



Σχολή  
Ηλεκτρολόγων  
Μηχανικών  
και Μηχανικών  
Υπολογιστών

Μεταπτυχιακή Διατριβή

## **Ανάπτυξη Μετατροπέα Ισχύος DC/AC Πολλαπλών Εισόδων**

*Ροδίτης Ιωάννης*

**Εξεταστική επιτροπή:**

Αναπληρωτής Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (Επιβλέπων)

Αναπληρωτής Καθηγητής Κανέλλος Φώτιος

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Χανιά, Αύγουστος 2022

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, αρχικά, τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κουτρούλη Ευτύχιο για τα χρήσιμα σχόλια, παρατηρήσεις και γενικά την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια ενασχόλησης με την συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία. Ένα μεγάλο ευχαριστώ, επίσης, στους καθηγητές κ. Κανέλλο Φώτιο και κ. Σταυρακάκη Γεώργιο, που ήταν πρόθυμοι να βοηθήσουν σε οτιδήποτε ρωτήθηκαν για την διεκπεραίωση της συγκεκριμένης εργασίας και που αποτελούν μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής.

Ιδιαίτερη μνεία αξίζει να αποδοθεί στους συναδέλφους του Εργαστηρίου Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης για την άψογη συνεργασία που είχαμε. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους και φίλους πλέον, κ. Δακανάλη Μιχαήλ, κ. Καλαϊτζάκη Ιάσωνα, κ. Μανδουραράκη Ιωάννη και κ. Φωτεινόπουλο Γεώργιο, για την τεχνική και όχι μόνο υποστήριξη.

Τελειώνοντας, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στα μέλη της οικογένειας μου και στους στενούς μου φίλους, που ήταν δίπλα μου στο απαιτητικό ταξίδι του μεταπτυχιακού.

Η μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο υλοποίησης του ερευνητικού έργου “Εξυπνος ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος για την παροχή ολοκληρωμένων υπηρεσιών σε ηλεκτρικά δίκτυα και καταναλωτές” της δράσης «ΕΡΕΥΝΩ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ».

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το τελευταίο χρονικό διάστημα παρατηρείται αύξηση ενδιαφέροντος σχετικά με την ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), η διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και τα ηλεκτρικά οχήματα (electric vehicles - EVs). Στις προηγούμενες εφαρμογές, γίνεται χρήση πολλών DC/DC και DC/AC μετατροπέων ισχύος. Ωστόσο, τα προαναφερθέντα συστήματα μετατροπής ισχύος αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένου του συνολικού κόστους, του μεγέθους και της πολυπλοκότητας του συνολικού συστήματος. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, αναπτύχθηκαν δύο μη-απομονωμένοι μετατροπείς πολλαπλών θυρών (MPC), που ενσωματώνουν τέσσερις DC πηγές και μια AC έξοδο, ο καθένας. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι αποτελούνται από μικρότερο αριθμό ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε σύγκριση με τη χρησιμοποίηση ξεχωριστών μετατροπέων για κάθε θύρα. Χαρακτηρίζονται από το ότι περιλαμβάνουν μικρότερο συνολικό αριθμό πηνίων και πυκνωτών, αλλά και από την χρησιμοποίηση τριών διακοπών που λειτουργούν σε χαμηλή διακοπτική συχνότητα συγκριτικά με άλλους μετατροπείς της βιβλιογραφίας με τον ίδιο αριθμό θυρών, οι οποίοι αποτελούνται μόνο από διακόπτες υψηλής διακοπτικής συχνότητας. Τα προτεινόμενα κυκλώματα έχουν σχεδιαστεί για τη διαχείριση ισχύος ενός υβριδικού ενεργειακού συστήματος, το οποίο αποτελείται από μία συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων (PV), μία συστοιχία μπαταριών, μία συστοιχία υπερπυκνωτών (SC), την μπαταρία ενός EV, καθώς και διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Παρόλο που η φωτοβολταϊκή συστοιχία είναι απευθείας συνδεδεμένη στο DC-link, ο αλγόριθμος ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) δύναται να εφαρμοστεί δίχως κάποιον επιπλέον μετατροπέα ισχύος, μειώνοντας έτσι τον συνολικό αριθμό ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Οι προτεινόμενες τοπολογίες, επιπρόσθετα, ενσωματώνουν μια τριφασική έκδοση ενός split-source αντιστροφέα (SSI), με σκοπό την περαιτέρω μείωση των απωλειών ισχύος στους ημιαγωγικούς διακόπτες. Επίσης, ο μετατροπέας SSI των MPCs έχει τροποποιηθεί για να υποστηρίζεται η αμφίδρομη ροή ισχύος. Τέλος, αναπτύχθηκαν τα εργαστηριακά πρωτότυπα των δύο αρχιτεκτονικών και η ορθή λειτουργία τους επικυρώθηκε υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Εισαγωγή.....	6
1.2 Στόχος της παρούσας εργασίας.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΘΥΡΩΝ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	9
2.1 Γενικές πληροφορίες για τους μετατροπείς πολλαπλών θυρών.....	9
2.2 DC/DC μετατροπείς τύπου MPC .....	11
2.2.1 Απομονωμένοι μετατροπείς DC/DC τύπου MPC.....	11
2.2.2 Μη-απομονωμένοι μετατροπείς DC/DC τύπου MPC.....	17
2.3 DC/AC μετατροπείς τύπου MPC .....	21
2.3.1 Απομονωμένοι μετατροπείς DC/AC τύπου MPC.....	21
2.3.2 Μη-απομονωμένοι μετατροπείς DC/AC τύπου MPC.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ.....	29
3.1 Μελέτη εναλλακτικών τοπολογιών μετατροπέων DC/AC πολλαπλών εισόδων.....	29
3.1.1 Εισαγωγή.....	29
3.1.2 Προσομοίωση εναλλακτικών τοπολογιών .....	30
3.2 Οι τοπολογίες που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή .....	38
3.2.1 Εισαγωγή.....	38
3.2.2 Δομή τοπολογιών ισχύος .....	40
3.2.3 Περιγραφή αρχής λειτουργίας και έλεγχος σημάτων οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων .....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MATLAB/SIMULINK .....	49
4.1 Σήματα ελέγχου και παλμοί οδήγησης διακοπτικών στοιχείων .....	49
4.2 Διάφορες ροές ισχύος μεταξύ των θυρών .....	54
4.3 Ρεύμα διαρροής γείωσης.....	64
4.4 Ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών, της συστοιχίας SC και της μπαταρίας του EV .....	70
4.5 Λογισμικό βελτιστοποίησης των κυκλωμάτων ισχύος.....	77
4.6 Βαθμός απόδοσης .....	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ .....	83
5.1 Εισαγωγή .....	83
5.2 Πειραματικά πρωτότυπα.....	85



5.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα.....	89
5.3 Σύγκριση προτεινόμενων τοπολογιών .....	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	103
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	104

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία καταβάλλονται όλο και περισσότερες προσπάθειες μετριασμού της κλιματικής αλλαγής και μείωσης της χρήσης ορυκτών καυσίμων. Τα ορυκτά καύσιμα εγκυμονούν αρκετούς γεωπολιτικούς κινδύνους, ενώ ταυτοχρόνως χαρακτηρίζονται και από δυσανάλογο εξωτερικό κόστος για το κοινωνικό γίνεσθαι, το οποίο ισοδυναμεί με βλάβες για την υγεία και το περιβάλλον. Για αυτόν τον λόγο παρατηρείται ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την υιοθέτηση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) [1]. Οι ΑΠΕ αποτελούν μορφές ενέργειας που παράγονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως είναι ο άνεμος, ο ήλιος, το νερό, η γεωθερμία κ.α. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, οι ΑΠΕ είναι αστείρευτες πηγές ενέργειας με μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι η αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, διότι οι ΑΠΕ κατανέμονται σε διαφορετικά γεωγραφικά επίπεδα επιτρέποντας την κάλυψη των τοπικών και περιφερειακών ενεργειακών αναγκών. Το συγκεκριμένο γεγονός ανακουφίζει τα συστήματα υποδομής και μειώνει τις απώλειες που παρατηρούνται κατά την μεταφορά της ενέργειας [2].

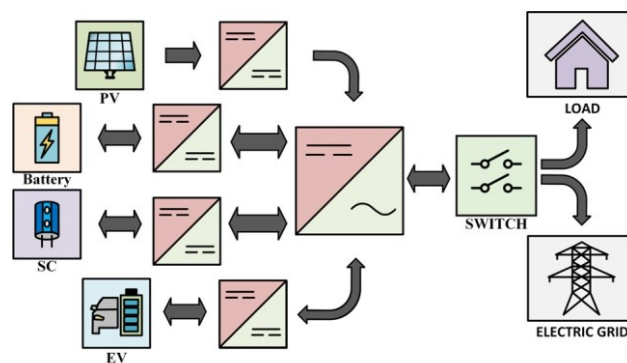
Από την άλλη πλευρά, όμως, οι ΑΠΕ αντιμετωπίζουν αρκετούς περιορισμούς και προκλήσεις. Το πρώτο, μεταξύ των σημαντικότερων μειονεκτημάτων, είναι η αλληλένδετη σύνδεσή τους με τις κλιματικές συνθήκες. Με άλλα λόγια, η ενέργεια και η ισχύς που παρέχονται από τις ΑΠΕ συνεχώς ποικίλλουν και δεν είναι σταθερού μεγέθους κάθε χρονική στιγμή, αλλά διαφέρουν ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται. Για παράδειγμα, η παραγωγή ενέργειας ενός φωτοβολταϊκού (photovoltaic - PV) συστήματος παρουσιάζει εξάρτηση από την ηλιοφάνεια, επηρεάζεται από συνεφιασμένες ημέρες και μηδενίζεται κατά την διάρκεια της νύχτας. Το δεύτερο μειονέκτημα αφορά τον μικρό συντελεστή απόδοσης. Συνεπώς, απαιτείται υψηλό κόστος εγκατάστασης σε μεγάλη έκταση γης. Ως φυσικό επακόλουθο η χρησιμοποίηση μόνο ΑΠΕ για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων καθίσταται μη συμφέρουσα λύση [3].

Για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τακτική είναι ο συνδυασμός των ΑΠΕ είτε με κάποιο συμβατικό σύστημα, όπως μια πετρελαιοκίνητη γεννήτρια, είτε με κάποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, όπως μια συστοιχία μπαταριών. Τα προαναφερθέντα συστήματα χαρακτηρίζονται ως υβριδικά. Τα υβριδικά συστήματα επωφελούνται από τα πλεονεκτήματα της εκάστοτε τεχνολογίας, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση του ολικού συστήματος [4]. Σε μια συνεφιασμένη ημέρα, για παράδειγμα, κατά την οποία από μόνη της η φωτοβολταϊκή (Φ/Β) συστοιχία δεν δύναται να καλύψει τις ενεργειακές απαιτήσεις, μια μπαταρία μπορεί να συμπληρώσει το έλλειμμα ισχύος. Γενικά το εκάστοτε αποθηκευτικό μέσο που χρησιμοποιείται σε ένα υβριδικό σύστημα με ΑΠΕ, εάν έχει υψηλή χωρητικότητα είναι ικανό να Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

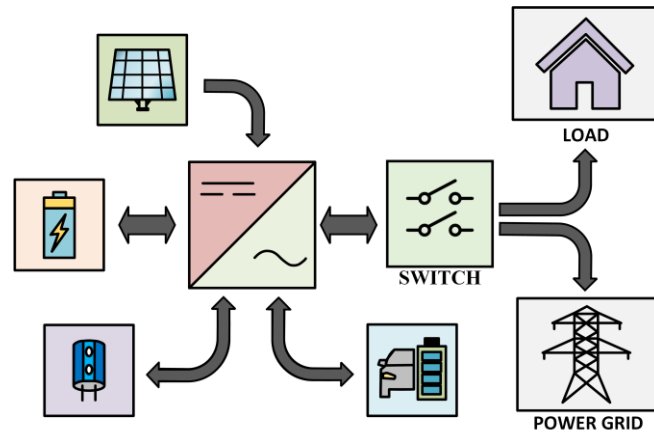
παρέχει ενέργεια για μεγάλο χρονικό διάστημα, αλλά με αντίτιμο τον μικρό χρόνο απόκρισης. Επομένως γίνεται φανερό ότι ο τύπος και η χωρητικότητα του αποθηκευτικού μέσου επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση ενός υβριδικού συστήματος [5].

Τα πιο συνηθισμένα αποθηκευτικά μέσα που χρησιμοποιούνται σε υβριδικά συστήματα με ΑΠΕ είναι η μπαταρία και ο υπερπυκνωτής (supercapacitor - SC) [6]. Οι μπαταρίες, αρχικά, έχουν την ικανότητα να προσφέρουν υψηλή αποδοτικότητα και πυκνότητα ενέργειας. Μπορούν, επίσης, να ανταποκριθούν και να υποστηρίξουν διάφορες αυξομειώσεις φορτίου, καθώς και να αντισταθμίσουν απαιτήσεις ισχύος χαμηλής συχνότητας. Βέβαια παρουσιάζουν και κάποιους περιορισμούς, όπως αργή φόρτιση και μικρή διάρκεια ζωής, ειδικά σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος [7]. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την συνεχιζόμενη βιομηχανική ανάπτυξη και έρευνα στον τομέα των μπαταριών, τα ηλεκτρικά οχήματα (electric vehicles - EVs) παρουσιάζουν σημαντική πρόοδο ως καταναεμημένα μέσα αποθήκευσης ενέργειας [8]. Οι υπερπυκνωτές, από την άλλη πλευρά, είναι ιδανικοί ως μέσα στιγμιαίας αποθήκευσης ενέργειας. Έχουν σχεδόν αμελητέες απώλειες και μεγάλη διάρκεια ζωής, υποστηρίζοντας ταυτοχρόνως μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης [9].

Η απαίτηση συνδυασμού, επομένως, διαφορετικών πηγών (είτε DC είτε AC) σε ένα ενιαίο σύστημα σε συνδυασμό με την κάλυψη του εκάστοτε φορτίου (είτε DC είτε AC) δημιούργησαν την ανάγκη ανάπτυξης κατάλληλων κυκλωμάτων, ώστε να μπορεί να επιτυγχάνεται αποτελεσματικός έλεγχος του ενιαίου συστήματος και ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των πηγών. Έτσι, αναπτύχθηκαν διάφοροι DC/DC και DC/AC μετατροπείς ισχύος. Η υλοποίηση, για παράδειγμα, ενός συστήματος, το οποίο αναπαρίσταται στην Εικόνα 1(α) και αποτελείται από πολλές πηγές εισόδου και διασύνδεση με το δίκτυο, απαιτεί την χρησιμοποίηση αρκετών μετατροπέων ισχύος για να επιτευχθεί ο κατάλληλος έλεγχος της ροής ισχύος. Με την συγκεκριμένη προσέγγιση, όμως, η διαχείριση της ροής ισχύος γίνεται αναποτελεσματική και η αρχιτεκτονική του συστήματος ογκώδης και ακριβή. Για να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα, έχουν αναπτυχθεί μετατροπείς ισχύος πολλαπλών θυρών (multiport power converters-MPCs) [10], οι οποίοι συνδυάζουν πολλούς μετατροπείς σε μια μονάδα ισχύος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1(β). Οι MPCs παρουσιάζουν χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος και λίγα επίπεδα ελέγχου.



(α)



(β)

**Εικόνα 1:** Βασικές αρχιτεκτονικές για την σύνδεση πολλών πηγών ενέργειας και αποθηκευτικών μέσων: (α) με χρήση πολλαπλών μετατροπέων, (β) με χρήση MPC.

## 1.2 Στόχος της παρούσας εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται την υλοποίηση και κατασκευή δύο διαφορετικών τοπολογιών για την ανάπτυξη ενός υβριδικού συστήματος με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μέσα αποθήκευσης ενέργειας. Με άλλα λόγια, οι προτεινόμενες τοπολογίες έχουν την δυνατότητα ελέγχου της ροής ισχύος μεταξύ τεσσάρων DC πηγών (Φ/Β συστοιχία, συστοιχία SC, μπαταρία EV και συστοιχία μπαταριών) και διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η υλοποίηση τους πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την μείωση του συνολικού αριθμού των απαιτούμενων διακοπτικών και παθητικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού και των πειραματικών δοκιμών επιβεβαίωσαν την ορθή λειτουργία των τοπολογιών για διάφορες ροές ισχύος. Έτσι, έγινε φανερό ότι είναι εφικτή η αποτελεσματική λειτουργία ενός συστήματος με πολλαπλές εισόδους χρησιμοποιώντας μετατροπείς με μειωμένο μέγεθος και κόστος σε σύγκριση με τους αντίστοιχους της υπάρχουσας βιβλιογραφίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΘΥΡΩΝ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ

### 2.1 Γενικές πληροφορίες για τους μετατροπείς πολλαπλών θυρών

Ο MPC είναι μια διάταξη με την ικανότητα διασύνδεσης μεγάλου αριθμού φορτίων, πηγών ενέργειας και μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Ένας κοινός DC δίαυλος χρησιμοποιείται, συνήθως, για την διασύνδεση των εισόδων και των εξόδων του μετατροπέα MPC. Οι πηγές, μέσω απομονωμένων DC/DC σταδίων, συνδέονται στον δίαυλο, ενώ εάν απαιτείται σύνδεση με το AC δίκτυο ή φορτίο, εφαρμόζεται και ένα επιπλέον DC/AC στάδιο. Διαφορετικές τοπολογίες κυκλωμάτων πολλαπλών εισόδων έχουν εισαχθεί τα τελευταία χρόνια για να συνδυάζουν διαφορετικές πηγές ενέργειας, όπως Φ/Β συστοιχίες, ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμων και AC δίκτυα. Μια σύγκριση μετατροπέων DC/DC πολλαπλών θυρών παρουσιάζεται στην [11]. Μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε μια γενική ποιοτική σύγκριση για μετατροπείς DC/AC πολλαπλών θυρών, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1, όπου σαν συμβατική αρχιτεκτονική υποδηλώνεται η περίπτωση κατά την οποία χρησιμοποιούνται ξεχωριστοί μετατροπείς για κάθε είσοδο [Εικόνα 1(α)].

**Πίνακας 1:** Σύγκριση μεταξύ συμβατικής αρχιτεκτονικής και MPC.

Κριτήρια Σύγκρισης	Συμβατική Αρχιτεκτονική	MPC
Πλήθος Διακοπτικών Στοιχείων	Πολλά	Λίγα
Μονάδα Ελέγχου	Ξεχωριστή	Ενιαία
Στάδια Μετατροπής	Πολλά	Λίγα
Πολυπλοκότητα	Δομική	Ελεγχόμενη
Αποδοτικότητα	Χαμηλή	Βελτιωμένη

Οι MPCs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κυρίως κατηγορίες, σε απομονωμένους και μη. Οι απομονωμένοι MPCs περιλαμβάνουν μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας μεταξύ DC και AC πλευράς, προσφέροντας έτσι ηλεκτρική απομόνωση [12]. Για παράδειγμα σε έναν απομονωμένο μετατροπέα ελέγχοντας κατάλληλα τους διακόπτες που βρίσκονται από την πλευρά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή ρυθμίζεται η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του πρωτεύοντος και άρα στα άκρα του δευτερεύοντος, αφού ο μετασχηματιστής έχει σταθερό λόγο μετασχηματισμού. Στην συνέχεια, με κατάλληλο διακοπτικό έλεγχο από την πλευρά του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή μπορεί να ρυθμιστεί η τάση εξόδου του μετατροπέα. Η χρήση, όμως, μετασχηματιστή πολλαπλών περιελίξεων, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος και μειωμένη απόδοση. Από την άλλη πλευρά, οι μη-απομονωμένοι MPCs στερούνται ηλεκτρικής απομόνωσης μεταξύ των εισόδων και των εξόδων τους [13]. Ως φυσικό επακόλουθο, έχουν χαμηλότερο κόστος και μειωμένες απώλειες ισχύος, λόγω της απουσίας του μετασχηματιστή. Υπάρχει, επιπρόσθετα, μια κοινή γραμμή γείωσης που διέρχεται από όλες τις θύρες ισχύος του μετατροπέα. Μια γενική σύγκριση [14] μεταξύ απομονωμένων και μη-απομονωμένων τοπολογιών παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

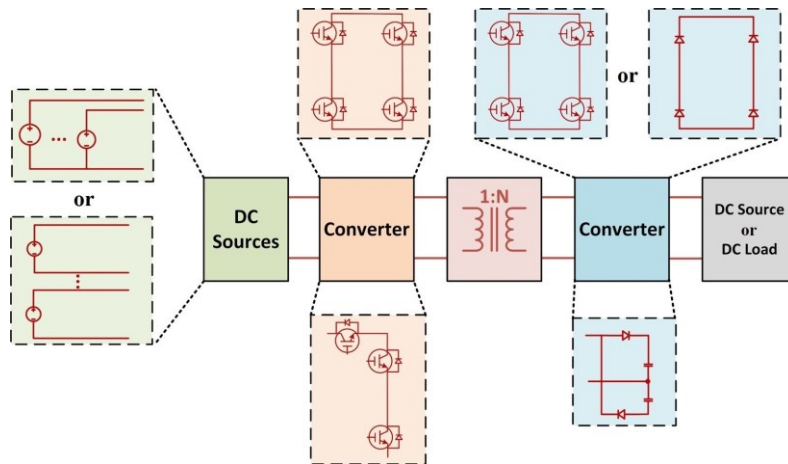
**Πίνακας 2:** Σύγκριση μεταξύ απομονωμένων και μη-απομονωμένων μετατροπέων.

Κριτήρια Σύγκρισης	Απομονωμένοι Μετατροπείς	Μη-Απομονωμένοι Μετατροπείς
Γαλβανική Απομόνωση	Ναι	Όχι
Μαγνητικό Πεδίο	Ναι	Όχι
Πολλαπλά Επίπεδα Τάσεως Εξόδου	Εύκολα Υλοποιήσιμο	Δύσκολα Υλοποιήσιμο
Βάρος	Βαρύτερο	Ελαφρύτερο
Αριθμός Στοιχείων	Πολλά	Λίγα
Απόκριση	Αργή	Γρήγορη
Κόστος	Ακριβό	Φθηνό
Αποδοτικότητα	Χαμηλή	Βελτιωμένη

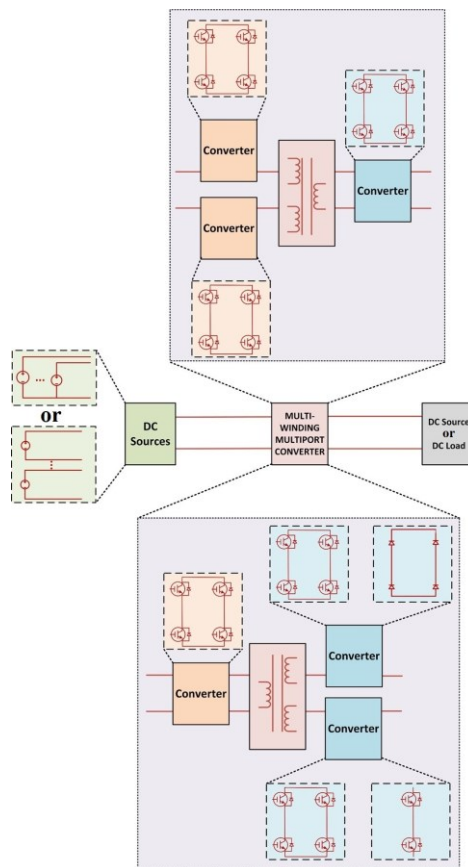
## 2.2 DC/DC μετατροπείς τύπου MPC

### 2.2.1 Απομονωμένοι μετατροπείς DC/DC τύπου MPC

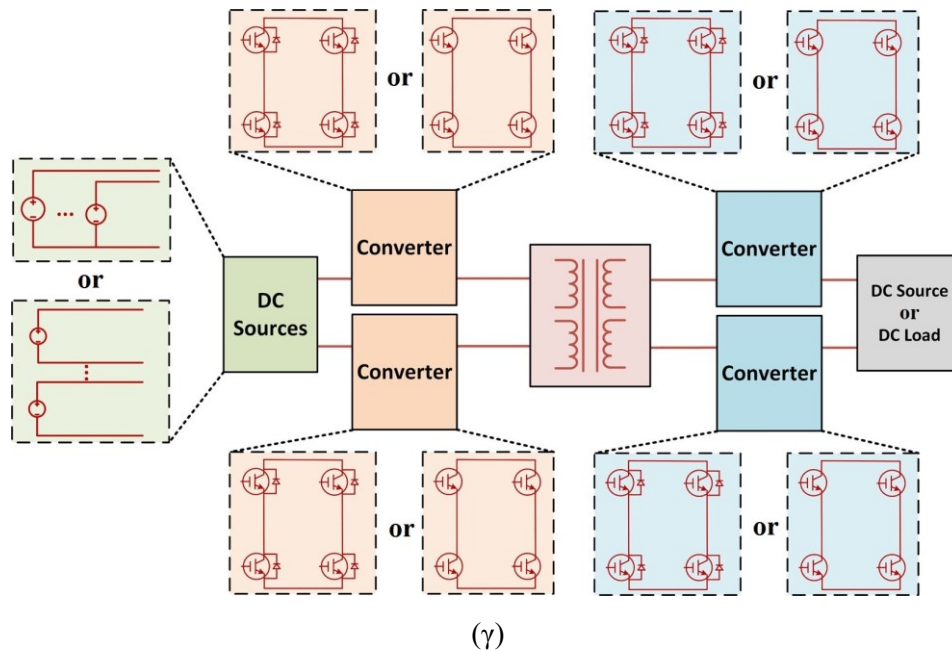
Οι απομονωμένοι μετατροπείς DC/DC τύπου MPC διαθέτουν γαλβανική απομόνωση, διότι χρησιμοποιούν μετασχηματιστές που απομονώνουν την είσοδο από την έξοδο. Η ύπαρξη ξεχωριστής γείωσης έχει αντίκτυπο και στις δύο πλευρές του μετατροπέα. Οι κύριες αρχιτεκτονικές των απομονωμένων μετατροπέων DC/DC τύπου MPC συνοψίζονται στην Εικόνα 2.



(α)



(β)



**Εικόνα 2:** Κύριες αρχιτεκτονικές απομονωμένων DC/DC τύπου MPC μετατροπέων πολλών θυρών: (α) με μετασχηματιστή με σχέση μετασχηματισμού 1:N, (β) με μετασχηματιστή κοινού πυρήνα ενός τυλίγματος στο πρωτεύον και δύο στο δευτερεύον ή δύο τυλίγματα στο πρωτεύον και ένα στο δευτερεύον, (γ) με μετασχηματιστή κοινού πυρήνα με δύο τυλίγματα στο πρωτεύον και δύο στο δευτερεύον.

Πολλαπλές πηγές και φορτία μπορούν να συνδεθούν σε έναν μόνο μετασχηματιστή με γαλβανική απομόνωση, με λόγο μετασχηματισμού 1:N [Εικόνα 2(α)]. Στο [15], ο εξεταζόμενος μετατροπέας διασυνδέει μία Φ/Β συστοιχία και ένα σύστημα αποθήκευσης με συστοιχία μπαταριών μέσω ενός μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας. Η παρουσία δύο γεφυρών καθιστά εφικτή την αμφίδρομη ροή ισχύος, καθώς και τις Buck και Boost λειτουργίες. Η συγκεκριμένη τοπολογία χαρακτηρίζεται από βελτιωμένη απόδοση και μπορεί να εφαρμοστεί σε βιομηχανικές εφαρμογές. Ο DC/DC μετατροπέας πολλών εισόδων που παρουσιάζεται στο [16] προκύπτει από τον συνδυασμό δύο πλήρων γεφυρών και ενός απομονωμένου μετασχηματιστή, ο οποίος σε κάθε πλευρά του έχει συνδεδεμένο σε σειρά ένα πηνίο. Ρυθμίζοντας κατάλληλα, με την χρήση ενός σταθερού σήματος αναφοράς την διαφορά της φασικής γωνίας μεταξύ των σημάτων ελέγχου για τους διακόπτες από την πλευρά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή και με ένα άλλο σταθερό σήμα αναφοράς για τον έλεγχο των διακοπών στην πλευρά του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, επιτυγχάνεται έλεγχος φόρτισης και εκφόρτισης των πηνίων και άρα της ροής ισχύος μεταξύ των θυρών του μετατροπέα. Η ισχύς έχει την δυνατότητα να ρέει μεταξύ των διαφορετικών DC θυρών με την απόδοση να υπερβαίνει το 90% σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργίας. Στο [17], οι διακόπτες ισχύος οδηγούνται από σήματα διαμόρφωσης εύρους παλμών (pulse width modulation-PWM). Οι μεταβλητές ελέγχου, οι οποίες καθορίζουν την PWM διαμόρφωση, είναι ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) του μετατροπέα και η μετατόπιση φάσης. Ο κύκλος λειτουργίας ελέγχει τις ροές ισχύος των εισόδων, ενώ η μετατόπιση φάσης ρυθμίζει



αποτελεσματικά την τάση εξόδου. Μέσω ενός αλγόριθμου ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (maximum power point tracking-MPPT), το σύστημα είναι πάντα ρυθμισμένο να ελέγχει την παραγωγή των ενσωματωμένων ΑΠΕ. Η δυναμική συμπεριφορά της εξεταζόμενης τοπολογίας μοντελοποιείται εφαρμόζοντας το state-space μοντέλο.

Στο [18] προτείνεται μια τοπολογία DC/DC μετατροπέα πολλαπλών θυρών για συστήματα παραγωγής ενέργειας με χρήση Φ/Β συστοιχιών. Ο αριθμός των ημιαγωγών ισχύος είναι  $10 \cdot n$ , όπου  $n$  είναι ο αριθμός των εισόδων και η ροή ισχύος είναι μονής κατεύθυνσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι αριθμός 10 αποτελεί το συνολικό αριθμό των διακοπτικών στοιχείων που χρησιμοποιείται για κάθε είσοδο (θύρα) του μετατροπέα στην οποία και εφαρμόζεται αλγόριθμος MPPT. Ο συγκεκριμένος MPC διαθέτει πολλαπλές θύρες εισόδου χαμηλής τάσης και μία θύρα εξόδου υψηλής τάσης. Ένας απομονωμένος αμφίδρομος DC/DC μετατροπέας περιγράφεται στο [19]. Έχει την ικανότητα αύξησης της τάσης από την πηγή εισόδου σε υψηλό και ενδιάμεσο επίπεδο. Η έξοδος υψηλής τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύρια πηγή ενέργειας, ενώ η έξοδος μέτριας τάσης μπορεί να εφαρμοστεί για τη φόρτιση μπαταριών. Ο μετατροπέας αυτός χαρακτηρίζεται από μεγάλο κέρδος τάσης, καλύτερη απόδοση μετατροπής ισχύος σε σύγκριση με άλλους μετατροπείς παρόμοιας λειτουργικότητας και μικρές απώλειες στα εξαρτήματά του. Ο μετατροπέας που προτείνεται στο [20] περιλαμβάνει μια DC είσοδο, μια απομονωμένη και μια μη-απομονωμένη DC έξοδο, τρεις διακόπτες, έναν πυκνωτή, μια δίοδο, έναν πηνίο για φιλτράρισμα και έναν flyback μετασχηματιστή. Ο μειωμένος αριθμός διακοπών μειώνει το συνολικό κόστος ενώ μπορεί να επιτευχθεί ανεξάρτητος έλεγχος των θυρών ισχύος.

Ένας DC/DC μετατροπέας με απομόνωση τεσσάρων θυρών για σύστημα αιολικής, ηλιακής ενέργειας και συστοιχίας μπαταριών σε αυτόνομη λειτουργία προτείνεται στο [21]. Ο μετατροπέας είναι σε θέση να εκτελέσει λειτουργία MPPT τόσο για την Φ/Β συστοιχία όσο και για την ανεμογεννήτρια, να φορτίσει και να εκφορτίσει μια συστοιχία μπαταριών, ενώ ρυθμίζει παράλληλα τον DC δίαυλο σε μια συγκεκριμένη τιμή. Στην εργασία [22] παρουσιάζεται ένα υβριδικό σύστημα βασισμένο σε συστοιχία μπαταριών χαμηλής τάσης, υλοποιημένο με έναν DC/DC MPC με απομόνωση υψηλού κέρδους. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός χρησιμοποιεί μια δομή διπλής γέφυρας για να παρέχει γαλβανική απομόνωση της συστοιχίας μπαταριών από το DC δίαυλο και αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ οποιωνδήποτε δύο θυρών. Στο [23], προτείνεται ένας DC/DC μετατροπέας που ενσωματώνει έναν αμφίδρομο μετατροπέα και έναν μετατροπέα συντονισμού σειράς. Ο MPC που παρουσιάζεται στο [23] περιλαμβάνει μια θύρα εισόδου μονής κατεύθυνσης για τη σύνδεση μιας πηγής ισχύος, όπως μιας Φ/Β συστοιχίας, μια θύρα αμφίδρομης εισόδου για διασύνδεση μιας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας, όπως συστοιχίας μπαταριών, και μια θύρα εξόδου μονής κατεύθυνσης για τη σύνδεση DC φορτίου.

Πολλές από τις τοπολογίες που υπάρχουν στη βιβλιογραφία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στην αρχιτεκτονική της Εικόνας 2(β), στην οποία ο μετασχηματιστής που χρησιμοποιείται είναι κοινού

πυρήνα ενός τυλίγματος στο πρωτεύον και δύο στο δευτερεύον ή δύο τυλιγμάτων στο πρωτεύον και ενός στο δευτερεύον. Ένας DC/DC μετατροπέας πολλαπλών θυρών, που υιοθετεί την προηγούμενη αναφερθείσα αρχιτεκτονική, υλοποιείται στο [24]. Βασικός στόχος είναι η από κοινού εκμετάλλευση ΑΠΕ και η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός οικιακού φορτίου. Ένας μετασχηματιστής πολλαπλών περιελίξεων συνδέεται με τον μετατροπέα μέσω τεσσάρων γεφυρών. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η παροχή ενός μαγνητικού δίαυλου υψηλής συχνότητας για μεταφορά ισχύος μεταξύ των θυρών. Η ροή ισχύος μεταξύ των θυρών, με την σειρά της, ελέγχεται ρυθμίζοντας την αλλαγή φάσης και τον κύκλο λειτουργίας. Συγκεκριμένα, ρυθμίζοντας κατάλληλα την διαφορά φάσης των σημάτων οδήγησης μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος της ροής ισχύος μεταξύ της Φ/B συστοιχίας, της συστοιχίας υπερπυκνωτών και του φορτίου, ενώ ρυθμίζοντας το duty cycle μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος της ροής ισχύος μεταξύ της συστοιχίας μπαταριών και της συστοιχίας των υπερπυκνωτών. Η τοπολογία που παρουσιάζεται στο [25] είναι πλήρως αμφίδρομη και βασίζεται σε έναν μετασχηματιστή τριών περιελίξεων. Ο μετατροπέας περιλαμβάνει ένα κύκλωμα συντονισμού LLC πολλαπλών θυρών εξοπλισμένο με δύο επιπλέον στάδια Buck και Boost λειτουργίας. Σε κάθε θύρα δύναται να συνδεθούν πηγές με διαφορετικό εύρος τάσεων, προσφέροντας έτσι διαφορετικό εύρος και στην ισχύ εξόδου του μετατροπέα. Η εσωτερική βαθμίδα συντονισμού λειτουργεί ως DC μετασχηματιστής, με πρωταρχικό στόχο να παρέχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ των θυρών. Η βοηθητική τρίτη θύρα έχει την ικανότητα σύνδεσης ενός μέσου αποθήκευσης. Στο [26], εξετάζεται ένας απομονωμένος DC/DC μετατροπέας πολλαπλών θυρών που ενσωματώνει DC πηγές και μονάδες αποθήκευσης. Ο μετατροπέας αποτελείται από έναν μετασχηματιστή τριών περιελίξεων και από τρεις ημιγέφυρες. Οι θύρες μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα για τη φόρτιση ή την εκφόρτιση του εκάστοτε μέσου αποθήκευσης (π.χ. συστοιχίες SC και μπαταριών). Έχει αναπτυχθεί, επιπλέον, μια βαθμίδα συντονισμού για την επίτευξη υψηλής απόδοσης και εύκολης επεκτασιμότητας της τοπολογίας.

Ένας απομονωμένος DC/DC μετατροπέας τριών θυρών, ο οποίος βασίζεται σε μετατροπέα συντονισμού σειράς και μετατροπέα διπλής πλήρους γέφυρας, προτείνεται στο [27] για σταθμούς φόρτισης μπαταριών EV. Η DC παροχή συνδέεται σε μία κοινή θύρα εισόδου και δύο θύρες εξόδου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για γρήγορη και αργή φόρτιση αντίστοιχα. Ένας μετασχηματιστής τριών περιελίξεων συνδέει τις τρεις θύρες, παρέχοντας ηλεκτρική απομόνωση καθώς και τα κατάλληλα επίπεδα τάσης. Η θύρα εισόδου έχει έναν μετατροπέα πλήρους γέφυρας συνδεδεμένο σε μια DC πηγή, ενώ η δεύτερη θύρα περιλαμβάνει μια βαθμίδα συντονισμού και έναν ανορθωτή διόδων πλήρους γέφυρας για γρήγορη φόρτιση. Η τρίτη συνδέεται με μπαταρία EV ή πρόσθετες συστοιχίες μπαταριών, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν το ηλεκτρικό δίκτυο και χρησιμοποιείται για αργή φόρτιση. Ο απομονωμένος αμφίδρομος DC/DC μετατροπέας πολλαπλών θυρών που προτείνεται στο [28] βασίζεται σε μια τοπολογία πλήρους γέφυρας, η οποία συνδυάζει τρεις επιμέρους πλήρεις γέφυρες και συνδέει ένα φορτίο κινητήρα συνεχούς ρεύματος, μια συστοιχία μπαταριών ως μονάδα

αποθήκευσης ενέργειας και έναν υπερπυκνωτή ως βοηθητικό μέσο αποθήκευσης ενέργειας για περιπτώσεις ταχείας εκφόρτισης. Το κύκλωμα αποτελείται από τρεις πλήρεις γέφυρες, τρεις μετασχηματιστές και δύο κυκλώματα L-C συντονισμού σειράς. Κάθε θύρα περιλαμβάνει ένα πλήρες κύκλωμα γέφυρας MOSFET που επιτρέπει αμφίδρομη ροή ισχύος. Η ροή ισχύος μεταξύ των θυρών ελέγχεται με την τεχνική της μετατόπισης φάσης. Συγκεκριμένα, μετατοπίζοντας την φάση μεταξύ των σημάτων ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων, επιτυγχάνεται ρύθμιση των τάσεων στα άκρα των δύο πλευρών του απομονωμένου μετασχηματιστή ανάλογα με την εκάστοτε ροή ισχύος. .

Στην τρίτη τοπολογία του σχήματος της Εικόνας 2(γ), χρησιμοποιείται μετασχηματιστής κοινού πυρήνα με δύο τυλίγματα στο πρωτεύον και δύο στο δευτερεύον. Στο [29], παρουσιάζεται ένας μετατροπέας, ο οποίος αποτελείται από μια DC πηγή και τρεις θύρες με DC φορτία. Η πολυκατευθυντική ροή ισχύος σε όλες τις θύρες μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τέσσερις πλήρεις γέφυρες, μία για κάθε θύρα. Η κάθε γέφυρα, με την σειρά της, ελέγχεται με την τεχνική της μετατόπισης φάσης. Ένας απομονωμένος DC/DC μετατροπέας πολλαπλών θυρών υψηλής συχνότητας για συστήματα με Φ/Β συστοιχίες παρουσιάζεται στο [30]. Αποτελείται από έναν μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας με δύο περιελίξεις στην είσοδο και δύο στην έξοδο. Κάθε είσοδος βασίζεται σε μια τοπολογία μετατροπέα δύο τεταρτημόριων που συνδέει την Φ/Β συστοιχία με τον μετασχηματιστή. Η θύρα εξόδου συνδέεται στον DC δίαυλο μέσω ενός ανορθωτή. Ένας μετατροπέας με τέσσερις πλήρεις γέφυρες παρουσιάζεται στο [31]. Μέσω ενός πηνίου, κάθε πλήρης γέφυρα συνδέεται με τον μετασχηματιστή. Ανάλογα με το μοτίβο μεταγωγής, η έξοδος κάθε πλήρης γέφυρας μπορεί να είναι μια τάση τετραγωνικού σήματος 2 ή 3 επιπέδων. Η μετατόπιση φάσης μεταξύ των τάσεων τετραγωνικού σήματος των ξεχωριστών πλήρων γεφυρών, εφαρμόζεται για τον έλεγχο της ροής ισχύος μεταξύ των θυρών.

Στον Πίνακα 3, παρατίθεται μια σύγκριση των απομονωμένων DC/DC μετατροπέων που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

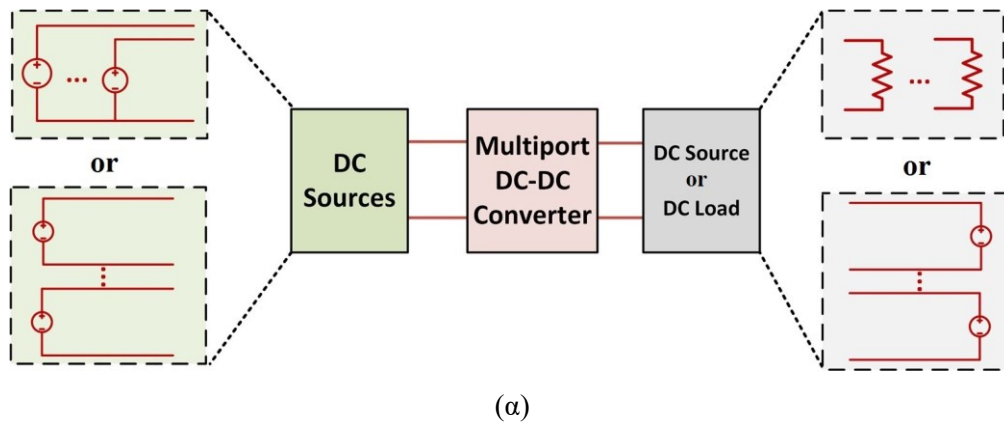
**Πίνακας 3:** Σύγκριση μεταξύ απομονωμένων DC/DC μετατροπέων τύπου MPC.

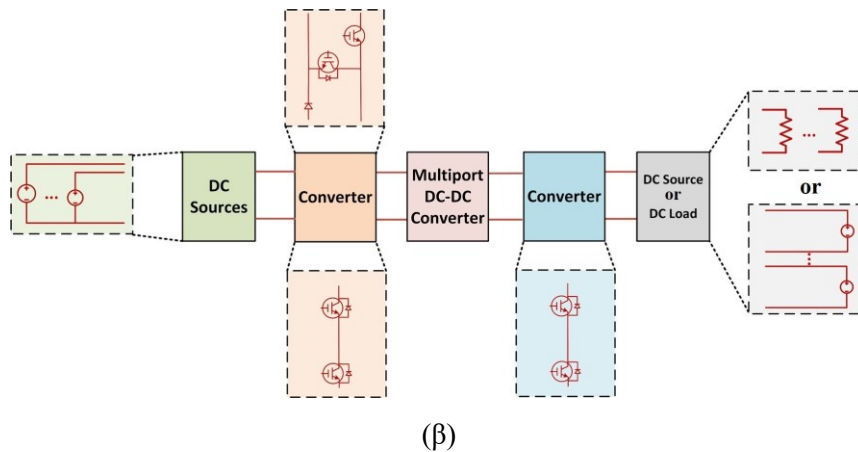
Βιβλιογραφικές Αναφορές	Κριτήρια Σύγκρισης				
	Αριθμός Διακοπτικών Στοιχείων	Μονάδα Ελέγχου	Ροή Ισχύος	Εφαρμογή	Αποδοτικότητα
[15]	12	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, DC φορτίο	Υψηλή
[16]	8	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	Δύο Μπαταρίες, Δύο DC φορτία	Υψηλή
[17]	8	Εξαρτημένη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία (ή SC), DC φορτίο	Υψηλή
[18]	10	Εξαρτημένη	Μονοκατευθυντική	PV, DC διάυλος	Υψηλή
[19]	4	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης, DC φορτίο	Υψηλή
[20]	4	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης (εφαρμογή χαμηλής ισχύος)	Μέτρια
[21]	8	Ευέλικτη	Μονοκατευθυντική	Ανεμογεννήτρια, Μπαταρία, PV, DC φορτίο	Μέτρια
[22]	8	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία, SC, DC-link πυκνωτής, DC φορτίο	Υψηλή
[23]	7	Εξαρτημένη	Μονοκατευθυντική	Μπαταρία, PV, DC φορτίο	Υψηλή
[24]	14	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία, PV, DC διάυλος, Κυψέλη Καυσίμου	Δεν αναφέρεται
[25]	10	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγές τάσης	Δεν αναφέρεται

[26]	10	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία, SC	Δεν αναφέρεται
[27]	12	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης, EV	Υψηλή
[28]	12	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία, SC, DC φορτίο	Υψηλή
[29]	16	Ευέλικτη	Μονοκατευθυντική	DC δίαυλος, DC φορτία	Υψηλή
[30]	12	Εξαρτημένη	Μονοκατευθυντική	PV, DC δίαυλος	Δεν αναφέρεται
[31]	16	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης	Μέτρια

### 2.2.2 Μη-απομονωμένοι μετατροπείς DC/DC τύπου MPC

Οι μη-απομονωμένοι DC/DC μετατροπείς έχουν σχεδόν αντικαταστήσει πλήρως τους συμβατικούς μετατροπείς, ειδικά σε εφαρμογές ΑΠΕ. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην καλύτερη απόδοση, στο οικονομικό κέρδος και στην απλότητα σχεδίασης. Οι κύριες αρχιτεκτονικές των μη-απομονωμένων DC/DC μετατροπέων τύπου MPC φαίνονται στην Εικόνα 3.





**Εικόνα 3:** Κύριες αρχιτεκτονικές μη-απομονωμένων DC/DC μετατροπέων πολλών θυρών: (α) χωρίς προσθήκη κάποιου εμβόλιμου μετατροπέα, (β) με την προσθήκη εμβόλιμων μετατροπέων στην είσοδο ή/και στην έξοδο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τοπολογίες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και υιοθετούν την αρχιτεκτονική της Εικόνας 3(α), όπου σαν κοινό χαρακτηριστικό έχουν την απουσία κάποιου εμβόλιμου μετατροπέα σε κάποια θύρα εκτός από τον ήδη υπάρχοντα μετατροπέα τύπου MPC. Ένας μη-απομονωμένος MPC με διακριτές διαδρομές ροής ισχύος μεταξύ των εισόδων και της εξόδου του παρουσιάζεται στο [32]. Χαρακτηρίζεται από δύο φάσεις λειτουργίας. Στην πρώτη φάση λειτουργίας, είναι δυνατή η σύνδεση μιας πηγής ενέργειας με έναν DC-link πυκνωτή. Στη δεύτερη, η έξοδος συνδέεται με μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας και μπορεί να εφαρμοστεί αμφίδρομη ροή ισχύος. Ορισμένα στοιχεία του μετατροπέα είναι κοινά στους διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας για να μειωθεί η πολυπλοκότητα. Ο προτεινόμενος μετατροπέας επιτυγχάνει υψηλή απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργίας. Στο [33], το προτεινόμενο κύκλωμα περιλαμβάνει μια Φ/Β συστοιχία και μια συστοιχία μπαταριών ως DC εισόδους σε έναν μετατροπέα ανύψωσης τάσης τύπου Luo και έχει δύο DC εξόδους. Υπάρχει μόνο ένα στάδιο μετατροπής μεταξύ της εισόδου και της εξόδου. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας χαρακτηρίζεται από χαμηλή κυμάτωση στα ρεύματα εισόδου, υψηλή απόδοση και κεντρικό έλεγχο. Κάθε θύρα του MPC που παρουσιάζεται στο [34] περιλαμβάνει έναν αμφίδρομο μετατροπέα Buck-Boost με ένα κοινό ενδιάμεσο DC τμήμα. Ο μετατροπέας επιτρέπει τη διαχείριση της ροής ισχύος μεταξύ διαφορετικών θυρών.

Ένας μη-απομονωμένος DC/DC μετατροπέας διπλής εισόδου και διπλής εξόδου περιγράφεται στο [35]. Ο προαναφερθέν MPC εφαρμόζεται σε υβριδικά ενεργειακά συστήματα με διαφορετικές πηγές εισόδου, καθώς και σε ηλεκτρικά οχήματα για την τροφοδοσία του ηλεκτροκινητήρα και των βοηθητικών φορτίων. Παρουσιάζει, ακόμα, υψηλό κέρδος τάσης για μικρές τιμές duty cycle και μικρότερες μέγιστες τιμές τάσης στα άκρα των ημιαγωγικών στοιχείων του μετατροπέα. Στόχος των συγγραφέων στο [36] είναι η σχεδίαση και υλοποίηση ενός μετατροπέα Buck-Boost DC/DC MPC τριπλής θύρας, για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Το κύκλωμα αποτελείται από τέσσερις ελεγχόμενους διακόπτες με αντιπαράλληλες διόδους, τρία πηνία, δύο πυκνωτές και ένα DC φορτίο. Στο [37]

προτείνεται ένας μη-απομονωμένος MPC ανύψωσης τάσης και τριών θυρών, με δύο διακριτές ροές ισχύος από κάθε είσοδο. Ο MPC περιλαμβάνει μια θύρα για μέσο αποθήκευσης και μια είσοδο για πηγές ενέργειας. Το αποθηκευτικό μέσο έχει την δυνατότητα να φορτίζεται απευθείας από την πηγή ισχύος ανεξάρτητα από την κατάσταση της ισχύος φορτίου. Ένας μη-απομονωμένος DC/DC MPC τριών θυρών με μεγάλο κέρδος μεταξύ της τάσης εξόδου και της τάσης εισόδου, παρουσιάζεται στο [38]. Τρεις διαφορετικοί τρόποι λειτουργίας μίας εισόδου και δύο εξόδων μπορούν να επιτευχθούν αλλάζοντας τη σύνδεση της DC πηγής εισόδου μεταξύ των θυρών.

