



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

**Αμφίδρομη τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος για
εφαρμογές σε κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης
λειτουργίας και συσσωρευτές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Κωτσιανδρής

Επιβλέπων : Στέφανος Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2010



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

**Αμφίδρομη τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος για
εφαρμογές σε κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης
λειτουργίας και συσσωρευτές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Π. Κωτσιανδρής

Επιβλέπων : Στέφανος Ν. Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στάυρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2010

.....
Γεώργιος Π. Κωτσιανδρής

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

Copyright © Γεώργιος Κωτσιανδρής, 2010.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε dc μορφή, όπως δηλαδή, τα συστήματα κυψελών καυσίμου και οι συσσωρευτές λιθίου – ιόντων πολυμερών, για διασύνδεση τους στο δίκτυο διανομής.

Βασική αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιλαμβάνεται σε καύσιμα (υδρογόνο, φυσικό αέριο, μεθανόλη, βενζίνη, κ.λπ....) άμεσα σε ηλεκτρική ισχύ. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε τις ενδιάμεσες απώλειες που έχουν οι άλλοι τρόποι παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Επίσης, σημαντική λεπτομέρεια είναι και το ότι η αποδοτικότητα των κυψελών καυσίμου δεν περιορίζεται από τα όρια του Carnot που υποχρεωτικά ακολουθούν οι μηχανές καύσης. Οι εκπομπές των κυψελών καυσίμου δεν συμπεριλαμβάνουν τα συνηθισμένα προϊόντα καύσης (SO_x , CO, άλλα μόρια, και διάφοροι άκαυτοι ή μερικώς καμένοι υδρογονάνθρακες).

Για την σύνδεση των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο διανομής είναι απαραίτητη η χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται και αναλύεται ένα σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος που περιλαμβάνει έναν αμφίπλευρο dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία και μία βαθμίδα υψηλής συχνότητας dc-ac-ac αμφίπλευρης ροής ισχύος, η οποία αποτελείται από ένα ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών αντιστροφέα και έναν ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών κυκλομετατροπέα. Το σύστημα αυτό μπορεί να λειτουργήσει, τόσο στη φάση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την κυψέλη προς το φορτίο, ή προς το δίκτυο, όσο και στη φάση παραγωγής υδρογόνου στην κυψέλη υδρογόνου αναστρέψιμης λειτουργίας, οπότε η κυψέλη λειτουργεί σαν συσκευή ηλεκτρόλυσης.

Λέξεις κλειδιά:

Κυψέλες καυσίμου, αναστρέψιμη λειτουργία, υδρογόνο, συσσωρευτές λιθίου – ιόντων πολυμερών, μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ηλεκτρονικά ισχύος, ημιαγωγοί διακόπτες, μετατροπέας συνεχούς ρεύματος, αντιστροφέας, κυκλομετατροπέας, ρυθμιστής τάσης, υβριδικά συστήματα.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to study the devices and topologies of power electronics that can be used in connecting production systems and storage of electricity in dc form, such as, fuel cells systems and batteries lithium - ion polymer, to the grid.

Basic principle for the operation of fuel cells is the conversion of chemical energy contained in fuels (hydrogen, natural gas, methanol, gasoline, etc ...) directly to electrical power. In this way we avoid the intermediate losses appeared in other ways of producing electricity. Also important detail is that the efficiency of fuel cells is not restricted by the limits of Carnot that necessarily follow all the combustion engines. Emissions of fuel cells does not contain the usual combustion products (SO_x, CO, other molecules, and various unburnt or partially burnt hydrocarbons).

For the connection of fuel cells with the electrical grid, it is necessary to use power electronics provisions. In particular, it is presented and analyzed a power electronics system that includes a two-sided dc-dc converter with coupled inductors and a stage of high-frequency dc-ac-ac circuit used for two-way power flow, which consists of a sinusoidal pulse width modulation inverter and a sinusoidal pulse width modulation cycloconverter. This system can work both in the production of electricity from the cell to the load, or the grid, and in the production of hydrogen in the hydrogen cell suitable for reversible operation, so the cell operates as electrolysis device.

Key words:

Fuel cells, hydrogen, batteries lithium - ion polymer, Li-poly, proton exchange membranes, PEMFC, AFC, FAFC, MCFC, SOFC, DMFC, renewable energy, power electronics, semiconductor switches, IGBT, Thyristor, PWM, dc-dc converter, inverter, cycloconverter, voltage regulator, hybrid systems.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα κατ' αρχάς να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Στέφανο Μανιά, αφενός για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου και αφετέρου για τη δυνατότητα που μου παρέιχε στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Η αίσθηση της συνεχούς επικοινωνίας και συνεργασίας ήταν καταλυτική για την άρτια εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω, επίσης, στους υποψήφιους διδάκτορες κ. Πέτρο Καραμανάκο και κ. Ιάκωβο Μανωλά για την άψογη συνεργασία που είχαμε και το χρόνο που μου αφιέρωσαν ώστε να ολοκληρώσω την εργασία αυτή. Οι επιστημονικές συμβουλές τους και οι εύστοχες υποδείξεις τους ήταν κρίσιμες στην επίλυση των προβλημάτων που προέκυπταν.

Γεώργιος Π. Κωτσιανδρής

Περιεχόμενα

Κεφάλαια	σελ
Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	10
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	13
Κεφάλαιο 2 – Κυψέλες Καυσίμου & Συσσωρευτές Λιθίου-Ιόντων Πολυμερών	
2.1 Κυψέλες καυσίμου	21
2.2 Είδη κυψελών καυσίμου	22
2.2.1 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου	22
2.2.2 Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων	23
2.2.3 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος	25
2.2.4 Κυψέλες καυσίμου λιωμένων ανθρακικών αλάτων	26
2.2.5 Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων	27
2.2.6 Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης	28
2.3 Δομή κυψελών καυσίμου	29
2.4 Κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας	30
2.4.1 Πυκνότητα ενέργειας κυψέλης αναστρέψιμης λειτουργίας	31
2.4.2 Βελτιστοποίηση της πυκνότητας της ενέργειας	36
2.4.3 Βαθμός απόδοσης κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας	37
2.5 Συσσωρευτές Λιθίου – Ιόντων Πολυμερών	38
2.5.1 Τεχνολογία	38
2.5.2 Τεχνικές προδιαγραφές	39
2.5.3 Παράταση του χρόνου ζωής των συσσωρευτών	41
2.5.4 Χωρητικότητα	41
2.5.5 Φόρτιση	42
2.6 Υβριδικά συστήματα	42
Κεφάλαιο 3 – DC-DC μετατροπείς ισχύος	
3.1 Μετατροπέας υποβιβασμού	45
3.2 Μετατροπέας ανύψωσης	48
3.3 Μετατροπέας υποβιβασμού - ανύψωσης	49
3.4 Μετατροπέας ανύψωσης με συζευγμένα πηνία	50
3.4.1 Αρχή λειτουργίας	50
3.5 Ανάλυση της βαθμίδας του αμφίπλευρου dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία από την προτεινόμενη τοπολογία	58
Κεφάλαιο 4 – Αντιστροφείς ισχύος	

4.1 Μονοφασικοί Αντιστροφείς	63
4.2 Τριφασικοί Αντιστροφείς	66
4.3 Τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM)	69
4.4 Διασύνδεση με το δίκτυο διανομής	73
4.4.1 Ροή ισχύος	73
4.4.2 Ορθογωνική ανάλυση τριφασικών συνιστωσών	76
4.4.3 Τροποποιημένη p-q θεωρία	78
4.4.4 Φυσική σημασία ισχύων στην τροποποιημένη p-q θεωρία	80
4.4.5 PQ έλεγχος αντιστροφέα	80
4.4.6 PV έλεγχος αντιστροφέα	82
4.4.7 Vf έλεγχος αντιστροφέα	83
4.5 Μοντελοποίηση διαφόρων φάσεων λειτουργίας αντιστροφέα	84
4.5.1 Μοντελοποίηση των διακοπών της γέφυρας	84
4.5.2 Μοντελοποίηση του αντιστροφέα σε αυτόνομη λειτουργία	85
4.5.3 Μοντελοποίηση του αντιστροφέα σε λειτουργία σύνδεσης με το δίκτυο	86
4.5.4 Μοντελοποίηση του αντιστροφέα σε λειτουργία ανόρθωσης	87
4.5.5 Μοντελοποίηση του αντιστροφέα σε λειτουργία φόρτισης-εκφόρτισης συσσωρευτών	88
4.6 Ανάλυση της βαθμίδας του αμφίπλευρου dc-ac-ac αντιστροφέα – κυκλομετατροπέα από την προτεινόμενη τοπολογία	90
Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα προσομοιώσεων της προτεινόμενης τοπολογίας - Συμπεράσματα	
5.1 Εισαγωγή	95
5.2 DC-DC μετατροπέας γέφυρας με συζευγμένα πηνία	96
5.2.1 Λειτουργία ανύψωσης (boost)	96
5.2.2 Λειτουργία υποβιβασμού (buck)	99
5.3 DC-DC μετατροπέας γέφυρας σε κλειστό βρόχο – λειτουργία ανύψωσης	102
5.4 Αντιστροφέας - Κυκλομετατροπέας υψηλής συχνότητας	107
5.5 Διασύνδεση της βαθμίδας αντιστροφέα – κυκλομετατροπέα υψηλής συχνότητας με το δίκτυο διανομής	113
5.6 Συμπεράσματα	117
Βιβλιογραφία	119



“I believe that water will one day be employed as a fuel, that hydrogen and oxygen which constitute it, used singly or together, will furnish an inexhaustible source of heat and light.”

-Jules Verne, Mysterious Island, 1874

“Πιστεύω ότι το νερό μια ημέρα θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, ότι το υδρογόνο και το οξυγόνο που το αποτελούν, χρησιμοποιούμενα μεμονωμένα ή μαζί, θα εφοδιάσουν μια ανεξάντλητη πηγή θερμότητας και φωτός.”

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

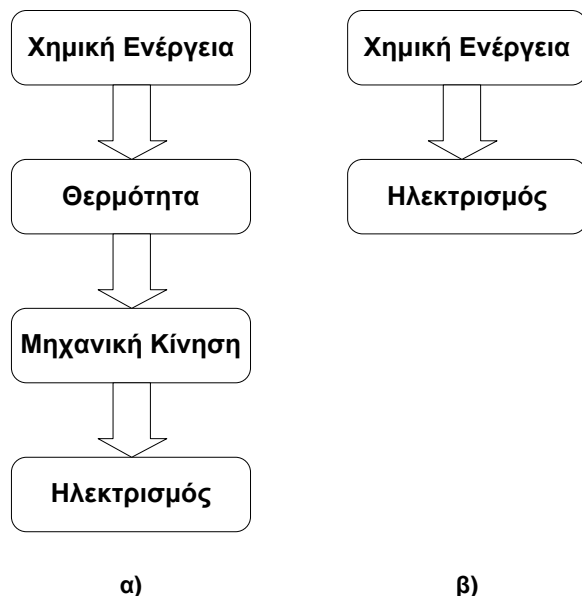
Εισαγωγή

Ο Ιούλιος Βερν στο βιβλίο του “Μυστηριώδες Νησί” από το 1874 κιάλας είχε προβλέψει την χρήση των συστατικών του νερού σαν μία ανεξάντλητη πηγή θερμότητας και φωτός. Στις μέρες μας αυτό το καταφέραμε με την κατασκευή των κυψέλων καυσίμου (fuel cells). Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χαρακτηριστούν σαν κέντρα ενός συστήματος το οποίο χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως καύσιμο. Είναι αυτές οι οποίες αναλαμβάνουν τη μετατροπή του καυσίμου σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Η έννοια της κατάλυσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου, όπως θα δούμε παρακάτω και η έρευνα για τη βελτίωση της αποδόσεων της γίνεται κυρίως σε αυτόν τον τομέα, τομέας εξορισμού μελετώμενος στην κλίμακα του νανομέτρου.

Το υδρογόνο είναι ένα άοσμο και άχρωμο αέριο και με μοριακό βάρος 2.016 gr/mol, είναι το ελαφρύτερο στοιχείο στη φύση [1]. Η πυκνότητα του είναι περίπου 14 φορές μικρότερη από του αέρα (0.08376 kg/m³ στην πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και την πίεσης). Είναι υγρό στις θερμοκρασίες κάτω από 20.3 K (στην ατμοσφαιρική πίεση) και έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα μάζας σε σχέση με όλα τα καύσιμα και η μέγιστη θερμική του αξία είναι 141.9 MJ/kg, δηλαδή, σχεδόν τρεις φορές υψηλότερη από αυτή της βενζίνης. Εντούτοις, λόγω της χαμηλής πυκνότητας του, η θερμική του αξία με ογκομετρική βάση είναι σχεδόν το ένα τρίτο αυτής του φυσικού αέριου. Οι λογικές πηγές του υδρογόνου είναι τα καύσιμα υδρογονανθράκων (C_xH_y) και το νερό (H₂O). Προς το παρόν, το υδρογόνο παράγεται συνήθως από υδρογονάνθρακες (φυσικά αέριο, πετρέλαιο, και άνθρακα), αλλά αναπτύσσονται διάφορες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου από το νερό και οι κυριότερες είναι: ηλεκτρόλυση, θερμοχημικές διαδικασίες, φωτόλυση, φωτοηλεκτροχημικές διαδικασίες, φωτοκατάλυση και από βιομάζα.

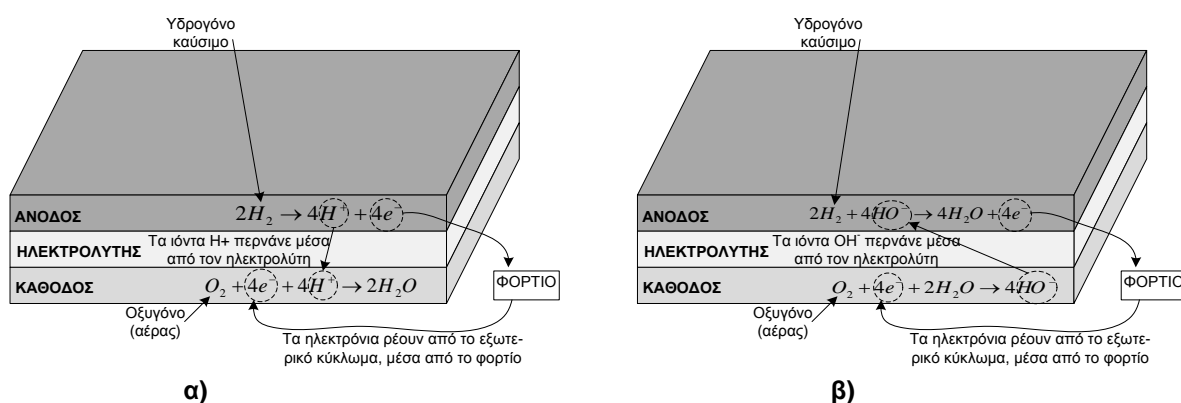
Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Η βασική αρχή λειτουργίας των κυψέλων καυσίμου είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιλαμβάνεται σε καύσιμα (υδρογόνο, φυσικό αέριο, μεθανόλη, βενζίνη, κ.τ.λ. ...) άμεσα στην ηλεκτρική ισχύ. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε τις ενδιάμεσες απώλειες που έχουν οι άλλοι τρόποι παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Σε μια συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού η χημική ενέργεια των καυσίμων μετατρέπεται πρώτα σε θερμότητα, ύστερα σε μηχανική κίνηση και τελικά σε ηλεκτρική ισχύ. Στις

κυψέλες καυσίμου εκμεταλλευόμαστε την απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική.



Σχήμα 1.1: Μετατροπή χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική σε α) συμβατική μονάδα παραγωγής και β) σύστημα κυψελών καυσίμου.

Στο σχήμα 1.2 φαίνονται σχηματικά οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία κυψέλη καυσίμου στις δύο διαφορετικές δυνατές περιπτώσεις, με όξινο και με αλκαλικό ηλεκτρολύτη, αντίστοιχα [1].



Σχήμα 1.2: Αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια και ροή των ηλεκτρονίων μέσω του φορτίου για μια κυψέλη καυσίμου α) όξινο ηλεκτρολύτη και β) αλκαλικού ηλεκτρολύτη.

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν και άλλες ιδιότητες εκτός από την υψηλή αποδοτικότητα που τις κάνουν ιδιαίτερα ελκυστικές. Οι εκπομπές των κυψελών καυσίμου δεν συμπεριλαμβάνουν τα συνηθισμένα προϊόντα καύσης (SO_x , CO , άλλα μόρια, και διάφοροι

άκαυτοι ή μερικώς καμένοι υδρογονάνθρακες), αν και μπορεί να υπάρξει κάποιο θερμικό NO_x όταν αυτές λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, δεν έχουν δονήσεις και θόρυβο στοιχεία που τις κάνουν εξαιρετικά φιλικές για τον άνθρωπο και αν αυτά συνδυαστούν και με την μηδενική σχεδόν εκπομπή επικίνδυνων καυσαερίων, οι κυψέλες καυσίμου μπορούν πολύ εύκολα να τοποθετούνται πολύ κοντά στο φορτίο που έχουν να τροφοδοτήσουν - για παράδειγμα, στο υπόγειο ενός κτιρίου. Όντας κοντά στα φορτία τους, όχι μόνο αποφεύγουν τις απώλειες συστημάτων μετάδοσης και διανομής, αλλά η θερμότητα των αποβλήτων τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας για διάφορες εφαρμογές όπως η θέρμανση χώρου, ο κλιματισμός, και η θέρμανση νερού στα νοικοκυριά.

Τα συστήματα συμπαραγωγής με τις κυψέλες καυσίμου μπορούν να έχουν αποδοτικότητες από τα καύσιμα στην ηλεκτρική ενέργεια και τη θερμότητα πάνω από 80%. Αυτή η υψηλή αποδοτικότητα τους, εκτός από το ότι οδηγεί σε μειωμένη κατανάλωση καυσίμων, αλλά επίσης, αν τα καύσιμα που θα χρησιμοποιούνταν για τις υπόλοιπες χρήσεις (π.χ. τη θέρμανση του κτιρίου), ήταν υδρογονάνθρακες όπως φυσικό αέριο ή πετρέλαιο, οι εκπομπές του CO_2 , που είναι το κυριότερο από τα αέρια του θερμοκηπίου μειώνονται επίσης. Στην πραγματικότητα, εάν οι κυψέλες καυσίμου τροφοδοτούνται από υδρογόνο που παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού χρησιμοποιώντας τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως την αιολική, την υδροηλεκτρική, ή τα φωτοβολταϊκά, δεν θα έχουμε καθόλου εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι κυψέλες καυσίμου είναι εύκολα διαμορφώσιμες στις βραχυπρόθεσμες αλλαγές στην ηλεκτρική ζήτηση, και το κατορθώνουν με μέτριους συμβιβασμούς στην αποδοτικότητα.

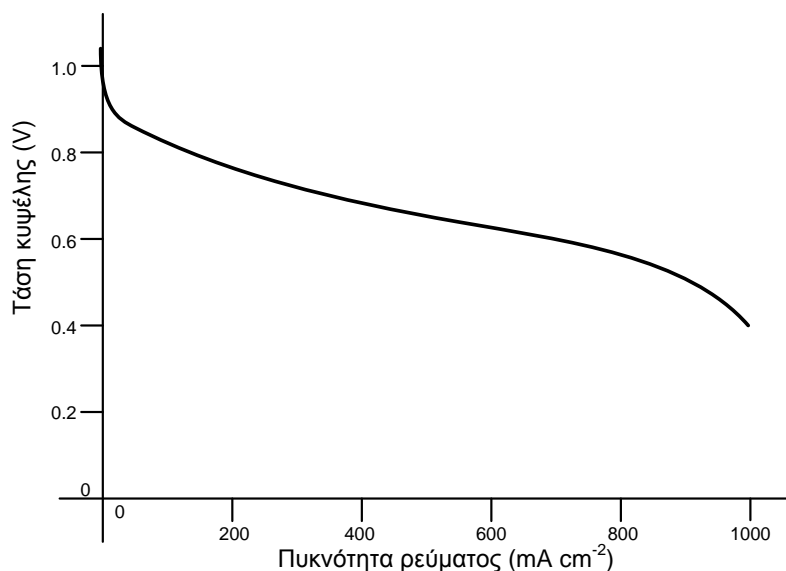
Οι συμβατικές μονάδες παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας πολλές φορές κατά την διάρκεια μιας ημέρας παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από αυτή που ζητείται τη δεδομένη χρονική στιγμή από τους καταναλωτές, και αυτό γίνεται επειδή είναι οικονομικώς πιο αποδοτικό για τις μεγάλες γεννήτριες των ατμοηλεκτρικών μονάδων να συνεχίσουν να λειτουργούν σε υψηλή παραγωγή από το να μειώνουν ή να διακόπτουν για λίγες ώρες την παραγωγή. Αυτή την περίσσεια ενέργεια μέχρι πρότινος προσπαθούσαμε να την αποθηκεύουμε. Ευρέως διαδεδομένα είναι τα συστήματα αποθήκευσης κινητικής ενέργειας (σφόνδυλοι), τα αντλιακά συστήματα αποθήκευσης νερού και φυσικά οι συσσωρευτές. Πρόσφατα έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.

Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας αποτελείται από μια συσκευή ηλεκτρόλυσης και από μια κυψέλη με καύσιμο το υδρογόνο και μπορεί να λειτουργεί σε δύο φάσεις, στη πρώτη φάση απορροφά ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και την καταναλώνει παράγοντας υδρογόνο και οξυγόνο και φορτίζει την συστοιχία των συσσωρευτών και στην δεύτερη φάση όπου γίνεται η επανασύνδεση του υδρογόνου με το οξυγόνο με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και διάθεση της στο δίκτυο [2].

Γενικά, ένα σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά για να είναι αξιόπιστη πηγή ισχύος:

- χαμηλό κόστος εφαρμογής,
- υψηλό βαθμό απόδοσης και υψηλή πυκνότητα ισχύος,
- χαμηλό πλάτος κυμάτωσης του ρεύματος από τις κυψέλες καυσίμου, με στόχο την μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής τους,
- γρήγορη και δυναμική απόκριση του συστήματος, για ρύθμιση της συνεχούς τάσης και για έλεγχο του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος,
- εναλλασσόμενη τάση εξόδου με συνολικό βαθμό αρμονικής παραμόρφωσης (THD) $\leq 5\%$ και
- ωμική απομόνωση μεταξύ του ζυγού συνεχούς ρεύματος και του δικτύου ή του φορτίου.

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια υπό μορφή ρεύματος dc, ενώ τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι σε μορφή ac. Είναι δηλαδή φανερό ότι για να συνδεθεί ένα σύστημα κυψελών καυσίμου με το δίκτυο και να είναι αξιοποιήσιμη η παραγωγή τού της ηλεκτρικής ενέργειας από την πλειοψηφία των ηλεκτρικών συσκευών και συστημάτων θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας αντιστροφέας. Επίσης, σύμφωνα με το σχήμα 1.3 είναι φανερό ότι η τάση εξόδου ενός συστήματος κυψελών καυσίμου μεταβάλλεται σε σχέση με το ρεύμα του φορτίου και αυτό είναι ένα μη ανεκτό χαρακτηριστικό για τα μοντέρνα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι επομένως απαραίτητη η χρήση ενός dc-dc μετατροπέα ισχύος για την σταθεροποίηση της εξόδου μια συστοιχίας κυψελών καυσίμου.

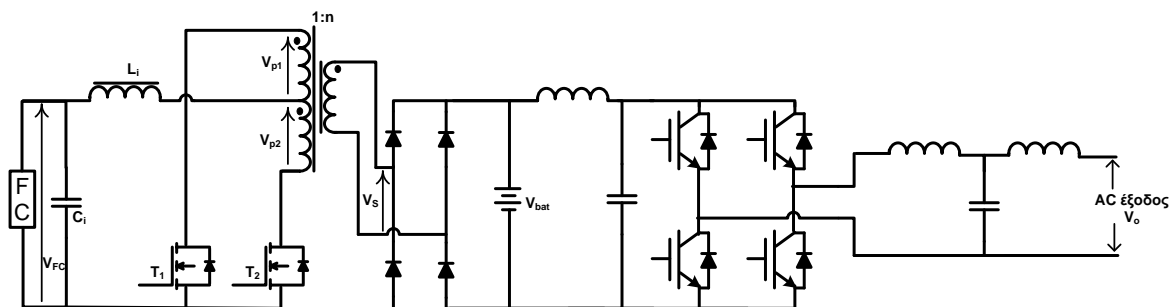


Σχήμα 1.3: Χαρακτηριστική I-V μια κυψέλης καυσίμου που φανερώνει την μεταβολή της τάσης εξόδου της κυψέλης από το ρεύμα που απορροφά το φορτίο της.

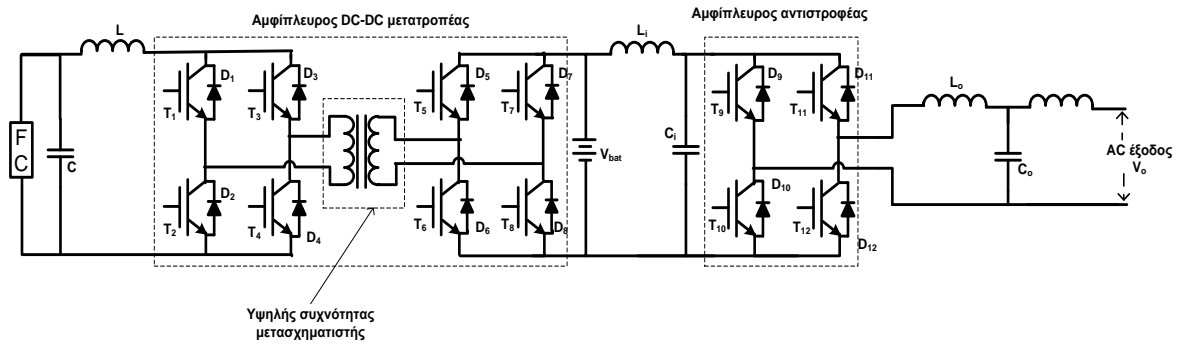
Επίσης, πολύ συχνά απαιτείται και γαλβανική απομόνωση των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και έτσι η χρήση κάποιου μετασχηματιστή είναι απαραίτητη. Ο μετασχηματιστής εκτός από την ωμική απομόνωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ανύψωση της τάσης. Βέβαια, ένας μετασχηματιστής που συνδέεται απευθείας στο δίκτυο είναι απαραίτητο να δουλεύει στα 50Hz και αυτό συνεπάγεται αυξημένο όγκο και βάρος. Αυτός είναι και ο λόγος που στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος που κάνει χρήση μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας, καθώς όσο αυξάνεται η συχνότητα λειτουργίας ενός μετασχηματιστή, τόσο μειώνεται ο όγκος και το βάρος του.

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν μεγάλη χρονική σταθερά απόκρισης εξαιτίας του αργού ελέγχου της ρύθμισης της τροφοδοσίας και ενυδάτωσης των κυψελών κατά την διαδικασία της ενεργειακής μετατροπής. Αυτή η χρονική σταθερά είναι της τάξεως των 10 – 20 sec και δημιουργεί πολλά προβλήματα στον έλεγχο του συνολικού συστήματος. Αυτός είναι ο λόγος που τα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι συχνά συνδυασμένα με την χρήση και διατάξεων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας όπως συσσωρευτές και υπερπυκνωτές. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται οι συσσωρευτές και αν πρόκειται για συστοιχία χαμηλής τάσης, της τάξεως των 96V, δεν χρειάζεται και ιδιαίτερο σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών (battery management system – BMS) και έτσι η συστοιχία τοποθετείται μετά την έξοδο της πρώτης βαθμίδας, δηλαδή του dc-dc μετατροπέα. Εάν η συστοιχία των συσσωρευτών είναι υψηλής τάσης, της τάξεως των 3 4V0 τότε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών που εκτός από το υψηλό του κόστος, οδηγεί συχνά και σε προβλήματα αστάθειας.

Βλέπουμε λοιπόν την πολύ μεγάλη χρησιμότητα των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος για την αξιοποίηση των συστημάτων κυψελών καυσίμου. Έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί πολλές και διάφορες τοπολογίες για την σύνδεση των κυψελών καυσίμου με το εναλλασσόμενο δίκτυο, δύο ενδεικτικές φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 1.4: Συμβατικό σύστημα μετατροπής ισχύος μιας κατεύθυνσης, με την συστοιχία των συσσωρευτών στην πλευρά της υψηλής dc τάσης (210-390 Volts).



Σχήμα 1.5 Συμβατικό αμφίπλευρο σύστημα μετατροπής ισχύος, με την συστοιχία των συσσωρευτών στην πλευρά της υψηλής συνεχούς τάσης.

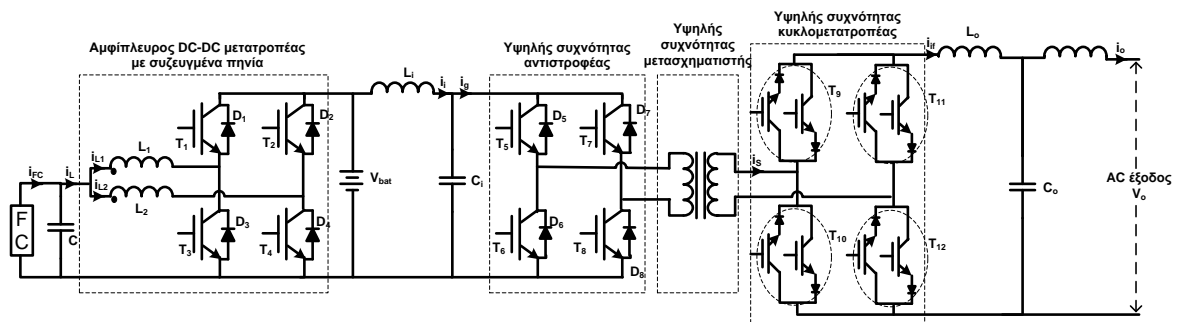
Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται μια τοπολογία μετατροπής ισχύος μιας κατεύθυνσης (μη αμφίδρομη), στην οποία χρησιμοποιείται ένας push-pull dc-dc μετατροπέας και ένας πλήρους γέφυρας αντιστροφέας. Η διάταξη όμως αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σύνδεση συστημάτων κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας καθώς δεν επιτρέπει την ροή ισχύος από το δίκτυο προς την κυψέλη καυσίμου. Για να ξεπεράσω αυτό το πρόβλημα έχει αναπτυχθεί η τοπολογία που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5, η οποία αποτελείται από έναν αμφίπλευρο πλήρους γέφυρας dc-dc μετατροπέα και έναν αντιστροφέα. Η διάταξη αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να συνδέσει ένα σύστημα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας με το δίκτυο αλλά η συστοιχία των συσσωρευτών τοποθετείται στην πλευρά της υψηλής συνεχούς τάσης κι επομένως απαιτείται σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών, τα μειονεκτήματα του οποίου αναφέρθηκαν παραπάνω. Επίσης, η πλήρης γέφυρα του dc-dc μετατροπέα απορροφά ρεύμα με υψηλή κυμάτωση από την κυψέλη και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την χρήση μεγάλων πυκνωτών – φίλτρων.

Για τους λόγους αυτούς στην παρούσα διπλωματική εργασία για την σύνδεση συστημάτων κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας με το δίκτυο διανομής ή εναλλασσόμενα φορτία, προτείνεται η τοπολογία του σχήματος 1.6. Πρόκειται για μια αμφίδρομη διάταξη που επιτρέπει την ροή της ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις, η συστοιχία των συσσωρευτών είναι τοποθετημένη στην πλευρά της χαμηλής dc τάσης και έτσι αποφεύγεται η χρήση συστήματος διαχείρισης συσσωρευτών, ενώ η ύπαρξη των συζευγμένων πηνίων μειώνει κατά πολύ την κυμάτωση του ρεύματος που απορροφά ο dc-dc μετατροπέας από την κυψέλη.

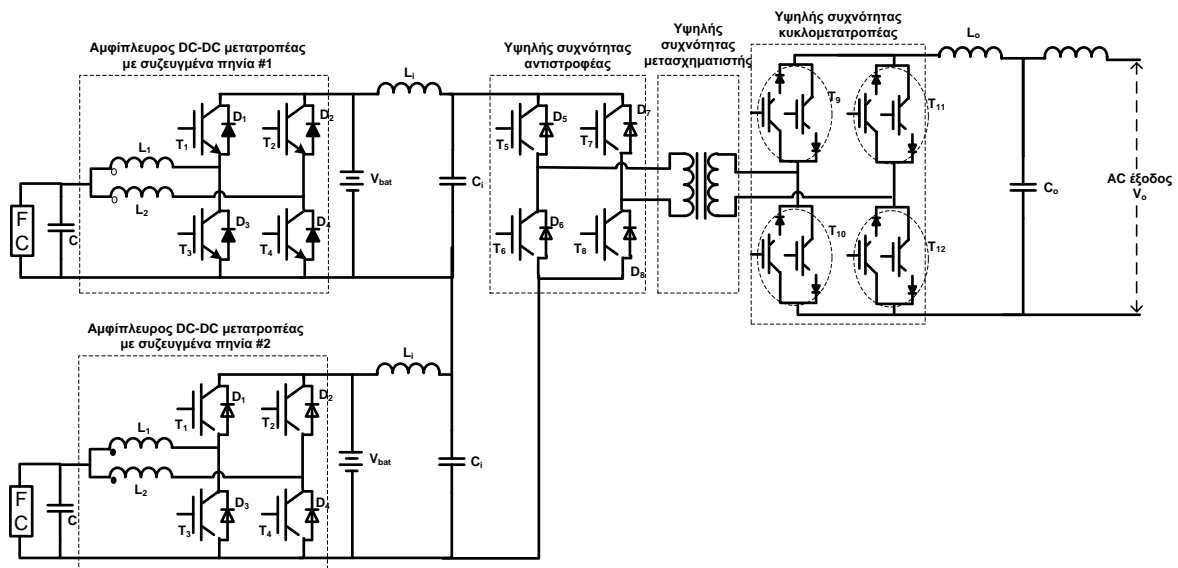
Η διάταξη αυτή αποτελείται από μια βαθμίδα αμφίπλευρου dc-dc μετατροπέα ανύψωσης – υποβιβασμού, από έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών αντιστροφέα και έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών κυκλομετατροπέα και εξαλείφει όλα τα μειονεκτήματα που είχαν οι προηγούμενες διατάξεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί συστοιχία συσσωρευτών χαμηλής dc τάσης (έως 96V) με αποτέλεσμα να μην απαιτείται σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών. Απορροφά μικρότερη κυμάτωση ρεύματος από την κυψέλη καυσίμου, σε χαμηλότερη διακοπτική

συχνότητα, με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερο φίλτρο στην είσοδο. Επίσης, λόγω της μικρότερης διακοπτικής συχνότητας είναι λιγότερο ευάλωτο στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης.

Με την χρήση αντιστροφέα υψηλής συχνότητας χρησιμοποιείται και μετασχηματιστής ισχύος υψηλής συχνότητας και έτσι μειώνεται σημαντικά το βάρος και ο όγκος του, ενώ η αμφίδρομη λειτουργία της διάταξης, κάνει την διάταξη ικανή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις και παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Μειονέκτημα της προτεινόμενης τοπολογίας είναι η χρήση τεσσάρων διόδων και τεσσάρων επιπλέον διακοπών στη βαθμίδα του κυκλομετατροπέα.



Σχήμα 1.6: Προτεινόμενη αμφίπλευρη τοπολογία μετατροπής ισχύος, με την συστοιχία των συσσωρευτών στην πλευρά χαμηλής συνεχούς τάσης.



Σχήμα 1.7: Επέκταση της παραπάνω τοπολογίας για σύστημα κυψελών καυσίμου πολλών επιπέδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κυψέλες καυσίμου, Συσσωρευτές Λιθίου – Ιόντων πολυμερών

2.1 Κυψέλες καυσίμου.

Μπορεί σήμερα οι κυψέλες καυσίμου να φαντάζουν ως ενδεχομένως η κυρίαρχη διανεμημένη τεχνολογία παραγωγής για τον εικοστό πρώτο αιώνα, αξίζει να σημειωθεί ότι αναπτύχθηκαν πριν από σχεδόν 160 χρόνια [3],[4]. Ο Sir William Grove, είναι ο άγγλος επιστήμονας που εφεύρε και κατασκεύασε τον πρώτο γαλβανικό συσσωρευτή κυψελών. Στα πειράματα του και στις δημοσιεύσεις του εν έτη 1839, την εφεύρεση του την αποκαλούσε "gaseous voltaic battery" (αεριώδης βολταϊκός συσσωρευτής). Ο συσσωρευτής του Grove εξαρτήθηκε από έναν συνεχή ανεφοδιασμό σπάνιων και ακριβών αερίων, και τα προβλήματα διάβρωσης όπως αναμένονταν οδήγησαν τον συσσωρευτή του να έχει σύντομη διάρκεια ζωής και να οδηγήσει σε εγκατάλειψη της ιδέας του.

Πενήντα έτη αργότερα, οι Mond και Langer ξέθαψαν την δουλειά του Grove και ανέπτυξαν μια κυψέλη των 1,5 W με αποδοτικότητα 50% και τότε ήταν, εν έτη 1890, που η συσκευή αυτή πήρε το όνομα "fuel cell", δηλαδή, "κυψέλη καυσίμου", έτσι όπως είναι γνωστή μέχρι και σήμερα. Μετά από άλλον έναν μισό αιώνα εγκατάλειψης αυτής της ιδέας και με ελάχιστη πρόοδος να σημειώνεται, έρχεται ο Francis T. Bacon, που ξαναξεκίνησε την μελέτη των κυψελών καυσίμου και μάλιστα αυτός ήταν που το 1938 θεωρείται ότι κατασκεύασε την πρώτη πρακτική κυψέλη καυσίμου. Μέχρι το 1952, ο Bacon ήταν σε θέση να παρουσιάσει μία αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC) των 5 kW που τροφοδοτούσε μεταξύ άλλων φορτίων και ένα περονοφόρο ανυψωτικό μηχάνημα ικανότητας 2 τόνων. Την ίδια χρονιά, ο Allis Chalmers παρουσίασε ένα τρακτέρ 20 ίππων που αντλούσε ισχύ από ένα σύστημα κυψελών καυσίμου.

Η ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου έλαβε πολύ μεγάλη προώθηση και άνθισε από την ανάγκη της NASA για να έχει πάνω στο διαστημικό σκάφος μια πηγή ηλεκτρικής ισχύος. Η σειρά Gemini με αποστολές που έμπαιναν σε τροχιά γύρω από την γη χρησιμοποίησε τις κυψέλες καυσίμου που στηρίχθηκαν στη τεχνολογία των μεμβρανών, ενώ στην πιο πρόσφατη αποστολή των Apollo που έκαναν επανδρωμένες εξερευνήσεις στη σελήνη καθώς και οι επόμενες διαστημικές πτήσεις των διαστημικών λεωφορείων έκαναν χρήση πιο εξελιγμένων αλκαλικών κυψελών καυσίμου από αυτή του Bacon.

2.2 Είδη κυψελών καυσίμου

Οι έξι σημαντικότεροι τύποι κυψελών καυσίμου είναι οι ακόλουθοι [1],[5]:

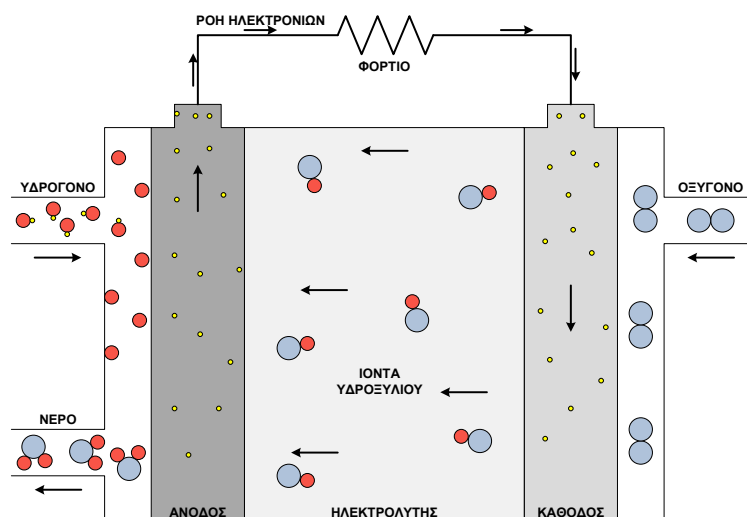
- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFCs)
- Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFCs)
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFCs)
- Κυψέλες καυσίμου λιωμένων ανθρακικών αλάτων (MCFCs)
- Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFCs)
- Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFCs)

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τα σημαντικότερα από τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου που θα μελετήσουμε παρακάτω.

Χαρακτηριστικά	Τύποι κυψελών καυσίμου					
	AFC	PAFC	PEMFC	MCFC	SOFC	DMFC
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	60-90	160-220	50-80	600-700	800-1000	90
Πυκνότητα ισχύος (mW/cm ²)	100-300	250	350-600	100-200	240-300	230
Επίπεδο ισχύος (kW)	10-100	100-5000	0,01-1000	1000-10 ⁵	100-10 ⁵	0,001-100
Αποδοτικότητα των καυσίμων	40-60	55	45-60	60-65	55-65	34
Χρόνος ζωής (ώρες)	>10000	>40000	>40000	>40000	>40000	>10000
Κόστος (US \$/kW)	>200	>3000	>200	1000	1500	>200

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά λειτουργίας διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

2.2.1 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου



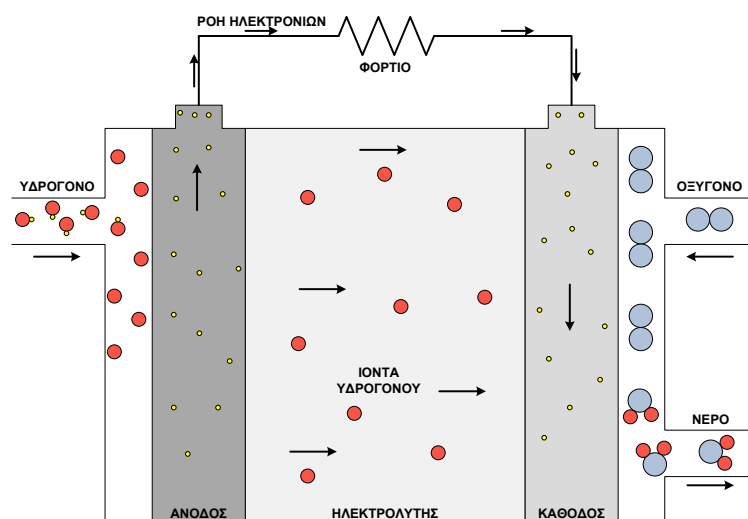
Σχήμα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα αλκαλικών κυψελών καυσίμου.

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFCs) έχουν την καλύτερη απόδοση μεταξύ όλων των τύπων κυψελών καυσίμου υπό τους ίδιους ή παρόμοιους όρους λειτουργίας, όταν καταναλώνουν καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο. Ως εκ τούτου, είναι μεταξύ των πρώτων

κυψελών καυσίμου που μελετήθηκαν και εξελίχθηκαν για χρήση σε πρακτικές εφαρμογές και είναι ο πρώτος τύπος κυψελών που χρησιμοποιούνται σε καθημερινή χρήση, κυρίως στα διαστημικά προγράμματα. Τα AFCs που χρησιμοποιούνται στις διαστημικές αποστολές πυραύλων λειτουργούν σε περίπου 200°C για να έχουν την μέγιστη απόδοση τους (δηλ., υψηλή αποδοτικότητα ενεργειακής μετατροπής πάνω από 70% και υψηλή πυκνότητα ισχύος που είναι κρίσιμη για τις διαστημικές εφαρμογές). Ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης είναι το υδροξείδιου του καλίου (KOH) που ακινητοποιείται σε μια μήτρα αμιάντων. Κατά συνέπεια, τα AFCs λειτουργούν σε υψηλή πίεση για να αποτραπεί ο βρασμός και κατά συνέπεια η μείωση του υγρού ηλεκτρολύτη. Συνεπώς, αυτές οι αυστηρές συνθήκες λειτουργίας (υψηλή πίεση και θερμοκρασία) των κυψελών αυτών έχουν και ακριβές απαιτήσεις στα υλικά κατασκευής έτσι ώστε αυτά να μπορούν να αντισταθούν σε αυτές τις συνθήκες καθώς και στα ακραία διαβρωτικά οξειδωτικά σε άνοδο και κάθοδο. Για να καλυφθούν αυτές οι απαιτήσεις, γίνεται απαραίτητη η χρήση πολύτιμων μετάλλων όπως ο λευκόχρυσος, ο χρυσός, και το ασήμι για την κατασκευή των ηλεκτροδίων, αν και αυτά τα πολύτιμα μέταλλα δεν είναι απαραίτητα για τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που οδηγούν στην ηλεκτρική παραγωγή.

Η χαρακτηριστική θερμοκρασία λειτουργίας των συστημάτων ισχύος με AFCs που στοχεύουν στις εμπορικές και επίγειες εφαρμογών κυμαίνεται από 20 έως 90°C, και ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως το KOH. Η σημαντικότερη τεχνική πρόκληση είναι ότι οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες, όπως το υδροξείδιο του καλίου ή του νατρίου, δεν απορρίπτουν το διοξείδιο του άνθρακα, ενώ ούτε το 300 έως 350 ppm διοξειδίου του άνθρακα που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα δεν είναι ανεκτό. Η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα σε άνοδο και κάθοδο πρέπει να είναι λιγότερη από 10 έως 100 ppm, ενώ στις επίγειες εφαρμογές σχεδόν πάντα (για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους) είναι απαραίτητη η χρήση του ατμοσφαιρικού αέρα ως οξειδωτικό.

2.2.2 Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.



Σχήμα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα κυψελών καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων.

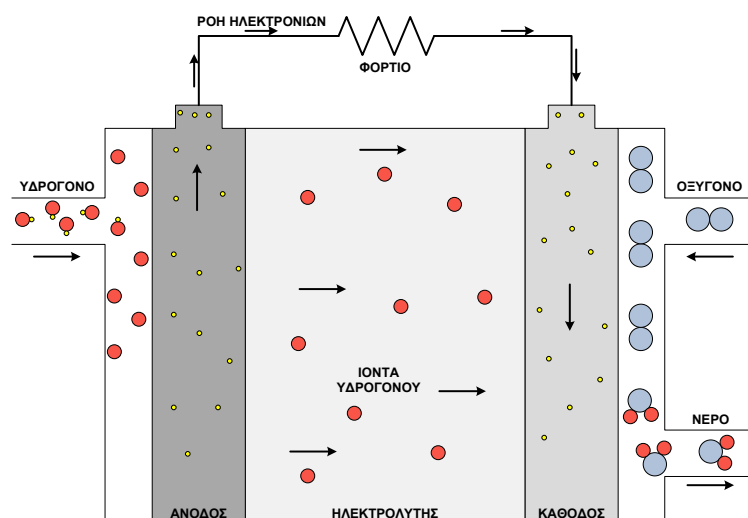
Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) συναντώνται και με άλλα ονόματα, όπως κυψέλες καυσίμου μεμβράνης πολυμερών ηλεκτρολυτών ή κυψέλες καυσίμου στερεών πολυμερών ηλεκτρολυτών. Αποτελείται από μια στερεά πολυμερή μεμβράνη που δρα σαν ηλεκτρολύτης και είναι ένας άριστος αγωγός πρωτονίων, στριμωγμένος ανάμεσα σε δύο πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα. Έχει την ικανότητα γρήγορης έναρξης και παράγει την υψηλότερη πυκνότητα ισχύος εξόδου μεταξύ όλων των τύπων των κυψελών καυσίμου. Λόγω της στερεάς μεμβράνης ως ηλεκτρολύτη, δεν υπάρχει κανένας ρευστός διαβρωτικός κίνδυνος έκχυσης, και δεν απαιτείται αυξημένη ευαισθησία στον προσανατολισμό. Δεν έχει κανέναν πτητικό ηλεκτρολύτη και γι αυτό δεν προκαλεί πολλές ανησυχίες για διάβρωση.

