



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

**Νέα Τοπολογία Ηλεκτρονικών Ισχύος για Εφαρμογές σε
Κυψέλες Υδρογόνου Αναστρέψιμης Λειτουργίας**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παντελής Γ. Μαραμπέας

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :
Σ. Ν. ΜΑΝΙΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

ΝΕΑ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΝΑΣΤΡΕΨΙΜΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ


Παντελή Γ. Μαραμπέα

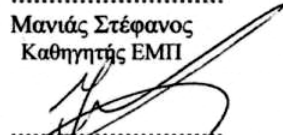
Συμβουλευτική Επιτροπή : Στέφανος Ν. Μανιάς

Αντώνιος Γ. Κλαδάς


Φραγκίσκος Τοπαλής

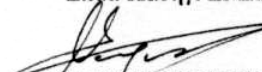
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 21η Μαρτίου 2008


.....
Μανιάς Στέφανος
Καθηγητής ΕΜΠ



.....
Παπαθανασίου Ιωάννης
Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Κλαδάς Αντώνιος
Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Γιαννοπούλου Πολυξένη
Επικ. Καθηγ. ΕΜΠ


.....
Μάργαρης Νικόλαος
Καθηγητής ΑΠΘ


.....
Τοπαλής Φραγκίσκος
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Παπαθανασίου Σταύρος
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2008

.....
Παντελής Γ. Μαραμπέας

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

Copyright Παντελής Γ . Μαραμπέας, 2008.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας απασχολεί εδώ και πολλά χρόνια την επιστημονική κοινότητα. Κατά το παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφορα τέτοια συστήματα, όπως τα συστήματα αποθήκευσης κινητικής ενέργειας (σφόνδυλοι), τα αντλητικά συστήματα αποθήκευσης νερού και οι συσσωρευτές (μπαταρίες). Μια άλλη, πιο πρόσφατη και γνωστή τεχνική, η οποία προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, ως συσκευή παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μια αμφίπλευρη τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στα συστήματα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας. Η τοπολογία αυτή, μαζί με το σύστημα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και σε υβριδικά συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το προτεινόμενο σύστημα μετατροπής ισχύος αποτελείται από μια βαθμίδα αμφίπλευρου dc-dc μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού με συζευγμένα πηνία και από μια υψηλής συχνότητας βαθμίδα dc-ac-ac αμφίπλευρης ροής ισχύος, η οποία περιλαμβάνει έναν ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών αντιστροφέα και έναν ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών κυκλομετατροπέα.

Η προτεινόμενη τοπολογία αναλύεται διεξοδικά, δίνονται οι απαιτούμενες εξισώσεις σχεδίασης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης στο Spice, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα. Από την ανάλυση της προτεινόμενης τοπολογίας γίνονται εμφανή τα πλεονεκτήματα που προσφέρει σε σύγκριση με τις έως τώρα υφιστάμενες τοπολογίες για εφαρμογές σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.

Λέξεις Κλειδιά

Συστήματα Παραγωγής και Αθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας,Κυψέλες Καυσίμου, Κυψέλες Καυσίμου Αναστρέψιμης Λειτουργίας, Μετατροπέας Ανύψωσης-Υποβιβασμού, Μετατροπέας Ανύψωσης με Συζευγμένα Πηνία, Τριφασικός Αντιστροφέας με Πηγή Τάσης, Υψηλής Συχνότητας Κυκλομετατροπέας, Αμφίπλευρη Τοπολογία Μετατροπής Ισχύος.

Abstract

Fuel cells are widely viewed as the technology of the future to replace the existing batteries to generate and/or store electrical power. The advantages of fuel cells include higher power density, they eliminate the charging and recharging problems, higher life time (ten years) and more cost effective than batteries. Moreover, the waste heat generated by the fuel cell can usually be used for cogeneration such as steam, air conditioning, hot air and heating and consequently the overall efficiency of such a system could be increased up to 80%.

The Regenerative fuel cell couples an electrolyzer with a hydrogen fuel cell and is capable to operate in two modes: electrical power generation mode, in which hydrogen and oxygen are recombined to produce electrical power and water and regenerative mode, in which electrical energy is consumed and hydrogen and oxygen are produced.

In the pasts several possible unidirectional or bi-directional topologies have been proposed, which can be used as front-end dc-dc conditioners in a power generation system

The present Ph.D. Dissertation proposes a bidirectional power electronics conditioning system, which can be applied to a power generation and storage system that uses regenerative fuel cells and renewable energy sources. The proposed power electronics conditioning system consists of a front-end interleaved boost dc-dc stage, a high frequency sinusoidal pulse width modulation inverter and a high frequency sinusoidal pulse width modulation cycloconverter stage. This topology when is compared to the existing bidirectional power conditioning systems has the following advantages:

- a) Provides bi-directional power flow to the hybrid generation and storage system thus giving the capability to use regenerative fuel cells,
- b) has build-in high frequency ohmic isolation and consequently exhibits high power density,
- c) employs low voltage battery configuration thus eliminating the necessity of a battery management system,
- d) draws low current ripple component from the fuel cell stack, and
- e) provides fuel cell start-up and battery charging through the utility grid and/or the renewable energy sources.

Key Words

Power Generation and Storage Systems, Fuel Cells, Regenerative Fuel Cells, Buck-Boost Converter, Interleaved Boost Converter, Three-Phase Voltage Source Inverter, High Frequency Cycloconverter, Bidirectional Power Electronics Conditioning System.

Στην αγαπημένη μου κόρη Ελένη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής μου θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Στέφανο Μανιά για την πολύτιμη βοήθεια, την αμέριστη συμπαράσταση και την καθοδήγηση του, καθώς και τα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. κ. καθηγητές Αντώνη Κλαδά και Φραγκίσκο Τοπαλή για τη συνεργασία και την εμπιστοσύνη τους. Επίσης οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επίκουρο καθηγητή κ. Σταύρο Παπαθανασίου για την προθυμία του να μου παράσχει οποιαδήποτε βοήθεια και συμβουλή του εξήτησα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη συνεργασία, το προσωπικό του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος, κ. κ. Κώστα Παύλου και Παναγιώτη Ζάνη, όπως και όλους τους συναδέλφους υποψήφιους διδάκτορες, ιδιαίτερα δε τον κ. Ιάκωβο Μανωλά. Επίσης ευχαριστώ πολύ το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και τους τεχνικούς του τμήματος υδρογόνου για τη διάθεση της κυψέλης καυσίμου PEM.

Τέλος, ευχαριστώ όλους εκείνους, που με τη στάση τους και τη συμπεριφορά τους με στήριξαν στη δύσκολη προσπάθεια της διεκπεραίωσης της διδακτορικής διατριβής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ			13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ		17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ		
2.1	Εισαγωγή		25
2.2	Αρχή λειτουργίας κυψελών καυσίμου		26
2.3	Λειτουργία και χαρακτηριστικά κυψελών καυσίμου		27
2.4	Τύποι κυψελών καυσίμου		33
2.4.1	Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)		33
2.4.2	Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)		34
2.4.3	Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)		35
2.4.4	Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)		36
2.4.5	Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)		37
2.4.6	Κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας		55
2.5	Εφαρμογές κυψελών καυσίμου		63
2.5.1	Σταθερές ή κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας		64
2.5.2	Διανεμημένη παραγωγή		64
2.5.3	Εφαρμογές στα μέσα μεταφοράς		65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	DC-DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ		
3.1	Εισαγωγή		67
3.2	DC-DC μετατροπείς ισχύος χωρίς ωμική ή γαλβανική απομόνωση		67
3.2.1	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Step-Down ή Buck Converter)		67
3.2.2	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Step-Up ή Boost Converter)		72
3.2.3	Μετατροπέας υποβιβασμού- ανύψωσης τάσης (Buck-Boost)		77

	3.2.4	Dc-dc μετατροπέας ανύψωσης με συζευγμένα πηνία	85
	3.2.5	Αμφίπλευρος dc-dc μετατροπέας με συζευγμένα πηνία	92
	3.3	DC-DC μετατροπείς με ωμική ή γαλβανική απομόνωση	93
	3.3.1	Μετατροπέας πλήρους γέφυρας (full bridge)	93
	3.3.2	Μετατροπέας εναλλαγής (push-pull)	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ	4	ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	
	4.1	Εισαγωγή	97
	4.2	Μονοφασικός αντιστροφέας τετραγωνικού παλμού σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας	98
	4.3	Μονοφασικός αντιστροφέας τετραγωνικού παλμού σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας	99
	4.3.1	Έλεγχος της τάσης εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας	102
	4.3.2	Εξάλειψη ανώτερων αρμονικών με την τεχνική SPWM	107
	4.4	Τριφασικός αντιστροφέας με πηγή τάσης	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ	5	ΚΥΚΛΟΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	
	5.1	Εισαγωγή	119
	5.2	Είδη κυκλομετατροπέων	119
	5.2.1	Κυκλομετατροπείς ελέγχου φάσης	120
	5.2.2	Μετατροπέας τύπου μήτρας	130
	5.2.3	Υψηλής συχνότητας κυκλομετατροπείς	131
ΚΕΦΑΛΑΙΟ	6	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ	
	6.1	Εισαγωγή	133
	6.2	Ανάλυση προτεινόμενης τοπολογίας	133
	6.2.1	Ανάλυση της βαθμίδας του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία	133

6.2.2	Ανάλυση της βαθμίδας του αμφίπλευρου dc-ac-ac αντιστροφέα – κυκλομετροπέα	136
6.3	Παράδειγμά σχεδιασμού	141
6.4	Προτεινόμενο κύκλωμα ελέγχου	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	
7.1	Εισαγωγή	147
7.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης	147
7.2.1	Προσομοίωση μετατροπέα με συζευγμένα πηνία	147
7.2.2	Προσομοίωση βαθμίδας αντιστροφέα και κυκλομετατροπέα	151
7.3	Πειραματικά αποτελέσματα	154
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
8.1	Εισαγωγή	159
8.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης	161
8.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	161
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	165
	ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ	168

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζεται και αναλύεται μια νέα διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται και αναλύεται ένα σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος, το οποίο αποτελείται από μια βαθμίδα με έναν αμφίπλευρο dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία και από μια βαθμίδα υψηλής συχνότητας dc-ac-ac αμφίπλευρης ροής ισχύος, η οποία αποτελείται από έναν ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών αντιστροφέα και από 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 ως συσκευή ηλεκτρόλυσης.

Η προτεινόμενη τοπολογία συγκρινόμενη με τις ήδη υπάρχουσες τοπολογίες παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα :

Πλεονεκτήματα :

- 1) Χρησιμοποιεί συστοιχία συσσωρευτών χαμηλής DC τάσης (έως 96 Volts), με αποτέλεσμα να μην απαιτείται σύστημα διαχείρισης και ισοδυναμικού των στοιχείων.
- 2) Απορροφά μικρότερη κυμάτωση ρεύματος από την κυψέλη καυσίμου, με χαμηλότερη διακοπτική συχνότητα, με αποτέλεσμα να χρειάζεται μικρότερο φίλτρο στην είσοδο της κυψέλης καυσίμου. Επίσης λόγω της μικρότερης διακοπτικής συχνότητας είναι λιγότερο ευάλωτο στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης (Electromagnetic Interference - EMI)
- 3) Λόγω της εφαρμογής του αντιστροφέα υψηλής συχνότητας, ο μετασχηματιστής ισχύος έχει μεγάλη πυκνότητα ισχύος (kW/cm^3), μειώνοντας έτσι τον όγκο και το βάρος του.
- 4) Λόγω της αμφίδρομης λειτουργίας του, το προτεινόμενο κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Μειονεκτήματα :

- 1) Χρησιμοποιεί τέσσερις (4) επιπλέον διακόπτες και τέσσερις (4) επί πλέον διόδους στη βαθμίδα του κυκλομετατροπέα.

Είναι γνωστό ότι πολλές φορές, κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης ημέρας, τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από αυτή που πραγματικά απαιτείται. Αυτό οφείλεται, εν μέρει, στο γεγονός ότι είναι οικονομικώς

πιο αποδοτικό για τις γεννήτριες να συνεχίζουν να λειτουργούν σε υψηλή παραγωγή, από το να μειώνουν ή να διακόπτουν εντελώς την παραγωγή τους, για λίγες ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι χαμηλή. Το γεγονός αυτό παρέχει την ευχέρεια αξιοποίησης αυτής της πλεονάζουσας παραγωγής, χρησιμοποιώντας την για την παραγωγή υδρογόνου και για τη φόρτιση των συσσωρευτών σε ένα σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας. Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή υδρογόνου και για τη φόρτιση των συσσωρευτών μπορεί να προέρχεται και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μηδενίζοντας έτσι τη εκπομπή των ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Το πρώτο κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής αναφέρεται στη δομή των συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου, στα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν για να είναι αξιόπιστα και στα ήδη υφιστάμενα τέτοια συστήματα. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η προτεινόμενη τοπολογία και γίνεται σύγκριση αυτής με τις υφιστάμενες τοπολογίες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής περιγραφή των βασικών τύπων κυψελών καυσίμου και αναφέρεται η αρχή λειτουργίας τους, καθώς και τα τεχνικά και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στην κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων (Polymer Electrolyte Membrane ή Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC), η οποία χρησιμοποιείται ως κυψέλη αναστρέψιμης λειτουργίας στο προτεινόμενο σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον τύπο της κυψέλης αυτής περιγράφονται τα δομικά στοιχεία της, τα χαρακτηριστικά της και αναλύεται το μαθηματικό της μοντέλο. Επίσης παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμά της και οι εφαρμογές της, τόσο σε σταθερές εγκαταστάσεις, όσο και σε κινητές (π.χ. οχήματα).

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται και αναλύεται η λειτουργία των dc-dc μετατροπέων ισχύος με ή χωρίς γαλβανική ή ωμική απομόνωση, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην ανάλυση του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, που χρησιμοποιείται στην προτεινόμενη τοπολογία της παρούσας διατριβής και ο οποίος παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα συγκρινόμενος με τους υπόλοιπους μετατροπέες, για εφαρμογές σε (αμφίπλευρα) συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται σύντομη παρουσίαση και ανάλυση της λειτουργίας των αντιστροφών με πηγή τάσης. Επίσης παρουσιάζεται και αναλύεται η μέθοδος εξάλειψης των

αρμονικών συνιστωσών με την τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM), για μονοφασικό και τριφασικό αντιστροφέα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στη βαθμίδα της dc-ac-ac μετατροπής της τάσης της τοπολογίας που προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύεται η λειτουργία των βασικών τύπων των κυκλομετατροπέων, όπως αυτοί εφαρμόστηκαν αρχικά και εξελίχθηκαν στη συνέχεια. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον για τις εφαρμογές των κυκλομετατροπέων, ιδιαίτερα μετά την εμφάνιση των νέων τεχνικών ελέγχου.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της προτεινόμενης τοπολογίας. Πιο συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση των φάσεων λειτουργίας της βαθμίδας του dc-dc ενδιάμεσου μετατροπέα και παρουσιάζεται το μαθηματικό του μοντέλο, όπως αυτό προκύπτει και από την ανάλυση που έγινε στο τρίτο κεφάλαιο. Επίσης, περιγράφεται η λειτουργία και γίνεται η μαθηματική ανάλυση της βαθμίδας αντιστροφέα-κυκλομετατροπέα. Τέλος, για την κατανόηση της θεωρητικής ανάλυσης δίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμού των στοιχείων (τιμές φίλτρου εισόδου του αντιστροφέα και μετασχηματιστή απομόνωσης) μιας τέτοιας τοπολογίας.

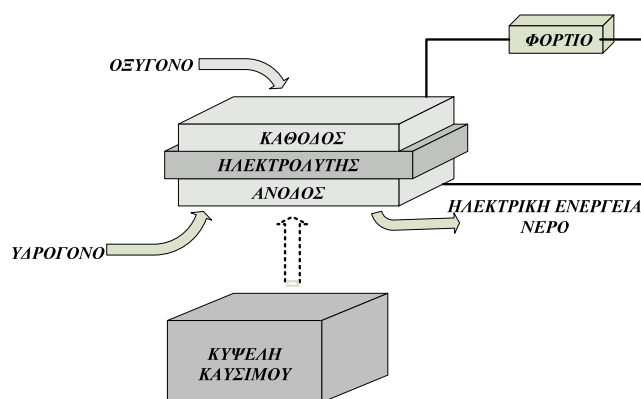
Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης της τοπολογίας, τα οποία επιβεβαιώνουν τα θεωρητικά αναμενόμενα. Επίσης, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία συγκρινόμενα τόσο με τα θεωρητικά αναμενόμενα, όσο και με αυτά της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την ορθότητα του σχεδιασμού και της κατασκευής της τοπολογίας.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, τα σημεία προαγωγής της επιστήμης και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κυψέλες καυσίμου αντιμετωπίζονται πλέον από την επιστημονική κοινότητα ως η τεχνολογία του μέλλοντος για την αντικατάσταση των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σήμερα στα συστήματα παραγωγής ή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας [1], [2]. Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου έναντι των συσσωρευτών είναι σημαντικά : παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος, δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα φόρτισης – εκφόρτισης, έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής (πάνω από δέκα χρόνια) και έχουν μικρότερο κόστος λειτουργίας από τις μπαταρίες. Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου συνίσταται στην απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας του εκάστοτε καυσίμου σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων που συντελούνται στα ηλεκτρόδια της κυψέλης και με τη βοήθεια ενός ηλεκτρολύτη (σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.

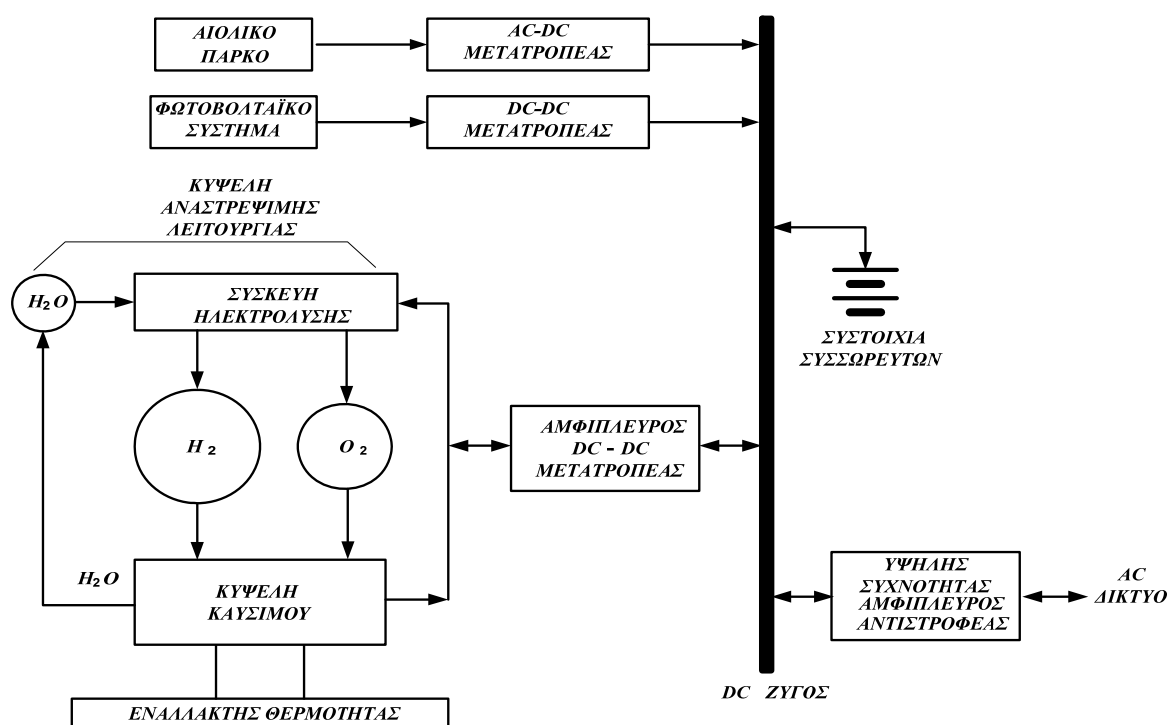
Αν υπάρξει πρόβλεψη για την αξιοποίηση και της παραγόμενης θερμικής ενέργειας, τότε η απόδοση της κυψέλης καυσίμου μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει (ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης) το 80%. Αυτός ο βαθμός απόδοσης είναι υπερβολικά υψηλός, συγκρινόμενος με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που εφαρμόζονται μέχρι σήμερα. Επιπλέον, κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου δεν εκλύονται στο περιβάλλον ρυπογόνες ουσίες, αφού τα παράγωγα των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην κυψέλη είναι αβλαβή (το κυριότερο παράγωγο είναι οι υδρατμοί).

Είναι γνωστό ότι πολλές φορές, κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης ημέρας, τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από αυτή που πραγματικά απαιτείται. Αυτό οφείλεται, εν μέρει, στο γεγονός ότι είναι οικονομικώς πιο αποδοτικό για τις γεννήτριες να συνεχίζουν να λειτουργούν σε υψηλή παραγωγή, από το να μειώνουν ή να διακόπτουν εντελώς την παραγωγή τους, για λίγες ώρες κατά τη διάρκεια της ημέρας, όπου η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι χαμηλή. Επομένως, παρουσιάζεται μια

ευκαιρία να χρησιμοποιηθεί αυτή η πλεονάζουσα παραγωγή. Το ίδιο ισχύει και για τα συστήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όταν η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξ ολοκλήρου.

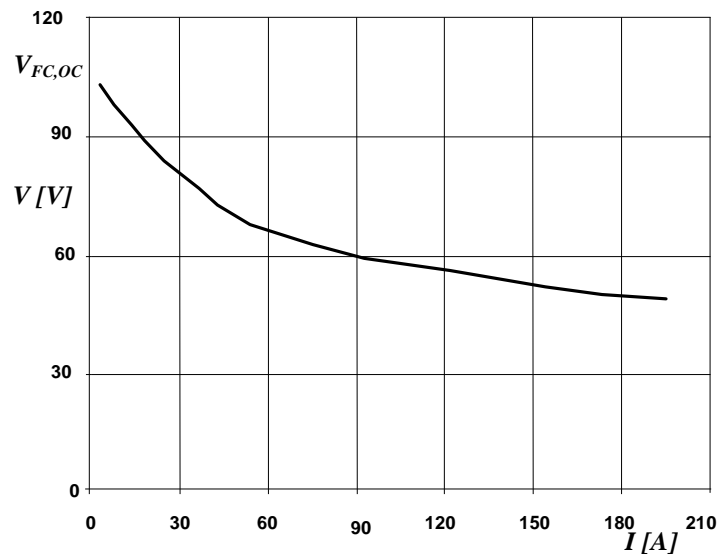
Κατά το παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα αποθήκευσης της ενέργειας για αξιοποίηση αυτής της πλεονάζουσας παραγωγής. Τέτοια συστήματα είναι τα συστήματα αποθήκευσης κινητικής ενέργειας (σφόνδυλοι), τα αντλιακά συστήματα αποθήκευσης νερού και οι συσσωρευτές (μπαταρίες). Μια άλλη, πιο πρόσφατη και γνωστή τεχνική είναι οι κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας [3]-[4]. Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας αποτελείται από μια συσκευή ηλεκτρόλυσης και από μια κυψέλη με καύσιμο το υδρογόνο. Το σύστημα αυτό είναι ικανό για να λειτουργεί σε δύο φάσεις : στη φάση κατά την οποία η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται παράγοντας υδρογόνο και οξυγόνο αλλά και φορτίζοντας τη συστοιχία των συσσωρευτών που χρησιμοποιείται, και στη φάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την οποία το υδρογόνο και το οξυγόνο επανασυνδέονται για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και νερό.

Το σχήμα 1.2 παρουσιάζει ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, που περιλαμβάνει κυψέλη καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.



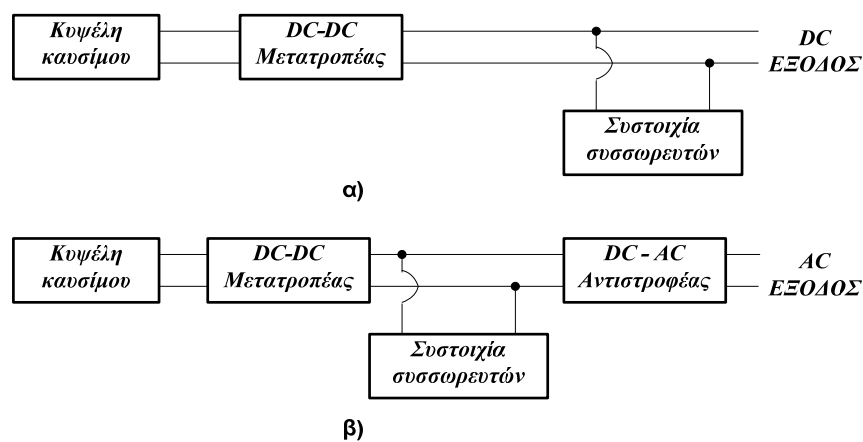
Σχήμα 1.2 Υβριδικό σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλη καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3, η τάση εξόδου μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου μεταβάλλεται σε σχέση με το ρεύμα του φορτίου, επομένως απαιτείται η τοποθέτηση ενός dc-dc ρυθμιστή (μετατροπέα) ισχύος [5]. Επιπλέον, μετά από τον dc-dc μετατροπέα πρέπει να ακολουθεί ένας αντιστροφέας, με σκοπό να καθίσταται δυνατή η σύνδεση της κυψέλης καυσίμου με φορτίο εναλλασσομένου ρεύματος ή και με το δίκτυο.



Σχήμα 1.3 V-I χαρακτηριστική μιας PEM κυψέλης καυσίμου.

Στο σχήμα 1.4 φαίνεται το δομικό διάγραμμα ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και οι βαθμίδες των ηλεκτρονικών ισχύος, που απαιτούνται για να τροφοδοτούν τα διάφορα φορτία.



Σχήμα 1.4 Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλη καυσίμου και οι βαθμίδες των ηλεκτρονικών ισχύος που απαιτούνται: α) για DC φορτία, β) για AC φορτία.

Εάν απαιτείται ωμική απομόνωση ή υψηλός λόγος μετασχηματισμού της τάσης, συνήθως ενσωματώνεται στο σύστημα ένας μετασχηματιστής. Προτιμάται η τοποθέτηση ενός υψηλής συχνότητας μετασχηματιστή στο τμήμα υψηλής συχνότητας του κυκλώματος, παρά η τοποθέτηση ενός χαμηλής συχνότητας μετασχηματιστή στο σημείο εξόδου της ac τάσης χαμηλής συχνότητας, ο οποίος είναι ογκώδης και υψηλού κόστους.

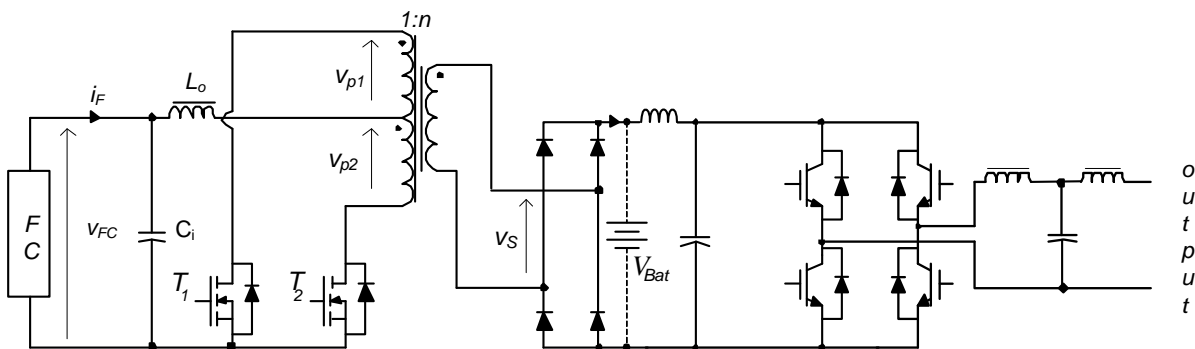
Ένα σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για να είναι ικανό να λειτουργεί ως αξιόπιστη πηγή ισχύος, πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά [6]:

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

Ένα σημαντικό πρόβλημα σε σχέση με τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου είναι ότι, από τη φύση τους, οι κυψέλες καυσίμου έχουν μια μεγάλη χρονική σταθερά απόκρισης. Αυτό προκαλείται από τον αργό έλεγχο της ρύθμισης τροφοδοσίας και ενυδάτωσης των κυψελών καυσίμου κατά τη διαδικασία της ενεργειακής μετατροπής. Αυτή η μεγάλη χρονική σταθερά (περίπου 10-20 sec) δημιουργεί πρόσθετες δυσκολίες ελέγχου στις επόμενες βαθμίδες μετατροπής ισχύος. Επομένως, απαιτείται κάποιος τύπος συμπληρωματικής αποθήκευσης ενέργειας (υπερπυκνωτές ή συσσωρευτές).

Οι συσσωρευτές είναι κοινή επιλογή και μπορεί να είναι καλή αν χρησιμοποιηθεί μια συστοιχία μπαταριών χαμηλής τάσης (π.χ. 96 V). Αυτή η συστοιχία χαμηλής τάσης, η οποία δεν απαιτεί σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών (battery management system - BMS), μπορεί να τοποθετηθεί μετά από την έξοδο της πρώτης βαθμίδας dc-dc μετατροπείας (σχήμα 1.4). Εάν χρησιμοποιηθεί συστοιχία συσσωρευτών υψηλής τάσης (π.χ. 340V), τότε, λόγω του μεγάλου αριθμού στοιχείων σε σειρά θα χρειαστεί ένα υψηλού κόστους σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών και συχνά θα οδηγήσει σε καταστάσεις αστάθειας.

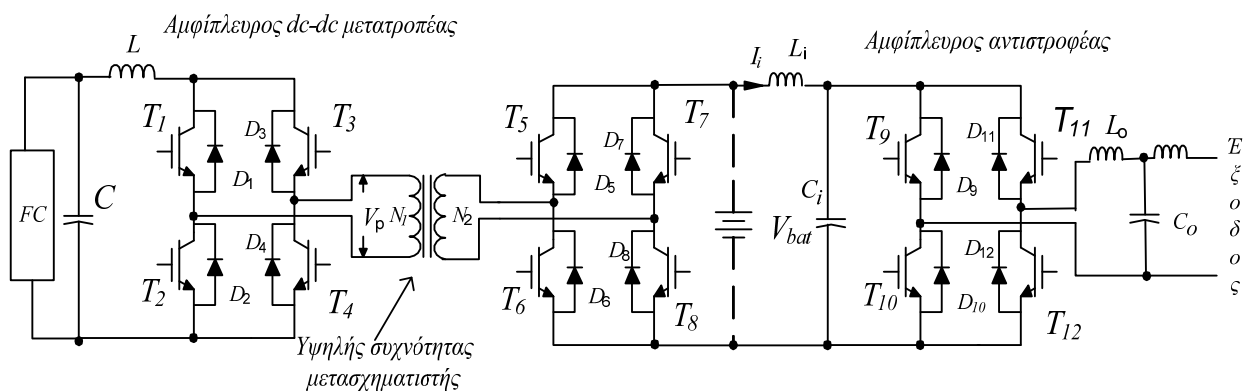
Στα περισσότερα υβριδικά συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, που απαιτούν εναλλασσόμενη τάση εξόδου χρησιμοποιείται μετά από τον dc-dc μετατροπεία, ένας πλήρους γέφυρας (μονοφασικός ή τριφασικός) SPWM αντιστροφείας πηγής τάσης. Στο σχήμα 1.5 παρουσιάζεται μια τοπολογία μετατροπής ισχύος μιας κατεύθυνσης (μη αμφίδρομη), στην οποία χρησιμοποιείται ένας push-pull dc-dc μετατροπείας και ένας μονοφασικός πλήρους γέφυρας αντιστροφείας. [7]-[11].



Σχήμα 1.5 Σύστημα μετατροπής ισχύος μιας κατεύθυνσης, με τη συστοιχία των συσσωρευτών στην πλευρά της υψηλής dc τάσης (210-390 Volts)

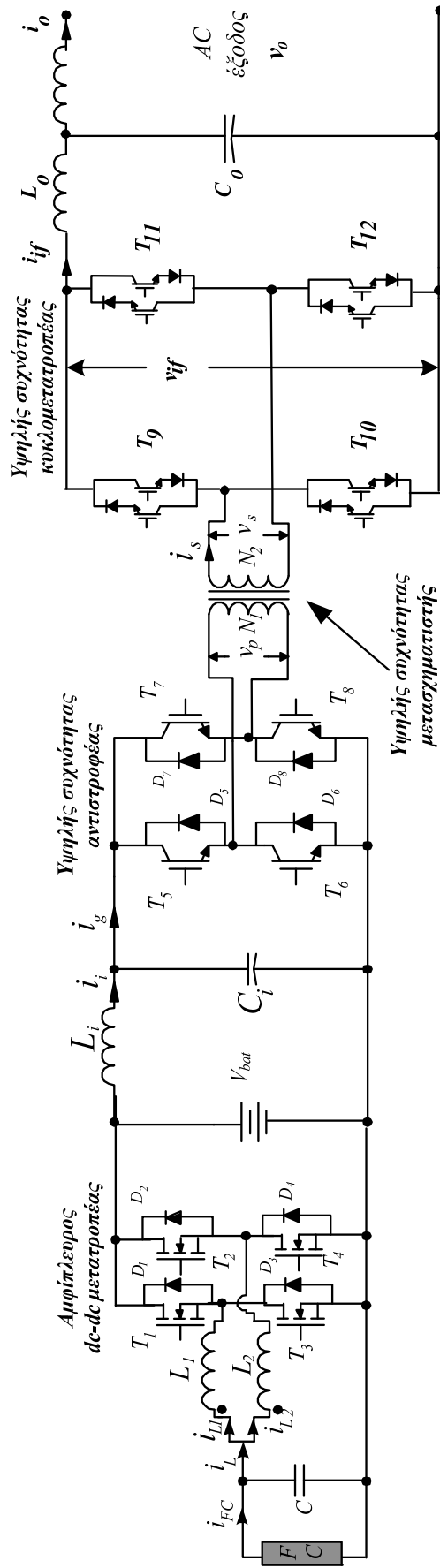
Στο σχήμα 1.6 παρουσιάζεται μια υφιστάμενη τοπολογία αμφίπλευρης μετατροπής ισχύος, η οποία χρησιμοποιεί έναν αμφίπλευρο πλήρους γέφυρας dc-dc μετατροπέα και έναν αντιστροφέα, που από τη φύση του έχει αμφίδρομα χαρακτηριστικά [12], [13], [14]. Αυτή η τοπολογία, αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές που απαιτείται αμφίπλευρη ροή ισχύος, συγκρινόμενη με την προτεινόμενη στην παρούσα διδακτορική διατριβή τοπολογία (σχήμα 1.7) έχει τα παρακάτω μειονεκτήματα :

- I. Η συστοιχία των συσσωρευτών τοποθετείται στην πλευρά της υψηλής συνεχούς τάσης, κι επομένως απαιτείται σύστημα διαχείρισης μπαταριών και συχνά θα οδηγεί σε καταστάσεις αστάθειας εντός της συστοιχίας των συσσωρευτών και
- II. Λόγω της παρουσίας του πλήρους γέφυρας dc-dc μετατροπέα, απορροφάται υψηλή κυμάτωση ρεύματος της κυψέλης καυσίμου, κι έτσι απαιτείται μεγαλύτερο φίλτρο πυκνωτή στην κυψέλη. Για να απορροφηθεί η ίδια κυμάτωση ρεύματος με αυτή του μετατροπέα ανύψωσης με συζευγμένα πηνία, πρέπει να λειτουργήσει στη διπλάσια διακοπτική συχνότητα.



Σχήμα 1.6 Αμφίπλευρο σύστημα μετατροπής ισχύος, με τη συστοιχία των συσσωρευτών στην πλευρά της υψηλής συνεχούς τάσης.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μια αμφίπλευρη τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στα συστήματα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας. Η τοπολογία αυτή, μαζί με το σύστημα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και σε υβριδικά συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο σχήμα 1.7 παρουσιάζεται το προτεινόμενο σύστημα μετατροπής ισχύος, το οποίο 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.



Σχήμα 1.7 Προτεινόμενη αμφίπλευρη τοπολογία μετατροπής ισχύος.

Η τοπολογία αυτή συγκρινόμενη με τα ήδη υφιστάμενα αμφίδρομα συστήματα μετατροπής ισχύος παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα :

Πλεονεκτήματα :

- 1) Χρησιμοποιεί συστοιχία συσσωρευτών χαμηλής DC τάσης (έως 96 Volts), με αποτέλεσμα να μην απαιτείται σύστημα διαχείρισης και ισοδυναμικού των στοιχείων.
- 2) Απορροφά μικρότερη κυμάτωση ρεύματος από την κυψέλη καυσίμου, σε χαμηλότερη διακοπτική συχνότητα, με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερο φίλτρο στην είσοδο της κυψέλης καυσίμου. Επίσης λόγω της μικρότερης διακοπτικής συχνότητας είναι λιγότερο ευάλωτο στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης (Electromagnetic Interference - EMI)
- 3) Λόγω της εφαρμογής του αντιστροφέα υψηλής συχνότητας, ο μετασχηματιστής ισχύος έχει μεγάλη πυκνότητα ισχύος (kW/cm^3), μειώνοντας έτσι τον όγκο και το βάρος του.
- 4) Λόγω της αμφίδρομης λειτουργίας του, το προτεινόμενο κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Μειονεκτήματα :

- 1) Χρησιμοποιεί τέσσερις (4) διόδους και τέσσερις (4) διακόπτες επιπλέον, στη βαθμίδα του κυκλομετατροπέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν σήμερα μια από τις ταχύτερα εξελισσόμενες τεχνολογίες στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και η τεχνολογία αυτών των ηλεκτροχημικών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας είναι γνωστή εδώ και 150 χρόνια περίπου, εν τούτοις μόλις τα τελευταία χρόνια άρχισαν να εξετάζονται σοβαρά ως η πηγή ενέργειας του μέλλοντος και να τυγχάνουν ευρύτερης αποδοχής από την επιστημονική κοινότητα.

Η αρχή λειτουργίας της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου εφευρέθηκε από τον Άγγλο William Grove το 1839, ο οποίος περιέγραψε μία "ηλεκτρολυτική μπαταρία αερίων", που με "ψυχρή καύση" του υδρογόνου και του οξυγόνου θα παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα με θεωρητική απόδοση σχεδόν 100%. Ένας από τους πρώτους που αναγνώρισε τη σημασία των κυψελών καυσίμου ήταν ο Westphal το 1880. Το 1894, ο Oswald πρότεινε μια διαδικασία συνδυασμού άνθρακα (C) και οξυγόνου (O₂). Η πραγματοποίηση αυτής της ιδέας απέτυχε, εξ' αιτίας των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας (της τάξης των 1000°C) και των προβλημάτων που δημιουργήθηκαν, όσον αφορά την αντοχή και την ομαλή συμπεριφορά των υλικών σε αυτές τις θερμοκρασίες. Από τότε και μετά, οι ερευνητικές προσπάθειες εστιάστηκαν στην αντίδραση H₂ – O₂, η οποία μπορούσε να ελεγχθεί ευκολότερα. Όμως, μόλις τη δεκαετία του 1960 οι κυψέλες καυσίμου εντάχθηκαν σε πρακτική εφαρμογή. Εκείνη την περίοδο, η NASA χρησιμοποίησε τις κυψέλες καυσίμου για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, κατά τη διάρκεια των αποστολών του διαστημόπλοιου Gemini. Το γεγονός αυτό ενθάρρυνε τους ερευνητές, με αποτέλεσμα σε πολλές χώρες να ξεκινήσει μία έντονη δραστηριότητα γύρω από τις κυψέλες καυσίμου, τόσο σε πανεπιστήμια και σε εργαστήρια, όσο και στη βιομηχανία. Αλλά ο αρχικός ενθουσιασμός εξασθένησε σύντομα στην αρχή της δεκαετίας του 1970, εξ' αιτίας του χαμηλού ρυθμού ανάπτυξης. Τελικά το ενδιαφέρον των αμερικανικών βιομηχανιών αναπτερώθηκε πάλι με τις χρηματοδοτήσεις για έρευνα από το Τμήμα Ενέργειας (DOE), το Ινστιτούτο Έρευνας Ηλεκτρικής Ενέργειας (EPRI) και το Ινστιτούτο Έρευνας Αερίων (GRI) στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εκδηλώθηκε για τις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC). Την ίδια περίοδο στην Ιαπωνία ξεκίνησε ένα νέο ερευνητικό πρόγραμμα, το «Moonlight Program», το οποίο υποστηριζόταν αφειδώς από την πολιτεία. Εκείνη την εποχή, το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα για την έρευνα των κυψελών καυσίμου είχε περικοπεί στο ελάχιστο. Αυτή την περίοδο, είχε τραβήξει το ενδιαφέρον η εφαρμογή των κυψελών καυσίμου σε μη κινητές εγκαταστάσεις. Όταν η Ευρωπαϊκή ερευνητική δραστηριότητα ξεκίνησε πάλι στα μέσα της δεκαετίας του '80, η Αμερικανική και η Ιαπωνική βιομηχανία είχαν ήδη αναπτύξει τις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος για μη κινητές εγκαταστάσεις. Έτσι, οι έρευνες

εστιάστηκαν στο φαινόμενο των υψηλών θερμοκρασιών των κυψελών καυσίμου για να ανταγωνιστούν τις νέες τεχνικές και ιδέες των Η.Π.Α. και της Ιαπωνίας.

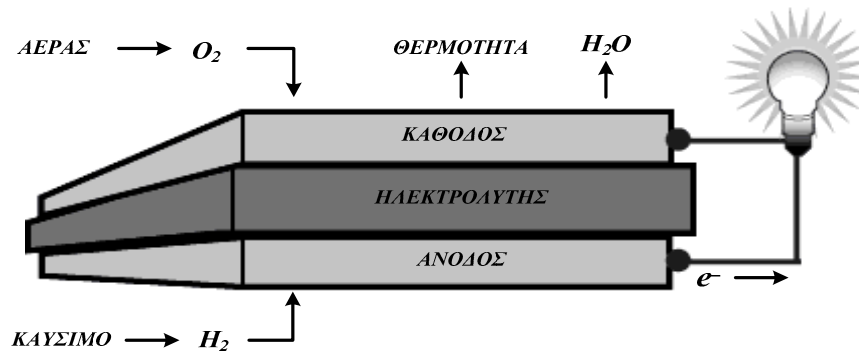
Το ενδιαφέρον για κινητές μονάδες ενεργοποιήθηκε και πάλι σήμερα, αφού η αυξανόμενη περιβαλλοντική ευαισθησία προωθεί την εισαγωγή στην αγορά αυτοκινούμενων οχημάτων με μηδενικές ή έστω πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων. Παρόλο που οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν και μελετήθηκαν σε μη αυτοκινούμενες εφαρμογές τις τέσσερις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση των κυψελών καυσίμου σε εμπορικά διαθέσιμα οχήματα έχει αρχίσει να εφαρμόζεται μόλις τα τελευταία χρόνια. Η χρήση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου στη βιομηχανία οχημάτων με την εγγενή υψηλή απόδοση, την υψηλή πυκνότητα παραγωγής ρεύματος και την δυναμική της μεθόδου να έχει μηδενική εκπομπή ρύπων, έχει εξελιχθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία και σήμερα αποτελεί ένα σοβαρό ανταγωνιστή στην αγορά οχημάτων μηδενικών εκπομπών ρύπων. Το πρώτο λεωφορείο που χρησιμοποίησε την τεχνολογία κυψελών καυσίμου, ολοκληρώθηκε το 1993 και αρκετά μικρότερα οχήματα αυτής της μεθόδου κατασκευάζονται στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

Σήμερα υπάρχει μια ποικιλία τύπων κυψελών καυσίμου, οι οποίες διαφέρουν ως προς το καύσιμο και τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, καθώς επίσης και ως προς τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται. Έτσι οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν από εφαρμογές πολύ μικρής ισχύος, όπως κινητά τηλέφωνα (mW), μέχρι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών μιας μεγάλης πόλης (MW) [15]. Επίσης γίνονται σχεδιασμοί για τη χρήση κυψελών καυσίμου σε κατοικίες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, ώστε να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες κάθε κατοικίας.

2.2 Αρχή λειτουργίας κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των καυσίμων άμεσα σε ηλεκτρική, έχοντας υψηλό βαθμό απόδοσης [1], [2]. Δεν έχουν εσωτερικά κινούμενα μέρη και λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με τις μπαταρίες. Μια σημαντική διαφορά είναι ότι οι μπαταρίες αποθηκεύουν την ενέργεια, ενώ οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παραγάγουν ηλεκτρική ενέργεια συνεχώς, εφ' όσον τροφοδοτούνται με καύσιμο και αέρα. Οι κυψέλες καυσίμου ενώνουν ηλεκτροχημικά ένα καύσιμο (κατά κανόνα υδρογόνο) με ένα οξειδωτικό χωρίς καύση, έχοντας μεγάλο βαθμό απόδοσης και χωρίς να ρυπαίνουν, όπως τα συμβατικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Η διαδικασία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου διαφέρει από την συμβατική διαδικασία, η οποία αποτελείται από την εξαγωγή θερμότητας από τα καύσιμα, τη μετατροπή της θερμότητας σε μηχανική ενέργεια και, τελικά, το μετασχηματισμό της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική, αλλά γίνεται απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική (σχήμα 2.1).

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών, όλες στηρίζονται στην ίδια βασική αρχή λειτουργίας [16]. Η δομή μιας κυψέλης καυσίμου, ανεξαρτήτως τύπου, περιλαμβάνει δυο ηλεκτρόδια, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται ένας ηλεκτρολύτης.



Σχήμα 2.1 Αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου [16].

Όταν χρησιμοποιείται το υδρογόνο ως καύσιμο γίνεται η αντίστροφη διαδικασία της υδρόλυσης, παράγοντας μόνο νερό και θερμότητα ως υποπροϊόντα, ενώ η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Πρακτικά, οι κυψέλες καυσίμου εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους [17].

2.3 Λειτουργία και χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου

Υπάρχουν διάφορες διαδικασίες που συντελούν στη λειτουργία των κυψελών καυσίμου, οι οποίες μπορούν να επιμεριστούν ως εξής:

- α) μεταφορά των αερίων στις επιφάνειες αντίδρασης,
- β) ηλεκτροχημική αντίδραση σε αυτές τις επιφάνειες,
- γ) μεταφορά των ιόντων και ηλεκτρονίων,
- δ) συνδυασμός τους στην κάθοδο.

Τα αέρια πρέπει να διαχέονται στο ηλεκτρόδιο χωρίς να περιέχουν στη σύνθεσή τους καμία επιβλαβή ουσία, που μπορεί να διακόψει τη ροή των αντιδράσεων, κατά τις οποίες παράγεται υγρό στην επιφάνεια του ηλεκτρολύτη. Τα αέρια κινούνται, ανάλογα με τη διαβάθμιση της συγκέντρωσής τους, προς τις επιφάνειες αντίδρασης, διερχόμενα μέσα από το κανάλι αερίων (υψηλή συμπίκνωση) και τις επιφάνειες αντίδρασης (χαμηλή συμπίκνωση). Η διαβάθμιση αυτή της συγκέντρωσής τους αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ της συμπίκνωσης, κατά την ελεύθερη ροή των αερίων στα κανάλια, και της συμπίκνωσης στην πλατίνα, δηλαδή στις επιφάνειες αντίδρασης. Η διαβάθμιση της συγκέντρωσης των αερίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία, από την πίεση των αερίων, καθώς επίσης και από το βαθμό διαχύσεώς τους στην ηλεκτρολυτική επιφάνεια. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης [18].

Οι κυψέλες καυσίμου, δεδομένης της υψηλής αποδοτικότητάς τους ακόμα και σε μικρές μονάδες, την αθόρυβη λειτουργία τους, την απλή μέθοδο λειτουργίας τους και την αξιοπιστία τους, είναι η καλύτερη μέθοδος μετατροπής ενέργειας σε συστήματα συμπαραγωγής, με μοναδικό μειονέκτημα, αυτή τη στιγμή, το υψηλό τους κόστος.

Πίνακας 2.1 Συνοπτικός πίνακας των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται σε κάθε τύπο κυψέλης καυσίμου.

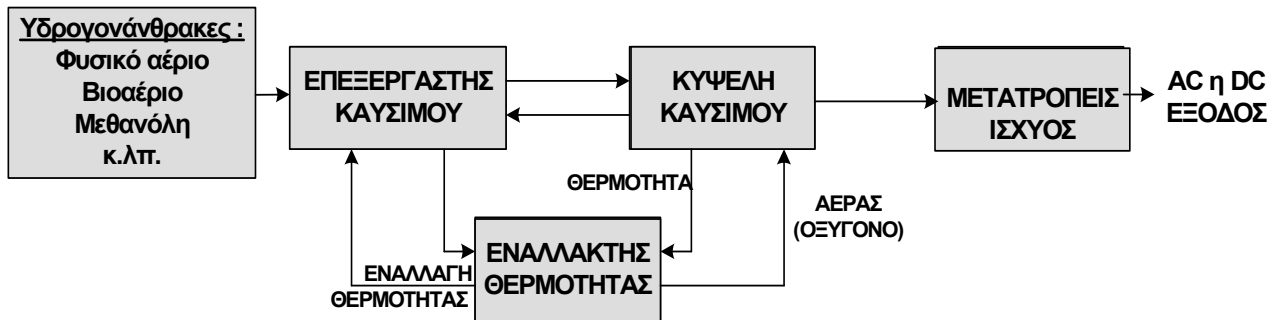
ΚΥΨΕΛΗ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΑΝΟΔΟ	ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΟ ΙΟΝ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΚΑΘΟΔΟ
Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	OH^-	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	H^+	$O_2 + 4H^+ \rightarrow 2H_2O$
Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + H_2O + 2e^-$	CO_3^{2-}	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$
Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O_2 \rightarrow CO_2 + 2e^-$	O^{2-}	$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$
<p>Σημείωση: Στον τύπο PEM το μεταφερόμενο ιόν είναι ένυδρο, οπότε το νερό πρέπει να επιστρέφει από την κάθοδο στην άνοδο. Στον τύπο AFC, το νερό σχηματίζεται στην άνοδο, αλλά χρειάζεται για την αντίδραση στην κάθοδο. Τέλος στον τύπο MCFC, το CO_2 χρειάζεται για την αντίδραση στην κάθοδο και πρέπει να επανακυκλοφορήσει από την άνοδο.</p>			

Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα (σχήμα 2.2) [19] :

1. Σύστημα διαχείρισης του αερίου, ή επεξεργαστής καυσίμου, ο οποίος διαβιβάζει στην κυψέλη καυσίμου το αέριο μίγμα υδρογόνου και αέρα (ή οξυγόνου)
2. Σύστημα διαχείρισης θερμότητας
3. Κυψέλη καυσίμου
4. Μονάδα μετατροπής ισχύος

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν την δυνατότητα να παράγουν ισχύ για όλες τις ανάγκες και εφαρμογές (ενότητα 2.1) [15]. Βέβαια, θεωρείται ευνόητο, ότι τα οικονομικά και λειτουργικά

χαρακτηριστικά διαφέρουν ανάλογα με το είδος και τις λειτουργίες της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας κυψελών καυσίμου και αυτά θα καθορίσουν ποια τεχνολογία ταιριάζει καλύτερα σε κάθε εφαρμογή.



Σχήμα 2.2 Δομικό διάγραμμα της διαδικασίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, με χρήση κυψελών καυσίμου.

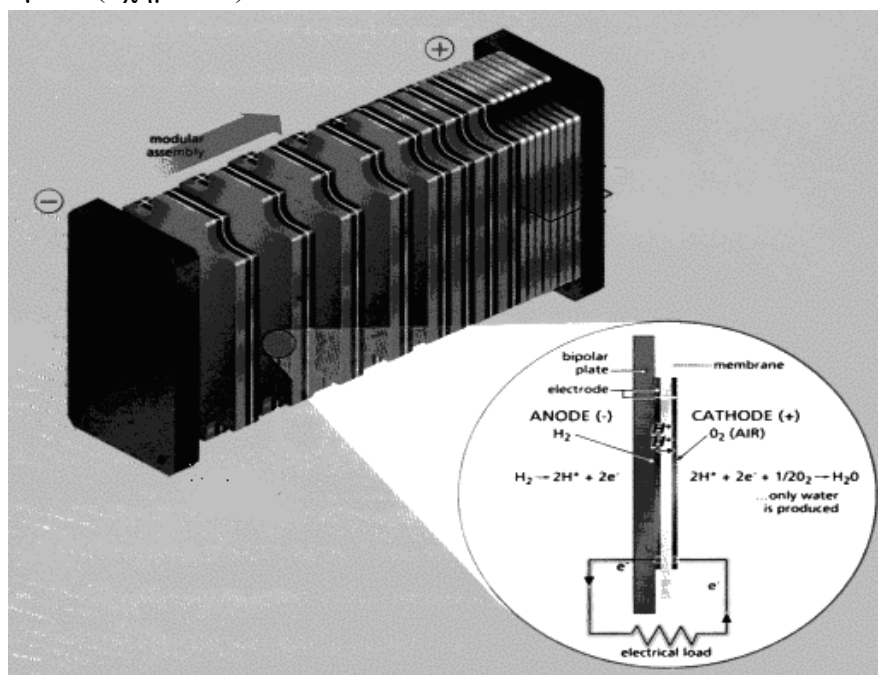
Η κατασκευή αποτελεσματικών, χαμηλού βάρους και μεγάλης διάρκειας ζωής κυψελών καυσίμου, προϋποθέτει άριστη γνώση της μηχανικής των ρευστών και των καταλυτικών και ηλεκτρολυτικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια. Η μετατροπή της χημικής ενέργειας που περιέχει το καύσιμο σε ηλεκτρική γίνεται στα ηλεκτρόδια, καθώς η ροή του καυσίμου μετατρέπεται σε ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα, που είναι συνδεδεμένο στο εξωτερικό μέρος της κυψέλης και σε μεταφορά ιόντων που πραγματοποιείται στον ηλεκτρολύτη. Επομένως τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι διαπερατά από τα αέρια μόρια, από τα ιόντα και από τα ηλεκτρόνια. Αυτό απαιτεί το σχηματισμό τριών αλληπάληλων στρωμάτων στο ηλεκτρόδιο (ηλεκτρολύτης, καταλυτική επιφάνεια, τμήμα αποσύνθεσης του αερίου), τα οποία είναι χαρακτηριστικά για κάθε ηλεκτρόδιο κυψέλης καυσίμου. Για να διασφαλιστεί η μετατροπή αυτή σε μεγάλες ποσότητες, επιβάλλεται οι τρεις ζώνες αντιδράσεων να είναι όσο το δυνατόν, μεγαλύτερης επιφάνειας. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση των διαδικασιών μεταφοράς των ενεργών στοιχείων που λαμβάνουν μέρος στις αντιδράσεις (δηλαδή των αέριων μορίων, των ιόντων και των ηλεκτρονίων), καθώς επίσης και η επιλογή της κατάλληλης ταχύτητας για τη μέγιστη απόδοση των ηλεκτροχημικών διεργασιών που πραγματοποιούνται στο τριμερές τμήμα της συσκευής, είναι εξαιρετικής σημασίας.

Η ταχύτητα αντίδρασης στην περιοχή που έρχονται σε επαφή τα τρία στρώματα μεταξύ τους, μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη καταλυτικών επενδύσεων. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, τόσο περισσότερο επιταχύνεται η καταλυτική δράση στην διαδικασία της αντίδρασης. Στην περίπτωση όξινων ηλεκτρολυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καταλύτες μόνο ευγενή μέταλλα, όπως η πλατίνα (Pt) και το ρουθίνιο (Ru), γιατί άλλα μέταλλα θα παρουσίαζαν πρόβλημα διάβρωσης με την πάροδο του χρόνου.

Για να επιτευχθεί ένα τεχνικά εκμεταλλεύσιμο επίπεδο ηλεκτρικής τάσης, πρέπει οι κυψελίδες ή κελιά που αποτελούνται από την κάθοδο, τον ηλεκτρολύτη και την άνοδο, να συνδεθούν σε σειρά. Ανάμεσα στις κυψελίδες αυτές πρέπει να τοποθετηθούν τα λεγόμενα

διπολικά ελάσματα (bipolar plates), τα οποία διευκολύνουν την παροχή του αερίου και συνδέουν ηλεκτρικά τις κυψέλες μεταξύ τους.

Συνήθως, οι κυψελίδες και τα διπολικά ελάσματα βρίσκονται τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο, με διαδοχική σειρά, σχηματίζοντας στοίβες. Τέτοιες στοίβες ονομάζονται "συστοιχίες κυψελών καυσίμου" (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Σχηματισμός συστοιχίας κυψέλης καυσίμου [16].

Για να καταστεί δυνατή η απαγωγή της θερμότητας που εκπέμπεται κατά τις αντιδράσεις, συνήθως τοποθετείται συγκεκριμένος αριθμός διπολικών ελασμάτων ψύξης μεταξύ των συστοιχιών. Η παροχή του αερίου, καθώς επίσης, η τροφοδότηση και η απομάστευση του ψυκτικού υγρού προβλέπεται να συνδέονται είτε στην άκρη των ελασμάτων αυτών, είτε απ' ευθείας στην πλευρά κάθε κυψέλης.

Το υδρογόνο είναι εξαιρετικά δύσκολο να απορροφηθεί από τις κυψέλες και να παραμείνει εκεί, όση ώρα χρειάζεται για να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες αντιδράσεις, γι' αυτό οι ανοχές των υλικών, το πάχος των φύλλων του ηλεκτρολύτη και οι αποστάσεις μεταξύ τους πρέπει να είναι συνεχώς υπό έλεγχο, ώστε να διασφαλίζεται η στεγανοποίηση της κυψέλης, διότι σε διαφορετική περίπτωση θα είχαμε διαρροή του καυσίμου εκτός κυψέλης. Τα κενά μεταξύ των φύλλων του ηλεκτρολύτη στεγανοποιούνται χρησιμοποιώντας λάστιχο στεγανοποίησης με τον παραδοσιακό τρόπο, ενώ το πάχος τους εξαρτάται από τον τύπο και την προετοιμασία του υλικού τους. Επιπλέον, το υδρογόνο είναι εύφλεκτο και η παρουσία άλλων στοιχείων το καθιστά ασταθές. Αντιδρά με τα περισσότερα μέταλλα και γι' αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο χρυσός, άργυρος, αλουμίνιο, ανοξείδωτο ατσάλι, νικέλιο και χαλκός.

Ο χαλκός δημιουργεί ένα προστατευτικό φιλμ προκαλώντας μείωση του βαθμού απόδοσης παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ το αλουμίνιο με την παρουσία του αέρα, σχηματίζει ένα προστατευτικό στρώμα οξειδίου του αλουμινίου, το οποίο και αυτό μειώνει το βαθμό απόδοσης

παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Με τον καιρό, όλα τα μέταλλα, εκτός από τον χρυσό, δείχνουν δείγματα χημικής αποδόμησης, όταν τοποθετούνται στο κανάλι τροφοδοσίας καυσίμου, αλλά για τα μέταλλα που προαναφέρθηκαν (εκτός από το χαλκό), η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με πολύ αργούς ρυθμούς. Επίσης, το κύκλωμα κυκλοφορίας του υδρογόνου δεν πρέπει να βρίσκεται κοντά σε οποιαδήποτε πηγή σπινθήρα, ελαχιστοποιώντας έτσι, τον κίνδυνο έκρηξης.

Το κύκλωμα του οξυγόνου δεν απαιτεί τόσο αυστηρές προδιαγραφές. Τα σημεία σύνδεσης των αγωγών του κυκλώματος του οξυγόνου πρέπει να είναι αρκετά μεγάλων διαστάσεων, ώστε να διευκολύνεται η διέλευση των μεγάλων ποσοτήτων αέρα, αφού η περιεκτικότητα του αέρα σε οξυγόνο είναι μικρή. Γι' αυτό το λόγο, απαιτούνται μεγάλες ποσότητες αέρα, ώστε να έχουμε την απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου (ή μονοξειδίου του άνθρακα στην περίπτωση που έχουμε κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), για να αντιδράσει με τις απαιτούμενες αναλογίες. Αν χρησιμοποιηθεί οξυγόνο, τότε το κύκλωμα πρέπει να είναι μακριά από οποιαδήποτε πηγή σπινθήρα. Το λάστιχο στεγανοποίησης του οξυγόνου ή του αέρα, δεν είναι της ίδιας σημασίας με αυτό του υδρογόνου, λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους των μορίων του και συνεπώς μικρότερης πιθανότητας διαφυγής του, αλλά όμως, δεν πρέπει να παραβλέπεται η πιθανότητα δημιουργίας ρωγμών κάτω από υψηλή πίεση.

Τα υλικά κατασκευής του κυκλώματος δεν πρέπει να περιέχουν στοιχεία που διαβρώνονται με την παρουσία οξυγόνου. Τα διπολικά ελάσματα (bipolar plates), τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις κυψέλες καυσίμου, και διοχετεύουν από τη μία πλευρά οξυγόνο και από την άλλη υδρογόνο, επιβάλλεται να είναι συμβατά τόσο στο οξειδωτικό, όσο και στο αναγωγικό περιβάλλον.

Οι ηλεκτρολύτες δεν είναι ίδιοι σε όλους τους τύπους κυψελών καυσίμου. Κάθε εταιρεία παράγει τους δικούς της ηλεκτρολύτες, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μίγματα, ώστε να αναπτύξει μία μεμβράνη που να έχει καλύτερες αντιστάσεις στα ηλεκτρόνια, αλλά ταυτόχρονα να ευνοεί τη διόδο των ιόντων του υδρογόνου.

Εκτός από τους παραπάνω παράγοντες, η παρουσία του νερού στο σύστημα πρέπει να είναι πλήρως ελεγχόμενη. Το νερό χρειάζεται για τις ηλεκτροχημικές διαδικασίες στον ηλεκτρολύτη, όμως αποτελεί εμπόδιο για τα αέρια της αντίδρασης. Έτσι, αυτά τα μέρη που είναι καλυμμένα από το υγρό μειώνουν τη δράση της κυψέλης. Το νερό σχηματίζεται στην άνοδο λόγω υγροποίησης του υδρογόνου και στην κάθοδο, ως προϊόν της χημικής αντίδρασης. Το νερό αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στην καθοδική επιφάνεια της κυψέλης καυσίμου όταν έχουμε υψηλές τιμές της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά με αύξηση της ταχύτητας ροής του, επιτυγχάνεται καθαρισμός της επιφάνειας από ενδεχόμενες συσσωρευμένες ακαθαρσίες.

Η κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρικό ρεύμα από τη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στους πόλους της, και γι' αυτό επιβάλλεται ο ηλεκτρικός διαχωρισμός μεταξύ των δύο πόλων. Κάθε αγωγίμο υλικό που θα έρθει σε επαφή με τους δύο πόλους, είναι ικανό να προκαλέσει ανεπιθύμητα αποτελέσματα (βραχυκύκλωμα). Αυτό είναι ένα σημαντικό κριτήριο επιλογής της κατάλληλης μεθόδου σύνδεσης των διπολικών ελασμάτων, καθώς τα περισσότερα ελατά υλικά έχουν αγωγίμες ιδιότητες. Οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες των αερίων και των

κυψελών, πρέπει επίσης να ελέγχονται διεξοδικά, αφού επηρεάζουν άμεσα την απόδοση και την ασφάλεια του συστήματος. Όταν αυξάνονται οι δύο αυτές μεταβλητές, βελτιώνεται και η λειτουργία του συστήματος, αλλά αν η διαφορά στις πιέσεις των αερίων είναι πολύ μεγάλη, τότε είναι πιθανή η καταστροφή του καταλύτη. Επίσης, αν η θερμοκρασία ξεπεράσει τα κατασκευαστικά όρια ανοχής των υλικών, τότε θα προκαλέσει μείωση της λειτουργικής απόδοσης της κυψέλης και ενδεχομένως την καταστροφή της. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου είναι σημαντικός, αλλά όταν οι κυψέλες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους σε συστοιχίες, τότε ο θερμοκρασιακός έλεγχος τους είναι εξαιρετικής σημασίας. Η σχεδίαση λεπτών κυψελών ήταν πάντα ο βασικός σκοπός των σχεδιαστών, αλλά κάτι τέτοιο δημιουργεί προβλήματα στον τρόπο ψύξης τους. Πολλοί σχεδιαστές χρησιμοποιούν διπολικά ελάσματα με οπές, ώστε να διέρχεται το νερό ή η θερμότητα του ατμοποιημένου νερού, με έκχυσή του στη ροή εισόδου του υδρογόνου, και να τα ψύχει. Και οι δύο τρόποι παρέχουν ικανοποιητική ψύξη, με τη διαφορά ότι η έκχυση του νερού απαιτεί μικρότερο όγκο των κυψελών.