Στο [39] υλοποιείται ένας μη-απομονωμένος DC/DC μετατροπέας τριών θυρών. Η μία θύρα επιτυγχάνει αμφίδρομη ροή ισχύος, παρέχοντας την δυνατότητα διασύνδεσης με συστοιχία μπαταριών, και οι άλλες δύο θύρες είναι μονοκατευθυντικές. Στις τελευταίες είναι εφικτή η σύνδεση με Φ/Β συστοιχία και DC φορτίο. Ένας μη-απομονωμένος DC/DC MPC που διασυνδέει Φ/Β συστοιχία και κυψέλες καυσίμου σε δύο DC φορτία παρουσιάζεται στο [40]. Παρόλο που διαθέτει τη δυνατότητα λειτουργίας και ως μετατροπέας μιας εισόδου και δύο εξόδων, διασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση η ορθή εφαρμογή του MPPT αλγορίθμου. Η πολυπλοκότητα της μονάδας ελέγχου είναι ελάχιστη, διότι με ένα μικρό σύνολο ελεγκτών επιτυγχάνονται όλες οι επιθυμητές ροές ισχύος. Ένας MPC για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, ο οποίος αποτελείται από L-C κυκλώματα συντονισμού, προτείνεται στο [41]. Για την φόρτιση και εκφόρτιση μίας μπαταρίας, στον μετατροπέα MPC περιλαμβάνεται ένας αμφίδρομος DC/DC μετατροπέας με χρήση PWM διαμόρφωσης.

Πολλές τοπολογίες μη-απομονωμένων MPCs βασίζονται στην αρχιτεκτονική του σχήματος της Εικόνα 3(β), στην οποία εκτός από τον μετατροπέα τύπου MPC απαιτείται και ένα συμπληρωματικό κύκλωμα πριν ή μετά τον MPC μετατροπέα. Ένας μη-απομονωμένος DC/DC μετατροπέας υψηλής ισχύος, που προσφέρει υψηλό κέρδος τάσης με μικρή καταπόνηση τάσης στα ημιαγωγικά εξαρτήματα, προτείνεται στο [42]. Επιτυγχάνεται, επίσης, μια σταθερότητα στο κέρδος τάσης για μεγάλο εύρος τάσεων εισόδου, γεγονός που βελτιώνει την απόδοση του συνολικού συστήματος. Ένας DC/DC μετατροπέας τριών θυρών παρουσιάζεται στο [43]. Ο συγκεκριμένος MPC ενσωματώνει Φ/Β συστοιχία με συστοιχία μπαταριών, με δυνατότητα ανύψωσης της τάσης εισόδου, και βελτιώνει την απόδοση της Φ/Β συστοιχίας υπό την επίδραση μεταβλητού φορτίου. Ένας DC/DC MPC χωρίς μετασχηματιστή με δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος αναλύεται στο [44]. Ο προτεινόμενος μετατροπέας περιλαμβάνει δύο εισόδους και δύο εξόδους. Έχει την δυνατότητα, επιπλέον, φόρτισης και εκφόρτισης συστοιχίας μπαταριών, με μικρή καταπόνηση τάσης στα ημιαγωγικά εξαρτήματα του κυκλώματος και λειτουργία ανύψωσης τάσης.

Στο [45], παρουσιάζεται ένας DC/DC μετατροπέας υψηλού κέρδους, ο οποίος ενσωματώνει δύο πηγές εισόδου και ένα φορτίο. Η λειτουργία ανύψωσης τάσης υψηλού κέρδους δύναται να εκτελεστεί όταν η ισχύς ρέει από την είσοδο στην πλευρά του φορτίου. Η λειτουργία Buck εφαρμόζεται για την αντίθετη ροή ισχύος. Ένας μη-απομονωμένος MPC με θύρα μονής κατεύθυνσης για την Φ/Β συστοιχία και αμφίδρομη θύρα για μονάδες αποθήκευσης προτείνεται στο [46]. Ο μετατροπέας

μπορεί να λειτουργήσει ως σύστημα μονής εισόδου-μονής εξόδου, διπλής εισόδου-μονής εξόδου και μονής εισόδου-διπλής εξόδου. Επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση, διότι κάθε θύρα έχει ένα μόνο στάδιο μετατροπής ισχύος. Ένας MPC τριών θυρών και τριών επιπέδων που χρησιμοποιεί διακόπτες GaN παρουσιάζεται στο [47]. Μπορεί να διασυνδέσει ΑΠΕ με φορτίο και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Οι τεχνικές διαμόρφωσης PWM και μετατόπισης φάσης χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα για να επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ροής ισχύος και της τάσης.

Στον Πίνακα 4 παρατίθεται μια σύγκριση μεταξύ των προαναφερθέντων μη-απομονωμένων DC/DC μετατροπέων τύπου MPC.

**Πίνακας 4:** Σύγκριση μεταξύ μη-απομονωμένων DC/DC μετατροπέων τύπου MPC.

Κριτήρια Σύγκρισης					
Βιβλιογραφικές Αναφορές	Αριθμός Διακοπτικών Στοιχείων	Μονάδα Ελέγχου	Ροή Ισχύος	Εφαρμογή	Αποδοτικότητα
[32]	10	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, DC δίαυλος, Κυψέλη Καυσίμου	Χαμηλή
[33]	8	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, DC φορτίο	Υψηλή
[34]	2*(αριθμός θυρών)	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγές τάσης	Δεν αναφέρεται
[35]	6	Ευέλικτη	Μονοκατευθυντική	EV	Μέτρια
[36]	6	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, DC φορτίο	Χαμηλή
[37]	9	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης, Μπαταρία, DC φορτίο	Υψηλή
[38]	5	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης	Υψηλή
[39]	6	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, DC φορτίο	Μέτρια
[40]	5	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, DC φορτία, Κυψέλη Καυσίμου	Μέτρια

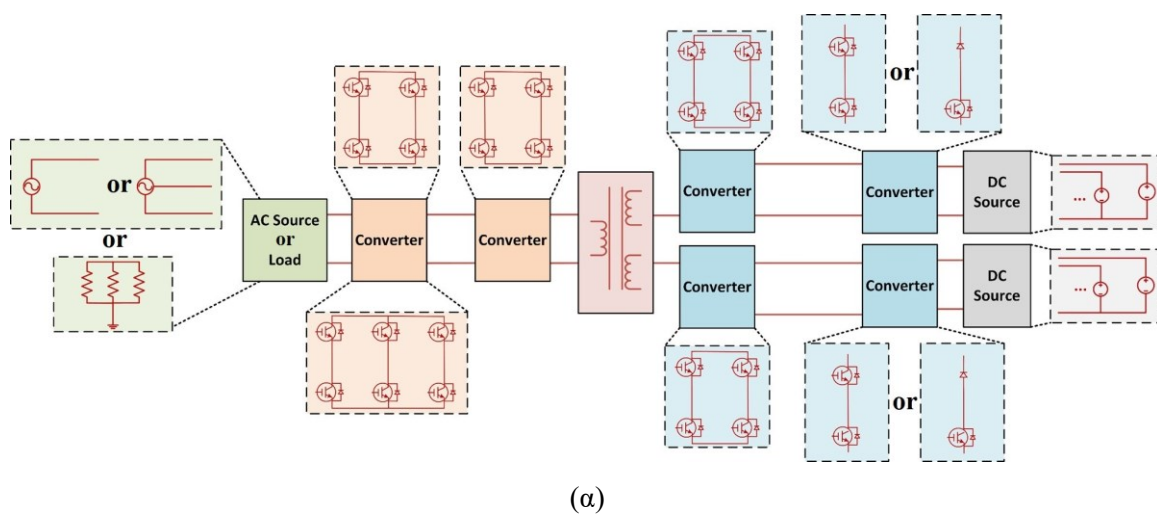


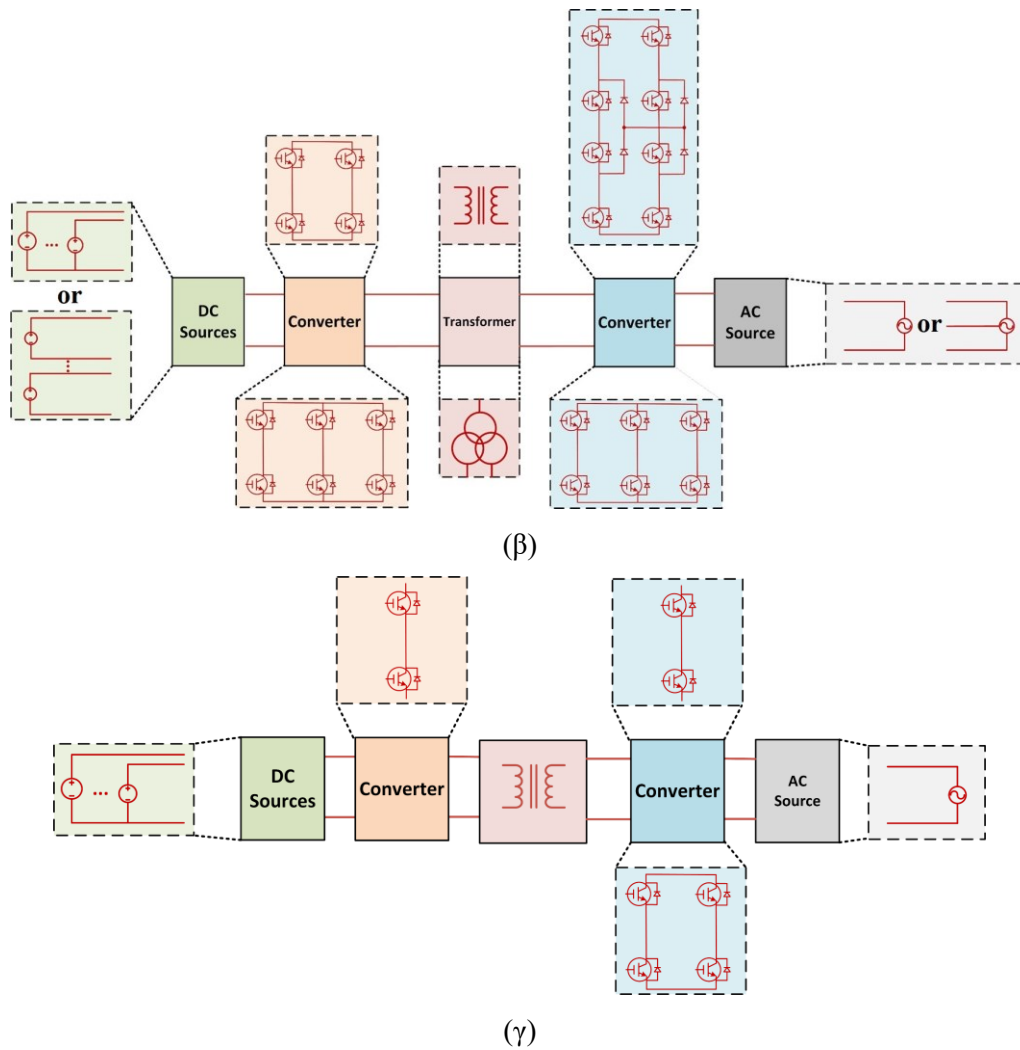
[41]	11	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, DC φορτίο	Υψηλή
[42]	3	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης	Υψηλή
[43]	5	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, DC δίαυλος	Χαμηλή
[44]	6	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία	Υψηλή
[45]	9	Εξαρτημένη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία, SC, Motor drive	Δεν αναφέρεται
[46]	5	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, DC φορτίο	Υψηλή
[47]	5	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, DC φορτίο	Υψηλή

### 2.3 DC/AC μετατροπείς τύπου MPC

### **2.3.1 Απομονωμένοι μετατροπείς DC/AC τύπου MPC**

Οι κύριες κατηγορίες απομονωμένων DC/AC μετατροπέων τύπου MPC παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.





**Εικόνα 4:** Κύριες αρχιτεκτονικές απομονωμένων DC/AC μετατροπέων πολλών θυρών: (α) με μετασχηματιστή κοινού πυρήνα ενός τυλίγματος στο πρωτεύον και δύο στο δευτερεύον, (β) με χρήση μετασχηματιστή με κοινό πυρήνα ή σε συνδεσμολογία αστέρα, (γ) με μετασχηματιστή με ένα τύλιγμα στο πρωτεύον και ένα τύλιγμα στο δευτερεύον.

Στην συνέχεια, αναλύονται τοπολογίες που ακολουθούν την αρχιτεκτονική της Εικόνας 4(α), με μετασχηματιστή κοινού πυρήνα ενός τυλίγματος στο πρωτεύον και δύο στο δευτερεύον. Ένας απομονωμένος DC/AC MPC για την διασύνδεση ΑΠΕ, μπαταρίες EV και του ηλεκτρικού δικτύου περιγράφεται στο [48]. Ο μετατροπέας πολλαπλών θυρών συνδυάζει μια πλήρη γέφυρα, καθώς και έναν αμφίδρομο και έναν μονόδρομο DC/DC μετατροπέα για να επιτύχει λειτουργία με τις διάφορες ροές ισχύος. Για να επιτευχθεί, ακόμα, διασύνδεση με την AC πλευρά του δικτύου με υψηλή ποιότητα ισχύος, εφαρμόζεται η PWM τεχνική στους διακόπτες της γέφυρας. Ένας μετασχηματιστής πολλαπλών περιελίξεων για εφαρμογές μικροδικτύων παρουσιάζεται στο [49]. Ο MPC που χρησιμοποιείται έχει τέσσερις θύρες: φορτίο ισχύος, κυψέλη καυσίμου, συστοιχία μπαταριών και Φ/B συστοιχία. Η τεχνική μετατόπισης φάσης εφαρμόζεται για τη διαχείριση της ροής ισχύος μεταξύ των θυρών και του ελέγχου του κύκλου λειτουργίας για την εφαρμογή του αλγορίθμου MPPT στη Φ/B

συστοιχία. Η μία θύρα είναι αμφίδρομη, επιτρέποντας τη ροή ισχύος από τις ΑΠΕ ή τις συστοιχίες μπαταριών στον μετατροπέα.

Ακολουθώς, παρουσιάζονται τοπολογίες που υιοθετούν την αρχιτεκτονική της Εικόνας 4 (β), με χρήση μετασχηματιστή με κοινό πυρήνα ή σε συνδεσμολογία αστέρα. Στο [50], προτείνεται ένας MPC με μετατροπή DC/AC υψηλής ισχύος για Φ/Β συστοιχίες συνδεδεμένες στο δίκτυο. Σε κάθε θύρα περιλαμβάνεται ένας DC/DC μετατροπέας με δύο πλήρεις γέφυρες πολλαπλών επιπέδων, έναν μετασχηματιστή που λειτουργεί σε υψηλή συχνότητα και έναν ημιτονοειδή DC/AC μετατροπέα PWM υψηλής τάσης. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω ενός εσωτερικού και ενός εξωτερικού βρόχου για το ρεύμα και την τάση, αντίστοιχα. Ένας απομονωμένος DC/AC MPC με δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος παρουσιάζεται στο [51]. Αποτελείται από δύο τριφασικούς μετατροπείς δύο επιπέδων με πηγή τάσης σε συνδυασμό με έναν μετασχηματιστή. Οι περιελίξεις στην πλευρά του μετατροπέα μπορούν να θεωρηθούν ως δύο ανεξάρτητες περιελίξεις σε συνδεσμολογία αστέρα. Το σύστημα ελέγχου του επιτρέπει ανεξάρτητο έλεγχο μεταξύ των διαφορετικών θυρών.

MPCs οι οποίοι έχουν παρόμοια συνδεσμολογία με την αρχιτεκτονική της Εικόνας 4(γ), στην οποία χρησιμοποιείται μετασχηματιστής κοινού πυρήνα με ένα τύλιγμα στο πρωτεύον και ένα τύλιγμα στο δευτερεύον, αναφέρονται παρακάτω. Ένας MPC για την υλοποίηση ενός σταθμού υπερταχείας φόρτισης για μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων περιγράφεται στο [52]. Περιλαμβάνει έναν μετατροπέα πλήρους γέφυρας για σύνδεση στο δίκτυο μέσης τάσης. Είναι εφικτή επίσης η αμφίδρομη ροή ισχύος. Η διασύνδεση ισχύος μεταξύ του σταδίου αποθήκευσης ενέργειας και των μπαταριών EV εκτελείται με χρήση παράλληλων συνδεδεμένων μετατροπέων ημιγέφυρας. Στο [53] υλοποιείται ένας MPC για την διασύνδεση Φ/Β συστοιχίας, ανεμογεννήτριας και συστοιχίας μπαταριών στο AC δίκτυο. Για την ρύθμιση του ρεύματος δικτύου χρησιμοποιείται ένα μοντέλο που βασίζεται στο d-q μετασχηματισμό, ενώ υπάρχουν και droop ελεγκτές για την κατανομή ισχύος μεταξύ των πηγών της DC πλευράς και του AC δικτύου.

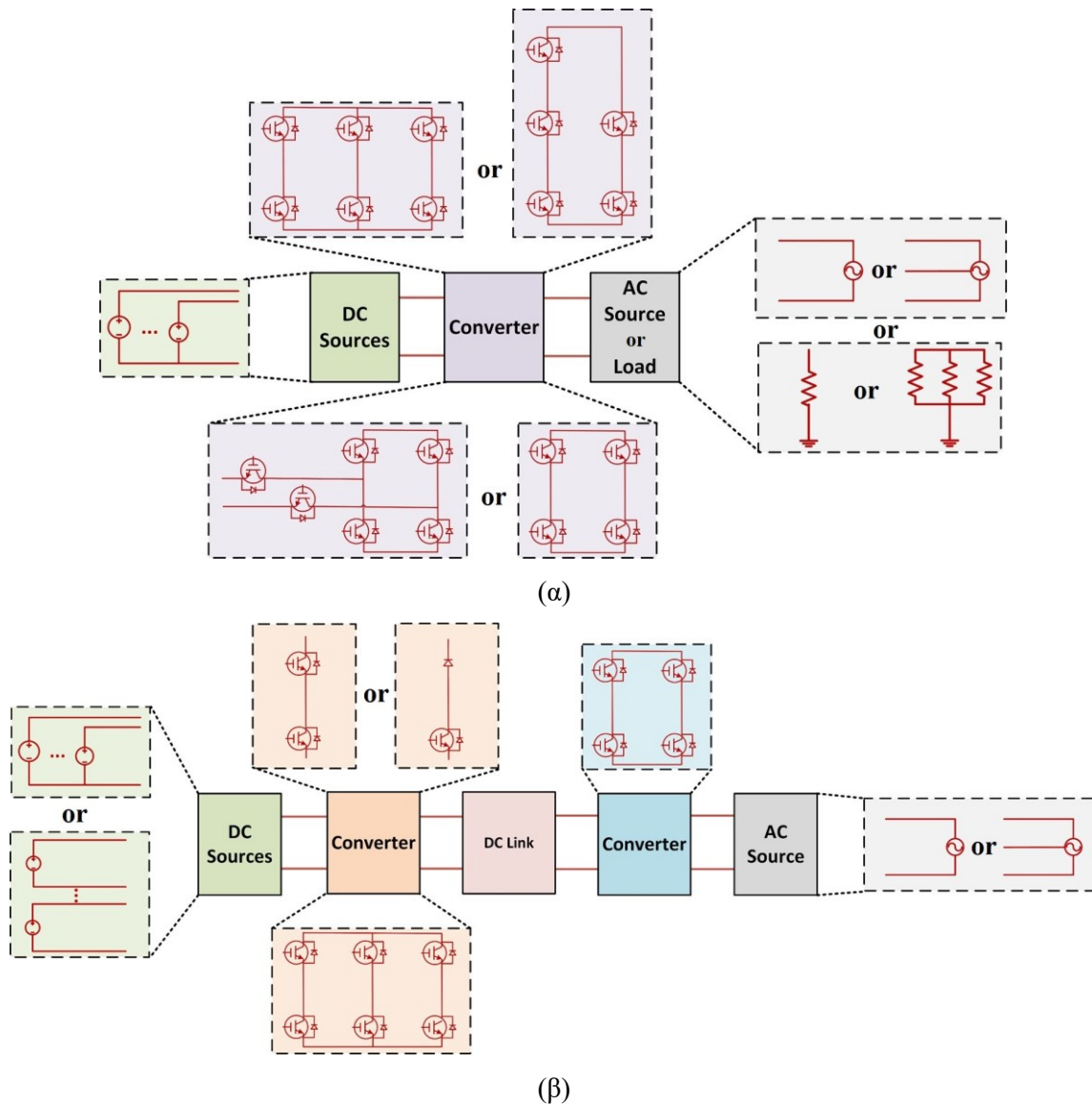
Στον Πίνακα 5 παρατίθεται μια σύγκριση για τους προηγούμενους απομονωμένους DC/AC μετατροπείς τύπου MPC.

**Πίνακας 5:** Σύγκριση μεταξύ απομονωμένων DC/AC μετατροπέων τύπου MPC.

Κριτήρια Σύγκρισης					
Βιβλιογραφικές Αναφορές	Αριθμός Διακοπτικών Στοιχείων	Μονάδα Ελέγχου	Ροή Ισχύος	Εφαρμογή	Αποδοτικότητα
[48]	28	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, EV, Μονοφασικό AC δίκτυο	Μέτρια
[49]	14	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, Κυψέλη Καυσίμου, Μονοφασικό AC δίκτυο, Οικιακό Φορτίο	Δεν αναφέρεται
[50]	28	Εξαρτημένη	Πολυκατευθυντική	PV, Τριφασικό AC δίκτυο	Δεν αναφέρεται
[51]	12	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης, Τριφασική AC πηγή τάσης	Υψηλή
[52]	10	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	EV μπαταρία, Τριφασικό AC δίκτυο	Δεν αναφέρεται
[53]	12	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, Ανεμογεννήτρια, Μονοφασική AC πηγή	Δεν αναφέρεται

### 2.3.2 Μη-απομονωμένοι μετατροπείς DC/AC τύπου MPC

Οι κύριες αρχιτεκτονικές των μη-απομονωμένων DC/AC μετατροπέων τύπου MPC συνοψίζονται στην Εικόνα 5.



**Εικόνα 5:** Κύριες αρχιτεκτονικές μη-απομονωμένων DC/AC μετατροπέων πολλών θυρών: (α) ένας ενιαίος μετατροπέας που δεν διαχωρίζεται με DC-link, (β) μετατροπέας που διαχωρίζεται με την παρουσία DC-link.

Οι MPCs της τοπολογίας που αναπαρίσταται στην Εικόνα 5(α), οι οποίοι δεν διαχωρίζονται με DC-link, περιγράφονται στην συνέχεια. Μια μέθοδος διαχείρισης ισχύος που βασίζεται σε μετατροπέα DC/AC τεσσάρων διακοπών και τριών θυρών προτείνεται στο [54]. Μια πηγή DC, ένας DC-link πυκνωτής και μια θύρα AC μπορούν να συνδεθούν στην συγκεκριμένη τοπολογία. Οι τέσσερις διακόπτες συνδέονται ως δομή γέφυρας-H και δύο πηνία συνδέονται στους δύο βρόχους της γέφυρας αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια προσέγγιση ελέγχου ισχύος με ρύθμιση

του ρεύματος των πηνίων. Η προαναφερθείσα τοπολογία είναι συμπαγής και οικονομικά αποδοτική, επειδή δεν απαιτούνται πρόσθετοι διακόπτες σε σύγκριση με έναν μετατροπέα πλήρους γέφυρας για τον ίδιο αριθμό θυρών. Στο [55], προτείνεται μια μέθοδος μείωσης της κυμάτωσης ισχύος 120 Hz σε μονοφασικούς μετατροπείς DC/AC για εφαρμογές ΑΠΕ. Η AC συνιστώσα απορροφάται από έναν πυκνωτή, που συνδέεται μέσω διακοπτικών στοιχείων και πηνίων στον DC-link πυκνωτή του μετατροπέα. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφεται εντελώς η κυμάτωση των 120 Hz στον DC-link πυκνωτή. Στο [56], παρουσιάζεται ένας MPC, ο οποίος περιλαμβάνει μια DC πηγή και μια θύρα πυκνωτή DC-link. Για τον έλεγχο της πλήρους γέφυρας, ο ένας κλάδος της θα πρέπει να λειτουργεί σε σταθερό κύκλο λειτουργίας για τη φόρτιση ενός πυκνωτή και ο άλλος λειτουργεί σύμφωνα με την ημιτονοειδή τεχνική PWM προκειμένου να παράγει μονοφασική AC τάση εξόδου. Σε κάθε κλάδο της πλήρους γέφυρας, επίσης, συνδέεται ένας διακόπτης ισχύος που λειτουργεί στη θεμελιώδη συχνότητα. Ένας απλοποιημένος MPC σε σχέση με τον προηγούμενο, ο οποίος αναπτύσσεται με την εισαγωγή μόνο ενός διακόπτη ισχύος σε μια H-γέφυρα, προτείνεται στο [57]. Μέσω της τεχνικής PWM διασφαλίζεται ότι το πηνίο της DC εισόδου φορτίζεται με σταθερό κύκλο λειτουργίας, ενώ η H-γέφυρα παράγει την AC έξοδο.

Στο [58], παρουσιάζεται ένας μη-απομονωμένος, αμφίδρομος DC/AC μετατροπέας για εφαρμογές μονοφασικών μικροδικτύων (νησιωτικών και συνδεδεμένων στο δίκτυο). Ο προτεινόμενος μετατροπέας περιλαμβάνει τρεις διακόπτες σε κάθε ένα από τους δύο κλάδους του, που είναι ικανοί για αμφίδρομη DC/DC μετατροπή. Ο μετατροπέας DC/AC μπορεί να λειτουργήσει είτε ως step-down είτε ως step-up μετατροπέας. Ένας μετατροπέας πλήρους γέφυρας που χρησιμοποιεί κάθε έναν από τους κλάδους του ταυτόχρονα ως μετατροπέας Buck-Boost και περιλαμβάνει δύο θύρες DC παρουσιάζεται στο [59]. Η μία από τις θύρες μπορεί να λειτουργήσει σε χαμηλότερη τάση από την άλλη. Στις DC θύρες μπορούν να υποστηρίζονται Φ/Β συστοιχίες, συστοιχίες μπαταριών, συστοιχίες SC και κυψέλες καυσίμου. Η AC πλευρά μπορεί να συνδεθεί είτε στο ηλεκτρικό δίκτυο, είτε σε AC κινητήρα, είτε σε AC φορτίο. Ένας μονοφασικός αμφίδρομος DC/AC MPC για εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας προτείνεται στο [60]. Αν και οι αμφίδρομοι διακόπτες που χρησιμοποιούνται στον MPC τριών θυρών αυξάνουν τις απώλειες αγωγιμότητας, οι απώλειες μεταγωγής (switching) μειώνονται λόγω της λειτουργίας πολλαπλών επιπέδων τάσης του μετατροπέα.

Αρκετές τοπολογίες μη-απομονωμένων DC/AC MPCs που μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία βασίζονται στην αρχιτεκτονική που απεικονίζεται στην Εικόνα 5(β), όπου η DC πλευρά διαχωρίζεται από την AC με την παρουσία ενός DC-link πυκνωτή. Στο [61], ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μαζί με μια Φ/Β συστοιχία διασυνδέονται στο AC δίκτυο, ώστε να παρέχεται ταχεία φόρτιση της μπαταρίας ενός EV. Η τάση στο DC-link διατηρείται σταθερή, ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ισχύς φόρτισης. Ο MPC που περιγράφεται στο [62] αποτελείται από δύο μετατροπείς τριών φάσεων που συνδέονται με μια DC σύνδεση και δύο επαγωγικά φίλτρα που επιτρέπουν τη διασύνδεση των διαφορετικών μονάδων ισχύος με DC φορτίο, AC δίκτυο, συστοιχία μπαταριών και υπερπυκνωτών.

Ένας μη-απομονωμένος MPC, ο οποίος αποτελείται από τρεις αμφίδρομους DC/DC μετατροπείς πλήρους γέφυρας, έναν αμφίδρομο DC/DC μετατροπέα ημιγέφυρας και έναν DC/AC μετατροπέα παρουσιάζεται στο [63]. Στο [64] αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία σχεδιασμού βασισμένη σε έναν γενετικό αλγόριθμο για μη-απομονωμένους DC/AC MPCs για την ελαχιστοποίηση του βάρους, των απωλειών και της κυμάτωσης του ρεύματος εισόδου.

Στον Πίνακα 6, παρατίθεται μια σύγκριση για τους προαναφερθέντες μη-απομονωμένους DC/AC μετατροπείς τύπου MPC.

**Πίνακας 6:** Σύγκριση μεταξύ μη-απομονωμένων DC/AC μετατροπέων τύπου MPC.

Κριτήρια Σύγκρισης					
Βιβλιογραφικές Αναφορές	Αριθμός Διακοπτικών Στοιχείων	Μονάδα Ελέγχου	Ροή Ισχύος	Εφαρμογή	Αποδοτικότητα
[54]	4	Εξαρτημένη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης, DC-link πυκνωτής, AC πηγή	Μέτρια
[55]	12	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης, DC-link πυκνωτής, AC πηγή	Υψηλή
[56]	6	Εξαρτημένη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης, DC-link πυκνωτής, AC φορτίο	Χαμηλή
[57]	5	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης, DC-link πυκνωτής, AC φορτίο	Μέτρια
[58]	6	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγές τάσης, Μπαταρία, DC και AC φορτίο	Δεν αναφέρεται
[59]	4	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	DC πηγή τάσης, Τριφασικό AC φορτίο/δίκτυο	Υψηλή

[60]	10	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία, Μονοφασική AC πηγή	Μέτρια
[61]	10	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	PV, Μπαταρία, EV, Μονοφασικό AC δίκτυο	Μέτρια
[62]	12	Εξαρτημένη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία, EV, Τριφασικό AC δίκτυο, DC φορτίο	Υψηλή
[63]	19	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία, Κυψέλη Καυσίμου, Μονοφασικό AC δίκτυο	Υψηλή
[64]	12	Ευέλικτη	Πολυκατευθυντική	Μπαταρία, SC, AC κινητήρας	Δεν αναφέρεται



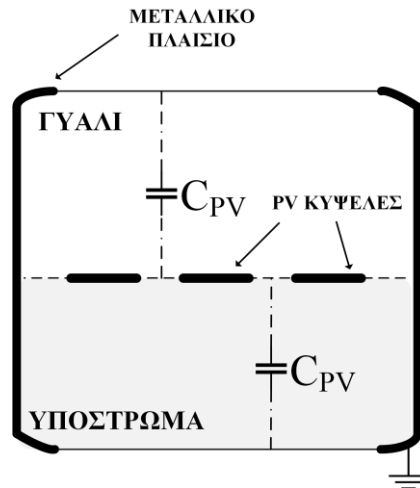
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ

### *3.1 Μελέτη εναλλακτικών τοπολογιών μετατροπέων DC/AC πολλαπλών εισόδων*

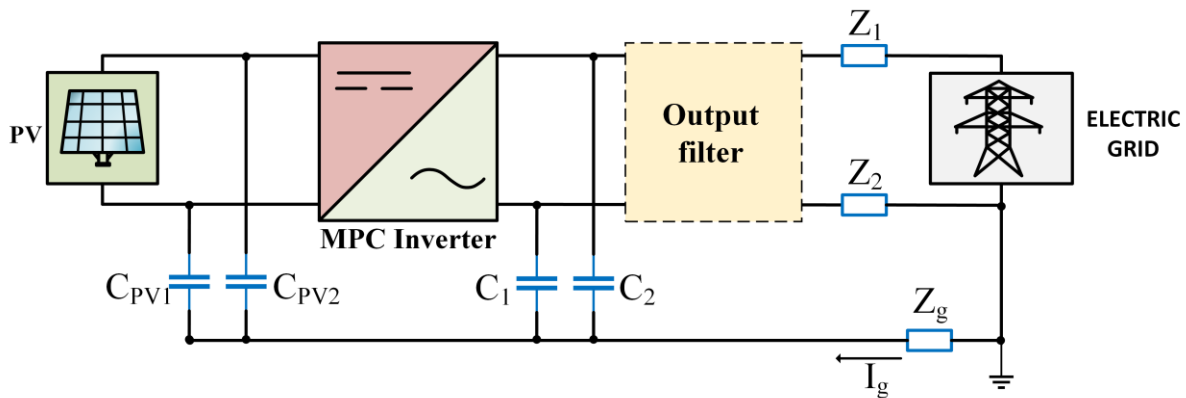
#### **3.1.1 Εισαγωγή**

Γενικά, η βιβλιογραφική ανασκόπηση έδειξε ότι οι υπάρχουσες τοπολογίες MPCs έχουν αναπτυχθεί για την υλοποίηση υβριδικών συστημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν, συνήθως, κάποια πηγή ΑΠΕ (π.χ. Φ/Β συστοιχία) και μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας (π.χ. συστοιχία μπαταριών). Εκτός από τις προηγούμενα, αξιοσημείωτη είναι επίσης η χρησιμοποίηση MPCs για φόρτιση-εκφόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και για οικιακές εφαρμογές. Ως φυσικό επακόλουθο κατά τον σχεδιασμό του εκάστοτε MPC οφείλεται να λαμβάνονται υπόψη ορισμένα χαρακτηριστικά των πηγών. Το μεταλλικό πλαίσιο των φωτοβολταϊκών στοιχείων ενός Φ/Β συστήματος και η γείωση του ηλεκτρικού δικτύου είναι συνδεδεμένα για λόγους προστασίας. Εξαιτίας της συγκεκριμένης σύνδεσης και της παρασιτικής χωρητικής σύζευξης, η οποία αναπτύσσεται μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων και του μεταλλικού πλαισίου, διέρχεται ένα ρεύμα διαρροής γείωσης. Το ρεύμα αυτό είναι ικανό να προκαλέσει μείωση στην απόδοση του μετατροπέα ισχύος και παραμόρφωση στο ρεύμα που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο [65]. Παράλληλα, ιδιαίτερη βαρύτητα αξίζει να δοθεί στην κυμάτωση του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά την φόρτιση και εκφόρτιση μιας μπαταρίας, διότι έχει άμεσο αντίκτυπο στην διάρκεια ζωής της [66].

Η παρασιτική χωρητικότητα ( $C_{PV}$ ) διαφαίνεται στην Εικόνα 6, ενώ στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται με μπλε χρώμα το ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό του ρεύματος διαρροής γείωσης ( $I_g$ ) [65]. Αναλυτικότερα, οι πυκνωτές  $C_{PV1}$  και  $C_{PV2}$  αναπαριστούν τις παρασιτικές χωρητικότητες μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων και του γειωμένου μεταλλικού πλαισίου. Οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  αντικατοπτρίζουν τις παρασιτικές χωρητικότητες, οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ του MPC και της γείωσης του μετατροπέα μέσω των ψυκτρών. Οι σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών του ηλεκτρικού δικτύου αντιπροσωπεύονται από τις  $Z_1$  και  $Z_2$ , ενώ η σύνθετη αντίσταση γείωσης από την  $Z_g$ .



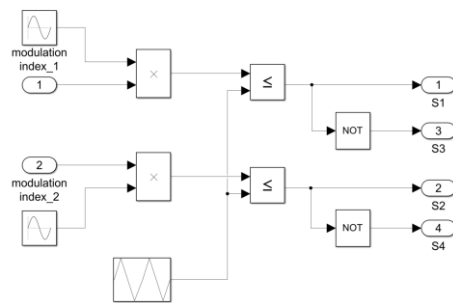
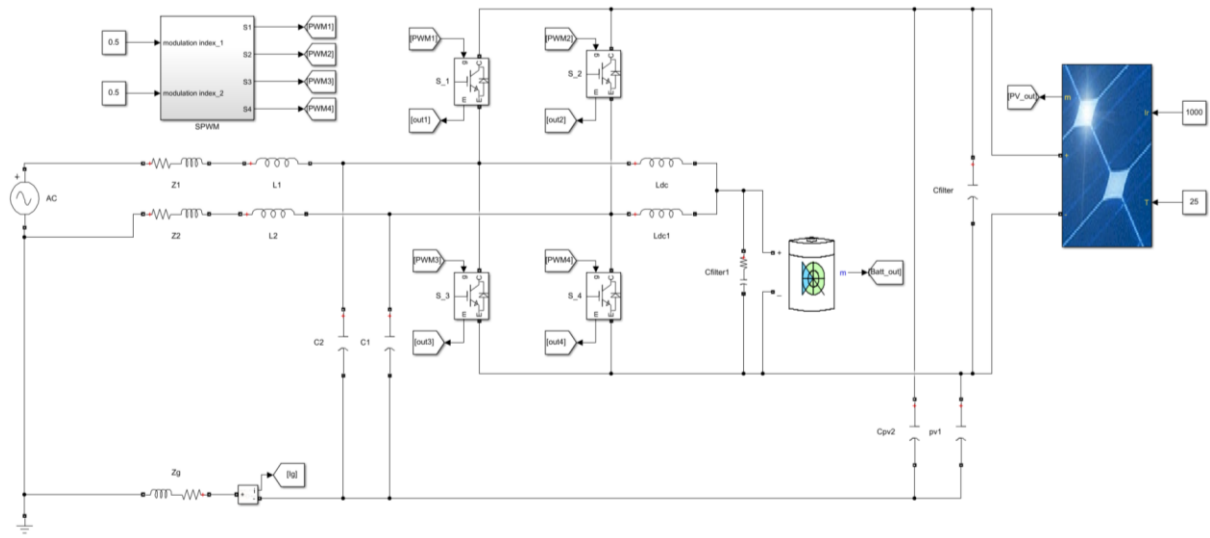
Εικόνα 6: Παρασιτική χωρητικότητα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου [67].



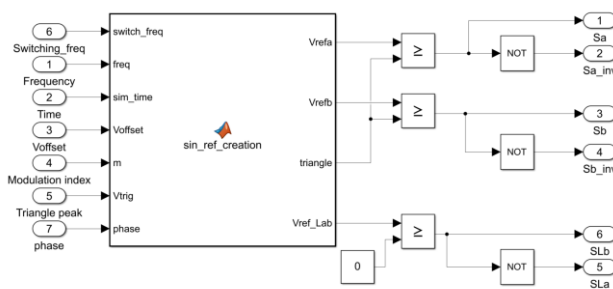
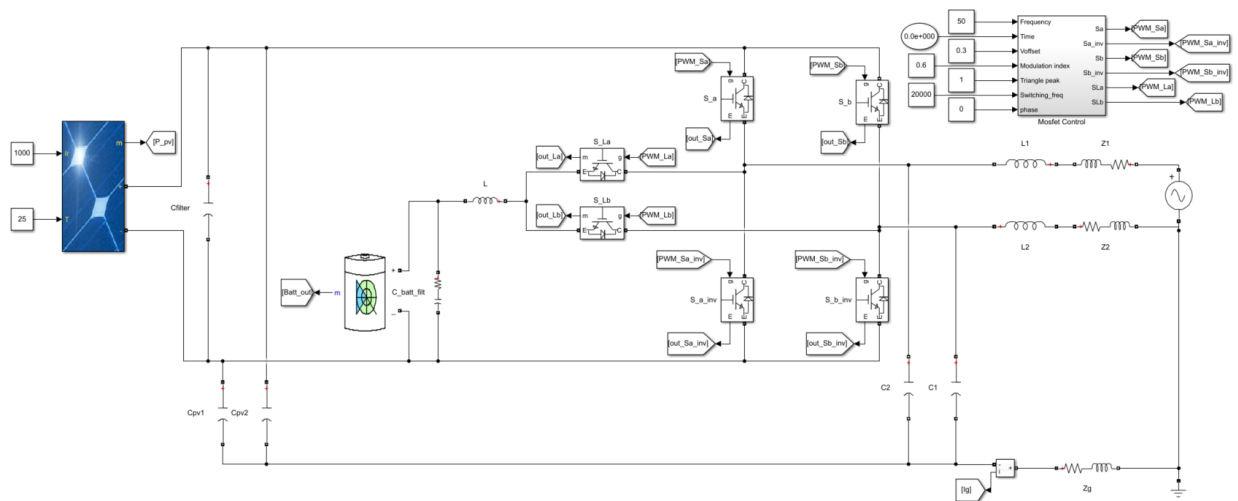
Εικόνα 7: Ισοδύναμο κύκλωμα για τον υπολογισμό του ρεύματος γείωσης-διαρροής ( $I_g$ ).

### 3.1.2 Προσομοίωση εναλλακτικών τοπολογιών

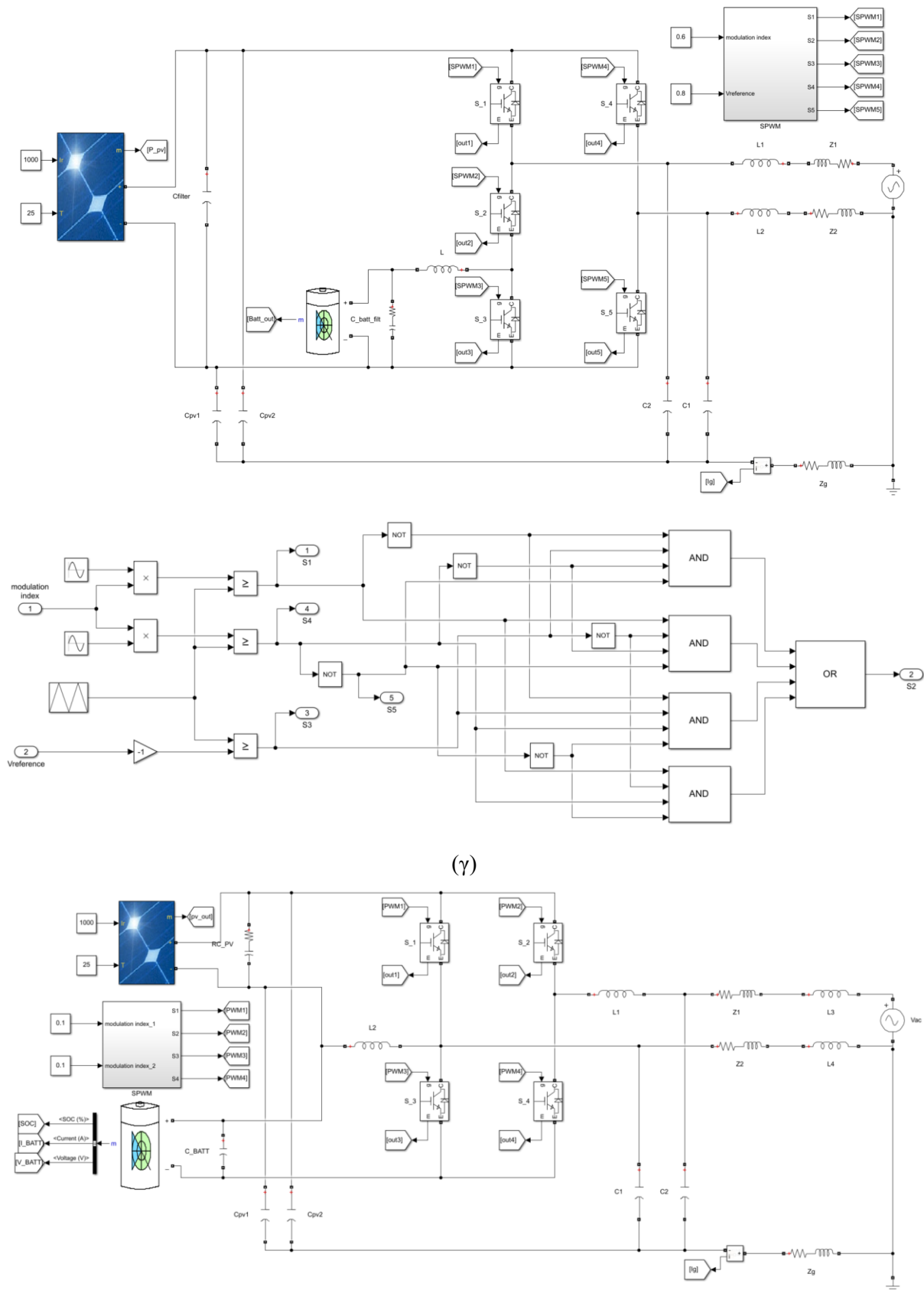
Δεδομένου ότι οι μετατροπείς ισχύος που έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής έχουν την δυνατότητα σύνδεσης με Φ/Β συστοιχία, συστοιχία μπαταριών και EV μπαταρία, διαπιστώθηκε ότι η ακόλουθη μελέτη είναι απαραίτητη ώστε τα συμπεράσματα να ενσωματωθούν στην υλοποίησή τους. Επομένως προσομοιώθηκαν εναλλακτικές τοπολογίες για DC/AC MPCs συνδεδεμένων σε μονοφασικό δίκτυο, οι οποίοι τροφοδοτούνται από Φ/Β συστοιχία και συστοιχία μπαταριών. Η επιλογή υλοποίησης των κυκλωμάτων μέσα από την βιβλιογραφική αναφορά, βασίστηκε στο γεγονός ότι αποτελούνται από μη-απομονωμένο μετατροπέα. Ως φυσικό επακόλουθο χαρακτηρίζονται από λιγότερες απώλειες ισχύος και καλύτερη απόδοση σε σχέση με την απόδοση των γαλβανικά απομονωμένων μετατροπέων MPC. Ταυτοχρόνως, το πλήθος των διακοπτικών στοιχείων, καθώς και ο τρόπος ανταλλαγής ισχύος μεταξύ των θυρών του MPC, αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα για την επιλογή των κυκλωμάτων. Τα μοντέλα Matlab/Simulink των κυκλωμάτων ισχύος και των διατάξεων ελέγχου των εναλλακτικών DC/AC MPCs, τα οποία υλοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.