Έχει πραγματικά μηδενικές μολυσματικές εκπομπές και παράγει πόσιμο νερό εάν γίνει χρήση καθαρού υδρογόνου ως καύσιμο. Λόγω του περιορισμού που επιβάλλεται από τη μεμβράνη και τα προβλήματα με την ισορροπία του νερού, η θερμοκρασία λειτουργίας στις PEMFCs είναι συνήθως λιγότερο από 120°C, με χαρακτηριστικές τιμές γύρω στους 80°C. Αυτή η μάλλον χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας απαιτεί τη χρήση ευγενών μετάλλων ως καταλύτες σε άνοδο και κάθοδο με γενικά υψηλότερες φορτίσεις των καταλυτών από ότι στις PAFCs. Με τις PEMFCs έχουμε επιτύχει μια υψηλή πυκνότητα ισχύος πάνω από 1 kW/kg και 0,7 kW/L, ίσως η υψηλότερη μεταξύ όλων των τύπων των κυψελών καυσίμου που βρίσκονται αυτήν την περίοδο υπό ανάπτυξη.

Για να αποτραπεί η ξήρανση της μεμβράνης και κατά συνέπεια η μείωση της απόδοσης και η μείωση της διάρκειας ζωής, και τα καύσιμα και το οξειδωτικό υγραίνονται πλήρως, και η θερμοκρασία λειτουργίας περιορίζεται από τη θερμοκρασία κορεσμού του νερού που αντιστοιχεί στη πίεση λειτουργίας. Το υγρό νερό που διαμορφώνεται στην κάθοδο δεν διαλύεται στην μεμβράνη ηλεκτρολυτών, και αφαιρείται συνήθως από την κυψέλη από το υπερβολικό ατμό του οξειδωτικού αερίου. Η συσσώρευση του υγρού νερού στην κάθοδο εμποδίζει τη μεταφορά του οξυγόνου στις καταλυτικές περιοχές, και κατά συνέπεια να “πλημμυρίζει” η κάθοδος και να μειώνεται η απόδοση της κυψέλης.

Σαν κυψέλη καυσίμου όξινων ηλεκτρολυτών που λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία, οι PEMFC είναι τρωτές στη δηλητηρίαση από το μονοξείδιο του άνθρακα. Ακόμη και ένα απειροστό ίχνος CO μειώνει δραστικά την απόδοση, αν και η επίδραση της δηλητηρίασης της κυψέλης από το CO είναι αντιστρέψιμη και δεν προκαλεί μόνιμες ζημιές στο σύστημα των PEMFC. Αντιθέτως, το διοξείδιο του άνθρακα δεν επηρεάζει την λειτουργία και την απόδοση των PEMFC.

2.2.3 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος.

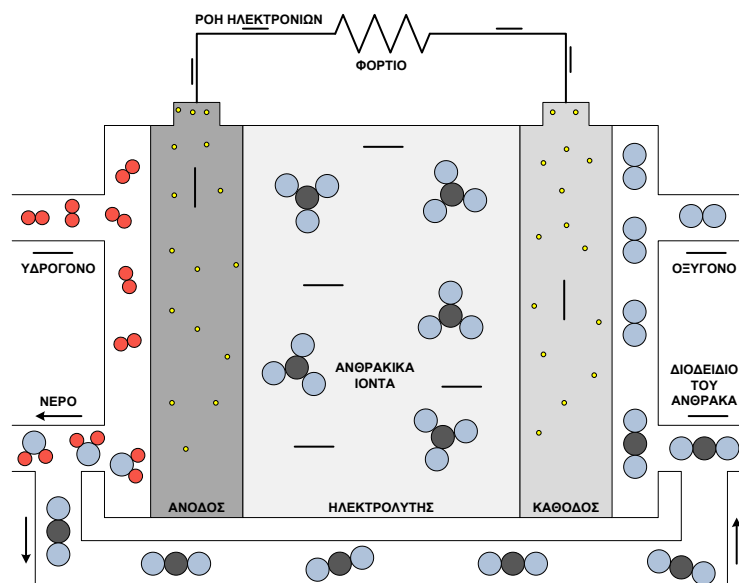


Σχήμα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος.

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) είναι ο πιο προηγμένος τύπος κυψελών καυσίμου και θεωρείται "τεχνικά ωριμασμένος" και γι αυτό αναφέρονται ως οι κυψέλες καυσίμου πρώτης γενιάς. Αντίθετα από τα συστήματα αλκαλικών κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν πρώτιστα για τις διαστημικές εφαρμογές, οι PAFC ήταν αρχικά στοχευμένες στις επίγειες εφαρμογές με την χρήση του ατμοσφαιρικού αέρα ως οξειδωτικό και ως περιείχε το CO_2 και την χρήση κατάλληλα επεξεργασμένων υδρογονάνθρακων ως καύσιμα για τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικά συστατικά μιας κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι τα ηλεκτρόδια που αποτελούνται από διασκορπισμένο καταλύτη λευκόχρυσου ή φύλλα άνθρακα, μήτρα SiC που συγκρατεί το φωσφορικό οξύ, και ένα διπολικό έλασμα από γραφίτη, με δύο κανάλια ροής για τα καύσιμα και το οξειδωτικό. Η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται από 160-220°C και μπορούν να χρησιμοποιήσουν είτε το καθαρό υδρογόνο, είτε το υδρογόνο που παράγεται από τους υδρογονάνθρακες (συνήθως φυσικό αέριο), είτε αλκοόλες ως αντιδρών στην άνοδο. Η αποβαλλόμενη θερμότητα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση χώρων και την παροχή ζεστού νερού στα νοικοκυριά.

Εντούτοις, οι PAFC δεν μπορούν να ανεχτούν την παρουσία του CO και του H_2S , τα οποία είναι συνήθως παρόντα στα αναμορφωμένα καύσιμα. Αυτοί οι μολυσματικοί παράγοντες δηλητηριάζουν τον καταλύτη και μειώνουν την ηλεκτροχημική καταλυτική δραστηριότητά του. Η ανοχή στο CO είναι καλύτερη σε θερμοκρασία λειτουργίας άνω των 180°C. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου είναι εμπορικά διαθέσιμες από φορητές μονάδες των 24V και 250W μέχρι τις επιτόπιες γεννήτριες των 200kW. Συστήματα PAFC 0.5-1.0MW αναπτύσσονται για τη χρήση στις εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ικανότητας 1-11MW. Η πυκνότητα ισχύος του συστήματος PAFC είναι περίπου 200mW/cm², και η πυκνότητα ισχύος για συστοιχία κυψελών καυσίμου 36kW υπολογίζεται να είναι 0,12kW/kg και 0,16kW/L.

2.2.4 Κυψέλες καυσίμου λιωμένων ανθρακικών αλάτων.

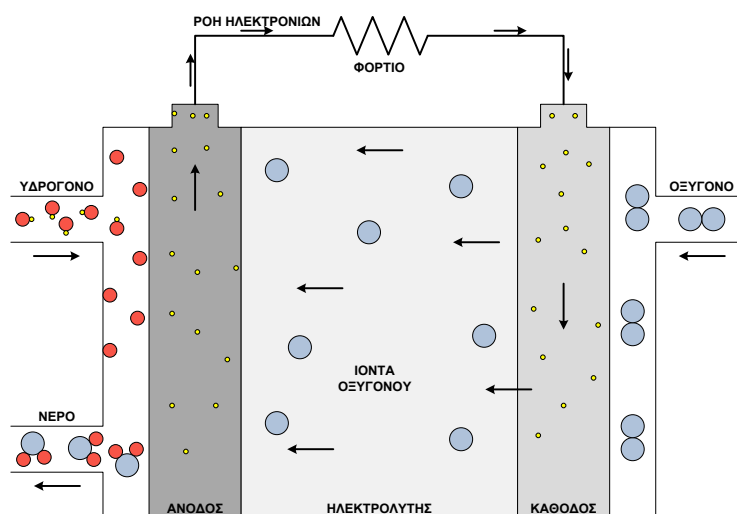


Σχήμα 2.4: Σχηματικό διάγραμμα κυψέλων καυσίμου λιωμένων ανθρακικών αλάτων.

Οι κυψέλες καυσίμου λιωμένου ανθρακικού άλατος (MCFC) αναφέρονται συχνά ως δεύτερης γενιάς κυψέλες καυσίμου επειδή η εμπορευματοποίησή τους αναμένεται κανονικά μετά από τις PAFC. Οι MCFCs λειτουργούν στην υψηλότερη θερμοκρασία από όλες τις κυψέλες καυσίμου που περιγράφονται ως εδώ. Η θερμοκρασία λειτουργίας το τ είναι γενικά γύρω στους 600-700°C. Τέτοιες υψηλές θερμοκρασίες παράγουν αρίστης ποιότητας αποβαλλόμενη θερμότητα που είναι κατάλληλη για την επεξεργασία καυσίμου, τη συμπαραγωγή, ή τη λειτουργία συνδυασμένου κύκλου, που οδηγούν στην υψηλότερη ηλεκτρική αποδοτικότητα. Παράγει επίσης τη δυνατότητα άμεσης αξιοποίησης των ανθρακούχων καυσίμων (ιδιαίτερα το φυσικό αέριο), μέσω της εσωτερικής αναμόρφωσης για να παραγάγει τα καύσιμα (υδρογόνο) που χρησιμοποιούνται τελικά από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στις κυψέλες καυσίμου. Έχει υπολογιστεί ότι οι MCFC μπορούν να επιτύχουν μια αποδοτικότητα ενεργειακής μετατροπής 52-60% (από τη χημική ενέργεια στην ηλεκτρική ενέργεια) με την εσωτερική αναμόρφωση και το φυσικό αέριο ως αρχικά καύσιμα.

Οι MCFCs χρησιμοποιούν ένα λιωμένο αλκαλικό μίγμα ανθρακικού άλατος ως ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι ακινητοποιημένος σε μια πορώδη μήτρα αργλικών αλάτων λίθιου. Τα αγωγά είδη είναι τα ιόντα ανθρακικού άλατος. Για την κάθοδο, αυτήν την περίοδο γίνεται χρήση του λιθιούχου οξειδίου του νικελίου, και για την άνοδο χρησιμοποιούνται νικέλιο, κοβάλτιο και χαλκό, συχνά υπό μορφή κονιοποιημένων κραμάτων και σύνθετων με οξείδια. Σαν πορώδη δομή μετάλλων, υπόκειται στη συμπύκνωση και την αργή κίνηση κάτω από τη συμπιεστική δύναμη απαραίτητη για τη λειτουργία στοιβών. Οι πρόσθετες ουσίες όπως χρώμιο ή αργίλιο διασκορπίζονται σαν οξείδια και με αυτόν τον τρόπο αυξάνουν τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα της ανόδου. Οι MCFCs έχουν συνήθως 75-80% χρησιμοποίηση καυσίμων (υδρογόνο).

2.2.5 Κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων.

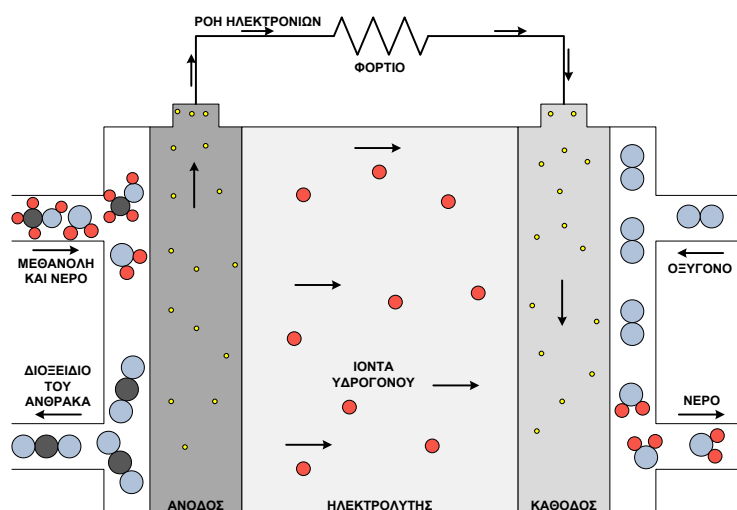


Σχήμα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων.

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) έχουν προκύψει σαν ένας σοβαρός εναλλακτικός τύπος κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας και συχνά αναφέρονται σαν κυψέλες καυσίμου τρίτης γενιάς, επειδή η εμπορευματοποίησή τους αναμένεται μετά από τις PAFCs (η πρώτη γενιά) και τις MCFCs (η δεύτερη γενιά). Οι SOFC είναι ένα σύστημα ισχύος ολόκληρο σε στερεή μορφή συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτρολύτη, και λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία γύρω στους 1000°C για την επαρκή ιοντική και ηλεκτρονική αγωγιμότητα των διάφορων τμημάτων της κυψέλης. Η υψηλής θερμοκρασίας λειτουργία οδηγεί στη γρηγορότερη ηλεκτροχημική κινητική (δηλ., χαμηλή πόλωση ενεργοποίησης) και δεν υπάρχει ανάγκη για καταλύτες ευγενών μετάλλων. Τα καύσιμα μπορούν να είναι αέριο υδρογόνο, μίγμα H_2/CO , ή υδρογονάνθρακες, επειδή η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας καθιστά πιθανή την εσωτερική κανονική αναμόρφωση των υδρογονανθράκων με τον υδρατμό. Σημαντικό είναι το ότι το CO δεν είναι πλέον ένας μολυσματικός παράγοντας, αλλά το αντίθετο μάλιστα, γίνεται καύσιμο στις SOFCs. Η αποδοτικότητα της μετατροπής της χημικής σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 50-60%, ίσως να φτάνει και το 70%-80%.

Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, οι SOFCs μπορούν να ανεχτούν καλύτερα τις ακαθαρσίες στα εισερχόμενα καύσιμα. Αλλά το σουλφίδιο του υδρογόνου (H_2S), το υδροχλωρίο (HCl) και η αμμωνία (NH_3) είναι ακαθαρσίες που συναντώνται συχνά στα εξαερωμένα προϊόντα άνθρακα, και κάθε μια από αυτές τις ουσίες είναι ενδεχομένως επιβλαβής στην απόδοση των SOFCs. Ο βασικός παράγοντας δηλητηρίασης των SOFCs είναι το H_2S . Αν και το όριο ανοχής της κυψέλης στο θείο είναι περίπου δύο μεγέθη μεγαλύτερο από τα όρια στους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, το επίπεδο παρόλα αυτά, είναι κάτω από 80 ppm.

2.2.6 Κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης.



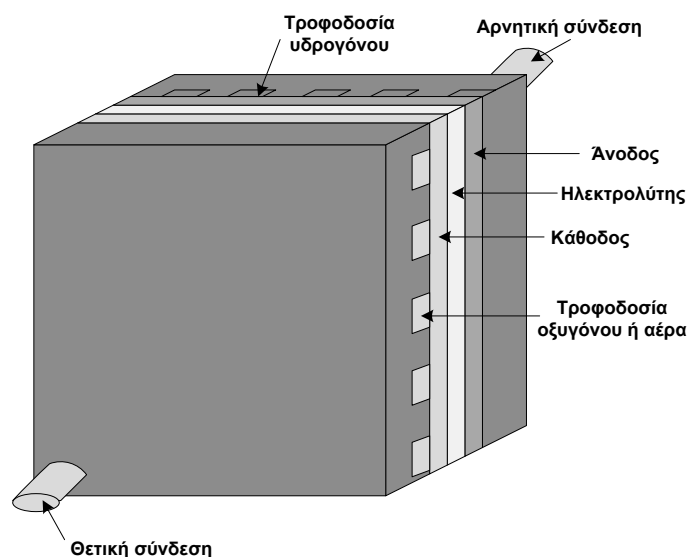
Σχήμα 2.6: Σχηματικό διάγραμμα κυψελών καυσίμου άμεσης μεθανόλης.

Αν και το υγρό υδρογόνο έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, η ρευστοποίηση του υδρογόνου απαιτεί κατά προσέγγιση το ένα τρίτο της συγκεκριμένης ενέργειας, και η απαραίτητη θερμική μόνωση αυξάνει τον όγκο της δεξαμενής σημαντικά. Η χρήση των υβριδίων μετάλλων μειώνει τη συγκεκριμένη ενεργειακή πυκνότητα και το βάρος της δεξαμενής γίνεται υπερβολικό. Η μεθανόλη ως καύσιμο προσφέρει ευκολία στον χειρισμό και την αποθήκευση, και την πιθανή υποδομή για τη διανομή της σαν καύσιμο. Επίσης, η μεθανόλη έχει θεωρητικά υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το υδρογόνο (5 kWh/L έναντι με 2,6 kWh/L για το υγρό υδρογόνο). Ο εύκολος ανεφοδιασμός σε καύσιμα είναι άλλο ένα πλεονέκτημα για τη μεθανόλη. Εντούτοις, στις συμβατικές κυψέλες καυσίμου τύπου υδρογόνου-αέρα ή τύπου υδρογόνου-οξυγόνου, απαιτείται ένας αναμορφωτής που προσθέτει πολυπλοκότητα και κόστος στο όλο σύστημα, καθώς επίσης και την παραγωγή ανεπιθύμητων ρύπων, όπως το μονοξείδιο του άνθρακα.

Τυπικά, η θερμοκρασία λειτουργίας είναι γύρω στους 90°C, και το εύρος των πιέσεων λειτουργίας κυμαίνεται από μία μέχρι αρκετές ατμόσφαιρες. Το σύστημα των DMFCs είναι εξαιρετικά ευαίσθητο στο μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το σουλφίδιο του υδρογόνου (H₂S). Το μονοξείδιο του άνθρακα μπορεί να υπάρξει ως ένα ενδιάμεσο προϊόν της αντίδρασης και μπορεί να δηλητηριάσει τον καταλύτη. Υπάρχει διαμάχη σχετικά με το εάν το μονοξείδιο του άνθρακα είναι παρόν στην άνοδο κατά τη διάρκεια της αντίδρασης. Το θείο μπορεί να είναι παρόν εάν η μεθανόλη παράγεται από πετρέλαιο και πρέπει να αφαιρεθεί. Οι DMFCs είναι οι ελκυστικότερες κυψέλες για τις εφαρμογές όπου η αποθήκευση ή η παραγωγή του υδρογόνου ασκεί αρνητική επίδραση στον όγκο και το βάρος του συστήματος. Κατά συνέπεια, οι DMFCs έχουν μια μεγάλη δυνατότητα χρήσης στις εφαρμογές μεταφορών που κυμαίνονται από τα αυτοκίνητα, τα τρένα και τα σκάφη, κ.τ.λ...

2.3 Δομή κυψελών καυσίμου

Η τάση στα άκρα μιας κυψέλης καυσίμου είναι αρκετά μικρή, περίπου 0.7V αν θεωρήσουμε ότι δημιουργείτε ένα χρήσιμο ρεύμα. Αυτό σημαίνει ότι για παραχθεί μια χρήσιμη τάση πολλές κυψέλες καυσίμου πρέπει να συνδεθούν εν σειρά. Για να συνδέσουμε διάφορες κυψέλες εν σειρά, χρησιμοποιούμε "διπολικά ελάσματα". Αυτά τα ελάσματα – πλάκες που παίζουν το ρόλο αλληλοσυνδέσεων μεταξύ των κυψελών έχουν κομμένα κανάλια στην επιφάνεια τους έτσι ώστε τα αέρια να μπορούν να ρέουν πέρα από την άκρη των ηλεκτροδίων. Πολλές κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά μεταξύ τους αποτελούν μια συστοιχία κυψελών καυσίμου, με τάση στα άκρα της πολλαπλάσια της τάσης κυψέλης. Τα αυλακωμένα ελάσματα αποτελούνται από έναν καλό αγωγό όπως γραφίτης ή ανοξείδωτο χάλυβα. Η δομή μιας κυψέλης καυσίμου φαίνεται στο σχήμα 2.7.

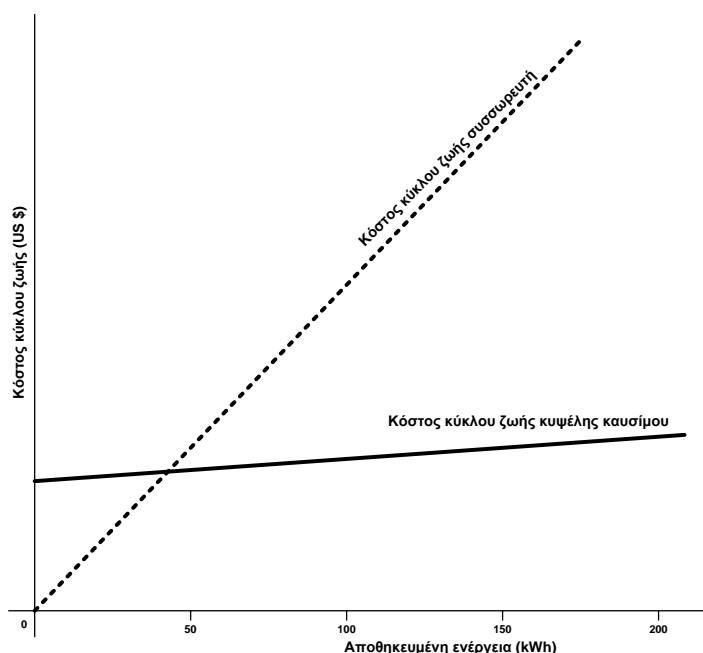


Σχήμα 2.7: Κυψέλη με κατάλληλες πλάκες για καλύτερη δέσμευση του ρεύματος από όλη την επιφάνεια των ηλεκτροδίων και ειδικά κανάλια για την κίνηση των αερίων.

Η δημιουργία συστοιχίας κυψελών καυσίμου έχει σαν αποτέλεσμα μια στερεά ομάδα κυψελών στην οποία το ηλεκτρικό ρεύμα περνά αποτελεσματικά, λίγο πολύ κατ' ευθείαν μέσω των κυψελών παρά από την επιφάνεια των διαδοχικών ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια επίσης, υποστηρίζονται καλά, και ολόκληρη η δομή είναι ισχυρή και γερή. Ιδανικά το διπολικό έλασμα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λεπτότερο, για να ελαχιστοποιηθεί η ηλεκτρική αντίσταση και να κάνει τις στοίβες κυψελών καυσίμου μικρότερες. Εντούτοις, αυτό κάνει τα κανάλια για την ροή του αερίου στενά, το οποίο σημαίνει ότι είναι δυσκολότερο να στείλεις το αέριο γύρω στην κυψέλη. Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας, ο κυκλοφορόν αέρας πρέπει να εξατμίσει και να μεταφέρει έξω από την κυψέλη το νερό που παράγεται στα προϊόντα της αντίδρασης.

2.4 Κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας

Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας, το οποίο και προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, περιλαμβάνει μια συσκευή ηλεκτρόλυσης και μία κυψέλη καυσίμου που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το υδρογόνο [2]. Η κυψέλη αυτή, είναι ικανή να λειτουργεί σε δύο φάσεις: στη φάση κατά την οποία καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια για παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου από την συσκευή ηλεκτρόλυσης του νερού (φόρτιση) και στη φάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την οποία το υδρογόνο και το οξυγόνο επανασυνδέονται για να παραγάγουν ηλεκτρικό ρεύμα και νερό (εκφόρτιση). Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία αυτής της κυψέλης, κατά τη φάση της παραγωγής υδρογόνου και οξυγόνου, αλλά και για τη φόρτιση των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται από το σύστημα, μπορεί να προέλθει από τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατά τις ώρες μειωμένης ζήτησης. Η ενέργεια αυτή μπορεί επίσης να προέλθει και από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όταν η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί πλήρως.



Σχήμα 2.8: Σύγκριση κόστους κύκλου ζωής κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας – συσσωρευτή.

Η κυψέλη αναστρέψιμης λειτουργίας, χρησιμοποιώντας τα ίδια ηλεκτρόδια μπορεί να εκτελεί και τη λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης παράγοντας υδρογόνο και οξυγόνο (δηλαδή, ισοδύναμη λειτουργία με συσσωρευτή που φορτίζεται) και τη λειτουργία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή, ισοδύναμη λειτουργία με συσσωρευτή που εκφορτίζεται). Αν και οι συσσωρευτές έχουν υψηλότερη απόδοση ανά ενεργειακό κύκλο, οι κυψέλες αναστρέψιμης ή μη λειτουργίας έχουν μερικά βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία τις

κάνουν πολύ ελκυστικές ως εναλλακτική λύση για αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, σε πολλές εφαρμογές. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας έναντι των συσσωρευτών είναι ότι παρουσιάζουν πολύ μικρότερο κόστος κύκλου ζωής για μεγάλα ποσά αποθηκευμένης ενέργειας, κάτι που φαίνεται χαρακτηριστικά και στο σχήμα 2.8 .

Ένα άλλο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας ανά μονάδα μάζας. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πολύ σημαντικό, τόσο για σταθερές, όσο και για κινητές εφαρμογές (ηλεκτρικό αυτοκίνητο, ηλιακό αεροπλάνο, κ.τ.λ.). Η πυκνότητα της ενέργειας είναι μια παράμετρος, που περιγράφει πόση ενέργεια μπορεί να αποδοθεί από ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα μάζας του ίδιου του συστήματος. Μονάδα μέτρησης της πυκνότητας της ενέργειας είναι η Wh/kg.

2.4.1 Πυκνότητα ενέργειας κυψέλης αναστρέψιμης λειτουργίας

Η πυκνότητα ενέργειας των κυψελών αναστρέψιμης λειτουργίας είναι θεωρητικά πολύ υψηλή και υπολογίζεται ως ποσό της παραγόμενης ενέργειας κατά τη φάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προς το συνολικό της βάρος. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της κυψέλης αναστρέψιμης λειτουργίας δίνεται από τη σχέση:

$$Ε \acute{\nu}εργεια \acute{ε}ξόδου (E_o) = nV_d I_d t_d \quad (2.1)$$

Όπου,

V_d : η τάση εξόδου ενός κελιού, σε volts

I_d : η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου, σε amps

n : ο αριθμός των κελιών της συστοιχίας της κυψέλης

t_d : ο χρόνος λειτουργίας στη φάση παραγωγής, σε ώρες.

Εάν θεωρηθεί ότι όλο το βάρος της κυψέλης οφείλεται μόνο στα αντιδρώντα αέρια (οξυγόνο και υδρογόνο), η πυκνότητα της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$Πυκνότητα \acute{ε}νέργειας = \frac{Ε \acute{\nu}εργεια \acute{ε}ξόδου}{Μάζα \acute{ν}τιδρόντων} = \frac{nV_d I_d t_d}{M_w} \quad (2.2)$$

Όπου,

M_w η μάζα σε kg του υδρογόνου και του οξυγόνου, που έχουν παραχθεί από το νερό.

Από το νόμο του Faraday έχουμε:

$$\frac{nV_d I_d t_d}{M_w} = \frac{2976,2 \text{ κελιά} * \text{Ampere} * \text{ώρες}}{\text{kg } H_2O} \quad (2.3)$$

Από τις σχέσεις (2.1) και (2.2) προκύπτει η θεωρητική μέγιστη πυκνότητα ενέργειας, για οποιαδήποτε τιμή της τάσης εξόδου:

$$\text{Πυκνότητα ενέργειας} = \frac{2976,2V_d, Wh}{kg H_2O} \quad (2.4)$$

Σε μία ιδανική κυψέλη αναστρέψιμης λειτουργίας, όπου η τάση εξόδου κάθε κελιού είναι 1,23V, η θεωρητική πυκνότητα της ενέργειας ανά κελί είναι 3660 Wh/kg, η οποία σε αρκετές περιπτώσεις είναι μεγαλύτερη από τη θεωρητική πυκνότητα ενέργειας των μέχρι τώρα γνωστών συστημάτων συσσωρευτών. Στην πράξη το βάρος μιας κυψέλης αναστρέψιμης λειτουργίας περιλαμβάνει και άλλα βάρη εκτός των αντιδρώντων αερίων. Η πυκνότητα σε ένα πραγματικό σύστημα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{Πυκνότητα ενέργειας} = \frac{\text{Ενέργεια εξόδου}}{\text{Συνολικό βάρος συστήματος}} = \frac{2676,2V_d M_w, Wh}{M_w + \text{Λοιπά ΒΒάρ, Kg}} \quad (2.5)$$

Τα λοιπά βάρη μιας κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας είναι το βάρος των δοχείων αποθήκευσης του υδρογόνου και του οξυγόνου, το βάρος της συστοιχίας, το βάρος του δοχείου αποθήκευσης του νερού και το βάρος των βοηθητικών συσκευών. Επομένως, η σχέση (2.5) γίνεται:

$$\text{Πυκνότητα ενέργειας} = \frac{2676,2V_d, Wh}{1 + \frac{T_w}{M_w} + \frac{S_w}{M_w} + \frac{W_w}{M_w} + \frac{A_w}{M_w}} \quad (2.6)$$

Όπου,

T_w : το καθαρό βάρος των δοχείων αποθήκευσης των αερίων, σε kg

S_w : το καθαρό βάρος της συστοιχίας της κυψέλης, σε kg

W_w : το καθαρό βάρος του δοχείου αποθήκευσης του νερού, σε kg

A_w : το καθαρό βάρος των βοηθητικών συσκευών, σε kg.

Βάρος δοχείων αποθήκευσης αερίων (H_2 , O_2)

Το βάρος των δοχείων αποθήκευσης των αερίων είναι συνάρτηση της πίεσης και του όγκου τους. Ο λόγος του καθαρού βάρους των δοχείων αποθήκευσης των αερίων προς τη μάζα των αερίων (H_2 , O_2), που έχουν παραχθεί από το νερό, δηλαδή ο λόγος T_w/M_w που περιέχεται στη σχέση (2.6) δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{T_w}{M_w} = k R T \quad (2.7)$$

Όπου,

k : συντελεστής που εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοχείου και από τα γραμμομόρια του νερού από το οποίο παρήχθησαν τα αέρια,

R : η σταθερά των ιδανικών αερίων = $84,78 \frac{(kg \cdot cm^3)}{cm^2 \cdot gmol \cdot K^\circ}$ και

T : η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin.

Βάρος συστοιχίας κελίων

Το βάρος της συστοιχίας των κελίων της κυψέλης εξαρτάται άμεσα από την τιμή της ισχύος που παράγεται από τη συστοιχία. Το μέγεθος και ο αριθμός των κελίων είναι γενικά ανάλογα με την τιμή της παραγόμενης ισχύος από τη συστοιχία. Επομένως, το βάρος της συστοιχίας των κελίων μπορεί να αποδοθεί από τη σχέση:

$$S_w = \frac{\text{Ισχύς συστοιχίας (watt)}}{\text{Πυκνότητα ισχύος (watt / kg)}} = \frac{nV_d I_d}{\text{πυκνότητα ισχύος}} \quad (kg) \quad (2.8)$$

Πολλαπλασιάζοντας αριθμητή και παρανομαστή με το χρόνο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας t_d , η σχέση (2.8) γίνεται:

$$S_w = \frac{nV_d I_d t_d}{t_d * \text{Πυκνότητα ισχύος}} \quad (kg) \quad (2.9)$$

Επομένως,

$$S_w = \frac{2976,2V_d M_w}{t_d * \text{Πυκνότητα ισχύος}} \quad (kg) \quad (2.10)$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη της (2.10) με M_w , ο όρος S_w/M_w της σχέσης (2.10) γίνεται:

$$\frac{S_w}{M_w} = \frac{2976,2V_d}{t_d * \text{Πυκνότητα ισχύος}} \quad (2.11)$$

Η πυκνότητα ισχύος της συστοιχίας των κελίων είναι συνάρτηση της τάσης εξόδου των κελίων V_d :

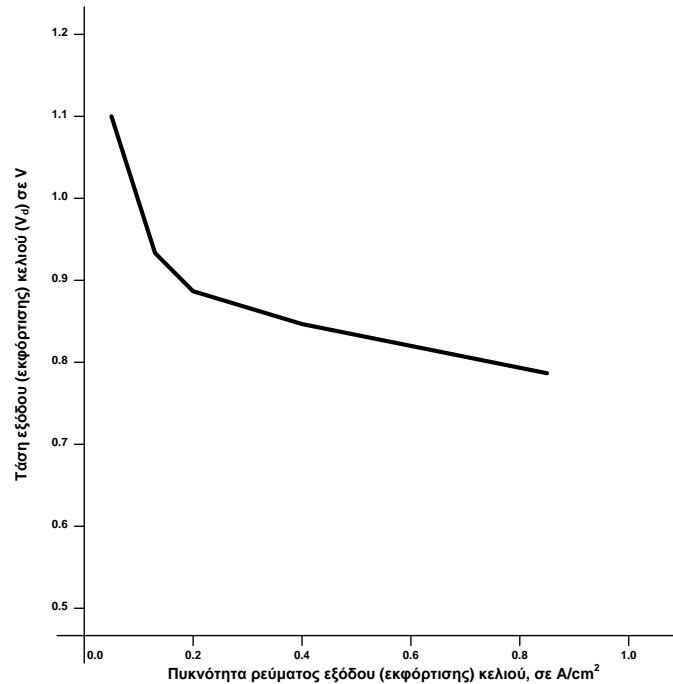
$$\text{Πυκνότητα ισχύος} = \frac{\text{Ισχύς εξόδου}}{S_w} = \frac{nV_d i_d A_c}{S_w} = \frac{V_d i_d A_r}{S_w} \quad (2.12)$$

Όπου,

i_d : η πυκνότητα του ρεύματος εξόδου (A/cm^2),

A_c : το εμβαδό κελιού (cm^2),
 A_t : το συνολικό εμβαδό κελιών (cm^2).

Η πυκνότητα του ρεύματος κάθε κελιού μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της τάσης εξόδου του V_d ($i_d = f(V_d)$), με βάση την αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη που φαίνεται στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος εξόδου κελιού.

Ο λόγος της συνολικής επιφάνειας προς το βάρος της συστοιχίας, πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί σταθερός:

$$\frac{A_t}{S_w} = K_a \quad (2.13)$$

Από τις σχέσεις (2.13) και (2.12), προκύπτει για την πυκνότητα ισχύος η παρακάτω σχέση:

$$\text{Πυκνότητα ισχύος} = V_d i_d K_a \quad (2.14)$$

Οπότε, η σχέση (2.11) γίνεται:

$$\frac{S_w}{M_w} = \frac{2976,2 V_d}{K_a t_d i_d} \quad (2.15)$$

Βάρος δοχείου αποθήκευσης νερού

Το βάρος του δοχείου αποθήκευσης του νερού είναι ανάλογο με τον όγκο και την πίεση του αποθηκευμένου νερού:

$$W_w = \frac{V_w P_{w,\max}}{k_w} \quad (2.16)$$

Όπου,

V_w : ο όγκος του αποθηκευμένου νερού, σε cm^3 ,

$P_{w,\max}$: η μέγιστη πίεση λειτουργίας του αποθηκευμένου νερού, σε kg/cm^2 ,

k_w : συντελεστής που εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία του δοχείου .

Επειδή το νερό είναι σχετικά ασυμπίεστο, ο όγκος του είναι ανάλογος με το βάρος του :

$$V_w = k_v \frac{M_w}{\rho} \quad (2.17)$$

Όπου,

ρ : η πυκνότητα του νερού $\left(= 0,001 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \right)$,

k_v : ο συντελεστής πληρότητας του δοχείου αποθήκευσης του νερού.

Από τις σχέσεις (2.13) και (2.14) έχουμε:

$$W_w = \frac{k_v \frac{M_w}{\rho} P_{w,\max}}{k_w} = \frac{k_v M_w P_{w,\max}}{\rho k_w} \quad (2.18)$$

Οπότε, ο παράγοντας W_w/M_w της σχέσης (2.6) γίνεται:

$$\frac{W_w}{M_w} = \frac{k_v}{\rho k_w} P_{w,\max} = c_w P_{w,\max} \quad (2.19)$$

Βάρος βοηθητικών συσκευών

Το βάρος των βοηθητικών συσκευών στις εφαρμογές των κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας, εμπειρικά κυμαίνεται μεταξύ του 65% και του 70% του βάρους M_w . Οπότε μπορεί να ληφθεί μια μέση τιμή:

$$\frac{A_w}{M_w} = 0,675 \quad (2.20)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.7) , (2.15) , (2.19) και (2.20) στη (2.6), προκύπτει για την πυκνότητα ενέργειας της κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας:

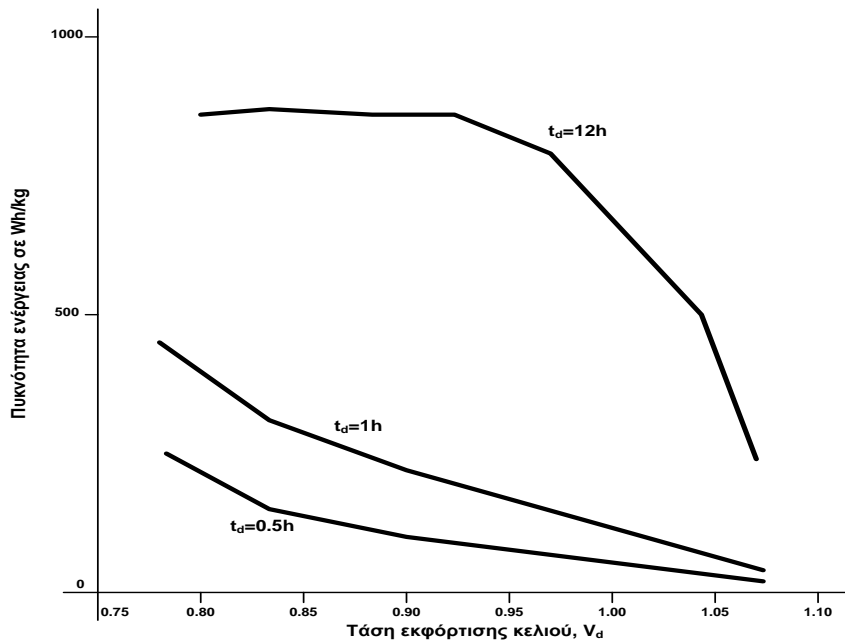
$$\text{Πυκνότητα ισχύος} = \frac{2676,2V_d}{1 + kRT + \frac{2976,2}{k_a t_d i_d} + c_w P_{w,\max} + 0,675} \quad (2.21)$$

Από τη σχέση (2.21) προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

1. Η θερμοκρασία των δοχείων αποθήκευσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη, επειδή τα αντιδρώντα αέρια έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα σε χαμηλή θερμοκρασία. Αυτό επιτρέπει τη χρησιμοποίηση μικρότερων σε όγκο και βάρος δοχείων αποθήκευσης.
2. Η τάση εξόδου της κυψέλης αναστρέψιμης λειτουργίας είναι καθοριστικός παράγοντας για την πυκνότητα της ενέργειας και πρέπει να είναι η βέλτιστη, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το βάρος της.
3. Η πυκνότητα της ενέργειας αυξάνεται, όσο επιμηκύνεται ο χρόνος εκφόρτισης.

2.4.2 Βελτιστοποίηση της πυκνότητας της ενέργειας

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται η επίδραση του χρόνου εκφόρτισης (παραγωγής ισχύος) στην πυκνότητα ενέργειας μιας κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας. Γίνεται φανερό ότι ο μεγαλύτερος χρόνος εκφόρτισης έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας. Αυτό γίνεται γιατί για μια δεδομένη χωρητικότητα ενέργειας, ο μικρός χρόνος εκφόρτισης είναι αποτέλεσμα υψηλής ονομαστικής τιμής ισχύος, η οποία απαιτεί μεγαλύτερη συστοιχία κελιών. Για δεδομένο χρόνο εκφόρτισης, η πυκνότητα ενέργειας αυξάνει όταν η τιμή της ισχύος κάθε κελιού αυξάνει, επειδή απαιτούνται λιγότερα κελιά. Καθώς η τιμή της ισχύος κάθε κελιού αυξάνεται, η τάση εκφόρτισης (εξόδου) μειώνεται. Οι χαρακτηριστικές πυκνότητας ενέργειας – τάσης εξόδου που φαίνονται στο σχήμα 2.10, αναφέρονται σε θερμοκρασία $T = 216 \text{ K}^\circ$, σε λόγο συνολικής επιφάνειας προς βάρος συστοιχίας $K_a = 1200 \text{ cm}^2/\text{kg}$, σε μέγιστη πίεση λειτουργίας αποθηκευμένου νερού $P_w = 28 \text{ kg/cm}^2$ και για V-I χαρακτηριστική όπως αυτή του σχήματος 2.10 .



Σχήμα 2.10: Επίδραση του χρόνου t_d στην πυκνότητα ενέργειας της κυψέλης καυσίμου.

2.4.3 Βαθμός απόδοσης κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας

Ο βαθμός απόδοσης ενός συστήματος κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας αφορά στα σχετικά ποσά ενέργειας που απαιτούνται κατά τη φάση της φόρτισης (παραγωγής υδρογόνου) και κατά τη φάση της εκφόρτισης (παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος). Τα ποσά των αντιδρώντων που χρησιμοποιούνται κατά τη φάση της φόρτισης πρέπει να είναι τα ίδια με αυτά κατά τη φάση της εκφόρτισης. Επομένως,

$$n_c I_c t_c = n_d I_d t_d \quad (2.22)$$

Όπου,

n_d : ο αριθμός των κελιών που χρησιμοποιούνται κατά την εκφόρτιση

n_c : ο αριθμός των κελιών που χρησιμοποιούνται κατά τη φόρτιση

I_c : η μέση τιμή του ρεύματος φόρτισης, σε A

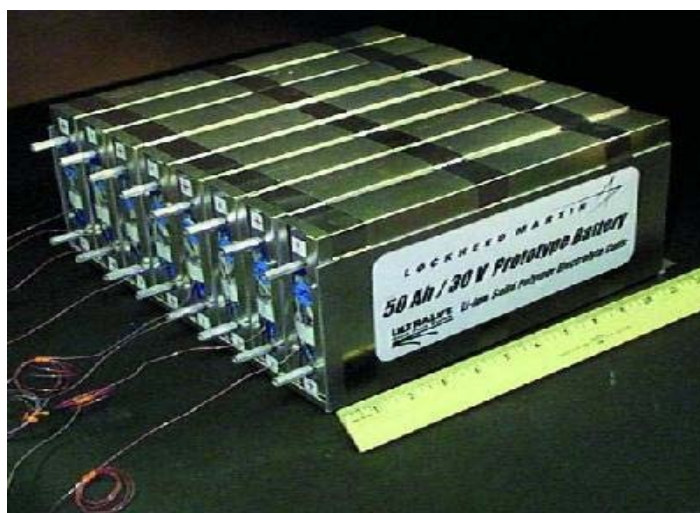
t_c : ο χρόνος φόρτισης, σε ώρες .

Ο βαθμός απόδοσης, με βάση τα παραπάνω είναι:

$$n = \frac{\text{Ενέργεια εξόδου}}{\text{Ενέργεια εισόδου}} = \frac{V_d n_d I_d t_d}{V_c n_c I_c t_c} = \frac{V_d}{V_c} \quad (2.23)$$

2.5 Συσσωρευτές Λιθίου - Ιόντων Πολυμερών.

Οι συσσωρευτές Λιθίου – Ιόντων Πολυμερών (Li-poly, Li-Pol, LiPo, LIP, PLI, LiP) είναι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές που συνήθως αποτελούνται από αρκετές πανομοιότυπες μονάδες δευτερευουσών κυψελών συνδεδεμένων παράλληλα ώστε να αυξηθεί η ανοχή τους στο ρεύμα αποφόρτισης. Παρακάτω φαίνεται ένας τέτοιος συσσωρευτής που αποτελείται από οχτώ παράλληλες κυψέλες[6].



Εικόνα 2.1: Πρωτότυπος συσσωρευτής Λιθίου-Ιόντων Πολυμερών.

Οι συσσωρευτές αυτού του τύπου εξελίχθηκαν τεχνολογικά από τους συσσωρευτές Λιθίου – Ιόντων. Η βελτιστοποίηση οφείλεται στο ότι το άλας λιθίου που χρησιμεύει σαν ηλεκτρολύτης δεν κρατιέται σε έναν οργανικό διαλύτη όπως στην κατηγορία των συσσωρευτών λιθίου – ιόντων, αλλά σε ένα στερεό πολυμερές σύνθετο όπως το οξείδιο του πολυαιθυλενίου ή το πολυακρilonιτρίλιο. Το μόνο πρόβλημα με αυτή τη σχεδίαση είναι ότι λειτουργεί μόνο αν θερμανθεί πάνω από 50°-60°C. Ο συσσωρευτής που είναι αυτή τη στιγμή ευρέως διαθέσιμος είναι ένα υβριδικό σχέδιο που συνδυάζει τις ανωτέρω τεχνολογίες. Ο εύφλεκτος ηλεκτρολύτης είναι ακόμα παρόν, αλλά συγκρατείται μέσα στο πολυμερές. Τα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών λιθίου – ιόντων πολυμερών, σε σύγκριση με τους συσσωρευτές λιθίου – ιόντων είναι το χαμηλότερο κόστος κατασκευής και η μεγαλύτερη αντοχή σε φυσικές φθορές. Οι συσσωρευτές λιθίου – ιόντων πολυμερών πρωτοχρησιμοποιήθηκαν σε καταναλωτικές ηλεκτρονικές συσκευές γύρω στο 1996.

2.5.1 Τεχνολογία

Οι κυψέλες που πωλούνται σήμερα ως συσσωρευτές πολυμερών έχουν διαφορετική σχεδίαση από τις παλαιότερες κυψέλες λιθίου – ιόντων. Αντίθετα με τις κυλινδρικές ή πρισματικές κυψέλες των συσσωρευτών λιθίου – ιόντων που έχουν ένα άκαμπτο μεταλλικό κάλυμμα, οι κυψέλες πολυμερών έχουν ένα εύκαμπτο κάλυμμα από ελάσματα πολυμερών, αλλά ακόμα περιέχουν οργανικούς διαλύτες. Η κύρια διαφορά μεταξύ των εμπορικών

κυψελών πολυμερών και των κυψελών λιθίου-ιόντων είναι ότι στις τελευταίες το άκαμπτο κάλυμμα πιέζει μεταξύ τους τα ηλεκτρόδια και το διαχωριστικό, ενώ στις κυψέλες πολυμερών αυτή η εξωτερική πίεση δεν είναι απαραίτητη, διότι τα φύλλα των ηλεκτροδίων και τα φύλλα του διαχωριστικού τοποθετούνται σε επάλληλες στρώσεις το ένα πάνω στο άλλο. Δεδομένου ότι δεν απαιτείται μεταλλικό περίβλημα των κυψελών, ο συσσωρευτής μπορεί να είναι ελαφρύτερος και μπορεί να διαμορφωθεί ειδικά για να ταιριάζει στην συσκευή που θα τροφοδοτεί. Λόγω της πυκνότερης συσκευασίας χωρίς κενούς χώρους ανάμεσα στις κυλινδρικές κυψέλες (όπως στην περίπτωση των συσσωρευτών λιθίου – ιόντων) και την έλλειψη μεταλλικού καλύμματος, η ενεργειακή πυκνότητα των συσσωρευτών λιθίου – ιόντων πολυμερών είναι πάνω από 20% υψηλότερη από αυτή των κλασικών συσσωρευτών λιθίου – ιόντων.

Η τάση των κυψελών Li-poly κυμαίνεται από περίπου 2,7 V (σε ξεφορτισμένη κατάσταση) σε περίπου 4,23 V (σε πλήρως φορτισμένη κατάσταση), και οι κυψέλες Li-poly πρέπει να προστατεύονται από υπερφόρτωση θέτοντας όριο στην τάση φόρτισης που δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 4,235 V ανά κυψέλη που χρησιμοποιείται σε σύνδεση σειράς. Υπερφορτίζοντας έναν συσσωρευτή Li-poly θα μπορούσε να οδηγήσει σε έκρηξη και / ή πυρκαγιά. Κατά τη διάρκεια αποφόρτισης στο φορτίο, το φορτίο πρέπει να αφαιρεθεί το συντομότερο όταν η τάση πέσει κάτω από περίπου 3,0 V ανά κυψέλη (που χρησιμοποιείται σε σύνδεση σειράς), ή αλλιώς ο συσσωρευτής στο μέλλον δεν θα μπορεί να φορτιστεί πλήρως και ίσως υπάρξουν προβλήματα στο να διατηρεί την τάση υπό φορτίο.

