρων. Έτσι, παρόλο που ο φορτιστής δύναται να φορτίσει ένα μόνο όχημα κάθε χρονική στιγμή, η σύνδεση του μπορεί να εναλλάσσεται μεταξύ πολλών θέσεων. Επιπλέον, θεωρείται ότι κάθε σταθμός φόρτισης έχει δύο είδη φορτιστών, το φορτιστή κανονικής φόρτισης και το φορτιστή ταχείας φόρτισης. Ο χρόνος φόρτισης διακριτοποιείται και σε κάθε χρονικό διάστημα ο αλγόριθμος του χρονοπρογραμματισμού λαμβάνει δύο αποφάσεις, η πρώτη αφορά την επιλογή του φορτιστή, ενώ η δεύτερη αφορά την επιλογή του ρεύματος φόρτισης.

Σε μικρούς σταθμούς φόρτισης είναι δυνατή η σύνδεση όλων των φορτιστών σε όλες τις θέσεις στάθμευσης. Όμως, η αύξηση της πολυπλοκότητας και του κόστους για να επιτευχθεί η διασύνδεση αυτή σε μεγάλους σταθμούς φόρτισης επιβάλλει την ομαδοποίηση των φορτιστών και των θέσεων στάθμευσης. Επομένως, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού πρέπει να εκτελείται σε όλες τις ομάδες φορτιστών/θέσεων παράλληλα και να επιλέγεται το βέλτιστο σενάριο.

Όταν αποστείλουν όλοι οι σταθμοί τις προσφορές φόρτισης, εκτελείται αλγόριθμος υποβοήθησης λήψης αποφάσεων από τη μονάδα επεξεργασίας του ΗΟ, με σκοπό την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού. Η επιλογή του σταθμού στον οποίο θα φορτίσει το ΗΟ πραγματοποιείται με βάση τις εξατομικευμένες προτιμήσεις του οδηγού που αναφέρθηκαν. Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε είναι η Analytic Hierarchy Process (AHP), που αποτελεί έναν από τους πιο δημοφιλείς αλγορίθμους υποβοήθησης λήψης αποφάσεων που βρίσκει εφαρμογή σε ευρύ πεδίο των επιστημών μηχανικού

[80], με δυνατότητα ενσωμάτωσης υποκειμενικών παραγόντων. Η συνολική αρχιτεκτονική του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4, ενώ λεπτομερής παρουσίαση των επιμέρους μεθόδων θα πραγματοποιηθεί στο Κεφάλαιο 6.



Σχήμα 2.4: Η αρχιτεκτονική χρονοπρογραμματισμού φόρτισης συσσωρευτών ΗΟ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ FLYBACK ΓΙΑ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

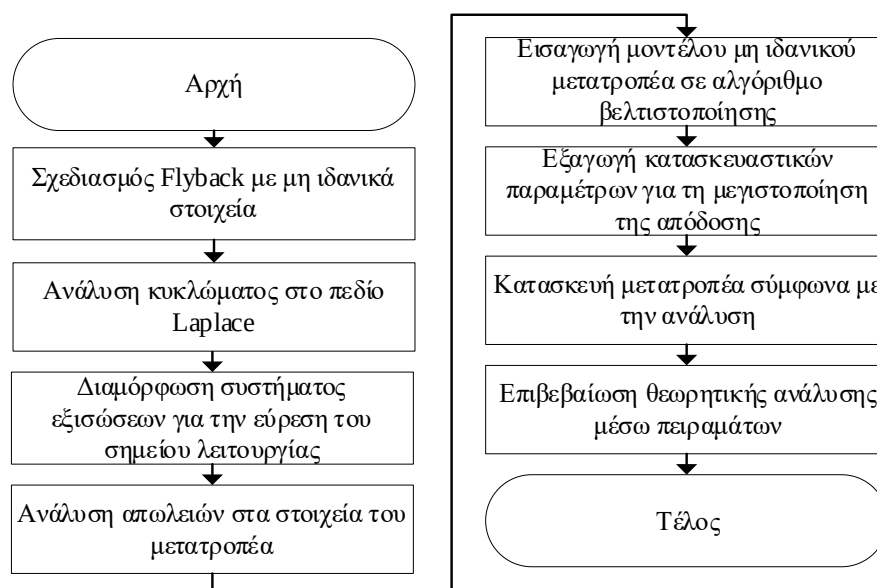
3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η τοπολογία του αμφίδρομου μετατροπέα Flyback που έχει επιλεγεί για την εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης, ακολουθώντας την αμφίδρομη ροή ενέργειας «από ομάδα συσσωρευτών προς συσσωρευτή» (Module-to-Cell, M2C). Όταν ο συσσωρευτής πρέπει να λάβει ενέργεια, ο μετατροπέας λειτουργεί σύμφωνα με τη ροή ενέργειας M2C. Αντιθέτως, όταν ο συσσωρευτής πρέπει να δώσει ενέργεια, ο μετατροπέας λειτουργεί σύμφωνα με τη ροή ενέργειας Cell-to-Module (C2M).

Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η κυκλωματική ανάλυση του μετατροπέα Flyback με μη ιδανικά στοιχεία, προκειμένου να εξαχθεί με ακρίβεια το σημείο λειτουργίας αυτού και να υπολογιστούν με ακρίβεια όλα τα μεγέθη που διέπουν τη λειτουργία του. Με την ανάλυση αυτή πραγματοποιείται εκτίμηση των ενεργειακών απωλειών του μετατροπέα και υλοποιείται αλγόριθμος βελτιστοποίησης, προκειμένου να επιλεγούν τα δομικά στοιχεία του μετατροπέα που εξασφαλίζουν μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η ακρίβεια της προαναφερθείσας ανάλυσης αξιολογήθηκε σε εργαστηριακό πρωτότυπο που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής. Η ροή ενεργειών που πραγματοποιήθηκαν για το σχεδιασμό και την υλοποίηση του μετατροπέα που αποτελεί μονάδα του συστήματος εξισορρόπησης της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.

3.2 Ανάλυση Flyback με μη ιδανικά στοιχεία

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, για την εξισορρόπηση των συσσωρευτών με αμφίδρομη ροή ενέργειας M2C, έχει επιλεγεί ο μετατροπέας Flyback. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η τοπολογία Flyback με σύγχρονη ανόρθωση, κατά την οποία αντικαθίσταται η διάοδος του δευτερεύοντος τυλίγματος με ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο. Ως εκ τούτου, επιτυγχάνεται αμφίδρομη ροή ενέργειας που επιτρέπει την εκφόρτιση των υπερφορτισμένων, καθώς και τη φόρτιση των υποφορτισμένων συσσωρευτών. Επιπρόσθετα, για τη μείωση των υπερτάσεων που οφείλονται στη σκέδαση, χρησιμοποιείται διάοδος τύπου Transient Voltage Suppression (TVS).

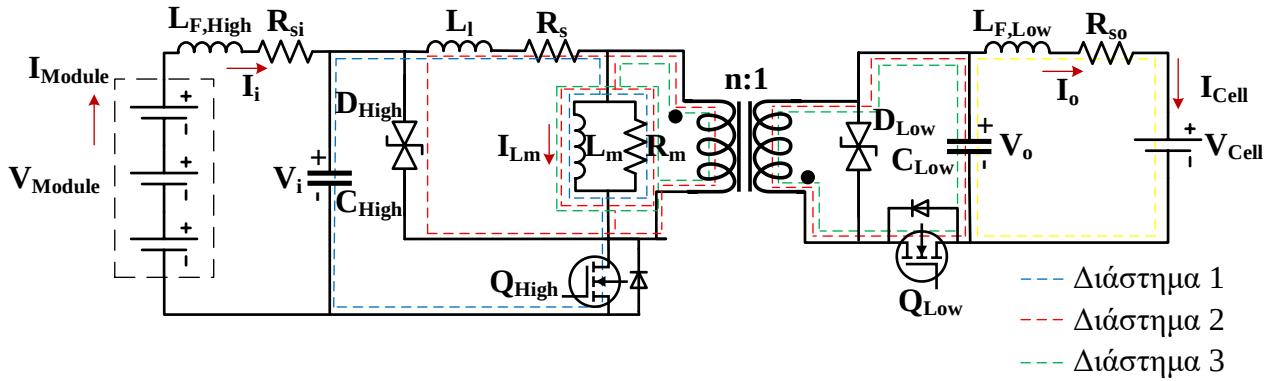


Σχήμα 3.1: Ροή ενεργειών για την ανάπτυξη του μετατροπέα εξισορρόπησης της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών.

3.2.1 Περιγραφή του επιλεγμένου μοντέλου Flyback

Ένα γρήγορο σύστημα εξισορρόπησης της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί υψηλό ρεύμα συσσωρευτή σε χαμηλή τάση. Επομένως, κατά τη λειτουργία του μετατροπέα ισχύος υπό αυτές τις συνθήκες, τα παρασιτικά του στοιχεία οδηγούν σε σημαντικές αποκλίσεις των παραμέτρων λειτουργίας του από τις θεωρητικές προσεγγίσεις που βασίζονται στην ανάλυση του μετατροπέα με ιδανικά στοιχεία. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η μοντελοποίηση του μετατροπέα με μη ιδανικά στοιχεία, ώστε να εξαχθεί με ακρίβεια το σημείο λειτουργίας του και να υπολογιστούν με ακρίβεια όλα τα μεγέθη που διέπουν τη λειτουργία του. Συγκεκριμένα οι τιμές των τάσεων και ρευμάτων εισόδου και εξόδου, καθώς και οι τιμές της συχνότητας και του λόγου κατάτμησης χαρακτηρίζουν πλήρως το σημείο λειτουργίας του μετατροπέα.

Το μοντέλο του μετατροπέα που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Όπως αναφέρθηκε, ο μετατροπέας έχει αμφίδρομη λειτουργία. Για την αποφυγή επανάληψης της ανάλυσης, η ανάλυση που πραγματοποιείται αναφέρεται στη ροή ενέργειας M2C, ενώ για τη ροή ενέργειας C2M η διαδικασία είναι όμοια. Επομένως η πλευρά που αναφέρεται στην υψηλή τάση είναι η είσοδος του μετατροπέα, ενώ η πλευρά που αναφέρεται στη χαμηλή τάση είναι η έξοδος του μετατροπέα.



Σχήμα 3.2: Το ισοδύναμο κύκλωμα του αμφίδρομου μετατροπέα Flyback.

Στα αριστερά παρατηρείται η σύνδεση του μετατροπέα στην ομάδα συσσωρευτών (υψηλή τάση – high side), ενώ δεξιά παρατηρείται η σύνδεση στον συσσωρευτή (χαμηλή τάση – low side). Στα σημεία διασύνδεσης με τους συσσωρευτές τοποθετούνται χαμηλοπερατά φίλτρα ($L_{F,High}$, C_{High} , $L_{F,Low}$, C_{Low}). Στο μοντέλο που αναλύεται, η σκέδαση του μετασχηματιστή μοντελοποιείται στην πλευρά της εισόδου ως L_l , ενώ οι ωμικές απώλειες μοντελοποιούνται με την αντίσταση R_s . Στην αντίσταση R_s συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες χαλκού του μετασχηματιστή και οι απώλειες αγωγής των δύο ημιαγωγικών στοιχείων, ανηγμένες ως προς το πρωτεύον σύμφωνα με τη σχέση (3.1). Οι απώλειες πυρήνα του μετασχηματιστή μοντελοποιούνται με την αντίσταση R_m , ενώ οι ωμικές απώλειες στα πηνία των φίλτρων με τις αντιστάσεις R_{si} , R_{so} .

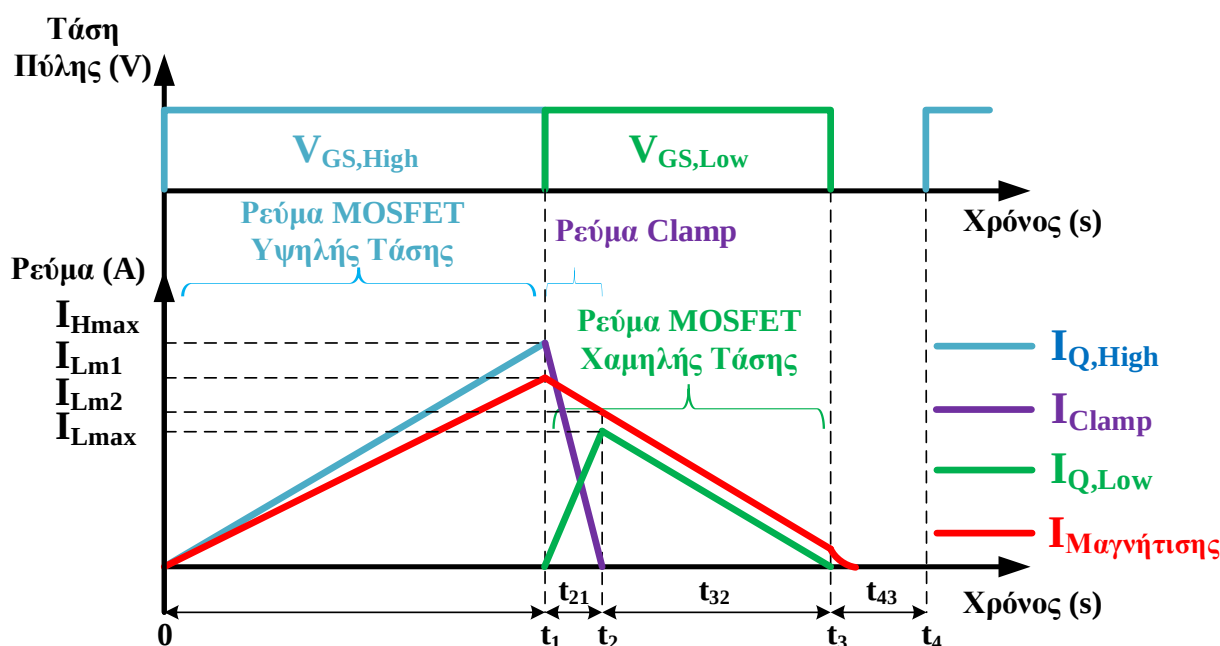
$$R_s = R_{Dson,High} + R_{Cu,High} + \frac{I_{Low,RMS}^2}{I_{High,RMS}^2} \cdot (R_{Dson,Low} + R_{Cu,Low}) \quad (3.1)$$

Για την εύρεση του σημείου λειτουργίας πραγματοποιείται η προσέγγιση ότι οι τάσεις και τα ρεύματα εισόδου και εξόδου είναι σταθερά, επομένως ο μετατροπέας βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη χρήση φίλτρων ικανών να μειώσουν δραστικά τις κυματώσεις. Έπειτα, πραγματοποιείται κυκλωματική ανάλυση στο πεδίο Laplace για κάθε διάστημα αγωγής του μετατροπέα. Έτσι, εξάγονται οι συναρτήσεις χρόνου των χαρακτηριστικών μεγεθών που θα οδηγήσουν στην εύρεση του σημείου λειτουργίας.

Κάθε μετατροπέας Flyback που επιτελεί το έργο της εξισορρόπησης της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών οφείλει να λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος, η οποία είτε προσφέρει είτε αφαιρεί φορτίο από το συσσωρευτή. Για το λόγο αυτό, ο μετατροπέας αποφασίστηκε να λειτουργεί στην περιοχή της ασυνεχούς αγωγής (Discontinuous Conduction Mode, DCM), όπου είναι και αποτελεσματικότερος

ο έλεγχος ρεύματος. Επιπλέον, ένα ακόμα πλεονέκτημα της DCM είναι οι αμελητέες απώλειες κατά την έναυση του ημιαγωγικού στοιχείου, καθώς αυτή πραγματοποιείται υπό μηδενικό ρεύμα.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται τα ρεύματα των ημιαγωγικών στοιχείων, το ρεύμα στη διάοδο TVS που αφορά το κύκλωμα περιορισμού υπερτάσεων, καθώς και το ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή. Παρατηρούνται τέσσερα διαστήματα αγωγής. Το πρώτο διάστημα αγωγής ($0 < t < t_1$) αναφέρεται στην αγωγή του ημιαγωγικού διακόπτη που βρίσκεται στην πλευρά της υψηλής τάσης (Q_{High}). Το δεύτερο διάστημα αγωγής ($t_1 < t < t_2$) ξεκινά με τη σβέση του Q_{High} και την έναυση του ημιαγωγικού διακόπτη της χαμηλής τάσης (Q_{Low}) σύμφωνα με την τεχνική της σύγχρονης ανόρθωσης. Κατά το δεύτερο διάστημα αγωγής, η διάοδος TVS τίθεται σε αγωγή προκειμένου να οδηγήσει το ρεύμα που διαρρέει τη σκέδαση του μετασχηματιστή. Το τρίτο διάστημα αγωγής ($t_2 < t < t_3$) ξεκινά με τη σβέση της διάοδου TVS. Στο διάστημα αυτό άγει μόνο ο ημιαγωγικός διακόπτης Q_{Low} . Το τέταρτο διάστημα αγωγής ($t_3 < t < t_4$) ξεκινά με το μηδενισμό του ρεύματος μαγνήτισης στην επαγωγή L_m . Στο διάστημα αυτό δεν άγει κανένα ημιαγωγικό στοιχείο.



Σχήμα 3.3: Οι κυματομορφές των ρευμάτων στα ημιαγωγικά στοιχεία υψηλής και χαμηλής τάσης, στη διάοδο TVS, καθώς και στην επαγωγή μαγνήτισης.

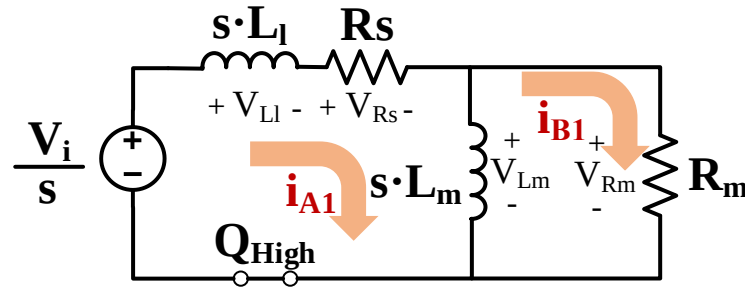
Στο Σχήμα 3.3 σημειώνονται οι στιγμιαίες τιμές των ρευμάτων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του σημείου λειτουργίας του μετατροπέα. Συγκεκριμένα, το I_{Hmax} υποδηλώνει το ρεύμα

στον κύριο ημιαγωγικό διακόπτη κατά το πέρας του πρώτου διαστήματος αγωγής, τα I_{Lm1} και I_{Lm2} αναφέρονται στο ρεύμα της επαγωγής μαγνήτισης κατά το πέρας του πρώτου και δεύτερου διαστήματος αγωγής αντίστοιχα, ενώ το I_{Lmax} υποδηλώνει το ρεύμα στο ημιαγωγικό στοιχείο που λειτουργεί με την τεχνική της σύγχρονης ανόρθωσης.

3.2.2 Ανάλυση διαστημάτων αγωγής

1^ο Διάστημα αγωγής

Το πρώτο διάστημα αγωγής ($0 < t < t_1$) αναφέρεται στην έναυση του ημιαγωγικού στοιχείου Q_{High} . Στο διάστημα αυτό το Q_{Low} δεν άγει και η επαγωγή μαγνήτισης συσσωρεύει ενέργεια. Στο διάστημα αγωγής αυτό, το ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Ισοδύναμο κύκλωμα για το πρώτο διάστημα αγωγής.

Κατά το πρώτο διάστημα αγωγής δημιουργούνται οι δύο βρόγχοι Α και Β. Ο βρόγχος Α περιλαμβάνει τα στοιχεία $V_i - L_l - R_s - L_m - Q_{High}$, ενώ ο βρόγχος Β περιλαμβάνει τα στοιχεία $L_m - R_m$. Εφαρμόζοντας τον κανόνα των τάσεων του Kirchhoff στο πεδίο Laplace για τους βρόγχους Α και Β οδηγούμαστε στις εξισώσεις (3.2), (3.3).

$$i_{A1} \cdot s \cdot L_l + i_{A1} \cdot R_s + (i_{A1} - i_{B1}) \cdot s \cdot L_m - \frac{V_i}{s} = 0 \quad (3.2)$$

$$i_{B1} \cdot R_m - (i_{A1} - i_{B1}) \cdot s \cdot L_m = 0 \quad (3.3)$$

Λύνοντας το σύστημα των (3.2) και (3.3) προκύπτει το ρεύμα $i_{A1}(s)$ στο πεδίο Laplace, όπως περιγράφεται από την (3.4).

$$i_{A1}(s) = \frac{\frac{V_i \cdot R_m + s \cdot L_m \cdot V_i}{L_m \cdot L_l}}{s \cdot (s^2 + s \cdot \frac{L_m \cdot R_s + L_l \cdot R_m + L_m \cdot R_m}{L_m \cdot L_l} + \frac{R_m \cdot R_s}{L_m \cdot L_l})} \quad (3.4)$$

Έπειτα από τον υπολογισμό των ριζών (s_1, s'_1) του χαρακτηριστικού πολυωνύμου και την εφαρμογή του αντίστροφου μετασχηματισμού Laplace στην (3.4), προκύπτει η συνάρτηση χρόνου του $i_{A1}(t)$ σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.5–3.8).

$$i_{A1}(t) = K_{A1} + M_{A1} \cdot e^{s_1 t} + N_{A1} \cdot e^{s'_1 t} \quad \text{για } 0 < t < t_1 \quad (3.5)$$

$$K_{A1} = \frac{V_i \cdot R_m}{L_m \cdot L_l \cdot s_1 \cdot s'_1} \quad (3.6)$$

$$M_{A1} = -\frac{V_i \cdot R_m}{L_m \cdot L_l \cdot s_1 \cdot s'_1} - \frac{\frac{V_i}{L_l} + \frac{V_i \cdot R_m}{L_m \cdot L_l \cdot s'_1}}{(s'_1 - s_1)} \quad (3.7)$$

$$N_{A1} = \frac{\frac{V_i}{L_l} + \frac{V_i \cdot R_m}{L_m \cdot L_l \cdot s'_1}}{(s'_1 - s_1)} \quad (3.8)$$

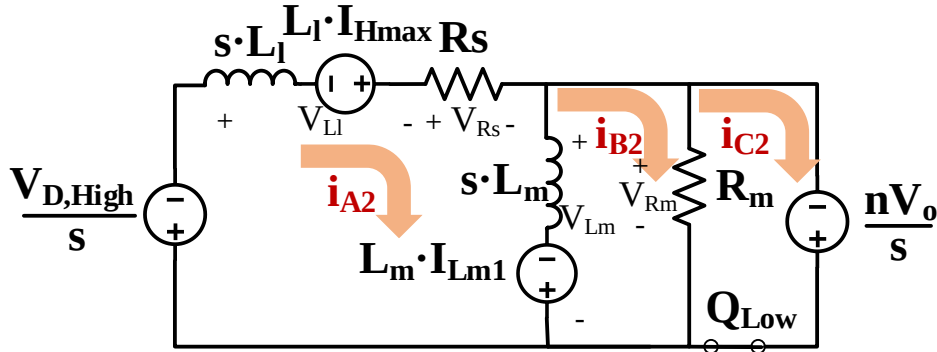
Αντίστοιχα με το i_{A1} , λύνοντας το σύστημα των (3.2) και (3.3) προκύπτει το ρεύμα $i_{B1}(s)$, με χαρακτηριστικό πολυώνυμο όμοιο με του i_{A1} , όπως περιγράφεται από την (3.9), ενώ η σχέση που περιγράφει το $i_{B1}(t)$ είναι η (3.10).

$$i_{B1}(s) = \frac{\frac{V_i}{L_l}}{s^2 + s \cdot \frac{L_m \cdot R_s + L_m \cdot R_m + L_l \cdot R_m}{L_m \cdot L_l} + \frac{R_m \cdot R_s}{L_m \cdot L_l}} \quad (3.9)$$

$$i_{B1}(t) = \frac{V_i}{L_l \cdot (s_1 - s'_1)} \cdot (e^{s_1 t} - e^{s'_1 t}) \quad (3.10)$$

2^ο Διάστημα αγωγής

Το δεύτερο διάστημα αγωγής του μετατροπέα ($t_1 < t < t_2$) ξεκινά με τη σβέση του Q_{High} και την έναυση του Q_{Low} σύμφωνα με την τεχνική της σύγχρονης ανόρθωσης. Κατά το διάστημα αγωγής αυτό, η διόδος TVS τίθεται σε αγωγή προκειμένου να οδηγήσει το ρεύμα που διαρρέει τη σκέδαση του μετασχηματιστή. Κατά το χρονικό διάστημα αυτό δημιουργούνται οι τρεις αγωγίμοι βρόγχοι Α, Β, Γ, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.5. Ο βρόγχος Α περιλαμβάνει τα στοιχεία $D_{High} - L_l - R_s - L_m$. Ο βρόγχος Β περιλαμβάνει τα στοιχεία $L_m - R_m$, ενώ ο βρόγχος Γ περιλαμβάνει τα στοιχεία $R_m - nV_o - Q_{Low}$.



Σχήμα 3.5: Ισοδύναμο κύκλωμα για το δεύτερο διάστημα αγωγής.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.3, οι τιμές των ρευμάτων που διαρρέουν τα L_m, L_l τη χρονική στιγμή t_1 εισάγονται ως αρχικές συνθήκες για το δεύτερο διάστημα αγωγής. Εφαρμόζοντας τον κανόνα των τάσεων του Kirchhoff, προκύπτει το σύστημα εξισώσεων που περιγράφεται από τις (3.11)–(3.13).

$$i_{A2} \cdot s \cdot L_l - L_l \cdot I_{Hmax} + i_{A2} \cdot R_s + (i_{A2} - i_{B2}) \cdot s \cdot L_m - L_m \cdot I_{Lm1} + \frac{V_{D,High}}{s} = 0 \quad (3.11)$$

$$(i_{B2} - i_{C2}) \cdot R_m + L_m \cdot I_{Lm1} - (i_{A2} - i_{B2}) \cdot s \cdot L_m = 0 \quad (3.12)$$

$$-\frac{nV_o}{s} - (i_{B2} - i_{C2}) \cdot R_m = 0 \quad (3.13)$$

Λύνοντας το σύστημα εξισώσεων (3.11)–(3.13) προκύπτουν τα βρογχικά ρεύματα στο πεδίο Laplace όπως φαίνεται στις εξισώσεις (3.14)–(3.18).

$$i_{A2}(s) = \frac{\frac{n \cdot V_o - V_{D,High}}{R_s}}{s} + \frac{I_{Hmax} - \frac{n \cdot V_o - V_{D,High}}{R_s}}{s + \frac{R_s}{L_l}} \quad (3.14)$$

$$i_{C2}(s) = \frac{K_{C2}}{s^2} + \frac{M_{C2}}{s} + \frac{N_{C2}}{s + \frac{R_s}{L_l}} \quad (3.15)$$

$$K_{C2} = \frac{n \cdot V_o}{L_m} \quad (3.16)$$

$$M_{C2} = \frac{n \cdot V_o \cdot L_l}{L_m \cdot R_s} + \frac{n \cdot V_o}{R_m} + \frac{n \cdot V_o}{R_s} - \frac{V_{D,High}}{R_s} - I_{Lm1} \quad (3.17)$$

$$N_{C2} = I_{Hmax} + \frac{V_{D,High}}{R_s} - \frac{n \cdot V_o \cdot L_l}{L_m \cdot R_s} - \frac{n \cdot V_o}{R_s} \quad (3.18)$$

Οι τελικές εξισώσεις των $i_{A2}(t)$ και $i_{C2}(t)$ δίνονται από τις (3.19) – (3.20).

$$i_{A2}(t) = \frac{n \cdot V_o - V_{D,High}}{R_s} + \left(I_{Hmax} - \frac{n \cdot V_o - V_{D,High}}{R_s} \right) \cdot e^{-\frac{R_s}{L_l}(t-t_1)} \quad (3.19)$$

για $t_1 < t < t_2$

$$i_{C2}(t) = K_{C2} \cdot (t - t_1) + M_{C2} + N_{C2} \cdot e^{-\frac{R_s}{L_l}(t-t_1)} = -i_o(t) \quad (3.20)$$

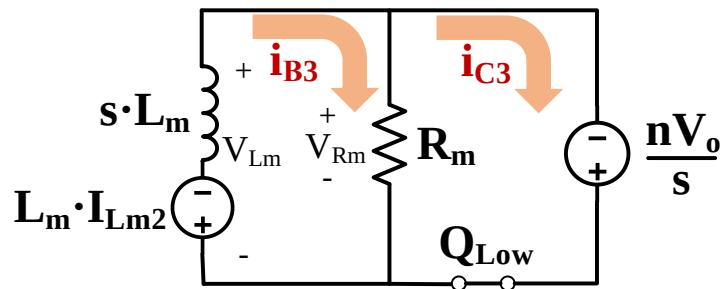
για $t_1 < t < t_2$

Επιπρόσθετα, κατά το δεύτερο διάστημα αγωγής, η τάση στην επαγωγή μαγνήτισης L_m ισούται με $-nV_o$. Επομένως, το ρεύμα στην L_m δίνεται σύμφωνα με τη σχέση (3.21).

$$V_{Lm} = L_m \cdot \frac{di_{Lm}}{dt} \Leftrightarrow i_{Lm}(t) = I_{Lm1} - \frac{n \cdot V_o}{L_m} \cdot (t - t_1) \quad (3.21)$$

3^ο Διάστημα αγωγής

Το τρίτο διάστημα αγωγής ($t_2 < t < t_3$) ξεκινά με τη σβέση της διόδου TVS. Στο διάστημα αυτό άγει μόνο ο ημιαγωγικός διακόπτης Q_{Low} και το ρεύμα της L_m συνεχίζει να μειώνεται. Στο διάστημα αγωγής αυτό, το ισοδύναμο κύκλωμα διαμορφώνεται από τους βρόγχους B και C (Σχήμα 3.6). Ο βρόγχος B περιλαμβάνει τα στοιχεία $L_m - R_m$, ενώ ο βρόγχος C περιλαμβάνει τα στοιχεία $R_m - nV_o - Q_{Low}$.



Σχήμα 3.6: Ισοδύναμο κύκλωμα για το τρίτο διάστημα αγωγής.

Η τιμή του ρεύματος στην L_m τη χρονική στιγμή t_3 αποτελεί αρχική συνθήκη για το τρίτο διάστημα αγωγής. Εφαρμόζοντας το νόμο τάσεων του Kirchhoff για το τρίτο διάστημα αγωγής προκύπτει το σύστημα που περιγράφεται από τις (3.22) και (3.23).

$$(i_{B3} - i_{C3}) \cdot R_m + L_m \cdot I_{Lm2} + i_{B3} \cdot s \cdot L_m = 0 \quad (3.22)$$

$$-\frac{nV_o}{s} - (i_{B3} - i_{C3}) \cdot R_m = 0 \quad (3.23)$$

Λύνοντας το σύστημα των (3.22), (3.23) προκύπτουν οι εξισώσεις που περιγράφουν το i_{C3} στο πεδίο Laplace και το πεδίου του χρόνου αντίστοιχα (3.24, 3.25).

$$i_{C3}(s) = \frac{n \cdot V_o}{s^2 \cdot L_m} + \frac{n \cdot V_o - I_{Lm2} \cdot R_m}{s \cdot R_m} \quad (3.24)$$

$$i_{C3}(t) = \frac{n \cdot V_o}{L_m} \cdot (t - t_2) + \frac{n \cdot V_o - I_{Lm2} \cdot R_m}{R_m} = -i_o(t) \quad (3.25)$$

3.2.3 Τελικό σύστημα εξισώσεων Flyback με μη ιδανικά στοιχεία

Αξιοποιώντας τις εξισώσεις (3.5), (3.10), (3.19), (3.20), (3.21), (3.25), προκύπτει το σύστημα εξισώσεων που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του σημείου λειτουργίας του μετατροπέα Flyback με μη ιδανικά στοιχεία.

Το ρεύμα i_{A1} διαρρέει το Q_{High} κατά τη διάρκεια του πρώτου διαστήματος αγωγής. Επομένως, τη χρονική στιγμή t_1 το ρεύμα στο Q_{High} λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του (I_{Hmax}), το οποίο προκύπτει από την (3.5) με την αντικατάσταση της μεταβλητής του χρόνου, όπως περιγράφεται από την (3.26). Το ρεύμα που διαρρέει την L_m προκύπτει από την αφαίρεση των i_{A1} και i_{B1} σύμφωνα με την (3.5) και (3.10). Τη χρονική στιγμή t_1 το ρεύμα της L_m είναι ίσο με I_{Lm1} το οποίο περιγράφεται από την (3.27).

Κατά το δεύτερο διάστημα αγωγής το ρεύμα στη TVS ξεκινά από την τιμή I_{Hmax} και μειώνεται μέχρι την τιμή μηδέν. Επομένως, για τη στιγμή t_2 η (3.19) οδηγεί στη σχέση (3.28). Επιπρόσθετα, κατά το δεύτερο διάστημα αγωγής, το ρεύμα στο Q_{Low} αυξάνεται ακολουθώντας το $-i_{C2}$. Έτσι, τη χρονική στιγμή t_2 το ρεύμα στο Q_{Low} λαμβάνει την τιμή I_{Lmax} και προκύπτει από την (3.20), όπως παρουσιάζεται στην (3.29). Επιπλέον, η τιμή του ρεύματος που διαρρέει την επαγωγή L_m τη στιγμή t_2 είναι ίση με I_{Lm2} και προκύπτει από την (3.21), όπως παρουσιάζεται στην (3.30).

Κεφάλαιο 3

Όπως αναφέρθηκε, κατά το τρίτο διάστημα αγωγής, μόνο το Q_{Low} είναι σε αγωγή, το ρεύμα του οποίου μειώνεται. Τη χρονική στιγμή t_3 το ρεύμα του Q_{Low} είναι ίσο με το μηδέν. Επομένως, με την αντικατάσταση των ανεξάρτητων μεταβλητών η (3.25) μετασχηματίζεται στην (3.31). Επιπλέον, η μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει το Q_{Low} αντιστοιχεί στη μέση τιμή του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα (3.32), ενώ η μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει το Q_{High} αντιστοιχεί στη μέση τιμή του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα (3.33). Τέλος, η πτώση τάσης στα φίλτρα εισόδου και εξόδου περιγράφεται από τις (3.34) και (3.35) αντίστοιχα.

$$I_{Hmax} = K_{A1} + M_{A1} \cdot e^{s_1 \cdot t_1} + N_{A1} \cdot e^{s'_1 \cdot t_1} \quad (3.26)$$

$$I_{Lm1} = I_{Hmax} - \frac{V_i}{L_l \cdot (s_1 - s'_1)} \cdot (e^{s_1 \cdot t_1} - e^{s'_1 \cdot t_1}) \quad (3.27)$$

$$\frac{n \cdot V_o - V_{D,High}}{R_s} + \left(I_{Hmax} - \frac{n \cdot V_o - V_{D,High}}{R_s} \right) \cdot e^{-\frac{R_s}{L_l} t_{21}} = 0 \quad (3.28)$$

$$I_{Lmax} = -K_{C2} \cdot t_{21} - M_{C2} - N_{C2} \cdot e^{-\frac{R_s}{L_l} t_{21}} \quad (3.29)$$

$$I_{Lm2} = I_{Lm1} - \frac{n \cdot V_o}{L_m} \cdot t_{21} \quad (3.30)$$

$$\frac{n \cdot V_o}{L_m} \cdot t_{32} + \frac{n \cdot V_o - I_{Lm2} \cdot R_m}{R_m} = 0 \quad (3.31)$$

$$\frac{I_o}{n} = \frac{1}{2} I_{Lmax} \cdot f_{sw} \cdot (t_{21} + t_{32}) \quad (3.32)$$

$$I_i = \frac{1}{2} I_{Hmax} \cdot f_{sw} \cdot t_1 \quad (3.33)$$

$$V_o = I_o \cdot R_{so} + V_{cell} \quad (3.34)$$

$$V_i = V_{module} - I_i \cdot R_{si} \quad (3.35)$$

Λύνοντας αριθμητικά το σύστημα των εξισώσεων (3.26)-(3.35) υπολογίζονται οι παράμετροι λειτουργίας $I_{Hmax}, I_{Lmax}, I_{Lm1}, I_{Lm2}, t_1, t_{21}, t_{32}, V_o, V_i, I_i$. Οι παράμετροι $n, V_{D,High}, L_m, L_l$ είναι γνωστές από το σχεδιασμό του μετατροπέα, ενώ οι παράμετροι $V_{module}, V_{cell}, I_o, f_{sw}$ προκύπτουν από τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.26)-(3.35) προκύπτει ακριβέστερη εκτίμηση του σημείου λειτουργίας του μετατροπέα σε σχέση με αυτή που προκύπτει χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της ανάλυσης κατά την οποία ο μετατροπέας θεωρείται ιδανικός. Η ακριβής εκτίμηση του σημείου λειτουργίας προσφέρει αφενός μεν την ακριβή εκτίμηση των απωλειών του μετατροπέα, αφετέρου δε εξασφαλίζει το επιθυμητό ρεύμα εξόδου χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος εισαγωγής του μετατροπέα σε μη επιθυμητή περιοχή λειτουργίας (Continuous Conduction Mode, CCM). Επομένως, οι επιθυμητές προδιαγραφές τηρούνται σε όλο το εύρος λειτουργίας του μετατροπέα.

3.3 Ανάλυση απωλειών μετατροπέα Flyback

Στην ενότητα αυτή, τα αποτελέσματα της ανάλυσης του μη ιδανικού μετατροπέα αξιοποιούνται για την εκτίμηση των ενεργειακών απωλειών στα επιμέρους στοιχεία του μετατροπέα. Βάση για την παρούσα ανάλυση αποτέλεσαν οι διδακτορικές διατριβές [81], [82]. Όπως και στη κυκλωματική ανάλυση της ενότητας 3.2, για την αποφυγή επανάληψης, η ανάλυση που πραγματοποιείται αναφέρεται στη ροή ενέργειας M2C, ενώ για τη ροή ενέργειας C2M η διαδικασία είναι όμοια. Επομένως η πλευρά που αναφέρεται στην υψηλή τάση (τάση ομάδας) είναι η είσοδος του μετατροπέα, ενώ η πλευρά που αναφέρεται στη χαμηλή τάση (τάση κελιού) είναι η έξοδος του μετατροπέα.

3.3.1 Απώλειες στο μετασχηματιστή

Οι απώλειες στον μετασχηματιστή διαχωρίζονται στις απώλειες πυρήνα και τις απώλειες χαλκού. Οι απώλειες πυρήνα εκτιμώνται από τη βελτιωμένη γενικευμένη εξίσωση του Steinmetz (Improved Generalised Steinmetz Equation, iGSE) (3.36), αξιοποιώντας την (3.37) για την εύρεση του συντελεστή k_f , καθώς και την (3.38) για τον υπολογισμό της μέγιστης μαγνητικής επαγωγής στο διακοπτικό κύκλο [81]. Το πλεονέκτημα της iGSE, που την καθιστά αρκετά αποτελεσματική στον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα του μετατροπέα Flyback, είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε μη ημιτονοειδείς κυματομορφές. Αυτό πραγματοποιείται μέσα από το διαχωρισμό της κυματομορφής σε επιμέρους τμήματα, που το καθένα αναφέρεται σε ένα διάστημα αγωγής του μετατροπέα.

$$P_{iGSE} = V_e \cdot k_f \cdot f_{sw} \cdot B_{max}^{\beta-a} \cdot \sum_j \left| \frac{V_{Lm,j}}{N_{High} \cdot A_e} \right|^a \cdot (\Delta t_j) \quad (3.36)$$

$$k_f = \frac{k}{2^{\beta+1} \cdot \pi^{a-1} \cdot (0.2761 + \frac{1.7061}{a + 1.354})} \quad (3.37)$$

$$B_{max} = \frac{V_i \cdot t_1}{N_{High} \cdot A_e} \quad (3.38)$$

όπου,

V_e : Ο ενεργός όγκος του πυρήνα.

f_{sw} : Η διακοπτική συχνότητα.

B_{max} : Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής.

$V_{Lm,j}$: Η τάση της επαγωγής μαγνήτισης κατά το διάστημα αγωγής j .

N_{High} : Ο αριθμός των σπειρών που αντιστοιχούν στην πλευρά της υψηλής τάσης.

A_e : Η ενεργός διατομή του πυρήνα.

k, a, b : Οι συντελεστές της αρχικής εξίσωσης του Steinmetz.

Οι συντελεστές k, a, β είναι οι συντελεστές που περιγράφονται στην αρχική εξίσωση του Steinmetz (3.39) και εκτιμώνται με χρήση μεθόδων προσαρμογής καμπύλης (curve fitting) στα δεδομένα που δίνονται στο φυλλάδιο κατασκευαστή του μαγνητικού υλικού. Συγκεκριμένα, ανατρέχοντας στο διάγραμμα P-B του φυλλαδίου του κατασκευαστή του πυρήνα [83], εξάγονται τα σημεία από τα οποία πρέπει να διέρχεται η (3.39) για την οποία πραγματοποιείται και η μέθοδος προσαρμογής καμπύλης. Δεδομένου ότι το εν λόγω διάγραμμα αναφέρεται σε καθαρά ημιτονοειδή διέγερση, η χρήση της (3.39) κρίνεται αποτελεσματική.

$$P_V = k \cdot f^a \cdot B^\beta \quad (3.39)$$

Το άθροισμα στην (3.36) αναφέρεται στα επιμέρους διαστήματα αγωγής του μετατροπέα. Επομένως, απαιτείται ο υπολογισμός της τάσης που εφαρμόζεται στην L_m σε κάθε διάστημα αγωγής. Για το σκοπό αυτό, αξιοποιούνται οι (3.5)-(3.8), καθώς και η (3.10), ώστε να υπολογιστεί το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγή μαγνήτισης κατά το πρώτο διάστημα αγωγής, όπως φαίνεται από την (3.40).

$$i_{Lm}(t) = i_{A1}(t) - i_{B1}(t) \Leftrightarrow \quad (3.40)$$

$$i_{Lm}(t) = \frac{V_i \cdot R_m}{L_m \cdot L_l \cdot s_1 \cdot s'_1} + \left(-\frac{V_i \cdot R_m}{L_m \cdot L_l \cdot s_1 \cdot s'_1} - \frac{V_i \cdot R_m}{L_m \cdot L_l \cdot s'_1 \cdot (s'_1 - s_1)} \right) \cdot e^{s_1 \cdot t} + \left(\frac{V_i \cdot R_m}{L_m \cdot L_l \cdot s'_1 \cdot (s'_1 - s_1)} \right) \cdot e^{s'_1 \cdot t}$$

Στη συνέχεια, αξιοποιείται η διαφορική εξίσωση της επαγωγής προκειμένου να υπολογιστεί η τάση που εφαρμόζεται στην επαγωγή κατά το πρώτο διάστημα αγωγής (3.41). Η μοντελοποίηση της σκέδασης συγκεντρωμένη στο πρωτεύον του μετασχηματιστή απλοποιεί την ανάλυση για το δεύτερο και το τρίτο διάστημα αγωγής, στα οποία η τάση στην V_{Lm} είναι σταθερή και δίνεται από την (3.42). Έχοντας υπολογίσει τις απώλειες πυρήνα μέσω της iGSE, πραγματοποιείται υπολογισμός της ισοδύναμης εν παραλλήλω αντίστασης R_m σύμφωνα με την (3.43).

$$V_{Lm1}(t) = L_m \cdot \frac{di_{Lm}(t)}{dt} \Leftrightarrow \quad (3.41)$$

$$V_{Lm1}(t) = \left(\frac{V_i \cdot R_m}{L_l \cdot s'_1} - \frac{s_1 \cdot V_i \cdot R_m}{L_l \cdot s'_1 \cdot (s'_1 - s_1)} \right) \cdot e^{s_1 \cdot t_1} + \left(\frac{V_i \cdot R_m}{L_l \cdot (s'_1 - s_1)} \right) \cdot e^{s'_1 \cdot t_1}$$

$$V_{Lm,2} = V_{Lm,3} = -n \cdot V_o \quad (3.42)$$

$$R_m = \frac{V_{Lm,RMS}^2}{P_{iGSE}} \Leftrightarrow R_m = f_{sw} \cdot \frac{V_{Lm,1,RMS}^2 \cdot t_1 + V_{Lm,2,RMS}^2 \cdot t_{21} + V_{Lm,3,RMS}^2 \cdot t_{32}}{P_{iGSE}} \quad (3.43)$$

Η δεύτερη κατηγορία απωλειών στον μετασχηματιστή αφορά τις απώλειες χαλκού στα τυλίγματα. Λόγω της υψηλής συχνότητας λειτουργίας (δεκάδες kHz), η αντίσταση του τυλίγματος αυξάνεται σε σχέση με εκείνη που παρατηρείται κατά τη ροή σταθερού ρεύματος. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο γειτνίασης. Για το λόγο αυτό, οι απώλειες χαλκού για κάθε τύλιγμα υπολογίζονται ξεχωριστά για τη σταθερή και την εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος που το διαρρέει, λαμβάνοντας υπόψη την αντίστοιχη συνιστώσα της ωμικής αντίστασης. Η επίδραση της συχνότητας λειτουργίας στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος έχει διερευνηθεί σε πληθώρα εργασιών με την [84] να είναι από τις δημοφιλέστερες. Στην παρούσα εργασία, υιοθετείται την ανάλυση που έχει παρουσιαστεί στην [85]. Συνεπώς, οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται από τις απώλειες χαλκού κάθε τυλίγματος και περιγράφονται από τη σχέση (3.44).

$$P_{Cu} = I_{High,DC}^2 \cdot R_{Cu,High,DC} + I_{High,RMS,AC}^2 \cdot R_{Cu,High,AC} + I_{Low,DC}^2 \cdot R_{Cu,Low,DC} + I_{Low,RMS,AC}^2 \cdot R_{Cu,Low,AC} \quad (3.44)$$

όπου,

$R_{Cu,High,DC}, R_{Cu,Low,DC}$: Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων του τυλίγματος της πλευράς υψηλής και χαμηλής τάσης αντίστοιχα για τη συνιστώσα σταθερού ρεύματος.

$R_{Cu,High,AC}, R_{Cu,Low,AC}$: Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων του τυλίγματος της πλευράς υψηλής και χαμηλής τάσης αντίστοιχα για τη συνιστώσα εναλλασσόμενου ρεύματος.

3.3.2 Απώλειες στη δίοδο περιορισμού υπερτάσεων

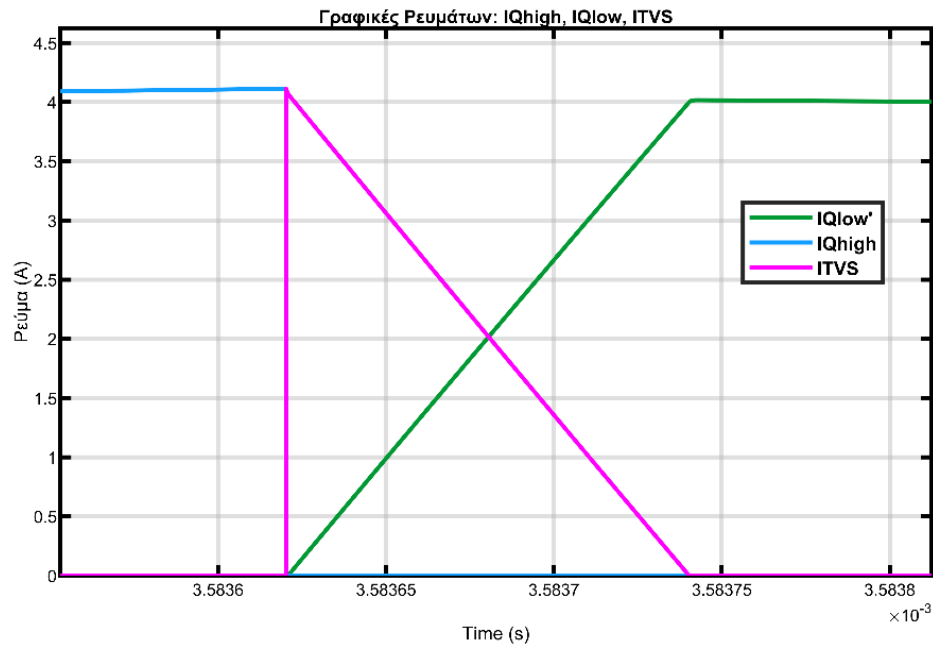
Ένα μειονέκτημα του μετατροπέα Flyback είναι η καταπόνηση του ημιαγωγικού στοιχείου στο πρωτεύον, λόγω της σκέδασης του μετασχηματιστή. Συγκεκριμένα, η σκέδαση L_s συσσωρεύει ενέργεια κατά το πρώτο διάστημα αγωγής. Αν κατά τη σβέση του ημιαγωγικού στοιχείου του πρωτεύοντος η ενέργεια που είναι συσσωρευμένη στη σκέδαση δεν διοχετευτεί κάπου, θα εμφανιστεί ως υπέρταση στα άκρα του ημιαγωγικού στοιχείου με πιθανή καταστροφή αυτού. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται κυκλώματα περιορισμού υπερτάσεων με σκοπό είτε να διοχετεύσουν την ενέργεια αυτή υπό μορφή θερμότητας στο περιβάλλον, είτε να την εκμεταλλευτούν διοχετεύοντάς την στην είσοδο ή στην έξοδο του μετατροπέα.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, προκειμένου να υλοποιηθεί ένα γρήγορο BMS που επιτρέπει την εξισορρόπηση της ενέργειας πολλών συσσωρευτών ταυτόχρονα, απαιτείται η εγκατάσταση ενός μετατροπέα σε κάθε συσσωρευτή. Η αρχιτεκτονική αυτή, επιβάλλει την εύρεση τρόπων για την αποδοτική λειτουργία του μετατροπέα με το ελάχιστο κόστος. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε καταλληλότερη η χρήση κυκλώματος περιορισμού υπερτάσεων με χρήση διόδου TVS, αντί να χρησιμοποιηθεί κάποιο πολύπλοκο κύκλωμα διοχέτευσης της ενέργειας στην είσοδο ή στην έξοδο με χρήση επιπλέον ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων. Η μέγιστη τάση καταπόνησης του Q_{High} προκύπτει από το άθροισμα της V_i και της τάσης διάσπασης της TVS ($V_{D,High}$). Κατά την αγωγή της (δεύτερο διάστημα αγωγής), η TVS διοχετεύει την ενέργεια που έχει συσσωρευτεί στη σκέδαση με τη μορφή θερμότητας στο περιβάλλον. Επομένως, κατά την κατασκευή του μετασχηματιστή πρέπει να επιτευχθεί όσον δυνατόν καλύτερη σύζευξη μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος, ώστε η σκέδαση να λαμβάνει χαμηλή τιμή.

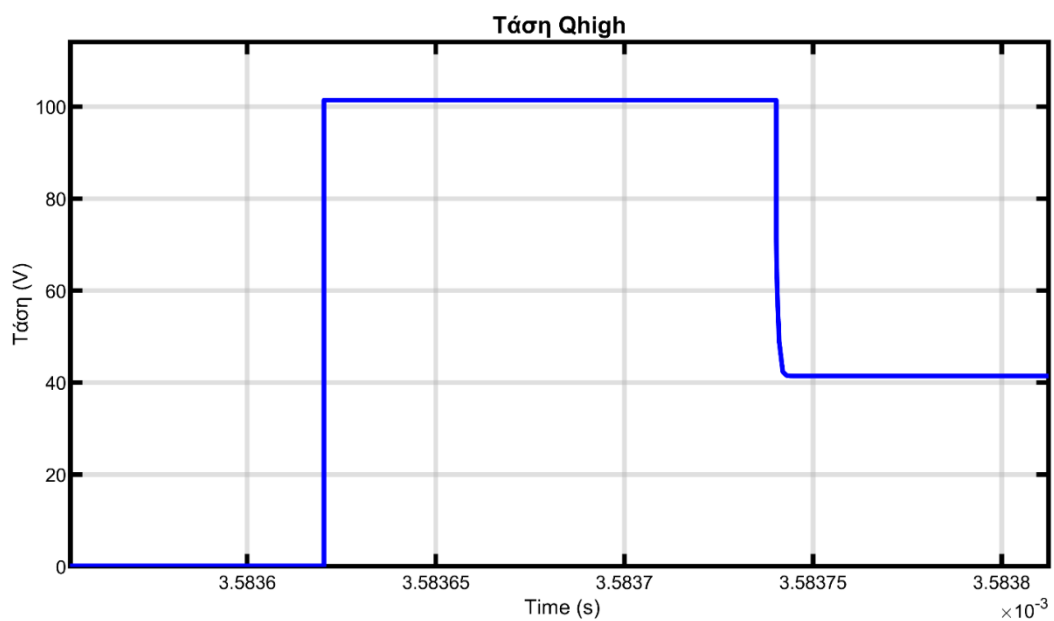
Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των ρευμάτων των ημιαγωγικών στοιχείων ανηγμένων ως προς την πλευρά της υψηλής τάσης, κατά το δεύτερο διάστημα αγωγής. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης στο Q_{High} κατά τη διάρκεια του δεύτερου διαστήματος

αγωγής. Κατά την αγωγή της TVS, όλη η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην L_l μεταφέρεται στο περιβάλλον υπό μορφή θερμότητας. Έτσι, οι απώλειες υπολογίζονται από τη σχέση (3.45).

$$P_D = \frac{1}{2} \cdot L_l \cdot I_{Hmax}^2 \cdot f_{sw} \quad (3.45)$$



Σχήμα 3.7: Κυματομορφές ρευμάτων κατά το δεύτερο διάστημα αγωγής (ανηγμένα ως προς την πλευρά υψηλής τάσης).



Σχήμα 3.8: Τάση στο Q_{High} κατά το δεύτερο διάστημα αγωγής.

3.3.3 Απώλειες στο ημιαγωγικό στοιχείο του πρωτεύοντος

Οι απώλειες σε ένα ημιαγωγικό στοιχείο κατηγοριοποιούνται σε απώλειες αγωγής και διακοπτικές απώλειες. Οι απώλειες αγωγής οφείλονται στην εσωτερική αντίσταση που εμφανίζει το στοιχείο και μοντελοποιούνται με την $R_{DSon,High}$ και υπολογίζονται σύμφωνα με τη (3.46).

$$P_{Q,cond,High} = I_{High,RMS}^2 \cdot R_{DSon,High} \quad (3.46)$$

Οι διαδικασίες έναυσης και σβέσης του ημιαγωγικού στοιχείου δεν πραγματοποιούνται ακαριαία. Συγκεκριμένα, κατά την έναυση ενός MOSFET, πρώτα αυξάνεται το ρεύμα του και έπειτα μειώνεται η τάση στα άκρα του. Αντίθετα, κατά τη σβέση του στοιχείου, πρώτα αυξάνεται η τάση στα άκρα του μέχρι την τιμή της τάσης που θα εφαρμοστεί στο στοιχείο κατά τη διακοπή του και έπειτα θα μειωθεί το ρεύμα του. Στα διαστήματα αυτά, που έχουν διάρκεια της τάξης των δεκάδων νανο-δευτερολέπτων, εμφανίζονται οι διακοπτικές απώλειες στο στοιχείο. Το πρωτεύον του μετατροπέα Flyback που λειτουργεί στη DCM ξεκινά να διαρρέεται από μηδενικό ρεύμα κατά τη χρονική στιγμή έναυσης του κυρίως ημιαγωγικού στοιχείου (Q_{High}). Έτσι, οι απώλειες έναυσης είναι αμελητέες. Πριν τη σβέση του, το Q_{High} διαρρέεται από το I_{Hmax} . Επομένως, οι απώλειες κατά τη σβέση του δίνονται από την (3.47).

$$P_{Q,sw,High} = \frac{1}{2} \cdot (V_i + V_{D,High}) \cdot I_{Hmax} \cdot f_{sw} \cdot (t_{vr} + t_{if}) \quad (3.47)$$

όπου,

t_{vr} : Ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η τάση στα άκρα του ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου στην τιμή της τάσης αποκοπής και υπολογίζεται με βάση την ανάλυση που περιγράφεται στο [86].

t_{if} : Ο χρόνος καθόδου ρεύματος κατά τη σβέση ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου σύμφωνα με το φυλλάδιο του κατασκευαστή του ημιαγωγικού στοιχείου.

3.3.4 Λοιπές απώλειες

Οι λοιπές απώλειες αφορούν τις απώλειες αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου στο δευτερεύον Q_{Low} , καθώς και τις απώλειες στα φίλτρα. Οι απώλειες αυτές δίνονται από την (3.48). Σχετικά με τις απώλειες στα φίλτρα, που αναφέρονται στις ισοδύναμες εν σειρά αντιστάσεις (Equivalent Series Resistances, ESRs) των πυκνωτών, καθώς και τις αντιστάσεις των πηνίων, θεωρείται ότι τα φίλτρα

είναι αρκούντως μεγάλα, ώστε οι πυκνωτές να διαρρέονται από ολόκληρη την AC συνιστώσα του ρεύματος και τα πηνία να διαρρέονται μόνο από τη DC συνιστώσα του ρεύματος.

$$P_{misc} = I_{Low,RMS}^2 \cdot R_{DSon,Low} + I_i^2 \cdot R_{Si} + I_o^2 \cdot R_{So} + (I_{Low,RMS}^2 - I_o^2) \cdot ESR_{CLow} + (I_{High,RMS}^2 - I_i^2) \cdot ESR_{CHigh} \quad (3.48)$$

Επισημαίνεται ότι το ημιαγωγικό στοιχείο του δευτερεύοντος (Q_{Low}) λειτουργεί σύμφωνα με την τεχνική της σύγχρονης ανόρθωσης. Επομένως, κατά τη σβέση του Q_{High} , η αντιπαράλληλη δίοδος του Q_{Low} τίθεται αυτόματα σε αγωγή. Έπειτα, μέσω κατάλληλου κυκλώματος, δίνεται παλμός στο Q_{Low} που ξεκινά να άγει υπό μηδενική τάση στα άκρα του. Επομένως, οι απώλειες κατά την έναυσή του είναι αμελητέες.

3.3.5 Υπολογισμός απόδοσης μετατροπέα Flyback

Η απόδοση του μετατροπέα υπολογίζεται σύμφωνα με την ισχύ εξόδου και τις απώλειες στα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος, όπως παρουσιάζεται στην (3.49). Σημειώνεται ότι κάθε μετατροπέας που πραγματοποιεί εξισορρόπηση στάθμης φόρτισης συσσωρευτών πρέπει να έχει αμφίδρομη λειτουργία. Επομένως, στη φάση του σχεδιασμού, κρίνεται σκόπιμο να μεγιστοποιηθεί η σταθμισμένη απόδοση που αφορά τη αμφίδρομη ροή ενέργειας (3.50).

$$efficiency = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{IGSE} + P_{Cu} + P_{Q,cond,High} + P_{Q,sw,High} + P_D + P_{misc}} \quad (3.49)$$

$$efficiency_W = 0.5 \cdot efficiency_{module-to-cell} + 0.5 \cdot efficiency_{cell-to-module} \quad (3.50)$$

3.4 Μεγιστοποίηση απόδοσης μετατροπέα Flyback

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το βέλτιστο σχεδιασμό του μετατροπέα Flyback με σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσης. Αφού ορίζονται οι σχεδιαστικές παράμετροι βελτιστοποίησης και οι περιορισμοί, παρουσιάζονται τα κριτήρια που συντέλεσαν στην επιλογή του Γενετικού Αλγορίθμου (Genetic Algorithm, GA) ως μεθοδολογίας εύρεσης του βέλτιστου σχεδιασμού. Έπειτα, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας του GA, καθώς και οι ρουτίνες που εφαρμόστηκαν στην παρούσα εργασία. Τέλος, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του μετατροπέα που οδηγούν στη μεγιστοποίηση της απόδοσης σύμφωνα με τις προδιαγραφές που τέθηκαν.

3.4.1 Μεταβλητές βελτιστοποίησης και περιορισμοί

Έχοντας το σύνολο των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του σημείου λειτουργίας του μετατροπέα, καθώς και την απόδοσή του, μπορεί να πραγματοποιηθεί διερεύνηση των σχεδιαστικών παραμέτρων που θα οδηγήσουν σε μεγιστοποίηση της σταθμισμένης απόδοσης του μετατροπέα (3.50). Οι ανεξάρτητες μεταβλητές αναφέρονται στην επαγωγή του μετασχηματιστή (L_m), το λόγο των σπειρών (n), τη διακοπτική συχνότητα (f_{sw}), την πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος της πλευράς υψηλής τάσης (J_1), την πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος της πλευράς χαμηλής τάσης (J_2), καθώς και τον αριθμό σπειρών του τυλίγματος της πλευράς υψηλής τάσης (N_{High}). Εισάγοντας τις παραπάνω ανεξάρτητες μεταβλητές, δημιουργείται ένας μεγάλος χώρος από λύσεις κοντά στο βέλτιστο, ώστε να επιλεγεί η λύση εκείνη που μπορεί να υλοποιηθεί σύμφωνα με τις διαθέσιμες τεχνικές.

Οι περιορισμοί που εισάγονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης έχουν ως εξής. Αρχικά, τίθεται ο περιορισμός που αφορά στην ελάχιστη διάρκεια του τέταρτου διαστήματος αγωγής. Όπως αναφέρθηκε, το τέταρτο διάστημα αγωγής αφορά το διάστημα ($t_3 < t < t_4$) που περιγράφεται από τη μεταβλητή t_{43} . Για την ομαλή λειτουργία του μετατροπέα, το σημείο λειτουργίας απαιτείται να βρίσκεται σε κάποια απόσταση από την καμπύλη που οριοθετεί τις δύο περιοχές λειτουργίας (DCM-CCM). Η λειτουργία στην καμπύλη αυτή αναφέρεται ως οριακή κατάσταση μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής (Boundary Conduction Mode, BCM) και ενέχει τον κίνδυνο μετάβασης σε ανεπιθύμητη περιοχή λειτουργίας με μια μικρή μεταβολή του φορτίου. Συνεπώς, ο περιορισμός που τίθεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι ότι η διάρκεια του τετάρτου διαστήματος αγωγής πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το ποσοστό λ της διακοπτικής περιόδου (3.51). Έτσι, εξασφαλίζεται η παραμονή στη DCM παρά τις μεταβολές στο φορτίο, την επίδραση των διακοπτικών χρόνων, καθώς και καθυστέρηση αφαίρεσης του παλμού στο στοιχείο του δευτερεύοντος κατά τη σύγχρονη ανόρθωση. Η τιμή που επιλέχθηκε για το λ είναι 6 %.

$$t_{43} \geq \lambda \cdot T_{sw} \Leftrightarrow T_{sw} - (t_1 + t_{21} + t_{32}) \geq \lambda \cdot T_{sw} \quad (3.51)$$

Ο δεύτερος περιορισμός που εισάγεται στο αλγόριθμο βελτιστοποίησης αφορά το διαθέσιμο χώρο που προσφέρεται από τον πυρήνα για τα τυλίγματα και τη μπομπίνα. Λόγω του ότι το τυλίγμα του μετασχηματιστή πραγματοποιείται με το χέρι, ο χώρος που προσφέρεται για τα τυλίγματα πρέπει να είναι έως ένα ποσοστό ξ του συνολικού παραθύρου, ώστε να χωρέσει και η μπομπίνα (3.52). Η τιμή που τέθηκε για το ξ είναι 30 %.

Ο τελευταίος περιορισμός αφορά τη μέγιστη μαγνητική επαγωγή, ώστε να μην κορεστεί το μαγνητικό υλικό. Λόγω του ότι χρησιμοποιούνται σύγχρονα μαγνητικά στοιχεία από υλικό N87, το όριο που τίθεται για τη μαγνητική επαγωγή είναι το 0,35 T (3.53) σύμφωνα με το φυλλάδιο του κατασκευαστή [83].

$$\frac{N_{High} \cdot S_{High} + N_{Low} \cdot S_{Low}}{A_w} \leq \xi \quad (3.52)$$

$$B_{max} \leq 0,35 \text{ T} \quad (3.53)$$

3.4.2 Επιλογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης

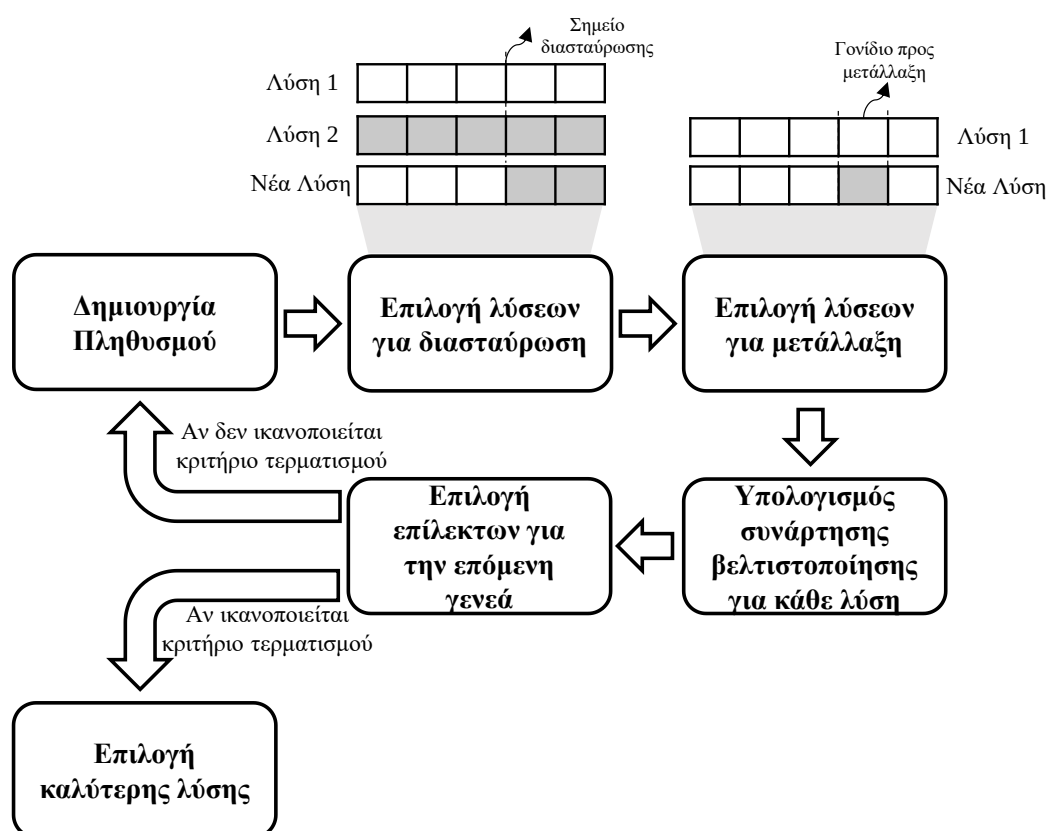
Η προτεινόμενη ανάλυση απαιτεί τη λύση του μη γραμμικού συστήματος (3.26) – (3.35) δύο φορές, προκειμένου να εκτιμηθεί το σημείο λειτουργίας του μετατροπέα, ενώ απαιτείται και αριθμητικός υπολογισμός των απαιτούμενων RMS μεγεθών. Επομένως, η συνάρτηση βελτιστοποίησης δεν εκφράζεται σε κλειστή μορφή, αλλά ως μία προγραμματιστική ρουτίνα. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που βασίζονται στην αναλυτική επίλυση των μερικών παραγώγων της συνάρτησης βελτιστοποίησης ως προς τις ανεξάρτητες μεταβλητές, αφενός μεν απαιτούν την έκφραση της συνάρτησης βελτιστοποίησης σε κλειστή μορφή, αφετέρου δε, συγκλίνουν σε τοπικά ακρότατα.

Επομένως, κρίθηκε αποτελεσματικότερη η επιλογή ενός μετα-ευρετικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του μετατροπέα. Βασική προϋπόθεση για την επιλογή μιας ευρετικής μεθόδου είναι η αποδοτικότητά της κατά την εύρεση λύσης κοντά στη βέλτιστη χωρίς να εγκλωβίζεται σε τοπικά ακρότατα. Οι ευρετικές μέθοδοι τροχιάς (trajectory-based), όπως είναι η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης (simulated annealing) είναι επιρρεπής στην εύρεση τοπικών ακροτάτων [34]. Αντίθετα, οι εξελικτικές μέθοδοι υπερτερούν στην ταχύτητα σύγκλισης και στην εύρεση του ολικού ακροτάτου [34]. Για τους λόγους αυτούς, για το βέλτιστο σχεδιασμό του μετατροπέα Flyback επιλέχθηκε ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm, GA).

Ο GA είναι ένας εξελικτικός αλγόριθμος εμπνευσμένος από τις γενετικές διεργασίες που πραγματοποιούνται κατά τη φυσική εξέλιξη [39]. Η ροή των διεργασιών του παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9. Αρχικά, πραγματοποιείται τυχαία δειγματοληψία των μεταβλητών βελτιστοποίησης μέσα από το πεδίο τιμών για να δημιουργηθούν πιθανές λύσεις (χρωμοσώματα). Κάθε πιθανή λύση

χαρακτηρίζεται από τις τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές βελτιστοποίησης (γονίδια). Έτσι δημιουργείται ένα σύνολο πιθανών λύσεων προς αξιολόγηση που ονομάζεται πληθυσμός.

Στη συνέχεια, στις πιθανές αυτές λύσεις πραγματοποιούνται οι διεργασίες του GA [39]. Οι διεργασίες αυτές είναι η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Κατά τη διεργασία της διασταύρωσης, επιλέγονται τυχαία δύο χρωμοσώματα. Από κάθε χρωμόσωμα επιλέγεται ένας αριθμός γονιδίων και δημιουργείται μία νέα λύση προς αξιολόγηση. Κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης, επιλέγεται τυχαία μία λύση και ένα γονίδιο της λύσης αυτής αντικαθίσταται από μια νέα τυχαία τιμή. Έπειτα από τις διεργασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης βελτιστοποίησης για κάθε λύση (χρωμόσωμα).