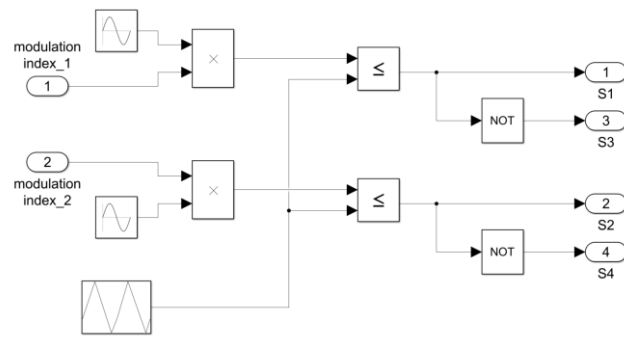


(α)

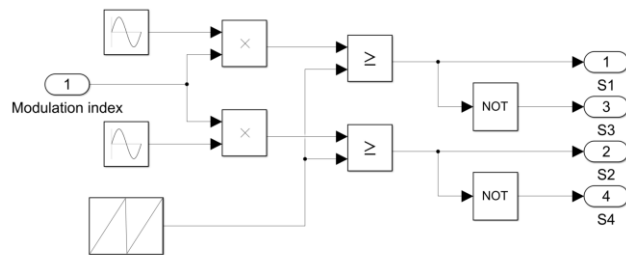
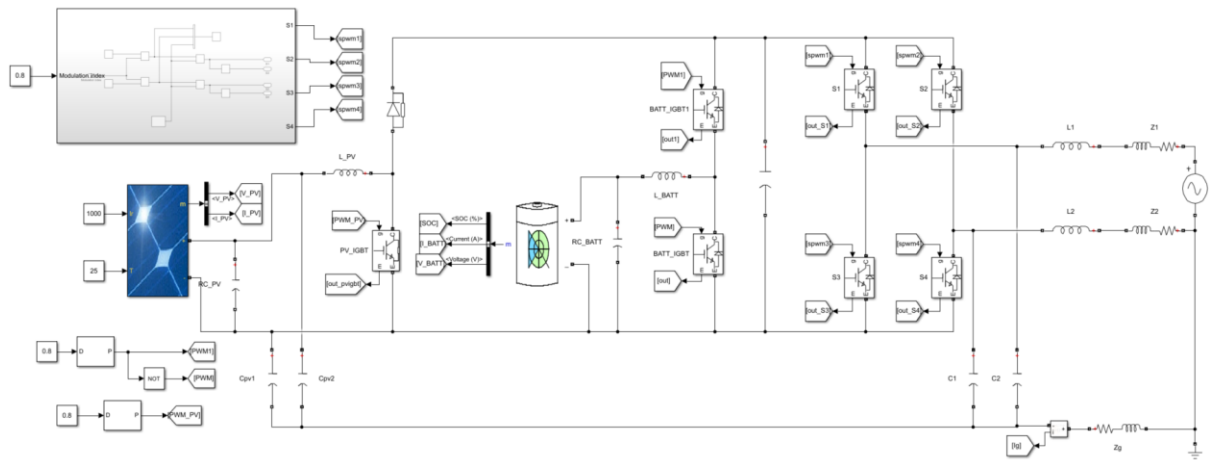


(β)

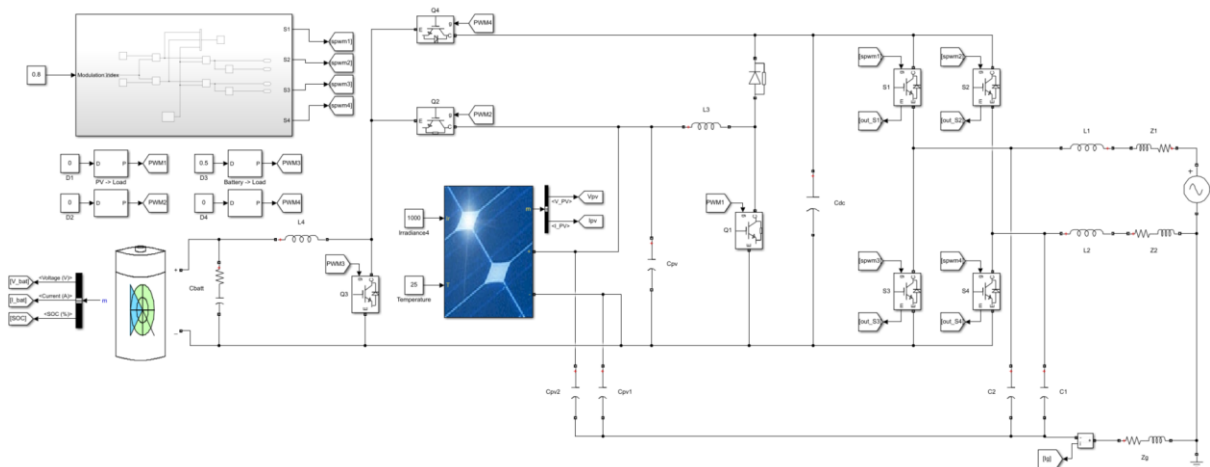


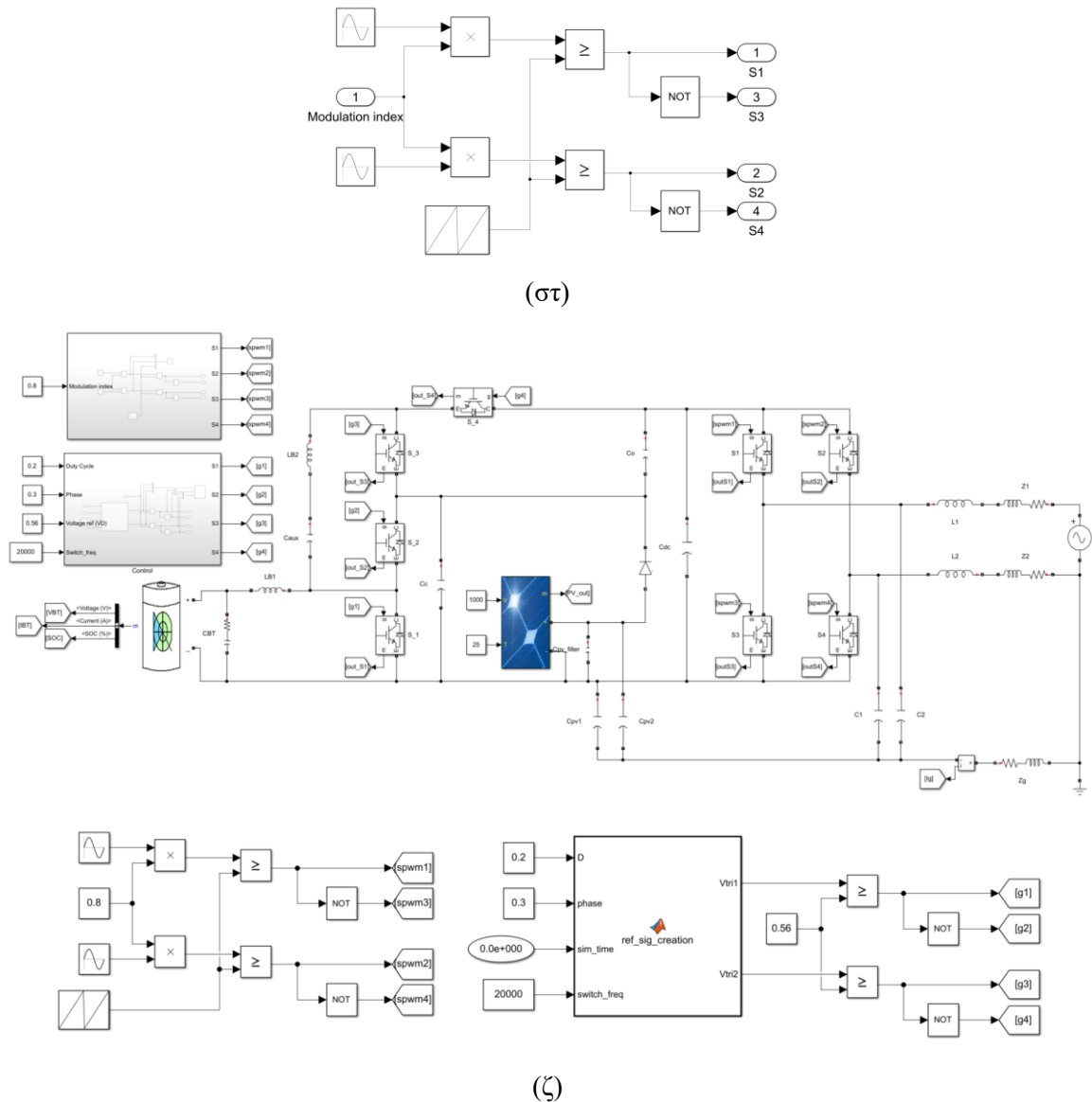


(δ)



(ε)





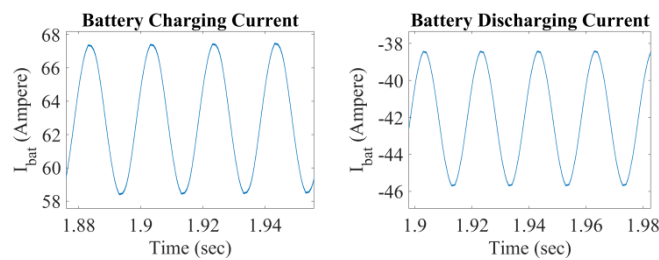
**Εικόνα 8:** Μοντέλα Matlab/Simulink των κυκλωμάτων ισχύος και των διατάξεων ελέγχου των εναλλακτικών μετατροπέων DC/AC πολλαπλών εισόδων που υλοποιήθηκαν.

Ο έλεγχος των σημάτων των διακοπτικών στοιχείων των τοπολογιών (α), (δ), (ε) και (στ) της Εικόνας 8 πραγματοποιείται με την χρήση της τεχνικής PWM. Η τοπολογία (β) της Εικόνας 8 ελέγχεται με ένα συνδυασμό ημιτονοειδούς και σταθερής διαμόρφωσης εύρους παλμών. Όσο αφορά το κύκλωμα (γ) της Εικόνας 8 η τεχνική ελέγχου είναι η PWM, εκτός από τον διακόπτη S2, του οποίου το σήμα προκύπτει μετά από ανάλυση ψηφιακών σημάτων ελέγχου με χάρτη Karnaugh. Τελειώνοντας, ο MPC της Εικόνας 8(ζ) ελέγχεται από κώδικα Matlab, στον οποίο δημιουργούνται δύο τριγωνικά σήματα αναφοράς που συγκρίνονται μεταξύ τους. Διαφοροποιώντας το πλάτος των τριγωνικών σημάτων και την διαφορά φάσης τους προκύπτουν τα σήματα ελέγχου για τις διάφορες λειτουργίες του κυκλώματος ισχύος. Οι τιμές των εξαρτημάτων για το κύκλωμα υπολογισμού του ρεύματος διαρροής γείωσης (βλ. Εικόνα 7) που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις παρατίθενται στον Πίνακα 7. Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφερθεί ότι όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

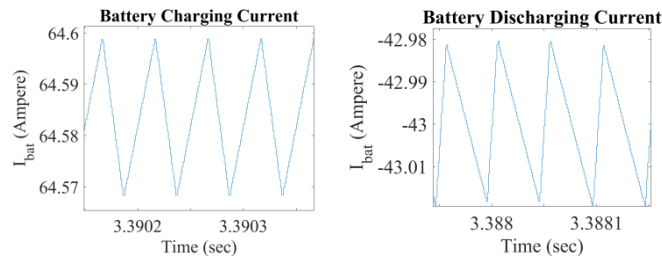
ισχύ εξόδου 2kW και διακοπτική συχνότητα 20kHz. Οι κυματομορφές για τα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης της συστοιχίας των μπαταριών παρουσιάζονται στην Εικόνα 9, ενώ για τα ρεύματα διαρροής γείωσης στην Εικόνα 10. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 8.

**Πίνακας 7:** Τιμές εξαρτημάτων για το κύκλωμα υπολογισμού του ρεύματος διαρροής γείωσης.

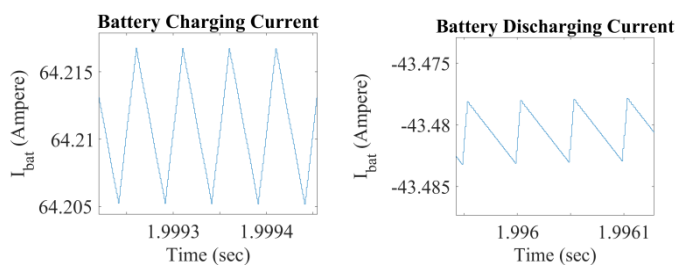
Στοιχείο Κυκλώματος	Τιμή
$C_{PV1}, C_{PV2}$	100 nF
$C_1, C_2$	0.5 nF
$Z_1, Z_2$	$50 * 10^{-3} + j 2 * 10^{-3} \Omega$
$Z_g$	$10 + j 2 * 10^{-3} \Omega$



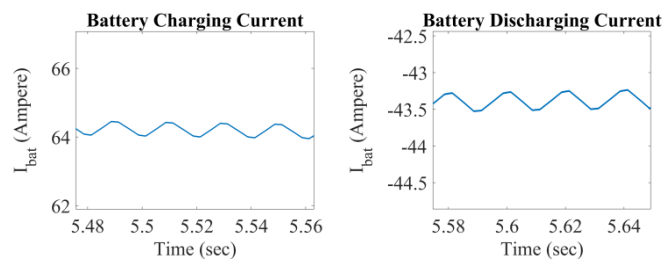
(α)



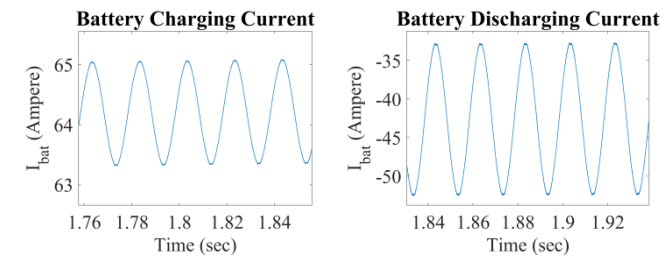
(β)



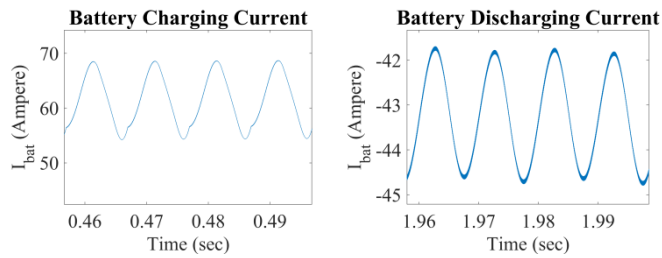
(γ)



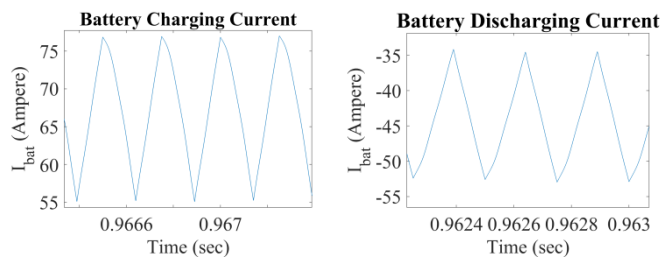
(δ)



(ε)

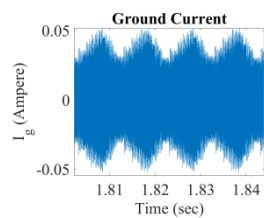


(στ)

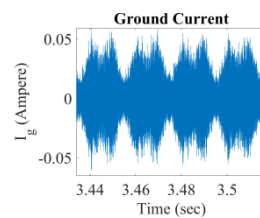


(ζ)

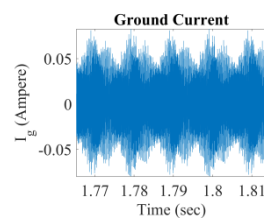
**Εικόνα 9:** Ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της συστοιχίας των μπαταριών για κάθε κύκλωμα που μελετήθηκε στο Matlab/Simulink.



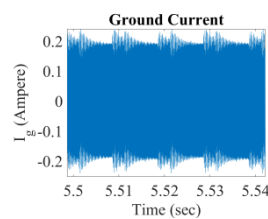
(α)



(β)

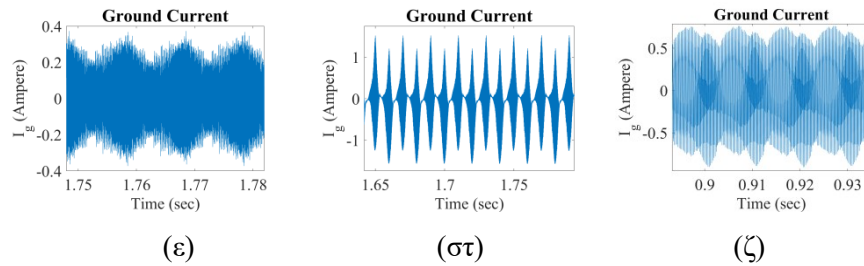


(γ)



(δ)





**Εικόνα 10:** Ρεύματα διαρροής για κάθε κύκλωμα που μελετήθηκε στο Matlab/Simulink.

**Πίνακας 8:** Αποτελέσματα προσομοίωσης των μεγεθών που μελετήθηκαν στο Matlab/Simulink.

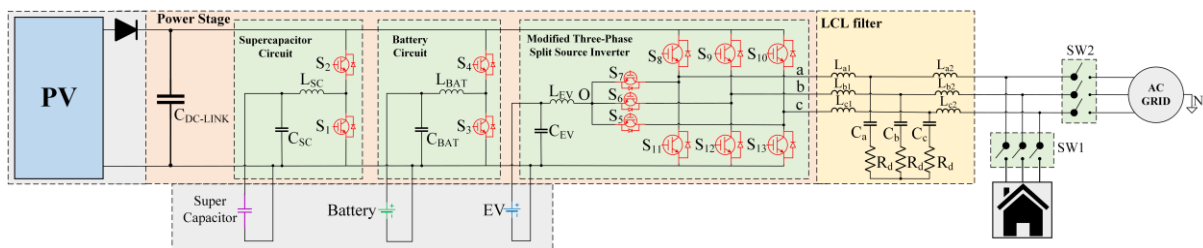
Τοπολογίες (Εικόνα 8)	Μεταβλητές Μελέτης			
	Κυμάτωση ρεύματος φόρτισης συστοιχίας μπαταριών (p-r, σε A)	Κυμάτωση ρεύματος εκφόρτισης συστοιχίας μπαταριών (p-r, σε A)	Θεμελιώδης συχνότητα κυμάτωσης ρεύματος συστοιχίας μπαταριών (σε Hz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA)
Εικόνα 8(α)	9.1	7.35	50	20.14
Εικόνα 8(β)	0.031	0.044	20000	25
Εικόνα 8(γ)	0.02	0.007	20000	30
Εικόνα 8(δ)	0.4	0.27	50	120
Εικόνα 8(ε)	1.9	19.5	50	231.2
Εικόνα 8(στ)	14	3.2	100	420
Εικόνα 8(ζ)	22	17	5000	394

Παρατηρείται ότι το χαμηλότερο ρεύμα κυμάτωσης της μπαταρίας επιτυγχάνεται με την τοπολογία (γ) της Εικόνας 8 κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση. Η υψηλότερη συχνότητα κυματισμού εμφανίζεται στα κυκλώματα των (β) και (γ). Και οι δύο τοπολογίες περιέχουν λιγότερα παθητικά στοιχεία σε σύγκριση με τα υπόλοιπα. Το υψηλότερο ρεύμα διαρροής γείωσης παράγεται στην κύκλωμα της Εικόνας 8(στ). Η τοπολογία (α), που περιέχει τον μικρότερο αριθμό διακοπτικών στοιχείων, παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή ρεύματος διαρροής γείωσης. Ωστόσο, οι τιμές του ρεύματος διαρροής που αναπτύχθηκε στις τοπολογίες που παρουσιάζονται στην Εικόνα 8(στ) και (ζ), είναι υψηλότερες από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή των 300 mA που έχει οριστεί από το πρότυπο VDE 0126-1-1 [65].

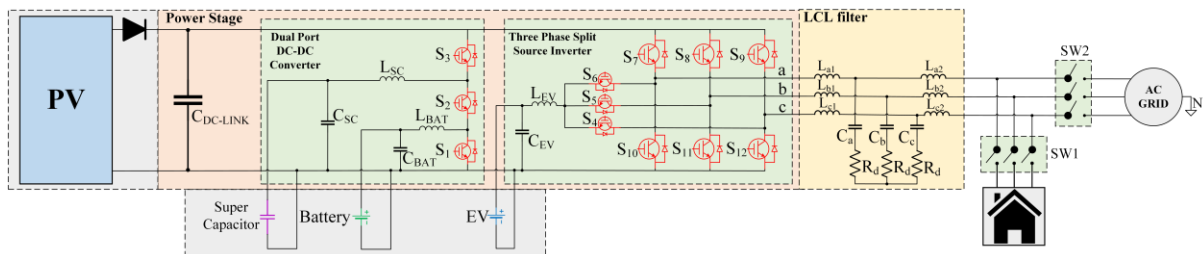
## 3.2 Οι τοπολογίες που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή

### 3.2.1 Εισαγωγή

Στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή προτείνονται δύο τοπολογίες ενός μετατροπέα DC/AC MPC, όπου σε αντίθεση με την χρησιμοποίηση ξεχωριστών μετατροπέων DC/DC και DC/AC σε κάθε θύρα εισόδου/εξόδου, μειώνεται ο αριθμός των εξαρτημάτων, η πολυπλοκότητα και το κόστος του συνολικού κυκλώματος. Με βάση τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την μελέτη της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και τις προσομοιώσεις λειτουργίας των υπαρχόντων διατάξεων μετατροπέων πολλαπλών εισόδων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.1.2 πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση των κυκλωμάτων ισχύος που παρουσιάζονται στην Εικόνα 11. Οι δύο τοπολογίες περιλαμβάνουν μια τριφασική AC έξοδο (είτε AC φορτίο είτε ηλεκτρικό δίκτυο) που έχουν την δυνατότητα διασύνδεσης με έως και τέσσερις διαφορετικές DC πηγές (Φ/Β συστοιχία, συστοιχία μπαταριών, συστοιχία SC, μπαταρία EV). Η Φ/Β συστοιχία συνδέεται απευθείας με το DC-link, μειώνοντας έτσι τον συνολικό αριθμό διακοπτικών και παθητικών στοιχείων, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η ικανότητα εκτέλεσης του αλγορίθμου MPPT. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο τοπολογιών έγκειται στον τρόπο σύνδεσης της συστοιχίας μπαταριών και της συστοιχίας SC στο DC-link. Για την Τοπολογία 1 [Εικόνα 11 (α)] η προαναφερθείσα σύνδεση πραγματοποιείται μέσω πηνίων και παράλληλων κλάδων που δομούνται από ημιαγωγικούς διακόπτες. Αντιθέτως, για την Τοπολογία 2 [Εικόνα 11 (β)] αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός παράλληλου κλάδου, ο οποίος αποτελείται από έναν μετατροπέα DC/DC δύο εισόδων (dual-port DC/DC converter).



(α)



(β)

**Εικόνα 11:** Τα δύο εναλλακτικά κυκλώματα ισχύος που σχεδιάστηκαν στο πλαίσιο της εργασίας: (α) Τοπολογία 1, (β) Τοπολογία 2.

Σύμφωνα με την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι μονοφασικοί DC/AC MPCs, οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί έως σήμερα διαθέτουν έως τρεις DC πηγές και
- Οι τριφασικοί DC/AC MPCs, απαιτούν μεγαλύτερο αριθμό διακοπτικών στοιχείων που λειτουργούν σε υψηλή διακοπτική συχνότητα σε σύγκριση με τις διατάξεις της Εικόνα 11, ενώ παράλληλα έχουν την δυνατότητα διασύνδεσης έως και τριών DC πηγών.

Σε αντίθεση, οι προτεινόμενες τοπολογίες διαθέτουν τριφασική AC έξοδο και δέχονται έως και τέσσερις DC πηγές, εξασφαλίζοντας όλες τις πιθανές ροές ισχύος μεταξύ των διαφορετικών θυρών. Σε σύγκριση με την υλοποίηση με ξεχωριστό DC/DC μετατροπέα σε κάθε DC πηγή και διασύνδεσή τους σε κοινό DC-link στην είσοδο της τριφασικής DC/AC γέφυρας [βλ. Εικόνα 1(α)], οι προτεινόμενες τοπολογίες υπερτερούν στην απευθείας σύνδεσης της Φ/Β συστοιχίας στο DC-link. Παράλληλα, άλλο ένα πλεονέκτημα είναι η χρησιμοποίηση λιγότερων διακοπτικών στοιχείων που λειτουργούν σε υψηλή διακοπτική συχνότητα, καθώς οι διακόπτες  $S_5$ ,  $S_6$ ,  $S_7$  για την Τοπολογία 1 [Εικόνα 11(α)] και  $S_4$ ,  $S_5$ ,  $S_6$  για την Τοπολογία 2 [Εικόνα 11 (β)] λειτουργούν στα 50Hz, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Μια αναλυτική σύγκριση εμφανίζεται στον Πίνακα 9.

**Πίνακας 9:** Σύγκριση μεταξύ των προτεινόμενων διατάξεων.

Κριτήρια Σύγκρισης	Τοπολογία		
	Τοπολογία 1	Τοπολογία 2	Με ξεχωριστούς DC/DC και DC/AC μετατροπείς (π.χ. [68])
Αριθμός Πηνίων (το AC φίλτρο εξόδου δεν συμπεριλαμβάνεται)	3	3	4
Αριθμός Πυκνωτών (το AC φίλτρο εξόδου δεν συμπεριλαμβάνεται)	4	4	8
Αριθμός διακοπτικών στοιχείων	10 (υψηλής διακοπτικής συχνότητας) & 3 (χαμηλής διακοπτικής συχνότητας)	9 (υψηλής διακοπτικής συχνότητας) & 3 (χαμηλής διακοπτικής συχνότητας)	13 (υψηλής διακοπτικής συχνότητας)

Αριθμός διόδων	10 (υψηλής διακοπτικής συχνότητας) & 3 (χαμηλής διακοπτικής συχνότητας)	9 (υψηλής διακοπτικής συχνότητας) & 3 (χαμηλής διακοπτικής συχνότητας)	13 (υψηλής διακοπτικής συχνότητας)
Αριθμός DC εισόδων	4	4	4
AC έξοδος	Τριφασική	Τριφασική	Τριφασική

### **3.2.2 Δομή τοπολογιών ισχύος**

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11, οι δύο προτεινόμενες τοπολογίες παρουσιάζουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά ως προς την αρχιτεκτονική τους. Αποτελούν, αρχικά, MPCs που δέχονται έως και τέσσερις DC πηγές και μια AC θύρα εξόδου. Πιο αναλυτικά, οι DC θύρες χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση Φ/Β συστοιχίας, συστοιχίας SC, μπαταρίας EV και συστοιχίας μπαταριών. Η AC πλευρά, επιπρόσθετα, μπορεί να συνδεθεί είτε με AC φορτίο είτε με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η Φ/Β συστοιχία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, συνδέεται απευθείας στον πυκνωτή του DC-link ( $C_{DC-link}$ ). Η υλοποίηση, εν συνεχεία, του τριφασικού split-source inverter (Three-Phase SSI) της Εικόνας 11, ο οποίος είναι ίδιος και για τις δύο τοπολογίες, στηρίχτηκε στις εργασίες [69] και [70].

Στο [69] παρουσιάζεται ένας μονοφασικός SSI, οποίος αποτελείται από μια DC πηγή και έναν DC-link πυκνωτή. Για να ελεγχθεί η πλήρης γέφυρα του μετατροπέα, ο ένας κλάδος της γέφυρας θα πρέπει να λειτουργεί με σταθερό σήμα αναφοράς (duty cycle) για να φορτίζεται το πηνίο. Αντιθέτως ο άλλος κλάδος ελέγχεται με ημιτονοειδή PWM τεχνική για να παραχθεί το μονοφασικό AC σήμα εξόδου. Σε κάθε κλάδο της γέφυρας, επίσης, συνδέεται ένας διακόπτης, ο οποίος λειτουργεί στην θεμελιώδη συχνότητα. Στο [70] παρατίθεται ένας DC/AC SSI, ο οποίος περιλαμβάνει μια DC πηγή και έναν DC-link πυκνωτή ως εισόδους και μια τριφασική AC έξοδο. Το πηνίο της DC πηγής συνδέεται μέσω τριών διόδων σε κάθε κλάδο της τριφασικής γέφυρας. Μια μόνο μεταβλητή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής ισχύος μεταξύ DC και AC πλευράς.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, στην παρούσα διατριβή σχεδιάστηκε ο τριφασικός SSI της Εικόνας 11. Πιο αναλυτικά, το πηνίο ( $L_{EV}$ ) της θύρας που προορίζεται για την σύνδεση της μπαταρίας του EV, ενώνεται σε κάθε κλάδο της τριφασικής γέφυρας μέσω τριών διακοπτικών στοιχείων και συγκεκριμένα IGBTs, ώστε να επιτευχθεί αμφίδρομη ροή ισχύος. Ένας από τους τρεις κλάδους της τριφασικής γέφυρας θα πρέπει να λειτουργεί σε σταθερό duty cycle για την DC/DC μετατροπή. Οι υπόλοιποι δύο ελέγχονται με τροποποιημένο ημιτονοειδές σήμα αναφοράς και είναι υπεύθυνοι για την DC/AC μετατροπή. Οι διακόπτες  $S_5, S_6, S_7$  για την Τοπολογία 1 και  $S_4, S_5, S_6$  για την Τοπολογία 2 λειτουργούν στην θεμελιώδη συχνότητα.

Όσο αφορά την σύνδεση της συστοιχίας μπαταριών και της συστοιχίας SC στο DC-link για την Τοπολογία 1 [Εικόνα 11 (α)], πραγματοποιείται μέσω δύο ξεχωριστών υποκυκλωμάτων ισχύος. Κάθε ένα από τα υποκυκλώματα λαμβάνει ως είσοδο την αντίστοιχη πηγή (συστοιχία SC, συστοιχία μπαταριών) και αποτελείται από έναν πυκνωτή ( $C_{SC}$ ,  $C_{BAT}$ ), συνδεδεμένο παράλληλα για φιλτράρισμα και ένα πηνίο ( $L_{SC}$ ,  $L_{BAT}$ ) σε σειρά για φόρτιση και εκφόρτιση, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές ροές ισχύος. Η αμφίδρομη ροή του ρεύματος είναι εφικτή μέσω της χρησιμοποίησης διακοπών τύπου IGBT με αντιπαράλληλη δίοδο. Αντιθέτως, στην Τοπολογία 2 [Εικόνα 11 (β)] η σύνδεση της συστοιχίας των μπαταριών και της συστοιχίας SC στο DC-link πραγματοποιείται μέσω ενός DC/DC μετατροπέα δύο εισόδων. Οι δύο πυκνωτές ( $C_{SC}$ ,  $C_{BAT}$ ) χρησιμοποιούνται για φιλτράρισμα, ενώ τα πηνία ( $L_{SC}$ ,  $L_{BAT}$ ) φορτίζουν και εκφορτίζουν με το κατάλληλο έλεγχο, ώστε να φορτίζεται και να εκφορτίζεται η εκάστοτε πηγή. Οι διακόπτες που επιλέχθηκαν είναι IGBT με αντιπαράλληλη δίοδο, για να εξασφαλιστεί η αμφίδρομη ροή του ρεύματος και άρα της ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μετατροπέας δύο εισόδων που έχει περιγραφεί προηγουμένως, βασίζεται στην εργασία [71]. Στον μετατροπέα που προτείνεται στο [71] χρησιμοποιούνται DC πηγές ως είσοδοι, από τις οποίες η μία διατηρεί την τάση στο DC-link σταθερή και στην άλλη είναι εφικτή η ρύθμιση της ισχύος που παράγει. Αντιθέτως στον μετατροπέα της παρούσας διατριβής χρησιμοποιούνται ως είσοδοι μία συστοιχία μπαταριών και μία συστοιχία SC, όπου και στις δυο πηγές είναι εφικτή η ρύθμιση της ισχύος που παράγουν και απορροφούν.

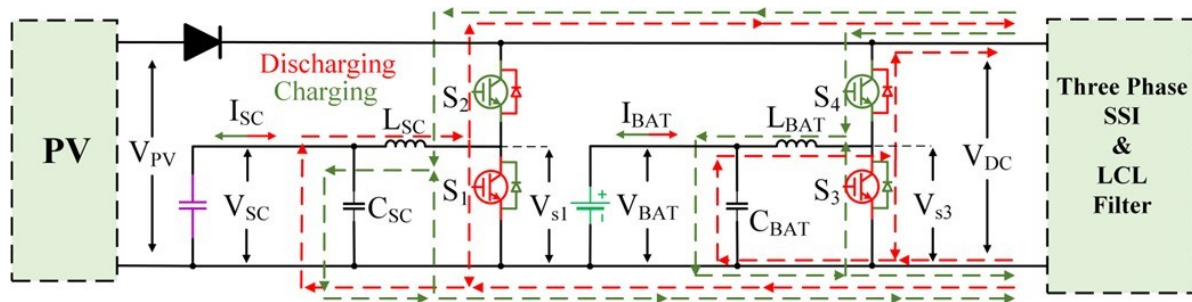
Η βασική αρχή λειτουργίας και οι στρατηγικές ελέγχου των διακοπών ισχύος παρουσιάζονται αναλυτικά στην ακόλουθη ενότητα.

### **3.2.3 Περιγραφή αρχής λειτουργίας και έλεγχος σημάτων οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων**

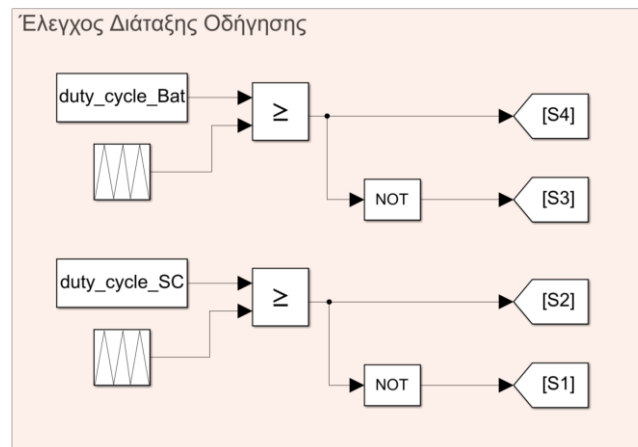
Με βάση το ισοζύγιο ισχύος μεταξύ των θυρών των προτεινόμενων MPC, μπορούν να υποστηριχθούν πολλαπλά εναλλακτικά σενάρια ροής ισχύος, όπως υποδεικνύεται με βέλη στο σχήμα της Εικόνα 1(β). Για αυτό τον λόγο ο κατάλληλος έλεγχος των διαφορετικών πηγών είναι απαραίτητος για την εύρυθμη λειτουργία του κυκλώματος ισχύος.

Θα αναλυθεί αρχικά ο έλεγχος της ροής ισχύος για τους DC/DC μετατροπείς της Τοπολογίας 1, δηλαδή των θυρών όπου συνδέεται η συστοιχία μπαταριών και η συστοιχία SC. Με κατάλληλο έλεγχο των διακοπτικών στοιχείων μπορεί να επιτευχθεί φόρτιση ή εκφόρτιση είτε της συστοιχίας των μπαταριών είτε των υπερπυκνωτών. Η πορεία του ρεύματος φαίνεται στην Εικόνα 12. Μια σταθερά (duty cycle) για κάθε πηγή εισόδου συγκρίνεται με ένα τριγωνικό σήμα (reference triangle) με συχνότητα ίση με την επιθυμητή διακοπτική συχνότητα του MPC (Εικόνα 13). Εφόσον η τιμή του duty cycle είναι μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή του τριγωνικού παλμού, τότε ο διακόπτης τίθεται σε κατάσταση OFF, διαφορετικά είναι ON. Οι διακόπτες  $S_1$ ,  $S_3$  λειτουργούν συμπληρωματικά με τους

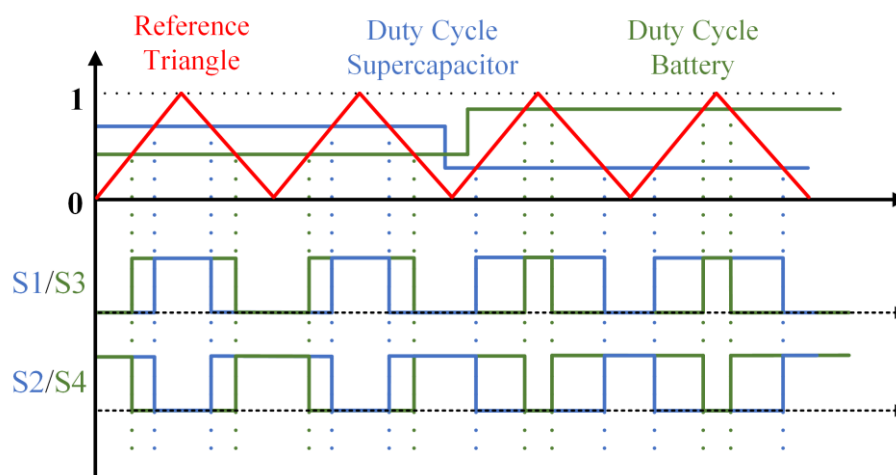
$S_2, S_4$  αντιστοίχως. Οι κυματομορφές λειτουργίας και οι παλμοί οδήγησης των διακοπών απεικονίζονται στην Εικόνα 14.



**Εικόνα 12:** Ροή ρεύματος κατά την φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας και του SC.

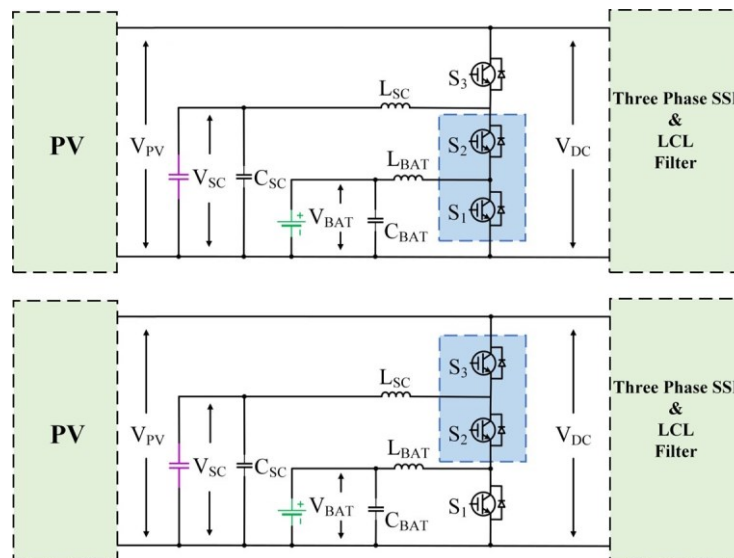


**Εικόνα 13:** Έλεγχος διάταξης οδήγησης για τους κλάδους διασύνδεσης της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή στην Τοπολογία 1.



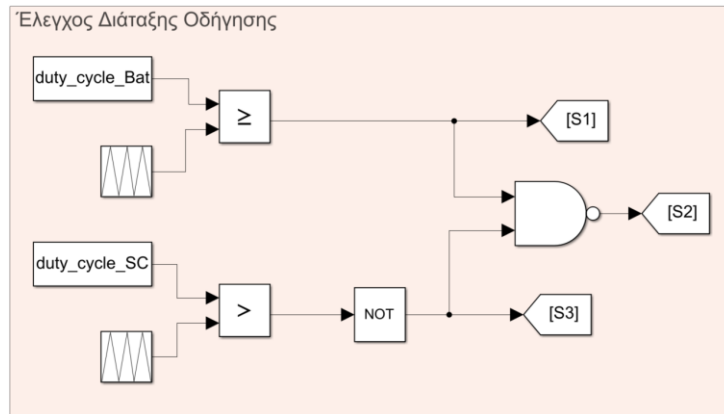
**Εικόνα 14:** Κυματομορφές λειτουργίας και παλμοί οδήγησης των διακοπών  $S_1, S_2, S_3, S_4$  της Τοπολογίας 1.

Όσο αφορά την Τοπολογία 2 ο έλεγχος της συστοιχίας των μπαταριών και της συστοιχίας SC με βάση τον DC/DC μετατροπέα δύο εισόδων περιγράφεται ακολούθως. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν οι  $S_1$ ,  $S_2$  αντιμετωπιστούν ως ένας διακόπτης τότε μαζί με τη θύρα της συστοιχίας SC, το πηνίο  $L_{SC}$  και τον διακόπτη  $S_3$  μπορούν να θεωρηθούν ως ένας μετατροπέας Buck-Boost, ίδιος με τον αντίστοιχο της Τοπολογίας 1. Ομοίως για την θύρα της συστοιχίας των μπαταριών αν θεωρηθούν ως ένας διακόπτης οι  $S_3$ ,  $S_2$ . Ως φυσικό επακόλουθο και σύμφωνα με την Εικόνα 15 παρατηρείται ότι υπάρχει ένας κοινός διακόπτης ( $S_2$ ), ο οποίος λειτουργεί ώστε ο μετατροπέας να μπορεί να παρέχει ή να απορροφήσει ενέργεια ταυτόχρονα και από τις δύο πηγές ή μεμονωμένα από την κάθε μια ξεχωριστά. Για την παραγωγή των παλμών οδήγησης για τους διακόπτες  $S_1$  και  $S_3$  ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με εκείνη των παράλληλων DC κλάδων της Τοπολογίας 1. Δηλαδή δύο σήματα αναφοράς, ένα για κάθε διακόπτη, συγκρίνονται με έναν τριγωνικό παλμό από 0 έως 1, ο οποίος έχει συχνότητα ίση με την επιθυμητή διακοπτική συχνότητα. Για όσο χρόνο η τιμή του σήματος αναφοράς είναι μεγαλύτερη από την τιμή του πλάτους του τριγωνικού παλμού, τότε ο διακόπτης  $S_1$  είναι ανοικτός, διαφορετικά είναι κλειστός. Αντίθετα, ο διακόπτης  $S_3$  είναι ανοικτός για όσο χρονικό διάστημα η τιμή του αντίστοιχου σήματος αναφοράς είναι μικρότερη από την τιμή του πλάτους του τριγωνικού παλμού, αλλιώς είναι κλειστός. Ο παλμός οδήγησης του διακόπτη  $S_2$  αποτελεί τον λογικό συνδυασμό NAND των παλμών οδήγησης των διακοπτών  $S_1$  και  $S_3$ . Ο τρόπος ελέγχου και οι παλμοί οδήγησης αναπαρίστανται στην Εικόνα 16 και στην Εικόνα 17, αντίστοιχα.

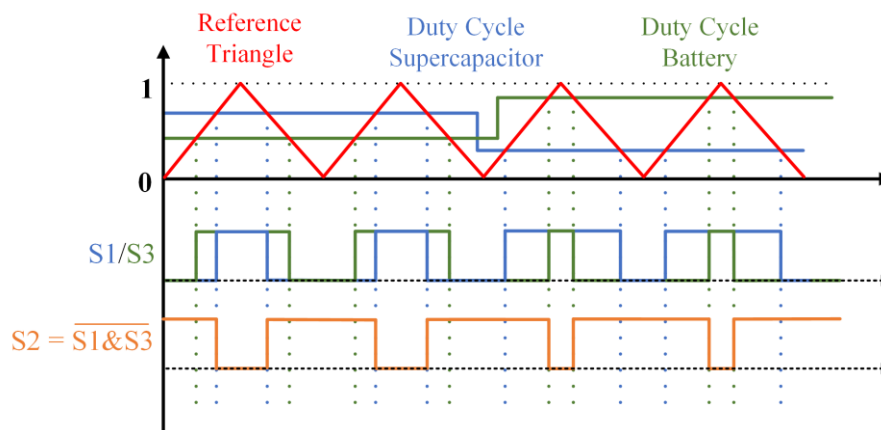


Εικόνα 15: Βασική λειτουργία DC/DC μετατροπέα δύο εισόδων για την Τοπολογία 2.





**Εικόνα 16:** Έλεγχος διάταξης οδήγησης για τους κλάδους διασύνδεσης της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή στην Τοπολογία 2.

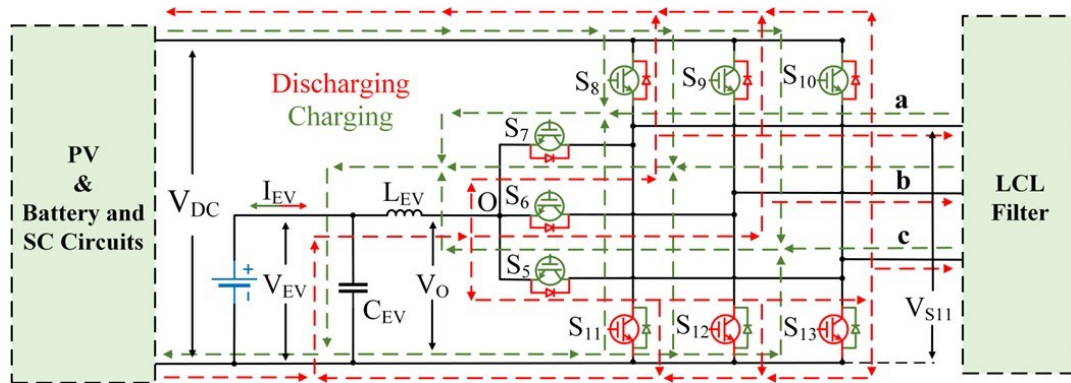


**Εικόνα 17:** Κυματομορφές λειτουργίας και παλμοί οδήγησης των διακοπών  $S_1, S_2, S_3$  της Τοπολογίας 2.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο τριφασικός SSI των προτεινόμενων κυκλωμάτων είναι ίδιος και για τις δύο τοπολογίες. Για λόγους ευκολίας στην επεξήγηση της μεθόδου ελέγχου, θα χρησιμοποιηθούν ως διακόπτες αναφοράς οι  $S_5$  έως  $S_{13}$  της Τοπολογίας 1. Αντίστοιχα συμπεράσματα όμως ισχύουν και για τους διακόπτες  $S_4$  έως  $S_{12}$  της Τοπολογίας 2. Η τριφασική γέφυρα, αρχικά, αποτελείται από τρεις κλάδους, ένας για κάθε φάση του AC δικτύου (a, b, c). Κάθε κλάδος της γέφυρας, με την σειρά του, περιλαμβάνει δύο IGBT με αντιπαράλληλες διόδους, οι οποίοι λαμβάνουν συμπληρωματικούς παλμούς. Επομένως, το  $S_8$  είναι συμπληρωματικό του  $S_{11}$  για τη φάση a, το  $S_9$  του  $S_{12}$  για τη φάση b και το  $S_{10}$  του  $S_{13}$  για τη φάση c, αντίστοιχα. Η μπαταρία του EV, από την άλλη πλευρά, συνδέεται σε σειρά με το  $L_{EV}$ , το οποίο φορτίζεται και εκφορτίζεται σε κατάλληλους κύκλους που ρυθμίζονται από τον έλεγχο των διακοπών ισχύος. Το  $L_{EV}$ , επίσης, συνδέεται με τρία IGBT με αντιπαράλληλες διόδους ( $S_5, S_6, S_7$ ), το καθένα συνδεδεμένο σε έναν κλάδο (a, b, c) του κυκλώματος πλήρους γέφυρας. Ως αποτέλεσμα της συγκεκριμένης σύνδεσης, υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ του ελέγχου της τριφασικής γέφυρας και της μπαταρίας του EV, η οποία

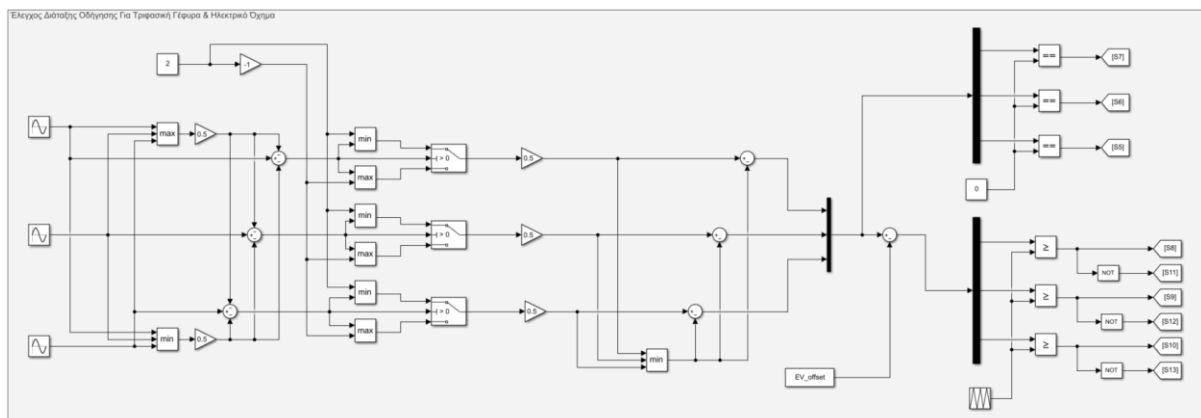


αναλύεται περαιτέρω στη συνέχεια. Στο σχήμα της Εικόνας 18, εμφανίζονται οι ροές ρεύματος του τριφασικού SSI με την μπαταρία EV.

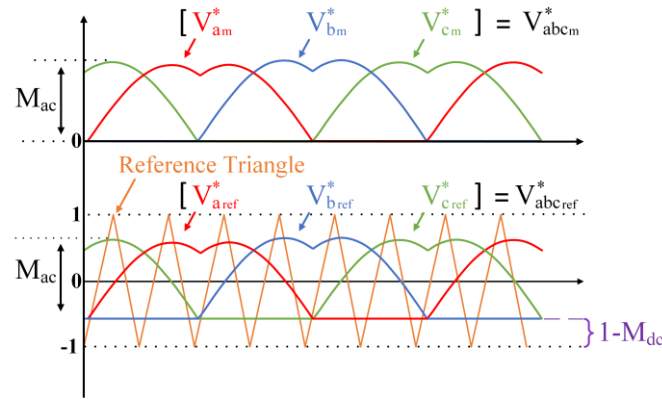


**Εικόνα 18:** Ροή ρεύματος κατά την φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας του EV.

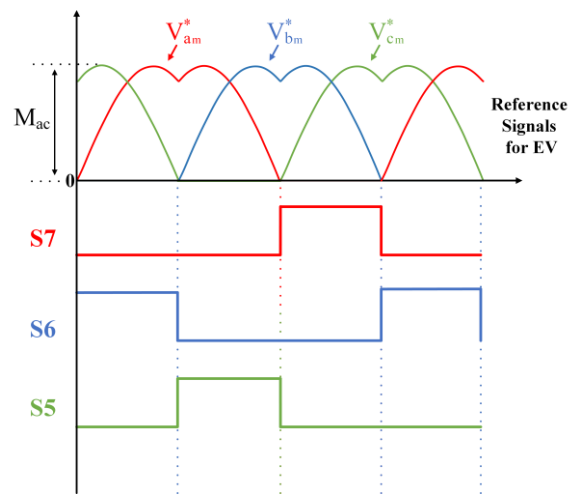
Προκειμένου να παραχθούν οι κατάλληλοι παλμοί οδήγησης για τα IGBT του κυκλώματος πλήρους γέφυρας και της μπαταρίας του EV, παράγονται τρία συμμετρικά ημίτονα αναφοράς, με διαφορά φάσης  $120^\circ$ . Στη συνέχεια, τα τρία ημιτονοειδή κύματα τροποποιούνται όπως περιγράφεται στην Εικόνα 19, παράγοντας τα σήματα αναφοράς που απεικονίζονται στη Εικόνα 20. Ο δείκτης AC διαμόρφωσης ( $M_{ac}$ ) αντιπροσωπεύει το πλάτος του σήματος αναφοράς και ο δείκτης DC διαμόρφωσης ( $M_{dc}$ ) αντιστοιχεί στο offset του σήματος αναφοράς. Οι τιμές των  $M_{ac}$  και  $M_{dc}$  ρυθμίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροή ισχύος. Για να δημιουργηθούν οι παλμοί οδήγησης των  $S_5$ ,  $S_6$ ,  $S_7$ , το σήμα αναφοράς για την μπαταρία του EV συγκρίνεται με το μηδέν. Εάν το σήμα αναφοράς κάθε διακόπτη είναι ίσο με μηδέν, τότε ο αντίστοιχος διακόπτης τίθεται στη θέση ON, διαφορετικά είναι OFF. Αυτή η διαδικασία διαφαίνεται στην Εικόνα 21. Προκειμένου να παραχθούν οι παλμοί οδήγησης για τους διακόπτες της τριφασικής γέφυρας ακολουθείται η εξής διαδικασία: όταν το σήμα αναφοράς για κάθε κλάδο της γέφυρας είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το πλάτος του τριγωνικού παλμού, τότε ο αντίστοιχος διακόπτης τίθεται στη θέση ON, διαφορετικά τίθεται OFF (Εικόνα 22). Οι διακόπτες  $S_8$ ,  $S_9$ ,  $S_{10}$  είναι συμπληρωματικοί των  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  αντίστοιχως.



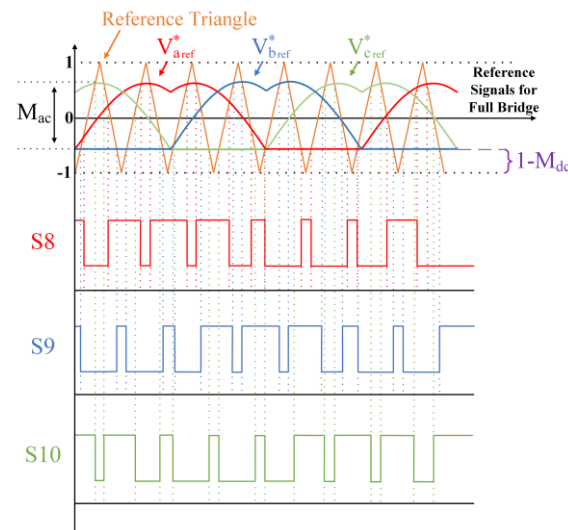
**Εικόνα 19:** Έλεγχος διάταξης οδήγησης τριφασικής γέφυρας και κλάδων διασύνδεσης ηλεκτρικού οχήματος.