Από την αρχή στην ανάπτυξή της, η τεχνολογία λιθίου πολυμερούς είχε προβλήματα με την εσωτερική αντίσταση. Άλλες προκλήσεις που έπρεπε να αντιμετωπιστούν ήταν οι μεγαλύτεροι χρόνοι φόρτισης και ο μικρότερος ρυθμός μέγιστης αποφόρτισης, σε σύγκριση με τις πιο τεχνολογικά ώριμες αντίστοιχες τεχνολογίες. Οι συσσωρευτές Li-poly συνήθως απαιτούν περισσότερο από μία ώρα για μια πλήρη φόρτιση. Οι πρόσφατες βελτιώσεις του σχεδιασμού έχουν συμβάλει στην αύξηση του μέγιστου ρεύματος αποφόρτισης από 2 έως και 30 φορές την χωρητικότητα της κυψέλης (ρυθμός αποφόρτισης σε amps, χωρητικότητα κυψέλης σε amp-hours). Τον Δεκέμβριο του 2007 η Toshiba ανακοίνωσε ένα νέο σχεδιασμό που προσφέρει πολύ ταχύτερο ρυθμό φόρτισης (περίπου 5 λεπτά για να φθάσει το 90%). Σε σύγκριση με τον συσσωρευτή ιόντων λιθίου, ο συσσωρευτής Li-poly έχει μεγαλύτερο κύκλο ζωής. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, οι κατασκευαστές διαβεβαιώνουν για πάνω από 500 κύκλους φόρτισης - αποφόρτισης μέχρι η χωρητικότητα του συσσωρευτή πέσει κάτω του 80%. (βλέπε Sanyo). Μια άλλη παραλλαγή των κυψελών Li-Poly, το “thin film rechargeable lithium battery”, έχει αποδειχθεί ότι παρέχει πάνω από 10.000 κύκλους.

2.5.2 Τεχνικές προδιαγραφές

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν δύο εμπορικές τεχνολογίες, που ανήκουν στην κατηγορία κυψελών «λιθίου – ιόντων πολυμερών» (όπου το πολυμερές χρησιμεύει σαν πολυμερής

ηλεκτρολύτης/διαχωριστής). Αυτές οι κυψέλες γενικά αναφέρονται σαν συσσωρευτές πολυμερούς ηλεκτρολύτη.

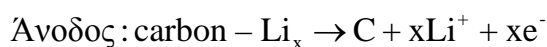
Ο συσσωρευτής έχει κατασκευαστεί ως:

Κάθοδος: LiCoO_2 ή LiMnO_4

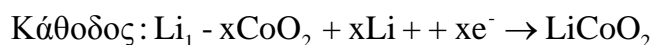
Διαχωριστής: Αγωγίμος ηλεκτρολύτης πολυμερών

Άνοδος: Li ή carbon-Li συνδυασμένα

Τυπική αντίδραση:



Διαχωριστής : $\text{Li} + \text{conduction}$



Πολυμερείς ηλεκτρολύτες / διαχωριστές μπορεί να είναι στερεά πολυμερή (π.χ., polyethyleneoxide, PEO) συν το LiPF_6 , ή άλλα αγωγίμα άλατα συν το SiO_2 , ή άλλα υλικά πληρώσεως για καλύτερες μηχανικές ιδιότητες (όμως τέτοια συστήματα δεν είναι διαθέσιμα στο εμπόριο ακόμη). Ορισμένοι κατασκευαστές όπως η Avestor (αφότου συγχωνεύθηκε με την Batscap) χρησιμοποιούν μεταλλικό Li ως άνοδο (αυτοί είναι οι συσσωρευτές λιθίου - μετάλλου - πολυμερούς), ενώ άλλοι θέλουν να συνεχίσουν με την αποδεδειγμένα ασφαλή ανόδο με την παρεμβολή άνθρακα.

Αυτή τη στιγμή και οι δύο εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες κάνουν χρήση του PVdF (ένα πολυμερές) μαζί με συμβατικούς διαλύτες και άλατα, όπως EC/DMC/DEC. Η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνολογιών είναι ότι η πρώτη (Bellcore / Telcordia) κάνει χρήση του LiMn_2O_4 στην κάθοδο, και η άλλη, η πιο συμβατική, χρησιμοποιεί το LiCoO_2 . Άλλες, πιο εξωτικές (αν και μη εμπορικά διαθέσιμες αυτή τη στιγμή) συσσωρευτές Li-poly, χρησιμοποιούν κάθοδο από πολυμερές. Για παράδειγμα, η Moltech αναπτύσσει έναν συσσωρευτή με πλαστική κάθοδο από άνθρακα και θείο. Ωστόσο, από το 2005 και αυτή η τεχνολογία φαίνεται να αντιμετωπίζει προβλήματα με την αυτό-αποφόρτιση και το κόστος κατασκευής.

Ωστόσο, μια άλλη πρόταση για την κατασκευή της καθόδου είναι η χρήση οργανικών σύνθετων με βάση το θείο σε συνδυασμό με ένα ηλεκτρικά αγωγίμο πολυμερές, όπως το polyaniline. Αυτή η προσέγγιση υπόσχεται υψηλή ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ., μικρή εσωτερική αντίσταση) και υψηλή ικανότητα αποφόρτισης, αλλά έχει προβλήματα με τους κύκλους λειτουργίας της και το κόστος.

2.5.3 Παράταση του χρόνου ζωής των κυψελών

Τα αναλογικά μπροστινά άκρα που ισορροπούν την κυψέλη και εξαλείφουν τις αναντιστοιχίες των κυψελών σε σειρά ή παράλληλα βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του συσσωρευτή και αυξάνουν τη συνολική χωρητικότητα του συνδυασμού των κυψελών. Καθώς ο αριθμός των κυψελών και το ρεύμα φορτίου αυξάνονται, η πιθανότητα για αναντιστοιχία επίσης αυξάνει. Υπάρχουν δύο είδη αναντιστοιχίας σε ένα συνδυασμό κυψελών: State-of-Charge (SOC) και capacity/energy (C/E) αναντιστοιχία. Αν και η αναντιστοιχία SOC είναι πιο συχνή, κάθε πρόβλημα περιορίζει την χωρητικότητα (mAh) του συνδυασμού των κυψελών σε αυτή των πιο αδύναμων κυψελών. Ένας συσσωρευτής θεωρείται ισορροπημένος όταν όλες οι κυψέλες που αποτελούν τον συσσωρευτή πληρούν τις ακόλουθες δύο προϋποθέσεις:

- Αν όλες οι κυψέλες έχουν την ίδια χωρητικότητα, τότε είναι ισορροπημένες, εφόσον έχουν το ίδιο σχετικό SOC. Στην περίπτωση αυτή, το ανοικτό κύκλωμα τάσης (Open circuit voltage, OCV) είναι ένα καλό μέτρο του SOC. Εάν, σε έναν εκτός ισορροπίας συσσωρευτή, όλες οι κυψέλες μπορούν να φορτίζονται διαφορετικά στην πλήρη χωρητικότητα (ισορροπημένη), τότε θα λειτουργούν κανονικά στους κύκλους λειτουργίας του συσσωρευτή χωρίς περεταίρω προσαρμογές.
- Αν οι κυψέλες έχουν διαφορετικές χωρητικότητες, θεωρούνται επίσης ισορροπημένες όταν το SOC είναι το ίδιο. Αλλά, δεδομένου ότι το SOC είναι ένα σχετικό μέτρο, το απόλυτο ποσό της χωρητικότητας για κάθε κυψέλη είναι διαφορετικό. Για να διατηρήσετε τις κυψέλες με διαφορετική χωρητικότητα στο ίδιο SOC, η εξισορρόπηση των κυψελών θα πρέπει να παρέχει διαφορετικής τιμής ρεύματα στις κυψέλες σε συνδυασμό σειράς, τόσο κατά τη διάρκεια της φόρτισης όσο και κατά την αποφόρτιση σε κάθε κύκλο.

2.5.4 Χωρητικότητα

Η χωρητικότητα των κυψελών μετριέται σε αμπερώρια (Ah) ή μιλιαμπερώρια (mAh). Ένας συσσωρευτής 1000 mAh είναι η ίδια με ένα συσσωρευτή 1 Ah, και στις δύο περιπτώσεις θα λάβω 1 Amp για 1 ώρα. Η βαθμολόγηση C που συνήθως συνδέεται με συσσωρευτές λιθίου - ιόντων αναφέρεται στη μέγιστη ένταση ρεύματος στο φορτίο ως πολλαπλάσιο της χωρητικότητας της κυψέλης, π.χ. ένας συσσωρευτής 1Ah, 20C πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει 20 A συνεχώς χωρίς να καταστραφεί. Ένας χρήσιμος τρόπος για να υπολογίσεις το πόσο χρόνο θα διαρκέσει ένας συσσωρευτής υπό βαρύ φορτίο, είναι να πολλαπλασιάσεις τα Ah χωρητικότητας με 60 για να τα μετατρέψεις σε Ampere-minutes, έτσι ένας συσσωρευτής 1Ah γίνεται συσσωρευτής 60Ampere-minutes και ύστερα απλά διαίρεσε με το μέσο ρεύμα φορτίου, π.χ. ένα μέσο ρεύμα φορτίου 10A θα σήμαινε ότι ένας συσσωρευτής των 60 Ampere-minutes θα διαρκέσει για $60 / 10 = 6$ λεπτά. Ένα αμπερώριο είναι ίσο με 3600 Coulomb, η τυπική μονάδα στο SI για το ηλεκτρικό φορτίο. Το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται εξαρτάται από την τάση, και είναι ίση με την τάση * το φορτίο

σε Coulomb, ή $3600 \cdot$ την τάση \cdot το φορτίο σε αμπερώρια. Έτσι, ένας συσσωρευτής 10Ah με ονομαστική τάση 10V θα αποδώσει 36.000 Coulomb φορτίου (ή $2,2 \cdot 10^{23}$ ηλεκτρόνια), και 360 kJ ενέργειας ($360 \text{ kJ} = 100 \text{ Wh}$).

2.5.5 Φόρτιση

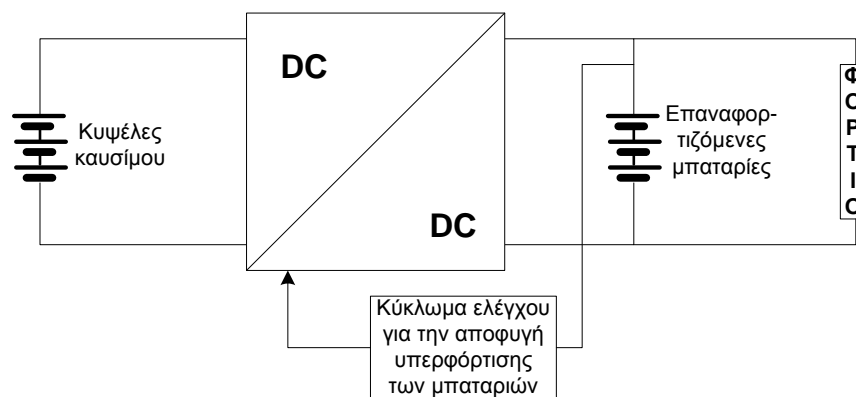
Οι συσσωρευτές Li-poly πρέπει να φορτίζονται με προσοχή. Η βασική διαδικασία είναι να φορτιστούν με σταθερό ρεύμα (1C έως 5C, ανάλογα με τον κατασκευαστή) μέχρι η κάθε κυψέλη να φθάσει 4,2V, ο φορτιστή τότε πρέπει να μειώσει σταδιακά το ρεύμα φόρτισης ενώ κρατάει την τάση των κυψελών στα 4,2V μέχρι το ρεύμα φόρτισης να μειωθεί στο 10% του αρχικού ρυθμού φόρτισης, σημείο στο οποίο ο συσσωρευτής θεωρείται 100% φορτισμένος. Ισορροπημένη φόρτιση απλά σημαίνει ότι ο φορτιστής παρακολουθεί την τάση της κάθε κυψέλης σε έναν συσσωρευτή και μεταβάλλει την φόρτιση για κάθε κυψέλη χωριστά έτσι όλες οι κυψέλες να φτάσουν στην ίδια τάση. Η φόρτιση δεν πρέπει να περατωθεί όταν επιτευχθεί τάση 4,2V στις κυψέλες, επειδή η χωρητικότητα που θα έχει επιτευχθεί σε αυτό το σημείο θα είναι μόλις στο 70% της πλήρους χωρητικότητας. Η φόρτιση πρέπει να συνεχιστεί και κατά την διάρκεια μείωσης του ρεύματος φόρτισης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η βραδεία φόρτιση δεν είναι αποδεκτή για συσσωρευτές λιθίου, η χημεία Li-ion δεν μπορεί να δεχθεί μία υπερφόρτιση χωρίς να προκληθεί βλάβη στην κυψέλη. Οι περισσότεροι κατασκευαστές δίνουν μέγιστη και ελάχιστη τάση των 4,23V και 3,0V ανά κυψέλη. Το να οδηγήσεις μία κυψέλη εκτός αυτών των ορίων μπορεί να μειώσει την χωρητικότητα της κυψέλης και την ικανότητα της να αποδίδει το πλήρες ονομαστικό ρεύμα στο φορτίο. Οι περισσότεροι εξειδικευμένοι φορτιστές για συσσωρευτές Li-poly χρησιμοποιούν ένα χρονόμετρο φόρτισης για την ασφάλεια, αυτό σταματά την φόρτιση μετά από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (συνήθως 90 λεπτά).

2.6 Υβριδικά συστήματα

Η χρήση των συσσωρευτών σε συνδυασμό με μια κυψέλη καυσίμου μπορούν να μειώσουν το κόστος του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η ουσία μιας υβριδικής κυψέλης καυσίμου είναι ότι η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί πάντα στην μέγιστη ισχύ. Όταν οι συνολικές απαιτήσεις του συστήματος σε ισχύ είναι χαμηλές, η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε έναν επαναφορτιζόμενο συσσωρευτή ή έναν πυκνωτή. Όταν οι απαιτήσεις σε ισχύ υπερβούν αυτές που μπορεί να προσφέρει η κυψέλη καυσίμου, απορροφάται ενέργεια από τον συσσωρευτή ή τον πυκνωτή. Αυτό προ υποθέτει ότι οι απαιτήσεις σε ισχύ είναι αρκετά μεταβλητές, γιατί σε περιπτώσεις στις οποίες η ζήτηση ισχύος είναι αρκετά σταθερή το υβριδικό σύστημα κυψέλης καυσίμου και συσσωρευτών δεν προσφέρει κανένα σοβαρό πλεονέκτημα.

Ένα υβριδικό σύστημα φαίνεται στο σχήμα 2.11 και όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα ένας DC/DC μετατροπέας είναι απαραίτητος. Ένα τέτοιο σύστημα θα ήταν ιδιαίτερα

ελκυστικό για τα κινητά τηλέφωνα και θα ταίριαζε στις κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης, δεδομένου ότι η μέση ισχύ, και ως εκ τούτου η ισχύς των κυψελών καυσίμου, είναι τόσο χαμηλή. Θα μπορούσε να είναι πολύ εύκολο να ανεφοδιαστεί με μεθανόλη μια τόσο μικρή κυψέλη καυσίμου. Ο συσσωρευτής θα μπορούσε να είναι ο πρότυπος συσσωρευτής των κινητών τηλεφώνων, με την κυψέλη καυσίμου και τον ενσωματωμένο DC/DC μετατροπέα σε μια χωριστή μονάδα φόρτισης. Ένας φορητός υπολογιστής είναι επίσης, ένας άλλος πολύ πιθανός υποψήφιος για τέτοια συστήματα κυψελών καυσίμου/συσσωρευτών.

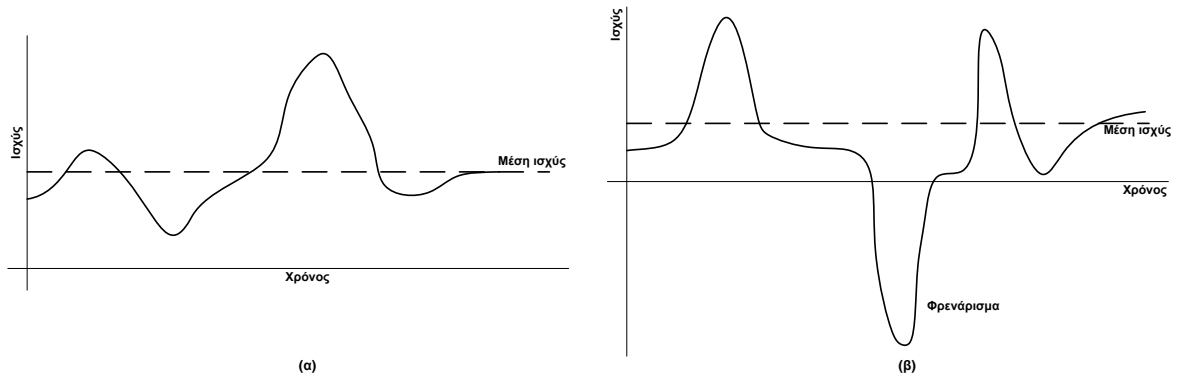


Σχήμα 2.11: Υβριδικό σύστημα κυψελών καυσίμου - συσσωρευτών

Σε μερικές περιπτώσεις τα μοντέλα για το σχεδιασμό τέτοιων υβριδικών συστημάτων είναι αρκετά καλά ανεπτυγμένα, επειδή έχουν χρησιμοποιηθεί ήδη για τα ηλιακά υβριδικά συστήματα. Συγκρίνοντας όμως τα ηλιακά υβριδικά συστήματα, με αυτά των κυψελών καυσίμου, τα τελευταία είναι πολύ πιο απλά, καθώς στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών εκτός από το φορτίο, είναι απρόβλεπτη και η παραγωγή της ενέργειας, κάτι που δεν συμβαίνει με τις κυψέλες καυσίμου. Τέτοια υβριδικά συστήματα, στα οποία η αιχμή ή η ισχύς του συσσωρευτή είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μέση ισχύ (και ως εκ τούτου την ισχύ των κυψελών καυσίμου), είναι μερικές φορές γνωστά ως "σκληρά" υβριδικά συστήματα. Σε αντίθεση, ένα "μαλακό" υβριδικό σύστημα είναι ένα στο οποίο η ισχύ των συσσωρευτών και η ενεργειακή αποθήκευση είναι αρκετά χαμηλές σε σχέση με την ισχύ των κυψελών καυσίμου. Τέτοια συστήματα συναντώνται συχνά σε οχήματα όπου η μέγιστη ισχύς και η μέση ισχύς δεν είναι τόσο διαφορετικές.

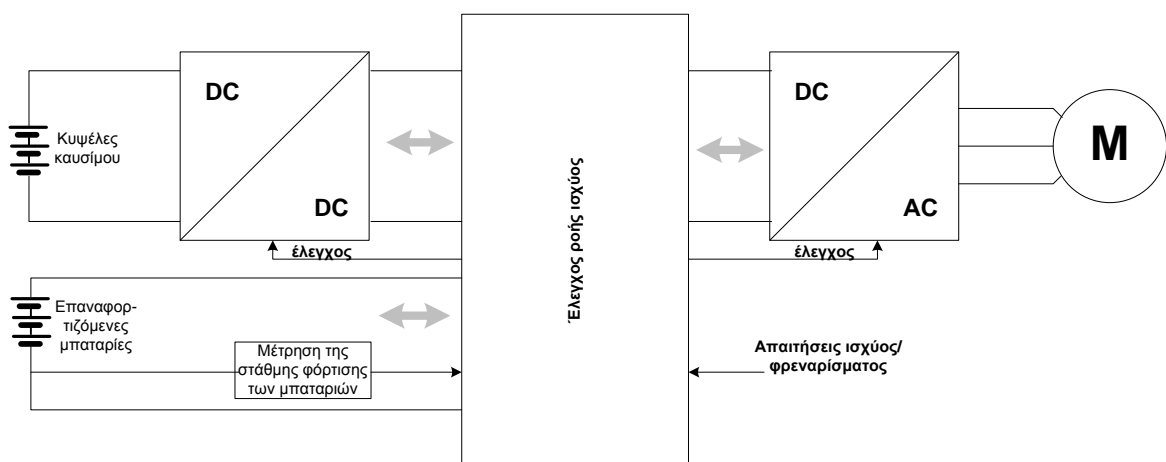
Μια γραφική παράσταση ισχύος/χρόνου φαίνεται στο σχήμα 2.12 (α). Η ισχύς των κυψελών καυσίμου είναι ικανοποιητική τις περισσότερες φορές, και ο συσσωρευτής μπορεί να δώσει την έξτρα ισχύ στην αιχμή του φορτίου και όταν η παραγωγή ισχύος πλεονάζει, ο συσσωρευτής επαναφορτίζεται. Αυτό το είδος της απαίτησης ισχύος είναι χαρακτηριστικό των αστικών ηλεκτρικών οχημάτων, όπου οι αιχμές αντιστοιχούν στις περιπτώσεις όπως η επιτάχυνση μετά τα φανάρια, όμως τις περισσότερες φορές το όχημα θα προχωρά αργά και σταθερά, ειδάλως θα είναι στάσιμο. Μια περαιτέρω δυνατότητα είναι απεικονισμένη στη γραφική παράσταση ισχύος/χρόνου του σχήματος (β). Εδώ ένα ηλεκτρικό όχημα

χρησιμοποιεί τη μηχανή για φρένο. Στο δυναμικό φρενάρισμα, η μηχανή χρησιμοποιείται όπως μια γεννήτρια, η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά έπειτα απλά περνά μέσω ενός αντιστάτη και μετατρέπεται σε θερμότητα. Στο αναπαραγωγικό φρενάρισμα, την ηλεκτρική ενέργεια την αποθηκεύουμε σε έναν επαναφορτιζόμενο συσσωρευτή, που χρησιμοποιείται αργότερα για να τρέξει τη μηχανή.



Σχήμα 2.12: Διάγραμμα ισχύος – χρόνου για υβριδικά συστήματα κυψελών καυσίμου - συσσωρευτών

Το αναπαραγωγικό φρενάρισμα είναι σαφώς η καλύτερη επιλογή αλλά προϋποθέτει ένα υβριδικό σύστημα με επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές. Ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα θα χρειαζόταν επίσης ένα αρκετά περίπλοκο σύστημα ελέγχου. Πρώτον, η ροή της ισχύος από την κυψέλη καυσίμου στον συσσωρευτή θα πρέπει να ελεγχθεί κατάλληλα, δεδομένου ότι η κατάσταση είναι πιο μεταβλητή, με μερικές φορές μόνο ένα μικρό ποσό ισχύος να πλεονάζει από την ισχύ των κυψελών καυσίμου. Δεύτερον, στην κανονική κατάσταση λειτουργίας οι συσσωρευτές θα πρέπει να μην είναι πλήρως φορτισμένες για να μπορούν να απορροφήσουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την μηχανή κατά το φρενάρισμά. Ο ελεγκτής της μηχανής θα πρέπει επίσης να είναι τύπου τεσσάρων τεταρτημορίων. Το σχήμα 2.13 παρουσιάζει ένα τέτοιο σύστημα.



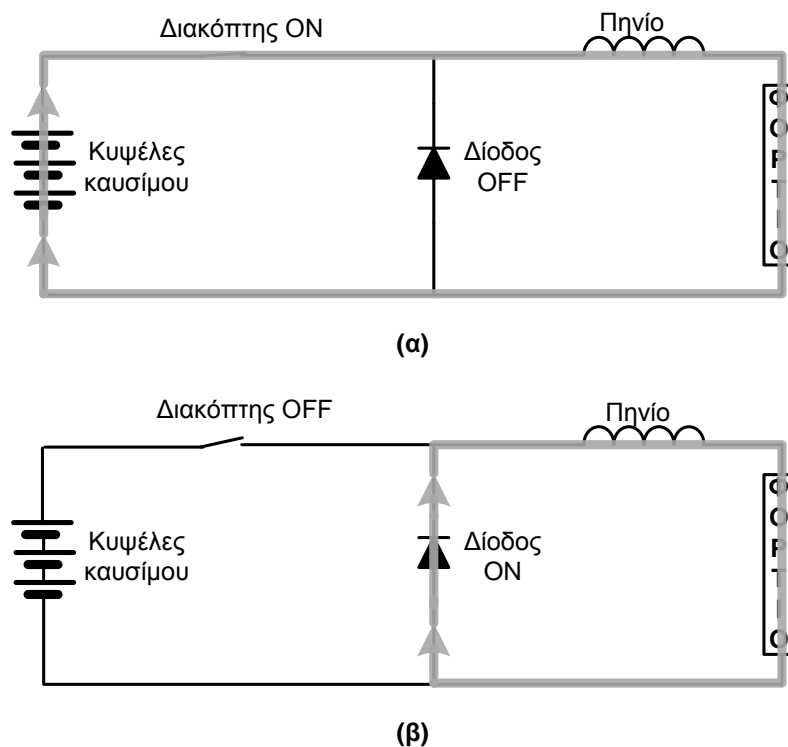
Σχήμα 2.13: Διάγραμμα υβριδικού συστήματος κυψελών καυσίμου - συσσωρευτών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

DC-DC μετατροπείς ισχύος

3.1 Μετατροπέας υποβιβασμού

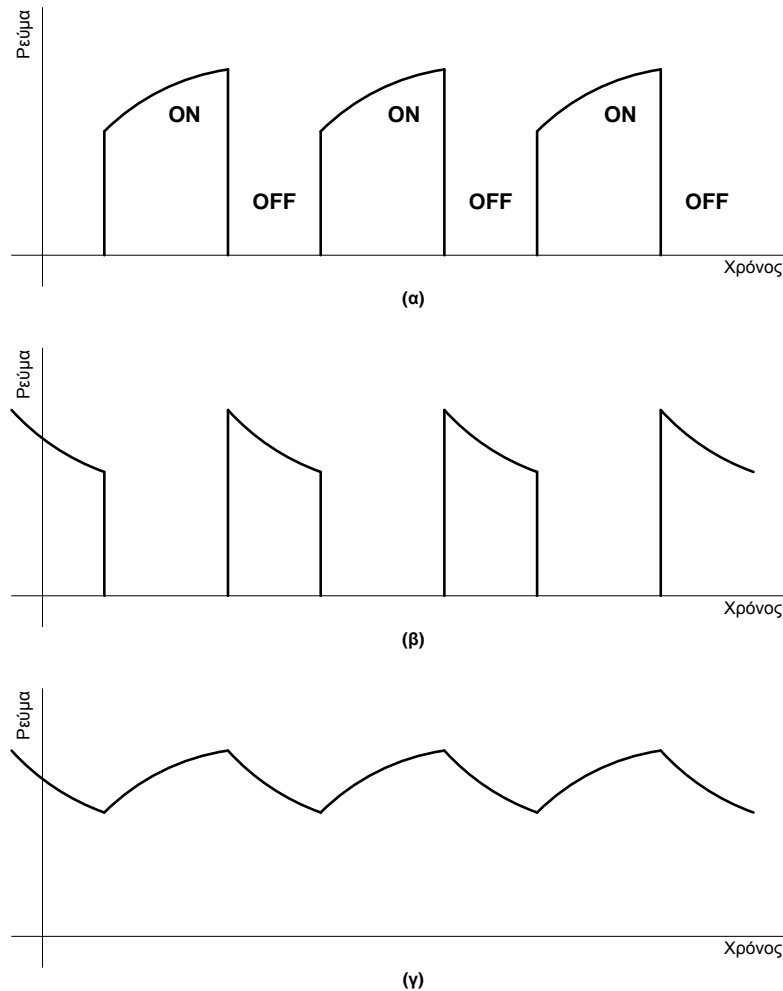
Το κύκλωμα ενός chopper (διακοπτικός μετατροπέας υποβιβασμού) φαίνεται στο σχήμα 3.1. Τα ουσιαστικά συστατικά του είναι ένας ηλεκτρονικός διακόπτης με ένα σχετικό κύκλωμα οδήγησης, μια δίοδος, και ένα πηνίο [1],[7].



Σχήμα 3.1: Κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα υποβιβασμού διακοπτικής λειτουργίας,
(α) Ροή του ρεύματος όταν ο ημιαγωγός διακόπτης είναι σε αγωγή,
(β) Ροή του ρεύματος όταν ο ημιαγωγός διακόπτης είναι εκτός αγωγής.

Στο πρώτο σχήμα (α) ο διακόπτης είναι ανοικτός, και το ρεύμα ρέει μέσω του πηνίου και του φορτίου. Το πηνίο παράγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη (emf), κάνοντας το ρεύμα να αυξηθεί βαθμιαία. Ο διακόπτης έπειτα κλείνει. Η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο διατηρεί την προηγούμενη ροή του ρεύματος μέσω του φορτίου χρησιμοποιώντας τη δίοδο,

όπως φαίνεται στο δεύτερο σχήμα (β). Τα διαφορετικά ρεύματα που ρέουν κατά τη διάρκεια κάθε μέρους αυτού του on-off κύκλου φαίνονται στο σχήμα 3.2. Η τάση στα άκρα του φορτίου μπορεί να εξομαλυνθεί χρησιμοποιώντας πυκνωτές εάν είναι απαραίτητο.



Σχήμα 3.2: (α) Ρεύμα που παρέχεται από την κυψέλη καυσίμου κατά την διάρκεια που άγει ο διακόπτης, (β) Ρεύμα που διαρρέει την δίοδο κατά την διάρκεια που ο διακόπτης είναι σε αποκοπή, (γ) Ρεύμα που διαρρέει το φορτίο.

Εάν υποθέσουμε τάση τροφοδοσίας V_1 , και οι χρόνοι αγωγής και αποκοπής του ηλεκτρονικού διακόπτη είναι t_{ON} και t_{OFF} , τότε η τάση εξόδου V_2 δίνεται από τον τύπο:

$$V_2 = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} V_1 \quad (3.1)$$

Είναι επίσης σαφές ότι η κυμάτωση εξαρτάται από τη συχνότητα, σε υψηλότερη συχνότητα, η κυμάτωση είναι μικρότερη. Εντούτοις, κάθε άνοιγμα και κλείσιμο του ημιαγωγού διακόπτη περιλαμβάνει την απώλεια κάποιας ενέργειας, έτσι η συχνότητα δεν πρέπει να είναι πάρα πολύ υψηλή. Ένα κύκλωμα ελέγχου απαιτείται για να ρυθμίσει το t_{ON} έτσι ώστε

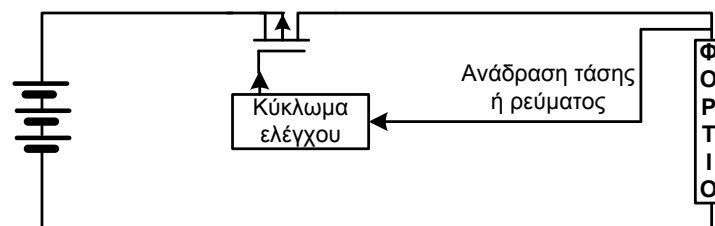
να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση εξόδου, τέτοια κυκλώματα είναι εύκολα διαθέσιμα από πολλούς κατασκευαστές.

Οι βασικές ενεργειακές απώλειες στον chopper είναι:

- Απώλειες μετατροπής στον ηλεκτρονικό διακόπτη,
- Απώλειες ισχύος που χάνεται στο διακόπτη ενώ ανοίγει ($0,6 * I$ για ένα IGBT ή $R_{DSON} * I_2$ για ένα MOSFET),
- Απώλειες ισχύος λόγω της αντίστασης του πηνίου,
- Απώλειες στη δίοδο, $0,6 * I$.

Στην πράξη όλες αυτές οι απώλειες μπορούν να περιοριστούν κατά μεγάλο ποσοστό. Η αποδοτικότητα ενός τέτοιου chopper πρέπει να είναι πάνω από 90%. Στα συστήματα υψηλής τάσης, πάνω από περίπου 100V, μπορούν να επιτευχθούν αποδοτικότητες μέχρι και 98%.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε εν συντομία το "γραμμικό" ρυθμιστή. Η βασική αρχή φαίνεται στο σχήμα 3.3.

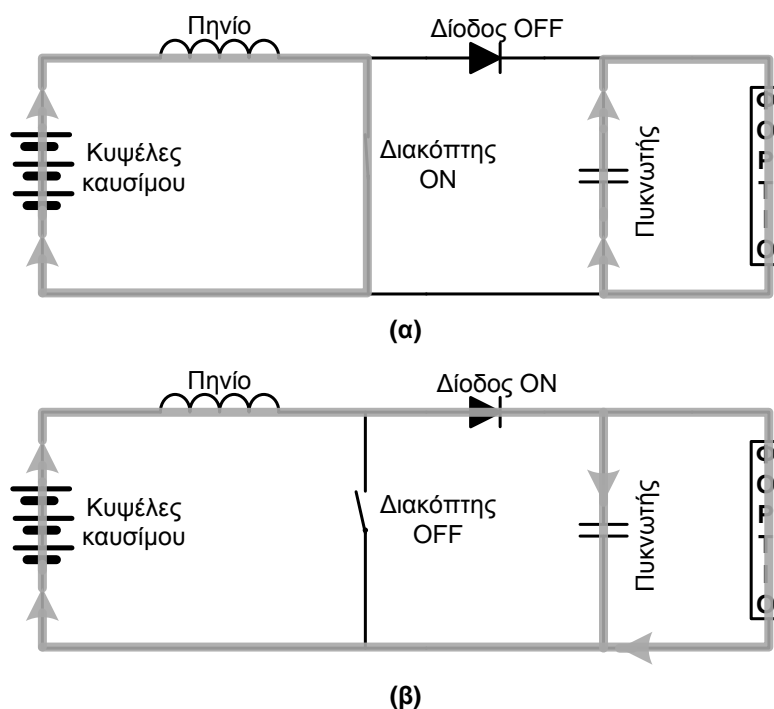


Σχήμα 3.3: Κύκλωμα γραμμικού ρυθμιστή.

Χρησιμοποιείται πάλι ένα τρανζίστορ, αλλά αυτή τη φορά δεν ανοίγει και κλείνει πλήρως. Η τάση της πύλης ρυθμίζεται έτσι ώστε η αντίστασή της στη παρούσα τιμή του ρεύματος να είναι τόση όση απαιτείται για να δημιουργήσει μια πτώση τάσης στην επιθυμητή τιμή. Αυτή η αντίσταση θα ποικίλει συνεχώς ανάλογα με το ρεύμα του φορτίου και την τάση εισόδου. Αυτός ο τύπος κυκλώματος χρησιμοποιείται ευρέως στα ηλεκτρονικά συστήματα, αλλά δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιηθεί με τις κυψέλες καυσίμου. Με το να μετατρέπει απλά την έξτρα τάση σε θερμότητα δεν μειώνει μόνο την τάση αλλά σπαταλά και ενέργεια. Οι κυψέλες καυσίμου θα χρησιμοποιηθούν πάντα όπου η αποδοτικότητα είναι ύψιστης σημασίας, και οι γραμμικοί ρυθμιστές δεν έχουν καμία θέση σε τέτοια συστήματα.

3.2 Μετατροπέας ανύψωσης.

Επειδή οι κυψέλες καυσίμου είναι ουσιαστικά συσκευές χαμηλής τάσης, είναι συχνά επιθυμητό να ενισχυθεί η τάση εξόδου. Αυτό μπορεί επίσης να γίνει, αρκετά απλά και αποτελεσματικά, χρησιμοποιώντας διακοπτικά κυκλώματα, με συνηθισμένο παράδειγμα αυτό του σχήματος 3.4 [1],[7].



Σχήμα 3.4: Κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα ανύψωσης διακοπτικής λειτουργίας,
(α) Ροή του ρεύματος όταν ο ημιαγωγός διακόπτης είναι σε αγωγή,
(β) Ροή του ρεύματος όταν ο ημιαγωγός διακόπτης είναι εκτός αγωγής.

Αρχικά υποθέτουμε ότι στον πυκνωτή υπάρχει φορτίο. Στο πρώτο σχήμα (α) ο διακόπτης είναι ανοικτός, και ένα ηλεκτρικό ρεύμα αποθηκεύει ενέργεια στο πηνίο. Το φορτίο τροφοδοτείται από την εκφόρτιση του πυκνωτή. Η δίοδος αποτρέπει την ροή φορτίου από τον πυκνωτή προς τον διακόπτη. Στο δεύτερο σχήμα (β) ο διακόπτης είναι κλειστός. Η τάση στο πηνίο αυξάνεται αισθητά επειδή το ρεύμα πέφτει. Μόλις η τάση αυξηθεί παραπάνω από την τάση του πυκνωτή (συν τα 0.6V από την δίοδο), το ρεύμα θα περάσει μέσω της δίοδου, θα φορτίσει τον πυκνωτή και θα διαρρέει το φορτίου. Αυτό θα συνεχιστεί όσο υπάρχει ακόμα ενέργεια στο πηνίο. Ο διακόπτης τότε κλείνει πάλι, όπως στο σχήμα (α), και το πηνίο ξανά αποθηκεύει ενέργεια, ενώ ο πυκνωτής εκφορτίζεται πάλι στο φορτίο.

Οι υψηλότερες τάσεις επιτυγχάνονται διατηρώντας τον διακόπτη σβηστό για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Για έναν ιδανικό μετατροπέα χωρίς απώλειες η τάση εξόδου είναι:

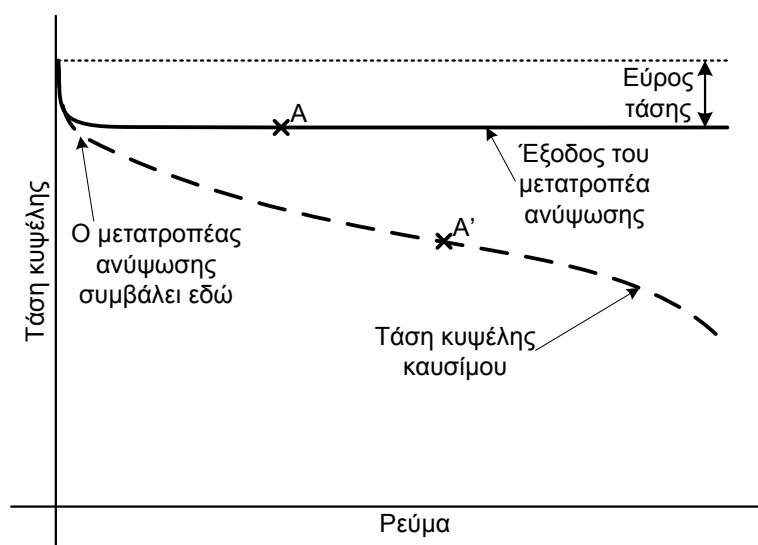
$$V_2 = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} V_1 \quad (3.2)$$

Στην πράξη, εντούτοις, η τάση εξόδου είναι κάπως μικρότερη από αυτή. Όπως και στην περίπτωση του chopper, έτσι και για τους ρυθμιστές μετατροπής αύξησης, τα κυκλώματα οδήγησης είναι εύκολα διαθέσιμα από πολλούς κατασκευαστές.

Οι απώλειες σε αυτό το κύκλωμα προέρχονται από τις ίδιες πηγές όπως για τον ρυθμιστή υποβιβασμού. Εντούτοις, επειδή τα ρεύματα μέσω του πηνίου και του διακόπτη είναι υψηλότερα από το ρεύμα εξόδου, οι απώλειες είναι υψηλότερες. Επίσης, όλο το φορτίο περνά μέσω της διόδου αυτή τη φορά, και υπόκειται έτσι στην πτώση τάσης των 0,6V και ως εκ τούτου στην απώλεια ενέργειας. Το αποτέλεσμα είναι ότι η αποδοτικότητα αυτών των ρυθμιστών ανύψωσης είναι κάπως μικρότερη από την αντίστοιχη των ρυθμιστών υποβιβασμού. Εντούτοις, η αποδοτικότητα πρέπει να είναι πάνω από 80%, και στα συστήματα στα οποία η αρχική τάση είναι υψηλή (πάνω από 100V) μπορεί να επιτευχθούν αποδοτικότητες μέχρι και 95%.

3.3 Μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης.

Μια τρίτη δυνατότητα είναι να χρησιμοποιηθεί ένας ρυθμιστής buck – boost. Σε αυτήν την περίπτωση η τελική έξοδος τίθεται κάπου μέσα στο εύρος λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Ενώ τέτοια κυκλώματα είναι τεχνικά δυνατά, η αποδοτικότητά τους τείνει να είναι μάλλον φτωχή, σίγουρα όχι καλύτερα από τον chopper. Μια εξαίρεση στην ανωτέρω δυνατότητα είναι σε περιπτώσεις στις οποίες είναι αποδεκτή μια μικρή παραλλαγή στην τάση εξόδου, και ένα κύκλωμα chopper χρησιμοποιείται μόνο στα υψηλότερα ρεύματα. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 3.5. Στα χαμηλότερα ρεύματα η τάση δεν είναι ρυθμισμένη.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα τάσης – ρεύματος για κυψέλη καυσίμου με κύκλωμα μετατροπέα ανύψωσης που ρυθμίζει την τάση λίγο λιγότερο από την μέγιστη τάση της συστοιχίας των κυψελών.

Πρέπει να επισημανθεί ότι, το ρεύμα εξόδου από έναν μετατροπέα ανύψωσης είναι μικρότερο από το ρεύμα εισόδου. Στο παραπάνω σχήμα, εάν η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στο σημείο Α', η έξοδος του συστήματος θα είναι στο σημείο Α, δηλαδή, υψηλότερη τάση αλλά χαμηλότερο ρεύμα. Επίσης, το σύστημα δεν είναι εξ ολοκλήρου ιδανικό, χωρίς απώλειες, ενώ ο μετατροπέας δεν λειτουργεί. Το ρεύμα θα ρέει από το πηνίο και τη δίοδο, με συνέπεια κάποια απώλεια ενέργειας.

Αυτά τα κυκλώματα μετατροπής καλούνται συχνά DC – DC μετατροπείς. Έτοιμες ολοκληρωμένες μονάδες, των συστημάτων αυτών είναι διαθέσιμες σε ένα πολύ ευρύ φάσμα ισχύων, και τάσεων εισόδου και εξόδου. Στις περιπτώσεις στις οποίες οι απαιτήσεις δεν μπορούν να καλυφθούν από μια έτοιμη μονάδα, ο σχεδιασμός μια νέας μονάδας εξ αρχής δεν είναι καθόλου δύσκολος. Πρότυπα ολοκληρωμένα κυκλώματα ελέγχου μπορούν σχεδόν πάντα να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν τα σήματα ελέγχου.

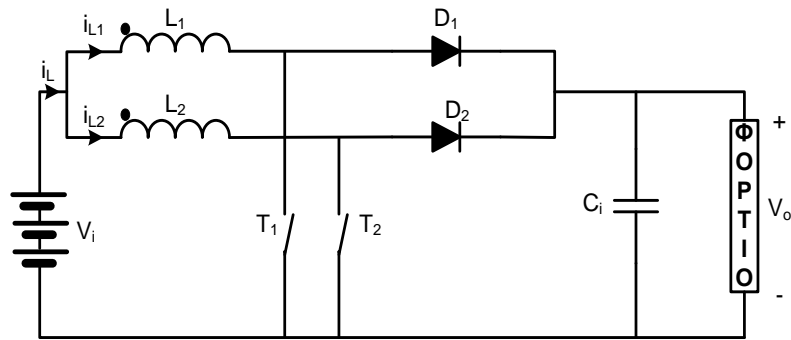
3.4 Μετατροπέας ανύψωσης με συζευγμένα πηνία

Ο μετατροπέας ανύψωσης είναι απαραίτητος για την διασύνδεση μιας πηγής ισχύος (π.χ. κυψέλη καυσίμου ή συστοιχία συσσωρευτών) με το ζυγό συνεχούς τάσης, ο οποίος χρησιμοποιείται ως είσοδος του αντιστροφέα. Ο μετατροπέας ανύψωσης με συζευγμένα πηνία δεν απορροφά μεγάλη κυμάτωση ρεύματος, επομένως μειώνει και το μέγεθος του παθητικού στοιχείου στην έξοδο της πηγής ισχύος [2],[8]-[15].

Μια σημαντική παράμετρος στο σχεδιασμό ενός μετατροπέα ανύψωσης με συζευγμένα πηνία, είναι η επιλογή του πηνίου ανύψωσης. Το βασικό πρόβλημα είναι το βάρος και το μέγεθος του πηνίου ανύψωσης, αφού είναι ίσως το βαρύτερο εξάρτημα του μετατροπέα. Προκειμένου να μειωθεί το βάρος αλλά και το μέγεθος του πηνίου προτιμάται πηνίο μικρής αυτεπαγωγής. Σ' αυτή την περίπτωση, ο μετατροπέας σχεδιάζεται ουσιαστικά για λειτουργία διακοπόμενου ρεύματος πηνίου (discontinuous inductor current mode – DICM). Το πρόβλημα κατά τη λειτουργία με διακοπόμενο ρεύμα πηνίου (DICM) είναι η απορρόφηση υψηλής κυμάτωσης του ρεύματος εισόδου, η οποία είναι ιδιαίτερα απαράδεκτη για πηγές ισχύος όπως οι κυψέλες καυσίμου. Για να μειωθεί η απορρόφηση της κυμάτωσης του ρεύματος εισόδου, ο μετατροπέας σχεδιάζεται με συζευγμένα πηνία.

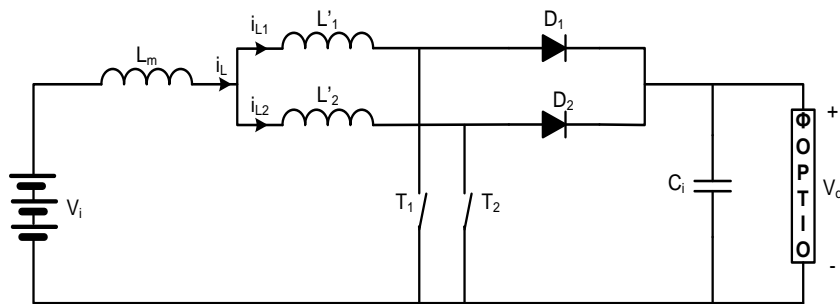
3.4.1 Αρχή λειτουργίας

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η τοπολογία μετατροπέα, ο οποίος αποτελείται από δυο μετατροπείς ανύψωσης με συζευγμένα πηνία. Τα πηνία L_1 και L_2 είναι συζευγμένα και με τον ίδιο προσανατολισμό τυλίγματος.



Σχήμα 3.6: Μετατροπέας ανύψωσης με συζευγμένα πηνία.

Τα συζευγμένα πηνία μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα ισοδύναμο κύκλωμα με τρία μη συζευγμένα πηνία, όπως φαίνεται σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα του σχήματος 3.6 με τρία μη συζευγμένα πηνία.