Στον πίνακα 2.2 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά διάφορων τύπων κυψελών καυσίμου. Μεταξύ αυτών των κυψελών καυσίμου, η κυψέλη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη πηγή για χρήση στις κατοικίες, στις βιομηχανίες και στα μικρά διανεμημένα συστήματα παραγωγής [3], [4], [20].

Πίνακας 2.2 Τεχνικές προδιαγραφές διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου

Κυψέλη καυσίμου	Πυκνότητα Ρεύματος (A/cm ²)	Ηλεκτρολύτης	Θερμοκρασία (C ⁰)	Απόδοση (%)
Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)	0.12	Στερεά πολυμερής ιοντική μεμβράνη	50- 100	35-40%
Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)	0.2	Υδροξείδιο καλίου	50-200	55-60%
Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	0.216	Φωσφορικό οξύ	180 - 220	45-45%
Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)	0.16	Τήγμα ανθρακικών αλάτων καλίου και λιθίου	620 -660	50-60%
Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)	0.2	Διοξείδιο ζirkονίου κεραμικό	800 -1000	50-60%

2.4 Τύποι κυψελών καυσίμου

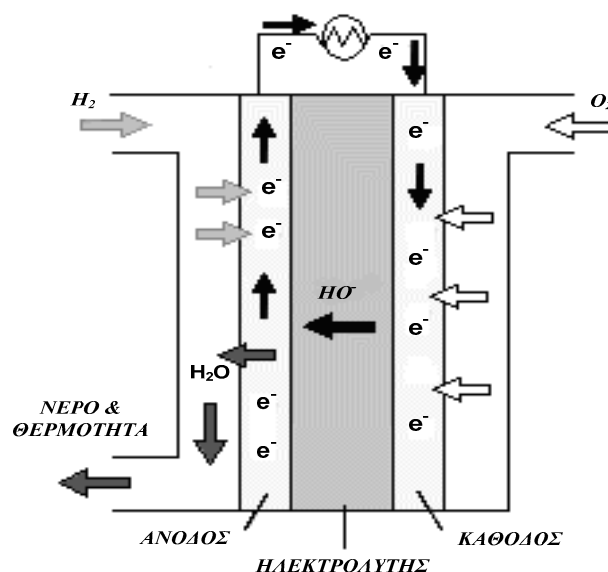
Οι κυψέλες καυσίμου κατατάσσονται σε κατηγορίες, ανάλογα με το καύσιμο και τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, καθώς και με τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, ως εξής [19], [20] :

1. Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (Alkaline Fuel Cells - AFC)
2. Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell - PAFC)
3. Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC)
4. Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC)
5. Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell - PEM)

Εκτός από τους πέντε παραπάνω αρχικούς τύπους κυψελών καυσίμου υπάρχουν τρεις ακόμα κατηγορίες, οι οποίες είναι οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης (DMFC), οι κυψέλες καυσίμου αιθανόλης (DEFC) και οι κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας(RFC).

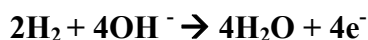
2.4.1 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline Fuel Cells - AFC)

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου ήταν από τις πρώτες κυψέλες καυσίμου που αναπτύχθηκαν. Στις κυψέλες αυτού του τύπου χρησιμοποιείται διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) ως ηλεκτρολύτης και μια ποικιλία μη πολύτιμων μετάλλων ως καταλύτες στην άνοδο και την κάθοδο. Η θερμοκρασία λειτουργίας των αλκαλικών κυψελών αρχικά κυμαινόταν μεταξύ 50°C και 200°C . Οι αλκαλικές κυψέλες νεώτερης γενιάς λειτουργούν σε θερμοκρασίες από 23°C έως 80°C . Στο σχήμα 2.4 απεικονίζεται η λειτουργία της κυψέλης AFC. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4, το υδρογόνο στην άνοδο αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα να παράγεται νερό και να ελευθερώνονται ηλεκτρόνια, τα οποία κατευθύνονται προς την κάθοδο μέσω του κλειστού κυκλώματος : άνοδος – φορτίο – κάθοδος.

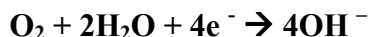


Σχήμα 2.4 Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της κυψέλης AFC.

Η χημική αντίδραση, που γίνεται στην άνοδο περιγράφεται ως εξής :



Τα ηλεκτρόνια κινούνται στο ηλεκτρικό κύκλωμα εξωτερικά της κυψέλης καυσίμου και καταλήγουν στην κάθοδο. Εκεί αντιδρούν με το οξυγόνο και με το νερό, παράγοντας περισσότερα υδροξυλικά ιόντα για να αναπληρώσουν αυτά που είχαν αντιδράσει στην άνοδο:



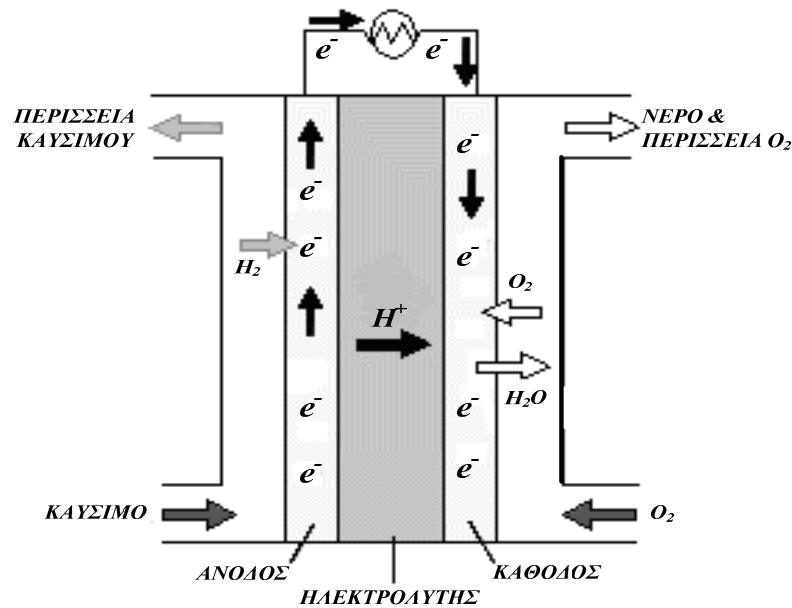
Ο ηλεκτρολύτης ρέει συνεχώς μέσα από την κυψέλη, η οποία ψύχεται, απορροφώντας θερμότητα από τα καταλυμένα πορώδη ηλεκτρόδια γραφίτη, από τα οποία παίρνει ιόντα υδροξυλίου (OH^-) και μία μικρή ποσότητα νερού κατά την όλη διαδικασία. Σε μία ενεργή κυψέλη, το ένα τρίτο από την ποσότητα του νερού που παράγεται, διαφεύγει προς την κάθοδο, ενώ τα δύο τρίτα παραμένουν στην άνοδο. Η υγρή φύση του ηλεκτρολύτη τον καθιστά ημιπερατό και γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο ανθρακικό υλικό επενδυμένο με teflon, το οποίο όμως καταλύεται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας.

Αν και οι κυψέλες αυτές έχουν πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης (έως και 70%), εμφανίζουν ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα, που έχει να κάνει με την ευπάθειά τους στο διοξείδιο του άνθρακα. Ακόμα και μια μικρή ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα μπορεί να υποβιβάσει την απόδοση της κυψέλης, οπότε καθίσταται πολύ δύσκολη η χρήση ατμοσφαιρικού αέρα. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να φιλτράρεται τόσο το οξυγόνο, όσο και το υδρογόνο πριν εισαχθούν στη κυψέλη, οπότε αυξάνεται σημαντικά το κόστος λειτουργίας. Επιπλέον, η ευαισθησία των αλκαλικών κυψελών στο διοξείδιο του άνθρακα μειώνει τη διάρκεια ζωής τους, καθιστώντας τη χρήση τους οικονομικά ασύμφορη. Για το λόγο αυτό είναι δύσκολη η εμπορική εκμετάλλευση του τύπου αυτού.

2.4.2 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells - PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells) χρησιμοποιούν φωσφορικό οξύ σε παχύρρευστη μορφή (gel) ως ηλεκτρολύτη και πορώδη ηλεκτρόδια από άνθρακα, ο οποίος περιέχει ποσότητα λευκόχρυσου. Η λειτουργία τους (σχήμα 2.5) μοιάζει πολύ με αυτή των PEM, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ 180°C έως 220°C .

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος είναι οι πρώτες κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά. Η χρήση αυτού του τύπου γίνεται συνήθως σε στατικές εφαρμογές, αν και υπάρχουν μερικές εφαρμογές σε μεγάλα οχήματα όπως αστικά λεωφορεία.. Είναι περισσότερο ανθεκτικές στην παρουσία CO από ότι οι κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), αλλά εμφανίζουν μικρότερη πυκνότητα ρεύματος.



Σχήμα 2.5 Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της κυψέλης φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος είναι συνήθως μεγάλες και βαριές κατασκευές. Ένα άλλο μειονέκτημά τους είναι ότι, όπως και οι κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, έχουν αυξημένο κόστος λόγω της χρήσης λευκόχρυσου ως καταλύτη.

2.4.3 Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC)

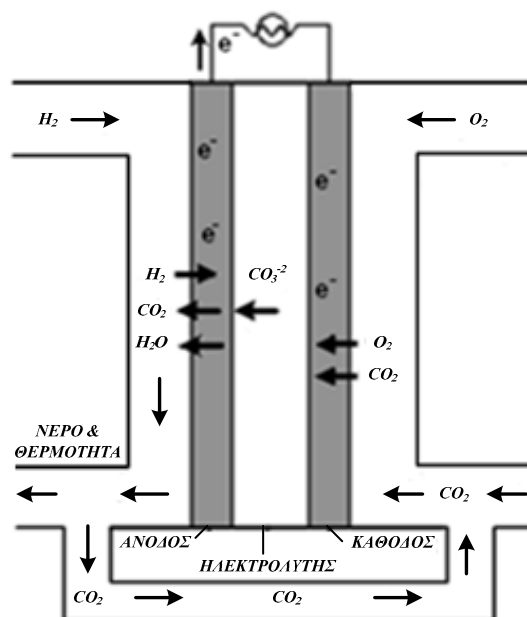
Οι κυψέλες καυσίμου αυτού του τύπου λειτουργούν σε θερμοκρασίες μεταξύ 620⁰C έως 660⁰C και μπορούν να χρησιμοποιήσουν ως καύσιμο εισαγωγής στην είσοδο της καθόδου μονοξείδιο του άνθρακα, αλλά στη έξοδό τους απαιτείται η παρουσία υδρογόνου. Παρ' όλο που η υψηλή θερμοκρασία επιτρέπει την ύπαρξη άνθρακα στην κυψέλη, το θείο μπορεί να "δηλητηριάσει" την κυψέλη, ακόμα και σε μικρές ποσότητες (σχεδόν 1ppm).

Στην κάθοδο, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα του ατμοσφαιρικού αέρα αντιδρούν μεταξύ τους και παράγουν ανθρακικά ιόντα (CO_3^-), τα οποία διέρχονται μέσα από τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης. Αυτά αντιδρούν με το υδρογόνο ή το μονοξείδιο του άνθρακα στην άνοδο και παράγεται νερό, διοξείδιο του άνθρακα και δυο ηλεκτρόνια (σχήμα 2.6).

Η θερμοκρασία που παράγεται κατά την λειτουργία των συστημάτων MCFC είναι αρκετά υψηλή για επιπλέον παραγωγή ισχύος και ταυτόχρονα αρκετά χαμηλή, ώστε να μην απαιτείται η χρήση ακριβών καταλυτών καθώς και ο απαραίτητος συνεργαζόμενος εξοπλισμός, όπως στις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων.

Ένα σύστημα κυψελών καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC) υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, παράγει ρεύμα πυκνότητας 0,16 A/cm² και τάσης 0,75V ανά κυψέλη, ενώ αν το σύστημα βρίσκεται υπό πίεση έχει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από νικέλιο, ενώ ο ηλεκτρολύτης από ένα μίγμα αποτελούμενο κατά 68% από

ανθρακικό λίθιο (Li_2CO_3) και κατά 32% από υδροξείδιο του καλίου (KOH). Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος αυτού, όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμένο κύκλο φτάνει το 50% έως 60%.

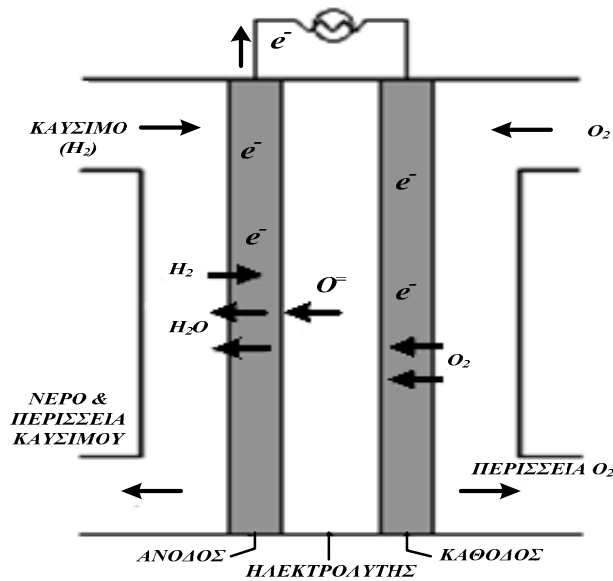


Σχήμα 2.6 Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της κυψέλης τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)

Τέλος, οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), όπως και οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), χρησιμοποιούνται σε μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2.4.4 Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων χρησιμοποιούν μια σκληρή, μη πορώδη, κεραμική ουσία ως ηλεκτρολύτη. Συνήθως στην κατασκευή του ηλεκτρολύτη χρησιμοποιείται οξείδιο του Ζιρκονίου (Zr) στο οποίο έχει προστεθεί ποσότητα Υτρίου (Y). Λειτουργώντας στους 800-1000°C, τα στερεά οξείδια σχηματίζουν ιόντα υδρογόνου τα οποία αντιδρούν με το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο, ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια (σχήμα 2.7). Αυτή η διαδικασία είναι αντίθετη με αυτή που συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, στις οποίες το υδρογόνο κατευθύνεται προς τα ηλεκτρόδια και μετά προς την πηγή του οξυγόνου. Αυτή η διαφορά, σε συνδυασμό με τη σταθερότητα των στερεών οξειδίων, επιτρέπει στις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων να εξαλείψουν την ανάγκη προσθήκης επεξεργαστή καυσίμου και συνεπώς να είναι πιο ευέλικτες από τις κυψέλες τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), ως προς τον τύπο του καυσίμου που τροφοδοτούνται. Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους, δεν είναι αναγκαία η χρήση καταλυτών από πολύτιμα μέταλλα, οπότε μειώνεται το κόστος κατασκευής τους. Επιπλέον, όπως συμβαίνει και με τις κυψέλες MCFC, η επεξεργασία του καυσίμου γίνεται μέσα στην ίδια την κυψέλη, οπότε είναι δυνατή η χρήση μιας μεγάλης ποικιλίας καυσίμων.



Σχήμα 2.7 Δομικό διάγραμμα λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων είναι ότι είναι πολύ ανεκτικές στην παρουσία θείου μέσα στην κυψέλη. Η κυψέλες αυτές μπορούν να αντέξουν παρουσία ποσότητας θείου κατά πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή που αντέχουν οι άλλοι τύποι κυψελών. Επίσης, είναι ανεκτικές και στο μονοξείδιο του άνθρακα και μάλιστα μπορούν να το χρησιμοποιήσουν ως καύσιμο, όπως επίσης και τα άλλα αέρια που είναι ενώσεις του άνθρακα.

Η απόδοση μετατροπής του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια φτάνει το 50-60%, ενώ αν χρησιμοποιηθεί και η θερμότητα που παράγουν (συμπαράγωγή), η απόδοσή τους αγγίζει το 85%.

Μειονέκτημα της κυψέλης καυσίμου στερεών οξειδίων είναι η αργή διαδικασία εκκίνησης, η οποία οφείλεται στην πολύ υψηλή θερμοκρασία που πρέπει να επιτευχθεί, για να αρχίσει να παράγει ενέργεια. Επιπλέον απαιτείται ισχυρή θερμική μόνωση, ώστε να συγκρατείται η θερμότητα. Για το λόγο αυτό η χρήση των κυψελών αυτών δεν είναι δυνατή σε οχήματα, καθώς και σε φορητές συσκευές, οπότε η εφαρμογή τους περιορίζεται σε μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας επιφέρει μείωση του χρόνου ζωής των συσκευών και περιορισμούς στη θερμική αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της κυψέλης.

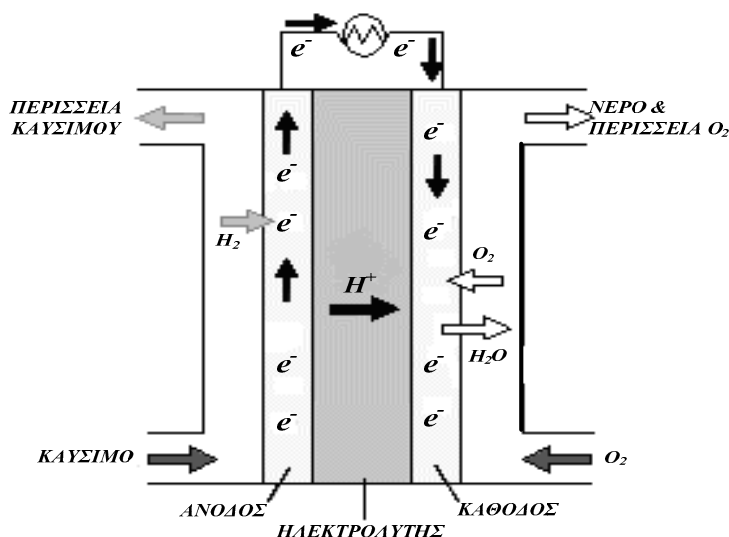
2.4.5 Κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων παρουσιάζει ενδιαφέρον, γιατί προορίζεται για χρήση σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Ήδη έχει γίνει εφαρμογή των κυψελών αυτών σε αυτοκίνητα, ενώ έχει κατασκευαστεί κυψέλη αυτού του τύπου, που προορίζεται για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε φορητό υπολογιστή. Επίσης γίνεται συζήτηση

για εφαρμογή των κυψελών καυσίμου PEM σε παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, για την κάλυψη των αναγκών μιας οικίας ή ακόμα και μιας πολυκατοικίας. Αν μάλιστα αξιοποιηθεί η δυνατότητα εκμετάλλευσης της θερμότητας που εκλύει η κυψέλη για την κάλυψη των αναγκών σε θέρμανση (συμπααραγωγή), τότε επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας και το οικονομικό αλλά και το περιβαλλοντικό όφελος που προκύπτει είναι μεγάλο [22].

Αυτός ο τύπος κυψελών καυσίμου χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά, ως σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και νερού, σε επανδρωμένη διαστημική αποστολή. Στην εφαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκε μία πολυμερής μεμβράνη, κατασκευασμένη από μία ειδική σύνθεση θειικού οξέος, η οποία όμως δεν ήταν μεγάλης διάρκειας. Η πολυμερής αυτή μεμβράνη χρησιμοποιούσε, ως καύσιμο και αντιδρών σώμα, το υδρογόνο (H₂) και το οξυγόνο (O₂), προερχόμενα από κρυογενή αποθήκευση. Με την τοποθέτηση μεμβρανών, των οποίων η χημική τους βάση είναι το θείο (S), επιτεύχθηκε η ηλεκτροχημική σταθερότητα του πολυμερούς καταλύτη, ενώ η θερμοκρασία που εκλύεται στις χημικές αντιδράσεις δεν υπερβαίνει τους 100°C.

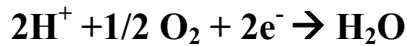
Η μεμβράνη δρα ως όξινος καταλύτης. Τα αντιδρώντα στοιχεία, υδρογόνο και οξυγόνο, προερχόμενα από τον ατμοσφαιρικό αέρα τροφοδοτούν συνεχώς τα δύο ηλεκτρόδια. Το υδρογόνο διαχέεται μέσω των πόρων της ανόδου στην καταλυτική επιφάνεια και στον κυρίως ηλεκτρολύτη, όπου και διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια (σχήμα 2.8), σύμφωνα με την αντίδραση:



Σχήμα 2.8 Σχηματική παράσταση των διεργασιών μέσα στην κυψέλη καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων.

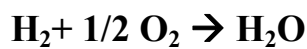
Τα ιόντα του υδρογόνου (H⁺) κατά το πέρασμά τους από την κάθοδο, διέρχονται μέσα από την μεμβράνη του πολυμερούς ηλεκτρολύτη, η οποία είναι πολύ αγωγίμη για τα πρωτόνια. Συγχρόνως, τα ηλεκτρόνια ρέουν προς την κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος. Στο

τμήμα της συσκευής, μεταξύ της καθόδου και του ηλεκτρολύτη, τα ιόντα υδρογόνου μαζί με τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος και το οξυγόνο, που έχει διαχυθεί μέσω των πόρων της καθοδικής επιφάνειας, αντιδρούν και σχηματίζεται καθαρό νερό, σύμφωνα με την αντίδραση :



Το νερό που παράγεται από αυτή την αντίδραση εξέρχεται από το σύστημα συμπαρασυρόμενο από τον αέρα.

Οι δύο αντιδράσεις συνοψίζονται στην εξής συνολική αντίδραση:



Εξ' αιτίας του πλεονάσματος των ηλεκτρονίων στην άνοδο και του ελλείμματος ηλεκτρονίων στην κάθοδο, δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια η οποία υπολογίζεται περίπου στο 1,1V. Αυτή η τάση παραμένει σταθερή για όσο διάστημα τροφοδοτείται αρκετή ποσότητα υδρογόνου και οξυγόνου στην κάθοδο και την άνοδο αντίστοιχα. Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου, σε αντίθεση με τις μπαταρίες, η πάροδος του χρόνου δεν επιφέρει καμία πρακτική μεταβολή καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους. Στην άνοδο, η αντίδραση ελευθερώνει ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια, των οποίων η μεταφορά είναι εξαιρετικά σημαντική για την παραγωγή ενέργειας. Αυτά τα ιόντα στην άνοδο, δημιουργούν ένα θετικό δυναμικό (+) το οποίο ωθεί τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα από την περιοχή της ανόδου, τα οποία είναι είτε προσκολλημένα σε ένα μόριο νερού που διέρχεται τον ηλεκτρολύτη, είτε προσκολλημένα σε μόρια νερού και μεταφέρονται μέσα από τον ηλεκτρολύτη. Αυτό συμβαίνει γιατί το άτομο του υδρογόνου που περιέχει το νερό, είναι φορτισμένο θετικά, με αποτέλεσμα να έλκει τα αρνητικά ιόντα κοντά του και αυτά με τη σειρά τους να προσκολλώνται. Όμως αυτές οι δυνάμεις έλξης δεν είναι ιδιαίτερα ισχυρές, οπότε αυτή η αμοιβαία έλξη ανάμεσα στα αντίθετα φορτισμένα σωματίδια, μπορεί εύκολα να διασπαστεί. Η μέθοδος μεταφοράς των ιόντων ποικίλλει, αλλά εξαρτάται κυρίως, από το πόσο λεπτή είναι η μεμβράνη, από την ποσότητα του νερού που βρίσκεται πάνω στη μεμβράνη και από τον αριθμό των ιόντων που μεταφέρονται.

Η οξύτητα του ηλεκτρολύτη δημιουργεί τη δομή στον ηλεκτρολύτη και λειτουργεί ως εμπόδιο για τα ηλεκτρόνια. Επίσης, λειτουργεί αποτελεσματικά στη ροή των ηλεκτρονίων από υλικά, των οποίων τα ηλεκτρόνια συνδέονται με ασθενείς δεσμούς, εξ' αιτίας της διαδικασίας μεταφοράς των ηλεκτρονίων. Έτσι, τα ηλεκτρόνια κινούνται από τις επιφάνειες αντίδρασης της ανόδου, περνώντας μέσα από το τμήμα διάχυσης του αερίου στο ηλεκτρόδιο, μετά διέρχονται από τον συλλέκτη ρεύματος στην άνοδο, καταλήγοντας σε ένα κύκλωμα ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς (ηλεκτρικό ρεύμα), και κατόπιν επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία κατά την αντίστροφη φορά, δηλαδή διαβιβάζονται τα ηλεκτρόνια στον συλλέκτη ρεύματος καθόδου, μετά στο τμήμα διάχυσης του αερίου στο ηλεκτρόδιο και κατόπιν στις καταλυτικές επιφάνειες αντίδρασης στην κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια δεν κινούνται μέσα στον ηλεκτρολύτη, γιατί οι χημικοί δεσμοί συγκρατούν ισχυρά τα ηλεκτρόνια μεταξύ τους, οπότε σχηματίζεται ένας ηλεκτρικός

μονωτής. Τα κριτήρια επιλογής ενός ηλεκτρολύτη είναι η δομική του σταθερότητα, η χαμηλή αντίστασή του σε κινήσεις ιόντων και το πορώδες υλικό του.

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι κυψέλες PEM (όπως μπορεί να φανεί από τον πίνακα 2.2) και που τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές σε εφαρμογές που έχουν να κάνουν με την καθημερινή ζωή, είναι οι εξής:

- 1) Λειτουργούν σε χαμηλή θερμοκρασία (συνήθως στους 80°C).
- 2) Δεν εκλύουν ρυπογόνες ουσίες κατά τη λειτουργία τους.
- 3) Μετατρέπουν το 35-40% της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αν αξιοποιηθεί και η εκλυόμενη θερμότητα (συμπαραγωγή), ο βαθμός απόδοσής μπορεί να φτάσει το 80%.
- 4) Είναι αθόρυβες και δεν έχουν κινούμενα μέρη (σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης).
- 5) Έχουν στερεό ηλεκτρολύτη (μεμβράνη) και έτσι αποφεύγονται οι κίνδυνοι που προκύπτουν από τη χρήση ενός υγρού, διαβρωτικού ηλεκτρολύτη (π.χ. υδροξείδιο του καλίου).
- 6) Έχουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος, δηλαδή μια κυψέλη PEM με μικρό όγκο μπορεί να παράγει μεγάλη ισχύ.

Οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους, των άμεσων εκκινήσεων (χωρίς ανάγκη προθέρμανσης) και του υψηλού βαθμού απόδοσής τους, είναι ιδανικές για την εφαρμογή τους στα οχήματα μεταφοράς. Υπολογισμοί και μετρήσεις που έχουν γίνει σε οχήματα εφοδιασμένα με κυψέλες καυσίμου PEM (με αποθηκευμένο υδρογόνο υπό πίεση) έχουν αποδείξει ότι υπερτερούν, σε απόδοση, των μηχανών εσωτερικής καύσης, κατά ένα συντελεστή 1,5 με 2,0 [21].

Σύμφωνα με το υπουργείο ενέργειας των Η.Π.Α, οι κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) είναι οι βασικές υποψήφιοι για εφαρμογές σε κατοικίες και σε ελαφρά οχήματα [22].

Δομικά στοιχεία της κυψέλης PEM

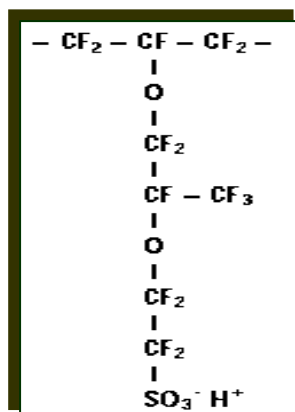
1. Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων.

Η μεμβράνη αποτελείται από ένα στερεό οργανικό πολυμερές υλικό, πάχους 200μm περίπου. Η περιγραφή της μεμβράνης που ακολουθεί και η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια κυψέλη PEM, βασίζεται στο υλικό Nafion της εταιρείας DuPont, που χρησιμοποιείται ευρέως για το σκοπό αυτό.

Η μεμβράνη αυτή αποτελείται από τρεις περιοχές (σχήμα 2.9) [21] :

1. Από ένα κορμό φθορανθράκων, που μοιάζει με τη δομή του Teflon και αποτελείται από μια αλυσίδα εκατοντάδων επαναλαμβανόμενων μονάδων $-CF_2-CF-CF_2-$.
2. Από τις πλευρικές αλυσίδες $-O-CF_2-CF-O-CF_2-CF_2-$ που συνδέουν τον κορμό του μορίου με την τρίτη περιοχή.
3. Από τις συστοιχίες ιόντων SO_3^- στα οποία προσκολλώνται ιόντα H^+ .

Τα αρνητικά ιόντα $-\text{SO}_3^-$ είναι μονίμως συνδεδεμένα στην πλευρική αλυσίδα και δεν μπορούν να κινηθούν. Όμως, αν η μεμβράνη ενυδατωθεί απορροφώντας νερό, τα ιόντα H^+ (πρωτόνια) γίνονται ευκίνητα. Τα πρωτόνια προσκολλώμενα στα μόρια του νερού, μπορούν να μεταπηδούν από ένα $-\text{SO}_3^-$ σε μια θέση της αλυσίδας, σε ένα άλλο $-\text{SO}_3^-$ (με πάλια συμβολίζεται ο ομοιοπολικός δεσμός), σε κάποια άλλη θέση στην αλυσίδα. Με αυτό τον τρόπο η μεμβράνη γίνεται ένας ιδανικός αγωγός πρωτονίων.



Σχήμα 2.9 Δομή μορίου Nafion

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η ενυδάτωση της μεμβράνης είναι σημαντικός παράγοντας για την καλή λειτουργία της κυψέλης και για αυτό πρέπει, κατά τη λειτουργία της, η ενυδάτωση της μεμβράνης να παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα, αλλιώς μειώνεται ο χρόνος ζωής της κυψέλης, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί ακόμα και να επέλθει η άμεση καταστροφή της.

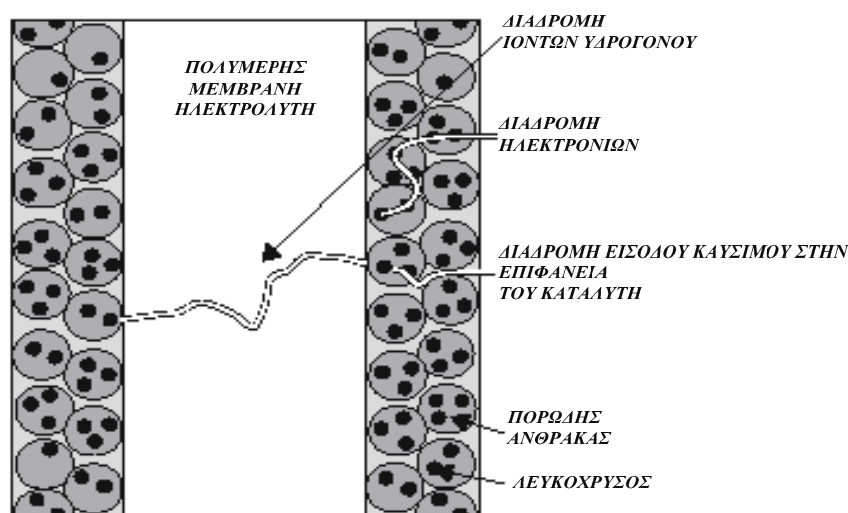
Για να διατηρείται το νερό σε υγρή μορφή πρέπει η λειτουργία της κυψέλης να γίνεται σε θερμοκρασίες κάτω των 100°C (η κυψέλη PEM συνήθως λειτουργεί σε θερμοκρασία 80°C). Η λειτουργία κυψελών σε θερμοκρασίες άνω των 100 βαθμών είναι δυνατή, αρκεί να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης, ώστε το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή.

Το κόστος των μεμβρανών που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι γύρω στα 100 δολάρια ανά τετραγωνικό πόδι (ή 1.075 δολάρια ανά τετραγωνικό μέτρο), το οποίο αναμένεται να μειωθεί όσο αυξάνεται η ζήτηση.

2. Ηλεκτρόδια

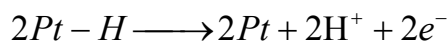
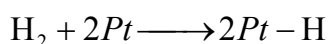
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ηλεκτρόδια είναι πορώδη και αποτελούνται από λευκόχρυσο. Ο λευκόχρυσος είναι ο ιδανικός καταλύτης για τις αντιδράσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω και που συμβαίνουν τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο, αφού αυξάνει κατακόρυφα την ταχύτητα των αντιδράσεων αυτών. Όμως, ο λευκόχρυσος είναι πολύ ακριβό και δυσεύρετο υλικό και για αυτό το λόγο τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από πορώδη άνθρακα, στον οποίο γίνεται ομοιόμορφη διασπορά μορίων λευκόχρυσου, τα οποία προσκολλώνται στα άτομα του άνθρακα. Με αυτό τον τρόπο μεγιστοποιείται η συνολική επιφάνεια επαφής των αντιδρώντων

σωμάτων με τον καταλύτη. Η διαδικασία αυτή έχει ως σκοπό τη μείωση του κόστους των ηλεκτροδίων, αυξάνοντας παράλληλα την αποτελεσματικότητά τους. Τα αέρια που συμμετέχουν στην αντίδραση (υδρογόνο και οξυγόνο) διαχέονται μέσα από τους πόρους του ηλεκτροδίου και έτσι έρχονται σε επαφή με τον καταλύτη (σχήμα 2.10). Η μεγάλη διασπορά των μορίων του λευκόχρυσου αυξάνει σημαντικά τη συνολική επιφάνειά του, ακόμα και όταν η ποσότητα του λευκόχρυσου που χρησιμοποιούμε είναι μικρή. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνει σημαντικά η ταχύτητα της αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στο ηλεκτρόδιο.



Σχήμα 2.10 Τομή κυψέλης καυσίμου [23]

Για να γίνει κατανοητή η καταλυτική δράση του λευκόχρυσου, θα περιγραφεί η διεργασία που πραγματοποιείται στο ηλεκτρόδιο της ανόδου. Τα άτομα του υδρογόνου δεσμεύονται από το λευκόχρυσο και στη συνέχεια απελευθερώνονται ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η διαδικασία αυτή έχει ως εξής:

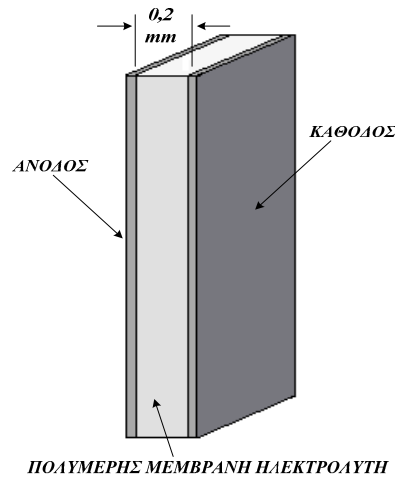


Η διαδικασία αυτή απαιτεί έναν όχι πολύ ισχυρό, αλλά ούτε και πολύ αδύναμο δεσμό μεταξύ των ατόμων του καταλύτη και του υδρογόνου. Αυτό είναι και το κριτήριο επιλογής του καταλύτη και λόγω αυτού του χαρακτηριστικού, ο λευκόχρυσος θεωρείται ιδανικός για την κυψέλη καυσίμου.

Μια μέθοδος κατασκευής κυψελών καυσίμου είναι να ενσωματώνονται τα ηλεκτρόδια πάνω στη μεμβράνη, φτιάχνοντας έτσι ένα συμπαγές σύστημα, το οποίο τοποθετείται στη συνέχεια μέσα στην κυψέλη. Η όλη διαδικασία ξεκινά με τη θέρμανση του υλικού των ηλεκτροδίων (σκόνη λευκόχρυσου αναμειγμένη με άνθρακα) μέχρι να ρευστοποιηθεί. Στη συνέχεια το υλικό εναποτίθεται στη μια πλευρά της μεμβράνης, η οποία στη συνέχεια θερμαίνεται μέχρι να στεγνώσει το υλικό και να σχηματιστεί το ηλεκτρόδιο. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται στη συνέχεια και στην άλλη πλευρά της μεμβράνης. Στη συνέχεια το σύστημα

μεμβράνης -ηλεκτροδίων εμβαπτίζεται σε θερμό διάλυμα οξέος, για να ενυδατωθεί η μεμβράνη και για να εξασφαλιστεί ότι θα είναι σε θέση να είναι αγωγική στα πρωτόνια. Τέλος η διάταξη ξεπλένεται με απεσταγμένο νερό και στη συνέχεια τοποθετείται στην κυψέλη.

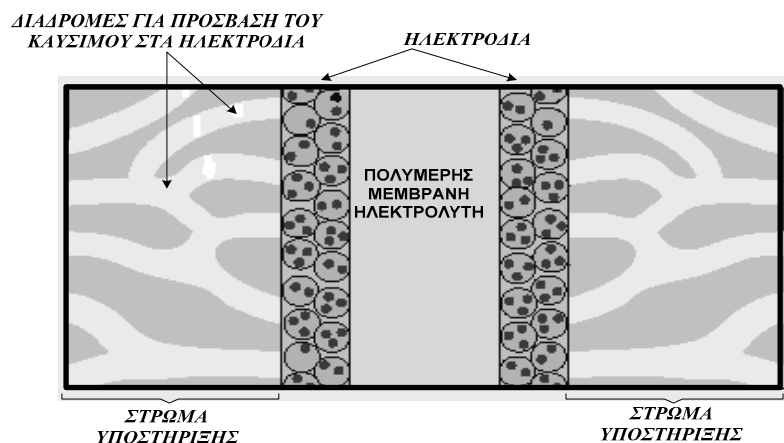
Το πάχος της μεμβράνης εξαρτάται από το υλικό κατασκευής της. Μια τυπική τιμή είναι γύρω στα 200 μm (σχήμα 2.11). Το πάχος των ηλεκτροδίων εξαρτάται από την περιεκτικότητά τους σε λευκόχρυσο. Για περιεκτικότητα 0,15 mg Pt/cm², το πάχος του ηλεκτροδίου κυμαίνεται περίπου στα 10 μm .



Σχήμα 2.11 Σύστημα μεμβράνης-ηλεκτροδίων

3. Στρώμα υποστήριξης (backing layer)

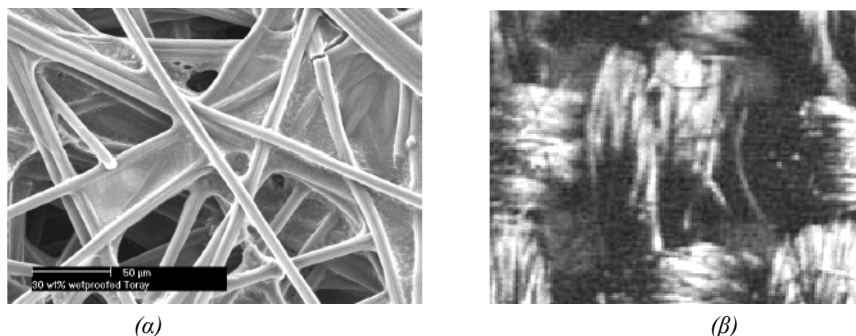
Σκοπός αυτού του στρώματος είναι η μεγιστοποίηση του ρεύματος, που συλλέγεται από τα ηλεκτρόδια. Το στρώμα αυτό τοποθετείται τόσο δίπλα στο ηλεκτρόδιο της ανόδου, όσο και δίπλα στο ηλεκτρόδιο της καθόδου και αποτελείται συνήθως από πορώδες χαρτί άνθρακα ή ύφασμα άνθρακα με πάχος 100 έως 400 μm (σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12 Τομή συστήματος μεμβράνης-ηλεκτροδίων και στρώματος υποστήριξης [23]

Το στρώμα υποστήριξης, εκτός από το να είναι αγωγικό στο ηλεκτρικό ρεύμα, πρέπει να επιτρέπει και τη διέλευση των αερίων (υδρογόνου και οξυγόνου), τα οποία θα έρχονται σε

επαφή με τα ηλεκτρόδια. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος, που το στρώμα υποστήριξης κατασκευάζεται από πορώδες υλικό. Τέλος το στρώμα υποστήριξης βοηθάει στη σωστή διαχείριση του νερού για την ενυδάτωση της μεμβράνης. Το υλικό από του στρώματος υποστήριξης, το ποίο συνήθως είναι χαρτί ή ύφασμα άνθρακα (σχήμα 2.13), πρέπει να αφήνει να περνά στη μεμβράνη η σωστή ποσότητα υδρατμών. Επίσης, πρέπει να οδηγεί το νερό, που παράγεται στην κάθοδο σε υγρή μορφή, έξω από την κυψέλη, ώστε η τελευταία να μην πλημμυρίζει.

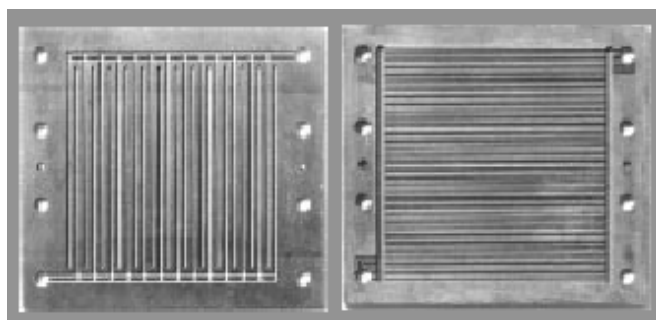


Σχήμα 2.13 (α) Μεγέθυνση χαρτιού άνθρακα (β) Μεγέθυνση υφάσματος άνθρακα [23]

4. Περιοχές ροής (συλλέκτες ρεύματος)

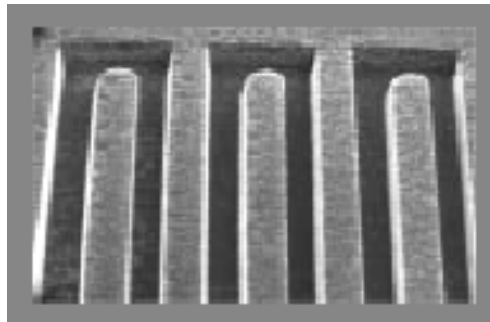
Στην εξωτερική επιφάνεια κάθε στρώματος υποστήριξης υπάρχει μια πλάκα από αγώγιμο υλικό, που εξυπηρετεί δυο σκοπούς : α) την εξασφάλιση της ροής των αερίων, τα οποία κυκλοφορούν στην κυψέλη και β) τη συλλογή του ρεύματος που δημιουργείται από τα ηλεκτρόδια. Οι πλάκες αυτές (μια στην πλευρά της ανόδου και μια στην πλευρά της καθόδου) κατασκευάζονται από ελαφρύ, ανθεκτικό, αεροστεγές και ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό (σχήμα 2.14). Το υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι κάποιο μέταλλο ή γραφίτης, ενώ αναπτύσσονται και συνθετικά υλικά για μελλοντική χρήση.

Ένας από τους σκοπούς κάθε πλάκας είναι να εξασφαλίζει μια περιοχή ροής για το υδρογόνο που κυκλοφορεί στην άνοδο και για τον ατμοσφαιρικό αέρα που κυκλοφορεί στην κάθοδο. Για το λόγο αυτό, στην πλευρά της πλάκας που εφάπτεται στο στρώμα υποστήριξης υπάρχουν σκαλισμένα κανάλια, που χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν το αέριο από το σημείο που εισέρχεται στην κυψέλη μέχρι το σημείο που εξέρχεται.



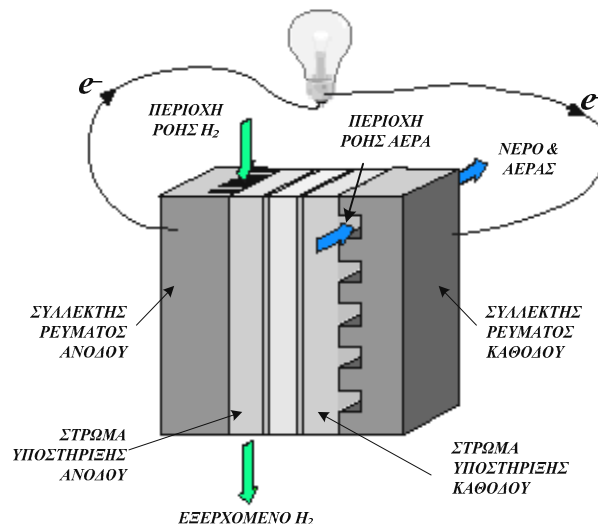
Σχήμα 2.14 Ανοξείδωτες πλάκες που χρησιμοποιούνται ως περιοχές ροής- συλλέκτες ρεύματος [23]

Ο σχηματισμός της περιοχής ροής, καθώς και το πλάτος και το βάθος των καναλιών (σχήμα 2.15) έχουν μεγάλη επίδραση στην αποτελεσματικότητα της διάχυσης των αντιδρώντων αερίων στην περιοχή του συστήματος μεμβράνης-ηλεκτροδίων. Επίσης η σχεδίαση της περιοχής ροής επηρεάζει το βαθμό ενυδάτωσης της μεμβράνης και την απομάκρυνση του νερού που παράγεται στην κάθοδο.



Σχήμα 2.15 Μεγέθυνση των καναλιών ροής του αερίου. Η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι 0,8mm [23].

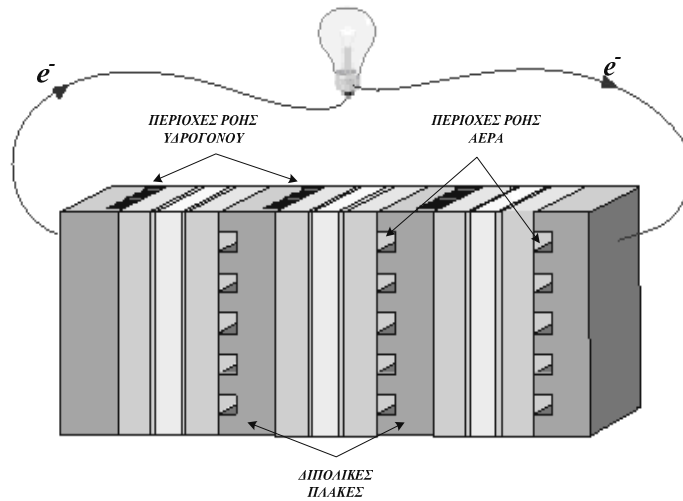
Ο άλλος σκοπός που επιτελεί κάθε πλάκα είναι η συλλογή του ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόνια που παράγονται από την οξείδωση του υδρογόνου, πρέπει να διέλθουν από την άνοδο, από το στρώμα υποστήριξης και από την πλάκα πριν βγουν από την κυψέλη. Στη συνέχεια πρέπει να οδεύσουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και τέλος να ξαναμπουν στην κυψέλη μέσω της πλάκας της καθόδου (σχήμα 2.16). Η προσθήκη των περιοχών ροής και συλλεκτών ρεύματος ολοκληρώνει την κυψέλη. Αυτό που απαιτείται πλέον είναι η παροχή υδρογόνου και ατμοσφαιρικού αέρα, για να καταστεί δυνατή η σύνδεση ενός εξωτερικού κυκλώματος και να αξιοποιηθεί το ρεύμα που παράγει η κυψέλη.



Σχήμα 2.16 Λειτουργία μιας κυψέλης PEM [23].

Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη τάση, μπορούν να συνδεθούν σε σειρά πολλές κυψέλες, δημιουργώντας μια συστοιχία κυψελών (σχήμα 2.17). Για να μειωθεί ο συνολικός όγκος της

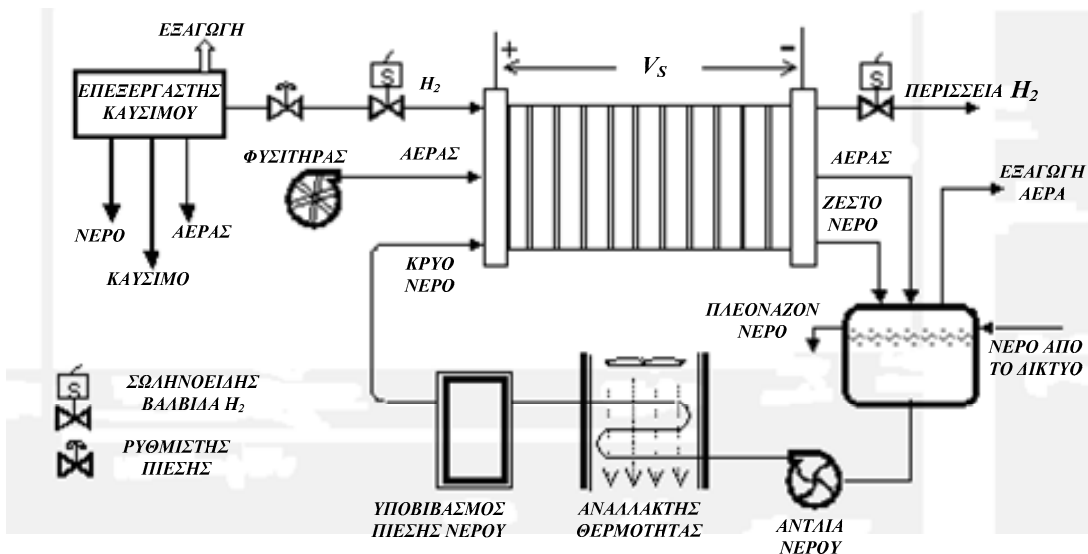
συστοιχίας, χρησιμοποιούνται διπολικές πλάκες μεταξύ των κυψελών, οι οποίες εξυπηρετούν την κάθοδο της μιας κυψέλης και την άνοδο της γειτονικής της.



Σχήμα 2.17 Συστοιχία κυψελών PEM [23].

Σύστημα υποστήριξης της κυψέλης PEM

Για να μπορέσει να λειτουργήσει μια κυψέλη καυσίμου, είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος (σχήμα 2.18), που αναλαμβάνει την υποστήριξη της κυψέλης [21]. Μία από τις λειτουργίες του συστήματος είναι η τροφοδοσία της κυψέλης με υδρογόνο και οξυγόνο. Συνήθως το οξυγόνο εισέρχεται στην κυψέλη από τον ατμοσφαιρικό αέρα, ενώ το υδρογόνο προέρχεται είτε από φιάλη, στην οποία βρίσκεται υπό υψηλή πίεση, είτε από επεξεργαστή καυσίμου. Ο επεξεργαστής τροφοδοτείται από το καύσιμο που χρησιμοποιούμε και το μετατρέπει σε υδρογόνο. Σε κάθε περίπτωση, μέσω ενός συστήματος βαλβίδων, το υδρογόνο εισέρχεται στην κυψέλη υπό πίεση μερικών atm.



Σχήμα 2.18 Ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας με κυψέλη PEM [21].

Επιπλέον το σύστημα υποστήριξης αναλαμβάνει την απομάκρυνση του νερού που παράγεται στην κάθοδο, ώστε να μην πλημμυρίσει η κυψέλη. Επίσης, το σύστημα πολλές φορές περιλαμβάνει και υγραντήρα, ώστε να διατηρεί την υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα που εισέρχεται στην κυψέλη σε ικανοποιητικά επίπεδα, ώστε η μεμβράνη να παραμένει καλά ενυδατωμένη.

Τέλος, το σύστημα υποστήριξης φροντίζει για την απαγωγή της θερμότητας που παράγει η κυψέλη κατά τη λειτουργία της. Με αυτό τον τρόπο διατηρείται η θερμοκρασία του συστήματος στα πλαίσια που επιβάλλει ο κατασκευαστής. Η απομάκρυνση της θερμότητας γίνεται τόσο με τον ατμοσφαιρικό αέρα που κυκλοφορεί στην κυψέλη, όσο και με ένα σύστημα ψύξης που χρησιμοποιεί νερό [21].

Χαρακτηριστικά λειτουργίας της κυψέλης PEM

Για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία μιας κυψέλης PEM, επιβάλλεται η παρακολούθηση μιας σειράς παραμέτρων και η διατήρησή τους σε συγκεκριμένα πλαίσια. Συνήθως για τη λειτουργία αυτή χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου, το οποίο σε περίπτωση παρέκκλισης από τις συνθήκες καλής λειτουργίας, επεμβαίνει δίνοντας τις κατάλληλες εντολές στα διάφορα υποσυστήματα που πλαισιώνουν την κυψέλη.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργία της κυψέλης είναι η ενυδάτωση της μεμβράνης. Ειδικά αν δεν χρησιμοποιείται ειδικός υγραντήρας, απαιτείται μεγάλη προσοχή κατά τη χρήση της κυψέλης, ώστε να αποφευχθεί τόσο η αφυδάτωση της μεμβράνης, όσο και το πλημμύρισμα της κυψέλης από την υπερβολική συγκέντρωση νερού.

Για τον παραπάνω λόγο, η διαδικασία εκκίνησης της κυψέλης επιβάλλεται να γίνεται με προσοχή. Κατά την έναυση της κυψέλης είναι αναγκαίο να ελέγχεται συνεχώς το ρεύμα που τη διαρρέει και να αυξάνεται σταδιακά, όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία της κυψέλης, μέχρι να φτάσει στη θερμοκρασία λειτουργίας. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος να αφυδατωθεί η μεμβράνη. Ο χρόνος που διαρκεί η διαδικασία αυτή εξαρτάται από την εξωτερική θερμοκρασία και σε φυσιολογικές συνθήκες διαρκεί έως 4 λεπτά περίπου.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη λειτουργία της κυψέλης είναι η θερμοκρασία. Το σύστημα ελέγχου πρέπει να διατηρεί τη θερμοκρασία της κυψέλης μέσα στα επιθυμητά πλαίσια. Αν η θερμοκρασία του συστήματος μειωθεί πολύ, τότε μειώνεται η απόδοση της κυψέλης. Αν αντίθετα η θερμοκρασία ξεπεράσει το ανώτατο όριο λειτουργίας της κυψέλης, τότε το πρώτο που θα συμβεί είναι να αφυδατωθεί η μεμβράνη, λόγω εξάτμισης του νερού, οπότε η κυψέλη δε θα μπορεί να αποδώσει ισχύ και αν δεν τεθεί αμέσως εκτός λειτουργίας, υπάρχει άμεσος κίνδυνος καταστροφής της.

Επίσης πρέπει να ελέγχεται συνεχώς η τάση στα άκρα της κυψέλης. Αν η τάση πέσει κάτω από ένα όριο (περίπου 0,5 Volt), τότε πρέπει να αποσυνδεθεί το φορτίο για να αποφευχθεί η καταπόνηση της κυψέλης.

Τέλος προσοχή απαιτείται και στην πίεση με την οποία εισάγεται το υδρογόνο στην κυψέλη. Αν η πίεση είναι πολύ μικρή, τότε μειώνεται η απόδοση της κυψέλης, ενώ αν η πίεση γίνει πολύ μεγάλη, τότε μπορεί να υπάρξει πρόβλημα στη δομική αντοχής της. Το οξυγόνο

πρέπει να εισάγεται με αρκετή πίεση, ώστε να ωθείται το νερό που παράγεται στην κάθοδο έξω από την κυψέλη και να αποτρέπεται υπερχειλίσιή της.

Μαθηματικό μοντέλο λειτουργίας της κυψέλης PEM

Κατά τη λειτουργία της κυψέλης PEM συμβαίνουν τόσο χημικά όσο και ηλεκτρικά φαινόμενα, τα οποία περιγράφονται από ένα σύνολο εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές περιέχουν μια σειρά από παραμέτρους, μερικές από τις οποίες είναι εμπειρικές, ενώ άλλες έχουν να κάνουν με τη σχεδίαση της κυψέλης, καθώς επίσης και με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες λειτουργεί.

Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει το σύνολο των κυψελών PEM, αρκεί να προσαρμοστούν κατάλληλα οι παράμετροί του. Οι εμπειρικές παράμετροι μπορούν να καθοριστούν με τη χρήση πειραματικών μετρήσεων της τάσης για κάποιες τιμές του ρεύματος [24], [25].

Σύμφωνα λοιπόν με το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί, η τάση μιας κυψέλης καυσίμου τύπου PEM είναι το αλγεβρικό άθροισμα τεσσάρων συνιστωσών :

1. Της θερμοδυναμικής τάσης (Thermodynamic potential - E),
2. της πτώσης τάσης που σχετίζεται με την ενεργοποίηση της ανόδου και της καθόδου (Activation voltage drop - V_{ACT}),
3. της ωμικής πτώσης, τάσης (Ohmic voltage drop - V_{OHMIC}) και
4. της πτώσης τάσης που οφείλεται στη μείωση της συγκέντρωσης του υδρογόνου και του οξυγόνου (Concentration voltage drop - V_{CON}).

Επομένως, η τάση που παράγει ενός κελιού μιας κυψέλης PEM είναι :

$$U_{cell} = E + V_{ACT} + V_{OHMIC} + V_{CON} \quad (2.1)$$

Συνήθως, συνδέονται πολλά κελιά σε σειρά, για να παραχθεί μεγαλύτερη τάση, δημιουργώντας έτσι μια συστοιχία (stack) κυψελών. Αν η συστοιχία περιλαμβάνει n κυψέλες, τότε η τάση στα άκρα της συστοιχίας θα είναι:

$$U_{STACK} = n \cdot U_{cell} \quad (2.2)$$

Στη συνέχεια γίνεται η μαθηματική περιγραφή των συνιστωσών της τάσης της κυψέλης.

1. Θερμοδυναμική τάση.

$$E = 1,229 - 8,5 \cdot 10^{-4} \cdot (T_{STACK} - 298,15) + 4,31 \cdot 10^{-5} \cdot T_{STACK} \cdot \ln(P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0,5}) \quad (2.3)$$

Όπου,

T_{STACK} είναι η απόλυτη θερμοκρασία ($^{\circ}K$) στην οποία λειτουργεί η κυψέλη και P_{O_2}, P_{H_2} είναι οι μερικές πιέσεις του οξυγόνου και του υδρογόνου αντίστοιχα (μέσα στην κυψέλη), οι οποίες δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_{O_2} = P_{O_2,in} \cdot \exp\left(\frac{-4,192 \cdot J_{FC}}{T_{STACK}^{1,334}}\right) - P_{H_2O,sat} \quad (2.4)$$

$$P_{H_2} = P_{H_2,in} \cdot \exp\left(\frac{-1,653 \cdot J_{FC}}{T_{STACK}^{1,334}}\right) - 0,5 \cdot P_{H_2O,sat} \quad (2.5)$$

Όπου,

J_{FC} είναι η πυκνότητα του ρεύματος που διαρρέει την κυψέλη και ισούται με το λόγο $\frac{I_{FC}}{A_{PEM}}$,

$P_{H_2,in}, P_{O_2,in}$ είναι οι πιέσεις με τις οποίες εισάγονται στην κυψέλη το υδρογόνο και το οξυγόνο αντίστοιχα,

$P_{H_2O,sat}$ είναι η μερική πίεση κορεσμού του νερού, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$P_{H_2O,sat} = 25,7 - 0,1615 \cdot T_{STACK} + 2,55 \cdot 10^{-4} \cdot T_{STACK}^2 \quad (2.6)$$

Όλες οι πιέσεις είναι σε atm.

Στις παραπάνω σχέσεις :

A_{PEM} είναι το εμβαδόν (σε cm^2) των ηλεκτροδίων της κυψέλης (πρακτικά ίσο με το εμβαδόν της μεμβράνης),

I_{FC} είναι το ρεύμα (σε A) που διαρρέει την κυψέλη (είναι το ίδιο με αυτό που διαρρέει όλη τη συστοιχία).

2. Πτώση τάσης λόγω ενεργοποίησης των ηλεκτροδίων.

$$V_{ACT} = \xi_1 + \xi_2 \cdot T_{STACK} + \xi_3 \cdot T_{STACK} \cdot \ln(J_{FC}) + \xi_4 \cdot T_{STACK} \cdot \ln(C_{O_2}) \quad (2.7)$$

Όπου,

C_{O_2} είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{O_2} = 1,969 \cdot 10^{-7} \cdot \exp\left(\frac{498}{T_{STACK}}\right) \cdot P_{O_2} \quad (2.8)$$

Πολλές φορές στη βιβλιογραφία, στην εξίσωση της τάσης ενεργοποίησης παρουσιάζεται και ο λογάριθμος της συγκέντρωσης του υδρογόνου. Όμως, η συμβολή της στη διαμόρφωση της τάσης ενεργοποίησης είναι μικρή και για λόγους απλοποίησης παραλείπεται.

Οι μεταβλητές ξ_i είναι εμπειρικές και οι τιμές τους εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, όπως το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα ηλεκτρόδια, η ποσότητα του νερού που ενυδατώνει τη μεμβράνη, η γήρανση της κυψέλης κ.λπ.

3. Ωμική πτώση τάσης.

$$V_{OHMIC} = -I_{FC} \cdot (R_M + R_C) \quad (2.9)$$

Όπου,

R_C είναι η συνολική αντίσταση που παρουσιάζουν τα διάφορα μέρη της κυψέλης στην αγωγή ηλεκτρονίων, ενώ R_M είναι η αντίσταση που παρουσιάζει η μεμβράνη στην διέλευση των πρωτονίων και αναλύεται ως εξής:

$$R_M = \rho_M \cdot \frac{T_{PEM}}{A_{PEM}} \quad (2.10)$$

όπου,

ρ_M είναι η ειδική αντίσταση της μεμβράνης (σε $\Omega\cdot\text{cm}$) και T_{PEM} είναι το πάχος της μεμβράνης, που μετράται σε cm . Η ειδική αντίσταση της μεμβράνης μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και το ρεύμα, όπως ορίζει η παρακάτω σχέση:

$$\rho_M = \frac{\left[1 + 0.03 \cdot J_{FC} + 0.062 \cdot \left(\frac{T_{STACK}}{303} \right)^2 \cdot (J_{FC})^{2.5} \right]}{\left(\frac{I}{\rho_{0,303}} - 0,0165 \cdot J_{FC} \right) \cdot \exp \left[4,18 \cdot \left(1 - \frac{303}{T_{STACK}} \right) \right]} \quad (2.11)$$

όπου,

$\rho_{0,303}$ είναι η ειδική αντίσταση της μεμβράνης ($\Omega\cdot\text{cm}$) όταν η κυψέλη δε διαρρέεται από ρεύμα και βρίσκεται σε θερμοκρασία 30°C (303°K).

Από τη σχέση 2.11 προκύπτει ότι, για να ορίζεται το ρ_M πρέπει ο παράγοντας

$\left(\frac{I}{\rho_{0,303}} - 0,0165 \cdot J_{FC} \right)$ να είναι μεγαλύτερος του μηδενός.

Άρα πρέπει $J_{FC} < \frac{I}{0,0165 \cdot \rho_{0,303}}$

Στην πραγματικότητα, η μέγιστη πυκνότητα του ρεύματος, που μπορεί να αντέξει η κυψέλη είναι ακόμα πιο μικρή και περιορίζεται από την τιμή J_{MAX} , όπως αναφέρεται στη συνέχεια.

4. Πτώση τάσης λόγω μείωσης της συγκέντρωσης των αντιδρώντων.

$$V_{CON} = B \cdot \ln \left(1 - \frac{J_{FC}}{J_{MAX}} \right) \quad (2.12)$$

Στην παραπάνω εξίσωση J_{MAX} είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να περάσει από την κυψέλη. Το B είναι μια εμπειρική παράμετρος και εκφράζει την πτώση τάσης (σε Volt) λόγω συγκέντρωσης αντιδρώντων στοιχείων.