**Εικόνα 20:** Σήματα αναφοράς για τον έλεγχο της τριφασικής γέφυρας και του ηλεκτρικού οχήματος.



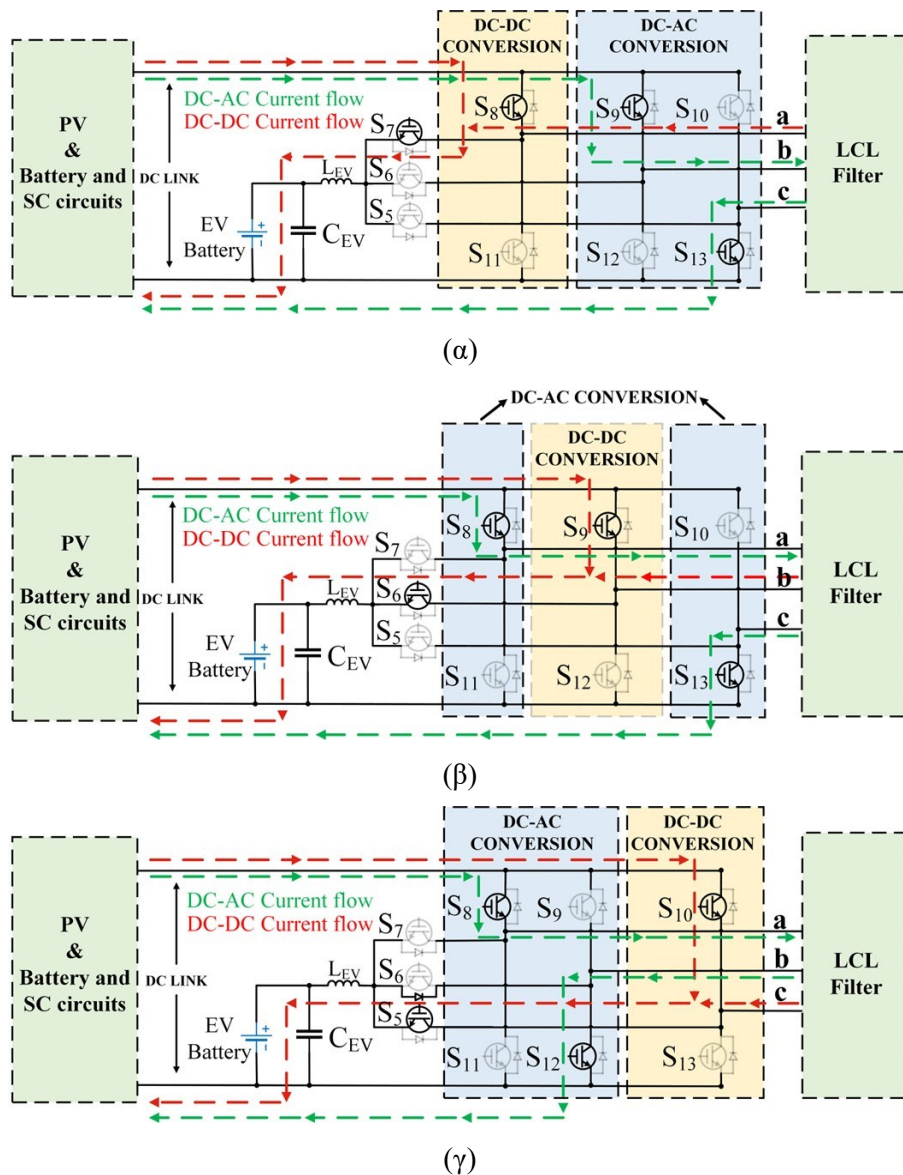
**Εικόνα 21:** Παλμοί οδήγησης για τους διακόπτες του ηλεκτρικού οχήματος.



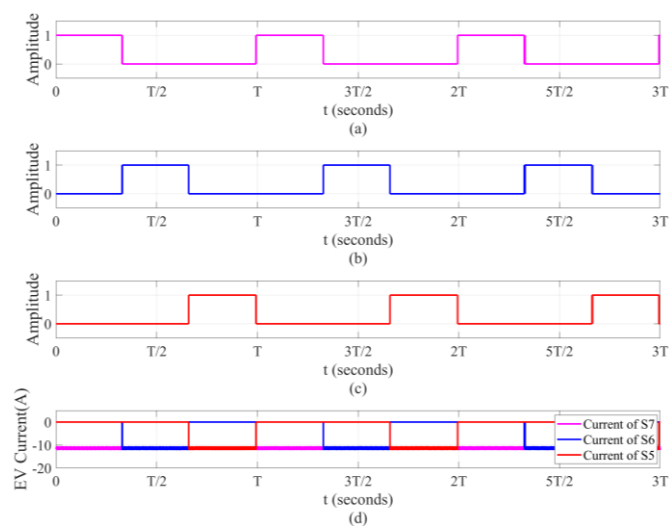
**Εικόνα 22:** Παλμοί οδήγησης για τους διακόπτες της τριφασικής γέφυρας.

Ένα ισοδύναμο διάγραμμα του τριφασικού SSI κατά τη διαδικασία φόρτισης της θύρας της μπαταρίας του EV παρουσιάζεται στην Εικόνα 23. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα σήματα αναφοράς για τον έλεγχο των τριών διακοπών της μπαταρίας του EV ( $S_5$ ,  $S_6$ ,  $S_7$ ) έχουν διαφορά φάσης  $120^\circ$ . Ως εκ τούτου, κάθε  $120^\circ$  (κύκλος φόρτισης) ένας διαφορετικός διακόπτης τίθεται στη

θέση ON. Σε κάθε κύκλο φόρτισης, ο ένας κλάδος της γέφυρας λειτουργεί ως DC/DC μετατροπέας για τον έλεγχο της τάσης της μπαταρίας του EV και οι υπόλοιποι δύο είναι υπεύθυνοι για τη DC/AC μετατροπή. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 23 (α), όταν το  $S_7$  είναι ON και το  $S_6$ ,  $S_5$  είναι OFF, τότε ο κλάδος της τριφασικής γέφυρας, στην οποία είναι συνδεδεμένο το  $S_7$ , λειτουργεί ως DC/DC μετατροπέας και οι άλλοι δύο κλάδοι ελέγχουν την DC/AC μετατροπή. Το ίδιο συμβαίνει και για τους υπόλοιπους δύο διακόπτες ισχύος. Με τον προαναφερθέντα τρόπο, η θύρα της μπαταρίας του EV του SSI φορτίζεται με σταθερό ρεύμα, το οποίο λαμβάνεται από τους τρεις διαφορετικούς διακόπτες ισχύος της θύρας της μπαταρίας του EV, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24.



**Εικόνα 23:** Διάγραμμα ροής κατά την φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος: (α)  $S_7$  είναι ON, (β)  $S_6$  είναι ON, (γ)  $S_5$  είναι ON.



**Εικόνα 24:** Παλμοί οδήγησης διακοπών (α)  $S_7$ , (β)  $S_6$ , (γ)  $S_5$  και (δ) ρεύμα ηλεκτρικού οχήματος.

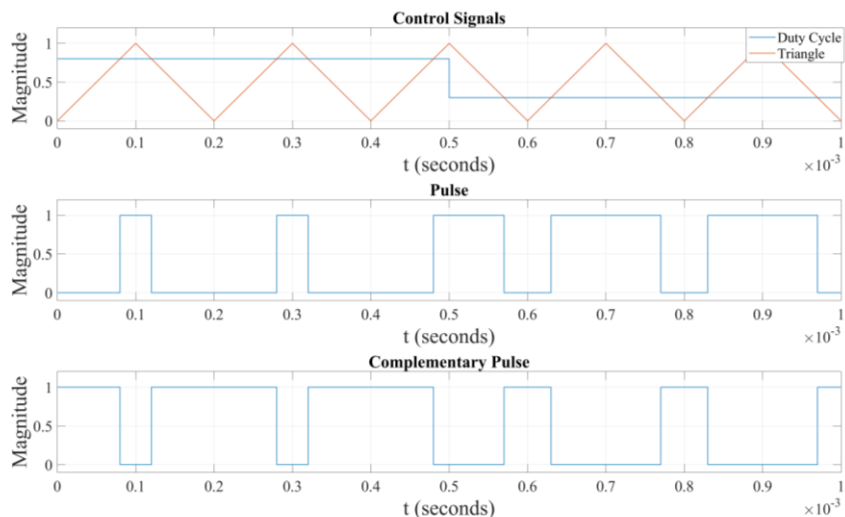
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΤΟΠΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MATLAB/SIMULINK

### 4.1 Σήματα ελέγχου και παλμοί οδήγησης διακοπτικών στοιχείων

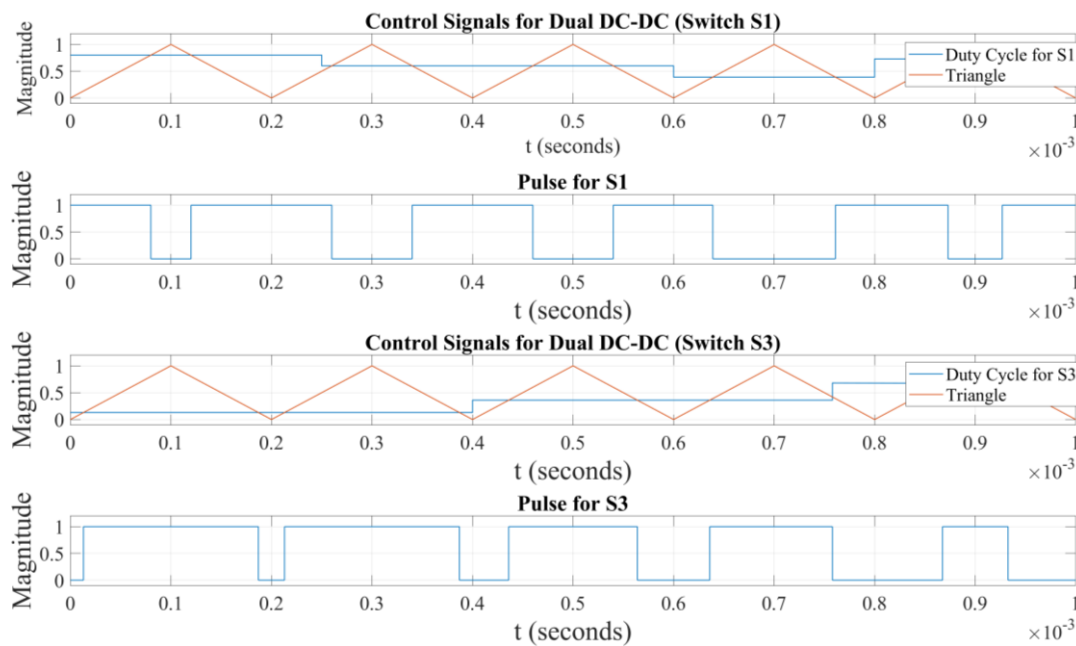
Η διαδικασία παραγωγής των σημάτων αναφοράς και των παλμών οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων, η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα, επιβεβαιώνεται και με τις αντίστοιχες προσομοιώσεις.

Όσο αφορά, αρχικά, την διάταξη της Τοπολογίας 1 [Εικόνα 11(α)] με τους κλάδους διασύνδεσης των συστοιχιών μπαταριών και SC, αντίστοιχα, παράλληλα με το DC-link, ένα σήμα αναφοράς συγκρίνεται με ένα τριγωνικό σήμα (triangle) από 0 έως 1, με συχνότητα ίση με την επιθυμητή διακοπτική συχνότητα. Για όσο χρονικό διάστημα, για παράδειγμα, η τιμή του σήματος αναφοράς είναι μεγαλύτερη από την τιμή του πλάτους του τριγωνικού παλμού τότε ο διακόπτης  $S_1$  είναι OFF και ο  $S_2$  ON. Αντιθέτως, για όσο χρόνο η τιμή του σήματος αναφοράς είναι μικρότερη από το πλάτος του τριγωνικού παλμού, ο διακόπτης  $S_1$  είναι ON και ο  $S_2$  OFF. Ως φυσικό επακόλουθο συμπεραίνεται ότι οι διακόπτες  $S_1$ ,  $S_2$  είναι συμπληρωματικοί. Το ίδιο ακριβώς ισχύει για τους διακόπτες  $S_3$ ,  $S_4$  της θύρας όπου είναι συνδεδεμένη η συστοιχία των μπαταριών. Οι αντίστοιχες κυματομορφές παρουσιάζονται στην Εικόνα 25, όπου σαν ‘Pulse’ μπορεί να θεωρηθεί ο παλμός που αντιστοιχεί είτε στον  $S_1$  είτε στον  $S_3$ .

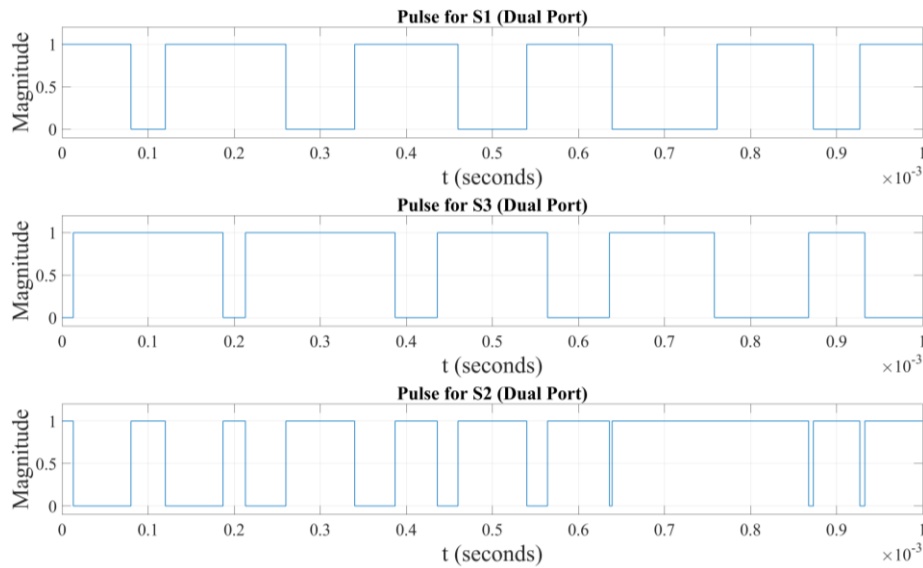


**Εικόνα 25:** Σήματα ελέγχου διάταξης οδήγησης για τους κλάδους διασύνδεσης της μπαταρίας και του υπερπυκνωτή στην Τοπολογία 1.

Στην Τοπολογία 2 [Εικόνα 11(β)], στην συνέχεια, ο κλάδος παράλληλα με το DC-link που αποτελεί έναν μετατροπέα DC/DC δύο εισόδων συνδέεται σε δύο πηγές (συστοιχία μπαταριών και υπερπυκνωτών). Για την παραγωγή των παλμών οδήγησης για τους διακόπτες  $S_1$  και  $S_3$  ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με την αυτή των παράλληλων DC κλάδων της Τοπολογίας 1. Δηλαδή δύο σήματα αναφοράς, ένα για κάθε διακόπτη, συγκρίνονται με έναν τριγωνικό παλμό από 0 έως 1, ο οποίος έχει συχνότητα ίση με την επιθυμητή διακοπτική συχνότητα. Όσο χρονικό διάστημα η τιμή του σήματος αναφοράς είναι μεγαλύτερη από την τιμή του πλάτους του τριγωνικού παλμού, τότε ο διακόπτης  $S_1$  είναι ON, διαφορετικά είναι OFF. Σε αντίθεση, ο διακόπτης  $S_3$  είναι ON για όσο χρονικό διάστημα η τιμή του αντίστοιχου σήματος αναφοράς είναι μικρότερη από την τιμή του πλάτους του τριγωνικού παλμού, αλλιώς είναι OFF. Η προαναφερθείσα λειτουργία απεικονίζεται στις κυματομορφές της Εικόνας 26. Ο παλμός οδήγησης του διακόπτη  $S_2$  αποτελεί τον λογικό συνδυασμό NAND των παλμών οδήγησης των διακοπών  $S_1$  και  $S_3$ . Η μεταξύ τους σχέση παρουσιάζεται στην Εικόνα 27.



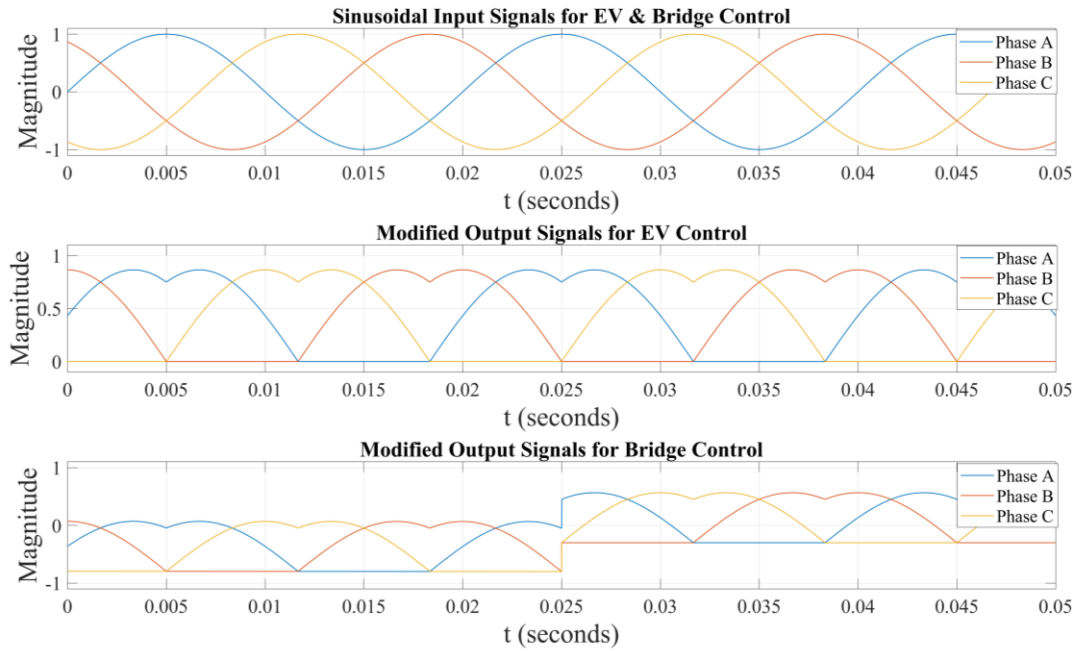
**Εικόνα 26:** Σήματα ελέγχου διάταξης οδήγησης του DC/DC μετατροπέα με δύο εισόδους για τους διακόπτες  $S_1$  και  $S_3$ .



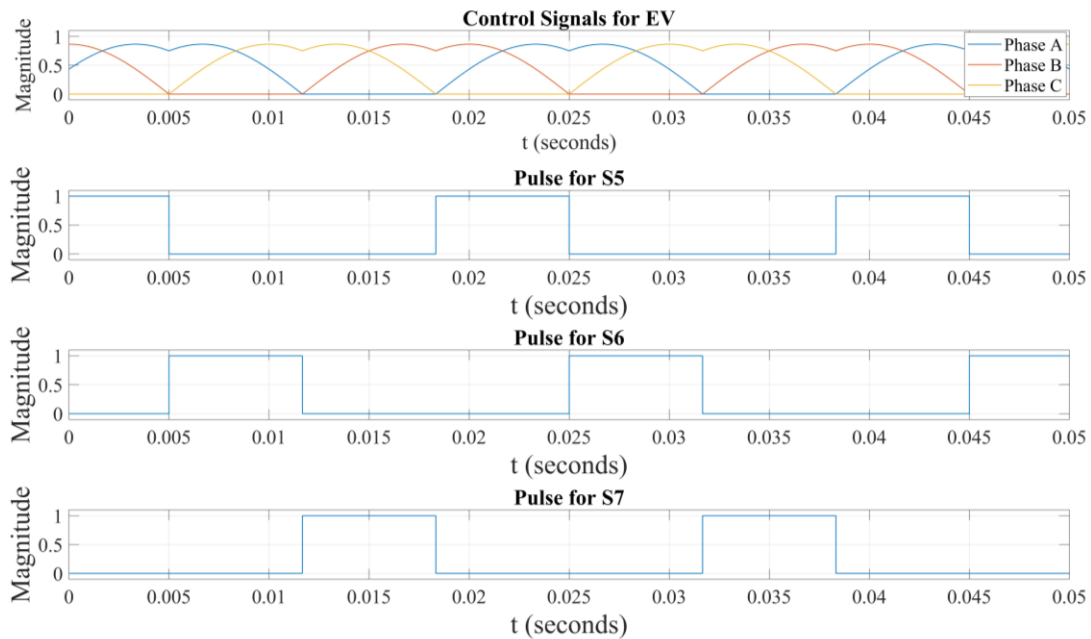
**Εικόνα 27:** Σήματα ελέγχου διάταξης οδήγησης του DC/DC μετατροπέα με δύο εισόδους για τους διακόπτες  $S_1$ ,  $S_2$  και  $S_3$ .

Για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ελέγχου της διάταξης οδήγησης των διακοπών της γέφυρας και των κλάδων διασύνδεσης της μπαταρίας του EV θα χρησιμοποιηθούν ως διακόπτες αναφοράς εκείνοι της Τοπολογίας 1. Τα ίδια συμπεράσματα εξάγονται για τους αντίστοιχους διακόπτες του SSI της Τοπολογίας 2. Για να επιτευχθεί η παραγωγή κατάλληλων παλμών οδήγησης στους διακόπτες της γέφυρας και των κλάδων διασύνδεσης της μπαταρίας του EV, τρία ημίτονα με διαφορά φάσης  $120^\circ$  μεταξύ τους υπόκεινται μια σειρά τροποποιήσεων και πράξεων, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Στην συνέχεια προκύπτει το σήμα αναφοράς για τους διακόπτες  $S_5$ ,  $S_6$ ,  $S_7$  και αφού ληφθεί υπόψη το offset για την μπαταρία του EV προκύπτει το σήμα αναφοράς για την τριφασική γέφυρα (Εικόνα 28). Κατόπιν για να παραχθούν οι παλμοί οδήγησης των διακοπών για το ηλεκτρικό όχημα, το σήμα αναφοράς συγκρίνεται με το μηδέν. Όσο χρονικό διάστημα το σήμα αναφοράς του εκάστοτε διακόπτη ισούται με το μηδέν, τότε ο αντίστοιχος διακόπτης είναι ανοιχτός, διαφορετικά είναι κλειστός. Για παράδειγμα, ο διακόπτης  $S_7$ , ο οποίος συνδέεται στην φάση a της τριφασικής γέφυρας, στο διάστημα από 0.012sec έως 0.018sec είναι ανοικτός, διότι το σήμα αναφοράς του (που φαίνεται με μπλε χρώμα στην Εικόνα 29) στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι μηδέν. Όσο αφορά τους παλμούς οδήγησης για τους διακόπτες της τριφασικής γέφυρας προκύπτουν από την εξής διαδικασία: το σήμα αναφοράς της κάθε φάσης συγκρίνεται με έναν τριγωνικό παλμό με πλάτος από -1 έως 1 και συχνότητα ίση με την διακοπτική. Για όσο χρονικό διάστημα το σήμα αναφοράς της εκάστοτε φάσης είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το πλάτος του τριγωνικού παλμού ο αντίστοιχος διακόπτης είναι ON, αλλιώς είναι OFF (Εικόνα 30). Οι διακόπτες  $S_8$ ,  $S_9$  και  $S_{10}$  είναι συμπληρωματικοί με τους  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  αντιστοίχως. Ένα παράδειγμα προσομοίωσης, με μεγέθυνση στον άξονα του χρόνου για το σήμα αναφοράς, ως προς την σχέση των διακοπών  $S_8$  και  $S_{11}$  παρατίθεται στην Εικόνα 31.



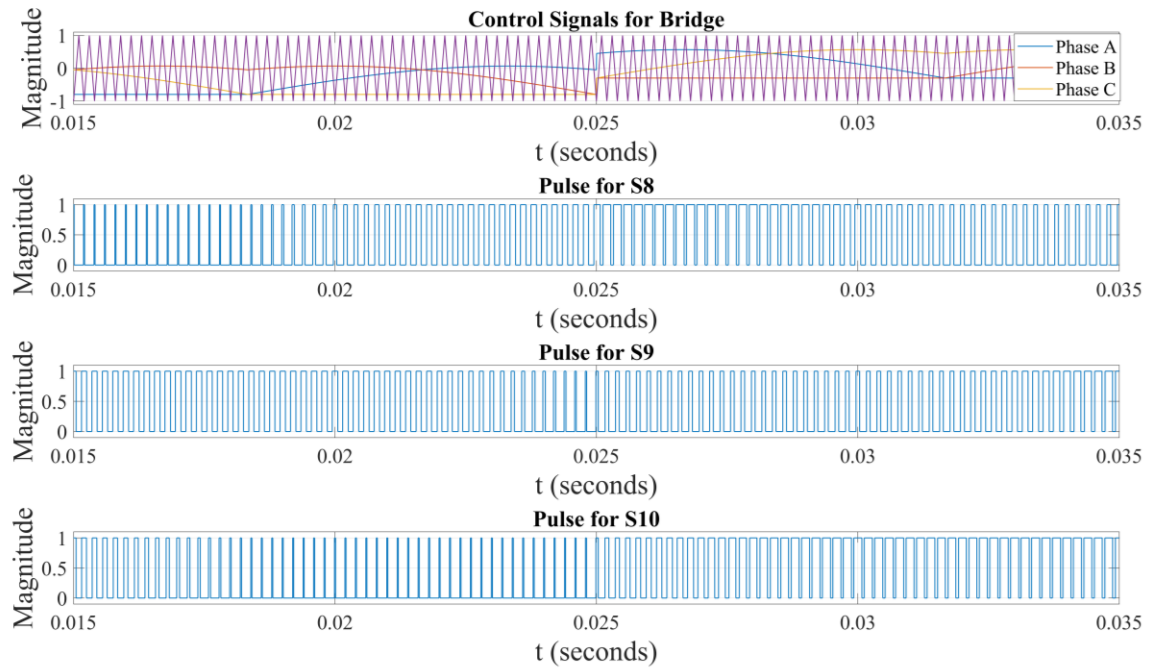


**Εικόνα 28:** Σήματα αναφοράς για γέφυρα και ηλεκτρικό όχημα.

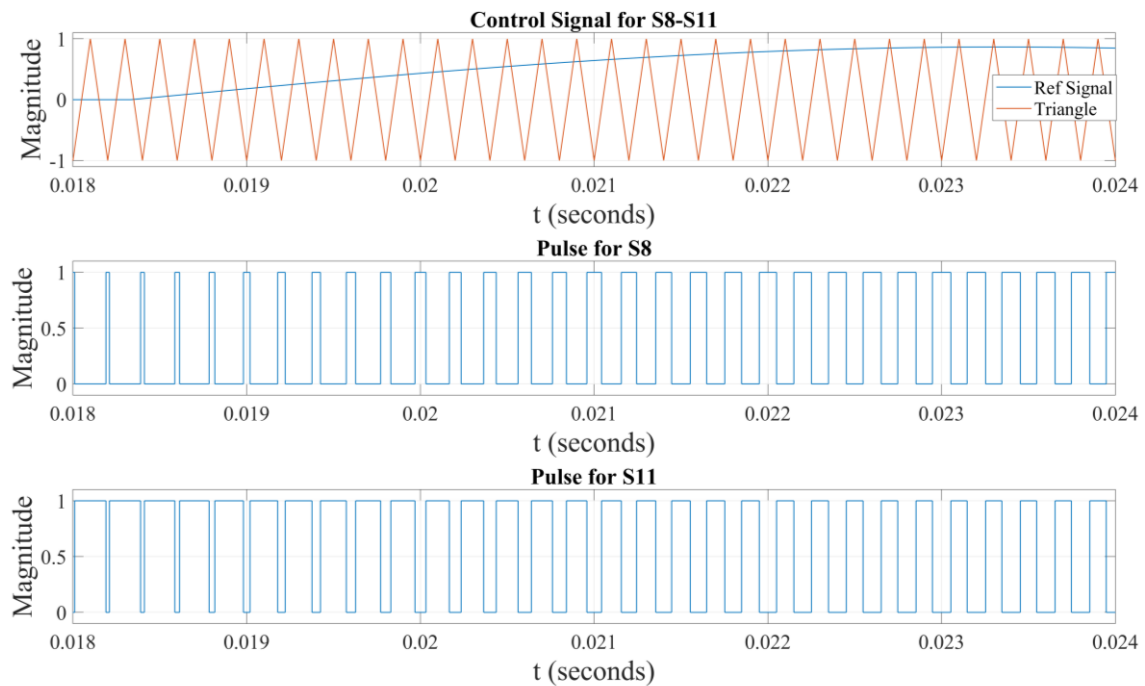


**Εικόνα 29:** Σήματα ελέγχου διάταξης οδήγησης για το ηλεκτρικό όχημα.





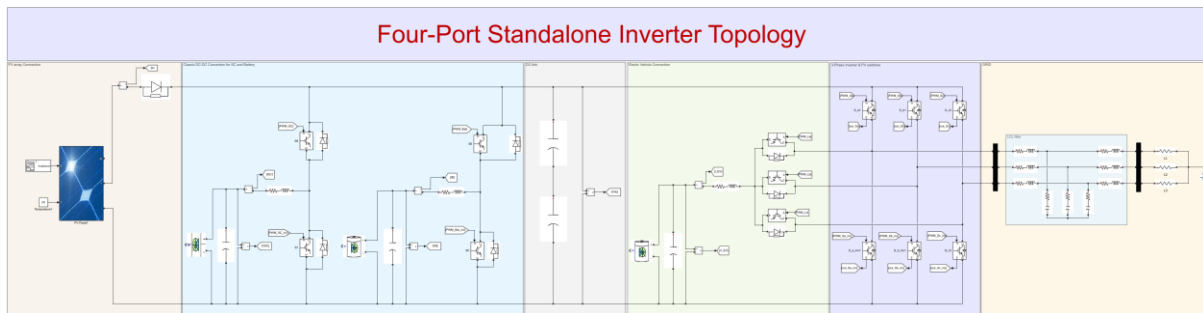
**Εικόνα 30:** Σήματα ελέγχου και παλμοί διάταξης οδήγησης για την τριφασική γέφυρα.



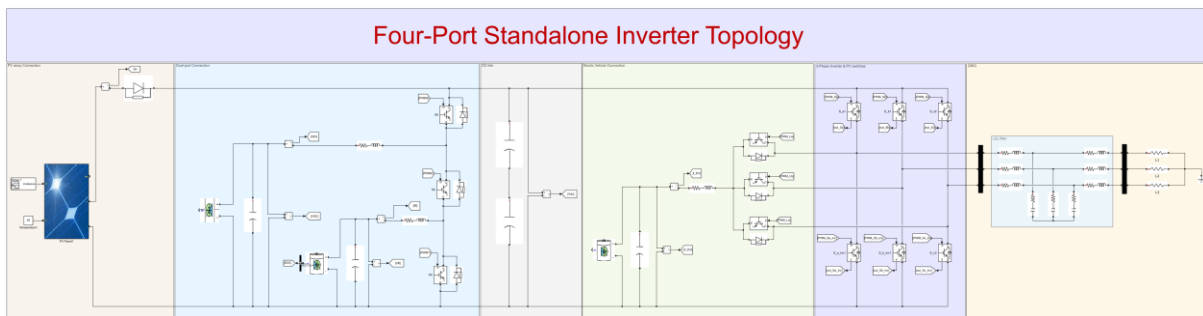
**Εικόνα 31:** Συμπληρωματικοί παλμοί για τους διακόπτες μιας φάσης της τριφασικής γέφυρας.

## 4.2 Διάφορες ροές ισχύος μεταξύ των θυρών

Στο λογισμικό Matlab/Simulink πραγματοποιήθηκαν διάφορες προσομοιώσεις με βάση τον έλεγχο των διατάξεων οδήγησης που έχει αναλυθεί έως τώρα. Στη συνέχεια απεικονίζονται τα μοντέλα που υλοποιήθηκαν για την εξακρίβωση της ορθής λειτουργίας των προτεινόμενων κυκλωμάτων για διασύνδεση χωρίς (Εικόνα 32) και με το ηλεκτρικό δίκτυο (Εικόνα 33).

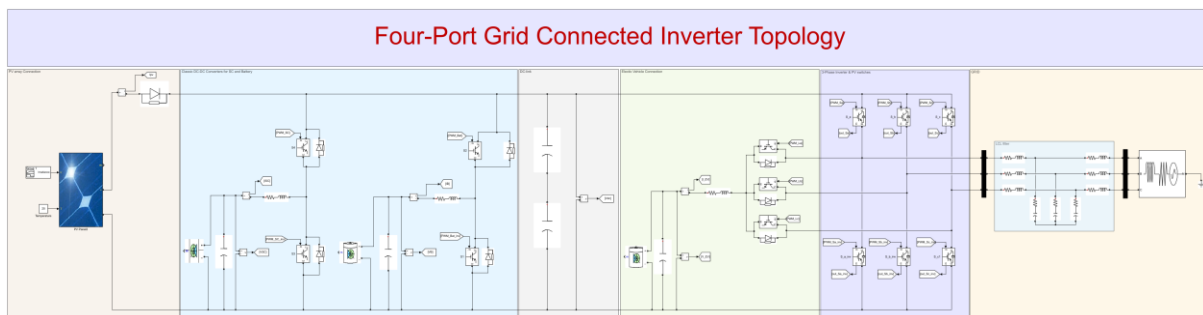


(α)

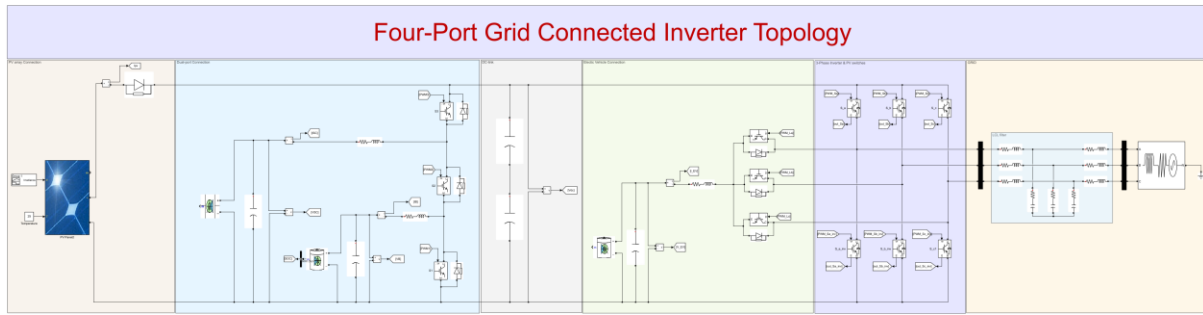


(β)

**Εικόνα 32:** Μοντέλο προσομοίωσης του κυκλώματος ισχύος σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία: (α) Τοπολογία 1, (β) Τοπολογία 2.



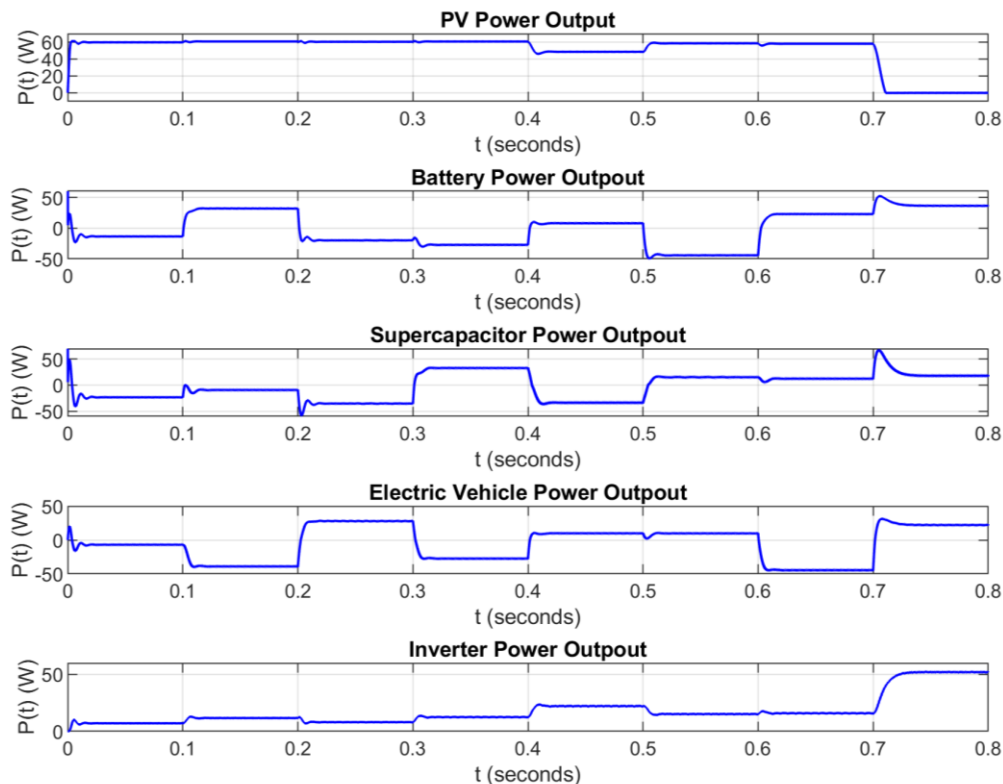
(α)



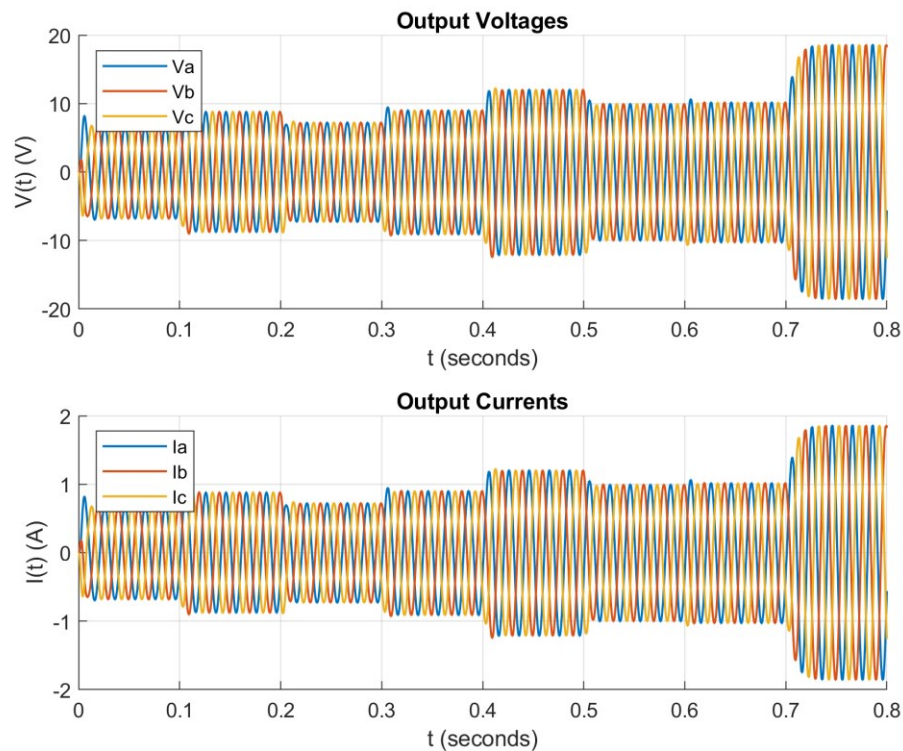
(β)

**Εικόνα 33:** Μοντέλο προσομοίωσης του κυκλώματος σε διασυνδεδεμένη λειτουργία: (α) Τοπολογία 1, (β) Τοπολογία 2.

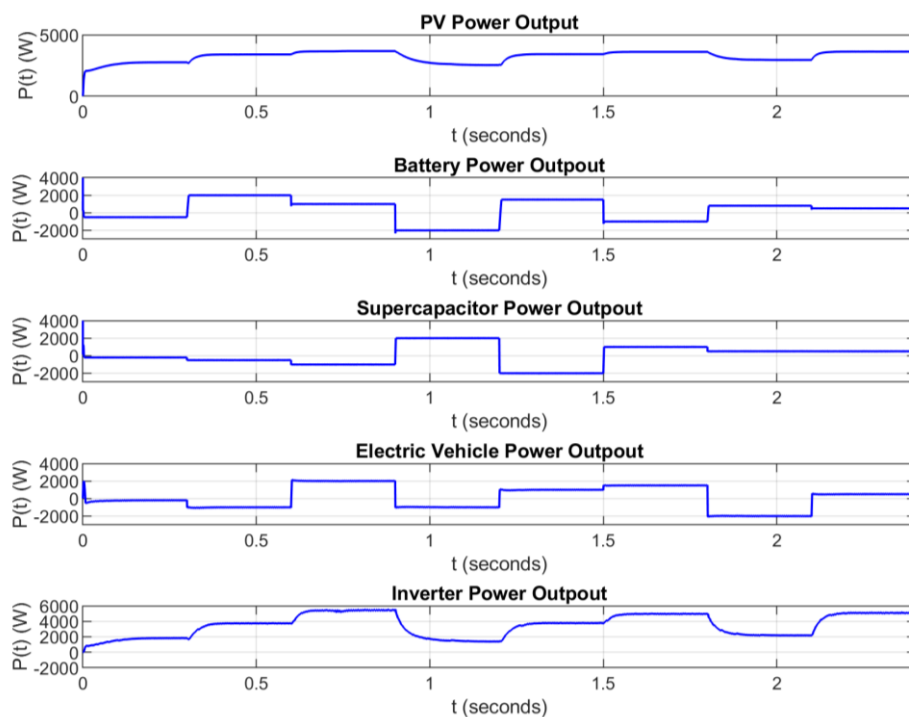
Κατόπιν, παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για διάφορες ροές ισχύος, καθώς και τα ρεύματα και οι τάσεις στην έξοδο του αντιστροφέα για την Τοπολογία 1 τόσο για τη μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία (Εικόνα 34 και Εικόνα 35) όσο και για τη διασυνδεδεμένη λειτουργία (Εικόνα 38 και Εικόνα 39). Παράλληλα, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες προσομοιώσεις σε διαφορετικές τιμές ισχύος για τη μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία (Εικόνα 36 και Εικόνα 37) και για τη διασυνδεδεμένη λειτουργία (Εικόνα 40 και Εικόνα 41).



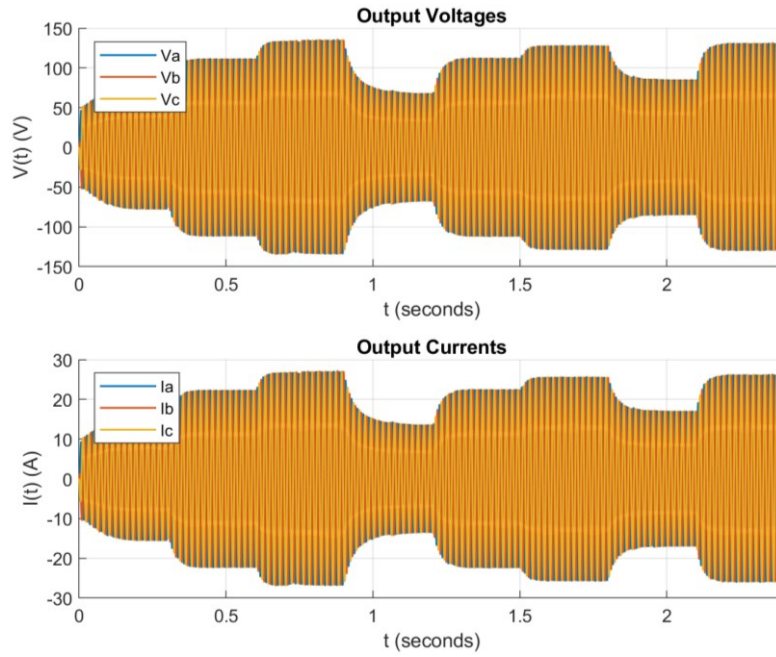
**Εικόνα 34:** Ροές ισχύος σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 1.



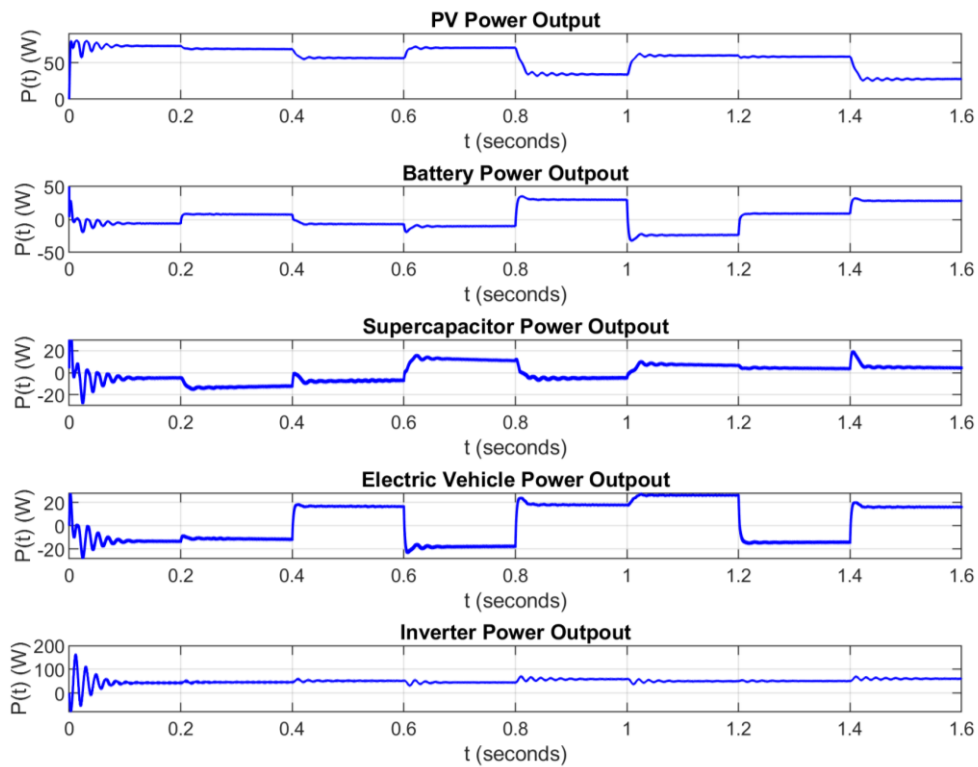
**Εικόνα 35:** Τάσεις και ρεύματα εξόδου σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 1.



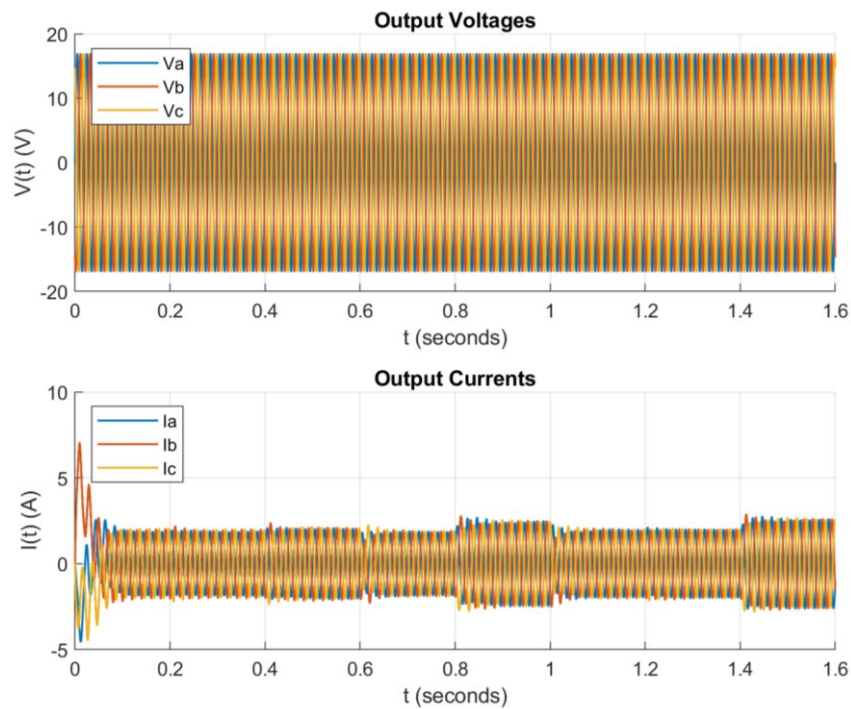
**Εικόνα 36:** Ροές σε διαφορετικές τιμές ισχύος σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 1.



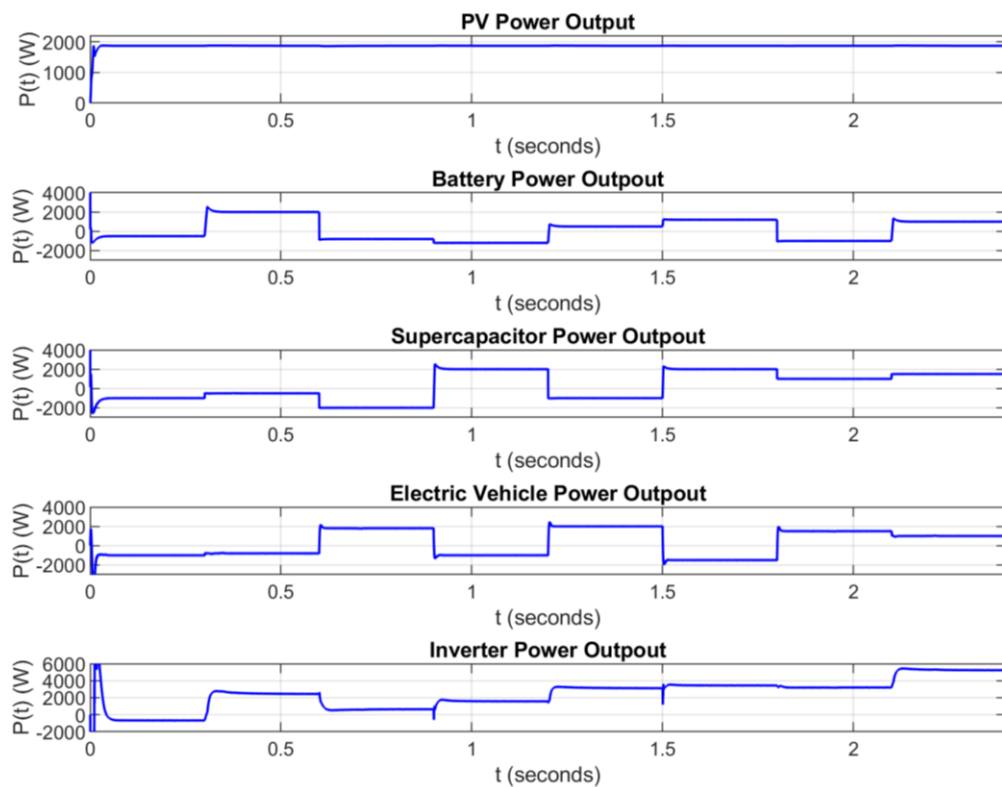
**Εικόνα 37:** Τάσεις και ρεύματα εξόδου σε διαφορετικές τιμές ισχύος σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 1.