Σχήμα 3.9: Ροή διεργασιών του GA.

Οι επιμέρους λύσεις με τις τιμές της συνάρτησης βελτιστοποίησης για καθεμιά χαρακτηρίζουν μία γενιά του πληθυσμού. Στο τελικό βήμα, τα χρωμοσώματα για τα οποία έχει επιτευχθεί η καλύτερη τιμή της συνάρτησης βελτιστοποίησης (π.χ. μεγαλύτερη τιμή απόδοσης μετατροπέα) διατηρούνται στην επόμενη γενεά. Ο αριθμός των μελών που διατηρούνται χαρακτηρίζεται ως αριθμός επίλεκτων. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος αριθμός γενεών, να

ξεπεραστεί ο μέγιστος χρόνος εκτέλεσης, η συνάρτηση βελτιστοποίησης να φτάσει την επιθυμητή τιμή, ή να μην υπάρξει βελτίωση του αποτελέσματος για έναν προκαθορισμένο αριθμό γενεών ή ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα.

Πριν την εκτέλεση του GA πρέπει να καθοριστούν τα όρια τιμών για κάθε μεταβλητή βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος ψευδοτυχαίας γεννήτριας, καθώς και το μέγεθος του πληθυσμού, ο αριθμός των γενεών, οι συντελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης, καθώς και ο αριθμός των επίλεκτων.

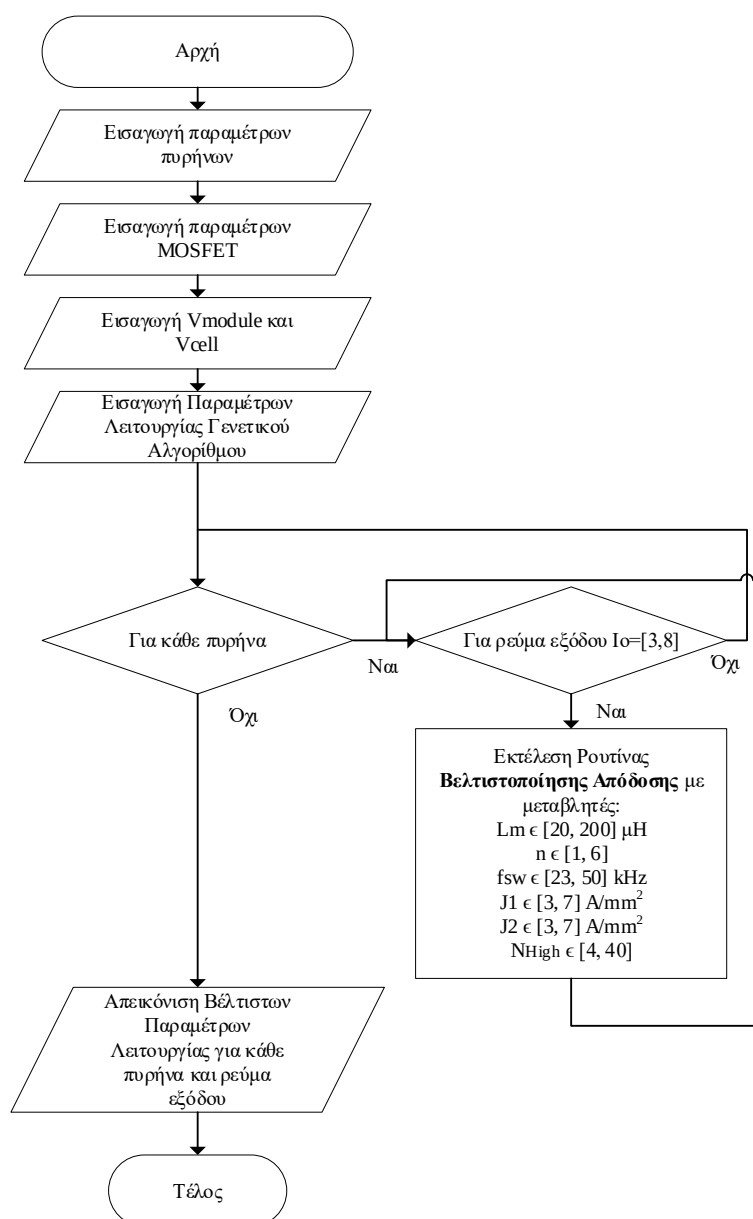
3.4.3 Εφαρμογή GA κατά σχεδιασμό του μετατροπέα Flyback

Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του μετατροπέα Flyback για BMS ($L_m, n, f_{sw}, J_1, J_2, N_{High}$) αντιστοιχούν στα γονίδια που διαμορφώνουν κάθε χρωμόσωμα (πιθανή λύση) του GA. Στην παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί η υλοποίηση του GA που προσφέρεται από το λογισμικό MATLAB. Το μέγεθος του πληθυσμού έχει οριστεί στα 100 μέλη, ο αριθμός των γενεών είναι 10, ενώ η διεργασία της διασταύρωσης πραγματοποιείται στο 80 % του πληθυσμού, η διεργασία της μετάλλαξης στο 15 % του πληθυσμού και ο αριθμός των επίλεκτων είναι 5.

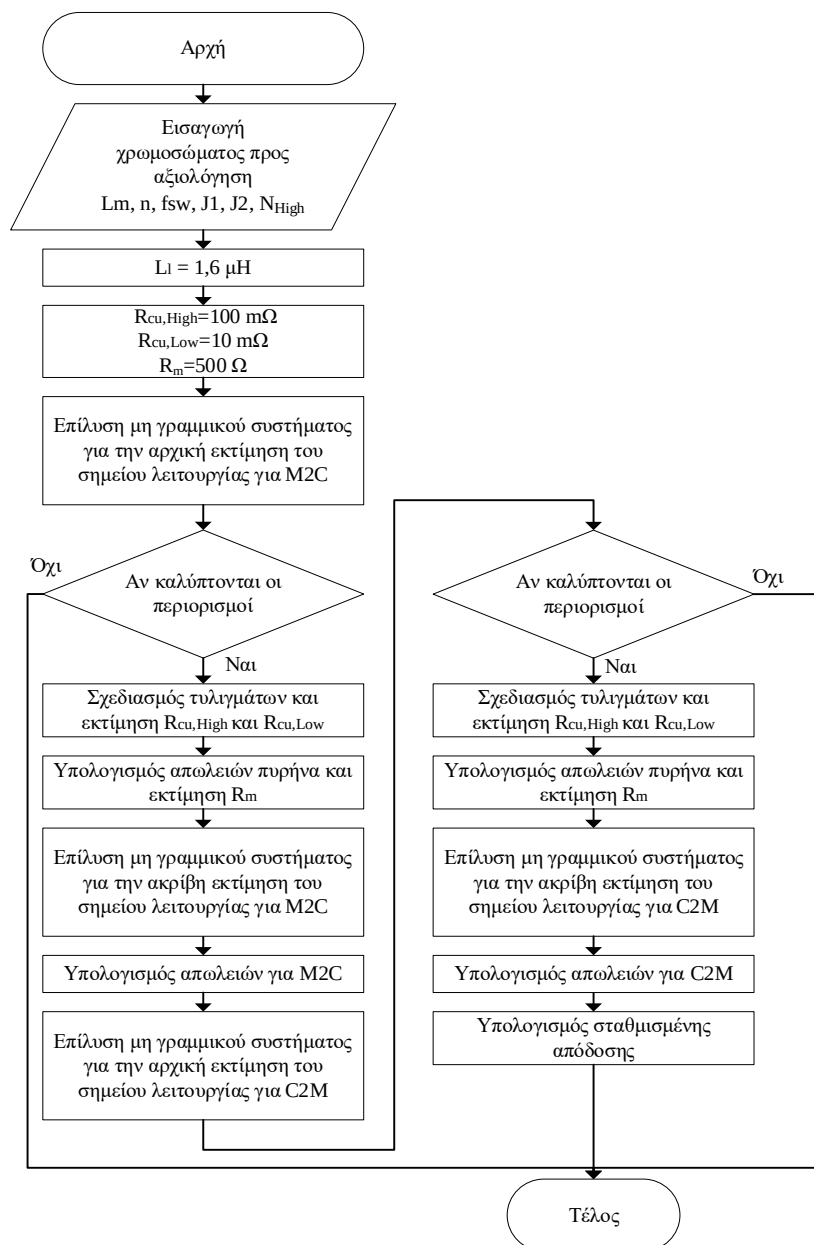
Η μελέτη εφαρμογής αφορά το όχημα τύπου Buggy που έχει κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας του Πανεπιστημίου Πατρών [76]-[78]. Επομένως, λαμβάνονται υπόψη οι συσσωρευτές LYP90AHA με ονομαστική τάση 3,3 V, οι οποίοι χωρίζονται σε ομάδες των οκτώ. Ο μετατροπέας βελτιστοποιείται για την ονομαστική τάση λειτουργίας των συσσωρευτών, μιας και στο μεγαλύτερο εύρος της λειτουργίας αυτού οι συσσωρευτές βρίσκονται στην τάση αυτή. Χρησιμοποιώντας τον GA αξιολογούνται σχεδιασμοί του μετατροπέα με χρήση των πυρήνων μετασχηματιστή RM8 και RM10 για ρεύμα εξισορρόπησης που βρίσκεται στο διάστημα [3, 8 A].

Το διάγραμμα ροής που περιγράφει τις διεργασίες εκτέλεσης του GA παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10. Η ρουτίνα βελτιστοποίησης περιγράφεται στο Σχήμα 3.11. Σημειώνεται ότι η τιμή της σκέδασης δεν είναι γνωστή πριν από τη κατασκευή του μετασχηματιστή. Επομένως, κατά την εκτέλεση του GA πρέπει να πραγματοποιηθεί θεώρηση για την τιμή αυτή. Έπειτα από την κατασκευή πληθώρας μετασχηματιστών που πληρούν τις προδιαγραφές της εφαρμογής (ρεύμα εξόδου ~5 A) με τους πυρήνες RM8 και RM10, μια τυπική τιμή της σκέδασης L_l που επετεύχθη ήταν το 1,6 μH . Αυτή η τιμή θεωρήθηκε κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Επιπλέον, κατά την αρχική

επίλυση του συστήματος (3.26)-(3.35) οι τιμές των $R_{cu,High}$, $R_{cu,Low}$, R_m δεν είναι γνωστές, καθώς δεν έχει πραγματοποιηθεί ο σχεδιασμός του μετασχηματιστή. Επομένως, για τις αντιστάσεις αυτές τίθενται οι τιμές 100 mΩ, 10 mΩ, και 500 Ω αντίστοιχα, ως τυπικές τιμές για τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του μετατροπέα. Αφού γίνουν οι θεωρήσεις αυτές, πραγματοποιείται επίλυση του συστήματος (3.26)-(3.35), ώστε να πραγματοποιηθεί πρώτη εκτίμηση του σημείου λειτουργίας. Έπειτα, χρησιμοποιώντας το μοντέλο απωλειών, υπολογίζονται εκ νέου οι $R_{cu,High}$, $R_{cu,Low}$, R_m , ώστε να εκτιμηθεί με ακρίβεια το σημείο λειτουργίας του μετατροπέα.



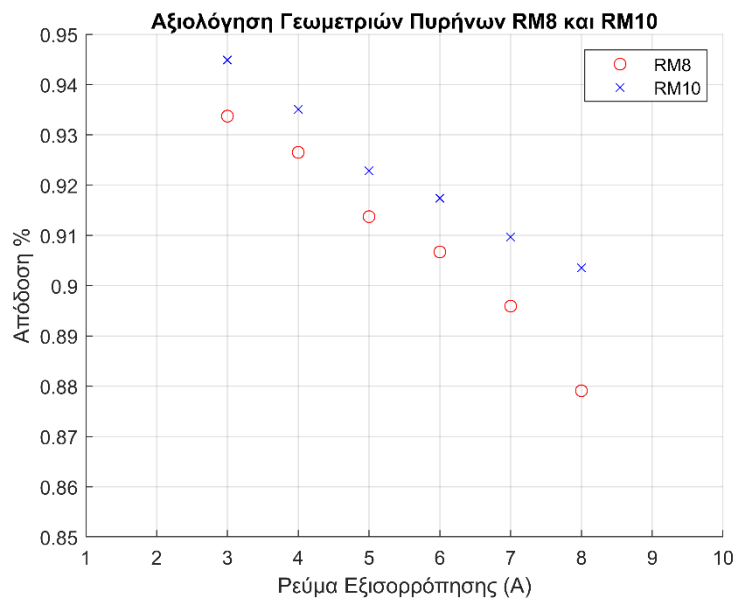
Σχήμα 3.10: Γενικό διάγραμμα ροής του GA.



Σχήμα 3.11: Η ρουτίνα υπολογισμού της συνάρτησης βελτιστοποίησης.

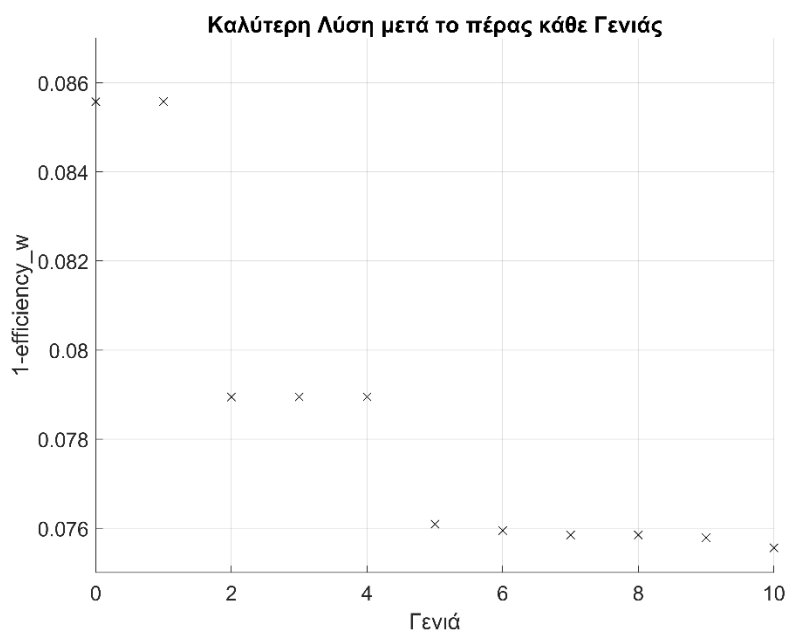
3.4.4 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Για τους δύο πυρήνες μετασχηματιστή υπό αξιολόγηση (RM8 και RM10) και ρεύμα εξισορρόπησης I_{Eq} στο διάστημα [3, 8 A] εκτελείται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.12, σύμφωνα με τα οποία επιλέχθηκε ο πυρήνας RM10 για την τελική εφαρμογή, μιας και επιτυγχάνει καλύτερη απόδοση χωρίς να αυξάνει δραματικά το μέγεθος του μετατροπέα.

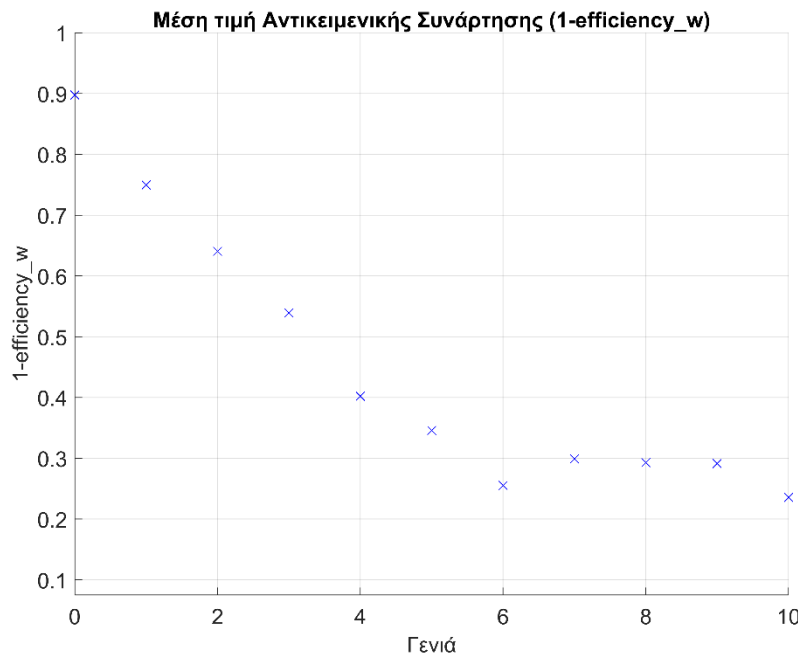


Σχήμα 3.12: Εκτιμώμενη απόδοση για τους πυρήνες RM8 και RM10 για ρεύμα εξισορρόπησης 3-8 A.

Η πρόοδος κατά την εύρεση της βέλτιστης λύσης από τον GA παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.13, ενώ η βελτίωση της μέσης τιμής της συνάρτησης βελτιστοποίησης του πληθυσμού για κάθε γενιά παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14. Σημειώνεται ότι η υλοποίηση του GA που έχει επιλεγεί επιτυγχάνει ελαχιστοποίηση συνάρτησης κόστους, συνεπώς τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.13 και 3.14 αφορούν την τιμή της συνάρτησης $y = 1 - efficiency_w$.



Σχήμα 3.13: Οι καλύτερες λύσεις μετά το πέρας κάθε γενιάς του GA.



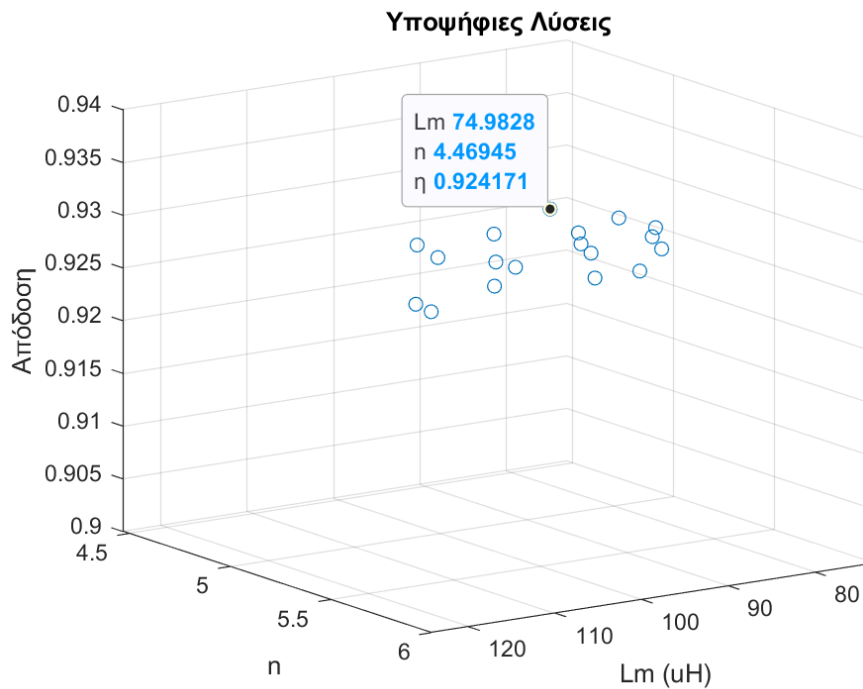
Σχήμα 3.14: Η μέση τιμή της συνάρτησης βελτιστοποίησης για κάθε γενιά του GA.

Έπειτα από τη λειτουργία του, ο GA επιστρέφει τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή και την επιθυμητή διακοπτική συχνότητα που μεγιστοποιούν την απόδοση του μετατροπέα. Τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή περιγράφονται από τον αριθμό σπειρών πρωτεύοντος και δευτερεύοντος (N_{High}, N_{Low}), την επαγωγή μαγνήτισης (L_m), τη σκέδαση (L_l), και τις ωμικές αντιστάσεις του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ($R_{cu,High}, R_{cu,Low}$). Όμως, επειδή ο μετασχηματιστής κατασκευάζεται με το χέρι, υπάρχει περίπτωση να υπάρχουν αποκλίσεις από την επιθυμητή λύση, κυρίως λόγω της θέωρησης ότι η σκέδαση διατηρείται σταθερή, και να μην επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός απόδοσης. Προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, ο GA εκτελείται αρκετές φορές με διαφορετική ψευδοτυχαία γεννήτρια λύσεων, ώστε να δοθεί ένας αριθμός λύσεων κοντά στη βέλτιστη και να επιλεγεί εκείνη που μπορεί να κατασκευαστεί σύμφωνα με τις διαθέσιμες τεχνικές περιέλιξης του μετασχηματιστή. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται η τυχαία φύση της λειτουργίας του GA σε αντίθεση με τις ντετερμινιστικές μεθόδους βελτιστοποίησης που οδηγούν σε μία συγκεκριμένη λύση που μπορεί να μην υλοποιείται με τις υπάρχουσες τεχνικές περιέλιξης.

Οι σταθμισμένες αποδόσεις που επιτυγχάνονται διαφοροποιώντας το φυτό (seed) της ψευδοτυχαίας γεννήτριας (μέθοδος twister) σε σχέση με την επαγωγή μαγνήτισης και το λόγο μετασχηματισμού παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.15. Οι τιμές των θεωρητικών χαρακτηριστικών του

Κεφάλαιο 3

μετασχηματιστή που επιλέχθηκε (με εκτίμηση απόδοσης 92,42 %), καθώς και οι τιμές που επιτεύχθηκαν έπειτα από την κατασκευή του παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Επιπλέον, κατασκευάστηκε ένας υποβέλτιστος μετασχηματιστής προκειμένου να διεξαχθεί πληθώρα πειραμάτων και να εξακριβωθεί η αξιοπιστία του μοντέλου. Τα χαρακτηριστικά του υποβέλτιστου μετασχηματιστή παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.15: Οι διαφορετικές λύσεις που προτείνονται μεταβάλλοντας το φύτρο της ψευδοτυχαίας γεννήτριας του GA.

Πίνακας 3.1: Τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή.

Χαρακτηριστικά μετασχηματιστή			
Παράμετρος	Αλγόριθμος	Κατασκευή	Μονάδα
Πυρήνας	RM10	RM10	-
Υλικό	N87	N87	-
n	4.470	4.287	-
L_m	74.98	78.58	uH
k	97.91	97.70	%
L_l	1.600	1.850	uH
$R_{cu,High}$	88.32	80	mΩ
$R_{cu,Low}$	5.9	8.5	mΩ
N_{High}	16.51	13	-
N_{Low}	3.69	3	-
f_{sw}	29.622		kHz

Πίνακας 3.2: Τα χαρακτηριστικά του υποβέλτιστου μετασχηματιστή.

Χαρακτηριστικά υποβέλτιστου μετασχηματιστή		
Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Πυρήνας	RM10	-
Υλικό	3F3	-
n	3.203	-
L_m	37.820	uH
k	95.58	%
L_l	1.750	uH
$R_{cu,High}$	125	mΩ
$R_{cu,Low}$	15	mΩ
N_{High}	13	-
N_{Low}	4	-

3.5 Πειραματική αξιολόγηση του μετατροπέα Flyback

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται πειραματική αξιολόγηση του πρωτοτύπου που κατασκευάστηκε σύμφωνα με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Αρχικά, εξετάζεται η ακρίβεια της προτεινόμενης ανάλυσης όσον αφορά την εύρεση του σημείου λειτουργίας του μετατροπέα (ενότητα 3.2). Έπειτα, αξιολογείται η ακρίβεια εκτίμησης των απωλειών στα επιμέρους στοιχεία του μετατροπέα και η εύρεση της απόδοσης για τις ροές ενέργειας M2C και C2M (ενότητα 3.3). Στο τέλος της ενότητας αυτής παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα για τη λειτουργία του μετατροπέα με μεταβλητή διακοπτική συχνότητα προκειμένου να επιτευχθεί περαιτέρω αύξηση της απόδοσης. Το εργαστηριακό πρωτότυπο που κατασκευάστηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16, ενώ τα χαρακτηριστικά του στον Πίνακα 3.3.



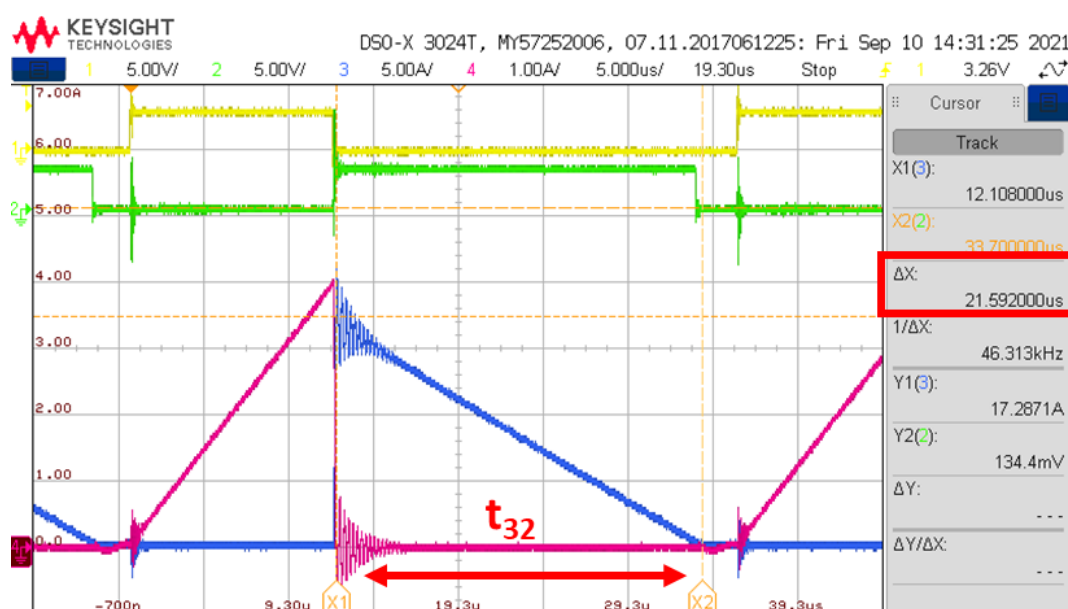
Σχήμα 3.16: Το εργαστηριακό πρωτότυπο του μετατροπέα Flyback.

Πίνακας 3.3: Οι παράμετροι του μετατροπέα που κατασκευάστηκε.

Προδιαγραφές του μετατροπέα Flyback		
Εξάρτημα	Κωδικός κατασκευαστή	Προδιαγραφές
MOSFET υψηλής τάσης (Q_{High})	IPP200N15N3G	150 V, 20 mΩ, 50 A
MOSFET χαμηλής τάσης (Q_{Low})	IPP023N08N5	80 V, 2.3 mΩ, 120 A
C_{High}	A759PY337M1JAAE042	63 V, 330 uF, 42 mΩ
L_{High}	744750460100	10 uH, 8.6 mΩ
C_{Low}	3 x RR50J391MDN1	6.3 V, 390 uF, 5 mΩ
L_{Low}	SER1512-103MED	10 uH, 3.7 mΩ
D_{High}	1.5SMC75CA	75 V
D_{Low}	1.5SMC20CA	20 V
Battery Cell	LYP90AHA	2.8 – 4 V, 90 Ah

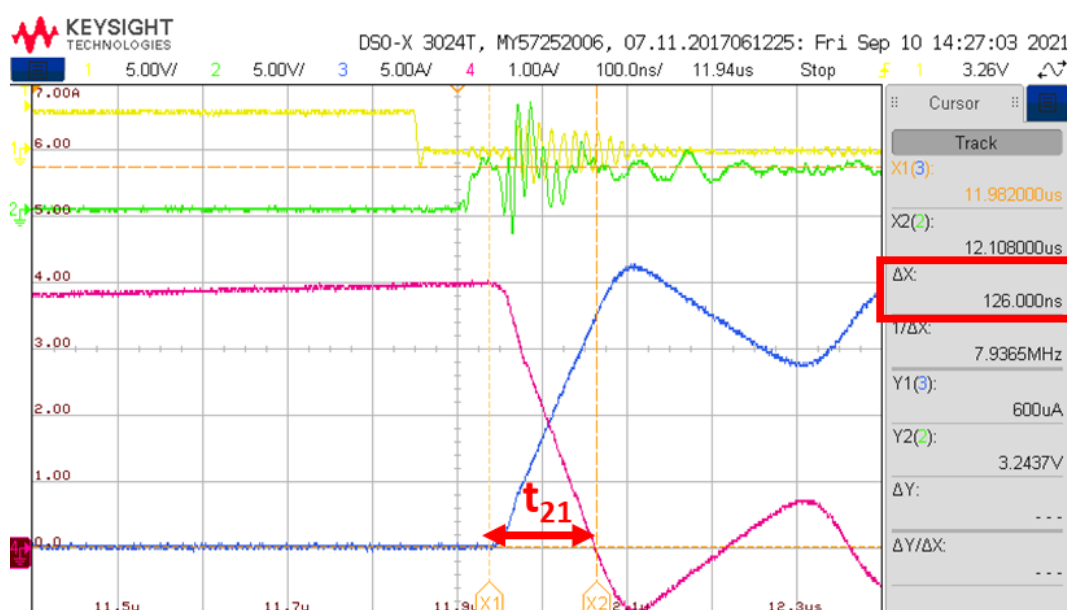
3.5.1 Αξιολόγηση ακρίβειας εκτίμησης του σημείου λειτουργίας

Για την εκτίμηση του σημείου λειτουργίας του μετατροπέα επιλύεται το σύστημα εξισώσεων (3.26)-(3.35). Έτσι, με δεδομένες τις μεταβλητές V_{Module} , V_{Cell} , I_{Cell} , f_{sw} υπολογίζεται ο λόγος κατάτμησης που θα πρέπει να εφαρμοστεί στο κύριο ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα, προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο ρεύμα εξισορρόπησης που περιγράφεται από τη μεταβλητή I_{Eq} . Αρχικά, ο μετατροπέας λειτουργεί στην κατάσταση εξισορρόπησης M2C, κατά την οποία η ενέργεια ρέει από την υψηλή τάση της συστοιχίας προς το επιμέρους κελί. Ενδεικτικές κυματομορφές από τη λειτουργία του μετατροπέα στη ροή M2C παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.17 και 3.18.



Σχήμα 3.17: Λειτουργία M2C με $V_{Module}=26,4$ V, $V_{Cell}=3,3$ V, $f_{sw}=28$ kHz, $I_{Eq}=5$ A. Εκτίμηση διαστήματος t_{32} . Κίτρινο: Παλμός Q_{High} , Πράσινο: Παλμός Q_{Low} (σύγχρονη ανόρθωση), Μωβ: Ρεύμα I_{High} , Μπλε: Ρεύμα I_{Low} .

Στα Σχήματα που έχουν ληφθεί από τον παλμογράφο, απεικονίζονται τα ρεύματα στα τυλίγματα της πλευράς υψηλής και χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή με μωβ και πράσινο χρώμα αντίστοιχα. Επιπλέον, ο παλμός στο κύριο ημιαγωγικό στοιχείο (για ροή M2C αφορά το Q_{High}) απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα, ενώ ο παλμός στο ημιαγωγικό στοιχείο που λειτουργεί σύμφωνα με την τεχνική της σύγχρονης ανόρθωσης (για ροή M2C αφορά το Q_{Low}) απεικονίζεται με πράσινο χρώμα.



Σχήμα 3.18: Λειτουργία M2C με $V_{Module}=26,4\text{ V}$, $V_{Cell}=3,3\text{ V}$, $f_{sw}=28\text{ kHz}$, $I_{Eq}=5\text{ A}$. Εκτίμηση διαστήματος t_{21} . Κίτρινο: Παλμός Q_{High} , Πράσινο: Παλμός Q_{Low} (σύγχρονη ανόρθωση), Μωβ: Ρεύμα I_{High} , Μπλε: Ρεύμα I_{Low} .

Η ακρίβεια του μοντέλου αξιολογείται σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα, καθώς και με τους υπολογισμούς που προκύπτουν από την ανάλυση του ιδανικού μετατροπέα. Στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις του προτεινόμενου μοντέλου, της ανάλυσης του ιδανικού μετατροπέα, καθώς και οι πειραματικές μετρήσεις όσον αφορά τις διάρκειες των διαστημάτων αγωγής για $V_{Module} = 26,4\text{ V}$ και δύο στάθμες τάσης στο κελί. Διαπιστώνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος οδηγεί σε ακριβή εκτίμηση των διαστημάτων αγωγής και ιδιαίτερα του t_1 που αφορά τον υπολογισμό του λόγου κατάτμησης του παλμού που εφαρμόζεται στο ημιαγωγικό στοιχείο.

Πίνακας 3.4: Αξιολόγηση της εκτίμησης των διαστημάτων αγωγής κατά τη λειτουργία M2C.

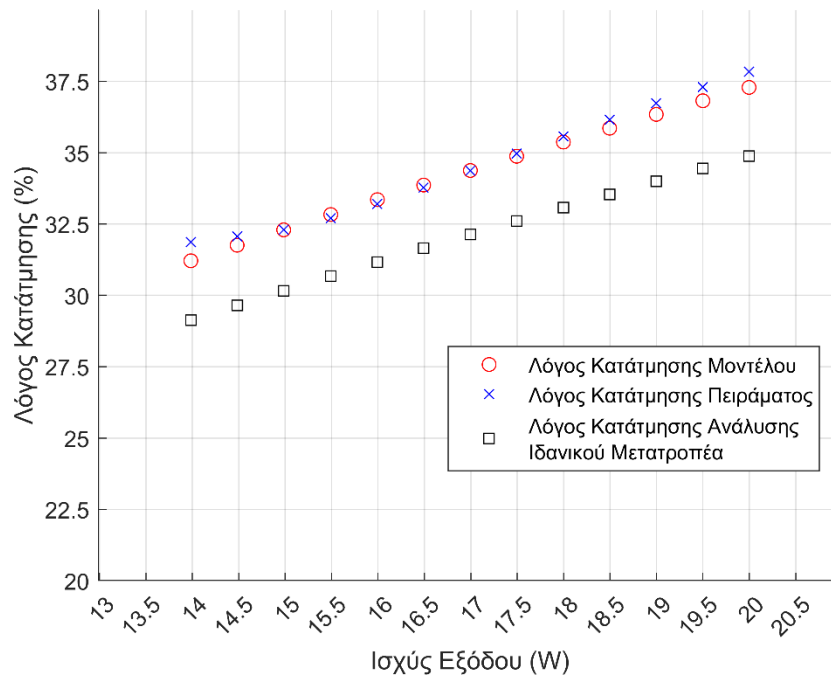
Λειτουργία M2C 28 kHz				
Τάση κελιού	Μεταβλητή	Ιδανικό μοντέλο	Προτεινόμενο μοντέλο	Πειραματικά
3,3 V	t1	11,218 us	11,992 us	11,996 us
	t21	0	117,45 ns	126 ns
	t32	21,661 us	21,502 us	21,592 us
	t43	2,8352	2,103 us	2 us
4,0 V	t1	12,564 us	13,526 us	13,490 us
	t21	0	136,53 ns	136 ns
	t32	19,378 us	19,417 us	19,388 us
	t43	3,772 us	2,634 us	2,700 us

Επιπρόσθετα, ο μετατροπέας λειτούργησε σε ανοιχτό βρόγχο με διαφορετικές στάθμες της τάσης V_{Module} και διακοπτικής συχνότητας f_{sw} σε όλο το εύρος τάσεων του συσσωρευτή (2,8–4 V), καθώς και με τους δύο μετασχηματιστές που κατασκευάστηκαν. Κάθε γραμμή του Πίνακα 3.5 παρουσιάζει τις στάθμες της τάσης εισόδου που επιλέχθηκαν για την εξισορρόπηση του συσσωρευτή με ρεύμα $I_{Eq} = 5\text{ A}$ σε όλο το εύρος τάσεων του συσσωρευτή (2,8–4 V). Για κάθε περίπτωση, εφαρμόζεται στο μετατροπέα ο λόγος κατάτμησης που προκύπτει από την προτεινόμενη μέθοδο, καθώς και την ανάλυση κατά την οποία ο μετατροπέας θεωρείται ιδανικός. Έπειτα, υπολογίζεται η μέση τιμή και το μέσο σφάλμα του ρεύματος I_{Eq} που επιτυγχάνεται σε λειτουργία ανοιχτού βρόγχου ώστε να διερευνηθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου, καθώς και της ανάλυσης του ιδανικού μετατροπέα. Το σφάλμα του προτεινόμενου μοντέλου κυμαίνεται στα όρια (0,9–1,91 %), ενώ το σφάλμα της ανάλυσης που βασίζεται στον ιδανικό μετατροπέα στα όρια (13,12–15,97 %). Η μεγάλη απόκλιση της ανάλυσης που βασίζεται στον ιδανικό μετατροπέα αναδεικνύει τη σημασία της ανάλυσης που προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, αφού σε εφαρμογές που χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές τάσεων και σχετικά υψηλά ρεύματα, οι μη ιδανικότητες του μετατροπέα επηρεάζουν σημαντικά το σημείο λειτουργίας.

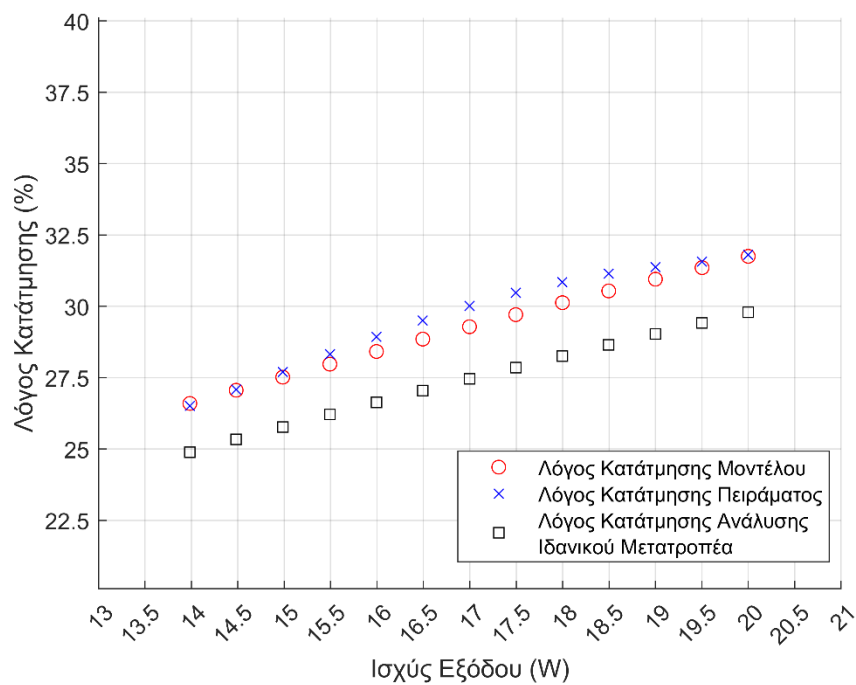
Ο Πίνακας 3.5 παρουσιάζει συγκεντρωτικά την ακρίβεια της προτεινόμενης ανάλυσης σε όλο το εύρος τάσεων λειτουργίας του κελιού για πληθώρα σεναρίων λειτουργίας. Για λεπτομερέστερη παρουσίαση της ακρίβειας της ανάλυσης παρατίθενται τα Σχήματα 3.19 και 3.20, στα οποία παρουσιάζεται η εκτίμηση του λόγου κατάτμησης όπως προκύπτει από την προτεινόμενη ανάλυση (κόκκινο σύμβολο), σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα (μπλε σύμβολο) που επιτυγχάνουν το απαιτούμενο ρεύμα εξισορρόπησης για μεταβαλλόμενη τάση συσσωρευτή και σταθερή τάση ομάδας συσσωρευτών. Με μαύρο συμβολισμό παρατίθεται οι τιμές του λόγου κατάτμησης που προκύπτουν από την ανάλυση του ιδανικού μετατροπέα, όπου και φαίνεται η μεγάλη απόκλισή της.

Πίνακας 3.5: Αξιολόγηση της ακρίβειας κατά την επίτευξη του ρεύματος εξισορρόπησης (5 A) σε λειτουργία M2C ανοιχτού βρόγχου.

Λειτουργία M2C								
Μετασχηματιστής	V_i (V)	f_{sw} (kHz)	Μέγιστη απόδοση (%)	Προτεινόμενο μοντέλο		Ιδανικό μοντέλο		
				Μέση τιμή του I_{Eq} (A)	Σφάλμα %	Μέση τιμή του I_{Eq} (A)	Σφάλμα %	
GA	N87	22,4	25	90,66	4,955	0,90	4,314	13,72
	N87	26,4	27	90,84	4,912	1,76	4,344	13,12
	N87	32	29	91,28	4,905	1,91	4,303	13,93
Υπο- βέλτιστος	3F3	26,4	35	87,18	5,061	1,23	4,201	15,97

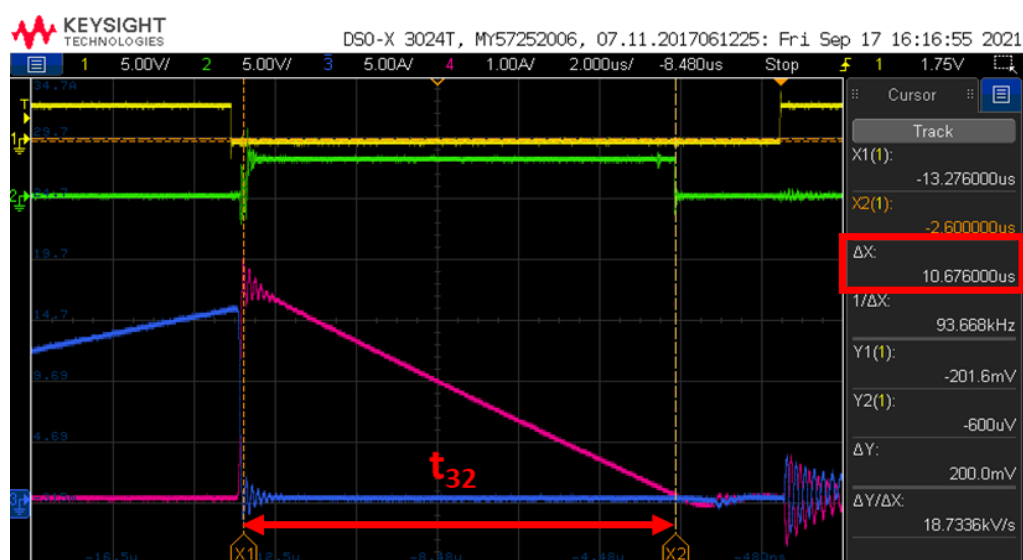


Σχήμα 3.19: Αξιολόγηση εκτίμησης λόγου κατάτμησης για λειτουργία M2C με $V_{Module}=26,4$ V, $f_{sw}=27$ kHz, $I_{Eq}=5$ A.



Σχήμα 3.20: Αξιολόγηση εκτίμησης λόγου κατάτμησης για λειτουργία M2C με $V_{Module}=32$ V, $f_{sw}=29$ kHz, $I_{Eq}=5$ A.

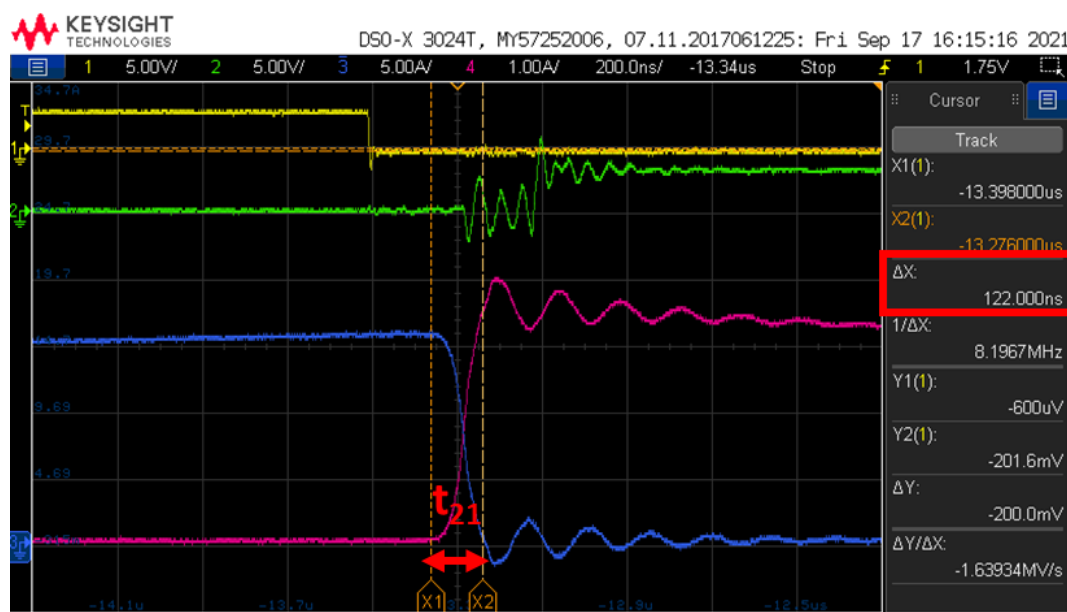
Αντίστοιχα πειράματα με αυτά που παρουσιάστηκαν για τη M2C ροή ενέργειας παρουσιάζονται και για τη C2M ροή ενέργειας. Στα Σχήματα 3.21, 3.22 παρουσιάζονται οι κυματομορφές από τον παλμογράφο, ενώ στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζεται η εκτίμηση των διαστημάτων αγωγής για δύο σημεία λειτουργίας. Επιπλέον, στον Πίνακα 3.7 παρουσιάζεται το σφάλμα εκτίμησης της μεθόδου. Στους πίνακες παρατίθεται και η εκτίμηση που προσδίδει η ανάλυση του ιδανικού μετατροπέα που οδηγεί σε σφάλματα εύρους (7,43–8,66 %) σε σχέση με το (0,38–2,50 %) της προτεινόμενης ανάλυσης. Στη C2M, η έξοδος του μετατροπέα αφορά την πλευρά της υψηλής τάσης και τροφοδοτείται με χαμηλό ρεύμα. Επομένως, η επίδραση των μη ιδανικών στοιχείων του μετατροπέα είναι μικρότερη. Για το λόγο αυτό, το εύρος του σφάλματος της ανάλυσης του ιδανικού μετατροπέα είναι μικρότερο σε σχέση με εκείνο που παρατηρείται στη M2C.



Σχήμα 3.21: Λειτουργία C2M με $V_{Module}=26,4$ V, $V_{Cell}=3,3$ V, $f_{sw}=28$ kHz, $I_{Eq}=5$ A. Εκτίμηση t_{32} . Κίτρινο: Παλμός Q_{Low} , Πράσινο: Παλμός Q_{High} (σύγχρονη ανόρθωση), Μωβ: Ρεύμα I_{High} , Μπλε: Ρεύμα I_{Low} .

Πίνακας 3.6: Αξιολόγηση της εκτίμησης των διαστημάτων αγωγής κατά τη λειτουργία C2M.

Λειτουργία C2M 28 kHz				
Τάση κελιού	Μεταβλητή	Ιδανικό μοντέλο	Προτεινόμενο μοντέλο	Πειραματικά
3,3 V	t1	21,828 us	22,503 us	22,357 us
	t21	0	114 ns	122 ns
	t32	11,341 us	10,716 us	10,676 us
	t43	2,545 us	2,381 us	2,6 us
4,0 V	t1	19,540 us	20,187 us	20,393 us
	t21	0	127,60 ns	132 ns
	t32	12,669 us	12,055 us	12,200 us
	t43	3,505 us	3,344 us	3,06 us



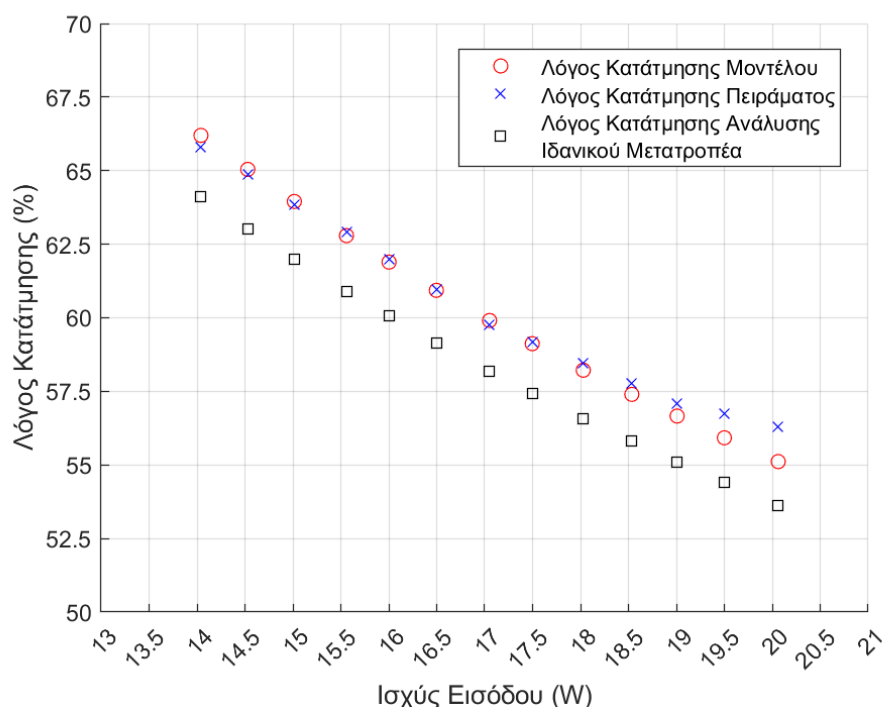
Σχήμα 3.22: Λειτουργία C2M με $V_{Module}=26,4$ V, $V_{Cell}=3,3$ V, $f_{sw}=28$ kHz, $I_{Eq}=5$ A. Εκτίμηση t_{21} . Κίτρινο: Παλμός Q_{Low} , Πράσινο: Παλμός Q_{High} (σύγχρονη ανόρθωση), Μωβ: Ρεύμα I_{High} , Μπλε: Ρεύμα I_{Low} .

Πίνακας 3.7: Αξιολόγηση της ακρίβειας κατά την επίτευξη του ρεύματος εξισορρόπησης (5 A) σε λειτουργία C2M ανοιχτού βρόγχου.

Λειτουργία C2M								
Μετασχηματιστής	V_i (V)	f_{sw} (kHz)	Μέγιστη απόδοση (%)	Προτεινόμενο μοντέλο		Ιδανικό μοντέλο		
				Μέση τιμή του I_{Eq} (A)	Σφάλμα %	Μέση τιμή του I_{Eq} (A)	Σφάλμα %	
GA	N87	22,4	25	90,01	4,930	1,40	4,567	8,66
	N87	26,4	27	90,29	4,875	2,50	4,629	7,43
	N87	32	29	90,39	4,899	2,02	4,578	8,43
Υπο-βέλτιστος	3F3	26,4	35	85,76	5,019	0,38	4,595	8,10

Η αξιολόγηση της ανάλυσης για την εκτίμηση του σημείου λειτουργίας ολοκληρώνεται με τα Σχήματα 3.23, 3.24, που παρουσιάζουν την ακρίβεια κατά την εκτίμηση του λόγου κατάτμησης με τους ίδιους συμβολισμούς που παρουσιάστηκαν για τη M2C. Στη C2M (Σχήμα 3.24) παρατηρούνται μεγαλύτερες αποκλίσεις του μοντέλου από τη M2C. Αυτές αποδίδονται στην καθυστέρηση σβέσης του MOSFET που χρησιμοποιείται στο τύλιγμα υψηλής τάσης, λόγω του φαινομένου ανάστροφης ανάκτησης της αντιπαράλληλης διόδου του. Σημειώνεται ότι παρόλο που κατά τη σύγχρονη ανόρθωση η αγωγή πραγματοποιείται κυρίως μεταξύ της πηγής και της υποδοχής (source-drain) του MOSFET που βρίσκεται στην έξοδο του μετατροπέα, η διόδος του καθυστερεί να τεθεί σε αποκοπή, λόγω της αργής διαδικασίας επανασύνδεσης φορέων.

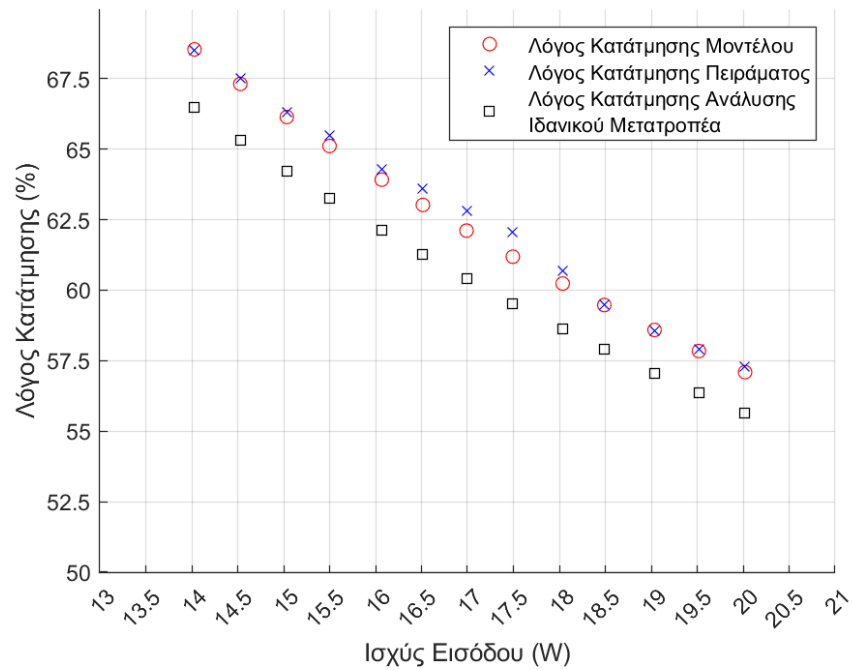
Μέσω της πληθώρας πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και με τους δύο μετασχηματιστές, επιβεβαιώνεται η ακρίβεια της προτεινόμενης ανάλυσης. Έχοντας εκτιμήσει με ακρίβεια τον απαραίτητο λόγο κατάτμησης για να καλυφθούν οι ανάγκες εξισορρόπησης, διασφαλίζεται ότι ο μετατροπέας θα λειτουργεί πάντα στην περιοχή της DCM και θα προσφέρει το απαιτούμενο ρεύμα εξισορρόπησης ($I_{Eq} = 5\text{ A}$) σε όλο το εύρος των τάσεων λειτουργίας.



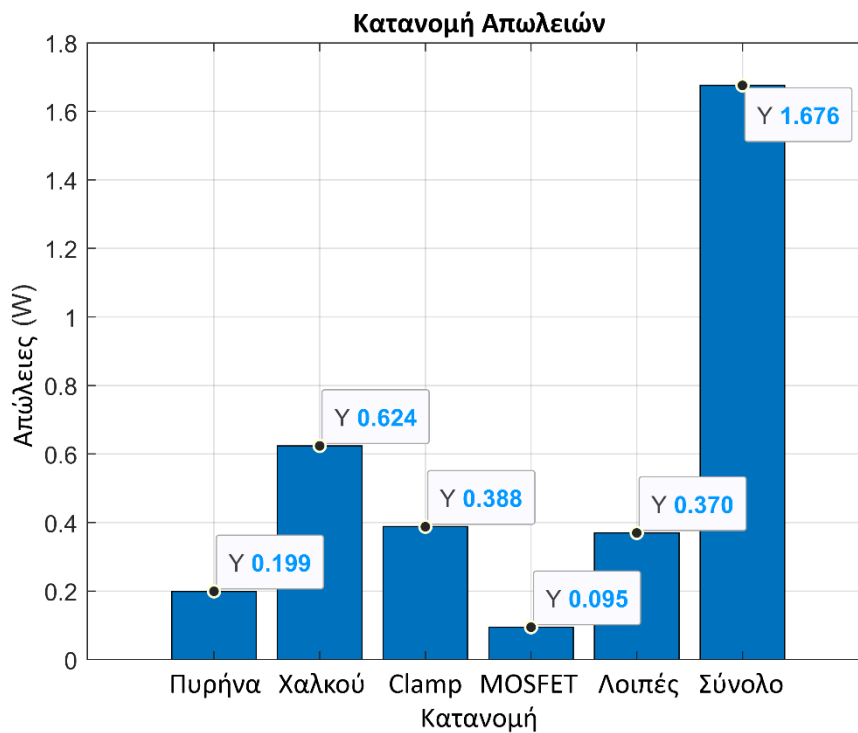
Σχήμα 3.23: Αξιολόγηση εκτίμησης λόγου κατάτμησης για λειτουργία C2M με $V_{Module}=26,4\text{ V}$, $f_{sw}=27\text{ kHz}$, $I_{Eq}=5\text{ A}$.

3.5.2 Αξιολόγηση ακρίβειας εκτίμησης απόδοσης

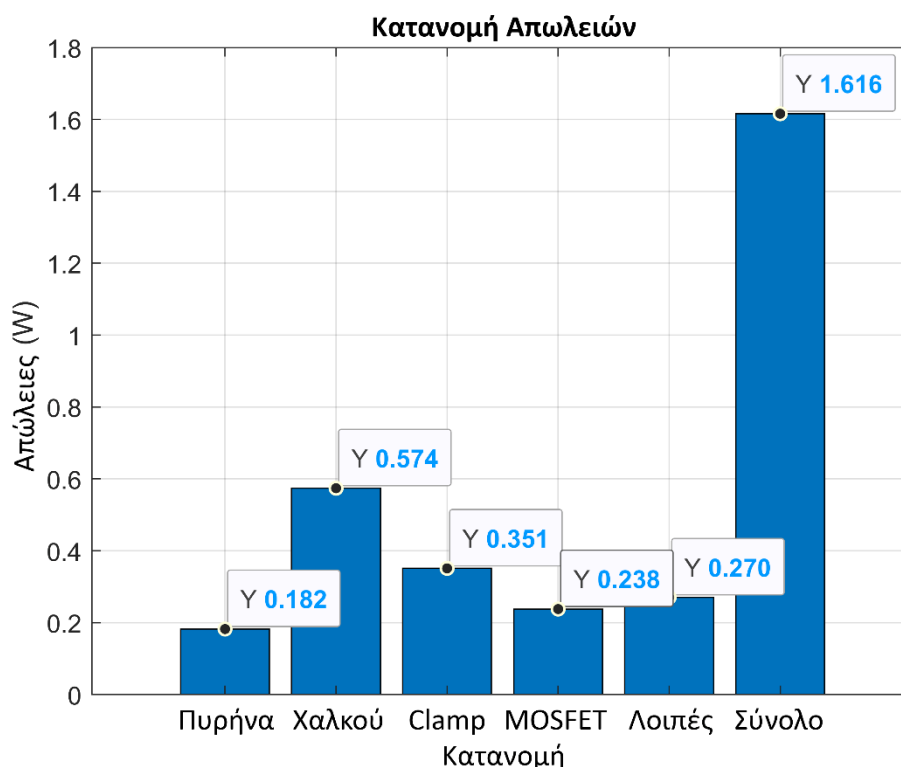
Το επόμενο βήμα για την αξιολόγηση της ακρίβειας που προφέρει η προτεινόμενη ανάλυση είναι η ακρίβεια εκτίμησης της ενεργειακής απόδοσης του μετατροπέα. Αξιοποιώντας την ανάλυση που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3, υπολογίζεται η κατανομή απωλειών σε κάθε στοιχείο του μετατροπέα και κατ' επέκταση η ενεργειακή του απόδοση. Η κατανομή των απωλειών για δύο καταστάσεις λειτουργίας που η μία αφορά τη λειτουργία M2C, ενώ η δεύτερη τη λειτουργία C2M, παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.25 και 3.26 αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του μετασχηματιστή είναι κυρίαρχες.



Σχήμα 3.24: Αξιολόγηση εκτίμησης λόγου κατάτμησης για λειτουργία C2M με $V_{Module}=32$ V, $f_{sw}=29$ kHz, $I_{Eq}=5$ A.

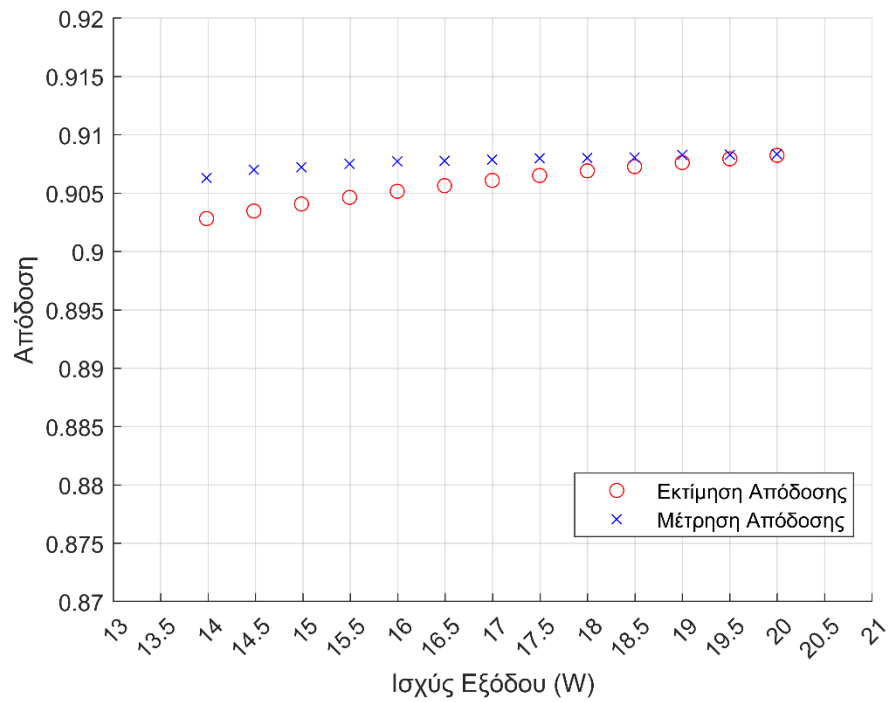


Σχήμα 3.25: Κατανομή απωλειών για τη λειτουργία M2C με $V_{Module}=26,4$ V, $V_{Cell}=3,3$ V, $f_{sw}=27$ kHz, $I_{Eq}=5$ A.

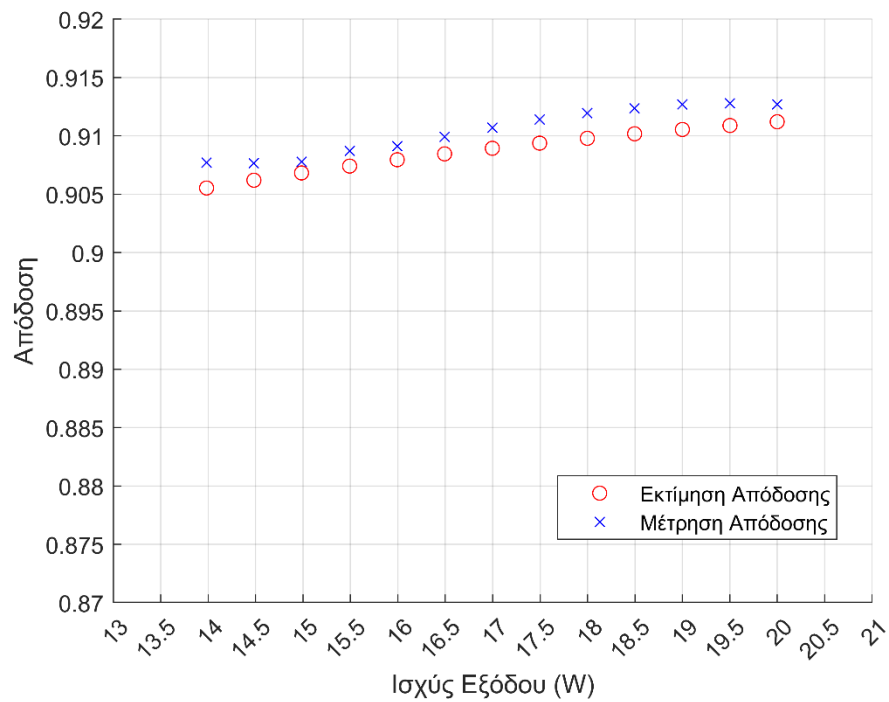


Σχήμα 3.26: Κατανομή απωλειών για τη λειτουργία C2M με $V_{Module}=26,4$ V, $V_{Cell}=3,3$ V, $f_{sw}=27$ kHz, $I_{Eq}=5$ A.

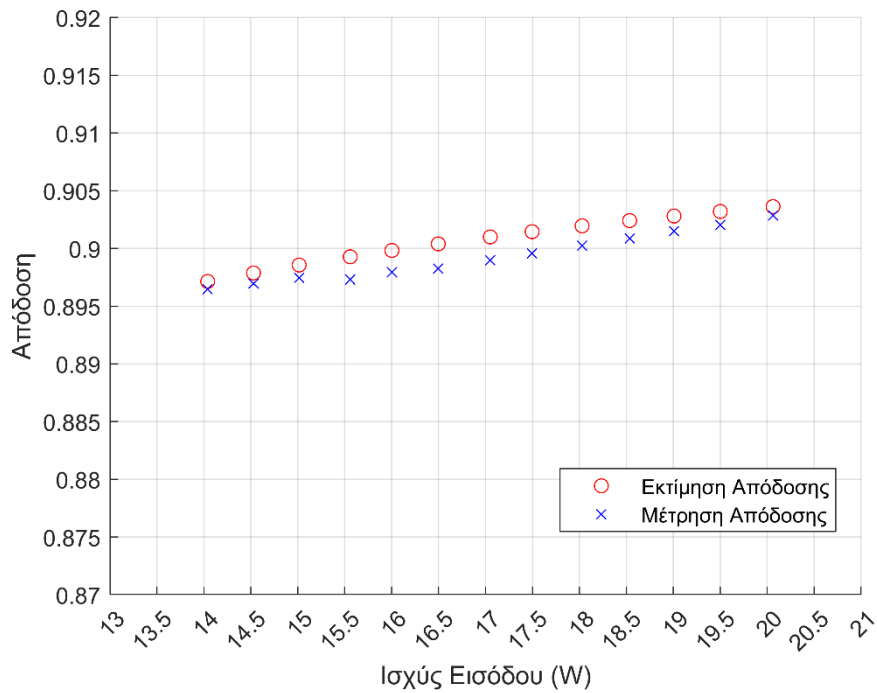
Η απόδοση του μετατροπέα για δύο διαφορετικά σενάρια λειτουργίας στη M2C παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.27 και 3.28 αντίστοιχα. Σε κάθε σενάριο επιλέγεται η τάση της συστοιχίας (V_{Module}) και η διακοπτική συχνότητα και μεταβάλλεται η τάση του συσσωρευτή στο εύρος (2,8–4 V). Σε όλα τα σενάρια το ρεύμα εξισορρόπησης ορίζεται στα 5 A. Στη συνέχεια, η ροή ενέργειας αντιστρέφεται και παρατίθενται τα Σχήματα 3.29, 3.30 που αφορούν τη C2M. Σε όλα τα σενάρια παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις εκτιμήσεις του μοντέλου. Οι πειραματικές μετρήσεις έχουν ληφθεί με το μετρητικό σύστημα LGM500 της εταιρίας ZES Zimmer.



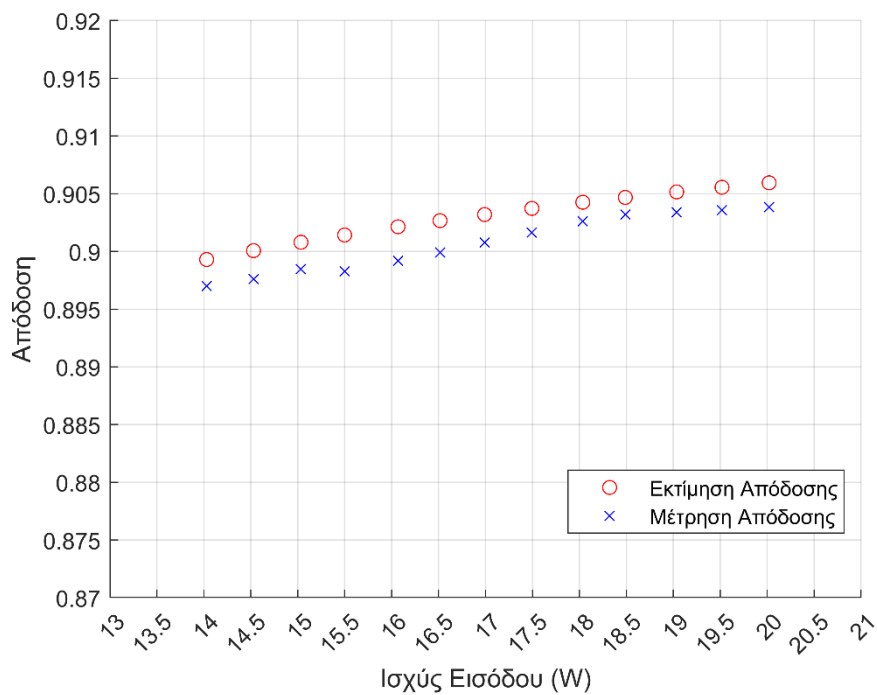
Σχήμα 3.27: Απόδοση συναρτήσει της ισχύος εξόδου για λειτουργία M2C με $V_{Module}=26,4$ V, $f_{sw}=27$ kHz, $I_{Eq}=5$ A.



Σχήμα 3.28: Απόδοση συναρτήσει της ισχύος εξόδου για λειτουργία M2C με $V_{Module}=32$ V, $f_{sw}=29$ kHz, $I_{Eq}=5$ A.