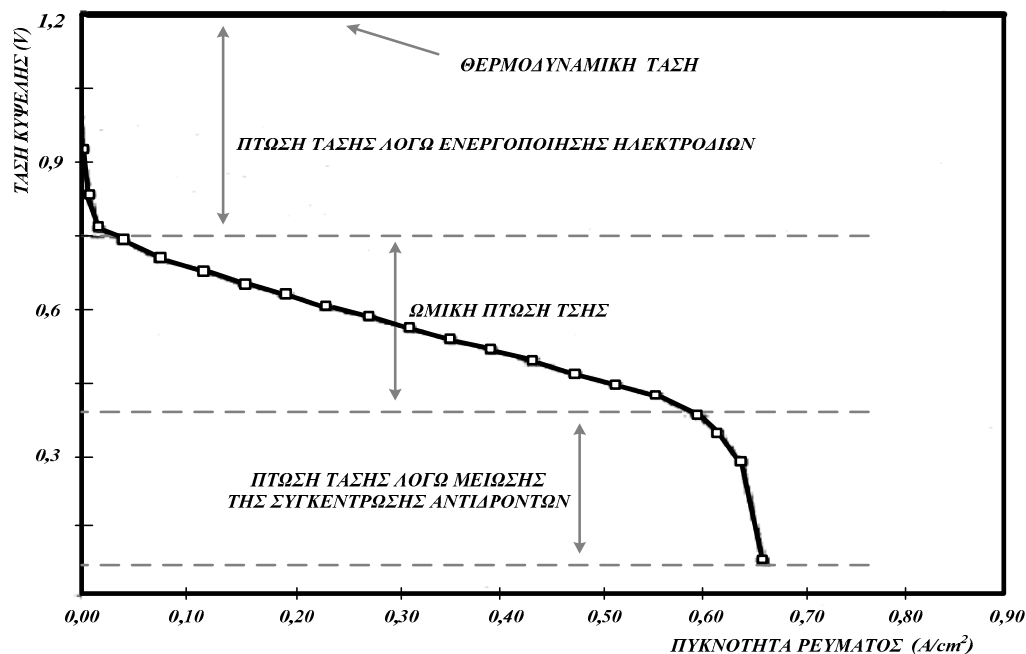
Επεξήγηση μεγεθών που εμπεριέχονται στις παραπάνω σχέσεις :

U_{STACK} : Τάση στα άκρα της συστοιχίας (Volts)

U_{cell}	: Τάση στα άκρα μιας κυψέλης (Volts)
V_n	: Αριθμός κυψελών στη συστοιχία
E	: Θερμοδυναμική τάση ανά κυψέλη (Volts)
V_{ACT}	: Πτώση τάσης λόγω ενεργοποίησης ανά κυψέλη (Volts)
V_{OHMIC}	: Ωμική πτώση τάσης ανά κυψέλη (Volts)
V_{CON}	: Πτώση τάσης λόγω μείωσης της συγκέντρωσης ανά κυψέλη (Volts)
T_{STACK}	: Απόλυτη θερμοκρασία λειτουργίας ($^{\circ}K$)
P_{O_2}	: Μερική πίεση οξυγόνου στην κυψέλη (Atm)
P_{H_2}	: Μερική πίεση υδρογόνου στην κυψέλη (Atm)
P_{H_2in}	: Πίεση παροχής οξυγόνου (Atm)
P_{O_2in}	: Πίεση παροχής υδρογόνου (Atm)
$P_{H_2O_{sat}}$: Μερική πίεση κορεσμού του νερού (Atm)
C_{O_2}	: Συγκέντρωση οξυγόνου (Mol/cm^3)
I_{FC}	: Συνολικό ρεύμα κυψέλης (A)
J_{FC}	: Πυκνότητα ρεύματος κυψέλης (A/cm^2)
J_{MAX}	: Μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που αντέχει η κυψέλη (A/cm^2)
A_{PEM}	: Εμβαδόν ηλεκτροδίων της (PEM cm^2)
T_{PEM}	: Πάχος της μεμβράνης PEM (cm)
ρ_M	: Ειδική αντίσταση μεμβράνης στις τρέχουσες συνθήκες ($\Omega \cdot cm$)
$\rho_{0,303}$: Ειδική αντίσταση μεμβράνης στους $30^{\circ}C$ ($303^{\circ}K$) και σε μηδενικό ρεύμα ($\Omega \cdot cm$)
R_c	: Ηλεκτρική αντίσταση των διαφόρων μερών της κυψέλης, εκτός της μεμβράνης (Ω)
B	: Συντελεστής πτώσης τάσης λόγω μείωσης της συγκέντρωσης (Volts)
ξ_i	: Εμπειρικοί συντελεστές της τάσης ενεργοποίησης

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Στο σχήμα 3.19 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος εξόδου (V-I) της κυψέλης καυσίμου, με τους επιμέρους όρους που επηρεάζουν την μεταβολή της τάσης εξόδου της κυψέλης συναρτήσει του ρεύματος του φορτίου. Παρατηρούμε ότι η θερμοδυναμική τάση παραμένει σταθερή σε όλο το φάσμα τιμών του ρεύματος φορτίου, ενώ για μικρές τιμές του ρεύματος φορτίου η πτώση της τάσης εξόδου της κυψέλης οφείλεται στην τάση ενεργοποίησης. Επίσης, για τις ενδιάμεσες τιμές του ρεύματος του φορτίου, η πτώση της τάσης εξόδου της κυψέλης οφείλεται στην ωμική πτώση τάσης, ενώ για μεγάλες τιμές του ρεύματος του φορτίου οφείλεται στην μείωση της συγκέντρωσης των αντιδρώντων στοιχείων (υδρογόνο και οξυγόνο). Τα σημεία μετάβασης από τον έναν τύπο πτώσης τάσης στον άλλο εξαρτώνται από τις τιμές που παίρνουν οι παράμετροι, που εμπλέκονται στις σχέσεις που προσδιορίζουν την τάση εξόδου της κυψέλης.



Σχήμα 2.19 Παράγοντες που επηρεάζουν την τάση εξόδου της κυψέλης καυσίμου

Στη συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός των παραπάνω πτώσεων τάσης στην κυψέλη καυσίμου, προκειμένου να προσδιοριστεί το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο θα επιτρέψει την προσομοίωση της λειτουργίας της κυψέλης [24], [25], [26].

1. Πτώση τάσης λόγω ενεργοποίησης των ηλεκτροδίων (ή πόλωση ενεργοποίησης)

Η πτώση τάσης αυτή οφείλεται στη συγκέντρωση ηλεκτρονίων και πρωτονίων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη. Δεν οφείλεται σε ωμικές απώλειες, αλλά πρόκειται για μια επί πλέον τάση, η οποία απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η χημική αντίδραση. Η πτώση τάσης αυτή δίνεται από την παρακάτω σχέση, η οποία είναι γνωστή ως εξίσωση του Tafel :

$$V_{act} = a \log\left(\frac{J_{FC}}{J_0}\right) = A \cdot \ln\left(\frac{J_{FC}}{J_0}\right) \tag{2.13}$$

Η σχέση αυτή ισχύει για $J_{FC} > J_0$

Όπου, $A = \frac{R \cdot T}{2\alpha F}$ είναι ο συντελεστής μεταφοράς φορτίου και εκφράζει το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για τη μεταβολή του ρυθμού της ηλεκτροχημικής αντίδρασης, ως προς την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται. Η τιμή του (από 0 έως 1) εξαρτάται από το είδος της αντίδρασης και από το υλικό κατασκευής του ηλεκτροδίου.

Επίσης :

J_{FC} είναι η πυκνότητα του ρεύματος που δίνει η κυψέλη και

J_0 είναι η πυκνότητα του ρεύματος της κυψέλης στη μόνιμη κατάσταση.

2. Ωμική πτώση τάσης

Στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου προκαλούνται ωμικές απώλειες λόγω της αντίστασης των ηλεκτροδίων, του ηλεκτρολύτη, καθώς και των συνδέσεων μεταξύ των κυψελών, που σχηματίζουν τη συστοιχία. Όλες αυτές παριστάνονται με μία ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά με την κυψέλη. Όμως, επειδή χρησιμοποιούμε πυκνότητα ρεύματος και όχι ρεύμα, θεωρούμε ωμική μια ωμική αντίσταση r , η οποία αντιστοιχεί σε επιφάνεια 1 cm^2 της κυψέλης καυσίμου. Αυτή η αντίσταση είναι σταθερή για όλες τις τιμές του ρεύματος εξόδου της κυψέλης. Έτσι η πτώση τάσης λόγω ωμικών απωλειών ακολουθεί το νόμο του Ohm:

$$V_{ohm} = J_{FC} \cdot r \quad (2.14)$$

3. Πτώση τάσης λόγω μείωσης της συγκέντρωσης των αντιδρώντων ή πόλωση συγκέντρωσης (concentration polarization)

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου παρατηρείται μείωση της συγκέντρωσης του οξυγόνου στην περιοχή του ηλεκτροδίου της καθόδου. Το μέγεθος της μείωσης αυτής εξαρτάται από το ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου και το βαθμό καλής κυκλοφορίας του αέρα στην κυψέλη. Επίσης, παρατηρείται μείωση της πίεσης του υδρογόνου στην άνοδο, καθώς η κυψέλη παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η μείωση αυτή εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος και από τα χαρακτηριστικά του συστήματος παροχής του υδρογόνου.

Για τον υπολογισμό της πτώσης τάσης συνήθως χρησιμοποιείται μια εμπειρική σχέση, σύμφωνα με την οποία η πτώση τάσης που οφείλεται στην ελάττωση της συγκέντρωσης των αντιδρώντων αερίων κοντά στα ηλεκτρόδια υπολογίζεται από τη σχέση :

$$V_{con} = m \cdot \exp(n \cdot J_{FC}) \quad (2.15)$$

Όπου, " m " και " n " είναι σταθερές, οι οποίες επιλέγονται ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου. Τυπικές τιμές είναι : $m = 3 \cdot 10^{-5} V$ και $n = 8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 / mA$

Στο μηχανισμό αυτόν οφείλεται η απότομη μείωση της τάσης, για μεγάλες τιμές πυκνότητας του ρεύματος, ενώ αντίθετα, η πτώση τάσης που προκαλείται σε μικρές τιμές της πυκνότητας του ρεύματος είναι αμελητέα.

Η τάση εξόδου ενός κελιού μιας κυψέλης καυσίμου δίνεται από τη σχέση :

$$V_{cel} = E - V_{Ohm} - V_{act} - V_{con} \quad (2.16)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.16) τις (2.13), (2.14) και (2.15) προκύπτει :

$$V_{cel} = E - J_{FC} \cdot r - A \cdot \ln \frac{J_{FC}}{J_0} - m \cdot \exp(n \cdot J_{FC}) \quad \text{ή}$$

$$V_{cel} = E - J_{FC} \cdot r - A \cdot \ln(J_{FC}) + A \cdot \ln(J_0) - m \cdot \exp(n \cdot J_{FC}) \quad (2.17)$$

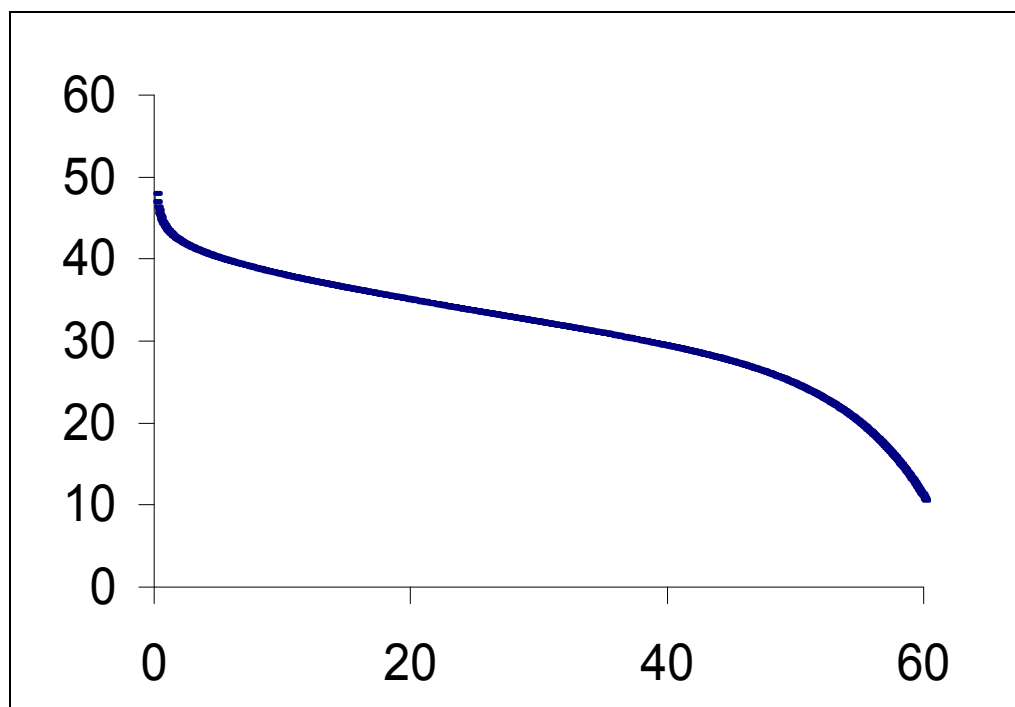
Θέτοντας, $E_{oc} = E + A \cdot \ln(i_0)$ η σχέση (2-17) γίνεται :

$$V_{cel} = E_{oc} - J_{FC} \cdot r - A \cdot \ln(J_{FC}) - m \cdot \exp(n \cdot J_{FC}) \quad (2.18)$$

Για τη μοντελοποίηση της κυψέλης καυσίμου, η οποία περιγράφεται από τη σχέση (2.18) θα χρησιμοποιηθούν στις παραμέτρους οι παρακάτω τιμές :

$$E_{oc} = 0.96V, r = 2 \cdot 10^{-4} k\Omega \cdot cm^2, A = 0.03V, m = 2 \cdot 10^{-5} V, n = 8 \cdot 10^{-3} cm^2 / mA$$

Επίσης, αν θεωρήσουμε συστοιχία 50 κελιών, με εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίων $50cm^2$, τότε η V-I χαρακτηριστική της κυψέλης θα είναι αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.20 και η οποία είναι σε απόλυτη συμφωνία με τη θεωρητικά αναμενόμενη.



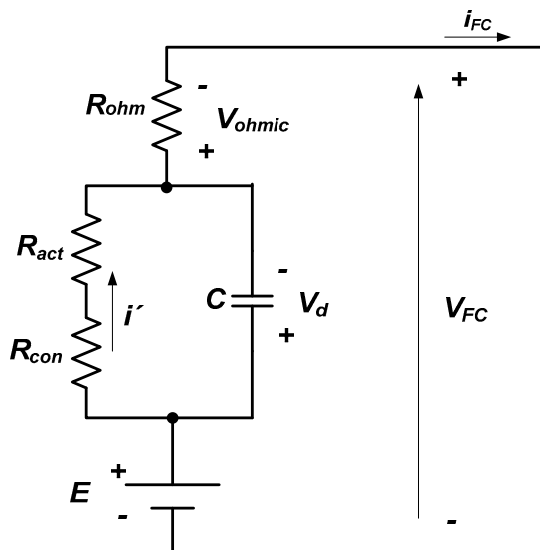
Σχήμα 2.20 V-I χαρακτηριστική κυψέλης καυσίμου.

Η τάση εξόδου της κυψέλης συνήθως παίρνει τη μόνιμη τιμή, που προβλέπεται από τις παραπάνω εξισώσεις, αφού περάσει κάποιο χρονικό διάστημα από τη μεταβολή του ρεύματος. Ο χρόνος που απαιτείται για να πάρει η τάση τη μόνιμη τιμή της εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κυψέλης και συνήθως είναι της τάξης μερικών δευτερολέπτων.

Μεταβατική συμπεριφορά της κυψέλης PEM

Η μεταβατική συμπεριφορά μιας κυψέλης PEM μπορεί να προσεγγιστεί από το κύκλωμα του σχήματος 2.21 [24].

Στο παρακάτω κύκλωμα η πηγή της DC τάσης αντιστοιχεί στη θερμοδυναμική τάση της κυψέλης ενώ οι αντιστάσεις R_{ohm} , R_{con} και R_{act} , αντιστοιχούν στις πτώσεις τάσης λόγω του φαινομένου του Ohm, της μείωσης της συγκέντρωσης των αντιδρώντων και της ενεργοποίησης των ηλεκτροδίων αντίστοιχα.



Σχήμα 2.21 Ισοδύναμο κύκλωμα PEMFC

Από το παραπάνω κύκλωμα προκύπτει ότι, οποιαδήποτε μεταβολή της τιμής του ρεύματος της κυψέλης, προκαλεί άμεση μεταβολή στην ωμική πτώση τάση της κυψέλης. Αντίθετα η πτώση τάσης λόγω ενεργοποίησης και η πτώση τάσης λόγω συγκέντρωσης εμφανίζουν μια χρονική υστέρηση για να πάρουν τις τιμές που αντιστοιχούν στη μόνιμη κατάσταση. Ο χρόνος που απαιτείται για να μεταβεί η τάση της κυψέλης στη νέα τιμή της εξαρτάται από την τιμή του πυκνωτή του παραπάνω κυκλώματος (σχήμα 2.20). Η σταθερά χρόνου του κυκλώματος δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = C(R_{con} + R_{act})$$

Οι τυπικές τιμές για τη σταθερά χρόνου της κυψέλης είναι μερικά δευτερόλεπτα (συνήθως 5 έως 20 sec), γι' αυτό η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή μπορεί να πάρει τιμές μέχρι μερικά Farad.

2.4.6 Κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας

Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας, το οποίο και προτείνεται στην παρούσα διατριβή, περιλαμβάνει μια συσκευή ηλεκτρόλυσης και μια κυψέλη καυσίμου

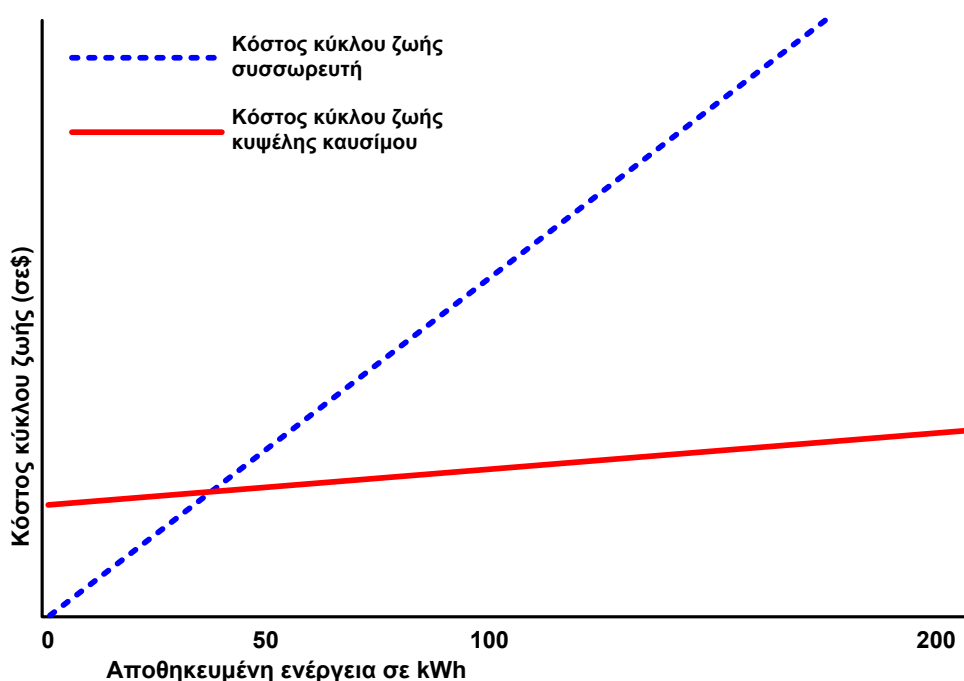
που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το υδρογόνο. Η κυψέλη αυτή, είναι ικανή να λειτουργεί σε δύο φάσεις : στη φάση κατά την οποία καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια για παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου από τη συσκευή ηλεκτρόλυσης του νερού (φόρτιση) και στη φάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την οποία το υδρογόνο και το οξυγόνο επανασυνδέονται για να παράγουν 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 μπαταριών που χρησιμοποιούνται στο 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 [3]-[4].

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 (σχήμα 2.22).



Σχήμα 2.22 Σύγκριση κόστους κύκλου ζωής κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας - συσσωρευτή

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.λπ.). 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.

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:

$$\text{Ενέργεια εξόδου } (E_o) = n \cdot V_d \cdot I_d \cdot t_d \quad (2.19)$$

Όπου,

V_d = τάση εξόδου ενός κελιού, σε volts

I_d = μέση τιμή του ρεύματος εξόδου, σε amps

n = αριθμός των κελιών της συστοιχίας της κυψέλης

t_d = 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 :

$$\text{Πυκνότητα ενέργειας} = \frac{\text{Ενέργεια εξόδου}}{\text{Μάζα αντιδρόντων}} = \frac{n \cdot V_d \cdot I_d \cdot t_d}{M_w} \quad (2.20)$$

Όπου,

M_w = μάζα (σε kg) του υδρογόνου και του οξυγόνου, που έχουν παραχθεί από το νερό. Από το νόμο του Faraday έχουμε :

$$\frac{n \cdot I_d \cdot t_d}{M_w} = \frac{2976,2 \text{ κελιά} \times \text{Ampere} \times \text{ώρες}}{\text{kg } H_2O} \quad (2.21)$$

Από τις σχέσεις (2.19) και (2.20) προκύπτει η θεωρητική μέγιστη πυκνότητα ενέργειας, για οποιαδήποτε τιμή της τάσης εξόδου :

$$\text{Πυκνότητα ενέργειας} = \frac{2976,2 \cdot V_d \text{ Wh}}{\text{Kg } H_2O} \quad (2.22)$$

Σε μια ιδανική κυψέλη αναστρέψιμης λειτουργίας, όπου η τάση εξόδου κάθε κελιού είναι 1,23 V, η θεωρητική πυκνότητα της ενέργειας ανά κελί είναι 3.660 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 ενέργειας σε ένα πραγματικό σύστημα υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\text{Πυκνότητα ενέργειας} = \frac{\text{Ενέργεια εξόδου}}{\text{Συνολικό βάρος συστήματος}} = \frac{2976,2 \cdot V_d \cdot M_w, Wh}{M_w + \text{Λοιπά βάρη, Kg}} \quad (2.23)$$

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 (2.23) γίνεται :

$$\text{Πυκνότητα ενέργειας} = \frac{2976,2 \cdot V_d, Wh}{I + \frac{T_w}{M_w} + \frac{S_w}{M_w} + \frac{W_w}{M_w} + \frac{A_w}{M_w}} \quad (2.24)$$

Όπου,

T_w = καθαρό βάρος των δοχείων αποθήκευσης των αερίων, σε Kg

S_w = καθαρό βάρος της συστοιχίας της κυψέλης, σε Kg

W_w = καθαρό βάρος του δοχείου αποθήκευσης του νερού, σε Kg

A_w = καθαρό βάρος των βοηθητικών συσκευών, σε Kg

Βάρος δοχείων αποθήκευσης αερίων (H₂, O₂)

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 (H₂, O₂), που έχουν παραχθεί από το νερό, δηλαδή ο λόγος T_w/M_w που περιέχεται στη σχέση (2.24) δίνεται από τη σχέση :

$$\frac{T_w}{M_w} = k \cdot R \cdot T \quad (2.25)$$

Όπου,

k , είναι συντελεστής η τιμή του οποίου εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά στοιχεία του δοχείου και από τα γραμμομόρια του νερού από το οποίο παρήχθησαν τα αέρια,

R , σταθερά ιδανικών αερίων = 84,78 (kg x cm³)/(cm² x g/mol x K⁰) και

T , θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin.

Βάρος συστοιχίας κελιών

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

$$S_w = \frac{\text{Ισχύς συστοιχίας (watts)}}{\text{Πυκνότητα ισχύος (watt/kg)}} = \frac{n \cdot V_d \cdot I_d}{\text{Πυκνότητα ισχύος}} \text{ (kg)} \quad (2.26)$$

Πολλαπλασιάζοντας αριθμητή και παρανομαστή με το χρόνο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας t_d , η σχέση (2.26) γίνεται :

$$S_w = \frac{n \cdot V_d \cdot I_d \cdot t_d}{t_d \cdot \text{Πυκνότητα ισχύος}} \text{ (kg)} \quad (2.27)$$

Επομένως,

$$S_w = \frac{2976,2 \cdot V_d \cdot M_w}{t_d \cdot \text{Πυκνότητα ισχύος}} \text{ (kg)} \quad (2.28)$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη της (2.28) με M_w , ο όρος S_w/M_w της σχέσης (2.18) γίνεται :

$$\frac{S_w}{M_w} = \frac{2976,2 \cdot V_d}{t_d \cdot \text{Πυκνότητα ισχύος}} \quad (2.29)$$

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

$$\text{Πυκνότητα ισχύος} = \frac{\text{Ισχύς εξόδου}}{S_w} = \frac{n \cdot V_d \cdot i_d \cdot A_c}{S_w} = \frac{V_d \cdot i_d \cdot A_t}{S_w} \quad (2.30)$$

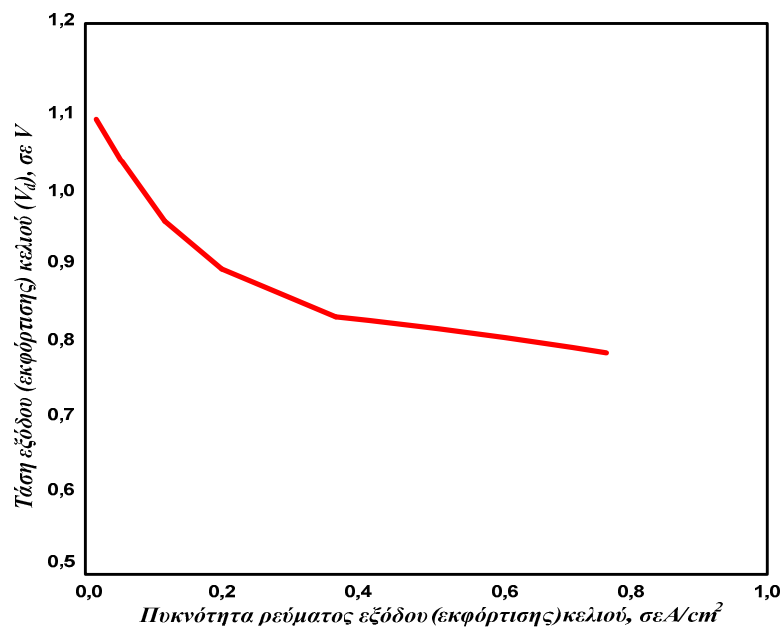
όπου,

i_d = πυκνότητα του ρεύματος εξόδου (A/cm²)

A_c = εμβαδόν κελιού (cm²)

A_t = Συνολικό εμβαδόν κελιών (cm²)

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 (σχήμα 2.23).



Σχήμα 2.23 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – πυκνότητας ρεύματος εξόδου κελιού

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

$$\frac{A_t}{S_w} = K_a \quad (2.31)$$

Από τις σχέσεις (2.31) και (2.30), προκύπτει για την πυκνότητα ισχύος η παρακάτω σχέση :

$$\text{Πυκνότητα ισχύος} = V_d \cdot i_d \cdot K_a \quad (2.32)$$

Οπότε, η σχέση (2.29) γίνεται :

$$\frac{S_w}{M_w} = \frac{2976,2 \cdot V_d}{k_a \cdot t_d \cdot i_d} \quad (2.33)$$

Βάρος δοχείου αποθήκευσης νερού

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

$$W_w = \frac{V_w \cdot P_{w,max}}{k_w} \quad (2.34)$$

όπου,

V_w = όγκος του αποθηκευμένου νερού, σε cm³

$P_{w,max}$ = μέγιστη πίεση λειτουργίας του αποθηκευμένου νερού, σε kg/cm²

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 :

$$V_w = k_v \frac{M_w}{\rho} \quad (2.35)$$

όπου,

$\rho = 0,001 \text{kg/cm}^3$ (πυκνότητα του νερού)

k_v = συντελεστής πληρότητας του δοχείου αποθήκευσης του νερού

Από τις (2.31) και (2.32) έχουμε :

$$W_w = \frac{k_v \frac{M_w}{\rho} P_{w,max}}{k_w} = \frac{k_v \cdot M_w \cdot P_{w,max}}{\rho \cdot k_w} \quad (2.36)$$

Οπότε, ο παράγοντας W_w/M_w της σχέσης (2.24) γίνεται :

$$\frac{W_w}{M_w} = \frac{k_v}{\rho \cdot k_w} P_{w,max} = c_w \cdot P_{w,max} \quad (2.37)$$

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 :

$$\frac{A_w}{M_w} = 0,675 \quad (2.38)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.25), (2.33), (2.37) και (2.38) στη (2.24), προκύπτει για την πυκνότητα ενέργειας της κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας :

$$\text{Πυκνότητα ισχύος} = \frac{2976,2 \cdot V_d}{I + k \cdot R \cdot T + \frac{2976,2}{k_a \cdot t_d \cdot i_d} + c_w \cdot P_{w,max} + 0,675} \quad (2.39)$$

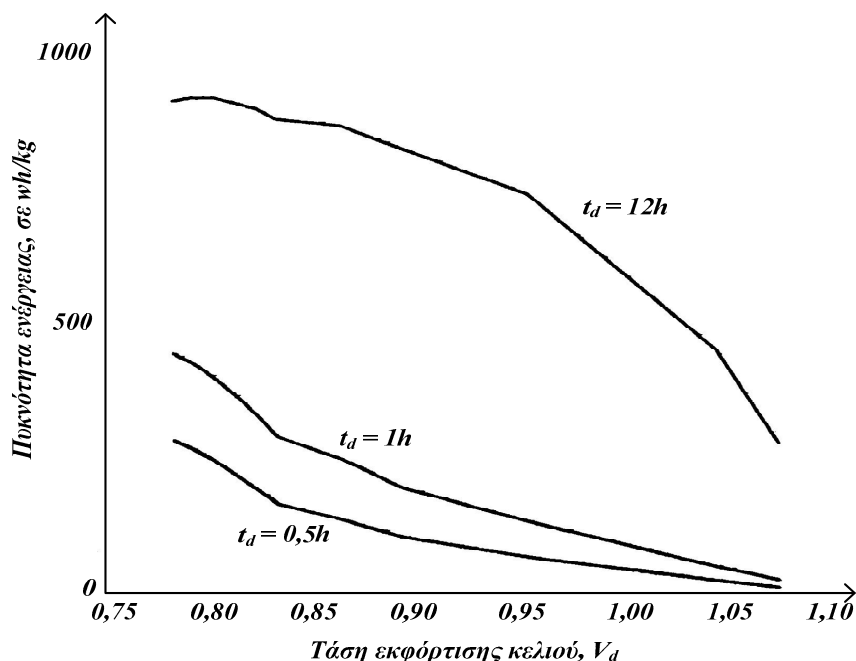
Από τη σχέση (2.39) προκύπτουν οι παρακάτω παρατηρήσεις :

- 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.

Βελτιστοποίηση της πυκνότητας της ενέργειας

Στο σχήμα 2.24 φαίνεται η επίδραση του χρόνου εκφόρτισης (παραγωγής ισχύος) στην πυκνότητα ενέργειας μιας κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.



Σχήμα 2.24 Επίδραση του χρόνου t_d στην πυκνότητα ενέργειας της κυψέλης καυσίμου

Από το σχήμα 2.24 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 παραπάνω χαρακτηριστικές πυκνότητας ενέργειας – τάσης εξόδου 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 $P_w = 28 \text{ kg}/\text{cm}^2$ και για V-I χαρακτηριστική όπως του σχήματος 2.23.

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 (παραγωγή 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,

$$n_c \cdot I_c \cdot t_c = n_d \cdot I_d \cdot t_d \quad (2.40)$$

όπου,

n_d = αριθμός των κελιών που χρησιμοποιούνται κατά την εκφόρτιση

n_c = αριθμός των κελιών που χρησιμοποιούνται κατά τη φόρτιση

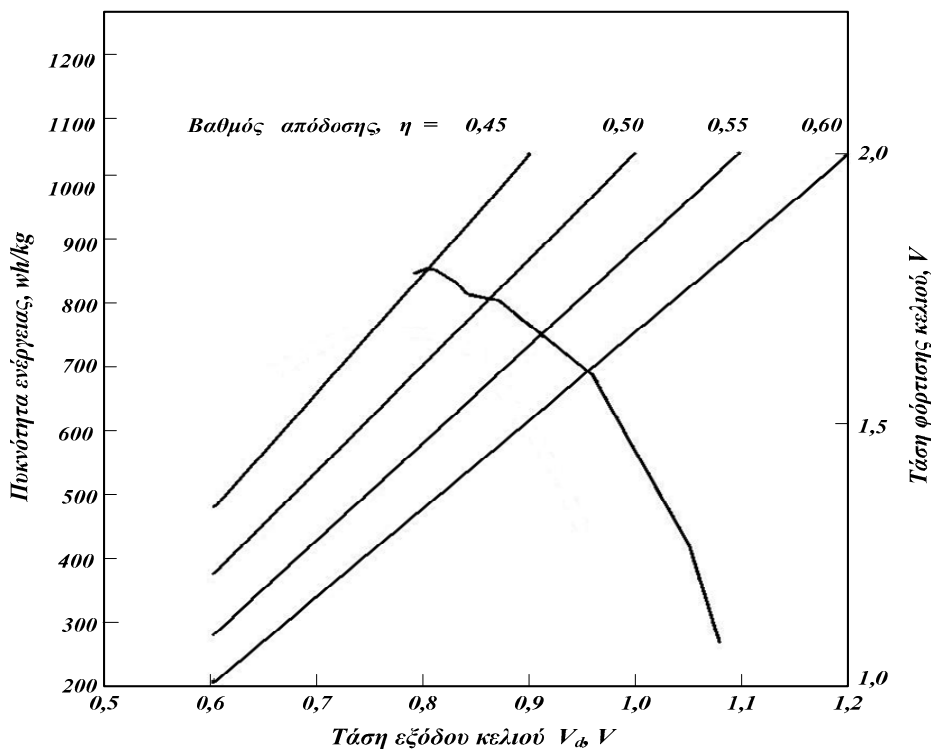
I_c = μέση τιμή του ρεύματος φόρτισης, σε A

t_c = χρόνος φόρτισης, σε ώρες

Ο βαθμός απόδοσης, με βάση τα παραπάνω είναι :

$$\eta = \frac{\text{Ενέργεια εξόδου}}{\text{Ενέργεια εισόδου}} = \frac{V_d \cdot n_d \cdot I_d \cdot t_d}{V_c \cdot n_c \cdot I_c \cdot t_c} = \frac{V_d}{V_c} \quad (2.41)$$

Στο σχήμα 2.25 φαίνεται πως σχετίζονται μεταξύ τους η πυκνότητα της ενέργειας, ο βαθμός απόδοσης, η τάση εξόδου (εκφόρτισης) και η τάση εισόδου (φόρτισης) σε κυψέλη καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.



Σχήμα 2.25 Επίδραση του βαθμού απόδοσης στην πυκνότητα της ενέργειας

2.5 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν την δυνατότητα να παράγουν ισχύ για όλες τις ανάγκες και εφαρμογές [15]. Μπορούν, λοιπόν, να χρησιμοποιηθούν από εφαρμογές πολύ μικρής ισχύος, όπως κινητά τηλέφωνα (μερικά mW), μέχρι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την

κάλυψη των αναγκών μιας μεγάλης πόλης (δεκάδες MW). Επίσης γίνονται σχεδιασμοί για τη χρήση κυψελών καυσίμου σε κατοικίες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας.

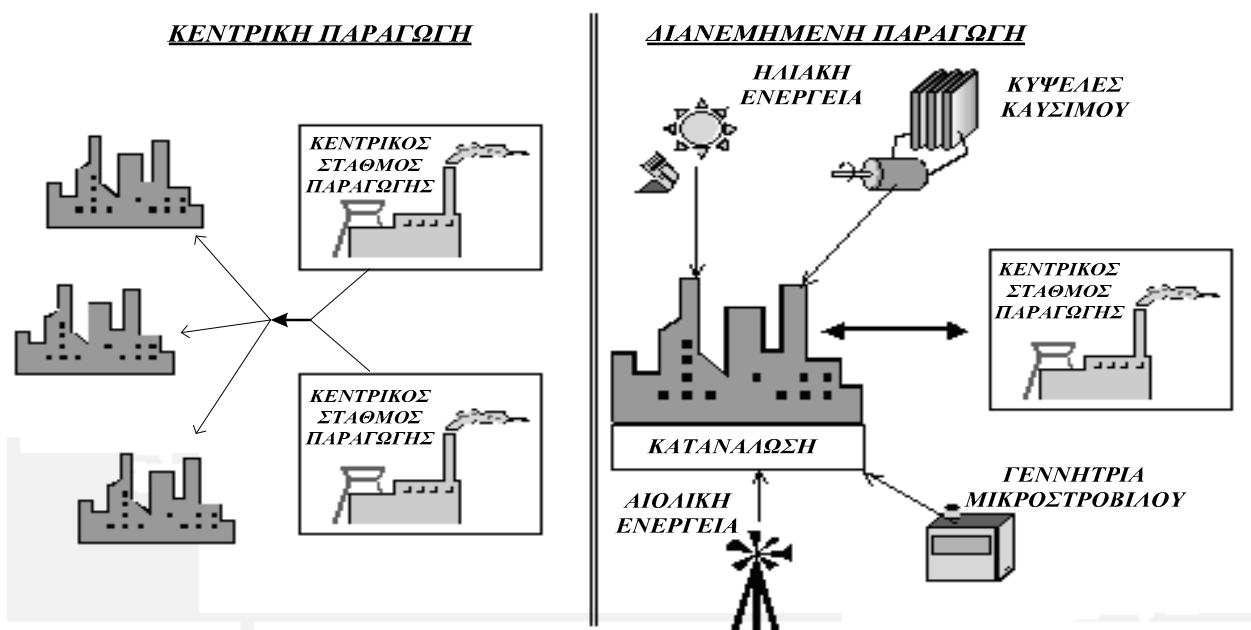
2.5.1 Σταθερές ή κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας

Οι κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν ενδεχομένως να παραγάγουν ηλεκτρική ενέργεια για κατοικίες, επιχειρήσεις, ιδρύματα, και βιομηχανίες μέσω κεντρικών (σταθερών) εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας. Η απαιτούμενη ισχύς κυμαίνεται από 1kW (μια μέση κατοικία χρησιμοποιεί περίπου 1-2 kW και την αιχμή, κατά τις ώρες υψηλής κατανάλωσης, περίπου 15 kW) ως μερικές δεκάδες MW (ιδρύματα, βιομηχανίες, κλπ.).

Οι κεντρικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου απαιτούν την ανάπτυξη χαμηλού κόστους, αξιόπιστου και αποδοτικού αντιστροφέα ισχύος, σύστημα ελέγχου και σύστημα διασύνδεσης με το δίκτυο. Ο αντιστροφέας χρησιμοποιείται για να μετατρέπει το παραγόμενο συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα από τη συστοιχία της κυψέλης σε εναλλασσόμενο, για είναι εφικτή η διασύνδεση με το δίκτυο. Επίσης, το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική λειτουργία των κυψελών καυσίμου και για να παράγεται υψηλής ποιότητας ηλεκτρική ισχύς.

2.5.2 Διανεμημένη παραγωγή

Η διανεμημένη παραγωγή (Distributed Generation - DG) ορίζεται ως μικρής κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που βρίσκεται κοντά στο φορτίο που εξυπηρετεί. Μερικές φορές αυτή αναφέρεται επίσης ως "επιτόπια ισχύς" ή "διανεμημένη ισχύς", που περιλαμβάνει όχι μόνο παραγωγή αλλά και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (σχήμα 2.26), [27].



Σχήμα 2.26 Συστήματα κεντρικής και διανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [27].

Ένας άλλος σχετικός όρος, με μερικές σημαντικές διαφορές είναι οι "διανεμημένοι ενεργειακοί πόροι" (Distributed Energy Resources -DER) και ορίζονται ως "μια ποικιλία μικρών συστημάτων παραγωγής ισχύος, που μπορούν να συνδυάζονται με τα συστήματα διαχείρισης και αποθήκευσης της ενέργειας και να χρησιμοποιούνται για να βελτιώνουν τη λειτουργία του συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και τα οποία είτε συνδέονται με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είτε όχι" [7].

Στην περίπτωση της κεντρικής παραγωγής, η ισχύς παράγεται σε μεγάλες εγκαταστάσεις (της τάξης των MW) και η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τις γραμμές (δίκτυα) μεταφοράς και διανομής στα κτίρια, όπου και καταναλώνεται. Στην περίπτωση της διανεμημένης παραγωγής, η παραγόμενη ισχύς παρέχεται απευθείας στο κτίριο, όπου καταναλώνεται, αλλά και τροφοδοτεί με την πλεονάζουσα ισχύ το δίκτυο, όπως ακριβώς παίρνει ισχύ από αυτό (σχήμα 2.26).

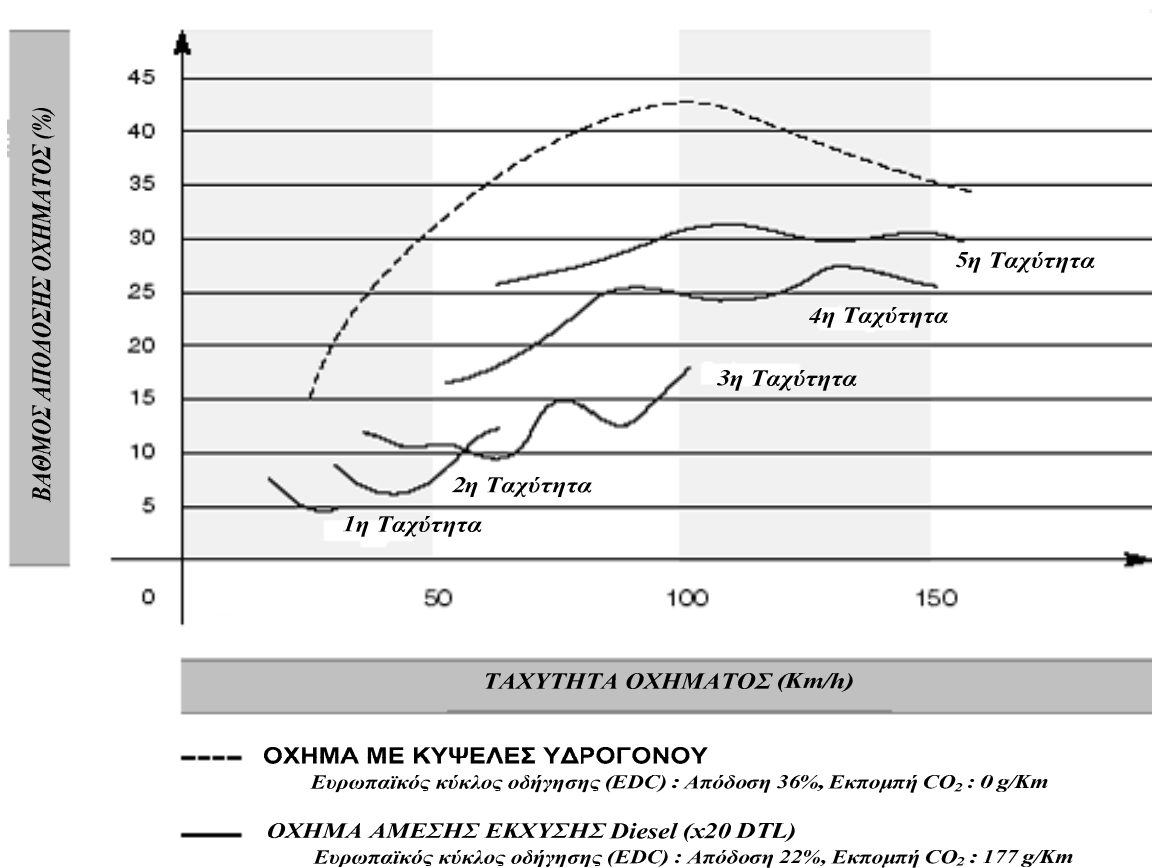
Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα της διανεμημένης παραγωγής είναι ότι εκτός από την υψηλού βαθμού απόδοση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η θερμότητα που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κοντινή περιοχή. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως συμπαραγωγή [27].

2.5.3 Εφαρμογές στα μέσα μεταφοράς

Μια βασική εμπορική εφαρμογή των κυψελών καυσίμου είναι η ενδεχόμενη αντικατάσταση από αυτές, των μηχανών εσωτερικής καύσης στα μέσα μεταφοράς. Σήμερα, όλες μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες οχημάτων αναπτύσσουν πρότυπα οχήματα κυψελών καυσίμων για να ερευνήσουν αυτήν την δυνατότητα. Για τις εφαρμογές των κυψελών καυσίμων στα οχήματα, μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους είναι η χρήση και η επεξεργασία των καυσίμων. Για παράδειγμα, η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), που θεωρείται ο κύριος υποψήφιος για τις εφαρμογές στα οχήματα, χρειάζεται αγνό και καθαρό υδρογόνο ως καύσιμο. Επομένως, πρέπει να τεθούν αυστηρές προδιαγραφές στην επεξεργασία των καυσίμων που θα χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτά, όπως η βενζίνη, το φυσικό αέριο και η μεθανόλη, για να αποβάλουν τις ενώσεις που θα μπορούσαν να "δηλητηριάσουν" τις κυψέλες. Είναι απαραίτητη, λοιπόν, η ανάπτυξη ενός συμπαγούς, αποδοτικού και οικονομικού συστήματος παραγωγής υδρογόνου υψηλής ποιότητας. Μια εναλλακτική μέθοδος, η οποία δεν απαιτεί επεξεργασία των υγρών καυσίμων πάνω στα οχήματα είναι η ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης και άμεσης χρήσης του υδρογόνου. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί εξελιγμένα συστήματα αποθήκευσης του υδρογόνου, ανθεκτικά στην σύγκρουση. Επίσης απαιτείται σημαντική ανάπτυξη στην υποδομή ανεφοδιασμού του υδρογόνου.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα ενός οχήματος με κυψέλες καυσίμου είναι ο εξαιρετικός βαθμός απόδοσής του. Ένα όχημα κυψελών υδρογόνου (π.χ. το Hydro Gen3 της Opel) επιτυγχάνει ένα ποσοστό απόδοσης αρκετά παραπάνω από 40% στην ταχύτητα των 100 km/h [28]. Επίσης, παρουσιάζει εμφανώς υψηλότερο βαθμό απόδοσης, σε οποιαδήποτε ταχύτητα, από ένα σύγχρονο πετρελαιοκίνητο όχημα. Στον ευρωπαϊκό έλεγχο οδήγησης πέτυχε βαθμό απόδοσης 36%, ενώ ένα πετρελαιοκίνητο όχημα άμεσης έγχυσης της ίδιας κατηγορίας, έφτασε

μόλις το 22%. Επιπλέον, το όχημα κυψελών υδρογόνου δεν εκπέμπει καθόλου διοξείδιο του άνθρακα, ενώ το όχημα με diesel εκπέμπει 177 gr CO₂ / Km (σχήμα 2.27), [29].



Σχήμα 2.27 Σύγκριση βαθμού απόδοσης μεταξύ οχήματος με κυψέλες καυσίμου και ενός με μηχανή Diesel [29].

Όλες οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν οργανώσει ομάδες, οι οποίες εργάζονται πάνω σε θέματα βελτίωσης της απόδοσης και της ασφάλειας των αυτοκινήτων με κυψέλες υδρογόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

DC-DC ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μεταξύ της κυψέλης καυσίμου και του αντιστροφέα τοποθετείται ένας dc-dc μετατροπέας. Ο μετατροπέας αυτός εκτελεί δυο λειτουργίες: η μια είναι η dc απομόνωση του αντιστροφέα, επειδή στην έξοδό του τοποθετείται συνήθως ένας αρκετά ογκώδης μετασχηματιστής και η δεύτερη είναι να παρέχει ικανοποιητική τιμή τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα, προκειμένου αυτός να μπορεί να δίνει την απαιτούμενη τιμή εναλλασσόμενης τάσης στην έξοδό του.

Για παράδειγμα, αν μια κυψέλη καυσίμου δίνει 220 V συνεχή τάση, τότε, χωρίς μετατροπέα ανύψωσης, το σύστημα δεν μπορεί να παρέχει εναλλασσόμενη πολική τάση στα 380 V. Επίσης, αν η κυψέλη είναι αναστρέψιμης λειτουργίας, τότε, χωρίς μετατροπέα υποβιβασμού, δεν θα μπορεί να γίνεται υποβιβασμός της συνεχούς τάσης, προκειμένου να λειτουργεί η συσκευή ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου. Επομένως καθίσταται απαραίτητη η τοποθέτηση ενός μετατροπέα τάσης στα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση της κατάστασης προόδου των τοπολογιών μετατροπέων ισχύος, οι οποίες χρησιμοποιούνται σήμερα στα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

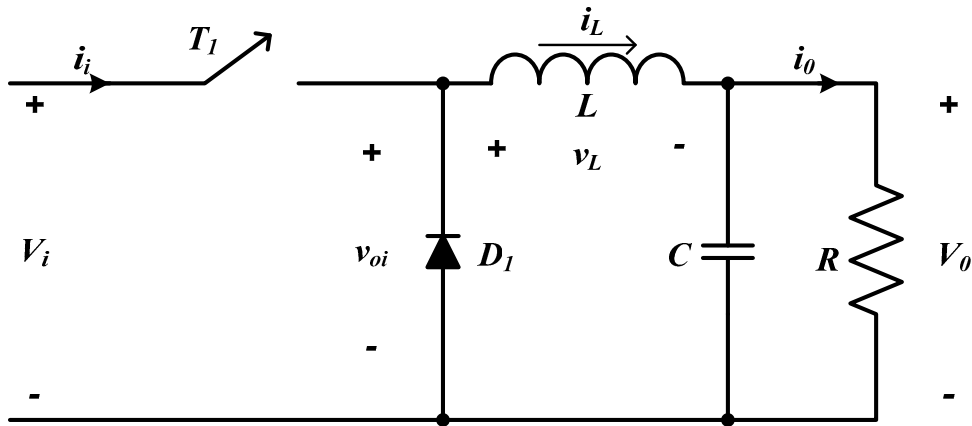
3.2 DC –DC μετατροπείς ισχύος χωρίς ωμική ή γαλβανική απομόνωση [30]-[35]

3.2.1 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (Step-Down ή Buck Converter)

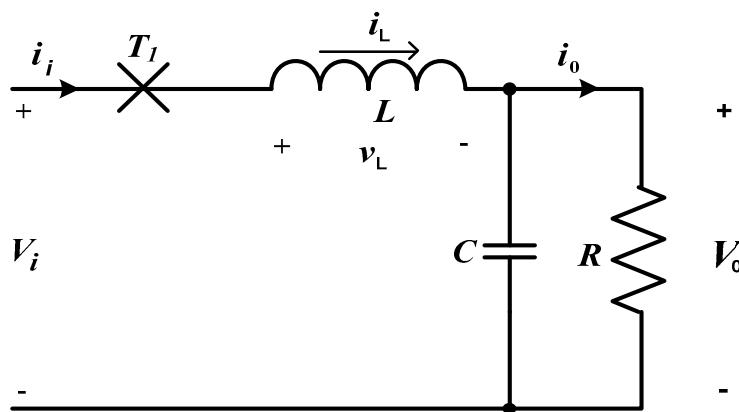
Ο μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (σχήμα 3.1α) παράγει στην έξοδό του τάση με μέση τιμή μικρότερη από την συνεχή τάση που εφαρμόζεται στην είσοδό του. Ο μετατροπέας αυτός λειτουργεί ανοιγοκλείνοντας περιοδικά το διακόπτη T_1 . Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός (άγει), η διάδος D_1 πολώνεται ανάστροφα και το ρεύμα ρέει από την πηγή εισόδου προς το φορτίο, φορτίζοντας ταυτόχρονα το πηνίο (σχήμα 3.1β). Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός (κατάσταση αποκοπής), η διάδος D_1 πολώνεται ορθά και η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο μεταφέρεται προς το φορτίο (σχήμα 3.1γ). Κατά τη διάρκεια ενός διακοπτικού κύκλου, μπορεί το ρεύμα στο πηνίο να ρέει συνεχώς, δηλαδή να μη μηδενίζεται σε κανένα διάστημα του διακοπτικού κύκλου, οπότε ο μετατροπέας λειτουργεί στην κατάσταση συνεχούς ρεύματος πηνίου ή να μηδενίζεται για ένα διάστημα του διακοπτικού κύκλου, οπότε ο μετατροπέας λειτουργεί στην κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου. Κατά τη λειτουργία των dc-dc μετατροπέων ισχύος ισχύουν οι

παρακάτω βασικές αρχές :

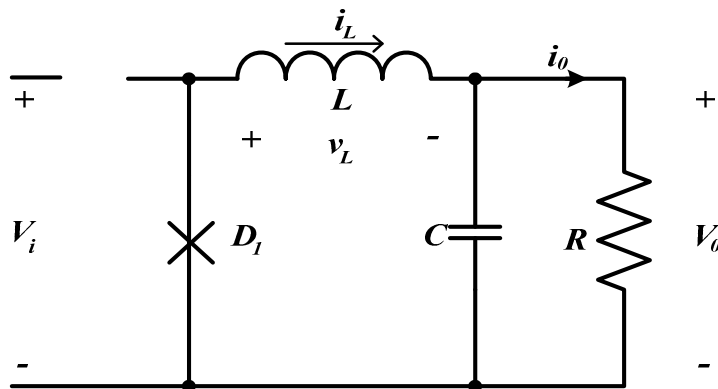
- Η μέση τιμή του ρεύματος του πυκνωτή του φίλτρου εξόδου είναι μηδέν.
- Η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του πηνίου του φίλτρου εξόδου είναι μηδέν.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 3.1 (α) Τοπολογία μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.
 (β) Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι σε αγωγή.
 (γ) Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι σε αποκοπή.

Λειτουργία με συνεχές ρεύμα πηνίου.

Κατά τη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχές ρεύμα πηνίου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο, άρα και φορτίο, δεν μηδενίζεται σε κανένα σημείο του διακοπτικού κύκλου. Στο σχήμα 3.2 φαίνονται οι χαρακτηριστικές του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης, για λειτουργία με συνεχές ρεύμα πηνίου.

Όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι σε αγωγή (σχήμα 3.1β), η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη και η τάση στα άκρα του πηνίου είναι :

$$v_L = V_i - V_0 \quad (3.1)$$

Το ρεύμα του πηνίου (i_L) σε αυτό το διάστημα αυξάνεται γραμμικά (σχήμα 3.2).

Όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι σε αποκοπή (σχήμα 3.1γ), η διόδος πολώνεται ορθά από το πηνίο. Το ρεύμα του πηνίου (το οποίο σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz τείνει να διατηρήσει την ίδια φορά με αυτή που είχε όταν διακόπηκε) ρέει μέσω της διόδου και μειώνεται γραμμικά, μεταφέροντας στο φορτίο ένα μέρος από την αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο. Η τάση στα άκρα του πηνίου είναι :

$$v_L = -V_0 \quad (3.2)$$

Το ολοκλήρωμα όμως της v_L σε μια διακοπτική περίοδο (T_s), στη μόνιμη κατάσταση είναι μηδέν :

$$\int_0^{T_s} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} v_L dt = 0 \quad (3.3)$$

Με αντικατάσταση των (3.1) και (3.2) στη (3.3) προκύπτει :

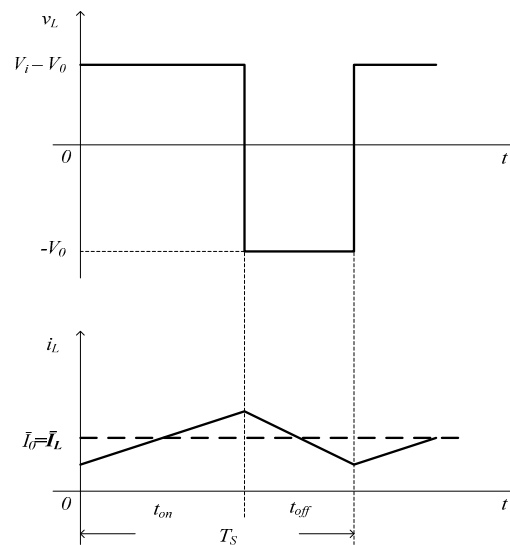
$$(V_i - V_0)t_{on} = V_0(T_s - t_{on})$$

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{t_{on}}{T_s} = D \quad (3.4)$$

Όπου,

$$\frac{t_{on}}{T_s} = D$$

είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης (duty cycle) και ορίζεται ως ο λόγος του χρονικού διαστήματος αγωγής του διακόπτη προς τη συνολική διακοπτική περίοδο.



Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστικές τάσης (v_L) και ρεύματος (i_L) του πηνίου για λειτουργία του μετατροπέα με συνεχές ρεύμα πηνίου.

Υποθέτοντας ότι όλα τα στοιχεία του κυκλώματος του μετατροπέα είναι ιδανικά, ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα είναι 100%, επομένως η ισχύς εξόδου του είναι ίση με την ισχύ εισόδου του :

$$P_i = P_o, \quad \text{άρα} \quad V_i \cdot \bar{I}_i = V_o \cdot \bar{I}_o \quad \text{και} \quad \frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_i} = \frac{I}{D} \quad (3.5)$$

όπου,

\bar{I}_o, \bar{I}_i είναι η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου και εισόδου, αντίστοιχα.

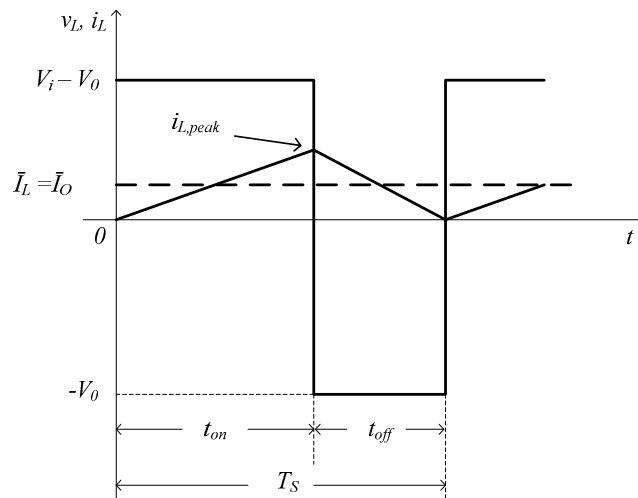
Λειτουργία με διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου.

Από το σχήμα 3.2 προκύπτει ότι αν το ρεύμα εξόδου γίνει μικρότερο από κάποια τιμή (I_{OB}), τότε ο μετατροπέας λειτουργεί με διακοπτόμενο ρεύμα, δηλαδή το ρεύμα του πηνίου μηδενίζεται για κάποιο χρονικό διάστημα στο τέλος μιας διακοπτικής περιόδου ή στην αρχή της επόμενης. Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας βρίσκεται στο όριο λειτουργίας συνεχούς-διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου, δηλαδή ότι το ρεύμα στο πηνίο μηδενίζεται σε μια δεδομένη στιγμή στο τέλος μιας διακοπτικής περιόδου ή στην αρχή της επόμενης (σχήμα 3.3), τότε από την κυματομορφή του ρεύματος προκύπτει ότι η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου σε αυτό το όριο, \bar{I}_{LB} , είναι :

$$\bar{I}_{LB} = \frac{I}{2} i_{L,peak} = \frac{t_{on}}{2L} (V_i - V_o) = \frac{DT_s}{2L} (V_i - V_o) = \bar{I}_{OB} \quad (3.6)$$

Όπου,

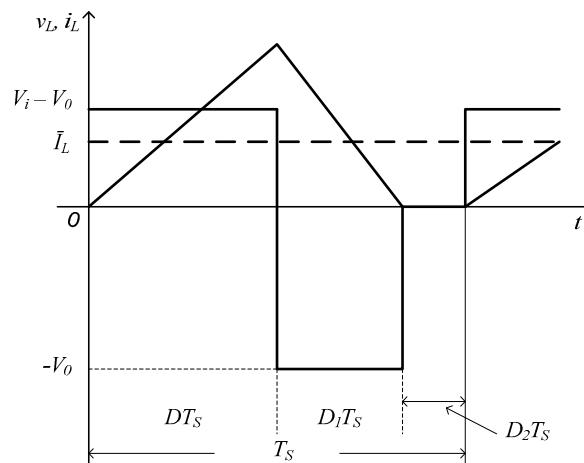
\bar{I}_{OB} είναι η οριακή μέση τιμή του ρεύματος εξόδου.



Σχήμα 3.3 Κυματομορφές της τάσης (v_L) και του ρεύματος (i_L) του πηνίου, στο όριο συνεχούς – διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου.

Από τη στιγμή κατά την οποία η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου \bar{I}_O , άρα και η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου, γίνει μικρότερη από την τιμή \bar{I}_{LB} (εξίσωση 3.6), τότε το ρεύμα στο πηνίο γίνεται διακοπτόμενο.

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος του πηνίου, στη λειτουργία του μετατροπέα με διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου.



Σχήμα 3.4 Κυματομορφές της τάσης (v_L) και του ρεύματος (i_L) του πηνίου, κατά τη λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου.

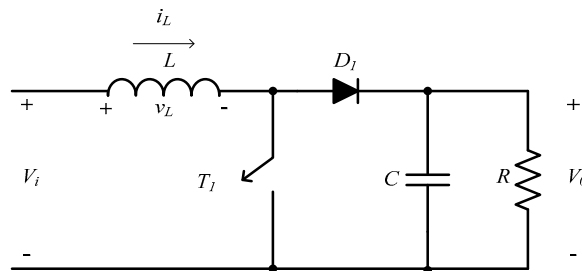
Η σχέση (3.4), που αφορά στη λειτουργία του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης στη λειτουργία συνεχούς ρεύματος πηνίου, γίνεται στην περίπτωση της λειτουργίας με διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{D}{D + D_1} \quad (3.7)$$

Όπου, D_1 όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4 και $D + D_1 < 1$.

3.2.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης (Step Up ή Boost converter)

Ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης δίνει στην έξοδό του τάση μεγαλύτερη ή ίση από την τάση εισόδου του. Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η τοπολογία αυτού του μετατροπέα. Όταν ο διακόπτης (T_1) είναι κλειστός (κατάσταση αγωγής), η πηγή εισόδου φορτίζει το πηνίο L . Για όσο χρονικό διάστημα ο διακόπτης (T_1) είναι ανοιχτός (κατάσταση αποκοπής), η ενέργεια που αποθηκεύτηκε στο πηνίο, μαζί με την ενέργεια της πηγής εισόδου μεταφέρεται προς το φορτίο μέσω της διόδου D_1 , κι έτσι το ρεύμα ρέει μέσω του πηνίου προς το φορτίο. Ο πυκνωτής στην έξοδο είναι πολύ μεγάλης τιμής, ώστε η τάση στα άκρα του να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή.

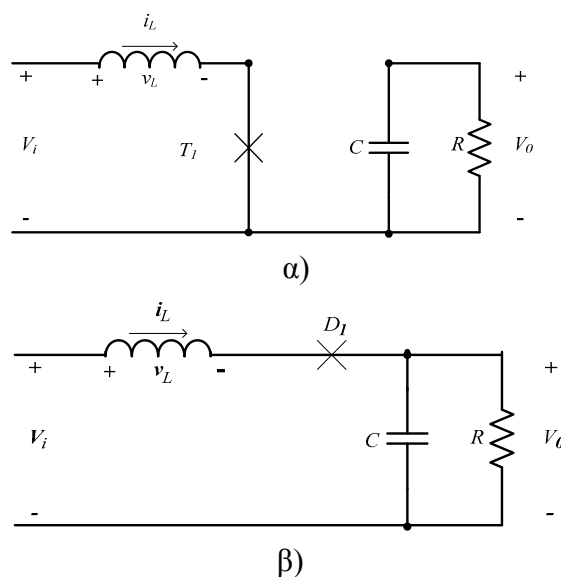


Σχήμα 3.5 Τοπολογία μετατροπέα ανύψωσης της τάσης.

Όπως και ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης, έτσι και ο μετατροπέας ανύψωσης μπορεί να λειτουργεί στην κατάσταση συνεχούς ρεύματος πηνίου ή στην κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου.