**Εικόνα 38:** Ροές ισχύος σε διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 1.

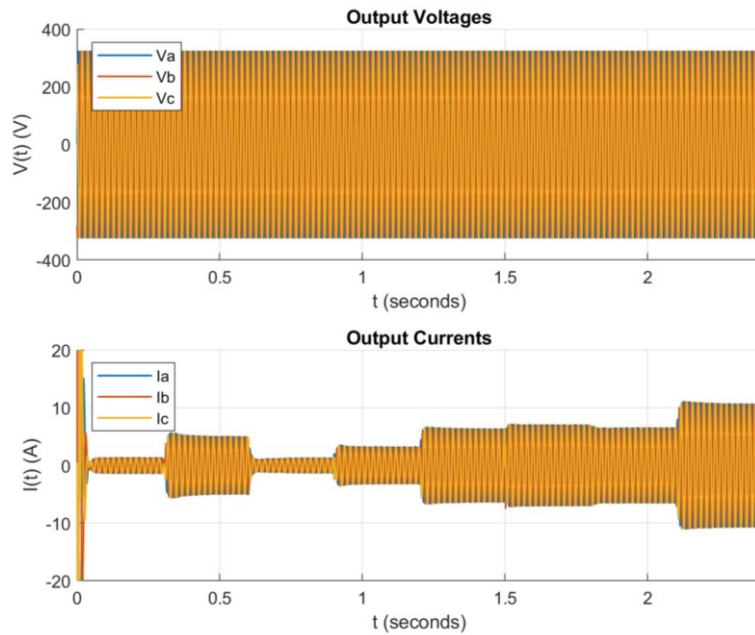


**Εικόνα 39:** Τάσεις και ρεύματα εξόδου σε διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 1.



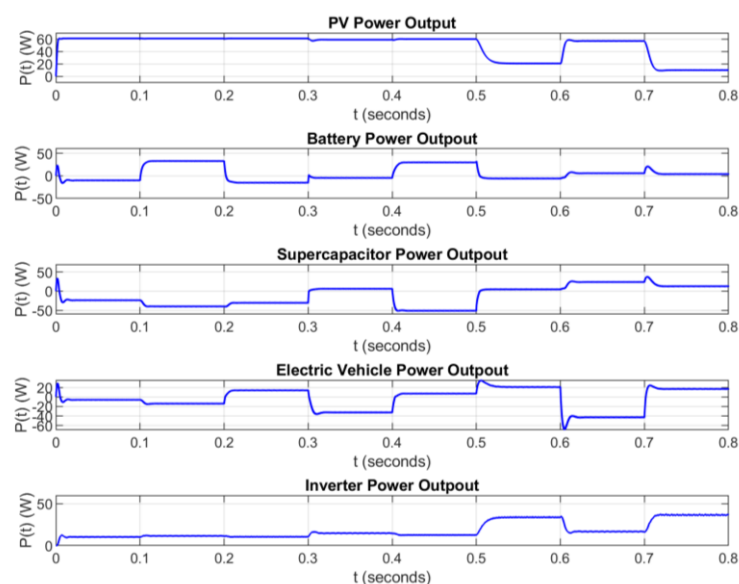
**Εικόνα 40:** Ροές σε διαφορετικές τιμές ισχύος σε διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 1.



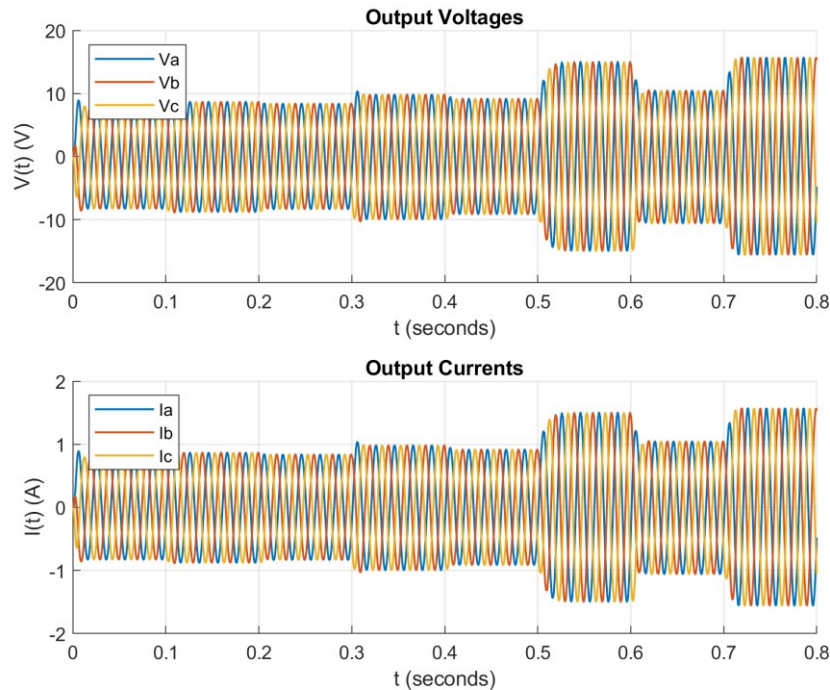


**Εικόνα 41:** Τάσεις και ρεύματα εξόδου σε διαφορετικές τιμές ισχύος σε διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 1.

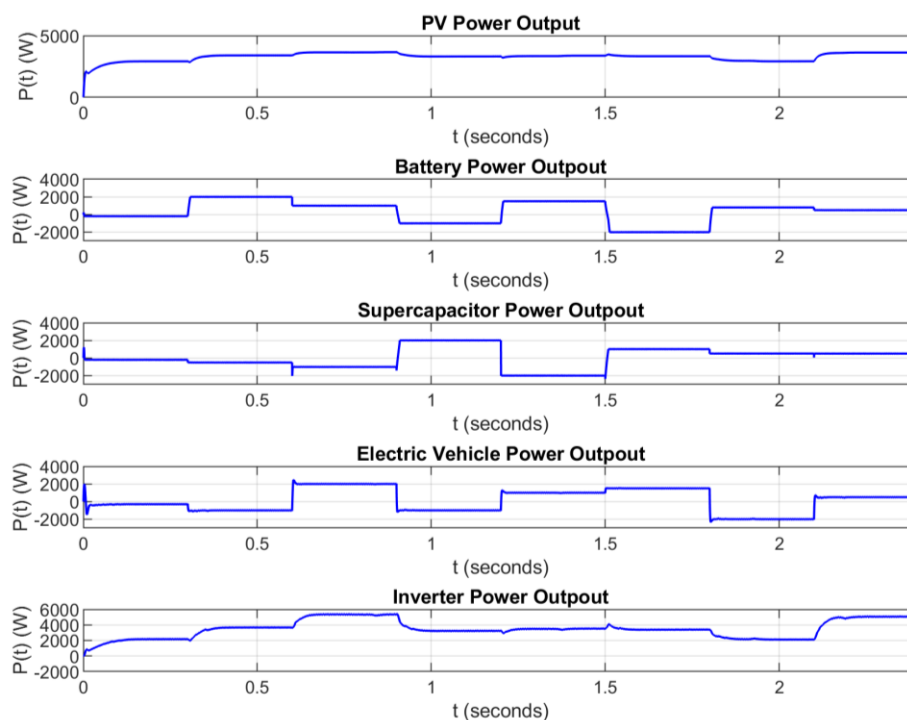
Εν συνεχεία, γίνεται μια παράθεση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για διάφορες ροές ισχύος, καθώς και των ρευμάτων και των τάσεων στην έξοδο του αντιστροφέα για την Τοπολογία 2 τόσο για τη μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία (Εικόνα 42 και Εικόνα 43) όσο και για τη διασυνδεδεμένη λειτουργία (Εικόνα 46 και Εικόνα 47). Παρουσιάζονται, ακόμα, οι αντίστοιχες προσομοιώσεις σε διαφορετικές τιμές ισχύος για τη μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία (Εικόνα 44 και Εικόνα 45) και για τη διασυνδεδεμένη λειτουργία (Εικόνα 48 και Εικόνα 49). Επιπρόσθετα, η Εικόνα 50 δείχνει την μεταβολή των σημάτων αναφοράς της γέφυρας και του ηλεκτρικού οχήματος για τις ροές ισχύος που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



**Εικόνα 42:** Ροές ισχύος σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 2.

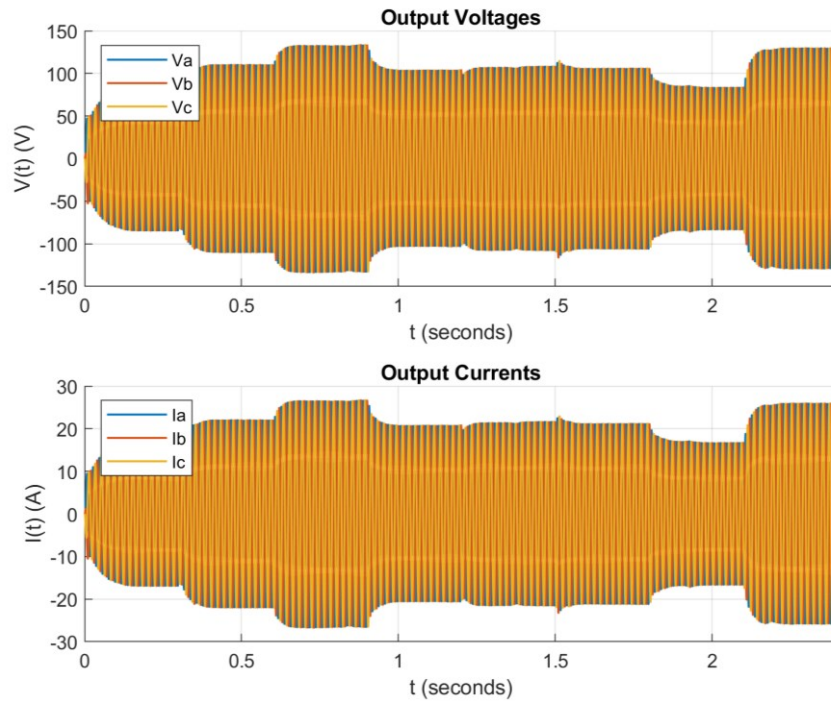


**Εικόνα 43:** Τάσεις και ρεύματα εξόδου σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 2.

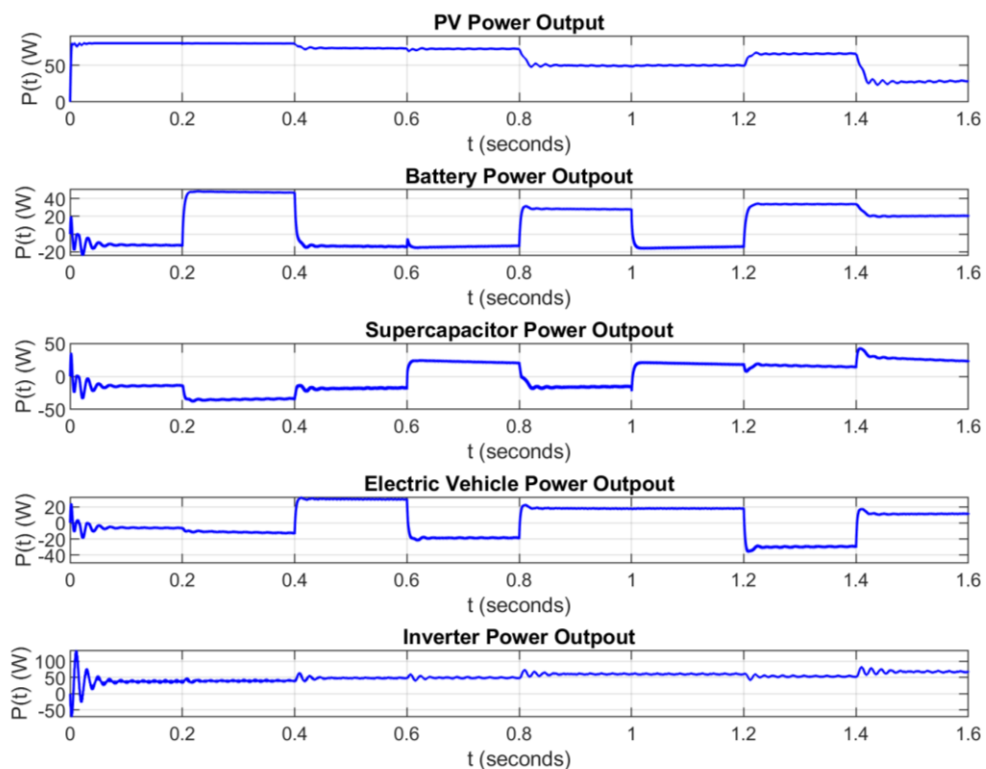


**Εικόνα 44:** Ροές σε διαφορετικές τιμές ισχύος σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 2.

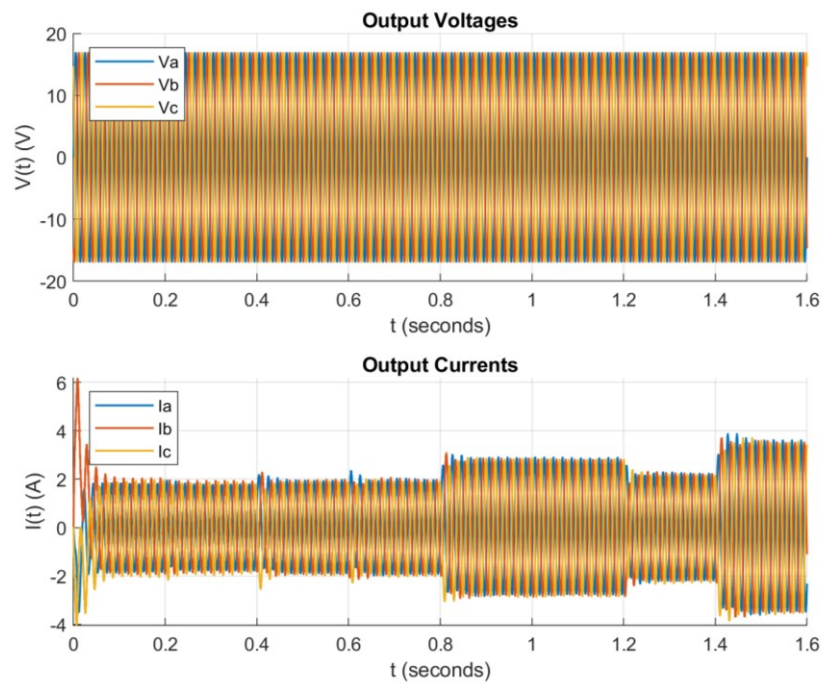




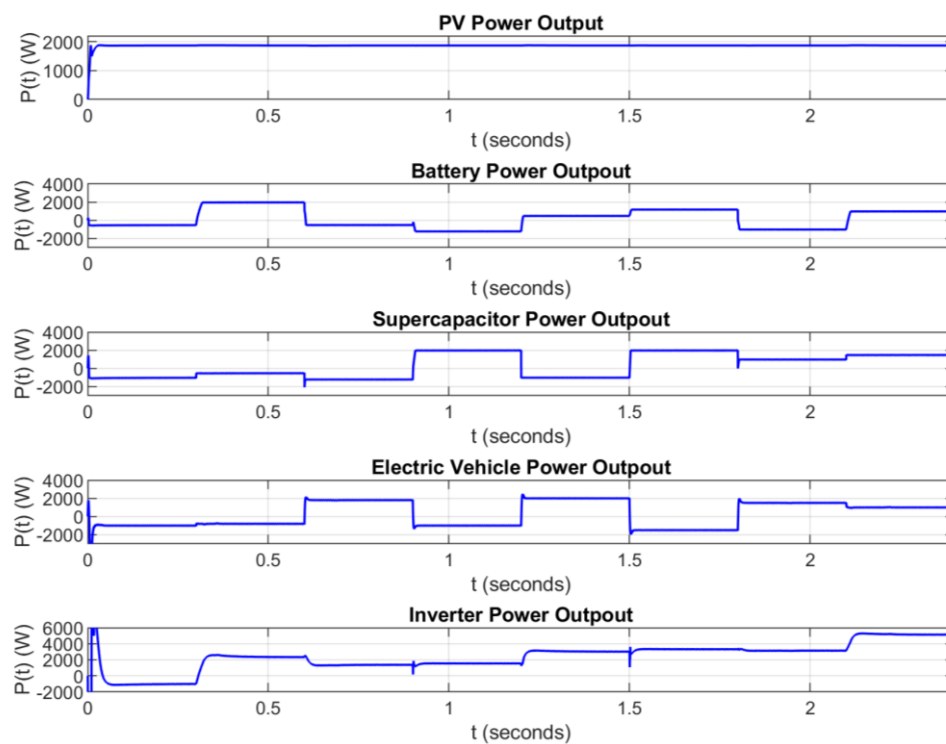
**Εικόνα 45:** Τάσεις και ρεύματα εξόδου σε διαφορετικές τιμές ισχύος σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 2.



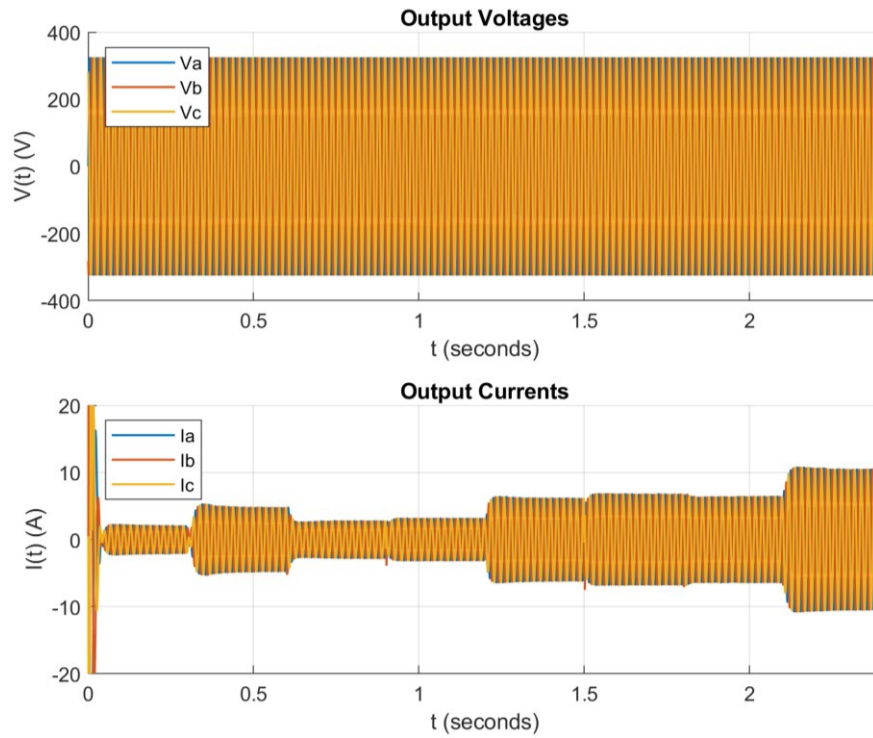
**Εικόνα 46:** Ροές ισχύος σε διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 2.



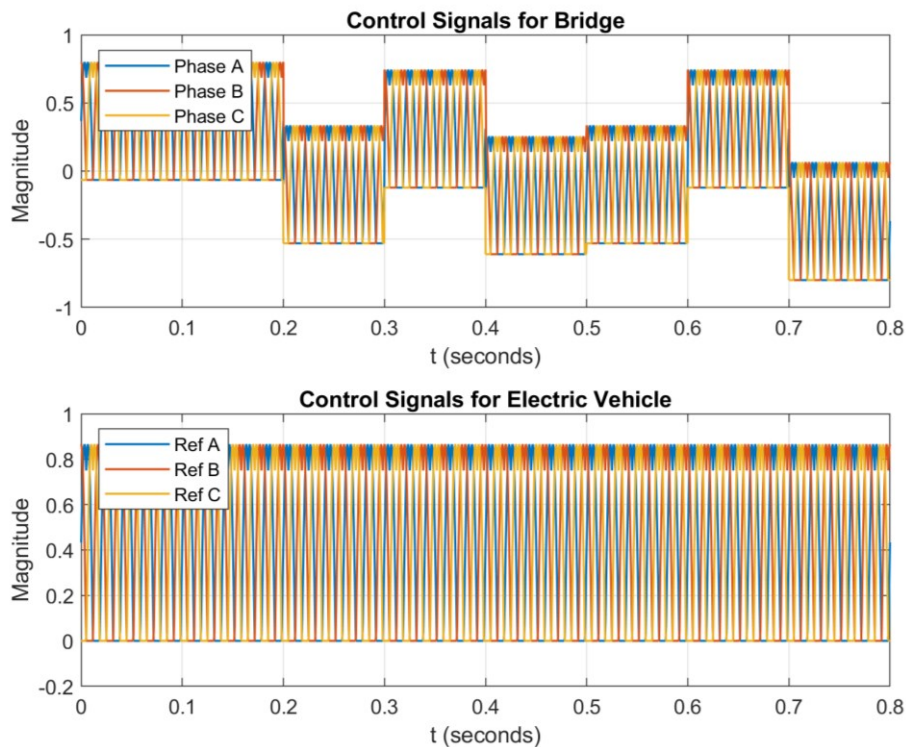
**Εικόνα 47:** Τάσεις και ρεύματα εξόδου σε διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 2.



**Εικόνα 48:** Ροές σε διαφορετικές τιμές ισχύος σε διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 2.



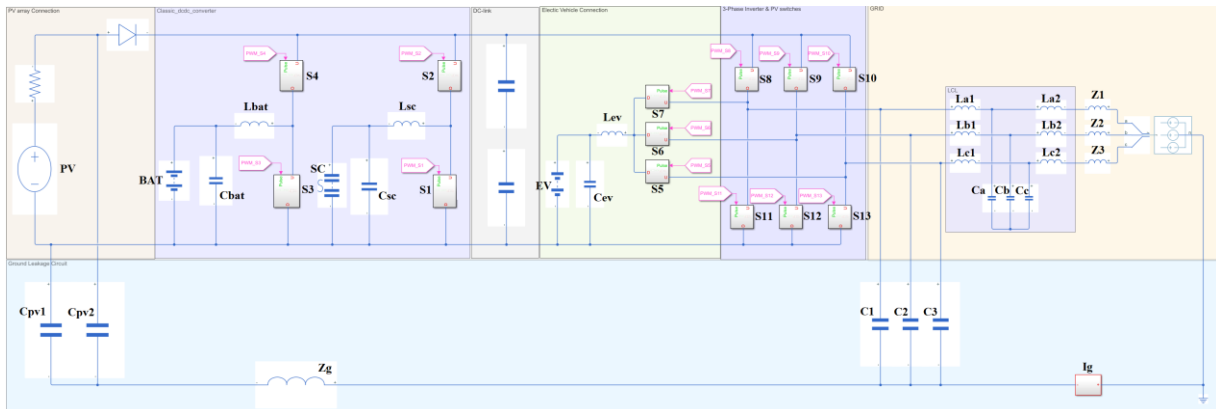
**Εικόνα 49:** Τάσεις και ρεύματα εξόδου σε διαφορετικές τιμές ισχύος σε διασυνδεδεμένη λειτουργία για την Τοπολογία 2.



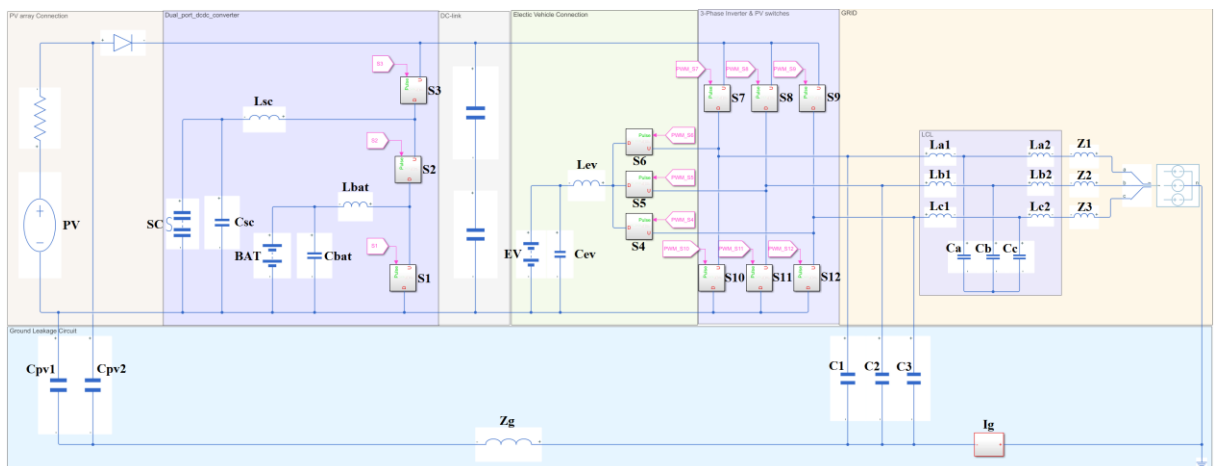
**Εικόνα 50:** Σήματα ελέγχου διακοπτικών στοιχείων τριφασικής γέφυρας και ηλεκτρικού οχήματος για διάφορες ροές ισχύος.

### 4.3 Ρεύμα διαρροής γείωσης

Πραγματοποιήθηκαν, επιπρόσθετα, προσομοιώσεις για τον υπολογισμό του ρεύματος διαρροής γείωσης σύμφωνα με την συνδεσμολογία που απεικονίζεται στις Εικόνες 51 και 52. Συγκεκριμένα, δύο πυκνωτές ( $C_{pv1}$ ,  $C_{pv2}$ ) συνδέονται στα άκρα της πηγής που προσομοιώνει την φωτοβολταϊκή συστοιχία και αναπαριστούν την χωρητικότητα μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων και του μεταλλικού πλαισίου της συστοιχίας. Άλλοι τρεις πυκνωτές ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ) συνδέονται, πριν το φίλτρο, σε κάθε φάση της τριφασικής γέφυρας ο καθένας, οι οποίοι διαδραματίζουν τον ρόλο των παρασιτικών χωρητικοτήτων μεταξύ των κλάδων της γέφυρας και του γειωμένου μεταλλικού κελύφους του αντιστροφέα. Σε κάθε φάση του τριφασικού δικτύου, επίσης, συνδέεται μια σύνθετη αντίσταση ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ), που αναπαριστά τις σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών του ηλεκτρικού δικτύου και, τέλος, προστίθεται μια σύνθετη αντίσταση ( $Z_g$ ) στην γραμμή της γείωσης.



**Εικόνα 51:** Κύκλωμα προσομοίωσης ρεύματος διαρροής γείωσης για την Τοπολογία 1.



**Εικόνα 52:** Κύκλωμα προσομοίωσης ρεύματος διαρροής γείωσης για την Τοπολογία 2.

Οι προσομοιώσεις για τον υπολογισμό του ρεύματος διαρροής πραγματοποιήθηκαν για τιμές ισχύος 100W, 2kW και 10kW και για διακοπτικές συχνότητες 10kHz, 20kHz και 50kHz και για τις δύο προτεινόμενες τοπολογίες. Επίσης, οι διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας που προσομοιώθηκαν είναι:

- STATE 1: μόνο η μπαταρία του EV να παράγει την εκάστοτε ισχύ (100W, 2kW),
- STATE 2: μόνο η συστοιχία SC να παράγει την εκάστοτε ισχύ (100W, 2kW),
- STATE 3: μόνο η συστοιχία μπαταριών να παράγει την εκάστοτε ισχύ (100W, 2kW),
- STATE 4: μόνο η Φ/Β συστοιχία να παράγει την εκάστοτε ισχύ (100W, 2kW).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ονομαστικές τιμές της συστοιχίας των μπαταριών και των υπερπυκνωτών δεν μπορούν να παράγουν από μόνες τους 10kW. Οπότε στην συγκεκριμένη περίπτωση οι καταστάσεις διαμορφώθηκαν ως εξής:

- STATE 1: μόνο η μπαταρία του EV να παράγει την ισχύ των 10kW,
- STATE 2: η συστοιχία μπαταριών σε συνδυασμό με την συστοιχία SC να παράγουν από 5kW η κάθε μια, ώστε να ικανοποιηθεί η απαίτηση των 10kW,
- STATE 3: μόνο η Φ/Β συστοιχία να παράγει την ισχύ των 10kW.

Οι κυματομορφές των ρευμάτων διαρροής γείωσης για την εκάστοτε τιμή ισχύος (100W, 2kW, 10kW) στα 10kHz παρουσιάζονται στις Εικόνες 53-58 και για τις δύο τοπολογίες, ενώ οι RMS τιμές των ρευμάτων γείωσης για κάθε τιμή ισχύος και για κάθε τιμή διακοπτικής συχνότητας (10kHz, 20kHz, 50kHz) και για τις δύο τοπολογίες παρατίθενται στους Πίνακες 10-15.

**Πίνακας 10:** RMS τιμές ρεύματος γείωσης για την Τοπολογία 1 για παραγωγή ισχύος 100W στις αντίστοιχες καταστάσεις λειτουργίας.

Πηγή	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (10kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (20kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (50kHz)
<b>Φωτοβολταϊκή συστοιχία (STATE 4)</b>	94.67	40.97	21.3
<b>Συστοιχία μπαταριών (STATE 3)</b>	63.12	27.24	13.87
<b>Συστοιχία υπερπυκνωτών (STATE 2)</b>	54.23	23.93	12.28
<b>Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος (STATE 1)</b>	48.37	22	12.17

**Πίνακας 11:** RMS τιμές ρεύματος γείωσης για την Τοπολογία 1 για παραγωγή ισχύος 2kW στις αντίστοιχες καταστάσεις λειτουργίας.

Πηγή	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (10kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (20kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (50kHz)
Φωτοβολταϊκή συστοιχία (STATE 4)	97.14	43.02	21.94
Συστοιχία μπαταριών (STATE 3)	64.43	28.60	14.56
Συστοιχία υπερπυκνωτών (STATE 2)	55.64	25.12	12.84
Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος (STATE 1)	50.22	23.1	12.79

**Πίνακας 12:** RMS τιμές ρεύματος γείωσης για την Τοπολογία 1 για παραγωγή ισχύος 10kW στις αντίστοιχες καταστάσεις λειτουργίας.

Πηγή	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (10kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (20kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (50kHz)
Φωτοβολταϊκή συστοιχία (STATE 3)	97.51	42.2	20.55
Συστοιχία μπαταριών & υπερπυκνωτών (STATE 2)	59.02	26.05	13.28
Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος (STATE 1)	49.83	22.68	12.55

**Πίνακας 13:** RMS τιμές ρεύματος γείωσης για την Τοπολογία 2 για παραγωγή ισχύος 100W στις αντίστοιχες καταστάσεις λειτουργίας.

Πηγή	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (10kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (20kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (50kHz)
<b>Φωτοβολταϊκή συστοιχία (STATE 4)</b>	103.44	42.82	22.54
<b>Συστοιχία μπαταριών (STATE 3)</b>	52.30	23.2	12.08
<b>Συστοιχία υπερπυκνωτών (STATE 2)</b>	50.54	22.46	12.06
<b>Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος (STATE 1)</b>	50.05	22.07	11.51

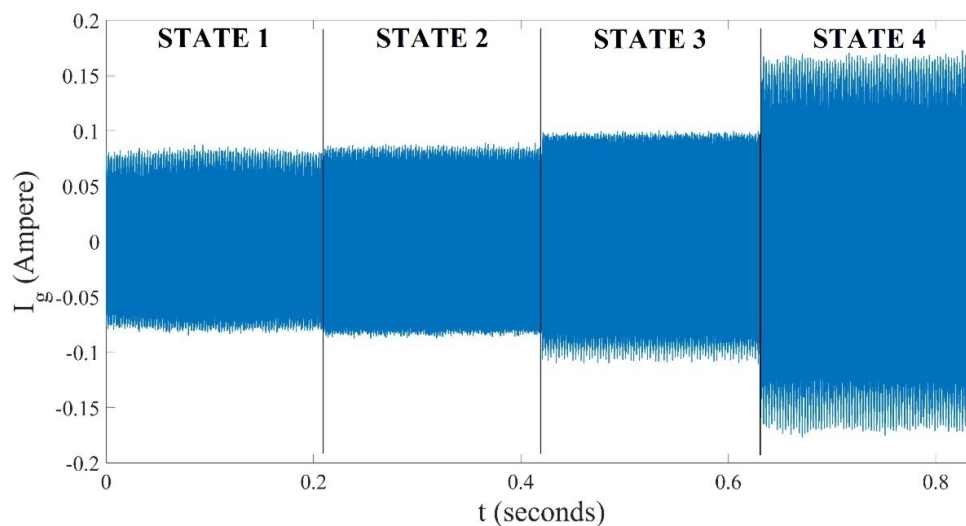
**Πίνακας 14:** RMS τιμές ρεύματος γείωσης για την Τοπολογία 2 για παραγωγή ισχύος 2kW στις αντίστοιχες καταστάσεις λειτουργίας.

Πηγή	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (10kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (20kHz)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA) (50kHz)
<b>Φωτοβολταϊκή συστοιχία (STATE 4)</b>	105.69	44.92	23.66
<b>Συστοιχία μπαταριών (STATE 3)</b>	54.91	24.34	12.68
<b>Συστοιχία υπερπυκνωτών (STATE 2)</b>	53.06	23.58	12.66
<b>Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος (STATE 1)</b>	52.56	23.16	12.08



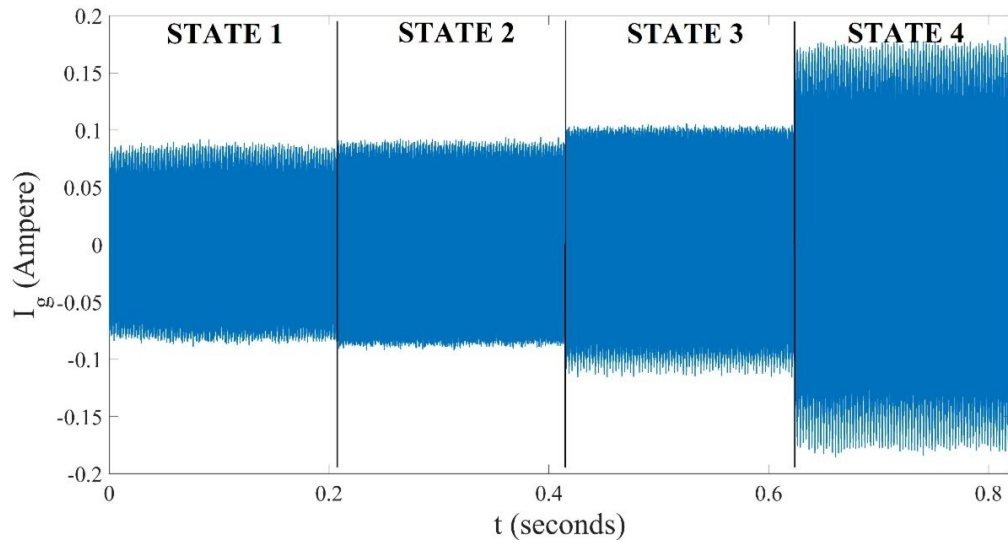
**Πίνακας 15:** RMS τιμές ρεύματος γείωσης για την Τοπολογία 2 για παραγωγή ισχύος 10kW στις αντίστοιχες καταστάσεις λειτουργίας.

Πηγή	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA)	Ρεύμα διαρροής γείωσης (RMS, σε mA)
	(10kHz)	(20kHz)	(50kHz)
<b>Φωτοβολταϊκή συστοιχία (STATE 3)</b>	106.62	44.07	23.21
<b>Συστοιχία μπαταρία &amp; υπερπυκνωτές (STATE 2)</b>	53.87	23.88	12.44
<b>Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος (STATE 1)</b>	52.73	22.72	11.85

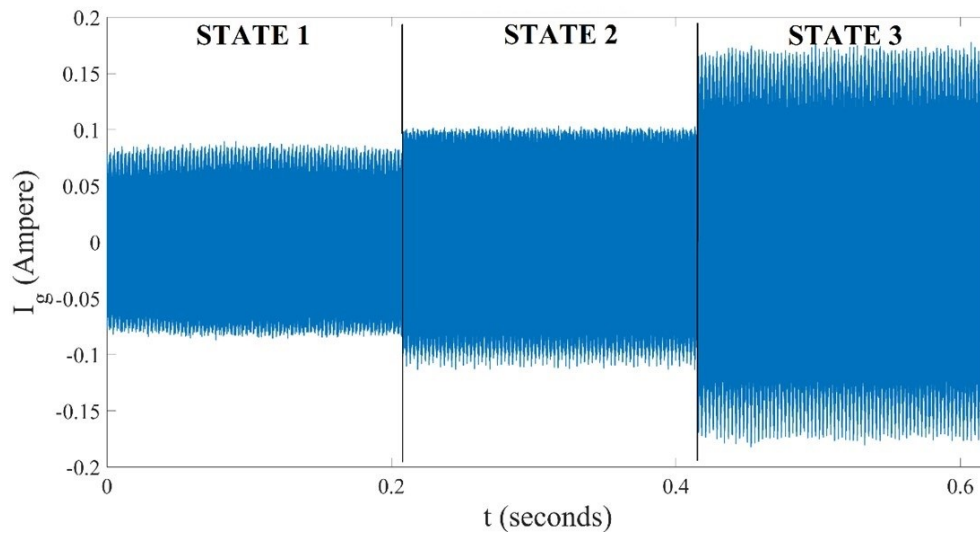


**Εικόνα 53:** Ρεύμα γείωσης για την Τοπολογία 1 για παραγωγή ισχύος 100W από κάθε πηγή.

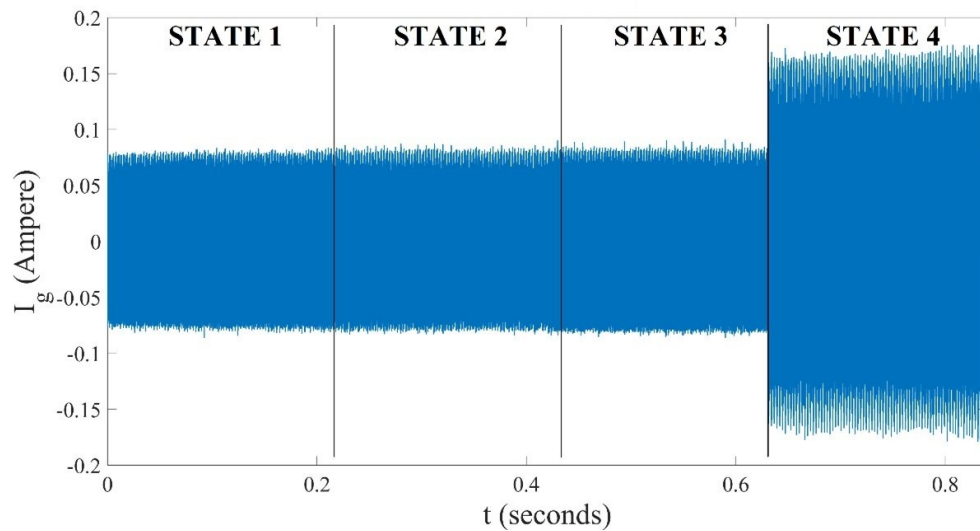




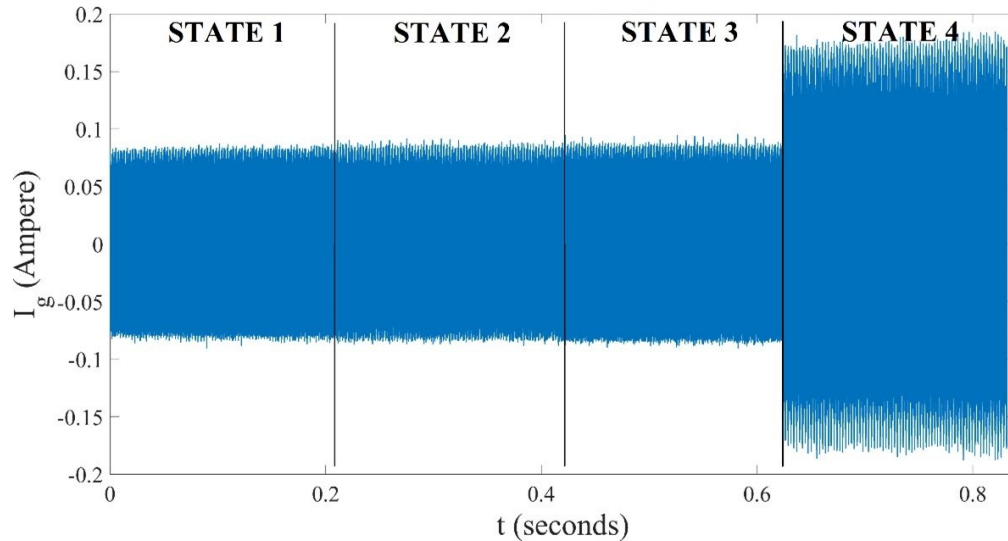
**Εικόνα 54:** Ρεύμα γείωσης για την Τοπολογία 1 για παραγωγή ισχύος 2kW από κάθε πηγή.



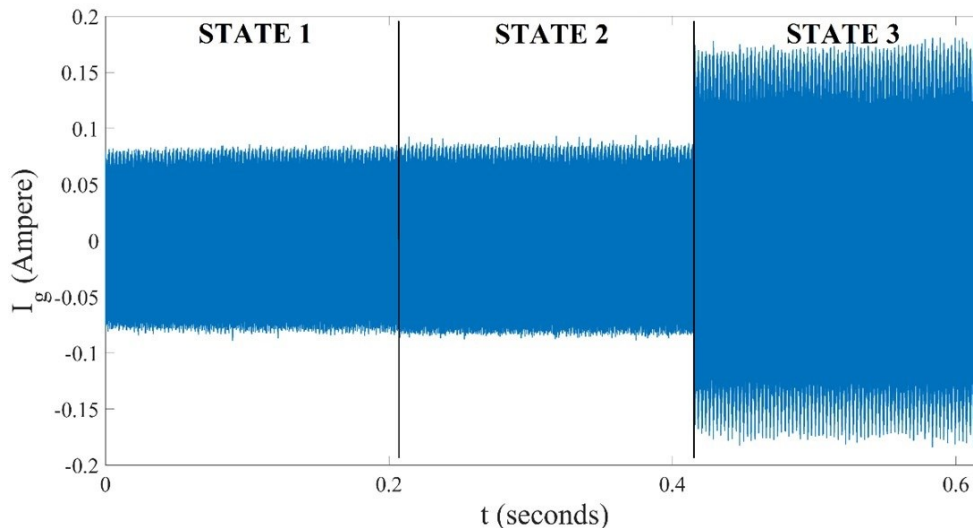
**Εικόνα 55:** Ρεύμα γείωσης για την Τοπολογία 1 για παραγωγή ισχύος 10kW.



**Εικόνα 56:** Ρεύμα γείωσης για την Τοπολογία 2 για παραγωγή ισχύος 100W από κάθε πηγή.



**Εικόνα 57:** Ρεύμα γείωσης για την Τοπολογία 2 για παραγωγή ισχύος 2kW από κάθε πηγή.



**Εικόνα 58:** Ρεύμα γείωσης για την Τοπολογία 2 για παραγωγή ισχύος 10kW.

#### 4.4 Ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης της συστοιχίας μπαταριών, της συστοιχίας SC και της μπαταρίας του EV

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για την μελέτη των ρευμάτων φόρτισης και εκφόρτισης για τις πηγές της συστοιχίας των μπαταριών, των υπερπυκνωτών και της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος και για τις δύο προτεινόμενες τοπολογίες. Η διακοπτική συχνότητα ορίστηκε στα 10kHz, και τα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης στα 3A και 5A αντίστοιχα. Οι peak to peak (p-p) τιμές παρατίθενται στον Πίνακα 16 (Τοπολογία 1) και Πίνακα 18 (Τοπολογία 2). Πραγματοποιήθηκαν, επιπλέον, προσομοιώσεις για τιμές ρεύματος φόρτισης και εκφόρτισης στα 15A και στα 10kHz. Τα αποτελέσματα διαφαίνονται στον Πίνακα 17 (Τοπολογία 1) και Πίνακα 19 (Τοπολογία 2). Στις Εικόνες 59-66 παρουσιάζονται οι κυματομορφές που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις για την Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τοπολογία 1 και την Τοπολογία 2, αντιστοίχως. Σημειώνεται ότι ως προς την φορά αναφοράς του ρεύματος των πηγών, θεωρείται ότι έχουν θετικό ρεύμα κατά την εκφόρτιση τους και αρνητικό κατά την φόρτισή τους.