Σχήμα 3.29: Απόδοση συναρτήσει της ισχύος εξόδου για λειτουργία C2M με $V_{Module}=26.4$ V, $f_{sw}=27$ kHz, $I_{Eq}=5$ A.

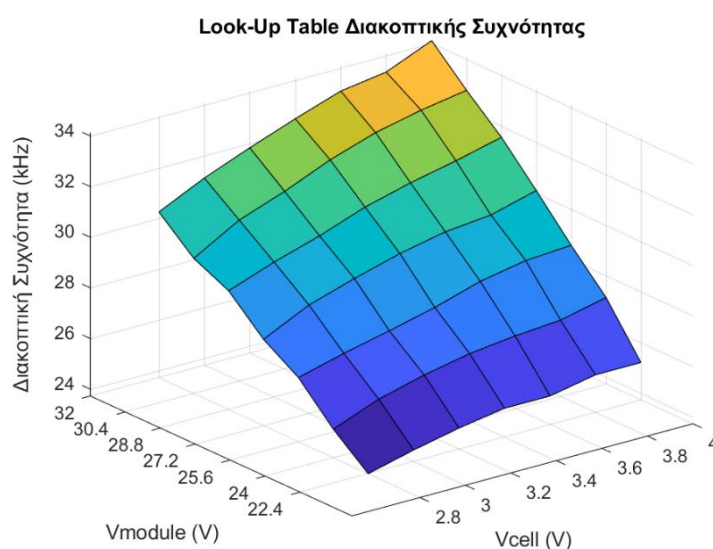


Σχήμα 3.30: Απόδοση συναρτήσει της ισχύος εξόδου για λειτουργία C2M με $V_{Module}=32$ V, $f_{sw}=29$ kHz, $I_{Eq}=5$ A.

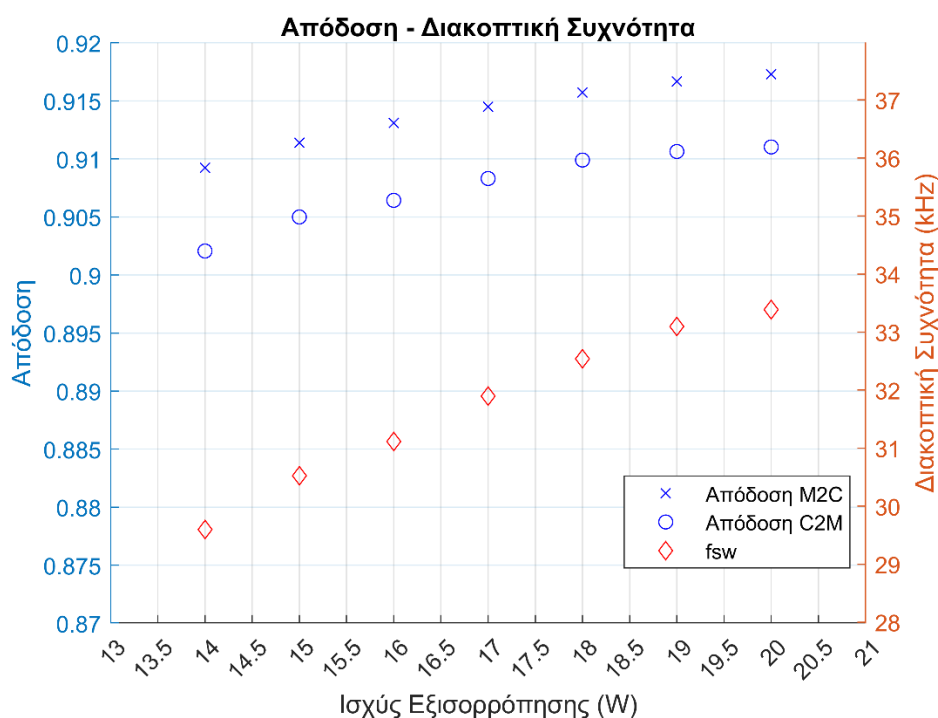
3.5.3 Λειτουργία με μεταβλητή διακοπτική συχνότητα

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές των επιλεγμένων συσσωρευτών, ο μετατροπέας λειτουργεί με τάση ομάδας (V_{Module}) στο εύρος (22,4 – 32 V) και τάση συσσωρευτή (V_{Cell}) στο εύρος (2,8 – 4 V). Είναι προφανές, ότι η λειτουργία με σταθερή διακοπτική συχνότητα οδηγεί σε βελτιστοποίηση της απόδοσης μόνο σε ένα σημείο λειτουργίας που καθορίζεται από τις επιλεγμένες τάσεις συσσωρευτή και ομάδας (ονομαστικές τιμές). Επομένως, για την καλύτερη εκμετάλλευση της προτεινόμενης ανάλυσης και των δυνατοτήτων που προσφέρει ο GA, πραγματοποιείται εκτέλεση του GA εκ νέου, για την εύρεση της διακοπτικής συχνότητας του μετατροπέα που έχει κατασκευαστεί. Συγκεκριμένα, οριστικοποιούνται οι μεταβλητές που αφορούν τον μετασχηματιστή, αφού αυτός είναι πλέον δεδομένος και ως μεταβλητή βελτιστοποίησης τίθεται μόνο η διακοπτική συχνότητα. Συνεπώς, οι τάσεις V_{Module} και V_{Cell} επιλέγονται από το πεδίο τιμών της και για κάθε συνδυασμό της εκτελείται ο GA για την επιλογή της κατάλληλης διακοπτικής συχνότητας με σκοπό να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του μετατροπέα για ρεύμα εξισορρόπησης ίσο με 5 A.

Στο Σχήμα 3.31 παρουσιάζεται η βέλτιστη επιλογή της διακοπτικής συχνότητας για κάθε συνδυασμό τάσεων συσσωρευτή και ομάδας συσσωρευτών. Στο Σχήμα 3.32 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόδοσης, καθώς και διακοπτικής συχνότητας για τις λειτουργίες M2C και C2M για τάση συστοιχίας $V_{Module} = 32\text{ V}$ και ρεύμα εξισορρόπησης $I_{Eq} = 5\text{ A}$. Συγκρινόμενες με τα αποτελέσματα των Σχημάτων 3.28 και 3.30 οι μετρήσεις απόδοσης για μεταβλητή διακοπτική συχνότητα παρουσιάζει αύξηση της τάξης του 0,5 %.



Σχήμα 3.31: Η διακοπτική συχνότητα που οδηγεί σε μεγιστοποίηση της απόδοσης για κάθε συνδυασμό των V_{Module} και V_{Cell} .



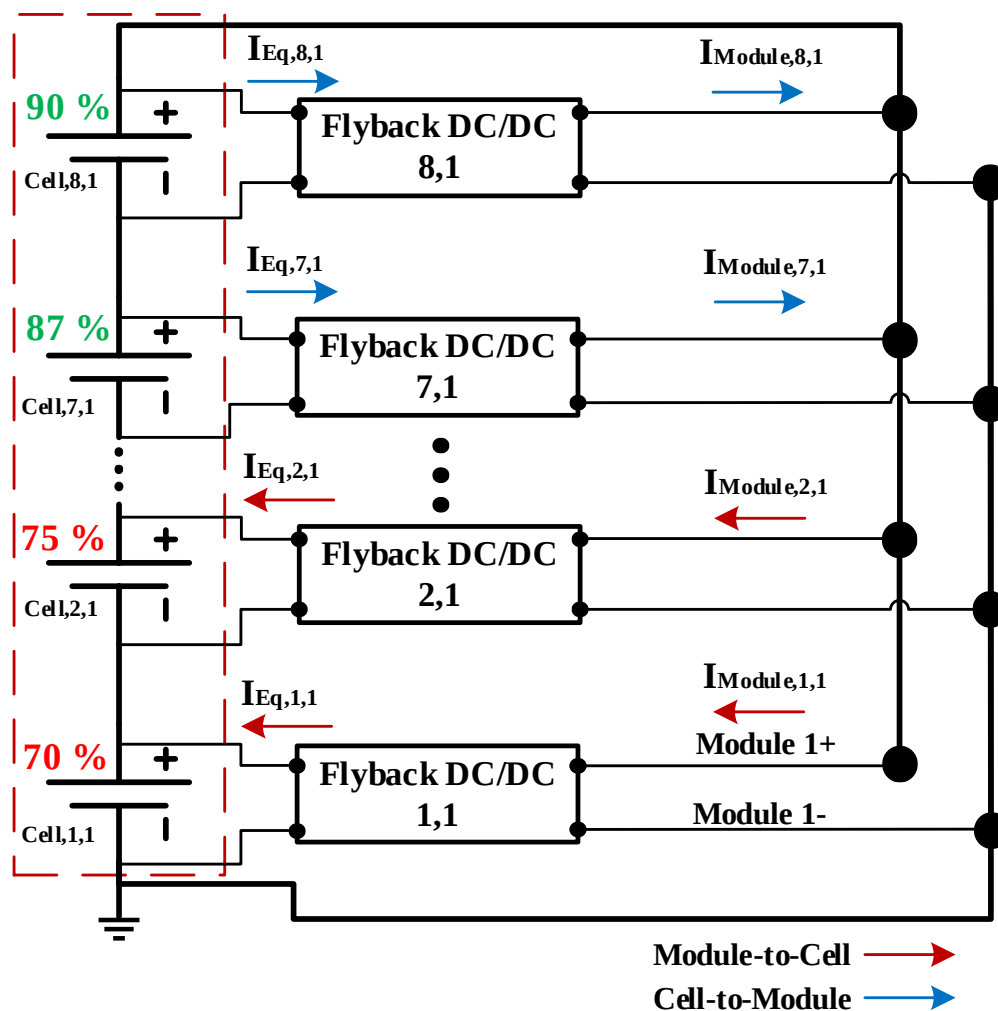
Σχήμα 3.32: Πειραματική μέτρηση της απόδοσης για τις λειτουργίες M2C και C2M με $V_{Module}=32$ V, $I_{Eq}=5$ A, και μεταβλητή διακοπτική συχνότητα σύμφωνα με το Σχήμα 3.31.

3.6 Προσομοίωση λειτουργίας κατά την εξισορρόπηση

Έπειτα από την πειραματική διερεύνηση της ακρίβειας της προτεινόμενης μεθόδου για το σχεδιασμό του μετατροπέα Flyback, πραγματοποιήθηκε, μέσω προσομοίωσης, διερεύνηση της λειτουργίας πολλών BMS κατά την εξισορρόπηση συσσωρευτών. Το σενάριο εφαρμογής που εξετάζεται αφορά μια ομάδα οκτώ συσσωρευτών, ίδιου τύπου με αυτούς που είναι εγκατεστημένοι στο όχημα τύπου Buggy του ΕΗΜΕ (LiFeYPO₄, 90 Ah) (Σχήμα 3.33). Οι στάθμες φόρτισης των συσσωρευτών 7 και 8 καθορίζονται στο 87 % και 90 % αντίστοιχα. Οι συσσωρευτές 3-6 είναι φορτισμένοι στο 80 % και η τάση τους έχει την τιμή των 3,53 V. Οι συσσωρευτές 1 και 2 είναι φορτισμένοι στις στάθμες 70 % και 75 % αντίστοιχα. Επομένως, κατά τη διαδικασία εξισορρόπησης, οι συσσωρευτές 1 και 2 πρέπει να λάβουν ενέργεια, ενώ οι συσσωρευτές 7 και 8 πρέπει να προσφέρουν ενέργεια. Οι συσσωρευτές 3-6 έχουν την επιθυμητή στάθμη φόρτισης, επομένως τα BMS τους δεν τίθενται σε λειτουργία.

Το προφίλ της εξισορρόπησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.34, όπου παρουσιάζονται κυματομορφές μόνο για τους συσσωρευτές 1, 2, 7 και 8 που συμμετέχουν ενεργά στην εξισορρόπηση, ενώ οι συσσωρευτές 3-6 παραλείπονται μιας τα BMS τους είναι ανενεργά. Κάθε Flyback προσφέρει

ή αφαιρεί φορτίο από τον συσσωρευτή του με σταθερό ρεύμα ίσο με 5 A. Αν ο συσσωρευτής πρέπει να εκφορτιστεί, ο Flyback λαμβάνει 5 A από αυτόν και το προσφέρει στη συστοιχία. Αντίθετα, αν ο συσσωρευτής πρέπει να φορτιστεί, ο Flyback δίνει 5 A από τη συστοιχία στον εν λόγω συσσωρευτή.



Σχήμα 3.33: Το σενάριο εξισορρόπησης .

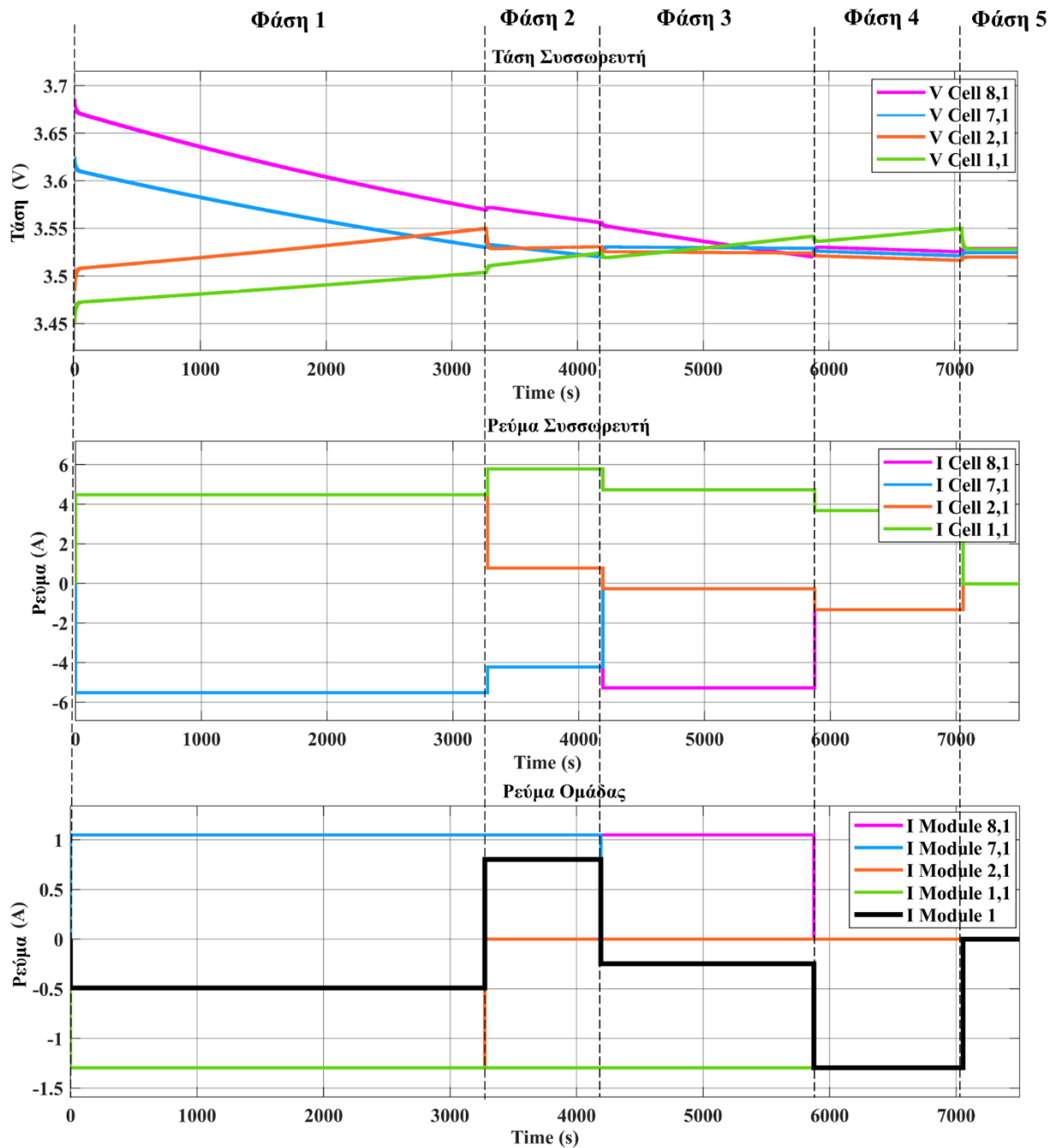
Το παρόν σενάριο εξισορρόπησης πραγματοποιείται σε πέντε φάσεις. Στο επάνω μέρος του Σχήματος 3.34 απεικονίζεται η μεταβολή στην τάση κάθε κελιού, στην ενδιάμεση κυματομορφή παρουσιάζεται το συνολικό ρεύμα του συσσωρευτή, ενώ στο κάτω τμήμα του Σχήματος 3.34 απεικονίζεται το ρεύμα της υψηλής πλευράς κάθε Flyback και το συνολικό ρεύμα της ομάδας (μαύρο χρώμα). Το συνολικό ρεύμα του κάθε κελιού αποτελείται από το άθροισμα του ρεύματος στη χαμηλή πλευρά του Flyback (5 A σε λειτουργία M2C και -5 A σε λειτουργία C2M) και το ρεύμα που διαρρέει την ομάδα (εξίσωση 3.54).

$$i_{Cell,q,m} = i_{Eq,q,m} + i_{Module,m} \quad (3.54)$$

Όπου:

q : ο αριθμός του κελιού στην ομάδα συσσωρευτών.

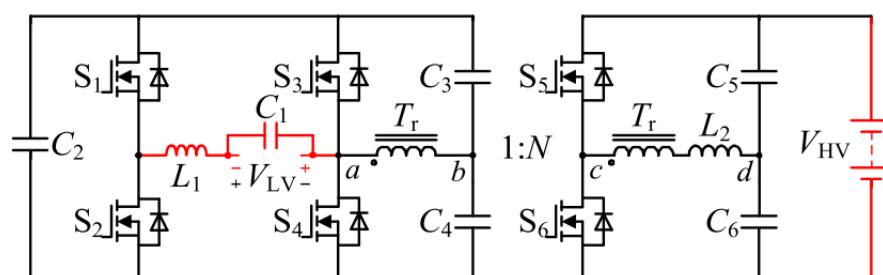
m : ο αριθμός της ομάδας συσσωρευτών.



Σχήμα 3.34: Το προφίλ των τάσεων και των ρευμάτων των συσσωρευτών κατά την εξισορρόπηση.

Κατά τη φάση 1, τα κελιά 7 και 8 εκφορτίζονται, ενώ τα κελιά 1 και 2 φορτίζονται. Στο τέλος της φάσης 1, το κελί 2 αποκτά την επιθυμητή τάση. Κατά τη φάση 2, τα κελιά 7 και 8 εκφορτίζονται, ενώ το κελί 1 φορτίζεται. Στο τέλος της φάσης 2, το κελί 7 αποκτά την επιθυμητή τάση. Στη συνέχεια, κατά τη φάση 3, το κελί 8 εκφορτίζεται, ενώ το κελί 1 φορτίζεται. Η τελευταία φάση εξισορρόπησης είναι η φάση 4, κατά την οποία το κελί 1 φορτίζεται. Στο τέλος της φάσης 4 όλα τα κελιά έχουν την ίδια τάση. Σημειώνεται ότι το σενάριο που παρουσιάζεται αντιπροσωπεύει την περίπτωση μιας ομάδας με έντονες ασυμμετρίες της στάθμης φόρτισης. Παρόλα αυτά, η παράλληλη και αυτόνομη λειτουργία πολλών BMS με υψηλό ρεύμα εξισορρόπησης οδηγεί στην ολοκλήρωση της διαδικασίας εντός δύο ωρών.

Με τον αμφίδρομο μετατροπέα Flyback που παρουσιάστηκε, επιτυγχάνεται ταχεία εξισορρόπηση με μειωμένες απώλειες. Αυτό καθίσταται εφικτό μέσα από την ανάλυση του μετατροπέα λαμβάνοντας υπόψη τις μη ιδανικότητες των στοιχείων, καθώς και τη μεθοδολογία βελτιστοποίησης. Προκειμένου να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής που προτείνεται στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής αυτής, πραγματοποιείται σύγκριση με την αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στην εργασία [12]. Η αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στην [12], αφορά έναν δικατευθυντήριο μετατροπέα για κάθε ομάδα συσσωρευτών, ο οποίος είναι κοινός για όλους τους συσσωρευτές της ομάδας και λειτουργεί με βάση τη ροή ενέργειας M2C. Ο συσσωρευτής που τίθεται προς εξισορρόπηση επιλέγεται με τη χρήση δικτύου διακοπών (switch matrix). Ο εν λόγω μετατροπέας απεικονίζεται στο Σχήμα 3.35.

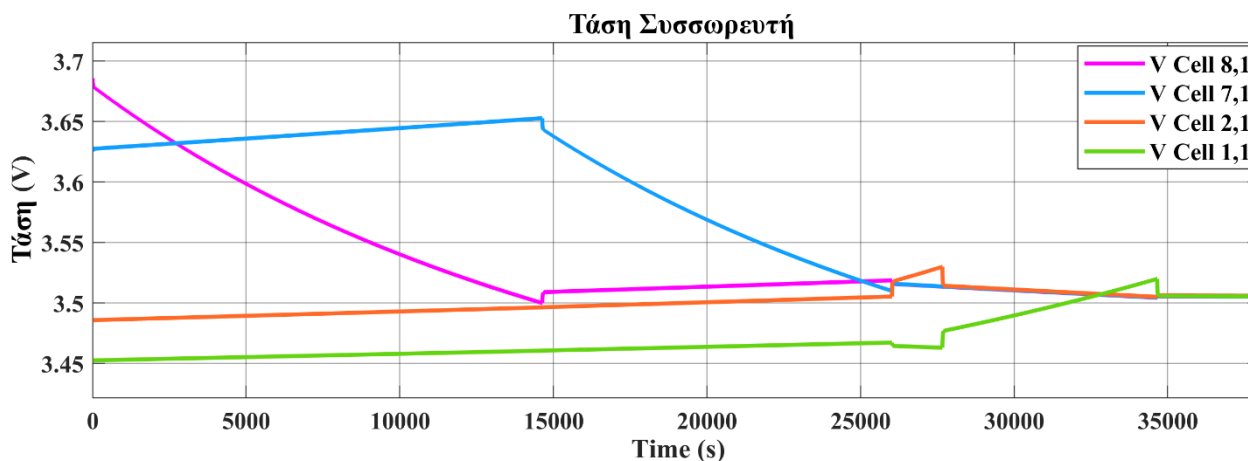


Σχήμα 3.35: Ο μετατροπέας που προτείνεται από την [12].

Το πλεονέκτημα της κοινής χρήσης ενός μετατροπέα για όλη την ομάδα οδηγεί στη μείωση του κόστους κατασκευής και εγκατάστασης μετατροπέων σε κάθε συσσωρευτή. Όμως, προστίθεται το επιπλέον κόστος της εγκατάστασης εξωτερικών διακοπών και κυκλωμάτων για τον έλεγχό τους. Επιπρόσθετα, η αρχιτεκτονική αυτή έχει το μειονέκτημα της εξισορρόπησης της ενέργειας ενός συσσωρευτή κάθε φορά. Έτσι, η συνολική διαδικασία της εξισορρόπησης των συσσωρευτών

ενδέχεται να καθυστερήσει. Επιπλέον, ο μετατροπέας της [12] έχει έξι ημιαγωγικά στοιχεία (τριπλάσια από αυτά του αμφίδρομου Flyback), γεγονός το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία για την ενεργειακή απόδοση του BMS, καθώς μια τυπική κατανάλωση του κυκλώματος παλμοδότησης για κάθε διακόπτη είναι 250 mW. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο μετατροπέας του BMS λειτουργεί σε χαμηλή ισχύ λόγω της χαμηλής τάσης στην πλευρά του συσσωρευτή, οι ενεργειακές απώλειες στα κυκλώματα παλμοδότησης λαμβάνουν τιμές αντίστοιχες με τις απώλειες του μετατροπέα και δεν μπορούν να αμεληθούν.

Στο Σχήμα 3.36 παρουσιάζεται το προφίλ των τάσεων κατά την εξισορρόπηση των συσσωρευτών χρησιμοποιώντας το μετατροπέα που παρουσιάζεται στην εργασία [12] στο ίδιο σενάριο εξισορρόπησης που περιγράφεται παραπάνω και απεικονίζεται στα Σχήματα 3.33, 3.34. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης στο περιβάλλον Simulink όπου αξιολογούνται και οι δύο μετατροπείς, προκύπτει ότι με τον αμφίδρομο Flyback εξισορρόπηση των συσσωρευτών ολοκληρώνεται σε 1,97 h με ενεργειακές απώλειες 11,07 Wh, ενώ ο μετατροπέας που παρουσιάζεται στην εργασία [12] οδηγεί στην ολοκλήρωση της διαδικασίας εξισορρόπησης σε 9,64 h με ενεργειακές απώλειες 29,39 Wh. Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό των απωλειών έχουν ληφθεί υπόψη απώλειες 250 mW ανά κύκλωμα παλμοδότησης όσο λειτουργεί ο εκάστοτε μετατροπέας.



Σχήμα 3.36: Αξιολόγηση του μετατροπέα που προτείνεται στην [12] για το σενάριο εξισορρόπησης που προτείνεται στα Σχήματα 3.33, 3.34.

3.7 Έξυπνος συσσωρευτής με χρήση του OPC-UA

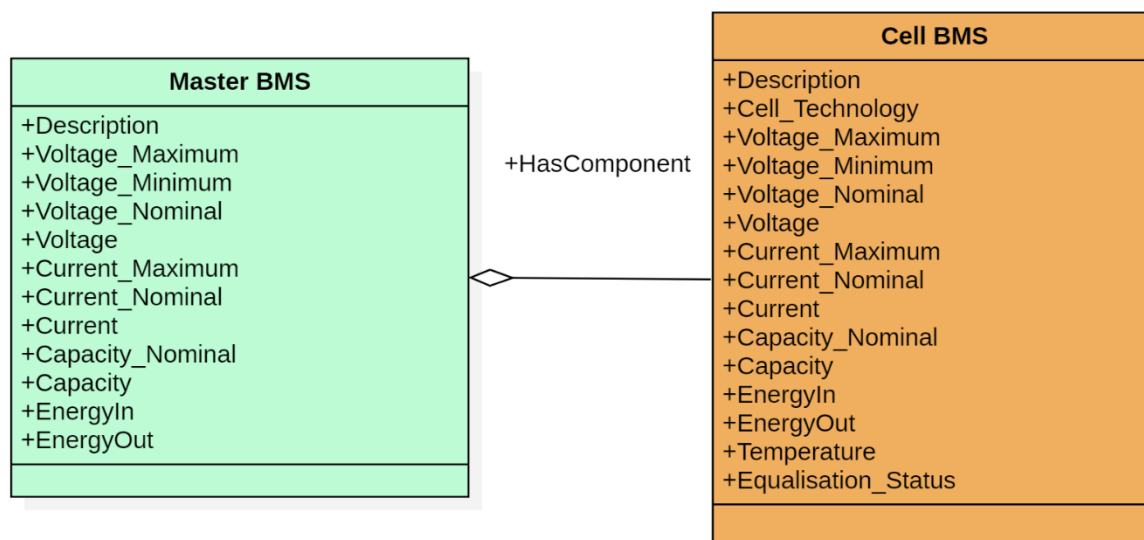
Η χρήση ενός μετατροπέα ισχύος σε κάθε συσσωρευτή προσφέρει ευελιξία κατά την εξισορρόπηση των κελιών μιας συστοιχίας, αφού κάθε ένα κελί μπορεί να φορτίζεται και να

εκφορτίζεται αυτόνομα. Ο μετατροπέας, μαζί με τον μικροελεγκτή που συλλέγει και επεξεργάζεται τα δεδομένα που σχετίζονται με τη λειτουργία του συσσωρευτή, δημιουργούν έναν έξυπνο συσσωρευτή. Ο έξυπνος συσσωρευτής είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα που μπορεί να επικοινωνήσει με τα υπόλοιπα υποσυστήματα ενός ηλεκτρικού οχήματος ή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, στην περίπτωση φθοράς ενός συσσωρευτή ηλεκτρικού οχήματος, αυτός μπορεί να αντικατασταθεί με έναν καινούριο έξυπνο συσσωρευτή. Τότε, ο κεντρικός υπολογιστής του οχήματος θα αναλάβει να αντλήσει αυτόματα τις παραμέτρους του καινούριου συσσωρευτή και να τον εντάξει στις διαδικασίες εξισορρόπησης, χωρίς περαιτέρω παραμετροποίηση.

Οι συσσωρευτές του οχήματος που έχουν υποστεί φθορά, μπορούν με τη σειρά τους να τοποθετηθούν σε σταθερά συστήματα συσσωρευτών που δεν απαιτούν συσσωρευτές που πραγματοποιούν κύκλους βαθιάς εκφόρτισης. Η επαναχρησιμοποίηση φθαρμένων συσσωρευτών σε εφαρμογές που έχουν μειωμένες απαιτήσεις χωρητικότητας, περιγράφεται με τον όρο *second-life batteries*. Η ύπαρξη των έξυπνων συσσωρευτών διευκολύνει την υλοποίηση της φιλοσοφίας των *second-life batteries*, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία υβριδικών συστοιχιών. Σε μια υβριδική συστοιχία, μπορούν να τοποθετηθούν συσσωρευτές διαφορετικών τεχνολογιών, με διαφορετικό επίπεδο υγείας, όπου ο καθένας θα έχει το δικό του BMS. Η χρήση BMS ταχείας εξισορρόπησης, όπως αυτό που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, θα διασφαλίζει ότι οι συσσωρευτές της υβριδικής συστοιχίας είναι πάντοτε εξισορροπημένοι προσφέροντας υψηλή ετοιμότητα στο σύστημα.

Ένα πρότυπο επικοινωνιών που μπορεί να επιτελέσει σημαντικό ρόλο στη διασύνδεση των υποσυστημάτων ενός έξυπνου δικτύου και κατ' επέκταση των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι το *Open Platform Communications – Unified Architecture (OPC-UA)*. Το OPC-UA μπορεί να υποστηρίξει την επικοινωνία μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων και των σταθμών φόρτισης (Κεφάλαιο 6 της διδακτορικής διατριβής). Στην επικοινωνία αυτή, οι πληροφορίες των συσσωρευτών του οχήματος είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τη σωστή λήψη αποφάσεων σχετικά με τη φόρτιση. Επομένως, τα δεδομένα κάθε συσσωρευτή μεταδίδονται μέσω του CAN bus στην κεντρική υπολογιστική μονάδα του οχήματος, από όπου και γίνονται διαθέσιμα στα εξωτερικά συστήματα. Έτσι, δημιουργούνται δύο επίπεδα πληροφοριών, το master BMS που περιγράφει τα συγκεντρωτικά δεδομένα της συστοιχίας, καθώς και το cell BMS που περιγράφει την κατάσταση κάθε συσσωρευτή. Το OPC-UA προσφέρει τη δυνατότητα περιγραφής λεπτομερών μοντέλων πληροφοριών (*information models*) που ενσωματώνουν και τις σχέσεις που διέπουν τα υποσυστήματα του συνολικού συστήματος. Το

μοντέλο πληροφοριών στο OPC-UA που προτείνεται για τις εφαρμογές των BMS παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.37.



Σχήμα 3.37: Το μοντέλο πληροφοριών στο OPC-UA για το BMS.

3.8 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η ανάλυση της λειτουργικής συμπεριφοράς του αμφίδρομου μετατροπέα Flyback για την εφαρμογή του σε M2C BMS, λαμβάνοντας υπόψη μη ιδανικά στοιχεία, προκειμένου να εκτιμηθεί με ακρίβεια το σημείο λειτουργίας. Το μη γραμμικό σύστημα που προκύπτει εισάγεται σε αλγόριθμο βελτιστοποίησης που βασίζεται στο Γενετικό Αλγόριθμο και επιλύεται με αριθμητικές μεθόδους. Έτσι, εξάγονται οι κατασκευαστικές και λειτουργικές παράμετροι του μετατροπέα που οδηγούν σε μεγιστοποίηση της απόδοσης. Στο μη ιδανικό μοντέλο του μετατροπέα εισήχθησαν οι επιδράσεις της σκέδασης, των απωλειών πυρήνα και χαλκού του μετασχηματιστή, καθώς και των απωλειών αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων.

Μέσα από πληθώρα πειραμάτων, υπολογίστηκε το σφάλμα στην εκτίμηση του ρεύματος εξόδου. Το σφάλμα αυτό λαμβάνει τιμές στο εύρος (0,38-2,50 %) που το καθιστά κατά πολύ μικρότερο του σφάλματος που προκύπτει από την ανάλυση θεωρώντας τα στοιχεία του μετατροπέα ιδανικά και βρίσκεται στο εύρος (7,43-15,97 %). Η ακριβής εκτίμηση του σημείου λειτουργίας διαβεβαιώνει ότι ο μετατροπέας θα λειτουργεί πάντοτε στη DCM και θα επιτυγχάνεται το απαιτούμενο ρεύμα εξόδου. Επιπλέον, η ακριβής εκτίμηση του σημείου λειτουργίας καθιστά μη αναγκαία την τοποθέτηση μετρητικού ρεύματος στην πλευρά χαμηλής τάσης. Έτσι μπορεί να μειωθεί περαιτέρω το κόστος του

BMS. Οι αποκλίσεις της προτεινόμενης ανάλυσης σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις οφείλονται στη μοντελοποίηση της επαγωγής σκέδασης και των ωμικών απωλειών μόνο στο πρωτεύον, καθώς και σφάλματα κατά τη μέτρηση των παραμέτρων του μετασχηματιστή (ειδικά της $R_{cu,Sec}$ που λαμβάνει τιμές μικρότερες των 10 mΩ), αλλά και απόκλιση στις παραμέτρους Steinmetz μέσω της μεθόδου προσαρμογής καμπύλης. Επιπλέον, οι διακοπτικοί χρόνοι και η επίδραση της θερμοκρασίας δεν λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο του μη ιδανικού Flyback.

Ο μετατροπέας Flyback είναι ένας απλός, κατασκευαστικά και λειτουργικά, μετατροπέας που προσφέρει αυτόνομη εξισορρόπηση της ενέργειας κάθε συσσωρευτή. Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική, ο Flyback λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος (DCM) με υψηλό ρεύμα εξισορρόπησης και υψηλή απόδοση. Για τη κατασκευή του μετατροπέα απαιτούνται δύο ημιαγωγικοί διακόπτες, ένας αισθητήρας τάσης, ένας αισθητήρας ρεύματος και ένας μετασχηματιστής. Σημειώνεται ότι η επιλογή της αρχιτεκτονικής που θα χρησιμοποιηθεί για το εκάστοτε BMS είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τον τύπο συσσωρευτή που χρησιμοποιείται στην κάθε εφαρμογή. Για συσσωρευτές μεγάλης χωρητικότητας (όπως οι LYP90AHA με 90 Ah ονομαστική χωρητικότητα), ανομοιομορφίες της τάξης του 5 % (4,5 Ah) στη στάθμη φόρτισης απαιτούν χρονοβόρα διαδικασία εξισορρόπησης. Έτσι, αν χρησιμοποιηθεί τοπολογία ταχείας εξισορρόπησης, ο απαιτούμενος χρόνος μειώνεται.

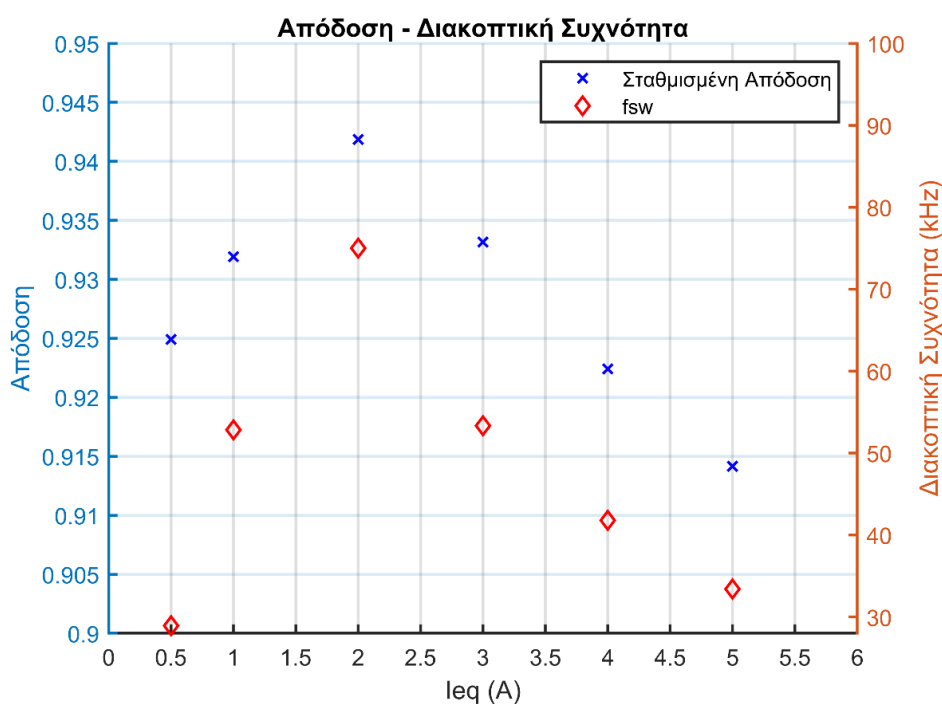
Ιδιαίτερα, σε περιπτώσεις ηλεκτρικών οχημάτων που κάνουν μεγάλα δρομολόγια με μικρές στάσεις, όπως τα φορτηγά ή τα λεωφορεία, οι συσσωρευτές τους καταπονούνται με συχνούς κύκλους βαθιάς εκφόρτισης. Στις περιπτώσεις αυτές, η ταχεία εξισορρόπηση με υψηλή απόδοση κρίνεται απαραίτητη για την επίτευξη υψηλής ετοιμότητας του οχήματος.

Στα διάφορα άρθρα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας που πραγματεύεται το σχεδιασμό ηλεκτρονικών μετατροπέων για BMS, προτείνεται εξισορρόπηση με διαφορετικό ρεύμα ([8], [11], [12], [20], [23], [25]). Έτσι, προκειμένου να πραγματοποιηθεί καλύτερη σύγκριση, εκτελέστηκε ο GA για τον Flyback που υλοποιήθηκε, ώστε να υπολογιστεί η βέλτιστη διακοπτική συχνότητα που θα οδηγήσει στη μέγιστη σταθμισμένη απόδοση για διάφορες τιμές του ρεύματος εξόδου και τάσεις λειτουργίας $V_{Cell} = 4\text{ V}$ και $V_{Module} = 32\text{ V}$ (Σχήμα 3.38). Η μέγιστη σταθμισμένη απόδοση που επιτεύχθηκε είναι 94,19 % για ρεύμα εξισορρόπησης 2 A.

Στον Πίνακα 3.8 πραγματοποιείται σύγκριση του μετατροπέα που κατασκευάστηκε, με μετατροπείς από την πρόσφατη βιβλιογραφία. Η σύγκριση βασίζεται κυρίως στην απόδοση του μετατροπέα και το ρεύμα εξισορρόπησης. Δεδομένου ότι η διατριβή αυτή επιδιώκει την ταχεία

εξισορρόπηση, οι τιμές απόδοσης που αναγράφονται στον Πίνακα 3.8 αφορούν το σημείο λειτουργίας με μέγιστο ρεύμα εξισορρόπησης.

Επιπλέον, ένα συνολικό σύστημα BMS για γρήγορη εξισορρόπηση, πρέπει λειτουργεί με όσον το δυνατό λιγότερους περιορισμούς. Τα κυριότερα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιεί είναι η δυνατότητα εξισορρόπησης μη γειτονικών κελιών, αλλά και η δυνατότητα εξισορρόπησης πολλών κελιών ταυτόχρονα. Ο ποιοτικός δείκτης του Πίνακα 3.8 που περιγράφει κατά πόσον το BMS καλύπτει τα κριτήρια αυτά ονομάζεται ‘ευελιξία’. Οι τοπολογίες που βασίζονται στην εξισορρόπηση γειτονικών κελιών (Adjacent Cell-to-Cell) [8] χαρακτηρίζονται από ‘καλή’ ευελιξία, αλλά όχι ‘άριστη’. Ο χαρακτηρισμός αυτός δόθηκε στις τοπολογίες αυτές διότι αν απαιτηθεί εξισορρόπηση μη γειτονικών κελιών, η ενέργεια θα πρέπει να μεταφερθεί μέσω των μετατροπέων που βρίσκονται στα ενδιάμεσα κελιά, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση της διαδικασίας και τη μη επιθυμητή ροή ενέργειας στα ενδιάμεσα κελιά. Αντίστοιχα, οι τοπολογίες που βασίζονται στη χρήση ενός μετατροπέα ή ενός κοινού μετασχηματιστή για όλα τα κελιά της ομάδας ([11], [12], [20], [23]), χαρακτηρίζονται από ‘μέτρια’ ευελιξία, καθώς οδηγούν σε χρονοβόρες διαδικασίες εξισορρόπησης, όπως φάνηκε και στη σύγκριση που έγινε με την [12]. Αντιθέτως, η χρήση ενός μετατροπέα για κάθε συσσωρευτή ([25], καθώς και σε αυτή τη διατριβή) προσφέρει ‘υψηλή’ ευελιξία.



Σχήμα 3.38: Πειραματικές μετρήσεις της σταθμισμένης απόδοσης κατά τις λειτουργίες M2C-C2M με $V_{Module}=32$ V, $V_{Cell}=4$ V, μεταβλητό I_{Eq} και μεταβλητή διακοπτική συχνότητα.

Πίνακας 3.8: Σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

	Αρχιτεκτονική *	Απόδοση (%)	Ρεύμα Εξισορρόπησης (A)	Αριθμός Ημιαγωγών	Αριθμός Μετασχημα- τιστών	Ευελιξία Εξισορρόπη- σης
[8]	M2M-C2C	90.40	7.5	$(11n/8)-1$	$n/24$	Καλή
[11]	C2C	89.80	1.5	$2n+2$	1	Μέτρια
[12]	P2C	86.80	3	$2n+8$	1	Μέτρια
[20]	C2C	-	4	n	$n/4$	Μέτρια
[21]	C2C	87.00	2.3	n	$n/12$	Καλή
[22]	C2C	80.40	0.2	$2n+6$	1	Μέτρια
[23]	C2C	80.67	2	$2n$	$n/6$	Μέτρια
[25]	P2C	70.00	2.5	$2n$	n	Υψηλή
[87]	M2C	81.60	2	$2n+4$	1 ανά ομάδα	Μέτρια
[88]	C2C	85.60	0.77	n	$n/6$	Μέτρια
[17]	C2C	89.00	2	$2n$	N	Μέτρια
[89]	C2M	88.00	0.15	$4n-4$	1 ανά ομάδα	Χαμηλή
Προτεινό- μενη	M2C	91.73	5	$2n$	n	Υψηλή

*P2C: Pack to Cell, M2M: Module-to-Module, C2C: Cell-to-Cell, M2C: Module-to-Cell.

Συμπερασματικά, η προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης της απόδοσης του μετατροπέα Flyback, οδηγεί στην υλοποίηση ενός BMS που προσφέρει ταχεία εξισορρόπηση με υψηλή απόδοση. Η χρήση του ενδείκνυται για συσσωρευτές υψηλής χωρητικότητας που τοποθετούνται σε ηλεκτρικά οχήματα βαρέως τύπου ή σε υποδομές αποθήκευσης ενέργειας του δικτύου (ή μικροδικτύων). Στις περιπτώσεις αυτές, η διασύνδεση M2C με έναν μετατροπέα σε κάθε κελί προσφέρει το πλεονέκτημα της υψηλής ευελιξίας κατά την εξισορρόπηση, αυξάνοντας έτσι το κατασκευαστικό κόστος του συσσωρευτή. Με τη χρήση του μετατροπέα Flyback, το κόστος κατασκευής του 'έξυπνου' συσσωρευτή διατηρείται σε επίπεδα που επιτρέπουν τη εφαρμογή αυτού του τύπου BMS σε βιομηχανικές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μέθοδος χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών. Έχοντας μελετήσει και κατασκευάσει το μετατροπέα Flyback που πραγματοποιεί εξισορρόπηση σε ένα συσσωρευτή, σύμφωνα με την διασύνδεση M2C, απαιτείται η ανάπτυξη μεθόδου διαχείρισης όλων των BMS που βρίσκονται στην ομάδα των συσσωρευτών, ώστε να εξασφαλισθεί ότι όλοι οι συσσωρευτές βρίσκονται στην ίδια στάθμη φόρτισης. Ο κύριος στόχος που τίθεται για το χρονοπρογραμματισμό είναι η εξισορρόπηση με τις ελάχιστες απώλειες. Επίσης, η μέθοδος εξισορρόπησης πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση της συστοιχίας, ώστε να διασφαλιστεί ότι κατά τη φόρτιση κανένα κελί δεν θα ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση, ενώ κατά την εκφόρτιση κανένα κελί δεν θα αποκτήσει χαμηλότερη τάση από την επιτρεπτή.

Αρχικά, πραγματοποιείται μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος εξισορρόπησης, ώστε να εξαχθούν οι απαραίτητες μαθηματικές σχέσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζεται υβριδική μέθοδος χρονοπρογραμματισμού κατά την οποία εφαρμόζονται δύο αλγόριθμοι, ο γενετικός αλγόριθμος (GA) και ο αλγόριθμος interior-point που ανήκει στην οικογένεια των αλγορίθμων καθόδου κλίσης (gradient descent). Έπειτα, στο περιβάλλον Simulink πραγματοποιείται αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου εξισορρόπησης για διάφορα σενάρια συσσωρευτών με διαφορετική SoC.

4.2 Μαθηματική μοντελοποίηση

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αρχικά η μαθηματική μοντελοποίηση του μετατροπέα, κάνοντας χρήση της ανάλυσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, ώστε να συμπεριληφθούν οι μη ιδανικότητες των στοιχείων που τον απαρτίζουν. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί για την εξισορρόπηση. Σημειώνεται, ότι δύναται να υπάρξουν διαφορετικές στρατηγικές εξισορρόπησης. Αυτή που επιλέγεται στην παρούσα διατριβή αφορά τη διαίρεση του χρόνου εξισορρόπησης σε ακέραιο αριθμό χρονικών διαστημάτων και την επιλογή του ρεύματος εξισορρόπησης για κάθε Flyback και κάθε χρονικό διάστημα, με σκοπό την

ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών που οφείλονται στη διαδικασία της εξισορρόπησης. Έτσι, η διαδικασία της εξισορρόπησης αποτελεί ένα πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε λόγω της χαμηλής πολυπλοκότητας σε αριθμητικές πράξεις, κριτήριο που είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά την εφαρμογή της σε πραγματικά συστήματα.

4.2.1 Μοντέλο μετατροπέα Flyback

Η ανάλυση του μετατροπέα Flyback που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 της διατριβής, οδηγεί στην ανάγκη επίλυσης ενός μη γραμμικού συστήματος για την εκτίμηση του σημείου λειτουργίας του μετατροπέα σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.26)-(3.35). Έχοντας ολοκληρώσει το σχεδιασμό του μετατροπέα, είναι πλέον γνωστές οι τιμές των στοιχείων που τον απαρτίζουν, καθώς και η συχνότητα παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων (Πίνακας 3.1).

Κατά τη λειτουργία του μετατροπέα μεταβάλλονται οι τιμές των τάσεων εισόδου και εξόδου, καθώς και η επιθυμητή τιμή του ρεύματος εξισορρόπησης (ρεύμα πλευράς χαμηλής τάσης). Συνεπώς, για να συμπεριληφθούν τα αποτελέσματα των απωλειών του μετατροπέα για κάθε κατάσταση λειτουργίας πρέπει να επιλυθεί το σύστημα των προαναφερθεισών εξισώσεων (3.26)-(3.35). Όμως, η επίλυση του συστήματος αυτού είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα ώστε να εισαχθεί σε αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού.

Για το λόγο αυτό, απαιτείται να εξαχθούν απλοποιημένες σχέσεις που οδηγούν στον υπολογισμό του ρεύματος στην πλευρά της ομάδας σύμφωνα με την τάση στην πλευρά του κελιού, την τάση στην πλευρά της ομάδας και το ρεύμα στην πλευρά του κελιού (ρεύμα εξισορρόπησης). Οι σχέσεις αυτές εξάγονται με τη μέθοδο προσαρμογής καμπύλης (curve fitting) για τις λειτουργίες M2C και C2M, όπως παρουσιάζεται στις (4.1) και (4.2). Συγκεκριμένα, επιλύεται το σύστημα εξισώσεων (3.26)-(3.35) για πληθώρα καταστάσεων λειτουργίας του μετατροπέα, ώστε να ληφθεί η τιμή του ρεύματος στην πλευρά της ομάδας για κάθε κατάσταση. Έπειτα, χρησιμοποιώντας μέθοδο προσαρμογής καμπύλης δευτέρου βαθμού, υπολογίζονται οι συντελεστές του πολωνύμου που οδηγούν στον υπολογισμό του ρεύματος I_{Module} για τις λειτουργίες M2C και C2M. Τέλος, οι απώλειες του μετατροπέα για λειτουργία M2C και C2M υπολογίζονται σύμφωνα με τις (4.3) και (4.4) αντίστοιχα.

$$\begin{aligned}
I_{Module,i,j,k,M2C} = & 1,228 \cdot 10^{-1} \cdot V_{Cell,i,j} - 1,68 \cdot 10^{-2} \cdot V_{Module,i} - 4,6 \cdot 10^{-3} \\
& \cdot (V_{Module,i} \cdot V_{Cell,i,j}) + 1,422 \cdot 10^{-1} \cdot I_{Eq,i,j,k} + 4,05 \cdot 10^{-2} \cdot (I_{Eq,i,j,k} \cdot V_{Cell,i,j}) \\
& - 5,4 \cdot 10^{-3} \cdot (I_{Eq,i,j,k} \cdot V_{Module,i}) + 9,7 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot I_{Eq,i,j,k}^2 + 6,0382 \\
& \cdot 10^{-4} \cdot V_{Module,i}^2 + 1,3994 \cdot 10^{-4} \cdot V_{Cell,i,j}^2
\end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
I_{Module,i,j,k,C2M} = & 1,041 \cdot 10^{-1} \cdot V_{Cell,i,j} - 1,21 \cdot 10^{-2} \cdot V_{Module,i} - 3,8 \cdot 10^{-3} \\
& \cdot (V_{Module,i} \cdot V_{Cell,i,j}) + 1,143 \cdot 10^{-1} \cdot I_{Eq,i,j,k} + 3,44 \cdot 10^{-2} \cdot (I_{Eq,i,j,k} \cdot V_{Cell,i,j}) \\
& - 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot (I_{Eq,i,j,k} \cdot V_{Module,i}) - 1,4 \cdot 10^{-2} - 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot I_{Eq,i,j,k}^2 + 4,5398 \\
& \cdot 10^{-4} \cdot V_{Module,i}^2 - 1,1124 \cdot 10^{-4} \cdot V_{Cell,i,j}^2
\end{aligned} \quad (4.2)$$

$$P_{Loss,i,j,k,M2C} = V_{Module,i} \cdot I_{Module,i,j,k,M2C} - V_{Cell,i,j} \cdot I_{Eq,i,j,k} \quad (4.3)$$

$$P_{Loss,i,j,k,C2M} = V_{Cell,i,j} \cdot I_{Eq,i,j,k} - V_{Module,i} \cdot I_{Module,i,j,k,C2M} \quad (4.4)$$

όπου,

i : ο αριθμός της ομάδας.

j : ο αριθμός του κελιού εντός της ομάδας.

k : ο αριθμός του χρονικού διαστήματος.

$V_{Cell,i,j}$: Η μέση τάση του κελιού κατά το χρονικό διάστημα της εξισορρόπησης.

$V_{Module,i}$: Η μέση τάση της ομάδας κατά το χρονικό διάστημα της εξισορρόπησης.

$I_{Eq,i,j,k}$: Το ρεύμα εξισορρόπησης, για τον μετατροπέα Flyback που είναι συνδεδεμένος στο κελί j της ομάδας i , για το χρονικό διάστημα εξισορρόπησης k .

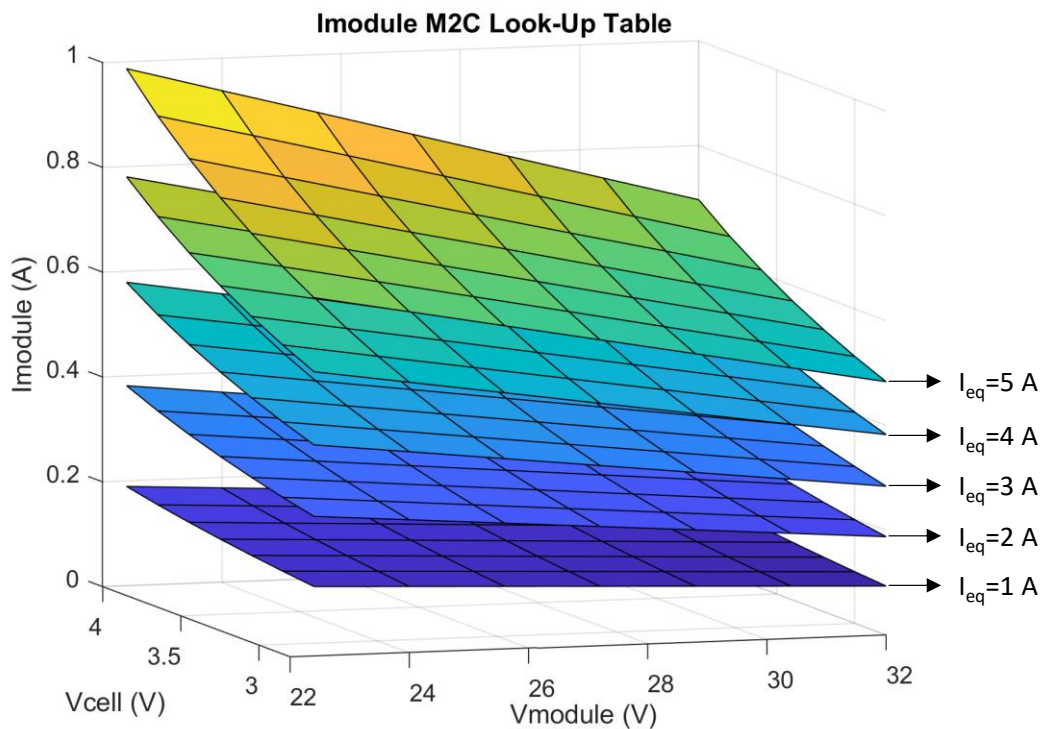
$I_{Module,i,j,k,M2C}, I_{Module,i,j,k,C2M}$: Το ρεύμα στην πλευρά της ομάδας, για τον μετατροπέα Flyback που είναι συνδεδεμένος στο κελί j της ομάδας i , για το χρονικό διάστημα εξισορρόπησης k , για λειτουργία M2C και C2M αντίστοιχα.

$P_{Loss,i,j,M2C}, P_{Loss,i,j,C2M}$: Οι ενεργειακές απώλειες για τον μετατροπέα Flyback που είναι συνδεδεμένος στο κελί j της ομάδας i , για το χρονικό διάστημα εξισορρόπησης k , για λειτουργία M2C και C2M αντίστοιχα.

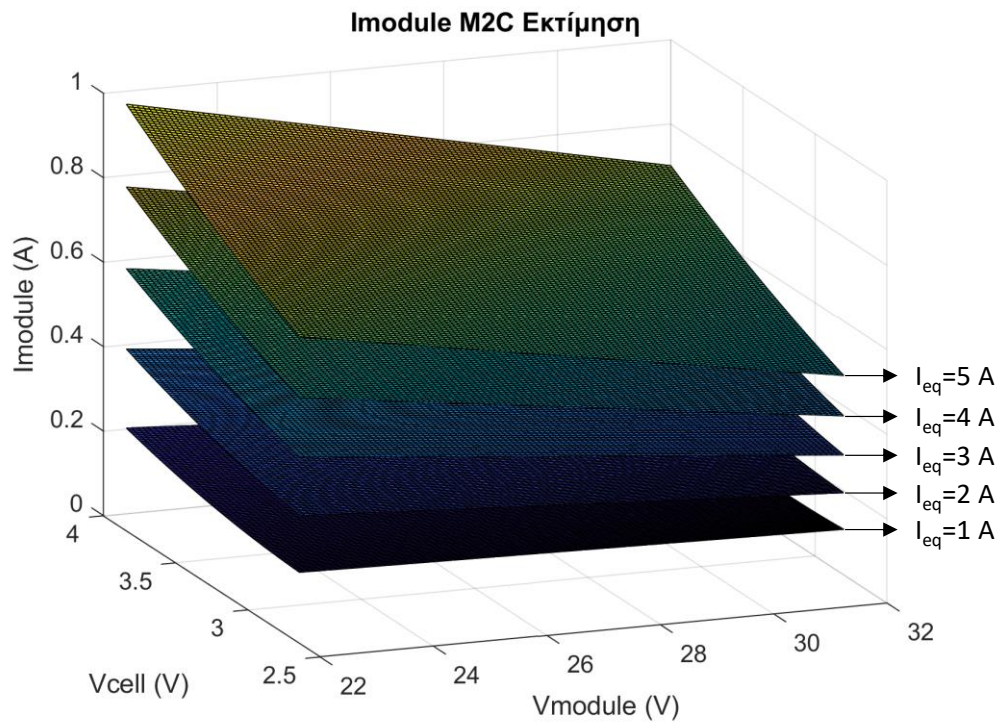
Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου προσαρμογής καμπύλης, με σκοπό την εκτίμηση του ρεύματος I_{Module} για τις δύο καταστάσεις λειτουργίας M2C και C2M παρουσιάζονται υπό μορφή γραφήματος στα Σχήματα 4.1 και 4.3, με το ρεύμα εξισορρόπησης να αποτελεί παράμετρο. Συνεπώς, έχει παραχθεί μια καμπύλη για κάθε διακριτή τιμή του ρεύματος

εξισορρόπησης στο εύρος (1, 5 A). Στα γραφήματα αυτά, είναι ορατά τα επίπεδα των τάσεων στα άκρα του μετατροπέα για τα οποία επιλύθηκε το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων (3.26)-(3.35).

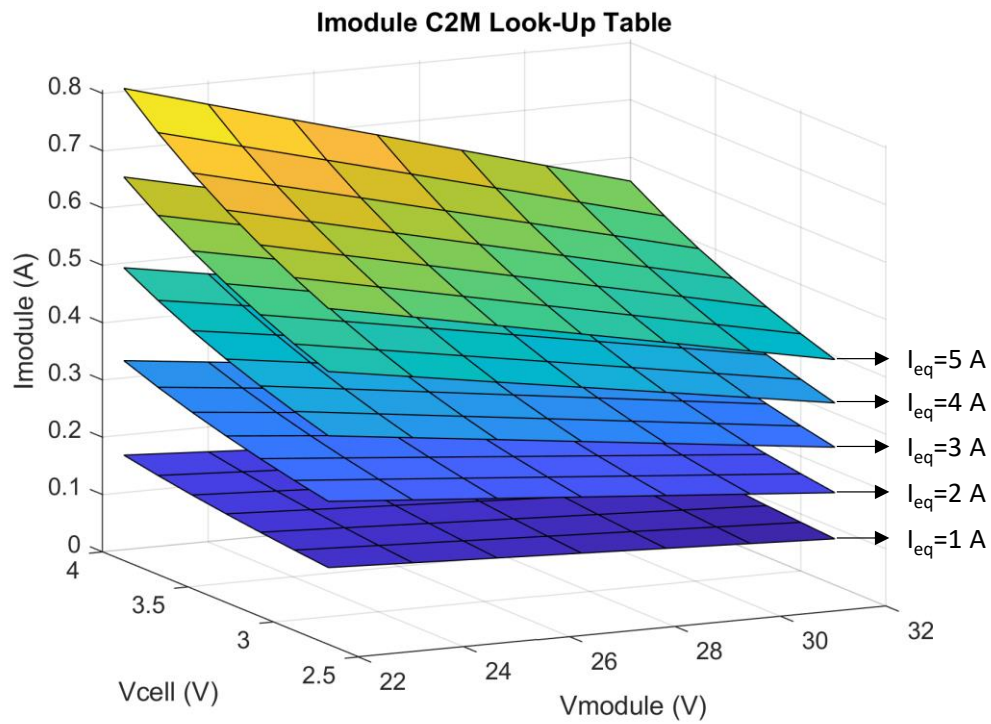
Στα Σχήματα 4.2 και 4.4 παρουσιάζονται υπό μορφή γραφήματος τα αποτελέσματα της μεθόδου προσαρμογής καμπύλης σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.1) και (4.2). Όμοια με τα Σχήματα 4.1 και 4.3, στα Σχήματα 4.2 και 4.4 το ρεύμα εξισορρόπησης εισάγεται ως παράμετρος και λαμβάνει διακριτές τιμές στο εύρος (1, 5 A). Επιπλέον, προκειμένου να φανεί σχηματικά η ακρίβεια της εκτίμησης της συνάρτησης I_{Module} ως προς τις μεταβλητές I_{eq} , V_{Module} , V_{Cell} , τα Σχήματα 4.5 και 4.6 απεικονίζουν σε κοινό σύστημα αξόνων τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσαρμογή καμπύλης και τα αποτελέσματα της μεθόδου για ρεύμα εξισορρόπησης που ισούται με 5 A.



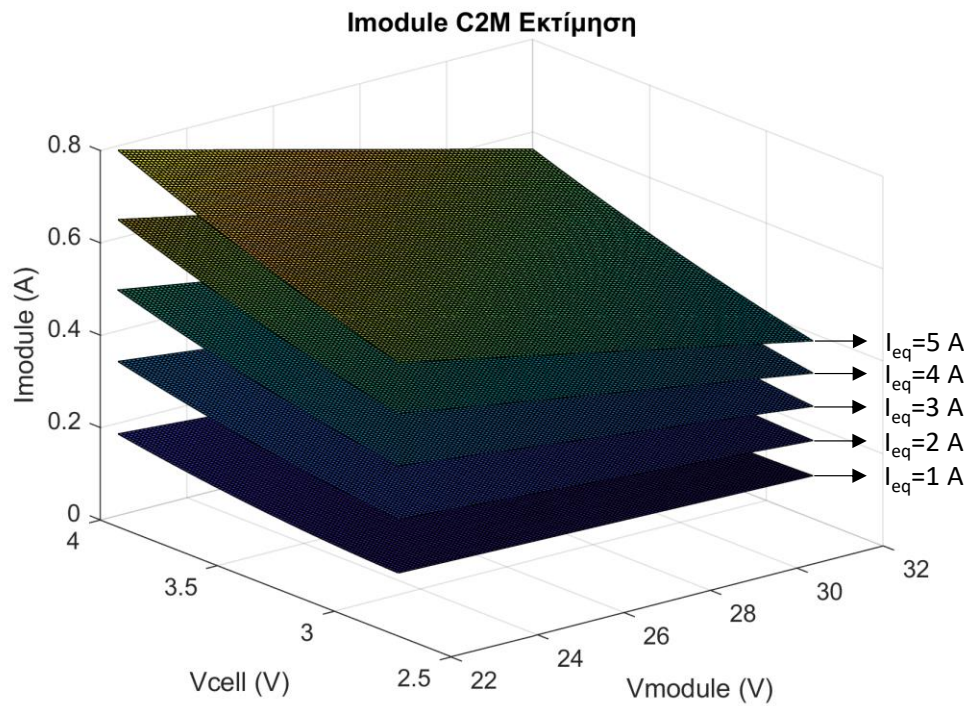
Σχήμα 4.1: Τα διακριτά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του $I_{Module,M2C}$.



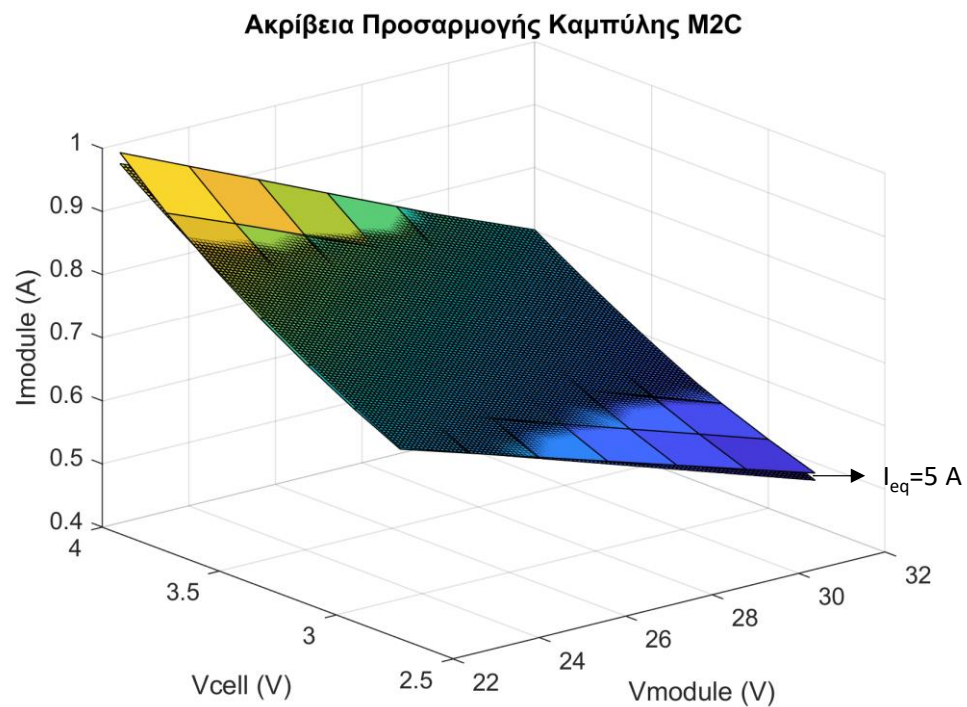
Σχήμα 4.2: Τα αποτελέσματα της μεθόδου προσαρμογής καμπύλης για την εκτίμηση του $I_{Module,M2C}$.



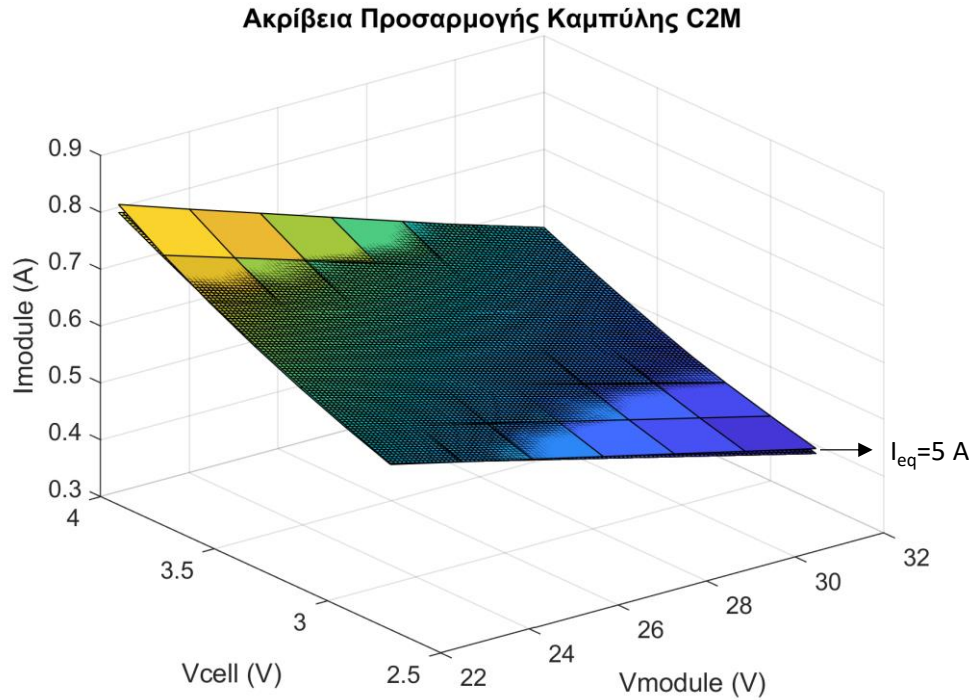
Σχήμα 4.3: Τα διακριτά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του $I_{Module,C2M}$.



Σχήμα 4.4: Τα αποτελέσματα της μεθόδου προσαρμογής καμπύλης για την εκτίμηση του $I_{Module,C2M}$.



Σχήμα 4.5: Σύγκριση της προσεγγιστικής καμπύλης και των διακριτών σημείων για τη λειτουργία M2C.



Σχήμα 4.6: Σύγκριση της προσεγγιστικής καμπύλης και των διακριτών σημείων για τη λειτουργία C2M.

4.2.2 Αντικειμενική συνάρτηση και περιοριστικές συνθήκες

Ο χρονοπρογραμματισμός εξισορρόπησης πραγματοποιείται για κάθε ομάδα συσσωρευτών ανεξάρτητα. Η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης προκύπτει από το σύνολο των απωλειών για τα χρονικά διαστήματα της εξισορρόπησης. Πέρα από τις απώλειες στους μετατροπείς, λαμβάνονται υπόψη και οι απώλειες λόγω της εν σειρά παρασιτικής αντίστασης των συσσωρευτών. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες στο κύκλωμα παλμοδότησης, καθώς η τυπική τιμή των 250 mW ανά κύκλωμα παλμοδότησης για μετατροπείς χαμηλής ισχύος οδηγεί σε απώλειες που είναι συγκρίσιμες με τις απώλειες στα στοιχεία του μετατροπέα.

Ανεξάρτητες μεταβλητές αποτελούν το ρεύμα εξισορρόπησης ($I_{Eq,i,j,k}$) για κάθε συσσωρευτή j της υπό διερεύνηση ομάδας i και χρονικό διάστημα k , ο συνολικός χρόνος εξισορρόπησης t , καθώς και η δυαδική μεταβλητή $FlybackStatus_{i,j,k}$ που δείχνει αν ο εκάστοτε μετατροπέας λειτουργεί για το εν λόγω χρονικό διάστημα.