Οι σχέσεις που συνδέουν τα πηνία δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$L_1' = L_1 - L_m \quad (3.3)$$

$$L_2' = L_2 - L_m \quad (3.4)$$

$$L_m = k\sqrt{L_1 - L_2} \quad (3.5)$$

όπου,

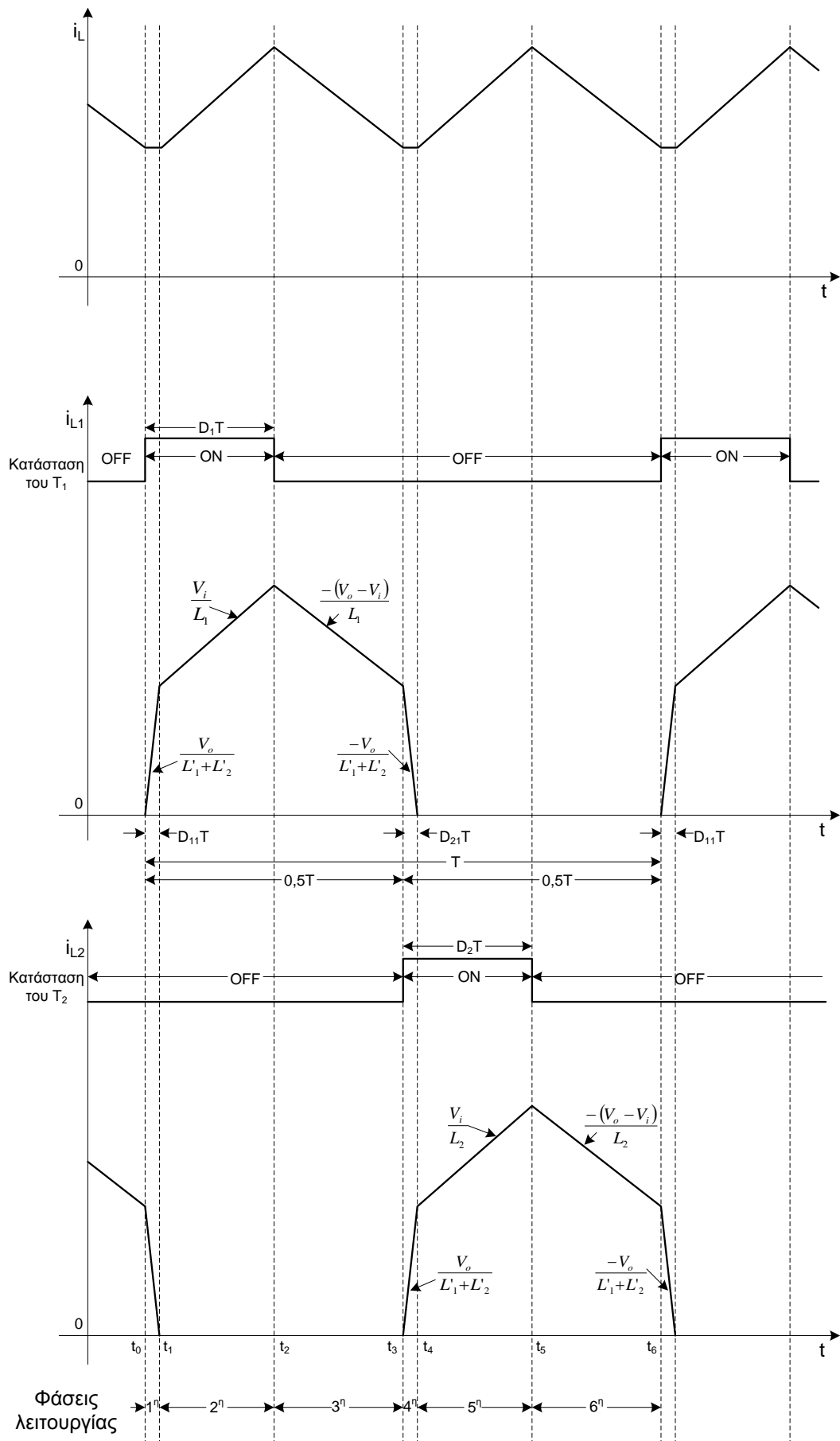
L_1, L_2 : οι αυτεπαγωγές των δύο πηνίων,

k : ο συντελεστής σύζευξης των πηνίων,

L_1', L_2' : η επαγωγική διαρροή των δύο πηνίων στο ισοδύναμο κύκλωμα

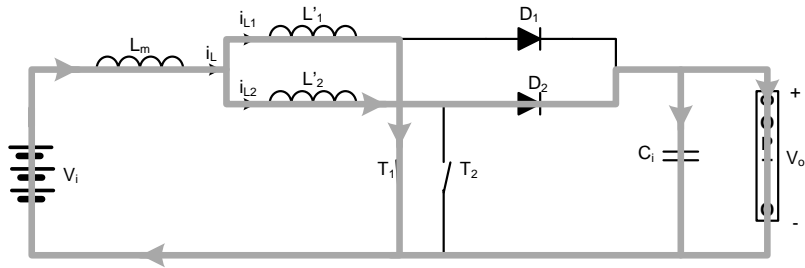
L_m : η αμοιβαία επαγωγή.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα για διάφορες διακοπτικές καταστάσεις και τις κυματομορφές του σχήματος 3.8, η λειτουργία του μετατροπέα μπορεί να χωριστεί σε έξι διαδοχικές φάσεις, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 3.8: Κυματομορφές του μετατροπέα ανύψωσης με συζευγμένα πηνία.

Φάση α.



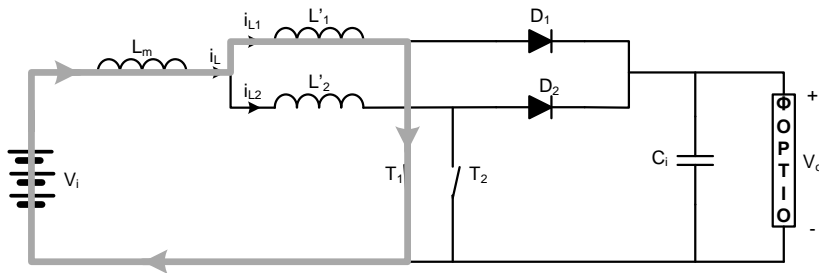
Σχήμα 3.9: Κίνηση του ρεύματος κατά την 1^η φάση λειτουργίας, χρόνος t_0-t_1 .

Στο χρόνο t_0 , ο διακόπτης T_1 είναι κλειστός. Το ρεύμα του πηνίου L_1' αρχίζει να αυξάνει ενώ το πηνίο L_2' συνεχίζει να εκφορτίζεται (είχε φορτιστεί από τον προηγούμενο διακοπτικό κύκλο).

Η μεταβολή του ρεύματος i_{L2} δίνεται από την σχέση:

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{-V_o}{L_1' + L_2'} \quad (3.6)$$

Φάση β.



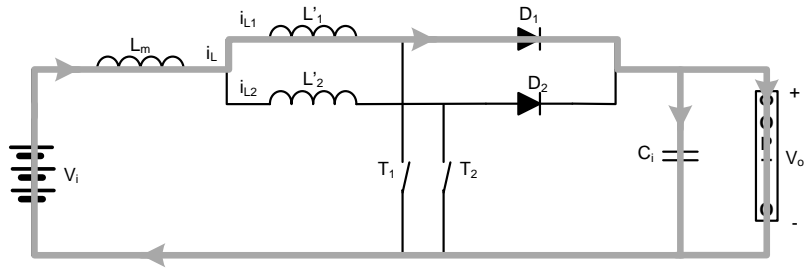
Σχήμα 3.10: Κίνηση του ρεύματος κατά την 2^η φάση λειτουργίας, χρόνος t_1-t_2 .

Κατά το χρόνο t_1 , το ρεύμα i_{L2} πέφτει στο μηδέν. Το ρεύμα i_{L1} συνεχίζει να αυξάνει και η μεταβολή του δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{V_i}{L_1} \quad (3.7)$$

όπου $L_1 = L_1' + L_m$.

Φάση c.

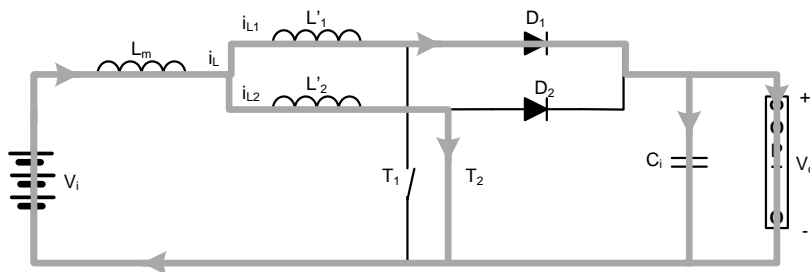


Σχήμα 3.11: Κίνηση του ρεύματος κατά την 3^η φάση λειτουργίας, χρόνος t_2-t_3 .

Κατά το χρόνο t_2 , ο διακόπτης T_1 είναι ανοικτός. Η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο L_1 μεταφέρεται στο φορτίο μέσω της διόδου D_1 . Η μεταβολή του ρεύματος i_{L1} δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{-(V_0 - V_i)}{L_1} \quad (3.8)$$

Φάση d.

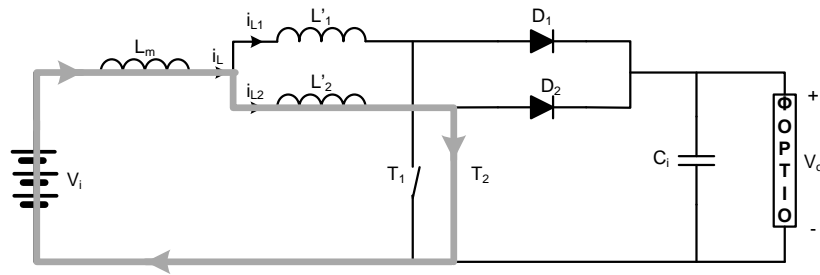


Σχήμα 3.12: Κίνηση του ρεύματος κατά την 4^η φάση λειτουργίας, χρόνος t_3-t_4 .

Κατά το χρόνο t_3 , ο διακόπτης T_2 είναι κλειστός. Το ρεύμα στο πηνίο L'_2 αρχίζει να αυξάνει, ενώ το πηνίο L'_1 συνεχίζει να εκφορτίζεται. Η μεταβολή του ρεύματος i_{L1} είναι περίπου:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{-V_0}{L'_1 + L'_2} \quad (3.9)$$

Φάση e.



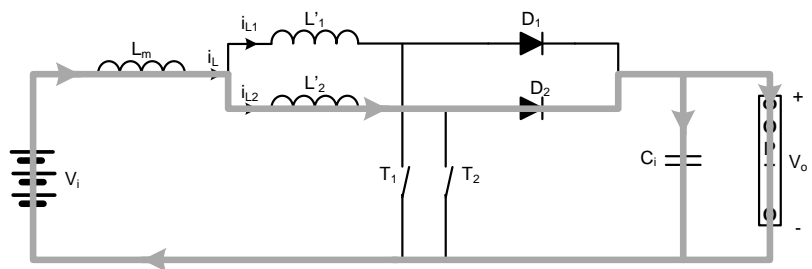
Σχήμα 3.13: Κίνηση του ρεύματος κατά την 5^η φάση λειτουργίας, χρόνος t_4 - t_5 .

Κατά το χρόνο t_4 , ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος i_{L2} του πηνίου L_2 είναι:

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_i}{L_2} \quad (3.10)$$

όπου $L_2 = L_2' + L_m$.

Φάση f.



Σχήμα 3.14: Κίνηση του ρεύματος κατά την 6^η φάση λειτουργίας, χρόνος t_5 - t_6 .

Κατά το χρόνο t_5 , ο διακόπτης T_2 είναι ανοικτός. Το πηνίο L_2' εκφορτίζεται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Η μεταβολή του ρεύματος i_{L2} είναι:

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{-(V_o - V_i)}{L_2} \quad (3.11)$$

Ο διακοπτικός κύκλος επαναλαμβάνεται όταν ο διακόπτης T_2 ανοίξει πάλι στο χρόνο t_6 .

Από τις κυματομορφές που φαίνονται στο σχήμα 3.8 προκύπτει ότι:

1. Ο μετατροπέας λειτουργεί στην φάση συνεχούς ρεύματος πηνίου (CICM), αφού το ρεύμα i_i είναι συνεχές. Κατά συνέπεια, οι στιγμιαίες υπερεντάσεις των πηνίων και των διακοπών και η κυμάτωση του ρεύματος εισόδου μπορούν να διατηρηθούν σχετικά χαμηλές.
2. Σε ότι αφορά τα επιμέρους στοιχεία του μετατροπέα ανύψωσης, εφόσον τα ρεύματα i_{L1} και i_{L2} είναι ασυνεχή, λειτουργούν πραγματικά στη φάση ασυνεχούς ρεύματος πηνίου (DICM). Αυτό βοηθάει στην αντιμετώπιση του προβλήματος της άνισης κατανομής του ρεύματος. Επίσης, από τη στιγμή που οι δίοδοι ανύψωσης D_1 και D_2 σταματούν να άγουν πριν οι διακόπτες T_1 και T_2 αρχίσουν να άγουν έχει επιτευχθεί η εξάλειψη των ανάστροφων απωλειών των διόδων.

Υποθέτοντας ότι οι κυματομορφές των ρευμάτων έχουν φτάσει στη μόνιμη κατάσταση, από την κυματομορφή του ρεύματος i_{L1} , προκύπτει ότι:

$$\frac{V_0}{L_1'+L_2'}D_{11}T + \frac{V_i}{L_1}(D_1 - D_{11})T = \frac{V_0 - V_i}{L_1}(0,5 - D_1)T + \frac{V_0}{L_1'+L_2'}D_{21}T \quad (3.12)$$

Από την κυματομορφή του ρεύματος i_{L2} , προκύπτει ότι:

$$\frac{V_0}{L_1'+L_2'}D_{21}T + \frac{V_i}{L_2}(D_2 - D_{21})T = \frac{V_0 - V_i}{L_2}(0,5 - D_2)T + \frac{V_0}{L_1'+L_2'}D_{11}T \quad (3.13)$$

Επίσης, οι μέσες τιμές I_1 και I_2 των ρευμάτων i_{L1} και i_{L2} αντίστοιχα, είναι:

$$I_1 = \frac{1}{T} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2}D_{11}T \frac{V_0}{L_1'+L_2'}D_{11}T + \frac{1}{2}(D_1 - D_{11})T \left[\frac{2V_0}{L_1'+L_2'}D_{11}T + \frac{V_i}{L_1}(D_1 - D_{11})T \right] + \\ & + \frac{1}{2}(0,5 - D_1)T \left[\frac{V_0}{L_1'+L_2'}(D_{11} + D_{21})T + \frac{V_i}{L_1}(D_1 - D_{11})T \right] + \frac{1}{2}D_{21}T \frac{V_0}{L_1'+L_2'}D_{21}T \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

$$I_2 = \frac{1}{T} \left\{ \begin{aligned} & \frac{1}{2}D_{21}T \frac{V_0}{L_1'+L_2'}D_{21}T + \frac{1}{2}(D_2 - D_{21})T \left[\frac{2V_0}{L_1'+L_2'}D_{21}T + \frac{V_i}{L_2}(D_2 - D_{21})T \right] + \\ & + \frac{1}{2}(0,5 - D_2)T \left[\frac{V_0}{L_1'+L_2'}(D_{11} + D_{21})T + \frac{V_i}{L_2}(D_2 - D_{21})T \right] + \frac{1}{2}D_{11}T \frac{V_0}{L_1'+L_2'}D_{11}T \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Επειδή τα στοιχεία του μετατροπέα θεωρούνται ιδανικά, δηλαδή ο μετατροπέας δεν έχει απώλειες, η ισχύς εισόδου του είναι ίση με την ισχύ εξόδου του:

$$P_i = P_o \quad \text{ή} \quad V_i(I_1 + I_2) = \frac{V_o^2}{R_L} \quad (3.16)$$

όπου R_L είναι η αντίσταση του φορτίου.

Κάνοντας τις επόμενες παραδοχές:

$$D_1 = D, \quad D_2 = D + \delta * D, \quad L_1 = L_2 = L \quad \text{και} \quad L_1' = L_2' = (1 - k)L \quad (3.17)$$

προκύπτει η σχέση υπολογισμού της τάσης εξόδου V_o :

$$V_o = \frac{[1 + 2(1 - k)(0,5 + D)(1 - 2D - \delta D)] + \sqrt{[1 + 2(1 - k)(0,5 + D)(1 - 2D - \delta D)]^2 - 4(1 - k)(1 - \delta D) \left[\frac{4L(1 - k)}{R_L T} + (1 - 2D - \delta D) \right]}}{2 \left[\frac{4L(1 - k)}{R_L T} + (1 - 2D - \delta D) \right]} V_i \quad (3.18)$$

Η σχέση αυτή είναι έγκυρη όταν η V_o έχει μόνο πραγματικό μέρος (όχι και φανταστικό), που σημαίνει ότι το υπόριζο δεν πρέπει να είναι αρνητικό:

$$R_L \geq \frac{16L(1 - k)^2(1 - \delta D)}{T \{ [1 + 2(1 - k)(0,5 + D)(1 - 2D - \delta D)]^2 - 4(1 - k)(1 - \delta D)(1 - 2D - \delta D) \}} \quad (3.19)$$

Όταν η R_L τείνει στην τιμή αυτή, τότε η τάση εξόδου τείνει να πλησιάζει την τιμή:

$$V_o = \frac{V_i}{1 - (2D + \delta D)} \quad \text{ή} \quad V_o = \frac{V_i}{1 - (D_1 + D_2)} \quad (3.20)$$

η οποία είναι η τάση εξόδου ενός τυπικού μετατροπέα ανύψωσης στη φάση λειτουργίας συνεχούς ρεύματος πηνίου (CICM), με βαθμό χρησιμοποίησης $(D_1 + D_2)$.

Η διαφορά μεταξύ των I_1 και I_2 , που είναι οι μέσες τιμές των ρευμάτων i_{L1} και i_{L2} , αντίστοιχα, δίνεται από την σχέση:

$$I_1 - I_2 \cong \frac{T\delta D}{4L} [V_o(2D + \delta D) - V_i] \quad (3.21)$$

Αν $\delta D \ll 2D$, τότε η παραπάνω σχέση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$I_1 - I_2 \cong \frac{T\delta D}{4L} [2DV_o - V_i] \quad (3.22)$$

Εδώ οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι η διαφορά μεταξύ των I_1 και I_2 είναι κατά προσέγγιση ανάλογη του δD και μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας την αυτεπαγωγή L .

Επίσης, όταν το $D = 0,25$, ισχύουν κατά προσέγγιση οι παρακάτω σχέσεις:

$$V_o = 2V_i \quad (3.23)$$

$$I_1 - I_2 = 0 \quad (3.24)$$

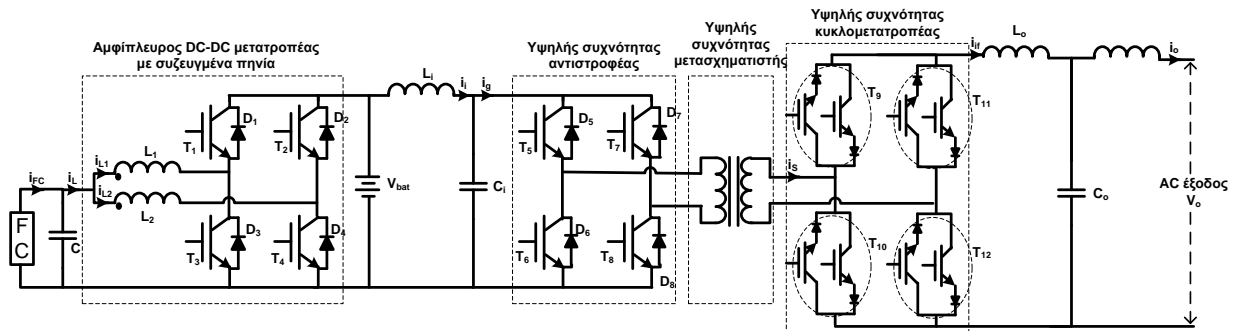
Επομένως, ο βαθμός χρησιμοποίησης για κάθε διακόπτη, $D = 0,25$ είναι το καλύτερο σημείο λειτουργίας.

3.5 Ανάλυση της βαθμίδας του αμφίπλευρου dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία από την προτεινόμενη τοπολογία.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1, υπάρχουν διάφορες τοπολογίες ηλεκτρονικών ισχύος για εφαρμογές σύνδεσης των συστημάτων κυψελών καυσίμου με το δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης ή με αντίστοιχα φορτία. Οι τοπολογίες αυτές όμως, είτε είναι μιας κατεύθυνσης, οπότε δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τις κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας, είτε αμφίπλευρης ροής ισχύος, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (υβριδικά), όπως οι κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας, αλλά οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούν είναι τοποθετημένοι στην πλευρά υψηλής dc τάσης και αυτό οδηγεί σε ανάγκη χρήσης συστημάτων διαχείρισης συσσωρευτών που αυξάνουν την πολυπλοκότητα και το κόστος της εφαρμογής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προτείνεται μια τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος αμφίπλευρης ροής ισχύος ειδικά μελετημένη για συστήματα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας. Βέβαια εκτός από τα συστήματα κυψελών καυσίμου, η ίδια τοπολογία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα υβριδικά συστήματα παραγωγής

και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς και χρήση της με συσσωρευτές λιθίου – ιόντων πολυμερών.



Σχήμα 3.15: Προτεινόμενη τοπολογία αμφίπλευρης ροής ισχύος

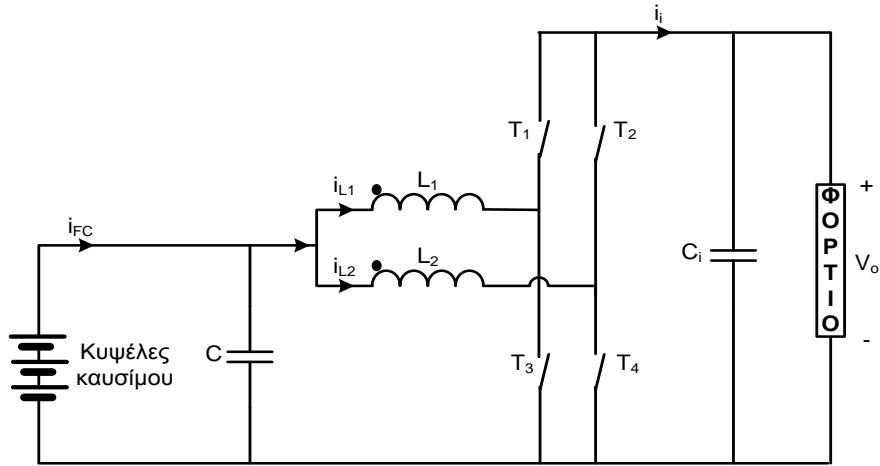
Το προτεινόμενο σύστημα μετατροπής ισχύος όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.15 αποτελείται από μία βαθμίδα dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, από έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών αντιστροφέα και έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών κυκλομετατροπέα.

Οι αμφίπλευροι dc-dc μετατροπείς ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές όπως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα και συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου. Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η τοπολογία ενός αμφίπλευρου dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συνδέσει συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας ή την συστοιχία συσσωρευτών λιθίου – ιόντων πολυμερών, με τον ζυγό συνεχούς τάσης, που είναι ουσιαστικά η είσοδος του αντιστροφέα.

Πολύ βασικό τμήμα του μετατροπέα αυτού είναι το πηνίο ανύψωσης και η επιλογή του πρέπει να γίνει με προσοχή και να ληφθούν υπόψη διάφορες παράμετροι ανάλογα με το σύστημα που θα χρειαστεί να διασυνδεθεί. Ο μεγαλύτερος προβληματισμός εδώ αφορά στο μέγεθος και στο βάρος ενός τέτοιου πηνίου μεγάλης ισχύος, το οποίο είναι ίσως το βαρύτερο ενιαίο εξάρτημα σε ολόκληρο το μετατροπέα. Προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος και το βάρος του, προτιμάται πηνίο με μικρή αυτεπαγωγή, αλλά αναγκαστικά πλέον ο μετατροπέας θα πρέπει να σχεδιαστεί για λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου (DCM), κάτι που δημιουργεί υψηλή κυμάτωση στο απορροφούμενο ρεύμα εισόδου, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα απαράδεκτο για μία κυψέλη καυσίμου.

Ο αμφίδρομος dc-dc μετατροπέας με συζευγμένα πηνία αποτελείται από δύο μετατροπείς ανύψωσης συνδεδεμένους παράλληλα, όπου οι διακόπτες T_3 και T_4 χρησιμεύουν για να φορτίζουν τις αυτεπαγωγές ανύψωσης και οι διακόπτες T_1 και T_2 για να τις εκφορτίζουν. Οι παλμοί έναυσης των ημιαγωγών διακοπών T_3 και T_4 είναι τέτοιοι, ώστε να διπλασιάζουν τη συχνότητα του ρεύματος εισόδου κι επομένως να περιορίζουν την τιμή της

χωρητικότητας εισόδου. Οι ημιαγωγοί T_1 και T_2 χρησιμοποιούνται επίσης για να λειτουργούν το μετατροπέα με συζευγμένα πηνία ως μια τοπολογία υποβιβασμού, με σκοπό την τροφότητα της κυπέλης υδρογόνου, κατά τη διάρκεια της φάσης παραγωγής υδρογόνου ή κατά τη διάρκεια της εκκίνησης της.



Σχήμα 3.16: Τοπολογία αμφίπλευρου μετατροπέα συζευγμένων πηνίων.

Για όσο διάστημα ρέει το ρεύμα εισόδου i_L , ο dc-dc μετατροπέας λειτουργεί ως μετατροπέας ανύψωσης στη φάση συνεχούς ρεύματος πηνίου (continuous inductor current mode – CICM). Συνεπώς, η αιχμή του ρεύματος περιορίζεται από τους ημιαγωγούς ισχύος και η απορρόφηση της κυμάτωσης του ρεύματος εισόδου μπορεί να διατηρείται σχετικά χαμηλή. Για όσο διάστημα ο μετατροπέας με συζευγμένα πηνία είναι ενεργοποιημένος, οπότε τα i_{L1} και i_{L2} είναι ασυνεχή, ο μετατροπέας ανύψωσης λειτουργεί πραγματικά στη φάση διακοπόμενου ρεύματος πηνίου (discontinuous inductor current mode – DICM). Αυτό βοηθάει στην αντιμετώπιση του προβλήματος της άνισης κατανομής του ρεύματος. Επίσης, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της εμφάνισης αντίστροφων απωλειών των διόδων, τη στιγμή που οι διόδοι D_1 και D_2 σταμάτησαν να άγουν και πριν αρχίσουν να άγουν οι ημιαγωγοί διακόπτες T_3 και T_4 . Η λειτουργία της βαθμίδας αυτής μπορεί να χωριστεί σε έξι φάσεις:

1. Ο διακόπτης T_3 αρχίζει να άγει φορτίζοντας έτσι το πηνίο L_1 , ενώ το πηνίο L_2 εκφορτίζεται μέσω της διόδου D_2 του διακόπτη T_2 . Η φάση ολοκληρώνεται όταν μηδενιστεί το ρεύμα i_{L2} .
2. Η φόρτιση του L_1 συνεχίζεται μέσω του διακόπτη T_3 και η φάση αυτή ολοκληρώνεται όταν ο διακόπτης T_3 τεθεί εκτός αγωγής.
3. Το L_1 αρχίζει να εκφορτίζεται μέσω της διόδου του διακόπτη T_1 .
4. Ο διακόπτης T_4 ξεκινάει να άγει φορτίζοντας το πηνίο L_2 , ενώ το L_1 συνεχίζει να εκφορτίζεται και όταν εκφορτιστεί πλήρως ολοκληρώνεται και η τέταρτη φάση.

5. Η φόρτιση του L_2 συνεχίζει μέχρις ότου ο διακόπτης T_4 σταματήσει να άγει.
6. Στην τελευταία φάση του διακοπτικού κύκλου, η δίοδος του διακόπτη T_2 μπαίνει σε αγωγή και εκφορτίζεται το πηνίο L_2 .

Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας δεν έχει απώλειες, τότε οι εξισώσεις (3.20) και (3.21) γίνονται:

$$V_{bat} = \frac{V_{FC}}{1 - (2D + \delta D)} = \frac{V_{FC}}{1 - (D_1 + D_2)} \quad (3.25)$$

$$I_L = I_{L1} + I_{L2} \quad (3.26)$$

$$I_{L1} - I_{L2} \cong \frac{T_s \delta D}{4L} [V_{bat} (2D + \delta D) - V_{FC}] \quad (3.27)$$

Όπου,

V_{bat} : η dc τάση εξόδου,

V_{FC} : η τάση εξόδου της κυψέλης υδρογόνου,

I_{L1} : η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου L_1 , i_{L1} ,

I_{L2} : η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου L_2 , i_{L2} ,

I_L : η μέση τιμή του ρεύματος του μετατροπέα ανύψωσης με συζευγμένα πηνία, i_L ,

D_1 : ο βαθμός χρησιμοποίησης της πρώτης μονάδας του μετατροπέα ανύψωσης,

D_2 : ο βαθμός χρησιμοποίησης της δεύτερης μονάδας του μετατροπέα ανύψωσης,

δ : η διαφορά των βαθμών χρησιμοποίησης μεταξύ των δύο μονάδων,

T_s : η διακοπτική περίοδος.

Για απλούστευση υποθέτουμε ότι $D_1 = D$, $D_2 = D + \delta D$, $L_1 = L_2 = L$. Οι διαρροές (L'_1 , L'_2) και η αμοιβαία αυτεπαγωγή (L_m) των δύο συζευγμένων πηνίων ανύψωσης δίνονται από τις σχέσεις:

$$L'_1 = L_1 - L_m, \quad L'_2 = L_2 - L_m \quad \text{και} \quad L_m = K \sqrt{L_1 L_2} \quad (3.28)$$

Όπου,

K : ο συντελεστής σύζευξης ($= 0,9 - 0,98$).

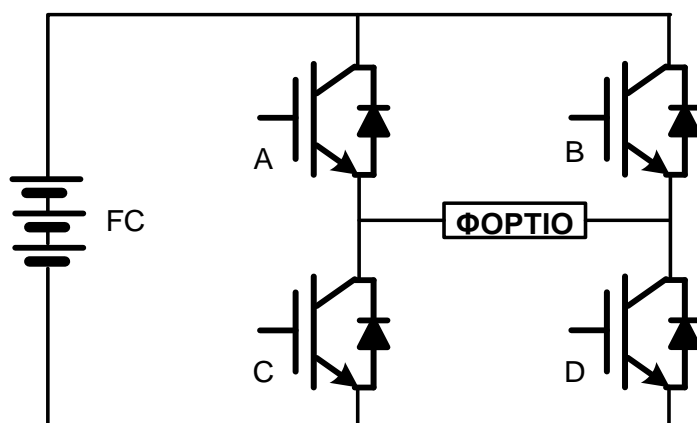
Αναλύοντας την εξίσωση (7.3) παρατηρούμε ότι το καλύτερο σημείο λειτουργίας, όσο υφίσταται το ρεύμα που μοιράζεται μεταξύ των δύο μετατροπέων ανύψωσης είναι όταν $D_1 = D_2 = 0,25$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αντιστροφείς Ισχύος

4.1 Μονοφασικοί αντιστροφείς

Οι κυψέλες καυσίμου θα χρησιμοποιηθούν συχνά στα συνδυασμένα συστήματα θερμότητας και ηλεκτρικής ισχύος (CHP = combined heat and power) είτε πρόκειται για σπίτια είτε για επιχειρήσεις. Σε αυτά τα συστήματα οι κυψέλες καυσίμου θα πρέπει να συνδεθούν με το δίκτυο διανομής του εναλλασσόμενου ρεύματος. Στα μικρά οικιακά συστήματα, η ηλεκτρική ενέργεια θα μετατραπεί σε μονοφασική εναλλασσόμενη τάση. Στα μεγαλύτερα βιομηχανικά συστήματα, οι κυψέλες καυσίμου θα πρέπει αναγκαστικά να συνδεθούν με το τριφασικό σύστημα παροχής. Η ρύθμιση των βασικών συστατικών ενός μονοφασικού αντιστροφέα φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Υπάρχουν τέσσερις ηλεκτρονικοί διακόπτες (A, B, C, D), που συνδέονται σε μια γέφυρα τύπου "H". Δίπλα σε κάθε διακόπτη υπάρχει μία αντιπαράλληλη διόδος, ο σκοπός της οποίας θα μελετηθεί παρακάτω. Σαν φορτίο επιλέγω ένα συνδυασμό R_L ενός αντιστάτη και ενός πηνίου [1], [16]-[25].

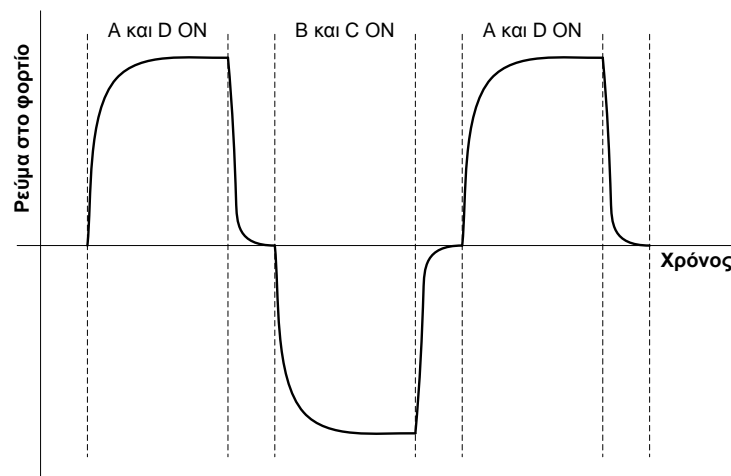


Σχήμα 4.1: Κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας.

Η βασική λειτουργία του αντιστροφέα είναι αρκετά απλή. Αρχικά ενεργοποιούνται οι διακόπτες A και D, και ένα ρεύμα διαρρέει το φορτίο με φορά προς τα δεξιά. Έπειτα, αυτοί οι δύο διακόπτες ανοίγουν και σε αυτό το σημείο βλέπουμε την ανάγκη για τις διόδους. Το φορτίο θα έχει πιθανώς κάποια αυτεπαγωγή, και έτσι το ρεύμα δεν θα είναι ικανό να σταματήσει αμέσως, αλλά θα συνεχίσει να ρέει στην ίδια κατεύθυνση, μέσω των διόδων

στους διακόπτες B και C, πίσω προς την πηγή. Στη συνέχεια οι διακόπτες B και C κλείνουν και ένα ρεύμα ρέει στο φορτίο προς την αντίθετη κατεύθυνση (αριστερά). Όταν αυτοί οι διακόπτες ανοίγουν, το ρεύμα για τους παραπάνω λόγους θα συνεχίσει την ροή του μέσω των διόδων που βρίσκονται στους διακόπτες A και D.

Η κυματομορφή του ρεύματος που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 4.2. Σε μερικές περιπτώσεις, αν και είναι πολύ λίγες, αυτή η κυματομορφή θα είναι επαρκής, αλλά επειδή η μορφή αυτή του ρεύματος απέχει πολύ από την κλασική ημιτονοειδή μορφή του, συνήθως προκαλεί πολλά προβλήματα στις περισσότερες που συνδέεται στο ήδη υπάρχον δίκτυο.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ρεύματος – χρόνου μονοφασικού αντιστροφέα ελεγχόμενου με τετραγωνικούς παλμούς.

Η διαφορά μεταξύ ενός καθαρού ημιτονοειδούς κύματος και οποιασδήποτε άλλης κυματομορφής έγκειται στο ζήτημα των αρμονικών. Αυτές είναι ημιτονοειδείς ταλαντώσεις της τάσης ή του ρεύματος των οποίων η συχνότητα, f_n , είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας ταλάντωσης. Μπορεί να αποδειχθεί ότι οποιαδήποτε περιοδική κυματομορφή μπορεί να αντιπροσωπευθεί από το συνδυασμό αρμονικών σε ένα θεμελιώδες κύμα ημιτόνου. Για να βρούμε αυτές τις αρμονικές μια κυματομορφής κάνουμε ανάλυση Fourier. Έτσι, η διαφορά μεταξύ μιας κυματομορφής τάσης ή ρεύματος και ενός καθαρού ημιτόνου μπορεί να ερμηνευτεί με την επιβολή αρμονικών υψηλής συχνότητας πάνω στην θεμελιώδη. Το πρόβλημα είναι ότι αυτές οι αρμονικές υψηλής συχνότητας μπορούν να έχουν επιβλαβή αποτελέσματα στον εξοπλισμό που συνδέεται με το δίκτυο και στα καλώδια εξ αιτίας των υψηλών αρμονικών ρευμάτων.

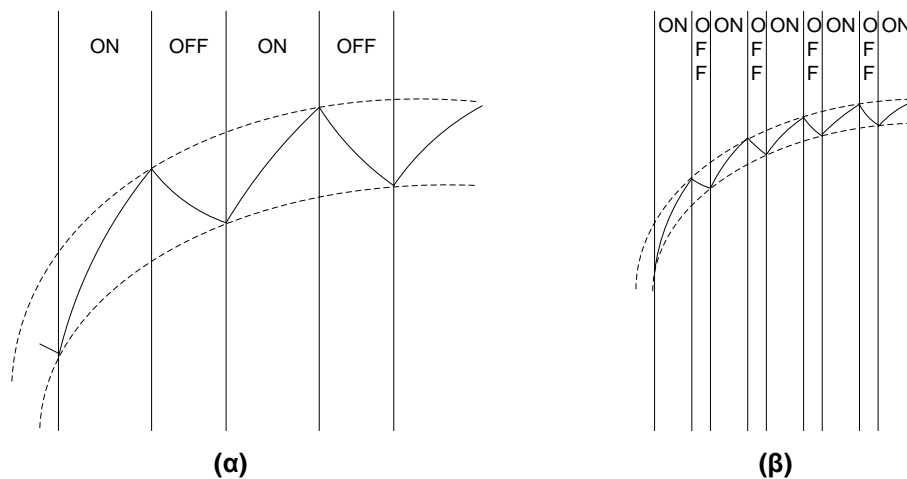
Μεταξύ των σοβαρότερων βλαβών είναι πιθανή ζημία στον προστατευτικό εξοπλισμό και διαταραχή των συστημάτων ελέγχου. Μπορούν επίσης να προκαλέσουν ανεπάρκειες στις ηλεκτρικές μηχανές, δυσάρεστο θόρυβο σε όλους τους τύπους μηχανών, ζημία στους υπολογιστές και σε άλλο ηλεκτρονικό εξοπλισμό, παράσιτα στις τηλεοράσεις και άλλα ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

Για αυτόν τον λόγο, υπάρχουν κανονισμοί σχετικά με την “καθαρότητα” της κυματομορφής ενός εναλλασσόμενου ρεύματος που συνδέεται στο δίκτυο. Δυστυχώς, αυτά τα πρότυπα ποικίλλουν από χώρα σε χώρα και τις κατά τόπους περιστάσεις. Εντούτοις, οι ανώτερες αρμονικές παντού εκφράζονται από την σχέση του πλάτους τους σε σύγκριση με το πλάτος της αρμονικής στην θεμελιώδη συχνότητα. Ένα ευρέως αποδεκτά πρότυπα είναι το IEC 1000- 2-2 (Heier, 1998).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ένας τετραγωνικός παλμός υπερβαίνει τα όρια στην τρίτη αρμονική κατά έναν παράγοντα πάνω από 6, καθώς επίσης και στις υπόλοιπες. Έτσι, γεννάται το ερώτημα, πώς μπορεί να παραχθεί μια καθαρότερη ημιτονοειδής τάση και ρεύμα; Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις είναι δύο, η διαμόρφωση πλάτους παλμών και η πιο σύγχρονη τεχνική “tolerance-band pulse”. Η αρχή της διαμόρφωσης πλάτους παλμών αναλύεται σε επόμενη παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου. Στα σύγχρονα συστήματα, οι παλμοί διακοπής παράγονται από κυκλώματα μικροεπεξεργαστών. Αυτό έχει οδηγήσει στην υιοθέτηση μιας “έξυπνης” προσέγγισης στους αντιστροφείς που αποκαλείται μέθοδος ανοχής εύρους παλμών (tolerance band pulse) και το σκεπτικό που ακολουθεί αυτή η μέθοδος είναι το εξής.

Η τάση εξόδου ελέγχεται συνεχώς, και συγκρίνεται με ένα εσωτερικό "ανώτερο όριο" και "χαμηλότερο όριο", τα οποία είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις του χρόνου. Στο θετικό κύκλο, ο διακόπτης D είναι κλειστός όλη την ώρα. Ο διακόπτης A κλείνει και το ρεύμα μέσω του φορτίου αυξάνει. Όταν φθάνει το ανώτερο όριο ο A ανοίγει, το ρεύμα όμως συνεχίζει να ρέει μέσω της διόδου που βρίσκεται παράλληλα με τον διακόπτη C, όπως προηγουμένως, αλλά φυσικά μειώνεται. Όταν φτάσει στο κατώτερο όριο, ο διακόπτης A κλείνει πάλι και το ρεύμα αρχίζει να αυξάνει ξανά. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς, με την τάση να αυξάνεται και να μειώνεται μεταξύ της ζώνης ανοχής.

Στο σχήμα 4.3 απεικονίζεται η κυματομορφή της τάσης με τον χρόνο κάνοντας χρήση της παραπάνω μεθόδου. Στο σχήμα (α) η ζώνη ανοχής είναι ευρύτερη ενώ στο σχήμα (β) είναι πιο στενή.



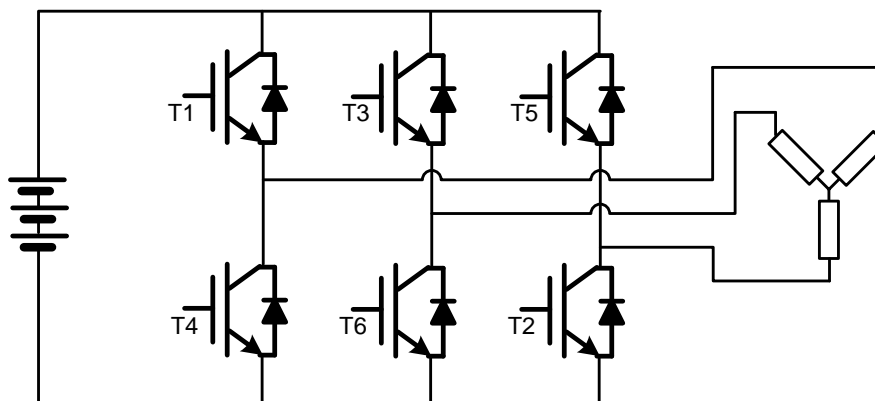
Σχήμα 4.3: Κυματομορφές τάσης – χρόνου με χρήση της τεχνικής tolerance band pulse

Πρέπει επίσης να εκτιμηθεί ότι η αντίσταση και η αυτεπαγωγή του φορτίου θα έχουν επιπτώσεις στην κυματομορφή. Το μόνο σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι η συχνότητα των παλμών μπορεί να γίνει πολύ υψηλή και επειδή οι περισσότερες από τις απώλειες σε ένα σύστημα εμφανίζονται με τα ανοιγοκλεισίματα των ηλεκτρονικών διακοπών, μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση. Η δοκιμασμένη μέθοδος της διαμόρφωσης πλάτους παλμών χρησιμοποιείται ακόμα ευρέως, αλλά η τεχνική των ζωνών ανοχής γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη, ειδικά για τους αντιστροφείς όπου η φύση του φορτίου δεν θα ποικίλει πολύ.

4.2 Τριφασικοί Αντιστροφείς

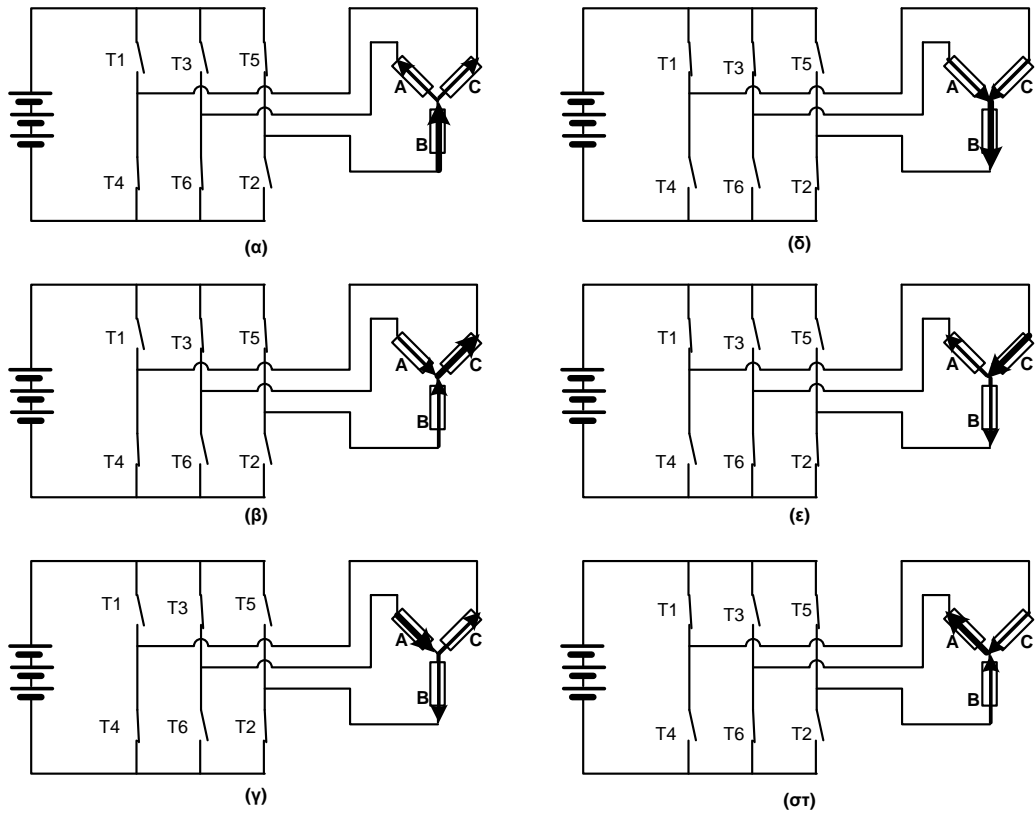
Σχεδόν σε όλα τα μέρη του κόσμου, ηλεκτρική ενέργεια παράγεται και διανέμεται χρησιμοποιώντας τρία παράλληλα κυκλώματα, όπου η τάση στο καθένα από αυτά βρίσκεται εκτός φάσης από την τάση στο επόμενο κύκλωμα κατά 120° . Ενώ τα περισσότερα σπίτια παρέχονται από μόνο μια φάση, τα περισσότερα βιομηχανικά συγκροτήματα έχουν διαθέσιμες και τις τρεις φάσεις. Έτσι, για τα βιομηχανικά συγκροτήματα, το συνεχές ρεύμα από τις κυψέλες καυσίμου θα πρέπει να μετατραπεί σε τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα.

Το βασικό κύκλωμα ενός τριφασικού αντιστροφέα φαίνεται στο σχήμα 4.4 .

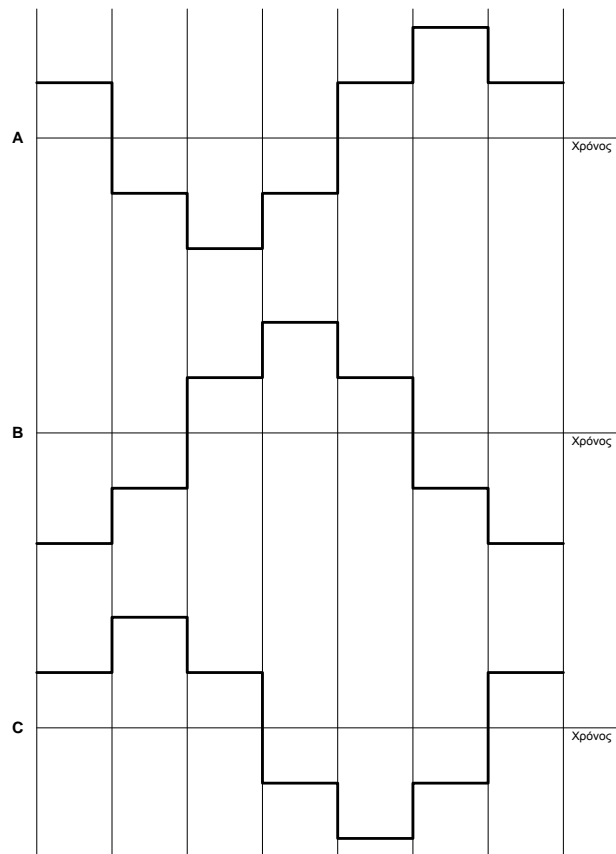


Σχήμα 4.4: Κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα.

Έξι διακόπτες, με αντιπαράλληλες διόδους ελεύθερης διέλευσης συνδέονται με τον τριφασικό μετασχηματιστή στα δεξιά. Κάθε κύκλος χωρίζεται σε έξι βήματα και ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται αυτοί οι διακόπτες για να παραγάγουν τρεις παρόμοιες τάσεις αλλά με διαφορά φάσης φαίνεται στα επόμενα σχήματα.