**Πίνακας 16:** Αποτελέσματα προσομοίωσης ρευμάτων φόρτισης/εκφόρτισης 3A/5A για την Τοπολογία 1.

Πηγή	Κυμάτωση ρεύματος φόρτισης (p-p, σε A)	Κυμάτωση ρεύματος εκφόρτισης (p-p, σε A)	Θεμελιώδης συχνότητα κυμάτωσης (kHz)
Συστοιχία μπαταριών	0.208	0.1	10
Συστοιχία υπερπυκνωτών	0.178	0.28	10
Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος	0.163	0.195	10

**Πίνακας 17:** Αποτελέσματα προσομοίωσης ρευμάτων φόρτισης/εκφόρτισης στα 15A για την Τοπολογία 1.

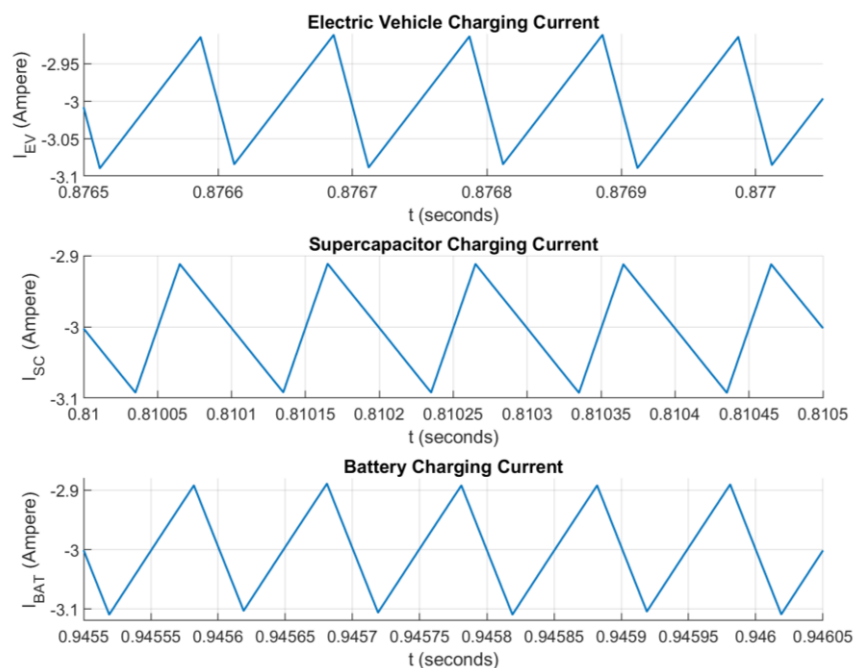
Πηγή	Κυμάτωση ρεύματος φόρτισης (p-p, σε A)	Κυμάτωση ρεύματος εκφόρτισης (p-p, σε A)	Θεμελιώδης συχνότητα κυμάτωσης (kHz)
Συστοιχία μπαταριών	1	0.496	10
Συστοιχία υπερπυκνωτών	0.823	1.437	10
Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος	0.742	1.25	10

**Πίνακας 18:** Αποτελέσματα προσομοίωσης ρευμάτων φόρτισης/εκφόρτισης 3A/5A για την Τοπολογία 2.

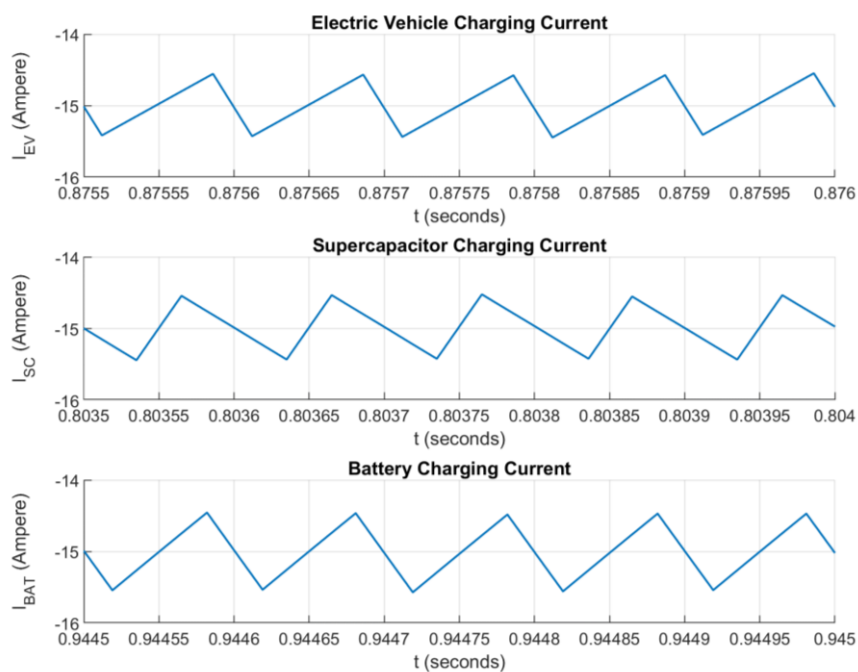
Πηγή	Κυμάτωση ρεύματος φόρτισης (p-p, σε A)	Κυμάτωση ρεύματος εκφόρτισης (p-p, σε A)	Θεμελιώδης συχνότητα κυμάτωσης (kHz)
Συστοιχία μπαταριών	0.196	0.252	10
Συστοιχία υπερπυκνωτών	0.2615	0.476	10
Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος	0.185	0.247	10

**Πίνακας 19:** Αποτελέσματα προσομοίωσης ρευμάτων φόρτισης/εκφόρτισης στα 15A για την Τοπολογία 2.

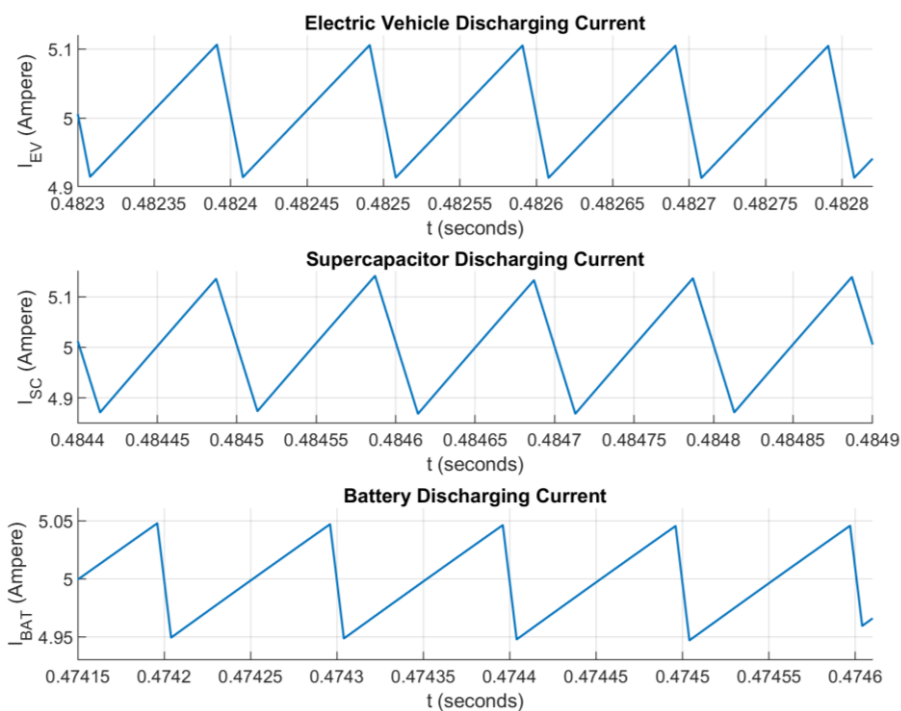
Πηγή	Κυμάτωση ρεύματος φόρτισης (p-p, σε A)	Κυμάτωση ρεύματος εκφόρτισης (p-p, σε A)	Θεμελιώδης συχνότητα κυμάτωσης (kHz)
Συστοιχία μπαταριών	0.914	1.24	10
Συστοιχία υπερπυκνωτών	1.338	2.057	10
Μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος	0.896	1.18	10



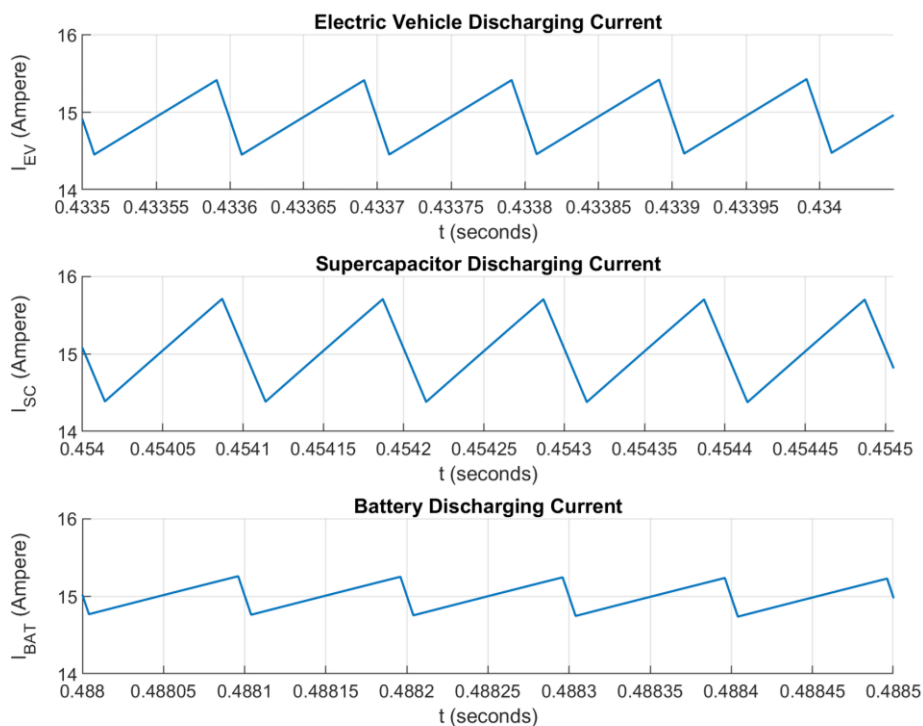
**Εικόνα 59:** Ρεύματα φόρτισης 3A για την Τοπολογία 1.



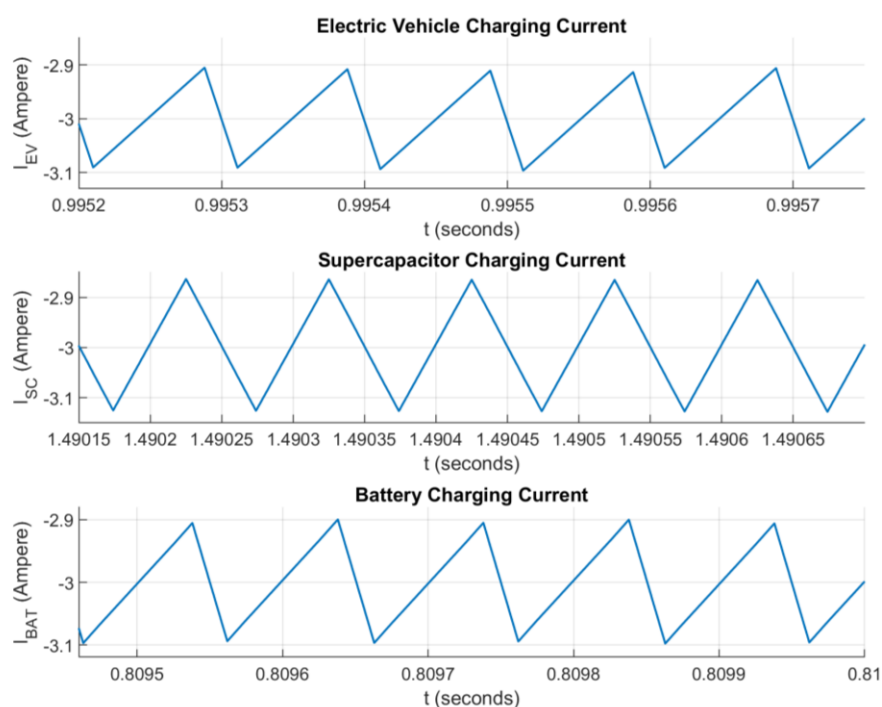
**Εικόνα 60:** Ρεύματα φόρτισης 15A για την Τοπολογία 1.



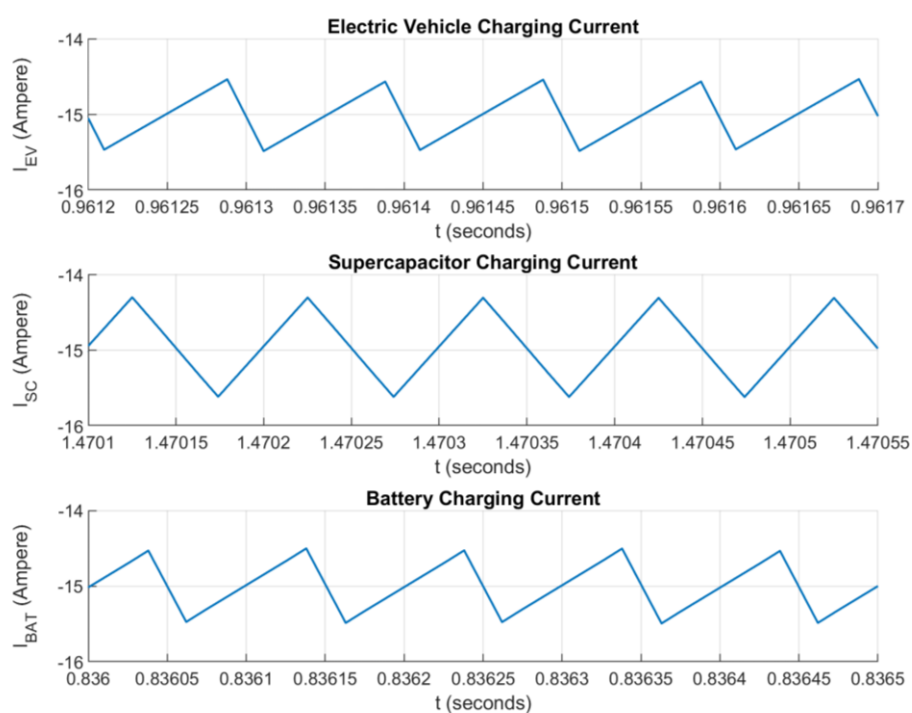
**Εικόνα 61:** Ρεύματα εκφόρτισης 5A για την Τοπολογία 1.



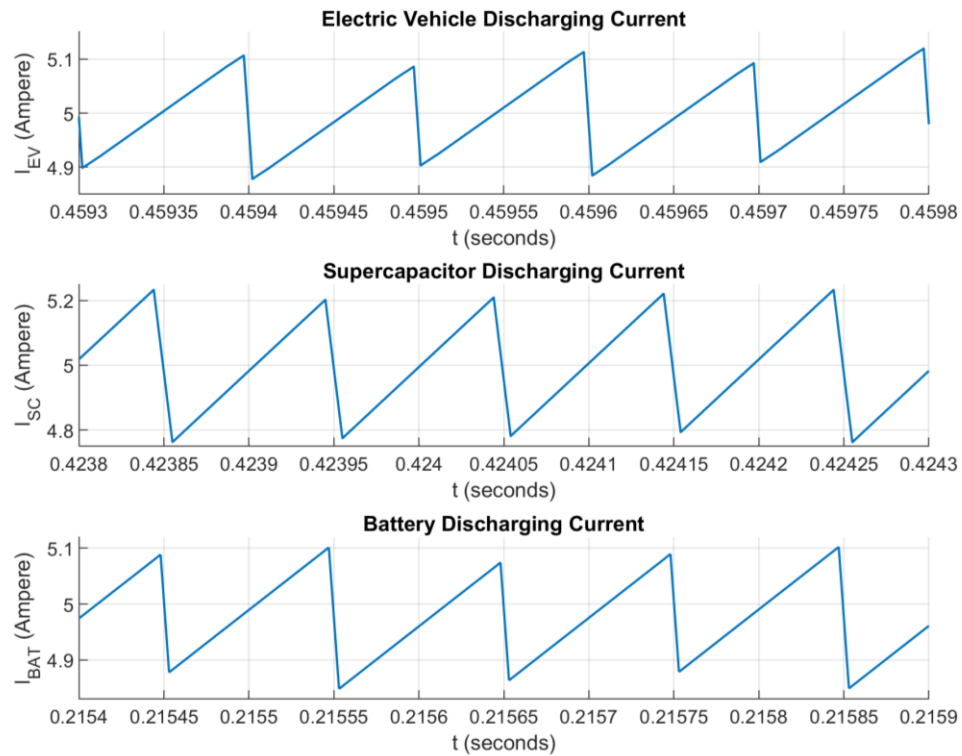
**Εικόνα 62:** Ρεύματα εκφόρτισης 15A για την Τοπολογία 1.



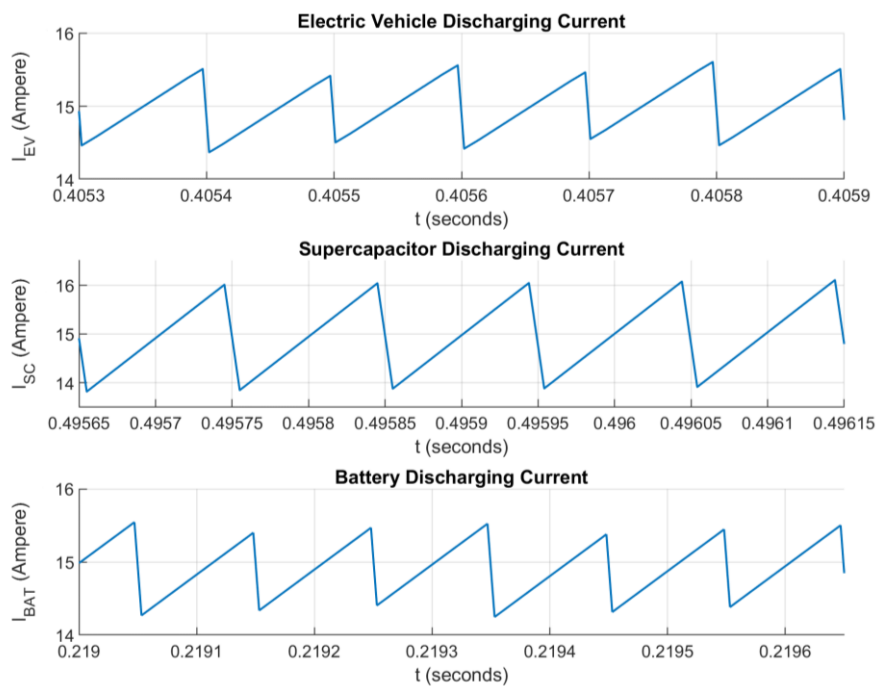
**Εικόνα 63:** Ρεύματα φόρτισης 3A για την Τοπολογία 2.



**Εικόνα 64:** Ρεύματα φόρτισης 15A για την Τοπολογία 2.



**Εικόνα 65:** Ρεύματα εκφόρτισης 5A για την Τοπολογία 2.



**Εικόνα 66:** Ρεύματα εκφόρτισης 15A για την Τοπολογία 2.



## 4.5 Λογισμικό βελτιστοποίησης των κυκλωμάτων ισχύος

Υλοποιήθηκε κατάλληλο λογισμικό βελτιστοποίησης για τον καλύτερο σχεδιασμό του κυκλώματος ισχύος, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Particle Swarm Optimization (PSO) της Matlab. Ο PSO είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο οποίος χρησιμοποιεί έναν αριθμό σωματιδίων που κινούνται στο χώρο αναζήτησης ενός προβλήματος. Κάθε σωματίδιο αξιολογεί το αποτέλεσμα του προβλήματος (το οποίο ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση) στην τρέχουσα θέση του με βάση τις τιμές του σωματιδίου για κάθε μεταβλητή σχεδιασμού στην θέση αυτή. Μετά από κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, κάθε σωματίδιο μετακινείται σε μια νέα θέση. Αυτή η θέση προκύπτει συνδυάζοντας την προηγούμενη θέση του σωματιδίου και το καλύτερο αποτέλεσμα μέχρι αυτό το σημείο. Ουσιαστικά μετά το πέρας ορισμένων επαναλήψεων, ο αλγόριθμος PSO προσδιορίζει τιμές για τις μεταβλητές σχεδιασμού, οι οποίες προσεγγίζουν ικανοποιητικά το συνολικό βέλτιστο (ελάχιστο ή μέγιστο, ανάλογα με την επιθυμητή αντικειμενική συνάρτηση σε κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται).

Στην περίπτωση του βέλτιστου σχεδιασμού των προτεινόμενων τοπολογιών, ως αντικειμενική συνάρτηση ορίστηκαν οι συνολικές απώλειες του κυκλώματος ισχύος και ως μεταβλητές σχεδιασμού οι τιμές των πηνίων και πυκνωτών του κυκλώματος, καθώς και η τιμή της διακοπτικής συχνότητας. Επομένως, ο αλγόριθμος PSO αναζητάει τις βέλτιστες τιμές πηνίων, πυκνωτών και διακοπτικής συχνότητας ώστε οι απώλειες του κυκλώματος ισχύος να ελαχιστοποιούνται, με τον περιορισμό όμως ότι το THD να είναι μικρότερο του 5% και το ρεύμα διαρροής γείωσης να είναι μικρότερο από 300mA. Δύο ακόμα περιορισμοί είναι οι εξής:

- το άεργο ρεύμα που διέρχεται από τους πυκνωτές του LCL φίλτρου ( $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ ) να είναι μικρότερο από το 1% του ονομαστικού ρεύματος που διαρρέει κάθε φάση ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ) και
- η διακοπτική συχνότητα να είναι στο εύρος τιμών 10-20kHz.

Το λογισμικό βελτιστοποίησης αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Το κύκλωμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 51 για την Τοπολογία 1 και στην Εικόνα 52 για την Τοπολογία 2. Στην Εικόνα 66 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε. Πιο συγκεκριμένα για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων σχεδίασης [decision variables (X)] των δύο τοπολογιών είναι απαραίτητο να τεθούν τα όρια μέσα στα οποία μπορούν να κυμαίνονται. Οι παράμετροι για τις οποίες αποφασίζει ο αλγόριθμος PSO είναι τα πηνία στην είσοδο κάθε πηγής ( $L_{SC}$ ,  $L_{EV}$ ,  $L_{BAT}$ ), τα πηνία και οι πυκνωτές του LCL φίλτρου ( $L_{a1}$ ,  $L_{b1}$ ,  $L_{c1}$ ,  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ ,  $L_{a2}$ ,  $L_{b2}$ ,  $L_{c2}$ ), καθώς και οι διακοπτικές συχνότητες της τριφασικής γέφυρας ( $F_{SBRIDGE}$ ) και των DC/DC μετατροπέων για τις συστοιχίες των μπαταριών και των SCs ( $F_{SDC/DC}$ ). Τα ελάχιστα και μέγιστα όρια τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 20. Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως οι συνολικές απώλειες ( $P_{LOSSES}$ ) του εκάστοτε κυκλώματος και η ελαχιστοποίηση της με βάση τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Δηλαδή:

$$\text{minimize}[P_{\text{LOSSES}}(X)], \text{ όπου } X = [L_{SC}, L_{EV}, L_{BAT}, L_{a1}, L_{b1}, L_{c1}, C_a, C_b, C_c, L_{a2}, L_{b2}, L_{c2}, F_{S_{\text{BRIDGE}}}, F_{S_{\text{DC/DC}}}]$$

**Πίνακας 20:** Όρια αναζήτησης βέλτιστων τιμών των παραμέτρων σχεδίασης.

Μεταβλητή σχεδιασμού	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
$L_{SC}$ (mH)	0.5	5
$L_{EV}$ (mH)	0.5	5
$L_{BAT}$ (mH)	0.5	5
$L_{a1}$ (mH)	0.5	5
$L_{b1}$ (mH)	0.5	5
$L_{c1}$ (mH)	0.5	5
$L_{a2}$ (mH)	0.5	5
$L_{b2}$ (mH)	0.5	5
$L_{c2}$ (mH)	0.5	5
$C_a$ (μF)	500	5000
$C_b$ (μF)	500	5000
$C_c$ (μF)	500	5000
$F_{S_{DC/DC}}$ (kHz)	10	20
$F_{S_{BRIDGE}}$ (kHz)	10	20

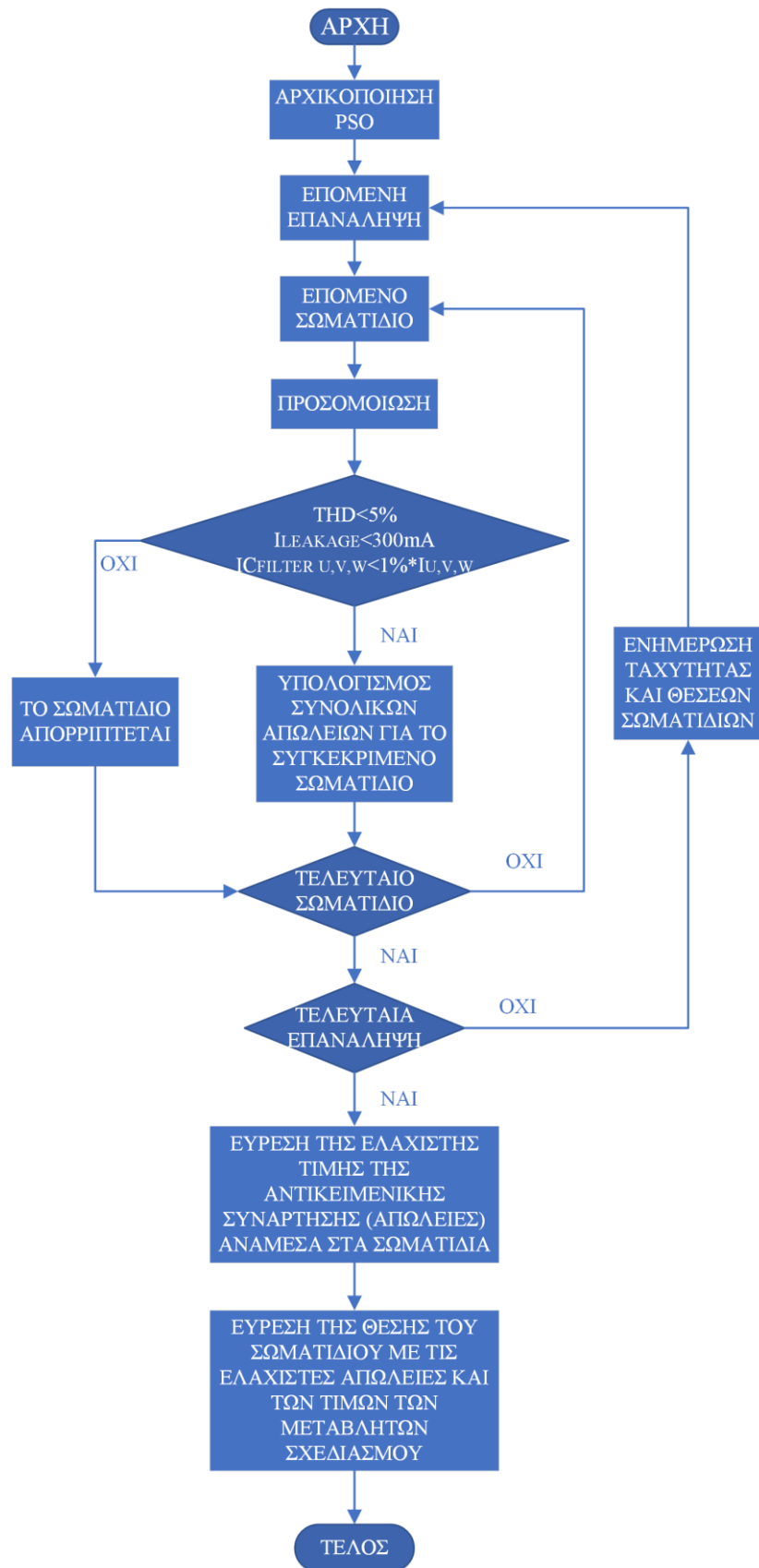
Προκειμένου να γίνει υπολογισμός των συνολικών απωλειών του μετατροπέα, χρησιμοποιείται προσομοίωση στο Simulink. Το μοντέλο Simulink έχει διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να λαμβάνει τις τιμές των μεταβλητών προσδιορισμού ενός δεδομένου σωματιδίου στην τρέχουσα θέση του και να λειτουργεί το κύκλωμα στην επιθυμητή τιμή ισχύος. Ως φυσικό επακόλουθο, για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου PSO το μοντέλο διαμορφώνεται για όλα τα σωματίδια ένα προς ένα. Εάν, όμως, κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης για κάποιο δεδομένο σωματίδιο, δεν ικανοποιηθεί οποιοσδήποτε από τους περιορισμούς που έχουν τεθεί, τότε το σύνολο των μεταβλητών σχεδιασμού που αντιπροσωπεύουν την αντίστοιχη θέση του σωματιδίου απορρίπτεται. Διαφορετικά, ο αλγόριθμος συνεχίζει με τον υπολογισμό των συνολικών απωλειών, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες όλων των φίλτρων και των πηνίων του κυκλώματος. Για την προσομοίωση των τοπολογιών και τον υπολογισμό των απωλειών τους χρησιμοποιήθηκαν εξαρτήματα από την βιβλιοθήκη Simscape Physical System του Simulink. Για την βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με συνολική ισχύς εξόδου στα 10kW. Συγκεκριμένα οι πηγές της συστοιχίας των μπαταριών, της συστοιχίας SC και της μπαταρίας του EV δίνουν από 3kW έκαστος και το υπόλοιπο 1kW παρέχεται από την Φ/Β συστοιχία. Τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης για εκατό επαναλήψεις του αλγορίθμου

Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

PSO και δέκα σωματίδια σε κάθε γενιά, παρουσιάζονται στον Πίνακα 21. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης της βελτιστοποίησης ήταν 120 ώρες και ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε διέθετε μνήμη RAM 8GB και επεξεργαστή Intel(R) Core(TM) i5-10500 CPU στα 3.10GHz.

**Πίνακας 21:** Αποτελέσματα αλγορίθμου βελτιστοποίησης για εκατό επαναλήψεις και δέκα σωματίδια σε κάθε επανάληψη.

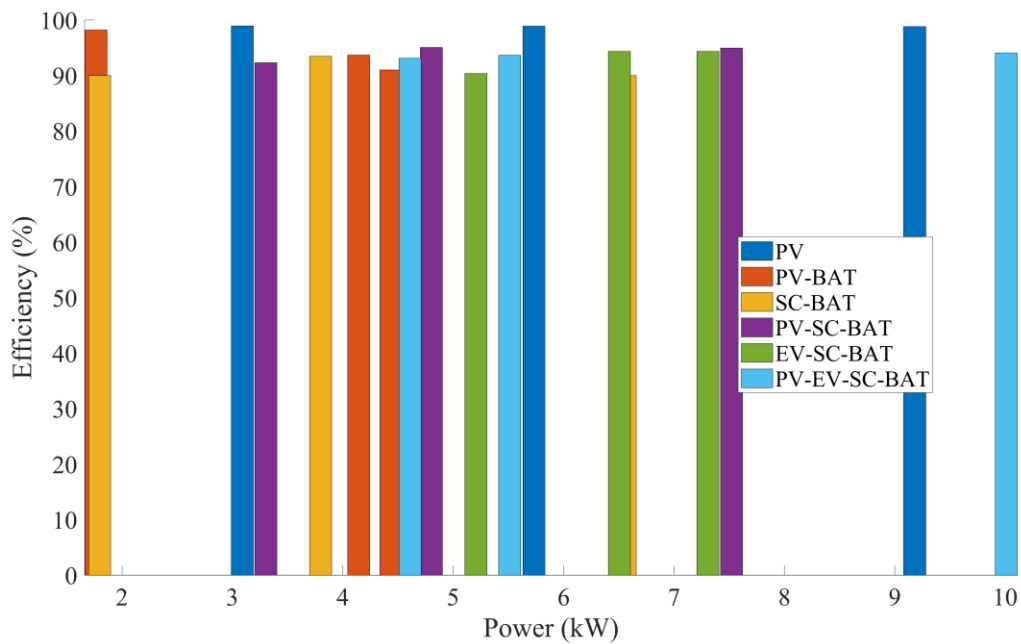
ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ 1		ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ 2	
ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	ΤΙΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	ΤΙΜΕΣ
$L_{SC}$	3mH	$L_{SC}$	3.7mH
$L_{EV}$	3.2mH	$L_{EV}$	4.9mH
$L_{BAT}$	4.7mH	$L_{BAT}$	4.8mH
$L_{a1}$	3.6mH	$L_{a1}$	3.4mH
$L_{b1}$	3.5mH	$L_{b1}$	3.5mH
$L_{c1}$	3.6mH	$L_{c1}$	3.5mH
$L_{a2}$	4.1mH	$L_{a2}$	3.9mH
$L_{b2}$	4mH	$L_{b2}$	4mH
$L_{c2}$	4.1mH	$L_{c2}$	4mH
$C_a$	25μF	$C_a$	25μF
$C_b$	24μF	$C_b$	26μF
$C_c$	28μF	$C_c$	26μF
$FS_{DC/DC}$	14491Hz	$FS_{DC/DC}$	12538Hz
$FS_{BRIDGE}$	19727Hz	$FS_{BRIDGE}$	16028Hz



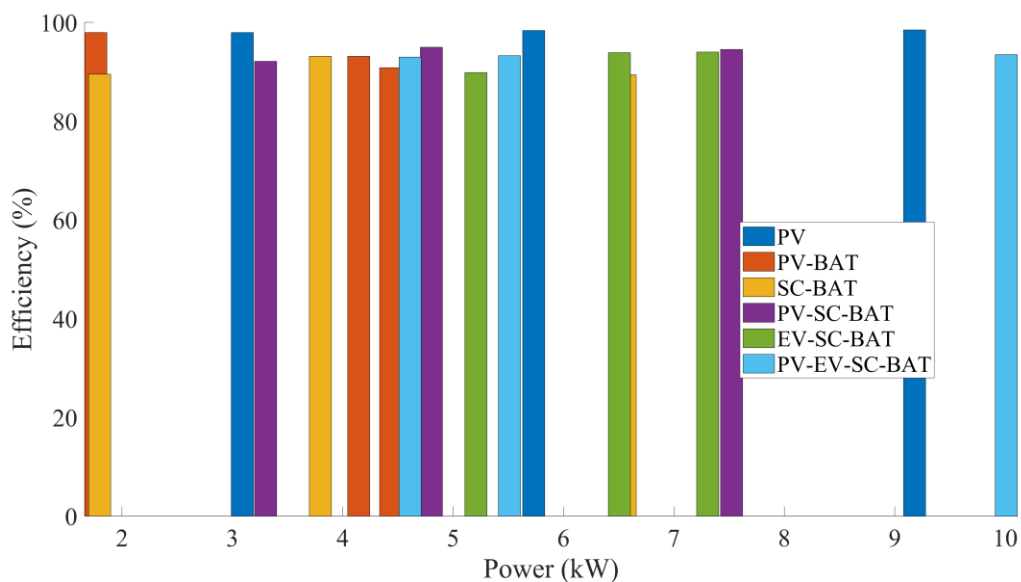
Εικόνα 67: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε.

## 4.6 Βαθμός απόδοσης

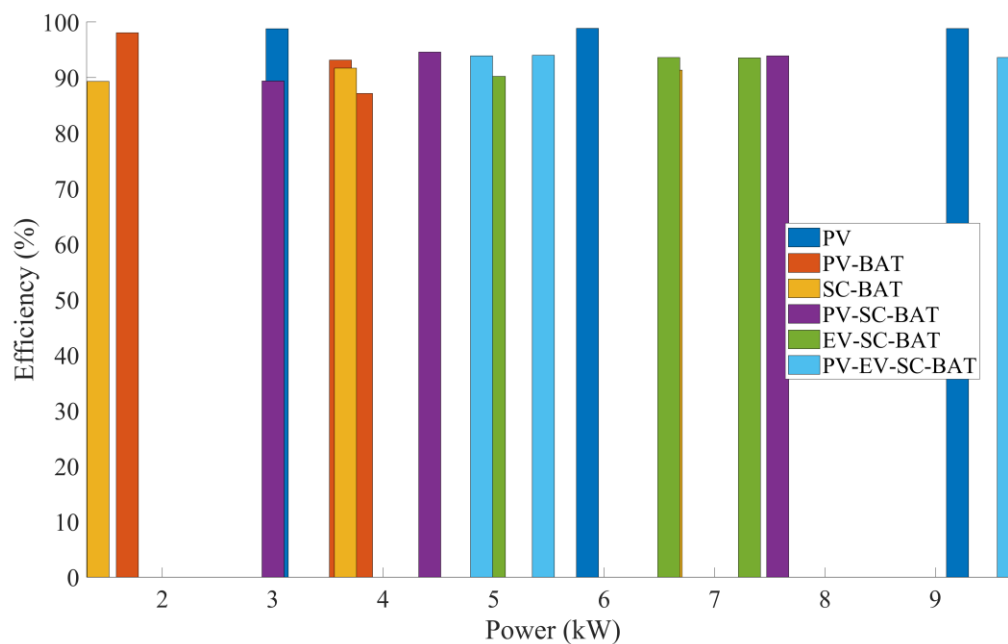
Έλαβαν χώρα, ακόμη, προσομοιώσεις για την μελέτη του βαθμού απόδοσης και για τις δύο προτεινόμενες τοπολογίες. Η διακοπτική συχνότητα ορίστηκε στα 10kHz και 20kHz για διάφορες ροές ισχύος με μέγιστη ισχύς εξόδου στα 10kW. Τα αποτελέσματα δείχνονται σε ραβδογράμματα (Εικόνα 68 και Εικόνα 69) για την Τοπολογία 1 και στις Εικόνες 70 και 71 για την Τοπολογία 2.



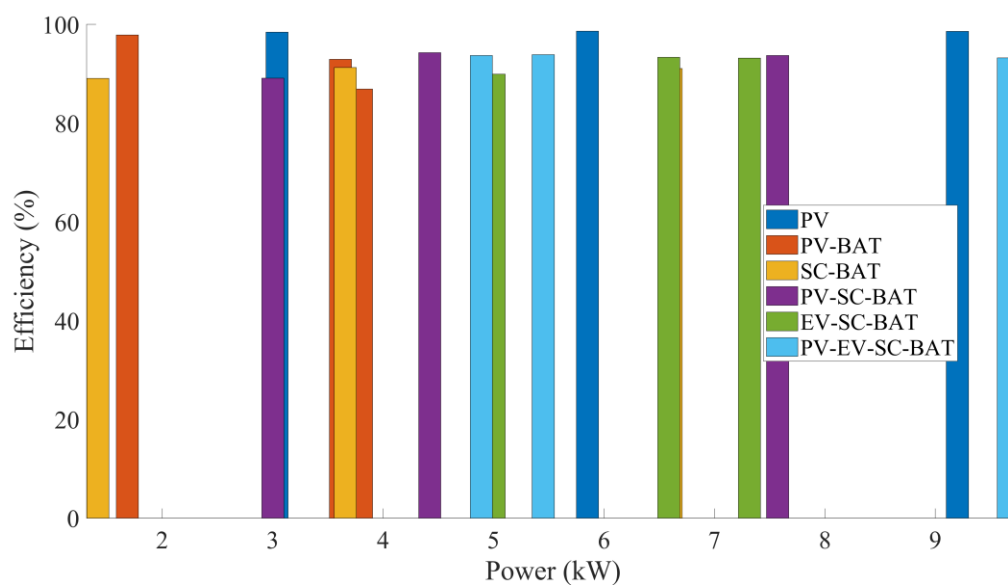
**Εικόνα 68:** Βαθμός απόδοσης για την Τοπολογία 1 στα 10kHz.



**Εικόνα 69:** Βαθμός απόδοσης για την Τοπολογία 1 στα 20kHz.



**Εικόνα 70:** Βαθμός απόδοσης για την Τοπολογία 2 στα 10kHz.



**Εικόνα 71:** Βαθμός απόδοσης για την Τοπολογία 2 στα 20kHz.

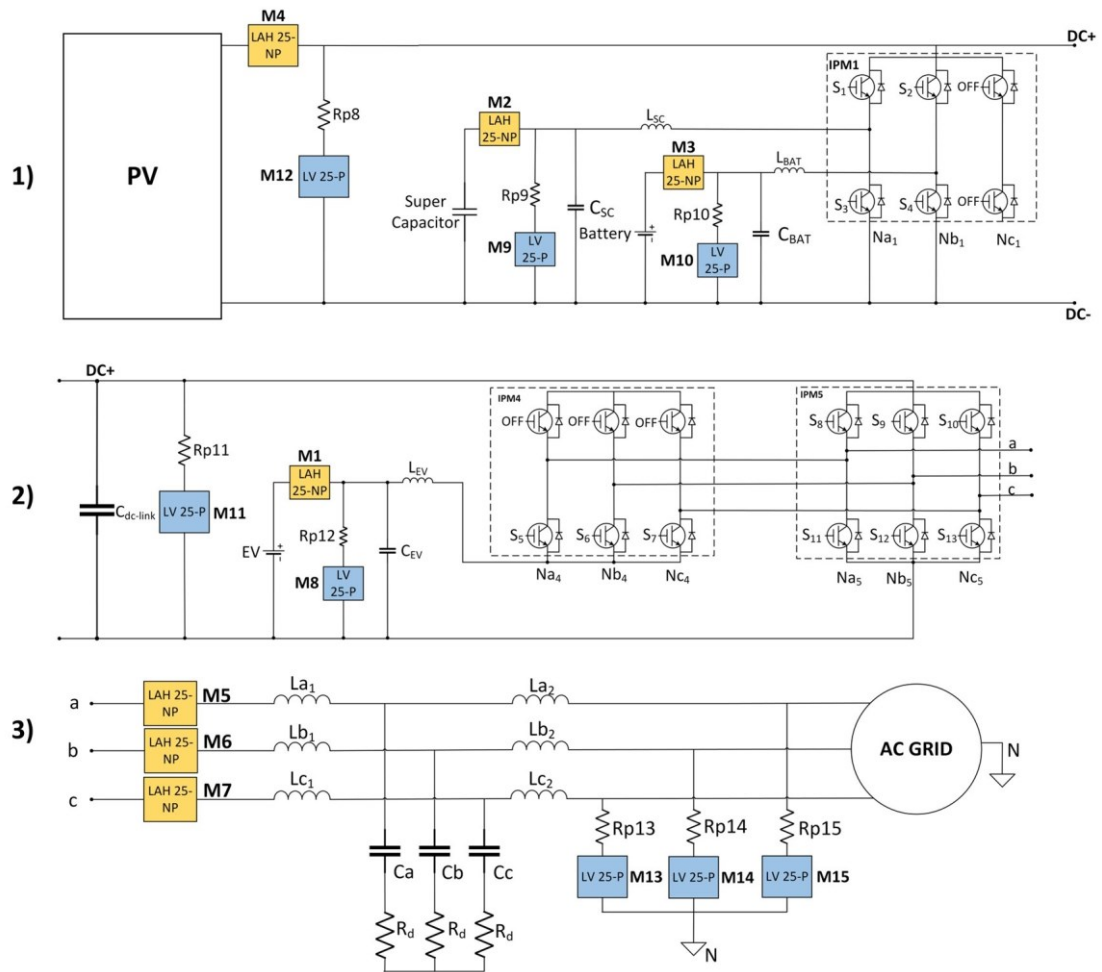
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΠΡΩΤΟΤΥΠΩΝ

### 5.1 Εισαγωγή

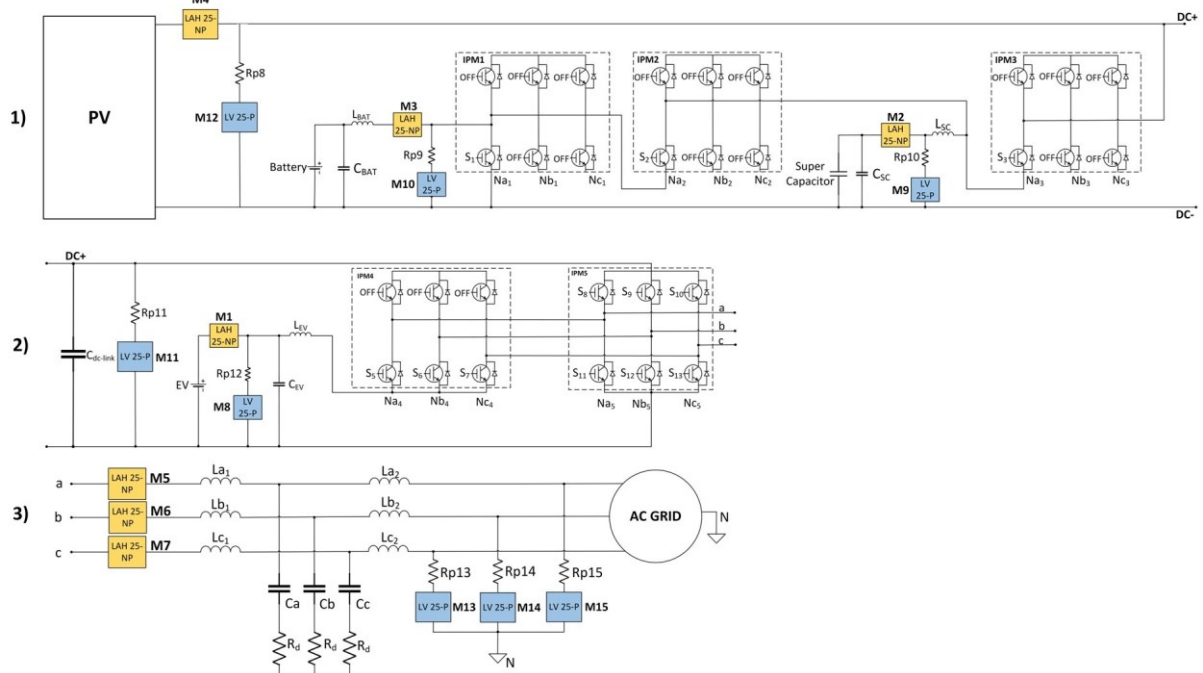
Για την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας των μετατροπέων DC/AC τύπου MPC που σχεδιάστηκαν και προσομοιώθηκαν, κατασκευάστηκαν πειραματικά πρωτότυπα για την υλοποίηση και των δύο διαφορετικών τοπολογιών που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο αυτής της μεταπτυχιακής διατριβής. Η κύρια διαφορά τους, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έγκειται στην τοπολογία του DC/DC μετατροπέα για την σύνδεση της συστοιχίας των μπαταριών και της συστοιχίας SC στο σύστημα. Στην Τοπολογία 1 οι συστοιχίες υπερπυκνωτών και μπαταριών διασυνδέονται μέσω πηνίων και παράλληλων κλάδων στο DC-link που αποτελούνται από ημιαγωγικούς διακόπτες. Στην Τοπολογία 2 οι συστοιχίες υπερπυκνωτών και μπαταριών διασυνδέονται στο DC-link μέσω ενός παράλληλου κλάδου που αποτελεί έναν μετατροπέα DC/DC των δύο εισόδων. Το κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα βασίζεται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα που εμπεριέχουν μία τριφασική γέφυρα και κατάλληλα κυκλώματα για την οδήγηση των διακοπών. Αυτά τα ολοκληρωμένα ονομάζονται Intelligent Power Modules (IPMs) και για το εργαστηριακό πρωτότυπο χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο IKCM20L60GDXXMA1. Για την κατασκευή του κυκλώματος ισχύος του μετατροπέα, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν συνολικά πέντε διαφορετικές πλακέτες:

- 1) Μία πλακέτα που περιλαμβάνει δύο αμφίδρομους DC/DC μετατροπείς για την σύνδεση της συστοιχίας των μπαταριών και των υπερπυκνωτών που αφορά την Τοπολογία 1,
- 2) Μία πλακέτα που περιλαμβάνει έναν αμφίδρομο DC/DC μετατροπέα δύο εισόδων για την σύνδεση της συστοιχίας των μπαταριών και των υπερπυκνωτών που αφορά την Τοπολογία 2,
- 3) Μία πλακέτα που περιλαμβάνει τον DC-link πυκνωτή, το κύκλωμα για την σύνδεση της μπαταρίας του EV, καθώς και την τριφασική γέφυρα του αντιστροφέα,
- 4) Μία βοηθητική πλακέτα που εμπεριέχει DC/DC μετατροπείς απομόνωσης και optocouplers, έτσι ώστε να επιτευχθεί λειτουργική απομόνωση και να γίνει εφικτή η παλμοδότηση ορισμένων διακοπτικών στοιχείων του κυκλώματος ισχύος και
- 5) Μία πλακέτα που περιλαμβάνει το φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα.

Το κύκλωμα ισχύος που παρουσιάστηκε προηγουμένως, μαζί με τα σημεία όπου θα ληφθούν οι κατάλληλες μετρήσεις από τις πλακέτες των μετρητικών, παρουσιάζεται στην Εικόνα 73 και στην Εικόνα 74 για τις Τοπολογίες 1 και 2, αντίστοιχα.



Εικόνα 73: Κυκλωματική αναπαράσταση του πειραματικού πρωτοτύπου για την Τοπολογία 1.



Εικόνα 74: Κυκλωματική αναπαράσταση του πειραματικού πρωτοτύπου για την Τοπολογία 2.



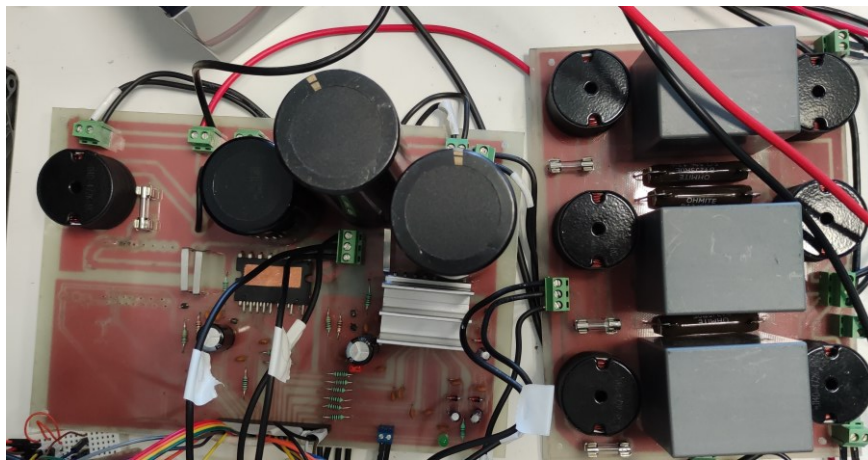
## 5.2 Πειραματικά πρωτότυπα

Οι πειραματικές τιμές των στοιχείων των κυκλωμάτων ισχύος παρατίθενται στον Πίνακα 22. Οι δύο εναλλακτικές τοπολογίες (Τοπολογία 1 και Τοπολογία 2), οι οποίες κατασκευάστηκαν, απεικονίζονται στην Εικόνα 99 και στην Εικόνα 100, αντίστοιχα. Παράλληλα στην Εικόνα 101 παρουσιάζεται ολόκληρο το κύκλωμα ισχύος για τις δύο προτεινόμενες τοπολογίες. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι πλακέτες με τα μετρητικά κυκλώματα, καθώς και μερικά βοηθητικά υποκυκλώματα απομόνωσης έχουν αναπτυχθεί στο πλαίσιο άλλων μεταπτυχιακών διατριβών που εκπονούνται στο Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

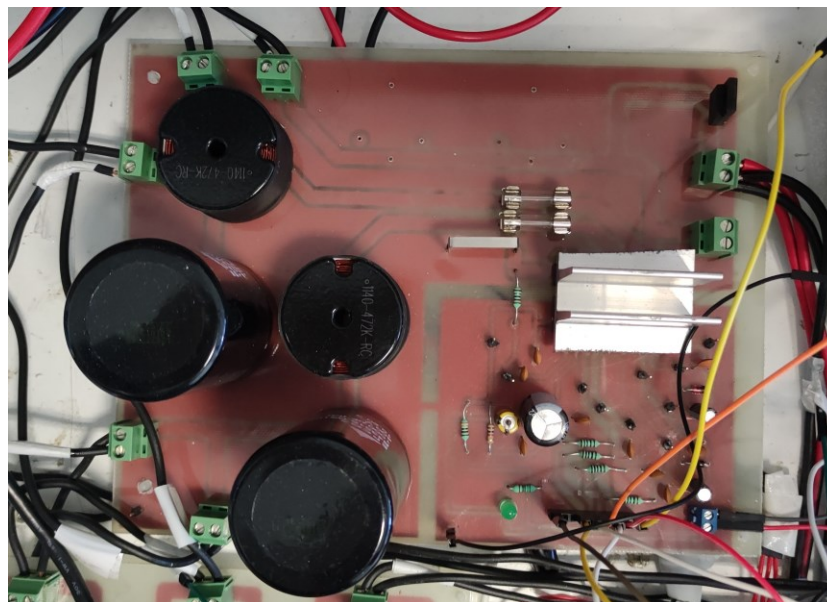
**Πίνακας 22:** Τιμές των παραμέτρων των πειραματικών πρωτοτύπων.