Η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται στην (4.5). Σημειώνεται ότι το ρεύμα κάθε Flyback στην πλευρά της ομάδας ($I_{Module,i,j,k}$) πρέπει να εισαχθεί στην 4.5 με θετικό πρόσημο για τη λειτουργία C2M, ενώ για τη λειτουργία M2C πρέπει να εισαχθεί με αρνητικό πρόσημο. Αντίστοιχα, το ρεύμα εξισορρόπησης ($I_{Eq,i,j,k}$) εισάγεται με θετικό πρόσημο κατά τη λειτουργία M2C και με αρνητικό

πρόσημο κατά τη λειτουργία C2M. Έτσι, θα προκύψει το συνιστάμενο ρεύμα κάθε κελιού και συνολικά της ομάδας για κάθε χρονικό διάστημα k .

$$E_{Loss,total} = \left(\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J |V_{Module,i} \cdot I_{Module,i,j,k} - V_{Cell,i,j} \cdot I_{Eq,i,j,k}| + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (I_{Module,i,k} + I_{Eq,i,j,k})^2 \cdot R_{Cell} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J P_{Driver} \cdot FlybackStatus_{i,j,k} \right) \cdot \frac{t}{K} \quad (4.5)$$

όπου,

K : Ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων στα οποία διαιρείται ο χρόνος εξισορρόπησης.

t : Ο συνολικός χρόνος εξισορρόπησης.

J : Ο αριθμός των κελιών στην κάθε ομάδα.

R_{Cell} : Η εν σειρά παρασιτική αντίσταση κάθε συσσωρευτή.

P_{Driver} : Οι απώλειες στο κύκλωμα παλμοδότησης.

$FlybackStatus_{i,j,k}$: Δυαδική μεταβλητή που λαμβάνει τις τιμές 1 και 0 αν ο μετατροπέας Flyback που είναι συνδεδεμένος στο κελί j της ομάδας i , για το χρονικό διάστημα εξισορρόπησης k είναι ενεργοποιημένος ή απενεργοποιημένος αντίστοιχα.

Οι περιορισμοί που τίθενται κατά την εκτέλεση της ρουτίνας βελτιστοποίησης αφορούν τα όρια ρεύματος για κάθε μετατροπέα Flyback, καθώς και τα όρια του φορτίου που μπορεί να αποθηκευτεί σε κάθε συσσωρευτή (4.6, 4.7). Όσον αφορά την (4.7), οι τιμές των ρευμάτων πρέπει να εισαχθούν με το κατάλληλο πρόσημο, καθώς κάθε συνιστώσα μπορεί να συνεισφέρει είτε σε φόρτιση του συσσωρευτή είτε σε εκφόρτιση. Συνεπώς, η τιμή του $I_{Eq,i,j,k}$ λαμβάνει θετικό πρόσημο για τη λειτουργία M2C, ενώ για τη λειτουργία C2M λαμβάνει αρνητικό πρόσημο. Αντίθετα, το $I_{Module,i,j,k}$ λαμβάνει αρνητικό πρόσημο για τη λειτουργία M2C, ενώ για τη λειτουργία C2M λαμβάνει θετικό πρόσημο. Αν η συστοιχία φορτίζεται, το $I_{Stack,Avg}$ υποδηλώνει το ρεύμα φόρτισης. Αν η συστοιχία εκφορτίζεται, το ρεύμα $I_{Stack,Avg}$ υποδηλώνει το ρεύμα προς το εξωτερικό φορτίο.

$$0 \leq I_{Eq,i,j,k} \leq MaxFlCurrent \quad (4.6)$$

$$Ah_{Min} \leq CellAh_{i,j} \leq Ah_{Max} \Rightarrow$$

$$Ah_{Min} \leq CellAh_{i,j,0} + \left(\sum_{k=1}^K I_{Eq,i,j,k} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J I_{Module,i,j,k} \right) \cdot \frac{t}{3600 \cdot K} + I_{Stack,Avg} \frac{t}{3600} \leq Ah_{Max} \quad (4.7)$$

όπου,

$MaxFlCurrent$: Το μέγιστο ρεύμα εξισορρόπησης.

Ah_{Min}, Ah_{Max} : Τα αποδεκτά όρια του φορτίου του συσσωρευτή σε Ah μετά το πέρας της εξισορρόπησης.

$CellAh_{i,j,0}$: Το ηλεκτρικό φορτίο του συσσωρευτή σε Ah κατά την εκκίνηση της εξισορρόπησης.

$CellAh_{i,j}$: Το ηλεκτρικό φορτίο του συσσωρευτή σε Ah μετά το πέρας της εξισορρόπησης.

$I_{Stack,Avg}$: Το συνολικό μέσο ρεύμα της συστοιχίας (φόρτιση ή εκφόρτιση) κατά το χρονικό διάστημα που διαρκεί η εξισορρόπηση.

4.3 Υβριδική μέθοδος χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης

Η αντικειμενική συνάρτηση που περιγράφεται από την (4.5) χαρακτηρίζεται από ανεξάρτητες μεταβλητές από τις οποίες κάποιες λαμβάνουν συνεχείς τιμές, ενώ άλλες λαμβάνουν διακριτές τιμές. Επομένως, το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης είναι ένα πρόβλημα μεικτών μεταβλητών (mixed-integer).

Προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα, ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα. Κατά το πρώτο επίπεδο επιλέγεται η τιμή των δυαδικών μεταβλητών $FlybackStatus_{i,j,k}$ που καθορίζουν ποιοι μετατροπείς θα τίθενται σε λειτουργία στο εκάστοτε χρονικό διάστημα. Η επιλογή αυτή πραγματοποιείται με χρήση γενετικού αλγορίθμου (GA). Κατά το δεύτερο επίπεδο, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος interior point για την εύρεση των ρευμάτων εξισορρόπησης $I_{Eq,i,j,k}$, καθώς και του χρόνου εξισορρόπησης t .

Συγκεκριμένα, η δυαδική μεταβλητή βελτιστοποίησης κατά τη λειτουργία του GA είναι το διάνυσμα $FlybackStatus_{i,j,k}$, μεγέθους $j \cdot k$ που λαμβάνει τις διακριτές τιμές (0, 1). Συνεπώς, σε κάθε κύκλο λειτουργίας του GA, εξετάζονται πιθανές τιμές του διανύσματος $FlybackStatus_{i,j,k}$, προκειμένου να επιλεγεί ο κατάλληλος συνδυασμός που θα οδηγήσει σε μείωση των ενεργειακών απωλειών κατά την εξισορρόπηση.

Επιδιώκοντας να περιοριστεί ο χώρος λύσεων του GA με λύσεις που έχουν νόημα, τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία επιτρέπεται να απενεργοποιηθεί κάθε μετατροπέας καθορίζονται από το ηλεκτρικό φορτίο που πρέπει να λάβει ο αντίστοιχος συσσωρευτής. Σύμφωνα με την τακτική αυτή, το κελί που χρειάζεται την περισσότερη ενέργεια εξισορρόπησης, καθορίζει το συνολικό χρόνο εξισορρόπησης. Για τους μετατροπείς που αντιστοιχούν στα υπόλοιπα κελιά, τα χρονικά διαστήματα που επιτρέπεται να απενεργοποιηθούν υπολογίζονται με βάση το μέγιστο ρεύμα εξισορρόπησης και

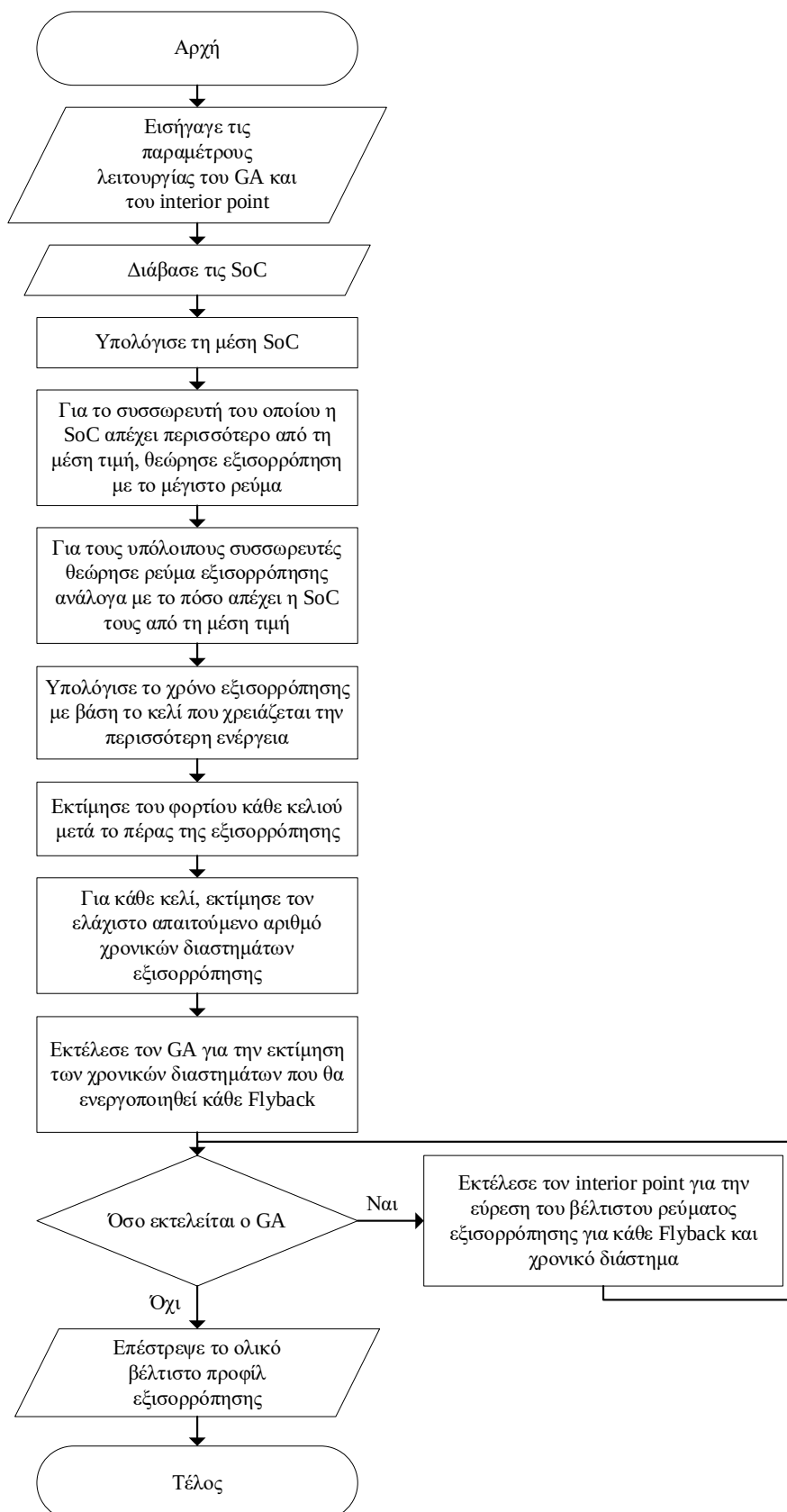
το φορτίο που πρέπει να λάβουν. Το διάγραμμα ροής για την υβριδική μέθοδο χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο βήμα εισάγονται οι παράμετροι λειτουργίας των αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Για τον interior-point επιλέχθηκαν παράμετροι που οδηγούν στην επίλυση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού σε οκτώ διακριτά χρονικά διαστήματα για μία ομάδα με οκτώ συσσωρευτές, σε χρόνο μικρότερο των δεκαπέντε δευτερολέπτων. Συνεπώς, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων τέθηκε ίσος με 10^6 , ενώ η ανοχή σχετικά με τους περιορισμούς τέθηκε ως 10^{-8} και η ανοχή ως προς την εύρεση του βέλτιστου 10^{-12} . Για τον GA επιλέχθηκαν παράμετροι που οδηγούν στην επίλυση του συνολικού προβλήματος σε χρόνο πέντε λεπτών. Συνεπώς, ο αριθμός του πληθυσμού τέθηκε ίσος με 15, ενώ ο αριθμός των γενεών ίσος με 2.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το φορτίο που απαιτείται να προσφέρει ή να λάβει ο κάθε συσσωρευτής. Στο συσσωρευτή του οποίου η στάθμη φόρτισης απέχει περισσότερο από το μέσο όρο, εφαρμόζεται το μέγιστο ρεύμα εξισορρόπησης, ώστε να εκτιμηθεί ο χρόνος εξισορρόπησης. Στους υπόλοιπους συσσωρευτές εφαρμόζεται ανάλογα με το φορτίο που πρέπει να προσφέρουν ή να λάβουν, τιμή ρεύματος εξισορρόπησης για την ολοκλήρωση της διαδικασίας σε όλους τους συσσωρευτές την ίδια στιγμή. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη το εξωτερικό ρεύμα (φόρτισης ή εκφόρτισης) που εφαρμόζεται στη συστοιχία και την εξίσωση (4.7), υπολογίζεται η στάθμη φόρτισης κάθε συσσωρευτή στο τέλος της διαδικασίας.

Με αυτή την ευρετική μέθοδο, έχει εκτιμηθεί ένα προφίλ εξισορρόπησης το οποίο θα αποτελέσει τη βάση για βελτίωση με την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου. Αν δεν είχε προηγηθεί η διαδικασία της εκτίμησης των τελικών τιμών της SoC για κάθε συσσωρευτή, θα έπρεπε να πραγματοποιηθεί βελτιστοποίηση δύο κριτηρίων. Το πρώτο κριτήριο θα ήταν η ελαχιστοποίηση της απόκλισης των SoC, ενώ το δεύτερο κριτήριο θα ήταν η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών. Το γεγονός αυτό, θα οδηγούσε σε αύξηση του υπολογιστικού φόρτου καθιστώντας τη μέθοδο μη ελκυστική προς εφαρμογή σε πραγματικά συστήματα.

Στο επόμενο βήμα, εκτελείται η υβριδική μέθοδος χρονοπρογραμματισμού, προκειμένου να εξαχθεί το τελικό προφίλ εξισορρόπησης που ελαχιστοποιεί τις ενεργειακές απώλειες. Στο τέλος της διαδικασίας βελτιστοποίησης, εξάγονται οι δυαδικές μεταβλητές που σηματοδοτούν τη λειτουργία ή όχι κάθε μετατροπέα, ο τελικός χρόνος εξισορρόπησης, καθώς και τα ρεύματα εξισορρόπησης για κάθε Flyback και χρονικό διάστημα.



Σχήμα 4.7: Το διάγραμμα ροής για το χρονοπρογραμματισμό εξισορρόπησης.

4.4 Αξιολόγηση χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης μέσω προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή, αξιολογείται η προτεινόμενη μέθοδος χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης σε περιβάλλον Simulink. Θεωρείται ότι απαιτείται εξισορρόπηση εντός μιας ομάδας που αποτελείται από οκτώ συσσωρευτές, για σενάρια με διαφορετικές κατανομές SoC. Η υβριδική μέθοδος χρονοπρογραμματισμού συγκρίνεται με τη μέθοδο που βασίζεται μόνο στη χρήση του αλγορίθμου interior point. Με την αποκλειστική χρήση του interior point επιλέγεται μόνο μία τιμή για το ρεύμα εξισορρόπησης κάθε συσσωρευτή για όλο το χρονικό διάστημα της εξισορρόπησης. Έτσι, διαπιστώνεται κατά πόσον η υβριδική μέθοδος οδηγεί σε βελτίωση των αποτελεσμάτων. Για την αξιολόγηση των δύο μεθόδων εξετάζονται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

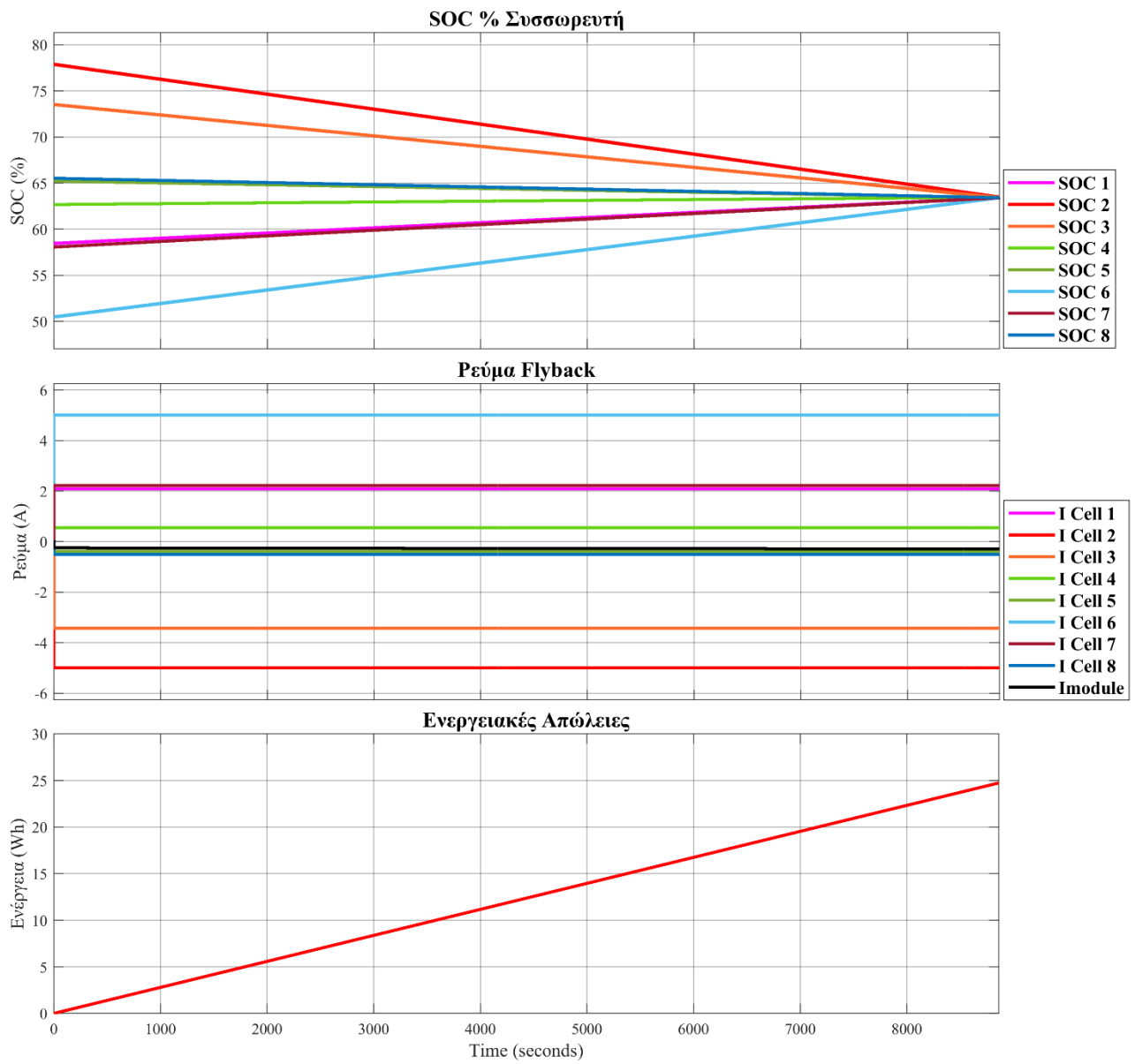
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα προσομοίωσης για κάθε σενάριο εξισορρόπησης.

Αριθμός κελιού	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
SoC (%)						
1	58,45	20,05	40,29	27,63	28,60	47,05
2	77,88	17,62	35,42	37,59	37,86	42,28
3	73,52	28,70	39,87	45,43	29,86	56,57
4	62,67	36,12	43,05	41,95	32,93	49,00
5	65,21	36,17	35,16	43,70	25,48	44,19
6	50,47	31,64	34,26	43,73	24,13	52,56
7	58,06	16,14	35,52	50,21	32,70	48,48
8	65,52	33,46	29,09	52,13	27,50	52,90
Ρεύμα φορτιστή (A)	0	0	16	16	32	32
Απώλειες interior point (Wh)	24,74	24,58	11,44	18,42	11,79	12,23
Απώλειες υβριδικής μεθόδου (Wh)	21,26	22,81	9,97	16,85	11,10	11,75
Ποσοστό βελτίωσης (%)	14,07	7,20	12,85	8,52	5,85	3,92

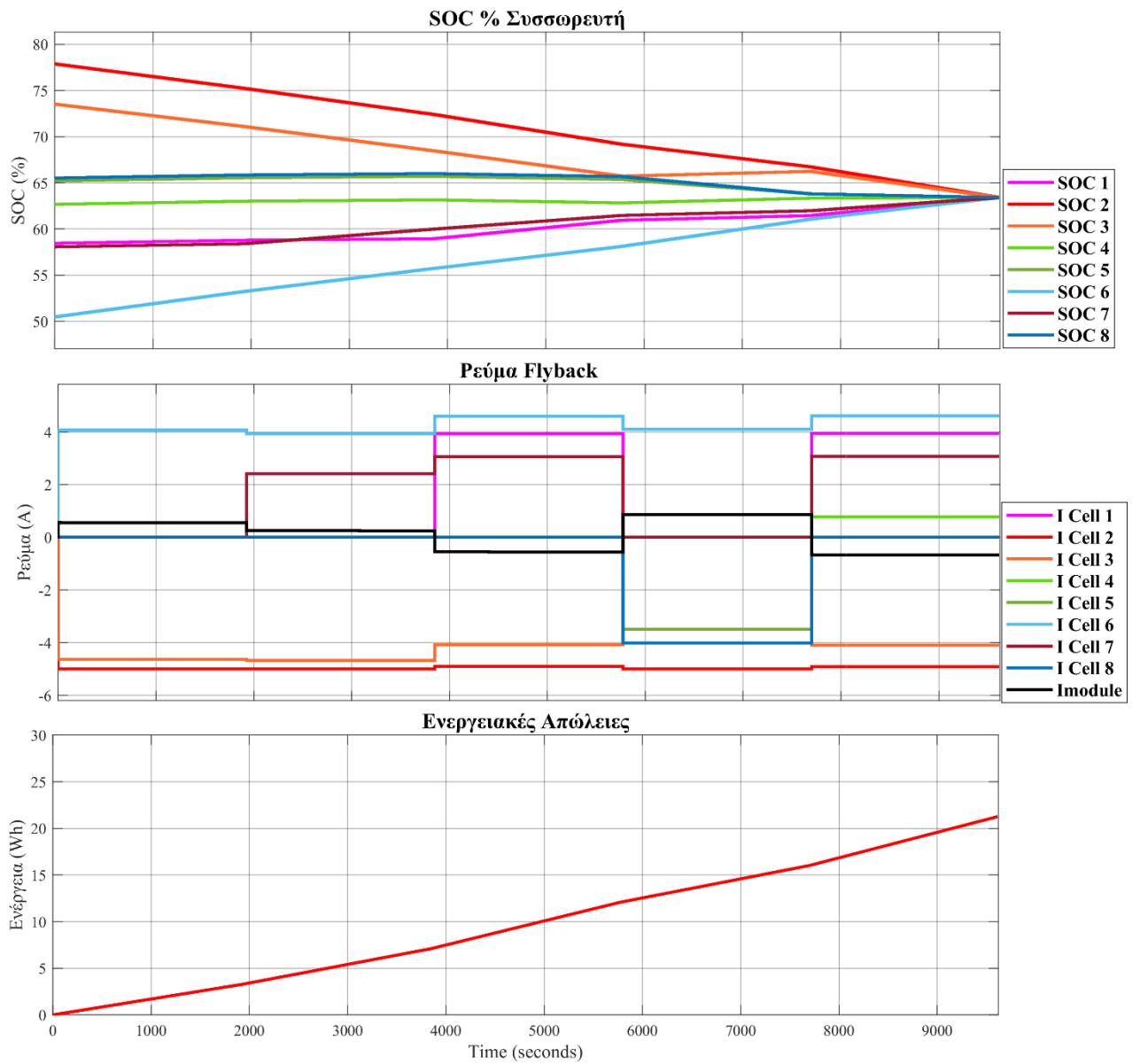
Στα Σχήματα 4.8, 4.10, 4.12 παρουσιάζεται το προφίλ εξισορρόπησης για τα σενάρια Σ1, Σ3, Σ6, όπως προκύπτει από τον αλγόριθμο interior point, για την επιλογή του βέλτιστου ρεύματος εξισορρόπησης κάθε κελιού. Στα Σχήματα 4.9, 4.11, 4.13 παρουσιάζεται το προφίλ εξισορρόπησης έπειτα από την εφαρμογή της υβριδικής μεθόδου για τα σενάρια Σ1, Σ3, Σ6. Στην πρώτη κυματομορφή κάθε σχήματος παρουσιάζονται οι στάθμες φόρτισης των συσσωρευτών της ομάδας καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας της εξισορρόπησης. Στη δεύτερη κυματομορφή παρουσιάζεται το ρεύμα εξισορρόπησης κάθε συσσωρευτή, ενώ στην τρίτη κυματομορφή παρουσιάζονται οι συνολικές ενεργειακές απώλειες στο σύστημα εξισορρόπησης.

Παρατηρείται ότι η υβριδική μέθοδος χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης οδηγεί σε μείωση των συνολικών απωλειών κατά τη διαδικασία της εξισορρόπησης, σε σχέση με τη μέθοδο που βασίζεται μόνο στον αλγόριθμο interior point κατά 3,92 έως 14,07 %. Με τη χρήση της υβριδικής μεθόδου, ο χρόνος εξισορρόπησης χωρίζεται σε διακριτά διαστήματα, για κάθε ένα από τα οποία επιλέγεται το βέλτιστο ρεύμα εξισορρόπησης κάθε συσσωρευτή. Ως εκ τούτου, επιλέγονται τιμές ρεύματος εξισορρόπησης κατά τις οποίες οι μετατροπείς Flyback λειτουργούν με υψηλή απόδοση.

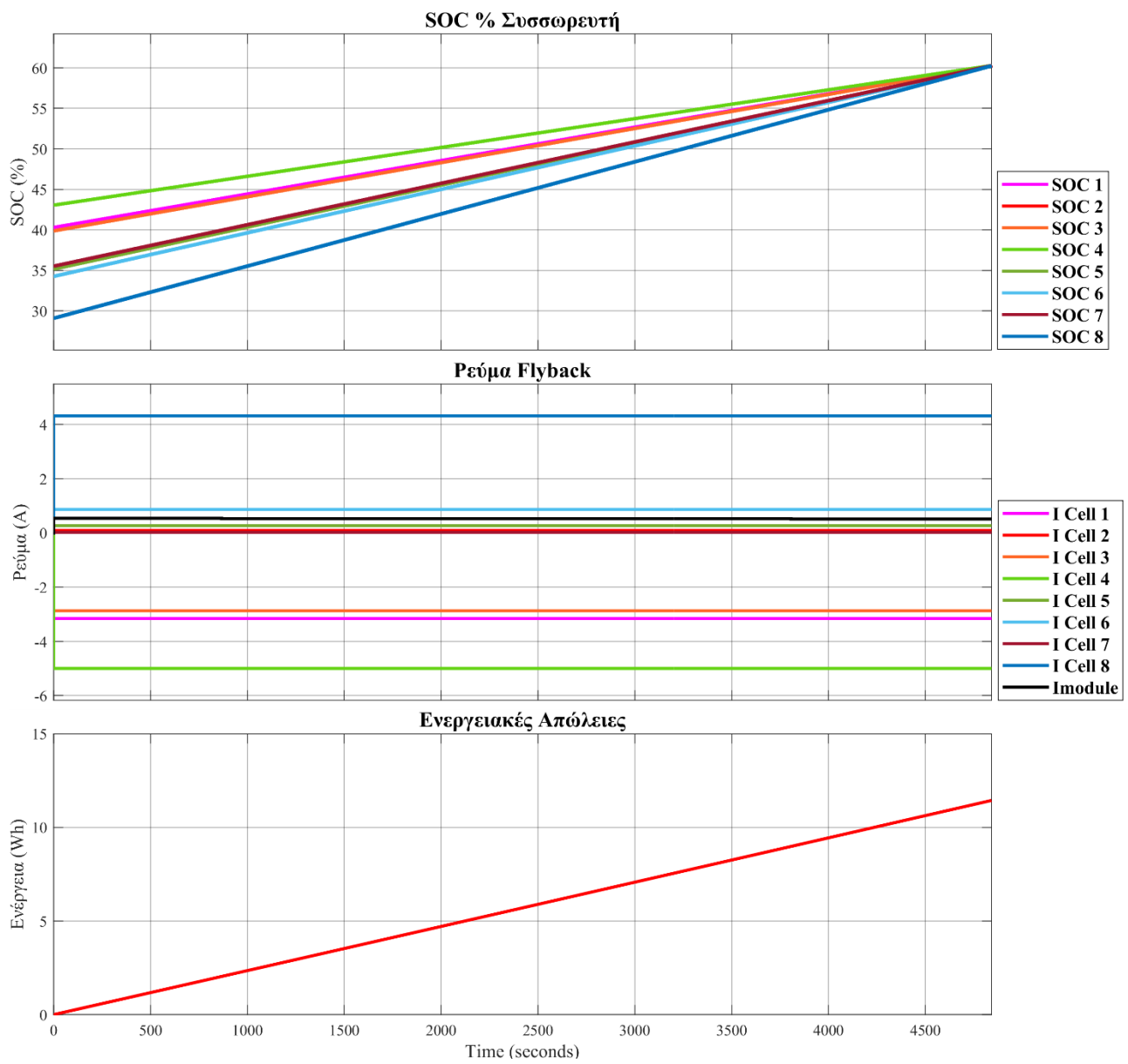
Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί ότι για το σενάριο Σ1, η υβριδική μέθοδος οδηγεί σε μεγαλύτερο χρόνο εξισορρόπησης από ότι η μέθοδος interior point. Η καθυστέρηση αυτή θεωρείται αποδεκτή, από τη στιγμή που δεν παραβιάζεται κάποιος περιορισμός και οι συνολικές απώλειες με τη χρήση της υβριδικής μεθόδου είναι λιγότερες.



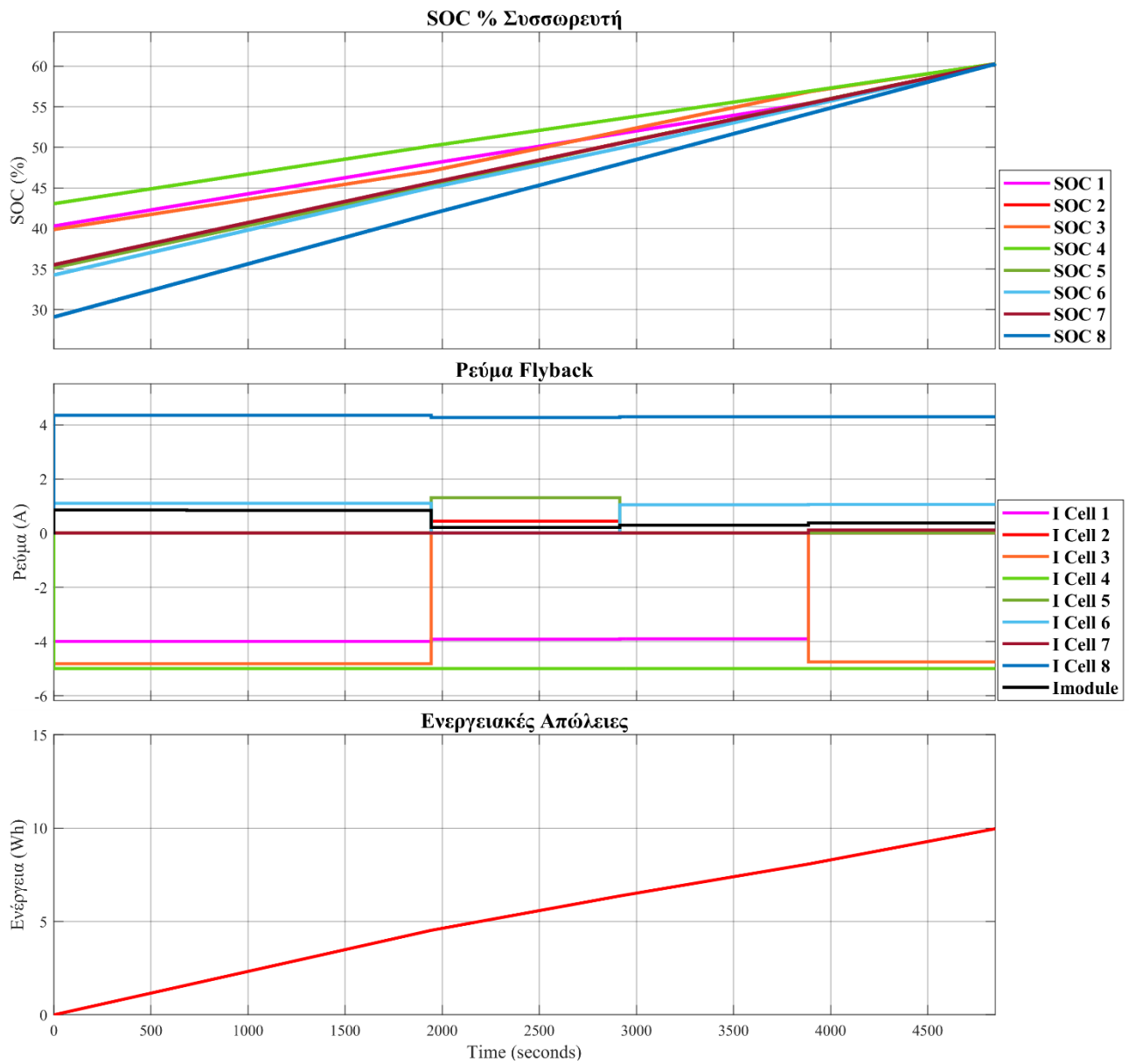
Σχήμα 4.8: Προφίλ εξισορρόπησης για το Σ1 σύμφωνα με τον interior point.



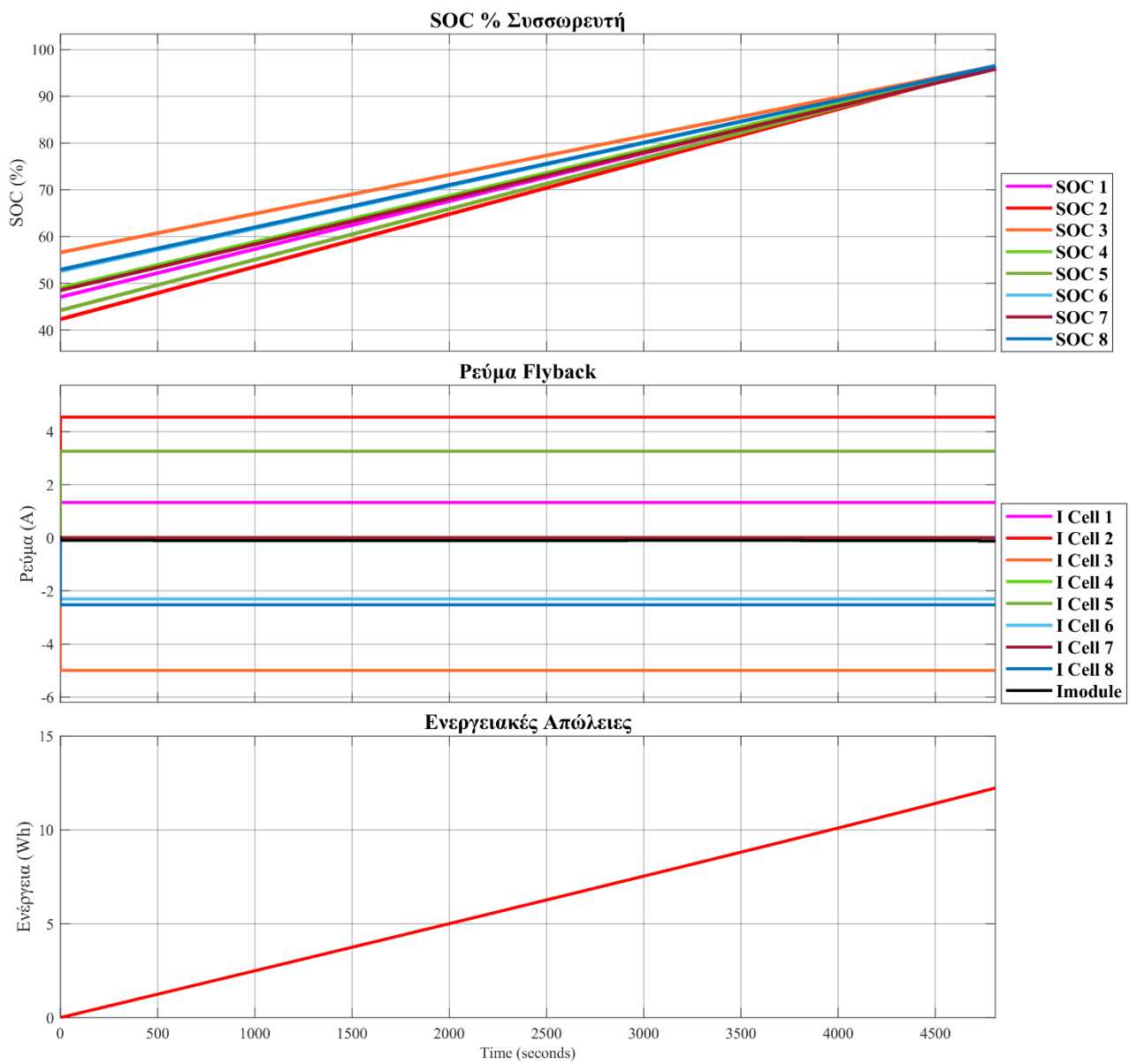
Σχήμα 4.9: Προφίλ εξισορρόπησης για το Σ1 σύμφωνα με την υβριδική μέθοδο.



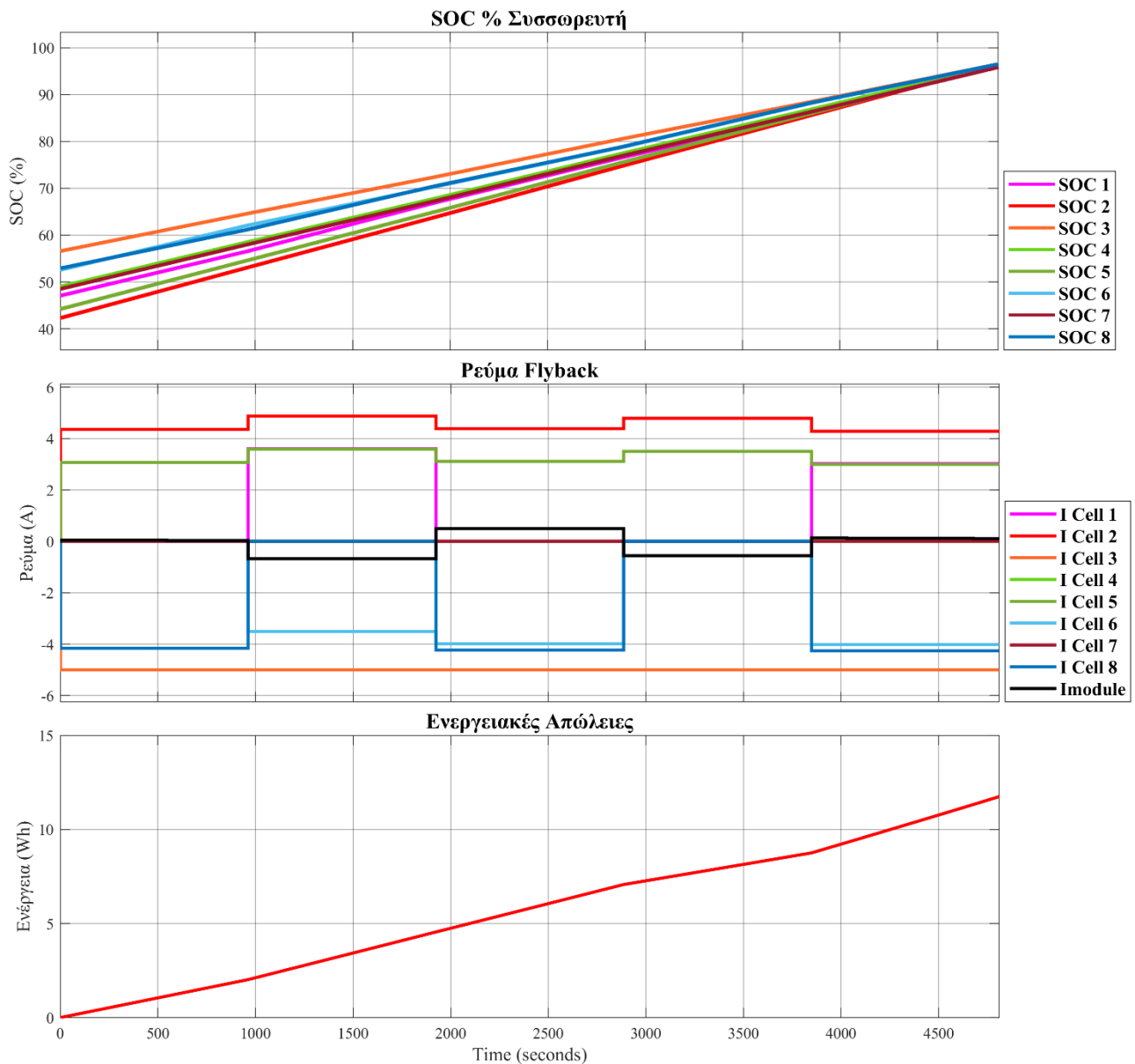
Σχήμα 4.10: Προφίλ εξισορρόπησης για το Σ3 σύμφωνα με τον interior point.



Σχήμα 4.11: Προφίλ εξισορρόπησης για το Σ3 σύμφωνα με την υβριδική μέθοδο.



Σχήμα 4.12: Προφίλ εξισορρόπησης για το Σ6 σύμφωνα με τον interior point.



Σχήμα 4.13: Προφίλ εξισορρόπησης για το Σ6 σύμφωνα με την υβριδική μέθοδο.

4.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μέθοδος χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης των συσσωρευτών που ανήκουν σε μια ομάδα. Σε κάθε συσσωρευτή θεωρείται ότι έχει εγκατασταθεί ένας μετατροπέας τύπου Flyback με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3. Συνεπώς, ο στόχος που τέθηκε στο παρόν κεφάλαιο είναι η διαχείριση των μετατροπέων αυτών, προκειμένου να επιτευχθεί εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης όλων των κελιών στην ομάδα, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες που οφείλονται στο κύκλωμα εξισορρόπησης.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού, προτάθηκε υβριδική μέθοδος χρονοπρογραμματισμού που βασίζεται στους αλγορίθμους GA και interior point. Ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται σε διακριτά χρονικά διαστήματα. Ο μεν GA χρησιμοποιείται για την επιλογή των διαστημάτων που θα ενεργοποιηθεί ο κάθε Flyback, ενώ ο interior point χρησιμοποιείται για την επιλογή του βέλτιστου ρεύματος για κάθε διάστημα.

Ο συνδυασμός των δύο αλγορίθμων οδηγεί σε μείωση των απωλειών στο κύκλωμα εξισορρόπησης σε σχέση με τη χρήση μόνο του interior point για την επιλογή μίας τιμής ρεύματος εξισορρόπησης με τα οποία θα λειτουργεί κάθε Flyback για όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Τα αποτελέσματα οδηγούν σε μείωση των ενεργειακών απωλειών από 3,92 % έως 14,07 % για τα έξι σενάρια που εξετάστηκαν. Σημειώνεται ότι κατά τη λειτουργία της προτεινόμενης μεθόδου λαμβάνεται υπόψη και το ρεύμα του φορτιστή, συνεπώς διασφαλίζεται ότι οι συσσωρευτές θα αποκτήσουν την επιθυμητή στάθμη φόρτισης, χωρίς να παρεμποδιστεί η διαδικασία της φόρτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ QUASI-RESONANT FLYBACK ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΟΜΑΔΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται η τοπολογία του αμφίδρομου μετατροπέα Quasi-resonant Flyback που έχει επιλεγεί για την εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης μεταξύ ομάδων συσσωρευτών (Module-to-Module, M2M). Ο Quasi-resonant Flyback είναι ένας αμφίδρομος μετατροπέας με τέσσερις ημιαγωγικούς διακόπτες, εκ των οποίων οι δύο παλμοδοτούνται, ενώ οι άλλοι δύο είναι συμπληρωματικά μεταξύ τους σε μόνιμη αγωγή ή μόνιμη αποκοπή, ανάλογα με την επιθυμητή κατεύθυνση της ροής ενέργειας. Με την εισαγωγή ενός κυκλώματος ταλάντωσης που αποτελείται από πηνίο και πυκνωτές, επιτυγχάνεται ταλάντωση στο ρεύμα του κύριου ημιαγωγικού διακόπτη, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται η σβέση αυτού υπό μηδενικό ρεύμα. Επομένως, οι διακοπτικές απώλειες σβέσης που παρουσιάζονται στον κλασικό αμφίδρομο μετατροπέα Flyback μειώνονται δραματικά. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback έναντι του απλού Flyback, είναι ότι λόγω της σβέσης του ημιαγωγικού στοιχείου υπό μηδενικό ρεύμα δεν συσσωρεύεται ενέργεια στην επαγωγή σκέδασης που πρέπει να διοχετευθεί αλλού. Ως εκ τούτου, δεν απαιτείται η χρήση ενεργού ή παθητικού κυκλώματος περιορισμού υπερτάσεων.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου, παρουσιάζεται η κυκλωματική ανάλυση του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback, προκειμένου να εκτιμηθεί το σημείο λειτουργίας αυτού και να υπολογιστούν όλα τα μεγέθη τα οποία διέπουν τη λειτουργία του. Με την ανάλυση αυτή, δίδεται η δυνατότητα εκτίμησης των ενεργειακών απωλειών του μετατροπέα και, αντίστοιχα με τον μετατροπέα που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, εκτελείται αλγόριθμος βελτιστοποίησης, προκειμένου να επιλεγούν οι τιμές των στοιχείων που απαρτίζουν το κύκλωμα ταλάντωσης του μετατροπέα και εξασφαλίζουν το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η ακρίβεια της προαναφερθείσας ανάλυσης αξιολογήθηκε σε εργαστηριακό πρωτότυπο το οποίο υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής.

5.2 Ανάλυση Quasi-resonant Flyback

Για την ανάλυση του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback ακολουθείται η ίδια μέθοδος που επιλέχθηκε για την ανάλυση του μετατροπέα Flyback που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.

Πραγματοποιείται ανάλυση του κυκλώματος στο πεδίο Laplace για κάθε διάστημα αγωγής, ώστε να εξαχθεί το σύστημα εξισώσεων που περιγράφει πλήρως τη λειτουργική συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά μεγέθη του μετατροπέα. Σημειώνεται ότι για το συγκεκριμένο μετατροπέα, στην υφιστάμενη βιβλιογραφία δεν έχουν εξαχθεί πλήρεις αναλυτικές σχέσεις, σύμφωνα με τη βιβλιογραφική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής. Προσεγγιστικές σχέσεις, σχετικά με τον υπολογισμό της συχνότητας της ταλάντωσης και του λόγου κατάτμησης, έχουν προταθεί στην εργασία [33].

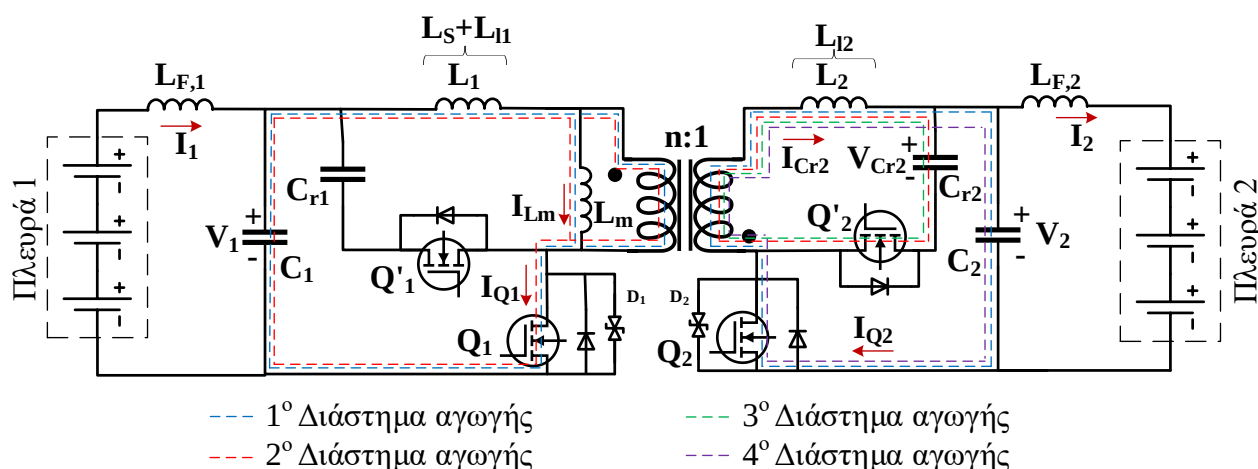
5.2.1 Κυκλωματικό διάγραμμα του Quasi-resonant Flyback

Το κυκλωματικό μοντέλο του Quasi-resonant Flyback παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Παρατηρείται ότι υπάρχουν δύο πυκνωτές ταλάντωσης, ένας σε κάθε πλευρά του κυκλώματος (C_{r1}, C_{r2}). Με τους διακόπτες Q'_1 και Q'_2 επιλέγεται ο πυκνωτής που θα συμμετάσχει στην ταλάντωση, ανάλογα με την κατεύθυνση της ροής της ενέργειας. Οι σκεδάσεις του μετασχηματιστή περιγράφονται από τις επαγωγές L_{l1} και L_{l2} , ενώ με L_s συμβολίζεται η εν σειρά επαγωγή η οποία τοποθετείται για την πραγματοποίηση της ταλάντωσης. Η συνολική επαγωγή της Πλευράς 1 εκφράζεται ως L_1 , ενώ η συνολική επαγωγή της Πλευράς 2 εκφράζεται ως L_2 .

Για την παρούσα ανάλυση, θα θεωρηθεί η ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 προς την Πλευρά 2 του μετατροπέα. Επομένως, ο Q_1 είναι ο κύριος ημιαγωγικός διακόπτης, ενώ ο Q_2 τίθεται σε λειτουργία μετά την ταλάντωση. Επιπλέον, παρόλο που πραγματοποιείται σβέση των ημιαγωγικών στοιχείων υπό μηδενικό ρεύμα στη μόνιμη κατάσταση, χρησιμοποιούνται δίοδοι TVS (D_1, D_2) για τις περιπτώσεις κατά τις οποίες δεν ικανοποιείται η συνθήκη για σβέση υπό μηδενικό ρεύμα.

Η λειτουργία του μετατροπέα κατά τη διάρκεια της διακοπτικής περιόδου χωρίζεται σε τέσσερα διαστήματα αγωγής. Θεωρώντας την περίπτωση μεταφοράς ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2 του μετατροπέα, το ημιαγωγικό στοιχείο Q'_1 είναι διαρκώς σε αποκοπή, ενώ το Q'_2 είναι διαρκώς σε αγωγή. Κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 προς την Πλευρά 1, το ημιαγωγικό στοιχείο Q'_2 είναι διαρκώς σε αποκοπή, ενώ το Q'_1 είναι διαρκώς σε αγωγή. Κατά το πρώτο διάστημα αγωγής πραγματοποιείται έναυση του ημιαγωγικού στοιχείου Q_1 και σβέση του Q_2 . Κατά το δεύτερο διάστημα αγωγής, πραγματοποιείται ταλάντωση μεταξύ των $L_1 - L_m - L_2 - C_{r2}$. Το πέρας του δεύτερου διαστήματος αγωγής σηματοδοτείται με το δεύτερο μηδενισμό του ρεύματος του Q_1 . Κατά το τρίτο διάστημα αγωγής άγει μόνο ο βρόγχος που αποτελείται από τα $L_m - L_2 - C_{r2} - Q'_2$. Το τρίτο διάστημα αγωγής ολοκληρώνεται όταν η τάση του πυκνωτή C_{r2} γίνει ίση με την τάση V_2 . Το

τέταρτο και τελευταίο διάστημα αγωγής αφορά την απομαγνήτιση της επαγωγής L_m στην έξοδο, αντίστοιχα με την περίπτωση του κλασσικού μετατροπέα Flyback.



Σχήμα 5.1: Κυκλωματικό διάγραμμα του Quasi-resonant Flyback.

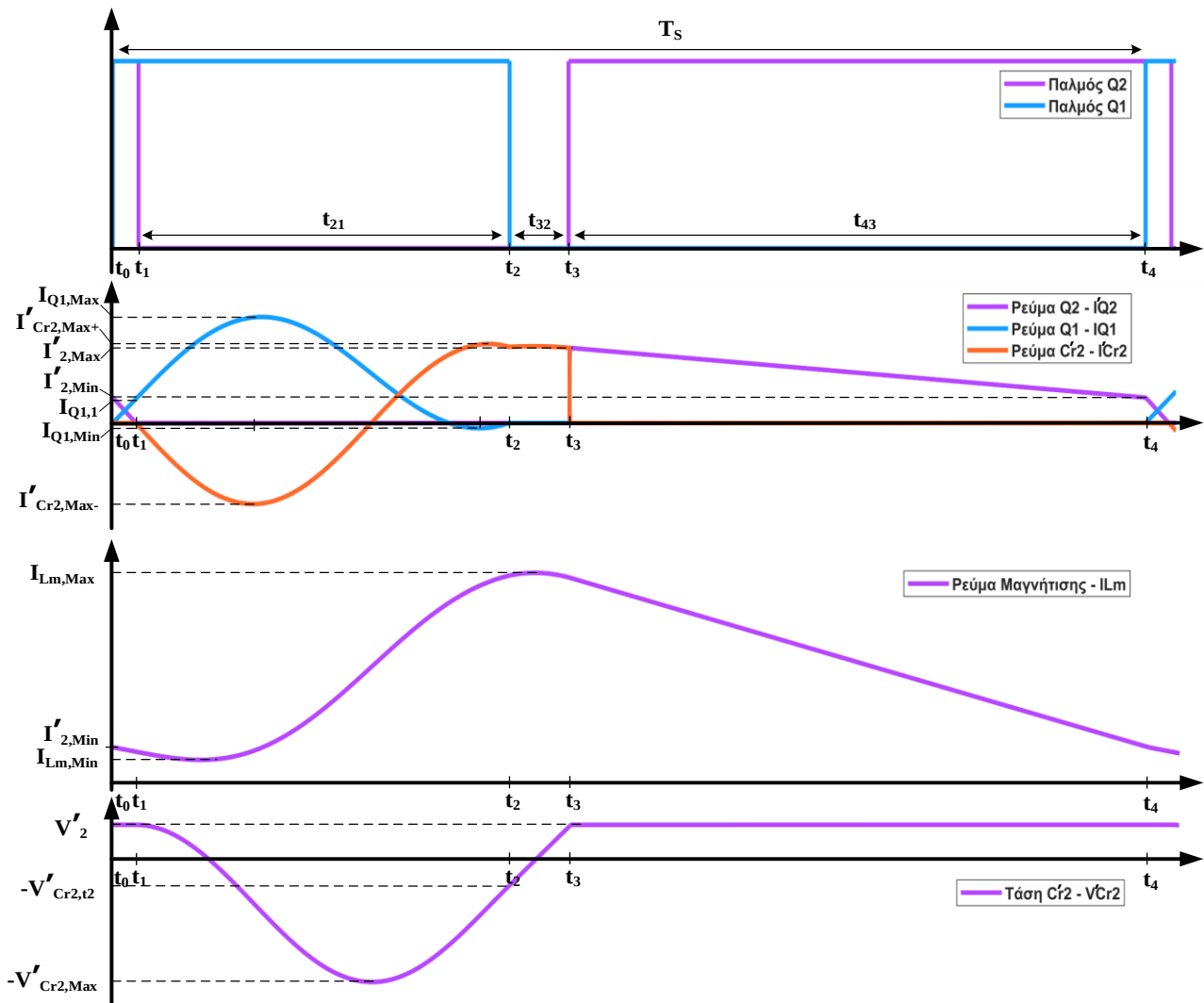
5.2.2 Μέθοδος παλμοδότησης του Quasi-resonant Flyback

Έχοντας πραγματοποιήσει μια γενική περιγραφή της λειτουργίας του κυκλώματος, στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικές κυματομορφές που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του μετατροπέα (Σχήμα 5.2). Σημειώνεται ότι η ανάλυση που παρουσιάζεται αναφέρεται στη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2. Συνεπώς, όλα τα μεγέθη που αναφέρονται στην Πλευρά 2 ανάγονται ως προς την Πλευρά 1, που αναφέρεται στην είσοδο του μετατροπέα. Για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1, αρκεί να αντιμετωπιστούν οι δείκτες 1, 2 στις αντίστοιχες μεταβλητές και να αναχθούν όλα τα μεγέθη στην Πλευρά 2, που αντιπροσωπεύει την είσοδο του μετατροπέα στην περίπτωση αυτή.

Στο γράφημα που βρίσκεται στο επάνω μέρος του σχήματος 5.2 σημειώνονται οι παλμοί στα δύο ημιαγωγικά στοιχεία Q_1 και Q_2 . Στο δεύτερο γράφημα του σχήματος 5.2 παρουσιάζεται η κυματομορφή του ρεύματος στο ημιαγωγικό στοιχείο Q_1 , καθώς και οι κυματομορφές των ρευμάτων που διαρρέουν το ημιαγωγικό στοιχείο Q_2 και τον πυκνωτή ταλάντωσης C_{r2} , ανηγμένες ως προς την Πλευρά 1 του μετατροπέα. Στο τρίτο γράφημα του σχήματος 5.2 παρουσιάζεται η κυματομορφή του ρεύματος που διαρρέει την επαγωγή μαγνήτισης L_m . Στον κατακόρυφο άξονα του δεύτερου και τρίτου γραφήματος σημειώνονται οι χαρακτηριστικές τιμές των ρευμάτων των στοιχείων που είναι απαραίτητες για την εξαγωγή των εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του μετατροπέα. Τα τονούμενα μεγέθη χαρακτηρίζουν τις ανηγμένες τιμές ως προς την Πλευρά 1 του μετατροπέα.

Στο τέταρτο και τελευταίο γράφημα του σχήματος 5.2 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης στον πυκνωτή ταλάντωσης C_{r2} , ανηγμένη ως προς την Πλευρά 1, καθώς και οι τιμές της τάσης αυτής που απαιτούνται για την εκτίμηση του σημείου λειτουργίας του μετατροπέα.

Εφαρμόζοντας τάση στην πύλη του Q_1 τη χρονική στιγμή $t_0 = 0$, το ρεύμα στο Q_1 αρχίζει να αυξάνεται, ενώ το ρεύμα στο Q_2 μειώνεται μέχρι το μηδενισμό του (χρονική στιγμή t_1). Έπειτα, το ρεύμα του Q_1 πραγματοποιεί ταλάντωση λόγω των επαγωγών L_1 , L_2 , L_m , καθώς και του πυκνωτή C_{r2} . Κατά το δεύτερο μηδενισμό του ρεύματος του Q_1 (χρονική στιγμή t_2), αφαιρείται η τάση από την πύλη του Q_1 και ο πυκνωτής C_{r2} φορτίζεται στην τάση V_2 (χρονική στιγμή t_3). Στη συνέχεια, εφαρμόζεται τάση στην πύλη του Q_2 και διοχετεύεται ενέργεια στον πυκνωτή εξόδου μέχρι το τέλος της διακοπτικής περιόδου. Επομένως, δημιουργούνται τέσσερα διαστήματα αγωγής, τα οποία παρουσιάζονται στις κυματομορφές του Σχήματος 5.2.



Σχήμα 5.2: Βασικές κυματομορφές του Quasi-resonant Flyback.

5.2.3 Ανάλυση διαστημάτων αγωγής

Για να διευκολυνθεί η ανάλυση του μετατροπέα, όλα τα μεγέθη αυτού ανάγονται ως προς την είσοδο. Συνεπώς, για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2, η αναγωγή των μεγεθών γίνεται ως προς την Πλευρά 1 του μετατροπέα και τα ανηγμένα μεγέθη υποδηλώνονται με τόνο (5.1-5.10). Επιπλέον, παραλείπονται οι μη ιδανικότητες των στοιχείων του κυκλώματος, καθώς και τα παρασιτικά στοιχεία του μετασχηματιστή, εκτός της σκέδασης, η οποία λαμβάνεται υπόψη και στις δύο πλευρές αυτού. Για τη διευκόλυνση της ανάλυσης, τα πηνία των φίλτρων εισόδου και εξόδου θεωρούνται αρκούντως μεγάλα, ώστε να διατηρούν τα ρεύματα εισόδου και εξόδου σταθερά. Επιπλέον, οι πυκνωτές των φίλτρων θεωρούνται αρκούντως μεγάλοι, ώστε η κυμάτωση της τάσης στα άκρα τους να είναι αμελητέα. Για την εξαγωγή των εξισώσεων που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του μετατροπέα σε κάθε διάστημα αγωγής, πραγματοποιείται ανάλυση των ισοδύναμων κυκλωμάτων στο πεδίο Laplace.

$$V'_2 = n \cdot V_2 \quad (5.1)$$

$$V'_{Cr2,t2} = n \cdot V_{Cr2,t2} \quad (5.2)$$

$$V'_{Cr2,Max} = n \cdot V_{Cr2,Max} \quad (5.3)$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{n} \quad (5.4)$$

$$I'_{2,Min} = \frac{I_{2,Min}}{n} \quad (5.5)$$

$$I'_{2,Max} = \frac{I_{2,Max}}{n} \quad (5.6)$$

$$I'_{Cr2,Max-} = \frac{I_{Cr2,Max-}}{n} \quad (5.7)$$

$$I'_{Cr2,Max+} = \frac{I_{Cr2,Max+}}{n} \quad (5.8)$$

$$C'_{r2} = \frac{1}{n^2} \cdot C_{r2} \quad (5.9)$$

$$L'_2 = n^2 \cdot L_2 \quad (5.10)$$

όπου:

V_2 : Η τάση στην Πλευρά 2 (έξοδο) του μετατροπέα.

$V_{Cr2,t2}$: Η τάση του πυκνωτή ταλάντωσης κατά τη χρονική στιγμή t_2 .

$V_{Cr2,Max}$: Η μέγιστη τάση του πυκνωτή ταλάντωσης.

I_2 : Η μέση τιμή του ρεύματος στην Πλευρά 2 (έξοδο) του μετατροπέα.

$I_{2,min}$: Η τιμή του ρεύματος στο Q_2 κατά τη χρονική στιγμή t_4 , που σηματοδοτεί το τέλος της διακοπτικής περιόδου.

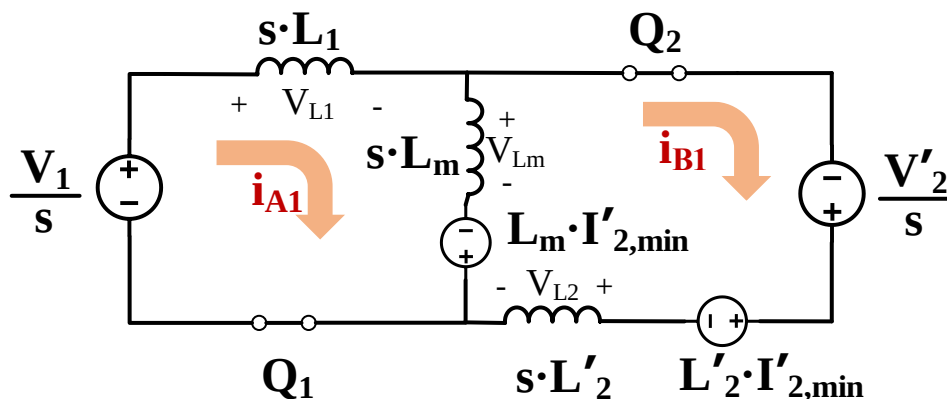
$I_{2,max}$: Η τιμή του ρεύματος στο Q_2 κατά τη χρονική στιγμή t_3 .

$I_{Cr2,Max+}$: Η μέγιστη θετική τιμή του ρεύματος στον πυκνωτή ταλάντωσης.

$I_{Cr2,Max-}$: Η μέγιστη αρνητική τιμή του ρεύματος στον πυκνωτή ταλάντωσης.

1^ο Διάστημα αγωγής

Το πρώτο διάστημα αγωγής ($t_0 < t < t_1$) ξεκινά τη χρονική στιγμή $t_0 = 0$ με την έναυση του ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου Q_1 και ολοκληρώνεται τη χρονική στιγμή t_1 με τη σβέση του Q_2 . Άρα, υπάρχει ένα διάστημα επικάλυψης της αγωγής των δύο στοιχείων. Το ρεύμα του Q_1 αυξάνεται, ενώ το ρεύμα του Q_2 μειώνεται από την τιμή $I_{2,min}$ μέχρι να μηδενιστεί. Κατά το πρώτο διάστημα αγωγής δημιουργούνται οι δύο βρόγχοι A και B (Σχήμα 5.3). Ο βρόγχος A περιλαμβάνει τα στοιχεία $V_1 - L_1 - L_m - Q_1$. Αντίστοιχα, ο βρόγχος B περιλαμβάνει τα στοιχεία $Q_2 - V'_2 - L'_2 - L_m$. Εφαρμόζοντας τον κανόνα των τάσεων του Kirchhoff στο πεδίο Laplace για τους βρόγχους A και B οδηγούμαστε στις εξισώσεις (5.11), (5.12). Στο ξεκίνημα του πρώτου διαστήματος αγωγής, οι επαγωγές L_m και L'_2 διαρρέονται από την τιμή ρεύματος $I'_{2,min}$ που εισάγεται στο ισοδύναμο κύκλωμα ως αρχική συνθήκη.