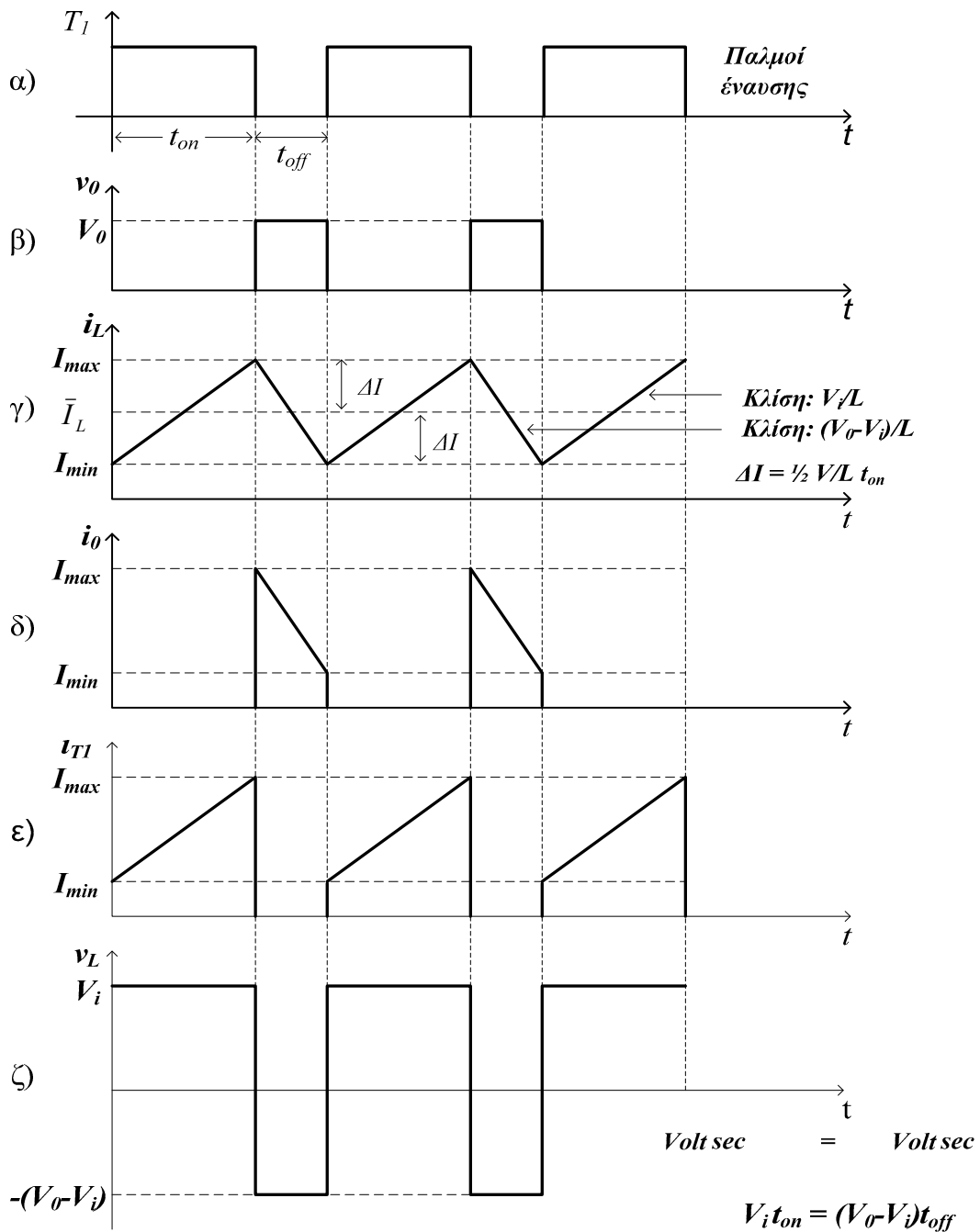
Λειτουργία με συνεχές ρεύμα πηνίου

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα του μετατροπέα κατά τη λειτουργία συνεχούς ρεύματος πηνίου.



Σχήμα 3.6 Ισοδύναμα κυκλώματα του μετατροπέα ανύψωσης :
 α) όταν ο διακόπτης T_1 είναι σε αγωγή και
 β) όταν διακόπτης T_1 είναι σε αποκοπή.

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του μετατροπέα ανύψωσης σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος πηνίου



Σχήμα 3.7 Κυματομορφές του μετατροπέα ανύψωσης σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος πηνίου.
 α) Παλμοί έναυσης του διακόπτη, β) Τάση εξόδου, γ) Ρεύμα εισόδου, δ) Ρεύμα εξόδου, ε) Ρεύμα διακόπτη ζ) Τάση πηνίου.

Για το χρονικό διάστημα (t_{on}), κατά το οποίο ο διακόπτης είναι σε αγωγή, η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη και η είσοδος παρέχει ενέργεια στο πηνίο, το ρεύμα του οποίου αυξάνεται γραμμικά (σχήμα 3.7). Η τάση στα άκρα του πηνίου είναι ίση με την τάση εισόδου :

$$v_L = V_i \tag{3.8}$$

Όταν ο διακόπτης σταματήσει να άγει, το ρεύμα του πηνίου τείνει να διατηρήσει τη φορά που είχε από την προηγούμενη κατάσταση και ρέει μέσω της διόδου προς το φορτίο. Η ενέργεια που ήταν αποθηκευμένη στο πηνίο καθώς και αυτή της πηγής εισόδου μεταφέρεται στο φορτίο. Το ρεύμα του πηνίου μειώνεται γραμμικά (σχήμα 3.7) ενώ η τάση του είναι :

$$v_L = V_i - V_0 \quad (3.9)$$

Στη μόνιμη κατάσταση, το ολοκλήρωμα της τάσης στα άκρα του πηνίου κατά τη διάρκεια μιας διακοπτικής περιόδου είναι μηδέν :

$$\int_0^{T_s} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_{t_{on}}^{T_s} v_L dt = 0 \quad (3.10)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.8) και (3.9) στην (3.10) προκύπτει :

$$V_i \cdot t_{on} + (V_i - V_0) \cdot (T_s - t_{on}) = 0 \quad (3.11)$$

Από την (3.11) προκύπτει τελικά η σχέση μετατροπής :

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{I}{I - D} \quad (3.12)$$

όπου,

$D = \frac{t_{on}}{T_s}$ είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης του ημιαγωγικού διακόπτη.

Θεωρώντας ότι τα στοιχεία του κυκλώματος είναι ιδανικά, η ισχύς εισόδου είναι ίση με την ισχύ εξόδου :

$$P_0 = P_i \Leftrightarrow V_0 \cdot \bar{I}_0 = V_i \cdot \bar{I}_i \quad \text{ή} \quad \frac{\bar{I}_0}{\bar{I}_i} = \frac{V_i}{V_0} = I - D \quad (3.13)$$

Από τις κυματομορφές του σχήματος 3.7 προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις για την κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου (ή του ρεύματος εισόδου) :

$$\text{Πλάτος κυμάτωσης} = \Delta I = \frac{I}{2} \frac{V}{L} t_{on} \quad (3.14)$$

$$\Delta I = \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \quad (3.15)$$

$$I_{max} - I_{min} = \frac{V \cdot t_{on}}{L} \quad (3.16)$$

$$\bar{I}_0 = \text{μέση τιμή ρεύματος εξόδου} = \bar{I}_L (I - D) \quad (3.17)$$

$$I_{max} = \bar{I}_L + \Delta I \quad (3.18)$$

$$I_{min} = \bar{I}_L - \Delta I \quad (3.19)$$

Παρατήρηση: Αν $\Delta I > \bar{I}_L$, τότε το ρεύμα του πηνίου γίνεται διακοπόμενο.

Λειτουργία με διακοπόμενο ρεύμα πηνίου

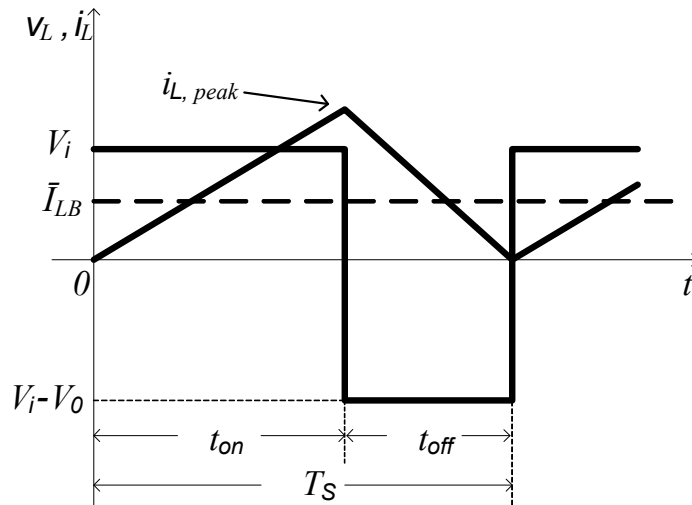
Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας βρίσκεται στο όριο λειτουργίας συνεχούς-διακοπόμενου

ρεύματος πηνίου, δηλαδή ότι το ρεύμα στο πηνίο μηδενίζεται σε μια δεδομένη στιγμή στο τέλος μιας διακοπτικής περιόδου ή στην αρχή της επόμενης (σχήμα 3.8), τότε από την κυματομορφή του ρεύματος προκύπτει ότι η μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου (\bar{I}_{LB}) σε αυτό το όριο είναι :

$$\bar{I}_{LB} = \frac{1}{2} i_{L,peak} = \frac{1}{2} \frac{V_i}{L} t_{on} \quad (3.20)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (2.12) στη (2.20) προκύπτει :

$$\bar{I}_{LB} = \frac{T_s V_0}{2L} D(1-D) \quad (3.21)$$



Σχήμα 3.8 Κυματομορφές της τάσης (v_L) και του ρεύματος (i_L) του πηνίου, στο όριο συνεχούς – διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου.

Από τα σχήματα 3.5 και 3.6 είναι εμφανές, ότι το ρεύμα στο πηνίο είναι ίσο με το ρεύμα εισόδου ($i_i = i_L$). Σ' αυτή την οριακή κατάσταση, η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου (\bar{I}_{OB}), με βάση τη σχέση (3.13) είναι :

$$\bar{I}_{OB} = \frac{T_s V_0}{2L} D(1-D)^2 \quad (3.22)$$

Οι εξισώσεις (3.21) και (3.22) μεγιστοποιούνται όταν $D = 0,5$ και $D = 1/3$ αντίστοιχα, με την προϋπόθεση ότι τα υπόλοιπα μεγέθη είναι σταθερά. Οι μέγιστες τιμές τους είναι :

$$\bar{I}_{LB,max} = \frac{T_s V_0}{8L} \quad (3.23)$$

$$\bar{I}_{OB,max} = \frac{2}{27} \frac{T_s V_0}{L} \quad (3.24)$$

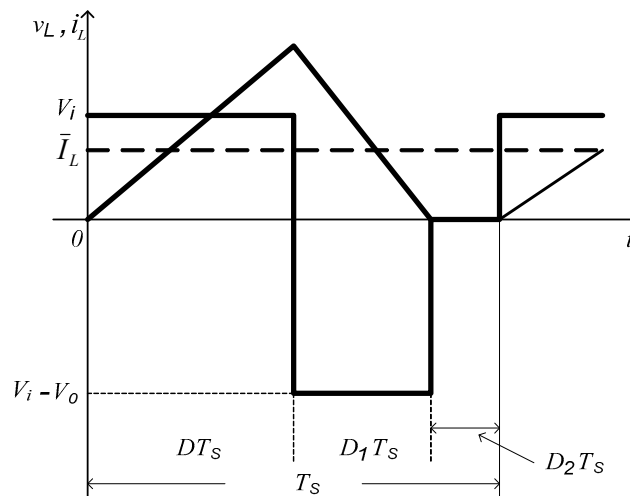
Επομένως, οι εξισώσεις (3.21) και (3.22) γίνονται :

$$\bar{I}_{LB} = 4D(1-D)\bar{I}_{LB,max} \quad (3.25)$$

$$\bar{I}_{OB} = \frac{27}{4} D(1-D)^2 \bar{I}_{OB,max} \quad (3.26)$$

Αν το ρεύμα του φορτίου I_O πάρει τιμή κάτω από \bar{I}_{OB} , τότε ο μετατροπέας λειτουργεί στην κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου.

Οι βασικές κυματομορφές του μετατροπέα ανύψωσης, στην κατάσταση διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Κυματομορφές της τάσης (v_L) και του ρεύματος (i_L) του πηνίου, κατά τη λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης με διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου κατά τη διάρκεια μιας διακοπτικής περιόδου ισούται με μηδέν :

$$V_i D T_s + (V_i - V_o) D_1 T_s = 0$$

ή

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D_1 + D}{D_1} \tag{3.27}$$

Τέλος, υποθέτοντας ότι η ισχύς εισόδου του μετατροπέα είναι ίση με την ισχύ εξόδου του, προκύπτει ότι :

$$\frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_i} = \frac{V_i}{V_o} = \frac{D_1}{D_1 + D} \tag{3.28}$$

Όπως έχει αναφερθεί, το ρεύμα του πηνίου είναι ίσο με το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα, επομένως το ίδιο ισχύει και για τις μέσες τιμές τους. Από το σχήμα 2.8 προκύπτει ότι :

$$\bar{I}_i = \bar{I}_L = \frac{V_d}{2L} D T_s (D + D_1) \tag{3.29}$$

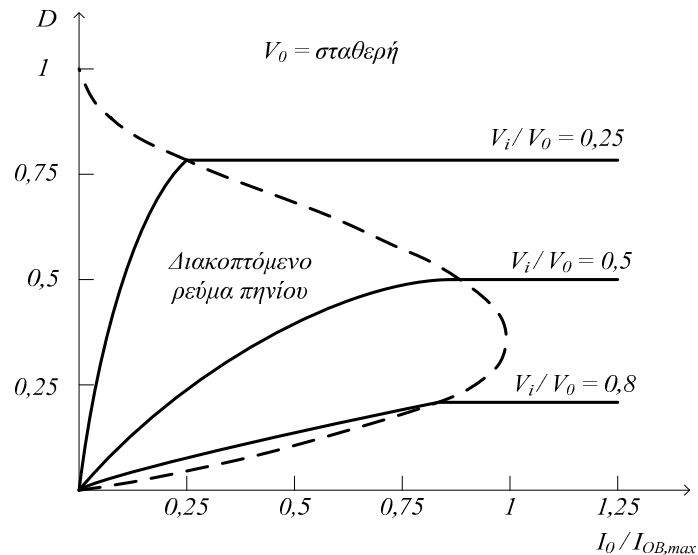
Από τις εξισώσεις (2.28) και (2.29) προκύπτει ότι :

$$\bar{I}_o = \frac{T_s V_i}{2L} D D_1 \tag{3.30}$$

Στις περισσότερες εφαρμογές του μετατροπέα ανύψωσης, η τάση εξόδου V_o διατηρείται σταθερή, μεταβάλλοντας το βαθμό χρησιμοποίησης D , για την αντιστάθμιση των μεταβολών της τάσης εισόδου V_i . Από τις εξισώσεις (3.24), (3.27) και (3.30) υπολογίζεται ο βαθμός χρησιμοποίησης D ως συνάρτηση του λόγου $\bar{I}_o/\bar{I}_{OB,max}$:

$$D = \left[\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_i} \left(\frac{V_o}{V_i} - 1 \right) \frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_{OB,max}} \right]^{1/2} \tag{3.31}$$

Στο σχήμα 3.10 έχουν σχεδιαστεί οι γραφικές παραστάσεις του βαθμού χρησιμοποίησης D του ημιαγωγικού διακόπτη ως συνάρτηση του λόγου $I_O / I_{OB,max}$ για διάφορες τιμές του λόγου V_i/V_O στις καταστάσεις λειτουργίας συνεχούς και διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου. Το όριο μεταξύ των δυο καταστάσεων λειτουργίας ορίζεται από τη διακεκομμένη γραμμή.

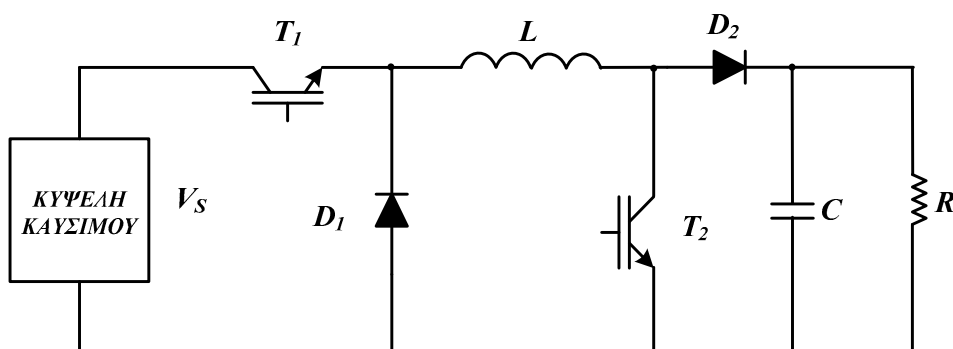


Σχήμα 3.10 Χαρακτηριστικές καμπύλες του μετατροπέα ανύψωσης, υπό την προϋπόθεση ότι η V_O είναι σταθερή, για συνεχή και διακοπτόμενη αγωγή.

Ο μετατροπέας ανύψωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, όπου δεν υπάρχει καμία ανάγκη για ωμική απομόνωση ή όταν ο ωμικός μετασχηματιστής απομόνωσης είναι μέρος του αντιστροφέα. Επιπλέον, όταν ο μετατροπέας ανύψωσης αποτελείται από διάφορες ενδιάμεσες μονάδες, μπορεί να διαχειριστεί ισχύ υψηλής τιμής.

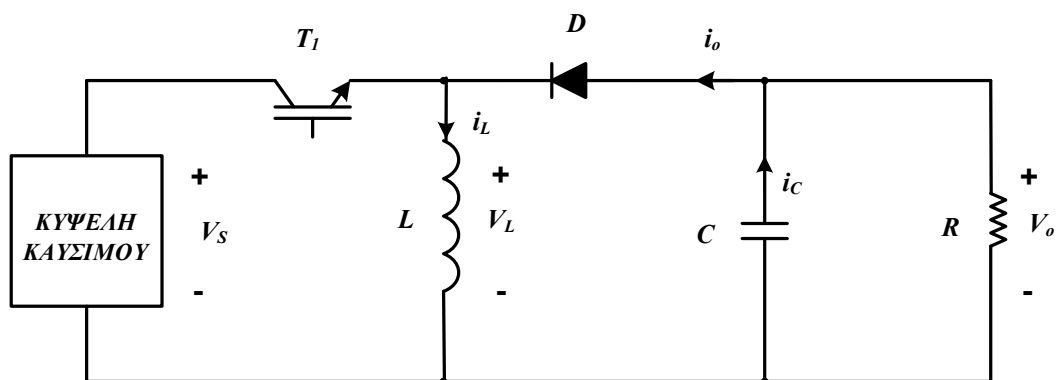
3.2.3 Μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης (Buck – Boost Converter)

Ο μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης δημιουργείται με εν σειρά ζεύξη ενός μετατροπέα υποβιβασμού και ενός ανύψωσης (σχήμα 3.11). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο υποβιβασμός ή η ανύψωση της τάσης της κυψέλης καυσίμου (ή άλλης DC πηγής) με ένα κύκλωμα.

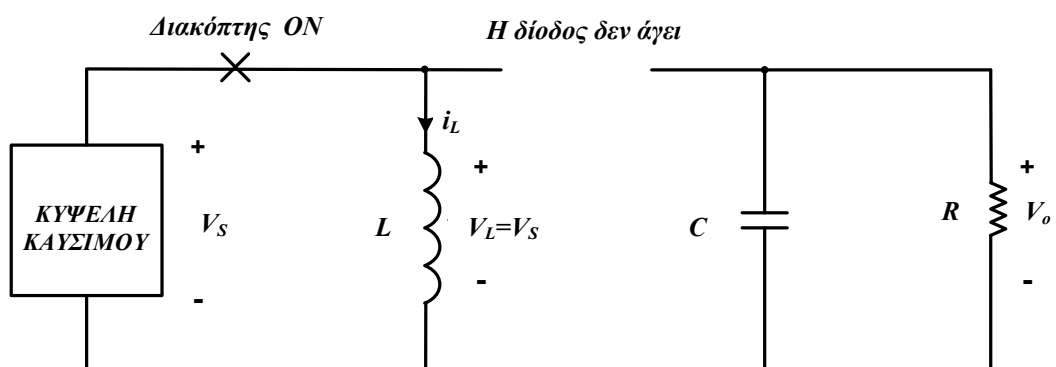


Σχήμα 3.11 Κύκλωμα DC – DC μετατροπέα υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης (Buck – Boost)

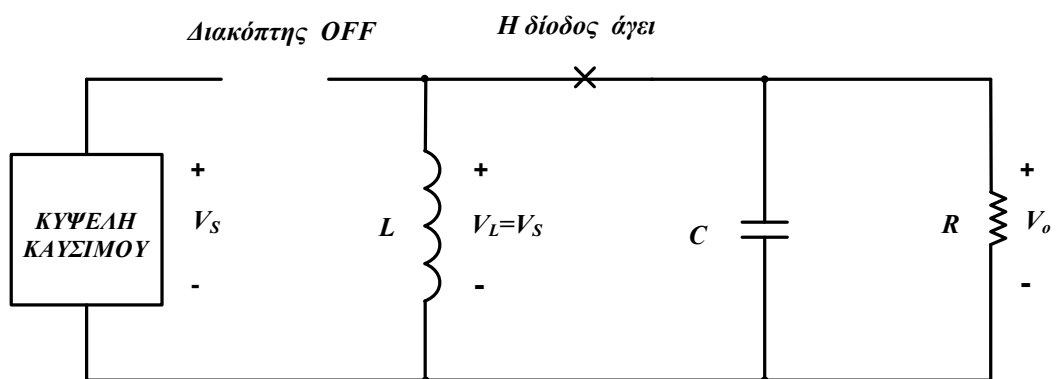
Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται ένα παρόμοιο κύκλωμα με ένα διακοπτικό στοιχείο.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 3.12 α) Κύκλωμα DC – DC μετατροπέα υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης (Buck – Boost)
 β) Ισοδύναμο κύκλωμα με κλειστό ημιαγωγικό διακόπτη
 γ) Ισοδύναμο κύκλωμα με ανοιχτό ημιαγωγικό διακόπτη

Η ενέργεια που αποθηκεύεται στην αυτεπαγωγή, όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι κλειστός (άγει) είναι :

$$W_1 = V_s \cdot \bar{I}_s \cdot t_{ON} \quad (3.32)$$

Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την αυτεπαγωγή, όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι ανοιχτός (δεν άγει) είναι :

$$W_0 = \bar{V}_0 \cdot \bar{I}_s \cdot t_{OFF} \quad (3.33)$$

Όπου :

V_s είναι η τάση εισόδου

\bar{V}_0 είναι η μέση τιμή της τάσης εξόδου

\bar{I}_s είναι η μέση τιμή του ρεύματος εισόδου

t_{OFF} είναι ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης δεν άγει

t_{ON} είναι ο χρόνος κατά τον οποίο ο διακόπτης άγει

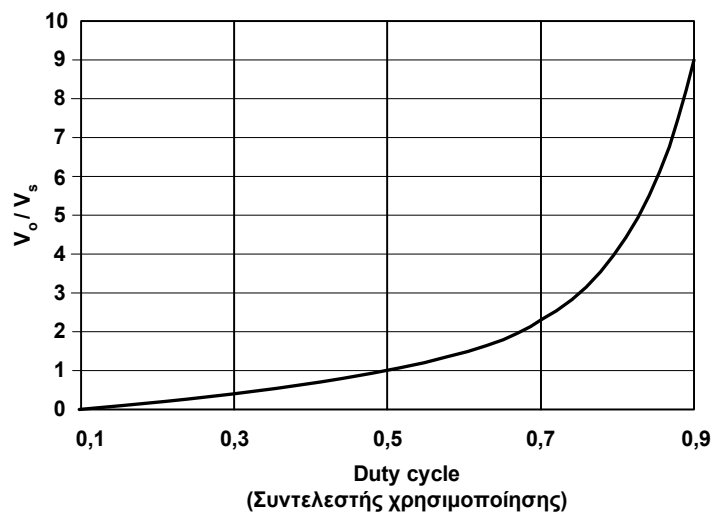
Σε μετατροπέα ο οποίος δεν παρουσιάζει απώλειες, οι δύο παραπάνω ενέργειες είναι ίσες. Άρα:

$$V_s \cdot \bar{I}_s \cdot t_{ON} = -\bar{V}_0 \cdot \bar{I}_s \cdot t_{OFF}$$

$$\bar{V}_0 = -V_s \cdot \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} = -V_s \cdot \frac{t_{ON}}{T - t_{ON}} = -V_s \frac{D}{1 - D}$$

$$\bar{V}_0 = -V_s \frac{D}{1 - D} \quad (3.34)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (3.34), η τάση εξόδου καθορίζεται από τη διακοπτική συχνότητα του ημιαγωγικού διακόπτη. Ανάλογα με την τιμή του συντελεστή χρησιμοποίησης D επιτυγχάνεται αύξηση ή μείωση της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου (σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13 Μεταβολή της τάσης εξόδου ως προς την τάση εισόδου του μετατροπέα υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης συναρτήσει της διακοπτικής συχνότητας του ημιαγωγικού διακόπτη

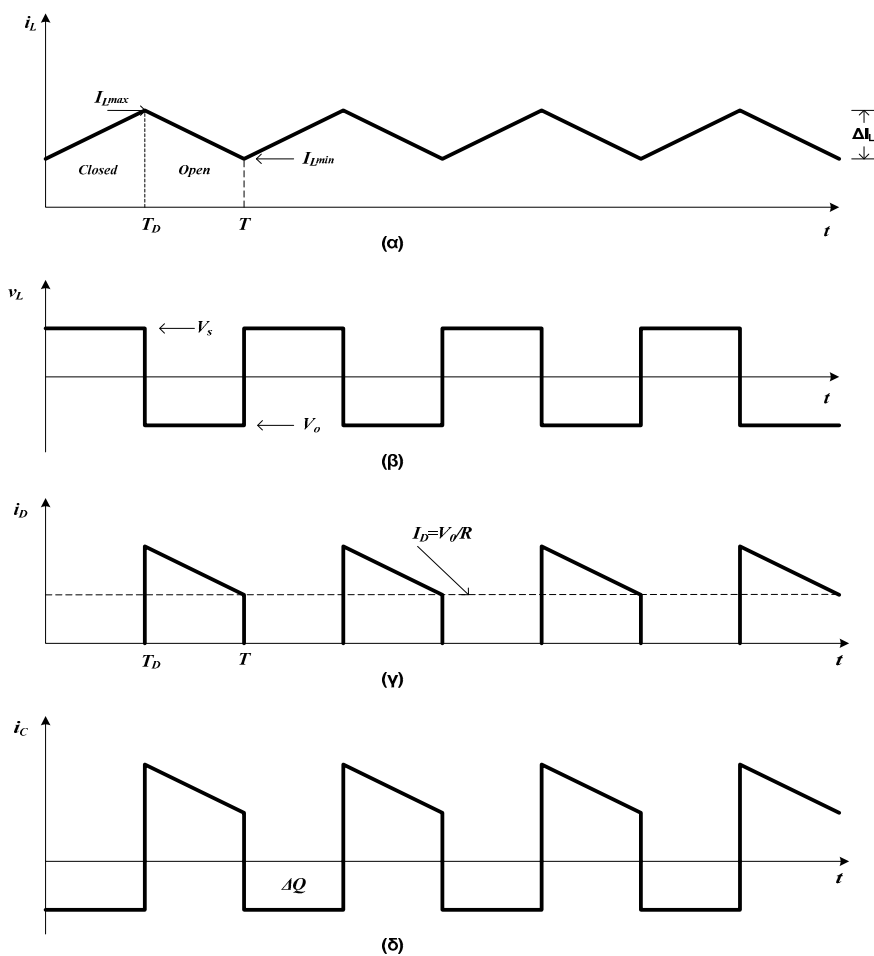
Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι όταν $D < 0,5$ η τάση εξόδου είναι μικρότερη από την τάση εισόδου, ενώ όταν $D > 0,5$ η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Επομένως το συγκεκριμένο κύκλωμα συνδυάζει ένα μετατροπέα ανύψωσης και ένα μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

Ένα μειονέκτημα αυτού του μετατροπέα είναι η αντιστροφή της πολικότητας της τάσης εξόδου ως προς την πολικότητα της τάσης εισόδου. Αντίθετα, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει με το μετατροπέα του σχήματος 3.11, στον οποίο όμως υπάρχουν δύο δίοδοι και δύο ημιαγωγικοί διακόπτες (IGBTs) κι επομένως μεγαλύτερες απώλειες και πιο πολύπλοκο κύκλωμα ελέγχου. Για τον μετατροπέα αυτόν ισχύει :

$$\bar{V}_0 = V_s \cdot \frac{D}{1 - D} \tag{3.35}$$

Η επιλογή του κυκλώματος που θα χρησιμοποιηθεί γίνεται από το σχεδιαστή, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Στο σχήμα 3.14 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές κυματομορφές του μετατροπέα του σχήματος 3.11.



Σχήμα 3.14 Χαρακτηριστικές μετατροπέα υποβιβασμού – ανύψωσης τάσης

- (α) Ρεύμα πηνίου
- (β) Τάση πηνίου
- (γ) Ρεύμα διόδου
- (δ) Ρεύμα πυκνωτή

Η ισχύς που παρέχεται από την πηγή (P_S) καταναλώνεται στο φορτίο (P_o), δηλαδή $P_S = P_o$:

$$P_S = \bar{V}_S \cdot \bar{I}_S \text{ και } P_o = \frac{\bar{V}_0^2}{R}$$

άρα :

$$\frac{\bar{V}_0^2}{R} = \bar{V}_S \cdot \bar{I}_S \quad (3.36)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου της Φ/Β γεννήτριας (I_S) συνδέεται με τη μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου με τη σχέση :

$$\bar{I}_S = \bar{I}_L \cdot D \quad (3.37)$$

Από τις σχέσεις 3.36 και 3.37 έχουμε :

$$\frac{\bar{V}_0^2}{R} = \bar{V}_S \cdot \bar{I}_L \cdot D \quad (3.38)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο είναι :

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{V}_0^2}{R \cdot \bar{V}_S \cdot D} \quad (3.39)$$

Από τις σχέσεις 3.34 και 3.39 έχουμε :

$$\bar{I}_L = \bar{V}_S \cdot \frac{D}{R(1-D)^2} \quad (3.30)$$

Στο σχήμα 3.14 (α) φαίνεται ότι το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο (I_L) έχει μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή, δηλαδή :

$$\bar{I}_{\max} = \bar{I}_L + \frac{\Delta \bar{I}_L}{2} \quad \text{και} \quad \bar{I}_{\min} = \bar{I}_L - \frac{\Delta \bar{I}_L}{2} \quad (3.31)$$

Κατά τη φάση που ο ημιαγωγικός διακόπτης άγει (σχήμα 3.12 (β)), ισχύει :

$$\Delta \bar{I}_L \cdot L = \bar{V}_S \cdot t_{on} = \bar{V}_S \cdot D \cdot T \quad (3.32)$$

Επομένως οι σχέσεις 3.31 με βάση τις σχέσεις 3.30 και 3.32 γίνονται :

$$\bar{I}_{\max} = \frac{\bar{V}_S \cdot D}{R \cdot (1-D)^2} + \frac{\bar{V}_S \cdot D \cdot T}{2 \cdot L}$$

$$\bar{I}_{\min} = \frac{\bar{V}_S \cdot D}{R \cdot (1-D)^2} - \frac{\bar{V}_S \cdot D \cdot T}{2 \cdot L} \quad (3.33)$$

Για να υπάρχει συνεχής ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το πηνίο, πρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα να μην αλλάζει φορά. Αυτό σημαίνει ότι η ελάχιστη τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος δεν

πρέπει να παίρνει αρνητικές τιμές. Επομένως η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής του πηνίου υπολογίζεται ως εξής :

$$\frac{V_s \cdot D}{R \cdot (1-D)^2} - \frac{V_s \cdot D \cdot T}{2 \cdot L} = 0 \Rightarrow L_{\min} = R \frac{(1-D)^2}{2 \cdot f} \quad (3.34)$$

Με βάση το σχήμα 3.14 (δ) μπορεί να υπολογιστεί η κυμάτωση της τάσης στο φορτίο ή ισοδύναμα στα άκρα του πυκνωτή :

$$\Delta Q = \frac{V_0}{R} \cdot D \cdot T = C \cdot \Delta V_0 \Rightarrow \Delta V_0 = \frac{V_0 \cdot D \cdot T}{R \cdot C} \Rightarrow \quad (3.35)$$

$$\Delta V_0 / V_0 = D / R \cdot C \cdot f$$

Η παραπάνω μελέτη των κυκλωμάτων έγινε με την υπόθεση ότι τα στοιχεία του κυκλώματος είναι ιδανικά. Στην πραγματικότητα, όμως, τόσο ο ημιαγωγικός διακόπτης όσο και η διόδος παρουσιάζουν πτώση τάσης στα άκρα τους κατά τη λειτουργία του κυκλώματος.

Αν V_Q και V_D είναι οι πτώσεις τάσης στα άκρα του ημιαγωγικού διακόπτη και της διόδου αντίστοιχα, τότε με βάση το κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης (σχήμα 3.11) θα έχουμε :

Όταν ο διακόπτης άγει:

$$V_{L \text{ closed}} = V_s - V_0 - V_Q \quad (3.36)$$

Όταν ο διακόπτης δεν άγει:

$$V_{L \text{ open}} = -V_0 - V_D \quad (3.37)$$

Η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του πηνίου, για μια περίοδο ανοίγματος-κλεισίματος του διακόπτη είναι ίση με μηδέν. Επομένως ισχύει:

$$\begin{aligned} \bar{V}_L &= (V_s - V_0 - V_Q) \cdot D + (-V_0 - V_D) \cdot (1-D) = 0 \Rightarrow \\ V_0 &= V_s \cdot D - V_Q \cdot D - V_D \cdot (1-D) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Η σχέση (3.38) φανερώνει ότι υπάρχει μείωση της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Επομένως, σε εγκαταστάσεις στις οποίες οι τάσεις λειτουργίας έχουν μικρές τιμές, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι πτώσεις τάσεις στα στοιχεία του κυκλώματος του μετατροπέα.

Κατά τη σχεδίαση του μετατροπέα πρέπει να θεωρείται ότι ο πυκνωτής έχει ωμική και επαγωγική αντίσταση σε σειρά με τη χωρητική. Η ωμική αντίσταση επιδρά συνήθως στην αύξηση της κυμάτωσης της τάσης εξόδου του μετατροπέα, ενώ η επαγωγική αντίσταση μπορεί να μη λαμβάνεται υπόψη στις χαμηλές συχνότητες λειτουργίας (κάτω των 300 kHz) του ημιαγωγικού διακόπτη.

Το πηνίο πρέπει να επιλέγεται με μικρή ωμική αντίσταση, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες κι επομένως να μεγιστοποιείται ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα.

Στο κύκλωμα του μετατροπέα ανύψωσης τάσης (σχήμα 3.5), το ισοζύγιο ισχύος έχει ως εξής :

$$P_S = P_0 + P_{rL} \Rightarrow V_S \cdot I_L = \bar{I}_D \cdot \bar{V}_0 + I_L^2 \cdot r_L \quad (3.39)$$

Όπου,

r_L είναι η ωμική αντίσταση του πηνίου και

P_{rL} είναι η ισχύς που καταναλώνεται υπό μορφή θερμότητας στο πηνίο.

Το ρεύμα (I_D) που διαρρέει τη δίοδο έχει τιμή μηδέν όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι ανοιχτός (θέση OFF), ενώ είναι ίσο με το ρεύμα (I_L) που διαρρέει το πηνίο όταν ο ημιαγωγικός διακόπτης είναι κλειστός (θέση ON). Επομένως η μέση τιμή του ρεύματος I_D σε μια περίοδο είναι :

$$\bar{I}_D = I_L \cdot (1 - D) \quad (3.40)$$

Από τις σχέσεις (3.39) και (3.40) έχουμε :

$$\begin{aligned} V_S \cdot I_L &= I_L \cdot (1 - D) \cdot \bar{V}_0 + I_L^2 \cdot r_L \Rightarrow \\ V_S &= (1 - D) \cdot \bar{V}_0 + I_L \cdot r_L \end{aligned} \quad (3.41)$$

Για το ρεύμα I_L ισχύει :

$$I_L = \frac{\bar{I}_D}{1 - D} = \frac{\bar{V}_0}{R} \Rightarrow I_L = \frac{\bar{V}_0}{R \cdot (1 - D)} \quad (3.42)$$

Η σχέση (3.41) με βάση την (3.42) γίνεται :

$$\begin{aligned} V_S &= (1 - D) \cdot \bar{V}_0 + \frac{r_L \cdot \bar{V}_0}{R \cdot (1 - D)} \Rightarrow \\ \bar{V}_0 &= \frac{V_S}{(1 - D) \cdot A} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Όπου,

$$A = 1 + (r_L / R \cdot (1 - D)^2)$$

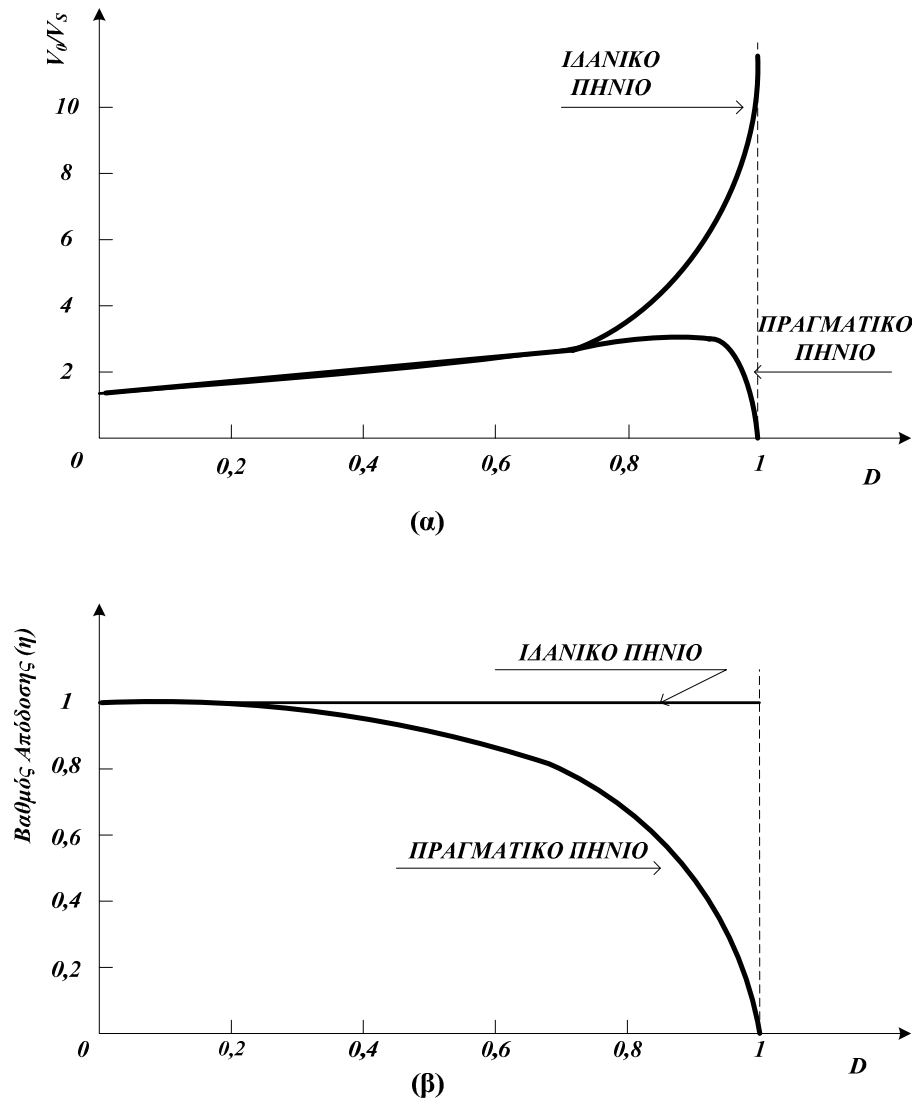
Με σύγκριση της παραπάνω σχέσης (3.43) με την (3.12), ($\bar{V}_0 = V_S / (1 - D)$) γίνεται αντιληπτή η επίδραση της ωμικής αντίστασης του πηνίου στην τάση εξόδου του κυκλώματος.

Ανάλογη επίδραση παρουσιάζεται και στο βαθμό απόδοσης του μετατροπέα :

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + P_{\text{απωλειών}}} = \frac{\frac{V_0^2}{R}}{\frac{V_0^2}{R} + I_L^2 \cdot r_L} \Rightarrow$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{r_L}{R \cdot (1-D)^2}} \quad (3.44)$$

Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι καμπύλες μεταβολής της τάσης εξόδου (α) και του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα (β) συναρτήσει του βαθμού χρησιμοποίησης (D) για ιδανικό πηνίο και για πραγματικό πηνίο.



Σχήμα 3.15 Μεταβολή της τάσης (α) και του βαθμού απόδοσης (β), συναρτήσει του βαθμού χρησιμοποίησης, μετατροπέα ανύψωσης τάσης με ιδανικό και πραγματικό πηνίο.

Ο ημιαγωγικός διακόπτης παρουσιάζει απώλειες ισχύος στις φάσεις που είναι ανοιχτός ή κλειστός. Δημιουργεί όμως απώλειες και στο μετατροπέα κατά το άνοιγμα ή το κλείσιμο του. Οι απώλειες ισχύος στο μετατροπέα περιορίζονται στο ελάχιστο όταν το κύκλωμα ελέγχου του διακόπτη εξασφαλίζει μηδενισμό της τάσης στα άκρα του διακόπτη όταν κλείνει και στη συνέχεια αύξηση του ρεύματος που τον διαρρέει. Το αντίστροφο πρέπει να συμβαίνει κατά το άνοιγμα του διακόπτη.

Πρέπει, λοιπόν, κατά το σχεδιασμό του μετατροπέα να προβλέπονται οι σωστοί χρόνοι ανοίγματος και κλεισίματος των ημιαγωγικών διακοπών, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες.

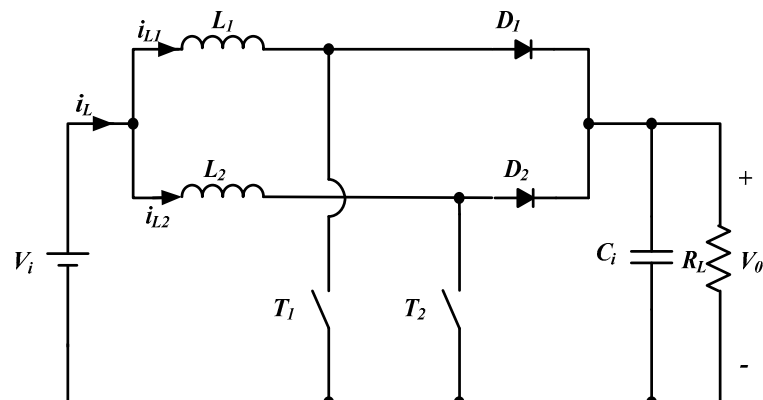
3.2.4 DC – DC μετατροπέας ανύψωσης με συζευγμένα πηνία [36]-[37]

Ο μετατροπέας ανύψωσης (μεγάλης ισχύος) είναι απαραίτητος για τη 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.

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 διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου (Discontinuous Inductor Current Mode - DICM). Το πρόβλημα κατά τη λειτουργία με διακοπτόμενο 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.

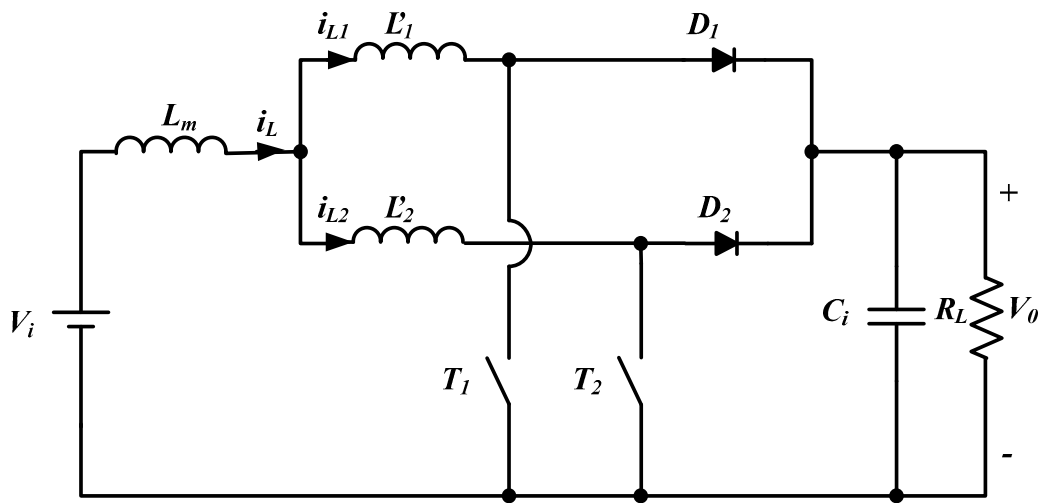
Αρχή λειτουργίας του DC – DC μετατροπέα ανύψωσης με συζευγμένα πηνία

Στο σχήμα 3.16 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 3.16 Μετατροπέας αποτελούμενος από δυο μετατροπείς ανύψωσης με συζευγμένα πηνία.

Τα συνεζευγμένα πηνία μπορούν να αναπαρασταθούν από ένα ισοδύναμο κύκλωμα με τρία μη συζευγμένα πηνία, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17 Ισοδύναμο κύκλωμα του μετατροπέα.

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

$$L'_1 = L_1 - L_m \tag{3.45}$$

$$L'_2 = L_2 - L_m \tag{3.46}$$

$$L_m = k\sqrt{L_1 \cdot L_2} \tag{3.47}$$

όπου,

L_1, L_2 είναι οι αυτεπαγωγές των δυο πηνίων,

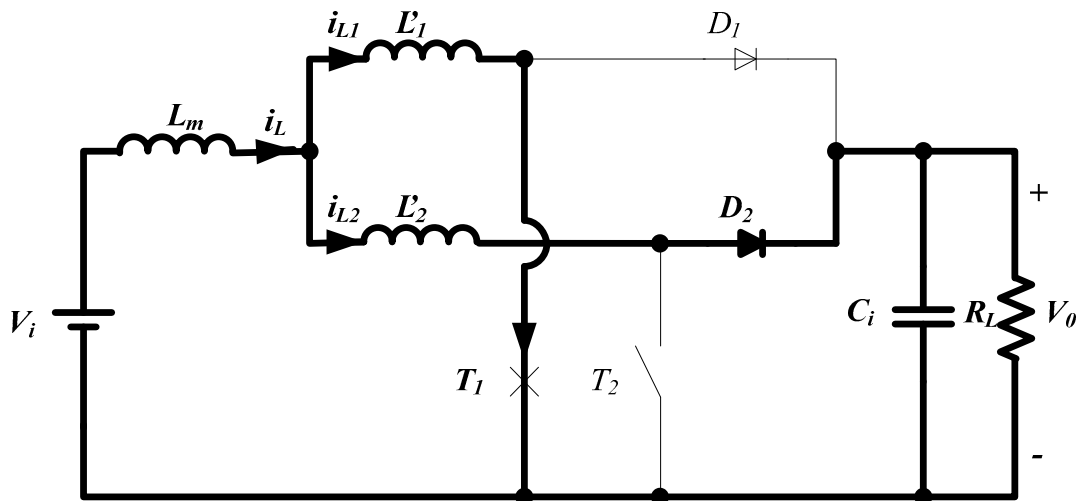
k είναι ο συντελεστής σύζευξης των πηνίων,

L'_1, L'_2 είναι η επαγωγική διαρροή των δυο πηνίων στο ισοδύναμο κύκλωμα και

L_m είναι η αμοιβαία επαγωγή

Από το ισοδύναμο κύκλωμα, για διάφορες διακοπτικές καταστάσεις και από τις κυματομορφές του σχήματος 3.24, η λειτουργία του μετατροπέα μπορεί να εξηγηθεί όπως παρακάτω :

Φάση λειτουργίας 1^η (σχήμα 3.18)



Σχήμα 3.18 Διαδρομές του ρεύματος κατά την 1^η φάση λειτουργίας (χρόνικο διάστημα $t_0 - t_1$).

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 τη σχέση :

$$\frac{di_{L_2}}{dt} = \frac{-V_0}{L'_1 + L'_2} \quad (3.48)$$

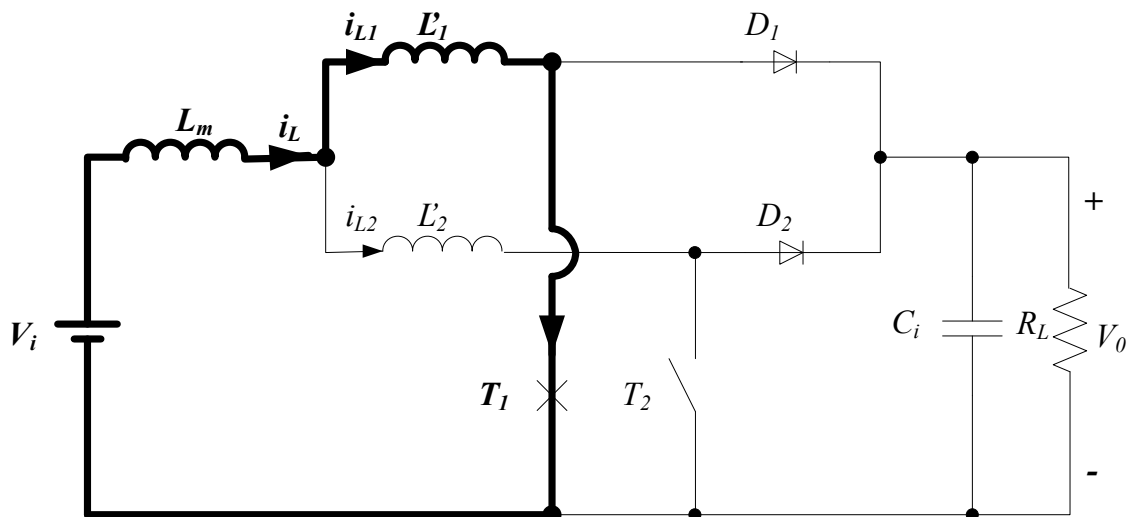
Φάση λειτουργίας 2^η (σχήμα 3.19)

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 :

$$\frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{V_i}{L_1} \quad (3.49)$$

όπου,

$$L_1 = L'_1 + L_m$$

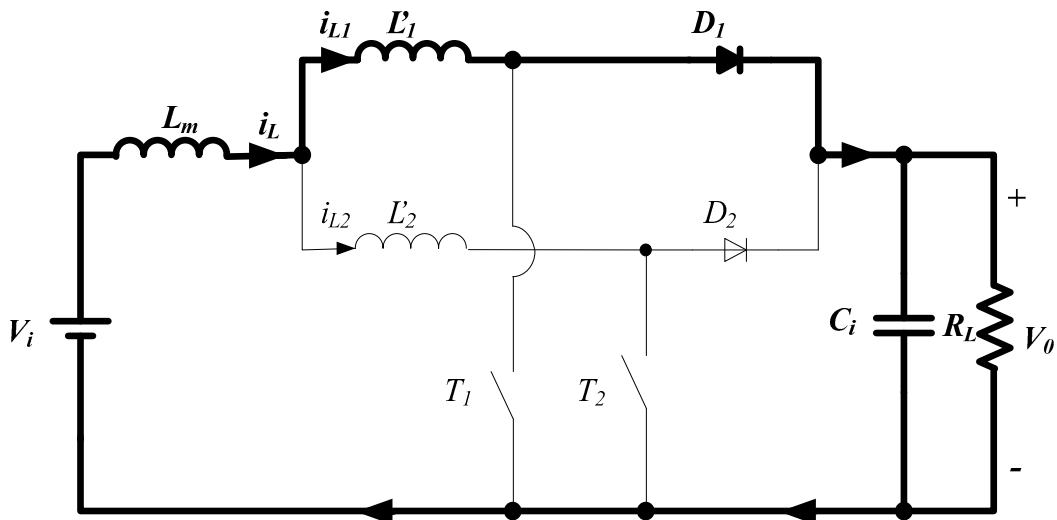


Σχήμα 3.19 Διαδρομή του ρεύματος κατά την 2^η φάση λειτουργίας (χρονικό διάστημα $t_1 - t_2$).

Φάση λειτουργίας 3^η (σχήμα 3.20)

Κατά το χρόνο t_2 , ο διακόπτης T_1 είναι ανοιχτός. 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:

$$\frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{-(V_0 - V_i)}{L_1} \quad (3.50)$$

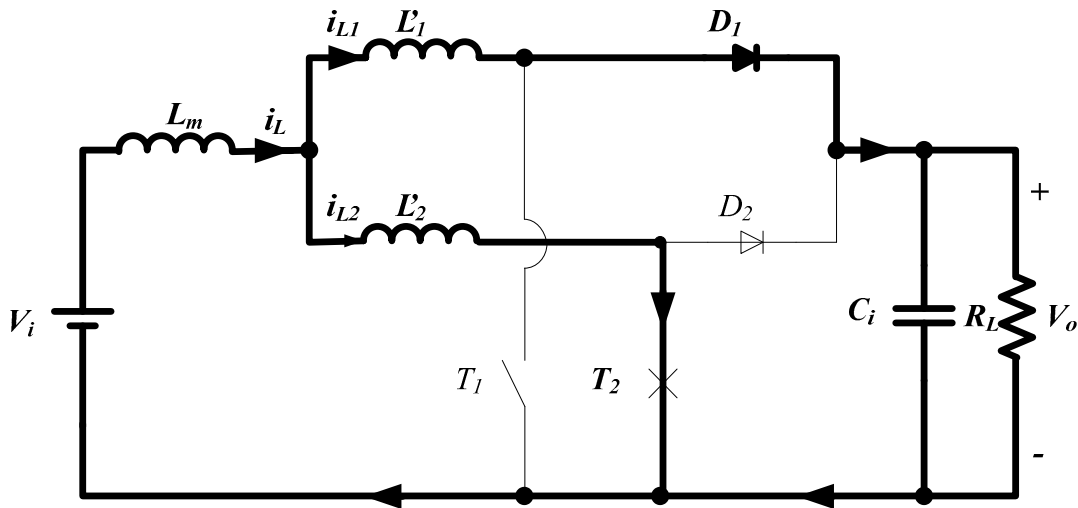


Σχήμα 3.20 Διαδρομή του ρεύματος κατά την 3^η φάση λειτουργίας (χρονικό διάστημα $t_2 - t_3$).

Φάση λειτουργίας 4^η (σχήμα 3.21)

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

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{-V_0}{L'_1 + L'_2} \tag{3.51}$$



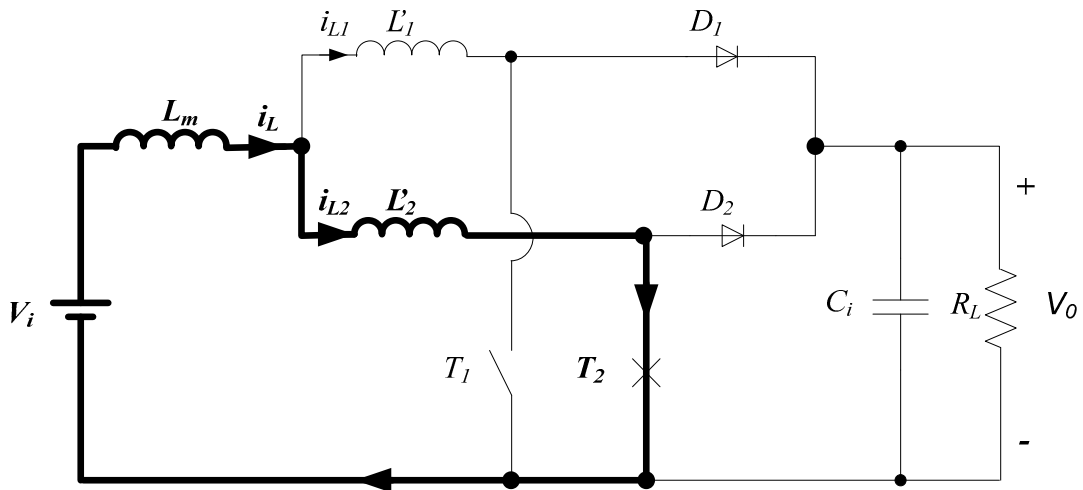
Σχήμα 3.21 Διαδρομή του ρεύματος κατά την 4^η φάση λειτουργίας (χρονικό διάστημα $t_3 - t_4$).

Φάση λειτουργίας 5^η (σχήμα 3.22)

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

$$\frac{di_{L_2}}{dt} = \frac{V_i}{L_2} \tag{3.52}$$

Όπου : $L_2 = L'_2 + L_m$

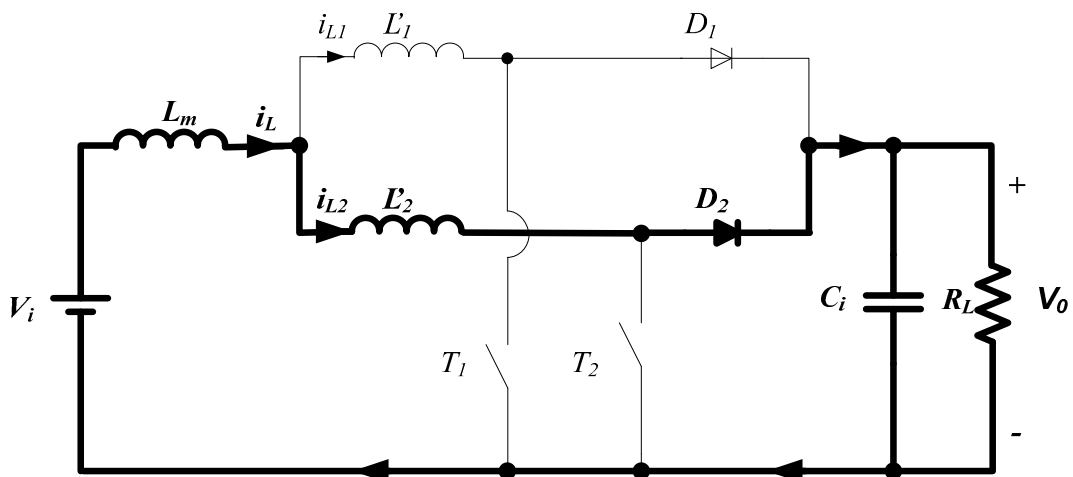


Σχήμα 3.22 Διαδρομή του ρεύματος κατά την 5^η φάση λειτουργίας (χρονικό διάστημα $t_4 - t_5$).

Φάση λειτουργίας 6^η (σχήμα 3.23)

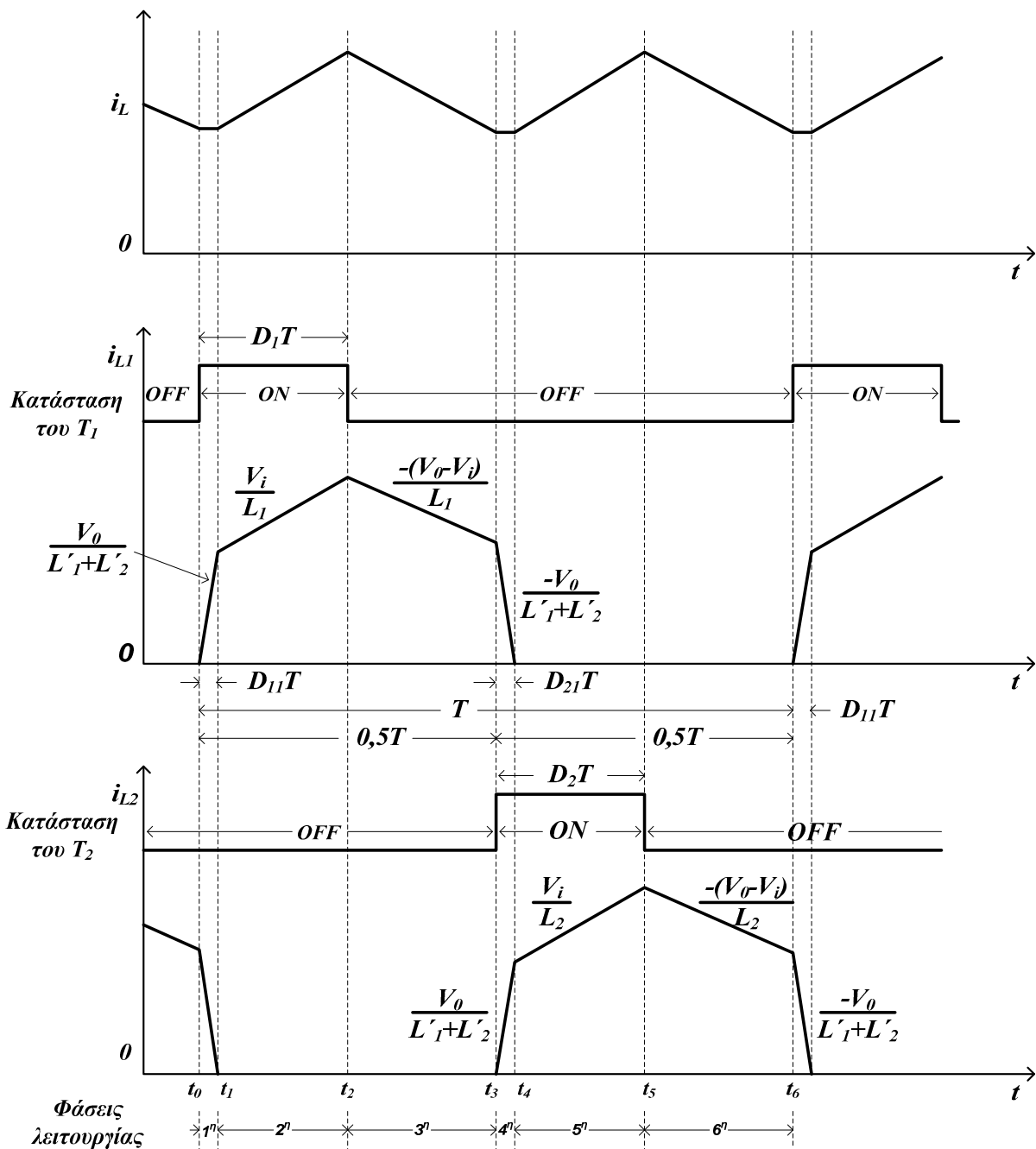
Κατά το χρόνο t_5 ο διακόπτης T_2 είναι ανοιχτός. Το πηνίο L'_2 εκφορτίζεται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Η μεταβολή του ρεύματος i_{L_2} είναι :

$$\frac{di_{L_2}}{dt} = \frac{-(V_0 - V_i)}{L_2} \tag{3.53}$$



Σχήμα 3.23 Διαδρομή του ρεύματος κατά την 6^η φάση λειτουργίας (χρονικό διάστημα $t_5 - t_6$).

Ο διακοπτικός κύκλος επαναλαμβάνεται όταν ο διακόπτης T_1 ανοίξει πάλι στο χρόνο t_6 .



Σχήμα 3.24 Κυματομορφές του μετατροπέα ανύψωσης με συζευγμένα πηνία.