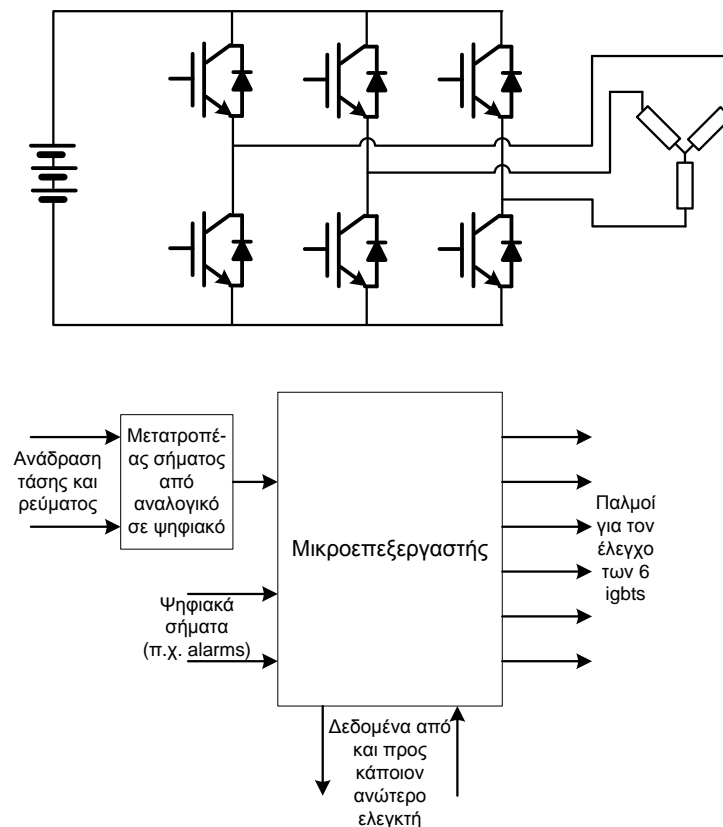
Σχήμα 4.5: Διαδοχή στην αγωγή των διακοπών για την παραγωγή τριφασικής τάσης.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ρεύματος-χρόνου για έναν τριφασικό αντιστροφέα

Οι γραφικές παραστάσεις του σχήματος 4.6 δείχνουν πώς το ρεύμα σε κάθε μια από τις τρεις φάσεις αλλάζει με το χρόνο χρησιμοποιώντας αυτήν την απλή ρύθμιση. Αυτές οι καμπύλες προφανώς δεν έχουν καμία σχέση με την ημιτονική μορφή που θέλουμε να παράγουμε. Για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιούνται και εδώ οι μέθοδοι διαμόρφωσης πλάτους παλμών και ανοχής πλάτους, με τον ίδιο τρόπο όπως και στον μονοφασικό αντιστροφέα. Η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών για τον τριφασικό αντιστροφέα αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Η κατασκευή ενός σύγχρονου τριφασικού αντιστροφέα δεν έχει σημαντικές διαφορές, είτε πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα μικρής ισχύος, είτε σε συστήματα μεγάλης ισχύος. Το ίδιο βασικό κύκλωμα χρησιμοποιείται με οποιαδήποτε μέθοδος διαμόρφωσης και αν επιλέξω (πλάτους παλμών ή ζώνης ανοχής). Το βασικό κύκλωμα εμφανίζεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Τριφασικός αντιστροφέας και χρήση μικροεπεξεργαστή για την παλμοδότηση των διακοπών

Τα σήματα που χρησιμοποιούνται για να ανοιγοκλείνουν οι διακόπτες λαμβάνονται από έναν μικροεπεξεργαστή. Τα σήματα ελέγχου της τάσης και του ρεύματος μπορούν να ληφθούν από τις τρεις φάσεις, την είσοδο, κάθε διακόπτη, ή από οποιαδήποτε άλλη θέση, ανάλογα με τον σχεδιασμό. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ψηφιακά σήματα από άλλους αισθητήρες. Επίσης, οδηγίες και πληροφορίες μπορούν να σταλούν και να

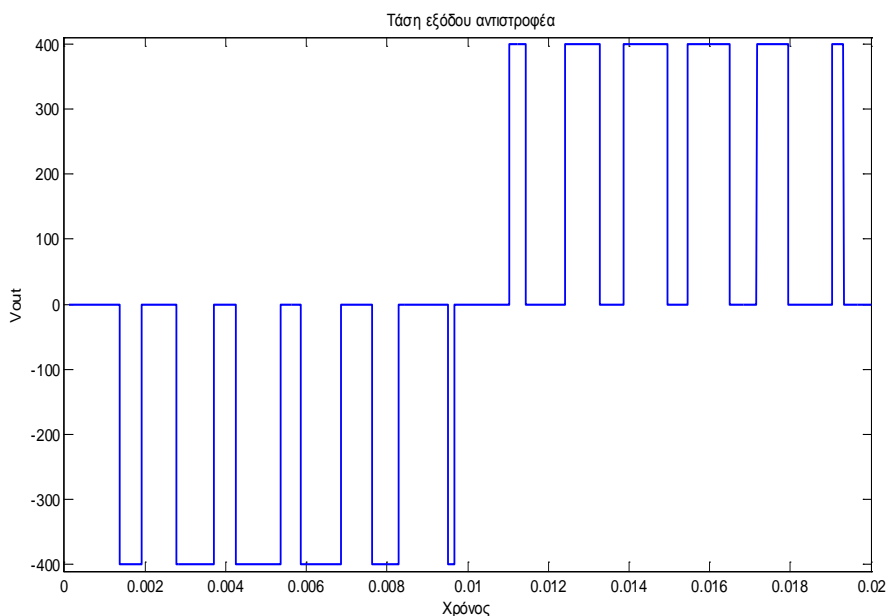
παραληφθούν από άλλα μέρη του συστήματος. Η χρήση αυτών των πληροφοριών μπορεί να είναι διαφορετική σε κάθε περίπτωση, αλλά το υλικό θα είναι ουσιαστικά το ίδιο.

Οι διακόπτες θα ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος, αλλά ο ίδιος ελεγκτής θα μπορούσε να είναι κατάλληλος για ένα μεγάλο εύρος ισχύων. Οι ίδιοι αντιστροφείς, αλλά με διαφορετικό προγραμματισμό, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές εφαρμογές όπως στις κυψέλες καυσίμου, τα φωτοβολταϊκά πάρκα, τις ανεμογεννήτριες και πολλές άλλες διανεμημένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

4.3 Τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM)

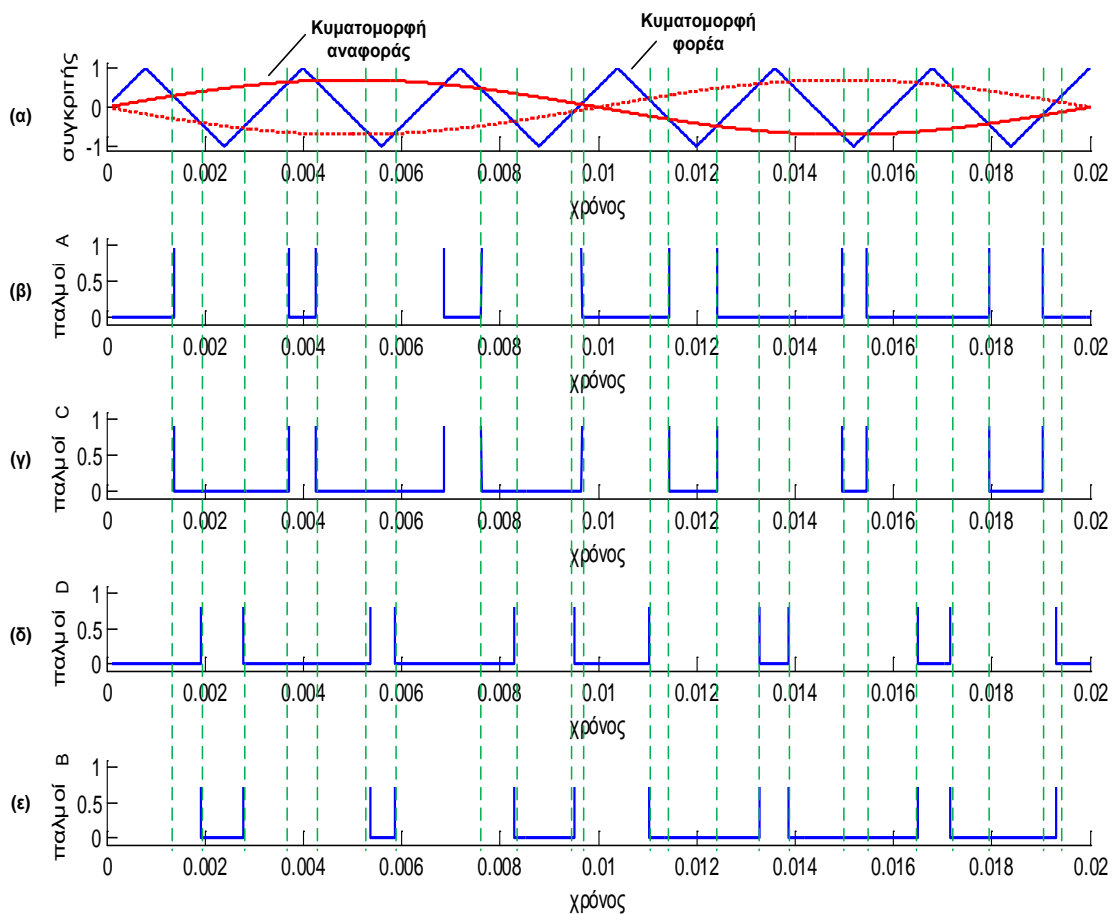
Όπως είδαμε, η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα για τον έλεγχο της τάσης εξόδου των αντιστροφέων. Παρακάτω περιγράφεται πιο αναλυτικά μια υποπερίπτωση της μεθόδου αυτής, που είναι η ημιτονοειδής διαμόρφωση πλάτους παλμών (SPWM) [7],[16].

Η τάση εξόδου ενός αντιστροφέα που χρησιμοποιεί την SPWM έχει την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 4.8: Τάση εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας που ελέγχεται με την τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών.

Όπως βλέπουμε η κυματομορφή αρχίζει με παλμούς μικρού εύρους (το πλάτος είναι πάντοτε σταθερό) και όσο πλησιάζει το $\frac{1}{2}$ της ημιπεριόδου οι παλμοί αυτοί έχουν μεγαλύτερο εύρος (άρα και μεγαλύτερη μέση τιμή), όπως συμβαίνει και με μία ημιτονοειδή κυματομορφή. Επομένως, η κυματομορφή αυτή περιέχει λιγότερες παρασιτικές συνιστώσες σε σχέση με την αντίστοιχη έξοδο του αντιστροφέα αν είχε χρησιμοποιηθεί έλεγχος με τετραγωνικούς παλμούς, και κατά συνέπεια ο αντιστροφέας χρειάζεται μικρότερο φίλτρο εξόδου. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί αναλύοντας την κυματομορφή του σχήματος 4.8 με σειρές Fourier. Στο σχήμα 4.9(β)-(ε) παρουσιάζονται οι παλμοί οδήγησης των ημιαγωγών διακοπών του αντιστροφέα του σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.9: Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών για τον μονοφασικό αντιστροφέα του σχήματος 4.1

- (α) Σύγκριση της κυματομορφής αναφοράς με την κυματομορφή φορέα,
- (β) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη A,
- (γ) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη C,
- (δ) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη D,
- (ε) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη B.

Στην SPWM λοιπόν, το πλάτος κάθε παλμού μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος ενός ημιτονοειδούς κύματος τοποθετημένο στο κέντρο του ίδιου παλμού. Ο συντελεστής παραμόρφωσης και οι αρμονικές μικρότερης τάξης μειώνονται σημαντικά. Τα σήματα έναυσης όπως φαίνονται και στο σχήμα 4.9(α) παράγονται με σύγκριση ενός ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς με ένα τριγωνικό κύμα φορέα συχνότητας f_c . Η συχνότητα του σήματος αναφοράς f_r καθορίζει την συχνότητα εξόδου του αντιστροφέα f_o και το μέγιστο πλάτος του A_f , ελέγχει τον δείκτη διαμόρφωσης M_f και κατά συνέπεια την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου V_o . Ο αριθμός παλμών ανά ημιπερίοδο εξαρτάται από την συχνότητα του φορέα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η συχνότητα του φέροντος είναι 312Hz (τριγωνικοί παλμοί) ενώ η συχνότητα της συνάρτησης αναφοράς (ημίτονο) είναι 50Hz, όσα δηλαδή θέλουμε να έχει και η τελική τάση εξόδου.

Η ενεργός τάση εξόδου μπορεί να μεταβληθεί με μεταβολή του δείκτη διαμόρφωσης $M_f = \frac{A_{αναφ.}}{A_{τριγ.}}$. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η περιοχή κάθε παλμού αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στην περιοχή κάτω από το ημιτονοειδές κύμα μεταξύ γειτονικών μέσων σημείων των περιόδων αποκοπής στα σήματα έναυσης και σβέσης.

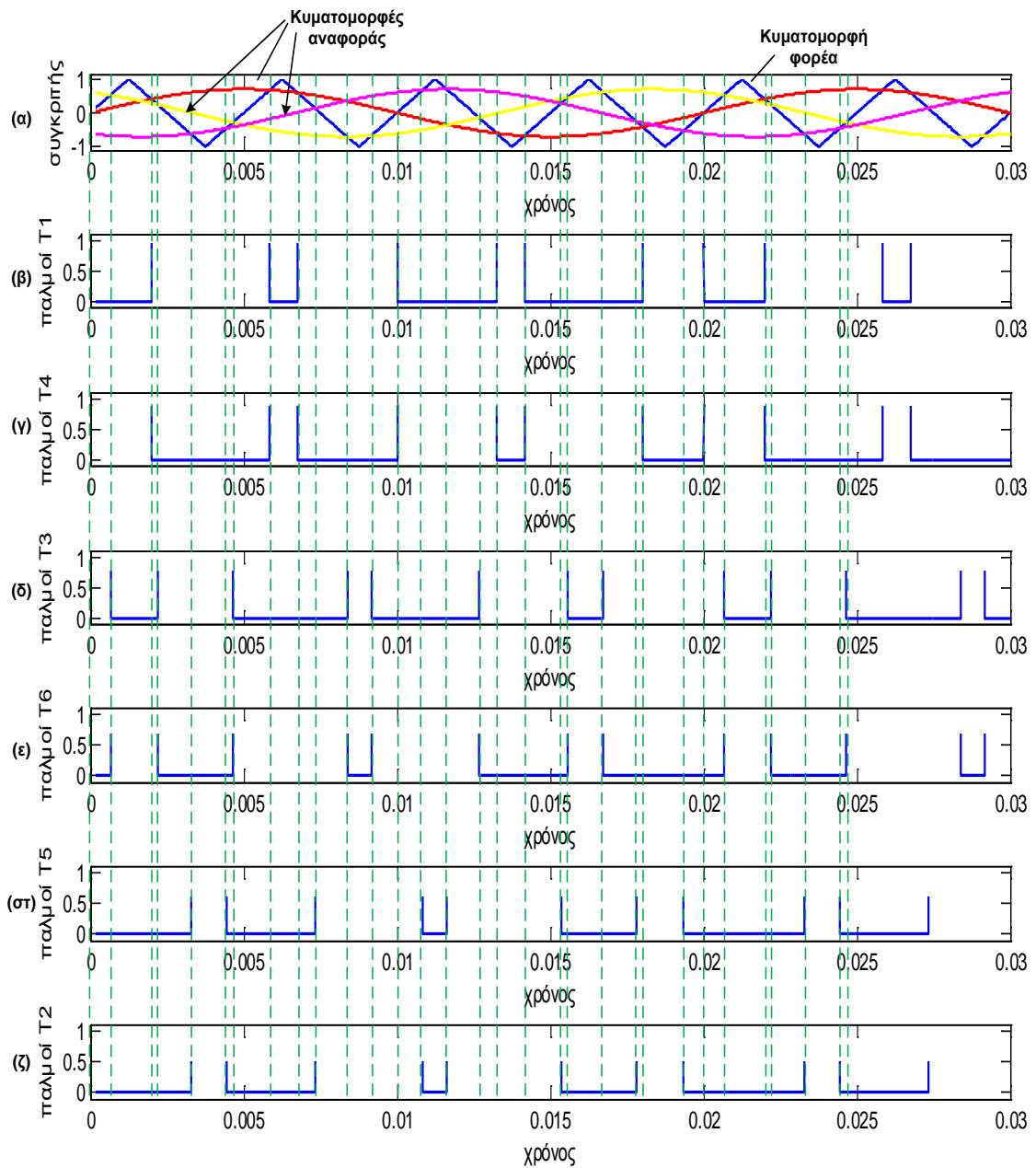
Η τάση εξόδου ενός αντιστροφέα όπως είπαμε περιέχει αρμονικές. Η ημιτονοειδής διαμόρφωση πλάτους παλμού όμως ωθεί τις αρμονικές σε μια περιοχή υψηλών συχνοτήτων γύρω από την διακοπτική συχνότητα f_c και τα πολλαπλάσια της, δηλαδή, αρμονικές κοντά στις τάξεις $m_f, 2m_f, 3m_f$ κτλ. Οι συχνότητες στις οποίες οι αρμονικές τάσης εμφανίζονται μπορούν να σχετισθούν με την σχέση : $d = 2F_{nc} \pm k$ για τον μονοφασικό αντιστροφέα και με την σχέση $d = F_{nc} \pm k$ για τον τριφασικό αντιστροφέα.

Η μέγιστη τιμή της θεμελιώδους της τάσης εξόδου για έλεγχο PWM και SPWM μπορεί να βρεθεί προσεγγιστικά από τη σχέση: $V_{m1} = m_f V_{in}$, για $0 \leq m_f \leq 1$. Για $m_f = 1$ η προηγούμενη σχέση δίνει το μέγιστο πλάτος της θεμελιώδους τάσης εξόδου σαν $V_{m1(max)} = V_{in}$. Αλλά η $V_{m1(max)}$ μπορεί να γίνει ίση με $\frac{4V_s}{\pi} = 1.278V_s$ για ορθογωνική έξοδο.

Για να αυξηθεί η θεμελιώδης της τάσης εξόδου, η m_f πρέπει να αυξηθεί πάνω από 1. Η λειτουργία με m_f μεγαλύτερο του 1 λέγεται υπερδιαμόρφωση. Η υπερδιαμόρφωση βασικά οδηγεί σε λειτουργία ορθογωνικού κύματος και προσθέτει περισσότερες αρμονικές σε σχέση με την λειτουργία στην γραμμική περιοχή (m_f μικρότερο του 1). Η υπερδιαμόρφωση αποφεύγεται σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή παραμόρφωση πχ. τροφοδοτικά αδιάλειπτης παροχής.

Για τον τριφασικό αντιστροφέα του σχήματος 4.4 οι παλμοί έναυσης φαίνονται στο σχήμα 4.10. Σαν αναφορά χρησιμοποιώ 3 ημιτονοειδείς κυματομορφές με διαφορά φάσης 120°

μεταξύ τους και συχνότητα 50Hz, ενώ σαν φορέα χρησιμοποιώ έναν τριγωνικό παλμό συχνότητας 200Hz.



**Σχήμα 4.10: Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών για τον τριφασικό αντιστροφέα του σχήματος 4.4
(α) Σύγκριση των κυματομορφών αναφοράς με την κυματομορφή φορέα,**

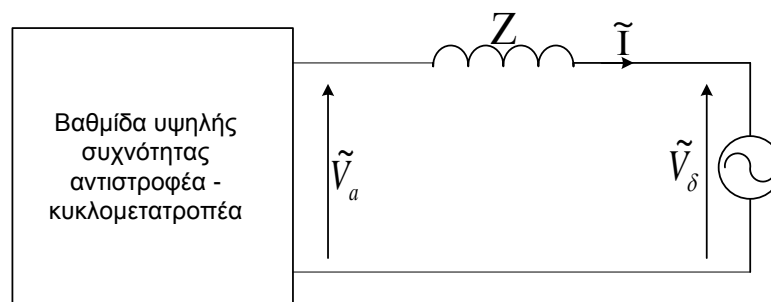
- (β) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη T1,**
- (γ) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη T4,**
- (δ) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη T3,**
- (ε) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη T6,**
- (στ) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη T5,**
- (ζ) Παλμοί έναυσης του ημιαγωγού διακόπτη T2.**

4.4 Διασύνδεση με το δίκτυο διανομής

Δεν είναι αρκετό απλά να παράγουμε την ηλεκτρική ενέργεια με μορφή εναλλασσόμενου ρεύματος και να συνδέσουμε τη γεννήτρια με το δίκτυο. Οποιοδήποτε ιδιωτικό σύστημα πρέπει να προσαρμοστεί σε ορισμένα πρότυπα προτού να λάβει την άδεια να παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει, στο δίκτυο διανομής. Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς που πρέπει να τηρεί είναι τα επίπεδα των αρμονικών. Εντούτοις, πρέπει επίσης να υπάρξουν και συστήματα προστασίας για να προστατεύσουν την κυψέλη καυσίμου, τον αντιστροφέα, και το δίκτυο από τις βλάβες όπως τα βραχυκυκλώματα και οι υπερτάσεις.

4.4.1 Ροή ισχύος

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η τοπολογία που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει την ικανότητα αμφίδρομης ροής της ισχύος ώστε οι κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας να μπορούν να αποδώσουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο κατά την φάση της κατανάλωσης υδρογόνου, αλλά και να απορροφήσουν ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο (σε ώρες μειωμένης ζήτησης) για την παραγωγή υδρογόνου. Για να γίνει η σύνδεση της παρούσας τοπολογίας με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος, θα πρέπει μετά την βαθμίδα του κυκλομετατροπέα να τοποθετηθεί μία σύνθετη αντίσταση προσαρμογής, που στις περισσότερες των περιπτώσεων θεωρούμε μόνο την αντίδραση και ονομάζεται πηνίο διασύνδεσης [26]-[27].



Σχήμα 4.11: Ισοδύναμο κύκλωμα της διασύνδεσης του dc-ac μετατροπέα (βαθμίδα υψηλής συχνότητας αντιστροφέα – κυκλομετατροπέα) με το δίκτυο διανομής.

Θεωρώντας την τάση δικτύου ως αναφορά, δηλαδή τάση με μηδενική γωνία, και εφαρμόζοντας νόμο τάσεων Kirchoff ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\tilde{V}_a = \tilde{I} \cdot \tilde{Z} + \tilde{V}_\delta \Rightarrow |V_a| e^{j\delta} = j \cdot \tilde{I} \cdot \omega L + |V_\delta| \Rightarrow \tilde{I} = \frac{|V_a| \sin \delta}{\omega L} + j \frac{(|V_\delta| - |V_a| \cos \delta)}{\omega L} \quad (4.1)$$

Φαινόμενη ισχύς του μετατροπέα προς το δίκτυο:

$$\tilde{S} = \tilde{V} \cdot \tilde{I}^* \Rightarrow \tilde{S} = |V_\delta| \cdot \tilde{I}^* = \frac{|V_\alpha| \cdot |V_\delta| \sin \delta}{\omega L} - j \cdot \frac{|V_\delta|^2 - |V_\alpha| \cdot |V_\delta| \cos \delta}{\omega L} \quad (4.2)$$

Φαινόμενη ισχύς του δικτύου προς τον μετατροπέα:

$$\tilde{S} = \tilde{V} \cdot \tilde{I}^* \Rightarrow \tilde{S} = |V_\alpha| \cdot \tilde{I}^* = \frac{|V_\alpha| \cdot |V_\delta| \sin \delta}{\omega L} - j \cdot \frac{|V_\alpha|^2 - |V_\alpha| \cdot |V_\delta| \cos \delta}{\omega L} \quad (4.3)$$

Ενεργός ισχύς:

$$P = \frac{|V_\alpha| \cdot |V_\delta| \sin \delta}{\omega L} \quad (4.4)$$

Άεργος ισχύς στην πλευρά του δικτύου:

$$Q = -\frac{|V_\delta|^2 - |V_\alpha| \cdot |V_\delta| \cos \delta}{\omega L} \quad (4.5)$$

Άεργος ισχύς στην πλευρά του μετατροπέα:

$$Q = -\frac{|V_\alpha|^2 - |V_\alpha| \cdot |V_\delta| \cos \delta}{\omega L} \quad (4.6)$$

Όπου, V_α η τάση εξόδου του μετατροπέα και V_δ η φασική τάση του δικτύου.

Βασική επιδίωξη κατά τη λειτουργία του συστήματος είναι η πλήρης εκμετάλλευση της ενεργού ισχύος που παράγουν οι κυψέλες καυσίμου. Επιπλέον ζητείται η ανταλλαγή σταθερής ποσότητας άεργου ισχύος η οποία θα μεταβάλλεται μόνο κατόπιν σχετικής εντολής. Τέλος, απαραίτητη προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία είναι η διατήρηση σταθερής τάσης στην έξοδο του dc-dc μετατροπέα (τάση πυκνωτή εξομάλυνσης). Τα παραπάνω μεταφράζονται στις ακόλουθες σχέσεις:

$$P = V_c' \cdot I_2 = \frac{|V_\alpha| \cdot |V_\delta| \sin \delta}{\omega L} \quad (4.7)$$

$$Q = -\frac{|V_\delta|^2 - |V_\alpha| \cdot |V_\delta| \cos \delta}{\omega L} = c_1 \Rightarrow |V_\alpha| \cdot \cos \delta = c_2 \quad (4.8)$$

$$|V_\alpha| = \frac{V_c' \cdot M_f}{\sqrt{2}} \quad (4.9)$$

Όπου c_1, c_2 παράμετροι εκ των οποίων η c_2 θα επιλέγεται ανάλογα με την επιθυμητή ποσότητα άεργου ισχύος. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.8) και (4.9) προκύπτει:

$$\frac{V_c' \cdot M_f}{\sqrt{2}} \cdot \cos \delta = c_2 \Rightarrow \cos \delta = \frac{c_2 \cdot \sqrt{2}}{V_c' \cdot M_f} \quad (4.10)$$

Επιπλέον από τη (4.7) προκύπτει:

$$\sin \delta = \frac{V_c' \cdot I_2 \cdot \omega L}{|V_\delta| \cdot \frac{V_c' \cdot M_f}{\sqrt{2}}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \omega L}{|V_\delta| \cdot M_f} \quad (4.11)$$

Υψώνοντας στο τετράγωνο τις σχέσεις (4.10) – (4.11) προκύπτει η σχέση υπολογισμού του συντελεστή διαμόρφωσης:

$$M_f = \sqrt{2 \left(\frac{c_2^2}{V_c'^2} + \frac{I_2^2 \omega^2 L^2}{|V_\delta|^2} \right)} \quad (4.12)$$

Από τις σχέσεις (4.10) και (4.12) υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή η γωνία και ο συντελεστής διαμόρφωσης ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις που ετέθησαν παραπάνω. Η V/c στις παραπάνω σχέσεις δεν είναι η πραγματική τάση των πυκνωτών (τάση εισόδου του αντιστροφέα), αλλά η τάση αναφοράς 96 Volt στην οποία επιδιώκεται να σταθεροποιηθεί η τάση των πυκνωτών. Στην ουσία δηλαδή η βαθμίδα του αντιστροφέα - κυκλομετατροπέα σε συνδυασμό με το δίκτυο και το πηνίο διασύνδεσης μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σύνθετο φορτίο το οποίο προσαρμόζεται με βάση τις παραπάνω σχέσεις ούτως ώστε για δεδομένο ρεύμα να αναπτύσσεται πάντα τάση στην είσοδο του αντιστροφέα ίση με 96 Volt.

Η επιλογή του πηνίου διασύνδεσης επηρεάζει και τον συντελεστή διαμόρφωσης με τρόπο που περιγράφεται από τη σχέση (4.12). Ο συντελεστής διαμόρφωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερος του μηδενός και δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να ξεπερνάει τη μονάδα. Είναι προτιμότερο να μην υπερβαίνει ούτε το 0.9 ώστε να υπάρχει ένα περιθώριο ασφαλείας. Για τάση εισόδου του αντιστροφέα $V_c = 96\text{Volt}$, ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα που δεν ξεπερνά τα 2A ($= I_{2\max}$), τάση δικτύου $V_\delta = 230\text{ Volt}$ και το συντελεστής διαμόρφωσης να πρέπει να κυμαίνεται από 0.1 έως 0.9, από την ανισότητα (4.13) προκύπτει το ανώτατο όριο για την επιλογή του πηνίου.

$$\sin \delta = \frac{\sqrt{2} \cdot I_2 \cdot \omega L}{|V_\delta| \cdot M_f} \leq 1 \quad (4.13)$$

Για συντελεστή διαμόρφωσης εντός των ορίων το πηνίο διασύνδεσης θα έχει μέγιστη τιμή 380mH .

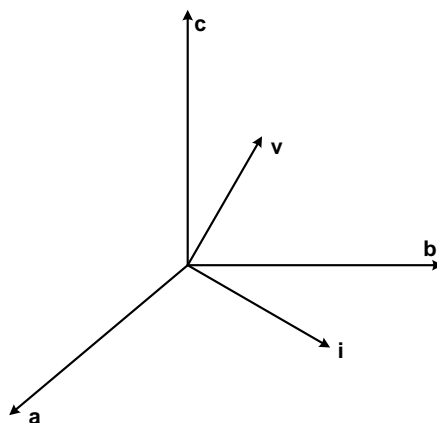
4.4.2 Ορθογωνική ανάλυση τριφασικών συνιστωσών

Αν θεωρήσουμε ότι v_a , v_b , v_c και i_a , i_b , i_c είναι οι στιγμιαίες τιμές των τάσεων και των ρευμάτων αντίστοιχα, τότε μπορούν να εκφραστούν με τα παρακάτω στιγμιαία διανύσματα χώρου:

$$\bar{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} , \quad \bar{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Εφόσον τα φορτία που μελετάμε είναι μη γραμμικά, το ρεύμα θα αποτελείται πλην της θεμελιώδους και από ανώτερες αρμονικές. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μαθηματικά εργαλεία, όπως η ορθογωνική ανάλυση του ρεύματος στο πεδίο του χρόνου (ή της συχνότητας), που προτάθηκε από τον L.S. Czarnecki.

Με αυτή την τεχνική, είναι δυνατόν να διαχωρίσουμε τις συνιστώσες του v ρεύματος σε αυτές που είναι αναγκαίες για την μεταφορά ενέργειας και σε αυτές που δεν συνεισφέρουν, προκαλώντας μόνο πρόσθετες απώλειες. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι συνιστώσες των τριών φάσεων, οι οποίες είναι αμοιβαίως κάθετες και αντιστοιχούν στις φάσεις a, b και c αντίστοιχα [28].



Σχήμα 4.12: Σύστημα τριφασικών συντεταγμένων.

- **Στιγμιαία ενεργός ισχύς:**

Η στιγμιαία ενεργός ισχύς p , δίνεται από το εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων \bar{v} και \bar{i} , δηλαδή:

$$p = \bar{v} \cdot \bar{i} \quad \text{ή} \quad p = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \quad (4.15)$$

- **Στιγμιαία άεργος ισχύς:**

Η στιγμιαία άεργος ισχύς \bar{q} , δίνεται από το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων \bar{v} και \bar{i} , δηλαδή:

$$\bar{q} = \bar{v} \times \bar{i} = [q_a \ q_b \ q_c]^T = \begin{bmatrix} v_b & v_c & | & v_c & v_a & | & v_a & v_b \\ i_b & i_c & | & i_c & i_a & | & i_a & i_b \end{bmatrix}^T \quad (4.16)$$

Κατά τον ίδιο τρόπο, μπορούμε να ορίσουμε το στιγμιαίο ενεργό ρεύμα, i_p , το στιγμιαίο άεργο ρεύμα, i_q , την στιγμιαία άεργο φαινόμενη ισχύ, s και τον στιγμιαίο συντελεστή, λ , ως εξής:

$$i_p = [i_{ap} \ i_{bp} \ i_{cp}]^T = \frac{p}{\bar{v} \cdot \bar{v}} \cdot v \quad (4.17)$$

$$i_q = [i_{aq} \ i_{bq} \ i_{cq}]^T = \frac{\bar{q} \times \bar{v}}{\bar{v} \cdot \bar{v}} \quad (4.18)$$

$$s = \bar{v} \cdot \bar{i} \quad \text{και} \quad \lambda = \frac{p}{s} \quad (4.19)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η στιγμιαία ενεργός ισχύς κάθε φάσης μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα.

$$\begin{cases} p_a = \bar{v}_a \cdot \bar{i}_a = \bar{v}_a \cdot (\bar{i}_{ap} + \bar{i}_{aq}) = p_{ap} + p_{aq} \\ p_b = \bar{v}_b \cdot \bar{i}_b = \bar{v}_b \cdot (\bar{i}_{bp} + \bar{i}_{bq}) = p_{bp} + p_{bq} \\ p_c = \bar{v}_c \cdot \bar{i}_c = \bar{v}_c \cdot (\bar{i}_{cp} + \bar{i}_{cq}) = p_{cp} + p_{cq} \end{cases} \quad (4.20)$$

Δεδομένου ότι ισχύει $p = \bar{v} \cdot \bar{i} = \bar{v} \cdot \bar{i}_p$, $\bar{v} \cdot \bar{i}_q = 0$ και $\bar{q} = \bar{v} \cdot \bar{i}_q$, είναι φανερό ότι, τα μεγέθη p_{ap} , p_{bp} και p_{cp} συνεισφέρουν στην ολική ενεργό ισχύ p , και το άθροισμα τους

ισούται με $p = p_{ap} + p_{bp} + p_{cp}$. Αντίθετα, τα τμήματα της ισχύος p_{aq} , p_{bq} και p_{cq} συνεισφέρουν στην στιγμιαία άεργο ισχύ \bar{q} , δηλαδή αντιστοιχούν στις ισχύς που μεταφέρο και ή κυκλοφορούν μεταξύ των τριών φάσεων, χωρίς να συμμετέχουν στην μεταφορά ισχύος μεταξύ της πηγής και του φορτίου, με το διάνυσμα \bar{q} να υποδεικνύει το πλάτος και το πρόσημο. Για παράδειγμα, η ισχύς p_{aq} δίνει την ποσότητα της ισχύος που κυκλοφορεί μεταξύ της φάσης b και c, και το πρόσημο αντιστοιχεί σε επαγωγικό (+) ή χωρητικό (-) φορτίο.

4.4.3 Τροποποιημένη p-q θεωρία

Τα νέα αυτά μεγέθη είναι δυνατό να εκφραστούν σε διαφορετικές συντεταγμένες, όπως για παράδειγμα τις $\alpha\beta 0$ [28]. Για τάσεις και ρεύματα σε τριφασικό σύστημα οι συνιστώσες των αξόνων α , β και 0 εκφράζονται ως εξής (μετασχηματισμός Clarke):

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = [C] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

όπου,

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Στην τροποποιημένη p-q θεωρία ορίζονται τρία μεγέθη στιγμιαίας άεργης ισχύος, όπως προκύπτει από το εξωτερικό γινόμενο του διανύσματος της τάσης \bar{v} και του ρεύματος \bar{i} . Αντίθετα, η στιγμιαία ενεργός ισχύς ισούται με το μέτρο του εσωτερικού γινομένου των ίδιων διανυσμάτων. Δηλαδή,

$$p = \bar{v} \cdot \bar{i} = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta + v_0 \cdot i_0 \quad (4.23)$$

$$\bar{q} = \bar{v} \times \bar{i} = [q_\alpha \quad q_\beta \quad q_0]^T = \begin{bmatrix} \left| \begin{matrix} v_\beta & v_0 \\ i_\beta & i_0 \end{matrix} \right| & \left| \begin{matrix} v_0 & v_\alpha \\ i_0 & i_\alpha \end{matrix} \right| & \left| \begin{matrix} v_\alpha & v_\beta \\ i_\alpha & i_\beta \end{matrix} \right| \end{bmatrix}^T \quad (4.24)$$

Οι στιγμιαίες ισχύς (ενεργός και άεργος) μπορούν να εκφραστούν μέσω ενός συνοπτικού πίνακα ως εξής:

$$\begin{bmatrix} p \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & v_0 \\ 0 & -v_0 & v_\beta \\ v_0 & 0 & -v_\alpha \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός της εξίσωσης (4.25) μας δίνει:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & 0 & v_0 & -v_\beta \\ v_\beta & -v_0 & 0 & v_\alpha \\ v_0 & v_\beta & -v_\alpha & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

όπου, $v_{\alpha\beta 0}^2 = v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2$.

Μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Clarke, που ακολουθεί, μετατρέπουμε τα ρεύματα αναφοράς από το σύστημα συντεταγμένων αβ0 στο τριφασικό σύστημα abc, με σκοπό την κατάλληλη παραγωγή παλμών για τον έλεγχο των διακοπών.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Από την εξίσωση (4.26) μπορούν να εξαχθούν και οι εκφράσεις των ενεργών και άεργων συνιστωσών των ρευμάτων i_α , i_β και i_0 , οι οποίες φαίνονται παρακάτω:

- Στιγμιαίο ενεργό ρεύμα στον άξονα α: $i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta 0}^2} \cdot p$ (4.28)

- Στιγμιαίο άεργο ρεύμα στον άξονα α: $i_{\alpha q} = \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}^2} \cdot q_\beta - \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta 0}^2} \cdot q_0$ (4.29)

- Στιγμιαίο ενεργό ρεύμα στον άξονα β: $i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta 0}^2} \cdot p$ (4.30)

- Στιγμιαίο άεργο ρεύμα στον άξονα β: $i_{\beta q} = \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta 0}^2} \cdot q_0 - \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}^2} \cdot q_\alpha$ (4.31)

- Στιγμιαίο ενεργή ομοπολική συνιστώσα ρεύματος: $i_{0p} = \frac{v_0}{v_{\alpha\beta 0}^2} \cdot p$ (4.32)

- Στιγμαϊό άεργη ομοπολική συνιστώσα ρεύματος: $i_{0q} = \frac{V_\beta}{V_{\alpha\beta 0}^2} \cdot q_\alpha - \frac{V_\alpha}{V_{\alpha\beta 0}^2} \cdot q_\beta$ (4.33)

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (4.28) – (4.33), στην τροποποιημένη p-q θεωρία, οι ομοπολικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος δεν διαχωρίζονται από τις αβ, όπως συμβαίνει στην αρχική p-q θεωρία. Θεωρούμε, δηλαδή, ότι έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τις αβ συνιστώσες, γεγονός που αποτελεί την θεμελιακή διαφορά ανάμεσα στις δύο μεθόδους, καθώς η συνεισφορά τους δεν περιορίζεται μόνο στην ενεργό στιγμιαία ισχύ, αλλά και στην άεργο.

4.4.4 Φυσική σημασία ισχύων στην τροποποιημένη p-q θεωρία.

Εφόσον για τον πίνακα $[C]$ που ορίστηκε στην εξίσωση (4.22) ισχύει ότι $[C]^{-1} = [C]^T$ μπορούμε να αποδείξουμε τις παρακάτω σχέσεις [28]:

$$p = \bar{v}_{(abc)} \cdot \bar{i}_{(abc)} = \bar{v}_{(\alpha\beta 0)} \cdot \bar{i}_{(\alpha\beta 0)} \quad (4.34)$$

$$\bar{q}_{(\alpha\beta 0)} = \bar{v}_{(\alpha\beta 0)} \times \bar{i}_{(\alpha\beta 0)} = ([C] \cdot \bar{v}_{(abc)}) \times ([C] \cdot \bar{i}_{(abc)}) = [C] \cdot (\bar{v}_{(abc)} \times \bar{i}_{(abc)}) = [C] \cdot \bar{q}_{(abc)} \quad (4.35)$$

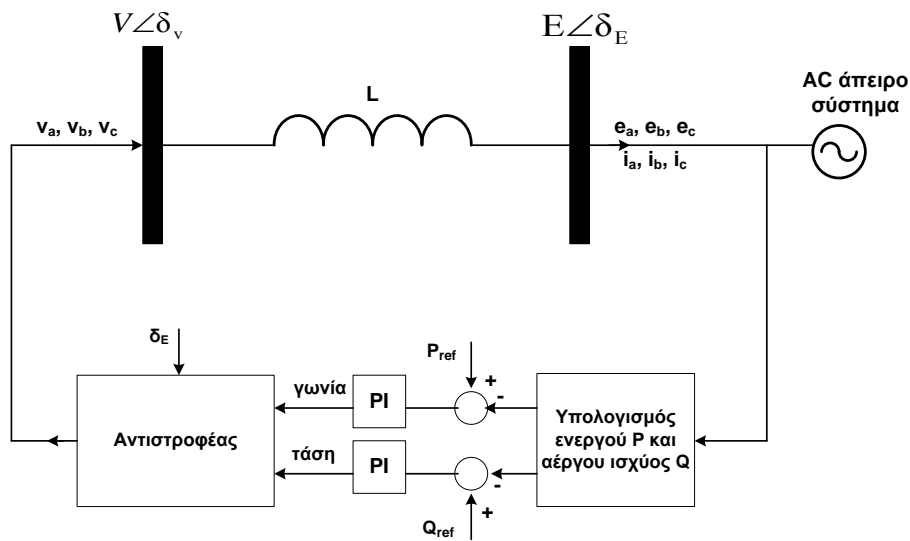
$$\text{Επειδή ισχύει ότι } \|[C]\| = 1, \text{ έχουμε: } q_{(\alpha\beta 0)} = \|\bar{q}_{(\alpha\beta 0)}\| = q_{(abc)} = \|\bar{q}_{(abc)}\| \quad (4.36)$$

Δηλαδή, η άεργος ισχύς $q_{(\alpha\beta 0)}$ εκφρασμένη στις συντεταγμένες αβ0, είναι ίδια με την άεργη ισχύ $q_{(abc)}$, με την δεύτερη να είναι εκφρασμένη στο τριφασικό σύστημα. Οπότε, η φυσική σημασία της άεργου ισχύος δεν εξαρτάται από το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιούμε. Όπως είναι φανερό από την εξίσωση (4.34), και η έκφραση της ενεργού ισχύος παραμένει η ίδια ανεξαρτήτως συστήματος συντεταγμένων.

Όπως προαναφέρθηκε, η ενεργός και η άεργος ισχύς είναι το άθροισμα μιας μέσης (dc) και μιας κυμαινόμενης (ac) συνιστώσας, δηλαδή ισχύει ότι $p = \bar{p} + \tilde{p}$ και $\|\bar{q}\| = \bar{q} + \tilde{q}$.

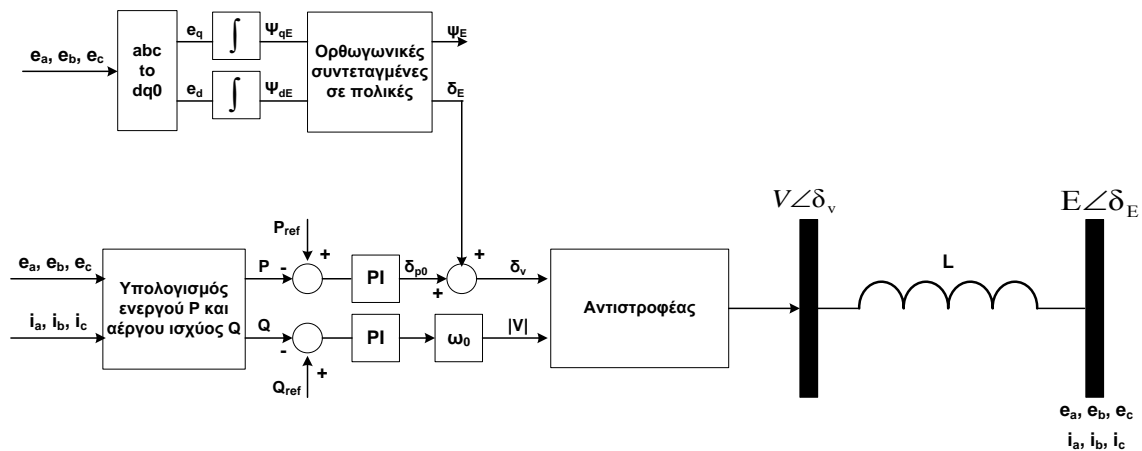
4.4.5 PQ έλεγχος αντιστροφεία.

Η βασική δομή ενός ελεγκτή PQ φαίνεται στο επόμενο σχήμα [29]. Στο σχήμα αυτό η ενεργός και η άεργος ισχύς ελέγχονται ξεχωριστά από δύο PI ελεγκτές, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για να παράγουν τις κατάλληλες τιμές για την τάση V και την γωνία δ_v βασισμένες στις στιγμιαίες τιμές της τάσης και του ρεύματος στον ζυγό που συνδέεται με το άπειρο δίκτυο.



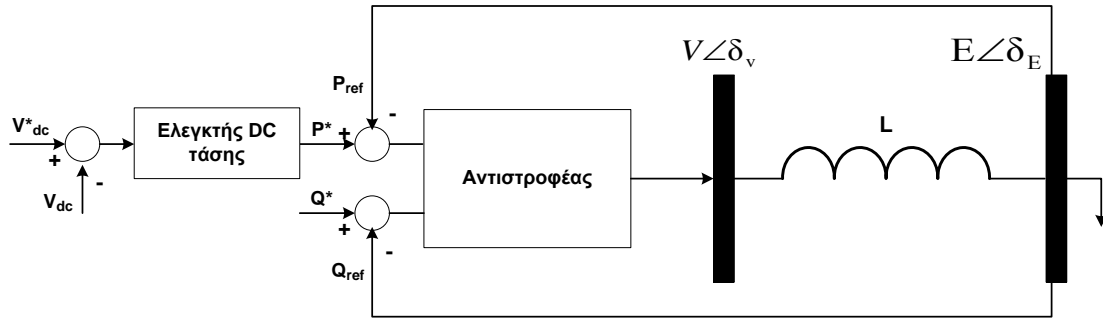
Σχήμα 4.13: Βασική δομή του PQ ελέγχου αντιστροφεία.

Ένα πιο επεξηγηματικό σχήμα του PQ ελέγχου φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4.14: Αναλυτική δομή του PQ ελέγχου αντιστροφεία.

Εάν δεν μεταφέρεται καθόλου ενέργεια από το dc προς το ac σύστημα, η μέση τάση στον πυκνωτή της dc πλευράς θα αυξηθεί υπερβολικά. Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται ένας ελεγκτής για να κρατήσει σταθερή την τάση στον πυκνωτή και να εγχύσει επιπλέον ισχύ στο ac σύστημα. Όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα, η έξοδος αυτού του ελεγκτή θα παράγει την αναφορά της ενεργού ισχύος για τον έλεγχο του αντιστροφεία.



Σχήμα 4.15: PQ έλεγχος αντιστροφέα λαμβάνοντας υπόψη και την ρύθμιση της dc τάσης.