Σχήμα 5.3: Ισοδύναμο κύκλωμα για το πρώτο διάστημα αγωγής.

$$s \cdot L_1 \cdot i_{A1} + s \cdot L_m \cdot (i_{A1} - i_{B1}) - L_m \cdot I'_{2,Min} - \frac{V_1}{s} = 0 \quad (5.11)$$

$$-\frac{V'_2}{s} + L'_2 \cdot I'_{2,Min} + s \cdot L'_2 \cdot i_{B1} + L_m \cdot I'_{2,Min} - s \cdot L_m \cdot i_{A1} + s \cdot L_m \cdot i_{B1} \quad (5.12)$$

Λύνοντας το σύστημα των (5.11) και (5.12) προκύπτουν τα ρεύματα $i_{A1}(s)$ και $i_{B1}(s)$ στο πεδίο Laplace, όπως περιγράφεται από τις (5.13), (5.14).

$$i_{A1}(s) = \frac{V_1 \cdot L'_2 + V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_m}{s^2 \cdot [L_1 \cdot L'_2 + L'_2 \cdot L_m + L_1 \cdot L_m]} \quad (5.13)$$

$$i_{B1}(s) = -I'_{2,Min} + \frac{V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_1 + V'_2 \cdot L_m}{s^2 \cdot [L_1 \cdot L'_2 + L'_2 \cdot L_m + L_1 \cdot L_m]} \quad (5.14)$$

Έπειτα, πραγματοποιώντας αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace των (5.13) και (5.14), προκύπτουν οι συναρτήσεις χρόνου για τα $i_{A1}(t)$ και $i_{B1}(t)$, καθώς και για το ρεύμα μαγνήτισης $i_{Lm1}(t)$ σύμφωνα με τις (5.15), (5.16), (5.17).

$$i_{A1}(t) = \frac{V_1 \cdot L'_2 + V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_m}{L_1 \cdot L'_2 + L'_2 \cdot L_m + L_1 \cdot L_m} \cdot t \quad (5.15)$$

$$i_{B1}(t) = -I'_{2,Min} + \frac{V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_1 + V'_2 \cdot L_m}{L_1 \cdot L'_2 + L'_2 \cdot L_m + L_1 \cdot L_m} \cdot t = -i_o(t) \quad (5.16)$$

$$i_{Lm1}(t) = i_{A1}(t) - i_{B1}(t) = I'_{2,Min} + \frac{V_1 \cdot L'_2 - V'_2 \cdot L_1}{L_1 \cdot L'_2 + L'_2 \cdot L_m + L_1 \cdot L_m} \cdot t \quad (5.17)$$

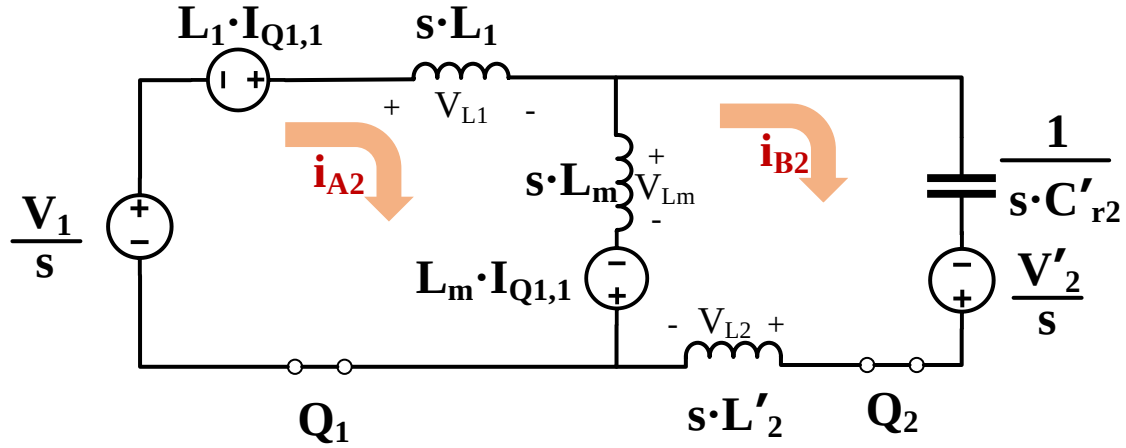
2^ο Διάστημα αγωγής

Κατά το δεύτερο διάστημα αγωγής ($t_1 < t < t_2$), ξεκινά ταλάντωση λόγω των στοιχείων $L_1 - L_m - L'_2 - C'_{r2}$ και δημιουργούνται οι βρόγχοι Α, Β του Σχήματος 5.4. Το ρεύμα του Q_1 ξεκινά ταλάντωση από την τιμή $I_{Q1,1}$. Η τιμή αυτή εισάγεται ως αρχική συνθήκη για τα L_1 και L_m στο ισοδύναμο κύκλωμα. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2, η αρχική τάση του C'_{r2} είναι ίση με V'_2 . Ως εκ τούτου, η τιμή V'_2 εισάγεται ως αρχική συνθήκη για τον C'_{r2} στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Εφαρμόζοντας τον κανόνα των τάσεων του Kirchhoff στο πεδίο Laplace για τους βρόγχους Α και Β οδηγούμαστε στις εξισώσεις (5.18), (5.19). Λύνοντας το σύστημα των (5.18), (5.19) προκύπτουν τα βρογχικά ρεύματα $i_{A2}(s)$ και $i_{B2}(s)$ σύμφωνα με τις (5.20)-(5.27).

$$-s \cdot L_1 \cdot I_{Q1,1} + s \cdot L_1 \cdot i_{A2} + s \cdot L_m \cdot (i_{A2} - i_{B2}) - L_m \cdot I_{Q1,1} - \frac{V_1}{s} = 0 \quad (5.18)$$

$$i_{B2} \cdot \frac{1}{s \cdot C'_{r2}} - \frac{V'_2}{s} + s \cdot L'_2 \cdot i_{B2} + L_m \cdot I_{Q1,1} - s \cdot L_m \cdot (i_{A2} - i_{B2}) = 0 \quad (5.19)$$



Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο κύκλωμα για το δεύτερο διάστημα αγωγής.

$$i_{A2}(s) = \frac{\frac{A}{E} \cdot s^3 + \frac{B}{E} \cdot s^2 + \frac{C}{E} \cdot s + \frac{D}{E}}{s^2(s^2 + \frac{F}{E})} \quad (5.20)$$

$$A = (L_1 \cdot L'_2 + L_m \cdot L'_2 + L_m \cdot L_1) \cdot C'_{r2} \cdot I_{Q1,1} \quad (5.21)$$

$$B = (L_m \cdot V'_2 + L'_2 \cdot V_1 + L_m \cdot V_1) \cdot C'_{r2} \quad (5.22)$$

$$C = (L_m + L_1) \cdot I_{Q1,1} \quad (5.23)$$

$$D = V_1 \quad (5.24)$$

$$E = (L_1 \cdot L'_2 + L_m \cdot L'_2 + L_m \cdot L_1) \cdot C'_{r2} \quad (5.25)$$

$$F = L_1 + L_m \quad (5.26)$$

$$i_{B2}(s) = \frac{\frac{V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_1}{L_1 \cdot L'_2 + L_m \cdot L'_2 + L_m \cdot L_1}}{s^2 + \frac{L_1 + L_m}{(L_1 \cdot L'_2 + L_m \cdot L'_2 + L_m \cdot L_1) \cdot C'_{r2}}} \quad (5.27)$$

Πραγματοποιώντας αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace, προκύπτουν οι συναρτήσεις χρόνου για τα $i_{A2}(t)$, $i_{B2}(t)$, και $i_{Lm2}(t)$ σύμφωνα με τις (5.28)-(5.30).

$$i_{A2}(t) = \frac{C}{F} + \frac{D}{F} \cdot t + \frac{(\frac{B}{E} - \frac{D}{F})}{\sqrt{\frac{F}{E}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot (t - t_1)\right) \quad (5.28)$$

$$i_{B2}(t) = \frac{V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_1}{L_1 \cdot L'_2 + L_m \cdot L'_2 + L_m \cdot L_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{F}{E}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot (t - t_1)\right) \quad (5.29)$$

$$i_{Lm2}(t) = i_{A2}(t) - i_{B2}(t) = I_{Q1,1} + \frac{V_1}{L_1 + L_m} \cdot (t - t_1) + \left[\frac{V_1 \cdot L'_2 - V'_2 \cdot L_1}{L_1 \cdot L'_2 + L_m \cdot L'_2 + L_m \cdot L_1} - \frac{V_1}{L_1 + L_m} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{F}{E}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot (t - t_1)\right) \quad (5.30)$$

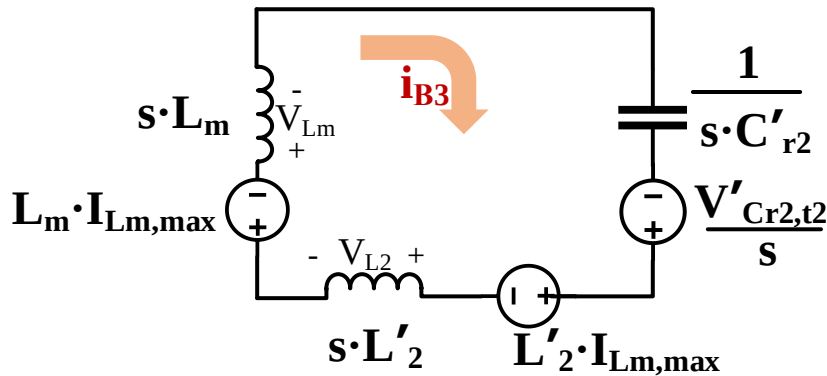
Στη συνέχεια, αξιοποιείται η διαφορική εξίσωση του πυκνωτή (5.31) για την εύρεση της ανηγμένης τάσης στα άκρα του στοιχείου (5.32).

$$V'_{Cr2}(s) = \frac{-i_{B2}}{s \cdot C'_{r2}} \quad (5.31)$$

$$V'_{Cr2}(t) = -\frac{V_1 \cdot L_m}{L_1 + L_m} + \frac{V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_1}{L_1 + L_m} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot (t - t_1)\right) \quad (5.32)$$

3^ο Διάστημα αγωγής

Κατά το τρίτο διάστημα αγωγής ($t_2 < t < t_3$), μόνο ο βρόγχος $C'_{r2} - L'_2 - L_m$ διαρρέεται από ρεύμα (Σχήμα 5.5). Κατά την εκκίνηση του διαστήματος αυτού, το ρεύμα μαγνήτισης λαμβάνει την τιμή $I_{Lm,max}$ που τίθεται ως αρχική τιμή των L_m και L'_2 στο κυκλωματικό ισοδύναμο. Επίσης, η αρχική τάση του πυκνωτή ταλάντωσης κατά το διάστημα αυτό λαμβάνει την τιμή $V'_{Cr2,t2}$.



Σχήμα 5.5: Ισοδύναμο κύκλωμα για το τρίτο διάστημα αγωγής.

Το διάστημα αγωγής αυτό ολοκληρώνεται μόλις ο πυκνωτής ταλάντωσης αποκτήσει τάση ίση με την τάση εξόδου. Το βρογχικό ρεύμα $i_{B3}(s)$ στο πεδίο Laplace υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις (5.33), (5.34), ενώ η συνάρτηση χρόνου $i_{B3}(t)$ εκφράζεται από τη (5.35). Επιπρόσθετα, η ανηγμένη τάση του πυκνωτή ταλάντωσης C'_{r2} δίνεται στο πεδίο Laplace και στο πεδίο του χρόνου από τις σχέσεις (5.36) και (5.37) αντίστοιχα.

$$i_{B3} \cdot \frac{1}{s \cdot C'_{r2}} - \frac{V'_{Cr2}}{s} + L'_2 \cdot I_{Lm,Max} + s \cdot L'_2 \cdot i_{B3} + L_m \cdot I_{Lm,Max} + s \cdot L_m \cdot i_{B3} = 0 \quad (5.33)$$

$$i_{B3}(s) = \frac{-s \cdot I_{Lm,Max}}{s^2 + \frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} + \frac{\frac{V'_{Cr2,t2} \cdot C'_{r2}}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}}{s^2 + \frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \quad (5.34)$$

$$i_{B3}(t) = -I_{Lm,Max} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t - t_2)\right) + \quad (5.35)$$

$$+ \frac{V'_{Cr2,t2} \cdot C'_{r2}}{\sqrt{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t - t_2)\right) = -i_{Lm3}(t)$$

$$V'_{cr2}(s) = \frac{\frac{-I_{Lm,Max}}{C'_{r2}}}{s^2 + \frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} - \frac{s \cdot V'_{Cr2,t2}}{s^2 + \frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \quad (5.36)$$

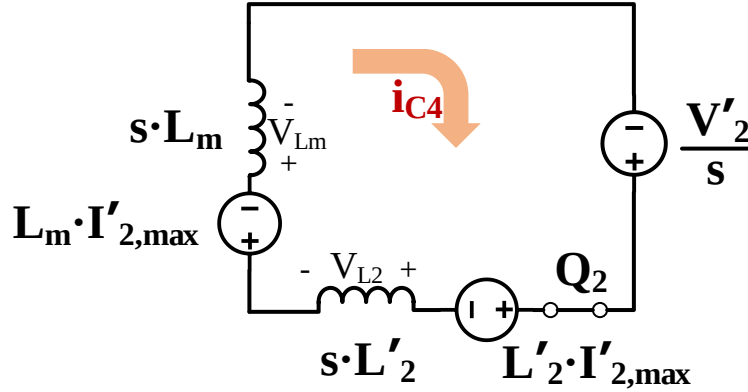
$$V'_{cr2}(t) = \frac{I_{Lm,Max}}{C'_{r2}} \sqrt{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t - t_2)\right) + \quad (5.37)$$

$$+ V'_{Cr2,t2} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t - t_2)\right)$$

4^ο Διάστημα αγωγής

Κατά το τέταρτο διάστημα αγωγής ($t_3 < t < t_4$), το Q_2 τίθεται σε αγωγή και η μορφή του ρεύματος που το διαρρέει είναι όμοια με αυτή που εμφανίζεται στον κλασσικό Flyback, ο οποίος λειτουργεί σε CCM. Ο βρόγχος C που διαρρέεται από ρεύμα περιλαμβάνει τα στοιχεία $V'_2 - Q_2 - L'_2 - L_m$ (Σχήμα 5.6). Κατά την εκκίνηση του τέταρτου διαστήματος αγωγής, το ρεύμα μαγνήτισης έχει την τιμή $I'_{2,max}$. Η τιμή αυτή τίθεται ως αρχική συνθήκη για τα L_m και L'_2 στο ισοδύναμο

κύκλωμα. Το ρεύμα i_{C3} υπολογίζεται στο πεδίο Laplace σύμφωνα με τις (5.38) και (5.39), ενώ η συνάρτηση χρόνου του δίνεται από την (5.40).



Σχήμα 5.6: Ισοδύναμο κύκλωμα για το τέταρτο διάστημα αγωγής.

$$-\frac{V'_2}{s} + L'_2 \cdot I'_{2,Max} + s \cdot L'_2 \cdot i_{C4} + L_m \cdot I'_{2,Max} + s \cdot L_m \cdot i_{C4} = 0 \quad (5.38)$$

$$i_{C4}(s) = \frac{V'_2}{s^2 \cdot (L'_2 + L_m)} - \frac{I'_{2,Max}}{s} \quad (5.39)$$

$$i_{C4}(t) = \frac{V'_2}{L'_2 + L_m} \cdot (t - t_3) - I'_{2,Max} = -i_o(t) = -i_{Lm4}(t) \quad (5.40)$$

5.2.4 Σύστημα εξισώσεων για τη λειτουργία του Quasi-resonant Flyback

Αξιοποιώντας τις εξισώσεις που προέκυψαν από την κυκλωματική ανάλυση του μετατροπέα κατά τα επιμέρους διαστήματα αγωγής, εξάγεται το σύστημα εξισώσεων που χαρακτηρίζει πλήρως τη λειτουργία του μετατροπέα. Συγκεκριμένα, στο πέρας του πρώτου διαστήματος αγωγής, το ρεύμα του Q_1 λαμβάνει την τιμή $I_{Q1,1}$, ενώ το ρεύμα του Q_2 ισούται με το μηδέν. Επομένως, οι (5.15) και (5.16) οδηγούν στις (5.41) και (5.42) αντίστοιχα. Κατά την ολοκλήρωση του δεύτερου διαστήματος αγωγής το ρεύμα του Q_1 μηδενίζεται για δεύτερη φορά, ενώ το ρεύμα του Cr'_2 λαμβάνει την τιμή $I'_{Cr2,max-}$ που ισοδυναμεί με το $I_{Lm,Max}$. Επομένως οι (5.28) και (5.29) οδηγούν στις (5.43) και (5.44). Επιπλέον, η V'_{Cr2} λαμβάνει την τιμή $V'_{Cr2,t2}$, άρα η (5.32) μετασχηματίζεται στην (5.45). Στο πέρας του τρίτου διαστήματος αγωγής το ρεύμα του πηνίου λαμβάνει την τιμή $I'_{2,Max}$, ενώ η τάση του πυκνωτή ταλάντωσης επιστρέφει στην τιμή V'_2 . Συνεπώς, οι (5.35) και (5.37) οδηγούν στις (5.46) και (5.47). Η διακοπτική περίοδος ολοκληρώνεται κατά το πέρας του τέταρτου διαστήματος αγωγής, για

το οποίο το ρεύμα του Q_2 λαμβάνει την τιμή $I'_{2,Min}$. Επομένως, η (5.40) καταλήγει στην (5.48). Τέλος, η μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει το Q_2 οδηγεί στον υπολογισμό του ρεύματος εξόδου. Παρατηρείται ότι η μορφή του ρεύματος Q_2 είναι τραπεζοειδής, συνεπώς η μέση τιμή του δίνεται από την (5.49). Επιπλέον, η συχνότητα της ταλάντωσης δίνεται από την εξίσωση (5.50).

$$I_{Q1,1} = \frac{V_1 \cdot L'_2 + V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_m}{L_1 \cdot L'_2 + L'_2 \cdot L_m + L_1 \cdot L_m} \cdot t_1 \quad (5.41)$$

$$t_1 = I'_{2,Min} \cdot \frac{L_1 \cdot L'_2 + L'_2 \cdot L_m + L_1 \cdot L_m}{V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_1 + V'_2 \cdot L_m} \quad (5.42)$$

$$\frac{C}{F} + \frac{D}{F} \cdot (t_2 - t_1) + \frac{\left(\frac{B}{E} - \frac{D}{F}\right)}{\sqrt{\frac{F}{E}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot (t_2 - t_1)\right) = 0 \quad (5.43)$$

$$I_{Lm,Max} = \frac{V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_1}{L_1 \cdot L'_2 + L_m \cdot L'_2 + L_m \cdot L_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{F}{E}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot (t_2 - t_1)\right) \quad (5.44)$$

$$V'_{Cr2,t2} = -\frac{V_1 \cdot L_m}{L_1 + L_m} + \frac{V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_1}{L_1 + L_m} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot (t_2 - t_1)\right) \quad (5.45)$$

$$I'_{2,Max} = I_{Lm,Max} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t_3 - t_2)\right) - \frac{V'_{Cr2,t2} \cdot C'_{r2}}{\sqrt{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t_3 - t_2)\right) \quad (5.46)$$

$$V'_2 = \frac{I_{Lm,Max}}{C'_{r2}} \sqrt{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t_3 - t_2)\right) + V'_{Cr2,t2} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t_3 - t_2)\right) \quad (5.47)$$

$$I'_{2,Min} = I'_{2,Max} - \frac{V'_2}{L'_2 + L_m} \cdot (t_4 - t_3) \quad (5.48)$$

$$I'_2 = \frac{\frac{1}{2} \cdot (I'_{2,Max} + I'_{2,Min}) \cdot (t_4 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot I'_{2,Min} \cdot t_1}{t_4} \quad (5.49)$$

$$f_{resonant} = \frac{\sqrt{F}}{2\pi} = \frac{\sqrt{\frac{L_1 + L_m}{[L_1 \cdot L'_2 + L_m \cdot L'_2 + L_m \cdot L_1] \cdot C'_{r2}}}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{(L'_2 + \frac{L_1 \cdot L_m}{L_1 + L_m}) \cdot C'_{r2}}} \quad (5.50)$$

5.3 Ανάλυση απωλειών μετατροπέα Quasi-resonant Flyback

Στην ενότητα αυτή αξιοποιούνται οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.2, προκειμένου να εκτιμηθούν οι ενεργειακές απώλειες στα επιμέρους στοιχεία του μετατροπέα. Λόγω του κυκλώματος ταλάντωσης, επιτυγχάνεται σβέση του Q_1 υπό μηδενικό ρεύμα, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιούνται οι διακοπτικές απώλειες σβέσης. Επιπλέον, κατά την παλμοδότηση του Q_2 , ο παλμός στην πύλη του εφαρμόζεται έπειτα από την έναρξη αγωγής της αντιπαράλληλης διόδου του στοιχείου. Επομένως, το MOSFET τίθεται σε αγωγή υπό σχεδόν μηδενική τάση στα άκρα του (την τάση ορθής πόλωσης της αντιπαράλληλης διόδου), με αποτέλεσμα οι διακοπτικές απώλειες κατά την έναυσή του να είναι αμελητέες.

Συνεπώς, οι απώλειες που εμφανίζονται στο μετατροπέα Quasi-resonant Flyback κατηγοριοποιούνται ως ωμικές απώλειες και απώλειες πυρήνα στο μετασχηματιστή και το πηνίο ταλάντωσης, απώλειες αγωγής στα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία, καθώς και απώλειες στα φίλτρα εισόδου και εξόδου.

5.3.1 Ωμικές απώλειες στο μετασχηματιστή

Η ωμική αντίσταση που εμφανίζεται στα τυλίγματα των μαγνητικών στοιχείων οδηγεί σε ένα σημαντικό ποσοστό απωλειών του μετατροπέα. Αντίστοιχα με το μετατροπέα Flyback που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, για κάθε τύλιγμα υπολογίζονται οι απώλειες σύμφωνα με την ωμική αντίσταση που παρουσιάζει όταν διαρρέεται από σταθερό ρεύμα ($R_{Cu,1,DC}$, $R_{Cu,2,DC}$), καθώς και όταν διαρρέεται από υψίσυχνο ρεύμα ($R_{Cu,1,AC}$, $R_{Cu,2,AC}$). Συνεπώς, υπολογίζονται ξεχωριστά οι απώλειες που οφείλονται στη σταθερή (αναφέρεται με το δείκτη DC), καθώς και την εναλλασσόμενη συνιστώσα ρεύματος κάθε τυλίγματος, που αφορά τη διακοπτική συχνότητα και αναφέρεται με το δείκτη AC [82]. Το πρωτεύον του μετασχηματιστή διαρρέεται, κατά τα διαστήματα αγωγής 1 και 2, από το ρεύμα που διαρρέει το Q_1 . Από τις συναρτήσεις χρόνου $i_{A1}(t)$ και $i_{A2}(t)$ που αφορούν το ρεύμα του Q_1 (5.15 και 5.28) υπολογίζεται με χρήση αριθμητικής μεθόδου η μέση και η ενεργός τιμή του ρεύματός που διαρρέει το Q_1 , προκειμένου να αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού (5.51). Αντίστοιχα, το ρεύμα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή αποτελείται από το

ρεύμα του πυκνωτή ταλάντωσης C_{r2} (5.29 και 5.35) και το ρεύμα του Q_2 (5.16 και 5.40). Έπειτα από τον αριθμητικό υπολογισμό της μέσης και της ενεργού τιμής του ρεύματος του Q_2 , καθώς και την ενεργό τιμή του ρεύματος του C_{r2} , οι απώλειες χαλκού του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή υπολογίζονται σύμφωνα με την (5.52).

$$P_{Cu,1} = I_{Q1,DC}^2 \cdot R_{Cu,1,DC} + I_{Q1,RMS,AC}^2 \cdot R_{Cu,1,AC} \quad (5.51)$$

$$P_{Cu,2} = I_{Q2,DC}^2 \cdot R_{Cu,2,DC} + (I_{Q2,RMS,AC}^2 + I_{Cr2,RMS,AC}^2) \cdot R_{Cu,2,AC} \quad (5.52)$$

5.3.2 Ωμικές απώλειες στο πηνίο ταλάντωσης

Αντίστοιχα με τον υπολογισμό των ωμικών απωλειών του μετασχηματιστή, υπολογίζονται και οι ωμικές απώλειες στο πηνίο ταλάντωσης που τοποθετείται στην Πλευρά 1 του κυκλώματος. Η ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 προς την Πλευρά 2 σημειώνεται ως $1 \rightarrow 2$. Το πηνίο ταλάντωσης (L_s) διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα που διαρρέει το Q_1 , δηλαδή από τα ρεύματα $i_{A1}(t)$ και $i_{A2}(t)$. Επομένως, οι ωμικές του απώλειες δίνονται από την (5.53).

$$P_{Cu,Ls,1 \rightarrow 2} = I_{Q1,DC}^2 \cdot R_{Cu,Ls,DC} + I_{Q1,RMS,AC}^2 \cdot R_{Cu,Ls,AC} \quad (5.53)$$

όπου:

$R_{Cu,Ls,DC}$: Η τιμή της ωμικής αντίστασης του πηνίου ταλάντωσης για τη συνιστώσα σταθερού ρεύματος.

$R_{Cu,Ls,AC}$: Η τιμή της ωμικής αντίστασης του πηνίου ταλάντωσης για τη συνιστώσα εναλλασσόμενου ρεύματος στη διακοπτική συχνότητα.

Σημειώνεται ότι η τοπολογία του Quasi-resonant Flyback δεν είναι πλήρως συμμετρική. Συνεπώς, όταν η ροή της ενέργειας είναι από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1 ($2 \rightarrow 1$), το ρεύμα του πηνίου ταλάντωσης αντιστοιχεί στο ρεύμα του Cr_1 και του Q_1 . Άρα, οι ωμικές του απώλειες δίνονται από την (5.54).

$$P_{Cu,Ls,2 \rightarrow 1} = I_{Q1,DC}^2 \cdot R_{Cu,Ls,DC} + (I_{Q1,RMS,AC}^2 + I_{Cr1,RMS,AC}^2) \cdot R_{Cu,Ls,AC} \quad (5.54)$$

5.3.3 Απώλειες πυρήνα στο μετασχηματιστή

Αντίστοιχα με τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 3 για το μετατροπέα Flyback, η βελτιωμένη γενικευμένη εξίσωση του Steinmetz (iGSE) αξιοποιήθηκε και για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback. Για την εύρεση

της τάσης στα άκρα της επαγωγής L_m σε κάθε διάστημα αγωγής, αξιοποιούνται οι συναρτήσεις χρόνου για το i_{Lm} (5.17), (5.30), (5.35), (5.40), σε συνδυασμό με τη διαφορική εξίσωση της επαγωγής. Σημειώνεται ότι στο πρώτο και στο τέταρτο διάστημα αγωγής η τάση της L_m είναι σταθερή, ενώ στο δεύτερο και το τρίτο διάστημα αγωγής η τάση της L_m είναι μεταβλητή, λόγω της ημιτονοειδούς μορφής του ρεύματος που τη διαρρέει (5.55-5.58). Επομένως, στα διαστήματα αγωγής που η τάση είναι μεταβλητή, το άθροισμα που αναφέρεται στην (3.36) μετατρέπεται σε ολοκλήρωμα το οποίο υπολογίζεται με χρήση αριθμητικής μεθόδου.

$$V_{Lm,1} = L_m \cdot \frac{di_{Lm1}(t)}{dt} = L_m \cdot \frac{V_1 \cdot L'_2 - V'_2 \cdot L_1}{L_1 \cdot L'_2 + L'_2 \cdot L_m + L_1 \cdot L_m} \quad (5.55)$$

$$V_{Lm,2}(t) = L_m \cdot \frac{di_{Lm2}(t)}{dt} = \frac{L_m \cdot V_1}{L_1 + L_m} + L_m \cdot \left(\frac{V_1 \cdot L'_2 - V'_2 \cdot L_1}{L_1 \cdot L'_2 + L_m \cdot L'_2 + L_m \cdot L_1} - \frac{V_1}{L_1 + L_m} \right) \cdot \cos \left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot (t - t_2) \right) \quad (5.56)$$

$$V_{Lm,3}(t) = L_m \cdot \frac{di_{Lm3}(t)}{dt} = - \frac{L_m \cdot I_{Lm,Max}}{\sqrt{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot \sin \left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t - t_3) \right) - L_m \cdot V'_{Cr2,t2} \cdot C'_{r2} \cdot \cos \left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r2} + L'_2 \cdot C'_{r2}}} \cdot (t - t_3) \right) \quad (5.57)$$

$$V_{Lm,4} = L_m \cdot \frac{di_{Lm4}(t)}{dt} = - \frac{L_m \cdot V'_2}{L'_2 + L_m} \quad (5.58)$$

Για την εύρεση των απωλειών πυρήνα στο μετασχηματιστή, απαιτείται ο υπολογισμός της μέγιστης $I_{Lm,Max}$ και της ελάχιστης $I_{Lm,Min}$ τιμής του ρεύματος που διαρρέει την επαγωγή μαγνήτισης L_m . Η τιμή $I_{Lm,Max}$ υπολογίζεται από τη λύση του συστήματος (5.41-5.50). Για την εύρεση της $I_{Lm,Min}$, απαιτείται η γνώση της χρονικής στιγμής $t_{V_{Cr2}=0}$ κατά την οποία μηδενίζεται η τάση του πυκνωτή ταλάντωσης. Ο υπολογισμός της τιμής αυτής γίνεται μέσω της (5.42) και περιγράφεται από την (5.59). Επομένως, η $I_{Lm,Min}$ δίνεται μέσω της (5.60). Αξιοποιώντας τις σχέσεις που προέκυψαν, οι απώλειες πυρήνα του μετασχηματιστή για κάθε διάστημα αγωγής υπολογίζονται σύμφωνα με τις (5.61-5.63).

$$-\frac{V_1 \cdot L_m}{L_1 + L_m} + \frac{V_1 \cdot L_m + V_2' \cdot L_m + V_2' \cdot L_1}{L_1 + L_m} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot t\right) = 0 \Rightarrow$$

$$t_{Vcr2=0} = \frac{\arccos\left(\frac{V_1 \cdot L_m}{V_1 \cdot L_m + V_2' \cdot L_m + V_2' \cdot L_1}\right)}{\sqrt{\frac{F}{E}}} \quad (5.59)$$

$$I_{Lm,Min} = I_{Q1,1} + \frac{V_1}{L_1 + L_m} \cdot t_{Vcr2=0} +$$

$$+ \left[\frac{V_1 \cdot L_2' - V_2' \cdot L_1}{L_1 \cdot L_2' + L_m \cdot L_2' + L_m \cdot L_1} - \frac{V_1}{L_1 + L_m} \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{F}{E}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot t_{Vcr2=0}\right) \quad (5.60)$$

$$P_{iGSE,Tr,j} = V_e \cdot k_f \cdot f_{sw} \cdot \Delta B^{\beta-a} \cdot \frac{1}{N_1 \cdot A_e} \cdot \int_{t_{j-1}}^{t_j} |V_{Lm,j}(t)|^a \cdot dt \quad (5.61)$$

$$\Delta B = \frac{L_m}{N_1 \cdot A_e} \cdot (I_{Lm,Max} - I_{Lm,Min}) \quad (5.62)$$

$$P_{iGSE,Tr} = \sum_{j=1}^4 P_{iGSE,Tr,j} \quad (5.63)$$

5.3.4 Απώλειες πυρήνα στο πηνίο ταλάντωσης

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία, υπολογίζονται οι απώλειες πυρήνα στο πηνίο ταλάντωσης. Όπως αναφέρθηκε και κατά τον υπολογισμό των ωμικών απωλειών του πηνίου ταλάντωσης, κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2 του κυκλώματος ($1 \rightarrow 2$) το πηνίο ταλάντωσης διαρρέεται από τα $i_{A1}(t)$ και $i_{A2}(t)$. Επομένως, η τάση στα άκρα του υπολογίζεται από τις (5.64) και (5.65) και οι απώλειες του πυρήνα από τις (5.66-5.70). Για την εύρεση της τιμής της μαγνητικής επαγωγής στο πηνίο ταλάντωσης, απαιτείται η μέγιστη $I_{Q1,Max}$ και η ελάχιστη $I_{Q1,Min}$ τιμή του ρεύματος που το διαρρέει. Το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, προσεγγιστικά, τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο ένα τέταρτο της περιόδου ταλάντωσης. Επίσης η τιμή $I_{Q1,Min}$ λαμβάνεται, προσεγγιστικά, τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στα τρία τέταρτα της περιόδου ταλάντωσης. Επομένως, τα $I_{Q1,Max}$ και $I_{Q1,Min}$ προκύπτουν από την εξίσωση του $i_{A2}(t)$ της παρουσιάζεται στην

(5.67-5.68). Οι συνολικές απώλειες στο πηνίο ταλάντωσης υπολογίζονται ως άθροισμα των απωλειών στα επιμέρους διαστήματα αγωγής που συμμετέχει το L_s .

$$V_{Ls,1 \rightarrow 2,1} = L_s \cdot \frac{di_{A1}(t)}{dt} = L_s \cdot \frac{V_1 \cdot L'_2 + V_1 \cdot L_m + V'_2 \cdot L_m}{L_1 \cdot L'_2 + L'_2 \cdot L_m + L_1 \cdot L_m} \quad (5.64)$$

$$V_{Ls,1 \rightarrow 2,2} = L_s \cdot \frac{di_{A2}(t)}{dt} = L_s \cdot \left[\frac{D}{F} + \left(\frac{B}{E} - \frac{D}{F} \right) \cdot \cos \left(\sqrt{\frac{F}{E}} \cdot (t - t_1) \right) \right] \quad (5.65)$$

$$P_{iGSE,Ls,1 \rightarrow 2,j} = V_e \cdot k_f \cdot f_{sw} \cdot \Delta B^{\beta-a} \cdot \frac{1}{N_{Ls} \cdot A_{e,Ls}} \cdot \int_{t_{j-1}}^{t_j} |V_{Ls,j}(t)|^a \cdot dt \quad (5.66)$$

$$I_{Q1,Max} = i_{A2} \left(\frac{1}{4 \cdot f_{resonant}} \right) = \frac{C}{F} + \frac{D}{F} \cdot \left(\frac{1}{4 \cdot f_{resonant}} \right) + \frac{\left(\frac{B}{E} - \frac{D}{F} \right)}{\sqrt{\frac{F}{E}}} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) \quad (5.67)$$

$$I_{Q1,Min} = i_{A2} \left(\frac{3}{4 \cdot f_{resonant}} \right) = \frac{C}{F} + \frac{D}{F} \cdot \left(\frac{3}{4 \cdot f_{resonant}} \right) + \frac{\left(\frac{B}{E} - \frac{D}{F} \right)}{\sqrt{\frac{F}{E}}} \cdot \sin \left(\frac{3\pi}{2} \right) \quad (5.68)$$

$$\Delta B_{Ls,1 \rightarrow 2} = \frac{L_s}{N_{Ls} \cdot A_{e,Ls}} \cdot (I_{Q1,Max} - I_{Q1,Min}) \quad (5.69)$$

$$P_{iGSE,Ls,1 \rightarrow 2} = \sum_{j=1}^2 P_{iGSE,Ls,1 \rightarrow 2,j} \quad (5.70)$$

Κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1 ($2 \rightarrow 1$), το πηνίο ταλάντωσης L_s διαρρέεται από το ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή ταλάντωσης C_{r1} και το ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο Q_1 . Επομένως, για την εκτίμηση των απωλειών στο L_s , ακολουθούνται οι κανόνες που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.2. Συνεπώς, όλοι οι δείκτες '1' και '2' στις αντίστοιχες μεταβλητές αντιστρέφονται. Κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 προς την Πλευρά 1, η τάση V_2 αφορά την είσοδο του μετατροπέα, ενώ η τάση V_1 αφορά την έξοδο αυτού. Αφού εκφραστούν όλα τα μεγέθη σύμφωνα με τη ροή ενέργειας αυτή, υπολογίζονται οι απώλειες στο L_s . Σημειώνεται ότι στο μετατροπέα Quasi-resonant Flyback, η πλευρά του κυκλώματος που αναφέρεται στην έξοδο, διαρρέεται από ρεύμα σε όλη τη διάρκεια της περιόδου. Συνεπώς, απαιτείται ο υπολογισμός της

τάσης του σε κάθε ένα από τα τέσσερα διαστήματα αγωγής, κατά τα οποία το L_s διαρρέεται από το $i_{B1}(t)$, $i_{B2}(t)$, $i_{B3}(t)$, $i_{C4}(t)$ αντίστοιχα (5.71-5.74).

$$V_{Ls,2 \rightarrow 1,1} = L'_s \cdot \frac{d(-i_{B1}(t))}{dt} = -L'_s \cdot \frac{V_2 \cdot L_m + V'_1 \cdot L_2 + V'_1 \cdot L_m}{L_2 \cdot L'_1 + L'_1 \cdot L_m + L_2 \cdot L_m} \quad (5.71)$$

$$V_{Ls,2 \rightarrow 1,2} = L'_s \cdot \frac{d(-i_{B2}(t))}{dt} = -L'_s \cdot \frac{V_2 \cdot L_m + V'_1 \cdot L_m + V'_1 \cdot L_2}{L_2 \cdot L'_1 + L_m \cdot L'_1 + L_m \cdot L_2} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{F'}{E'}} \cdot (t - t_1)\right) \quad (5.72)$$

$$\begin{aligned} V_{Ls,2 \rightarrow 1,3} &= L'_s \cdot \frac{d(-i_{B3}(t))}{dt} = \\ &-L'_s \cdot I_{Lm,Max} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r1} + L'_1 \cdot C'_{r1}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r1} + L'_1 \cdot C'_{r1}}} \cdot (t - t_2)\right) - \\ &-L'_s \cdot V'_{Cr1,t2} \cdot C'_{r1} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{L_m \cdot C'_{r1} + L'_1 \cdot C'_{r1}}} \cdot (t - t_2)\right) \end{aligned} \quad (5.73)$$

$$V_{Ls,2 \rightarrow 1,4} = -L'_s \cdot \frac{d(-i_{C4}(t))}{dt} = -L'_s \cdot \frac{V'_1}{L'_1 + L_m} \quad (5.74)$$

$$I'_{Cr1,Max-} = i_{B2} \left(\frac{1}{4 \cdot f_{resonant}} \right) = -\frac{V_2 \cdot L_m + V'_1 \cdot L_m + V'_1 \cdot L_2}{L_2 \cdot L'_1 + L_m \cdot L'_1 + L_m \cdot L_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{F_{2 \rightarrow 1}}{E_{2 \rightarrow 1}}}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (5.75)$$

$$I'_{Cr1,Max+} = i_{B2} \left(\frac{3}{4 \cdot f_{resonant}} \right) = -\frac{V_2 \cdot L_m + V'_1 \cdot L_m + V'_1 \cdot L_2}{L_2 \cdot L'_1 + L_m \cdot L'_1 + L_m \cdot L_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{F_{2 \rightarrow 1}}{E_{2 \rightarrow 1}}}} \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{2}\right) \quad (5.76)$$

$$\Delta B_{Ls,2 \rightarrow 1} = \frac{L'_s}{N_{Ls} \cdot A_{e,Ls}} \cdot (I'_{Cr1,Max+} - I'_{Cr1,Max-}) \quad (5.77)$$

$$P_{iGSE,Ls,2 \rightarrow 1,j} = V_e \cdot k_f \cdot f_{sw} \cdot \Delta B^{\beta-a} \cdot \frac{1}{N_{Ls} \cdot A_{e,Ls}} \cdot \int_{t_{j-1}}^{t_j} |V_{Ls,j}(t)|^a \cdot dt \quad (5.78)$$

$$P_{iGSE,Ls,2 \rightarrow 1} = \sum_{j=1}^4 P_{iGSE,Ls,2 \rightarrow 1,j} \quad (5.79)$$

Οι όροι $E_{2 \rightarrow 1}$, $F_{2 \rightarrow 1}$ προκύπτουν από τις E , F (5.25-5.26), όπως παρουσιάζεται στις (5.80-5.81).

$$E_{2 \rightarrow 1} = [L_2 \cdot L'_1 + L_m \cdot L'_1 + L_m \cdot L_2] \cdot C'_{r1} \quad (5.80)$$

$$F_{2 \rightarrow 1} = L_2 + L_m \quad (5.81)$$

5.3.5 Απώλειες στα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία

Στο μετατροπέα Quasi-resonant Flyback, το ημιαγωγικό στοιχείο Q_1 τίθεται σε αγωγή και το ρεύμα του αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τιμή $I_{Q1,1}$. Παρόλο που δεν ικανοποιείται η συνθήκη για έναυση του στοιχείου υπό μηδενική τάση, για διακοπτικές συχνότητες έως 500 kHz η μείωση της τάσης μεταξύ της υποδοχής και της πύλης πραγματοποιείται πριν το ρεύμα που διαρρέει το στοιχείο λάβει μεγάλες τιμές. Επομένως, η γρήγορη μείωση της τάσης στα άκρα του στοιχείου, σε συνδυασμό με τη σταδιακή αύξηση του ρεύματος, οδηγεί σε πολύ μικρές τιμές των απωλειών έναυσης που μπορούν να αμεληθούν. Επιπλέον, η σβέση του Q_1 επιτυγχάνεται υπό μηδενικό ρεύμα, με αποτέλεσμα να μηδενίζονται οι διακοπτικές απώλειες που αντιστοιχούν στη σβέση του. Συνεπώς, οι απώλειες που αφορούν το ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο Q_1 είναι μόνο οι απώλειες αγωγής.

Σχετικά με το Q_2 , ο παλμός στην πύλη του εφαρμόζεται λίγο μετά τη χρονική στιγμή t_3 προκειμένου να έχει τεθεί σε αγωγή η αντιπαράλληλη διόδός του. Επομένως, επιτυγχάνεται έναυση του στοιχείου υπό σχεδόν μηδενική τάση (την τάση αγωγής της διόδου του), άρα και ελαχιστοποίηση των απωλειών έναυσης. Κατά τη σβέση του στοιχείου, ο παλμός αποσύρεται από την πύλη όταν το ρεύμα μηδενιστεί. Συνεπώς, ελαχιστοποιούνται και οι απώλειες σβέσης του ημιαγωγικού στοιχείου Q_2 . Συμπερασματικά, οι απώλειες που αναφέρονται στο Q_2 αφορούν την αγωγή του. Κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2, το Q'_2 είναι μόνιμα σε αγωγή, ενώ το Q'_1 είναι μόνιμα σε αποκοπή. Επομένως, στα βοηθητικά αυτά στοιχεία καταναλώνεται ενέργεια που αφορά μόνο την αγωγή του Q'_2 . Σύμφωνα με τα παραπάνω, σε όλα τα ημιαγωγικά στοιχεία που τίθενται σε αγωγή εμφανίζονται μόνο απώλειες αγωγής. Αξιοποιώντας τις συναρτήσεις χρόνου που περιγράφουν το ρεύμα που διαρρέει κάθε στοιχείο σε κάθε διάστημα αγωγής, οι ενεργές τιμές των ρευμάτων τους ($I_{Q1,RMS}$, $I_{Q2,RMS}$, $I_{Q'2,RMS}$) υπολογίζονται με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Επομένως, οι συνολικές απώλειες αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων δίνονται από την (5.82).

$$P_{Q,cond,1 \rightarrow 2} = I_{Q1,RMS}^2 \cdot R_{DSon,Q1} + I_{Q2,RMS}^2 \cdot R_{DSon,Q2} + I_{Q'2,RMS}^2 \cdot R_{DSon,Q'2} \quad (5.82)$$

5.3.6 Λοιπές απώλειες

Οι λοιπές απώλειες αφορούν τις απώλειες στα φίλτρα και αναφέρονται στις ισοδύναμες εν σειρά αντιστάσεις (Equivalent Series Resistances, ESRs) των πυκνωτών, καθώς και στις αντιστάσεις των

πηνίων, θεωρείται ότι τα φίλτρα είναι αρκούντως μεγάλα, ώστε οι πυκνωτές εξομάλυνσης να διαρρέονται από ολόκληρη την εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος και τα πηνία των φίλτρων να διαρρέονται μόνο από τη σταθερή συνιστώσα του ρεύματος (5.83).

$$P_{misc} = I_1^2 \cdot R_{Lf,1} + I_2^2 \cdot R_{Lf,2} + (I_{Q1,RMS}^2 - I_1^2) \cdot ESR_{C1} + (I_{Q2,RMS}^2 - I_2^2) \cdot ESR_{C2} \quad (5.83)$$

5.3.7 Υπολογισμός απόδοσης μετατροπέα Quasi-resonant Flyback

Η απόδοση του μετατροπέα υπολογίζεται σύμφωνα με την ισχύ εξόδου και τις απώλειες στα επιμέρους στοιχεία του κυκλώματος, όπως παρουσιάζεται στην (5.84). Η τοποθέτηση ενός μόνο πηνίου ταλάντωσης, στη μία εκ των δύο πλευρών του μετατροπέα, καθιστά το μετατροπέα Quasi-resonant Flyback ένα μη πλήρως συμμετρικό κύκλωμα. Επομένως, αντίστοιχα με το μετατροπέα Flyback, στη φάση του σχεδιασμού πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι δύο κατευθύνσεις ροής ενέργειας.

$$efficiency = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{Cu,1} + P_{Cu,2} + P_{Cu,LS,1 \rightarrow 2} + P_{iGSE,Tr} + P_{iGSE,LS} + P_{Q,cond,1 \rightarrow 2} + P_{misc}} \quad (5.84)$$

5.4 Μεγιστοποίηση απόδοσης μετατροπέα Quasi-resonant Flyback

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback με χρήση Γενετικού Αλγορίθμου (Genetic Algorithm, GA). Αφού τίθενται οι απαιτούμενες προδιαγραφές λειτουργίας για το μετατροπέα, ορίζονται οι μεταβλητές βελτιστοποίησης και οι περιορισμοί. Έπειτα, εκτελείται ο GA και εξάγονται οι τιμές των πηνίων και πυκνωτών που θα χρησιμοποιηθούν για το κύκλωμα ταλάντωσης του μετατροπέα.

5.4.1 Προδιαγραφές λειτουργίας για το μετατροπέα Quasi-resonant Flyback

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, ο μετατροπέας Quasi-resonant Flyback έχει επιλεγεί για την εξισορρόπηση ομάδων συσσωρευτών, με κάθε ομάδα να αποτελείται από οκτώ συσσωρευτές με μέγιστη συνολική τάση τα 32 V. Για το παρόν σενάριο εξισορρόπησης ορίστηκε ρεύμα εξισορρόπησης μεταξύ των ομάδων ίσο με 5 A. Επομένως, ο μετατροπέας που θα υλοποιηθεί θα προσφέρει εξισορρόπηση με ισχύ 160 W.

Για την κατασκευή του μετατροπέα επιλέχθηκε βιομηχανικά κατασκευασμένο καλώδιο Litz 1500 κλώνων διαμέτρου 50 μm ο καθένας. Επιπλέον, επιλέχθηκε ο πυρήνας RM14, καθώς έχει κατάλληλο

Area Product που μπορεί να υποστηρίξει τη μαγνητική ροή που απαιτείται για τις ανάγκες της εφαρμογής. Επιπλέον, ο όγκος του RM14 είναι επαρκής για τη χρήση του βιομηχανικά κατασκευασμένου Litz. Όσον αφορά το πηνίο ταλάντωσης, επιλέχθηκε ο πυρήνας RM10 και καλώδιο Litz που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο με 200 κλώνους διαμέτρου 150 μm ο καθένας.

5.4.2 Μεταβλητές βελτιστοποίησης και περιορισμοί

Όπως προαναφέρθηκε, ο μετατροπέας Quasi-resonant Flyback αξιοποιείται για την εξισορρόπηση μεταξύ ομάδων συσσωρευτών που αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό κελιών. Επομένως, ο λόγος μετασχηματισμού n τίθεται ίσος με τη μονάδα. Έχοντας ως δεδομένο τον πυρήνα που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και το καλώδιο Litz, πραγματοποιείται η περιέλιξη του μετασχηματιστή, προκειμένου να διαπιστωθεί ο μέγιστος αριθμός σπειρών που μπορεί να χωρέσει στον πυρήνα. Με αυτό τον τρόπο, καταλήγουμε σε έξι σπείρες ανά τύλιγμα. Αντίστοιχα, για το πηνίο ταλάντωσης καταλήγουμε σε τέσσερις σπείρες. Συνεπώς, η επαγωγή μαγνήτισης του μετασχηματιστή (L_m), καθώς και η επαγωγή του πηνίου ταλάντωσης (L_s) ρυθμίζονται μεταβάλλοντας το μέγεθος του διακένου.

Για να επιτευχθεί ακριβής εκτίμηση της απόδοσης κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή και του πηνίου ταλάντωσης μετρήθηκε με το Analog Discovery 2⁴ και προσεγγίστηκε με μέθοδο προσαρμογής καμπύλης. Τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 5.7, ενώ οι συναρτήσεις της ωμικής αντίστασης σε σχέση με τη συχνότητα λειτουργίας παρουσιάζονται στις σχέσεις (5.85-5.86).

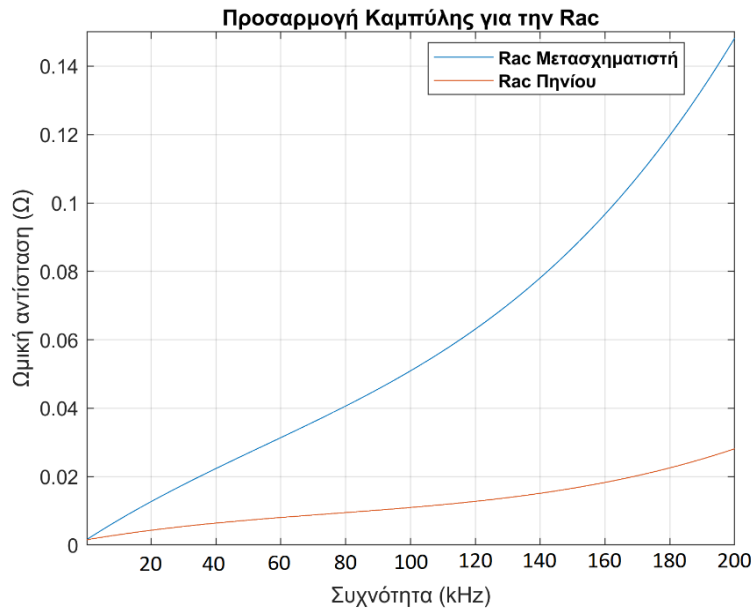
$$R_{AC,Transf} = (1,783 \cdot 10^{-17}) \cdot f^3 - (2,9544 \cdot 10^{-12}) \cdot f^2 + 6,113 \cdot 10^{-7} \cdot f + 3 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.85)$$

$$R_{AC,Ls} = (5,3257 \cdot 10^{-18}) \cdot f^3 - (1,2125 \cdot 10^{-12}) \cdot f^2 + (1,6267 \cdot 10^{-7}) \cdot f + 1,5 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (5.86)$$

Έχοντας επιλέξει τις παραπάνω σχεδιαστικές παραμέτρους του μετατροπέα, εκτελείται ο GA για την επιλογή των τιμών που αφορούν την επαγωγή μαγνήτισης L_m , το πηνίο ταλάντωσης L_s , καθώς και του πυκνωτή ταλάντωσης C_r . Στον Πίνακα 5.1 δίνονται τα πεδία τιμών για τις παραπάνω μεταβλητές. Οι περιοριστικές συνθήκες αφορούν τη μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής του μετασχηματιστή και του πηνίου, καθώς και την ελάχιστη τιμή του ρεύματος $I_{Q1,Min}$ που υποδηλώνει την ικανοποίηση της συνθήκης για σβέση του ημιαγωγικού στοιχείου υπό μηδενικό ρεύμα (5.87-

⁴ <https://digilent.com/shop/analog-discovery-2-100ms-s-usb-oscilloscope-logic-analyzer-and-variable-power-supply/>

5.88). Ο GA εκτελείται για ονομαστική τάση εισόδου 26,4 V και την ελάχιστη επιτρεπτή τάση εξόδου της ομάδας (22,4 V), προκειμένου να καταλήξει στη μέγιστη τιμή της σταθμισμένης απόδοσης που αφορά τις δύο κατευθύνσεις ροής της ενέργειας.



Σχήμα 5.7: Προσαρμογή καμπύλης για την εκτίμηση της R_{AC} .

$$B_{max} \leq 0.35 T \quad (5.87)$$

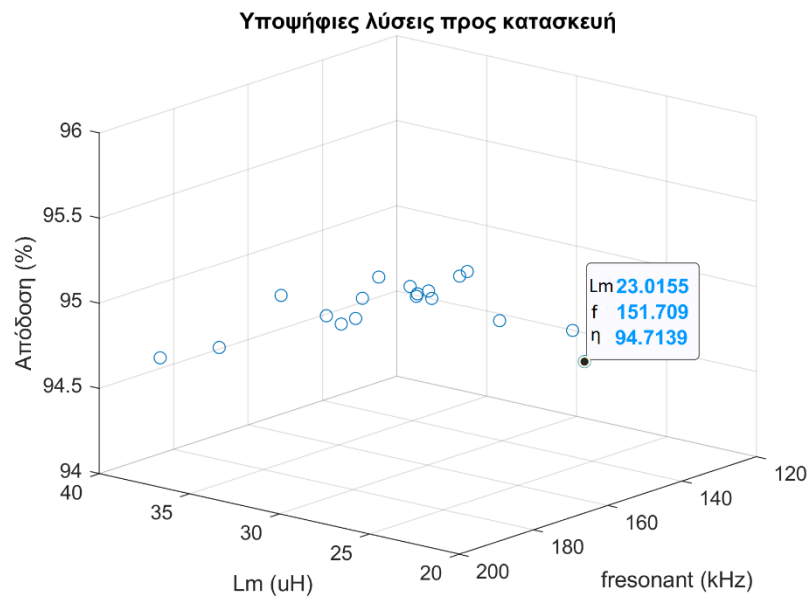
$$I_{Q1,Min} < 0 A \quad (5.88)$$

Πίνακας 5.1: Όρια μεταβλητών για την εκτέλεση του GA.

Όρια μεταβλητών		
Παράμετρος	Όρια	Μονάδα
L_m	5-50	μH
L_s	0-10	μH
C_r	10-500	nF

5.4.3 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του GA για την εύρεση των τιμών των στοιχείων ταλάντωσης δίνονται στο Σχήμα 5.8. Αντίστοιχα με την περίπτωση του αμφίδρομου μετατροπέα Flyback, ο GA εκτελέστηκε με διαφορετική γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών, προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη λύση που μεγιστοποιεί την απόδοση. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του μετατροπέα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.



Σχήμα 5.8: Υποψήφιες λύσεις προς κατασκευή έπειτα από την εκτέλεση του GA.

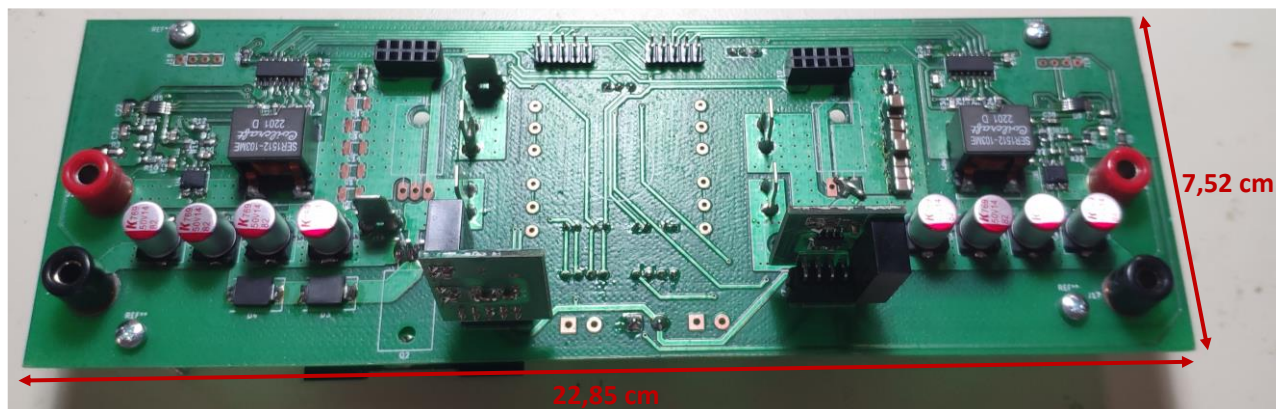
Πίνακας 5.2: Στοιχεία μετατροπέα Quasi-resonant Flyback.

Στοιχεία μετατροπέα Quasi-resonant Flyback		
Στοιχείο	Τιμή	Μονάδα
MOSFETs	IPP051N15N5AKSA1	-
Πυρήνας MT	RM14 N87	-
Πυρήνας Πηνίου	RM10 N87	-
n	6:6	-
L_m	21,34	μH
k	97,21	%
L_{l1}, L_{l2}	0,614	μH
L_s	3,19	μH
C_{r1}, C_{r2}	270	nF
Εκτιμώμενη απόδοση	94,71	%

5.5 Πειραματική αξιολόγηση μετατροπέα Quasi-resonant Flyback

Στην ενότητα αυτή, πραγματοποιείται πειραματική αξιολόγηση του πρωτοτύπου που κατασκευάστηκε σύμφωνα με τα αποτελέσματα του GA. Αρχικά, εξετάζεται η ακρίβεια της προτεινόμενης ανάλυσης όσον αφορά την εύρεση του σημείου λειτουργίας του μετατροπέα (ενότητα 5.2). Έπειτα, αξιολογείται η ακρίβεια εκτίμησης των απωλειών στα επιμέρους στοιχεία του

μετατροπέα και η εύρεση της απόδοσης για τις δύο κατευθύνσεις ροής ενέργειας (ενότητα 5.3). Τα πειράματα πραγματοποιούνται για τη λειτουργία του μετατροπέα και προς τις δύο κατευθύνσεις (από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2 και τούμπαλιν). Στο τέλος της ενότητας αυτής, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων της διατριβής με σχετικές εργασίες από τη βιβλιογραφία. Το εργαστηριακό πρωτότυπο που κατασκευάστηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9: Το εργαστηριακό πρωτότυπο του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback.

5.5.1 Αξιολόγηση λειτουργίας μετατροπέα

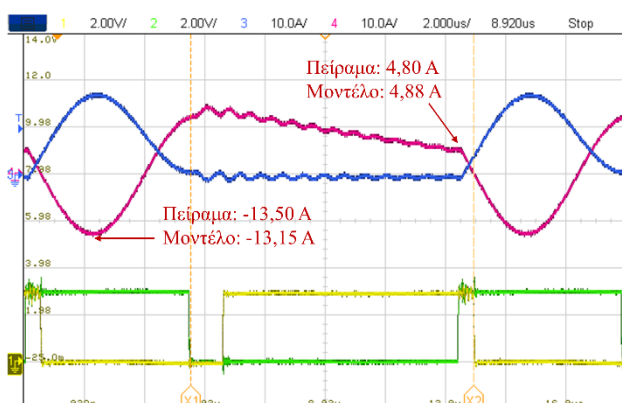
Κατά την πρώτη φάση της αξιολόγησης του μετατροπέα, η τάση εισόδου (Πλευρά 1) τοποθετείται στα 32 V που χαρακτηρίζει τη μέγιστη τάση της ομάδας. Το ρεύμα εξισορρόπησης τίθεται στα 5 A. Η τιμή αυτή αποτελεί προδιαγραφή του μετατροπέα, προκειμένου να καταστεί εφικτή η γρήγορη εξισορρόπηση. Έχοντας επιλέξει την τάση εισόδου και το ρεύμα εξόδου, πραγματοποιούνται πειράματα θέτοντας την τάση εξόδου (Πλευρά 2) στα 22,4 V και 32 V (ελάχιστη και μέγιστη τάση ομάδας), ώστε να ληφθούν κυματομορφές κατά τη λειτουργία του μετατροπέα στην ελάχιστη και τη μέγιστη ισχύ. Η τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα (Πλευρά 2) επιλέγεται με τη χρήση ηλεκτρονικού φορτίου, το οποίο τίθεται στη λειτουργία σταθερής τάσης (Constant Voltage). Για την επίτευξη ρεύματος εξόδου τιμής 5 A, επιλύεται το μη γραμμικό σύστημα που περιγράφεται από τις εξισώσεις (5.41-5.50), με γνωστές τις τάσεις εισόδου και εξόδου, προκειμένου να εκτιμηθεί η διακοπτική συχνότητα και ο λόγος κατάτμησης που θα εφαρμοστεί στον παλμό του ημιαγωγικού στοιχείου Q_1 , σύμφωνα με τις εξισώσεις (5.89) και (5.90).

$$f_{sw} = \frac{1}{t_4} \quad (5.89)$$

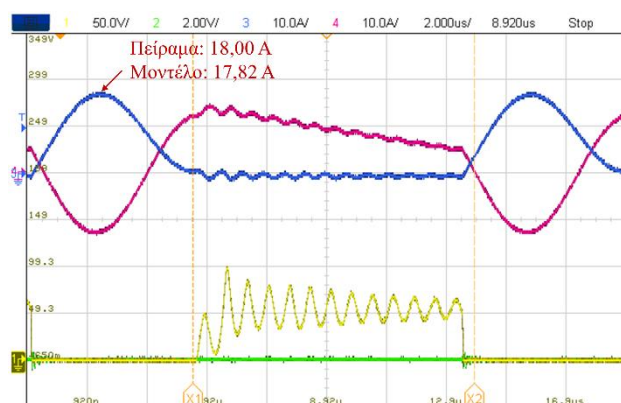
$$dutyCycle_{Q1} = \frac{t_1 + t_2}{t_4} \cdot 100 \% \quad (5.90)$$

Ροή ενέργειας από Πλευρά 1 σε Πλευρά 2

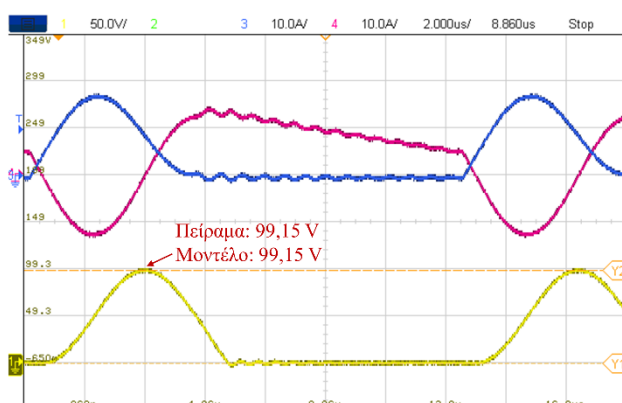
Στα Σχήματα 5.10-5.13 παρουσιάζονται κυματομορφές από τον παλμογράφο για τα χαρακτηριστικά μεγέθη του μετατροπέα, κατά τη λειτουργία αυτού σύμφωνα με τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2, με τάση εισόδου 32 V και τάση εξόδου 22,4 V.



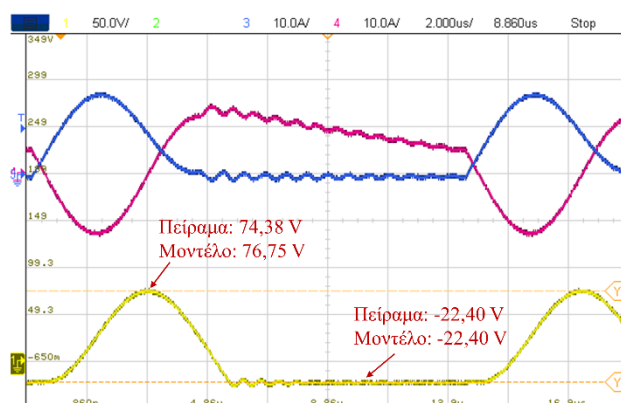
Σχήμα 5.10: Λειτουργία Πλευρά 1 προς Πλευρά 2 με $V_1=32$ V, $V_2=22,4$ V, $I_2=5$ A. Εκτίμηση τιμών ρευμάτων Q_2 . Πράσινο: Παλμός Q_1 , Κίτρινο: Παλμός Q_2 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.



Σχήμα 5.11: Λειτουργία Πλευρά 1 προς Πλευρά 2 με $V_1=32$ V, $V_2=22,4$ V, $I_2=5$ A. Εκτίμηση μέγιστου ρεύματος Q_1 . Κίτρινο: V_{DS} Q_1 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.



Σχήμα 5.12: Λειτουργία Πλευρά 1 προς Πλευρά 2 με $V_1=32$ V, $V_2=22,4$ V, $I_2=5$ A. Εκτίμηση μέγιστης τάσης Q_2 . Κίτρινο: V_{DS} Q_2 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.

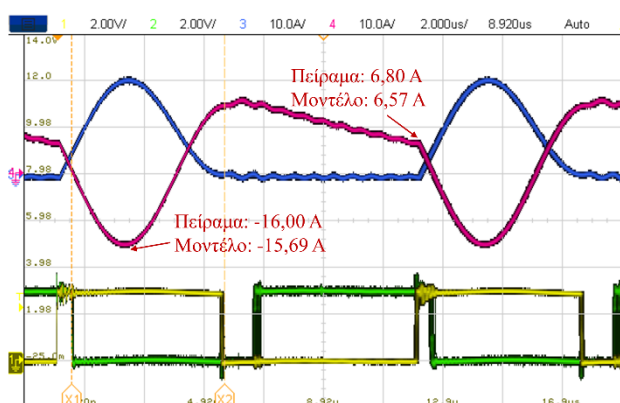


Σχήμα 5.13: Λειτουργία Πλευρά 1 προς Πλευρά 2 με $V_1=32$ V, $V_2=22,4$ V, $I_2=5$ A. Εκτίμηση τάσης Cr_2 . Κίτρινο: V_{Cr2} , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.

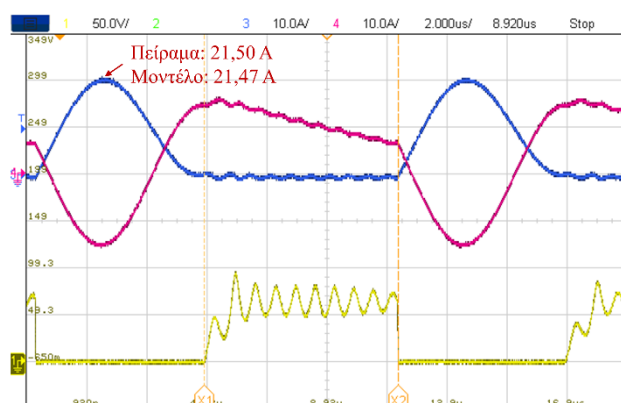
Ιδιαίτερα στα Σχήματα 5.10 και 5.11, παρατηρείται η επίτευξη της σβέσης του Q_1 υπό μηδενικό ρεύμα σύμφωνα με τους χρόνους αγωγής που προκύπτουν από το προτεινόμενο μοντέλο. Επιπλέον,

παρατηρείται ότι και η σβέση του Q_2 πραγματοποιείται υπό μηδενικό ρεύμα (ο παλμός αποσύρεται τη χρονική στιγμή t_1). Τέλος, από τα Σχήματα 5.10, 5.11 και 5.12 παρατηρείται ότι η έναυση του Q_2 πραγματοποιείται όταν ολοκληρώνεται η ταλάντωση της τάσης του C_{r2} . Συνεπώς, το Q_2 ξεκινά την αγωγή υπό μηδενική τάση.

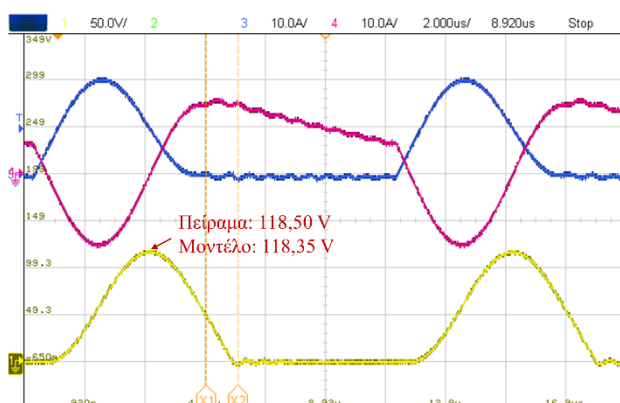
Επαναλαμβάνοντας την πειραματική διαδικασία για τάση εξόδου 32 V, παρατίθενται τα Σχήματα 5.14-5.17 από τον παλμογράφο. Σημειώνεται ότι και σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας η προτεινόμενη μοντελοποίηση του μετατροπέα οδηγεί σε εκτίμηση των λειτουργικών του μεγεθών με καλή ακρίβεια.



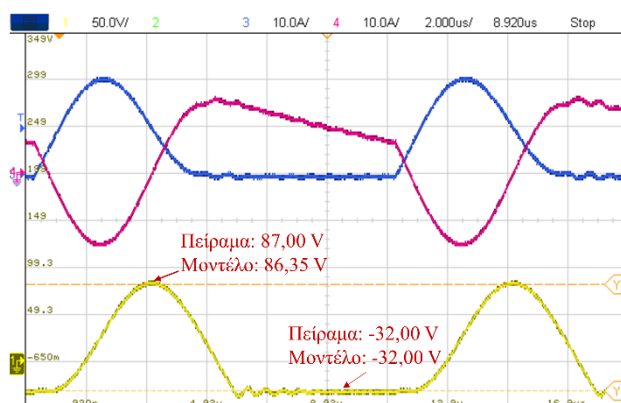
Σχήμα 5.14: Λειτουργία Πλευρά 1 προς Πλευρά 2 με $V_1=32$ V, $V_2=32$ V, $I_2=5$ A. Εκτίμηση τιμών ρευμάτων Q_2 . Κίτρινο: Παλμός Q_1 , Πράσινο: Παλμός Q_2 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.



Σχήμα 5.15: Λειτουργία Πλευρά 1 προς Πλευρά 2 με $V_1=32$ V, $V_2=32$ V, $I_2=5$ A. Εκτίμηση μέγιστου ρεύματος Q_1 . Κίτρινο: V_{DS} Q_1 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.



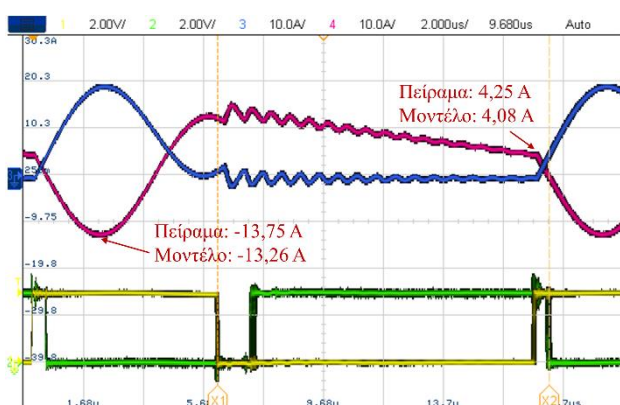
Σχήμα 5.16: Λειτουργία Πλευρά 1 προς Πλευρά 2 με $V_1=32$ V, $V_2=32$ V, $I_2=5$ A. Εκτίμηση μέγιστης τάσης Q_2 . Κίτρινο: V_{DS} Q_2 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.



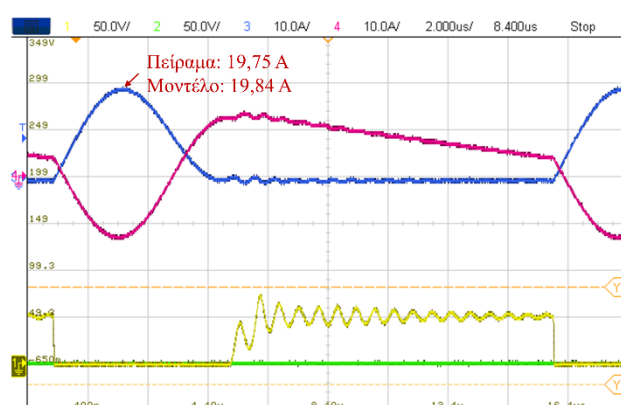
Σχήμα 5.17: Λειτουργία Πλευρά 1 προς Πλευρά 2 με $V_1=32$ V, $V_2=32$ V, $I_2=5$ A. Εκτίμηση τάσης C_{r2} . Κίτρινο: V_{Cr2} , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.

Ροή ενέργειας από Πλευρά 2 σε Πλευρά 1

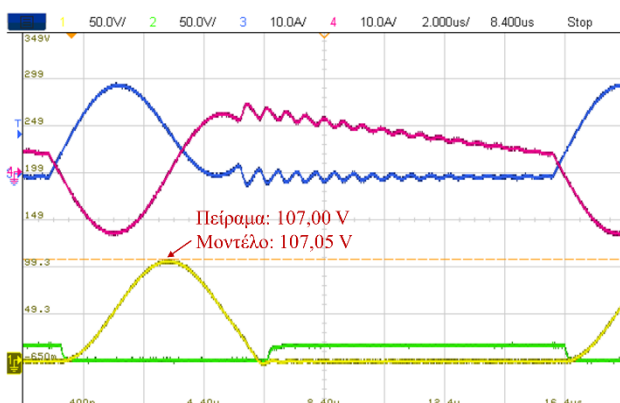
Κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1, το κύκλωμα διαφοροποιείται ελαφρώς, καθώς το πηνίο ταλάντωσης βρίσκεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, άρα στην πλευρά της εξόδου. Στα Σχήματα 5.18-5.21 παρουσιάζονται κυματομορφές από τον παλμογράφο για τα χαρακτηριστικά μεγέθη του μετατροπέα, με τάση εισόδου 32 V και τάση εξόδου 22,4 V. Επιπλέον, για την πληρότητα της ανάλυσης, τα χαρακτηριστικά μεγέθη του μετατροπέα για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1 για πλήρη ισχύ λειτουργίας (τάση εξόδου 32 V) παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.22-5.25.