Από τις κυματομορφές του σχήματος 3.24 προκύπτει ότι :

- 1) Ο μετατροπέας λειτουργεί στη 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 στο σχήμα 3.24 έχουν φτάσει στη μόνιμη κατάσταση, από την κυματομορφή του ρεύματος i_{L_1} προκύπτει ότι :

$$\frac{V_0}{L'_1 + L'_2} D_{11}T + \frac{V_i}{L_1} (D_1 - D_{11})T = \frac{V_0 - V_i}{L_1} (0.5 - D_1)T + \frac{V_0}{L'_1 + L'_2} D_{21}T \quad (3.54)$$

Από την κυματομορφή του ρεύματος i_{L_2} του σχήματος 3.24 προκύπτει ότι :

$$\frac{V_0}{L'_1 + L'_2} D_{21}T + \frac{V_i}{L_2} (D_2 - D_{21})T = \frac{V_0 - V_i}{L_2} (0.5 - D_2)T + \frac{V_0}{L'_1 + L'_2} D_{11}T \quad (3.55)$$

Επίσης από το σχήμα 3.24, οι μέσες τιμές I_1 και I_2 των ρευμάτων i_{L_1} και i_{L_2} αντίστοιχα, είναι:

$$I_1 = \frac{I}{T} \left[\frac{1}{2} D_{11}T \frac{V_0}{L'_1 + L'_2} D_{11}T + \frac{1}{2} (D_1 - D_2)T \left(\frac{2V_0}{L'_1 + L'_2} D_{11}T + \frac{V_i}{L_1} (D_1 - D_{11})T \right) + \frac{1}{2} (0.5 - D_1)T \left(\frac{V_0}{L'_1 + L'_2} (D_{11} + D_{21})T + \frac{V_i}{L_1} (D_1 - D_{11})T \right) + \frac{1}{2} D_{21}T \frac{V_0}{L'_1 + L'_2} D_{21}T \right] \quad (3.56)$$

$$I_2 = \frac{I}{T} \left[\frac{1}{2} D_{11}T \frac{V_0}{L'_1 + L'_2} D_{21}T + \frac{1}{2} (D_2 - D_{21})T \left(\frac{2V_0}{L'_1 + L'_2} D_{21}T + \frac{V_i}{L_2} (D_2 - D_{21})T \right) + \frac{1}{2} (0.5 - D_2)T \left(\frac{V_0}{L'_1 + L'_2} (D_2 - D_{21})T + \frac{V_i}{L_2} (D_2 - D_{21})T \right) + \frac{1}{2} D_{11}T \frac{V_0}{L'_1 + L'_2} D_{11}T \right] \quad (3.57)$$

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

$$P_i = P_o \quad \text{ή} \quad V_i (I_1 + I_2) = \frac{V_o^2}{R_L} \quad (3.58)$$

όπου R_L είναι η αντίσταση του φορτίου.

Από τις σχέσεις (3.54), (3.55), (3.56), (3.57) και (3.58) μπορεί να υπολογιστεί η τάση εξόδου V_o . Ωστόσο, για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών, γίνονται οι εξής παραδοχές :

$$D_1 = D, \quad D_2 = D + \delta \cdot D, \quad L_1 = L_2 = L \quad \text{και} \quad L'_1 = L'_2 = (1 - k)L.$$

Από την εξίσωση δευτέρου βαθμού, που προκύπτει από τις παραπάνω σχέσεις μετά τις απλοποιήσεις προκύπτει η σχέση υπολογισμού της V_o :

$$V_o = \frac{[I + 2(I-k)(0.5+D)(I-2D-\delta D)] + \sqrt{[I + 2(I-k)(0.5+D)(I-2D-\delta D)]^2 - 4(I-k)(I-\delta D)\left[\frac{4L(I-k)}{R_L T} + (I-2D-\delta D)\right]}}{2\left[\frac{4L(I-k)}{R_L} + (I-2D-\delta D)\right]} V_i \quad (3.59)$$

Η σχέση (3.59) είναι έγκυρη όταν η V_o έχει μόνο πραγματικό μέρος (όχι και φανταστικό), πράγμα που σημαίνει ότι το υπόριζο δεν πρέπει να είναι αρνητικό :

$$R_L \geq \frac{16L(I-k)^2(I-\delta D)}{T\left\{[I + 2(I-k)(0.5+D)(I-2D-\delta D)]^2 - 4(I-k)(I-\delta D)(I-2D-\delta D)\right\}} \quad (3.60)$$

Όταν η R_L τείνει στην τιμή που δίνει η σχέση (3.60), τότε η τάση εξόδου τείνει να πλησιάσει την τιμή :

$$V_o = \frac{V_i}{I-(2D+\delta D)} \quad \text{ή} \quad V_o = \frac{V_i}{I-(D_1+D_2)} \quad (3.61)$$

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_{L_1} και i_{L_2} αντίστοιχα, δίνεται από τη σχέση :

$$I_1 - I_2 \cong \frac{T\delta D}{4L} [V_o(2D+\delta D) - V_i] \quad (3.62)$$

Αν $\delta D \ll 2D$, τότε η σχέση (3.62) γίνεται :

$$I_1 - I_2 \cong \frac{T\delta D}{4L} (2DV_o - V_i) \quad (3.63)$$

Παρατηρήσεις :

1. Η διαφορά μεταξύ των I_1 και I_2 είναι κατά προσέγγιση ανάλογη του δD και μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας την αυτεπαγωγή L .
2. Όταν $D = 0,25$ ισχύουν, κατά προσέγγιση, οι παρακάτω σχέσεις :

$$V_o = 2V_i \quad (\text{από την 3.61}) \quad (3.64)$$

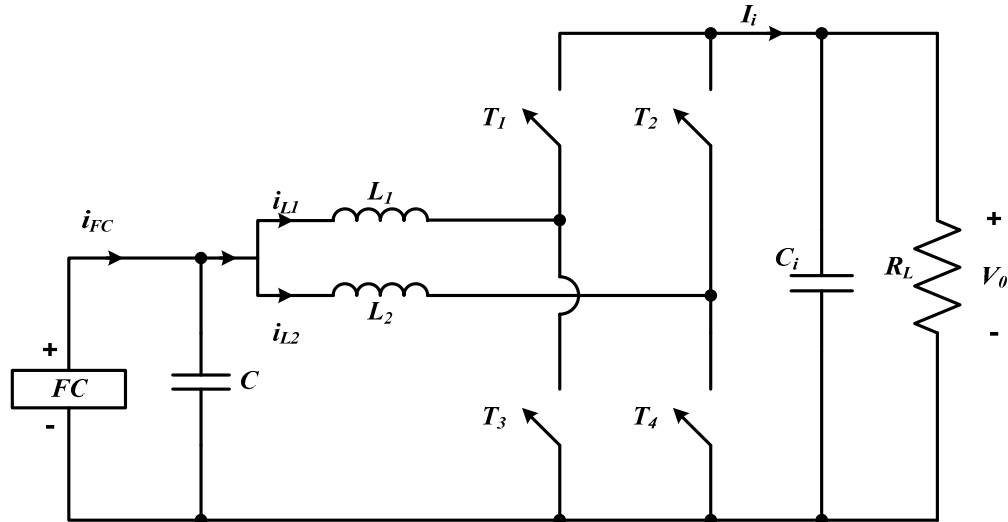
$$I_1 - I_2 = 0 \quad (\text{από τις 3.62 και 3.63}) \quad (3.65)$$

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

3.2.5 Αμφίπλευρος dc-dc μετατροπέας με συζευγμένα πηνία [38],[39]

Οι αμφίπλευροι dc-dc μετατροπείς ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπως διαστημόπλοια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα και συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου. Στο σχήμα 3.25

παρουσιάζεται η τοπολογία ενός αμφίπλευρου dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου.



Σχήμα 3.25 Τοπολογία αμφίπλευρου dc-dc μετατροπέα.

Ο μετατροπέας αυτός, ο οποίος προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από δύο μετατροπείς ανύψωσης-υποβιβασμού της τάσης συνδεδεμένους παράλληλα, όπου οι ημιαγωγικοί διακόπτες T_3 και T_4 χρησιμεύουν για να φορτίζουν τις αυτεπαγωγές ανύψωσης και οι T_1 και T_2 για να τις εκφορτίζουν. Οι ημιαγωγικοί διακόπτες οδηγούνται με τον ίδιο βαθμό χρησιμοποίησης, αλλά οι παλμοί έναυσης των ημιαγωγικών διακοπών T_1 και T_4 έχουν διαφορά φάσης 180° , σε σχέση με τους T_2 και T_3 . Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διπλασιάζεται η συχνότητα του ρεύματος εισόδου (δηλαδή της κυψέλης) κι επομένως να περιορίζεται η απορρόφηση της κυμάτωσης του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου, άρα και η τιμή της χωρητικότητας εισόδου. Οι ημιαγωγοί T_1 και T_2 χρησιμοποιούνται επίσης για να λειτουργούν τον μετατροπέα ως μια τοπολογία υποβιβασμού, με σκοπό την τροφοδότηση της κυψέλης καυσίμου κατά τη διάρκεια της φάσης παραγωγής υδρογόνου ή κατά τη διάρκεια της εκκίνησης της κυψέλης, σε σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.

3.3 DC-DC Μετατροπείς με ωμική ή γαλβανική απομόνωση [30]-[35]

3.3.1 Μετατροπέας πλήρους γέφυρας (Full bridge converter)

Στο σχήμα 3.26 (α) παρουσιάζεται η τοπολογία μετατροπέα πλήρους γέφυρας, όπου τα ζεύγη των διακοπών (T_1, T_2) και (T_3, T_4) μεταβαίνουν διαδοχικά με τη συχνότητα μετάβασης. Όταν οι διακόπτες (T_1, T_2) ή (T_3, T_4) είναι κλειστοί, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.26(β) ισχύει:

$$v_{oi} = (N_1/N_2) \cdot V$$

Επομένως :

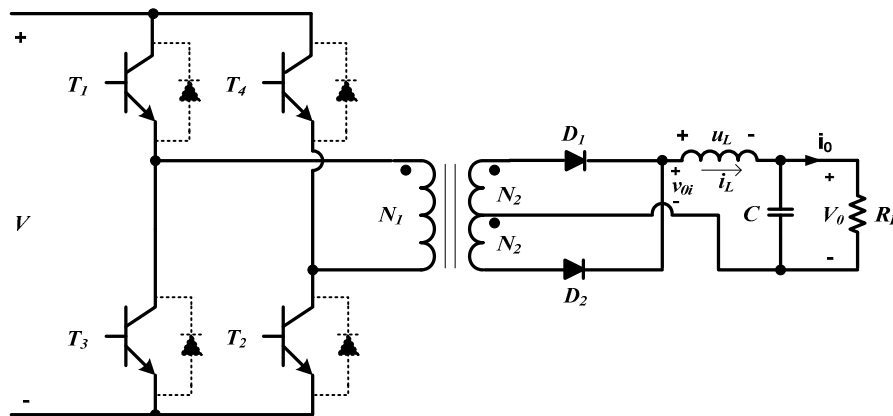
$$v_L = \frac{N_1}{N_2}(V - \bar{V}_0) \quad \text{στο διάστημα } 0 < t < t_{on} \quad (3.66)$$

Όταν και τα δύο ζεύγη των διακοπών είναι ανοιχτά, το ρεύμα της επαγωγής κατανέμεται εξίσου στα δυο δευτερεύοντα πηνία του μετασχηματιστή. Θεωρώντας τις διόδους ιδανικές ($v_{oi}=0V$), ισχύει :

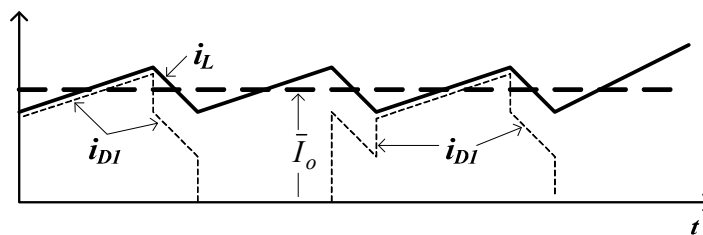
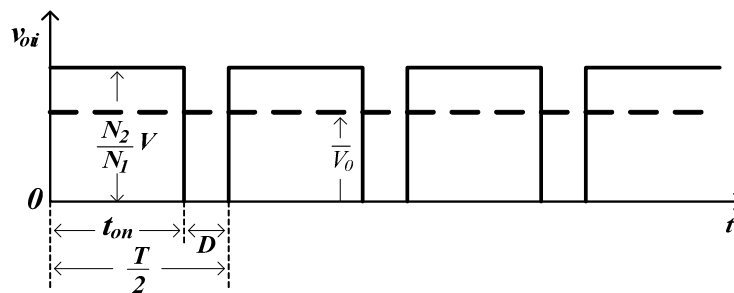
$$v_L = -\bar{V}_0 \quad \text{στο διάστημα } t_{on} < t < t_{on} + D \quad (3.67)$$

Στη μόνιμη κατάσταση, εξισώνοντας το ολοκλήρωμα της τάσης επαγωγής με μηδέν για μια διακοπτική περίοδο και έχοντας υπόψη ότι $t_{on} + D = \frac{1}{2}T$, προκύπτει :

$$\frac{\bar{V}_0}{V} = 2 \frac{N_2}{N_1} \frac{t_{on}}{T} \quad \text{ή} \quad \frac{\bar{V}_0}{V} = 2 \frac{N_2}{N_1} D \quad (3.68)$$



(α)



(β)

Σχήμα 3.26 (α) Τοπολογία μετατροπέα πλήρους γέφυρας
(β) Κυματομορφές μετατροπέα πλήρους γέφυρας

3.3.2 Μετατροπέας εναλλαγής (Push-Pull)

Στο σχήμα 3.27 παρουσιάζονται η τοπολογία και οι κυματομορφές ενός dc-dc μετατροπέα push-pull. Στην τοπολογία αυτή, ο τετραγωνικός παλμός στην είσοδο του μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας παράγεται από έναν push-pull PWM αντιστροφέα. Στο δευτερεύον χρησιμοποιείται μεσαία λήψη, που έχει ως αποτέλεσμα να προκαλείται πτώση τάσης στο δευτερεύον σε μία μόνο δίοδο.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.27 (α), όταν ο διακόπτης T_1 είναι κλειστός, η δίοδος D_1 άγει, ενώ η D_2 πολώνεται ανάστροφα. Έτσι από το σχήμα 3.26 (β) προκύπτει ότι :

$$v_{oi} = \frac{N_2}{N_1} \cdot V \quad (3.69)$$

Η τάση στα άκρα της αυτεπαγωγής του φίλτρου δίνεται από τη σχέση :

$$v_L = \frac{N_2}{N_1} (V - V_0) \quad \text{στο διάστημα} \quad 0 < t < t_{on} \quad (3.70)$$

Στο παραπάνω χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.27 (β) το ρεύμα αυξάνεται γραμμικά. Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος D , κατά το οποίο και οι δύο διακόπτες είναι ανοιχτοί, το ρεύμα της αυτεπαγωγής μοιράζεται εξίσου στα δύο δευτερεύοντα πηνία και $v_{oi} = 0$. Επομένως, στο χρονικό διάστημα $t_{on} < t < t_{on} + D$ ισχύει :

$$v_L = -\bar{V}_0 \quad (3.71)$$

και

$$i_{D_1} = i_{D_2} = \frac{I}{2} i_L \quad (3.72)$$

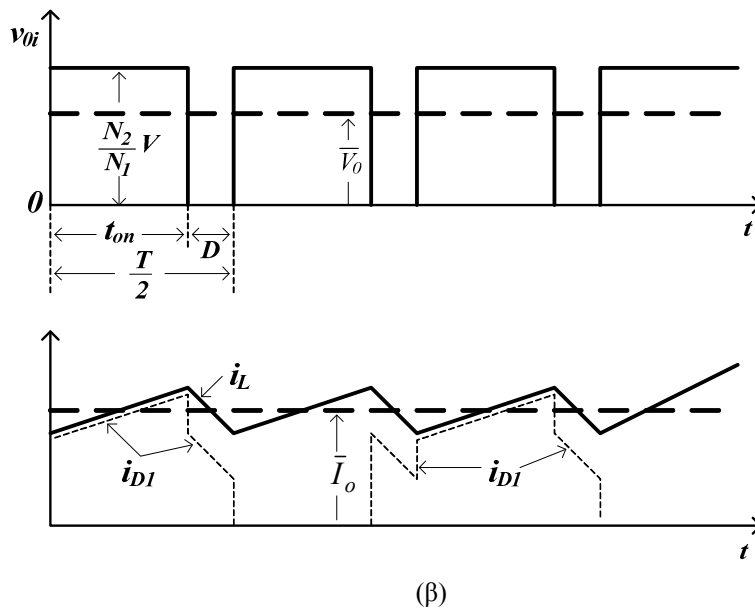
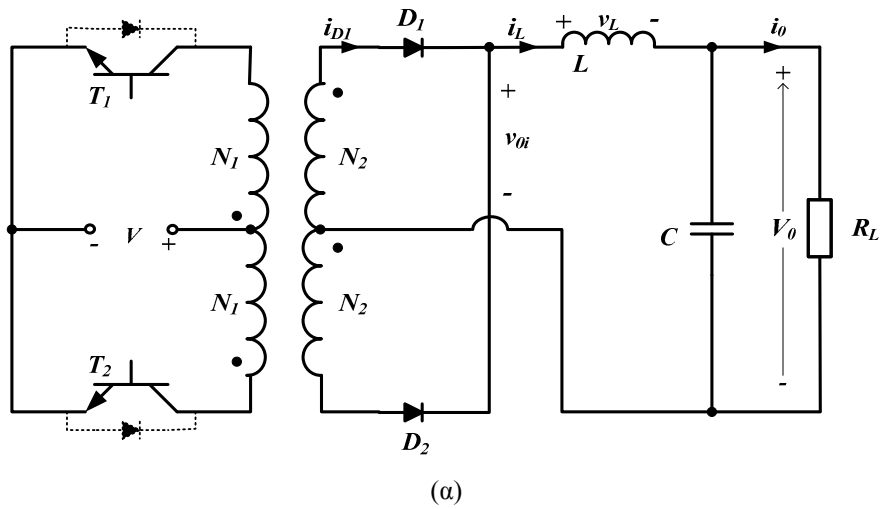
Ο επόμενος διακοπτικός κύκλος αποτελείται από το χρόνο t_{on} (όπου ο διακόπτης T_2 είναι κλειστός) και από το χρονικό διάστημα D . Οι κυματομορφές επαναλαμβάνονται με περίοδο $\frac{1}{2}T$:

$$t_{on} + D = \frac{1}{2}T \quad (3.73)$$

Από τις σχέσεις (3.57), (3.58) και (3.60) προκύπτει ότι :

$$\frac{\bar{V}_0}{V} = 2 \frac{N_2}{N_1} D \quad (3.74)$$

Όπου $D = \frac{t_{on}}{T}$ είναι ο βαθμός χρησιμοποίησης των διακοπών T_1 και T_2 , με μέγιστη τιμή $D=0,5$. Η μέση τιμή της τάσης v_o είναι : $v_o = \bar{V}_0$ (σχήμα 3.22 (β)).



Σχήμα 3.27 (α) Τοπολογία μετατροπέα εναλλαγής (push-pull)
 (β) Κυματομορφές μετατροπέα εναλλαγής.

Οι αντιπαράλληλες διόδους, οι οποίες σημειώνονται με διακοπτόμενες γραμμές χρησιμεύουν για να παρέχουν διέξοδο στο ρεύμα, που οφείλεται στη μαγνητική ροή διαρροής του μετασχηματιστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2, μεταξύ του φορτίου και του dc-dc μετατροπέα εφαρμόζεται ένας αντιστροφέας ισχύος, προκειμένου να καταστεί δυνατή η τροφοδοσία φορτίων εναλλασσομένου ρεύματος ή η διασύνδεση της κυψέλης καυσίμου με το δίκτυο.

Οι αντιστροφείς είναι ένα είδος μετατροπέων, οι οποίοι μπορούν να μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη, με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος [30]. Χρησιμοποιούνται στις εξής περιοχές :

- Συστήματα ελέγχου της ταχύτητας των εναλλασσόμενων ηλεκτρικών μηχανών
- Συστήματα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας
- Συστήματα ελέγχου της τάσης εξόδου αιολικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας
- Συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας με επαγωγή
- Συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος

Οι αντιστροφείς διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες :

- A) Αντιστροφείς πηγής τάσης (Voltage Source Inverters, VSI)
- B) Αντιστροφείς πηγής ρεύματος (Current Source Inverters, CSI)

Επίσης, οι δυο παραπάνω κατηγορίες υποδιαιρούνται ως εξής :

1. Μονοφασικοί αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας
2. Μονοφασικοί αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας
3. Τριφασικοί αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας.

Οι αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) είναι οι πλέον διαδεδομένοι, γιατί συμπεριφέρονται ως φυσικές πηγές τάσης, πράγμα που απαιτείται στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές. Οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος (CSI) χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές μέσης τάσης, στις οποίες απαιτούνται κυματομορφές ρεύματος υψηλής ποιότητας.

Επειδή η λειτουργία των αντιστροφέων γίνεται με χρησιμοποίηση ημιαγωγικών διακοπών, οι κυματομορφές εξόδου τους αποτελούνται από σειρές διακριτών τιμών τάσης διαφόρων επιπέδων. Η παλμική μορφή της κυματομορφής της τάσης εξόδου ενός αντιστροφέα επιτυγχάνεται με κατάλληλη τεχνική διαμόρφωσης, μέσω της οποίας ελέγχεται ο χρόνος αγωγής (ON) και σβέσης (OFF), αλλά και η σειρά λειτουργίας των ημιαγωγικών διακοπών. Οι πλέον συνηθισμένες τεχνικές διαμόρφωσης είναι : (α) η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation - SPWM), (β) η διαμόρφωση εύρους παλμών με διανύσματα τάσης (Voltage Space-Vector Pulse Width Modulation - VSVPWM) και (γ) η επιλεκτική εξάλειψη αρμονικών (Selective Harmonic Elimination - SHE).

Λόγω της μορφής (σε διακριτές τιμές) της κυματομορφής εξόδου καθίσταται αναγκαία η επιβολή κάποιων λειτουργικών περιορισμών στους αντιστροφείς. Έτσι, στους αντιστροφείς

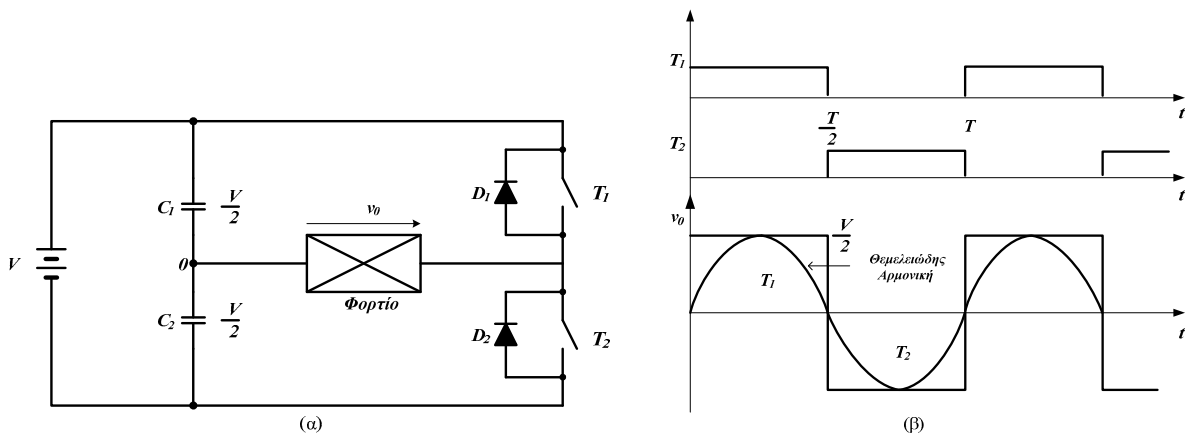
πηγής τάσης με διαμόρφωση PWM, οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλή τιμή κλίσης της τάσης εξόδου (dv/dt), πρέπει το φορτίο να είναι επαγωγικό στις αρμονικές συχνότητες, ώστε να παράγεται ομαλή κυματομορφή ρεύματος. Αν το φορτίο είναι χωρητικό, τότε αυτό προκαλεί υψηλές αιχμές ρεύματος, ο περιορισμός των οποίων απαιτεί την παρεμβολή επαγωγικού φίλτρου μεταξύ της εξόδου του αντιστροφέα και του φορτίου.

Στους αντιστροφείς πηγής ρεύματος με διαμόρφωση PWM, οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλή τιμή κλίσης του ρεύματος εξόδου (di/dt), πρέπει το φορτίο να είναι χωρητικό στις αρμονικές συχνότητες, ώστε να παράγεται ομαλή κυματομορφή τάσης. Αν το φορτίο είναι επαγωγικό, τότε αυτό προκαλεί υψηλές αιχμές τάσης, ο περιορισμός των οποίων απαιτεί την παρεμβολή χωρητικού φίλτρου μεταξύ της εξόδου του αντιστροφέα και του φορτίου.

Οι αντιστροφείς τριών επιπέδων δεν ενδείκνυνται σε εφαρμογές μέσης τάσης, γιατί λόγω της υψηλής τιμής της κλίσης της τάσης (dv/dt), μπορεί να προκληθούν προβλήματα καταπόνησης στις μονώσεις του φορτίου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρησιμοποίηση αντιστροφέων πολλαπλών επιπέδων τάσης (Multilevel Inverters, MINV). Στους αντιστροφείς αυτούς, η κυματομορφή της τάσης εξόδου αποτελείται από πολλά επίπεδα, επιτυγχάνοντας έτσι υψηλότερες τάσεις εξόδου με μικρή μεταβολή της τάσης (dv/dt). Οι αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων βρίσκουν εφαρμογές σε συστήματα οδήγησης κινητήρων, ως ενεργά φίλτρα, ως αντισταθμιστές άεργης ισχύος και ως ρυθμιστές τάσης σε συστήματα ισχύος.

4.2 Μονοφασικός αντιστροφέας τετραγωνικού παλμού σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας

Στο σχήμα 4.1(α) παρουσιάζεται ένας μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας [30]. Τα διακοπτικά στοιχεία T_1 και T_2 μπορεί να είναι τρανζίστορ ισχύος, MOSFETs (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors), IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors), Θυρίστορ (SCR – Silicon Control Rectifier) ή GTO (Gate Turn-off Θυρίστορ), ανάλογα με την ισχύ που απαιτείται στην έξοδο.



Σχήμα 4.1 (α) Συνδεσμολογία αντιστροφέα ημιγέφυρας

(β) Παλμοί έναυσης των διακοπτικών στοιχείων και κυματομορφή της τάσης εξόδου του αντιστροφέα με ωμικό φορτίο

Παρατηρώντας το σχήμα 4.1(β) γίνεται φανερό ότι η τάση εξόδου v_o είναι ένας τετραγωνικός παλμός δύο καταστάσεων (έχει δηλαδή εναλλάξ θετικές και αρνητικές τιμές), το πλάτος του οποίου είναι $\frac{V}{2}$. Ο έλεγχος της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται με μεταβολή των χρόνων αγωγής των διακοπτικών στοιχείων T_1 και T_2 , η οποία γίνεται μεταβάλλοντας τη διάρκεια των παλμών έναυσής τους. Για να αυξηθεί η τάση εξόδου του αντιστροφέα, πρέπει να αυξηθούν οι χρόνοι αγωγής των T_1 και T_2 , ενώ για να μειωθεί η τάση εξόδου πρέπει οι χρόνοι αγωγής των T_1 και T_2 να ελαττωθούν. Επομένως αυξομειώνοντας κατάλληλα τα χρονικά διαστήματα αγωγής των T_1 και T_2 , η τάση εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να διατηρείται σταθερή στις διάφορες διακυμάνσεις της τάσης εισόδου. Σε κάθε περίπτωση, αυτό που πρέπει να αποφεύγεται είναι η ταυτόχρονη αγωγή των διακοπτικών στοιχείων, για να μη βραχυκυκλώνεται η πηγή εισόδου.

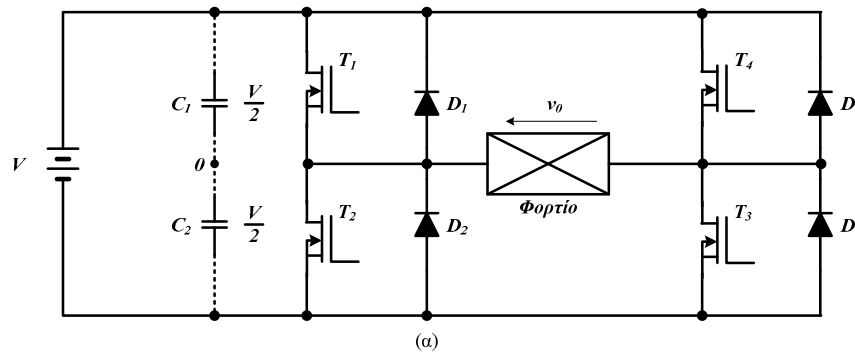
Οι δίοδοι D_1 και D_2 ονομάζονται δίοδοι ελεύθερης διέλευσης και χρησιμοποιούνται για τη διέλευση του ρεύματος εξόδου, όταν οι δύο διακόπτες T_1 και T_2 είναι ταυτόχρονα σε κατάσταση αποκοπής.

4.3 Μονοφασικός αντιστροφέας τετραγωνικού παλμού σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας

Ο αντιστροφέας ημιγέφυρας, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάζει τα παρακάτω μεγάλα μειονεκτήματα [30]:

- i. Για τη λειτουργία του απαιτούνται δύο πυκνωτές μέσης λήψης
- ii. Δεν μπορεί να δημιουργήσει τάση εξόδου με διαστήματα μηδενικής τάσης για μη ωμικά φορτία
- iii. Το πλάτος της τάσης εξόδου έχει τη μισή τιμή της τάσης εισόδου

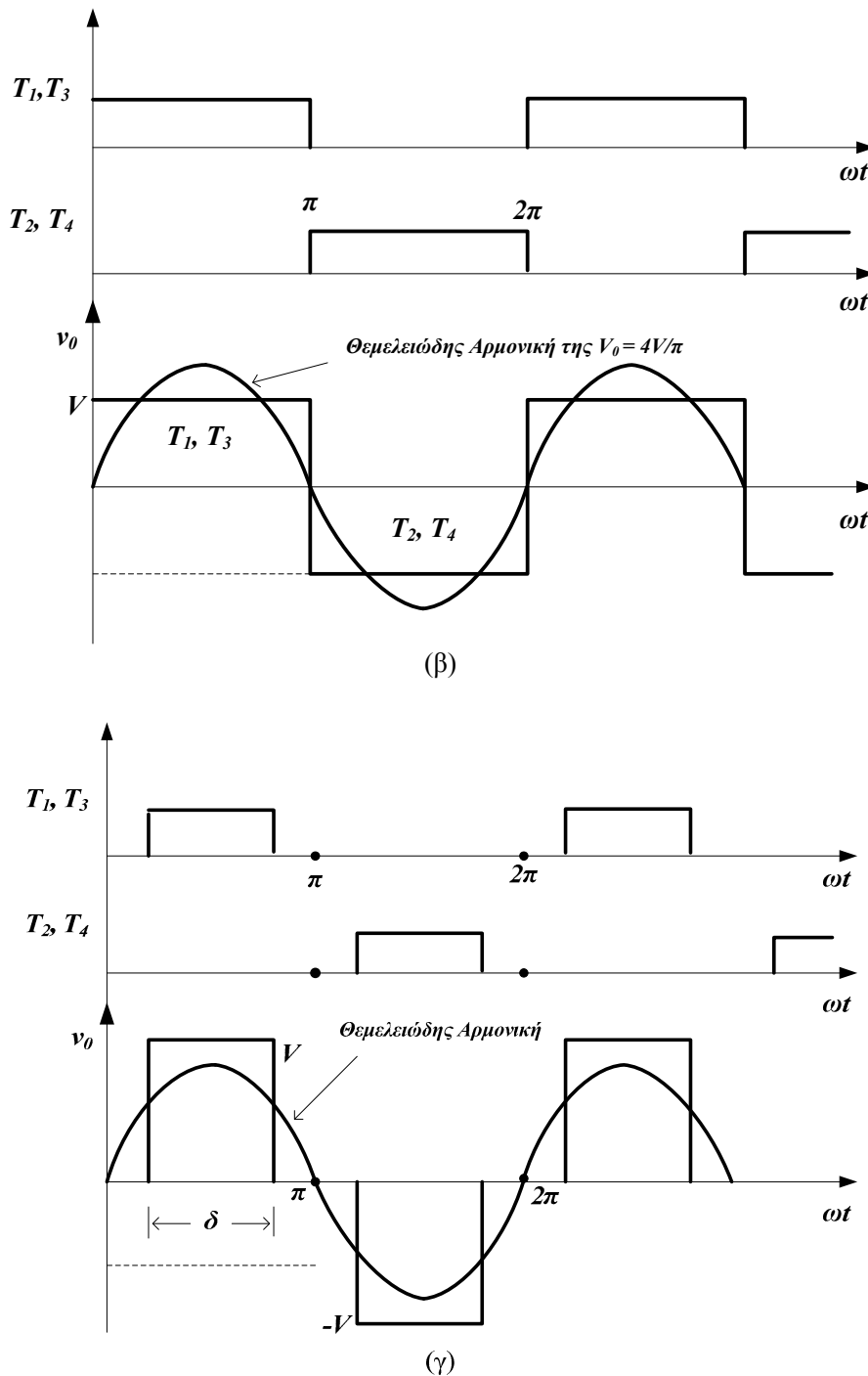
Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η τοπολογία ενός αντιστροφέα σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (αποτελείται από δύο ημιγέφυρες), ο οποίος δεν εμφανίζει τα παραπάνω μειονεκτήματα. Επίσης παρουσιάζονται οι κυματομορφές του αντιστροφέα όταν οι διακόπτες (MOSFET) άγουν για γωνία δ° .



Σχήμα 4.2 Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με MOSFETs.

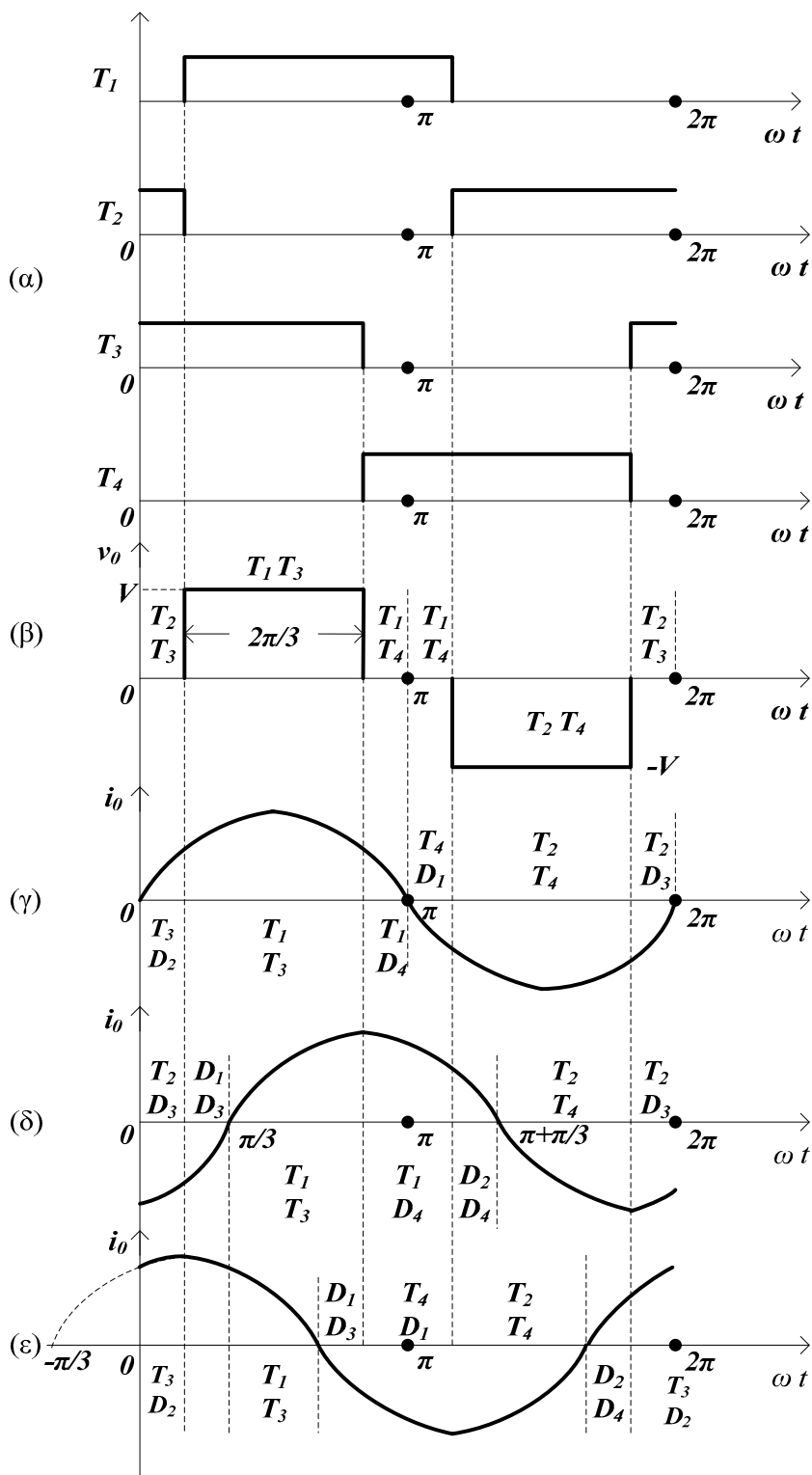
(α) Κύκλωμα γέφυρας

(Συνεχίζεται)



Σχήμα 4.2 Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με MOSFETs.
(β) Κυματομορφές αντιστροφέα για γωνία αγωγής των MOSFETs 180°
(γ) Κυματομορφές του αντιστροφέα όταν τα MOSFETs άγουν για γωνία δ° (ωμικό φορτίο)

Στο σχήμα 4.3 Παρουσιάζονται οι κυματομορφές του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, για διάφορα φορτία (ωμικό, επαγωγικό, χωρητικό), με την υπόθεση ότι το φίλτρο εξόδου παρέχει ημιτονοειδές ρεύμα εξόδου και η μετατόπιση του ρεύματος οφείλεται μόνο στο φορτίο.



Σχήμα 4.3 Κυματομορφές αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

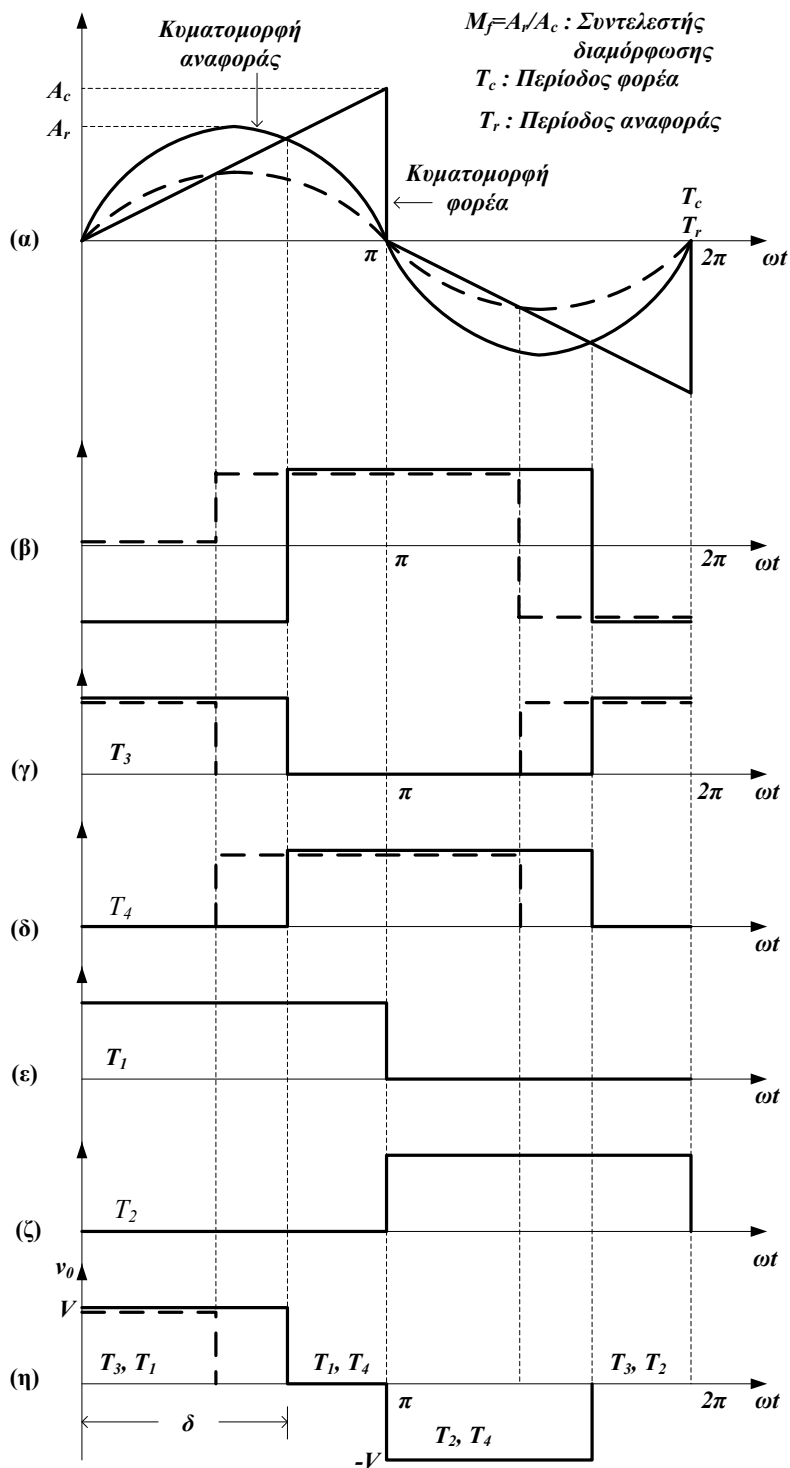
- (α) Παλμοί έναυσης των MOSFETs
- (β) Τάση εξόδου
- (γ) Ρεύμα εξόδου για ωμικό φορτίο
- (δ) Ρεύμα εξόδου για επαγωγικό φορτίο
- (ε) Ρεύμα εξόδου για χωρητικό φορτίο

Εξετάζοντας το κύκλωμα του σχήματος 4.2(α) και τις κυματομορφές του σχήματος 4.3 μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα :

- 1) Όταν η τάση και το ρεύμα έχουν ταυτόχρονα θετικές τιμές (δηλαδή το γινόμενο $v_o \cdot i_o$ είναι θετικό), τότε άγουν οι διακόπτες T_1 και T_3 , κι έτσι μεταφέρεται ενεργός ισχύς από την είσοδο προς την έξοδο του αντιστροφέα.
- 2) Όταν το ρεύμα και η τάση έχουν ταυτόχρονα αρνητικές τιμές (δηλαδή το γινόμενο $v_o \cdot i_o$ είναι θετικό), τότε άγουν οι διακόπτες T_2 και T_4 , κι έτσι μεταφέρεται ενεργός ισχύς από την είσοδο προς την έξοδο του αντιστροφέα.
- 3) Όταν η τάση εξόδου έχει μηδενική τιμή, ενώ ρεύμα εξόδου έχει θετική τιμή (δηλαδή το γινόμενο $v_o \cdot i_o$ είναι μηδέν), τότε μπορεί να άγει ένα από τα ζεύγη των ημιαγωγικών στοιχείων $[T_3-D_2]$, $[T_1-D_4]$, κι έτσι επιτυγχάνεται η κυκλοφορία του ρεύματος εξόδου. Αν π.χ. άγει ο διακόπτης S_3 , τότε το ρεύμα εξαναγκάζει τη δίοδο D_2 να άγει, κι έτσι ακολουθεί τη διαδρομή T_3 -φορτίο- D_2 . Το ρεύμα αυτό ονομάζεται κυκλικό ρεύμα (circulating current).
- 4) Όταν η τάση εξόδου έχει μηδενική τιμή, ενώ ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου έχει αρνητική τιμή (δηλαδή $v_o \cdot i_o = 0$), τότε άγει ένα από τα ζεύγη $[T_4-D_1]$, $[T_2-D_3]$ και επιτυγχάνεται η κυκλοφορία του ρεύματος εξόδου. Αν π.χ. άγει ο διακόπτης S_4 , τότε το ρεύμα εξαναγκάζει τη δίοδο D_1 να άγει, κι έτσι ακολουθεί τη διαδρομή S_4 -φορτίο- D_1 . Το ρεύμα αυτό ονομάζεται επίσης ανακυκλώμενο. Σ' αυτή την περίπτωση μεταφέρεται ηλεκτρική ισχύς από την αυτεπαγωγή του φορτίου προς την πηγή εισόδου. Αυτή η ηλεκτρική ισχύς ονομάζεται άεργος και ρεύμα επίσης άεργο.
- 5) Όταν η τάση εξόδου έχει θετική τιμή, ενώ ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου έχει αρνητική τιμή (δηλαδή το φορτίο είναι επαγωγικό και $v_o \cdot i_o < 0$), τότε άγουν οι δίοδοι ελεύθερης διέλευσης D_1 και D_3 , κι έτσι το ρεύμα ακολουθεί τη διαδρομή πηγή- D_1 -φορτίο- D_3 .
- 6) Όταν η τάση εξόδου έχει αρνητική τιμή και ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου έχει θετική τιμή (δηλαδή το φορτίο είναι χωρητικό και $v_o \cdot i_o < 0$), τότε άγουν οι δίοδοι ελεύθερης διέλευσης D_2 και D_4 , κι έτσι το ρεύμα ακολουθεί τη διαδρομή πηγή- D_2 -φορτίο- D_4 . Στην περίπτωση αυτή μεταφέρεται άεργος ισχύς από τον πυκνωτή του φορτίου προς την πηγή εισόδου και το ρεύμα είναι επίσης άεργο.

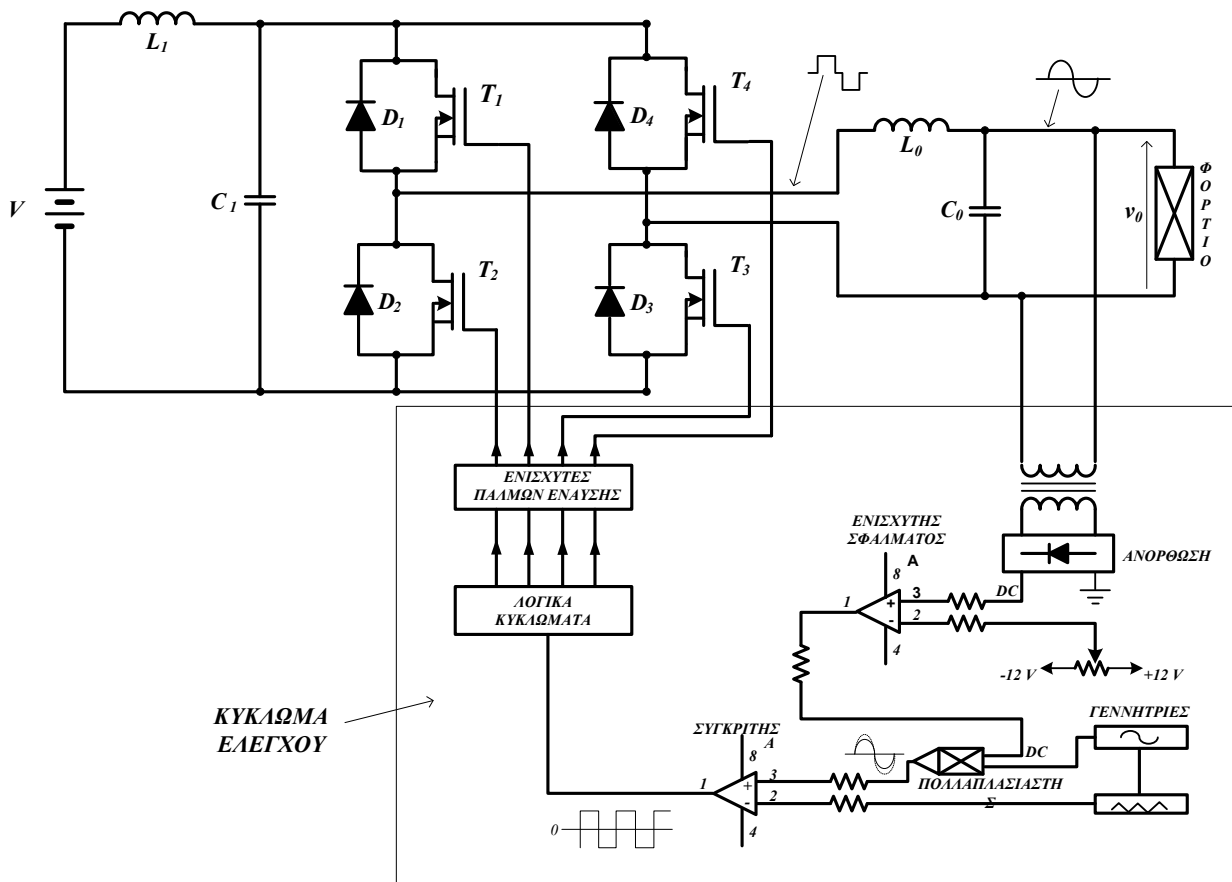
4.3.1 Έλεγχος της τάσης εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας

Ο έλεγχος της τάσης εξόδου του αντιστροφέα επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας το εύρος των παλμών "δ" της τάσης εξόδου, ανάλογα με τις διακυμάνσεις της τάσης εισόδου. Η τεχνική με την οποία επιτυγχάνεται ο έλεγχος αυτός ονομάζεται "Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation - PWM). Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ο ορισμός της τεχνικής PWM :



Σχήμα 4.4 Ορισμός της τεχνικής Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM)
 (α) Κυματομορφές αναφοράς και φορέα
 (β) Κυματομορφή της τάσης εξόδου του συγκριτή
 (γ) Παλμός έναυσης του διακόπτη T_3
 (δ) Παλμός έναυσης του διακόπτη T_4
 (ε) Παλμός έναυσης του διακόπτη T_1
 (ζ) Παλμός έναυσης του διακόπτη T_2
 (η) Τάση εξόδου του αντιστροφέα

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται ένα κύκλωμα ελέγχου της τάσης εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας, το οποίο κάνει χρήση της τεχνικής PWM.



Σχήμα 4.5 Κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα PWM, για έλεγχο της τάσης εξόδου [30]

Στη συνέχεια με βάση τα σχήματα 4.4 και 4.5 γίνεται ανάλυση της τεχνικής PWM.

Το κύκλωμα ελέγχου παράγει μια ημιτονοειδή κυματομορφή, η οποία λέγεται κυματομορφή αναφοράς και μια τριγωνική, η οποία λέγεται κυματομορφή φορέα. Οι δύο αυτές κυματομορφές (σχήμα 4.4) είναι συγχρονισμένες και παράγονται από αντίστοιχες γεννήτριες (σχήμα 4.5), όπου:

A_r είναι το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς

A_c είναι το πλάτος της κυματομορφής φορέα

$T_c = \frac{1}{F_c}$ είναι η περίοδος της κυματομορφής φορέα

$T_r = \frac{1}{F_r}$ είναι η περίοδος της κυματομορφής αναφοράς

$M_f = \frac{A_r}{A_c}$ είναι ο συντελεστής διαμόρφωσης (4.1)

Στη συνέχεια, οι δύο αυτές κυματομορφές εφαρμόζονται στην είσοδο ενός συγκριτή, η έξοδος του οποίου είναι η κυματομορφή που φαίνεται στο σχήμα 4.4(β). Από τα σχήματα 4.4(α) και

4.4(β) γίνεται φανερό ότι η έξοδος του συγκριτή εξαρτάται από τα σημεία τομής των δύο κυματομορφών εισόδου. Στο σχήμα 4.4(β) παρουσιάζονται δύο διαφορετικές κυματομορφές της τάσης εξόδου του συγκριτή, για δύο διαφορετικές τιμές του πλάτους A_f της κυματομορφής αναφοράς, διατηρώντας σταθερό το πλάτος A_c ενός κυματομορφής του φορέα. Επομένως, αυξομειώνοντας το συντελεστή διαμόρφωσης M_f μεταβάλλεται αντίστοιχα και η κυματομορφή της τάσης εξόδου του συγκριτή.

Το αρνητικό μέρος της τάσης εξόδου του συγκριτή ορίζει τους παλμούς έναυσης του διακόπτη T_3 . Με αναστροφή των παλμών έναυσης του διακόπτη T_3 προκύπτουν οι παλμοί έναυσης του διακόπτη T_4 . Οι παλμοί έναυσης των διακοπών T_1 και T_2 παράγονται από την κυματομορφή αναφοράς και φαίνονται στα σχήματα 4.4(ε) και 4.4(ζ).

Στο σχήμα 4.4(η) παρουσιάζεται η τάση εξόδου για τους παραπάνω παλμούς έναυσης. Όπως προκύπτει από το σχήμα αυτό, αυξομειώνοντας το συντελεστή διαμόρφωσης M_f αυξομειώνεται αντίστοιχα και το εύρος των παλμών "δ" της τάσης εξόδου.

Στο σχήμα 4.6 φαίνεται η τάση εξόδου ενός μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας, η οποία με ανάλυση κατά Fourier δίνεται από τη σχέση :

$$v_o = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=1,2,3}^{\infty} b_n \cos(n\omega t) \quad (4.2)$$

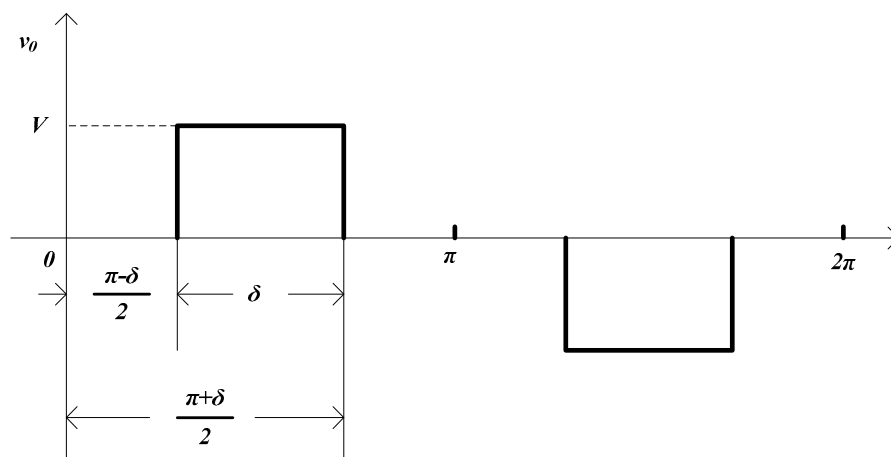
Όπου,

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V \sin(n\omega t) dt \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V \cos(n\omega t) d\omega t$$

ω είναι η κυκλική συχνότητα της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου v_o

n είναι η τάξη της αρμονικής συνιστώσας.



Σχήμα 4.6 Τάση εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα με PWM

Από το σχήμα 4.6 γίνεται φανερό ότι η τάση v_o είναι περιττή συνάρτηση με συμμετρία ενός τετάρτου κύματος (δηλαδή $f(t)=-f(t+T/2)$, T : περίοδος), άρα $b_n=0$ και οι άρτιοι συντελεστές της σχέσης (4.3) έχουν μηδενική τιμή. Με βάση τα παραπάνω, η σχέση (4.2) γίνεται :

$$v_o = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) \quad (4.5)$$

όπου,

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{2V}{n\pi} [-\cos(n\omega t)]_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} = \frac{4V}{n\pi} \sin\left(\frac{n\delta}{2}\right) \quad (4.6)$$

Από τις σχέσεις (4.5) και (4.6) προκύπτει για την τάση εξόδου :

$$v_o = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \sin(n\omega t) \quad (4.7)$$

Από την παραπάνω σχέση, το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας είναι:

$$\hat{V}_{o,1} = \frac{4V}{\pi} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (4.8)$$

Άρα, η μέγιστη τιμή του πλάτους της θεμελιώδους αρμονικής δίνεται για $\delta=180^\circ$ και είναι :

$$\hat{V}_{o,1(\max)} = \frac{4V}{\pi} = 1,27V \quad (4.9)$$

όπου,

V είναι η DC τάση εισόδου του αντιστροφέα.

Παρατηρώντας τη σχέση (4.7) γίνεται φανερό ότι η τάση εξόδου είναι μια κυματομορφή, η οποία αποτελείται από τη θεμελιώδη (χρήσιμη) αρμονική συνιστώσα και από τις ανώτερες ή παρασιτικές (ανεπιθύμητες) αρμονικές συνιστώσες. Οι παρασιτικές αρμονικές πρέπει να εξαλειφθούν ή να μειωθούν έτσι, ώστε η τάση εξόδου να είναι καθαρά ημιτονοειδής κυματομορφή και να παρουσιάζει " Συντελεστή Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion- THD factor)" μικρότερο του 5%. Η τιμή του συντελεστή αυτού δίνεται στις προδιαγραφές του κατασκευαστή και υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\text{THD}\% = \frac{1}{\hat{V}_{o,1}} \left[\sum_{n=3,5}^{\infty} (\hat{V}_{o,n})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \times 100 \quad (4.10)$$

όπου,

$\hat{V}_{o,1}$ = πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου

$\hat{V}_{o,n}$ = πλάτος της n-οστης αρμονικής της τάσης εξόδου

4.3.2 Εξάλειψη ανώτερων αρμονικών με την τεχνική Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (SPWM).

Όπως αναφέρεται και πιο πάνω, όταν η τάση εξόδου του αντιστροφέα είναι τετραγωνικής μορφής περιέχει παρασιτικές συνιστώσες, οι οποίες τις περισσότερες φορές ανάλογα με τη φύση του φορτίου πρέπει να εξαλειφθούν ή να μειωθούν. Αυτό γίνεται με τη χρήση ενός LC φίλτρου, του οποίου το βάρος, το κόστος και ο όγκος είναι αρκετά μεγάλο. Γι' αυτό το λόγο, σήμερα όλοι οι τελευταίας τεχνολογίας αντιστροφέας, αντί να παράγουν τετραγωνικής μορφής τάση παράγουν μία τάση πολλαπλών παλμών, όπως είναι αυτή του σχήματος 4.7(γ). Όπως βλέπουμε η κυματομορφή του σχήματος 4.7(γ) αρχίζει με παλμούς μικρού εύρους (το πλάτος είναι πάντοτε σταθερό) και όσο πλησιάζει το 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 αυτή του σχήματος 4.6 (ή 4.4(η)) και κατά συνέπεια ο αντιστροφέας χρειάζεται μικρότερο φίλτρο εξόδου. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί αναλύοντας τη κυματομορφή του σχήματος 4.7(γ) με σειρές Fourier. Η τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται για την δημιουργία της κυματομορφής πολλαπλών παλμών ονομάζεται Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM). Στο σχήμα 4.7(β) παρουσιάζονται οι παλμοί οδήγησης των MOSFET για την δημιουργία της τάσης του σχήματος 4.7(γ). Στο σχήμα 4.7 :

A_r = πλάτος κυματομορφών αναφοράς

A_c = πλάτος κυματομορφής φορέα

$T_c = 1/F_c$ = περίοδος κυματομορφής αναφοράς

$T_r = 1/F_r$ = περίοδος κυματομορφής φορέα

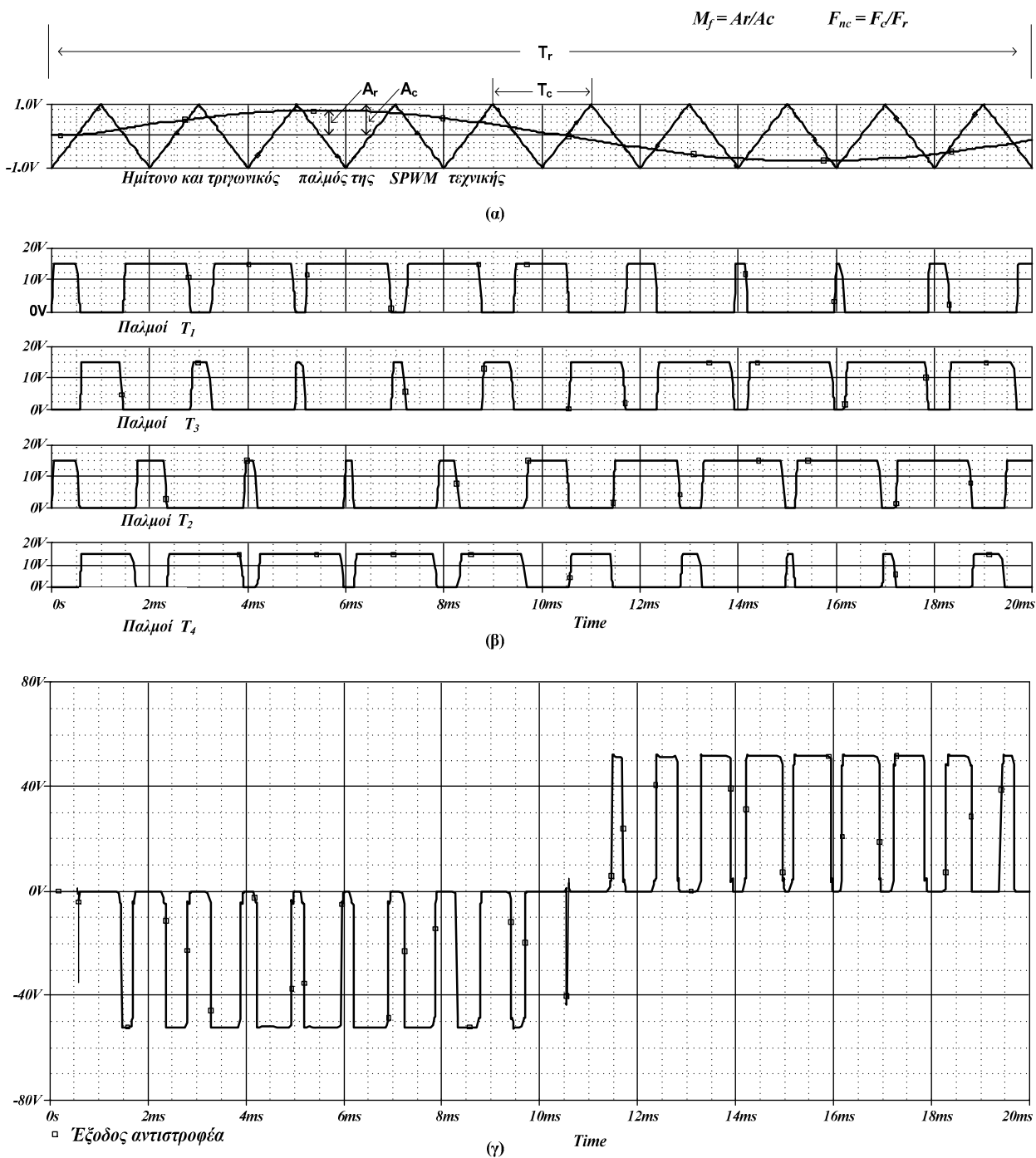
$M_f = A_r/A_c$ = συντελεστής διαμόρφωσης (Modulation factor)

$F_{nc} = F_c/F_r$ = ανοιγμένη συχνότητα φορέα

Η τάση εξόδου στη περίπτωση της SPWM τεχνικής ελέγχεται από πλευράς RMS τιμής με την αυξομείωση του εύρους των πολλαπλών παλμών ενώ η συχνότητα ελέγχεται με την αυξομείωση της περιόδου του κύκλου λειτουργίας του αντιστροφέα.