4.4.6 PV έλεγχος αντιστροφέα.

Το ίδιο μοντέλο που αναλύθηκε παραπάνω για τον PQ έλεγχο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και όταν ο ελεγκτής έχει να επιτηρεί την ενεργό ισχύ P και την τάση E του δικτύου [29]. Όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα ο βρόχος ενεργού ισχύος θα είναι ίδιος με την προηγούμενη περίπτωση, ενώ ένας PI ελεγκτής αναλαμβάνει να ρυθμίσει το πλάτος της τάσης που θα παραγάγει ο αντιστροφέας. Η τάση V περιορίζεται από μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν από την μέγιστη και την ελάχιστη ποσότητα αέργου ισχύος που εγχέεται στο δίκτυο, αντίστοιχα. Όταν η τάση E πέσει, ο αντιστροφέας πρέπει να εγχύσει άεργο ισχύ, αυξάνοντας την τιμή της τάσης V. Η μέγιστη τιμή της τάσης V_{max} είναι απαραίτητη όταν ο αντιστροφέας εγχέει μέγιστη άεργο ισχύ και μηδενική ενεργό ισχύ. Η μηδενική έγχυση ενεργού ισχύος συνεπάγεται $\delta_V = \delta_E$ ή $\cos(\delta_V - \delta_E) = 1$, άρα θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$Q_{max} = \frac{V_{max}^2 - V_{max} E^*}{\omega L} \quad (4.37)$$

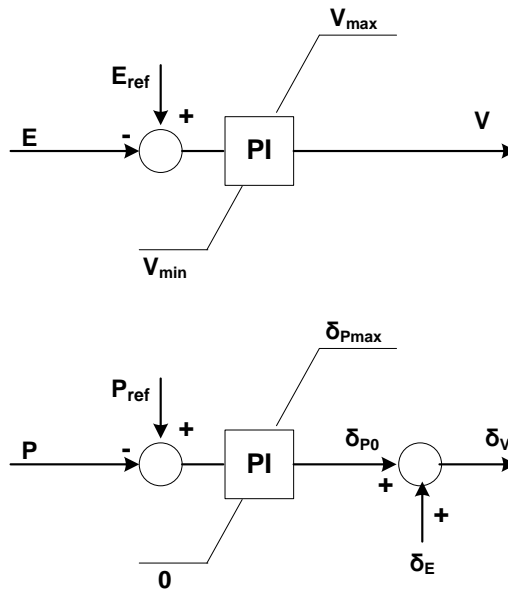
Λύνοντας ως προς V_{max} προκύπτει:

$$V_{max} = \frac{E^* \pm \sqrt{E^{*2} + 4Q_{max} L \omega}}{2} \quad (4.38)$$

Η τιμή για το V_{min} προκύπτει με παρόμοιο τρόπο:

$$V_{min} = \frac{E^* \pm \sqrt{E^{*2} + 4Q_{min} L \omega}}{2} \quad (4.39)$$

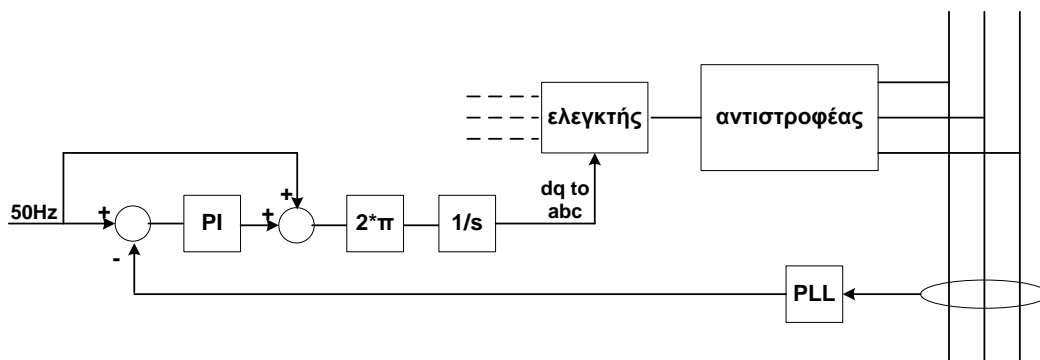
όπου το Q_{min} αντιπροσωπεύει την ελάχιστη τιμή όταν η διάταξη λειτουργεί σαν πηνίο. Αυτή η λειτουργία είναι απαραίτητη όταν η τάση του δικτύου είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή τιμή.



Σχήμα 4.16: PV έλεγχος αντιστροφέα.

4.4.7 Vf έλεγχος αντιστροφέα.

Και σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται δύο βρόχοι [29]. Ο έλεγχος της τάσης είναι πάνω κάτω ο ίδιος όπως και στην περίπτωση του PV ελέγχου. Ο ελεγκτής της συχνότητας μπορεί επίσης να είναι ένας PI ελεγκτής που έχει σαν είσοδο την διαφορά της συχνότητας του δικτύου από τα 50 Hz. Όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα, η συχνότητα του συστήματος μετράται με ένα PLL (phase lock loop).



Σχήμα 4.17: Vf έλεγχος αντιστροφέα.

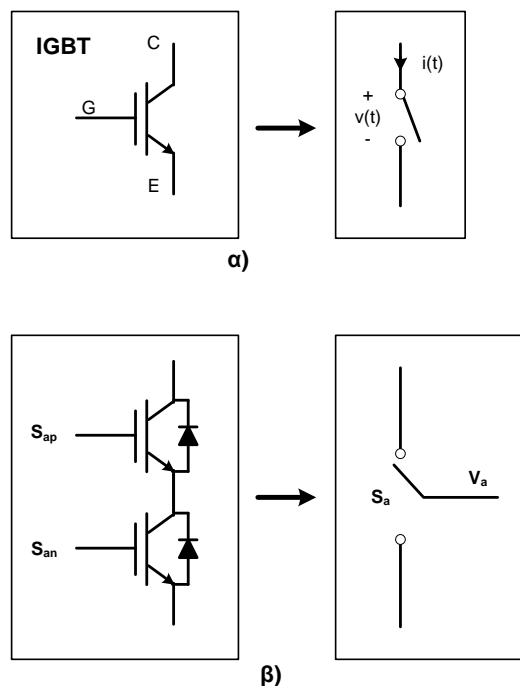
4.5 Μοντελοποίηση διαφόρων φάσεων λειτουργίας αντιστροφέα.

4.5.1 Μοντελοποίηση των διακοπών της γέφυρας.

Η συνηθισμένη τοπολογία πλήρους γέφυρας ενός μονοφασικού αντιστροφέα αποτελείται από δύο κλάδους, ο κάθε ένας από τους οποίους περιλαμβάνει δύο ημιαγωγούς διακόπτες σε σειρά συνδεδεμένους μεταξύ τους [30]. Κρίνοντας από την λειτουργία τους, κάθε ημιαγωγός διακόπτης (που για τις εφαρμογές που εξετάζουμε, είναι σχεδόν πάντα IGBT) μπορεί να αντικατασταθεί από έναν μονοπολικό ιδανικό διακόπτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18α. Η διακοπτική συνάρτηση ενός μονοπολικού διακόπτη είναι η εξής:

$$s = \begin{cases} 1, & v(t) = 0, \text{ εαν ο διακόπτης } S \text{ είναι κλειστός} \\ 0, & i(t) = 0, \text{ εαν ο διακόπτης } S \text{ είναι ανοικτός} \end{cases} \quad (4.40)$$

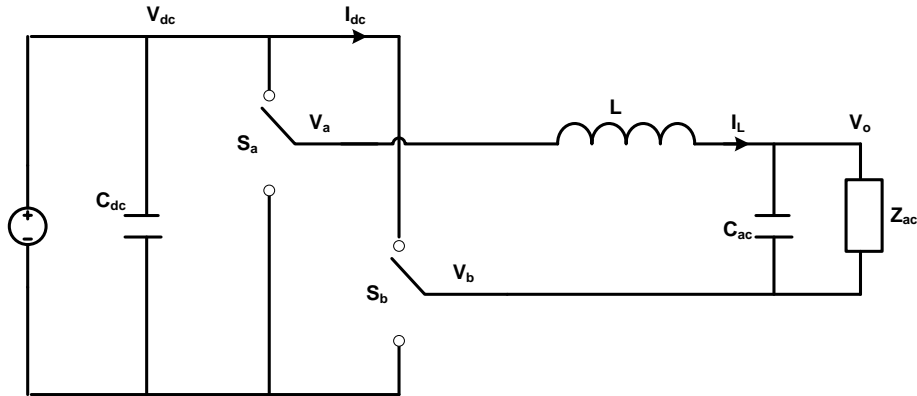
Ο κάθε κλάδος μπορεί να αναπαρασταθεί από έναν διπολικό ιδανικό διακόπτη όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18β.



Σχήμα 4.18: Αναπαράσταση α) ενός IGBT και β) ενός κλάδου του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

4.5.2 Μοντελοποίηση του αντιστροφέα σε αυτόνομη λειτουργία.

Εφαρμόζοντας την αναπαράσταση που αναφέρθηκε προηγουμένως προκύπτει η απλοποιημένη τοπολογία ενός αντιστροφέα [30].



Σχήμα 4.19: Κυκλωματικό μοντέλο αντιστροφέα σε αυτόνομη λειτουργία.

Η διακοπτική συνάρτηση αυτού του μοντέλου είναι η εξής:

$$\begin{cases} v_a = s_a \cdot V_{dc} \\ v_b = s_b \cdot V_{dc} \end{cases} \Rightarrow v_{ab} = s_{ab} \cdot V_{dc} \quad (4.41)$$

Οι εξισώσεις κατάστασης αυτής της λειτουργίας του αντιστροφέα είναι οι εξής:

$$\begin{cases} v_{ab} = s_{ab} \cdot V_{dc} \\ L \frac{di_L}{dt} = v_{ab} - v_o \\ C_{ac} \frac{dv_o}{dt} = i_L - \frac{v_o}{Z_{ac}} \end{cases} \quad (4.42)$$

Εφαρμόζοντας μέση τιμή $(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t) \cdot dt)$ στα παραπάνω μεγέθη, προκύπτουν οι επόμενες εξισώσεις:

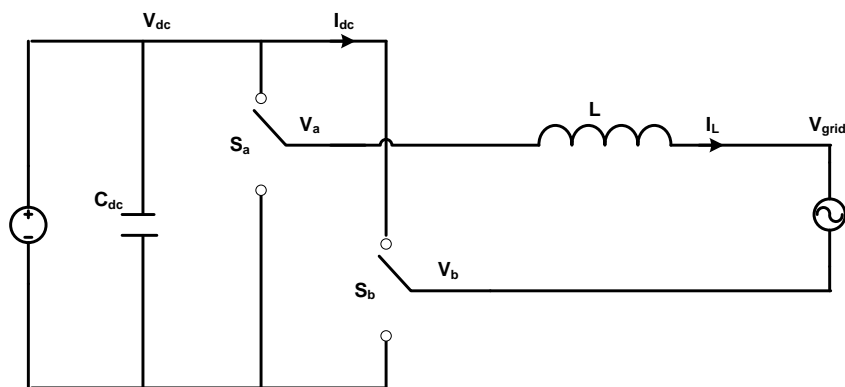
$$\begin{cases} \bar{v}_{ab} = d_{ab} \cdot V_{dc} \\ L \frac{d\bar{i}_L}{dt} = \bar{v}_{ab} - \bar{v}_o \\ C_{ac} \frac{d\bar{v}_o}{dt} = \bar{i}_L - \frac{\bar{v}_o}{Z_{ac}} \end{cases} \quad (4.43)$$

Σε μορφή πίνακα οι εξισώσεις κατάστασης γράφονται:

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{i}}_L \\ \dot{\bar{v}}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_{ac}} & -\frac{1}{Z_{ac} C_{ac}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_L \\ \bar{v}_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{dc} \\ 0 \end{bmatrix} d_{ab} \quad (4.44)$$

4.5.3 Μοντελοποίηση αντιστροφέα σε λειτουργία σύνδεσης με το δίκτυο.

Το μοντέλο ενός συνδεδεμένου με το δίκτυο αντιστροφέα όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα είναι ίδιο με το μοντέλο ενός αντιστροφέα σε αυτόνομη λειτουργία, με την διαφορά ότι παραλείπεται ο πυκνωτής στην ac πλευρά, λόγω της διασύνδεσης με το άπειρο σύστημα [30].



Σχήμα 4.20: Κυκλωματικό μοντέλο αντιστροφέα σε λειτουργία σύνδεσης με το δίκτυο.

Το διακοπτικό μοντέλο ενός αντιστροφέα συνδεδεμένου με το δίκτυο είναι το εξής:

$$\begin{cases} v_{ab} = s_{ab} \cdot V_{dc} \\ L \frac{di_L}{dt} = v_{ab} - v_{grid} \end{cases} \quad (4.45)$$

Το μοντέλο εφαρμόζοντας μέσες τιμές γίνεται:

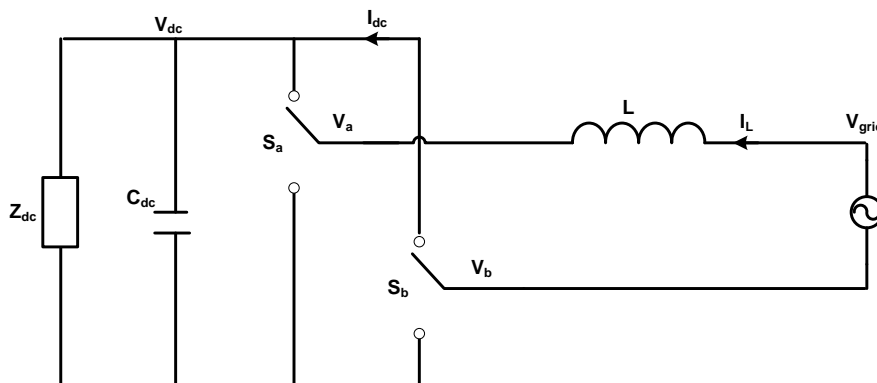
$$\begin{cases} \bar{v}_{ab} = d_{ab} \cdot V_{dc} \\ L \frac{d\bar{i}_L}{dt} = \bar{v}_{ab} - \bar{v}_{grid} \end{cases} \quad (4.46)$$

Επειδή το μοντέλο αυτό είναι πρώτης τάξης, έχει μόνο μια εξίσωση κατάστασης:

$$L \frac{d\bar{i}_L}{dt} = d_{ab} \cdot V_{dc} - v_{grid} \quad (4.47)$$

4.5.4 Μοντελοποίηση αντιστροφέα σε λειτουργία ανόρθωσης.

Η τοπολογία αυτής της λειτουργίας φαίνεται στο επόμενο σχήμα [30]. Είναι φανερό ότι ο πυκνωτής έχει μεταφερθεί από την ac πλευρά στην dc πλευρά για να σταθεροποιήσει την dc τάση και να βελτιώσει την απόκριση.



Σχήμα 4.21: Κυκλωματικό μοντέλο αντιστροφέα σε λειτουργία ανόρθωσης.

Οι επόμενες εξισώσεις δείχνουν το διακοπτικό μοντέλο του αντιστροφέα σε λειτουργία ανόρθωσης. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι το ρεύμα στην dc πλευρά έχει αναστραφεί σε σχέση με τις προηγούμενες λειτουργίες.

$$\begin{cases} v_{ab} = s_{ab} \cdot v_{dc} \\ i_{dc} = s_{ab} \cdot i_L \\ L \frac{di_L}{dt} = v_{ab} - v_{grid} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} - \frac{v_{dc}}{Z_{dc}} \end{cases} \quad (4.48)$$

Εφαρμόζοντας μέσες τιμές στο παραπάνω διακοπτικό μοντέλο, προκύπτουν οι επόμενες εξισώσεις:

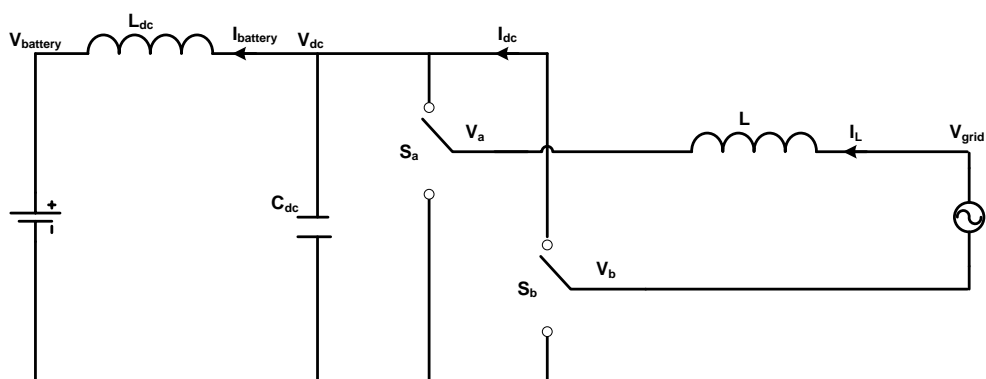
$$\begin{cases} L \frac{d\bar{i}_L}{dt} = d_{ab} \cdot \bar{v}_{dc} - v_{grid} \\ C_{dc} \frac{d\bar{v}_{dc}}{dt} = d_{ab} \cdot \bar{i}_L - \frac{\bar{v}_{dc}}{Z_{dc}} \end{cases} \quad (4.49)$$

Σε μορφή πίνακα οι εξισώσεις κατάστασης γράφονται:

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{v}}_{dc} \\ \dot{\bar{i}}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z_{dc} C_{dc}} & \frac{d_{ab}}{C_{dc}} \\ \frac{d_{ab}}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_{dc} \\ \bar{i}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} V_{grid} \quad (4.50)$$

4.5.5 Μοντελοποίηση αντιστροφέα σε λειτουργία φόρτισης – αποφόρτισης συσσωρευτών.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το μοντέλο ενός αντιστροφέα σε λειτουργία φόρτισης – αποφόρτισης συσσωρευτών στην dc πλευρά [30]. Η διαφορά αυτής της λειτουργίας από την λειτουργία ανόρθωσης είναι η χρήση ενός πηνίου φόρτισης που τοποθετείται στην dc πλευρά σε σειρά με το στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας, πχ. συστοιχία συσσωρευτών.



Σχήμα 4.22: Κυκλωματικό μοντέλο αντιστροφέα σε λειτουργία φόρτισης - αποφόρτισης.

Το διακοπτικό μοντέλο του αντιστροφέα σε λειτουργία φόρτισης – αποφόρτισης είναι το εξής:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{ab} = s_{ab} \cdot v_{dc} \\ i_{dc} = s_{ab} \cdot i_L \\ L \frac{di_L}{dt} = v_{ab} - v_{grid} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_{battery} \\ L_{dc} \frac{di_{battery}}{dt} = v_{dc} - v_{battery} \end{array} \right. \quad (4.51)$$

Εφαρμόζοντας μέσες τιμές στο παραπάνω διακοπτικό μοντέλο, προκύπτουν οι επόμενες εξισώσεις:

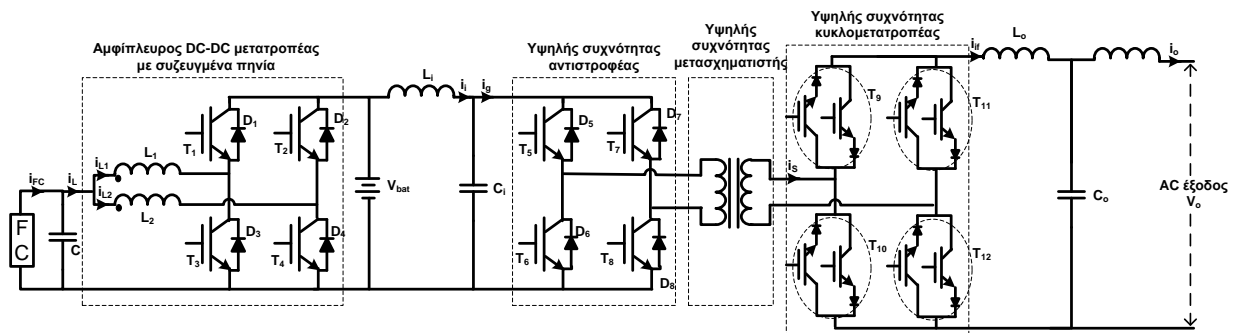
$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{d\bar{i}_L}{dt} = d_{ab} \cdot \bar{v}_{dc} - v_{grid} \\ C_{dc} \frac{d\bar{v}_{dc}}{dt} = d_{ab} \cdot \bar{i}_L - \bar{i}_{battery} \\ L_{dc} \frac{d\bar{i}_{battery}}{dt} = \bar{v}_{dc} - \bar{v}_{battery} \end{array} \right. \quad (4.52)$$

Σε μορφή πίνακα οι εξισώσεις κατάστασης γράφονται:

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{v}}_{dc} \\ \dot{\bar{i}}_L \\ \dot{\bar{i}}_{battery} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{d_{ab}}{C_{dc}} & -1 \\ \frac{d_{ab}}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_{dc}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_{dc} \\ \bar{i}_L \\ \bar{i}_{battery} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} V_{grid} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} V_{battery} \quad (4.53)$$

4.6 Ανάλυση της βαθμίδας του αμφίπλευρου dc-ac-ac αντιστροφέα - κυκλομετατροπέα από την προτεινόμενη τοπολογία.

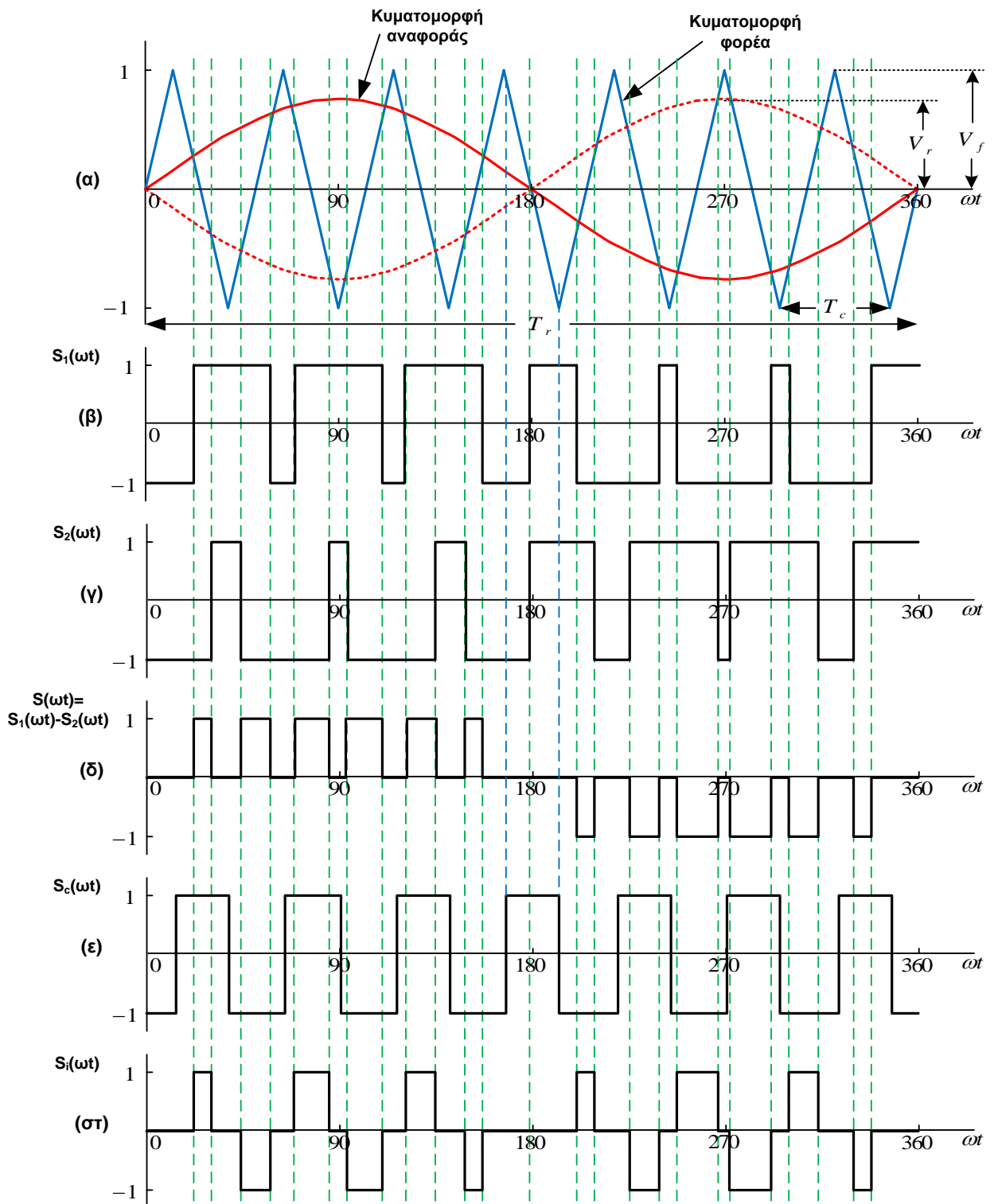
Το προτεινόμενο σύστημα μετατροπής ισχύος όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.23 αποτελείται από μία βαθμίδα dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, από έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών αντιστροφέα και έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών κυκλομετατροπέα [2],[31]-[39].



Σχήμα 4.23: Προτεινόμενη τοπολογία αμφίπλευρης ροής ισχύος

Παρατηρώ, δηλαδή, ότι ο κυκλομετατροπέας παρέχει απομόνωση υψηλής συχνότητας μεταξύ του δικτύου ή του φορτίου και του υπόλοιπου συστήματος μετατροπής ισχύος. Όταν το σύστημα λειτουργεί στη φάση της παραγωγής ισχύος, ο κυκλομετατροπέας μετατρέπει την υψηλής συχνότητας τάση που παράγεται από τον SPWM αντιστροφέα σε χαμηλής συχνότητας τάση, η οποία εφαρμόζεται στο δίκτυο λειτουργίας. Όταν το σύστημα λειτουργεί στη φάση της παραγωγής υδρογόνου, ο κυκλομετατροπέας μετατρέπει τη χαμηλής συχνότητας τάση του δικτύου σε υψηλής συχνότητας, η οποία εφαρμόζεται στον αντιστροφέα. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης λειτουργία ο αντιστροφέας λειτουργεί ως ένας ελεγχόμενος ανορθωτής (switch mode rectifier – SMR) εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη ισχύ στην κυψέλη καυσίμου για παραγωγή υδρογόνου. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της παραγωγής υδρογόνου η συστοιχία των συσσωρευτών μπορεί να φορτίζεται.

Στη ροή ισχύος από την dc μεριά (έξοδος του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία) στη ac μεριά (είσοδος του αντιστροφέα), ο αντιστροφέας υψηλής συχνότητας μετατρέπει τη συνεχή τάση εισόδου v το v σε υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM) εναλλασσόμενη τάση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.24(στ). στη συνέχεια, αυτή η υψηλής συχνότητας τάση μέσω ενός υψηλής συχνότητας μετασχηματιστή εφαρμόζεται στα διακοπτικά στοιχεία του κυκλομετατροπέα, δίνοντας την απαιτούμενη εναλλασσόμενη SPWM τάση εξόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.24(δ). η διακοπτική συνάρτηση λειτουργίας του κυκλομετατροπέα φαίνεται στο σχήμα 4.24(ε). Από το σχήμα 4.2 παρατηρούμε ότι οι μαθηματικές εκφράσεις των διακοπτικών συναρτήσεων του κυκλομετατροπέα και του αντιστροφέα δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:



Σχήμα 4.24: Θεωρητικές κυματομορφές των βαθμίδων του αντιστροφέα και του κυκλομετατροπέα,
 (α) Ορισμός SPWM,
 (β) Κυματομορφές που προκύπτουν από τη σύνθεση των σημάτων αναφοράς και φορέα,
 (γ) Κυματομορφές που προκύπτουν από τη σύνθεση των σημάτων αναφοράς και φορέα,
 (δ) Συνολική διακοπτική συνάρτηση αντιστροφέα-κυκλομετατροπέα $S(\omega t)$, που προκύπτει από τις (β) και (γ),
 (ε) Διακοπτική συνάρτηση του κυκλομετατροπέα $S_c(\omega t)$, που προκύπτει από το σήμα φορέα (α),
 (σ) Διακοπτική συνάρτηση του αντιστροφέα $S_i(\omega t)$, που προκύπτει από τις (α) και (β).

$$S_c(\omega t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=mF_{nc}}^{\infty} C_n \sin\left(n\omega_o t - \frac{n\pi}{2}\right) \quad (4.54)$$

$$S_i(\omega t) = S_c(\omega t)S(\omega t) \quad (4.55)$$

Όπου $S(\omega t)$ είναι η συνολική διακοπτική συνάρτηση των δύο διαδοχικών βαθμίδων και δίνεται από τη σχέση:

$$S(\omega t) = \sum_{n=1, \text{περιττός}}^{\infty} A_n \sin(n\omega_o t) = M_f \sin(\omega_o t) + \sum_{n=d}^{\infty} A_n \sin(n\omega_o t) \quad (4.56)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.54) και (4.56) στην εξίσωση (4.55) καταλήγουμε στη σχέση:

$$S_i(\omega t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=m}^{\infty} \sum_{k=mF_{nc}}^{\infty} A_n C_k \sin(n\omega_o t) \sin\left(k\omega_o t - k \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.57)$$

Παρατηρώντας τα σχήματα 4.23 και 4.24 βλέπουμε ότι η τάση και το ρεύμα εξόδου του κυκλωμετατροπέα, πριν από την έξοδο του φίλτρου δίνονται από τις σχέσεις:

$$v_{if}(\omega t) = V_{bat} M_f \sin(\omega_o t) \left(\frac{N_2}{N_1}\right) + V_{bat} \sum_{n=d}^{\infty} A_n \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \sin(n\omega_o t) \quad (4.58)$$

$$i_{if}(\omega t) = \frac{v_{if}(\omega t)}{Z_o(\omega t)} = B_1 \sin(\omega_o t + \phi_1) + \sum_{n=d}^{\infty} B_n \sin(n\omega_o t + \phi_n) \quad (4.59)$$

Επίσης, το ρεύμα εισόδου του αντιστροφέα δίνεται από τη σχέση:

$$i_g(\omega t) = i_{if}(\omega t)S(\omega t) \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \quad (4.60)$$

Δίνοντας τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$I_{g,o} = DC \text{ συνιστώσα } i_g(\omega t) = \frac{M_f B_1 \cos \phi_1}{2} \quad (4.61)$$

$$I_{g,2} = \text{πλάτος της 2η αρμονικής του } i_g(\omega t) = \frac{M_f B_1}{2} \quad (4.62)$$

Ακόμα ισχύουν:

$$B_1 = \frac{V_{bat} M_f}{|Z_{o,1}|} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (4.63)$$

$$B_n = \frac{A_n}{|Z_{o,n}|} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (4.64)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(Z_{o,n})}{\text{Re}(Z_{o,n})} \right) \quad (4.65)$$

Όπου,

v_{if} : η τάση εξόδου του κυκλωμετατροπέα πριν από το φιλτράρισμα,

i_{if} : το ρεύμα εξόδου του κυκλωμετατροπέα πριν από το φιλτράρισμα,

V_{bat} : η τάση των συσσωρευτών

M_f : ο συντελεστής διαμόρφωσης της τεχνικής SPWM,

A_n : το πλάτος της $n^{ης}$ αρμονικής συνιστώσας της v_{if} ,

B_n : το πλάτος της $n^{ης}$ αρμονικής συνιστώσας του i_{if} ,

Z_0 : η σύνθετη αντίσταση εισόδου του φίλτρου εξόδου,

$|Z_{o,n}|$: το μέτρο της Z_0 στη συχνότητα της $n^{ης}$ αρμονικής,

ϕ_1 : η φάση μετατόπισης μεταξύ των αντίστοιχων θεμελιωδών συνιστωσών των v_{if} και i_{if}

d : η κυριαρχούσα αρμονική συνιστώσα της $v_{if} = 2F_{nc} - 1$,

F_{nc} : η ανοιγμένη συχνότητα φέροντος σήματος,

ω_0 : η συχνότητα λειτουργίας εξόδου.

Το σύστημα αυτό του αμφίπλευρου dc-ac-ac αντιστροφέα – κυκλωμετατροπέα μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο μέσω ενός πηνίου διασύνδεσης X_s , οπότε σ' αυτή την περίπτωση το ρεύμα και η ισχύς (ενεργός και άεργος) εξόδου ελέγχονται εφαρμόζοντας τις ίδιες αρχές, όπως σε οποιαδήποτε σύνδεση με το δίκτυο ενός dc-ac αντιστροφέα. Βέβαια η τοπολογία αυτή μπορεί να λειτουργεί και ως αυτόνομο σύστημα, οπότε σ' αυτή την περίπτωση το μέγεθος και η συχνότητα της τάσης εξόδου, που παράγεται από τη βαθμίδα αντιστροφέα – κυκλωμετατροπέα ρυθμίζεται στις επιθυμητές τιμές, πολύ καλύτερα από ότι με έναν συνηθισμένο PWM dc-ac αντιστροφέα. Ακόμα, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις της διακοπτικής συνάρτησης (4.54) και (4.57), καθώς και τις εξισώσεις (4.58) και (4.59), μπορούμε να πάρουμε τις μαθηματικές εκφράσεις για το ρεύμα εισόδου i_s του κυκλωμετατροπέα $i_s(\omega t)$ και την τάση εξόδου του αντιστροφέα $v_p(\omega t)$. Αυτές οι ποσότητες, οι οποίες είναι απαραίτητες για το σχεδιασμό του υψηλής συχνότητας μετασχηματιστή απομόνωσης και για τον υπολογισμό των κύριων στοιχείων του αντιστροφέα και του κυκλωμετατροπέα δίνονται από τις σχέσεις:

$$i_s(\omega t) = i_{if}(\omega t) S_c(\omega t) \quad (4.66)$$

$$v_p(\omega t) = V_{bat} S_i(\omega t) \quad (4.67)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.57), (4.60), (4.61) και (4.62) στις εξισώσεις (4.66) και (4.67) παίρνουμε τις σχέσεις:

$$i_s(\omega t) = \frac{4B_1}{\pi} \sin(\omega_o t + \phi_1) \sum_{n=mF_{nc}}^{\infty} C_n \sin\left(n\omega_o t - n\frac{\pi}{2}\right) + \sum_{n=d}^{\infty} \sum_{k=mF_{nc}}^{\infty} B_n C_k \sin(n\omega_o t + \phi_n) \sin\left(k\omega_o t + k\frac{\pi}{2}\right) \quad (4.68)$$

$$v_p(\omega t) = \frac{4V_{bat}}{\pi} \sum_{n=m}^{\infty} \sum_{k=mF_{nc}}^{\infty} A_n C_k \sin(n\omega_o t) \sin\left(k\omega_o t + k\frac{\pi}{2}\right) \quad (4.69)$$

Όπου, $m = 1, 3, 5, \dots$

Υποθέτοντας ότι η κανονική συχνότητα του φέροντος σήματος είναι $F_{nc} \geq 17$, η οποία είναι η σωστή επιλογή σε εφαρμογές υψηλών διακοπτικών συχνοτήτων, το διπλό άθροισμα της εξίσωσης (4.68) μπορεί να παραληφθεί, γιατί τα πλάτη των B_n για $n \geq d$ είναι αμελητέα. Συνεπώς, η εξίσωση (4.68) γίνεται:

$$i_s(\omega t) = \frac{4B_1}{\pi} \sum_{n=mF_{nc}}^{\infty} C_n \left[\cos\left((n-1)\omega_o t - n\frac{\pi}{2} - \phi_1\right) - \cos\left((n+1)\omega_o t - n\frac{\pi}{2} + \phi_1\right) \right] \quad (4.70)$$

Όπου, $m = 1, 3, 5, \dots$

Η εξίσωση (4.70) υποδηλώνει σαφώς ότι ο υψηλής συχνότητας μετασχηματιστής απομόνωσης πρέπει να σχεδιαστεί για να λειτουργεί στη συχνότητα :

$$f_{transformer} = (F_{nc} - 1)(2\pi f_o) \quad (4.71)$$

Όπου, f_o : είναι η συχνότητα της τάσης εξόδου.

Γενικά, όταν το κύκλωμα της προτεινόμενης τοπολογίας ισχύος συνδεθεί με το δίκτυο μέσω μιας αυτεπαγωγής διασύνδεσης X_s , η ισχύς που δίνει στην έξοδο του ο κυκλομετατροπέας δίνεται από τη γνωστή σχέση των σύγχρονων μηχανών:

$$P = \frac{\tilde{V}_{co} \tilde{V}_{ut}}{X_s} \sin \delta \quad (4.72)$$

Όπου,

\tilde{V}_{co} : η rms τιμή της τάσης εξόδου του κυκλομετατροπέα,

\tilde{V}_{ut} : η rms τιμή της τάσης του δικτύου,

δ : η γωνία μεταξύ v_{co} και V_{ut} .

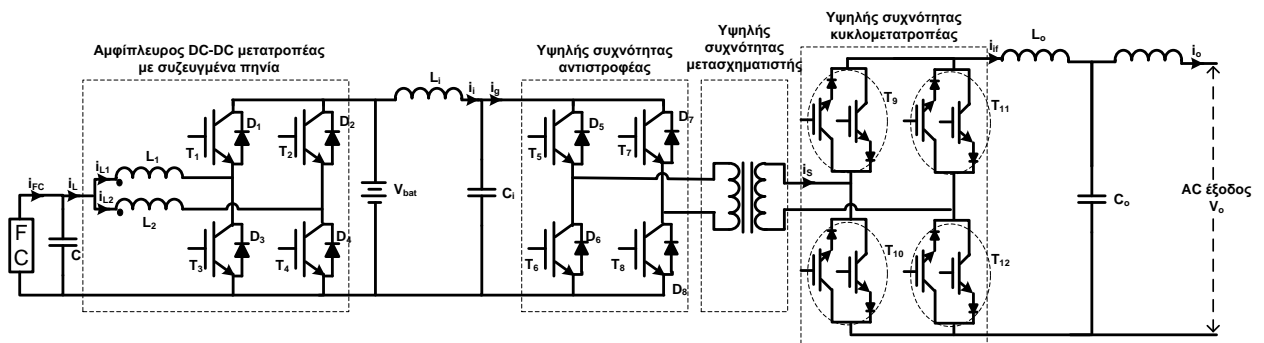
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αποτελέσματα προσομοιώσεων της προτεινόμενης τοπολογίας- Συμπεράσματα

5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε η θεωρητική ανάλυση των διάφορων τοπολογιών και διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που δίνει μία dc τάση, όπως είναι τα συστήματα κυψελών καυσίμου και οι συσσωρευτές λιθίου - ιόντων πολυμερών, με το δίκτυο ac τάσης μονοφασικό ή τριφασικό. Επίσης αναλύθηκε και μια συγκεκριμένη τοπολογία που παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες τοπολογίες ηλεκτρονικών ισχύος κατάλληλες για αυτή τη λειτουργία.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το συνολικό κυκλωματικό διάγραμμα αυτής της τοπολογίας, ενώ στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των διακριτών τμημάτων αυτού του κυκλώματος σύμφωνα με το πρόγραμμα simulink του MatLab.



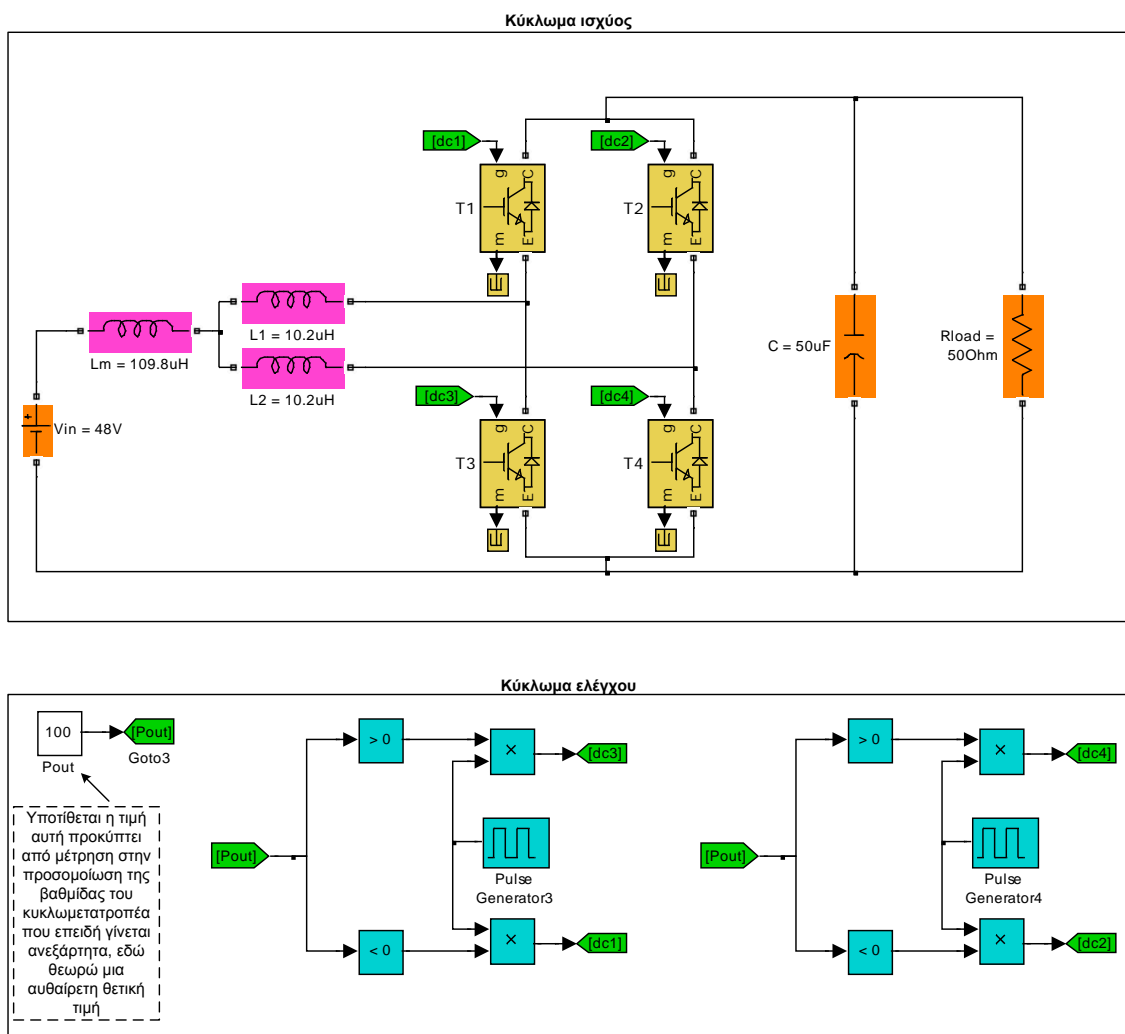
Σχήμα 5.1: Προτεινόμενη αμφίπλευρη τοπολογία μετατροπής ισχύος.

5.2 Dc-dc μετατροπέας με συζευγμένα πηνία.

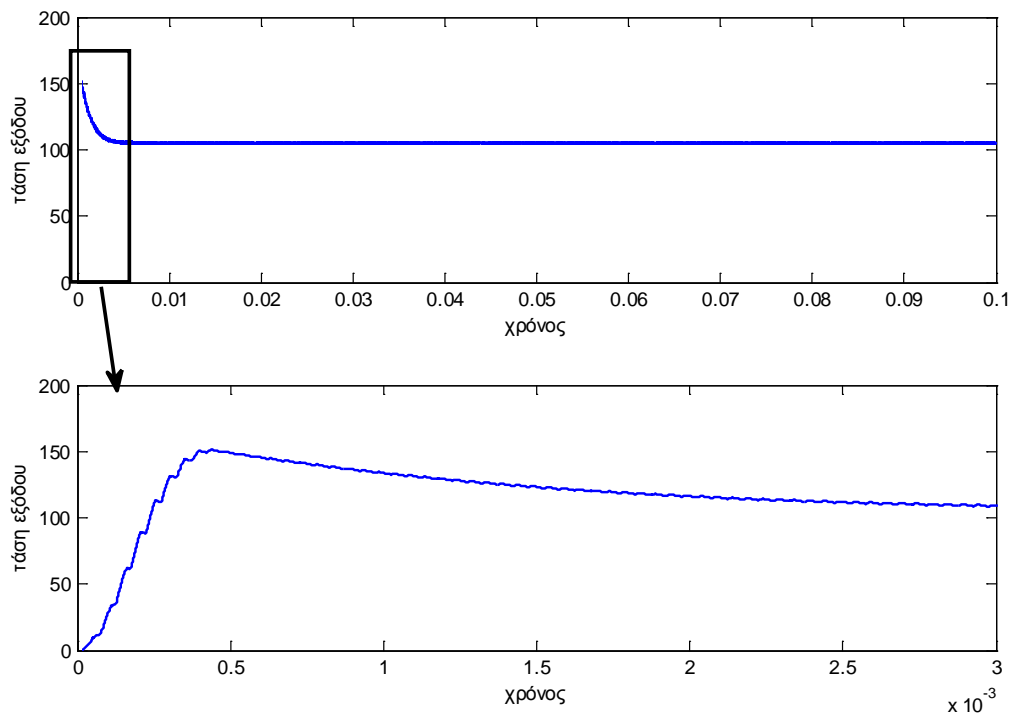
Αν και οι προσομοιώσεις για την βαθμίδα του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία έχουν γίνει αυτό σμες, χωρίς την ύπαρξη της βαθμίδας του υψηλής συχνότητας αντιστροφέα – κυκλομετατροπέα, στο πραγματικό κύκλωμα, θα πρέπει να ελέγχο την φορά της ροής ισχύος στην έξοδο της συνολικής μελετώμενης τοπολογίας και να επιλέγω αν ο dc-dc μετατροπέας θα δουλέψει σαν μετατροπέας ανύψωσης (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και κατανάλωση υδρογόνου από τις κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας) ή σαν μετατροπέας υποβιβασμού (κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και παραγωγή υδρογόνου από τις κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας).

5.2.1 Λειτουργία ανύψωσης (boost).

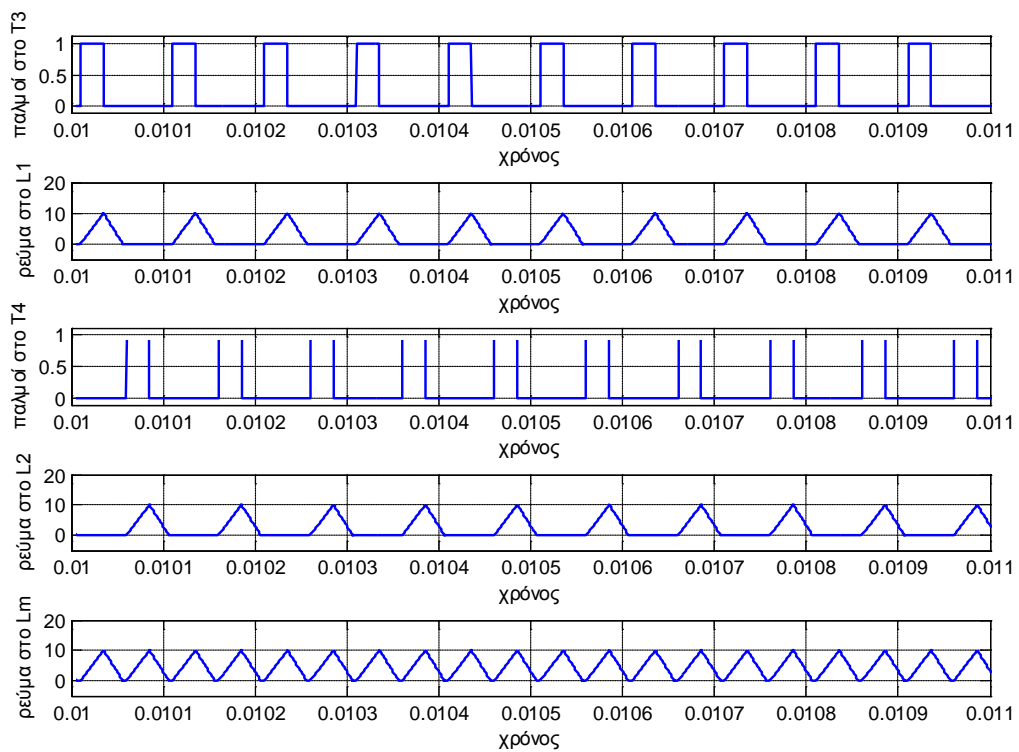
Για την λειτουργία ανύψωσης του μετατροπέα γέφυρας, παλμοδοτώ τους δύο κάτω ημιαγωγούς διακόπτες της γέφυρας ενώ δίνω μηδενικούς παλμούς στους δύο επάνω, και κάνω χρήση μόνο των αντιπαράλληλων διόδων τους.



Σχήμα 5.2: Κύκλωμα προσομοιώσεων dc-dc μετατροπέα γέφυρας με συζευγμένα πηνία κατά την λειτουργία ανύψωσης.



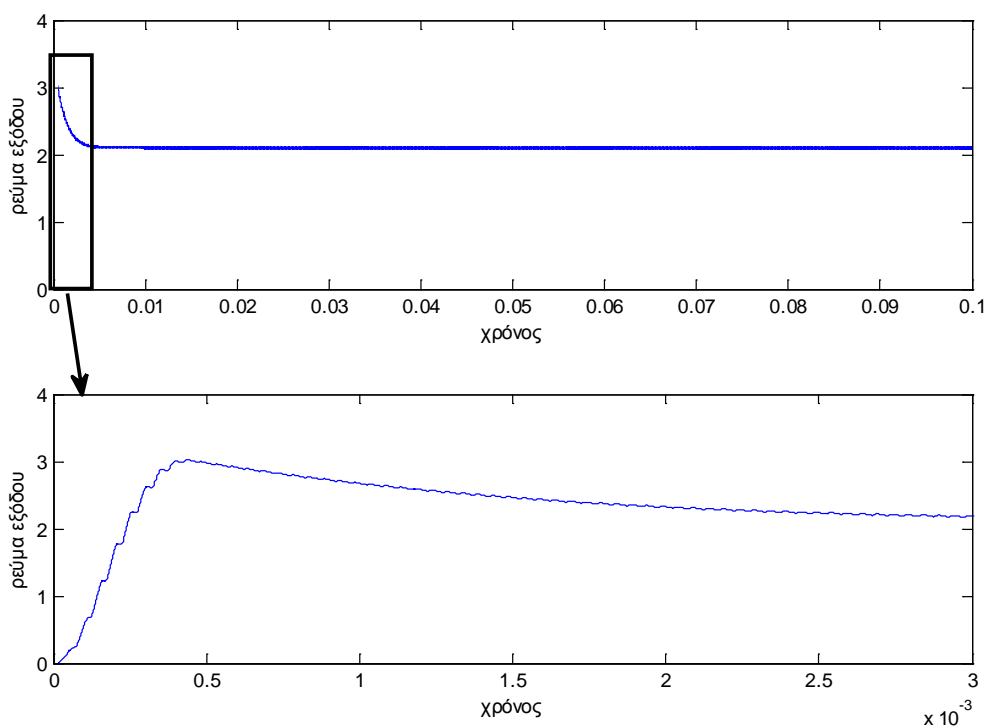
Σχήμα 5.3: Κυματομορφή τάσης εξόδου του dc-dc μετατροπέα γέφυρας με συζευγμένα πηνία σε λειτουργία ανύψωσης.