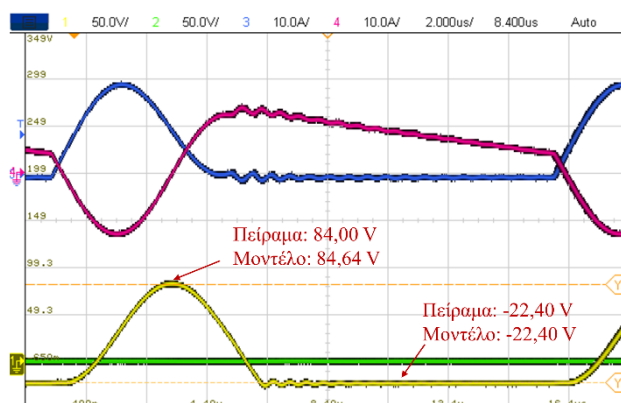
Σχήμα 5.18: Λειτουργία Πλευρά 2 προς Πλευρά 1 με $V_2=32$ V, $V_1=22,4$ V, $I_1=5$ A. Εκτίμηση τιμών ρευμάτων Q_1 . Πράσινο: Παλμός Q_1 , Κίτρινο: Παλμός Q_2 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.



Σχήμα 5.19: Λειτουργία Πλευρά 2 προς Πλευρά 1 με $V_2=32$ V, $V_1=22,4$ V, $I_1=5$ A. Εκτίμηση μέγιστου ρεύματος Q_2 . Κίτρινο: V_{DS} Q_2 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.

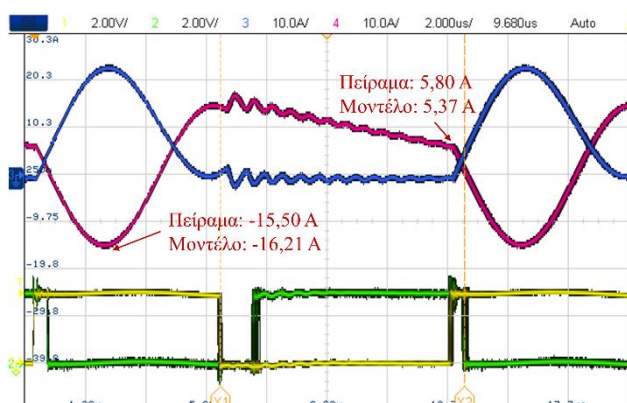


Σχήμα 5.20: Λειτουργία Πλευρά 2 προς Πλευρά 1 με $V_2=32$ V, $V_1=22,4$ V, $I_1=5$ A. Εκτίμηση μέγιστης τάσης Q_1 . Κίτρινο: V_{DS} Q_1 , Πράσινο: V_{GS} Q_1 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.

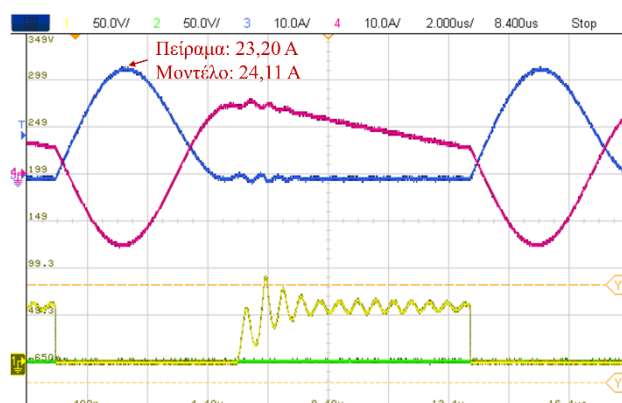


Σχήμα 5.21: Λειτουργία Πλευρά 2 προς Πλευρά 1 με $V_2=32$ V, $V_1=22,4$ V, $I_1=5$ A. Εκτίμηση τάσης Cr_1 . Κίτρινο: V_{Cr1} , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.

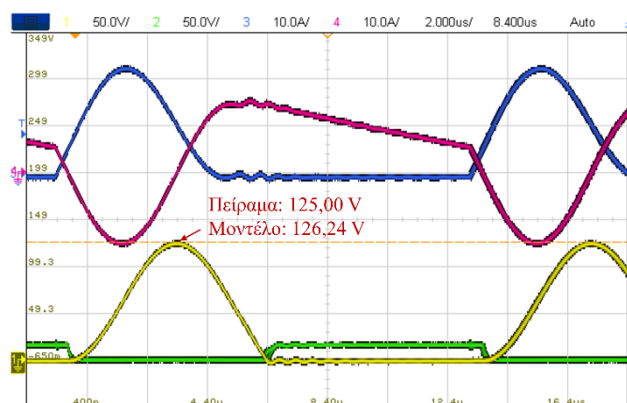
Εξετάζοντας τα Σχήματα 5.10-5.25, παρατηρείται ότι το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ακριβή πρόβλεψη των χαρακτηριστικών μεγεθών του μετατροπέα σε ευρύ φάσμα της λειτουργίας αυτού. Η εκμετάλλευση της σκέδασης του μετασχηματιστή για την πραγματοποίηση της ταλάντωσης του ρεύματος, οδηγεί στην εξάλειψη των υπερτάσεων που εμφανίζονται στον κλασικό Flyback. Επιπλέον, η ταλάντωση που πραγματοποιείται στην τάση του ημιαγωγικού στοιχείου του δευτερεύοντος οδηγεί στην έναυση του υπό μηδενική τάση. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με τη σταδιακή αύξηση του ρεύματος στο ημιαγωγικό στοιχείο του πρωτεύοντος, οδηγεί σε ελαχιστοποίηση των διακοπτικών απωλειών στα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία (πρακτικά μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές).



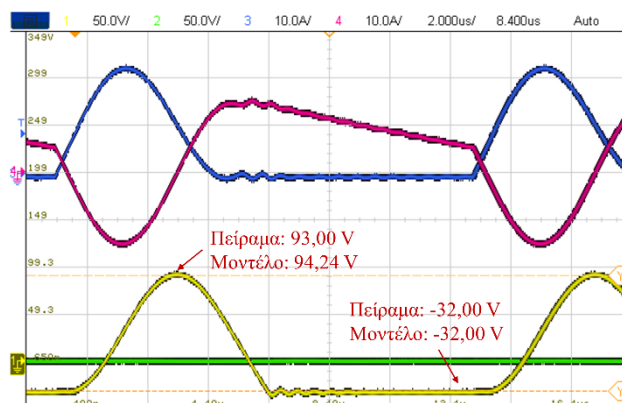
Σχήμα 5.22: Λειτουργία Πλευρά 2 προς Πλευρά 1 με $V_2=32$ V, $V_1=32$ V, $I_1=5$ A. Εκτίμηση τιμών ρευμάτων. Πράσινο: Παλμός Q_1 , Κίτρινο: Παλμός Q_2 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.



Σχήμα 5.23: Λειτουργία Πλευρά 2 προς Πλευρά 1 με $V_2=32$ V, $V_1=32$ V, $I_1=5$ A. Εκτίμηση μέγιστου ρεύματος Q_2 . Κίτρινο: V_{DS} Q_2 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.



Σχήμα 5.24: Λειτουργία Πλευρά 2 προς Πλευρά 1 με $V_2=32$ V, $V_1=32$ V, $I_1=5$ A. Εκτίμηση μέγιστης τάσης Q_1 . Κίτρινο: V_{DS} Q_1 , Πράσινο: V_{GS} Q_1 , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.



Σχήμα 5.25: Λειτουργία Πλευρά 2 προς Πλευρά 1 με $V_2=32$ V, $V_1=32$ V, $I_1=5$ A. Εκτίμηση τάσης Cr_1 . Κίτρινο: V_{Cr1} , Μπλε: Ρεύμα πρωτεύοντος, Μώβ: Ρεύμα δευτερεύοντος.

5.5.2 Εκτίμηση Κατάστασης Λειτουργίας

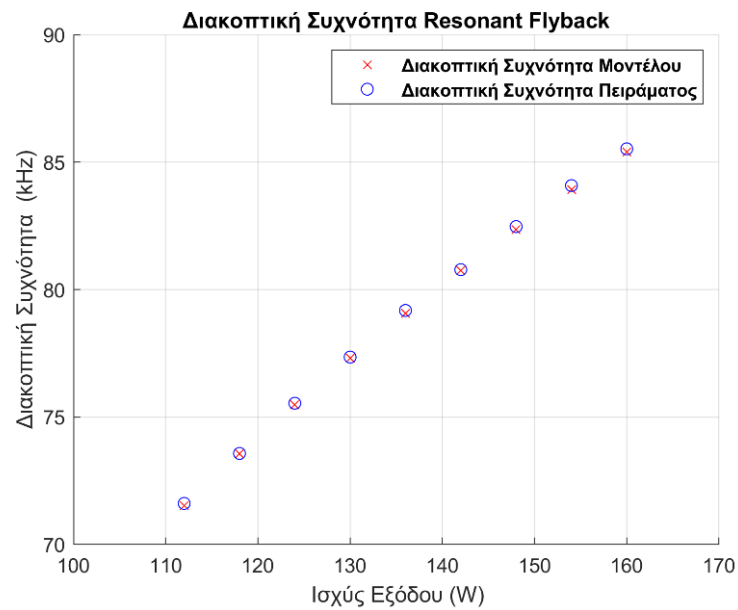
Αφού επιβεβαιώθηκε η ορθή λειτουργία του μετατροπέα σύμφωνα με τη θεωρητική ανάλυση, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αριθμός πειραμάτων για την αξιολόγηση του προτεινόμενου μοντέλου όσον αφορά την εκτίμηση της διακοπτικής συχνότητας και του λόγου κατάτμησης, προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο ρεύμα εξόδου υπό συγκεκριμένη τάση των ομάδων συσσωρευτών που συνδέονται στην είσοδο και την έξοδο του μετατροπέα. Η τάση εισόδου τίθεται στα 32 V, ενώ η τάση εξόδου μεταβάλλεται από τα 22,4 V έως τα 32 V με τη χρήση του ηλεκτρονικού φορτίου. Η επιθυμητή τιμή του ρεύματος εξόδου τίθεται στα 5 A.

Ροή ενέργειας από Πλευρά 1 σε Πλευρά 2

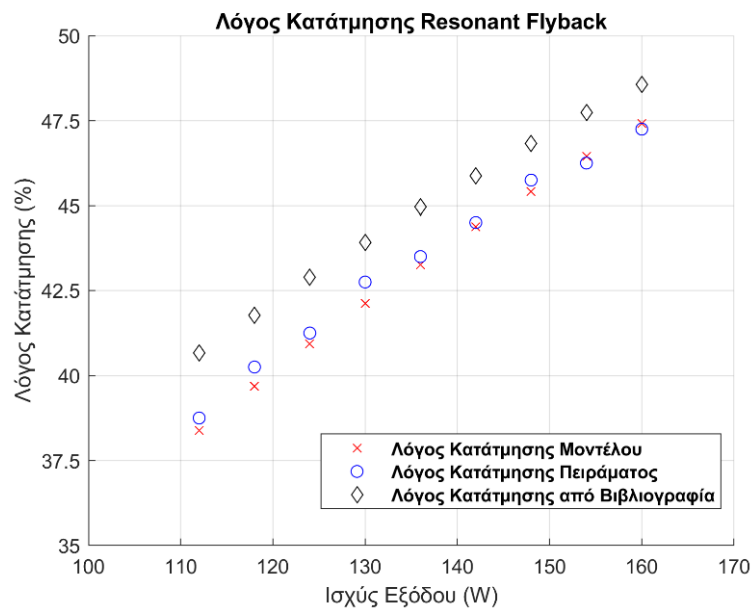
Αρχικά, εξετάζεται η λειτουργία του μετατροπέα κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, η τάση εισόδου (Πλευρά 1) τίθεται στα 32 V και με τη χρήση του ηλεκτρονικού φορτίου μεταβάλλεται η τάση εξόδου (Πλευρά 2). Επιλύοντας το μη γραμμικό σύστημα που περιγράφεται από τις εξισώσεις (5.41-5.50) υπολογίζεται η τιμή της διακοπτικής συχνότητας με την οποία επιτυγχάνεται τιμή του ρεύματος εξόδου ίση με 5 A (5.89), καθώς και ο απαιτούμενος λόγος κατάτμησης του παλμού που εφαρμόζεται στο ημιαγωγικό στοιχείο Q_1 , προκειμένου να επιτευχθεί η σβέση αυτού υπό μηδενικό ρεύμα (5.90).

Τα πειραματικά αποτελέσματα που αναδεικνύουν την ακρίβεια κατά την εκτίμηση της διακοπτικής συχνότητας και του λόγου κατάτμησης με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου (5.41-5.50), παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.26 και 5.27. Ο προσεγγιστικός λόγος κατάτμησης σύμφωνα με την εξίσωση που παρουσιάζεται στην εργασία [33] απεικονίζεται στο Σχήμα 5.27. Σημειώνεται ότι στην [33] θεωρείται ότι ολόκληρη η επαγωγή που οφείλεται στη σκέδαση βρίσκεται συγκεντρωμένη στο πρωτεύον. Επιπλέον, στην εν λόγω εργασία δεν καταστρώνεται η πλήρης μορφή του μη γραμμικού συστήματος που οδηγεί στην εκτίμηση των χρονικών διαστημάτων αγωγής με ακρίβεια. Το γεγονός αυτό, οδηγεί σε αποκλίσεις κατά την εκτίμηση του λόγου κατάτμησης του παλμού που εφαρμόζεται στο Q_1 .

Επιπλέον, στην [33] δεν πραγματοποιείται σύνδεση του κέρδους τάσης του μετατροπέα με τη διακοπτική συχνότητα. Συνεπώς, ο έλεγχος της τάσης εξόδου πραγματοποιείται με τη χρήση της μεθόδου υστέρησης (on-off) και την εφαρμογή σταθερής διακοπτικής συχνότητας, ανεξάρτητης του φορτίου. Στην παρούσα διατριβή, η επίλυση του μη γραμμικού συστήματος (5.41-5.50) οδηγεί στην ακριβή εκτίμηση της διακοπτικής συχνότητας για τις απαιτούμενες τιμές του κέρδους τάσης.

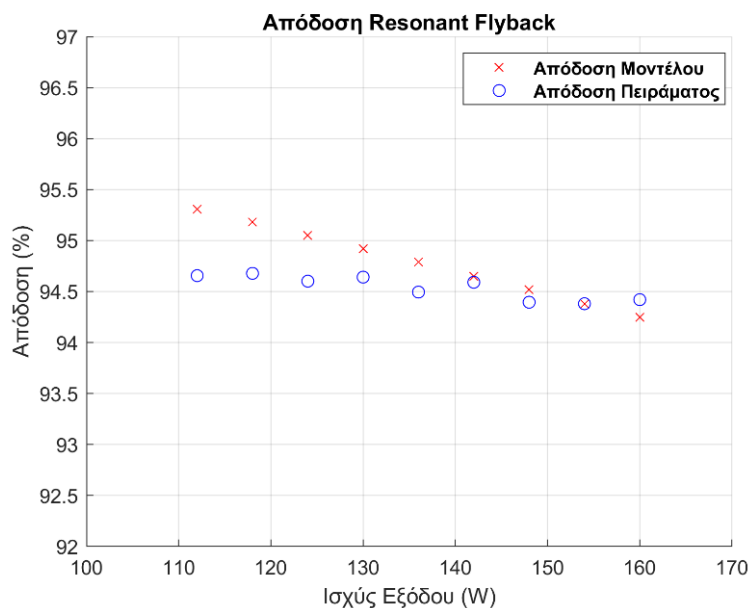


Σχήμα 5.26: Εκτίμηση διακοπτικής συχνότητας για ρεύμα εξόδου 5A και τάση εισόδου 32 V για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2.



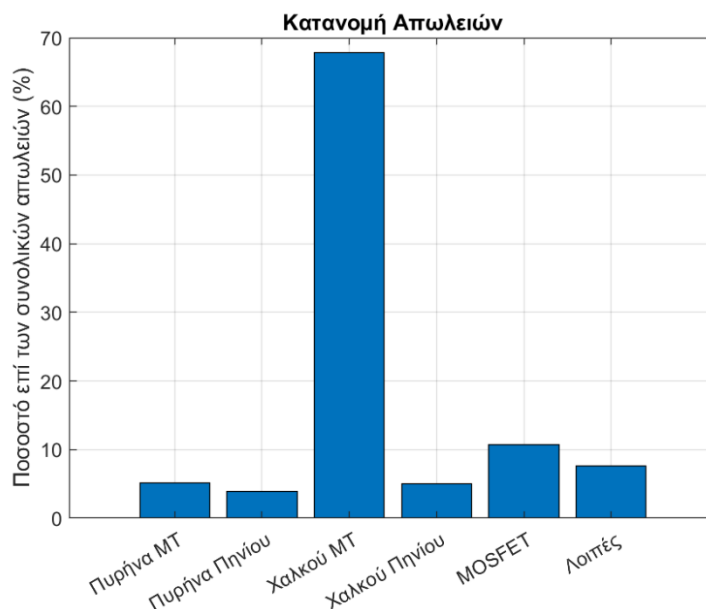
Σχήμα 5.27: Εκτίμηση λόγου κατάτμησης για ρεύμα εξόδου 5A και τάση εισόδου 32 V για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2.

Στη συνέχεια, αξιοποιούνται οι εξισώσεις που περιγράφονται στην ενότητα 5.3 για την εκτίμηση της απόδοσης του Quasi-resonant Flyback σε όλο το εύρος λειτουργίας του. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.28.



Σχήμα 5.28: Εκτίμηση απόδοσης για ρεύμα εξόδου 5A και τάση εισόδου 32 V για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2.

Στο Σχήμα 5.29 παρουσιάζεται η κατανομή απωλειών στα επιμέρους στοιχεία του μετατροπέα σε ποσοστό επί των συνολικών απωλειών. Είναι εμφανές, ότι κυριαρχούν οι απώλειες χαλκού του μετασχηματιστή.

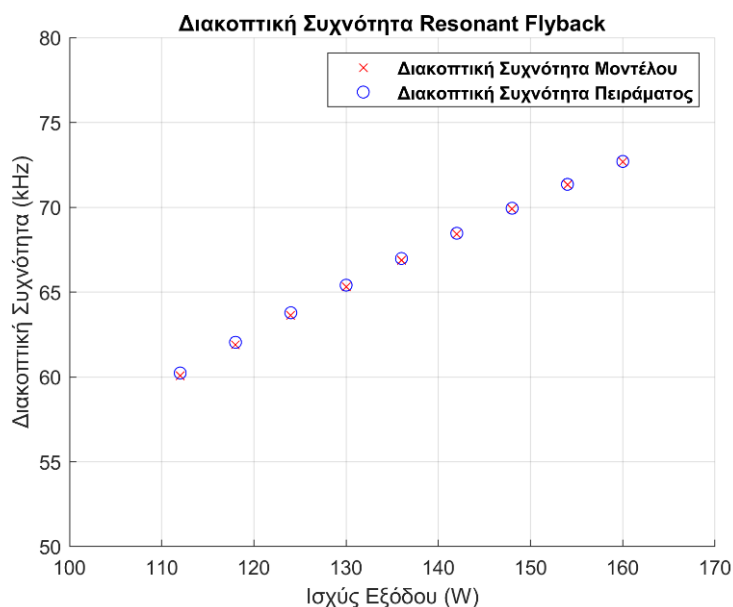


Σχήμα 5.29: Κατανομή απωλειών για ρεύμα εξόδου 5A και τάση εισόδου 32 V, τάση εξόδου 32 V για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2. Σύνολο απωλειών 9,75 W.

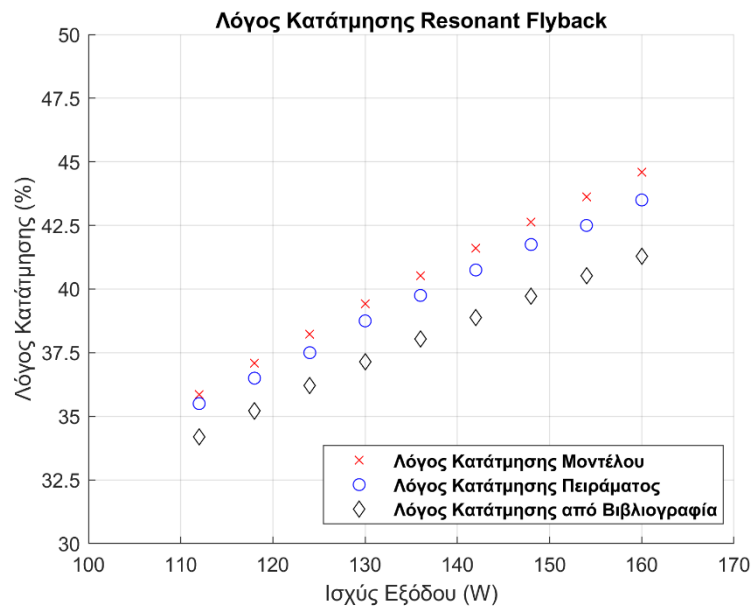
Ροή ενέργειας από Πλευρά 2 σε Πλευρά 1

Έπειτα, πραγματοποιείται πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας του μετατροπέα για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1, για τάση εισόδου 32 V και ρεύμα εξόδου 5 A. Επειδή το κύκλωμα δεν είναι πλήρως συμμετρικό, η συχνότητα ταλάντωσης σε αυτή την περίπτωση είναι στα 142,13 kHz, έναντι των 156,27 kHz που υπολογίζεται για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2. Συνεπώς, για ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1, ο μετατροπέας λειτουργεί σε χαμηλότερη συχνότητα. Η εκτίμηση της διακοπτικής συχνότητας, καθώς και του λόγου κατάτμησης σε όλο το εύρος λειτουργίας του μετατροπέα παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.30 και 5.31.

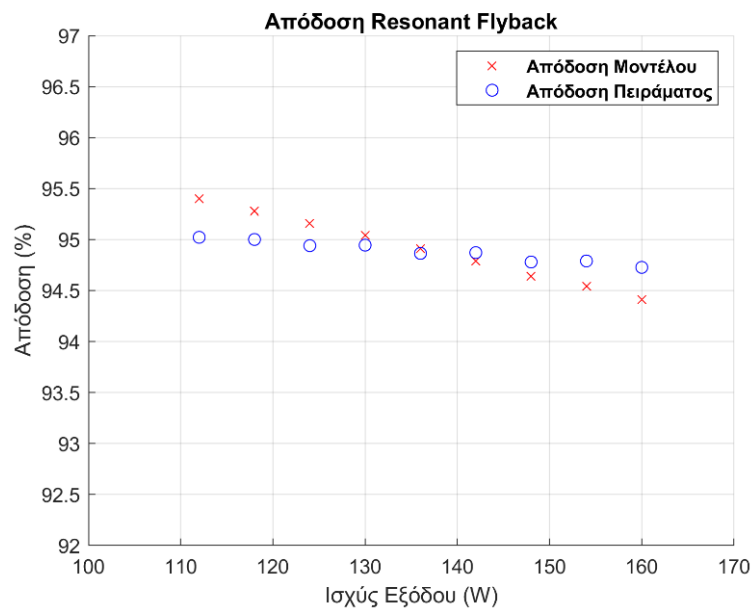
Η απόδοση του μετατροπέα, καθώς και η κατανομή των απωλειών στα επιμέρους στοιχεία ως ποσοστό επί των συνολικών απωλειών παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.32 και 5.33. Παρατηρείται ότι κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1 η απόδοση του μετατροπέα (Σχήμα 5.32) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή που μετράται κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2 (Σχήμα 5.28). Παρόλο που κατά τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1 το πηνίο ταλάντωσης διαρρέεται από ρεύμα μεγαλύτερης RMS τιμής, ο μετατροπέας λειτουργεί με μικρότερη διακοπτική συχνότητα. Επομένως, η ωμική αντίσταση που εμφανίζουν τα τυλίγματα του μετασχηματιστή και του πηνίου είναι μικρότερη.



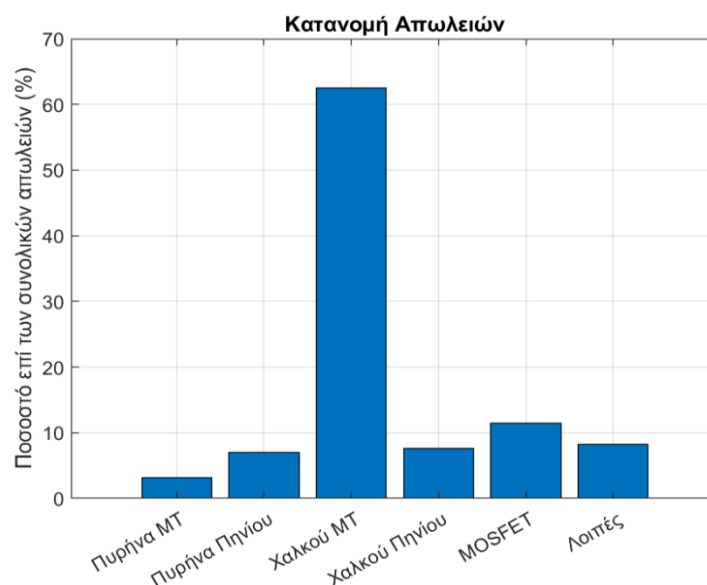
Σχήμα 5.30: Εκτίμηση διακοπτικής συχνότητας για ρεύμα εξόδου 5A και τάση εισόδου 32 V ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1.



Σχήμα 5.31: Εκτίμηση λόγου κατάτμησης για ρεύμα εξόδου 5A και τάση εισόδου 32 V για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1.



Σχήμα 5.32: Εκτίμηση απόδοσης για ρεύμα εξόδου 5A και τάση εισόδου 32 V για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1.



Σχήμα 5.33: Κατανομή απωλειών για ρεύμα εξόδου 5A, τάση εισόδου 32 V και τάση εξόδου 32 V για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 2 στην Πλευρά 1. Σύνολο απωλειών 9,46 W.

5.5.3 Σύγκριση με βιβλιογραφία

Έχοντας λειτουργήσει το μετατροπέα Quasi-resonant Flyback σε μεγάλο εύρος συνθηκών, σε αυτήν την υποενότητα πραγματοποιείται σύγκριση με σχετικές εργασίες από τη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση με σχετική βιβλιογραφία.

	Τοπολογία	Αμφίδρομος	Soft-switching	Παλμοδοτούμενα στοιχεία	Μέγιστη διακοπτική συχνότητα	Μέγιστη Ισχύς	Απόδοση σε πλήρη ισχύ
[90]	Forward	Όχι	ZCS, ZVS	1	100 kHz	250 W	96,50 %
[91]	Forward	Όχι	ZCS	1	300 kHz	550 W	90,00 %
[92]	Flyback	Όχι	ZVS	1	340 kHz	65 W	90,00 %
[33]	Flyback	Όχι	ZCS, ZVS	1	1 MHz	36 W	90,30 %
[93]	Dual Active Bridge	Ναι	ZVS	8	100 kHz	500 W	96,00 %
[31]	Flyback	Όχι	ZCS, ZVS	2	50 kHz	150 W	88,00 %
[94]	L2C3 Resonant	Ναι	ZCS, ZVS	4	200 kHz	2 W	90,00 %
[27]	Flyback	Όχι	ZVS	3	280 kHz	45 W	94,50 %
ΔΔ	Flyback	Ναι	ZCS πρωτεύον, ZVS δευτερεύον	2	86 kHz	160 W	94,73 %

*ZCS: Zero Current Switching, ZVS: Zero Voltage Switching.

Η σύγκριση πραγματοποιείται με βάση την ενεργειακή απόδοση, τη μέγιστη ισχύ και διακοπτική συχνότητα, τον αριθμό των παλμοδοτούμενων στοιχείων, αν επιτυγχάνεται ομαλή μετάβαση (soft-switching), καθώς και αν ο μετατροπέας προσφέρει αμφίδρομη ροή ενέργειας. Ο προτεινόμενος μετατροπέας προσφέρει αμφίδρομη μεταφορά ενέργειας με μικρό αριθμό παλμοδοτούμενων ημιαγωγικών στοιχείων και υψηλή απόδοση.

5.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε ο μετατροπέας Quasi-resonant Flyback με σκοπό τη χρήση του στην εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης ομάδων συσσωρευτών. Στο μετατροπέα Quasi-resonant Flyback, τοποθετούνται τέσσερα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία, εκ των οποίων τα δύο παλμοδοτούνται στη διακοπτική συχνότητα. Τα υπόλοιπα δύο ημιαγωγικά στοιχεία λειτουργούν συμπληρωματικά μεταξύ τους σε αγωγή ή αποκοπή, ανάλογα με την επιθυμητή φορά της ροής ενέργειας. Επομένως, για τα ημιαγωγικά στοιχεία που δεν παλμοδοτούνται, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλός και οικονομικός τρόπος οδήγησης, αποφεύγοντας τη χρήση τροφοδοτικών με απομόνωση και κυκλωμάτων οδήγησης υψηλού ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται τα ημιαγωγικά στοιχεία που δεν παλμοδοτούνται να είναι τύπου P-Type MOSFET.

Η ταλάντωση που επιτελείται κατά τη λειτουργία του προτεινόμενου Quasi-resonant Flyback, οδηγεί στη σβέση του ημιαγωγικού στοιχείου του πρωτεύοντος υπό μηδενικό ρεύμα, καθώς και στην έναυση και τη σβέση του ημιαγωγικού στοιχείου του δευτερεύοντος υπό μηδενική τάση. Συνεπώς, τα φαινόμενα σκέδασης που εμφανίζονται εν γένει στους μετασχηματιστές παύουν να διαδραματίζουν αρνητικό ρόλο στη λειτουργία του μετατροπέα (όπως στην περίπτωση του κλασσικού Flyback). Αντιθέτως, πραγματοποιείται συνεισφορά της σκέδασης για την επίτευξη της ταλάντωσης. Η ωφέλιμη χρήση της σκέδασης μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω αυτοματοποίηση της βιομηχανικής διαδικασίας κατασκευής του μετασχηματιστή, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίπεδοι (planar) μετασχηματιστές που παρουσιάζουν μεγαλύτερη σκέδαση σε σχέση με τους μετασχηματιστές που κατασκευάζονται με καλώδιο τύπου Litz, αλλά είναι πιο οικονομικοί και δεν απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση στην κατασκευή.

Στην παρούσα διατριβή, εξήχθησαν αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών μεγεθών του Quasi-resonant Flyback, καθώς και για την εκτίμηση των ενεργειακών απωλειών. Κατά την πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας του μετατροπέα, σημειώθηκε σύγκλιση των θεωρητικών εκτιμήσεων με τα πειραματικά αποτελέσματα και υψηλή ενεργειακή απόδοση. Παρά τα

πλεονεκτήματα του μετατροπέα Quasi-resonant Flyback, η λειτουργία του μετασχηματιστή μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο της καμπύλης μαγνήτισης (όπως και στον κλασσικό Flyback), οδηγεί στην ανάγκη για πυρήνες μεγάλου μεγέθους. Επιπλέον, οι αυξημένες τιμές των ενεργών τιμών των ρευμάτων, οδηγούν σε μεγάλο ποσοστό απωλειών χαλκού στα τυλίγματα του μετασχηματιστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι λήψης αποφάσεων σχετικά με τη φόρτιση ΗΟ σε Σταθμούς Φόρτισης (ΣΦ). Πραγματοποιείται η θεώρηση ότι στους ΣΦ είναι εγκατεστημένοι δύο τύποι φορτιστών (κανονικής και γρήγορης φόρτισης), οι οποίοι μπορούν να διαμοιραστούν στις θέσεις στάθμευσης. Με τον τρόπο αυτό, ένα ΗΟ μπορεί να μένει σταθμευμένο στο σταθμό, χωρίς να δεσμεύει πόρους φόρτισης και οι φορτιστές να εναλλάσσονται μεταξύ των σταθμευμένων οχημάτων με τη χρήση δικτύου διακοπών.

Αρχικά παρουσιάζεται ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ που εκτελείται στο ΣΦ. Σε πρώτο βήμα παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος για την εισαγωγή κριτηρίων που ωφελούν τους διαχειριστές των ΣΦ, καθώς και κριτηρίων που ωφελούν τους οδηγούς των ΗΟ. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται σύγκριση του Γενετικού Αλγορίθμου (Genetic Algorithm, GA) και του Αλγορίθμου Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO), προκειμένου να επιλεγεί ο καταλληλότερος προς εφαρμογή στο χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ΗΟ σε ΣΦ. Οι αλγόριθμοι αυτοί επιλέγονται προς αξιολόγηση λόγω της ευρείας αποδοχής που έχουν στην επίλυση προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ ([61], [62], [67], [95], [96]). Οι παράμετροι λειτουργίας των δύο αλγορίθμων επιλέγονται με τη μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi.

Στο επόμενο βήμα, παρουσιάζεται η μέθοδος υποβοήθησης λήψης αποφάσεων Analytic Hierarchy Process (AHP) και η μαθηματική μοντελοποίηση για τη χρήση της ως μεθόδου υποβοήθησης των οδηγών κατά την επιλογή του καταλληλότερου ΣΦ. Στο τελικό βήμα, πραγματοποιείται συνδυασμένη χρήση του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού και της AHP σε σενάρια φόρτισης, ώστε να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση της συνολικής μεθοδολογίας. Επιπλέον, παρουσιάζεται το πρότυπο επικοινωνιών Open Platform Communications – Unified Architecture (OPC-UA) για πιθανή του εφαρμογή στην επικοινωνία μεταξύ ΗΟ και ΣΦ.

6.2 Μαθηματική μοντελοποίηση κριτηρίων χρονοπρογραμματισμού

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ΗΟ σε ΣΦ. Όπως αναφέρθηκε, στους ΣΦ είναι εγκατεστημένοι δύο τύποι φορτιστών, οι φορτιστές κανονικής φόρτισης που μπορούν να προσφέρουν ρεύμα μέχρι 90 Α, καθώς και οι φορτιστές ταχείας φόρτισης που μπορούν να προσφέρουν ρεύμα μέχρι 300 Α. Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιείται διερεύνηση για τη φόρτιση ΗΟ χωρίς να υποστηρίζεται επιστροφή ενέργειας από το ΗΟ προς το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

6.2.1 Μαθηματική μοντελοποίηση χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος

Μέσω του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού επιδιώκεται η ικανοποίηση πέντε κριτηρίων. Όλα τα κριτήρια λαμβάνουν μη αρνητικές τιμές και κανονικοποιούνται στο εύρος $[0,1]$. Ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται σε διακριτό χρόνο. Συνεπώς, ο συνολικός χρόνος φόρτισης διακριτοποιείται σε χρονικά διαστήματα (timeslots) με διάρκεια πέντε λεπτών έκαστο.

Το πρώτο κριτήριο για το χρονοπρογραμματισμό αφορά τη χρονική στιγμή ολοκλήρωσης της φόρτισης και δηλώνεται με τη μεταβλητή $complTime_{criterion}$ (6.1). Το κριτήριο αυτό υπολογίζεται σύμφωνα με την επιθυμία του οδηγού για την ολοκλήρωση της φόρτισης ($PrefTime$) και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν η φόρτιση ολοκληρώνεται έγκαιρα. Σημειώνεται ότι το κριτήριο που αφορά το χρόνο φόρτισης δεν τίθεται ως περιορισμός (constraint), για να μπορέσει να δοθεί η επιλογή συμφέρουσας λύσης παρά την καθυστέρηση της φόρτισης μέσα σε λογικά πλαίσια. Η επιτρεπτή αυτή καθυστέρηση δηλώνεται με τη μεταβλητή $Tolerance$. Συνεπώς, αν η προτεινόμενη λύση φόρτισης οδηγήσει σε καθυστέρηση, το κριτήριο $complTime_{criterion}$ μειώνεται γραμμικά (6.1).

Το δεύτερο κριτήριο που αξιολογείται κατά το χρονοπρογραμματισμό αφορά το κόστος της φόρτισης ($price_{criterion}$). Σε ένα έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι εφικτή η συνεχής μεταβολή του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με την προσφορά και τη ζήτηση. Αυτό το κριτήριο αξιολογείται σύμφωνα με την (6.2), στην οποία το κόστος της φόρτισης κανονικοποιείται έχοντας ως ελάχιστο όριο τη φόρτιση με το χαμηλότερο κόστος ενέργειας σε όλη τη διάρκεια φόρτισης, ενώ ως μέγιστο όριο τίθεται το κόστος που προκύπτει φορτίζοντας το όχημα με το υψηλότερο κόστος ενέργειας σε όλη τη διάρκεια φόρτισης.

Το τρίτο κριτήριο σχετίζεται με τη μεγιστοποίηση του συντελεστή αξιοποίησης των πόρων του ΣΦ. Το κριτήριο αυτό ($utilisation_{criterion}$) υπολογίζεται για κάθε χρονικό διάστημα σύμφωνα με το επιλεγμένο ρεύμα φόρτισης και το ονομαστικό ρεύμα του φορτιστή που έχει επιλεγεί (6.3). Τα

χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το ΗΟ είναι σταθμευμένο αλλά δεν φορτίζει, δεν λαμβάνονται υπόψη, καθώς σε αυτά τα χρονικά διαστήματα δεν δεσμεύεται φορτιστής, λόγω της αξιοποίησης κάθε φορτιστή σε πολλές θέσεις στάθμευσης σύμφωνα με την πρακτική του διαμοιρασμού των πόρων.

Τα τελευταία δύο κριτήρια σχετίζονται με τη διατήρηση της ενέργειας των συσσωρευτών σε υψηλά επίπεδα πραγματοποιώντας φόρτιση με τιμές ρεύματος κοντά στο ονομαστικό. Το πρώτο από τα δύο αυτά κριτήρια αφορά το μέσο ρεύμα φόρτισης ($I_{avg_{criterion}}$) και παρουσιάζεται στις (6.4), (6.5). Αν το μέσο ρεύμα φόρτισης είναι μικρότερο ή ίσο του ονομαστικού, τότε το κριτήριο αυτό λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του. Ειδικά, η τιμή του κριτηρίου μειώνεται γραμμικά με ρυθμό που εξαρτάται από τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή ρεύματος φόρτισης που προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή. Το κριτήριο λαμβάνει την τιμή μηδέν όταν το μέγιστο ρεύμα φόρτισης γίνει ίσο με το μέγιστο ρεύμα που επιτρέπεται από τον κατασκευαστή.

Το δεύτερο κριτήριο που σχετίζεται με τη διασφάλιση της υγείας των συσσωρευτών αφορά το μέγιστο ρεύμα φόρτισης (6.6). Έτσι, λαμβάνεται υπόψη η αρνητική επίδραση ενός σεναρίου κατά το οποίο οι συσσωρευτές φορτίζονται αρχικά με χαμηλό ρεύμα και έπειτα με υψηλό ρεύμα, ώστε η μέση τιμή του ρεύματος φόρτισης να είναι κοντά στην ονομαστική. Αντίστοιχα και με το κριτήριο του μέσου ρεύματος φόρτισης, το κριτήριο του μέγιστου ρεύματος φόρτισης ($I_{max_{criterion}}$) λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν οι συσσωρευτές φορτίζονται με ρεύμα μικρότερο ή ίσο του ονομαστικού, ενώ μειώνεται γραμμικά όταν το ρεύμα φόρτισης ξεπεράσει την ονομαστική τιμή.

Η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους κριτηρίων (6.7). Για κάθε κριτήριο ορίζεται ένας συντελεστής βαρύτητας ανάλογα με τις προτεραιότητες που τίθενται από το διαχειριστή του ΣΦ και τον οδηγό του ΗΟ. Οι περιορισμοί που τίθενται αφορούν το χρόνο ολοκλήρωσης της φόρτισης, ο οποίος πρέπει να είναι εντός του αποδεχτού πλαισίου που θέτουν οι οδηγοί (6.8), καθώς και το μέγιστο ρεύμα φόρτισης (6.9) το οποίο καθορίζεται είτε από τη μέγιστη τιμή του ρεύματος φόρτισης των συσσωρευτών, είτε από τη μέγιστη τιμή του ρεύματος εξόδου του φορτιστή, ανάλογα με το ποια από τις δύο τιμές είναι η μικρότερη. Τέλος, το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας πρέπει να ισούται με τη μονάδα. Η συνθήκη αυτή ελέγχεται κατά τον ορισμό των συντελεστών αυτών, καθώς οι τιμές τους λαμβάνονται πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου.

$$complTime_{criterion} = \begin{cases} 1, & complTime \leq PrefTime \\ 1 - \frac{complTime - PrefTime}{Tolerance}, & complTime > PrefTime \end{cases} \quad (6.1)$$

$$price_{criterion} = 1 - normalisedPrice \quad (6.2)$$

$$utilisation_{criterion} = \frac{\sum_{i=1}^{timeslots} \frac{I_{i,charging}}{I_{i,chargerRated}}}{timeslots} \quad (6.3)$$

$$I_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{timeslots} I_{i,charging}}{timeslots} \quad (6.4)$$

$$I_{avg}_{criterion} = \begin{cases} 1, & I_{avg} \leq PrefCurrent \\ 1 - \frac{I_{avg} - PrefCurrent}{MaxBatCurrent - PrefCurrent}, & I_{avg} > PrefCurrent \end{cases} \quad (6.5)$$

$$I_{max}_{criterion} = \begin{cases} 1, & I_{max} \leq PrefCurrent \\ 1 - \frac{I_{max} - PrefCurrent}{MaxBatCurrent - PrefCurrent}, & I_{max} > PrefCurrent \end{cases} \quad (6.6)$$

$$f_{objective} = (w_{complTime} \cdot complTime_{criterion}) + (w_{price} \cdot price_{criterion}) + \\ + (w_{util} \cdot utilisation_{criterion}) + (w_{I_{avg}} \cdot I_{avg}_{criterion}) + (w_{I_{max}} \cdot I_{max}_{criterion}) \quad (6.7)$$

$$compTime \leq PrefTime + Tolerance \quad (6.8)$$

$$0 \leq I_{i,charging} \leq \begin{cases} MaxBatCurrent, & MaxBatCurrent \leq MaxChargerCurrent_i \\ MaxChargerCurrent, & MaxBatCurrent > MaxChargerCurrent_i \end{cases} \quad (6.9)$$

$$w_{complTime} + w_{price} + w_{util} + w_{I_{avg}} + w_{I_{max}} = 1 \quad (6.10)$$

όπου,

$complTime_{criterion}$: Η τιμή του κριτηρίου χρόνου φόρτισης με εύρος τιμών στο εύρος [0, 1].

$complTime$: Ακέραιος αριθμός που υποδηλώνει τον αριθμό των διακριτών διαστημάτων που αντιπροσωπεύουν το συνολικό χρόνο φόρτισης.

$PrefTime$: Ακέραιος αριθμός που υποδηλώνει τον αριθμό των διακριτών διαστημάτων που αντιπροσωπεύουν τον επιθυμητό χρόνο φόρτισης.

$Tolerance$: Ακέραιος αριθμός που υποδηλώνει τον αριθμό των διακριτών διαστημάτων που αντιπροσωπεύουν τον χρόνο καθυστέρησης της φόρτισης.

$price_{criterion}$: Η τιμή του κριτηρίου κόστους φόρτισης με τιμές στο εύρος [0, 1].

normalisedPrice: Το κόστος της φόρτισης κανονικοποιημένο στο εύρος [0, 1]. Η τιμή 1 υποδηλώνει φόρτιση με το μέγιστο κόστος καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης, ενώ η τιμή 0 υποδηλώνει φόρτιση με το ελάχιστο κόστος καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης.

utilisation_{criterion}: Η τιμή του κριτηρίου αξιοποίησης των πόρων του σταθμού στο εύρος [0, 1].

timeslots: Ακέραιος αριθμός που υποδηλώνει τον αριθμό των διακριτών διαστημάτων που αντιπροσωπεύουν το χρόνο φόρτισης. Τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το ΗΟ είναι σταθμευμένο, αλλά δεν φορτίζεται δεν συμπεριλαμβάνονται στο χρόνο αυτό.

I_{i,charging}: Το ρεύμα φόρτισης κατά το *i* χρονικό διάστημα.

I_{i,chargerRated}: Το ονομαστικό ρεύμα του επιλεγμένου φορτιστή κατά το *i* χρονικό διάστημα.

I_{avg}: Το μέσο ρεύμα φόρτισης για το τρέχον σενάριο.

I_{avg}_{criterion}: Η τιμή του κριτηρίου που αναφέρεται στο μέσο ρεύμα φόρτισης στο εύρος [0, 1].

PrefCurrent: Το προτιμώμενο ρεύμα φόρτισης σύμφωνα με τις ανάγκες των οδηγών.

MaxBatCurrent: Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή των συσσωρευτών.

MaxChargerCurrent_i: Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να προσφέρει ο φορτιστής που επιλέγεται κατά το *i* χρονικό διάστημα.

I_{max}_{criterion}: Η τιμή του κριτηρίου που αναφέρεται στο μέγιστο ρεύμα φόρτισης στο εύρος [0, 1].

I_{max}: Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης για το τρέχον σενάριο.

W_{complTime}, W_{price}, W_{util}, W_{I_{avg}}, W_{I_{max}}: Οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο.

Για να γίνει κατανοητή η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό σενάριο φόρτισης βασιζόμενο στις προδιαγραφές του ΗΟ του ΕΗΜΕ [76]-[78]. Συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις φόρτισης παρουσιάζονται στις γραμμές 1-6 του Πίνακα 6.1. Επιπλέον, οι ονομαστικές τιμές των δύο τύπων φορτιστών παρουσιάζονται στις γραμμές 7 και 8 του Πίνακα 6.1. Ο ΣΦ θεωρείται ότι έχει εγκατεστημένους δύο τύπους φορτιστών, το φορτιστή κανονικής φόρτισης (Normal Charger) με ονομαστικό ρεύμα 90 A, καθώς και το φορτιστή γρήγορης φόρτισης (Fast Charger) με ονομαστικό ρεύμα 300 A.

Έχοντας θέσει τις απαιτήσεις φόρτισης στον Πίνακα 6.1, ένα πιθανό προφίλ φόρτισης παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2. Το προφίλ φόρτισης έχει διάρκεια 25 λεπτών (5 χρονικά διαστήματα). Για κάθε χρονικό διάστημα παρουσιάζεται ο επιλεγμένος φορτιστής, το κόστος φόρτισης και το ρεύμα φόρτισης.

Οι τιμές των κριτηρίων χρονοπρογραμματισμού σύμφωνα με τις (6.1)-(6.10) για το ενδεικτικό σενάριο φόρτισης, καθώς και οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Επιπλέον, στο τελευταίο κελί του Πίνακα 6.3 παρουσιάζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ως σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους κριτηρίων. Παρατηρείται ότι η προτεινόμενη λύση οδηγεί σε καθυστέρηση της φόρτισης κατά 5 λεπτά (1 χρονικό διάστημα) και μειωμένο συντελεστή αξιοποίησης των γρήγορων φορτιστών προκειμένου να μειωθεί η φθορά των συσσωρευτών.

Πίνακας 6.1: Απαιτήσεις φόρτισης για το ενδεικτικό σενάριο.

Απαιτήσεις οδηγού ΗΟ	Τάση φόρτισης	96 V
	Διάρκεια φόρτισης	20 λεπτά (4 διαστήματα των 5 λεπτών έκαστο)
	Αποδεκτή καθυστέρηση	10 λεπτά (2 διαστήματα των 5 λεπτών έκαστο)
	Επιθυμητό μέσο ρεύμα φόρτισης	201 A
	Μέγιστο ρεύμα συσσωρευτή	270 A
	Προσφερόμενο φορτίο	67 Ah
Δυνατότητες ΣΦ	Μέγιστο ρεύμα κανονικής φόρτισης	90 A
	Μέγιστο ρεύμα γρήγορης φόρτισης	300 A

Οι εξισώσεις (6.1)-(6.9) εισάγονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με σκοπό την εύρεση του ρεύματος φόρτισης για κάθε χρονικό διάστημα, ώστε να μεγιστοποιηθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι απαιτήσεις φόρτισης υπόκεινται σε επεξεργασία σύμφωνα με το διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που οι οδηγοί επιθυμούν αργή φόρτιση με ρεύμα μικρότερο του ονομαστικού, τίθεται ως επιθυμητή τιμή του ρεύματος φόρτισης η

ονομαστική τιμή, καθώς η φόρτιση με τιμή ρεύματος ίση με το ονομαστικό δεν επιβαρύνει την υγεία της μπαταρίας. Επιπλέον, αν οι οδηγοί επιθυμούν φόρτιση με μέσο ρεύμα μεγαλύτερο του ονομαστικού, επιλέγεται η τιμή αυτή ως επιθυμητή τιμή φόρτισης. Συνεπώς, ο όρος *PrefCurrent* στις (6.5) και (6.6) αντικαθίσταται με την επιθυμητή τιμή ρεύματος φόρτισης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.1.

Πίνακας 6.2: Ενδεικτικό σενάριο φόρτισης.

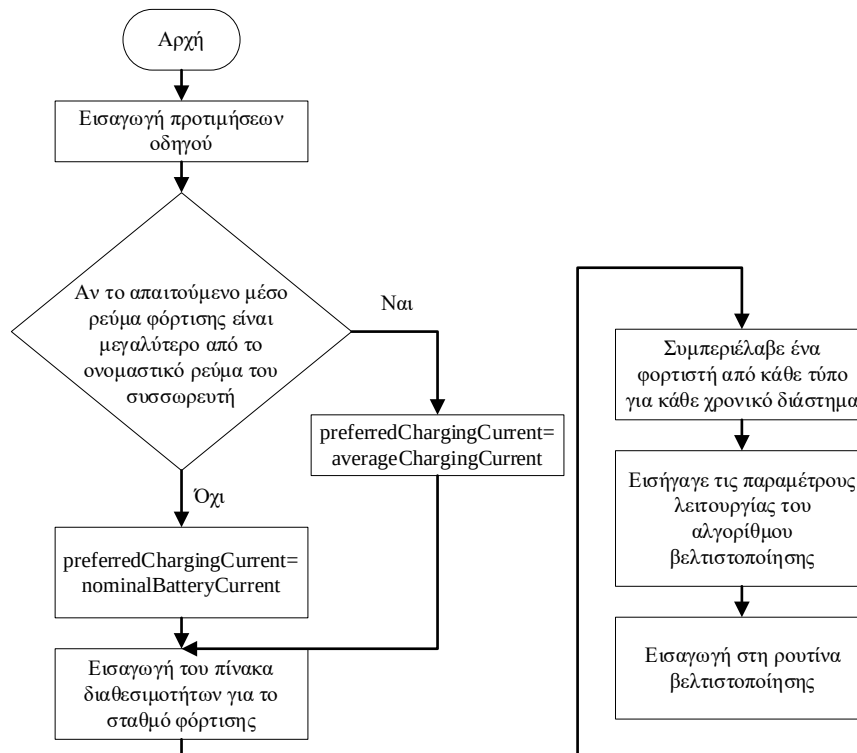
	Αριθμός χρονικού διαστήματος (χρόνος κάθε διαστήματος = 5 λεπτά)					Σύνολο	
	1	2	3	4	5		
Φορτιστής	Fast	Fast	Normal	Normal	Fast	Συνολικό Κόστος	Συνολικό Φορτίο
Κόστος (€ /kWh)	0,264	0,202	0,151	0,135	0,260	1,33 €	67 Ah
Ρεύμα (A)	208	208	90	90	208		

Πίνακας 6.3: Οι τιμές των κριτηρίων χρονοπρογραμματισμού και οι επιλεγμένοι συντελεστές βαρύτητας.

Κριτήριο	Χρόνος ολοκλήρωσης	Κόστος	Αξιοποίηση Πόρων	Μέσο Ρεύμα	Μέγιστο Ρεύμα	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης
Τιμή	0,5	0,409	0,816	1	0,9	0,783
Βαρύτητα	0,126	0,126	0,4	0,288	0,06	

Επιπρόσθετα, στο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων που θα εισαχθούν στον μετα-ευρετικό αλγόριθμο πραγματοποιείται έλεγχος των διαθέσιμων πόρων του ΣΦ. Συγκεκριμένα, δεσμεύεται

ένας φορτιστής από κάθε τύπο που είναι διαθέσιμος και τα όρια ρεύματος που υποστηρίζει εισάγονται στον μετα-ευρετικό αλγόριθμο.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα ροής για την επεξεργασία των απαιτήσεων φόρτισης πριν την εισαγωγή τους στον μετα-ευρετικό αλγόριθμο.

6.3 Επιλογή μετα-ευρετικού αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού

Έχοντας ορίσει τα κριτήρια προς αξιολόγηση για την επιλογή του συνδυασμού των ρευμάτων και των φορτιστών για κάθε χρονικό διάστημα, πραγματοποιείται σύγκριση των αλγορίθμων GA και PSO για την επιλογή του καταλληλότερου.

6.3.1 Περιγραφή αλγορίθμου Particle Swarm Optimization (PSO)

Ο μετα-ευρετικός αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (PSO) εφευρέθηκε από τους Eberhart και Kennedy το 1995 ως μια ευφυής μέθοδος βασισμένη στη συμπεριφορά ομάδων ζώων όπως τα πουλιά και τα ψάρια [39]. Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας του αλγορίθμου PSO.

Κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου κάθε σωματίδιο (πιθανή λύση) βρίσκεται σε τυχαία θέση ($x_{i,t}^d$) σε χώρο d διαστάσεων, οι συντεταγμένες της οποίας καθορίζονται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές

του προβλήματος. Σε κάθε βήμα t του αλγορίθμου, οι συντεταγμένες κάθε σωματιδίου μεταβάλλονται με βάση την ταχύτητα του $v_{i,t}^d$, η οποία εξαρτάται από την αδράνεια του σωματιδίου w , τη βέλτιστη θέση του συγκεκριμένου σωματιδίου $Pbest_{i,t}^d$, καθώς και την τρέχουσα ολική βέλτιστη θέση $Gbest_t^d$ που προκύπτει αξιολογώντας τη θέση κάθε μεμονωμένου σωματιδίου του σμήνους. Σε κάθε βήμα εκτέλεσης του αλγορίθμου, η ταχύτητα και η θέση κάθε σωματιδίου μεταβάλλονται σύμφωνα με τις σχέσεις.

$$v_{i,t+1}^d = w \cdot v_{i,t}^d + c_1 \cdot rand_1 \cdot (Pbest_{i,t}^d - x_{i,t}^d) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (Gbest_t^d - x_{i,t}^d) \quad (6.11)$$

$$x_{i,t+1}^d = x_{i,t}^d + v_{i,t+1}^d \quad (6.12)$$

Όπου,

$v_{i,t+1}^d$: Η ταχύτητα κάθε σωματιδίου κατά το βήμα $t + 1$.

w : Συντελεστής βαρύτητας που εκφράζει την αδράνεια των σωματιδίων.

$v_{i,t}^d$: Η ταχύτητα κάθε σωματιδίου κατά το βήμα t .

c_1, c_2 : Συντελεστές βαρύτητας για τη συνιστώσα της ταχύτητας που αφορά τη βέλτιστη θέση του σωματιδίου, καθώς και τη βέλτιστη θέση που προκύπτει από όλο το σμήνος αντίστοιχα.

$rand_1, rand_2$: Τυχαίες τιμές στο εύρος $[0, 1]$.

$Pbest_{i,t}^d$: Βέλτιστη θέση κάθε σωματιδίου κατά το βήμα t .

$Gbest_t^d$: Βέλτιστη θέση που προκύπτει από όλο το σμήνος κατά το βήμα t .

$x_{i,t+1}^d$: Θέση κάθε σωματιδίου κατά το βήμα $t + 1$.

$x_{i,t}^d$: Θέση κάθε σωματιδίου κατά το βήμα t .

6.3.2 Σχεδιασμός πειραμάτων για τη σύγκριση των αλγορίθμων GA και PSO

Για τη συγκριτική αξιολόγηση των δύο μετα-ευρετικών αλγορίθμων και την επιλογή του καταλληλότερου για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ΗΟ σε ΣΦ θεωρείται ένα ενδεικτικό σενάριο. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι ένας σταθμός φόρτισης περιλαμβάνει τρεις φορτιστές κανονικής φόρτισης (Normal) που μπορούν να προσφέρουν ρεύμα μέχρι 90 A, καθώς και δύο φορτιστές ταχείας φόρτισης (Fast) που μπορούν να προσφέρουν ρεύμα μέχρι 300 A. Όπως αναφέρθηκε, ο συνολικός χρόνος φόρτισης χωρίζεται σε ακέραιο αριθμό διακριτών χρονικών διαστημάτων διάρκειας 5 λεπτών έκαστο. Η επιλογή της διάρκειας αυτής επιτρέπει αφενός μεν να αποτραπεί η φθορά των συσσωρευτών μέσω της συχνής μεταβολής του ρεύματος φόρτισής τους,

αφετέρου δε, οδηγεί σε έναν ευρύ χώρο λύσεων προς επιλογή εκείνης που οδηγεί στην καλύτερη ικανοποίηση των κριτηρίων που τίθενται.

Για το σενάριο εφαρμογής θεωρούνται ΗΟ πόλης με τάση συσσωρευτών τα 90 V, μέγιστο ρεύμα συσσωρευτών τα 270 A, και συνολική χωρητικότητα τις 180 Ah. Το κόστος φόρτισης με το φορτιστή κανονικής φόρτισης ακολουθεί την κανονική κατανομή $N(0.127, 6.4516 \cdot 10^{-4})$ €/kWh για κάθε χρονικό διάστημα φόρτισης, ενώ το κόστος φόρτισης με το φορτιστή γρήγορης φόρτισης είναι διπλάσιο. Για τους σκοπούς της αξιολόγησης των δύο αλγορίθμων, δημιουργούνται 100 τυχαία σενάρια φόρτισης ΗΟ, ώστε να επιτευχθεί αξιοπιστία στη στατιστική ανάλυση [97]. Για τα 100 αυτά σενάρια φόρτισης, ο χρόνος φόρτισης λαμβάνεται τυχαία στο εύρος [20, 95] λεπτά, ενώ η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου της συστοιχίας λαμβάνεται τυχαία στο εύρος [30, 180] Ah.

Η επιλογή των συντελεστών βαρύτητας πραγματοποιείται με βάση την ακόλουθη λογική. Τα κριτήρια που εξυπηρετούν τους οδηγούς των ΗΟ και τους διαχειριστές των ΣΦ μοιράζονται εξίσου. Συνεπώς, ο συντελεστής βαρύτητας που σχετίζεται με το ποσοστό αξιοποίησης των πόρων του ΣΦ τίθεται ίσος με 0,5. Επίσης, το σύνολο των συντελεστών βαρύτητας που αφορούν τους οδηγούς είναι 0,5 και διαμοιράζεται στα επιμέρους κριτήρια. Στο κριτήριο που αφορά το κόστος φόρτισης δίνεται ο συντελεστής 0,25, στο κριτήριο που αφορά το μέσο ρεύμα φόρτισης δίνεται ο συντελεστής 0,125, ενώ στο συντελεστή που αφορά το μέγιστο ρεύμα φόρτισης δίνεται ο συντελεστής 0,125. Στη φάση της αξιολόγησης θεωρείται ότι υπάρχει πλήρης διαθεσιμότητα του ΣΦ και ότι δεν επιτρέπεται καθυστέρηση στη φόρτιση. Έτσι, το κριτήριο που αναφέρεται στο χρόνο ολοκλήρωσης της φόρτισης δεν λαμβάνεται υπόψη κατά την αξιολόγηση των αλγορίθμων.

Για την αξιολόγηση των δύο μετα-ευρετικών αλγορίθμων (GA και PSO) χρησιμοποιείται η μέθοδος των ορθογωνίων πινάκων που έχει προταθεί από τον Taguchi και περιγράφεται στη μεθοδολογία του σθεναρού σχεδιασμού του Phadke [98]. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Taguchi για το στατιστικό σχεδιασμό πειραμάτων, επιλέγονται οι παράμετροι λειτουργίας των μετα-ευρετικών αλγορίθμων που οδηγούν στα καλύτερα αποτελέσματα. Η ακριβής μέθοδος που χρησιμοποιείται στην παρούσα διδακτορική διατριβή για το στατιστικό σχεδιασμό πειραμάτων έχει παρουσιαστεί στις [98], [99].

Αρχικά, ορίζονται οι παράμετροι λειτουργίας των δύο αλγορίθμων που θα διερευνηθούν, καθώς και τα διακριτά τους επίπεδα. Στη συνέχεια, δημιουργούνται οι πίνακες με ορθογωνικότητα στις στήλες σύμφωνα με τη μέθοδο Taguchi. Κατά τη μέθοδο στατιστικού σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi η ορθογωνικότητα ερμηνεύεται με τη συνδυαστική έννοια. Συγκεκριμένα, σε κάθε γραμμή

του πίνακα δημιουργείται ένα μοναδικός συνδυασμός των τιμών των παραμέτρων προς αξιολόγηση [98]. Συνεπώς, αν οι τιμές των παραμέτρων αντιστοιχηθούν σε διακριτά επίπεδα με διάμεσο την τιμή μηδέν, το εσωτερικό γινόμενο δύο οποιονδήποτε στηλών του πίνακα πρέπει να ισούται με το μηδέν.

Κάθε στήλη του πίνακα αντιστοιχεί σε μία παράμετρο λειτουργίας του μετα-ευρετικού αλγορίθμου, ενώ κάθε σειρά αντιπροσωπεύει έναν συνδυασμό τιμών παραμέτρων προς αξιολόγηση. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα ενός πίνακα Taguchi για τρεις μεταβλητές με τρεις διακριτές τιμές για κάθε μία παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.4. Επαληθεύεται ότι για κάθε ζεύγος στηλών του Πίνακα 6.4, το εσωτερικό τους γινόμενο ισούται με το μηδέν. Σημειώνεται, ότι οι τιμές των παραμέτρων που φαίνονται στον Πίνακα 6.4 αφορούν αντιστοίχιση των πραγματικών τιμών στη διακριτή κλίμακα $[-1, 0, +1]$, ώστε να μπορεί να επαληθευτεί ο κανόνας του εσωτερικού γινομένου. Οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων ορίζονται στο εκάστοτε πρόβλημα.

Πίνακας 6.4: Ο πίνακας Taguchi για την περίπτωση τριών παραμέτρων με τρία διακριτά επίπεδα τιμών για κάθε μία.

Αριθμός Πειράματος	Τιμές Παραμέτρων		
	Παράμετρος 1	Παράμετρος 2	Παράμετρος 3
1	-1	-1	-1
2	-1	0	0
3	-1	1	1
4	0	-1	1
5	0	0	-1
6	0	1	0
7	1	-1	0
8	1	0	1
9	1	1	-1

Για κάθε έναν από τους δύο αλγορίθμους προς αξιολόγηση (GA και PSO) κατασκευάζεται ο ορθογώνιος πίνακας Taguchi που περιλαμβάνει τρεις παραμέτρους με δέκα διακριτά επίπεδα για κάθε μία. Συνεπώς, δημιουργούνται 100 διαφορετικοί συνδυασμοί των παραμέτρων, κάθε ένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε ένα πείραμα προς αξιολόγηση (Παράρτημα Α). Για κάθε έναν από τους 100 συνδυασμούς των παραμέτρων λειτουργίας των αλγορίθμων εκτελούνται όλα τα σενάρια φόρτισης, που περιεγράφηκαν στην υποενότητα αυτή, μέσω προγράμματος που υλοποιήθηκε στη γλώσσα MATLAB, ώστε να υπολογιστεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε σενάριο. Έπειτα, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε σενάριο φόρτισης κανονικοποιείται στο εύρος $[0, 1]$, σύμφωνα με τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή που επιτυγχάνεται για το εκάστοτε

σενάριο. Η επίδραση κάθε τιμής της εκάστοτε παραμέτρου στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζεται στις (6.13), (6.14) [99].

$$Y = f(\mathbf{X}) \quad (6.13)$$

$$E_{i,j} = E(Y|X_i = x_j^*) \quad (6.14)$$

όπου,

$\mathbf{X}$: Το διάνυσμα των παραμέτρων προς διερεύνηση.

$Y = f(\mathbf{X})$: Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε διάνυσμα $\mathbf{X}$.

X_i : Η υπό αξιολόγηση παράμετρος (π.χ. ο αριθμός των γενεών του GA).

x_j^* : Η τιμή της παραμέτρου X_i προς αξιολόγηση (π.χ. ο αριθμός των γενεών του GA ισούται με 100).

$E_{i,j}$: Η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την τιμή x_j^* της παραμέτρου X_i . Η μέση τιμή λαμβάνεται θέτοντας την τιμή της X_i (π.χ. τον αριθμό των γενεών του GA) ίση με x_j^* (π.χ. 100 γενεών) και μεταβάλλοντας τις υπόλοιπες παραμέτρους (π.χ. πληθυσμός και συντελεστής διασταύρωσης) σε όλο το εύρος τους.

Έπειτα, η επίδραση κάθε παραμέτρου αξιολογείται περαιτέρω μέσω της διακύμανσης της αντικειμενικής συνάρτησης (6.15) [99], ώστε να επιλεγεί η παράμετρος που όχι μόνο οδηγεί σε μεγάλη μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, αλλά και σε μικρή διακύμανση. Στο τελευταίο βήμα, υπολογίζεται η μέση τιμή των παραπάνω στατιστικών μεγεθών για κάθε τιμή των παραμέτρων λειτουργίας των αλγορίθμων για τα 100 τυχαία σενάρια φόρτισης, προκειμένου να επιλεγεί ο καταλληλότερος συνδυασμός για τη λειτουργία του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής για τον GA και τον PSO παρουσιάζονται στις ενότητες 6.3.3 και 6.3.4 αντίστοιχα. Όλα τα πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί σε περιβάλλον MATLAB χρησιμοποιώντας το “Global Optimisation Toolbox” [100]. Όλα τα πειράματα εκτελέστηκαν σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel i7 8700 (6 πυρήνες, 12 νήματα, 4.6 GHz μέγιστη συχνότητα ρολογιού).

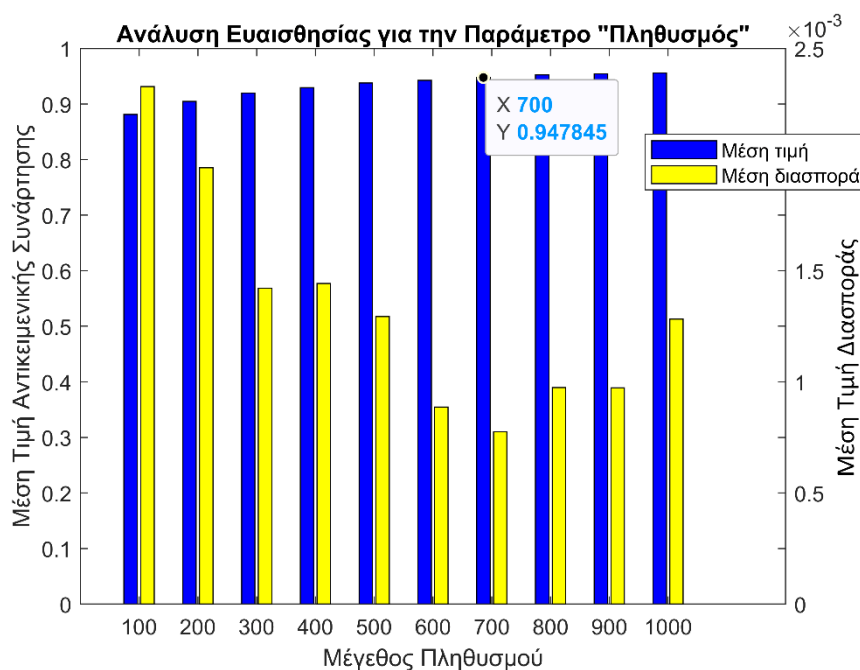
$$V_{i,j} = V(Y|X_i = x_j^*) \quad (6.15)$$

6.3.3 Επιλογή παραμέτρων λειτουργίας του GA

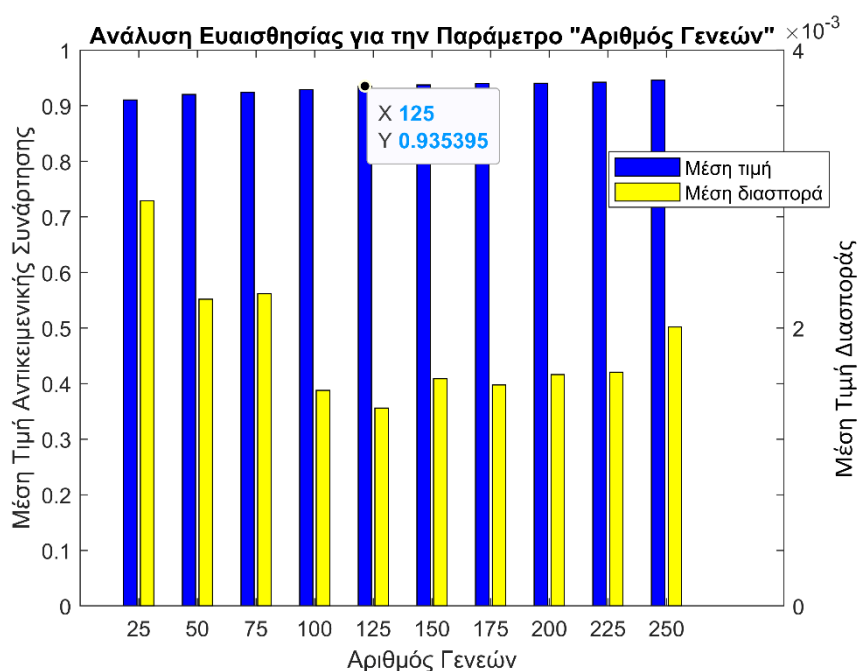
Στην ενότητα αυτή εφαρμόζεται η μέθοδος που παρουσιάστηκε στην ενότητα 6.3.2 για την εύρεση της επίδρασης των παραμέτρων λειτουργίας του GA στις επιδόσεις του. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι το μέγεθος του πληθυσμού (population size), ο αριθμός των γενεών (number of

generations) και ο ρυθμός διασταύρωσης (crossover rate). Για το μέγεθος του πληθυσμού, εξετάζονται δέκα τιμές στο εύρος [100, 1000] με βήμα 100. Για τον αριθμό των γενεών, εξετάζονται δέκα τιμές στο εύρος [25, 250] με βήμα 25, ενώ για το ρυθμό διασταύρωσης εξετάζονται δέκα τιμές στο εύρος [0,1, 1] με βήμα 0,1.