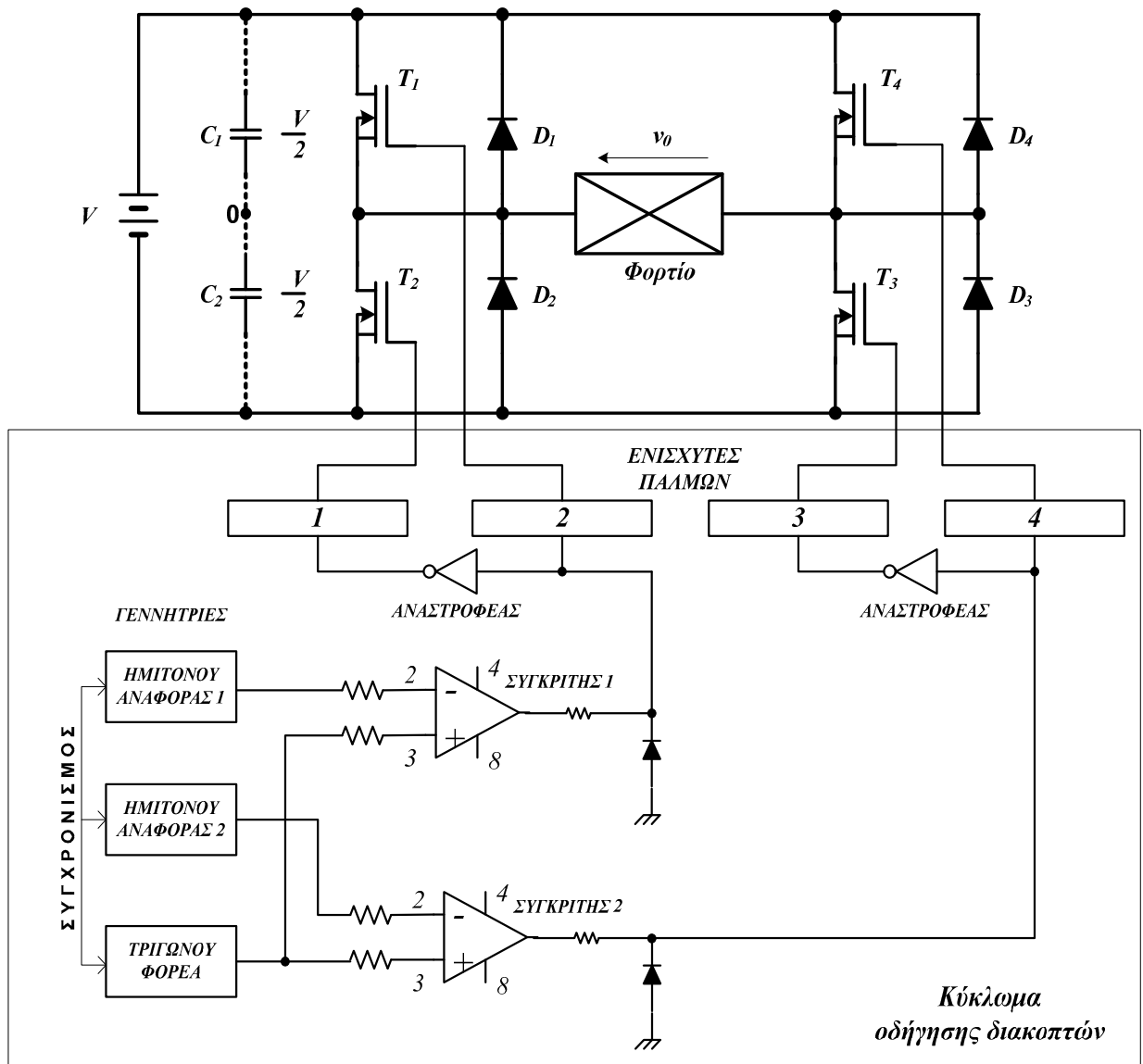
Όταν χρησιμοποιείται η τεχνική της SPWM, η RMS τιμή της θεμελιώδους ή βασικής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι $\frac{V \cdot M_f}{\sqrt{2}}$ όπου V είναι η τάση εισόδου του αντιστροφέα. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.7(α), το M_f είναι ο λόγος του πλάτους του ημιτόνου προς το πλάτος του τριγωνικού παλμού. Το πλάτος του τριγωνικού παλμού παραμένει σταθερό με αποτέλεσμα αυξομειώνοντας το πλάτος του ημιτόνου να αυξομειώνονται τα εύρη των παλμών έναυσης και κατά συνέπεια να αυξομειώνεται η RMS τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας. Οι παλμοί έναυσης προκύπτουν από την έξοδο δύο τελεστικών ενισχυτών (συγκριτών). Ο ένας συγκριτής συγκρίνει το ημίτονο και τον τριγωνικό παλμό όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7(α), ο δε δεύτερος συγκρίνει τον ίδιο τριγωνικό παλμό με ένα ημίτονο που έχει 180° διαφορά φάσης με αυτό του σχήματος 4.7(α). Από τον πρώτο συγκριτή

προκύπτουν οι παλμοί έναυσης για τα ημιαγωγικά στοιχεία T_1, T_2 και από τον δεύτερο για τα T_3, T_4 (σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.7 Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM).
α) Δημιουργία παλμών έναυσης με τη σύγκριση ημιτόνου και τριγωνικού παλμού.
β) Παλμοί έναυσης ημιαγωγικών στοιχείων
γ) Τάση εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το κύκλωμα παραγωγής και σύνδεσης των παλμών έναυσης του αντιστροφέα γέφυρας, στο οποίο χρησιμοποιείται η τεχνική SPWM. Στο κύκλωμα αυτό δεν περιλαμβάνεται η συνδεσμολογία για τον έλεγχο της τάσης εξόδου. Σημειώνεται ότι οι παλμοί έναυσης που δημιουργούνται με την τεχνική SPWM είναι ίδιοι αν χρησιμοποιηθούν τρανζίστορ ισχύος, MOSFETs, IGBTs ή άλλα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία ισχύος.



Σχήμα 4.8 Κύκλωμα αντιστροφέα, ο οποίος χρησιμοποιεί την τεχνική SPWM [30].

Με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού σε Η/Υ μπορούν να υπολογιστούν τα σημεία τομής μεταξύ των κυματομορφών αναφοράς και φορέα, για διάφορες τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης M_f και της ανοιγμένης συχνότητας F_{nc} . Έχοντας τις τιμές των σημείων τομής, με ανάλυση κατά Fourier μπορεί να βρεθεί το φάσμα συχνοτήτων της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα $v_o(\omega t)$. Με ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων της τάσης v_o και για διάφορες τιμές των M_f και F_{nc} προκύπτει ο πίνακας 4.1, με τις RMS τιμές των αρμονικών συνιστωσών της

SPWM τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Οι τιμές αυτές είναι ανοιγμένες ως προς την τάση εισόδου V .

Πίνακας 4.1 RMS τιμές των αρμονικών συνιστωσών της SPWM τάσης εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα

M_f	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Αρμονική συνιστώσα	Ανοιγμένη τιμή πλάτους αρμονικής ως προς την τάση εισόδου V				
Θεμελιώδης	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$2F_{nc} \pm 1$	0,190	0,326	0,370	0,314	0,181
$2F_{nc} \pm 3$	—	0,024	0,071	0,139	0,212
$2F_{nc} \pm 5$	—	—	—	0,013	0,033

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι :

1. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα δίνεται από τη σχέση :

$$\hat{V}_{o,1} = V \times M_f \quad (4.11)$$

όπου,

V είναι η τάση εισόδου του αντιστροφέα και $0 < M_f \leq 1$

2. Η ανοιγμένη τιμή της συχνότητας του φορέα F_{nc} , πρέπει να είναι ζυγός αριθμός, έτσι ώστε να μηδενιστούν οι ανώτερες αρμονικές συνιστώσες της τάσης εξόδου V_o , οι οποίες βρίσκονται στη συχνότητα F_{nc} .
3. Οι τιμές της συχνότητας και του πλάτους της κυριαρχούσας αρμονικής συνιστώσας (dominant harmonic component) d , πρέπει να είναι γνωστές προκειμένου να σχεδιαστεί το φίλτρο εξόδου του αντιστροφέα και δίνονται από τη σχέση :

$$d = 2F_{nc} - 1 \quad (4.12)$$

όπου,

$$F_{nc} = \text{ανοιγμένη συχνότητα του φορέα} = \frac{F_c}{F_r} \quad (\text{βλ. σχήμα 4.7})$$

$$\hat{V}_{o,d(\max)} \text{ (μέγιστο πλάτος κυριαρχούσας αρμονικής συνιστώσας, το οποίο δίνεται όταν } M_f = 0,6 \text{ και δεν επηρεάζεται από την τιμή του } F_{nc}) = 0,370V \quad (4.13)$$

Η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα είναι αυτή που παρουσιάζει το μέγιστο συντελεστή παραμόρφωσης, ο οποίος δίνεται από τη σχέση :

$$D_n \% = 100 \left(\frac{\hat{V}_{o,n}}{n^2} \right) \quad (4.14)$$

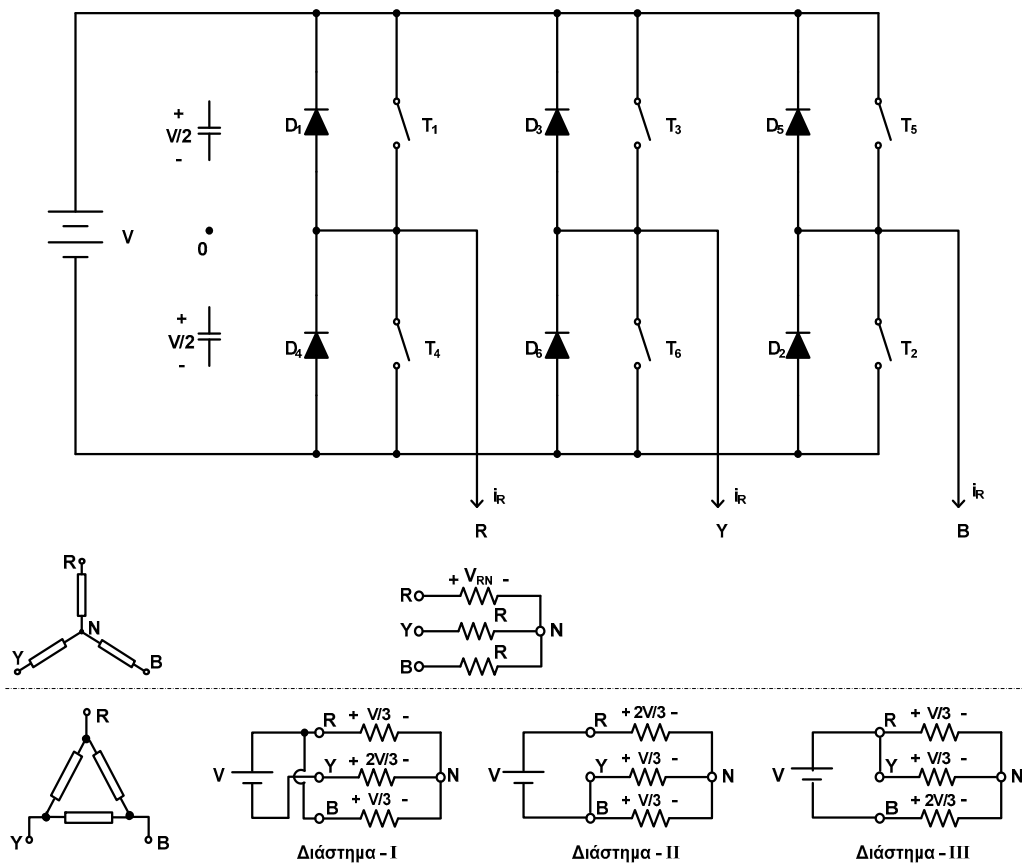
όπου,

$$\hat{V}_{o,n(\max)} = \text{πλάτος της } n\text{-οστής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου } v_o$$

n = τάξη της αρμονικής συνιστώσας

4.4 Τριφασικός αντιστροφέας με πηγή τάσης (Three-Phase Voltage Source Inverter)

Ο τριφασικός αντιστροφέας με πηγή τάσης είναι η πλέον δημοφιλής τοπολογία για τη μετατροπή συνεχούς τάσης σε τριφασική εναλλασσόμενη, ελεγχόμενου πλάτους της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας και ελεγχόμενης συχνότητας. Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος ενός τριφασικού αντιστροφέα, στο οποίο τα διακοπτικά στοιχεία που συμβολίζονται με T_1 έως T_6 μπορούν να είναι MOSFET ισχύος ή GTOs ή IGBTs, ή Θυρίστορες, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ εξόδου του αντιστροφέα [30].



Σχήμα 4.9 Κύκλωμα ισχύος τριφασικού αντιστροφέα και ισοδύναμα κυκλώματα για τη σχεδίαση των τάσεων εξόδου.

Ο αντιστροφέας αυτός αποτελείται από τρεις αντιστροφείς ημιγέφυρας, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα και έχουν την ίδια κυματομορφή τάσης εξόδου σε σχέση με το υποθετικό ουδέτερο σημείο "0", αλλά με μετατόπιση 120° μεταξύ τους. Επομένως, για τον αντιστροφέα του σχήματος 4.9 ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις :

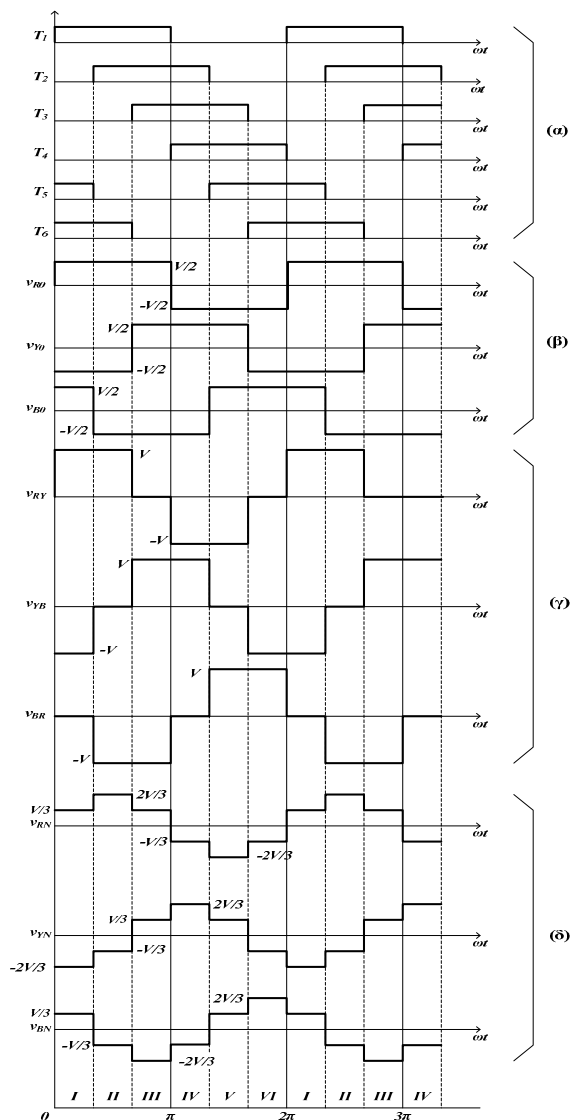
$$v_{R0}(\omega t) = v_{Y0}(\omega t - 120^\circ) = v_{B0}(\omega t - 240^\circ) \tag{4.15}$$

$$v_{RY}(\omega t) = v_{R0}(\omega t) - v_{Y0}(\omega t) \tag{4.16}$$

$$v_{YB}(\omega t) = v_{Y0}(\omega t) - v_{B0}(\omega t) \tag{4.17}$$

$$v_{BR}(\omega t) = v_{B0}(\omega t) - v_{R0}(\omega t) \tag{4.18}$$

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του αντιστροφέα για παλμούς έναυσης των διακοπών T1 – T6 με διάρκεια 180°, έτσι ώστε οι παλμοί των πολικών τάσεων εξόδου του αντιστροφέα [v_{RY}(ωt), v_{YB}(ωt), v_{BR}(ωt)] να έχουν εύρος 120°.



Σχήμα 4.10 Κυματομορφές αντιστροφέα για παλμούς έναυσης 180°.

- (α) Παλμοί έναυσης διακοπών T₁ - T₆
- (β) Τάσεις εξόδου ως προς το υποθετικό ουδέτερο σημείο "0"
- (γ) Πολικές τάσεις εξόδου
- (δ) Φασικές τάσεις εξόδου

Σημειώνεται ότι όταν είναι γνωστές οι κυματομορφές εξόδου του αντιστροφέα, τότε μπορούν να βρεθούν και οι παλμοί έναυσης των διακοπών ή αντίστροφα, αν είναι γνωστοί οι παλμοί έναυσης των διακοπών, τότε μπορούν να βρεθούν οι τάσεις εξόδου του αντιστροφέα, ανεξάρτητα από το είδος του φορτίου, το οποίο μπορεί να είναι συμμετρικό ή μη και να έχει οποιοδήποτε συνδυασμό ωμικής, επαγωγικής και χωρητικής αντίστασης. Από το σχήμα 4.10 προκύπτει ότι η λειτουργία του αντιστροφέα, σε μια περίοδο της τάσης εξόδου μπορεί να διαιρεθεί σε έξι διαστήματα. Στα διαστήματα αυτά για να προκύψουν οι αντίστοιχες τάσεις εξόδου, πρέπει οι διακόπτες του αντιστροφέα να άγουν με την παρακάτω σειρά :

<u>Χρονικό διάστημα</u>	<u>Διακόπτες σε αγωγή</u>
I	1,5,6
II	1,2,6
III	1,2,3
IV	2,4,3
V	5,4,3
VI	5,4,6

Επομένως, σε κάθε διάστημα λειτουργίας άγουν πάντα τρεις διακόπτες (δύο από τους πάνω και ένας από τους κάτω ή αντίστροφα). Η τάση εξόδου του αντιστροφέα v_{R0} εκφράζεται με την παρακάτω σειρά Fourier :

$$v_{R0} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \hat{V}_{R0,n} \sin(n\omega t) \quad (4.19)$$

όπου,

“0” είναι το υποθετικό ουδέτερο σημείο, που μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές (σχήμα 4.9) και χρησιμοποιείται μόνο σε θεωρητικές και πειραματικές εφαρμογές, προκειμένου να διαπιστωθεί η καλή λειτουργία κάθε ημιγέφυρας του τριφασικού αντιστροφέα.

Το πλάτος της n-οστής αρμονικής συνιστώσας της τάσης v_{R0} είναι :

$$\hat{V}_{R0,n} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{V}{2} \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{V}{2} \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{2V}{n\pi} \quad (4.20)$$

Από τις (4.19) και (4.20) προκύπτει ότι :

$$v_{R0} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (4.21)$$

Επίσης, για τις άλλες δύο φάσεις ισχύουν οι σχέσεις :

$$v_{B0} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \sin n(\omega t - 240^\circ) \quad (4.22)$$

$$v_{B0} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{2V}{n\pi} \sin n(\omega t - 240^\circ) \quad (4.23)$$

Για τις πολικές τάσεις εξόδου του αντιστροφέα ισχύουν τα παρακάτω :

$$v_{RY} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \hat{V}_{RY,n} \sin n(\omega t + 30^\circ) \quad (4.24)$$

όπου,

$\hat{V}_{RY,n}$ είναι το πλάτος της n-οστής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης v_{RY} και δίνεται από τη σχέση :

$$\begin{aligned} \hat{V}_{RY,n} &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t = \\ &= \frac{4}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{4}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V \sin(n\omega t) d\omega t = \\ &= \frac{4V}{\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Επομένως, οι πολικές τάσεις εξόδου του αντιστροφέα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$v_{RY} = \sum_{n=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin n(\omega t + 30^\circ) \quad (4.26)$$

$$v_{YB} = \sum_{n=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin n(\omega t + 30^\circ - 120^\circ) \quad (4.27)$$

$$v_{BR} = \sum_{n=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \sin n(\omega t + 30^\circ - 240^\circ) \quad (4.28)$$

Για τις φασικές τάσεις φορτίου ισχύουν τα παρακάτω :

$$v_{RN} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \hat{V}_{RN,n} \sin(n\omega t) \quad (4.29)$$

όπου,

$\hat{V}_{RN,n}$ είναι το πλάτος της n-οστής αρμονικής συνιστώσας της φασικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα και δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\begin{aligned}
\hat{V}_{RN,n} &= \frac{T}{2} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t = \\
&= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t = \\
&= \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/3} \frac{V}{3} \sin(n\omega t) d\omega t + \frac{\pi}{4} \int_{\pi/3}^{\pi/2} \frac{2V}{3} \sin(n\omega t) d\omega t = \\
&= \frac{4V}{3n\pi} \left(1 + \cos \frac{n\pi}{3} \right)
\end{aligned} \tag{4.30}$$

Επομένως οι φασικές τάσεις φορτίου δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$v_{RN} = \sum_{n=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \left(1 + \cos \frac{n\pi}{3} \right) \sin n(\omega t) \tag{4.31}$$

$$v_{YN} = \sum_{n=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \left(1 + \cos \frac{n\pi}{3} \right) \sin n(\omega t - 120^\circ) \tag{4.32}$$

$$v_{BN} = \sum_{n=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \left(1 + \cos \frac{n\pi}{3} \right) \sin n(\omega t - 240^\circ) \tag{4.33}$$

όπου,

V είναι η τάση εισόδου του αντιστροφέα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10, οι τάσεις εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα είναι τετραγωνικές κυματομορφές, που περιέχουν ανώτερες αρμονικές, οι συχνότητες των οποίων βρίσκονται κοντά στη θεμελιώδη αρμονική συνιστώσα. Η εξάλειψη ή η μείωση αυτών των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός φίλτρου εξόδου, μεταξύ της εξόδου του αντιστροφέα και του φορτίου. Το μέγεθος, το βάρος και το κόστος του φίλτρου μπορεί να μειωθεί κατά πολύ με τεχνικές, όπως η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM), η οποία αναλύεται στη συνέχεια.

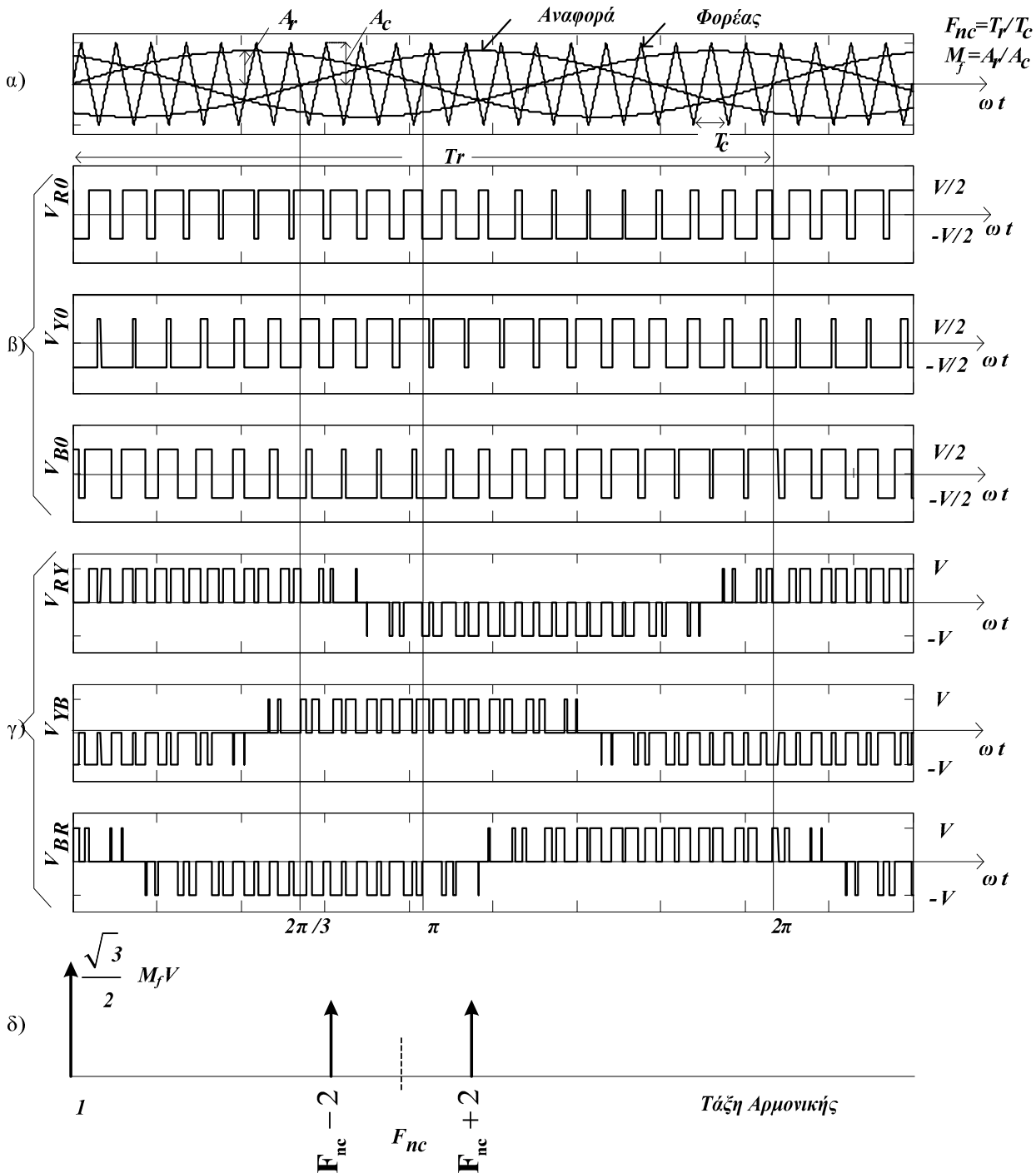
Η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών για τον τριφασικό αντιστροφέα χρησιμοποιεί τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς (μία για κάθε ημιγέφυρα) και μία τριγωνική κυματομορφή φορέα (σχήμα 4.11α). Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς A_r είναι μεταβλητό σε σχέση με το πλάτος της κυματομορφής του φορέα A_c , το οποίο παραμένει σταθερό. Η τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης, καθώς και της ανοιγμένης συχνότητας του φορέα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$M_r = \frac{A_r}{A_c} \tag{4.34}$$

$$F_{nc} = \frac{F_c}{F_r} \tag{4.35}$$

Όπως στην περίπτωση της τεχνικής SPWM του μονοφασικού αντιστροφέα, έτσι και στον τριφασικό αντιστροφέα, τα σημεία τομής των κυματομορφών αναφοράς και φορέα ορίζουν τις

κυματομορφές των παλμών έναυσης των ημιαγωγικών διακοπών S1 – S6, καθώς και τις τάσεις εξόδου των τριών ημιγεφυρών, σε σχέση με το υποθετικό ουδέτερο σημείο "0". Οι κυματομορφές των φασικών τάσεων του αντιστροφέα v_{R0} , v_{Y0} και v_{B0} παρουσιάζονται στο σχήμα 4.11 β) και έχουν διαφορά φάσης 120° .



Σχήμα 4.11 Ορισμός της τεχνικής SPWM για τριφασικούς αντιστροφείς

- α) Κυματομορφές αναφορών και φορέα
- β) Φασικές τάσεις εξόδου v_{R0} , v_{Y0} και v_{B0}
- γ) Πολικές τάσεις εξόδου v_{RY} , v_{YB} και v_{BR}
- δ) Φάσμα συχνοτήτων της πολικής τάσης v_{RY}

Από τις κυματομορφές του σχήματος 4.11 β) μπορούν να βρεθούν οι πολικές τάσεις εξόδου του αντιστροφέα, οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις (4.16), (4.17) και (4.18).

Με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού σε H/Y μπορούν να υπολογιστούν τα σημεία τομής των κυματομορφών αναφοράς και φορέα, για διάφορες τιμές των μεταβλητών της τεχνικής SPWM (δηλαδή του συντελεστή διαμόρφωσης M_f και της ανοιγμένης συχνότητας F_{nc}). Με το ίδιο λογισμικό και με τις τιμές των σημείων τομής για κάποιες συγκεκριμένες τιμές των M_f και F_{nc} μπορεί να βρεθεί το φάσμα συχνοτήτων της κυματομορφής $v_{R0}(\omega t)$, το οποίο είναι το ίδιο και για τις κυματομορφές $v_{Y0}(\omega t)$ και $v_{B0}(\omega t)$ και παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2. Σημειώνεται ότι οι τιμές αυτές είναι ανοιγμένες ως προς την τάση εισόδου V του αντιστροφέα.

Πίνακας 4.2 RMS τιμές των αρμονικών συνιστωσών της SPWM τάσης εξόδου τριφασικού αντιστροφέα [30]

M_f	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Αρμονική συνιστώσα	RMSτιμή αρμονικής, ανοιγμένη ως προς την τάση εισόδου V				
Θεμελιώδης	0,122	0,245	0,36	0,490	0,612
$2F_{nc} \pm 1$	0,010	0,037	0,080	0,135	0,195
$2F_{nc} \pm 2$	---	---	---	0,005	0,011
$2F_{nc} \pm 4$	---	---	---	---	---

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι :

1. Το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα είναι :

$$\hat{V}_{RY,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} VM_f \text{ Volts} \quad (4.36)$$

όπου, V είναι η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα

2. Οι τιμές του πλάτους και της τάξης της κυριαρχούσας ανώτερης αρμονικής συνιστώσας, οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατασκευή του φίλτρου εξόδου και που είναι ανεξάρτητες από την τιμή του M_f δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$d = F_{nc} - 2 \quad (4.37)$$

$$\hat{V}_{(RY,d)\max} = 0.27 \text{ Volts (για } M_f = 1) \quad (4.38)$$

3. Η τιμή της συχνότητας του φορέα επιλέγεται έτσι, ώστε η ανοιγμένη συχνότητα F_{nc} να είναι περιττός αριθμός πολλαπλάσιος του 3, για να μην περιέχει η τάση εισόδου ζυγές αρμονικές συνιστώσες.

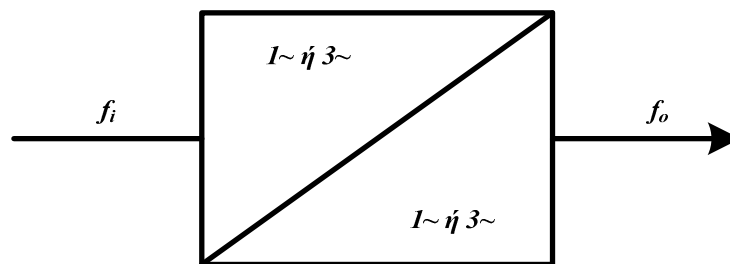
Από τον πίνακα 4.2 προκύπτει επίσης, ότι το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας μεταβάλλεται με το συντελεστή διαμόρφωσης M_f . Επομένως, με την τεχνική SPWM επιτυγχάνεται και ο έλεγχος της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μέσω του συντελεστή διαμόρφωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΚΥΚΛΟΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Ένας κυκλομετατροπέας μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση εισόδου του σε εναλλασσόμενη τάση στην έξοδό του, αλλά διαφορετικής συχνότητας, χωρίς να απαιτείται ενδιάμεση βαθμίδα μετατροπής της τάσης σε συνεχή (σχήμα 5.1). Η αρχή λειτουργίας αυτού του μετατροπέα αναπτύχθηκε στις αρχές του 1930, με χρησιμοποίηση υδραργυρικών διακοπτικών στοιχείων, με έλεγχο από την τάση του δικτύου. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε αρχικά στο Γερμανικό ηλεκτρικό σιδηρόδρομο, όπου η τριφασική εναλλασσόμενη τάση εισόδου, συχνότητας 50 Hz μετατρεπόταν σε μονοφασική εναλλασσόμενη τάση στη συχνότητα των $16\frac{2}{3}$ Hz. Επίσης, στις ΗΠΑ λειτουργούσε για αρκετά χρόνια μια διάταξη ελέγχου της ταχύτητας σύγχρονου κινητήρα 400 HP, η οποία περιλάμβανε έναν κυκλομετατροπέα με ογδόντα θυρίστορ [40].



Σχήμα 5.1 Δομικό διάγραμμα κυκλομετατροπέα

Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος, τόσο για τον έλεγχο της λειτουργίας σύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων, όσο και σε συστήματα για τη ρύθμιση της συχνότητας της τάσης διαφόρων πηγών ισχύος (συσσωρευτές, φωτοβολταϊκές γεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, κ.λπ.) προκειμένου αυτές να διασυνδεθούν σε δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος.

5.2 Είδη κυκλομετατροπέων, [40]

Υπάρχουν τρία βασικά είδη κυκλομετατροπέων :

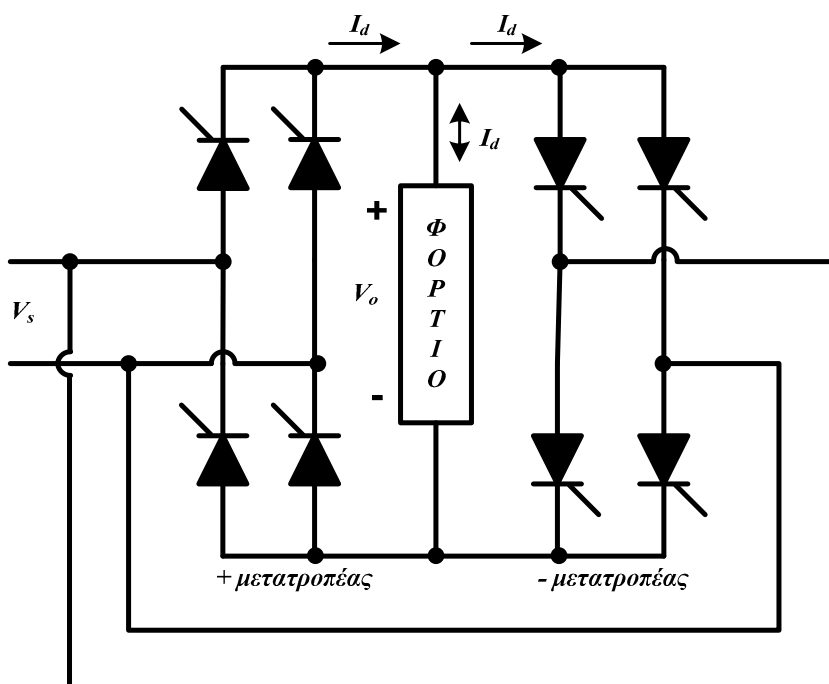
- 1) Κυκλομετατροπείς ελέγχου φάσης (phase-controlled), οι οποίοι συνήθως χρησιμοποιούν θυρίστορ, λόγω της ευκολίας που παρουσιάζουν στον έλεγχο για τη μετατροπή των φάσεων.
- 2) Κυκλομετατροπείς τύπου μήτρας (ac-ac matrix converters), οι οποίοι χρησιμοποιούν μικρότερο αριθμό διακοπτικών στοιχείων από τους προηγούμενους.
- 3) Υψηλής συχνότητας κυκλομετατροπείς (high frequency ac-ac (hfac-ac) converters), οι οποίοι χρησιμοποιούν IGBTs, λόγω της ικανότητας των διακοπτικών αυτών στοιχείων να λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες και πλεονεκτούν σε σχέση με τους προηγούμενους στο ότι εμφανίζουν

πολύ καλύτερης ποιότητας κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου, επομένως απαιτείται μικρότερο φίλτρο στην έξοδο.

5.2.1 Κυκλομετατροπείς ελέγχου φάσης (phase-controlled)

1. Κυκλομετατροπέας από μονοφασικός σε μονοφασικό (1φ-1φ)

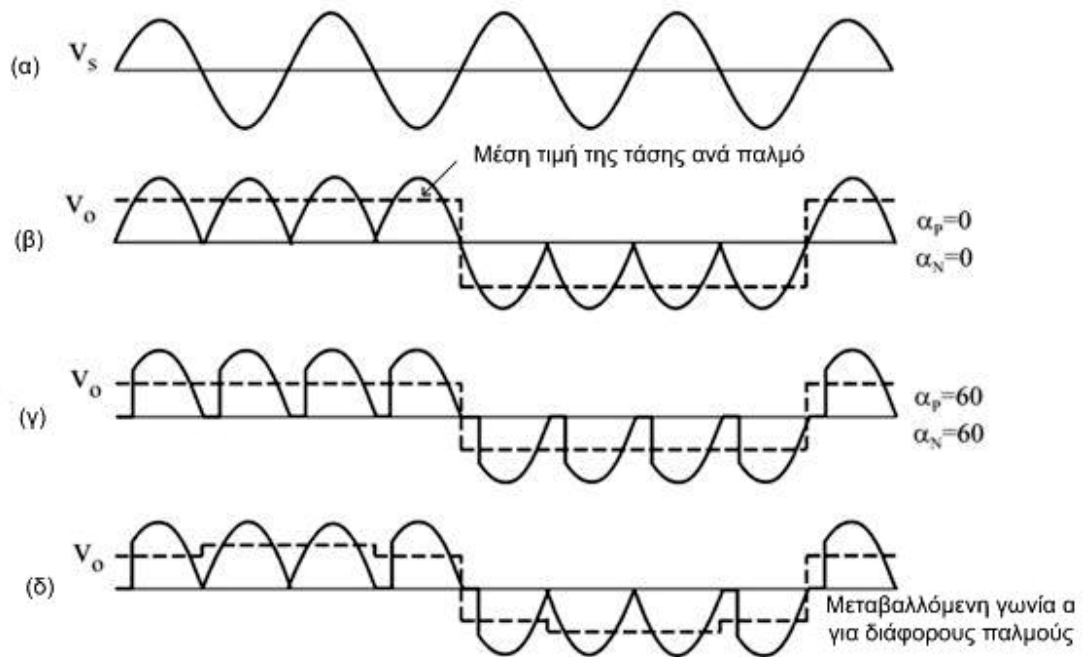
Αυτός ο κυκλομετατροπέας αποτελείται από μια αντιπαράλληλη σύνδεση δύο κυκλωμάτων ανορθωτών γέφυρας (σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2 Κυκλομετατροπέας από μονοφασικό σε μονοφασικό (1φ – 1φ)

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του παραπάνω κυκλομετατροπέα με ωμικό φορτίο. Η τάση εισόδου v_s είναι εναλλασσόμενη στη συχνότητα f_1 , όπως δείχνει το σχήμα 5.3α. Οι κυματομορφές αυτές έχουν παραχθεί για διάφορες γωνίες έναυσης των θυρίστορ. Σημειώνεται ότι οι γωνίες έναυσης συμβολίζονται με α_p για το θετικό μετατροπέα (ανορθωτή) και με α_n για τον αρνητικό.

Κατά τις δύο πρώτες περιόδους της τάσης εισόδου v_s , λειτουργεί ο θετικός μετατροπέας, ο οποίος ανορθώνει την τάση εισόδου, παρέχοντας ηλεκτρικό ρεύμα στο φορτίο. Η τάση εξόδου αποτελείται από τέσσερις θετικές ημιπεριόδους της τάσης εισόδου (σχήμα 5.3(β)). Κατά τις επόμενες δύο περιόδους της τάσης εισόδου λειτουργεί ο αρνητικός μετατροπέας, ο οποίος τροφοδοτεί το φορτίο με ρεύμα, αλλά με αντίθετη φορά. Οι κυματομορφές του ρεύματος είναι ίδιες με αυτές της τάσης, αφού το φορτίο είναι ωμικό. Σημειώνεται ότι όταν λειτουργεί ο ένας μετατροπέας, ο άλλος δεν λειτουργεί, κι έτσι δεν κυκλοφορεί ρεύμα μεταξύ των δύο μετατροπέων.



Σχήμα 5.3 Κυματομορφές κυκλομετατροπέα από μονοφασικό σε μονοφασικό (1φ-1φ) [40]

- (α) Τάση εισόδου
 (β) Τάση εξόδου για μηδενική γωνία έναυσης
 (γ) Τάση εξόδου για γωνία έναυσης $\pi/3$
 (δ) Τάση εξόδου για μεταβαλλόμενη γωνία έναυσης

Η συχνότητα της τάσης εξόδου v_o είναι τέσσερις φορές μικρότερη από αυτή της τάσης εισόδου v_s , δηλαδή $f_o/f_i = 1/4$. Επομένως, αυτός είναι ένας κυκλομετατροπέας υποβιβασμού της συχνότητας. Ο κυκλομετατροπέας αυτός μπορεί να λειτουργεί αμφίδρομα, οπότε κατά την ανάστροφη λειτουργία, η συχνότητα της τάσης εξόδου θα είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή της τάσης εισόδου, δηλαδή $f_o/f_i = 4$. Στην περίπτωση αυτή ονομάζεται κυκλομετατροπέας ανύψωσης της συχνότητας.

Η συχνότητα f_o της τάσης εξόδου v_o μπορεί να αλλάζει με μεταβολή του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του θετικού και του αρνητικού μετατροπέα και θα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας f_i της τάσης εισόδου, σε έναν 1φ-1φ κυκλομετατροπέα.

Η μέση τιμή (dc) της τάσης εξόδου (σχήμα 5.3(β), (γ) με διακεκομμένη γραμμή) για κάθε ανορθωτή δίνεται από τη σχέση :

$$V_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cos \alpha \quad (5.1)$$

όπου,

V είναι η τιμή της τάσης εισόδου.

Επίσης η μέγιστη τιμή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου είναι :

$$v_{o1} = \frac{4}{\pi} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cos \alpha \quad (5.2)$$

Από τη σχέση (5.2) προκύπτει ότι η θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου εξαρτάται από την τιμή της γωνίας έναυσης α .

$$\text{Για } \alpha=0^\circ, V_{o1} = V_{do} \times I = V_{do} \text{ όπου } V_{do} = \frac{4}{\pi} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V$$

Για $\alpha=\pi/3$, όπως στο σχήμα 6.3.(γ), τότε : $V_{o1} = V_{do} \times 0,5$

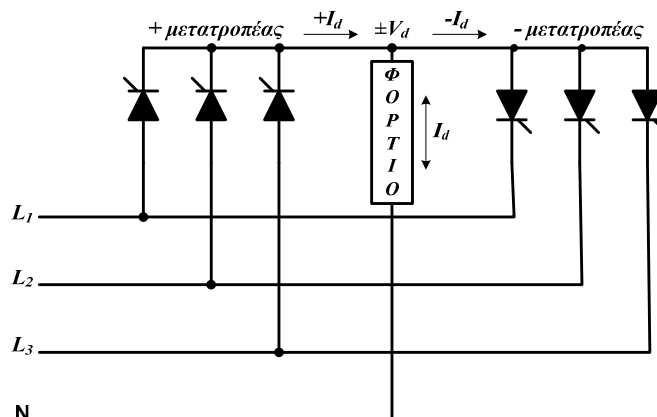
Επομένως, η τιμή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου μπορεί να ελεγχθεί με μεταβολή της γωνίας έναυσης α . Η λειτουργία με σταθερή γωνία έναυσης α δίνει μια κυματομορφή της τάσης εξόδου με πολλές αρμονικές συνιστώσες. Στα σχήματα 5.3(β) και (γ) φαίνεται με διακεκομμένες γραμμές ότι η τάση εξόδου είναι τετραγωνικός παλμός. Αν ο τετραγωνικός παλμός τροποποιούνταν, ώστε να μοιάζει περισσότερο με ημιτονοειδή κυματομορφή, τότε θα μειώνονταν οι αρμονικές συνιστώσες. Για το λόγο αυτό η κυματομορφή της τάσης εξόδου διαμορφώνεται όπως στο σχήμα 5.3(δ), όπου η τεσσάρων επιπέδων κυματομορφή (διακεκομμένη γραμμή) μοιάζει περισσότερο με ημιτονοειδή και περιέχει λιγότερες αρμονικές.

2. Κυκλομετατροπέας από τριφασικός σε μονοφασικό (3φ-1φ)

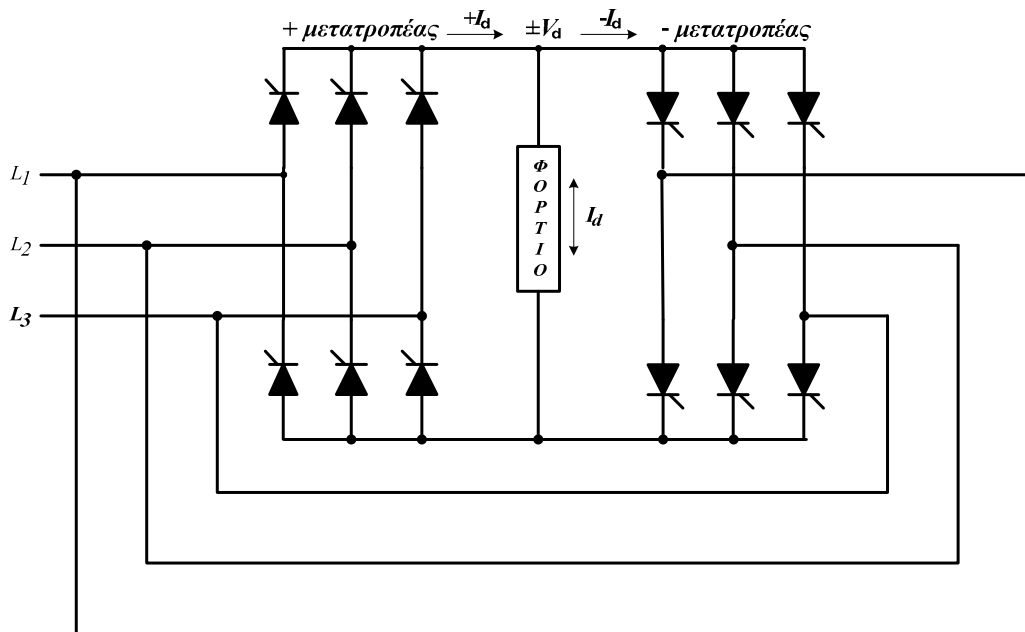
Υπάρχουν δύο είδη σε αυτόν τον τύπο κυκλομετατροπέα :

- Κυκλομετατροπέας ημιγέφυρας ή μισού κύματος (σχήμα 5.4) και
- Κυκλομετατροπέας πλήρους γέφυρας (σχήμα 5.5).

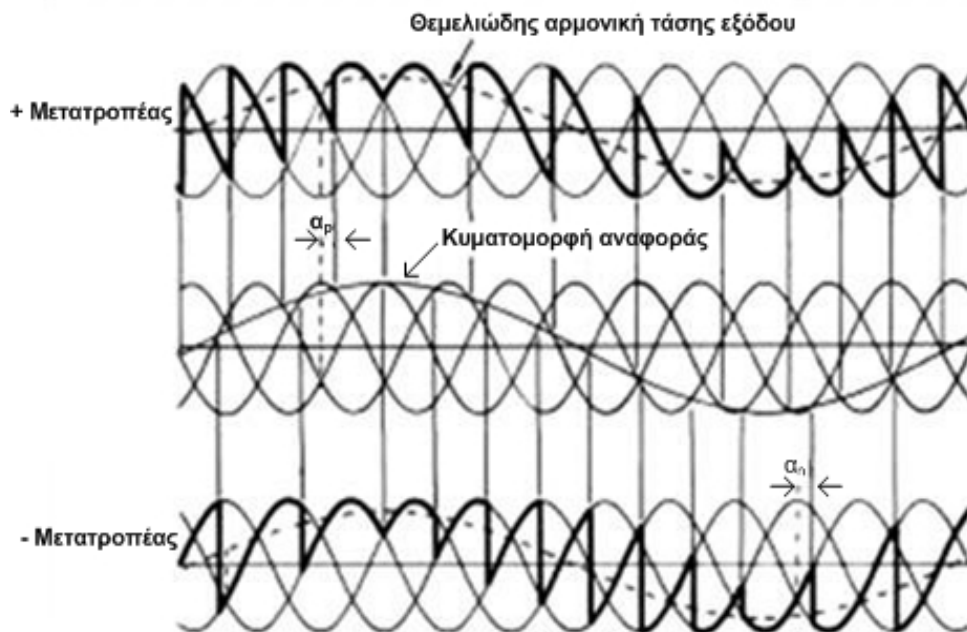
Όπως στην περίπτωση του 1φ-1φ κυκλομετατροπέα, έτσι και στον 3φ-1φ εφαρμόζεται μια ανορθωμένη τάση στο φορτίο. Και οι δύο ανορθωτές (και ο θετικός και ο αρνητικός) μπορούν να παράγουν τάσεις είτε θετικής είτε αρνητικής πολικότητας, αλλά ο θετικός ανορθωτής μπορεί να τροφοδοτεί το φορτίο μόνο με θετικό ρεύμα και ο αρνητικός ανορθωτής μόνο με αρνητικό ρεύμα. Κατά συνέπεια, ο κυκλομετατροπέας μπορεί να λειτουργεί σε τέσσερα τεταρτημόρια: : (+v, +i), (-v, -i) κατά τις φάσεις ανόρθωσης και (+v, -i), (-v, +i) κατά τις φάσεις αντιστροφής. Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τόσο της τάσης εξόδου, όσο και της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου.



Σχήμα 5.4 3φ-1φ κυκλομετατροπέας ημιγέφυρας ή μισού κύματος



Σχήμα 5.5 3φ-1φ κυκλομετατροπέας πλήρους γέφυρας



Σχήμα 5.6 Κυματομορφές 3φ-1φ κυκλομετατροπέα ημιγέφυρας [40]

Η γωνία έναυσης για το θετικό μετατροπέα συμβολίζεται με α_p , και αυτή του αρνητικού μετατροπέα συμβολίζεται με α_n . Η πολικότητα του ρεύματος καθορίζει εάν ο θετικός ή ο αρνητικός μετατροπέας παρέχει ισχύ στο φορτίο. Όταν η πολικότητα του ρεύματος αλλάζει, ο μετατροπέας που παρείχε προηγουμένως ρεύμα τίθεται εκτός λειτουργίας και ο άλλος ενεργοποιείται. Κατά τη διάρκεια της αντιστροφής της πολικότητας του ρεύματος, η μέση τάση που παρέχεται και από τους δύο μετατροπείς πρέπει να είναι ίση, ώστε να μη διαταράσσεται η

συνέχεια της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης στο φορτίο. Διαφορετικά, η μεταπήδηση από τον έναν μετατροπέα στον άλλο θα προκαλούσε μια ανεπιθύμητη απότομη αύξηση της τάσης. Για να αποτραπεί αυτό το πρόβλημα, οι μετατροπείς αναγκάζονται να παραγάγουν πάντα την ίδια μέση τάση. Κατά συνέπεια, πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω σχέση για τις γωνίες έναυσης:

$$\alpha_p + \alpha_N = \pi \quad (5.3)$$

Η θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου στο σχήμα 6.6 δίνεται από τη σχέση :

$$v_{O_1}(t) = \sqrt{2}V_o \sin \omega_o t \quad (5.4)$$

Όπου, V_o είναι η ενεργός τιμή της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου.

Τη χρονική στιγμή t_o , η V_o δίνεται από τη σχέση :

$$v_{O_1}(t_o) = \sqrt{2}V_o \sin \omega_o t_o \quad (5.5)$$

Ο θετικός μετατροπέας μπορεί να παρέχει αυτήν την τάση εάν η α_p ικανοποιεί την παρακάτω σχέση :

$$v_{O_1}(t_o) = \sqrt{2}V_o \sin \omega_o t_o = V_{do} \cos \alpha_p \quad (5.6)$$

Όπου, $V_{do} = \sqrt{2}V_o \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p}$ ($p=3$ για μετατροπέα μισού κύματος και 6 για μετατροπέα γέφυρας)

Από τις σχέσεις (3) και (6) προκύπτει η σχέση :

$$v_o = V_{do} \cos \alpha_p = -V_{do} \sin \alpha_N \quad (5.7)$$

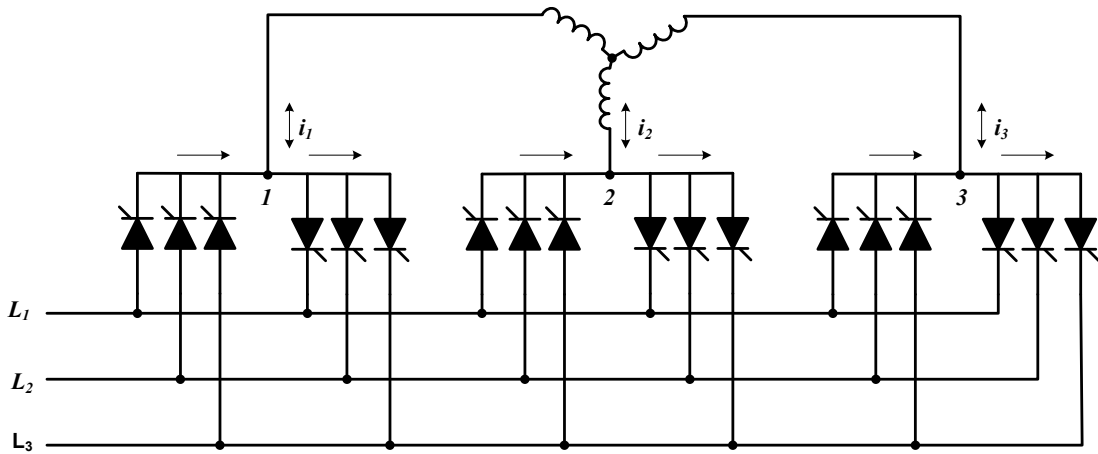
Οι γωνίες έναυσης μπορούν να υπολογιστούν οποιαδήποτε στιγμή από τις σχέσεις (5.6) και (5.7).

Η λειτουργία του 3φ-1φ κυκλομετατροπέα γέφυρας είναι παρόμοια με αυτή του παραπάνω 3φ-1φ μισού κύματος κυκλομετατροπέα, με τη διαφορά ότι σ' αυτή την περίπτωση οι παλμοί είναι έξι.

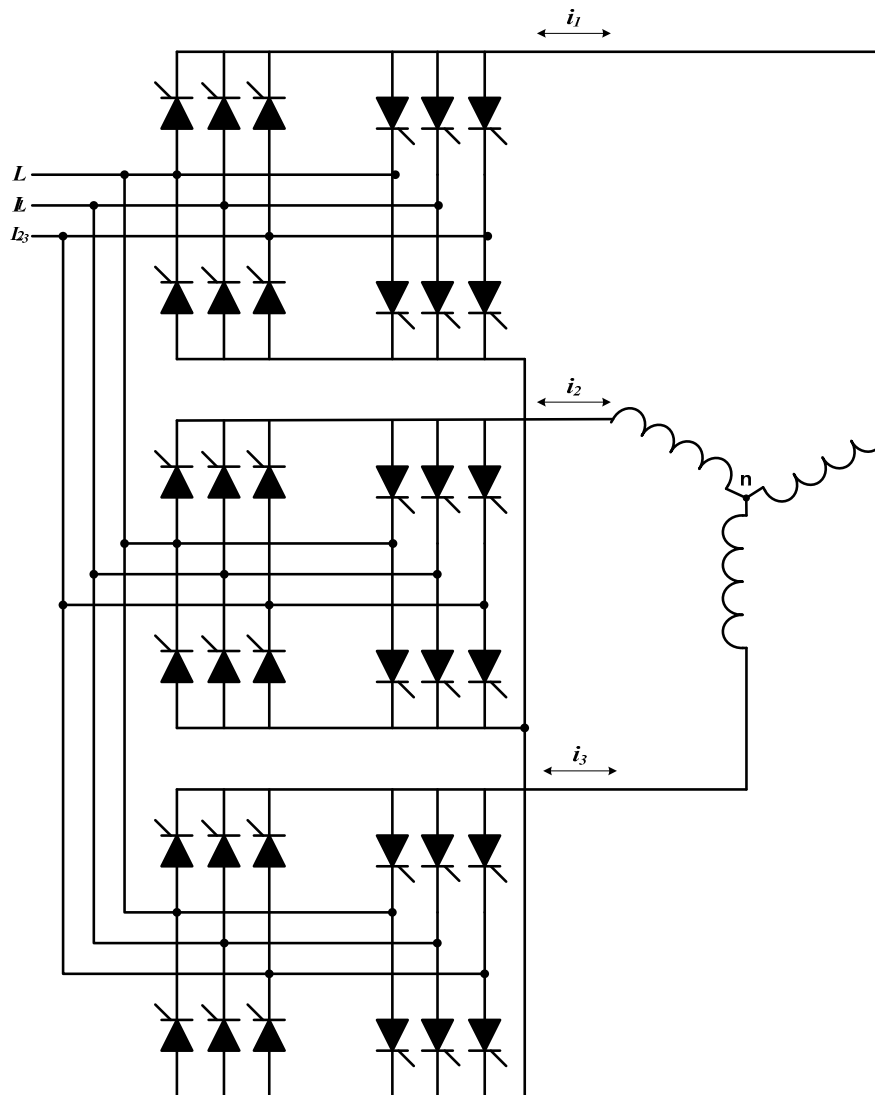
3. Κυκλομετατροπέας από τριφασικός σε τριφασικό (3φ-3φ)

Αν οι έξοδοι τριών ίδιων 3φ-1φ κυκλομετατροπέων συνδεθούν κατά αστέρα ή κατά τρίγωνο και οι τάσεις εξόδου έχουν διαφορά φάσης $2\pi/3$ μεταξύ τους, τότε προκύπτει ένας κυκλομετατροπέας από τριφασικός σε τριφασικό (3φ-3φ). Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζεται ένας 3φ-3φ κυκλομετατροπέας ημιγέφυρας (ή μισού κύματος), ο οποίος προέκυψε από τη σύνδεση τριών κυκλομετατροπέων 3φ-1φ ημιγέφυρας σε σύνδεση αστέρα. Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται ένας 3φ-3φ κυκλομετατροπέας γέφυρας, ο οποίος προέκυψε από τη σύνδεση τριών κυκλομετατροπέων 3φ-1φ γέφυρας σε σύνδεση αστέρα. Ο κυκλομετατροπέας 3φ-3φ ημιγέφυρας λέγεται και τριών παλμών, ενώ ο κυκλομετατροπέας 3φ-3φ γέφυρας λέγεται και έξι

παλμών. Η ανάλυση της λειτουργίας του 3φ-3φ κυκλομετατροπέα σε κάθε φάση είναι ίδια με αυτή που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 5.7 3φ-3φ κυκλομετατροπέας ημιγέφυρας

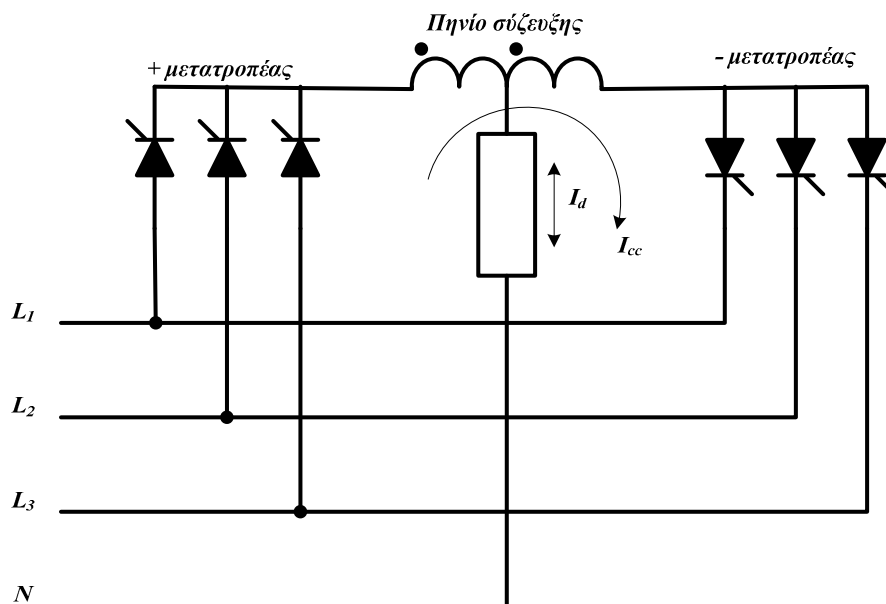


Σχήμα 5.8 3φ-3φ κυκλομετατροπέας γέφυρας

Οι κυκλομετατροπείς παράγουν πολλές αρμονικές τάσης στην έξοδο, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα.

Λειτουργία τύπου διακοπής και λειτουργία τύπου κυκλικού ρεύματος

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η πολικότητα του ρεύματος καθορίζει εάν ο θετικός ή ο αρνητικός μετατροπέας παρέχει ισχύ στο φορτίο. Όταν το ρεύμα είναι θετικό, ο θετικός μετατροπέας (ανορθωτής) παρέχει την απαιτούμενη τάση στο φορτίο και ο αρνητικός είναι απενεργοποιημένος. Αντίστροφα, όταν το ρεύμα είναι αρνητικό, ο αρνητικός μετατροπέας παρέχει την απαιτούμενη τάση στο φορτίο και ο θετικός είναι απενεργοποιημένος. Αυτή η λειτουργία λέγεται λειτουργία διακοπής και οι κυκλομετατροπείς που χρησιμοποιούν αυτή τη διαδικασία λέγονται τύπου διακοπής. Ωστόσο, εάν για οποιονδήποτε λόγο και οι δύο μετατροπείς είναι ενεργοποιημένοι, τότε γίνεται βραχυκύκλωμα. Για να αποφευχθεί αυτό το βραχυκύκλωμα, μπορεί να τοποθετηθεί ένα πηνίο σύζευξης (Inter-Group Reactor, IGR) μεταξύ των μετατροπέων όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9. Αντί να απενεργοποιούνται οι μετατροπείς κατά τη διάρκεια της αντιστροφής του ρεύματος (αν και οι δύο είναι ενεργοποιημένοι) δημιουργείται ένα κυκλικό ρεύμα. Αυτό το κυκλικό ρεύμα είναι μιας κατεύθυνσης, επειδή τα διακοπτικά στοιχεία επιτρέπουν στο ρεύμα να ρέει μόνο προς μια κατεύθυνση. Μερικοί κυκλομετατροπείς επιτρέπουν τη ροή αυτού του κυκλικού ρεύματος κάθε χρονική στιγμή και λέγονται κυκλομετατροπείς τύπου κυκλικού ρεύματος.



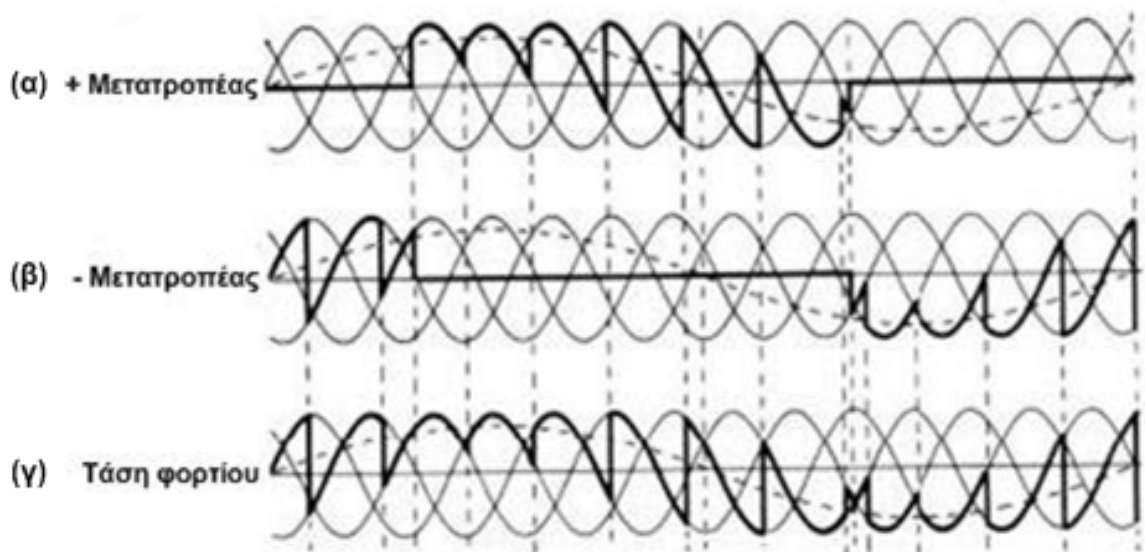
Σχήμα 5.9 Κυκλικό ρεύμα και πηνίο σύζευξης

Κυκλομετατροπείς τύπου διακοπής λειτουργίας

Η λειτουργία αυτών των κυκλομετατροπέων εξηγήθηκε εν συντομία στις προηγούμενες ενότητες. Δεν επιτρέπουν τη ροή κυκλικού ρεύματος, και επομένως δεν απαιτείται πηνίο

σύζευξης (IGR), το οποίο είναι ογκώδες. Όταν το ρεύμα μηδενίζεται, και οι δύο μετατροπείς (θετικός και αρνητικός) είναι απενεργοποιημένοι. Οι μετατροπείς παραμένουν απενεργοποιημένοι για ένα σύντομο χρονικό διάστημα τέτοιο, που να είναι βέβαιο ότι το ρεύμα στο φορτίο είναι μηδενικό. Στη συνέχεια, ανάλογα με την πολικότητα, ένας από τους μετατροπείς ενεργοποιείται. Μετά από κάθε μηδενισμό του ρεύματος ενεργοποιείται ο μετατροπέας, ο οποίος ήταν εκτός λειτουργίας πριν από το μηδενισμό.

Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζονται οι κυματομορφές λειτουργίας για έναν τριών παλμών κυκλομετατροπέα τύπου διακοπής.



Σχήμα 5.10 Κυματομορφές λειτουργίας τύπου διακοπής [40]

- (α) Τάση εξόδου + μετατροπέα
- (β) Τάση εξόδου – μετατροπέα
- (γ) Τάση φορτίου

Η λειτουργία τύπου διακοπής έχει μερικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τη λειτουργία τύπου κυκλικού ρεύματος.

Μειονεκτήματα :

1. Κατά το χρονικό διάστημα που οι μετατροπείς είναι απενεργοποιημένοι, το ρεύμα παραμένει μηδενικό, παραμορφώνοντας τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος. Αυτή η παραμόρφωση σημαίνει ανάπτυξη περισσότερων αρμονικών σε σχέση με τους κυκλομετατροπείς κυκλικού ρεύματος.
2. Η απαιτούμενη αντιστροφή του ρεύματος κάνει τον έλεγχο πιο πολύπλοκο.