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
$V_{PV}$	Ονομαστική τάση PV	60 V
$V_{SC}$	Ονομαστική τάση SC	24 V
$V_{BAT}$	Ονομαστική τάση μπαταρίας	12 V
$V_{EV}$	Ονομαστική τάση μπαταρίας EV	12 V
$V_{AC}$	Ονομαστική τάση AC δικτύου	230 Vrms, 50 Hz
$L_{\alpha 1}, L_{b1}, L_{c1}$	Αυτεπαγωγή του LCL φίλτρου από την πλευρά του μετατροπέα	4.7 mH
$L_{\alpha 2}, L_{b2}, L_{c2}$	Αυτεπαγωγή του LCL φίλτρου από την πλευρά του δικτύου	4.7 mH
$C_{\omega}, C_b, C_c$	Χωρητικότητα του LCL φίλτρου	10 $\mu$ F
$R_D$	Damping resistor	5 $\Omega$
$C_{DC-link}$	Χωρητικότητα του DC-link	500 $\mu$ F
$C_{SC}$	Χωρητικότητα της SC θύρας	1000 $\mu$ F
$C_{BAT}$	Χωρητικότητα της θύρας της μπαταρίας	1000 $\mu$ F
$C_{EV}$	Χωρητικότητα της EV θύρας	1000 $\mu$ F

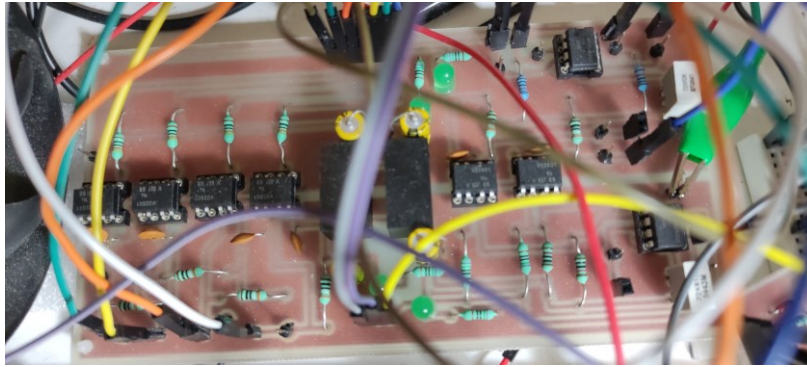
$L_{SC}$	Αυτεπαγωγή της SC θύρας	4.7 mF
$L_{BAT}$	Αυτεπαγωγή της θύρας της μπαταρίας	4.7 mF
$L_{EV}$	Αυτεπαγωγή της EV θύρας	4.7 mF
$F_{SW}$	Διακοπτική συχνότητα	10 kHz



(α)

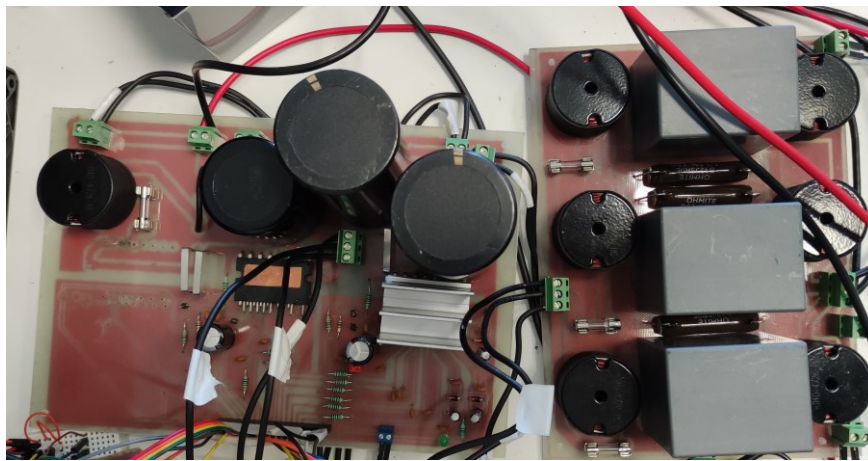


(β)

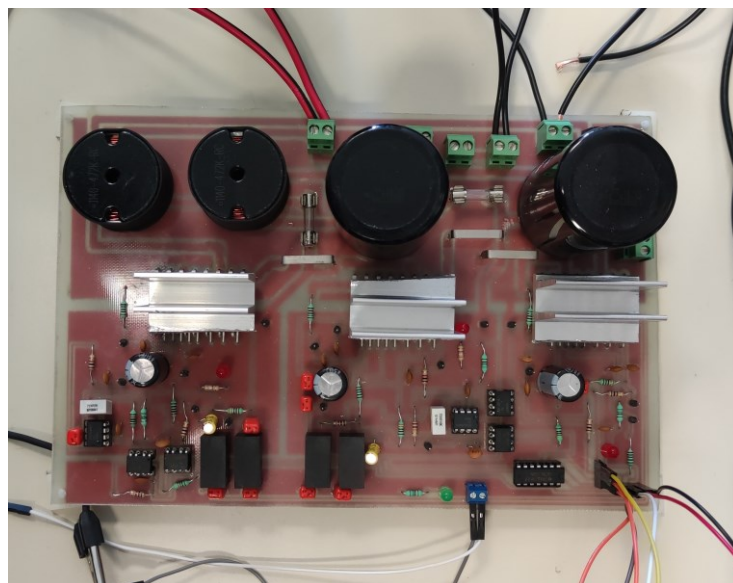


(γ)

**Εικόνα 99:** Πειραματικό πρωτότυπο του κυκλώματος ισχύος για την Τοπολογία 1: (α) τριφασική γέφυρα και LCL φίλτρο εξόδου, (β) κυκλώματα διασύνδεσης συστοιχίας υπερπυκνωτών και συστοιχίας μπαταριών στο DC-link, (γ) κύκλωμα γαλβανικής απομόνωσης.

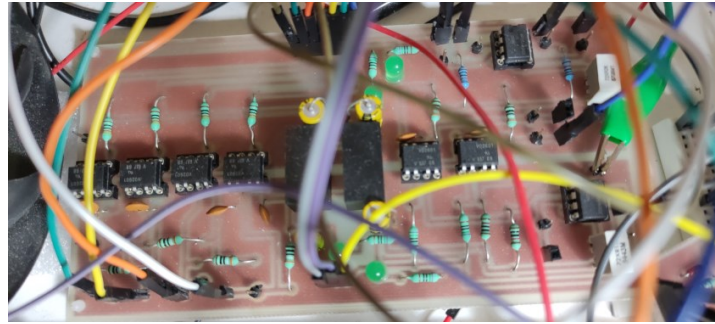


(α)



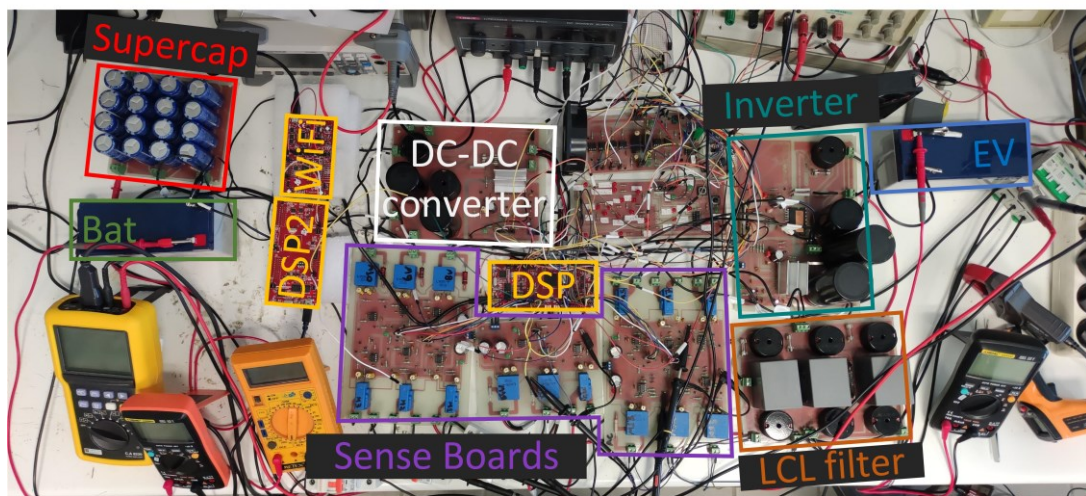
(β)



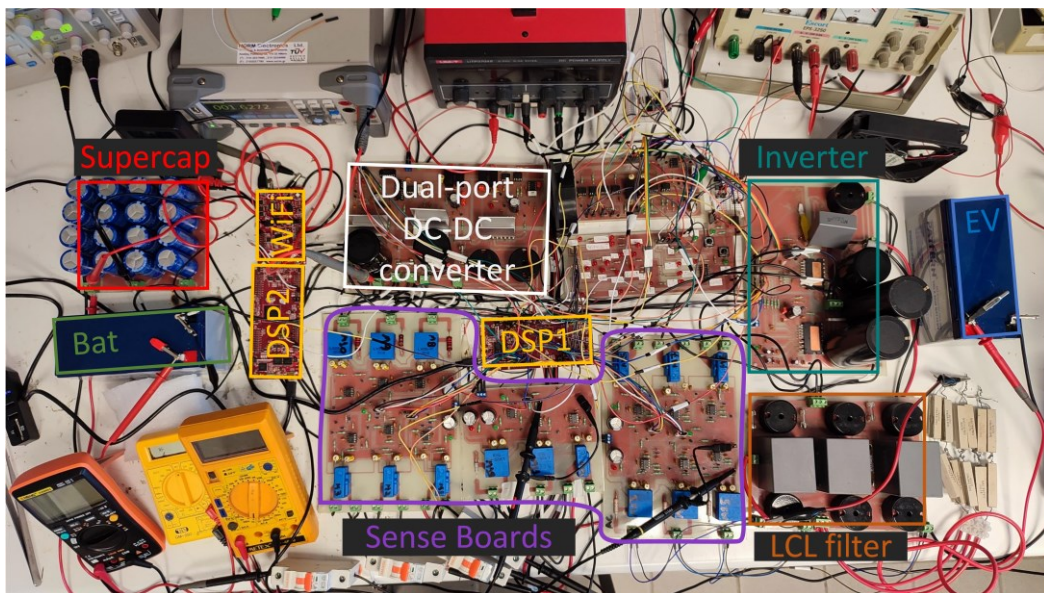


(γ)

**Εικόνα 100:** Πειραματικό πρωτότυπο του κυκλώματος ισχύος για την Τοπολογία 2: (α) τριφασική γέφυρα και LCL φίλτρο εξόδου, (β) μετατροπέας DC/DC dual-port για την διασύνδεση συστοιχίας υπερπυκνωτών και συστοιχίας μπαταριών στο DC-link, (γ) κύκλωμα γαλβανικής απομόνωσης.



(α)

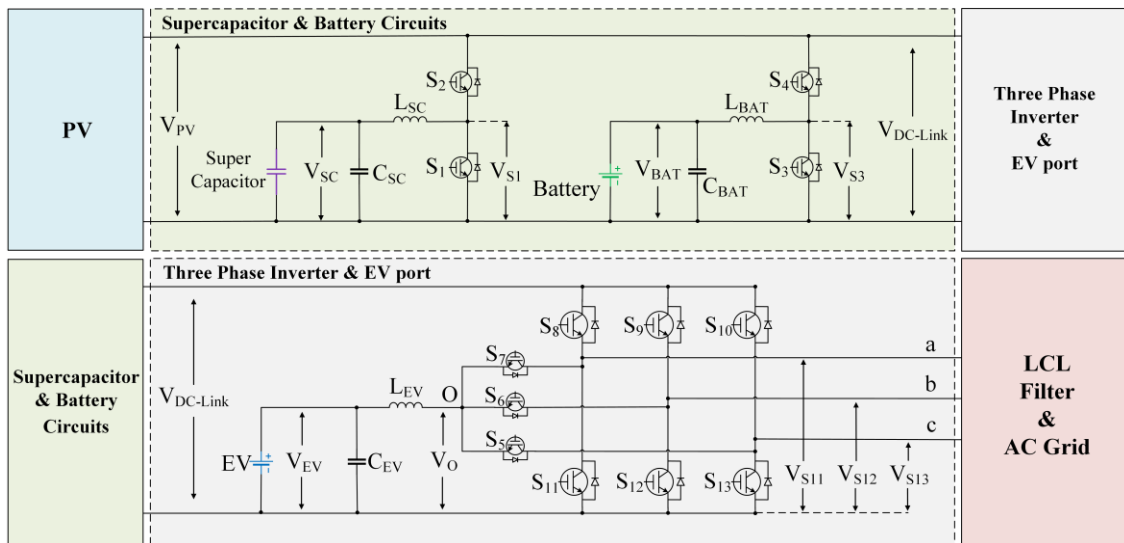


(β)

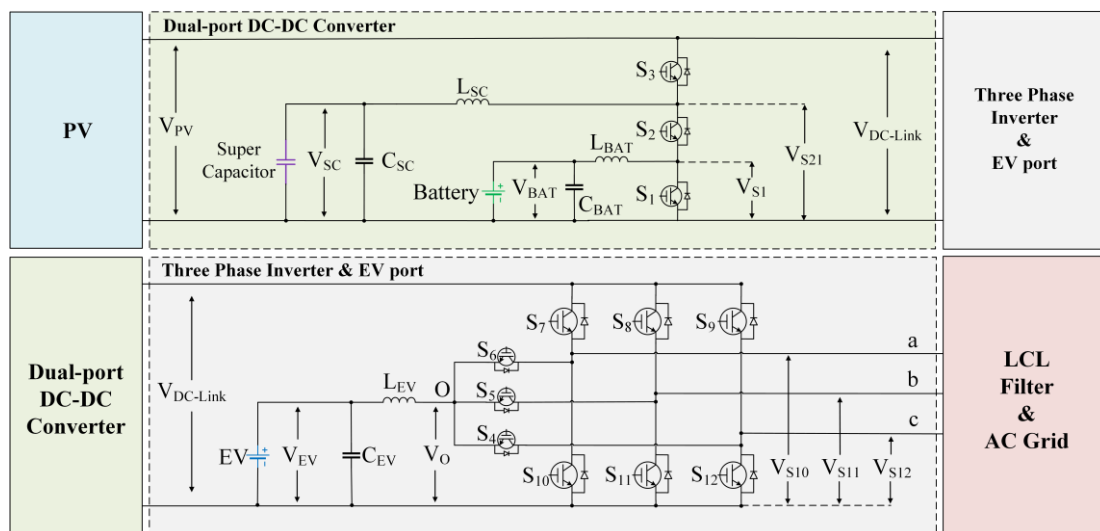
**Εικόνα 67:** Πειραματικό πρωτότυπο του κυκλώματος ισχύος: (α) Τοπολογία 1, (β) Τοπολογία 2.

### 5.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα

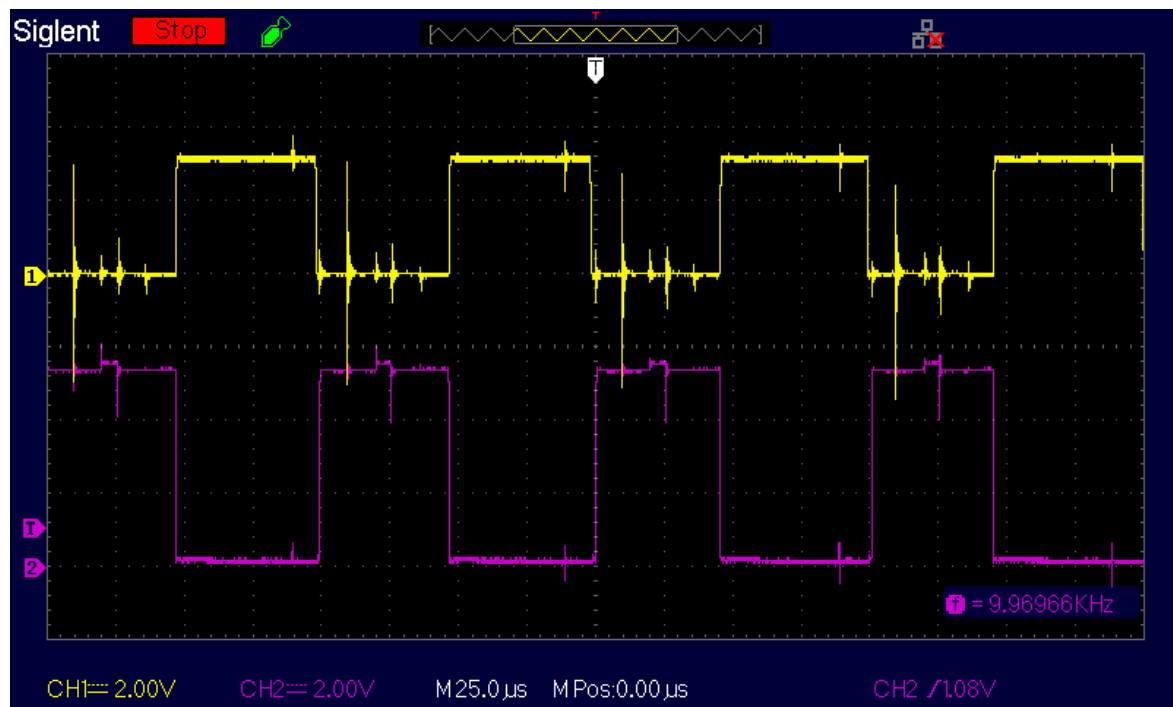
Οι πειραματικές κυματομορφές των σημάτων οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα ισχύος καθώς και τα σήματα τάσεων σε διάφορα σημεία του κυκλώματος παρουσιάζονται παρακάτω. Στην Εικόνα 75 και Εικόνα 76 διαφαίνονται δύο διαγράμματα που απεικονίζουν τα διακοπτικά στοιχεία καθώς και τις τάσεις που μετρήθηκαν για την Τοπολογία 1 και 2 αντίστοιχα. Οι Εικόνες 77-84 αφορούν μετρήσεις του κυκλώματος που είναι κοινές και για τις δύο τοπολογίες. Στις Εικόνες 85, 86 απεικονίζονται οι μετρήσεις των DC/DC μετατροπέων της Τοπολογίας 1, ενώ στις Εικόνες 87-90 απεικονίζονται οι μετρήσεις που αφορούν τον DC/DC μετατροπέα δύο εισόδων της Τοπολογίας 2.



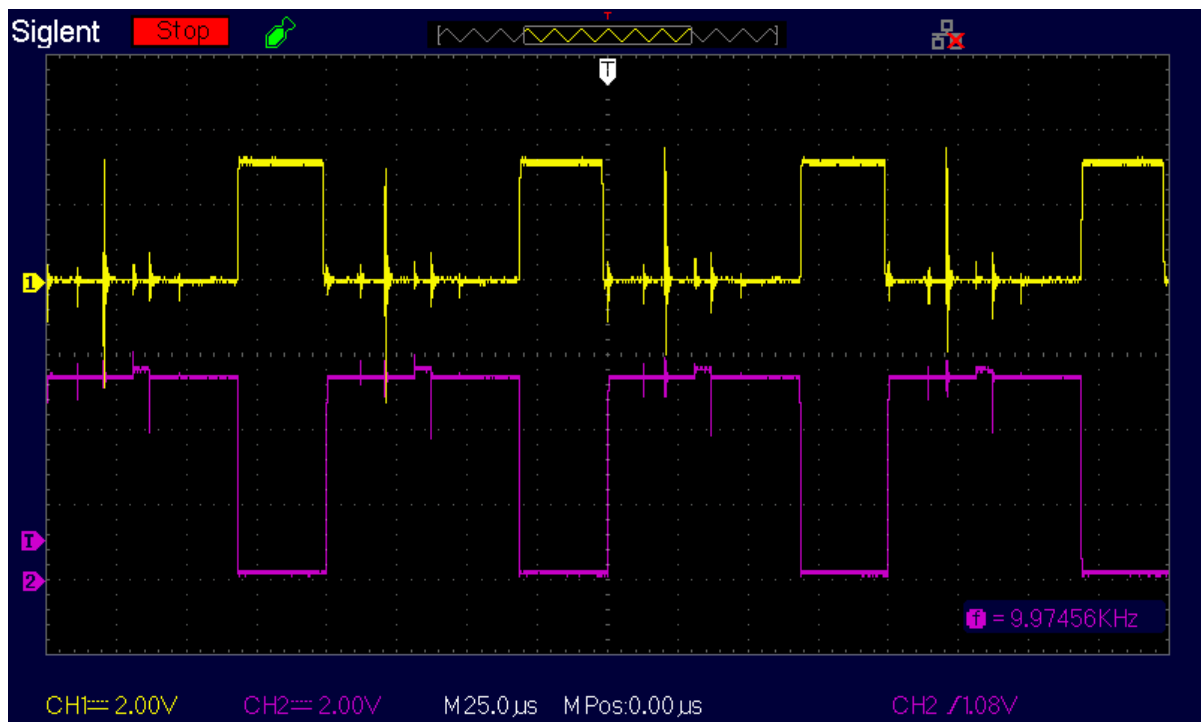
**Εικόνα 75:** Διάγραμμα απεικόνισης τάσεων και διακοπτικών στοιχείων του κυκλώματος για την Τοπολογία 1.



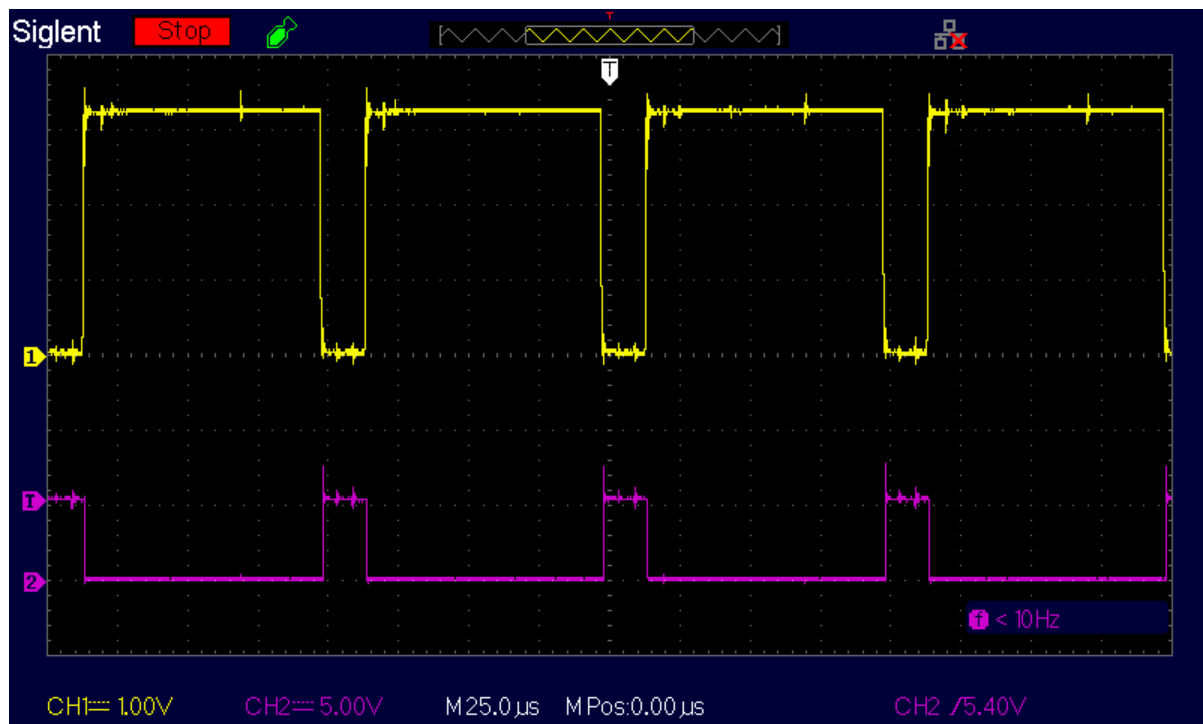
**Εικόνα 76:** Διάγραμμα απεικόνισης τάσεων και διακοπτικών στοιχείων του κυκλώματος για την Τοπολογία 2.



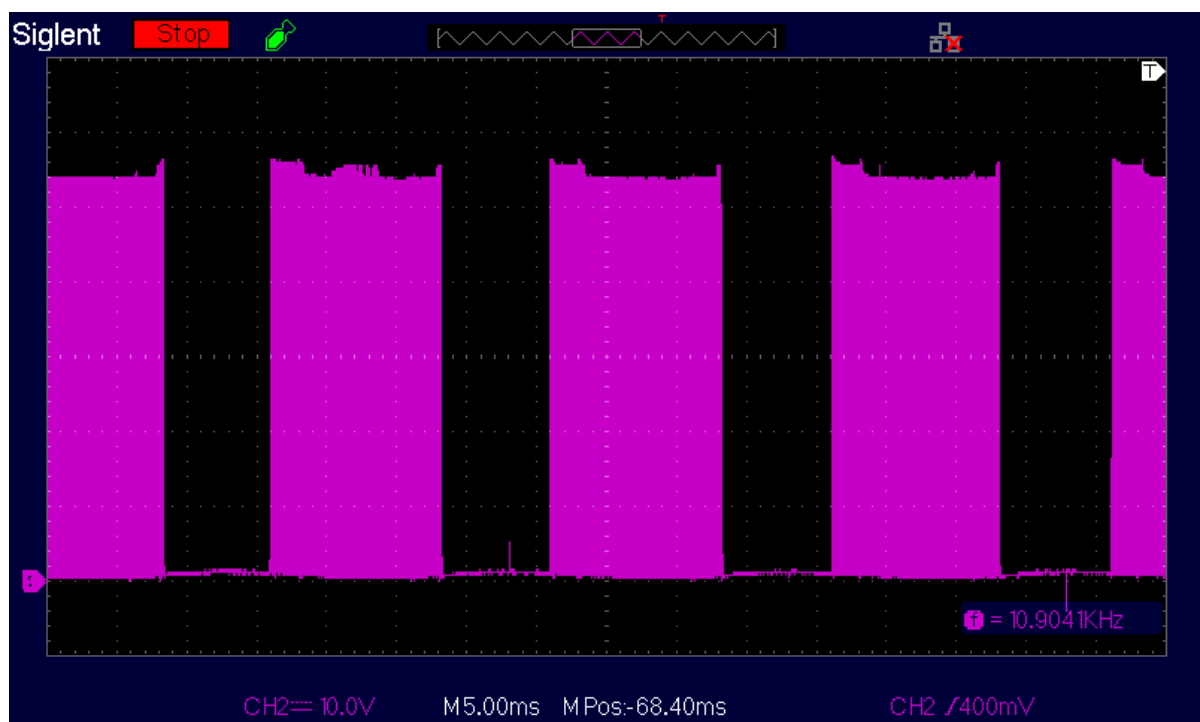
Εικόνα 77: Σήμα οδήγησης στον διακόπτη  $S_{11}$  (CH1: 2V/div) και τάση  $V_{S11}$  (CH2: 20V/div).



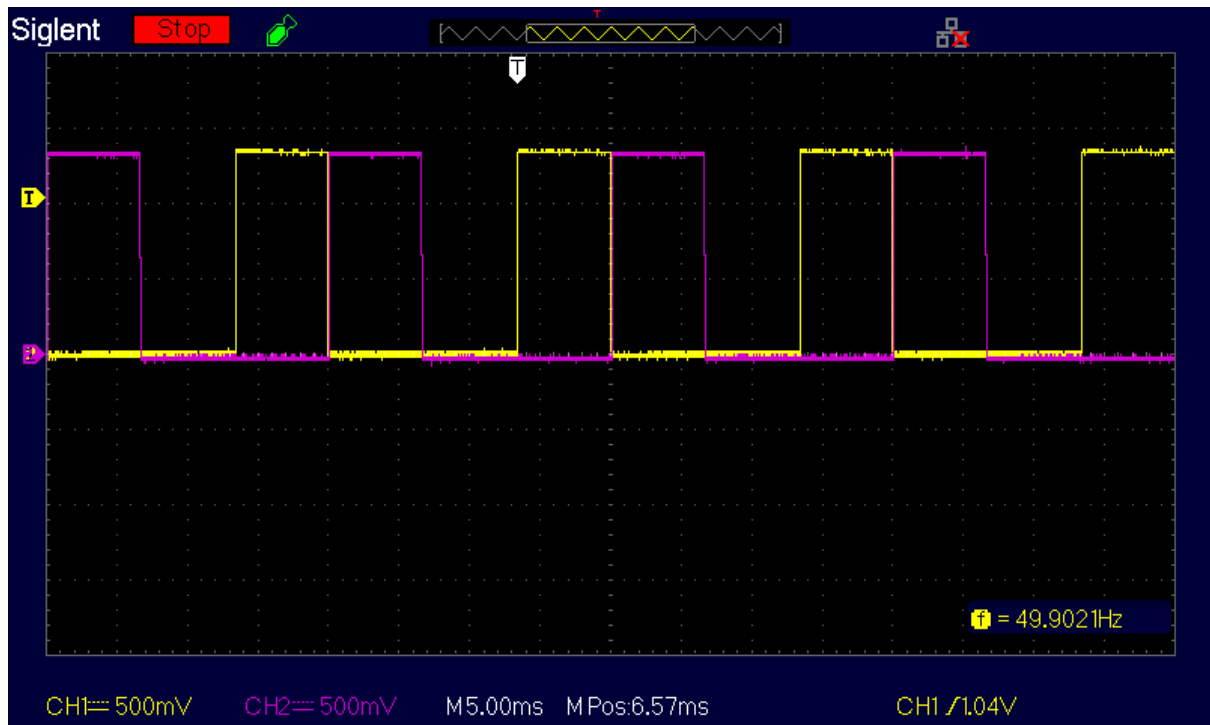
Εικόνα 78: Σήμα οδήγησης στον διακόπτη  $S_{12}$  (CH1: 2V/div) και τάση  $V_{S12}$  (CH2: 20V/div).



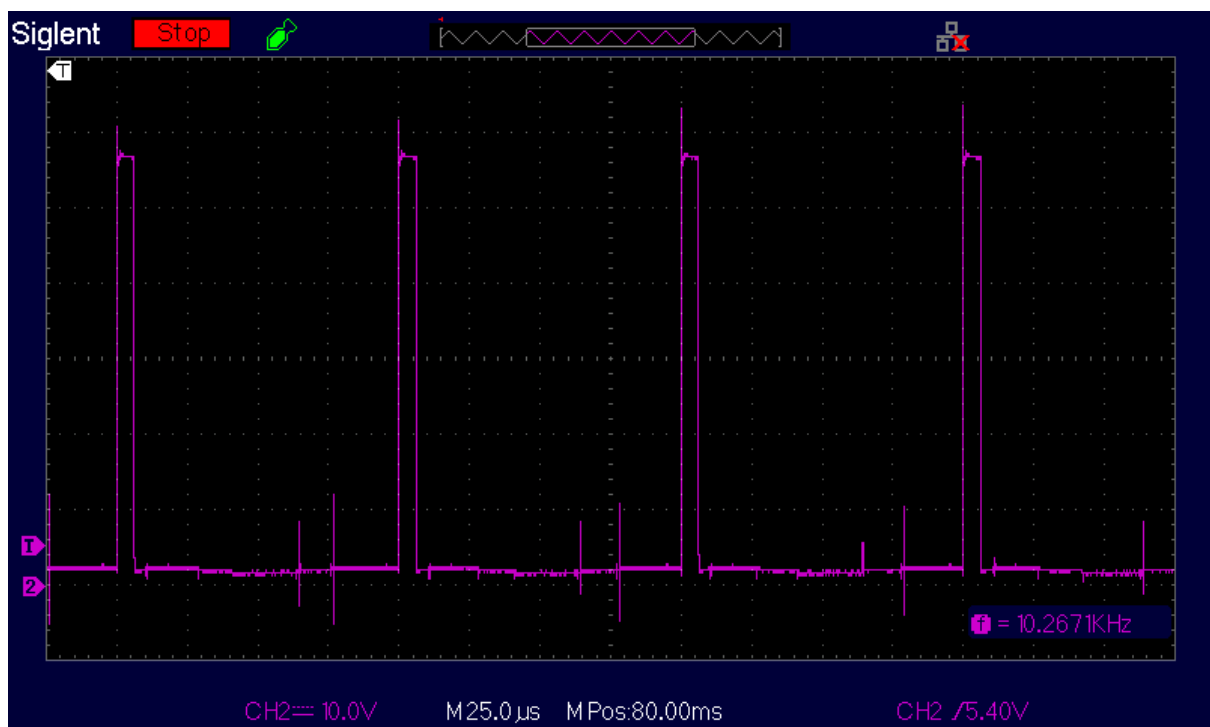
**Εικόνα 79:** Σήμα οδήγησης στον διακόπτη  $S_{13}$  (CH1: 1V/div) και τάση  $V_{S13}$  (CH2: 20V/div).



**Εικόνα 80:** Τάση  $V_{S11}$  σε μεγαλύτερη κλίμακα χρόνου (CH2: 10V/div).

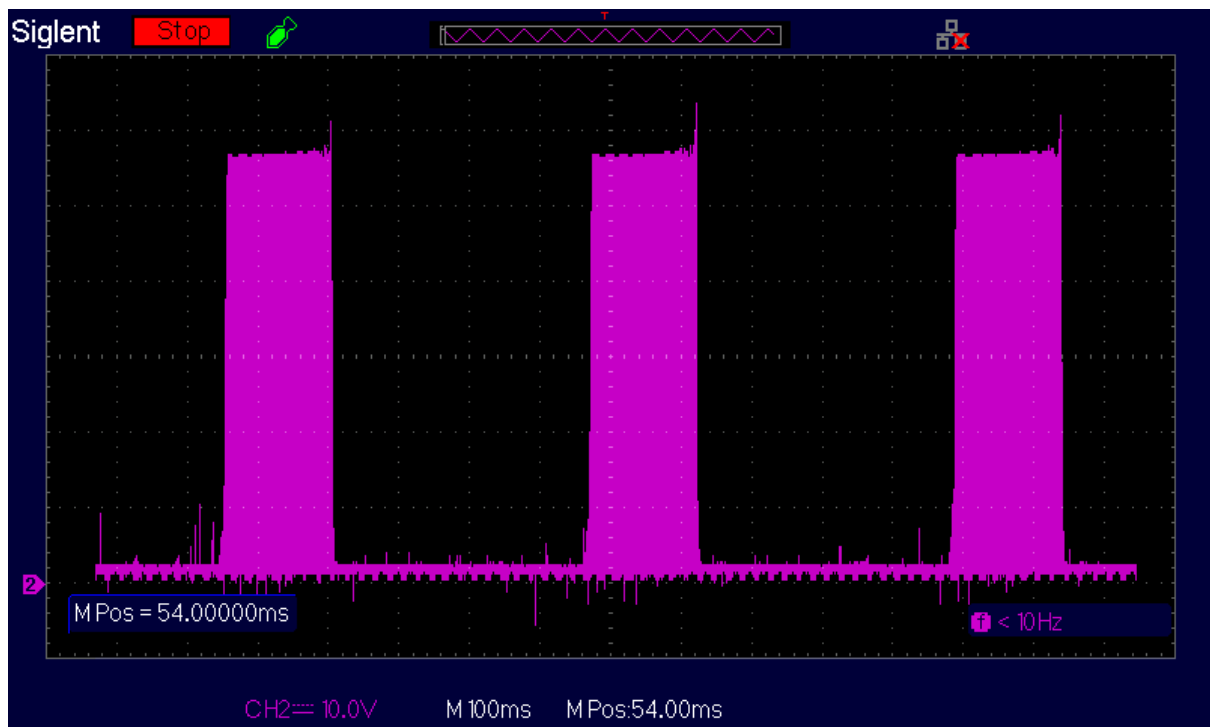


Εικόνα 81: Σήμα οδήγησης των διακοπών  $S_7$  (CH1: 500mV/div) και  $S_6$  (CH2: 500mV/div).

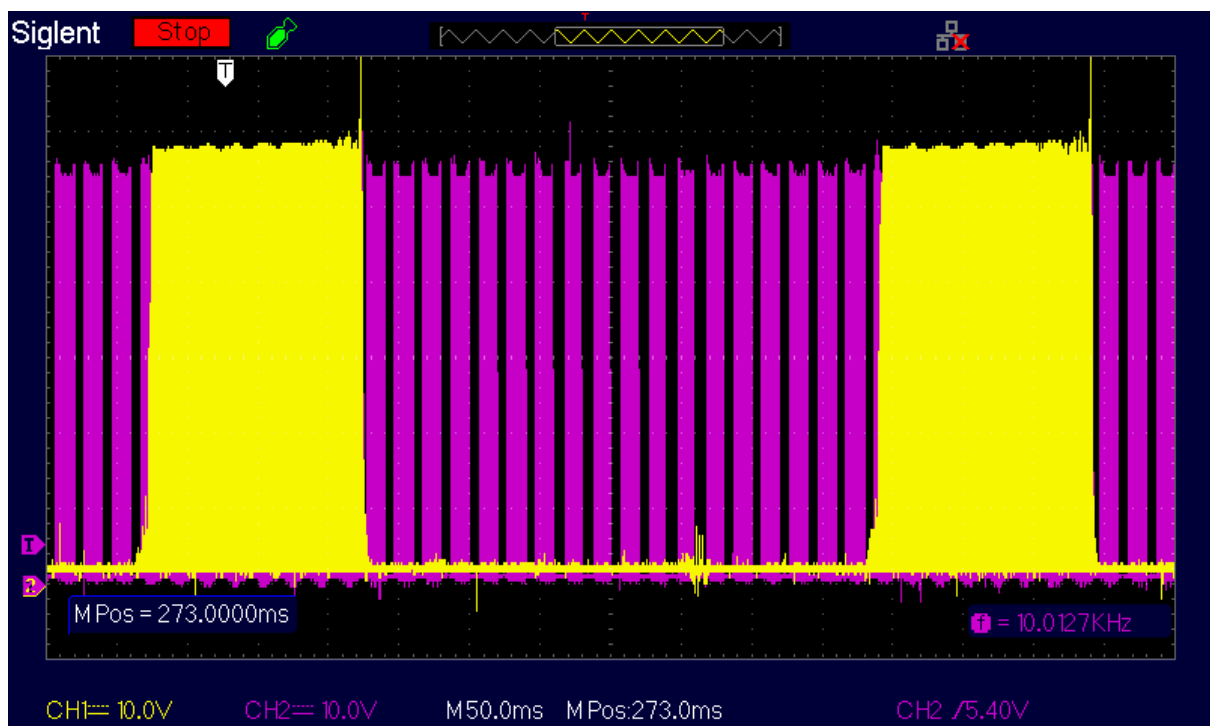


Εικόνα 82: Τάση  $V_O$  (CH2: 10V/div).

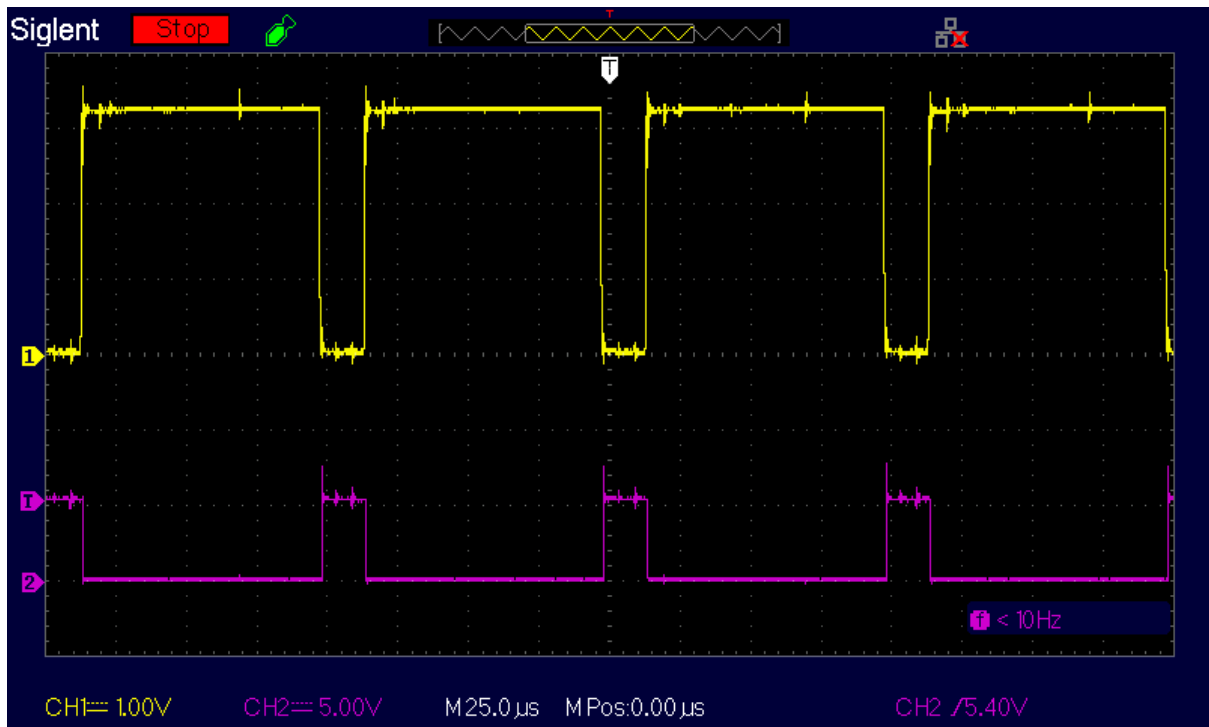




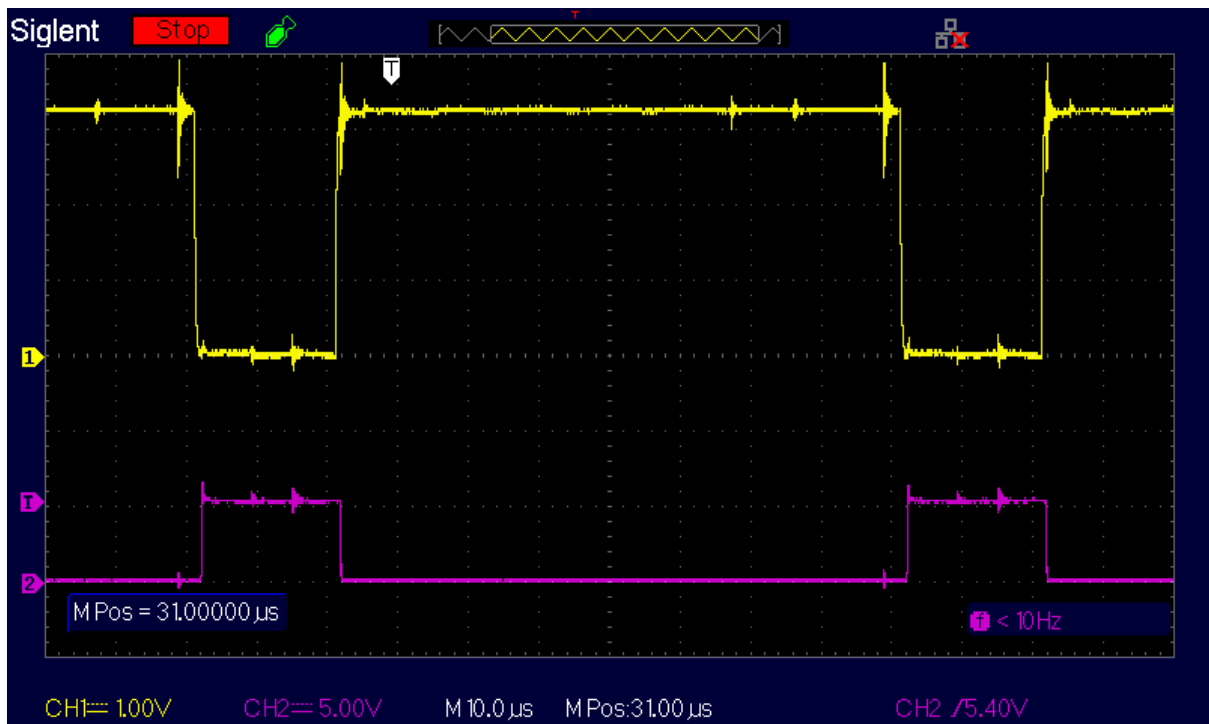
**Εικόνα 83:** Τάση  $V_O$  σε μεγαλύτερη κλίμακα χρόνου (CH2: 10V/div).



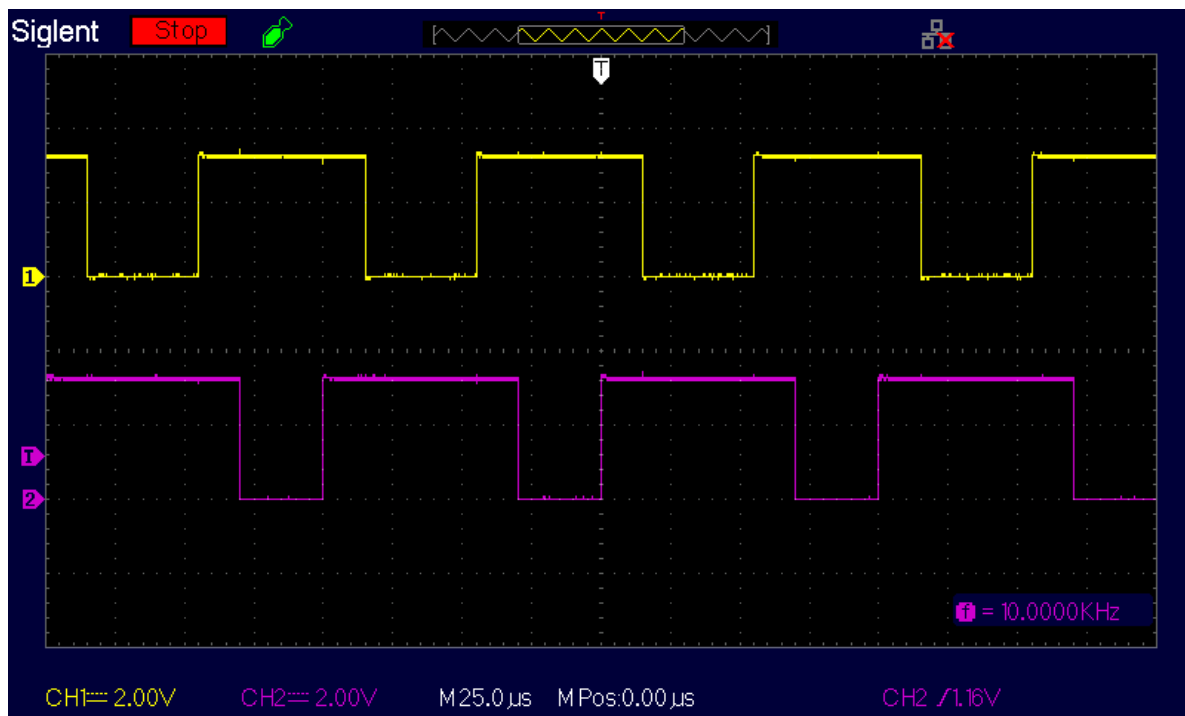
**Εικόνα 84:** Τάση  $V_O$  (CH1: 10V/div) σε σύγκριση με την τάση  $V_{S11}$  (CH2: 10V/div).



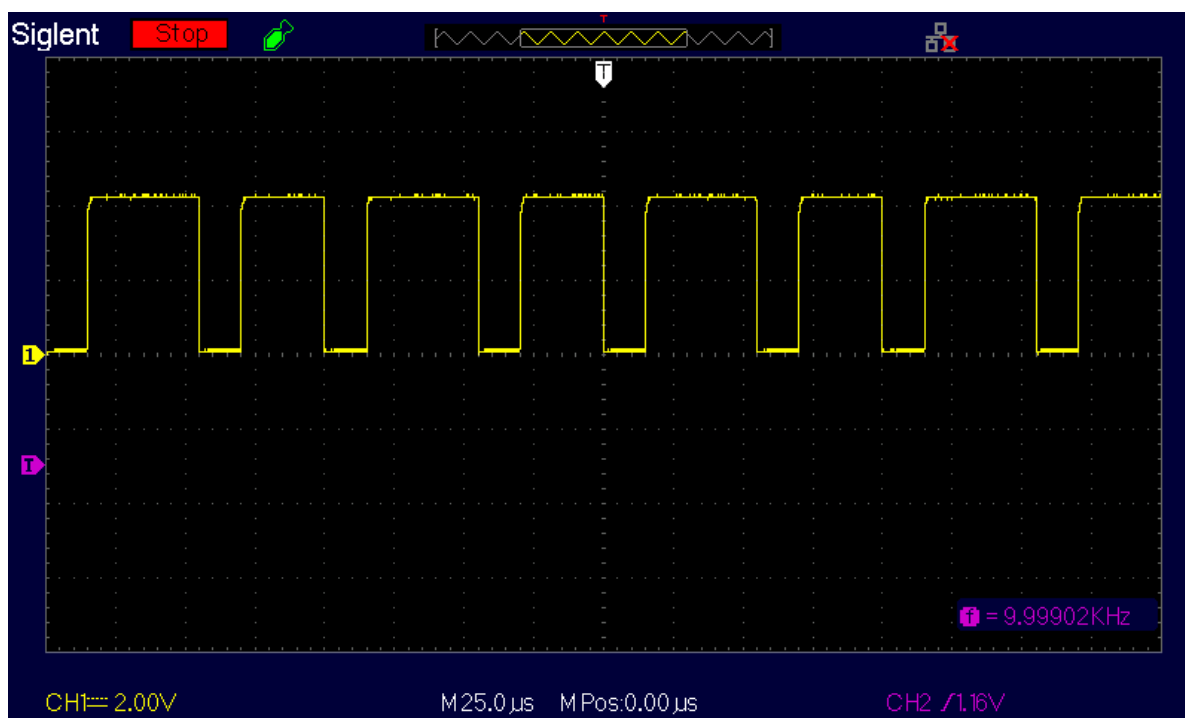
**Εικόνα 85:** Σήμα οδήγησης στον διακόπτη  $S_3$  (CH1: 1V/div) και τάση  $V_{S3}$  (CH2: 50V/div) για την Τοπολογία 1.



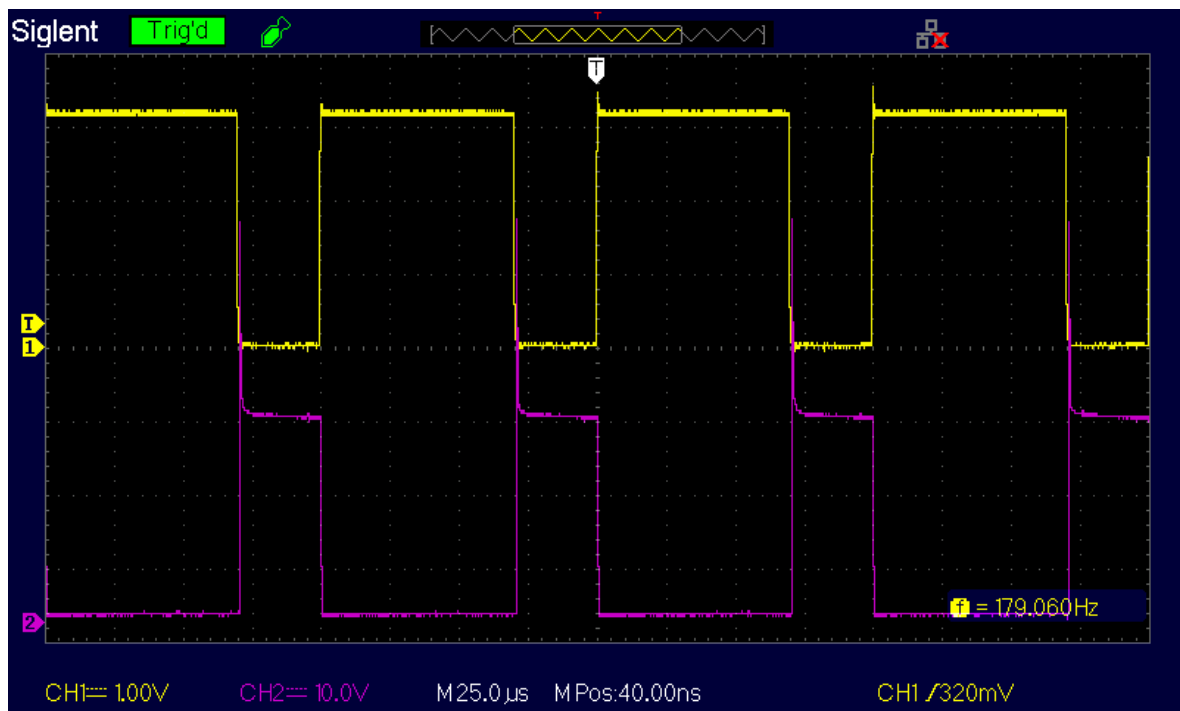
**Εικόνα 86:** Σήμα οδήγησης στον διακόπτη  $S_1$  (CH1: 1V/div) και τάση  $V_{S1}$  (CH2: 50V/div) για την Τοπολογία 1.