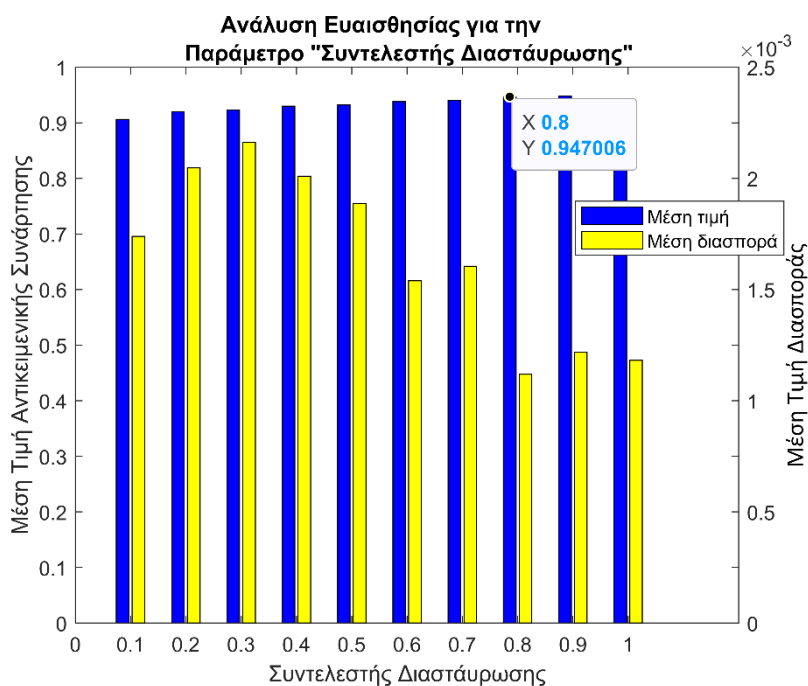
Οι μέγιστες τιμές του μεγέθους του πληθυσμού και του αριθμού γενεών έχουν επιλεγεί με σκοπό την ολοκλήρωση του χρονοπρογραμματισμού για ένα σενάριο φόρτισης διάρκειας 1,5 ωρών σε λιγότερο από 15 δευτερόλεπτα. Το σενάριο φόρτισης με διάρκεια 1,5 ωρών αντιστοιχεί σε 18 χρονικά διαστήματα των 5 λεπτών έκαστο, δηλαδή 18 ανεξάρτητες μεταβλητές (κάθε χρονικό διάστημα 5 λεπτών αντιστοιχεί σε μία ανεξάρτητη μεταβλητή). Επιπρόσθετα, ο αριθμός των επίλεκτων έχει τεθεί ως το 5 % του πληθυσμού. Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.2-6.4. Κάθε σχήμα απεικονίζει τη μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και τη διασπορά της για τα επιλεγμένα επίπεδα κάθε λειτουργικής παραμέτρου του αλγορίθμου. Το μέγεθος του πληθυσμού επιλέγεται ως 700 (Σχήμα 6.2), για τον αριθμό των γενεών επιλέγεται η τιμή 125 (Σχήμα 6.3), ενώ για το συντελεστή διασταύρωσης επιλέγεται η τιμή 0,8 (Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.2: Στατιστική ανάλυση σχετικά με το μέγεθος του πληθυσμού που εφαρμόζεται στον GA.



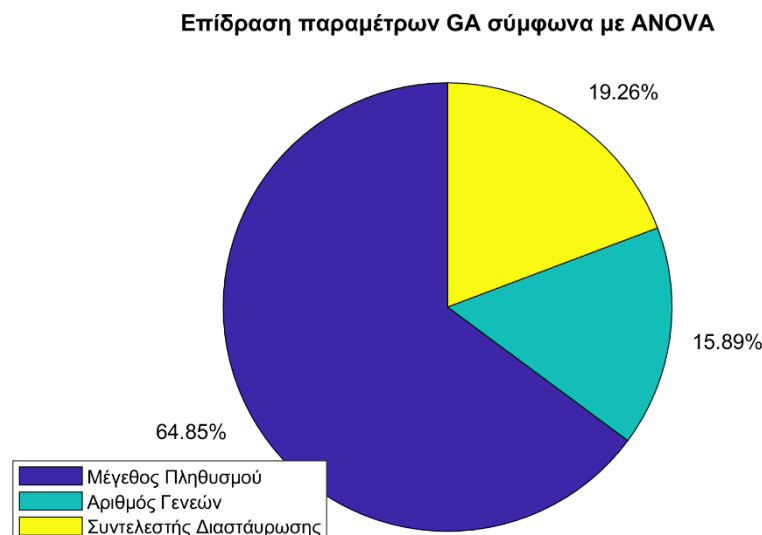
Σχήμα 6.3: Στατιστική ανάλυση σχετικά με το αριθμό των γενεών που εφαρμόζεται στον GA.



Σχήμα 6.4: Στατιστική ανάλυση σχετικά με το συντελεστή διασταύρωσης που εφαρμόζεται στον GA.

Ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο υπολογισμός της επίδρασης κάθε παραμέτρου στην τιμή της συνάρτησης κέρδους. Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται με την ανάλυση των διασπορών

(Analysis of Variances, ANOVA), όπως παρουσιάζεται κατά τον Phadke [98]. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην [98], τα αποτελέσματα της ANOVA για τον GA παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: Επίδραση των παραμέτρων του GA σύμφωνα με την ANOVA.

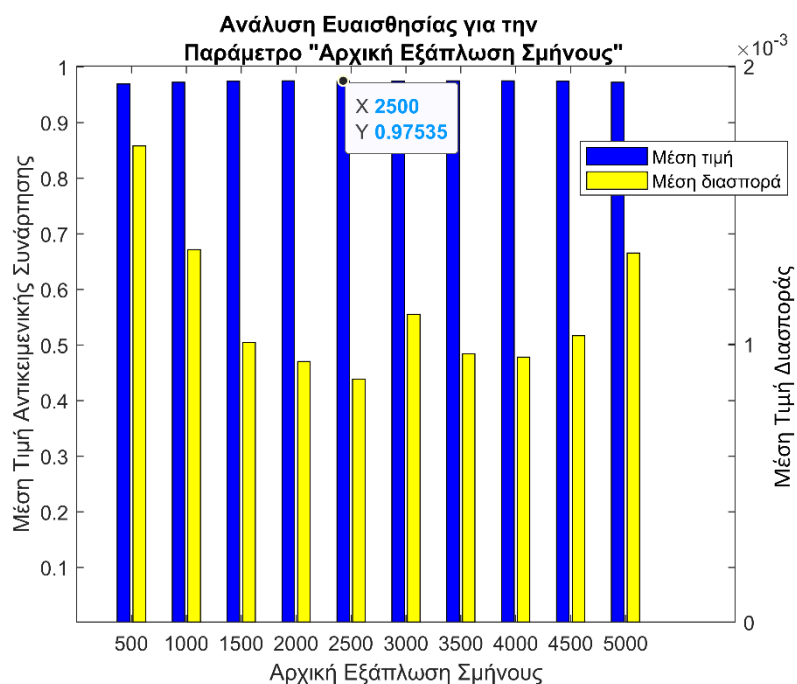
6.3.4 Επιλογή παραμέτρων λειτουργίας του PSO

Ακολουθώντας τα ίδια βήματα με το GA πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση για την επιλογή των λειτουργικών παραμέτρων του PSO. Οι παράμετροι που εξετάζονται είναι η αρχική εξάπλωση του σμήνους (initial swarm span), ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων (maximum iterations) και το μέγεθος του σμήνους (swarm size).

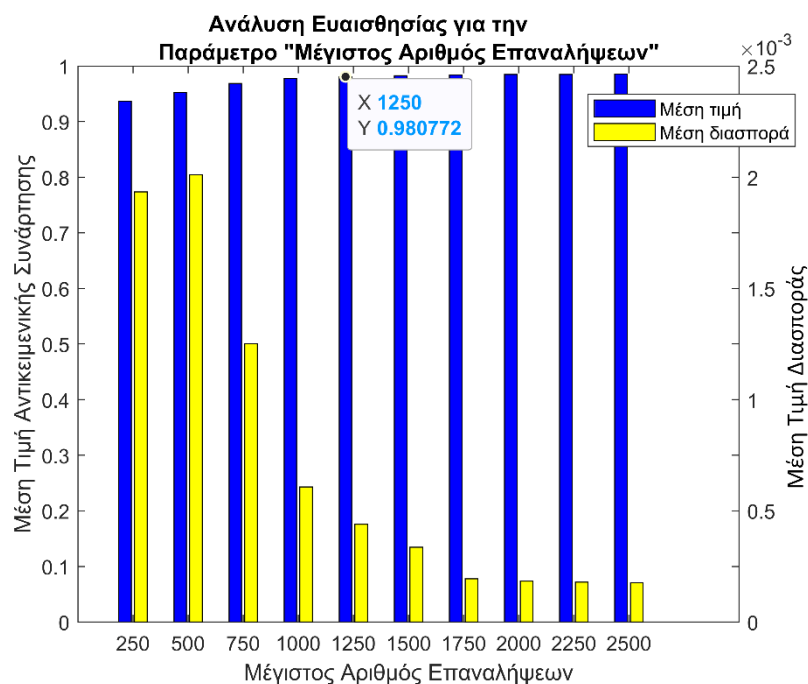
Σχετικά με την αρχική εξάπλωση του σμήνους, εξετάζονται δέκα τιμές στο εύρος [500, 5000] με βήμα 500. Για την επιλογή του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων εξετάζονται δέκα τιμές στο εύρος [250, 2500] με βήμα 250, ενώ για το μέγεθος του σμήνους εξετάζονται δέκα τιμές στο εύρος [45, 450] με βήμα 45. Όπως και στην επιλογή του εύρους των τιμών των παραμέτρων του GA, έτσι και στην περίπτωση του PSO, οι μέγιστες τιμές των λειτουργικών του παραμέτρων έχουν επιλεγθεί με σκοπό την ολοκλήρωση του χρονοπρογραμματισμού για ένα σενάριο φόρτισης διάρκειας 1,5 ωρών (18 ανεξάρτητες μεταβλητές) σε λιγότερο από 15 δευτερόλεπτα. Η τιμή του συντελεστή βαρύτητας που αφορά τη βέλτιστη θέση του σωματιδίου c_1 , καθώς και τη βέλτιστη θέση που προκύπτει από όλο το σμήνος c_2 ορίζονται ως 1,49 σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [101], [102].

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής για τον PSO παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.6-6.8, ώστε να επιλεγούν οι τιμές των παραμέτρων λειτουργίας του αλγορίθμου. Για την αρχική εξάπλωση του

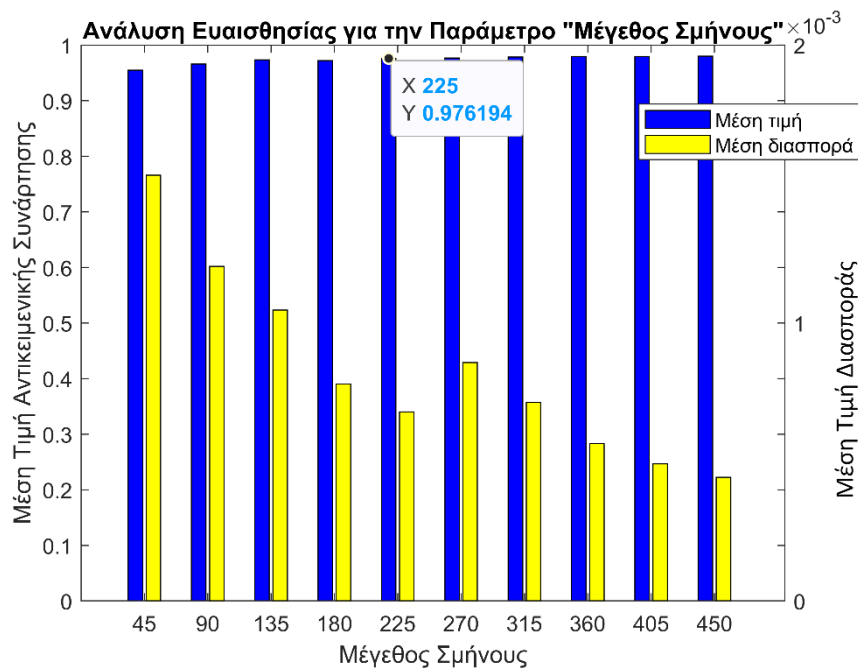
σμήνους επιλέγεται η τιμή 2500 (Σχήμα 6.6), για το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων επιλέγεται η τιμή 1250 (Σχήμα 6.7), ενώ για το μέγεθος του σμήνους επιλέγεται η τιμή 225 (Σχήμα 6.8). Επιπλέον, τα αποτελέσματα της ANOVA, όσον αφορά την επίδραση των παραμέτρων του PSO στην τιμή της συνάρτησης κέρδους παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.6: Στατιστική ανάλυση σχετικά με την αρχική εξάπλωση του σμήνους που εφαρμόζεται στον PSO.

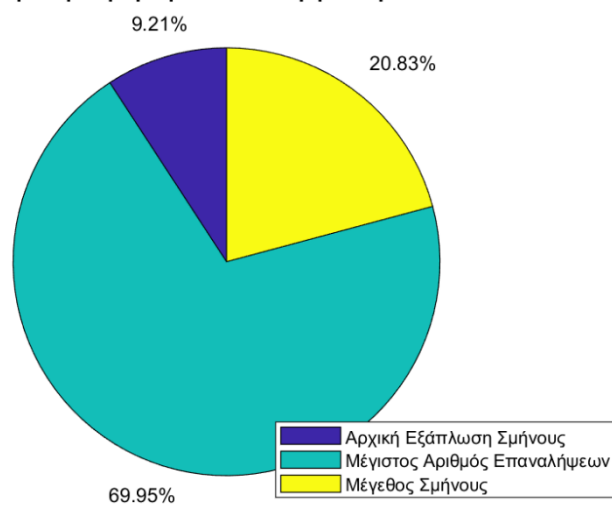


Σχήμα 6.7: Στατιστική ανάλυση σχετικά με το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων που εφαρμόζεται στον PSO.



Σχήμα 6.8: Στατιστική ανάλυση σχετικά με το μέγεθος του σμήνους που εφαρμόζεται στον PSO.

Επίδραση παραμέτρων PSO σύμφωνα με ANOVA



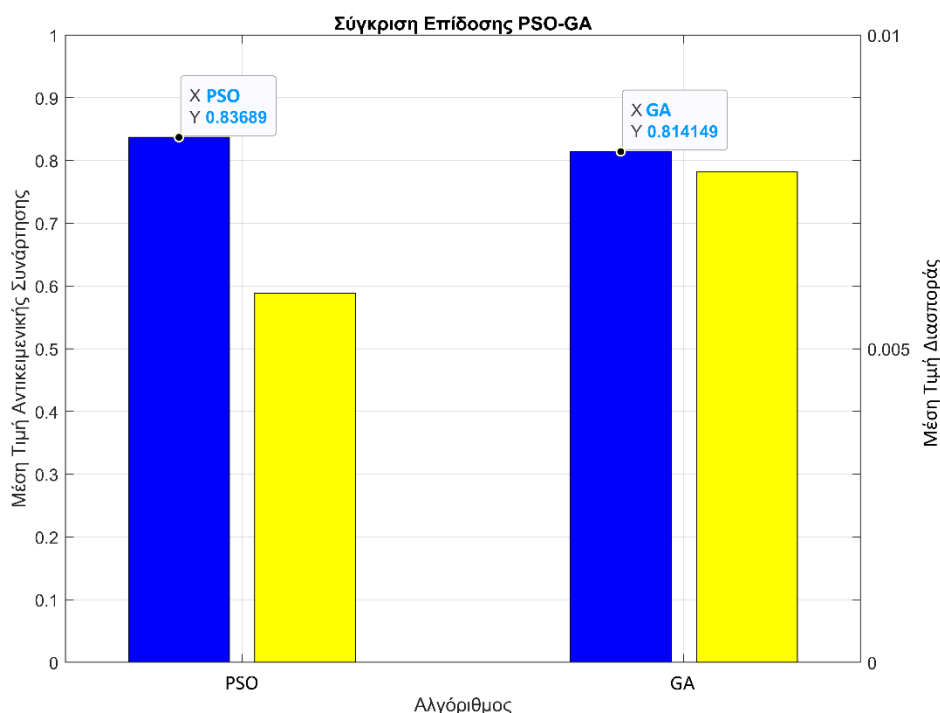
Σχήμα 6.9: Επίδραση των παραμέτρων του PSO σύμφωνα με την ANOVA.

6.3.5 Σύγκριση μεταξύ GA και PSO

Αφού έχουν επιλεγεί οι παράμετροι λειτουργίας κάθε αλγορίθμου, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των δύο για την επιλογή του καταλληλότερου προς χρήση για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ΗΟ. Συγκεκριμένα, οι δύο αλγόριθμοι εκτελούνται για τα 100 σενάρια φόρτισης που παρουσιάστηκαν στην 6.3.2. Η μέση τιμή και η διασπορά της αντικειμενικής συνάρτησης $f_{objective}$

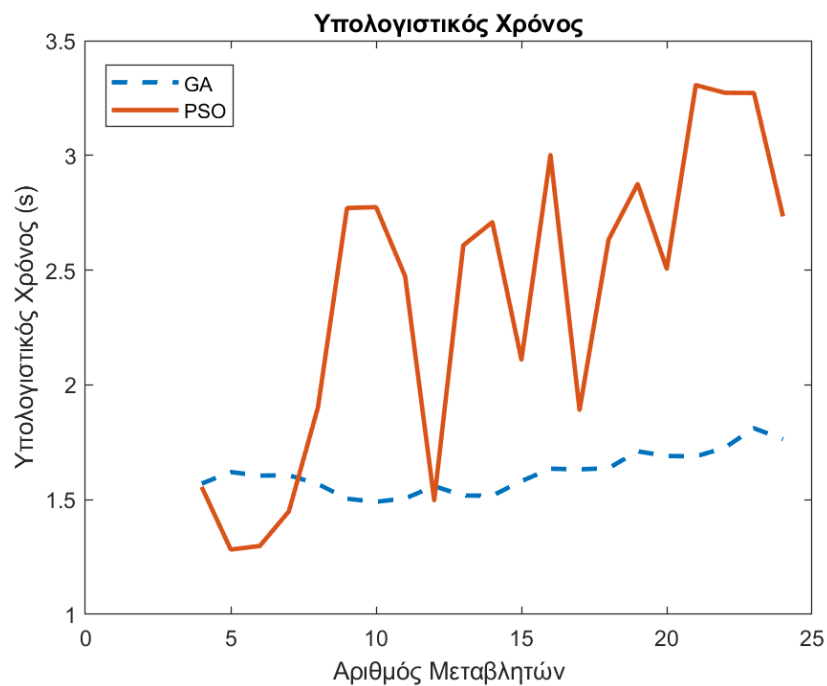
(6.7) για κάθε έναν από τους δύο αλγορίθμους παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10. Παρατηρείται ότι ο PSO οδηγεί σε μεγαλύτερη μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και μικρότερη διασπορά σε σχέση με το GA.

Επιπλέον, πραγματοποιείται σύγκριση των δύο αλγορίθμων με βάση τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτούν. Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση αυτή κατασκευάζονται τυχαία σενάρια φόρτισης που απαιτούν χρόνο ολοκλήρωσης στο διάστημα [20, 120] λεπτών που αντιστοιχεί στο εύρος των [4, 24] χρονικών διαστημάτων, κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μία ανεξάρτητη μεταβλητή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.11. Παρατηρείται ότι ο GA είχε ένα μέσο χρόνο υπολογισμού τα 1,62 s, ενώ ο PSO τα 2,38 s. Η επίδοση του PSO ήταν καλύτερη από εκείνη του GA σε μέση απόλυτη διαφορά των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης κατά 3,15 %.

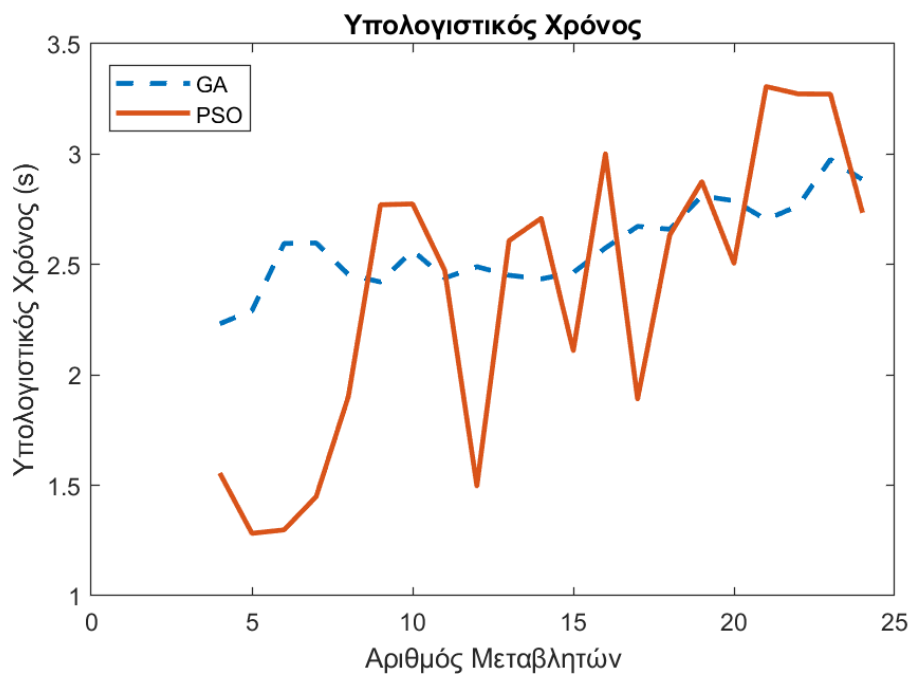


Σχήμα 6.10: Σύγκριση επίδοσης μεταξύ PSO και GA.

Προκειμένου να ελεγχθεί αν η αύξηση του χρόνου εκτέλεσης του GA μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα, πραγματοποιείται εκ νέου η προαναφερθείσα σύγκριση αυξάνοντας τον αριθμό των γενεών του GA σε 200 (από 125 που είχε επιλεγεί αρχικά). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.12. Παρατηρείται ότι η μέση τιμή του χρόνου εκτέλεσης του GA αυξήθηκε σε 2,58 s, όμως ακόμα και σε αυτή την περίπτωση ο PSO οδήγησε σε καλύτερα αποτελέσματα κατά 2,13 %. Συνεπώς, μεταξύ των δύο αλγορίθμων επιλέγεται ο PSO για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ΗΟ σε ΣΦ.



Σχήμα 6.11: Σύγκριση μεταξύ του PSO και του GA όσον αφορά τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση τους, χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση.



Σχήμα 6.12: Σύγκριση μεταξύ του PSO και του GA όσον αφορά τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση τους, αυξάνοντας τον αριθμό των γενεών σε 200.

6.3.6 Σύγκριση μεταξύ PSO και εξαντλητικής διερεύνησης

Για την περαιτέρω αξιολόγηση του PSO, πραγματοποιείται σύγκριση με τον αλγόριθμο εξαντλητικής διερεύνησης του χώρου των πιθανών λύσεων για ένα μικρό σενάριο φόρτισης των 20 λεπτών (4 ανεξάρτητες μεταβλητές). Κατά την εξαντλητική διερεύνηση του χώρου των πιθανών λύσεων το ρεύμα φόρτισης κβαντίζεται στο εύρος φόρτισης κάθε τύπου φορτιστή (κανονικής και γρήγορης φόρτισης) με βήμα 2 A. Έτσι, μπορούν να αξιολογηθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των τεσσάρων ανεξάρτητων μεταβλητών (ρευμάτων φόρτισης) σε λογικό χρόνο εκτέλεσης. Ο υπολογιστικός χρόνος για την εκτέλεση της εξαντλητικής διερεύνησης για ένα σενάριο φόρτισης 20 λεπτών είναι 60 δευτερόλεπτα με χρήση παράλληλου προγραμματισμού, ενώ ο αντίστοιχος χρόνος για τον PSO είναι 1,57 δευτερόλεπτα χρησιμοποιώντας μόνο ένα πυρήνα του επεξεργαστή. Η εξαντλητική διερεύνηση του χώρου λύσεων καταλήγει στη βέλτιστη λύση, συνεπώς η απόκλιση του PSO αξιολογείται σύμφωνα με τη Σχέση 6.16.

$$PSO_{comparison} = \frac{result_{exhaustive} - result_{PSO}}{result_{exhaustive}} \cdot 100 \% \quad (6.16)$$

όπου,

$PSO_{comparison}$: Η απόκλιση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει από τον PSO για κάθε σενάριο φόρτισης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της εξαντλητικής διερεύνησης.

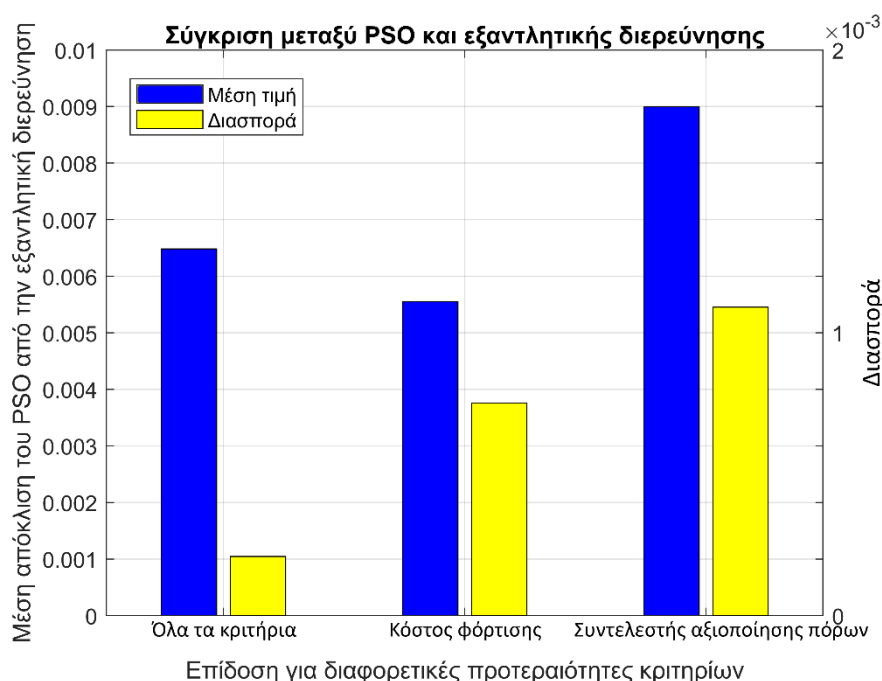
$result_{exhaustive}$: Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε εκτέλεση της εξαντλητικής διερεύνησης.

$result_{PSO}$: Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε εκτέλεση του PSO.

Προκειμένου να εξακριβωθεί η επίδοση του PSO σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξαντλητική διερεύνηση του χώρου λύσεων, δοκιμάζονται τυχαία σενάρια φόρτισης και διαφοροποιήσεις στην επιλογή των συντελεστών βαρύτητας που υποδηλώνουν τις προτεραιότητες για κάθε κριτήριο (Σχήμα 6.13). Αρχικά, πραγματοποιείται αξιολόγηση λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια και τους συντελεστές βαρύτητας που περιγράφονται στην 6.3.2. Έπειτα, εξετάζονται τα ίδια σενάρια για την περίπτωση που αξιολογείται μόνο το κόστος της φόρτισης, ενώ στο τέλος εξετάζεται η περίπτωση που αξιολογείται μόνο το κριτήριο αξιοποίησης των πόρων του σταθμού.

Για όλες τις περιπτώσεις, η μέση τιμή της απόκλισης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει από τον PSO σε σχέση με την εξαντλητική διερεύνηση είναι μικρότερη από 1 %

(6.16). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι ο PSO είναι κατάλληλος προς αξιοποίηση για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ΗΟ σε ΣΦ.



Σχήμα 6.13: Σύγκριση μεταξύ του PSO και της εξαντλητικής διερεύνησης για διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας.

6.4 Υποβοήθηση λήψης αποφάσεων για την επιλογή σταθμού φόρτισης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η μέθοδος Analytic Hierarchy Process (AHP) με σκοπό την υποβοήθηση των οδηγών των ΗΟ κατά την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης. Πέρα από τη μαθηματική μοντελοποίηση των κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή του ΣΦ, παρουσιάζεται και ένα διάγραμμα ροής για την εισαγωγή των προτιμήσεων των οδηγών ως συντελεστών βαρύτητας.

6.4.1 Μοντελοποίηση κριτηρίων και περιγραφή της AHP

Όταν ληφθούν από το ΗΟ τα προτεινόμενα χρονοδιαγράμματα φόρτισης από κάθε ΣΦ πρέπει να επιλεγεί το καταλληλότερο σύμφωνα με τις προτιμήσεις των οδηγών για μετακίνηση. Για το σκοπό αυτό αξιοποιείται η AHP ως μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους υποβοήθησης λήψης αποφάσεων με ευρεία χρήση στις επιστήμες μηχανικού, με σημαντικό πλεονέκτημα τη δυνατότητα συμπερίληψης υποκειμενικών παραγόντων [103]. Όμως, παρά την ευρεία χρήση της, ιδιαίτερα στο αντικείμενο των βιομηχανικών συστημάτων παραγωγής [104], η AHP δεν έχει διερευνηθεί διεξοδικά

κατά τη λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με το έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για την παρούσα εφαρμογή, τα κριτήρια που αξιολογούνται από την AHP παρουσιάζονται στις εξισώσεις (6.17-6.20) και αφορούν το κόστος φόρτισης, την καταπόνηση των συσσωρευτών λόγω της φόρτισης με υψηλό μέσο ή μέγιστο ρεύμα, καθώς και το χρόνο ολοκλήρωσης της φόρτισης.

$$Price_{criterion} = \frac{ReferencePrice}{StationPrice} \quad (6.17)$$

$$AvgCurrent_{criterion} = \frac{EVAverageCurrent}{StationAverageCurrent} \quad (6.18)$$

$$MaxCurrent_{criterion} = \frac{EVAverageCurrent}{StationMaximumCurrent} \quad (6.19)$$

$$ComplTime_{criterion} = \frac{PreferredChargeDuration}{ChargeDuration + TravelTime} \quad (6.20)$$

Όπου,

Price_{criterion}: Το κριτήριο που αναφέρεται στο κόστος φόρτισης.

ReferencePrice: Η τιμή αναφοράς για το κόστος φόρτισης ενδεικτικά μπορεί να προκύψει από τη μέση τιμή της ενέργειας στην περιοχή που θα πραγματοποιηθεί η φόρτιση.

StationPrice: Το κόστος φόρτισης για τον εκάστοτε ΣΦ.

AvgCurrent_{criterion}: Το κριτήριο που αναφέρεται στο μέσο ρεύμα φόρτισης.

EVAverageCurrent: Το μέσο ρεύμα φόρτισης που προκύπτει σύμφωνα με την απαιτούμενη από τους οδηγούς ενέργεια φόρτισης και το χρόνο φόρτισης.

StationAverageCurrent: Το μέσο ρεύμα φόρτισης που προσφέρεται από τον εκάστοτε ΣΦ.

MaxCurrent_{criterion}: Το κριτήριο που αναφέρεται στο μέγιστο ρεύμα φόρτισης.

StationMaximumCurrent: Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης που προκύπτει σύμφωνα με την απαιτούμενη από τους οδηγούς ενέργεια φόρτισης και το χρόνο φόρτισης

ComplTime_{criterion}: Το κριτήριο που αναφέρεται στο χρόνο ολοκλήρωσης φόρτισης.

PreferredChargeDuration: Η προτίμηση των οδηγών για τη διάρκεια φόρτισης.

ChargeDuration: Ο χρόνος φόρτισης για τον εκάστοτε ΣΦ.

TravelTime: Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση του ΗΟ στο ΣΦ.

Έχοντας λάβει τα δεδομένα φόρτισης από κάθε ΣΦ, υπολογίζονται τα κριτήρια επιλογής σύμφωνα με τις (6.17)-(6.20). Υψηλότερη τιμή κάθε κριτηρίου οδηγεί πλεονεκτικά προς την επιλογή του

σταθμού που το προσφέρει. Αναλυτική περιγραφή της παραλλαγής της AHP που χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή βρίσκεται στην [105]. Στη συνέχεια, οι τιμές των κριτηρίων κανονικοποιούνται στο εύρος [1,9], σύμφωνα με την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή που λαμβάνουν στις προσφορές των ΣΦ, όπως απαιτείται για την εκτέλεση της μεθόδου (6.21).

$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \cdot (y_{max} - y_{min}) + y_{min} \quad (6.21)$$

Όπου,

X' : Η κανονικοποιημένη τιμή του κριτηρίου.

X : Η τιμή του κριτηρίου όπως προκύπτει από τις (6.17)-(6.20).

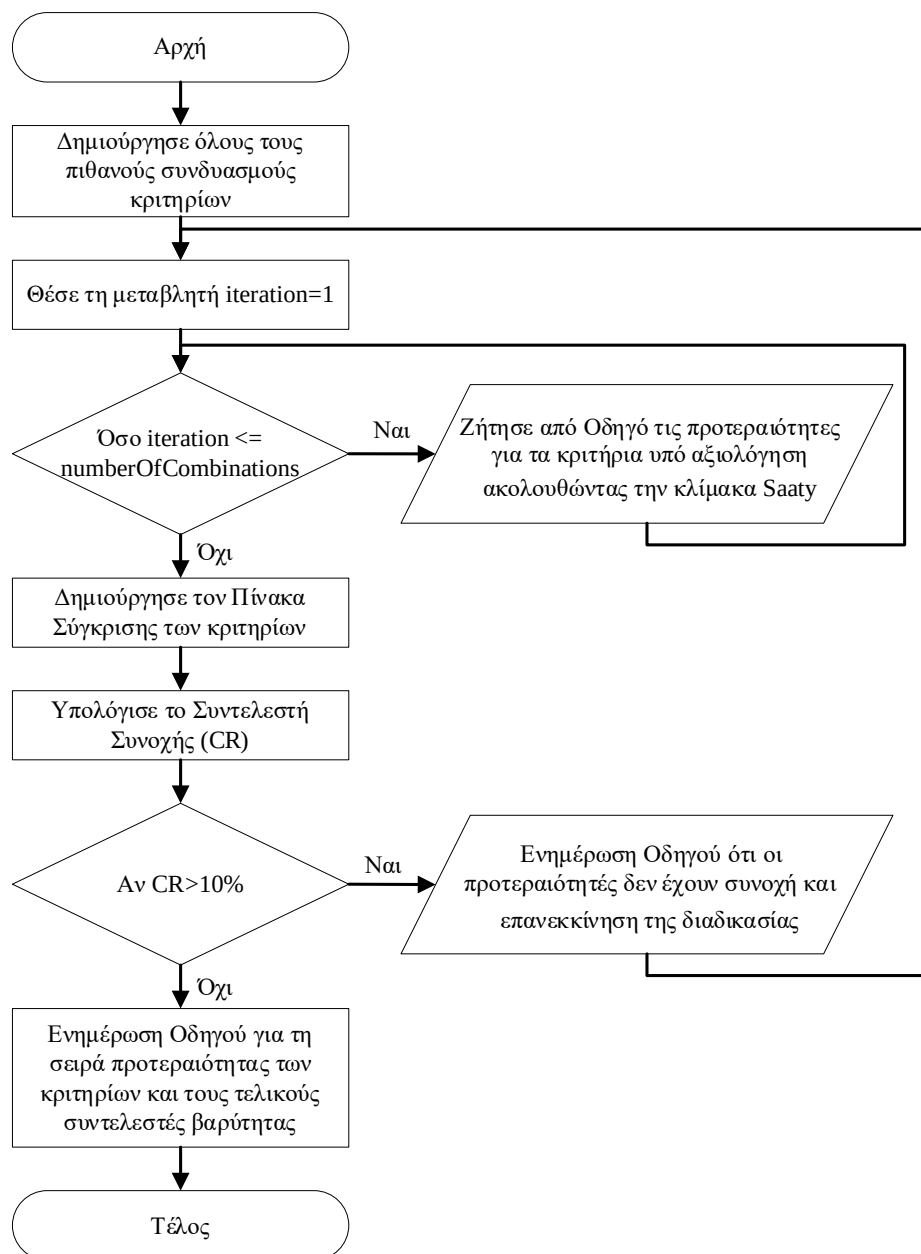
X_{min}, X_{max} : Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του εκάστοτε κριτηρίου, όπως προκύπτει από τα προφίλ φόρτισης για κάθε σταθμό. Τα y_{max} και y_{min} λαμβάνουν την τιμή 9 και 1 αντίστοιχα, ώστε να πραγματοποιηθεί η κανονικοποίηση στο εύρος [1,9].

Μετά τον ορισμό των κριτηρίων που θα αξιολογηθούν με τη χρήση της AHP πρέπει να ποσοτικοποιηθούν οι προτεραιότητες των οδηγών σχετικά με τα κριτήρια αυτά. Σημειώνεται ότι κατά την εισαγωγή των υποκειμενικών προτιμήσεων των οδηγών σχετικά με τα κριτήρια φόρτισης, μπορεί να μην υπάρξει συνοχή στον πίνακα που δημιουργείται, καθώς η προτίμηση οφείλεται σε υποκειμενικό παράγοντα. Η AHP επιτρέπει τη μη πλήρη συνοχή του πίνακα κριτηρίων, αρκεί ο συντελεστής συνοχής να είναι μικρότερος του 10 % [105].

Η ποσοτικοποίηση των προτιμήσεων του οδηγού πραγματοποιείται μέσω σύγκρισης κατά ζεύγη όλων των κριτηρίων με βάση την κλίμακα του Saaty στο εύρος [1,9]. Στην κλίμακα Saaty η τιμή 1 αντιστοιχεί σε “όμοια προτεραιότητα” ενώ η τιμή 9 αντιστοιχεί σε “εξαιρετική προτεραιότητα” του ενός κριτηρίου έναντι του άλλου. Σε μια εμπορική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου πρέπει να ακολουθείται ένα διάγραμμα ροής για την εισαγωγή των προτιμήσεων του οδηγού. Ένα ενδεικτικό διάγραμμα ροής λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του συντελεστή συνοχής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.14.

Έχοντας ολοκληρώσει τη μοντελοποίηση των κριτηρίων και έχοντας θέσει τον τρόπο που θα λαμβάνονται οι προτεραιότητες των οδηγών, στη συνέχεια δημιουργούνται δύο τύποι πινάκων σύγκρισης (judgement matrices). Ο πρώτος πίνακας προκύπτει από την κατά ζεύγη σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών προφίλ φόρτισης που προκύπτουν από τα δεδομένα φόρτισης από τους ΣΦ, ενώ ο δεύτερος απεικονίζει την προτεραιότητα των κριτηρίων και προκύπτει από την κατά ζεύγη

σύγκριση μεταξύ των προτιμήσεων των οδηγών. Η κατά ζεύγη σύγκριση πραγματοποιείται μέσα από τη διαίρεση των δύο τιμών που εξετάζονται. Έστω ότι αξιολογείται N αριθμός κριτηρίων/εναλλακτικών. Τότε ο πίνακας σύγκρισης που προκύπτει από την κατά ζεύγη σύγκριση των κριτηρίων αυτών έχει μέγεθος $N \times N$.



Σχήμα 6.14: Διάγραμμα ροής για την ποσοτικοποίηση των προτιμήσεων του οδηγού.

Οι προτεραιότητες για τις εναλλακτικές φόρτισης και τα κριτήρια αξιολόγησης υπολογίζονται μέσω του γεωμετρικού μέσου κάθε σειράς, ο οποίος στη συνέχεια κανονικοποιείται με τη διαίρεσή

του με το άθροισμα των γεωμετρικών μέσων όλων των σειρών, ώστε τελικά να υπολογιστεί το διάνυσμα προτεραιοτήτων (Priority Vector). Το διάνυσμα των προτεραιοτήτων για κάθε κριτήριο δηλώνει το συντελεστή βαρύτητάς του. Ενδεικτικό παράδειγμα του πίνακα σύγκρισης για τα τέσσερα κριτήρια φόρτισης που λαμβάνονται υπόψη παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.5.

Πίνακας 6.5: Πίνακας σύγκρισης των τεσσάρων κριτηρίων φόρτισης.

Κριτήριο	Κόστος Φόρτισης	Μέσο ρεύμα	Μέγιστο ρεύμα	Χρόνος Φόρτισης	Priority Vector
Κόστος Φόρτισης	1,00	0,33	3,00	1,00	0,21
Μέσο ρεύμα	3,00	1,00	3,00	3,00	0,48
Μέγιστο ρεύμα	0,33	0,33	1,00	0,33	0,10
Χρόνος Φόρτισης	1,00	0,33	3,00	1,00	0,21

Ο τελικός πίνακας αποφάσεων (decision matrix) προκύπτει από τα διανύσματα προτεραιοτήτων των κριτηρίων και των εναλλακτικών. Οι σειρές του πίνακα αντιστοιχούν στις εναλλακτικές, ενώ οι στήλες αντιστοιχούν στα κριτήρια υπό αξιολόγηση. Η τιμή που τοποθετείται σε κάθε θέση του πίνακα προκύπτει από το γινόμενο της βαρύτητας του κριτηρίου (w_j) και την τιμή του διανύσματος προτεραιοτήτων της εναλλακτικής “i” για το εν λόγω κριτήριο ($PV(A_i, C_j)$). Η τελική αξιολόγηση της εναλλακτικής προκύπτει από το άθροισμα κάθε γραμμής του πίνακα αποφάσεων. Ο Πίνακας 6.6 παρουσιάζει σε γενική μορφή έναν πίνακα αποφάσεων τριών κριτηρίων (C1, C2, C3) και τριών εναλλακτικών (A1, A2, A3).

Πίνακας 6.6: Πίνακας αποφάσεων τριών κριτηρίων και τριών εναλλακτικών.

Κριτήρια					
		C1	C2	C3	Προτεραιότητα
Εναλ- λακτικές	A1	$w_1 \cdot PV(A_1, C_1)$	$w_2 \cdot PV(A_1, C_2)$	$w_3 \cdot PV(A_1, C_3)$	sum(row)
	A2	$w_1 \cdot PV(A_2, C_1)$	$w_2 \cdot PV(A_2, C_2)$	$w_3 \cdot PV(A_2, C_3)$	sum(row)
	A3	$w_1 \cdot PV(A_3, C_1)$	$w_2 \cdot PV(A_3, C_2)$	$w_3 \cdot PV(A_3, C_3)$	sum(row)

6.5 Σενάριο λειτουργίας μεθόδων επιλογής σταθμού φόρτισης ΗΟ

Έπειτα από την επιμέρους περιγραφή κάθε μίας εκ των δύο μεθόδων που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της διατριβής αυτής για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ΗΟ και την επιλογή ΣΦ, παρουσιάζεται ένα συνολικό σενάριο λειτουργίας μικρής κλίμακας. Στο παρόν σενάριο θεωρείται ότι ένα ΗΟ χρειάζεται φόρτιση και ο οδηγός του αναζητά τον καταλληλότερο ΣΦ ανάμεσα στους δεκαπέντε πλησιέστερους.

Για το παρόν σενάριο θεωρείται ότι όλοι οι ΣΦ είναι όμοιοι, με πέντε φορτιστές εκ των οποίων οι τρεις προσφέρουν κανονική φόρτιση (έως 90 A), ενώ οι δύο προσφέρουν ταχεία φόρτιση (έως 300 A). Όλοι οι ΣΦ έχουν διαφορετική διαθεσιμότητα φορτιστών κατά το χρονικό διάστημα που απαιτείται να πραγματοποιηθεί η φόρτιση. Αρχικά, το ΗΟ στέλνει τις απαιτήσεις του οδηγού στους πλησιέστερους ΣΦ, κάθε ένας από τους οποίους εκτελεί τον PSO (ενότητα 6.3) και στέλνει πίσω στο ΗΟ το προτεινόμενο προφίλ φόρτισης. Στη συνέχεια, στο ΗΟ εκτελείται η AHP για να ταξινομηθούν οι ΣΦ και να επιλεγεί ο πιο κατάλληλος.

Η χωρική κατανομή των ΣΦ βασίζεται στην πόλη του Όσλο, στην οποία έχουν αναπτυχθεί σημαντικά οι υποδομές φόρτισης [106]. Συνεπώς, η απόσταση του ΣΦ από το ΗΟ λαμβάνεται σύμφωνα με την κατανομή $N(1,74, 0,3364)$ [107], ενώ η μέση ταχύτητα οδήγησης είναι τα 30 km/h. Όσον αφορά τους συντελεστές βαρύτητας για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης του PSO, αυτοί διαμοιράζονται ως 0,4 για το κριτήριο που αφορά το συντελεστή αξιοποίησης των πόρων του σταθμού και ως 0,6 στα κριτήρια που αφορούν τις προτιμήσεις των οδηγών. Συνεπώς, οι συντελεστές του priority vector που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5 πολλαπλασιάζονται με τον 0,6 ώστε να οδηγήσουν στους τελικούς συντελεστές ως 0,126 για το κόστος φόρτισης, 0,288 για το μέσο ρεύμα φόρτισης, 0,06 για το μέγιστο ρεύμα φόρτισης και 0,126 για το χρόνο ολοκλήρωσης της φόρτισης.

Οι δεκαπέντε ΣΦ που αξιολογούνται σε τρία διαφορετικά σενάρια φόρτισης έχουν διαθεσιμότητες πόρων μεταξύ [10, 94] %. Σε όλα τα σενάρια απαιτείται αύξηση του φορτίου των συσσωρευτών κατά 95 Ah. Τα σενάρια διαφοροποιούνται μεταξύ τους με βάση τον επιθυμητό χρόνο ολοκλήρωσης της φόρτισης. Το πρώτο σενάριο (Σ1) αφορά μια γρήγορη φόρτιση με επιθυμητό χρόνο ολοκλήρωσης τα 30 λεπτά. Στο δεύτερο σενάριο (Σ2) ο επιθυμητός χρόνος ολοκλήρωσης είναι τα 60 λεπτά, ενώ στο τρίτο σενάριο (Σ3) ο επιθυμητός χρόνος ολοκλήρωσης είναι 90 λεπτά.

Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως αυτή υπολογίζεται από τον PSO, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7, στον οποίο παρατηρείται ότι η προτεινόμενη μέθοδος χρονοπρογραμματισμού

φόρτισης οδηγεί σε εφικτές λύσεις ακόμα και στις περιπτώσεις ΣΦ με χαμηλή διαθεσιμότητα, λόγω της μεθόδου διαμοιρασμού φορτιστών μεταξύ θέσεων στάθμευσης. Παρατηρείται ότι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μειώνεται σημαντικά όταν η διαθεσιμότητα των πόρων του ΣΦ μειωθεί κάτω από 30 %. Συνεπώς, οι ΣΦ στους οποίους αξιοποιείται η προτεινόμενη λύση μπορούν να προσφέρουν ανταγωνιστικές λύσεις ακόμα και σε περιπτώσεις χαμηλής διαθεσιμότητας.

Πίνακας 6.7: Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε ΣΦ έπειτα από τη λειτουργία του PSO.

Διαθεσιμότητα Σταθμού (%)															
	94%	88%	82%	76%	70%	64%	58%	52%	46%	40%	34%	28%	22%	16%	10%
Σ1	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,78	0,76	0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Σ2	0,90	0,89	0,92	0,90	0,86	0,86	0,86	0,83	0,89	0,83	0,76	0,55	0,00	0,00	0,00
Σ3	0,88	0,85	0,87	0,84	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,87	0,54	0,58	0,54	0,00

Η ταξινόμηση των ΣΦ έπειτα από την εκτέλεση της AHP για τα τρία σενάρια φόρτισης παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.8. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των Πινάκων 6.7 και 6.8 παρατηρείται ότι η σειρά ταξινόμησης των ΣΦ μετά την εκτέλεση του PSO και της AHP δεν είναι ίδια. Η διαφορά αυτή οφείλεται στα διαφορετικά κριτήρια που αξιολογούν οι δύο αλγόριθμοι. Ο μεν PSO αξιολογεί κριτήρια που αφορούν τους διαχειριστές των ΣΦ και τους οδηγούς των ΗΟ, ενώ η AHP αξιολογεί τα κριτήρια που αφορούν μόνο τους οδηγούς των ΗΟ. Η τελική επιλογή του ΣΦ στον οποίο θα φορτίσει το όχημα πραγματοποιείται από τον οδηγό σύμφωνα με τα αποτελέσματα της AHP.

Πίνακας 6.8: Το αποτέλεσμα της AHP για την ταξινόμηση των ΣΦ.

Διαθεσιμότητα Σταθμού (%)															
	94%	88%	82%	76%	70%	64%	58%	52%	46%	40%	34%	28%	22%	16%	10%
Σ1	0.122	0.081	0.155	0.096	0.122	0.143	0.139	0.095	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Σ2	0.089	0.084	0.102	0.088	0.094	0.089	0.086	0.079	0.076	0.083	0.084	0.046	0.000	0.000	0.000
Σ3	0.070	0.085	0.089	0.082	0.074	0.084	0.081	0.074	0.081	0.087	0.089	0.031	0.042	0.032	0.000

Επιπλέον, οι αναλυτικές προσφορές των δεκαπέντε ΣΦ υπό αξιολόγηση για το δεύτερο σενάριο φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.9. Στον Πίνακα 6.9 παρουσιάζεται ως καταλληλότερο το προφίλ φόρτισης που προτείνεται από το ΣΦ με αριθμό 3. Ο ΣΦ αυτός έχει υψηλή διαθεσιμότητα φορτιστών και βρίσκεται κοντά στη θέση του ΗΟ. Συνεπώς, το προφίλ φόρτισης του ΣΦ αυτού μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του οδηγού, διατηρώντας το συντελεστή αξιοποίησης των πόρων του σταθμού σε υψηλά επίπεδα. Στον Πίνακα 6.9 μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι ΣΦ 13-15 δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν τη φόρτιση λόγω της χαμηλής τους διαθεσιμότητας πόρων.

Πίνακας 6.9: Η πρόσφορά κάθε ΣΦ για το δεύτερο σενάριο φόρτισης.

ΣΦ	Απόσταση (km)	Φορτίο προς σταθμό (Ah)	Χρόνος προς σταθμό (h)	Χρόνος φόρτισης (h)	Μέσο ρεύμα (A)	Μέγιστο ρεύμα (A)	Κόστος (€)	Φορτίο (Ah)	Ταξινόμηση
1	2,05	3,08	0,068	1,08	90,62	98,08	1,20	98,17	0,089
2	2,80	4,21	0,093	1,08	91,57	110,47	1,22	99,21	0,084
3	0,43	0,64	0,014	1,08	88,27	90,00	1,11	95,64	0,102
4	2,24	3,36	0,075	1,08	90,79	100,32	1,21	98,36	0,088
5	1,50	2,25	0,050	1,08	89,77	90,00	1,12	97,25	0,094
6	0,98	1,47	0,033	1,17	89,94	90,00	1,10	97,20	0,089
7	1,41	2,12	0,047	1,17	89,65	90,00	1,10	97,12	0,086
8	1,94	2,91	0,065	1,00	106,81	151,63	1,63	97,91	0,079
9	3,82	5,72	0,127	1,08	92,98	128,68	1,27	100,72	0,076
10	3,35	5,02	0,112	0,92	109,11	160,08	1,64	100,02	0,083
11	0,96	1,44	0,032	0,92	115,72	175,82	1,61	96,44	0,084
12	3,50	5,25	0,117	0,75	202,51	258,75	2,06	101,25	0,046
13	2,16	3,24	0,072	0,42	270,00	270,00	2,09	90,00	0,000
14	1,70	2,56	0,057	0,33	270,00	270,00	2,10	90,00	0,000
15	2,15	3,23	0,072	0,17	270,00	270,00	0,94	45,00	0,000

6.6 Επικοινωνία οχήματος και σταθμού φόρτισης μέσω του προτύπου OPC-UA

Για την επικοινωνία μεταξύ ΗΟ και ΣΦ, στα πλαίσια της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής έχει επιλεγεί το πρότυπο OPC-UA. Το OPC-UA λειτουργεί σύμφωνα με το πρωτόκολλο TCP/IP ακολουθώντας το μοντέλο publish/subscribe [108]. Επιπρόσθετα, είναι συμβατό με το πρωτόκολλο IPv4, ώστε να υποστηρίζει τα παλαιότερης τεχνολογίας συστήματα, καθώς και το IPv6, ώστε να υποστηρίζει μεγάλο αριθμό ΗΟ που θα κυκλοφορήσουν στο μέλλον.

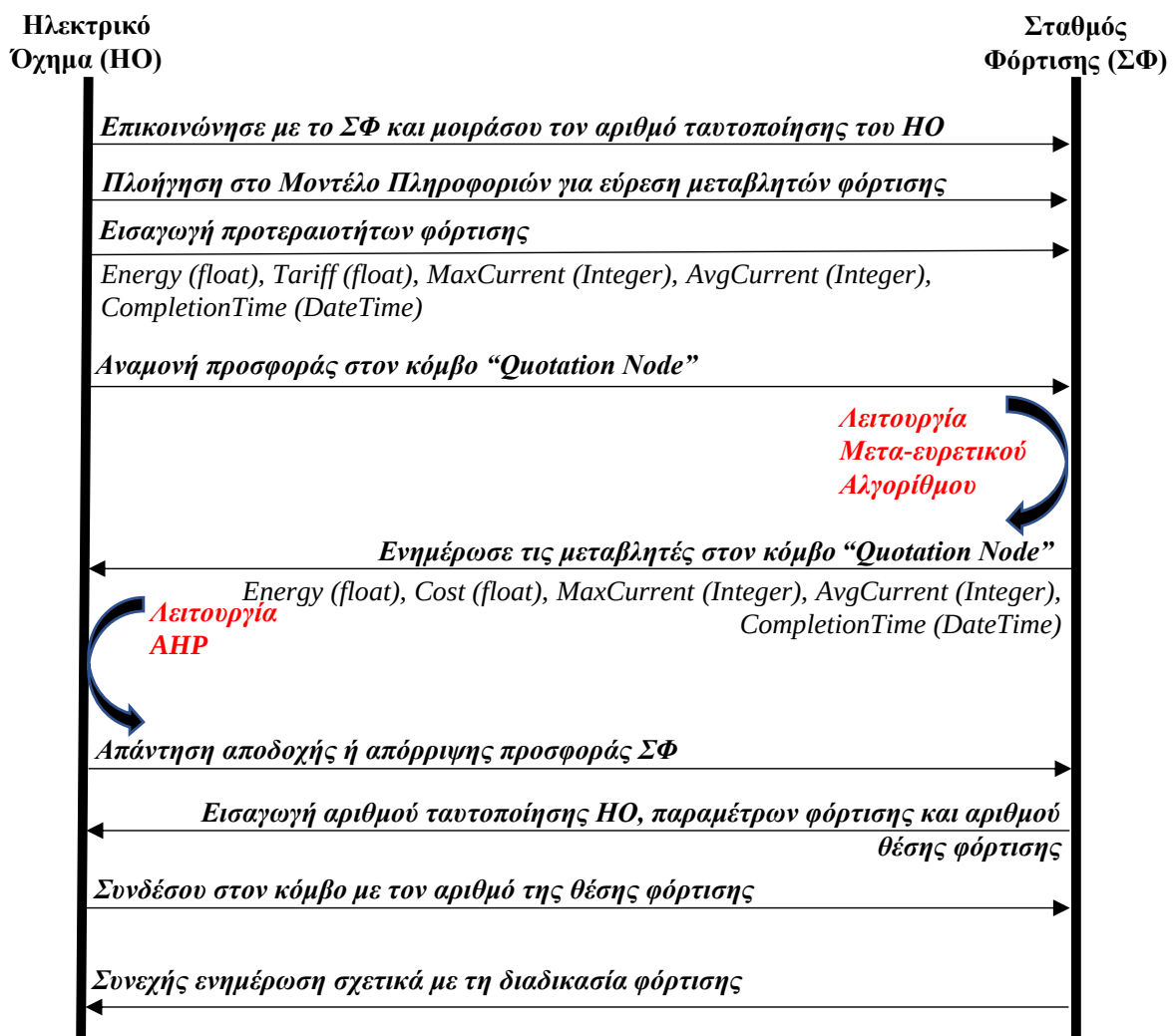
Το OPC-UA προσφέρει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σχεσιακών μοντέλων δεδομένων με σημασιολογική αναπαράσταση δεδομένων. Συνεπώς, είναι κατάλληλο προς εφαρμογή στα έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία αποτελούνται από πλήθος ετερογενών συστημάτων από διάφορους κατασκευαστές. Έτσι, μέσω του OPC-UA τα διάφορα συστήματα που απαρτίζουν το έξυπνο δίκτυο μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να απαιτούνται πολύπλοκα ενδιάμεσα συστήματα προσαρμογής δεδομένων. Αυτό καθίσταται εφικτό μέσω του σχεσιακού μοντέλου που υποστηρίζεται από το πρότυπο. Συγκεκριμένα, πέρα από τα επιμέρους υποσυστήματα του οχήματος και τις μεταβλητές που περιγράφουν την κατάστασή τους, ορίζονται και οι μεταξύ τους συσχετίσεις. Συνεπώς, όταν ένα σύστημα θέλει να αντλήσει δεδομένα από ένα άλλο σύστημα, χρειάζεται απλώς η ύπαρξη κάποιων μετα-δεδομένων που περιγράφουν τις μεταβλητές και όχι η πλήρης γνώση του μοντέλου δεδομένων.

Στο Σχήμα 6.15 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ακολουθίας για την επικοινωνία μεταξύ ΗΟ και ΣΦ, προκειμένου να ανταλλάξουν τα απαραίτητα δεδομένα για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης και την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού, σύμφωνα με τις μεθόδους που προτείνονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Οι εξυπηρετητές OPC-UA στην πλευρά του ΣΦ και του ΗΟ έχουν υλοποιηθεί με χρήση της βιβλιοθήκης λογισμικού που προσφέρεται στην [109]. Ο εξυπηρετητής στην πλευρά του ΣΦ εκτελείται σε επεξεργαστή Intel Core i7-5500U, ενώ ο εξυπηρετητής στην πλευρά του ΗΟ εκτελείται στην πλατφόρμα Raspberry Pi 3. Η συμβατότητα του εξυπηρετητή OPC-UA που υλοποιήθηκε εξετάζεται με τη χρήση του λογισμικού Softing [110].

6.7 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι για την επιλογή ΣΦ με σκοπό τη φόρτιση ΗΟ λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις των οδηγών. Η διαδικασία υποβοήθησης λήψης αποφάσεων για τη φόρτιση ΗΟ πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση, αποστέλλονται από το ΗΟ οι απαιτήσεις φόρτισης σε γειτονικούς σταθμούς, ώστε να εκτελεστεί σε κάθε έναν από αυτούς ο μετα-

ευρετικός αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού PSO και να εξαχθεί ένα προτεινόμενο προφίλ φόρτισης του ΗΟ. Στη δεύτερη φάση, οι προτάσεις των ΣΦ αξιολογούνται μέσω της ΑΗΡ, προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη σύμφωνα με τις προτιμήσεις των οδηγών. Οι ΣΦ αξιοποιούν δύο τύπους φορτιστών (κανονικής και γρήγορης φόρτισης) οι οποίοι δύναται να διαμοιραστούν μεταξύ διαφορετικών θέσεων στάθμευσης, σύμφωνα με τη μέθοδο του διαμοιρασμού πόρων. Για την επικοινωνία μεταξύ ΣΦ και ΗΟ εξετάζεται το πρότυπο OPC-UA.



Σχήμα 6.15: Διάγραμμα ακολουθίας για την επικοινωνία μεταξύ ΗΟ και ΣΦ μέσω του OPC-UA.

Για την επιλογή του μετα-ευρετικού αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ του GA και του PSO, ώστε να διερευνηθεί ποιος από τους δύο προσφέρει τα καλύτερα αποτελέσματα. Οι παράμετροι λειτουργίας των δύο μετα-ευρετικών αλγορίθμων

επιλέχθηκαν μέσα από την εφαρμογή της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του PSO με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξαντλητική διερεύνηση του χώρου λύσεων προκύπτουν αποκλίσεις μικρότερες του 1 % σε μικρό χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Επιπλέον, ο διαμοιρασμός των φορτιστών μεταξύ των θέσεων στάθμευσης μπορεί να οδηγήσει σε ανταγωνιστικές λύσεις, ακόμα και αν ο ΣΦ έχει χαμηλή διαθεσιμότητα.

Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνοψίζονται στα εξής σημεία. Αρχικά, η επιλογή μετα-ευρετικού αλγορίθμου για το χρονοπρογραμματισμό επιτρέπει την απόζευξη του μηχανισμού διερεύνησης του χώρου λύσεων από τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Έτσι, τα κριτήρια βελτιστοποίησης και οι συντελεστές βαρύτητας μπορούν να αλλάζουν δυναμικά, χωρίς να απαιτείται εκ νέου η παραμετροποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Επιπλέον, η θεώρηση δύο τύπων φορτιστών οι οποίοι διαμοιράζονται μεταξύ των διάφορων θέσεων στάθμευσης προσδίδουν τη δυνατότητα απόζευξης της φόρτισης του οχήματος από τη στάθμευσή του. Έτσι, ένα όχημα που παραμένει σταθμευμένο, αλλά δεν φορτίζει, παύει να δεσμεύει πόρους.

Επιπλέον, εισάγεται η σκοπιά των οδηγών των ΗΟ κατά την επιλογή ΣΦ μέσω της AHP, διευκολύνοντας την εισαγωγή των προτιμήσεων τους με τη μορφή συντελεστών βαρύτητας. Τα κριτήρια που εξετάζονται είναι το κόστος και ο χρόνος ολοκλήρωσης της φόρτισης, καθώς και το μέσο και μέγιστο ρεύμα φόρτισης, προκειμένου να μην καταπονούνται οι συσσωρευτές. Ως μελλοντική επέκταση της προτεινόμενης μεθόδου μπορεί να αποτελέσει η αμφίδρομη ροή ενέργειας κατά τη φόρτιση, σύμφωνα με την έννοια του V2G.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

7.1 Ανακεφαλαίωση της διατριβής

Ο βασικός σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η πρόταση μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας αποδοτικής διαχείρισης ενέργειας, τόσο στο εσωτερικό του οχήματος μέσω διατάξεων BMS, όσο και κατά τη διασύνδεση του οχήματος με το σταθμό φόρτισης, μέσω αλγορίθμων υποβοήθησης λήψης αποφάσεων. Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στα επιμέρους κεφάλαια της διατριβής συντελούν στην επίτευξη των επιμέρους στόχων που τέθηκαν. Έπειτα από διερεύνηση της πρόσφατης βιβλιογραφίας στο αντικείμενο, προτείνεται μια συνολική αρχιτεκτονική που απαρτίζεται από διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και αλγορίθμους βελτιστοποίησης και υποβοήθησης λήψης αποφάσεων.

Αρχικά, προτάθηκε σύστημα εξισορρόπησης στάθμης φόρτισης συσσωρευτών βασισμένο στον αμφίδρομο μετατροπέα τύπου Flyback, που λειτουργεί σύμφωνα με την τεχνική της σύγχρονης ανόρθωσης. Η λειτουργία της εξισορρόπησης προσφέρεται από το Σύστημα Διαχείρισης Συσσωρευτών (Battery Management System - BMS). Σύμφωνα με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική οι συσσωρευτές μιας συστοιχίας χωρίζονται σε επιμέρους ομάδες κελιών συνδεδεμένων σε σειρά. Σε κάθε συσσωρευτή τοποθετείται ένας μετατροπέας Flyback, η μία πλευρά του οποίου συνδέεται στα άκρα του συσσωρευτή, ενώ η άλλη του πλευρά συνδέεται στα άκρα της ομάδας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η αμφίδρομη ροή ενέργειας ομάδας-προς-συσσωρευτή (Module-to-Cell - M2C).

Λόγω της χαμηλής τάσης στην πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται στο κελί, σε συνδυασμό με τις μη ιδανικότητες των στοιχείων που τον απαρτίζουν, ακόμα και ρεύματα της τάξεως των μερικών Α μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις της βασικής θεωρητικής ανάλυσης, κατά την οποία ο μετατροπέας θεωρείται ιδανικός, από την πραγματική λειτουργία. Για το σκοπό αυτό, παρουσιάστηκε η ανάλυση του μετατροπέα λαμβάνοντας υπόψη τις μη ιδανικότητες των στοιχείων που τον απαρτίζουν, ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί με ακρίβεια το σημείο λειτουργίας του. Έτσι, επιτυγχάνεται ακρίβεια, κατά την εκτίμηση του σημείου λειτουργίας του με σφάλμα που λαμβάνει τιμές στο εύρος (0,38-2,50 %), το οποίο είναι κατά πολύ μικρότερο του σφάλματος που προκύπτει από την ανάλυση θεωρώντας τα στοιχεία του μετατροπέα ιδανικά και βρίσκεται στο εύρος (7,43-15,97 %).

Έχοντας πραγματοποιήσει την ανάλυση αυτή, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί να οδηγήσει στην επιλογή τιμών για τις σχεδιαστικές παραμέτρους που στοχεύουν σε μεγιστοποίηση της απόδοσης. Στην παρούσα διατριβή, ο βέλτιστος σχεδιασμός του μετατροπέα Flyback πραγματοποιείται με τη χρήση του Γενετικού Αλγορίθμου (Genetic Algorithm - GA). Το πειραματικό πρωτότυπο του μετατροπέα Flyback που κατασκευάστηκε με σκοπό την εξισορρόπηση τάσης συσσωρευτών λειτουργεί προσφέροντας ισχύ εξόδου 20 W και εξισορρόπηση με ρεύμα συσσωρευτή τα 5 A. Η μέγιστη απόδοση που επιτυγχάνεται σε πλήρη ισχύ (ρεύμα εξισορρόπησης ίσο με 5 A) είναι 91,73 %. Ενώ η μέγιστη απόδοση που επετεύχθη είναι 94,19 % για ρεύμα εξισορρόπησης 2 A (8 W).

Η εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών εντός μιας συστοιχίας είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη λειτουργία ενός αριθμού ηλεκτρονικών μετατροπέων, ανάλογα με τον αριθμό των κελιών που χρήζουν εξισορρόπησης. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα διατριβή προτείνεται μέθοδος χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης της στάθμης φόρτισης συσσωρευτών, σύμφωνα με την οποία επιλέγεται το ρεύμα κάθε μετατροπέα που θα οδηγήσει στην ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών που οφείλονται στη διαδικασία της εξισορρόπησης. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στη χρήση του GA για την επιλογή των χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία θα λειτουργεί κάθε BMS, καθώς και του αλγορίθμου καθόδου κλίσης interior point για την επιλογή του ρεύματος σε κάθε χρονικό διάστημα. Η προτεινόμενη μέθοδος αξιολογήθηκε μέσω προσομοίωσης σε περιβάλλον Simulink. Η μείωση των ενεργειακών απωλειών που επιτυγχάνεται με την προσθήκη του GA σε σχέση με τη χρήση μόνο του interior point είναι στο εύρος 3,92 % έως 14,07 %.

Έχοντας μελετήσει το ζήτημα της εξισορρόπησης μεμονωμένων συσσωρευτών με BMS που λειτουργούν προσφέροντας αμφίδρομη ροή ενέργειας M2C, τίθεται ως επόμενος στόχος η εξισορρόπηση της τάσης μεταξύ ομάδων συσσωρευτών (Module-to-Module - M2M)). Για την επίτευξη του στόχου αυτού, προτείνεται η χρήση του αμφίδρομου μετατροπέα Quasi-resonant Flyback. Για τη λειτουργία του μετατροπέα αυτού απαιτούνται δύο ημιαγωγικά στοιχεία που παλμοδοτούνται στη διακοπτική συχνότητα και δύο ημιαγωγικά στοιχεία που λειτουργούν ως διακόπτες επιλογής φοράς ροής ενέργειας. Το κύριο ημιαγωγικό στοιχείο του μετατροπέα αυτού τίθεται σε αποκοπή υπό μηδενικό ρεύμα, αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο τις αρνητικές επιδράσεις της σκέδασης του μετασχηματιστή στη λειτουργία του μετατροπέα. Το πρωτότυπο που κατασκευάστηκε λειτουργεί προσφέροντας μέγιστη ισχύ εξόδου 160 W για ρεύμα εξισορρόπησης 5 A και τάση 32 V (8 συσσωρευτές συνδεδεμένοι σε σειρά).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διερευνώνται επίσης μέθοδοι διαχείρισης της ενέργειας των συσσωρευτών ηλεκτρικών οχημάτων σε υψηλό επίπεδο, αφενός μεν με σκοπό το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθμό φόρτισης, αφετέρου δε, την υποβοήθηση των οδηγών κατά την επιλογή σταθμού φόρτισης. Σχετικά με το σταθμό φόρτισης, θεωρείται ότι αποτελείται από δύο τύπους φορτιστών που προσφέρουν κανονική και γρήγορη φόρτιση αντίστοιχα. Επιπλέον, θεωρείται ότι ο κάθε φορτιστής δύναται να συνδεθεί σε πάνω από μία θέση στάθμευσης, σύμφωνα με τη φιλοσοφία του διαμοιρασμού πόρων. Με αυτό τον τρόπο, αποσυνδέεται η στάθμευση του οχήματος από τη φόρτιση αυτού, με αποτέλεσμα να μη δεσμεύει πόρους ένα όχημα που βρίσκεται σταθμευμένο αλλά δεν φορτίζει.