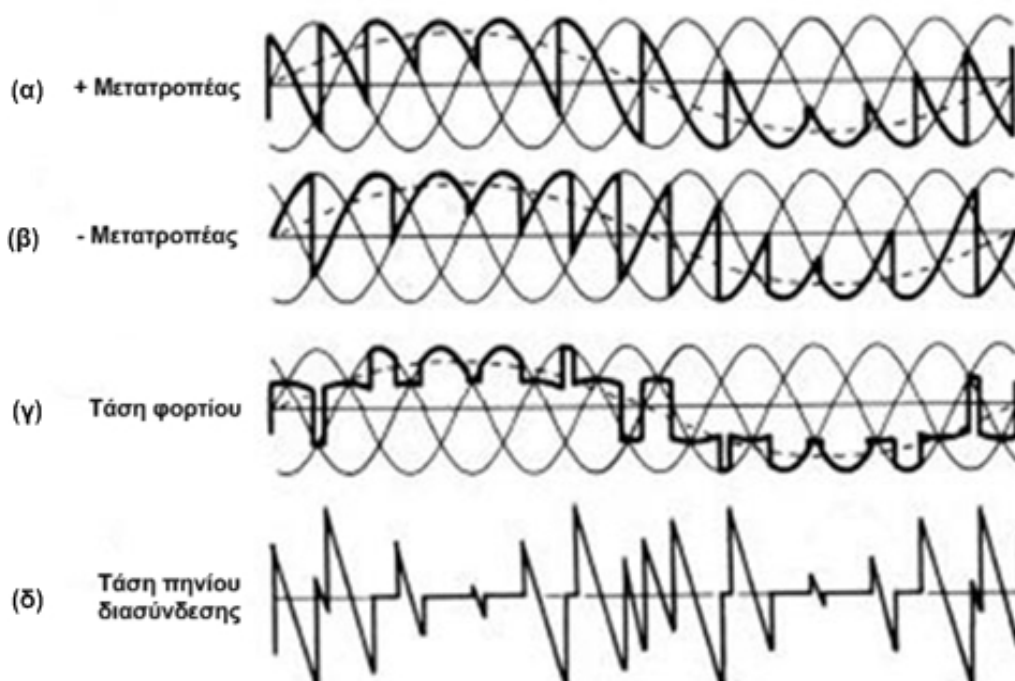
Πλεονεκτήματα :

1. Δεν απαιτείται πηνίο σύζευξης (IGR), το οποίο είναι ογκώδες, κι έτσι το μέγεθος και το κόστος είναι μικρότερο από ότι στην περίπτωση της λειτουργίας τύπου κυκλικού ρεύματος.

2. Ένας μόνο μετατροπέας είναι πάντα σε αγωγή και όχι δύο, με αποτέλεσμα να προκύπτουν λιγότερες απώλειες, άρα ο κυκλομετατροπέας να εμφανίζει υψηλότερο βαθμό απόδοσης.

Κυκλομετατροπείς τύπου κυκλικού ρεύματος

Σε αυτήν την περίπτωση, και οι δύο μετατροπείς λειτουργούν πάντα παράγοντας την ίδια θεμελιώδη αρμονική της τάσης εισόδου. Οι γωνίες έναυσης των μετατροπέων ικανοποιούν τη σχέση 6.3, κατά συνέπεια όταν ένας μετατροπέας λειτουργεί στη φάση της ανόρθωσης, ο άλλος λειτουργεί στη φάση της αντιστροφής και αντίστροφα. Εάν και οι δύο μετατροπείς παράγουν τα καθαρά ημιτονοειδείς κυματομορφές δεν δημιουργείται κυκλικό ρεύμα, επειδή η στιγμιαία πιθανή διαφορά μεταξύ των εξόδων των μετατροπέων είναι μηδενική. Στην πραγματικότητα όμως, μεταξύ των εξόδων των δύο μετατροπέων ελέγχου φάσης (είτε στη φάση ανόρθωσης είτε στη φάση αντιστροφής) συνδέεται πάντα ένα πηνίο σύζευξης (IGR). Η κυματομορφή της τάσης στα άκρα του πηνίου σύζευξης παρουσιάζεται στο σχήμα 5.11(δ) και προκύπτει από τη διαφορά των στιγμιαίων τάσεων εξόδου των δύο μετατροπέων. Η τάση αυτή γίνεται μηδενική, όταν και οι δύο μετατροπείς παράγουν την ίδια στιγμιαία τάση.



Σχήμα 5.11 Κυματομορφές λειτουργίας τύπου κυκλικού ρεύματος [40]

- (α) Τάση εξόδου + μετατροπέα
- (β) Τάση εξόδου - μετατροπέα
- (γ) Τάση φορτίου
- (δ) Τάση πηνίου σύζευξης

Ο κυκλομετατροπέας τύπου κυκλικού ρεύματος παράγει μια ομαλότερη τάση φορτίου με λιγότερες αρμονικές σε σχέση με την περίπτωση τύπου διακοπής λειτουργίας. Επιπλέον, ο

έλεγχος είναι απλός επειδή δεν υπάρχει αναγκαιότητα αντιστροφής του ρεύματος. Εντούτοις, το ογκώδες πηνίο σύζευξης (IGR) είναι ένα μεγάλο μειονέκτημα για αυτόν τον μετατροπέα. Εκτός από αυτό, το σύστημα οδήγησης είναι πιο πολύπλοκο από αυτό του μετατροπέα τύπου διακοπής λειτουργίας. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων, αυτός ο κυκλομετατροπέας δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος.

Ο κυκλομετατροπέας τύπου διακοπής λειτουργίας και ο κυκλομετατροπέας τύπου κυκλικού ρεύματος μπορούν να συνδυαστούν δίνοντας ένα υβριδικό σύστημα, το οποίο να παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο κυκλομετατροπέων. Ο κυκλομετατροπέας που προκύπτει, μοιάζει με αυτόν του τύπου κυκλικού ρεύματος, αλλά ανάλογα με την πολικότητα του ρεύματος εξόδου ενεργοποιείται μόνο ο ένας μετατροπέας, ενώ ο άλλος είναι εκτός λειτουργίας, όπως γίνεται με τον κυκλομετατροπέα τύπου διακοπής λειτουργίας. Όταν το ρεύμα του φορτίου μειώνεται κάτω από ένα όριο, και οι δύο μετατροπείς ενεργοποιούνται. Κατά συνέπεια, το ρεύμα παρουσιάζει ομαλή αντιστροφή. Όταν το ρεύμα αυξάνεται πάνω από ένα όριο αλλά στην αντίθετη κατεύθυνση, ο εξερχόμενος μετατροπέας τίθεται εκτός λειτουργίας. Αυτός ο υβριδικός κυκλομετατροπέας λειτουργεί τις περισσότερες φορές ως τύπου διακοπής λειτουργίας, κι έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μικρότερο πηνίο σύζευξης. Ο βαθμός απόδοσης είναι ελαφρώς υψηλότερος από αυτόν του κυκλομετατροπέα τύπου κυκλικού ρεύματος αλλά πολύ μικρότερος από αυτόν του κυκλομετατροπέα τύπου διακοπής λειτουργίας. Επίσης, η παραμόρφωση που προκαλείται από τη λειτουργία τύπου διακοπής λειτουργίας εξαφανίζεται λόγω της λειτουργίας κυκλικού ρεύματος γύρω από μηδενικό ρεύμα. Επιπλέον, ο έλεγχος του μετατροπέα είναι ακόμα πιο απλός από αυτόν του κυκλομετατροπέα τύπου διακοπής λειτουργίας.

Αρμονικές συνιστώσες

Οι κυματομορφές της τάσης εξόδου του κυκλομετατροπέα περιλαμβάνουν διάφορες αρμονικές. Οι ανώτερες αρμονικές φιλτράρονται συνήθως από την αυτεπαγωγή μηχανών, επομένως το ρεύμα των μηχανών έχει λιγότερες αρμονικές. Οι υπόλοιπες αρμονικές προκαλούν απώλειες. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην τοπολογία του κυκλομετατροπέα, αντίθετα με τους άλλους μετατροπείς, δεν υπάρχει πηνίο ή πυκνωτής, δηλαδή στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας, γι' αυτό το λόγο, η στιγμιαία ισχύς εισόδου και η ισχύς εξόδου είναι ίσες. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το αρμονικό περιεχόμενο των κυματομορφών. Κατά τη λειτουργία τύπου διακοπής παράγονται πιο πολλές αρμονικές απ' ότι κατά τη λειτουργία τύπου κυκλικού ρεύματος, λόγω της μηδενικής παραμόρφωσης του ρεύματος. Εκτός αυτού, ο αριθμός των παλμών επηρεάζει το αρμονικό περιεχόμενο. Μεγαλύτερος αριθμός παλμών έχει μικρότερο αρμονικό περιεχόμενο. Επομένως, ένας 6-παλμών (γέφυρας) κυκλομετατροπέας παράγει λιγότερες αρμονικές από έναν 3-παλμών (ημιγέφυρας) κυκλομετατροπέα. Επιπλέον, εάν η συχνότητα εξόδου είναι πιο κοντά στη συχνότητα εισόδου, οι αρμονικές αυξάνονται. Τέλος, ο χαμηλός συντελεστής ισχύος και η διακοπτόμενη αγωγή συμβάλλουν στη δημιουργία αρμονικών.

Για έναν μετατροπέα p -παλμών, η τάξη των αρμονικών εισόδου είναι " $pn+1$ " και αυτή των αρμονικών εξόδου είναι " pn ", όπου p είναι ο αριθμός των παλμών και n είναι ακέραιος αριθμός. Κατά συνέπεια για έναν μετατροπέα 3-παλμών οι αρμονικές εισόδου βρίσκονται στις συχνότητες $2f_i$, $4f_i$ για $n=1$, $5f_i$, $7f_i$ για $n=2$, κ.λπ. Οι αρμονικές εξόδου, αφ' ετέρου, είναι στις συχνότητες $3f_i$, $6f_i$...

Κατά τη λειτουργία του κυκλομετατροπέα, η γωνία α είναι ημιτονοειδώς διαμορφωμένη. Η συχνότητα διαμόρφωσης είναι η ίδια με τη συχνότητα εξόδου και οι αρμονικές των πλευρικών ζωνών συχνότητων εμφανίζονται στην έξοδο. Επομένως, στις κυματομορφές εξόδου αναμένεται για να υπάρχουν αρμονικές σε συχνότητες σχετικές με τις συχνότητες εισόδου και εξόδου.

Για τη λειτουργία τύπου διακοπής, οι αρμονικές εξόδου βρίσκονται στις συχνότητες « pnf_i+Nf_o », όπου το N είναι ένας ακέραιος αριθμός, που ικανοποιεί τη σχέση « $pn+N$ =περιττός». Οι αρμονικές εξόδου για έναν 3-παλμών κυκλομετατροπέα τύπου διακοπής λειτουργίας βρίσκονται στις συχνότητες :

$$n=1 \quad 3f_i, 3f_i+2f_o, 3f_i+4f_o, 3f_i+6f_o, 3f_i+8f_o, 3f_i+10f_o \dots$$

$$n=2 \quad 6f_i, 6f_i+1f_o, 6f_i+3f_o, 6f_i+5f_o, 6f_i+7f_o, 6f_i+9f_o \dots$$

$$n=3 \quad 9f_i, 9f_i+2f_o, 9f_i+4f_o, 9f_i+6f_o, 9f_i+8f_o, 9f_i+10f_o \dots$$

$$n=4, 5 \dots$$

Για τη λειτουργία τύπου κυκλικού ρεύματος, οι αρμονικές είναι στις ίδιες συχνότητες με του τύπου διακοπόμενης λειτουργίας, αλλά το N περιορίζεται στο $(n+1)$. Κατά συνέπεια, οι αρμονικές εξόδου για έναν 3-παλμών κυκλομετατροπέα τύπου κυκλικού ρεύματος βρίσκονται στις συχνότητες :

$$n=1 \quad 3f_i, 3f_i+2f_o, 3f_i+4f_o$$

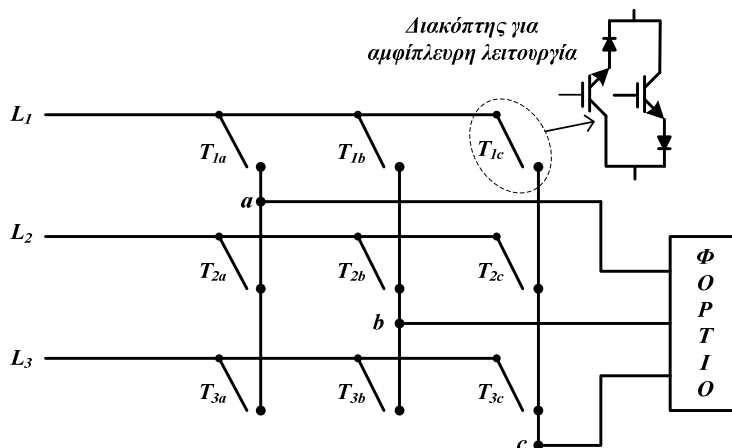
$$n=2 \quad 6f_i+1f_o, 6f_i+3f_o, 6f_i+5f_o, 6f_i+7f_o$$

$$n=3 \quad 9f_i, 9f_i+2f_o, 9f_i+4f_o, 9f_i+6f_o, 9f_i+8f_o, 9f_i+10f_o$$

$$n=4, 5, \dots$$

5.2.2 Μετατροπέας τύπου μήτρας

Ο μετατροπέας τύπου μήτρας είναι μια σχετικά νέα τοπολογία, η οποία προτάθηκε στην αρχή της δεκαετίας του '80. Ένας μετατροπέας τύπου μήτρας αποτελείται από μια μήτρα 9 διακοπτικών στοιχείων, που συνδέουν τις τρεις φάσεις εισόδου με τις τρεις φάσεις εξόδου άμεσα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.12. Οποιαδήποτε φάση εισόδου μπορεί να συνδεθεί με οποιαδήποτε φάση εξόδου, οποιαδήποτε στιγμή, ανάλογα με τον έλεγχο. Όμως, δεν πρέπει να είναι ταυτόχρονα ενεργοποιημένοι δύο διακόπτες της ίδιας φάσης, γιατί αυτό θα προκαλέσει βραχυκύκλωμα στις φάσεις εισόδου. Αυτοί οι μετατροπείς ελέγχονται συνήθως με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) για να παραγάγουν τις τριφασικές μεταβαλλόμενες τάσεις με μεταβλητή συχνότητα.

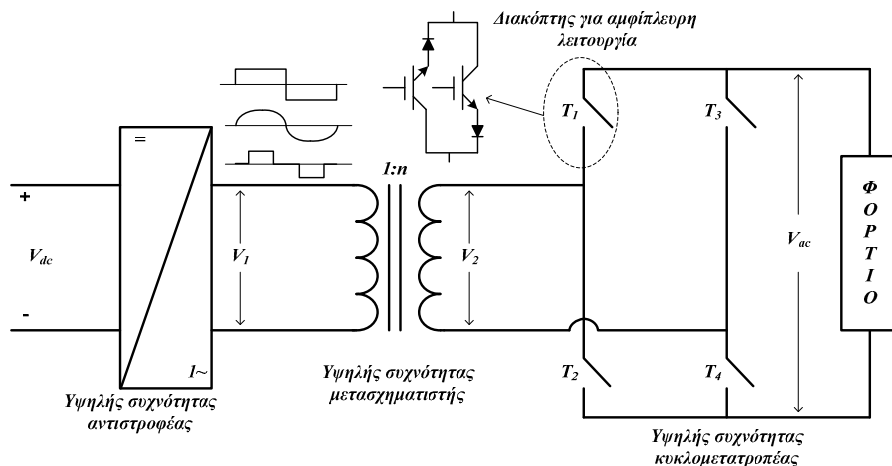


Σχήμα 5.12 Τοπολογία κυκλομετατροπέα τύπου μήτρας

Αυτός ο κυκλομετατροπέας δεν χρησιμοποιείται ευρέως, λόγω του μεγάλου αριθμού διακοπτικών στοιχείων(18), ενώ ένα σύστημα ανορθωτή-αναστροφέα με dc ενδιάμεση βαθμίδα περιλαμβάνει 12 διακόπτες.

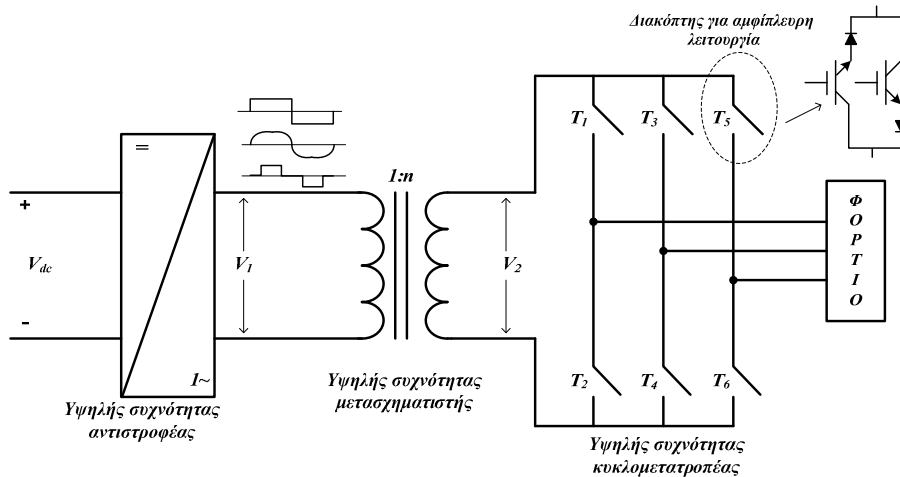
5.2.3 Υψηλής συχνότητας κυκλομετατροπείς

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της συνεχούς μείωσης του μεγέθους και της τιμής των ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων ισχύος, οι κυκλομετατροπείς παρουσιάζουν όλο και περισσότερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Συνήθως, σε ένα σύστημα παραγωγής ισχύος χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας, που παράγει κυματομορφή τάσης υψηλής συχνότητας, με την οποία τροφοδοτείται ο κυκλομετατροπέας, είτε μέσω ενός μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας είτε όχι. Εάν χρησιμοποιείται μετασχηματιστής, αυτός παρέχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ του αντιστροφέα και του κυκλομετατροπέα. Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται μια τοπολογία, στην οποία χρησιμοποιείται μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας. Η τοπολογία αυτή, η οποία προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή μπορεί να έχει αμφίπλευρη λειτουργία, αν χρησιμοποιηθεί διάταξη διακοπών, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13 Τοπολογία μετατροπής ισχύος με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και κυκλομετατροπέα 1φ-1φ

Στο σχήμα 5.14 παρουσιάζεται μια τοπολογία, στην οποία χρησιμοποιείται 1φ-3φ κυκλομετατροπέας υψηλής συχνότητας, προκειμένου να τροφοδοτηθούν τριφασικά φορτία ή να διασυνδεθεί το σύστημα σε τριφασικό δίκτυο. Και αυτή η τοπολογία μπορεί να έχει αμφίπλευρη λειτουργία, αν χρησιμοποιηθεί διάταξη διακοπών, όπως αυτή που φαίνεται στο εν λόγω σχήμα.



Σχήμα 5.14 Τοπολογία μετατροπής ισχύος με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και κυκλομετατροπέα 1φ-3φ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

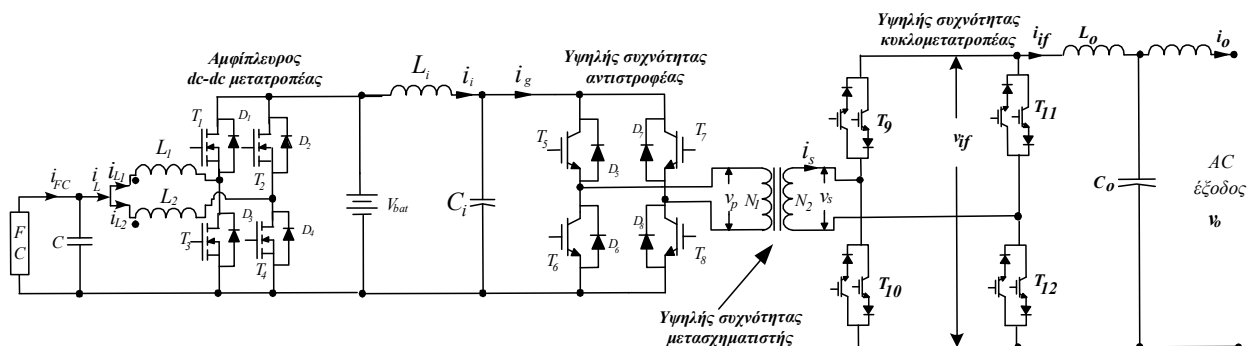
6.1 Εισαγωγή

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί διάφορες τοπολογίες ηλεκτρονικών ισχύος, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε συστήματα για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, χρησιμοποιώντας ως πηγές κυψέλες καυσίμου. Οι τοπολογίες αυτές, είτε είναι μιας κατεύθυνσης, δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα μόνο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είτε αμφίπλευρης ροής ισχύος, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (υβριδικά), τα οποία χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου (υδρογόνου) αναστρέψιμης λειτουργίας.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μία νέα αμφίπλευρη τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας. Η τοπολογία αυτή, μαζί με το σύστημα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και σε υβριδικά συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το προτεινόμενο σύστημα μετατροπής ισχύος αποτελείται από μια βαθμίδα dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, από έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών αντιστροφέα και από έναν υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών κυκλομετατροπέα.

6.2 Ανάλυση της προτεινόμενης τοπολογίας

Η προτεινόμενη τοπολογία, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1 χρησιμοποιεί έναν αμφίπλευρο dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία και μια βαθμίδα αμφίπλευρου υψηλής συχνότητας dc-ac-ac αντιστροφέα-κυκλομετατροπέα.



Σχήμα 6.1 Προτεινόμενη τοπολογία αμφίπλευρης μετατροπής ισχύος.

6.2.1. Ανάλυση της βαθμίδας του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία

Ο αμφίπλευρος dc-dc μετατροπέας με συζευγμένα πηνία διασυνδέει την κυψέλη

καυσίμου ή τη συστοιχία μπαταριών με το ζυγό συνεχούς τάσης, που είναι ουσιαστικά η είσοδος του αντιστροφέα.

Μια σημαντική πτυχή στο σχεδιασμό ενός μετατροπέα ανύψωσης μεγάλης ισχύος είναι η επιλογή του πηνίου ανύψωσης. 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 μειωθούν το μέγεθος και το βάρος του πηνίου, προτιμάται πηνίο με μικρή αυτεπαγωγή. Σε αυτή την περίπτωση, ο μετατροπέας σχεδιάζεται για λειτουργία διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου (DCM). Το πρόβλημα με τη λειτουργία DCM είναι η υψηλή απορρόφηση της κυμάτωση του ρεύματος εισόδου, η οποία είναι ιδιαίτερα απαράδεκτη για μια πηγή τάσης όπως η κυψέλη καυσίμου [36]-[37].

Η πρώτη βαθμίδα της προτεινόμενης τοπολογίας αποτελείται από δυο 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 ημιαγωγικών 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 τροφοδότηση της κυψέλης υδρογόνου, κατά τη διάρκεια της φάσης παραγωγής υδρογόνου ή κατά τη διάρκεια της εκκίνησής της.

Για όσο διάστημα ρέει το ρεύμα εισόδου i_L (σχήμα 6.1), 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 διακοπτόμενου ρεύματος πηνίου (discontinuous inductor current mode - DICM). Αυτό βοηθάει στην αντιμετώπιση του προβλήματος της άνισης κατανομής του ρεύματος. Επίσης, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της εμφάνισης ανάστροφων απωλειών των διόδων, τη στιγμή που οι διόδοι D_1 και D_2 σταματήσουν να άγουν και πριν αρχίσουν να άγουν οι ημιαγωγικοί διακόπτες T_3 και T_4 .

Η λειτουργία της βαθμίδας αυτής μπορεί να χωριστεί στις παρακάτω έξι φάσεις :

Φάση I: Αυτή η φάση ξεκινάει όταν ο διακόπτης T_3 αρχίσει να άγει, φορτίζοντας έτσι το πηνίο L_1 , ενώ το πηνίο L_2 εκφορτίζεται μέσω της διόδου του διακόπτη T_2 . Σ' αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι το πηνίο L_2 είχε εκφορτιστεί από την προηγούμενη φάση λειτουργίας. Αυτή η φάση ολοκληρώνεται όταν το ρεύμα i_{L2} μηδενιστεί.

Φάση II: Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, συνεχίζεται η φόρτιση του πηνίου L_1 μέσω του διακόπτη T_3 . Αυτή η φάση ολοκληρώνεται όταν ο διακόπτης T_3 σταματήσει να άγει.

Φάση III: Αυτή η φάση ξεκινάει με την εκφόρτιση του πηνίου L_1 μέσω της διόδου του διακόπτη T_1 .

Φάση IV: Αυτή η φάση ξεκινάει όταν ο διακόπτης T_4 άγει φορτίζοντας κατά συνέπεια το πηνίο L_2 , ενώ το πηνίο L_1 εξακολουθεί να εκφορτίζεται. Αυτή η φάση ολοκληρώνεται όταν το πηνίο L_1 εκφορτιστεί πλήρως.

Φάση V: Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης το πηνίο L_2 συνεχίζει να φορτίζεται μέχρις ότου ο διακόπτης T_4 σταματήσει να άγει.

Φάση VI: Αυτή η φάση, η οποία είναι η τελευταία της λειτουργίας ενός διακοπτικού κύκλου, ξεκινάει με την αγωγή της διόδου του διακόπτη T_2 προκαλώντας την εκφόρτιση του πηνίου L_2 .

Υποθέτοντας ότι η πρώτη βαθμίδα δεν έχει απώλειες [36]-[37], τότε οι εξισώσεις (3.61) και (3.62) γίνονται :

$$V_{bat} = \frac{V_{FC}}{1 - (2D + \delta D)} = \frac{V_{FC}}{1 - (D_1 + D_2)} \quad (6.1)$$

$$I_L = I_{L1} + I_{L2} \quad (6.2)$$

$$I_{L1} - I_{L2} \cong \frac{T_s \delta D}{4L} [V_{bat} (2D + \delta D) - V_{FC}] \quad (6.3)$$

Όπου,

V_{bat} = DC τάση εξόδου

V_{FC} = Τάση εξόδου της κυψέλης υδρογόνου

I_{L1} = Μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου L_1 , i_{L1}

I_{L2} = Μέση τιμή του ρεύματος του πηνίου L_2 , i_{L2}

I_L = Μέση τιμή του ρεύματος του μετατροπέα ανύψωσης με συζευγμένα πηνία, i_L

D_1 = Βαθμός χρησιμοποίησης της πρώτης μονάδας του μετατροπέα ανύψωσης

D_2 = Βαθμός χρησιμοποίησης της δεύτερης μονάδας του μετατροπέα ανύψωσης

δ = Διαφορά των βαθμών χρησιμοποίησης μεταξύ των δυο μονάδων

T_s = Διακόπτη 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 δυο συζευγμένων πηνίων ανύψωσης δίνονται από τις σχέσεις :

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

όπου K είναι ο συντελεστής σύζευξης = 0,9-0,98.

Εξετάζοντας την εξίσωση (6.3) βλέπουμε ότι το καλύτερο σημείο λειτουργίας, όσο υφίσταται το ρεύμα που μοιράζεται μεταξύ των δύο μετατροπέων ανύψωσης είναι όταν $D_1=D_2=0,25$.

6.2.2. Ανάλυση της βαθμίδας του αμφίπλευρου dc-ac-ac αντιστροφέα-κυκλομετατροπέα [41]-[50]

Ο αμφίπλευρος υψηλής συχνότητας dc-ac-ac μετατροπέας αποτελείται από μια βαθμίδα αντιστροφέα υψηλής συχνότητας και από μια βαθμίδα υψηλής συχνότητας κυκλομετατροπέα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1, 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 μια υψηλής συχνότητας, η οποία εφαρμόζεται στον αντιστροφέα. Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης λειτουργίας ο αντιστροφέας λειτουργεί ως ένας ελεγχόμενος ανορθωτής (switch mode rectifier - SMR) εξασφαλίζοντας την απαιτούμενη ισχύ στην κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή υδρογόνου. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της παραγωγής υδρογόνου η συστοιχία των συσσωρευτών μπορεί να φορτίζεται.

Κατά τη φάση της λειτουργίας από dc σε ac, ο αντιστροφέας υψηλής συχνότητας μετατρέπει τη συνεχή τάση εισόδου του σε μια υψηλής συχνότητας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM) εναλλασσόμενη τάση, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2(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 6.2(δ). Η διακοπτική συνάρτηση λειτουργίας του κυκλομετατροπέα φαίνεται στο σχήμα 6.2(ε).

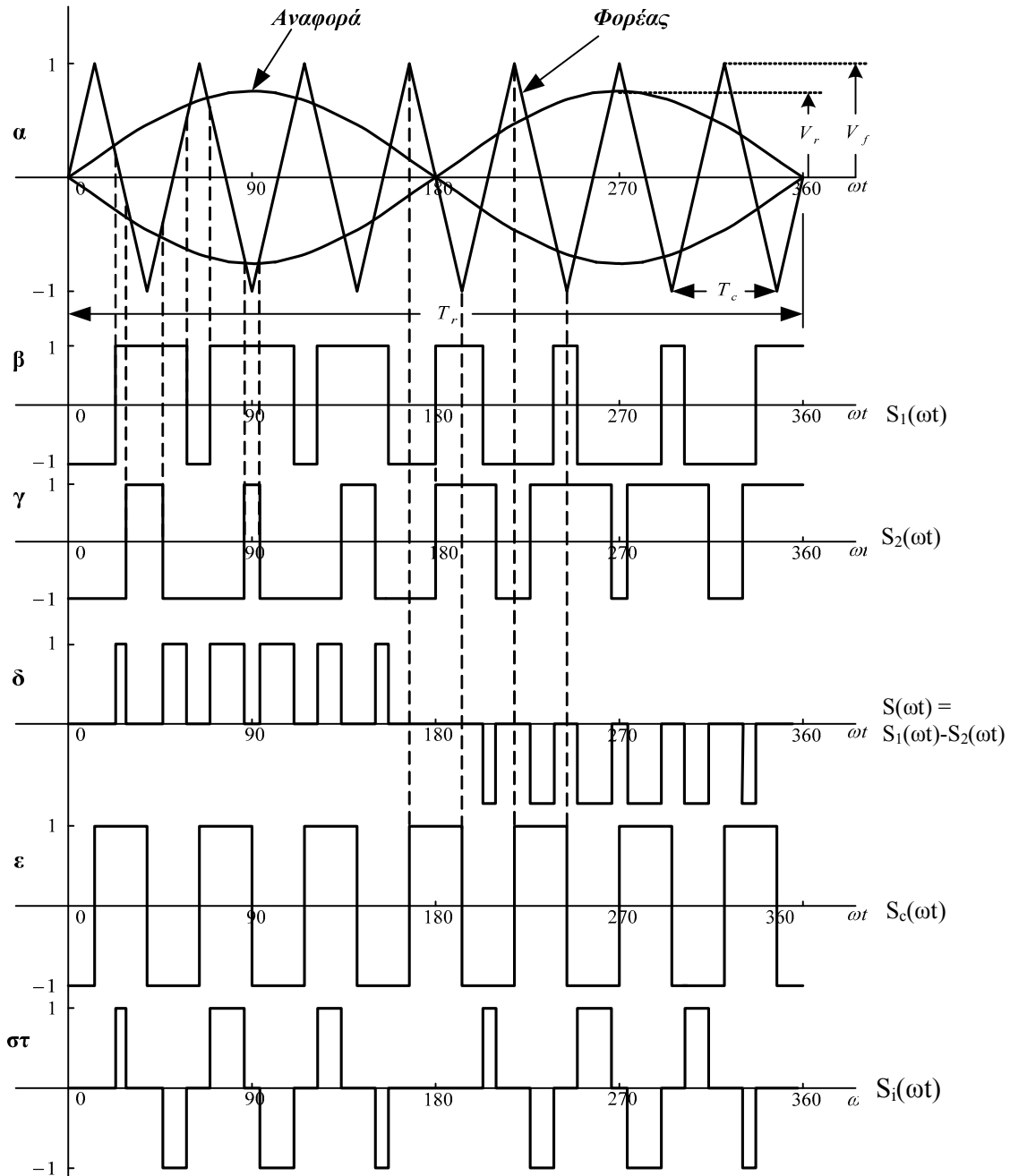
Από το σχήμα 6.2 παρατηρούμε ότι οι μαθηματικές εκφράσεις των διακοπτικών συναρτήσεων του κυκλομετατροπέα και του αντιστροφέα δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις :

$$S_c(\omega t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=mF_{nc}}^{\infty} C_n \sin(n\omega_0 t - n\pi/2) \quad (6.4)$$

$$S_i(\omega t) = S_c(\omega t)S(\omega t) \quad (6.5)$$

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

$$S(\omega t) = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t) = M_f \sin(\omega_0 t) + \sum_{n=d}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t) \quad (6.6)$$



Σχήμα 6.2 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, που προκύπτει από το σήμα φορέα (α)
 (στ) Διακοπτική συνάρτηση $S_i(\omega t)$ του αντιστροφέα, που προκύπτει από τις (α) και (β)

Επομένως, αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.6) και (4.4) στην εξίσωση (4.5) καταλήγουμε στη σχέση :

$$S_i(\omega t) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=m}^{\infty} \sum_{k=mF_{nc}}^{\infty} A_n C_k \sin(n\omega_0 t) \sin(k\omega_0 t - k\pi/2) \quad (6.7)$$

Παρατηρώντας τα σχήματα 6.1 και 6.2 βλέπουμε ότι η τάση και το ρεύμα εξόδου του κυκλωμετατροπέα, πριν από την έξοδο του φίλτρου δίνονται από τις σχέσεις :

$$v_{if}(\omega t) = V_{bat} \cdot M_f \cdot \sin(\omega_0 t) \left(\frac{N_2}{N_1} \right) + V_{bat} \sum_{n=d}^{\infty} A_n \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \sin(n\omega_0 t) \quad (6.8)$$

$$i_{if}(\omega t) = \frac{v_{if}(\omega t)}{Z_0(\omega t)} = B_1 \cdot \sin(\omega_0 t + \phi_1) + \sum_{n=d}^{\infty} B_n \cdot \sin(n\omega_0 t + \phi_n) \quad (6.9)$$

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

$$i_g(\omega t) = i_{if}(\omega t) S(\omega t) \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (6.10)$$

δίνοντας τα παρακάτω αποτελέσματα :

$$I_{g,o} = DC \text{ συνιστώσα } i_g(\omega t) = \frac{M_f B_1 \cos \phi_1}{2} \quad (6.11)$$

$$I_{g,2} = \text{πλάτος της 2ης αρμονικής συνιστώσας του } i_g(\omega t) = M_f B_1 / 2 \quad (6.12)$$

Όπου,

$$B_1 = \frac{V_{bat} \cdot M_f}{|Z_{o,1}|} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (6.13)$$

$$B_n = \frac{A_n}{|Z_{o,n}|} \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \quad (6.14)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{I_m(Z_{0,n})}{\text{Re}(Z_{0,n})} \right) \quad (6.15)$$

- v_{if} = τάση εξόδου του κυκλομετατροπέα πριν από το φιλτράρισμα
 i_{if} = ρεύμα εξόδου του κυκλομετατροπέα πριν από το φιλτράρισμα
 V_{bat} = τάση συσσωρευτή
 M_f = συντελεστής διαμόρφωσης της SPWM τεχνικής
 A_n = πλάτος της $n^{ης}$ αρμονικής συνιστώσας της v_{if}
 B_n = πλάτος της $n^{ης}$ αρμονικής συνιστώσας του i_{if}
 Z_0 = σύνθετη αντίσταση εισόδου του φίλτρου εξόδου
 $|Z_{0,n}|$ = μέτρο της Z_0 στη συχνότητα της $n^{ης}$ αρμονικής
 ϕ_1 = φάση μετατόπισης μεταξύ των αντίστοιχων θεμελιωδών συνιστωσών των v_{if} και i_{if}
 d = κυριαρχούσα αρμονική συνιστώσα της $v_{if} = 2F_{nc} - 1$
 F_{nc} = ανοιγμένη συχνότητα φέροντος σήματος
 ω_0 = συχνότητα λειτουργίας εξόδου

Η προτεινόμενη τοπολογία 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-κυκλομετατροπέα ρυθμίζονται στις επιθυμητές τιμές (τιμές αναφοράς), πολύ καλύτερα από ότι με έναν συνηθισμένο PWM dc-ac αντιστροφέα. Εναλλακτικά, το σύστημα μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυο μέσω ενός πηγίου 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.

Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις της διακοπτικής συνάρτησης (6.4) και (6.7), καθώς και τις εξισώσεις (6.8) και (6.9) και, μπορούμε να πάρουμε τις μαθηματικές εκφράσεις για το ρεύμα εισόδου του κυκλομετατροπέα $i_s(\omega t)$ 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 κυκλομετατροπέα δίνονται από τις σχέσεις :

$$i_s(\omega t) = i_{if}(\omega t) S_C(\omega t) \quad (6.16)$$

$$v_p(\omega t) = V_{bat} S_i(\omega t) \quad (6.17)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (6.7), (6.10), (6.11) και (6.12) στις εξισώσεις (6.16) και (6.17) παίρνουμε τις σχέσεις :

$$\begin{aligned}
 i_s(\omega t) = & \frac{4B_1}{\pi} \sin(\omega_0 t + \phi_1) \sum_{n=mF_{nc}}^{\infty} C_n \sin(n\omega_0 t - n\pi/2) + \sum_{n=d}^{\infty} \sum_{k=mF_{nc}}^{\infty} B_n C_k \\
 & \times \sin(n\omega_0 t + \phi_n) \sin(k\omega_0 t + k\pi/2)
 \end{aligned} \quad (6.18)$$

$$v_p(\omega t) = \frac{4V_{bat}}{\pi} \sum_{n=m}^{\infty} \sum_{k=mF_{nc}}^{\infty} A_n C_k \times \sin(n\omega_0 t) \sin(k\omega_0 t + k\pi/2) \quad (6.19)$$

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 (6.18) μπορεί να παραληφθεί, γιατί τα πλάτη των B_n για $n \geq d$ είναι αμελητέα. Συνεπώς, η εξίσωση (6.18) γίνεται :

$$i_s(\omega t) = \frac{4B_l}{\pi} \sum_{n=mF_{nc}}^{\infty} C_n [\cos((n-1)\omega_0 t - n\pi/2 - \phi_l) - \cos((n+1)\omega_0 t - n\pi/2 + \phi_l)] \quad (6.20)$$

Όπου $m = 1, 3, 5, \dots$

Η εξίσωση (6.20) υποδηλώνει σαφώς ότι ο υψηλής συχνότητας μετασχηματιστής απομόνωσης πρέπει να σχεδιαστεί για να λειτουργεί στη συχνότητα :

$$f_{transformer} = (F_{nc} - 1)(2\pi f_0) \quad (6.21)$$

όπου f_0 είναι η συχνότητα της τάσης εξόδου.

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

$$P = \frac{\tilde{V}_{co} \cdot \tilde{V}_{ut}}{X_s} \cdot \sin \delta \quad (6.22)$$

Όπου :

\tilde{V}_{co} = RMS τιμή της τάσης εξόδου του κυκλομετατροπέα

\tilde{V}_{ut} = RMS τιμή της τάσης του δικτύου

δ = Γωνία μεταξύ v_{co} και V_{ut}

6.3 Παράδειγμα σχεδιασμού

Για να αποδοθεί η σημασία και να διευκολυνθεί η κατανόηση των θεωρητικών αποτελεσμάτων που εξήχθησαν στην προηγούμενη παράγραφο, δίνεται το παρακάτω παράδειγμα:

$$V_{FC} = 48 V$$

$$D_1 = D_2 = D = 0,25$$

$$V_{bat} = \text{τάση συσσωρευτών} = 96 V \text{ με } +15\%, -20\% \text{ απόκλιση}$$

$$V_{o(RMS)} = \text{RMS τιμή τάσης φορτίου} = 115 V$$

$$I_{o(RMS)} = \text{RMS τιμή ρεύματος φορτίου} = 4 A$$

$$f_o = \text{συχνότητα εξόδου του μετατροπέα} = 60 \text{ Hz}$$

$$F_{nc} = \text{ανοιγμένη συχνότητα φέροντος σήματος} = 7$$

$$M_f = 0.8 \text{ της ονομαστικής τάσης συσσωρευτών}$$

$$K_i = \text{συντελεστής κυμάτωσης του ρεύματος πηνίου του φίλτρου εισόδου} = 0,2$$

$$K_v = \text{συντελεστής κυμάτωσης της τάσης πυκνωτή του φίλτρου εισόδου} = 0,01$$

$$THD \leq 5\%$$

Σημειώνεται ότι η $F_{nc}=7$ έχει κρατηθεί σκόπιμα χαμηλή για λόγους σαφήνειας της κυματομορφής.

Από τις παραπάνω προδιαγραφές, λαμβάνονται οι ακόλουθες p.u. τιμές:

$$1 \text{ p.u. volts} = 115 V$$

$$1 \text{ p.u. ρεύματος} = 4A$$

$$1 \text{ p.u. σύνθετης αντίστασης} = 115/4 = 28.75 \Omega$$

$$1 \text{ p.u. συχνότητας} = 2\pi f_o = 377 \text{ rad/s}$$

Επιπλέον, υποθέτουμε ότι $M_f = 0.8$ της ονομαστικής τάσης των συσσωρευτών (οι τιμές του M_f κυμαίνονται μεταξύ $0.7 \leq M_f \leq 1$).

Στις περισσότερες προδιαγραφές συστημάτων παροχής ισχύος η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) της τάσης εξόδου v_o είναι $\leq 5\%$ κάτω από συνθήκες μέγιστου φορτίου και χωρίς φορτίο. Έχει αποδειχθεί ότι, εάν το πλάτος της κύριας αρμονικής συνιστώσας (στην περίπτωση μας $2F_{nc}-1$) μειωθεί στο 3% του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας, στη χειρότερη κατάσταση λειτουργίας (Συντελεστής Ισχύος = 0,8 επαγωγικός), τότε μπορεί να εξασφαλιστεί ένας συνολικός συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) μικρότερος από 5% [42]. Επομένως, ξέροντας ότι το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της κυματομορφής της SPWM τάσης είναι ίσο με τον M_f p.u. και ότι η αντίστοιχη κυριαρχούσα αρμονική συνιστώσα του κάτω από τις χειρότερες συνθήκες λειτουργίας ($M_f = 0.7$) είναι $V_{if,d} = 0.7$ p.u., τότε οι απαραίτητες τιμές των στοιχείων του φίλτρου εξόδου δίνονται από τις σχέσεις [42] :

$$\frac{X_{L_{0,1}}}{X_{C_{0,1}}} = L_0 C_0 = \frac{22}{(2F_{nc}-1)^2} \quad \text{ή}$$

$$L_0 C_0 = \frac{22}{(2 \times 7 - 1)^2} = 0.13 \text{ p.u.}$$

Επιλέγοντας χωρητικότητα 0.5 p.u.,

$$C_0 = 0.5 \text{ p.u.}$$

$$L_0 = 0.26 \text{ p.u.}$$

$$X_{C0} = 1/(\omega_0 C_0) = 1/0.5 = 2 \text{ p.u.}$$

$$X_{L0} = \omega_0 L_0 = 0.26 \text{ p.u.}$$

Επομένως, οι πραγματικές τιμές των στοιχείων του φίλτρου εξόδου του κυκλωματροπέα δίνονται από τις σχέσεις :

$$C_0 = \frac{I}{X_{C0} \omega_0} = \frac{I}{2 \times 28.7 \div 377} = 46 \mu\text{F}$$

$$L_0 = \frac{X_{L0}}{\omega_0} = \frac{0.26 \times 28.7}{377} = 19.7 \text{ mH}$$

Παρατηρώντας το σχήμα 6.1 βλέπουμε ότι τα στοιχεία του φίλτρου εισόδου του αντιστροφέα μπορούν να παραχθούν ως συνάρτηση του επιτρεπόμενου συντελεστή κυμάτωσης K_i του ρεύματος πηνίου του φίλτρου και του συντελεστή κυμάτωσης K_v της τάσης πυκνωτή του φίλτρου, όπως παρακάτω [42]:

$$K_i = \frac{I}{\left(4 \frac{X_{L_{i,l}}}{X_{C_{i,l}}} - 1\right) I_{i,0}} I_{g,2(RMS)}$$

$$K_v = \frac{2X_{L_{i,l}} X_{C_{i,l}}}{\left(4X_{L_{i,l}} - X_{C_{i,l}}\right) V_{C,0}} I_{g,2(RMS)}$$

ή

$$\frac{X_{L_{i,l}}}{X_{C_{i,l}}} = \frac{0.26}{K_i} + 0.25$$

$$\frac{X_{L_{i,l}} X_{C_{i,l}}}{4X_{L_{i,l}} - X_{C_{i,l}}} = 1.414 K_v$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις και τις δεδομένες προδιαγραφές σχεδιασμού,

οι παράμετροι των στοιχείων του φίλτρου εισόδου του αντιστροφέα δίνονται από το παρακάτω σύστημα εξισώσεων :

$$\frac{X_{L_{i,1}}}{X_{C_{i,1}}} = \frac{0.26}{0.2} = 1.3$$

$$\frac{X_{L_{i,1}} X_{C_{i,1}}}{4X_{L_{i,1}} - X_{C_{i,1}}} = 1.414 \times 0.01 = 0.0141$$

Επιλύοντας το σύστημα των δύο παραπάνω εξισώσεων, οι p.u.(ανοιγμένες στη μονάδα) και οι πραγματικές τιμές των στοιχείων του φίλτρου εισόδου του αντιστροφέα είναι :

$$X_{C_{i,1}} = 0.0265 \text{ p.u.}$$

$$X_{L_{i,1}} = 0.042 \text{ p.u.}$$

$$C_i = \frac{1}{0.0265 \times 28.7 \times 377} = 3488 \mu F$$

$$L_i = \frac{0.042 \times 28.7}{377} = 3.20 \text{ mH}$$

Τέλος, ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή είναι $N_1/N_2 = 0.47$ και η συχνότητα του μετασχηματιστή απομόνωσης είναι ίση με 360Hz.

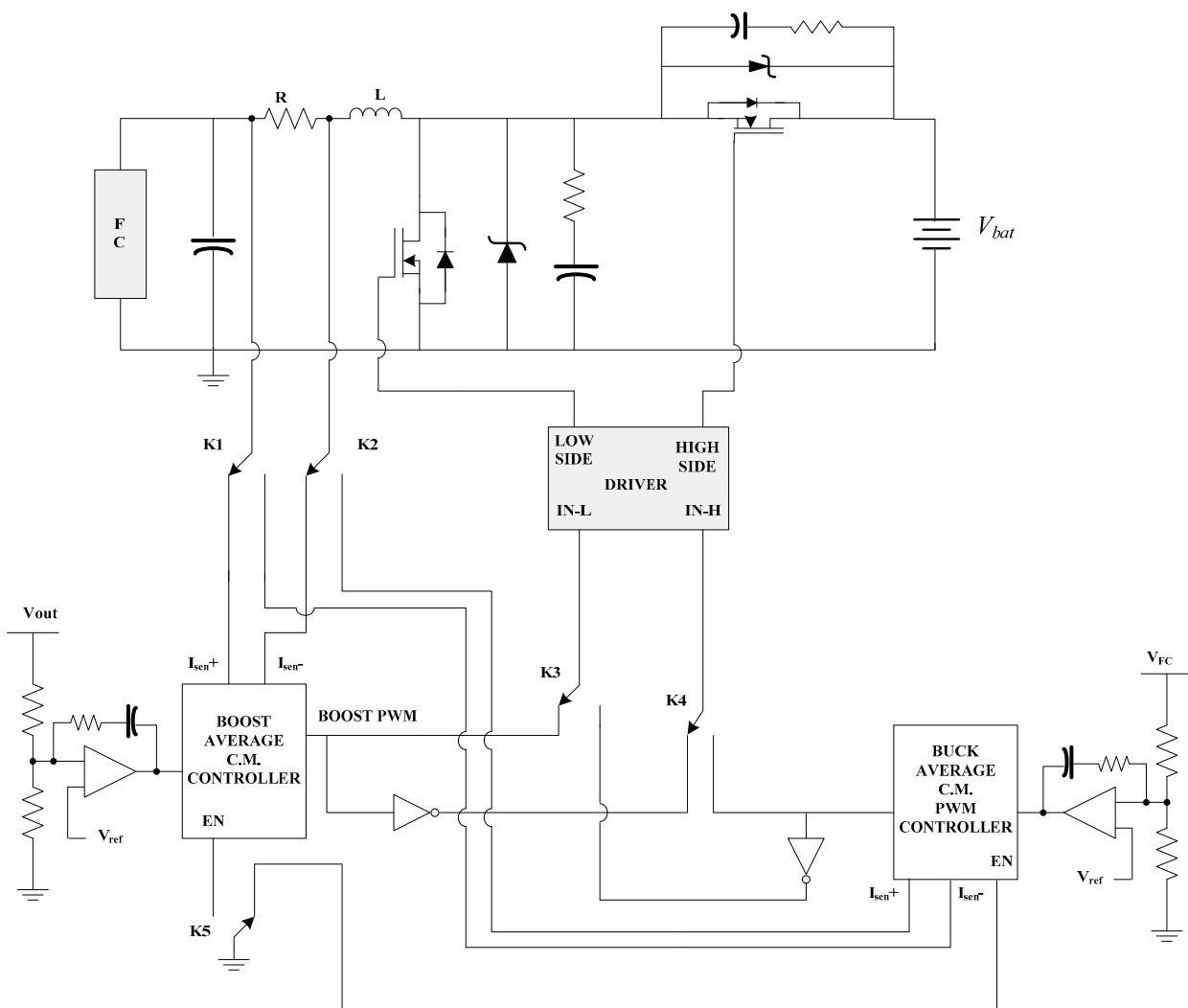
6.4 Προτεινόμενο κύκλωμα ελέγχου

Προκειμένου η προτεινόμενη τοπολογία να μπορεί να λειτουργεί αμφίδρομα, απαιτείται ένα κύκλωμα ελέγχου τόσο για τη βαθμίδα του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, όσο και για τη βαθμίδα των υψηλής συχνότητας αντιστροφέα και κυκλομετατροπέα, οι οποίοι από τη φύση τους έχουν αμφίδρομα χαρακτηριστικά. Στα σχήματα 6.3 και 6.4 παρουσιάζονται τα προτεινόμενα κυκλώματα ελέγχου για τις δυο βαθμίδες, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να λειτουργεί η προτεινόμενη τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος τόσο στη φάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και στη φάση παραγωγής υδρογόνου.

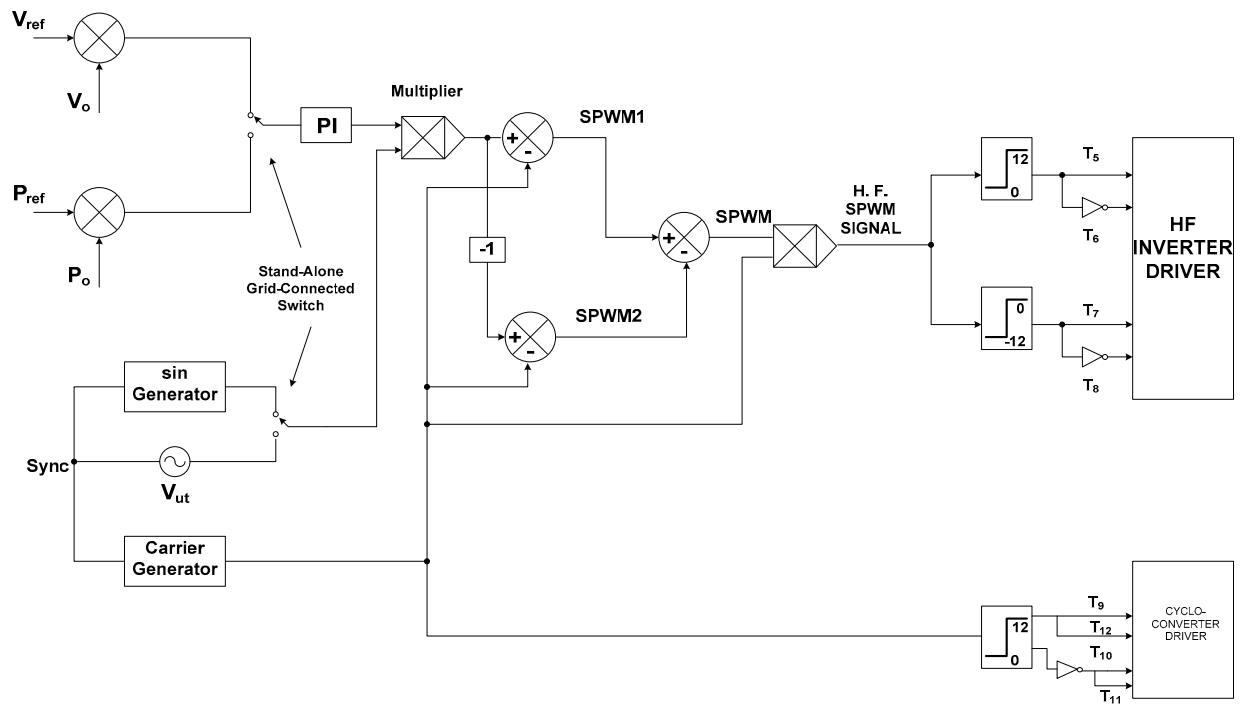
Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3, για τη λειτουργία του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα ελέγχου δύο ελεγκτές διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Ο ένας PWM ελεγκτής εφαρμόζεται για τη λειτουργία του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, ως μετατροπέα ανύψωσης κατά τη φάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ο άλλος για τη λειτουργία του μετατροπέα ως μετατροπέα υποβιβασμού κατά τη φάση της παραγωγής υδρογόνου. Επίσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4, για τον υψηλής συχνότητας αντιστροφέα χρησιμοποιείται η γνωστή τεχνική ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών

(SPWM) και η βαθμίδα του κυκλομετατροπέα οδηγείται από μια σειρά τετραγωνικών παλμών, οι οποίοι είναι συγχρονισμένοι με τα σήματα ελέγχου του υψηλής συχνότητας αντιστροφέα.

Οι αυτόματοι διακόπτες K1 – K7 χρησιμοποιούνται με σκοπό να λειτουργούν την προτεινόμενη τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος τόσο στη φάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και στη φάση παραγωγής υδρογόνου. Η θέση των επαφών των αυτόματων διακοπών, όπως παρουσιάζονται στα σχήματα 6.3 και 6.4 επιτρέπουν στην τοπολογία να λειτουργεί στη φάση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Με ενεργοποίηση του αυτόματου διακόπτη, η κατάσταση των επαφών αλλάζει και η τοπολογία λειτουργεί στη φάση της παραγωγής υδρογόνου.



Σχήμα 6.3 Προτεινόμενο κύκλωμα ελέγχου για τη βαθμίδα υποβιβασμού/άνυψωσης της τάσης



Σχήμα 6.4 Προτεινόμενο κύκλωμα ελέγχου για τη βαθμίδα των υψηλής συχνότητας αντιστροφέα - κυκλομετατροπέα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

7.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε η θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας της προτεινόμενης τοπολογίας ηλεκτρονικών ισχύος, για εφαρμογές σε κυψέλες υδρογόνου αναστρέψιμης λειτουργίας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης της προτεινόμενης τοπολογίας στο πρόγραμμα Spice, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν με χρησιμοποίηση κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM).

7.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

7.2.1 Προσομοίωση του μετατροπέα με συζευγμένα πηνία

Το κύκλωμα καθώς και τα αποτελέσματα προσομοίωσης, που ελήφθησαν για τον dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, κατά τη φάση της λειτουργίας ανύψωσης της τάσης παρουσιάζονται στο σχήμα 5.1. Η τάση εισόδου του μετατροπέα είναι 48 V και η διακοπτική συχνότητα 50 kHz.

Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζεται το κύκλωμα προσομοίωσης στο Spice του μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, κατά τη λειτουργία της ανύψωσης της τάσης. Στο κύκλωμα προσομοίωσης περιλαμβάνεται και το κύκλωμα προσομοίωσης μιας κυψέλης καυσίμου, το οποίο προέκυψε σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 2 (μεταβατική συμπεριφορά κυψέλης PEM).

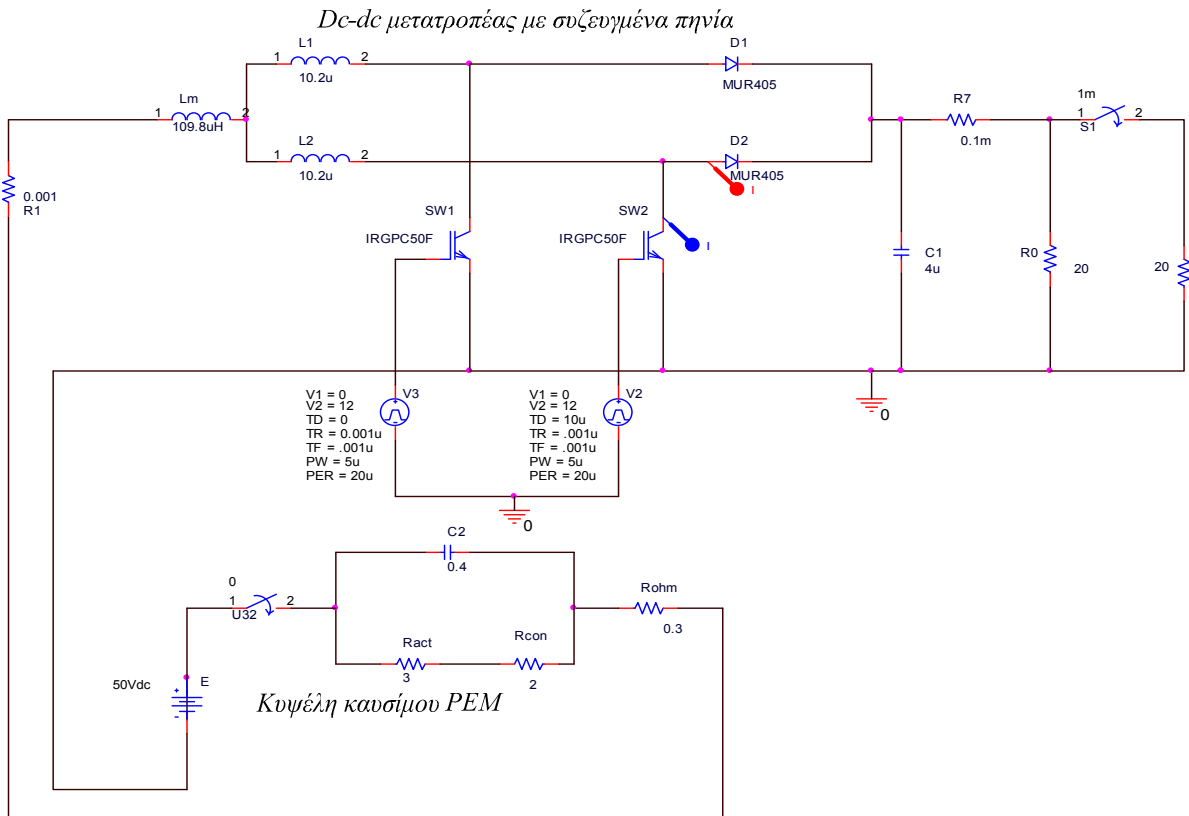
Στο σχήμα 7.2(α) φαίνονται οι κυματομορφές των ρευμάτων i_{L1} και i_{L2} , που διαρρέουν τα πηνία L_1 και L_2 αντίστοιχα, ενώ στο σχήμα 7.2(β) φαίνονται οι κυματομορφές του ρεύματος εισόδου ($i_L = i_{L1} + i_{L2}$) και του ρεύματος εξόδου (κάτω). Τέλος στο σχήμα 7.2(γ) παρουσιάζονται οι κυματομορφές των ρευμάτων που διαρρέουν το διακόπτη (SW2) και τη δίοδο ανύψωσης (D2).

Στο σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η μεταβατική κατάσταση των ρευμάτων και των τάσεων εξόδου τόσο της κυψέλης καυσίμου, όσο και του μετατροπέα, όταν αυξάνεται απότομα το φορτίο.

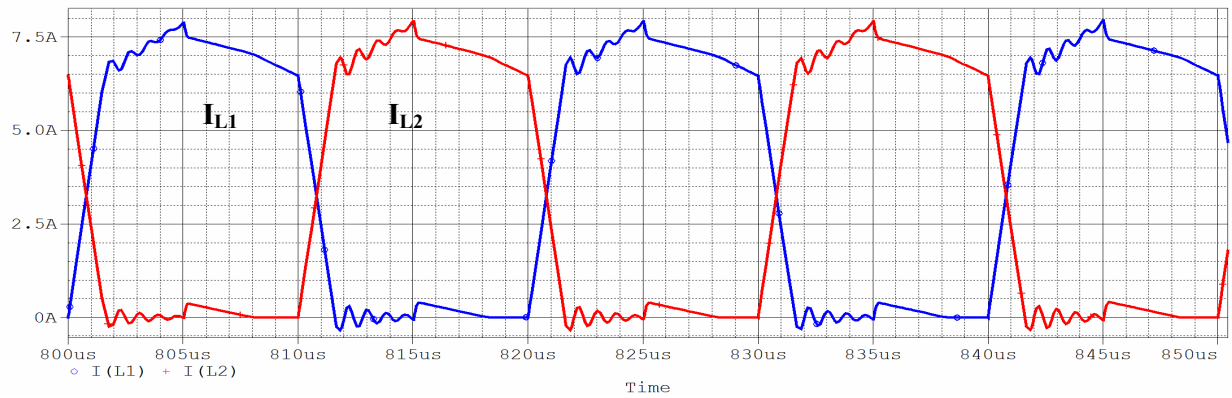
Εξετάζοντας τα αποτελέσματα προσομοίωσης του σχήματος 7.1, γίνεται φανερό ότι

συμφωνούν με τα θεωρητικά αναμενόμενα,.

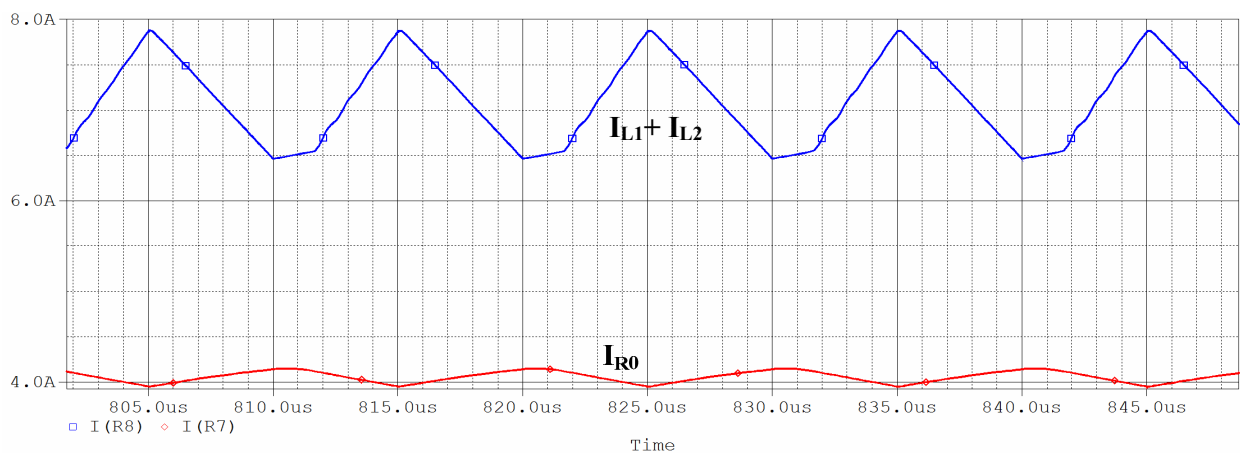
Από το σχήμα 7.2(b) μπορεί κανείς να δει ότι η κυμάτωση του ρεύματος εισόδου είναι 1,2 A, που είναι το 20% της dc τιμής. Αυτή η υψηλή κυμάτωση προέκυψε επειδή χρησιμοποιήθηκε εσκεμμένα μικρής τιμής πηνίο ανύψωσης (120 μ H) στην προσομοίωση του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, για λόγους ευκρίνειας της κυματομορφής. Προκειμένου να ληφθεί η ίδια κυμάτωση του ρεύματος εισόδου χρησιμοποιώντας πλήρους γέφυρας dc-dc μετατροπέα, πρέπει να επιλεγεί διακοπτική συχνότητα των 100 kHz.