Σχήμα 5.4: Παλμοί έναυσης των ημιαγωγών διακοπών και κυματομορφές των ρευμάτων στα πηνία σε λειτουργία ανύψωσης.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.4 έχει επιλεγθεί βαθμός χρησιμοποίησης των ημιαγωγών διακοπών 2 %. Αν αυξηθεί παραπάνω ο βαθμός χρησιμοποίησης (μέγιστο 5 %), θα παρατηρήσουμε μια αύξηση στη τάση εξόδου, δηλαδή, αυξάνεται η δυνατότητα του dc-dc μετατροπέα να ανυψώσει την τάση εξόδου.

Επίσης, παρατηρώ ότι το ρεύμα στο πηνίο L_m , είναι το άθροισμα των ρευμάτων των πηνίων L_1 και L_2 . Αυτό είναι απόλυτα αναμενόμενο από το νόμο ρευμάτων του Kirchhoff. Επίσης, επειδή ο βαθμός χρησιμοποίησης των ημιαγωγών διακοπών είναι ίδιος, προκύπτει ότι τα ρεύματα στα πηνία L_1 και L_2 θα είναι συμμετρικά.

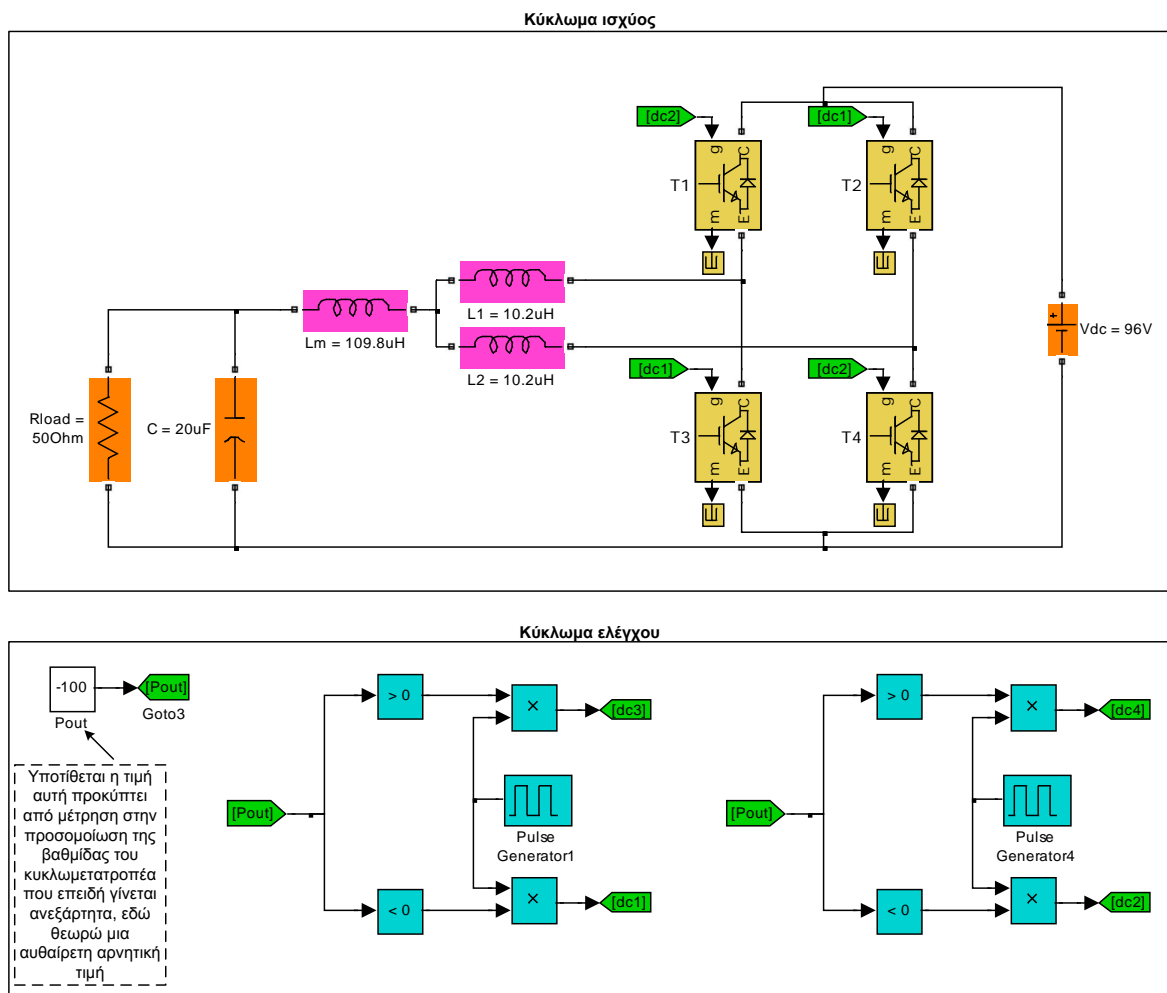


Σχήμα 5.5: Κυματομορφή τάσης εξόδου του dc-dc μετατροπέα γέφυρας με συζευγμένα πηνία σε λειτουργία ανύψωσης.

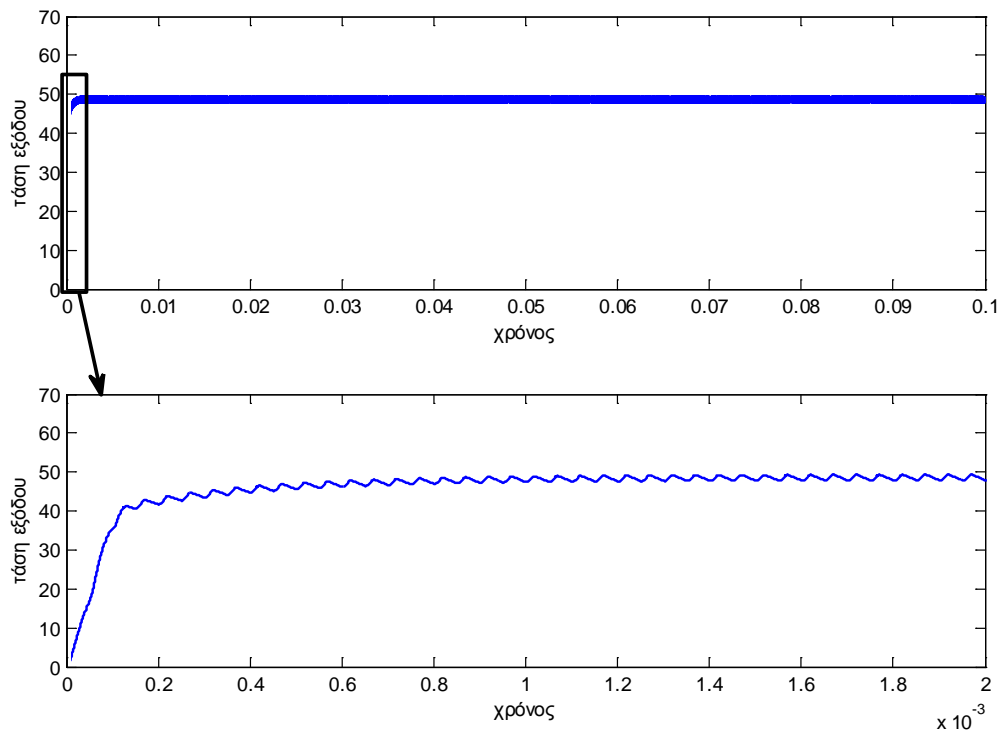
Όπως φαίνεται στα σχήματα 5.3 και 5.5 από τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος εξόδου, αντίστοιχα, του dc-dc μετατροπέα γέφυρας με συζευγμένα πηνία, η έξοδος του κυκλώματος έχει πολύ μικρή κυμάτωση. Αυτό οφείλεται και στον πυκνωτή εξομάλυνσης που συνδέεται στην έξοδο του μετατροπέα.

5.2.2 Λειτουργία υποβιβασμού (buck).

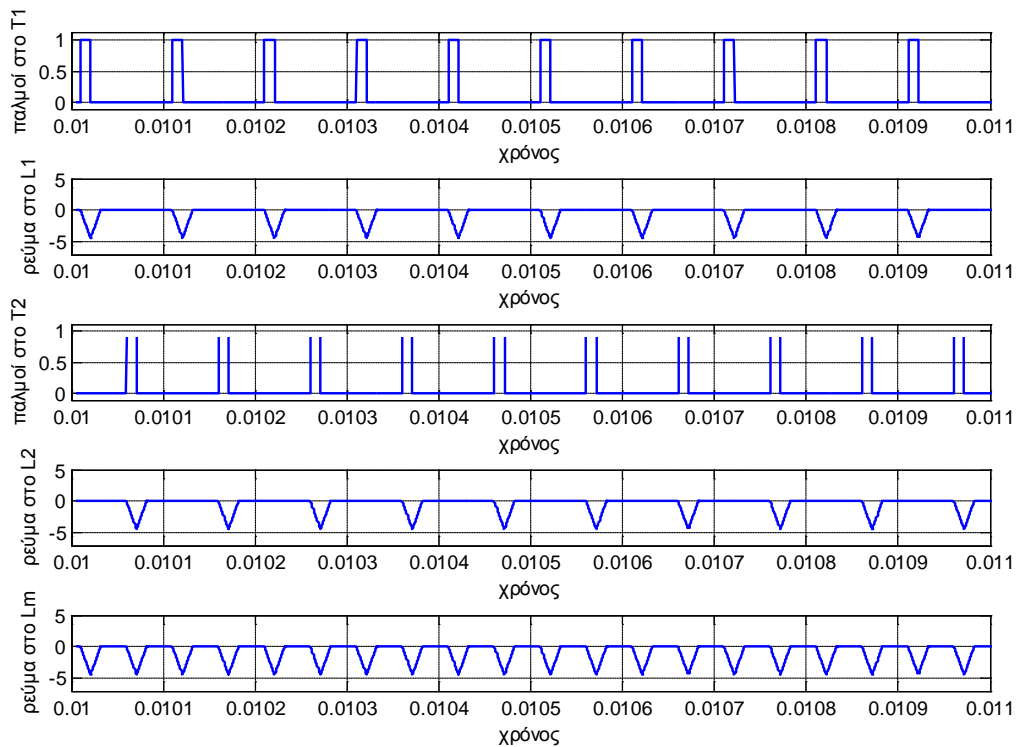
Για την λειτουργία υποβιβασμού του μετατροπέα γέφυρας, παλμοδοτώ τους δύο πάνω ημιαγωγούς διακόπτες της γέφυρας ενώ δίνω μηδενικούς παλμούς στους δύο κάτω, και κάνω χρήση μόνο των αντιπαράλληλων διόδων τους. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, μια από τις δυνατότητες της προτεινόμενης τοπολογίας σε αυτή την διπλωματική εργασία είναι η αμφίπλευρη ροή ισχύος στο σύστημα ώστε να μπορεί να είναι δυνατή η λειτουργία των κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας. Στο σχήμα 5.6 ελέγχω την ροή ισχύος από το δίκτυο προς τις κυψέλες καυσίμου. Υποθέτω ότι εκεί που στο σχήμα 5.6 είναι μια πηγή dc τάσης, στη πραγματικότητα βρίσκεται η βαθμίδα του υψηλής συχνότητας αντιστροφέα – κυκλομετατροπέα, που προσομοιώνεται σε επόμενη ενότητα. Για ευκολία στην προσομοίωση την κυψέλη καυσίμου την θεωρώ σαν ένα απλό φορτίο.



Σχήμα 5.6: Κύκλωμα προσομοιώσεων dc-dc μετατροπέα γέφυρας με συζευγμένα πηνία κατά την λειτουργία υποβιβασμού.



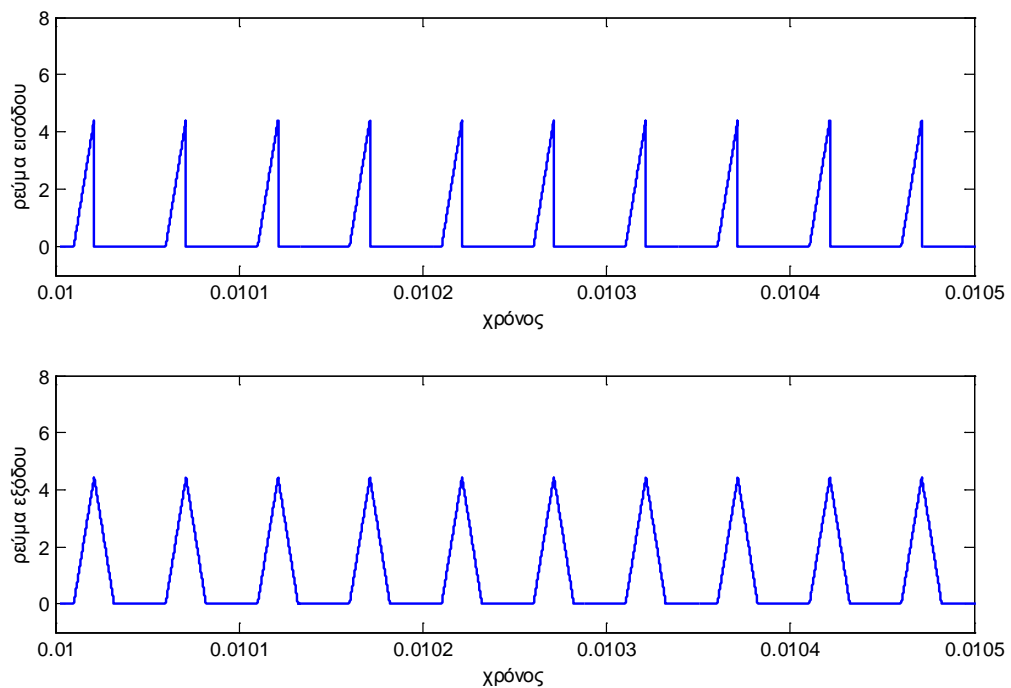
Σχήμα 5.7: Κυματομορφή τάσης εξόδου του dc-dc μετατροπέα γέφυρας με συζευγμένα πηνία σε λειτουργία υποβιβασμού.



Σχήμα 5.8: Παλμοί έναυσης των ημιαγωγών διακοπών και κυματομορφές των ρευμάτων στα πηνία σε λειτουργία υποβιβασμού.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.8 έχει επιλεγθεί βαθμός χρησιμοποίησης των ημιαγωγών διακοπών 11%. Αν αυξηθεί παραπάνω ο βαθμός χρησιμοποίησης (μέγιστο 50%), θα παρατηρήσουμε μια αύξηση στη τάση εξόδου.

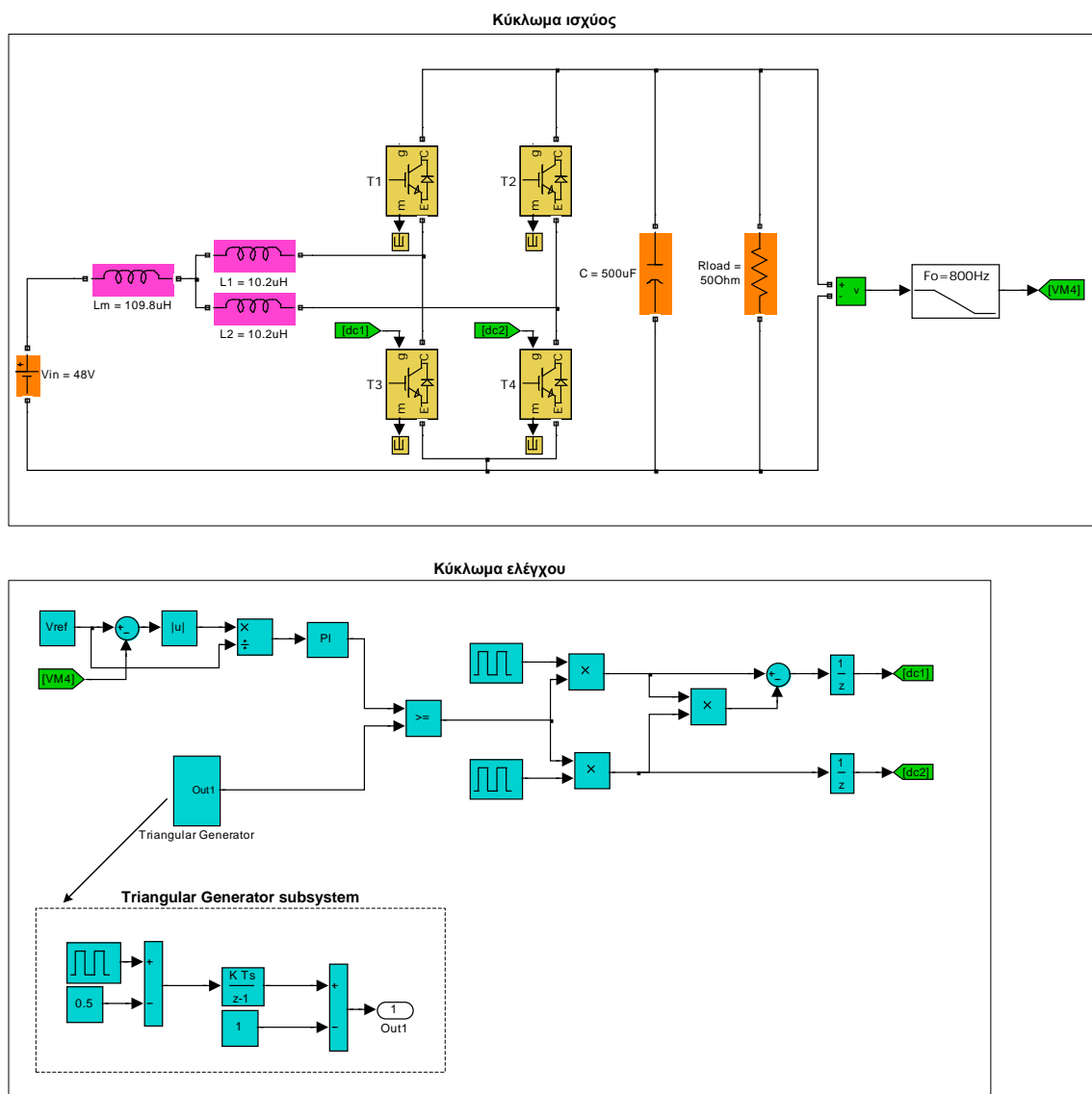
Επίσης, παρατηρώ ότι το ρεύμα στο πηνίο L_m , είναι το άθροισμα των ρευμάτων των πηνίων L_1 και L_2 . Αυτό είναι απόλυτα αναμενόμενο από το νόμο ρευμάτων του Kirchhoff. Επίσης, επειδή ο βαθμός χρησιμοποίησης των ημιαγωγών διακοπών είναι ίδιος, προκύπτει ότι τα ρεύματα στα πηνία L_1 και L_2 θα είναι συμμετρικά.



Σχήμα 5.9: Κυματομορφές ρεύματος στην είσοδο και την έξοδο του κυκλώματος σε λειτουργία υποβιβασμού (σαν είσοδο θεωρώ την δεξιά πλευρά και σαν έξοδο την αριστερή πλευρά).

5.3 Dc-dc μετατροπέας γέφυρας σε κλειστό βρόχο – λειτουργία ανύψωσης.

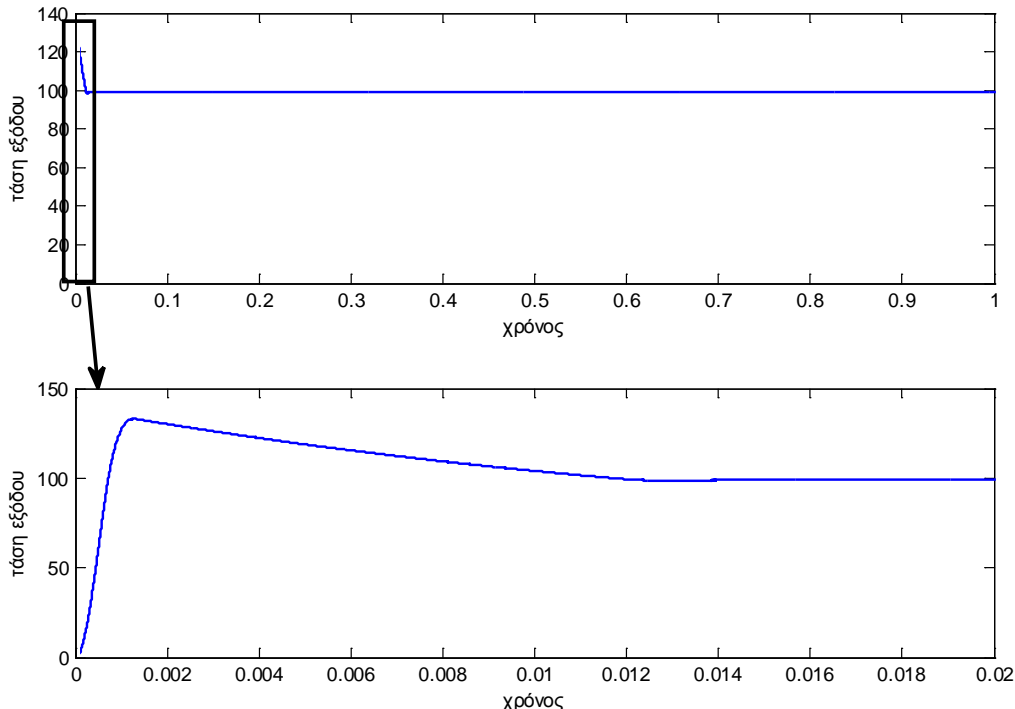
Τα προηγούμενα κυκλώματα μπορεί να είχαν την επιθυμητή απόκριση, αλλά ο έλεγχος των ημιαγωγών διακοπών γινόταν σε ανοικτό βρόχο με αποτέλεσμα το κύκλωμα ελέγχου να μην μπορεί να παρακολουθήσει την έξοδο του συστήματος και να την διορθώσει σε περίπτωση που παρουσιαστεί κάποια απόκλιση από την επιθυμητή τιμή. Αυτό το πρόβλημα το ξεπερνάμε με την εισαγωγή ενός βρόχου ανάδρασης και την κατάλληλη τροποποίηση του κυκλώματος ελέγχου. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα 5.10 μετράμε την έξοδο του κυκλώματος ισχύος και την εισάγουμε στο κύκλωμα ελέγχου όπου αφαιρείται από μια σταθερά που είναι η επιθυμητή τιμή της τάσης εξόδου που πρέπει να έχει το κύκλωμα ισχύος (στην προκειμένη περίπτωση έχω θεωρήσει τάση αναφοράς $V_{ref} = 100V$).



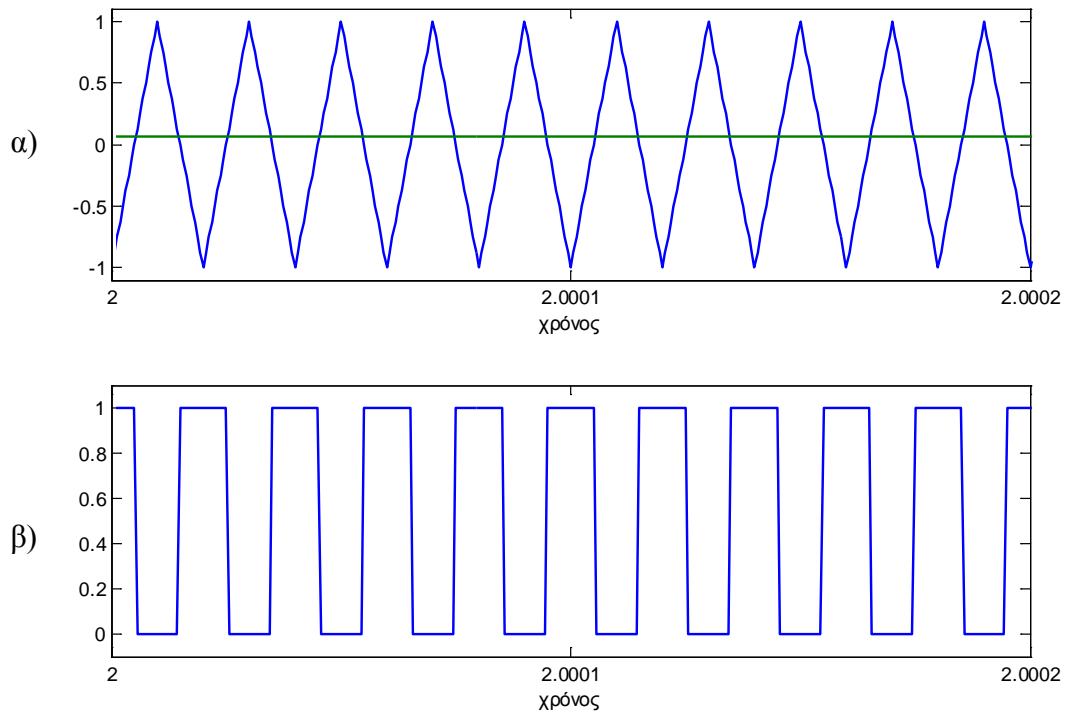
Σχήμα 5.10: Κύκλωμα προσομοιώσεων dc-dc μετατροπέα γέφυρας με συζευγμένα πηνία σε κλειστό βρόχο.

Η τιμή που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία είναι το σφάλμα της εξόδου. Στη συνέχεια, παίρνω την σχετική του τιμή σε σχέση με την τάση αναφοράς και την εισάγω σε έναν ελεγκτή PI. Ο PI ελεγκτής αποτελείται από δύο όρους, τον P (αναλογικό) και τον I (ολοκληρωτικό). Συγκεκριμένα, ο αναλογικός όρος προσαρμόζει την έξοδο του συστήματος ανάλογα με το μέγεθος του σφάλματος, ενώ ο ολοκληρωτικός όρος μπορεί να εξαλείψει την απόκλιση της εξόδου από την είσοδο στην μόνιμη κατάσταση. Την έξοδο του PI την συγκρίνω (τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών – PWM) με μια τριγωνική κυματομορφή που φαίνεται στο σχήμα 5.12(α) και το αποτέλεσμα της σύγκρισης το πολλαπλασιάζω με δύο συμπληρωματικούς τετραγωνικούς παλμούς συχνότητας 10kHz και προκύπτουν οι παλμοί έναυσης των ημιαγωγών διακοπών, όπως φαίνονται και στο σχήμα 5.14. Για να εξασφαλίσω ότι οι διακόπτες T_3 και T_4 δεν θα άγουν ποτέ ταυτόχρονα, γιατί έτσι θα βραχυκυκλωθεί η είσοδος, πολλαπλασιάζω τους δύο παλμούς μεταξύ τους και τα κοινά σημεία τους τα αφαιρώ από τον έναν από τους δύο παλμούς. Αυτό οδηγεί σε μεγάλη βελτίωση των κυματομορφών του συστήματος, καθώς αποφεύγονται πολλά κρουστικά ρεύματα κατά τις χρονικές στιγμές που δίνεται η έναυση στους ημιαγωγούς διακόπτες.

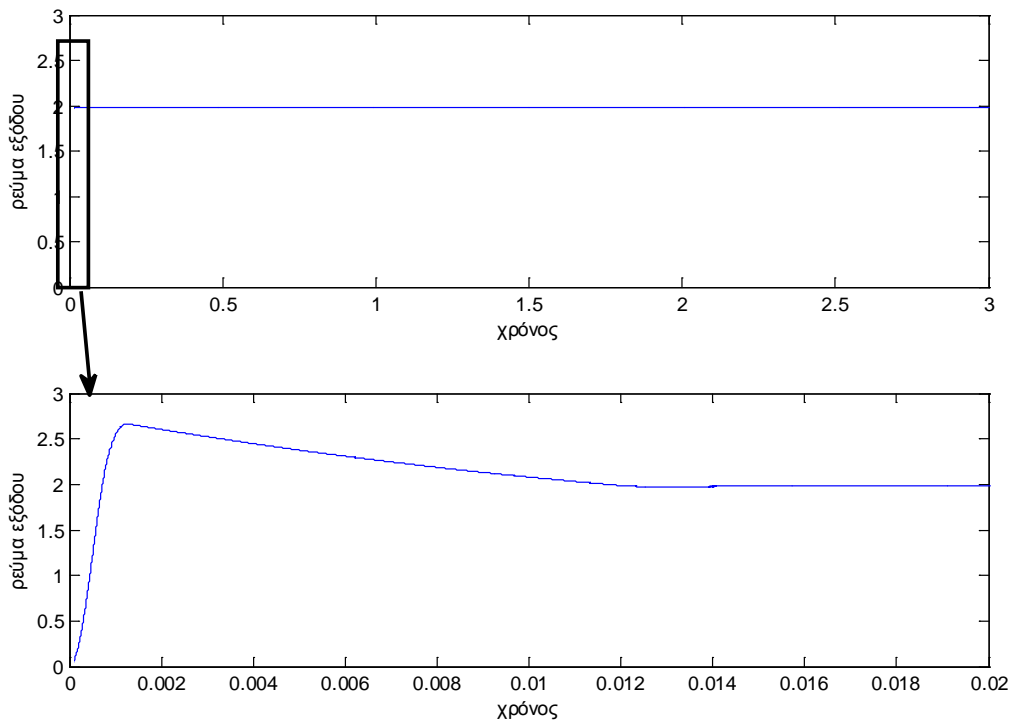
Στο σχήμα 5.11 φαίνεται η κυματομορφή της τάσης εξόδου του συστήματος, όπου παρατηρώ ότι το κύκλωμα χρειάζεται περίπου 0,02sec μέχρι να μπορέσει ο ελεγκτής PI να ρυθμίσει την έξοδο του σταθερά στα 100V, που είναι η τάση αναφοράς που του έχουμε ορίσει.



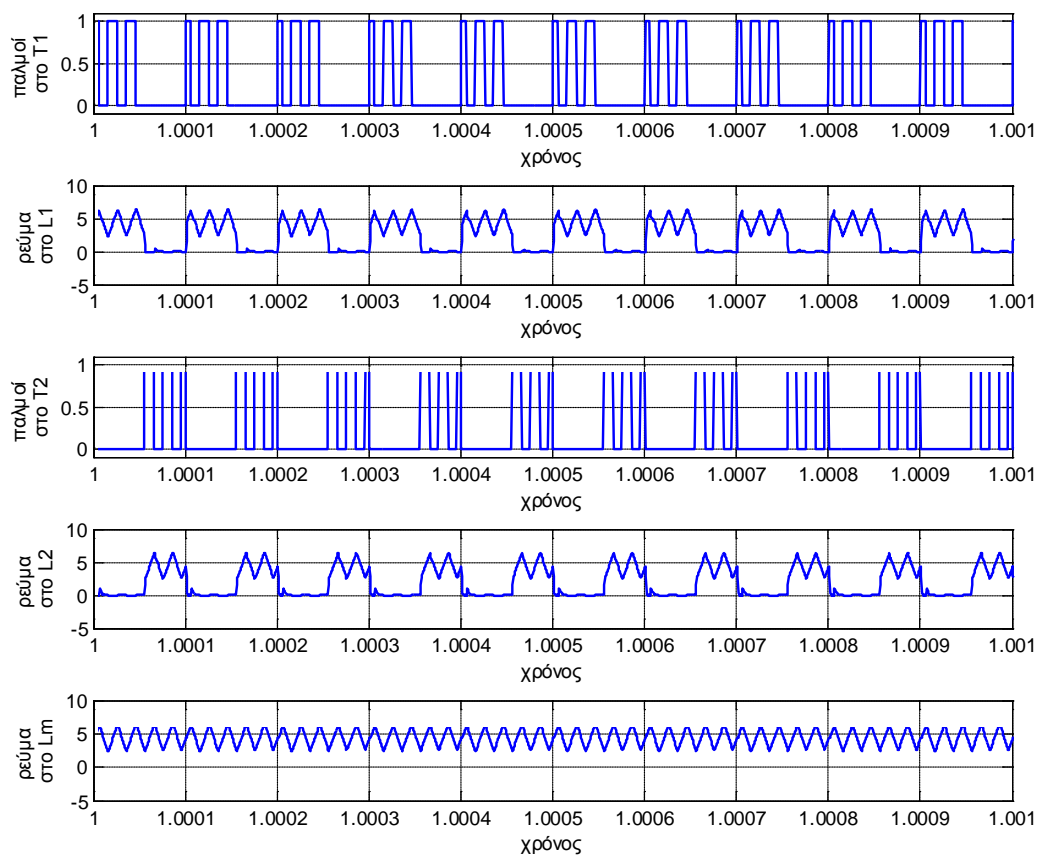
Σχήμα 5.11: Κυματομορφή τάσης εξόδου του dc-dc μετατροπέα γέφυρας με συζευγμένα πηνία, σε κλειστό βρόχο – λειτουργία ανύψωσης.



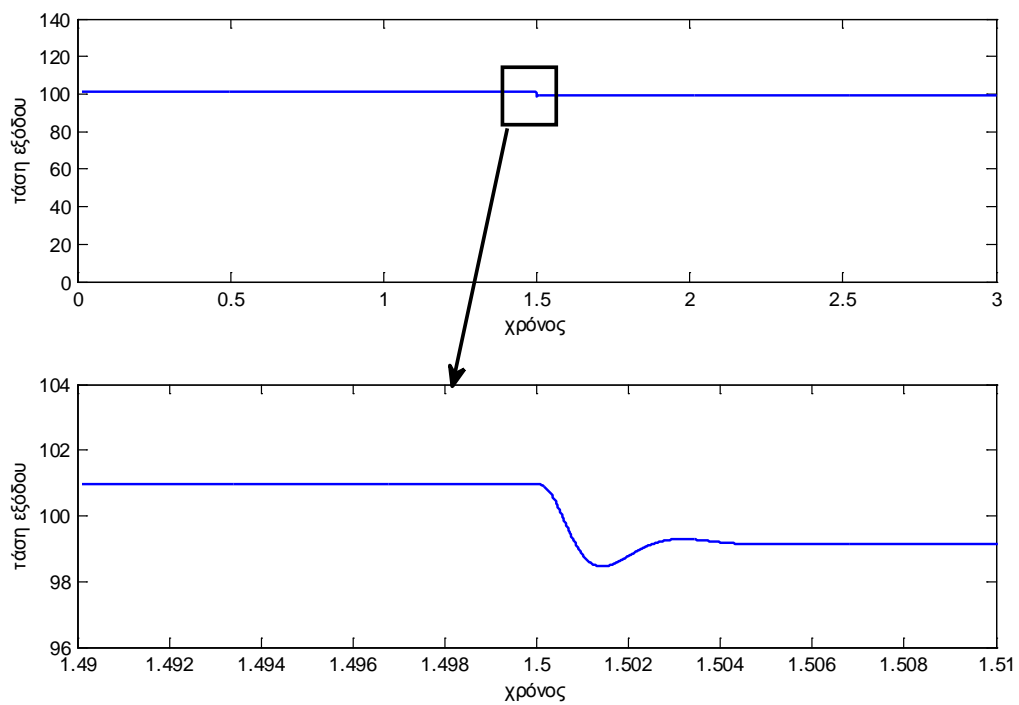
Σχήμα 5.12: (α) Κυματομορφές τριγωνικού φορέα και εξόδου του ελεγκτή PI, (β) αποτέλεσμα της σύγκρισης των κυματομορφών του σχήματος (α), με σκοπό την δημιουργία παλμών με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών – PWM.



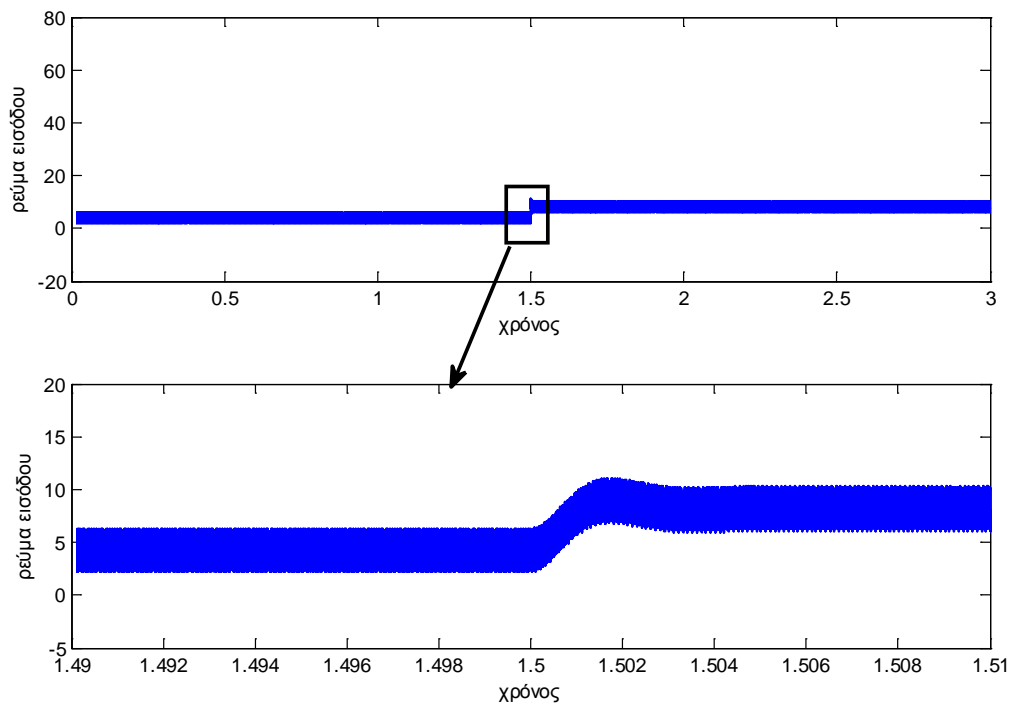
Σχήμα 5.13: Κυματομορφή ρεύματος εξόδου του κυκλώματος.



Σχήμα 5.14: Παλμοί έναυσης των ημιαγωγών διακοπών και κυματομορφές ρεύματος στα πηνία.



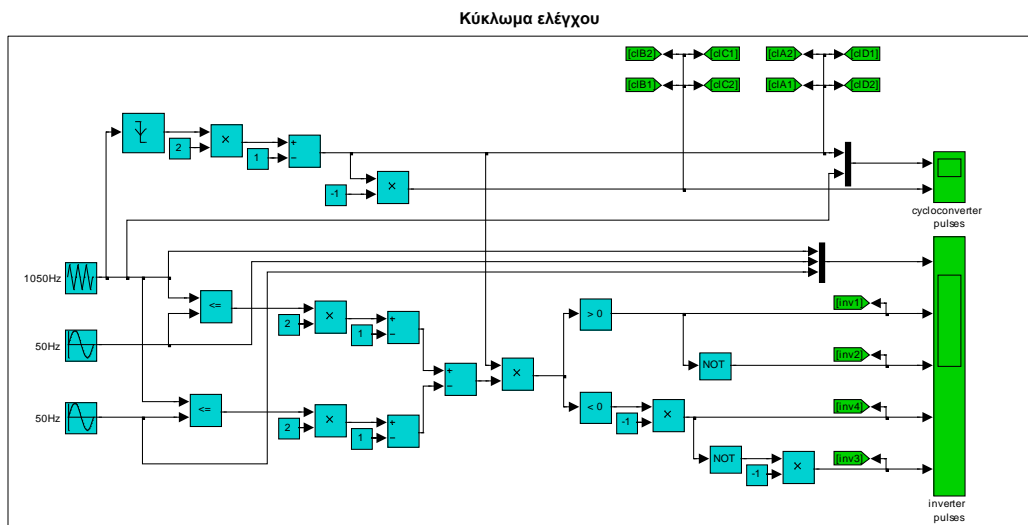
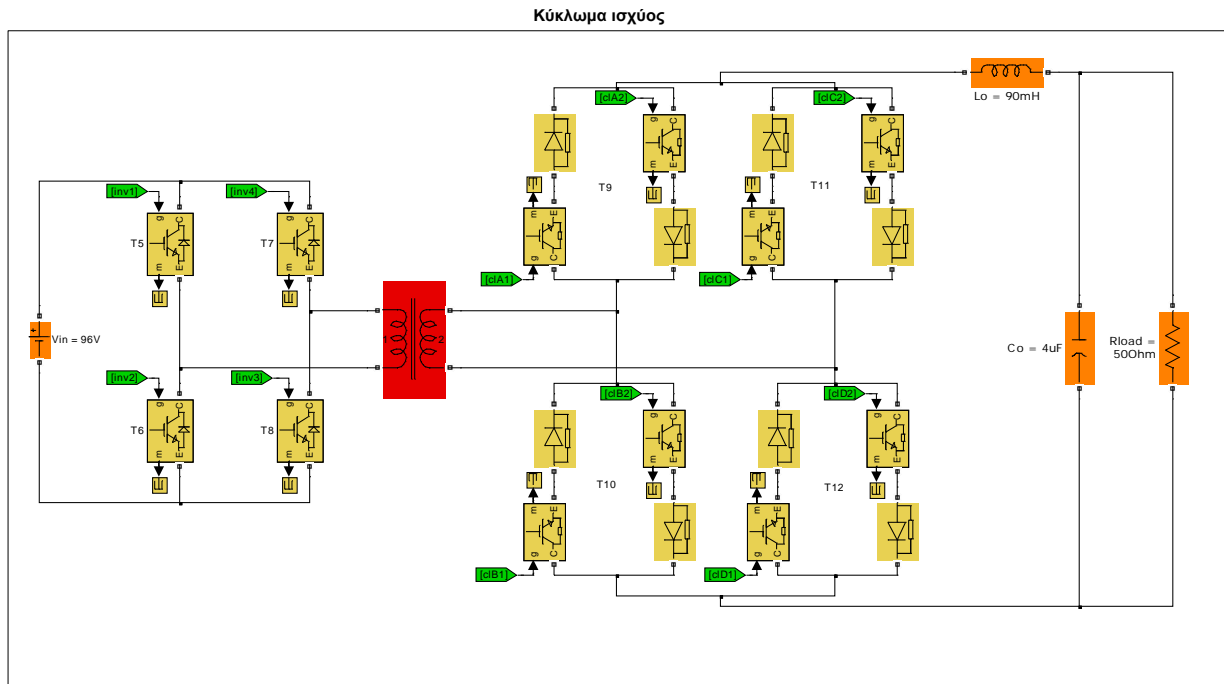
Σχήμα 5.15: Κυματομορφή τάσης εξόδου, τη χρονική στιγμή 5sec μειώνεται το φορτίο κατά 50%.



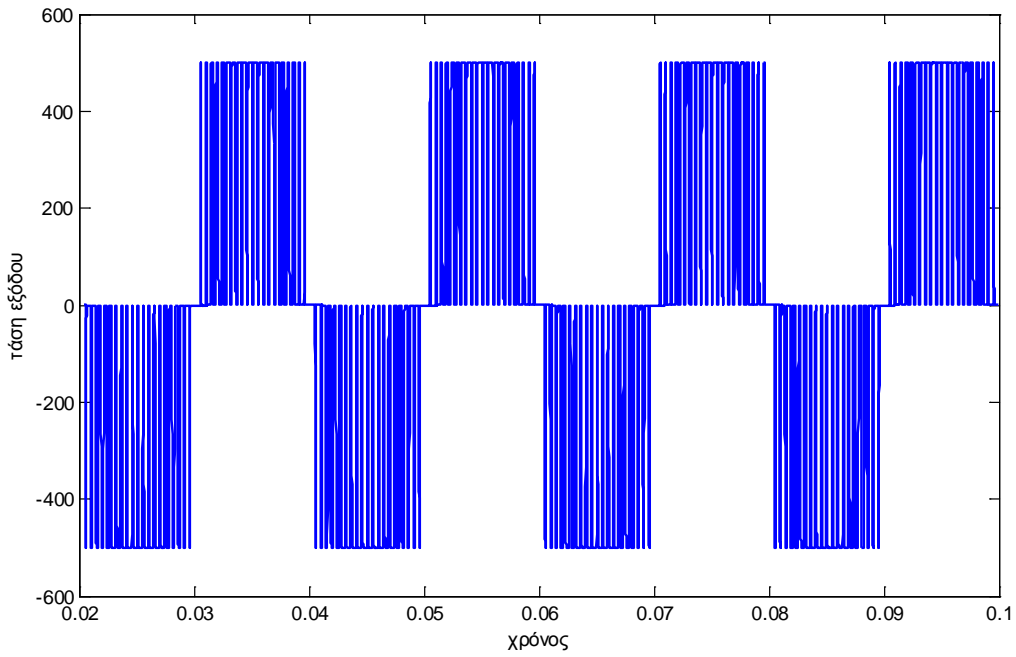
Σχήμα 5.16: Κυματομορφή του ρεύματος εισόδου, τη χρονική στιγμή 5sec μειώνεται το φορτίο κατά 50%.

Στα σχήματα 5.15 και 5.16 φαίνεται η ανταπόκριση του συστήματος κλειστού βρόχου σε μείωση του φορτίου κατά 50% κατά την χρονική στιγμή 1,5sec. Κατά την χρονική στιγμή που συμβαίνει η αλλαγή στο φορτίο παρατηρούμε μια άμεση μεταβολή στην τάση εξόδου του μετατροπέα αλλά ο ελεγκτής PI που χρησιμοποιείται στο κύκλωμα ελέγχου κλειστού βρόχου του μετατροπέα αντιλαμβάνεται την μεταβολή της τάση στην έξοδο (την οποία δειγματοληπτεί και συγκρίνει με την τάση αναφοράς) και τροποποιεί κατάλληλα τους παλμούς στους διακόπτες του μετατροπέα ώστε να δώσει στην έξοδο μεγαλύτερη ανύψωση της τάσης και να αντισταθμίσει την πτώση που συνέβη. Βλέπουμε ότι μέσα σε ελάχιστα δέκατα του δευτερολέπτου η τάση έχει επανέλθει στο φυσιολογικό επίπεδο.