Για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης, επιδιώκεται η μέγιστη αξιοποίηση των πόρων του σταθμού, καθώς και η ικανοποίηση κριτηρίων που αφορούν τους οδηγούς, όπως είναι το κόστος και ο χρόνος φόρτισης, καθώς και η μείωση της φθοράς των συσσωρευτών ανάλογα με την τιμή του ρεύματος φόρτισης που επιλέγεται. Η επιλογή του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας, μέσω προσομοίωσης, τον GA με τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO), για μεγάλο αριθμό σεναρίων φόρτισης. Η επιλογή των λειτουργικών παραμέτρων για τους δύο αλγορίθμους πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μέθοδο σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi, που περιγράφεται στη θεωρία του σθεναρού σχεδιασμού. Διαπιστώθηκε ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα, ο PSO οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνοντας εξίσου μικρό χρόνο εκτέλεσης με τον GA.

Η υποστήριξη των οδηγών των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου Analytic Hierarchy Process (AHP), ενώ το πρότυπο επικοινωνίας που επιλέγεται είναι το Open Platforms Communications – Unified Architecture (OPC-UA).

7.2 Συμβολή της διατριβής

Η συμβολή της διατριβής στον τομέα της διαχείρισης ενέργειας συσσωρευτών, καθώς και στο αντικείμενο χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων συνοψίζεται στα εξής σημεία:

1. Ανάλυση του αμφίδρομου μετατροπέα Flyback για τη χρήση του ως BMS, λαμβάνοντας υπόψη τις μη ιδανικότητες των στοιχείων που τον απαρτίζουν, ώστε να εκτιμηθεί με ακρίβεια το σημείο λειτουργίας του, καθώς και οι ενεργειακές του απώλειες. Η ανάλυση αυτή εισάγεται με τη μορφή μαθηματικού μοντέλου κατά την εκτέλεση γενετικού αλγορίθμου, με

σκοπό την επιλογή των σχεδιαστικών παραμέτρων του μετατροπέα για την επίτευξη του μέγιστου δυνατού βαθμού απόδοσης κατά την εξισορρόπηση με υψηλό ρεύμα.

2. Πρόταση μεθόδου χρονοπρογραμματισμού εξισορρόπησης στάθμης φόρτισης συσσωρευτών, προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των ενεργειακών απωλειών που σχετίζονται με την εξισορρόπηση.
3. Ανάλυση του αμφίδρομου μετατροπέα Quasi-resonant Flyback, ώστε να εξαχθούν οι εξισώσεις για τον υπολογισμό των μεγεθών που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του, καθώς και πλήρης ανάλυση ενεργειακών απωλειών. Η ανάλυση αυτή αξιοποιείται κατά την εκτέλεση γενετικού αλγορίθμου βέλτιστης επιλογής των σχεδιαστικών παραμέτρων του μετατροπέα, με σκοπό την επίτευξη του μέγιστου δυνατού βαθμού απόδοσης για τις εκάστοτε προδιαγραφές.
4. Πρόταση μεθόδου χρονοπρογραμματισμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθμό φόρτισης που αποτελείται από δύο τύπους φορτιστών οι οποίοι διαμοιράζονται μεταξύ των θέσεων στάθμευσης. Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση μετα-ευρετικού αλγορίθμου, με αποτέλεσμα να αποσυνδέεται η μαθηματική μοντελοποίηση των κριτηρίων που εξετάζονται, από το μηχανισμό διερεύνησης του χώρου λύσεων. Οι παράμετροι λειτουργίας του μετα-ευρετικού αλγορίθμου επιλέγονται με χρήση της μεθόδου σχεδιασμού πειραμάτων Taguchi.
5. Έπειτα από την αποδοχή της Analytic Hierarchy Process (AHP) ως μέθοδο υποβοήθησης λήψης αποφάσεων για εφαρμογές σε βιομηχανικά συστήματα παραγωγής, η μέθοδος προτείνεται προς χρήση για την υποστήριξη των οδηγιών των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Siemens AG, “Prepare for the unexpected – creating smart grids to meet current and future challenges,” Whitepaper, 2021.
- [2] International Energy Agency, “Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility,” OECD Publishing, Paris, 2019.
- [3] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti and M. -Y. Chow, “Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles,” in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 4-16, June 2013.
- [4] Amsterdam round Table and McKinsey & Company, “Electric vehicles in Europe: Gearing up for a New Phase?,” Report, 2014. Available online: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/Europe/electric-vehicles-in-Europe-gearing-up-for-a-new-phase> (accessed on 3 March 2022).
- [5] N. Chawla, N. Bharti, and S. Singh, “Recent Advances in Non-Flammable Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries,” in *Batteries*, vol. 5, no. 1, p. 19, Feb. 2019.
- [6] X. Song, F. Yang, D. Wang and K. -L. Tsui, “Combined CNN-LSTM Network for State-of-Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries,” in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 88894-88902, 2019.
- [7] R. Xiong, J. Cao, Q. Yu, H. He and F. Sun, “Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles,” in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1832-1843, 2018.
- [8] Z. Zhang, H. Gui, D. -J. Gu, Y. Yang and X. Ren, “A Hierarchical Active Balancing Architecture for Lithium-Ion Batteries,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 4, pp. 2757-2768, April 2017.
- [9] J. Cao, N. Schofield and A. Emadi, “Battery balancing methods: A comprehensive review,” *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Harbin, China, 2008, pp. 1-6.
- [10] M. Koseoglou, E. Tsioumas, N. Jabbour and C. Mademlis, “Highly Effective Cell Equalization in a Lithium-Ion Battery Management System,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 2, pp. 2088-2099, Feb. 2020.
- [11] H. Xiong, D. Song, F. Shi, Y. Wei, and L. Jinzhen, “Novel voltage equalisation circuit of the lithium battery pack based on bidirectional flyback converter,” in *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 11, pp. 2194–2200, Jun. 2020.
- [12] X. Qi, Y. Wang, Y. Wang and Z. Chen, “Optimization of Centralized Equalization Systems Based on an Integrated Cascade Bidirectional DC–DC Converter,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 1, pp. 249-259, Jan. 2022.

- [13] A. Rachid, H. E. Fadil and F. Giri, “Dual stage CC-CV charge method for controlling DC-DC power converter in BEV charger,” 2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Marrakech, Morocco, 2018, pp. 74-79.
- [14] ZVEI-German Electrical and Electronic Manufacturers’ Association, “Voltage Classes for Electric Mobility,” Report, 2014. Available online: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2014/april/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility.pdf (accessed on 3 March 2022).
- [15] M. Spöttle, K. Jörling, M. Schimmel, M. Staats, L. Grizzel, L. Jerram, W. Drier and J. Gartner, “Research for TRAN Committee – Charging infrastructure for electric road vehicles,” European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels, 2018.
- [16] S. S. Ravi and M. Aziz, “Utilization of Electric Vehicles for Vehicle-to-Grid Services: Progress and Perspectives,” in *Energies*, vol. 15, no. 2, p. 589, Jan. 2022.
- [17] T. H. Phung, A. Collet and J. -C. Crebier, “An Optimized Topology for Next-to-Next Balancing of Series-Connected Lithium-ion Cells,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 9, pp. 4603-4613, Sept. 2014.
- [18] M. -Y. Kim, J. -H. Kim and G. -W. Moon, “Center-Cell Concentration Structure of a Cell-to-Cell Balancing Circuit With a Reduced Number of Switches,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 10, pp. 5285-5297, Oct. 2014.
- [19] M. Lelie et al., “Battery Management System Hardware Concepts: An Overview,” in *Applied Sciences*, vol. 8, no. 4, p. 534, Mar. 2018.
- [20] S. Lee, M. Kim, J. W. Baek, D.-W. Kang, and J. Jung, “Enhanced Switching Pattern to Improve Cell Balancing Performance in Active Cell Balancing Circuit Using Multi-Winding Transformer,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 149544–149554, 2020.
- [21] Y. Shang, N. Cui, and C. Zhang, “An Optimized Any-Cell-to-Any-Cell Equalizer Based on Coupled Half-Bridge Converters for Series-Connected Battery Strings,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 9, pp. 8831–8841, Sep. 2019.
- [22] K.-M. Lee, S.-W. Lee, Y.-G. Choi, and B. Kang, “Active Balancing of Li-Ion Battery Cells Using Transformer as Energy Carrier,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 1251–1257, Feb. 2017.
- [23] Y. Chen, X. Liu, Y. Cui, J. Zou, and S. Yang, “A Multi-winding Transformer Cell-to-Cell Active Equalization Method for Lithium-Ion Batteries with Reduced Number of Driving Circuits,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1–1, 2015.

- [24] X. Qi, Y. Wang, and M. Fang, “An Integrated Cascade Structure-Based Isolated Bidirectional DC–DC Converter for Battery Charge Equalization,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 11, pp. 12003–12021, Nov. 2020.
- [25] Y.-D. Yang, K.-Y. Hu, and C.-H. Tsai, “Digital Battery Management Design for Point-of-Load Applications With Cell Balancing,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 6365–6375, Aug. 2020.
- [26] V. Gautam and P. Sensarma, “Enhancing the Voltage Gain of a Flyback Converter Using Leakage Energy,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 4717–4727, Sep. 2018.
- [27] L. Xue and J. Zhang, “Highly Efficient Secondary-Resonant Active Clamp Flyback Converter,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1235–1243, Feb. 2018.
- [28] W.-C. Wu, T.-J. Liang, K.-H. Chen, and C.-Y. Li, “Quasi-resonant flyback converter with new valley voltage detection mechanism,” 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Mar. 2018.
- [29] H. Dong, X. Xie, and L. Zhang, “A New CCM/DCM Hybrid-Mode Synchronous Rectification Flyback Converter,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 5, pp. 3629–3639, May 2020.
- [30] N. M. Mukhtar and D. D.-C. Lu, “A Bidirectional Two-Switch Flyback Converter With Cross-Coupled LCD Snubbers for Minimizing Circulating Current,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 8, pp. 5948–5957, Aug. 2019.
- [31] H. Tarzamni, E. Babaei and A. Z. Gharehkhoushan, “A Full Soft-Switching ZVZCS Flyback Converter Using an Active Auxiliary Cell,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 1123–1129, Feb. 2017.
- [32] H. S.-H. Chung, Wai-Leung Cheung and K. S. Tang, “A ZCS bidirectional flyback DC/DC converter,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 6, pp. 1426–1434, Nov. 2004.
- [33] C. Wang, S. Xu, W. Shen, S. Lu, and W. Sun, “A Single-Switched High-Switching-Frequency Quasi-Resonant Flyback Converter,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 9, pp. 8775–8786, Sep. 2019.
- [34] S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, “An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 4633–4658, April 2021.
- [35] E. Coulinge, S. Pittet and D. Dujic, “Design Optimization of Two-Quadrant High-Current Low-Voltage Power Supply,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 11, pp. 11602–11611, Nov. 2020.
- [36] J. Hu, B. Wen, R. Burgos and Y. Kang, “Design of a Wide-Input-Voltage PCB-Embedded Transformer Based Active-Clamp Flyback Converter Considering Permeability Degradation,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 9, pp. 10355–10365, Sept. 2021.

- [37] E. L. Barrios, A. Ursúa, L. Marroyo and P. Sanchis, “Analytical Design Methodology for Litz-Wired High-Frequency Power Transformers,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2103-2113, April 2015.
- [38] S. H. Kang, D. Maksimović and I. Cohen, “Efficiency Optimization in Digitally Controlled Flyback DC–DC Converters Over Wide Ranges of Operating Conditions,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 8, pp. 3734-3748, Aug. 2012.
- [39] T. Weise, “Global Optimization Algorithms - Theory and Application,” Self-Published, Second edition, 2009. Available online: <http://www.it-weise.de/> (accessed on 29-03-2022).
- [40] Y. Ma, F. -I. Chou, P. -Y. Yang, J. -T. Tsai, Z. -Y. Yang and J. -H. Chou, “Optimal Parameter Design by NSGA-II and Taguchi Method for RCD Snubber Circuit,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 182146-182158, 2020.
- [41] H. Wang, S. Dusmez and A. Khaligh, “Design and Analysis of a Full-Bridge LLC-Based PEV Charger Optimized for Wide Battery Voltage Range,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 4, pp. 1603-1613, May 2014.
- [42] S. Zou, J. Lu, A. Mallik and A. Khaligh, “Modeling and Optimization of an Integrated Transformer for Electric Vehicle On-Board Charger Applications,” in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 2, pp. 355-363, June 2018.
- [43] A. Garcia-Bediaga, I. Villar, A. Rujas, L. Mir and A. Rufer, “Multiobjective Optimization of Medium-Frequency Transformers for Isolated Soft-Switching Converters Using a Genetic Algorithm,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 4, pp. 2995-3006, April 2017.
- [44] A. Stratta et al., “Optimal Integrated Design of a Magnetically Coupled Interleaved H-Bridge,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 1, pp. 724-737, Jan. 2022.
- [45] Y. Shang, N. Cui, B. Duan and C. Zhang, “Analysis and Optimization of Star-Structured Switched-Capacitor Equalizers for Series-Connected Battery Strings,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 11, pp. 9631-9646, Nov. 2018.
- [46] S. Narayanaswamy, S. Steinhorst, M. Lukasiewicz, M. Kauer and S. Chakraborty, “Optimal Dimensioning and Control of Active Cell Balancing Architectures,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 10, pp. 9632-9646, Oct. 2019.
- [47] C. Pinto, J. V. Barreras, E. Schaltz and R. E. Araújo, “Evaluation of Advanced Control for Li-ion Battery Balancing Systems Using Convex Optimization,” in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1703-1717, Oct. 2016.
- [48] Q. Ouyang, J. Chen, J. Zheng and H. Fang, “Optimal Multiobjective Charging for Lithium-Ion Battery Packs: A Hierarchical Control Approach,” in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 9, pp. 4243-4253, Sept. 2018.

- [49] Q. Ouyang, W. Han, C. Zou, G. Xu and Z. Wang, “Cell Balancing Control For Lithium-Ion Battery Packs: A Hierarchical Optimal Approach,” in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 8, pp. 5065-5075, Aug. 2020.
- [50] Till Gnann, Patrick Plötz & Martin Wietschel, “How to address the chicken-egg-problem of electric vehicles? Introducing an interaction market diffusion model for EVs and charging infrastructure,” Conference: Eceee Summer Study 2015, At: Hyères, France June 2015.
- [51] J. C. Mukherjee and A. Gupta, “A Review of Charge Scheduling of Electric Vehicles in Smart Grid,” in *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 1541-1553, Dec. 2015.
- [52] O. Sassi and A. Oulamara, “Electric vehicle scheduling and optimal charging problem: complexity, exact and heuristic approaches,” in *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 2, pp. 519–535, Jun. 2016.
- [53] J. Wang, G. R. Bharati, S. Paudyal, O. Ceylan, B. P. Bhattarai and K. S. Myers, “Coordinated Electric Vehicle Charging With Reactive Power Support to Distribution Grids,” in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 54-63, Jan. 2019.
- [54] S. Wang, Z. Y. Dong, F. Luo, K. Meng and Y. Zhang, “Stochastic Collaborative Planning of Electric Vehicle Charging Stations and Power Distribution System,” in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 1, pp. 321-331, Jan. 2018.
- [55] H. -M. Chung, W. -T. Li, C. Yuen, C. -K. Wen and N. Crespi, “Electric Vehicle Charge Scheduling Mechanism to Maximize Cost Efficiency and User Convenience,” in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3020-3030, May 2019.
- [56] B. Hashemi, M. Shahabi and P. Teimourzadeh-Baboli, “Stochastic-Based Optimal Charging Strategy for Plug-In Electric Vehicles Aggregator Under Incentive and Regulatory Policies of DSO,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3234-3245, April 2019.
- [57] L. Wang, S. Sharkh, A. Chipperfield and A. Cruden, “Dispatch of Vehicle-to-Grid Battery Storage Using an Analytic Hierarchy Process,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 4, pp. 2952-2965, April 2017.
- [58] X. Chen, K. -C. Leung, A. Y. S. Lam and D. J. Hill, “Online Scheduling for Hierarchical Vehicle-to-Grid System: Design, Formulation, and Algorithm,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1302-1317, Feb. 2019.
- [59] D. Wang, X. Guan, J. Wu, P. Li, P. Zan and H. Xu, “Integrated Energy Exchange Scheduling for Multimicrogrid System With Electric Vehicles,” in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 4, pp. 1762-1774, July 2016.

- [60] T. Mao, W. -h. Lau, C. Shum, H. S. -H. Chung, K. -F. Tsang and N. C. -F. Tse, “A Regulation Policy of EV Discharging Price for Demand Scheduling,” in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 1275-1288, March 2018.
- [61] C. -C. Lin, D. -J. Deng, C. -C. Kuo and Y. -L. Liang, “Optimal Charging Control of Energy Storage and Electric Vehicle of an Individual in the Internet of Energy With Energy Trading,” in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 6, pp. 2570-2578.
- [62] S. Li, J. Li, C. Su and Q. Yang, “Optimization of Bi-Directional V2G Behavior With Active Battery Anti-Aging Scheduling,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 11186-11196, 2020.
- [63] M. E. Kabir, C. Assi, M. H. K. Tushar and J. Yan, “Optimal Scheduling of EV Charging at a Solar Power-Based Charging Station,” in *IEEE Systems Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 4221-4231, Sept. 2020.
- [64] R. F. Atallah, C. M. Assi, W. Fawaz, M. H. K. Tushar and M. J. Khabbaz, “Optimal Supercharge Scheduling of Electric Vehicles: Centralized Versus Decentralized Methods,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 7896-7909, Sept. 2018.
- [65] H. Zhang, Z. Hu, Z. Xu and Y. Song, “Optimal Planning of PEV Charging Station With Single Output Multiple Cables Charging Spots,” in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2119-2128, Sept. 2017.
- [66] S. Wang, S. Bi, Y. -J. A. Zhang and J. Huang, “Electrical Vehicle Charging Station Profit Maximization: Admission, Pricing, and Online Scheduling,” in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1722-1731, Oct. 2018.
- [67] H. Wu, G. K. H. Pang, K. L. Choy and H. Y. Lam, “An Optimization Model for Electric Vehicle Battery Charging at a Battery Swapping Station,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 881-895, Feb. 2018.
- [68] Y. Wang, Z. Su, Q. Xu, T. Yang and N. Zhang, “A Novel Charging Scheme for Electric Vehicles With Smart Communities in Vehicular Networks,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 9, pp. 8487-8501, Sept. 2019.
- [69] Y. Cao, T. Wang, O. Kaiwartya, G. Min, N. Ahmad and A. H. Abdullah, “An EV Charging Management System Concerning Drivers’ Trip Duration and Mobility Uncertainty,” in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 48, no. 4, pp. 596-607, April 2018.
- [70] Z. Su, Y. Wang, Q. Xu, M. Fei, Y. -C. Tian and N. Zhang, “A Secure Charging Scheme for Electric Vehicles With Smart Communities in Energy Blockchain,” in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 4601-4613, June 2019.
- [71] S. Howell, Y. Rezgui, J.-L. Hippolyte, B. Jayan, and H. Li, “Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources,” in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 193–214, Sep. 2017.

- [72] S. Rohjans, D. Fensel and A. Fensel, “OPC UA goes semantics: Integrated communications in smart grids,” ETFA2011, Toulouse, France, 2011, pp. 1-4.
- [73] M. H. Cintuglu and O. A. Mohammed, “Multiagent-based decentralized operation of microgrids considering data interoperability,” 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Miami, FL, USA, 2015, pp. 404-409.
- [74] M. -J. Yoo, P. Kolyvakis, D. Kiritsis, D. Werthmann and R. Hellbach, “Semantic Model for IoT-Enabled Electric Vehicle Services: Puzzling with Ontologies,” 2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud), Vienna, Austria, 2016, pp. 387-392.
- [75] S. M. S. Hussain, T. S. Ustun, P. Nsonga and I. Ali, “IEEE 1609 WAVE and IEC 61850 Standard Communication Based Integrated EV Charging Management in Smart Grids,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 8, pp. 7690-7697, Aug. 2018.
- [76] N. T. Milas, E. C. Tatakis and E. D. Mitronikas, “Investigation of the operation of an electric city car equipped with electronic differential using CAN-enabled monitoring,” 2017 Panhellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET), Xanthi, 2017, pp. 1-4.
- [77] Ν. Μήλας, “Βελτιστοποίηση λειτουργίας ηλεκτρονικού διαφορικού για μικρό ηλεκτροκίνητο όχημα,” Διπλωματική εργασία 380, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2014.
- [78] Δ. Γ. Βιδιαδάκης και Ν. Β. Τσιάρα, “Μελέτη και κατασκευή οχήματος πόλης με διαφορικό ηλεκτροκινητήριο σύστημα”, Διπλωματική εργασία 348, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2012.
- [79] M. M. U. Rehman, F. Zhang, M. Evzelman, R. Zane and D. Maksimovic, “Control of a series-input, parallel-output cell balancing system for electric vehicle battery packs,” 2015 IEEE 16th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2015, pp. 1-7.
- [80] S. Howell, Y. Rezgui, J.-L. Hippolyte, B. Jayan, and H. Li, “Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources,” in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 193–214, Sep. 2017.
- [81] Α. Νανάκος, “Βέλτιστος σχεδιασμός του αντιστροφέα ρεύματος flyback για εφαρμογή του σε φωτοβολταϊκά πλαίσια εναλλασσόμενου ρεύματος,” Διδακτορική Διατριβή 297, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012.
- [82] Γ. Χρηστίδης, “Βέλτιστος Σχεδιασμός Μικρο-αντιστροφέα Τύπου Flyback για τη Σύνδεση Φωτοβολταϊκού Πλαισίου με το Δίκτυο Χαμηλής Τάσης,” Διδακτορική Διατριβή 340, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2016.

- [83] TDK, Ferrites and accessories - SIFERRIT material N87, Datasheet, 2017. Available online: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/528882/71e02c7b9384de1331b3f625ce4b2123/pdf-n87.pdf> (accessed on 29-03-2022).
- [84] P. L. Dowell, “Effects of eddy currents in transformer windings,” *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 113, no. 8, pp. 1387–1394, 1966.
- [85] Γ. Δημητρακάκης, “Διερεύνηση των απωλειών μαγνητικών στοιχείων διαρρεόμενων από υψίσυχνα ρεύματα για εφαρμογές σε διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος,” Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
- [86] D. Graovac, “MOSFET Power Losses Calculation Using the Data- Sheet Parameters,” Application Note, Infineon.
- [87] C. Kim, M. Kim and G. Moon, “A Modularized Charge Equalizer Using a Battery Monitoring IC for Series-Connected Li-Ion Battery Strings in Electric Vehicles,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 8, pp. 3779-3787, Aug. 2013.
- [88] Y. Shang, B. Xia, C. Zhang, N. Cui, J. Yang and C. C. Mi, “An Automatic Equalizer Based on Forward–Flyback Converter for Series-Connected Battery Strings,” in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5380-5391, July 2017.
- [89] A. M. Imtiaz and F. H. Khan, ““Time Shared Flyback Converter” Based Regenerative Cell Balancing Technique for Series Connected Li-Ion Battery Strings,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 12, pp. 5960-5975, Dec. 2013.
- [90] M. Kim and S. Choi, “A fully soft-switched single switch isolated DC-DC converter,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 9, pp. 4883–4890, Oct. 2014.
- [91] A. Emrani, E. Adib, and H. Farzanehfard, “Single-switch soft-switched isolated DC–DC converter,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 4, pp. 1952–1957, Apr. 2012.
- [92] J. Li, F. B. M. vanHorck, H. J. Bergveld, and B. Daniel, “A high-switching- frequency flyback converter in resonant mode,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8582–8592, Nov. 2017.
- [93] X. Ma, P. Wang, H. Bi and Z. Wang, “A Bidirectional LLCL Resonant DC-DC Converter With Reduced Resonant Tank Currents and Reduced Voltage Stress of the Resonant Capacitor,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 125549-125564, 2020.
- [94] Z. Wei, H. Wang, Y. Lu, D. Shu, G. Ning and M. Fu, “Bidirectional Constant Current String-to-Cell Battery Equalizer Based on L2C3 Resonant Topology,” in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 38, no. 1, pp. 666-677, Jan. 2023.

- [95] R.-H. Cheng, C. Xu, and T.-K. Wu, “A Genetic Approach to Solve the Emergent Charging Scheduling Problem Using Multiple Charging Vehicles for Wireless Rechargeable Sensor Networks,” in *Energies*, vol. 12, no. 2, p. 287, Jan. 2019.
- [96] D. Liu, Y. Wang, and Y. Shen, “Electric Vehicle Charging and Discharging Coordination on Distribution Network Using Multi-Objective Particle Swarm Optimization and Fuzzy Decision Making,” in *Energies*, vol. 9, no. 3, p. 186, Mar. 2016.
- [97] D. Mourtzis, M. Doukas, and F. Psarommatis, “Design of manufacturing networks for mass customisation using an intelligent search method,” in *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 7, pp. 679–700, 2014.
- [98] M.S. Phadke, “Quality Engineering Using Robust Design”, (1st. ed.). Prentice Hall PTR, USA, 1995.
- [99] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Ratto, “Sensitivity Analysis in Practice,” Halsted Press, USA, 2002.
- [100] MATLAB documentation. Global Optimization Toolbox. Available online: https://uk.mathworks.com/help/gads/index.html?s_tid=CRUX_lftnav (accessed on 29-03-2022).
- [101] D. Wang, D. Tan, L. Liu, “Particle swarm optimization algorithm: an overview,” in *Soft Computing*, vol. 22, no 2, pp. 387–408, 2018.
- [102] R. C. Eberhart and Y. Shi, “Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization,” Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation. CEC00, 2000.
- [103] A. Emrouznejad and M. Marra, “The state of the art development of AHP (1979–2017): a literature review with a social network analysis,” in *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 22, pp. 6653–6675, Jun. 2017.
- [104] D. Mourtzis, E. Vlachou, N. Milas, N. Tapoglou, and J. Mehnen, “A cloud-based, knowledge-enriched framework for increasing machining efficiency based on machine tool monitoring,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 233, no. 1, pp. 278–292, Jul. 2017.
- [105] E. Triantaphyllou, S.H. Mann, “Using the analytic Hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges,” in *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, vol. 2, no. 1, pp. 35–44, 1995.
- [106] Statistics Norway. Electric Prices. Website, Available online: <https://www.ssb.no/en/elkraftpris> (accessed on 21 September 2020).
- [107] PlugShare. Website. Available online: <https://www.plugshare.com/> (accessed on 21 September 2020).
- [108] S. Cavalieri, M. G. Salafia, and M. S. Scroppo, “Integrating OPC UA with web technologies to enhance interoperability,” in *Computer Standards & Interfaces*, vol. 61, pp. 45–64, Jan. 2019.

Βιβλιογραφία

- [109] Eclipse Milo. An open source implementation of OPC UA (IEC 62541). Github Repository. Available online: <https://github.com/eclipse/milo> (accessed on 04 April 2023).
- [110] OPC UA Demo Client, Softing, Website, Available online: <https://data-intelligence.softing.com/products/opc-software-platform/opc-ua-demo-client/> ((accessed on 04 April 2023).

Πίνακας Συμβολισμών

Κεφάλαιο 3

a, b, k	Οι συντελεστές της αρχικής εξίσωσης του Steinmetz.
A_e	Η ενεργός διατομή του πυρήνα (m^2).
A_w	Συνολική επιφάνεια του παραθύρου μετασχηματιστή (m^2).
B	Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής (T).
B_{max}	Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής (T).
C_{High}, C_{Low}	Οι χωρητικότητες των φίλτρων στις πλευρές υψηλής και χαμηλής τάσης του μετατροπέα αντίστοιχα.
D_{High}, D_{Low}	Οι δίοδοι περιορισμού υπερτάσεων στις πλευρές υψηλής και χαμηλής τάσης του μετατροπέα αντίστοιχα.
ESR_{CHigh}, ESR_{CLow}	Ισοδύναμες εν σειρά αντιστάσεις (Equivalent Series Resistances – ESRs) των πυκνωτών των φίλτρων στις πλευρές υψηλής και χαμηλής τάσης του μετατροπέα αντίστοιχα (Ω).
$efficiency_{module-to-cell}$, $efficiency_{cell-to-module}$	Η απόδοση του μετατροπέα για κάθε μία από τις δύο κατευθύνσεις ροής ενέργειας (M2C και C2M).
$efficiency_w$	Η σταθμισμένη απόδοση του μετατροπέα για τις δύο κατευθύνσεις ροής ενέργειας.
f	Η ημιτονοειδής διέγερση που εφαρμόζεται για τη μέτρηση των απωλειών πυρήνα σε μαγνητικό υλικό (Hz).
f_{sw}	Η διακοπτική συχνότητα (Hz).
i_{A1}, i_{B1}	Τα βρογχικά ρεύματα για το πρώτο διάστημα αγωγής (A).
i_{A2}, i_{B2}, i_{C2}	Τα βρογχικά ρεύματα για το δεύτερο διάστημα αγωγής (A).
i_{B3}, i_{C3}	Τα βρογχικά ρεύματα για το τρίτο διάστημα αγωγής (A).
I_{Cell}	Το ρεύμα του μετατροπέα στην πλευρά του κελιού (Πλευρά χαμηλής τάσης) (A).
I_{Eq}	Το ρεύμα εξισορρόπησης (A).
$I_{High,DC}, I_{Low,DC}$	Μέσες τιμές ρευμάτων στα τυλίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή αντίστοιχα (A).
$I_{High,RMS}, I_{Low,RMS}$	Οι ενεργές τιμές των ρευμάτων στις πλευρές υψηλής και χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή αντίστοιχα (A).

Πίνακας Συμβολισμών

$I_{High,RMS,AC}, I_{Low,RMS,AC}$	Ενεργές τιμές εναλλασσόμενης συνιστώσας ρευμάτων στα τυλίγματα υψηλής και χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή αντίστοιχα (A).
I_{Hmax}	Η μέγιστη τιμή του ρεύματος του ημιαγωγικού στοιχείου της πλευράς υψηλής τάσης (κύριο ημιαγωγικό στοιχείο) (A).
I_i	Η μέση τιμή του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα (A).
i_{Lm}	Το ρεύμα μαγνήτισης του μετασχηματιστή (A).
I_{Lm1}	Η τιμή του ρεύματος μαγνήτισης μετά το πέρας του πρώτου διαστήματος αγωγής (A).
I_{Lm2}	Η τιμή του ρεύματος μαγνήτισης μετά το πέρας του δεύτερου διαστήματος αγωγής (A).
I_{Module}	Το ρεύμα του μετατροπέα στην πλευρά της ομάδας (Πλευρά υψηλής τάσης) (A).
I_o	Η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα (A).
k_f	Ο συντελεστής της βελτιωμένης γενικευμένης εξίσωσης του Steinmetz (Improved Generalised Steinmetz Equation – iGSE).
$L_{F,High}, L_{F,Low}$	Οι επαγωγές των φίλτρων στις πλευρές υψηλής και χαμηλής τάσης του μετατροπέα αντίστοιχα.
L_l	Η σκέδαση του μετασχηματιστή συγκεντρωμένη στο πρωτεύον (H).
L_m	Η επαγωγή μαγνήτισης του μετασχηματιστή (H).
n	Ο λόγος μετασχηματισμού.
N_{High}, N_{Low}	Ο αριθμός των σπειρών που αντιστοιχούν στην πλευρά της υψηλής και χαμηλής τάσης αντίστοιχα.
P_{Cu}	Απώλειες χαλκού μετασχηματιστή (W).
P_D	Απώλειες στη δίοδο περιορισμού υπερτάσεων (W).
P_{iGSE}	Οι απώλειες πυρήνα του μετασχηματιστή σύμφωνα με την iGSE (W).
P_{misc}	Λοιπές απώλειες (W).
P_{out}	Ισχύς εξόδου του μετατροπέα (W).
$P_{Q,cond,High}$	Απώλειες αγωγής στο ημιαγωγικό στοιχείο της πλευράς υψηλής τάσης (W).
$P_{Q,sw,High}$	Διακοπτικές απώλειες στο ημιαγωγικό στοιχείο της πλευράς υψηλής τάσης (W).
P_V	Απώλειες πυρήνα μετασχηματιστή ανά μονάδα όγκου (W).
Q_{High}, Q_{Low}	Οι ημιαγωγοί διακόπτες στις πλευρές υψηλής και χαμηλής τάσης του μετατροπέα αντίστοιχα.

Πίνακας Συμβολισμών

$R_{Cu,High}, R_{Cu,Low}$	Οι αντιστάσεις αγωγής των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή στις πλευρές υψηλής και χαμηλής τάσης του μετατροπέα αντίστοιχα (Ω).
$R_{Cu,High,AC}, R_{Cu,Low,AC}$	Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων του τυλίγματος της πλευράς υψηλής και χαμηλής τάσης αντίστοιχα για τη συνιστώσα εναλλασσόμενου ρεύματος (Ω).
$R_{Cu,High,DC}, R_{Cu,Low,DC}$	Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων του τυλίγματος της πλευράς υψηλής και χαμηλής τάσης αντίστοιχα για τη συνιστώσα σταθερού ρεύματος (Ω).
$R_{DSon,High}, R_{DSon,Low}$	Οι αντιστάσεις αγωγής των ημιαγωγικών διακοπών στις πλευρές υψηλής και χαμηλής τάσης του μετατροπέα αντίστοιχα (Ω).
R_m	Η ωμική αντίσταση που μοντελοποιεί τις απώλειες πυρήνα του μετασχηματιστή (Ω).
R_s	Η ισοδύναμη αντίσταση που μοντελοποιεί τις παρασιτικές αντιστάσεις του μετατροπέα (Ω).
R_{Si}, R_{So}	Οι αντιστάσεις των πηνίων των φίλτρων στις πλευρές υψηλής και χαμηλής τάσης του μετατροπέα αντίστοιχα (Ω).
s_1, s_1'	Οι ρίζες του χαρακτηριστικού πολωνύμου στο πεδίο Laplace για τα βρογχικά ρεύματα i_{A1}, i_{B1} .
S_{High}, S_{Low}	Το εμβαδό του αγωγού του τυλίγματος της πλευράς υψηλής και χαμηλής τάσης αντίστοιχα (m^2).
t_1, t_2, t_3, t_4	Οι χρονικές στιγμές που σηματοδοτούν το πέρας των διαστημάτων αγωγής 1, 2, 3 και 4 αντίστοιχα (s).
t_{21}, t_{32}, t_{43}	Οι χρονικές διάρκειες των διαστημάτων αγωγής 2, 3 4 αντίστοιχα (s).
t_{if}	Ο χρόνος καθόδου ρεύματος κατά τη σβέση ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου σύμφωνα με το φυλλάδιο του κατασκευαστή του ημιαγωγικού στοιχείου (s).
t_{vr}	Ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει η τάση στα άκρα του ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου στην τιμή της τάσης αποκοπής (s).
T_{sw}	Η διακοπτική περίοδος (s).
V_{Cell}	Η τάση του μετατροπέα στην πλευρά του κελιού (Πλευρά χαμηλής τάσης) (V).
$V_{D,High}$	Η τάση συγκράτησης της διόδου περιορισμού υπερτάσεων της πλευράς υψηλής τάσης του μετατροπέα (V).
V_e	Ο ενεργός όγκος του μαγνητικού υλικού του πυρήνα του μετασχηματιστή (m^3).
V_{Lm}	Η τάση στα άκρα της επαγωγής μαγνήτισης (V).

Πίνακας Συμβολισμών

$V_{Lm,j}$	Η τάση της επαγωγής μαγνήτισης κατά το διάστημα αγωγής j (V).
V_{Module}	Η τάση του μετατροπέα στην πλευρά της ομάδας (Πλευρά υψηλής τάσης) (V).
V_i	Η τάση εισόδου του μετατροπέα (V).
V_o	Η τάση εξόδου του μετατροπέα (V).
λ	Το ελάχιστο ποσοστό της διακοπτικής περιόδου που θα διαρκεί το τέταρτο διάστημα αγωγής.
ξ	Ο συντελεστής χρησιμοποίησης του παραθύρου του μετασχηματιστή.

Κεφάλαιο 4

Ah_{Min}, Ah_{Max}	Τα αποδεκτά όρια του φορτίου του συσσωρευτή σε Ah μετά το πέρας της εξισορρόπησης (Ah).
$CellAh_{i,j,0}$	Το ηλεκτρικό φορτίο του συσσωρευτή σε Ah κατά την εκκίνηση της εξισορρόπησης (Ah).
$CellAh_{i,j}$	Το ηλεκτρικό φορτίο του συσσωρευτή σε Ah μετά το πέρας της εξισορρόπησης (Ah).
$E_{Loss,total}$	Το σύνολο των ενεργειακών απωλειών μετά το πέρας της εξισορρόπησης (Ws).
$FlybackStatus_{i,j,k}$	Δυαδική μεταβλητή που λαμβάνει τις τιμές 1 και 0 αν ο μετατροπέας Flyback που είναι συνδεδεμένος στο κελί j της ομάδας i , για το χρονικό διάστημα εξισορρόπησης k είναι ενεργοποιημένος ή απενεργοποιημένος αντίστοιχα.
i	ο αριθμός της ομάδας.
$I_{Eq,i,j,k}$	Το ρεύμα εξισορρόπησης, για τον μετατροπέα Flyback που είναι συνδεδεμένος στο κελί j της ομάδας i , για το χρονικό διάστημα εξισορρόπησης k (A).
$I_{Module,i,j,k,M2C},$ $I_{Module,i,j,k,C2M}$	Το ρεύμα στην πλευρά της ομάδας, για τον μετατροπέα Flyback που είναι συνδεδεμένος στο κελί j της ομάδας i , για το χρονικό διάστημα εξισορρόπησης k , για λειτουργία M2C και C2M αντίστοιχα (A).
$I_{Stack,Avg}$	Το συνολικό μέσο ρεύμα της συστοιχίας (φόρτιση ή εκφόρτιση) κατά το χρονικό διάστημα που διαρκεί η εξισορρόπηση (A).
j	ο αριθμός του κελιού εντός της ομάδας.
J	Ο συνολικός αριθμός των κελιών στην κάθε ομάδα.
k	ο αριθμός του χρονικού διαστήματος.

Πίνακας Συμβολισμών

K	Ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων στα οποία διαιρείται ο χρόνος εξισορρόπησης.
$MaxFlCurrent$	Το μέγιστο ρεύμα εξισορρόπησης (A).
P_{Driver}	Οι απώλειες στο κύκλωμα παλμοδότησης (W).
$P_{Loss,i,j,M2C}, P_{Loss,i,j,C2M}$	Οι ενεργειακές απώλειες για τον μετατροπέα Flyback που είναι συνδεδεμένος στο κελί j της ομάδας i , για το χρονικό διάστημα εξισορρόπησης k , για λειτουργία M2C και C2M αντίστοιχα (W).
R_{Cell}	Η εν σειρά παρασιτική αντίσταση κάθε συσσωρευτή (Ω).
t	Ο συνολικός χρόνος εξισορρόπησης (s).
$V_{Cell,i,j}$	Η μέση τάση του κελιού κατά το χρονικό διάστημα της εξισορρόπησης (V).
$V_{Module,i}$	Η μέση τάση της ομάδας κατά το χρονικό διάστημα της εξισορρόπησης (V).

Κεφάλαιο 5

a, b, k	Οι συντελεστές της αρχικής εξίσωσης του Steinmetz.
A_e	Η ενεργός διατομή του πυρήνα του μετασχηματιστή (m^2).
$A_{e,Ls}$	Η ενεργός διατομή του πυρήνα του πηνίου ταλάντωσης (m^2).
C_1, C_2	Οι χωρητικότητες των φίλτρων στην Πλευρά 1 και Πλευρά 2 του μετατροπέα αντίστοιχα.
C_{r1}, C_{r2}	Οι πυκνωτές ταλάντωσης στην Πλευρά 1 και Πλευρά 2 του μετατροπέα αντίστοιχα (F).
D_1, D_2	Οι δίοδοι περιορισμού υπερτάσεων στην Πλευρά 1 και Πλευρά 2 του μετατροπέα αντίστοιχα.
$dutyCycle_{Q1}$	Ο λόγος κατάτμησης για τον παλμό στην πύλη του ημιαγωγικού στοιχείου Q_1 .
$efficiency$	Η απόδοση του μετατροπέα.
ESR_{C1}, ESR_{C2}	Ισοδύναμες εν σειρά αντιστάσεις (Equivalent Series Resistances – ESRs) των πυκνωτών των φίλτρων στην Πλευρά 1 και την Πλευρά 2 του μετατροπέα αντίστοιχα (Ω).
$f_{resonant}$	Η συχνότητα ταλάντωσης (Hz).
f_{sw}	Η διακοπτική συχνότητα (Hz).
I_1	Η μέση τιμή του ρεύματος στην Πλευρά 1 του μετατροπέα (A).
I_2	Η μέση τιμή του ρεύματος στην Πλευρά 2 του μετατροπέα (A).

Πίνακας Συμβολισμών

$I_{2,Max}, I_{2,Min}$	Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ρεύματος στο ημιαγωγικό στοιχείο Q_2 κατά το τέταρτο διάστημα αγωγής (A).
i_{A1}, i_{B1}	Τα βρογχικά ρεύματα για το πρώτο διάστημα αγωγής (A).
i_{A2}, i_{B2}	Τα βρογχικά ρεύματα για το δεύτερο διάστημα αγωγής (A).
i_{B3}	Το βρογχικό ρεύμα για το τρίτο διάστημα αγωγής (A).
i_{C4}	Το βρογχικό ρεύμα για το τέταρτο διάστημα αγωγής (A).
$I_{Cr1,RMS,AC}, I_{Cr2,RMS,AC}$	Ενεργές τιμές εναλλασσόμενης συνιστώσας ρευμάτων στους πυκνωτές ταλάντωσης Cr_1 και Cr_2 αντίστοιχα (A).
$I_{Cr'2,Max+}, I_{Cr'2,Max-}$	Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ρεύματος στον πυκνωτή ταλάντωσης Cr'_2 (A).
$I_{Lm,Max}, I_{Lm,Min}$	Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ρεύματος στην επαγωγή μαγνήτισης (A).
$I_{Q1,1}$	Η τιμή του ρεύματος στο ημιαγωγικό στοιχείο Q_1 μετά το πέρας του πρώτου διαστήματος αγωγής (A).
$I_{Q1,DC}, I_{Q2,DC}$	Μέσες τιμές ρευμάτων στα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία Q_1 και Q_2 αντίστοιχα (A).
$I_{Q1,RMS,AC}, I_{Q2,RMS,AC}$	Ενεργές τιμές εναλλασσόμενης συνιστώσας ρευμάτων στα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία Q_1 και Q_2 αντίστοιχα (A).
$I_{Q1,Max}, I_{Q1,Min}$	Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ρεύματος στο ημιαγωγικό στοιχείο Q_1 (A).
$I_{Q1,RMS}, I_{Q2,RMS}, I_{Q'2,RMS}$	Οι ενεργές τιμές των ρευμάτων των ημιαγωγικών στοιχείων Q_1, Q_2, Q'_2 αντίστοιχα (A).
k_f	Ο συντελεστής της βελτιωμένης γενικευμένης εξίσωσης του Steinmetz (Improved Generalised Steinmetz Equation – iGSE).
L_1, L_2	Οι συνολικές τιμές των επαγωγών στην Πλευρά 1 και Πλευρά 2 του μετατροπέα αντίστοιχα (H).
L_{F1}, L_{F2}	Οι επαγωγές των φίλτρων στην Πλευρά 1 και Πλευρά 2 του μετατροπέα αντίστοιχα.
L_{l1}, L_{l2}	Οι επαγωγές σκέδασης στην Πλευρά 1 και Πλευρά 2 του μετατροπέα αντίστοιχα (H).
L_m	Η επαγωγή μαγνήτισης (H).
L_s	Το πηνίο ταλάντωσης (H).
n	Ο λόγος μετασχηματισμού.
N_1	Ο αριθμός σπειρών του τυλίγματος του μετασχηματιστή στην Πλευρά 1.
$P_{Cu,LS,1 \rightarrow 2}, P_{Cu,LS,2 \rightarrow 1}$	Απώλειες χαλκού στο πηνίο ταλάντωσης για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 προς την Πλευρά 2 και τούμπαλιν (W).

Πίνακας Συμβολισμών

$P_{iGSE,LS,1\rightarrow 2}, P_{iGSE,LS,2\rightarrow 1}$	Απώλειες πυρήνα στο πηνίο ταλάντωσης για τις ροές ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2 και τούμπαλιν (W).
$P_{iGSE,Tr}$	Απώλειες πυρήνα στο μετασχηματιστή (W).
P_{misc}	Λοιπές απώλειες (W).
P_{out}	Η ισχύς εξόδου του μετατροπέα (W).
$P_{Q,cond,1\rightarrow 2}$	Το σύνολο των απωλειών αγωγής στα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία για τη ροή ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2 (W).
Q_1, Q_2	Παλμοδοτούμενα ημιαγωγικά στοιχεία της Πλευράς 1 και της Πλευράς 2 αντίστοιχα.
Q'_1, Q'_2	Δευτερεύοντα ημιαγωγικά στοιχεία της Πλευράς 1 και της Πλευράς 2 αντίστοιχα.
$R_{AC,LS}$	Η τιμή της ωμικής αντίστασης του πηνίου ταλάντωσης στη συχνότητα παλμοδότησης (Ω).
$R_{AC,Transf}$	Η τιμή της ωμικής αντίστασης κάθε τυλίγματος του μετασχηματιστή στη συχνότητα παλμοδότησης (Ω).
$R_{Cu,1,DC}, R_{Cu,2,DC}$	Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων του τυλίγματος του μετασχηματιστή της Πλευράς 1 και της Πλευράς 2 αντίστοιχα για τη συνιστώσα σταθερού ρεύματος (Ω).
$R_{Cu,1,AC}, R_{Cu,2,AC}$	Οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων του τυλίγματος του μετασχηματιστή της Πλευράς 1 και της Πλευράς 2 αντίστοιχα για τη συνιστώσα εναλλασσόμενου ρεύματος (Ω).
$R_{Cu,LS,DC}, R_{Cu,LS,AC}$	Η τιμή της ωμικής αντίστασης του πηνίου ταλάντωσης για τη συνιστώσα σταθερού και εναλλασσόμενου ρεύματος αντίστοιχα (Ω).
$R_{DSon,Q1}, R_{DSon,Q2}, R_{DSon,Q'2}$	Οι τιμές των αντιστάσεων αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων Q_1, Q_2, Q'_2 αντίστοιχα (Ω).
$R_{Lf,1}, R_{Lf,2}$	Οι ωμικές αντιστάσεις των επαγωγών των φίλτρων στην Πλευρά 1 και την Πλευρά 2 του μετατροπέα αντίστοιχα (Ω).
t_1, t_2, t_3, t_4	Οι χρονικές στιγμές που σηματοδοτούν το πέρας των διαστημάτων αγωγής 1, 2, 3 και 4 αντίστοιχα (s).
t_{21}, t_{32}, t_{43}	Οι χρονικές διάρκειες των διαστημάτων αγωγής 2, 3 4 αντίστοιχα (s).
$t_{Vcr2=0}$	Η χρονική στιγμή μηδενισμού της τάσης του πυκνωτή ταλάντωσης (s).
V_1	Η τάση στην Πλευρά 1 του μετατροπέα (V).
V_2	Η τάση στην Πλευρά 2 του μετατροπέα (V).

Πίνακας Συμβολισμών

$V'_{Cr2,t2}$	Η τάση στον πυκνωτή ταλάντωσης Cr'_2 κατά τη χρονική στιγμή t_2 (V).
$V'_{Cr2,Max}$	Η μέγιστη τάση στον πυκνωτή ταλάντωσης Cr'_2 (V).
V_e	Ο ενεργός όγκος του πυρήνα (V).
V_{Lm}	Η τάση στα άκρα της επαγωγής μαγνήτισης (V).
$V_{LS,1 \rightarrow 2}, V_{LS,2 \rightarrow 1}$	Η τάση στα άκρα του πηνίου ταλάντωσης για τις ροές ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2 και τούμπαλιν (V).
ΔB	Η διακύμανση της μαγνητικής επαγωγής στο μετασχηματιστή (T).
$\Delta B_{LS,1 \rightarrow 2}, \Delta B_{LS,2 \rightarrow 1}$	Η διακύμανση της μαγνητικής επαγωγής του πηνίου ταλάντωσης για τις ροές ενέργειας από την Πλευρά 1 στην Πλευρά 2 και τούμπαλιν (T).

Κεφάλαιο 6

Συμβολισμοί σχετικοί με το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης

c_1, c_2	Συντελεστές βαρύτητας για τη συνιστώσα της ταχύτητας που αφορά τη βέλτιστη θέση του σωματιδίου, καθώς και τη βέλτιστη θέση που προκύπτει από όλο το σμήνος του PSO αντίστοιχα.
$complTime$	Ακέραιος αριθμός που υποδηλώνει τον αριθμό των διακριτών διαστημάτων που αντιπροσωπεύουν το συνολικό χρόνο φόρτισης.
$complTime_{criterion}$	Η τιμή του κριτηρίου χρόνου φόρτισης με εύρος τιμών στο εύρος [0, 1].
$E_{i,j}$	Η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την τιμή x_j^* της παραμέτρου X_i . Η μέση τιμή λαμβάνεται θέτοντας την τιμή της X_i (π.χ. τον αριθμό των γενεών του GA) ίση με x_j^* (π.χ. 100 γενεών) και μεταβάλλοντας τις υπόλοιπες παραμέτρους (π.χ. πληθυσμός και συντελεστής διασταύρωσης) σε όλο το εύρος τους.
$f_{objective}$	Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.
$Gbest_t^d$	Βέλτιστη θέση που προκύπτει από όλο το σμήνος του PSO κατά το βήμα t .
I_{avg}	Το μέσο ρεύμα φόρτισης για το τρέχον σενάριο (A).
$I_{avg}_{criterion}$	Η τιμή του κριτηρίου που αναφέρεται στο μέσο ρεύμα φόρτισης στο εύρος [0, 1].
$I_{i,charging}$	Το ρεύμα φόρτισης κατά το i χρονικό διάστημα (A).
$I_{i,chargerRated}$	Το ονομαστικό ρεύμα του επιλεγμένου φορτιστή κατά το i χρονικό διάστημα (A).

Πίνακας Συμβολισμών

I_{max}	Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης για το τρέχον σενάριο (A).
$I_{max_{criterion}}$	Η τιμή του κριτηρίου που αναφέρεται στο μέγιστο ρεύμα φόρτισης στο εύρος $[0, 1]$.
$MaxBatCurrent$	Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή των συσσωρευτών (A).
$MaxChargerCurrent_i$	Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να προσφέρει ο φορτιστής που επιλέγεται κατά το i χρονικό διάστημα (A).
$normalisedPrice$	Το κόστος της φόρτισης κανονικοποιημένο στο εύρος $[0, 1]$. Η τιμή 1 υποδηλώνει φόρτιση με το μέγιστο κόστος καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης, ενώ η τιμή 0 υποδηλώνει φόρτιση με το ελάχιστο κόστος καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης.
$Pbest_{i,t}^d$	Βέλτιστη θέση κάθε σωματιδίου του PSO κατά το βήμα t .
$PrefCurrent$	Το προτιμώμενο ρεύμα φόρτισης σύμφωνα με τις ανάγκες των οδηγών (A).
$PrefTime$	Ακέραιος αριθμός που υποδηλώνει τον αριθμό των διακριτών διαστημάτων που αντιπροσωπεύουν τον επιθυμητό χρόνο φόρτισης.
$price_{criterion}$	Η τιμή του κριτηρίου κόστους φόρτισης με τιμές στο εύρος $[0, 1]$.
$PSO_{comparison}$	Η απόκλιση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει από τον PSO για κάθε σενάριο φόρτισης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της εξαντλητικής διερεύνησης.
$rand_1, rand_2$	Τυχαίες τιμές στο εύρος που απαιτούνται για τη λειτουργία του PSO $[0,1]$.
$result_{exhaustive}$	Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε εκτέλεση της εξαντλητικής διερεύνησης.
$result_{PSO}$	Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε εκτέλεση του PSO.
$timeslots$	Ακέραιος αριθμός που υποδηλώνει τον αριθμό των διακριτών διαστημάτων που αντιπροσωπεύουν το χρόνο φόρτισης. Τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το ΗΟ είναι σταθμευμένο, αλλά δεν φορτίζεται δεν συμπεριλαμβάνονται στο χρόνο αυτό.
$Tolerance$	Ακέραιος αριθμός που υποδηλώνει τον αριθμό των διακριτών διαστημάτων που αντιπροσωπεύουν τον χρόνο καθυστέρησης της φόρτισης.
$utilisation_{criterion}$	Η τιμή του κριτηρίου αξιοποίησης των πόρων του σταθμού στο εύρος $[0, 1]$.
$v_{i,t}^d$	Η ταχύτητα κάθε σωματιδίου του PSO κατά το βήμα t .
$v_{i,t+1}^d$	Η ταχύτητα κάθε σωματιδίου του PSO κατά το βήμα $t + 1$.
$V_{i,j}$	Η διακύμανση της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε τιμή της παραμέτρου X_i

Πίνακας Συμβολισμών

w	Συντελεστής βαρύτητας που εκφράζει την αδράνεια των σωματιδίων του PSO.
$w_{complTime}, w_{price}, w_{util}, w_{Iavg}, w_{Imax}$	Οι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο.
X	Το διάνυσμα των παραμέτρων προς διερεύνηση.
X_i	Η υπό αξιολόγηση παράμετρος (π.χ. ο αριθμός των γενεών του GA).
$x_{i,t}^d$	Θέση κάθε σωματιδίου κατά το βήμα t .
$x_{i,t+1}^d$	Θέση κάθε σωματιδίου κατά το βήμα $t + 1$.
x_j^*	Η τιμή της παραμέτρου X_i προς αξιολόγηση (π.χ. ο αριθμός των γενεών του GA ισούται με 100).
$Y = f(X)$	Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε διάνυσμα X .

Συμβολισμοί σχετικοί με την λειτουργία της AHP για την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης σύμφωνα με τις προτιμήσεις των οδηγών

$AvgCurrent_{criterion}$	Το κριτήριο που αναφέρεται στο μέσο ρεύμα φόρτισης.
$ChargeDuration$	Ο χρόνος φόρτισης για τον εκάστοτε ΣΦ.
$ComplTime_{criterion}$	Το κριτήριο που αναφέρεται στο χρόνο ολοκλήρωσης φόρτισης.
$EVAverageCurrent$	Το μέσο ρεύμα φόρτισης που προκύπτει σύμφωνα με την απαιτούμενη από τους οδηγούς ενέργεια φόρτισης και το χρόνο φόρτισης.
$MaxCurrent_{criterion}$	Το κριτήριο που αναφέρεται στο μέγιστο ρεύμα φόρτισης.
$PreferredChargeDuration$	Η προτίμηση των οδηγών για τη διάρκεια φόρτισης.
$Price_{criterion}$	Το κριτήριο που αναφέρεται στο κόστος φόρτισης.
$ReferencePrice$	Η τιμή αναφοράς για το κόστος φόρτισης ενδεικτικά μπορεί να προκύψει από τη μέση τιμή της ενέργειας στην περιοχή που θα πραγματοποιηθεί η φόρτιση.
$StationAverageCurrent$	Το μέσο ρεύμα φόρτισης που προσφέρεται από τον εκάστοτε ΣΦ.
$StationMaximumCurrent$	Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης που προκύπτει σύμφωνα με την απαιτούμενη από τους οδηγούς ενέργεια φόρτισης και το χρόνο φόρτισης.
$StationPrice$	Το κόστος φόρτισης για τον εκάστοτε ΣΦ.
$TravelTime$	Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση του ΗΟ στο ΣΦ.

Πίνακας Συμβολισμών

X'	Η κανονικοποιημένη τιμή του κριτηρίου.
X	Η τιμή του κριτηρίου όπως προκύπτει από τις (6.17)-(6.20).
X_{min}, X_{max}	Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του εκάστοτε κριτηρίου, όπως προκύπτει από τα προφίλ φόρτισης για κάθε σταθμό. Τα y_{max} και y_{min} λαμβάνουν την τιμή 9 και 1 αντίστοιχα, ώστε να πραγματοποιηθεί η κανονικοποίηση στο εύρος $[1,9]$.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Taguchi τριών παραμέτρων με δέκα επίπεδα έκαστη

Αριθμός πειράματος	Π1	Π2	Π3	Αριθμός πειράματος	Π1	Π2	Π3	Αριθμός πειράματος	Π1	Π2	Π3
1	-5	-5	-5	35	-1	-2	3	69	4	2	-1
2	-4	-5	-4	36	1	-2	4	70	5	2	1
3	-3	-5	-3	37	2	-2	5	71	-5	3	3
4	-2	-5	-2	38	3	-2	-5	72	-4	3	4
5	-1	-5	-1	39	4	-2	-4	73	-3	3	5
6	1	-5	1	40	5	-2	-3	74	-2	3	-5
7	2	-5	2	41	-5	-1	-1	75	-1	3	-4
8	3	-5	3	42	-4	-1	1	76	1	3	-3
9	4	-5	4	43	-3	-1	2	77	2	3	-2
10	5	-5	5	44	-2	-1	3	78	3	3	-1
11	-5	-4	-4	45	-1	-1	4	79	4	3	1
12	-4	-4	-3	46	1	-1	5	80	5	3	2
13	-3	-4	-2	47	2	-1	-5	81	-5	4	4
14	-2	-4	-1	48	3	-1	-4	82	-4	4	5
15	-1	-4	1	49	4	-1	-3	83	-3	4	-5
16	1	-4	2	50	5	-1	-2	84	-2	4	-4
17	2	-4	3	51	-5	1	1	85	-1	4	-3
18	3	-4	4	52	-4	1	2	86	1	4	-2
19	4	-4	5	53	-3	1	3	87	2	4	-1
20	5	-4	-5	54	-2	1	4	88	3	4	1
21	-5	-3	-3	55	-1	1	5	89	4	4	2
22	-4	-3	-2	56	1	1	-5	90	5	4	3
23	-3	-3	-1	57	2	1	-4	91	-5	5	5
24	-2	-3	1	58	3	1	-3	92	-4	5	-5
25	-1	-3	2	59	4	1	-2	93	-3	5	-4
26	1	-3	3	60	5	1	-1	94	-2	5	-3
27	2	-3	4	61	-5	2	2	95	-1	5	-2
28	3	-3	5	62	-4	2	3	96	1	5	-1
29	4	-3	-5	63	-3	2	4	97	2	5	1
30	5	-3	-4	64	-2	2	5	98	3	5	2
31	-5	-2	-2	65	-1	2	-5	99	4	5	3
32	-4	-2	-1	66	1	2	-4	100	5	5	4
33	-3	-2	1	67	2	2	-3				
34	-2	-2	2	68	3	2	-2				

Περίληψη

Το συνεχές ενδιαφέρον που σχετίζεται με το έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και τα ηλεκτρικά οχήματα έχει πυροδοτήσει εντατική έρευνα για νέες τεχνολογίες και πρακτικές αποδοτικής διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας. Δομικά στοιχεία των έξυπνων δικτύων και των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές. Συνεπώς, η εύρεση μεθόδων για την αποδοτική διαχείριση της ενέργειας των συσσωρευτών είναι ιδιαίτερης σημασίας.

Μέσα από την παρούσα Διδακτορική Διατριβή επιδιώκεται η πρόταση μεθόδων αποδοτικής διαχείρισης της ενέργειας ηλεκτρικών οχημάτων σε δύο βασικούς άξονες. Ο πρώτος άξονας αφορά την ανάπτυξη ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και αλγορίθμων με σκοπό τη διαχείριση της ενέργειας κάθε συσσωρευτή, ώστε να διασφαλιστεί ότι αυτός λειτουργεί κατά το βέλτιστο δυνατό τρόπο, εντός των προδιαγραφών που τίθενται από τον κατασκευαστή. Ο δεύτερος άξονας της διδακτορικής διατριβής αφορά τη διαχείριση της ενέργειας συσσωρευτών σε υψηλό επίπεδο, μέσα από την πρόταση αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού φόρτισης και υποβοήθησης λήψης αποφάσεων για την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των οδηγών.

Το ρόλο της διαχείρισης της ενέργειας των μεμονωμένων κελιών επιτελούν τα Συστήματα Διαχείρισης Συσσωρευτών (ΣΔΣ), που είναι ευρέως γνωστά με την αγγλική ορολογία Battery Management Systems (BMS). Τα BMS επιτελούν διττό ρόλο. Αφενός μεν επιτηρούν την κατάσταση των συσσωρευτών μέσω της συλλογής και επεξεργασίας μετρήσεων, αφετέρου δε, πραγματοποιούν εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισής τους, ώστε να αποφεύγονται καταστάσεις υπερφόρτισης και υποφόρτισης που μπορεί να οδηγήσουν σε ραγδαία φθορά του συσσωρευτή.

Στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή θεωρείται ότι η συστοιχία των συσσωρευτών χωρίζεται σε ομάδες των οκτώ συσσωρευτών. Συνεπώς, η εξισορρόπηση της ενέργειας πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα, εσωτερικά κάθε ομάδας και μεταξύ των ομάδων. Για την εξισορρόπηση της ενέργειας των συσσωρευτών εντός μιας ομάδας, ακολουθώντας την ροή ενέργειας από ομάδα σε κελί (Module-to-Cell), προτείνεται ο αμφίδρομος μετατροπέας Flyback. Για την εξισορρόπηση της ενέργειας μεταξύ των ομάδων συσσωρευτών, ακολουθώντας την ροή ενέργειας από ομάδα σε ομάδα (Module-to-Module), προτείνεται ο αμφίδρομος μετατροπέας Quasi-resonant Flyback.

Κατά την ανάλυση των υπό διερεύνηση τοπολογιών εξάγονται αναλυτικές εξισώσεις για όλα τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του κάθε μετατροπέα, λαμβάνοντας υπόψη τις μη ιδανικότητες των στοιχείων που τον απαρτίζουν, ώστε να εξαχθεί με ακρίβεια το σημείο λειτουργίας αυτού. Έπειτα, πραγματοποιείται μοντελοποίηση των απωλειών στα επιμέρους στοιχεία του μετατροπέα. Στη συνέχεια, εκτελείται μετα-ευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, πιο συγκεκριμένα ο Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm, GA), προκειμένου να εξαχθούν οι τιμές των στοιχείων του μετατροπέα που μεγιστοποιούν την απόδοση. Στο τελικό στάδιο, πραγματοποιείται η κατασκευή εργαστηριακών πρωτοτύπων των ηλεκτρονικών μετατροπέων και η πειραματική αξιολόγηση των θεωρητικών εκτιμήσεων. Με τα πρωτότυπα που κατασκευάστηκαν στην παρούσα διατριβή επιτυγχάνεται εξισορρόπηση της ενέργειας των συσσωρευτών με υψηλή απόδοση και ρεύμα. Επίσης, ένα σημαντικό αποτέλεσμα της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι η πρόταση μεθόδου για το χρονοπρογραμματισμό εξισορρόπησης των συσσωρευτών εντός μίας ομάδας με σκοπό τη μείωση των συνολικών απωλειών κατά τη διαδικασία της εξισορρόπησης.

Ο δεύτερος άξονας της διατριβής σχετίζεται με τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων σε σταθμούς φόρτισης. Η λήψη αποφάσεων πραγματοποιείται σε δύο κατευθύνσεις. Η πρώτη κατεύθυνση αφορά το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος σε σταθμό φόρτισης με χρήση μετα-ευρετικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την επίτευξη της φόρτισης του οχήματος με γνώμονα τις ανάγκες μετακίνησης των οδηγών με χαμηλό κόστος και φθορά των συσσωρευτών κατά τη φόρτιση, αλλά και τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του σταθμού, τηρώντας τους περιορισμούς που τίθενται από το διαχειριστή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η δεύτερη κατεύθυνση σχετίζεται με την εφαρμογή της μεθόδου Analytic Hierarchy Process (AHP) για την υποβοήθηση των οδηγών κατά την επιλογή του καταλληλότερου σταθμού φόρτισης, αξιολογώντας τις υπηρεσίες φόρτισης που προφέρονται από τους κοντινότερους σταθμούς και επιλέγοντας το σταθμό εκείνο που καλύπτει σε μεγαλύτερο βαθμό τα κριτήρια που τίθενται από τους οδηγούς.

Συμπερασματικά, μέσα από την παρούσα Διδακτορική Διατριβή επιδιώκεται η επίλυση του προβλήματος της διαχείρισης της ενέργειας συσσωρευτών ηλεκτρικών οχημάτων ολιστικά, αφενός μεν μέσα από τη διερεύνηση του χαμηλού επιπέδου που αφορά μεμονωμένους συσσωρευτές, αφετέρου δε, μέσω της λήψης αποφάσεων που σχετίζονται με τη διαδικασία της φόρτισης.

Λέξεις κλειδιά: Συστήματα Διαχείρισης Συσσωρευτών, Ηλεκτρικά Οχήματα, Συσσωρευτές, Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Flyback, Quasi-resonant Flyback, Βελτιστοποίηση, Γενετικός Αλγόριθμος, Αλγόριθμος Σμήνους Σωματιδίων, Αλγόριθμοι υποβοήθησης λήψης αποφάσεων, Analytic Hierarchy Process.

Summary

The ever-increasing interest in smart grids and electric vehicles has triggered intensive research on new technologies and practices for efficient energy management. The electrochemical cells are the prevalent solution for the energy storage systems of smart grids and electric vehicles. Hence, new research for methods related to the efficient energy management of battery systems is crucial.

The main objective of this doctoral thesis is to propose methods for the efficient energy management of electric vehicles in two main axes. The first axis is related to the development of electronic power converters and algorithms to manage the energy of the electrochemical cells that belong in a battery stack, aiming to ensure that each cell operates according to the specifications set by the manufacturer. The second axis of this doctoral thesis is related to the energy management of electric vehicles in a higher level, through the development of decision-making algorithms for the charging of electric vehicles and the selection of the most appropriate charging station based on the requirements of the drivers.

The energy management of the battery cells is performed by the Battery Management Systems (BMSs). The purpose of the BMS is twofold. On the one hand, the BMS is responsible for the supervision of the condition of the cell, through measurements related to its operation. On the other hand, the BMSs are used for the energy equalization among the cells of a battery stack, aiming to avoid overcharging or undercharging situations that may radically damage the cell.

In the context of this thesis, it is assumed that the battery stack is divided into battery modules, and each module contains eight cells. As a result, the equalization of the energy among the cells is performed in two layers. The first layer of equalization refers to the equalization of the energy among the cells that belong in a battery module, following the bidirectional Module-to-Cell energy flow. The second layer of equalization refers to the equalization of the energy among the modules of the battery stack, following the bidirectional Module-to-Module energy flow. In the context of this thesis, the bidirectional Flyback converter is selected to facilitate the Module-to-Cell equalization, while the bidirectional Quasi-resonant Flyback converter is selected to facilitate the Module-to-Module equalization.

During the analysis of the power converters under investigation, analytical equations are derived for all the quantities that characterize the operation of each converter, taking into account the non-

idealities of its components, in order to accurately derive its operating point. Afterwards, a detailed loss analysis is performed on all components that comprise the converter. Subsequently, a meta-heuristic optimization algorithm, more specifically the Genetic Algorithm, is executed to derive the values of the elements of the converter that maximize its efficiency. In the final stage, the implementation of laboratory prototypes of the electronic converters and the experimental evaluation of the theoretical assumptions is performed. Using the implemented converters, high-current and high-efficiency cell equalization is achieved. In addition, an important result of the present doctoral thesis is the proposal of a method for the equalization scheduling among the cells within a battery module, aiming to reduce the total losses during the equalization process.

The second axis of the thesis is related to the decision-making during the charging of electric vehicles in charging stations. The decision-making involves two directions. The first direction is related to the charge scheduling of the electric vehicles in a charging station, using a meta-heuristic optimization algorithm. This procedure is important to assure that the charging is performed considering the requirements of the drivers, while not only minimizing the charging cost and the battery degradation, but also maximizing the utilization of the chargers in a charging station and also considering the limitations set by the energy system operators. The second direction is related to the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) to support the drivers during the selection of the most appropriate charging station, by evaluating the charging services that are provided by the nearby charging stations based on the drivers' priorities.

Summarizing, through this doctoral thesis, a holistic approach for energy management of the batteries of electric vehicles is proposed. On the low level, Battery Management Systems for the equalization among the cells of the stack, with high current and high efficiency are proposed. On the higher level, decision-making methods for the charging of electric vehicles considering the priorities of the drivers are proposed.

Keywords: Battery Management Systems, Electric Vehicles, Batteries, Electronic Power Converters, Power Electronics, Flyback, Quasi-resonant Flyback, Optimization, Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, Decision-making Algorithms, Analytic Hierarchy Process.