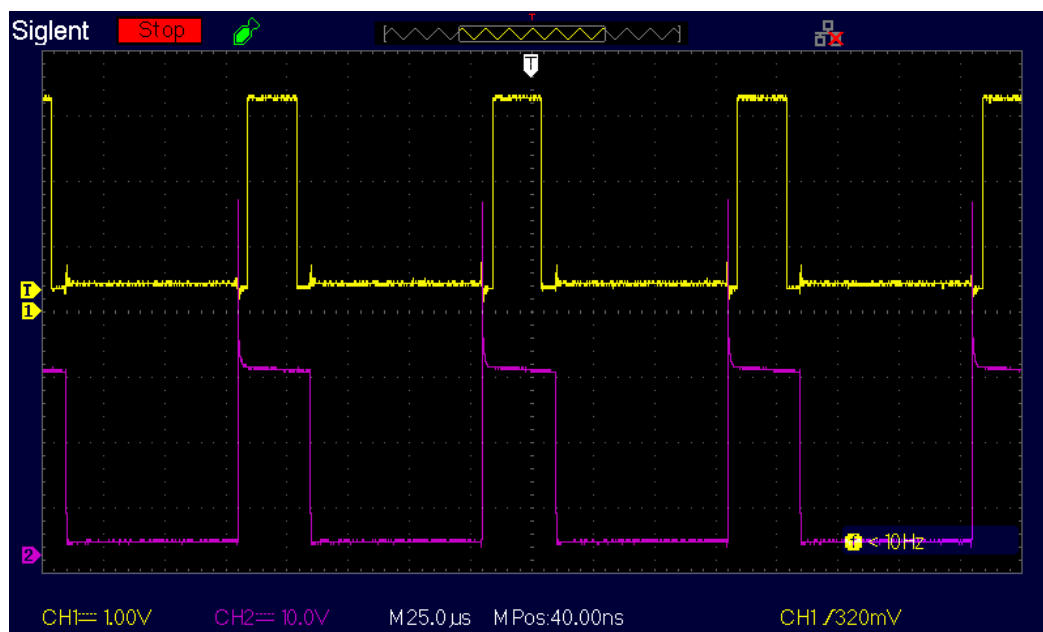
Εικόνα 87: Οι παλμοί  $S_1$  και  $S_3$  (CH1: 2V/div, CH2: 2V/div) για την Τοπολογία 2.



Εικόνα 88: Οι παλμός  $S_2$  (CH1: 2V/div) που παράγεται από την NAND των  $S_1$  και  $S_3$  για την Τοπολογία 2.

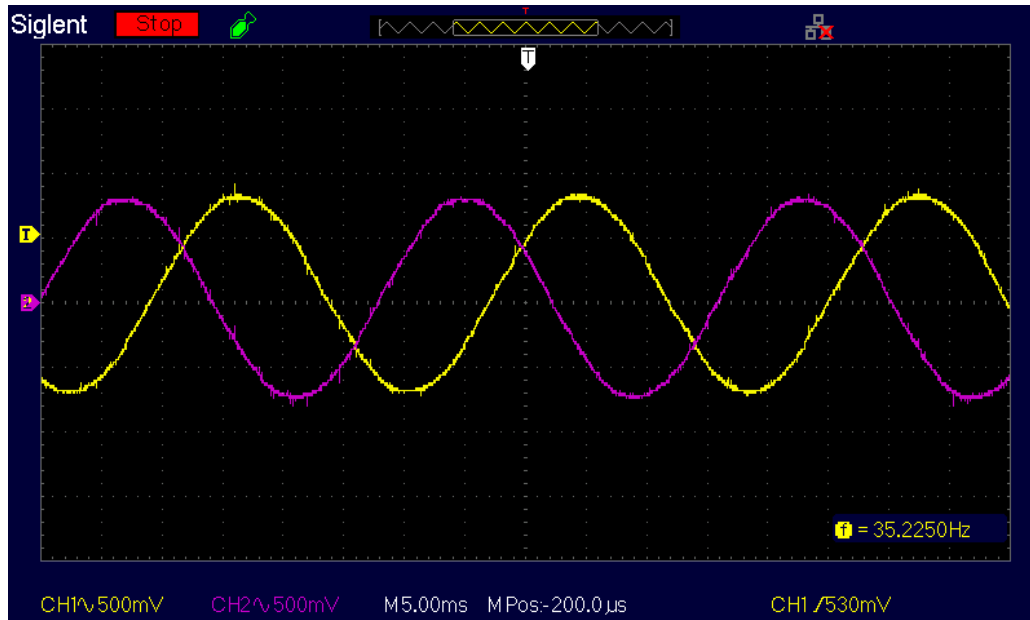


**Εικόνα 89:** Σήμα οδήγησης στον διακόπτη  $S_1$  (CH1: 1V/div) και τάση  $V_{S1}$  (CH2: 10V/div) για την Τοπολογία 2.

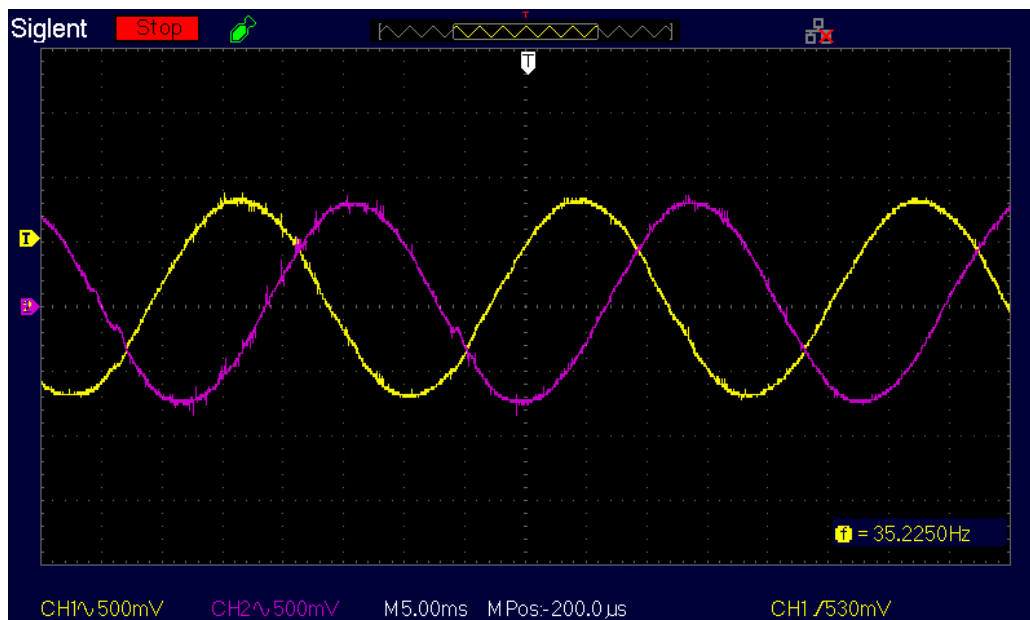


**Εικόνα 90:** Σήμα οδήγησης στον διακόπτη  $S_3$  (CH1: 1V/div) και τάση  $V_{S21}$  (CH2: 10V/div) για την Τοπολογία 2.

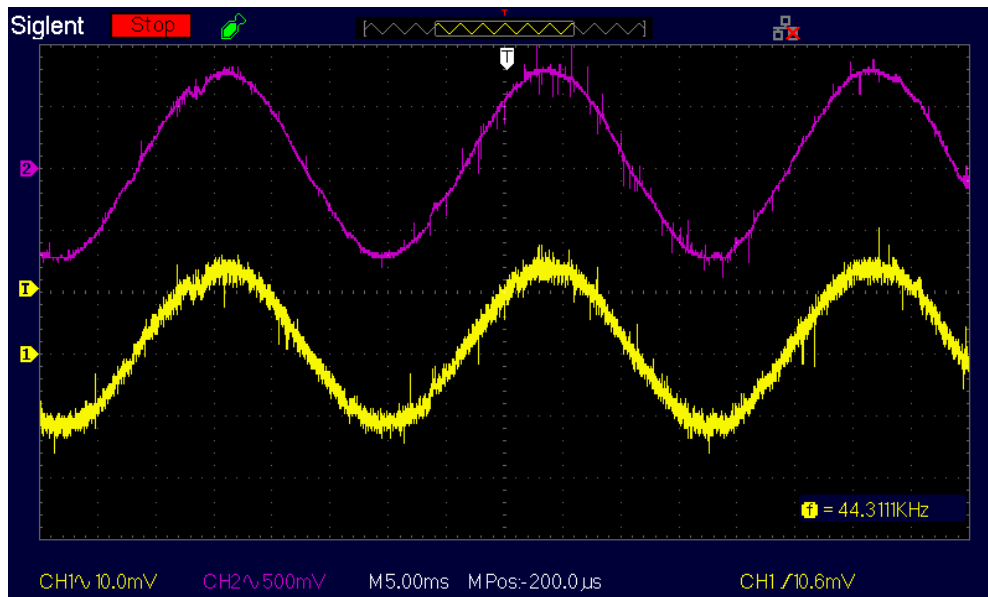
Στην Εικόνα 91 παρουσιάζονται οι πειραματικές κυματομορφές των τάσεων στις φάσεις a και b στην έξοδο του αντιστροφέα σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία, ενώ στην Εικόνα 92 οι αντίστοιχες κυματομορφές των τάσεων στις φάσεις a και c. Στην Εικόνα 93 απεικονίζονται οι πειραματικές κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα σε μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία.



**Εικόνα 91:** Τάσεις  $V_a$  (CH1: 10V/div) και τάση  $V_b$  (CH2: 10V/div) για μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία του μετατροπέα.

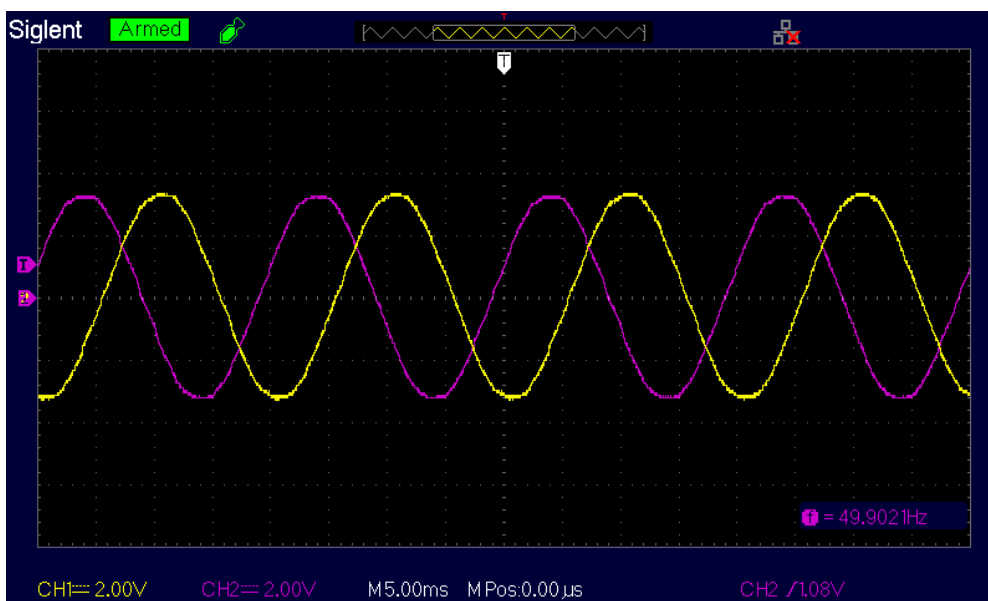


**Εικόνα 92:** Τάσεις  $V_a$  (CH1: 10V/div) και τάση  $V_c$  (CH2: 10V/div) για μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία του μετατροπέα.

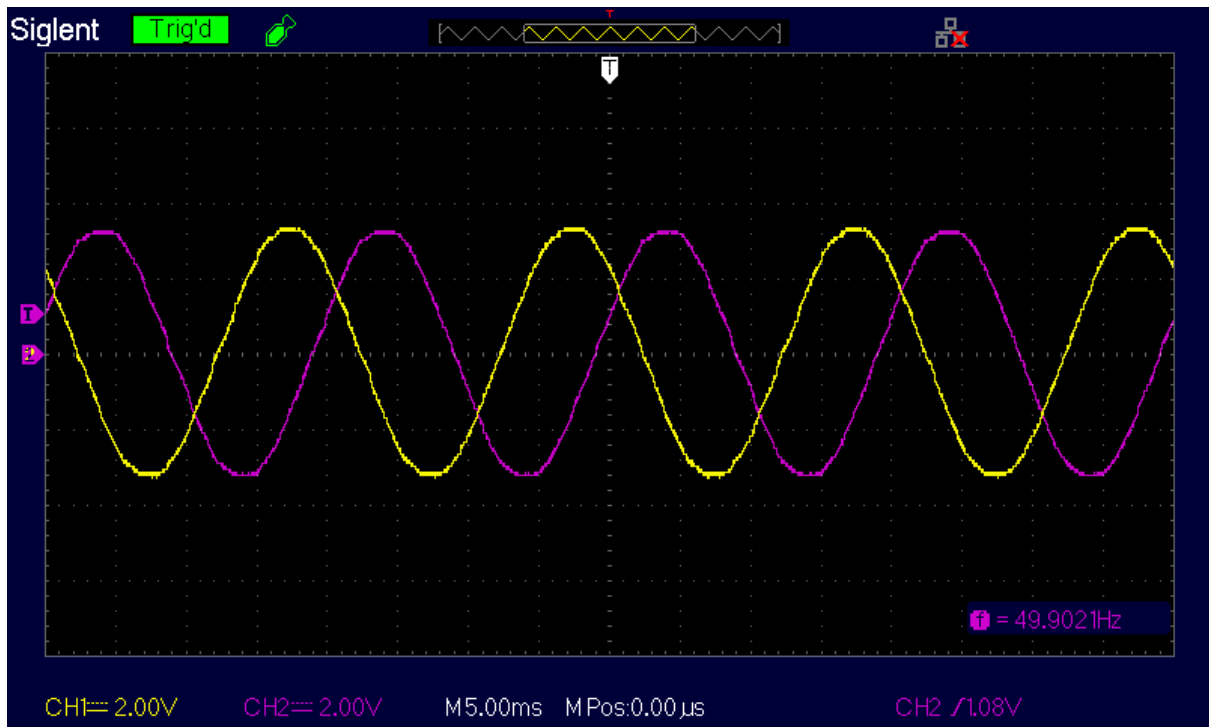


**Εικόνα 93:** Τάση  $V_a$  (CH1: 10V/div) και ρεύμα  $I_a$  (CH2: 1A/div) για μη-διασυνδεδεμένη λειτουργία του μετατροπέα.

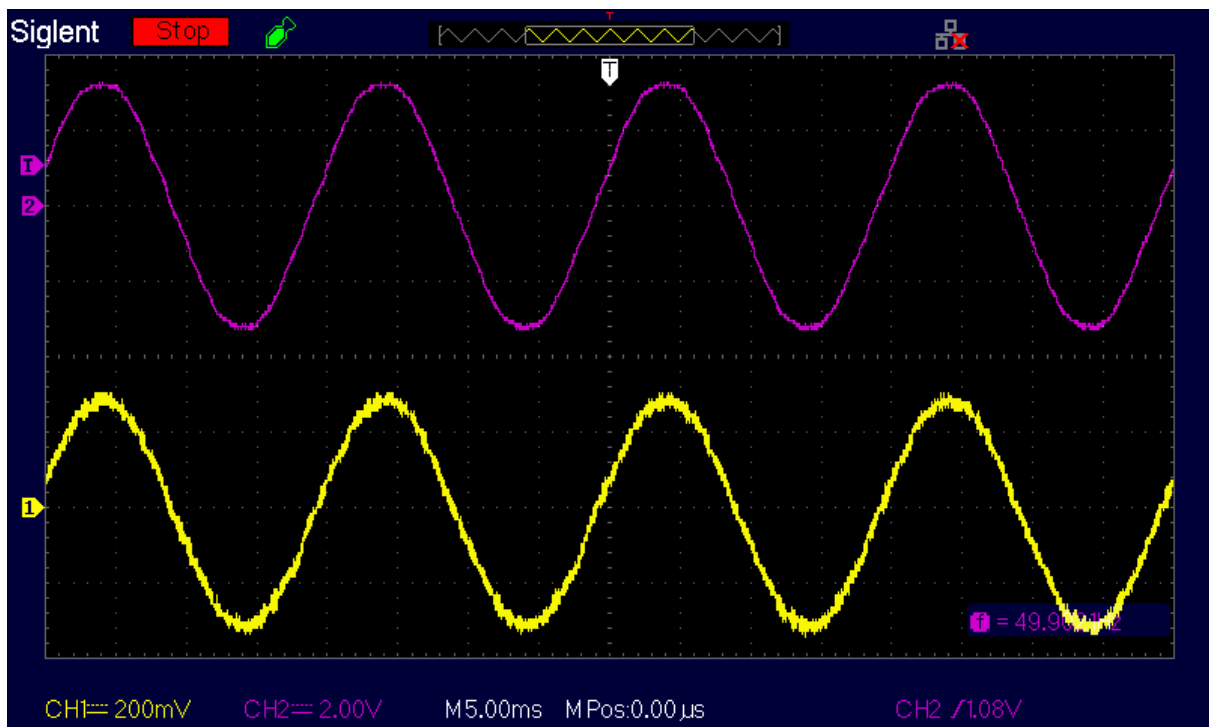
Αντιστοίχως, στην Εικόνα 94 παρουσιάζονται οι πειραματικές κυματομορφές των τάσεων στις φάσεις a και b στην έξοδο του αντιστροφέα σε διασυνδεδεμένη λειτουργία, ενώ στην Εικόνα 95 οι αντίστοιχες κυματομορφές των τάσεων στις φάσεις a και c. Στην Εικόνα 96 απεικονίζονται οι πειραματικές κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα σε διασυνδεδεμένη λειτουργία. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις των τάσεων έχουν ληφθεί από την πλευρά του δευτερεύοντος του Μ/Σ που χρησιμοποιήθηκε για την σύνδεση του μετατροπέα με το δίκτυο.



**Εικόνα 94:** Τάσεις  $V_a$  (CH1: 200V/div) και τάση  $V_b$  (CH2: 200V /div) για διασυνδεδεμένη λειτουργία του μετατροπέα.



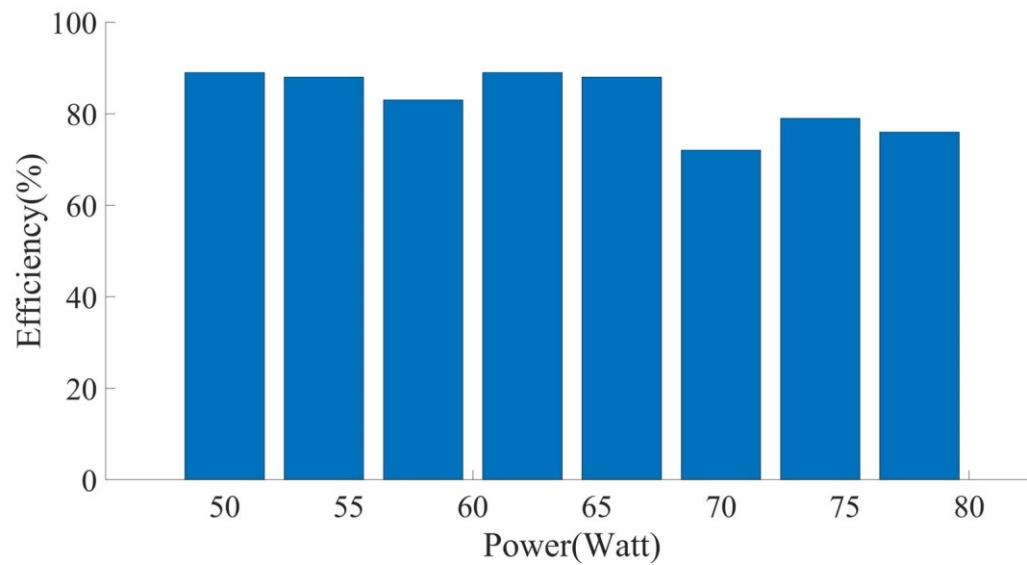
**Εικόνα 95:** Τάσεις  $V_a$  (CH1: 200V/div) και τάση  $V_c$  (CH2: 200V /div) για διασυνδεδεμένη λειτουργία του μετατροπέα.



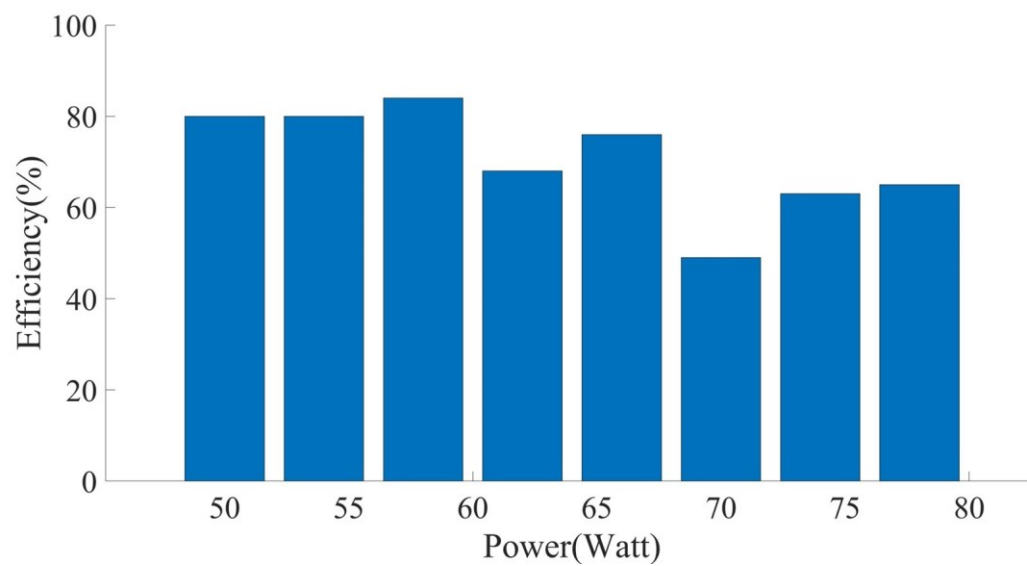
**Εικόνα 96:** Τάση  $V_a$  (CH1: 2A/div) και ρεύμα  $I_a$  (CH2: 200V/div) για διασυνδεδεμένη λειτουργία του μετατροπέα.

Στην Εικόνα 97 (α) και (β) παρατίθεται οι τιμές του βαθμού απόδοσης για διάφορες τιμές ισχύος εξόδου για την Τοπολογία 1 και την Τοπολογία 2, αντίστοιχα, σύμφωνα με τις προσομοιώσεις. Τα

πειραματικά αποτελέσματα του βαθμού απόδοσης για διαφορετικές ροές ισχύος στην Τοπολογία 1 και στην Τοπολογία 2 φαίνονται στην Εικόνα 98 (α) και (β) αντίστοιχα.



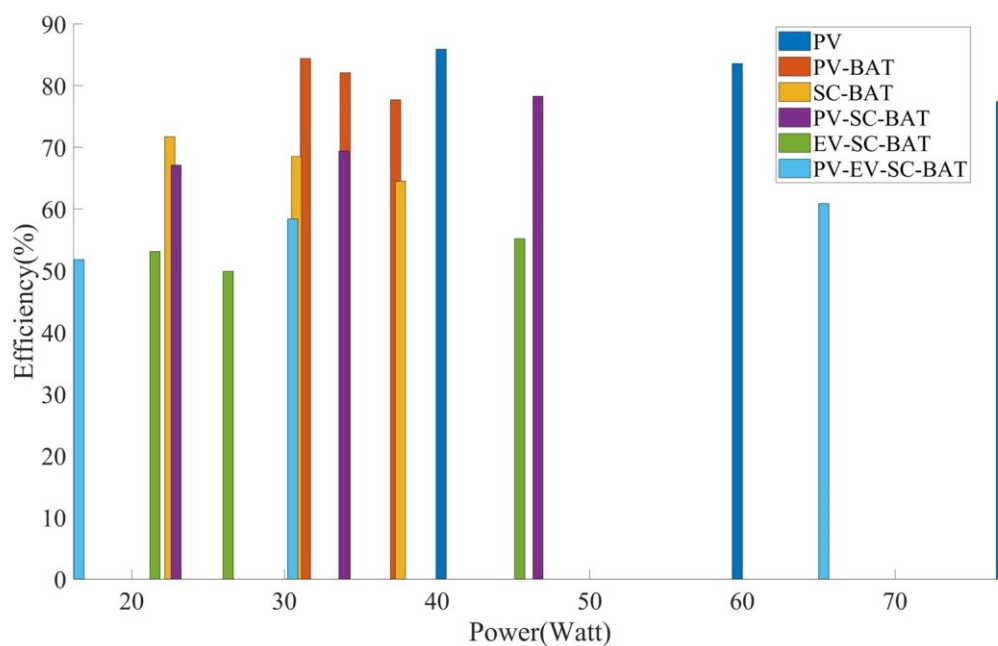
(α)



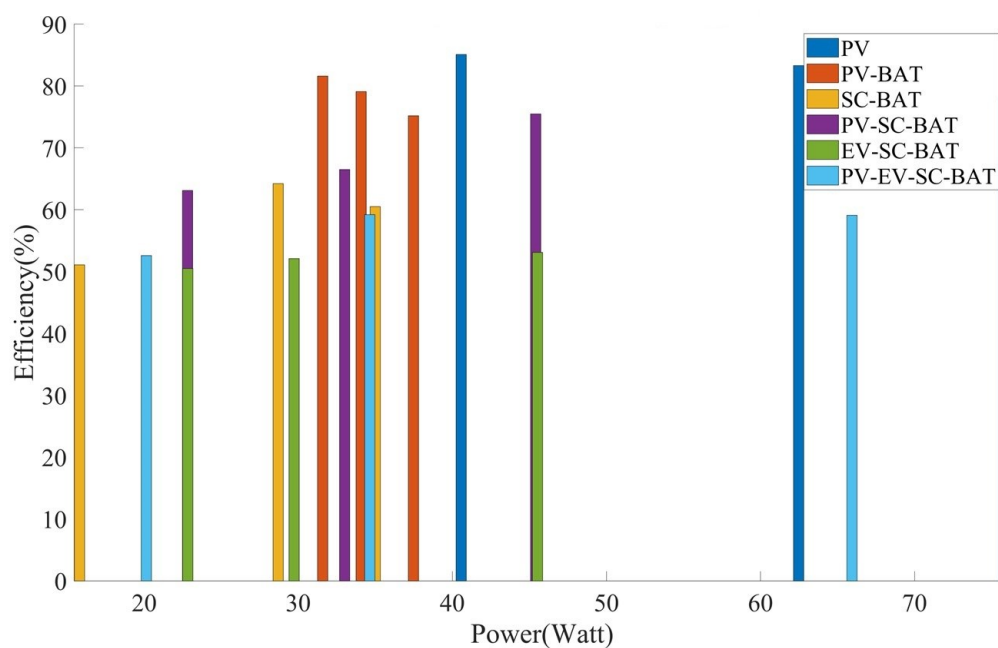
(β)

**Εικόνα 97:** Ραβδόγραμμα βαθμού απόδοσης- ισχύος εξόδου σύμφωνα με προσομοιώσεις: (α) για την Τοπολογία 1, (β) για την Τοπολογία 2.





(α)



(β)

**Εικόνα 98:** Βαθμός απόδοσης για διαφορετικές ροές ισχύος πειραματικών διατάξεων: (α) για την Τοπολογία 1, (β) για την Τοπολογία 2.

### 5.3 Σύγκριση προτεινόμενων τοπολογιών

Παρότι έχουν ληφθεί υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διακοπών και οι εσωτερικές αντιστάσεις των πηνίων, λόγω των αντιστάσεων των αγωγών και γενικότερα των μη-ιδανικών στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό πρωτότυπο, παρατηρείται μια διαφορά στον βαθμό απόδοσης μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραματικών μετρήσεων. Αν και η Τοπολογία 1 έχει πάντα μεγαλύτερη απόδοση από την Τοπολογία 2, το πόσο μεγάλη είναι αυτή η διαφορά μεταξύ των βαθμών απόδοσης εξαρτάται από την εκάστοτε ροή ισχύος. Στην Τοπολογία 2, και πιο συγκεκριμένα στο κύκλωμα διασύνδεσης της συστοιχίας των μπαταριών και της συστοιχίας των υπερπυκνωτών, το ρεύμα για την φόρτιση ή την εκφόρτιση μίας πηγής μπορεί να διέρχεται από έναν, δύο ή και τρεις διακόπτες, ανάλογα με την περίπτωση λειτουργίας του κυκλώματος ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κάθε επιμέρους διακόπτης να εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες ισχύος σε σχέση με την Τοπολογία 1, στο αντίστοιχο κύκλωμα διασύνδεσης, όπου το ρεύμα σε κάθε περίπτωση διέρχεται από δύο διακόπτες το πολύ, εμφανίζοντας έτσι μικρότερες απώλειες ισχύος.

Μπορεί να διαπιστωθεί επίσης ότι παρόλο που η Τοπολογία 2 έχει ένα λιγότερο διακοπτικό στοιχείο και το ρεύμα διαρροής γείωσης είναι μικρότερο (σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρατίθενται στους Πίνακες 10-15) η Τοπολογία 1 υπερτερεί σε βαθμό απόδοσης και στην κυμάτωση των ρευμάτων φόρτισης και εκφόρτισης της συστοιχίας των μπαταριών και των υπερπυκνωτών (σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 16-19). Αξίζει να αναφερθεί επίσης, ότι στον dual-port DC/DC μετατροπέα της Τοπολογίας 2 η τάση της συστοιχίας των μπαταριών οφείλει να είναι πάντοτε ίση ή μικρότερη από την τάση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών για να λειτουργήσει ο μετατροπέας, προσδίδοντας έτσι μικρότερη ευελιξία σε σχέση με την Τοπολογία 1.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι κατανεμημένες ΑΠΕ σε συνδυασμό με τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι σε θέση να εξομαλύνουν την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και να παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες στο ηλεκτρικό δίκτυο. Δύο νέοι τριφασικοί και μη-απομονωμένοι μετατροπείς DC/AC και πολλαπλών θυρών έχουν παρουσιαστεί στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία. Βασικό στόχο αποτελεί η διασύνδεση κατανεμημένων ΑΠΕ και υβριδικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι προτεινόμενες αρχιτεκτονικές χρησιμοποιούν λιγότερα παθητικά εξαρτήματα και διακόπτες ισχύος υψηλής συχνότητας, γεγονός που μειώνει το κόστος και βελτιώνει την αξιοπιστία του συνολικού συστήματος. Επιτρέπουν, επίσης, την ταυτόχρονη διαχείριση ενέργειας σε τέσσερις ξεχωριστές DC θύρες (δηλαδή συστοιχία PV, συστοιχία μπαταριών, συστοιχία SC και μπαταρία EV), καθώς και την ανταλλαγή ισχύος με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Αν και η φωτοβολταϊκή πηγή συνδέεται απευθείας με το DC-link, ο αλγόριθμος MPPT μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς τη χρήση πρόσθετου μετατροπέα ισχύος στις δύο εναλλακτικές τοπολογίες που αναπτύχθηκαν, μειώνοντας έτσι τον συνολικό αριθμό εξαρτημάτων. Τα προτεινόμενα κυκλώματα, ακόμα, ενσωματώνουν μια τροποποιημένη τριφασική έκδοση μιας τοπολογίας SSI για την υποστήριξη αμφίδρομης ροής ισχύος, όπου οι τρεις διακόπτες ισχύος, που συνδέουν τη θύρα της μπαταρίας του EV στην AC γέφυρα, μπορούν να λειτουργήσουν στην θεμελιώδη συχνότητα κατά την φόρτιση ή να είναι OFF σε κατάσταση εκφόρτισης της μπαταρίας του EV. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους των εξαρτημάτων ισχύος που απαιτούνται για την υλοποίηση των προτεινόμενων τοπολογιών σε σύγκριση με κυκλώματα που έχουν παρουσιαστεί έως σήμερα στην διεθνή βιβλιογραφία, όπου γίνεται συνήθως χρήση διακοπών ισχύος υψηλής συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα, η Τοπολογία 1 αποτελείται από 10 διακόπτες υψηλής διακοπτικής συχνότητας και από 3 χαμηλής, ενώ η Τοπολογία 2 από 9 διακόπτες υψηλής διακοπτικής συχνότητας και 3 χαμηλής. Αντιθέτως, ένας τριφασικός DC/AC MPC με ξεχωριστό μετατροπέα DC/DC σε κάθε DC θύρα και έναν μετατροπέα γέφυρας στην AC πλευρά, για τον ίδιο αριθμό θυρών, αποτελείται από 13 διακόπτες υψηλής διακοπτικής συχνότητας. Επιπρόσθετα, ο συνολικός αριθμός των πηνίων και των πυκνωτών είναι μικρότερος και για τις δυο τοπολογίες και συγκεκριμένα 7 έναντι 12, όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 9. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την επιτυχή λειτουργία των προτεινόμενων μετατροπέων DC/AC τύπου MPC υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας ροής ισχύος.

Ως μελλοντική επέκταση της παρούσας εργασίας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η τροποποίηση των προτεινόμενων τοπολογιών, ώστε να δίνουν την δυνατότητα διασύνδεσης με μονοφασικό δίκτυο. Εκτός από τα προηγούμενα, σημαντική μελέτη θα ήταν η περαιτέρω βελτίωση των κυκλωμάτων ως προς τον αριθμό των ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων, με σκοπό την ακόμα οικονομικότερη κατασκευή των προτεινόμενων μετατροπέων DC/AC.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] R. M. E. e. al., "A Comprehensive Review on Renewable Energy Development, Challenges, and Policies of Leading Indian States With an International Perspective," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 74432-74457, 2020.
- [2] T. G. Hlalele, R. M. Naidoo, J. Zhang και R. C. Bansal, "Dynamic Economic Dispatch With Maximal Renewable Penetration Under Renewable Obligation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 38794-38808, 2020.
- [3] B. S. Pali και S. Vadhera, "Renewable energy systems for generating electric power: A review," *2016 IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, pp. 1-6, 2016.
- [4] A. Faiz και A. Rehman, "Hybrid renewable energy systems: Hybridization and advance control," *2015 Power Generation System and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*, pp. 1-5, 2015.
- [5] P. Kumar και V. Kumar, "Energy storage options for enhancing the reliability of Power system in the presence of Renewable Energy Sources," *2020 2<sup>nd</sup> International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, pp. 1071-1076, 2020.
- [6] B. R. Ravada, N. R. Tummuru και B. N. L. Ande, "Photovoltaic-Wind and Hybrid Energy Storage Integrated Multi-Source Converter Configuration for DC Microgrid Applications," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 83-91, Jan. 2021.
- [7] S. Ganesan, U. Subramaniam, A. A. Ghodke, R. M. Elavarasan, K. Raju και M. S. Bhaskar, "Investigation on Sizing of Voltage Source for a Battery Energy Storage System in Microgrid With Renewable Energy Sources," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 188861-188874, 2020.
- [8] M. Casini, G. G. Zanvettor, M. Kovjanic και A. Vicino, "Optimal Energy Management and Control of an Industrial Microgrid With Plug-in Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 101729-101740, 2019.
- [9] M. E. ŞahİN, F. Blaabjerg και A. Sangwongwanİch, "Modelling of supercapacitors based on simplified equivalent circuit," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 6, no. 1, pp. 31-39, March 2021.
- [10] Y. Sato, M. Uno και H. Nagata, "Nonisolated Multiport Converters Based on Integration of PWM Converter and Phase-Shift-Switched Capacitor Converter," in *IEEE Transactions on*

- Power Electronics*, vol. 35, no. 1, pp. pp. 455-470, Jan. 2020.
- [11] A. Lavanya, J. D. Navamani, K. Vijayakumar και R. Rakesh, "Multi-input DC-DC converter topologies-a review," *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, pp. pp. 2230-2233, 2016.
- [12] N. Swaminathan και Y. Cao, "An Overview of High-Conversion High-Voltage DC–DC Converters for Electrified Aviation Power Distribution System," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 4, pp. 1740-1754, Dec. 2020.
- [13] X. -F. Cheng, C. Liu, D. Wang και Y. Zhang, "State-of-the-Art Review on Soft-Switching Technologies for Non-Isolated DC-DC Converters," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 119235-119249, 2021.
- [14] S. J. Al-Chlaihaw, "Comparative study of the multiport converter used in renewable energy systems," *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, pp. 1-6, 2016.
- [15] B. K. Santhoshi, M. s. Kuppusamy, M. Sivasubramanian και S. Akila, "A Novel Multiport Bidirectional dual active bridge DC-DC Converter for Renewable Power Generation Systems," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 1, pp. 1-4, 2016.
- [16] K. Itoh, M. Ishigaki, N. Yanagizawa, S. Tomura και T. Umeno, "Analysis and Design of a Multiport Converter Using a Magnetic Coupling Inductor Technique," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 2, pp. 1713-1721, March-April 2015.
- [17] M. C. Mira, Z. Zhang, A. Knott και M. A. E. Andersen, "Analysis, Design, Modeling, and Control of an Interleaved-Boost Full-Bridge Three-Port Converter for Hybrid Renewable Energy Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 1138-1155, Feb. 2017.
- [18] Y. Zhuang, X. Z. F. Liu, X. Z. Y. Huang και Z. Liu, "Short-Circuit Fault-Tolerant Topology for Multiport Cascaded DC/DC Converter in Photovoltaic Power Generation System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 549-561, Jan. 2021.
- [19] M. Grace και N. J., "Single input based multi port DC-DC converter topologies for renewable energy applications," *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, vol. 2, no. 7, 2020.
- [20] G. Chen, Y. Liu, X. Qing και F. Wang, "Synthesis of Integrated Multiport DC–DC Converters With Reduced Switches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 6, pp. 4536-

4546, June 2020.

- [21] J. Zeng, J. Ning, X. Du, T. Kim, Z. Yang και V. Winstead, "A Four-Port DC–DC Converter for a Standalone Wind and Solar Energy System," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 1, pp. 446-454, Jan.-Feb. 2020.
- [22] T. Chaudhury και D. Kastha, "A High Gain Multiport DC–DC Converter for Integrating Energy Storage Devices to DC Microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 10, pp. 10501-10514, Oct. 2020.
- [23] M. Uno, R. Oyama και K. Sugiyama, "Partially Isolated Single-Magnetic Multiport Converter Based on Integration of Series-Resonant Converter and Bidirectional PWM Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 11, pp. 9575-9587, Nov. 2018.
- [24] M. Jafari, Z. Malekjamshidi, G. Platt, J. G. Zhu και D. G. Dorrell, "A multi-port converter based renewable energy system for residential consumers of smart grid," *IECON 2015 - 41<sup>st</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 005168-005173, 2015.
- [25] Y. Tran και D. Dujic, "A multiport isolated DC-DC converter," *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 156-162, 2016.
- [26] Y. Tran και D. Dujic, "A multiport medium voltage isolated DC-DC converter," *IECON 2016 - 42<sup>nd</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 6983-6988, 2016.
- [27] N. D. Dao, D. Lee και Q. D. Phan, "High-Efficiency SiC-Based Isolated Three-Port DC/DC Converters for Hybrid Charging Stations," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 10, pp. 10455-10465, Oct. 2020.
- [28] K. Shreelekha και S. Arulmozhi, "Multiport isolated bidirectional DC-DC converter interfacing battery and supercapacitor for hybrid energy storage application," *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, pp. 2763-2768, 2016.
- [29] J. Yang, G. Buticchi, S. G. C. Gu, H. Zhang και P. Wheeler, "A Generalized Input Impedance Model of Multiple Active Bridge Converter," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 6, no. 4, pp. 1695-1706, Dec. 2020.
- [30] B. N. Alajmi, M. I. Marei και I. Abdelsalam, "A Multiport DC–DC Converter Based on Two-Quadrant Inverter Topology for PV Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 1, pp. 522-532, Jan. 2021.

- [31] S. Galeshi, D. Frey και Y. Lembeye, "Design Procedure of DC-DC Multi-Port Active-Bridge Converters," *PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, pp. 1-8, 2020.
- [32] R. Faraji και H. Farzanehfard, "Fully Soft-Switched Multiport DC–DC Converter With High Integration," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 2, pp. 1901-1908, Feb. 2021.
- [33] V. Kamaraj και C. Nallaperumal, "Modified multiport Luo converter integrated with renewable energy sources for electric vehicle applications," *Circuit World*, vol. 46, no. 2, pp. 125-135, 2020.
- [34] M. Corti, E. Tironi και G. Ubezio, "Multi-port converters in smart grids: Protection selectivity," *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp. 143-149, 2016.
- [35] T. Jalilzadeh, N. Rostami, E. Babaei και S. H. Hosseini, "Multiport DC–DC Converter With Step-Up Capability and Reduced Voltage Stress on Switches/Diodes," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 11, pp. 11902-11915, Nov. 2020.
- [36] B. Chandrasekar, C. Nallaperumal, S. Padmanaban, M. S. Bhaskar, J. B. Holm-Nielsen, Z. Leonowicz και S. O. Masebinu, "Non-Isolated High-Gain Triple Port DC–DC Buck-Boost Converter With Positive Output Voltage for Photovoltaic Applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 113649-113666, 2020.
- [37] R. Faraji και H. Farzanehfard, "Soft-Switched Nonisolated High Step-Up Three-Port DC–DC Converter for Hybrid Energy Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, pp. 10101-10111, Dec. 2018.
- [38] Z. Saadatizadeh, E. Babaei, F. Blaabjerg και C. Cecati, "Three-Port High Step-Up and High Step-Down DC-DC Converter With Zero Input Current Ripple," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 2, pp. 1804-1813, Feb. 2021.
- [39] B. C. e. al., "Non-Isolated High-Gain Triple Port DC–DC Buck-Boost Converter With Positive Output Voltage for Photovoltaic Applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 113649-113666, 2020.
- [40] P. Prabhakaran και V. Agarwal, "Novel Four-Port DC–DC Converter for Interfacing Solar PV–Fuel Cell Hybrid Sources With Low-Voltage Bipolar DC Microgrids," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 1330-1340, June 2020.

- [41] M. Uno και K. Sugiyama, "Switched Capacitor Converter Based Multiport Converter Integrating Bidirectional PWM and Series-Resonant Converters for Standalone Photovoltaic Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 2, pp. 1394-1406, Feb. 2019.
- [42] V. Marzang, S. H. Hosseini, N. Rostami, P. Alavi, P. Mohseni και S. M. Hashemzadeh, "A High Step-Up Nonisolated DC–DC Converter With Flexible Voltage Gain," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 10, pp. 10489-10500, Oct. 2020.
- [43] M. Al-Soeidat, H. Khawaldeh, D. D. Lu και J. Zhu, "A Novel High Step-up Three-Port Bidirectional DC/DC Converter for PV-Battery Integrated System," *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 3352-3357, 2020.
- [44] T. Jalilzadeh, N. Rostami, E. Babaei και S. H. Hosseini, "Bidirectional multi-port dc–dc converter with low voltage stress on switches and diodes," *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 8, pp. 1593-1604, June 2020.
- [45] G. G. Kumar, V. S. Rao και S. Kumaravel, "Bidirectional Switched Active LC network based Dual input Non-isolated DC-DC converter," *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, pp. 1-6, 2020.
- [46] K. Tomas-Manez, A. Anthon, Z. Zhang, Z. Ouyang και T. Franke, "High efficiency non-isolated three port DC-DC converter for PV-battery systems," *2016 IEEE 8<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, pp. 1806-1812, 2016.
- [47] H. Moradisizkoohi, N. Elsayad, M. Shojaie και O. A. Mohammed, "PWM Plus Phase-Shift-Modulated Three-Port Three-Level Soft-Switching Converter Using GaN Switches for Photovoltaic Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 636-652, June 2019.
- [48] S. A. Khan, M. R. Islam, Y. Guo και J. Zhu, "A New Isolated Multi-Port Converter With Multi-Directional Power Flow Capabilities for Smart Electric Vehicle Charging Stations," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 2, pp. 1-4, March 2019.
- [49] M. Jafari, Z. Malekjamshidi, G. Lei, T. Wang, G. Platt και J. Zhu, "Design and Implementation of an Amorphous High-Frequency Transformer Coupling Multiple Converters in a Smart Microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 1028-1037, Feb. 2017.
- [50] T. Janssen και H. Krishnaswami, "Voltage and current control of a multi-port NPC inverter configuration for a grid-connected photovoltaic system," *2016 IEEE 17<sup>th</sup> Workshop on Control*



- and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, pp. 1-7, 2016.
- [51] C. Perera, J. Salmon και G. J. Kish, "Multiport Converter With Independent Control of AC and DC Power Flows for Bipolar DC Distribution," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 3, pp. 3473-3485, March 2021.
- [52] M. Vasiladiotis και A. Rufer, "A Modular Multiport Power Electronic Transformer With Integrated Split Battery Energy Storage for Versatile Ultrafast EV Charging Stations," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 3213-3222, May 2015.
- [53] D. Yu, X. Du, J. Zeng και Z. Yang, "Control of a Grid-tied Multiport Inverter for a Microgrid with Renewable Energy Sources," *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 2467-2471, 2020.
- [54] W. Cai, L. Jiang, B. Liu, S. Duan και C. Zou, "A Power Decoupling Method Based on Four-Switch Three-Port DC/DC/AC Converter in DC Microgrid," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 336-343, Jan.-Feb. 2015.
- [55] M. Alsolami, J. Wang και L. Herrera, "DC ripple current reduction on multilevel, multiport, single-phase DC/AC converter for renewable energy applications," *2015 IEEE 3<sup>rd</sup> Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, pp. 312-318, 2015.
- [56] S. S. Lee και Y. E. Heng, "Improved Single-Phase Split-Source Inverter With Hybrid Quasi-Sinusoidal and Constant PWM," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2024-2031, 2017.
- [57] A. S. T. T. Lee, D. Ishak και R. Mohd-Mokhtar, "Single-Phase Simplified Split-Source Inverter (S3I) for Boost DC–AC Power Conversion," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 10, pp. 7643-7652, Oct. 2019.
- [58] A. Agrawal και R. Gupta, "Multi-functional Bi-directional DC-DC/AC Converter Topology for Single Phase Microgrid Applications," *2018 8<sup>th</sup> IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, pp. 1-6, 2018.
- [59] S. Neira, J. Pereda και F. Rojas, "Three-Port Full-Bridge Bidirectional Converter for Hybrid DC/DC/AC Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 12, pp. 13077-13084, Dec. 2020.
- [60] H. Wu, L. Zhu και F. Yang, "Three-Port-Converter-Based Single-Phase Bidirectional AC–DC Converter With Reduced Power Processing Stages and Improved Overall Efficiency," *IEEE*

- Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, pp. 10021-10026, Dec. 2018.
- [61] O. Hemakesavulu, P. A. Reddy, K. Keerthi, A. Monalisa και S. Vishnu, "An intelligent control of converter for EV charging station with PV and battery," *Journal of Information and Computational Science*, vol. 10, no. 5, 2020.
- [62] G. Villa, S. Saeed, P. García, C. Gómez-Aleixandre και R. Georgious, "Compensation Alternatives for Power Sharing Errors in Multi-Port Converters for Hybrid DC/AC Microgrids," *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* 6929-693, pp. 6929-6939, 2019.
- [63] J. Itoh, M. Miyashita, K. Kusaka, Y. Noge και M. Ishibashi, "Multi-port Converter with Square-wave-voltage Multilevel Converter and Active Power Filter Connected in Series," *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 6388-6395, 2019.
- [64] D. Tran, S. Chakraborty, Y. Lan, J. V. Mierlo και O. Hegazy, "Optimized Multiport DC/DC Converter for Vehicle Drivetrains: Topology and Design Optimization," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 8, 2018.
- [65] D. Zografos, E. Koutroulis, Y. Yang και F. Blaabjerg, "Minimization of leakage ground current in transformerless single-phase full-bridge photovoltaic inverters," *2015 17<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, pp. 1-10, 2015.
- [66] S. D. Breucker, K. Engelen, R. D'hulst και J. Driesen, "Impact of current ripple on Li-ion battery ageing," *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, pp. 1-9, 2013.
- [67] G. V. Bharath, A. Hota και V. Agarwal, "A New Family of 1- $\phi$  Five-Level Transformerless Inverters for Solar PV Applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 1, pp. 561-569, Jan.-Feb. 2020.
- [68] A. Balal και M. Giesselmann, "PV to Vehicle, PV to Grid, Vehicle to Grid, and Grid to Vehicle Micro Grid System Using Level Three Charging Station," *2022 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, pp. 25-30, 2022.
- [69] S. S. Lee και Y. E. Heng, "Improved Single-Phase Split-Source Inverter With Hybrid Quasi-Sinusoidal and Constant PWM," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 3, pp. 2024-2031, March 2017.
- [70] A. Abdelhakim, P. Mattavelli και G. Spiazzi, "Three-Phase Split-Source Inverter (SSI): Analysis and Modulation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 11, pp. 7451-7461, Nov.

2016.

- [71] J. Cai και Q.-C. Zhong, "Compact bidirectional DC-DC converters with two input sources," *2014 IEEE 5<sup>th</sup> International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 1-5, 2014.