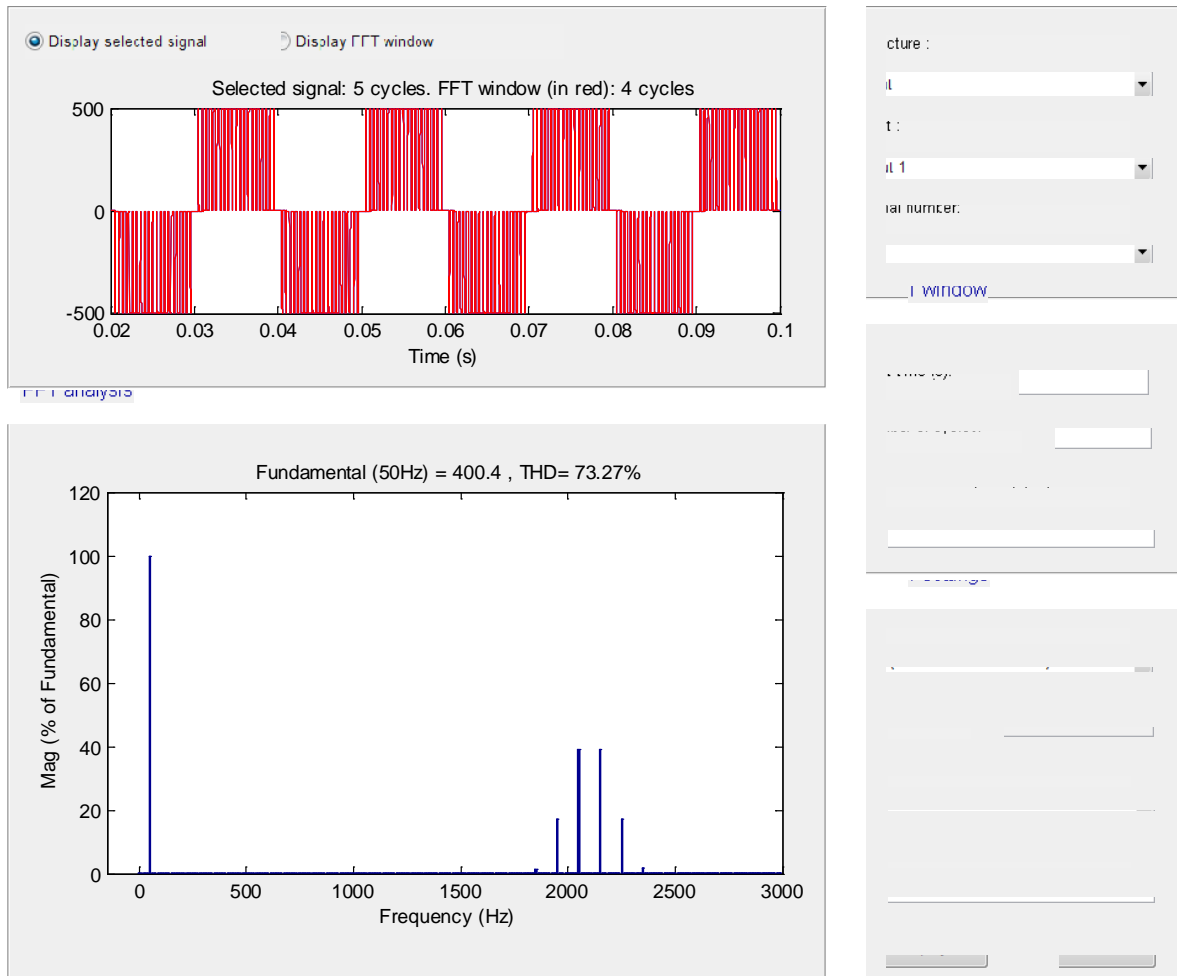
5.4 Αντιστροφέας - κυκλωματροπέας υψηλής συχνότητας



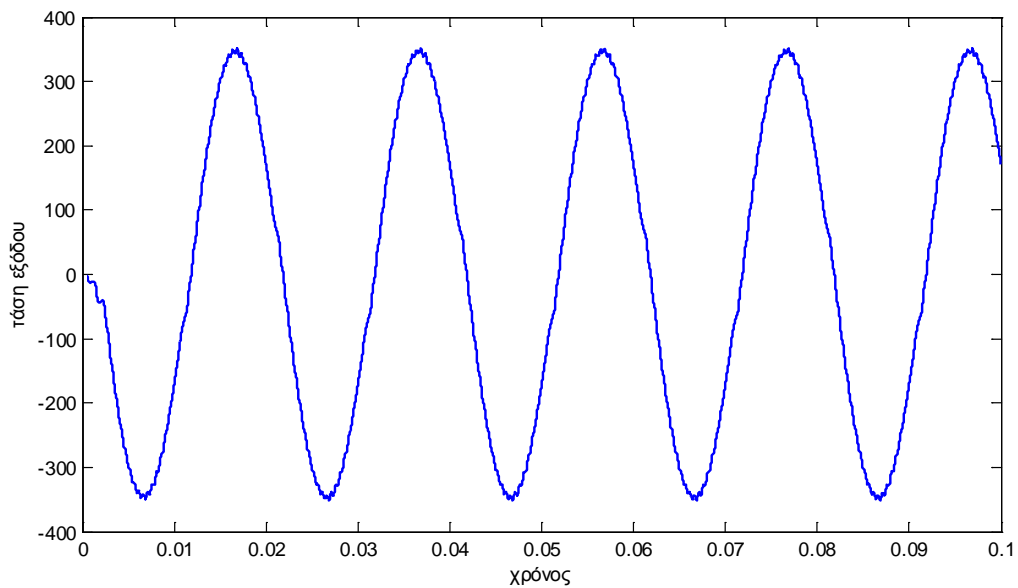
Σχήμα 5.17: Κύκλωμα προσομοιώσεων βαθμίδα dc-ac-ac (αντιστροφέας – κυκλωματροπέας υψηλής συχνότητας).



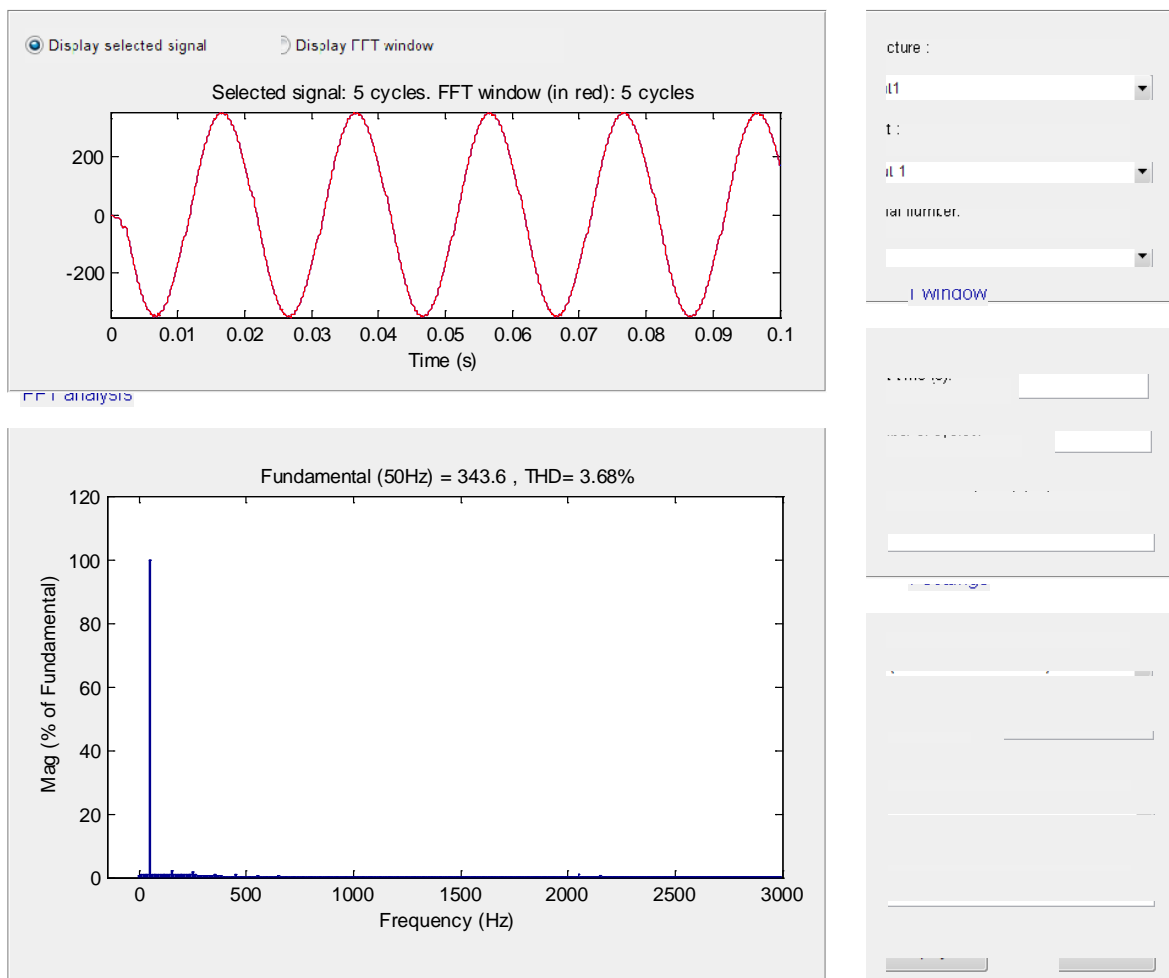
Σχήμα 5.18: Κυματομορφή τάσης εξόδου πριν τη χρήση LC φίλτρου στην έξοδο του συστήματος αντιστροφέα – κυκλομετατροπέα.



Σχήμα 5.19: FFT ανάλυση της κυματομορφής του σχήματος 5.18 .



Σχήμα 5.20: Κυματομορφή τάσης εξόδου μετά τη χρήση LC φίλτρου στην έξοδο του συστήματος αντιστροφέα – κυκλομετατροπέα.



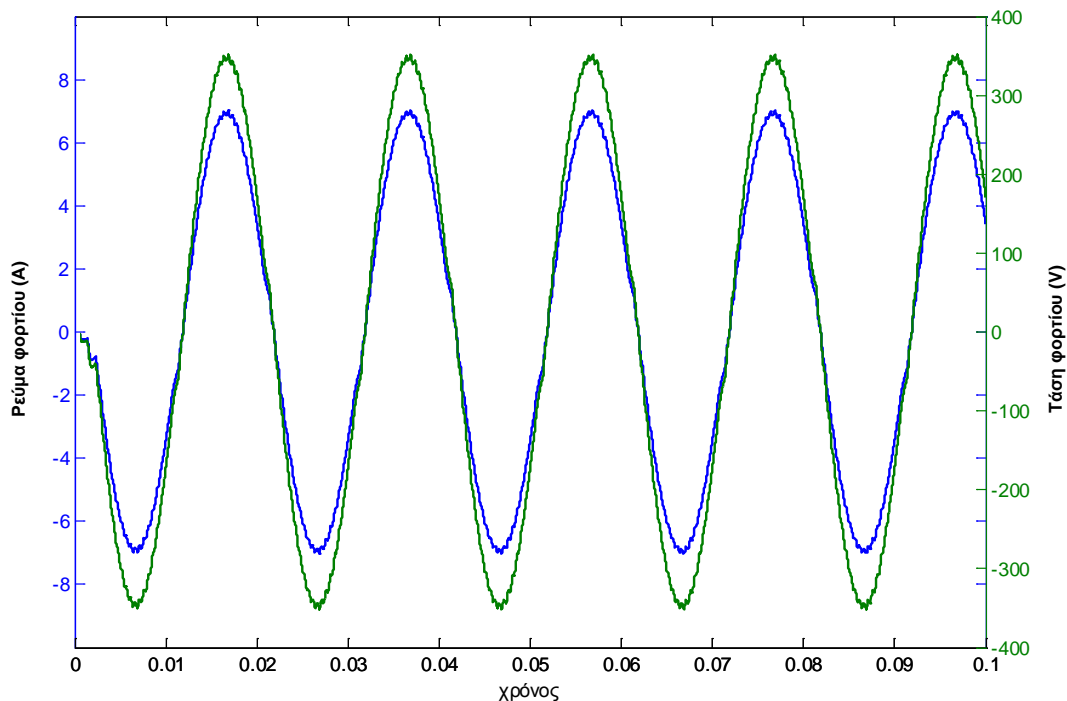
Σχήμα 5.21: FFT ανάλυση της κυματομορφής του σχήματος 5.20 .

Για να πετύχω $THD_V \leq 5\%$ στην τάση εξόδου, θα πρέπει να μειώσω την κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα στο 3% της θεμελιώδους, δηλαδή, $325V * 3\% = 9,75V$.

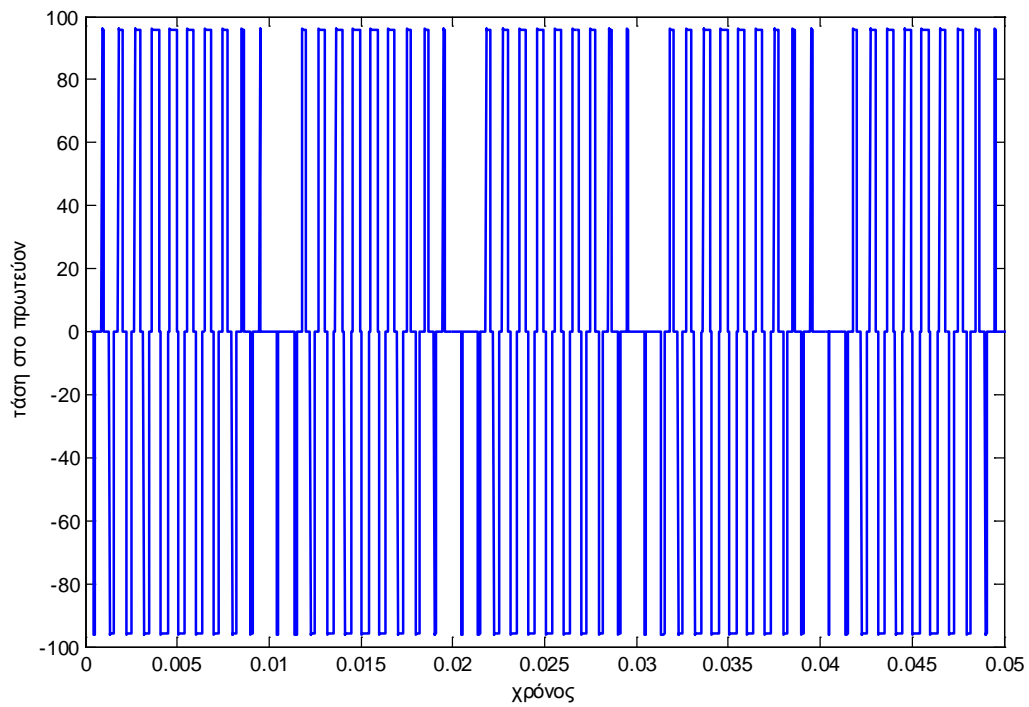
$$\begin{aligned} \text{Άρα θα ισχύει: } \frac{V_{0,n}}{V_{f,n}} &\cong \frac{1}{1 - n^2 \omega^2 LC} \Rightarrow \frac{9.8}{163} \cong \frac{1}{1 - [(21)^2 * (2\pi * 50)^2 * L * C]} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{9.8}{163} &\cong \frac{1}{1 - [43524955 * L * C]} \Rightarrow 1 - [43524955 * L * C] = \frac{163}{9.8} \Rightarrow \\ \Rightarrow 43524955 * L * C &= 1 - \frac{163}{9.8} \Rightarrow |L * C| = 3.5916 * 10^{-7} \end{aligned}$$

Και επιλέγω κατάλληλο συνδυασμό πυκνωτή και πηνίου, στην παρούσα προσομοίωση έχω επιλέξει $C = 4\mu F$ και $L = 90mH$.

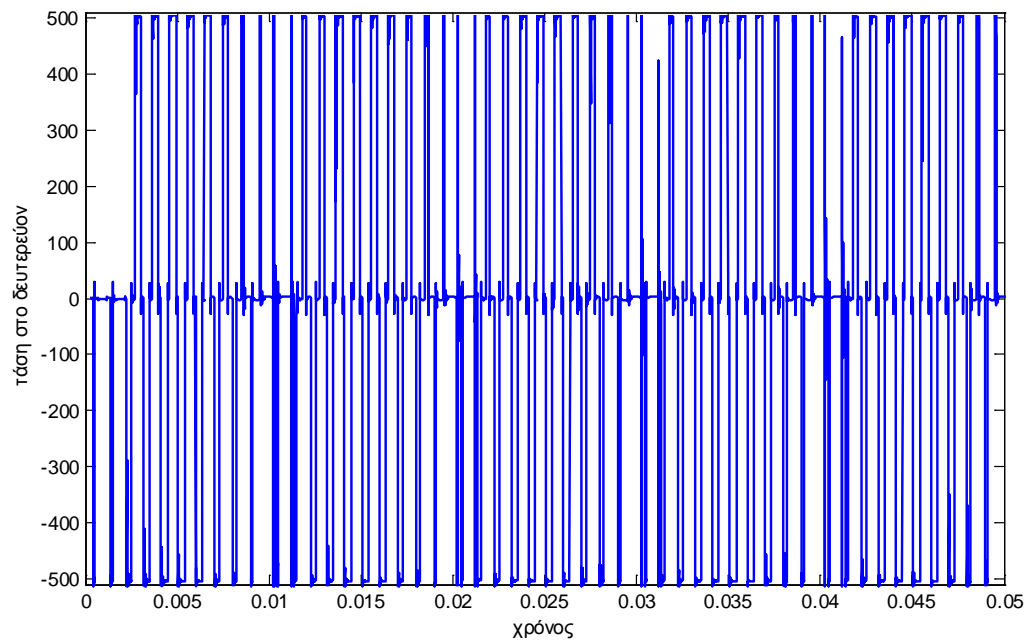
Όπως φαίνεται και από τα σχήματα 5.18 , 5.19 , 5.20 και 5.21 η χρήση φίλτρου είναι υποχρεωτική καθώς πριν το φίλτρο η τάση εξόδου παρουσιάζει ολική αρμονική παραμόρφωση $THD = 75\%$, με το οποίο είναι αδιανόητο για ένα σύστημα να συνδεθεί στο δίκτυο. Μετά το φίλτρο το THD της τάσης εξόδου μειώνεται σημαντικά και είναι εμφανής πλέον η ημιτονική μορφή της κυματομορφής της τάσης εξόδου. Στο επόμενο σχήμα παρατίθεται η κυματομορφή του ρεύματος φορτίου σε σύγκριση με την μειωμένη κατά πλάτος κυματομορφή της τάσης φορτίου.



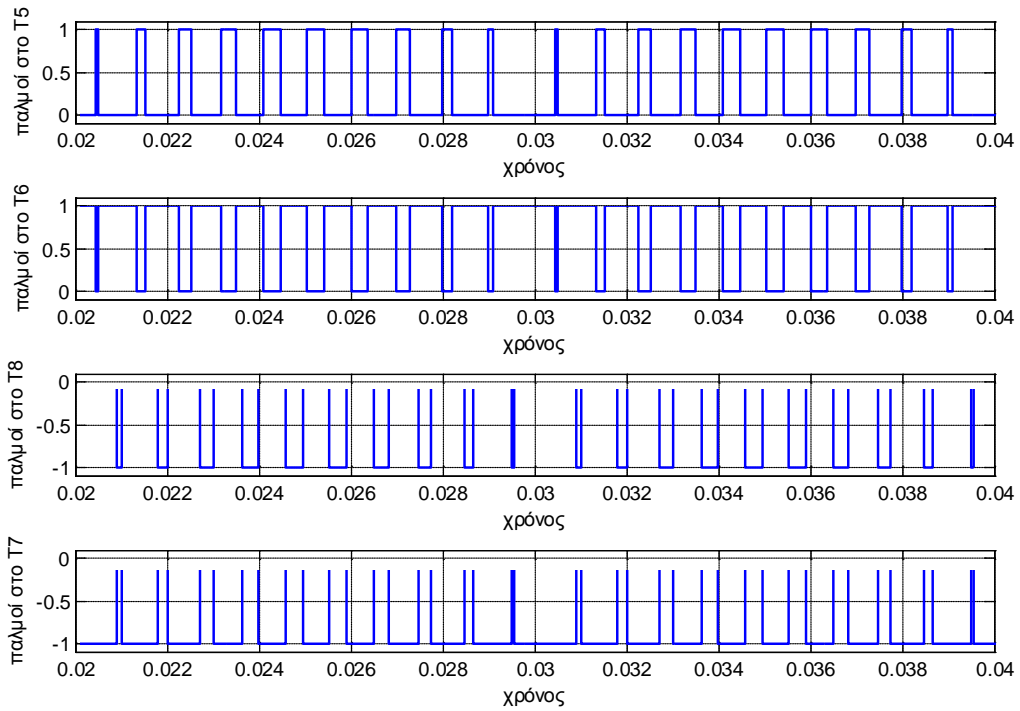
Σχήμα 5.22: Κυματομορφή ρεύματος φορτίου μετά τη χρήση LC φίλτρου στην έξοδο του συστήματος αντιστροφέα – κυκλομετατροπέα σε σύγκριση με την κυματομορφή της τάσης του φορτίου.



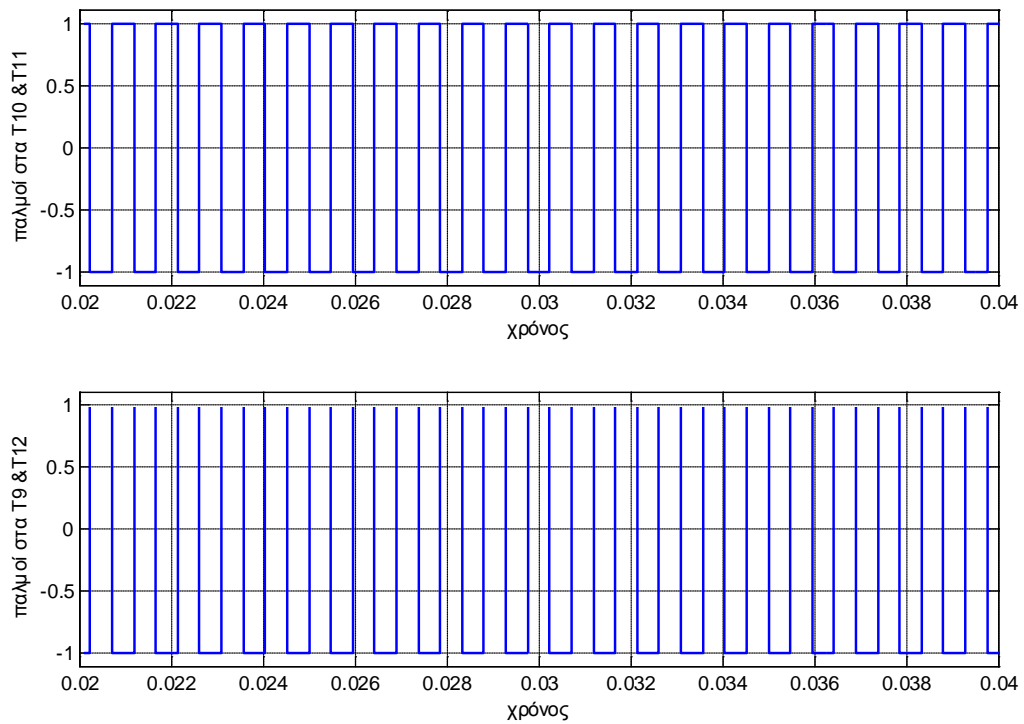
Σχήμα 5.23: Κυματομορφή τάσης στο πρωτεύον του μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας.



Σχήμα 5.24: Κυματομορφή τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας.

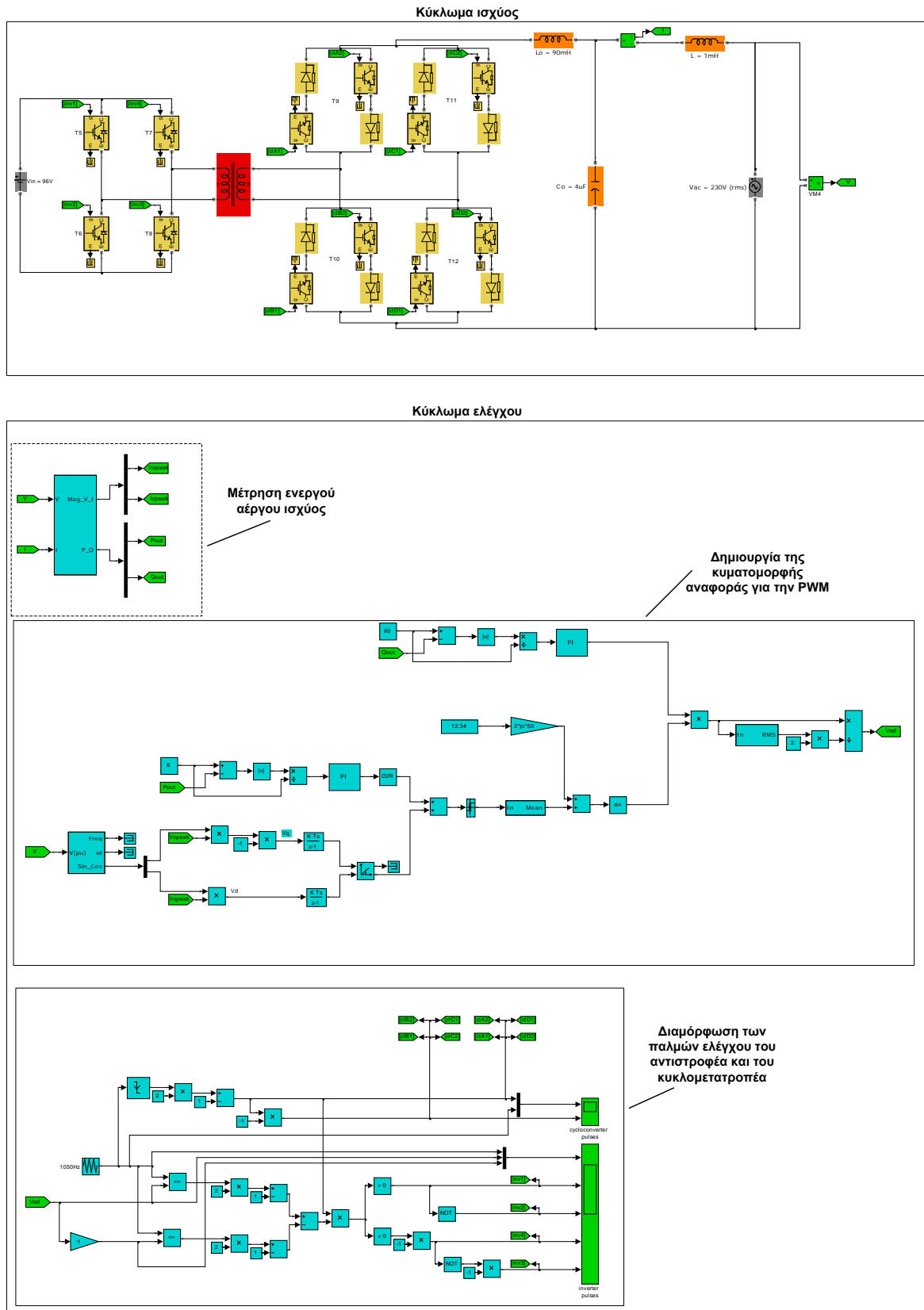


Σχήμα 5.25: Παλμοί έναυσης των ημιαγωγών διακοπών του αντιστροφέα υψηλής συχνότητας.



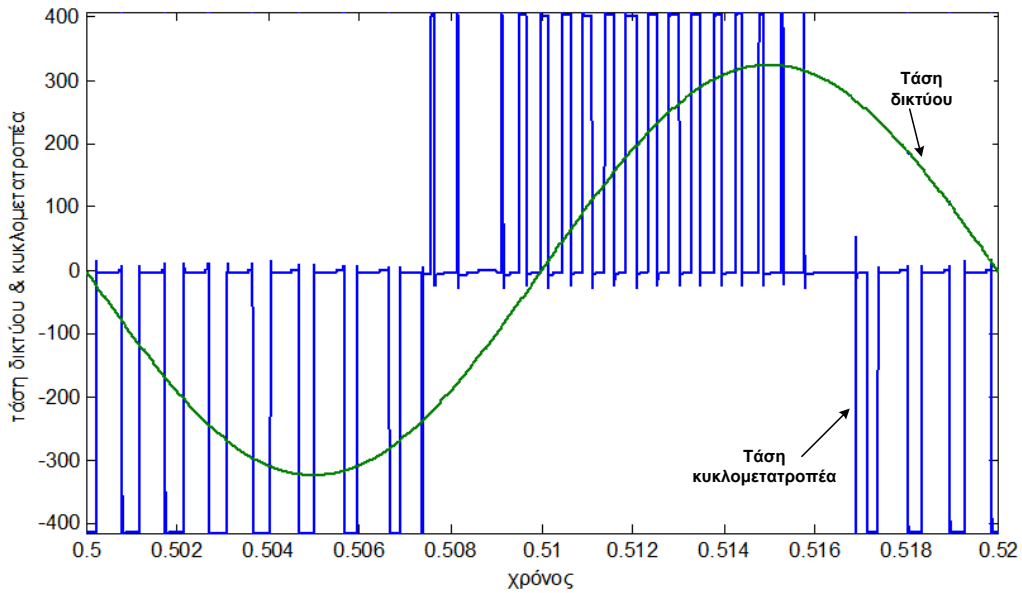
Σχήμα 5.26: Παλμοί έναυσης των ημιαγωγών διακοπών του κυκλωματροπέα υψηλής συχνότητας.

5.5 Διασύνδεση με το δίκτυο διανομής

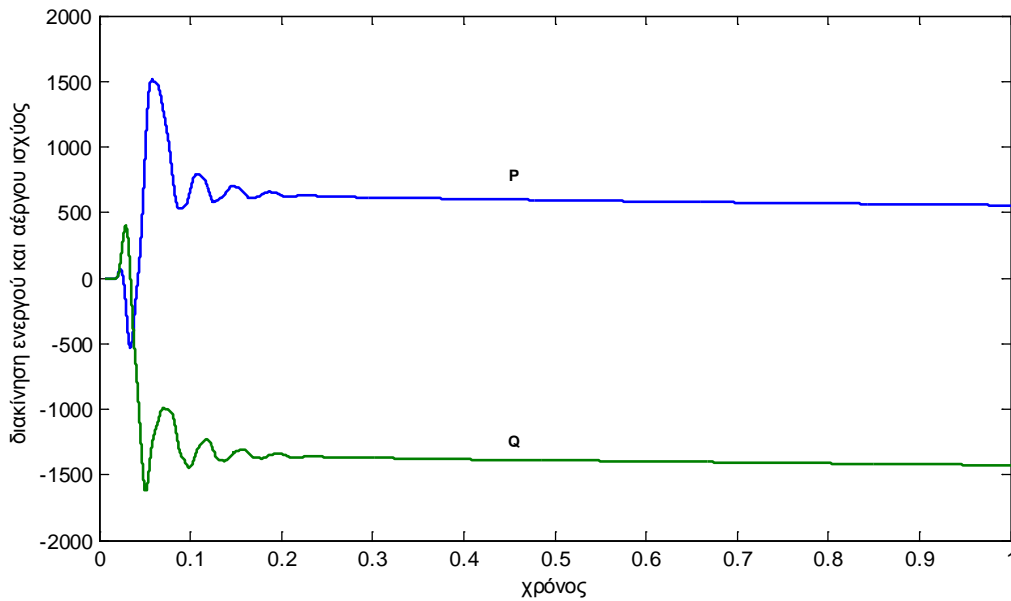


Σχήμα 5.27: Κύκλωμα προσομοιώσεων βαθμίδας dc-ac-ac συνδεδεμένο με το δίκτυο διανομής.

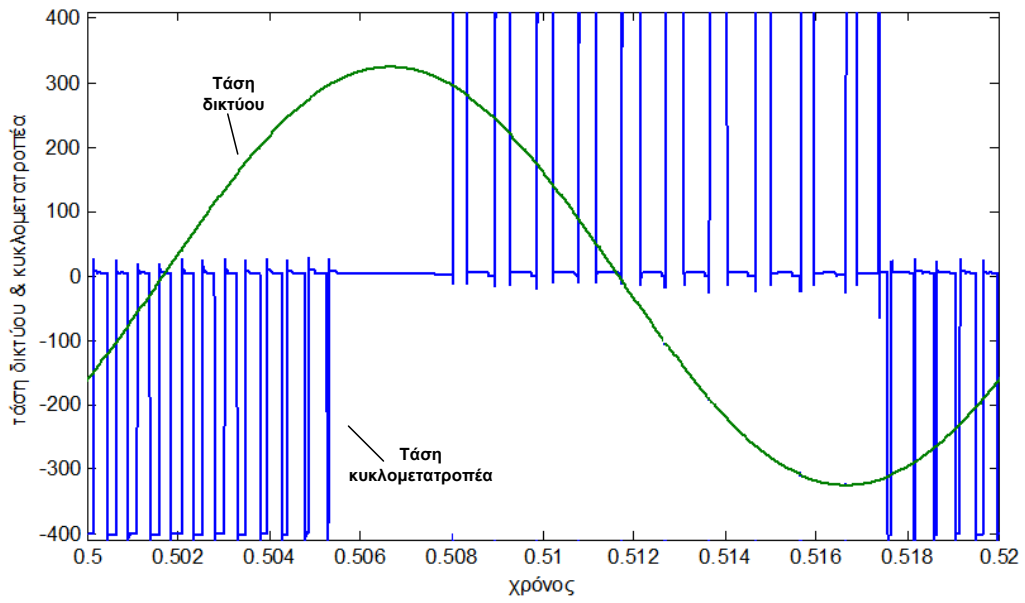
Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.27 στην έξοδο του φίλτρου του κυκλομετατροπέα τοποθετήθηκε μια σύνθετη αντίσταση προσαρμογής με κυρίως επαγωγικό χαρακτήρα. Στην θέση του άπειρου δικτύου διανομής τοποθετήθηκε μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης πλάτους 325V (230V rms) και συχνότητας 50Hz.



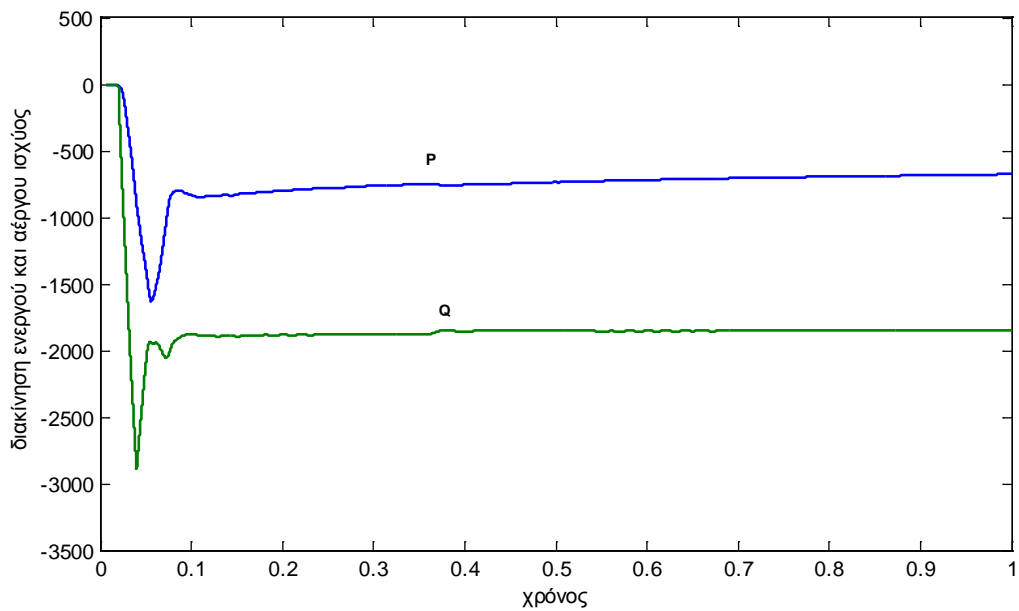
Σχήμα 5.28: Κυματομορφές τάσης δικτύου και τάσης στην είσοδο (δεξιά) του κυκλομετατροπέα – περίπτωση 1.



Σχήμα 5.29: Διακίνηση ενεργού και αέργου ισχύος για την περίπτωση 1.

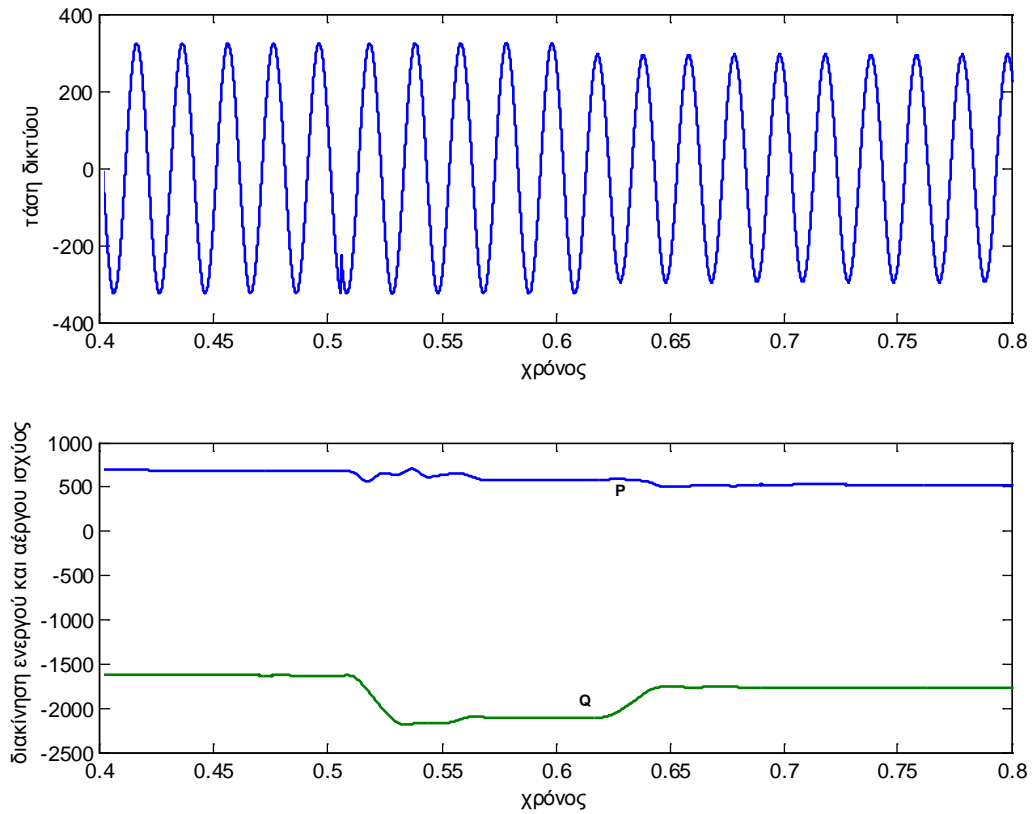


Σχήμα 5.30: Κυματομορφές τάσης δικτύου και τάσης στην είσοδο (δεξιά) του κυκλομετατροπέα – περίπτωση 2.



Σχήμα 5.31: Διακίνηση ενεργού και αέργου ισχύος για την περίπτωση 2.

Την χρονική στιγμή 0,5sec αλλάζω την φάση της τάσης του δικτύου ενώ την χρονική στιγμή 0,62sec αλλάζω και το πλάτος. Στα επόμενα σχήματα φαίνεται πως μεταβάλλεται η ενεργός και άεργος ισχύς.



Σχήμα 5.36: Μεταβολή σε ενεργό και άεργο ισχύ, μετά από μεταβολή της τάσης του δικτύου.

5.6 Συμπεράσματα

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν βάση του τύπου του ηλεκτρολύτη τον οποίο χρησιμοποιούν. Το πιο γνωστό είδος είναι η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου (PEM). Δύο ηλεκτρόδια, τα οποία διαχωρίζονται από μία μεμβράνη, η οποία έχει το ρόλο του ηλεκτρολύτη. Μεταξύ αυτής της πολυμερισμένης μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη.

Σε μια συμβατική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού η χημική ενέργεια των καυσίμου μετατρέπεται πρώτα σε θερμότητα, ύστερα σε μηχανική κίνηση και τελικά σε ηλεκτρική ισχύ, ενώ στις κυψέλες καυσίμου εκμεταλλευόμαστε την απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Έτσι αποφεύγουμε πολλές από τις απώλειες των συμβατικών μονάδων και η απόδοση των κυψέλων καυσίμου όπως θα δούμε και παρακάτω, είναι πολύ υψηλότερη από την απόδοση των συμβατικών μονάδων. Επίσης, δεν έχουν δονήσεις και θόρυβο στοιχεία που τις κάνουν εξαιρετικά φιλικές για τον άνθρωπο και αν αυτά συνδυαστούν και με την μηδενική σχεδόν εκπομπή επικίνδυνων καυσαερίων, οι κυψέλες καυσίμου μπορούν πολύ εύκολα να τοποθετούνται πολύ κοντά στο φορτίο που έχουν να τροφοδοτήσουν.

Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας αποτελείται από μια συσκευή ηλεκτρόλυσης και από μια κυψέλη με καύσιμο το υδρογόνο και μπορεί να λειτουργεί σε δύο φάσεις, στη πρώτη φάση απορροφά ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και την καταναλώνει παράγοντας υδρογόνο και οξυγόνο και φορτίζει την συστοιχία των συσσωρευτών και στην δεύτερη φάση όπου γίνεται η επανασύνδεση του υδρογόνου με το οξυγόνο με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και διάθεση της στο δίκτυο.

Γενικά, ένα σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά για να είναι αξιόπιστη πηγή ισχύος:

- χαμηλό κόστος εφαρμογής,
- υψηλό βαθμό απόδοσης και υψηλή πυκνότητα ισχύος,
- χαμηλό πλάτος κυμάτωσης του ρεύματος από τις κυψέλες καυσίμου, με στόχο την μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής τους,
- γρήγορη και δυναμική απόκριση του συστήματος, για ρύθμιση της συνεχούς τάσης και για έλεγχο του παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος,
- εναλλασσόμενη τάση εξόδου με συνολικό βαθμό αρμονικής παραμόρφωσης (THD) $\leq 5\%$ και
- ωμική απομόνωση μεταξύ του ζυγού συνεχούς ρεύματος και του δικτύου ή του φορτίου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την σύνδεση συστημάτων κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας με το δίκτυο ή εναλλασσόμενα φορτία, προτείνεται η τοπολογία του σχήματος 1.5. Πρόκειται για μια αμφίδρομη διάταξη που επιτρέπει την ροή της ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις, η συστοιχία των συσσωρευτών είναι τοποθετημένη στην πλευρά της χαμηλής dc τάσης και έτσι αποφεύγεται η χρήση συστήματος διαχείρισης συσσωρευτών, ενώ η ύπαρξη των συζευγμένων πηνίων μειώνει κατά πολύ την κυμάτωση του ρεύματος που απορροφά ο dc-dc μετατροπέας από την κυψέλη.

Η διάταξη αυτή αποτελείται από μια βαθμίδα αμφίπλευρου dc-dc μετατροπέα ανύψωσης – υποβιβασμού, από έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών αντιστροφέα και έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών κυκλομετατροπέα και εξαλείφει όλα τα μειονεκτήματα που είχαν οι προηγούμενες διατάξεις. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί συστοιχία συσσωρευτών χαμηλής dc τάσης (έως 96V) με αποτέλεσμα να μην απαιτείται σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών. Απορροφά μικρότερη κυμάτωση ρεύματος από την κυψέλη καυσίμου, σε χαμηλότερη διακοπτική συχνότητα, με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερο φίλτρο στην είσοδο. Επίσης, λόγω της μικρότερης διακοπτικής συχνότητας είναι λιγότερο ευάλωτο στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης. Με την χρήση αντιστροφέα υψηλής συχνότητας χρησιμοποιείται και μετασχηματιστής ισχύος υψηλής συχνότητας και έτσι μειώνεται σημαντικά το βάρος και ο όγκος του, ενώ η αμφίδρομη λειτουργία της διάταξης, κάνει την διάταξη ικανή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις και παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Μειονέκτημα της προτεινόμενης τοπολογίας είναι η χρήση τεσσάρων διόδων και τεσσάρων επιπλέον διακοπών στη βαθμίδα του κυκλομετατροπέα.

Βιβλιογραφία

- [1] James Larminie, Andrew Dicks “Fuel Cell Systems Explained”, Εκδόσεις Wiley, 2003.
- [2] Παντελής Μαραμπέας, διδακτορική διατριβή, “Νέα τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος για εφαρμογές σε κυψέλες υδρογόνου αναστρέψιμης λειτουργίας”, 2008.
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell.
- [4] http://el.wikipedia.org/wiki/Κυψέλη_καυσίμου.
- [5] Frank Kreith, D. Yogi Goswami, “Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy”, Εκδόσεις CRC Press, 2007.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_polymer_battery.
- [7] Σ. Ν. Μανιάς, “Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά”, Εκδόσεις Συμμεών, 2003.
- [8] Pål Andreassen, Tore M. Undeland, “Digital Control Methods for Current Sharing of Interleaved Synchronous Buck Converter”.
- [9] Jose R. Pinheiro, Hilton A. Griindling, Dalton L.R. Vidor and JosC E. Baggio, “Control Strategy of an Interleaved Boost Power Factor Correction Converter”.
- [10] Wei Wen, Yim-Shu Lee, “A Two-Channel Interleaved Boost Converter with Reduced Core Loss and Copper Loss”.
- [11] Gang Yao, Yanqun Shen, Wuhua Li, Xiangning He, “A New Soft Switching Snubber for the Interleaved Boost Converters”.
- [12] Po-Wa Lee, Yim-Shu Lee, David K. W. Cheng, and Xiu-Cheng Liu, “Steady-State Analysis of an Interleaved Boost Converter with Coupled Inductors”.
- [13] Hwi-Beom Shiny, Jong-Gyu Parky, Sung-Dong Changy and Hyun-Chil Choiz, “Generalized analysis of multi-phase interleaved boost converter”.
- [14] M.A.P. Andrade, L. Schuch, J.R. Pinheiro, “Generalized Switching Logic Scheme For CCM-PFC Interleaved Boost Converters”.
- [15] Andy M. McLandrich, “Sensorless Control of a Bidirectional Boost Converter for a Fuel Cell Energy Management System”.

- [16] Σ. Ν. Μανιάς, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμεών, 2007.
- [17] Σ. Ν. Μανιάς, “Σημειώσεις μαθήματος Ηλεκτρονικά Ισχύος ΙΙ”.
- [18] Bimal Bose, “Modern Power Electronics And Ac Drives”, Εκδόσεις Prentice Hall, 2002.
- [19] Bimal Bose, “Power Electronics and Motor Drives - Advances and Trends”, Εκδόσεις Elsevier, 2006.
- [20] Fraidoon Mazda, “Power Electronics Handbook”, Εκδόσεις Newnes, 1997.
- [21] Muhammad H. Rashid, “Power Electronics Handbook”, Εκδόσεις Academic Press, 2001.
- [22] E. Acha, “Power Electronic Control in Electrical Systems”, Εκδόσεις Newnes, 2002.
- [23] Ned Mohan, “Power Electronics Converters Applications and Design”, Εκδόσεις Wiley.
- [24] Timothy L. Skvarenina, “Power Electronics Handbook”, Εκδόσεις CRC Press, 2002.
- [25] William Shepherd, “Power Converter Circuits”, Εκδόσεις Marcel Dekke, 2004.
- [26] Staffan Norrga, “Novel Soft-switching Isolated Three-phase Bidirectional AC/DC Converter”.
- [27] Staffan Norrga, Stephan Meier, Stefan Östlund, “A Three-phase Soft-switched Isolated AC/DC Converter without Auxiliary Circuit”.
- [28] Σκρίμπας Γεώργιος – Αλέξανδρος, “Σχεδίαση και έλεγχος τριφασικού, τεσσάρων αγωγών ενεργού φίλτρου ισχύος μέσω της τροποποιημένης $p - q$ θεωρίας”.
- [29] Amirhossein Hajimiragha, "Generation Control in Small Isolated Power Systems", Science Thesis, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering, Stockholm 2005.
- [30] Dong Dong, "Modeling and Control Design of a Bidirectional PWM Converter for Single-phase Energy Systems", MASTER OF SCIENCE In Electrical Engineering, Blacksburg, VA, 2009.
- [31] Robert S. Balog, and Philip T. Krein, “Commutation Technique for High-Frequency Link Cycloconverter Based on State-Machine Control”.

- [32] P.T. Krein, Xin Geng and R. Balog, “High-Frequency Link Inverter Based on Multiple-Carrier PWM”.
- [33] Philip T. Krein, Robert S. Balog, and Xin Geng, “High-Frequency Link Inverter for Fuel Cells Based on Multiple-Carrier PWM”.
- [34] Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, “Cycloconverters”.
- [35] R. L. Cardoso, I. Barbi, “Bi-Directional DC-AC converters with high frequency isolation”.
- [36] Staffan Norrga, “Novel Soft-switching Isolated Three-phase Bidirectional AC/DC Converter”.
- [37] Staffan Norrga, Stephan Meier, Stefan Östlund, “A Three-phase Soft-switched Isolated AC/DC Converter without Auxiliary Circuit”.
- [38] Stephan Meier, Staffan Norrga and Hans-Peter Nee, “Control Strategies for Mutually Commutated Converter Systems without Cycloconverter Turn-off Capability”.
- [39] Zainal Salam, Zulkifli Ramli, “A Bi-Directional UPS inverter utilising high frequency center-tapped transformer”.