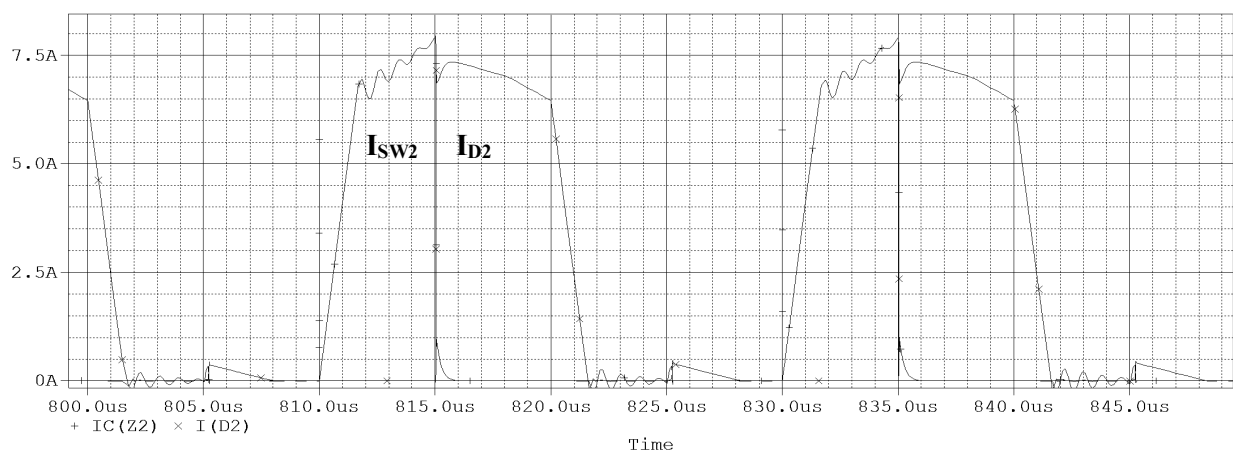
Σχήμα 7.1 Κύκλωμα προσομοίωσης κυψέλης PEM και μετατροπέα με συζευγμένα πηνία.



(α)



(β)



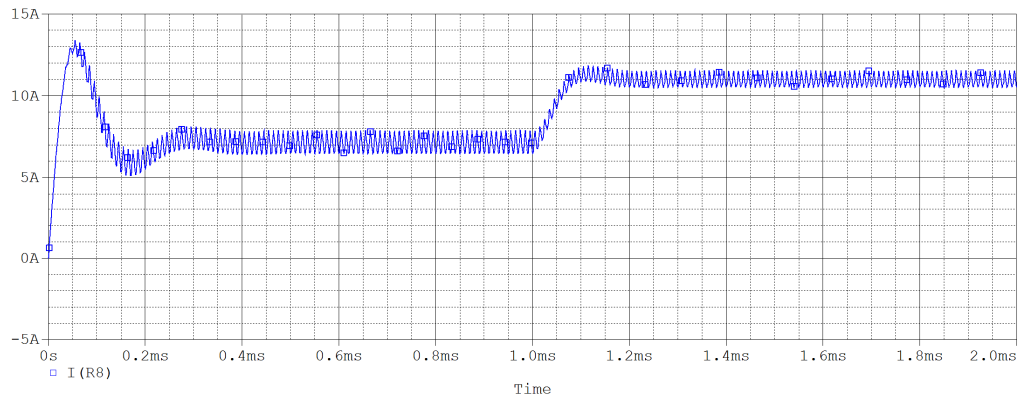
(γ)

Σχήμα 7.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο SPICE του μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, κατά τη φάση της λειτουργίας ανύψωσης της τάσης. $V_{in} = 48\text{ V}$, διακοπτική συχνότητα = 50 kHz, $D1 = D2 = 0,25$.

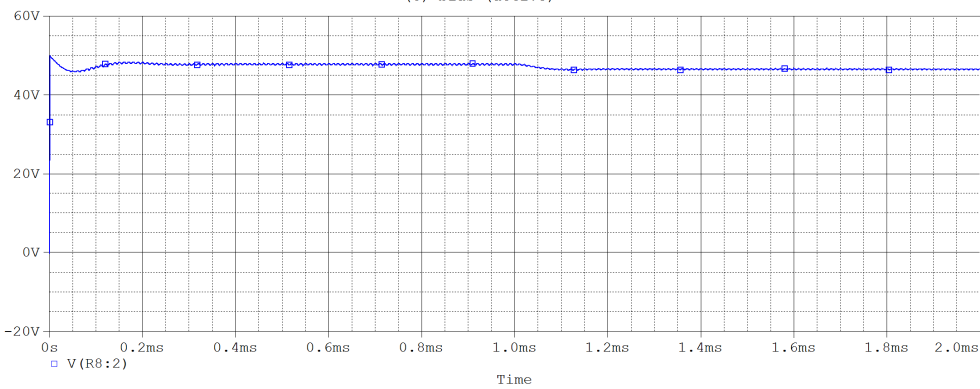
α) Κυματομορφές ρευμάτων πηνίων ανύψωσης, i_{L1} και i_{L2}

β) Κυματομορφές ρευμάτων εισόδου και εξόδου, i_L και i_{ob}

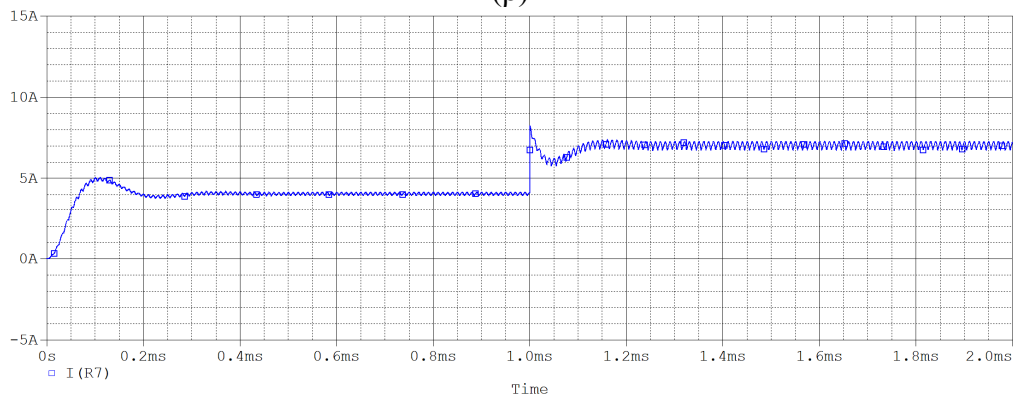
γ) Κυματομορφές ρευμάτων διακόπτη και διόδου ανύψωσης



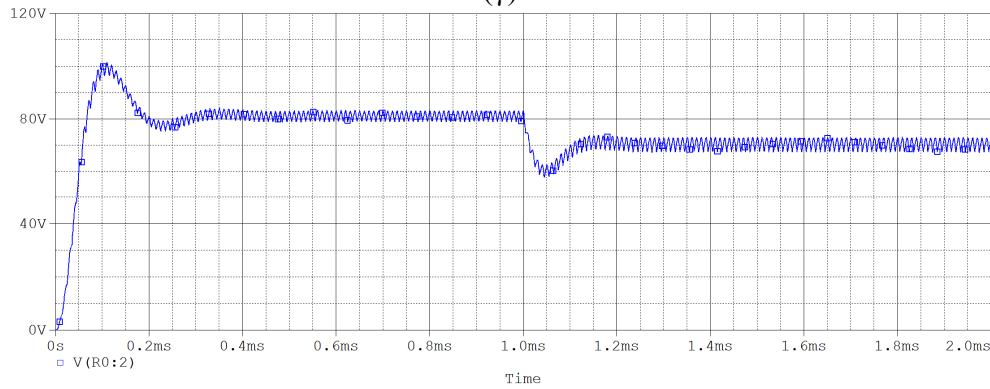
(α)



(β)



(γ)

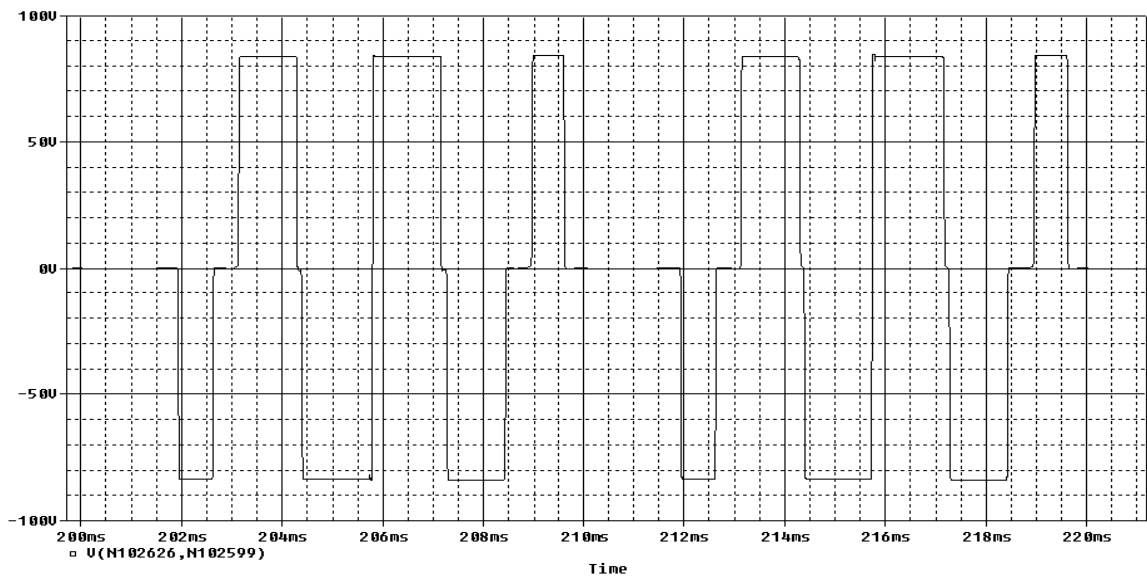


(δ)

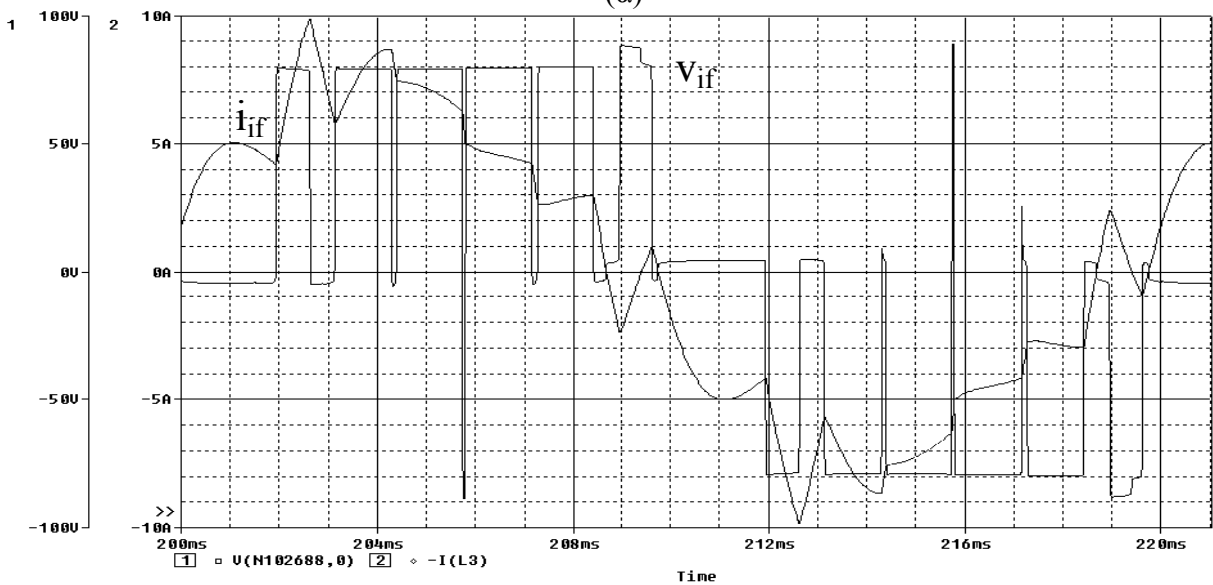
Σχήμα 7.3 Ανάλυση μεταβατικής κατάστασης για το ρεύμα και την τάση εξόδου της κυψέλης και του μετατροπέα. (α) Ρεύμα εξόδου κυψέλης καυσίμου, (β) τάση εξόδου κυψέλης καυσίμου, (γ) ρεύμα εξόδου μετατροπέα και (δ) τάση εξόδου μετατροπέα.

7.2.2 Προσομοίωση βαθμίδας αντιστροφεία και κυκλομετατροπέα

Στα σχήματα 7.4 και 7.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των βαθμίδων μετατροπής από dc σε ac και από ac σε ac, τα οποία ελήφθησαν κατά τη φάση λειτουργίας παραγωγής ισχύος και κατά τη φάση παραγωγής υδρογόνου αντίστοιχα. Σ' αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε σκόπιμα μικρή τιμή διακοπτική συχνότητα ($F_{nc} = 7$, δηλαδή 350Hz), όπως και στην προσομοίωση του dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, για λόγους ευκρίνειας της κυματομορφής. Αν η συχνότητα του φέροντος σήματος είχε μεγαλύτερη τιμή, τότε θα προέκυπτε πολύ καλύτερης ποιότητας κυματομορφή.

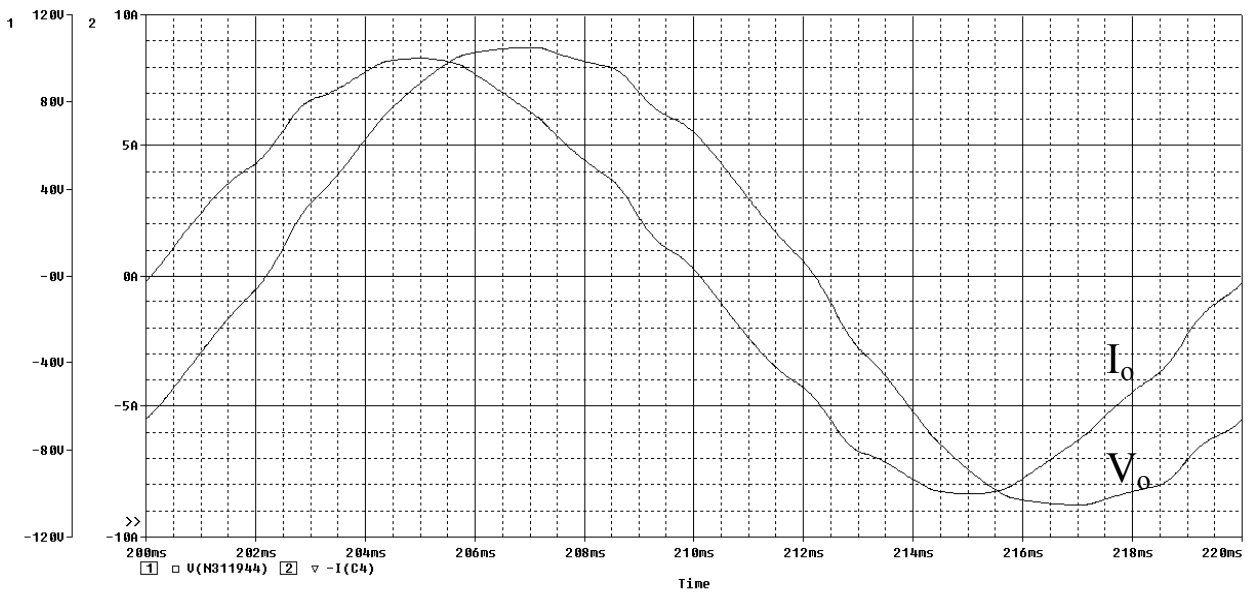


(α)

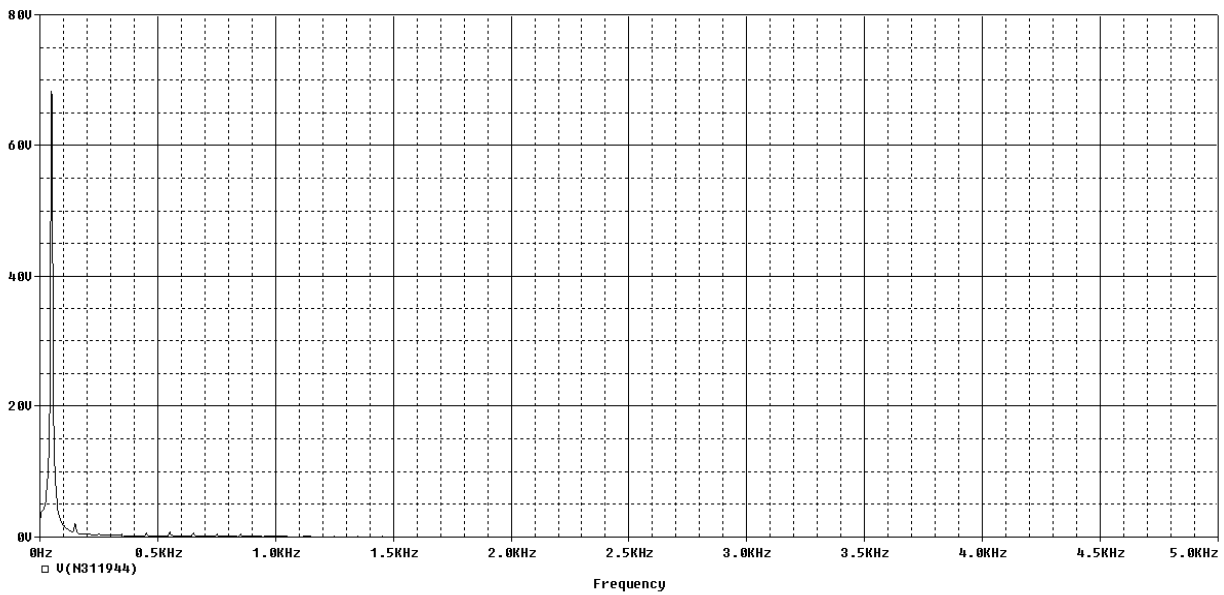


(β)

(Συνεχίζεται)



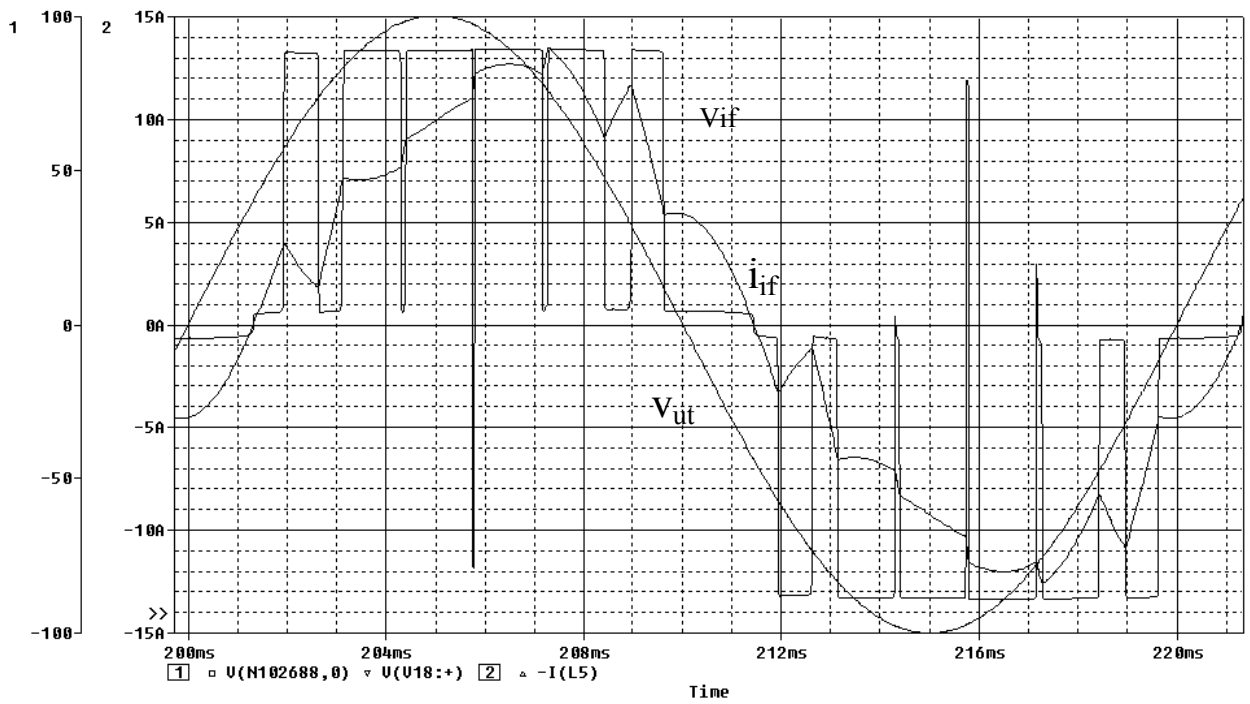
(γ)



(δ)

Σχήμα 7.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο SPICE του αντιστροφέα και του κυκλομετατροπέα, κατά τη dc-ac φάση λειτουργίας ($V_{bat}=100$ volts, SPWM, $F_{nc}=7$, $M_f=1$, $PF=0.8$ επαγωγικός).

- α) Υψηλής συχνότητας τάση εξόδου του αντιστροφέα
- β) Τάση και ρεύμα εξόδου του κυκλομετατροπέα πριν από το φιλτράρισμα
- γ) Τάση και ρεύμα εξόδου του κυκλομετατροπέα μετά από το φιλτράρισμα
- δ) Φάσμα συχνοτήτων της τάσης εξόδου

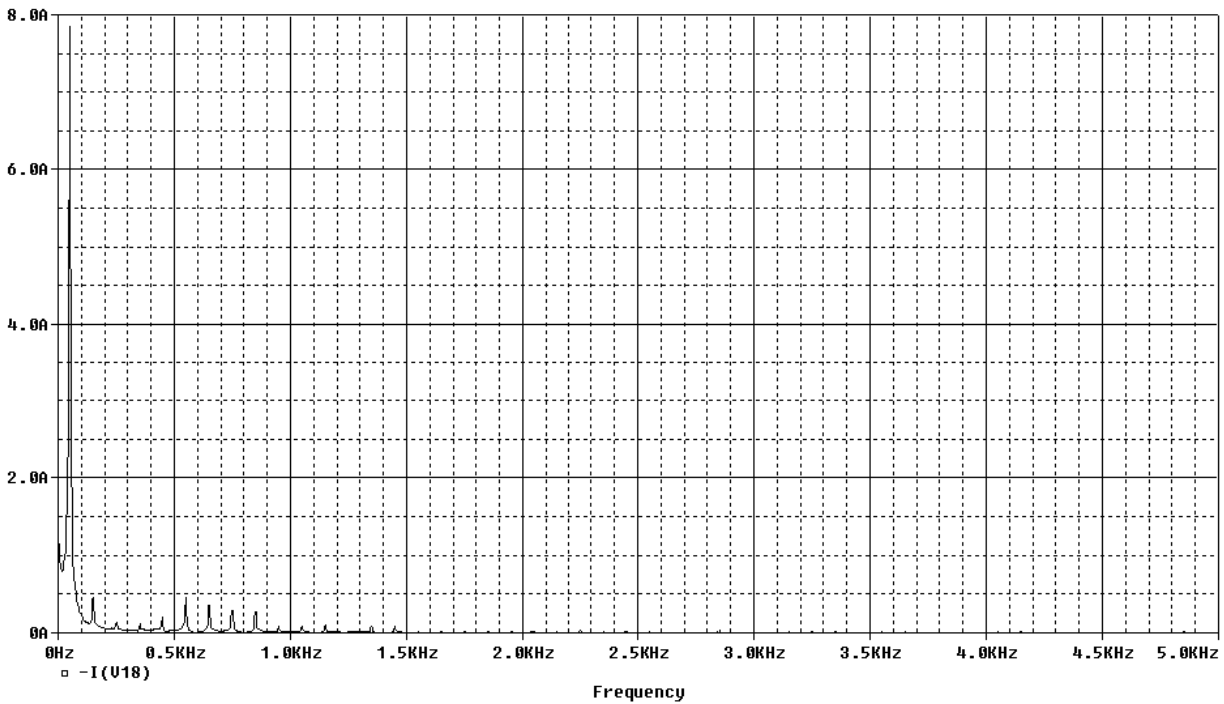


(α)



(β)

(Συνεχίζεται)



(γ)

Σχήμα 7.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο SPICE του αντιστροφέα και του κυκλομετατροπέα κατά την ac-dc φάση λειτουργίας ($V_{ut}=100$ volts, SPWM, $F_{nc}=7$ and $M_f=1$).

- α) Τάση εισόδου, ρεύμα εισόδου και ανακλώμενη τάση στον κυκλομετατροπέα
- β) Τάση και ρεύμα εξόδου του κυκλομετατροπέα
- γ) Φάσμα συχνοτήτων του ρεύματος εισόδου

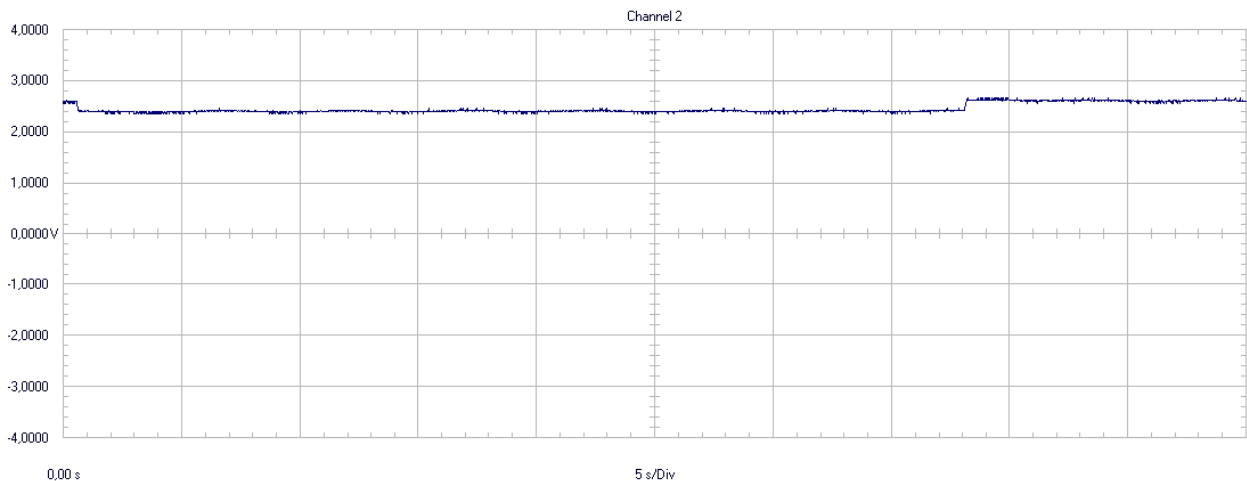
Τα αποτελέσματα προσομοίωσης που παρουσιάζονται στα σχήματα 7.4 και 7.5 συμφωνούν απόλυτα με τα θεωρητικά αναμενόμενα.

7.3 Πειραματικά αποτελέσματα

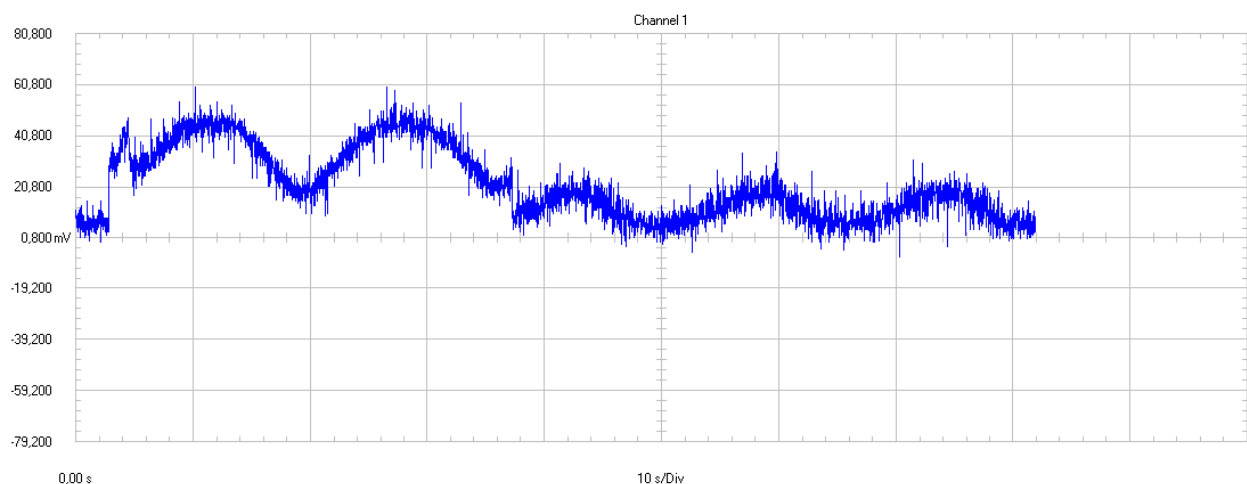
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, που ελήφθησαν σε κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.

Στο σχήμα 7.6 φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος εξόδου της κυψέλης καυσίμου για απότομη μεταβολή του φορτίου. Παρατηρούμε ότι από τη στιγμή της αύξησης του φορτίου (στην προκειμένη περίπτωση από 250W περίπου στα 1000 W), η τάση εξόδου της κυψέλης μειώνεται (όπως αναμενόταν) από τα 52 V στα 48V, ενώ υπάρχει μια αύξηση του ρεύματος από τα 5A περίπου στα 30A, ενώ στη συνέχεια η τάση σταθεροποιείται πάλι στα 52V και το ρεύμα περίπου στα 20A. Η μεταβατική αυτή κατάσταση διαρκεί περίπου 35sec. Η απότομη και μεγάλη αύξηση του ρεύματος κατά τη μεταβατική κατάσταση οφείλεται στο γεγονός ότι η κυψέλη καυσίμου ενεργοποιεί τα βοηθητικά υποσυστήματά της, τόσο για την

προσαγωγή μεγαλύτερης ποσότητας των αντιδρώντων αερίων καυσίμων (υδρογόνου και οξυγόνου) στο ηλεκτρόδιο της ανόδου, όσο και για την καλύτερη ψύξη και την ταχύτερη ένυδρη μεταφορά των ιόντων του υδρογόνου μέσω του ηλεκτρολύτη προς το ηλεκτρόδιο της καθόδου, προκειμένου να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του φορτίου.



(α)

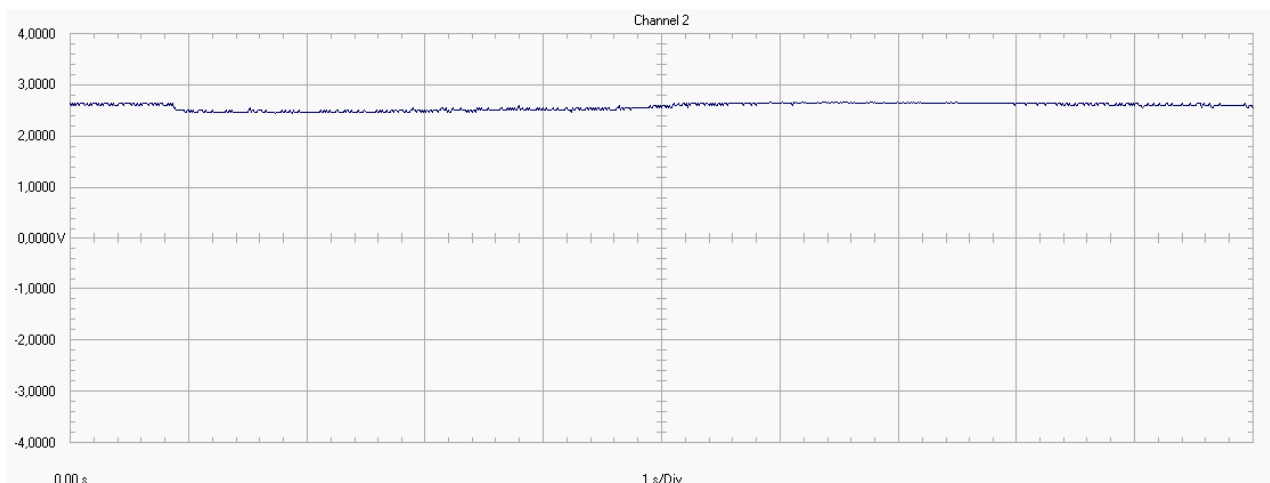


(β)

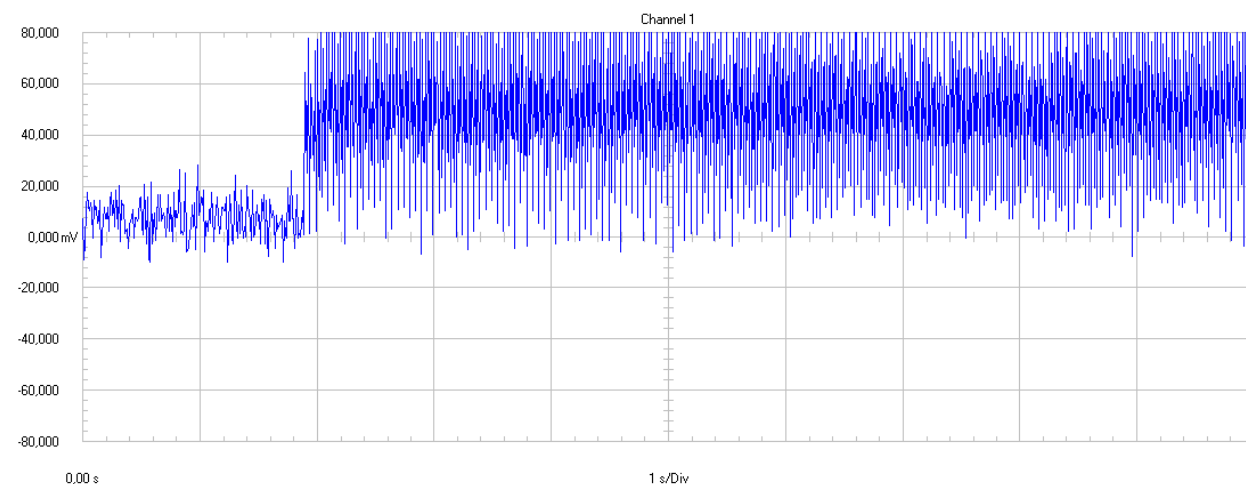
Σχήμα 7.6 Μεταβατική κατάσταση τάσης και ρεύματος της κυψέλης καυσίμου για απότομη μεταβολή του φορτίου.

(α) Τάση εξόδου, (β) Ρεύμα εξόδου

Στο σχήμα 7.7 φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος εξόδου του dc-dc μετατροπέα κατά την παραπάνω μεταβολή του φορτίου. Παρατηρούμε ότι η μεταβατική κατάσταση για την τάση εξόδου του μετατροπέα περιορίζεται (όπως αναμενόταν) στα 4sec περίπου, ενώ ο χρόνος της μεταβατικής κατάστασης του ρεύματος είναι πάρα πολύ μικρός. Σε αυτό βέβαια, βοηθάει και η παρουσία της συστοιχίας των συσσωρευτών, η οποία είναι συνδεδεμένη παράλληλα στην έξοδο του μετατροπέα.



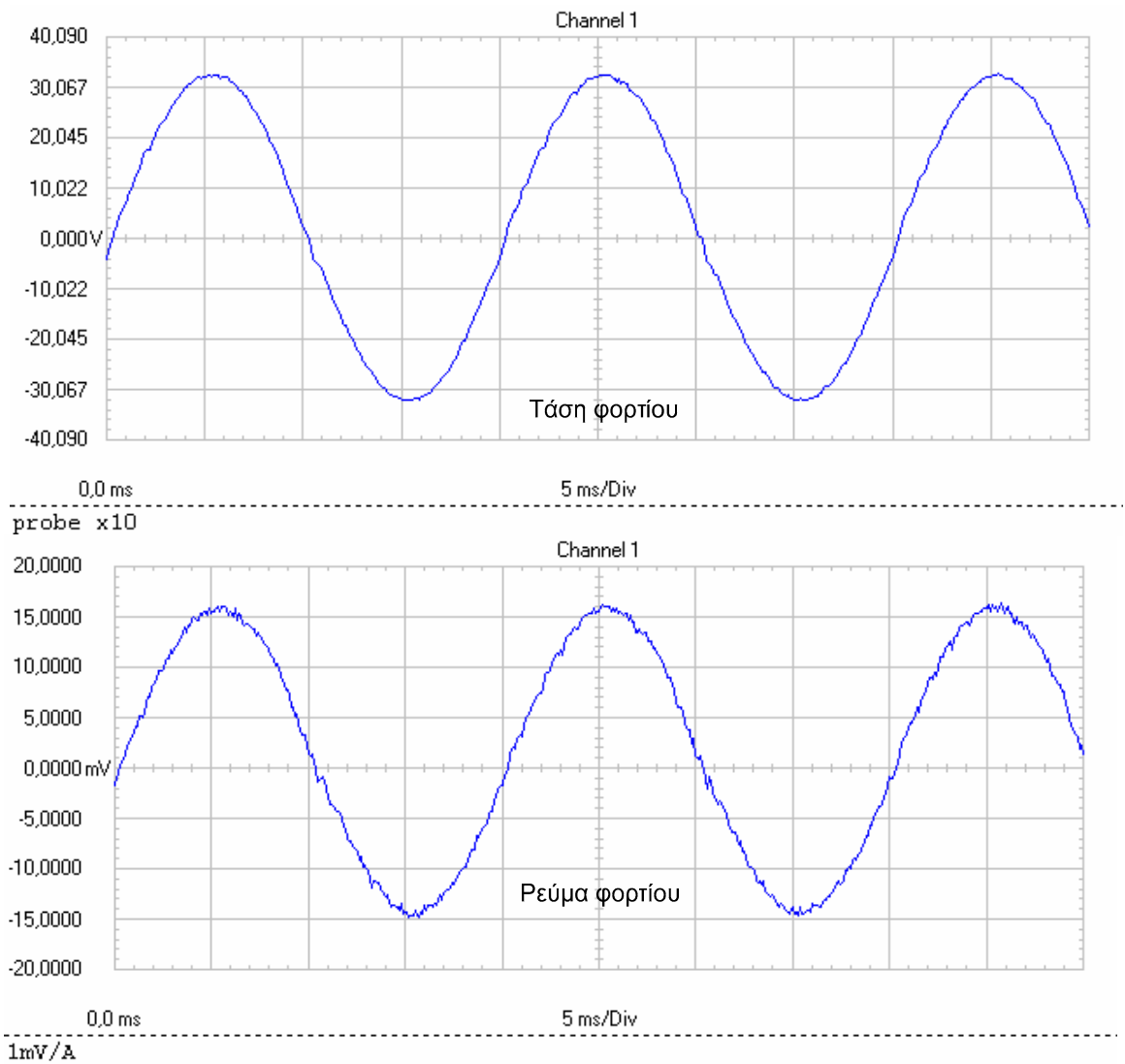
(α)



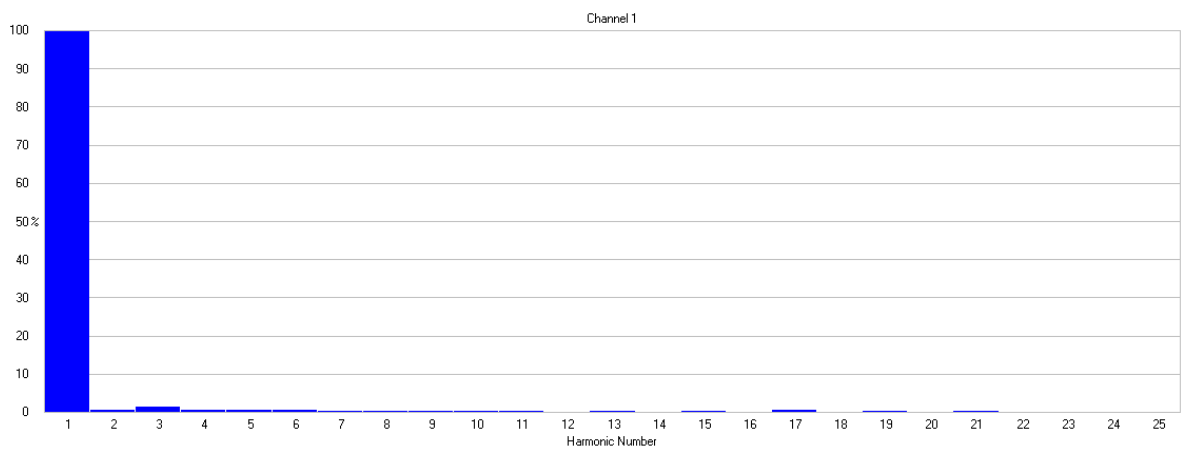
(β)

Σχήμα 7.7 Μεταβατική κατάσταση τάσης και ρεύματος του dc-dc μετατροπέα για απότομη μεταβολή του φορτίου. (α) Τάση εξόδου, (β) Ρεύμα εξόδου

Στο σχήμα 7.8 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στο φορτίο, το ποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι ωμικό (2,5 kW). Παρατηρούμε ότι οι δύο κυματομορφές είναι συμφασικές (λόγω του ωμικού φορτίου) και πολύ καλής ποιότητας σε ότι αφορά τις αρμονικές συνιστώσες, όπως φαίνεται και από το φάσμα συχνοτήτων της τάσης στο σχήμα 7.8 (γ).



(α)



(β)

Σχήμα 7.8 (α)Κυματομορφές τάσης (πάνω) και ρεύματος (κάτω) στο φορτίο
 (β)Φάσμα συχνοτήτων της τάσης στο φορτίο.

Παρατηρώντας τα σχήματα 7.6, 7.7 και 7.8 μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι απόλυτα σύμφωνα με αποτελέσματα της προσομοίωσης, όπως αυτά παρουσιάζονται στα σχήματα 7.2 έως και 7.4.

Για τη λειτουργία της κυψέλης υδρογόνου στη φάση της παραγωγής υδρογόνου δεν ελήφθησαν πειραματικά αποτελέσματα, γιατί η συγκεκριμένη κυψέλη καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι αναστρέψιμης λειτουργίας. Αυτό θα γίνει σε μελλοντική ερευνητική προσπάθεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας απασχολεί εδώ και πολλά χρόνια την επιστημονική κοινότητα. Κατά το παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφορα τέτοια συστήματα, όπως τα συστήματα αποθήκευσης κινητικής ενέργειας (σφόνδυλοι), τα αντλητικά συστήματα αποθήκευσης νερού και οι συσσωρευτές (μπαταρίες). Μια άλλη, πιο πρόσφατη και γνωστή τεχνική, η οποία προτείνεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, ως συσκευή παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι κυψέλες καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.

Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας αποτελείται από μια κυψέλη με καύσιμο το υδρογόνο και από μια συσκευή ηλεκτρόλυσης. Το σύστημα αυτό είναι ικανό για να λειτουργεί σε δύο φάσεις : στη φάση κατά την οποία η ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται παράγοντας υδρογόνο και οξυγόνο, και στη φάση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την οποία το υδρογόνο και το οξυγόνο επανασυνδέονται για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και νερό.

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 μπαταριών που χρησιμοποιούνται στο 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 1.2).

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 (σχήμα 2.20). Ένα άλλο πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η υψηλή πυκνότητα ενέργειας, δηλαδή, η δυνατότητα να αποθηκεύουν μεγάλα ποσά ενέργειας ανά μονάδα μάζας. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι πολύ σημαντικό, τόσο για σταθερές, όσο και για κινητές (ηλεκτρικό αυτοκίνητο, ηλιακό αεροπλάνο κ.λπ.) εφαρμογές. 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.

Ένα σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για να είναι ικανό να λειτουργεί ως αξιόπιστη πηγή ισχύος, πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

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

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μια αμφίπλευρη τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στα συστήματα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας. Η τοπολογία αυτή, μαζί με το σύστημα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και σε υβριδικά συστήματα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το προτεινόμενο σύστημα μετατροπής ισχύος 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.

Η τοπολογία αυτή συγκρινόμενη με τα ήδη υφιστάμενα αμφίπλευρα συστήματα μετατροπής ισχύος παρουσιάζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα :

Πλεονεκτήματα :

- 1) Χρησιμοποιείται συστοιχία συσσωρευτών χαμηλής DC τάσης (έως 96 Volts), με αποτέλεσμα να μην απαιτείται σύστημα διαχείρισης και ισοδυναμικού των στοιχείων.
- 2) Απορροφάται μικρότερη κυμάτωση ρεύματος από την κυψέλη καυσίμου, σε χαμηλότερη διακοπτική συχνότητα, με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερο φίλτρο στην είσοδο της κυψέλης καυσίμου. Επίσης λόγω της μικρότερης διακοπτικής συχνότητας είναι λιγότερο ευάλωτο στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής παρενόχλησης (Electromagnetic Interference - EMI)
- 3) Λόγω της εφαρμογής του αντιστροφέα υψηλής συχνότητας, ο μετασχηματιστής ισχύος έχει μεγάλη πυκνότητα ισχύος (kW/cm^3), μειώνοντας έτσι τον όγκο και το βάρος του.
- 4) Λόγω της αμφίδρομης λειτουργίας του, το προτεινόμενο κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Μειονεκτήματα :

- 1) Χρησιμοποιούνται τέσσερεις (4) δίοδοι και τέσσερεις (4) διακόπτες επιπλέον, στη βαθμίδα του κυκλομετατροπέα.

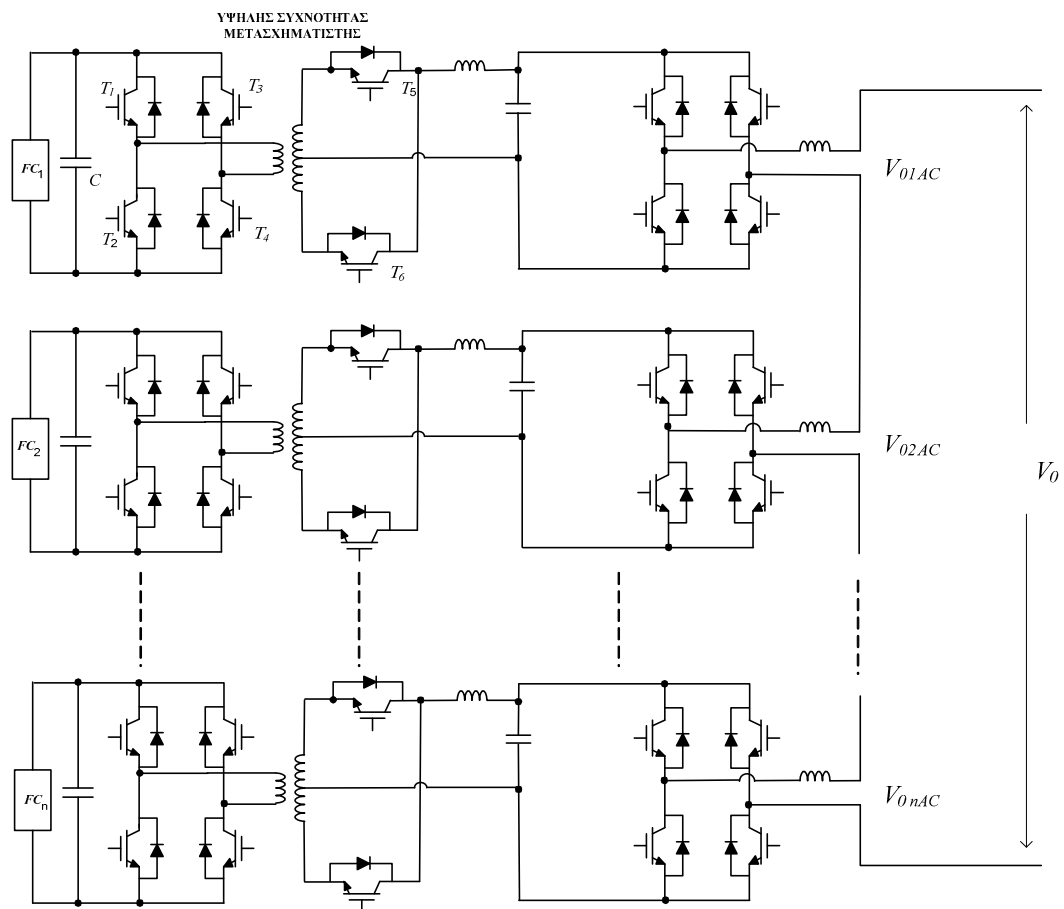
8.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Η παρούσα διδακτορική διατριβή συμβάλει στην προαγωγή της επιστήμης στον τομέα των συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, η διδακτορική αυτή διατριβή προτείνει μια νέα τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία παρέχει αμφίδρομη επεξεργασία της ηλεκτρικής ισχύος, για εφαρμογές σε συστήματα κυψελών καυσίμου αναστρέψιμης λειτουργίας.

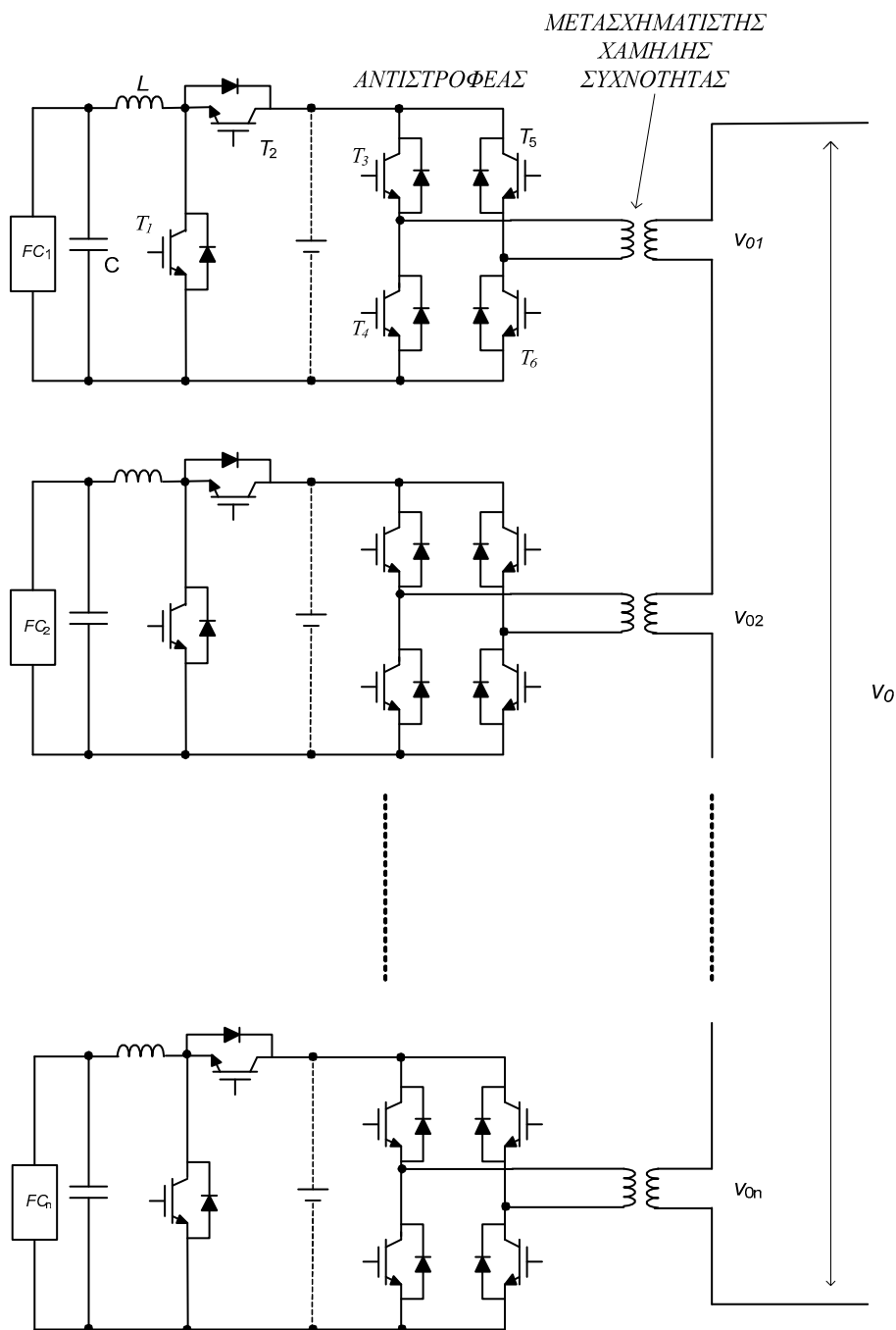
Οι καινοτομίες που παρουσιάζει η προτεινόμενη τοπολογία αφορούν στη χρησιμοποίηση αμφίπλευρου dc-dc μετατροπέα με συζευγμένα πηνία, καθώς και η χρησιμοποίηση υψηλής συχνότητας βαθμίδας αντιστροφεία – κυκλομετατροπέα.

8.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

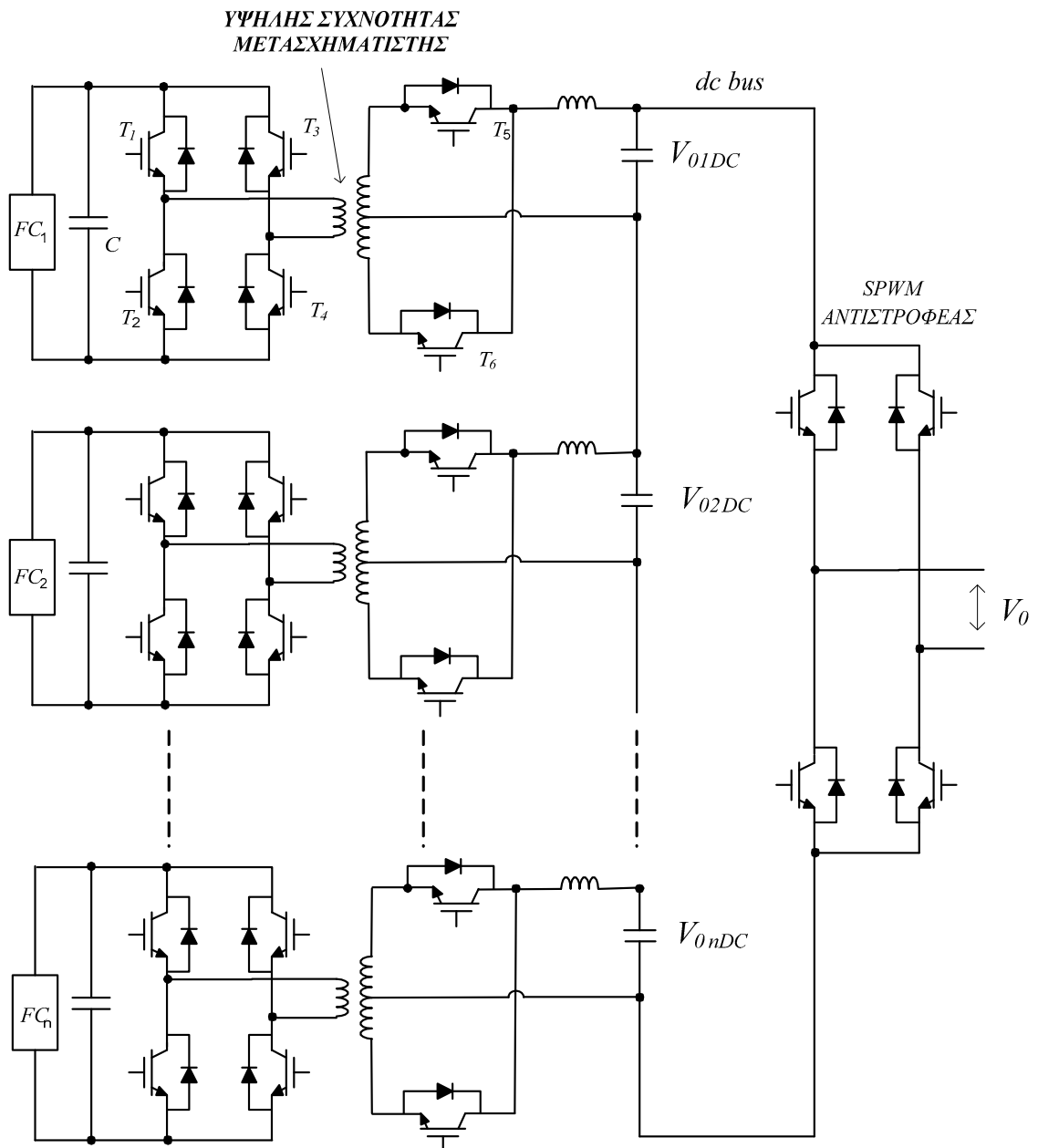
Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η διερεύνηση και η ανάπτυξη τοπολογιών ηλεκτρονικών ισχύος για εφαρμογές σε διασυνδεδεμένα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος. Τέτοιες τοπολογίες παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 8.1 Η εναλλασσόμενη τάση εξόδου του συστήματος προκύπτει από το άθροισμα των εναλλασσόμενων τάσεων εξόδου των αντιστροφείων των επιμέρους μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 8.2 Η εναλλασσόμενη τάση εξόδου του συστήματος προκύπτει από το άθροισμα των εναλλασσόμενων τάσεων των δευτερευόντων τυλιγμάτων των μετασχηματιστών χαμηλής συχνότητας, των επιμέρους μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 8.3 Η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα της βαθμίδας εξόδου προκύπτει από το άθροισμα των συνεχών τάσεων εξόδου των ανορθωτικών διατάξεων των επιμέρους μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Fuel Cells, IEEE spectrum, June 2001
- [2] J. Hirschenhofer, “How the fuel cell produces power” IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Nov. 1992, pp 24-25.
- [3] J.E. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Wiley, New York, 2000.
- [4] K. Rejashékara, “Hybrid Fuel Cell Strategies for clean Power Generation” IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 41, No.3, May/June 2005, pp.682-689.
- [5] Energy Nexus Group, Technology Characterization: Fuel Cells, April 2002.
- [6] David Hart, Günter Hörmandinger, Initial Assessment of Fuel Cells and Competing Technologies, 1997.
- [7] S.T. Hung, D.C. Hopkins, C. R. Mosling, “extrusion of battery life via charge equalization control”, IEEE Trans. on Industrial Electronics. Vol. 40, No. 1, Feb. 1993, pp. 96-104.
- [8] H. Ertl, J. W. Kolar and F.C. Zack, “A Novel Multicell DC-AC Converter for Applications in Renewable Energy Systems”, IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol 49, No. 5, October 2002, pp. 1048-1057.
- [9] Z. Jiang, L. Gao and R.A. Dagar, “Flexible multiobjective Control of Power Converter in Active Hybrid Fuel Cell/Battery Power Sources,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 1, January 2005, pp. 244-253.
- [10] Y. Xue et al, “Topologies of single-phase Inverters for small distributed power generators,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 5, September 2004, pp. 1305-1314.
- [11] F.Blaabjerg et al, “Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.19, No 5, Sept. 2004, pp. 1184-1194.
- [12] United States Patent No. 6,506,066, April 1996.
- [13] United States Patent No.6,579,638, Jan. 2003.
- [14] J. Wang, et al, “Low Cost of Fuel Cell Converter System for Residential Power Generation,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 5, Sept. 2004, pp. 1315-1322.
- [15] <http://www.nfcrc.uci.edu/fcresources/FCexplained/fccapps.htm>
- [16] http://www.nfcrc.uci.edu/fcresources/FCexplained/FC_howItWorks.htm
- [17] http://www.nfcrc.uci.edu/fcresources/FCexplained/FC_Comp.htm

- [18] http://www.nfrcr.uci.edu/fcresources/FCexplained/FC_Types.htm
- [19] National Fuel Cell Research Center, <http://www.nterc.uci.edu/fcresources/FCexplained/stationary.htm>
- [20] J. A. Switch, M.H. Nehrir, V. Gerez, and R. Shaw, "A broad look at the workings, types, and applications of fuel cells," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer meeting, Vol. I, Chicago, July 2002, pp. 70-75.
- [21] John Eriksen et al., "System analysis of a PEM FC- Based Stand Alone Power Systems (SAPS)" Institute for Energy Technology (IFE), 2001.
- [22] Fuel Cell Handbook, 5th ed. EG&G Services Parson Inc., DOE, October 2000.
- [23] Sharon Thomas, Martia Zalbowits, "Fuel Cells-Green Power", Los Alamos National Laboratory.
- [24] Raimando R. Passos, Edson A. Ticiantelly, "Effects of the operational conditions on the membrane and electrode properties of a PEMFC", Journal of Brazilian Chemical Society, Vol. 13, No 4, p.483-489, 2002.
- [25] Tuomas Mennola et. al., "Measurement of ohmic voltage losses in individual cells of a PEMFC stack", Journal of Power Sources 112, p.261-272, 2002.
- [26] Μέξης Γεώργιος, "Τεχνικές Προσομοίωσης Συστημάτων Κυψελών υδρογόνου", Αθήνα Σεπτέμβριος 2006.
- [27] http://www.nfrcr.uci.edu/fcresources/FCexplained/FC_benefits.htm
- [28] Fuel cell vehicles at GM/Opel, Journal of Power Sources Roland Nolte Adam Opel AG, Global Alternative Propulsion Center, 55252 Mainz-Kastel, Germany.
- [29] The improvement of the efficiency of fuel cells against the elimination of harmful emissions from the internal combustion engines, JSAE Review, 29 September 2000.
- [30] Σ. Ν. Μανιάς, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Εκδόσεις Συμαιών 2000.
- [31] Σ. Ν. Μανιάς, "Ανώτερα Κεφάλαια Ηλεκτρονικών Ισχύος", Εκδόσεις Παπασωτηρίου 1997.
- [32] Σ. Ν. Μανιάς, "Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά", Εκδόσεις Συμαιών 2001.
- [33] Ιωαννίδης Χ. Γεώργιος, "Νέες τεχνικές ελέγχου και Σχεδιαστικής Προσέγγισης για τους Μετατροπείς Ισχύος Συνεχούς Ρεύματος με εφαρμογή στο Μετατροπέα Υποβιβασμού (Buck)" 1998.
- [34] N. Mohan, T. Undelend, W. Robbins "Power Electronics, Application and Design" 1995.

- [35] Καρβέλης Α. Γεράσιμος, "Νέες τοπολογίες ημι-συντονιζόμενων μετατροπέων Ηλεκτρονικών Ισχύος για μετατροπή Συνεχούς - σε - Συνεχές και Εναλλασσόμενου σε Συνεχές", 1996.
- [36] P. W. Lee et al, "steady-state analysis of an interleaved boost converter with coupled inductors," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 4, Aug. 2000, pp. 787-795.
- [37] X. Huang et al, "Parasitic Ringing and Design Issues of Digitally Controlled High Power Interleaved Boost Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.19, No 5, Sept. 2004, pp.1341-1352.
- [38] Andy M. Mc Landich "Sensorless Control of a Bidirectional Boost Converter for a Fuel Cell Energy Management System" 2003.
- [39] Su-Jin Jang, Tae-Won Lee, Won-Chal Lee, Chung-Yuen Won "Bi-directional DC-DC Converter for Fuel Cell Generation System", IEEE Power Electronics Conference, Vol. 6, June , 2004, pp. 4722- 4728.
- [40] Burak Ozpineci, Leon M. Tolbert, "Cycloconverters", IEEE-IECON, Aachen/Germany, 1998, Vol.2, pp 726-732.
- [41] G. K. Andersen, C. Klumpner, S.B. Kjaer, and F. Blaabjerg, "A new green power inverter for fuel cells," in Proc. PESC'02 Conf. Vol.2, 2002, pp.727-733.
- [42] S. Manias, and Ziogas, P.D. "A novel two stage DC to AC transistorized inverter," Canadian Elec. Engin. Journal, Vol.8, No.3, July 198, pp.106-1143.
- [43] S. N. Manias, "Some Novel Power Conversion Schemes Employing Pulse Width Modulated High-Frequency Links", PhD Thesis Department of Electrical Engineering and Computer Science, Concordia University, Montreal Canada, September 1984.
- [44] R. J. Wai, R.Y. Dyan, J. D. Lee and L. W. Liu, "High Efficiency Fuel-Cell Power Inverter with Soft-Switching Resonant Technique," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2 June 2005, pp. 485-492.
- [45] R. Gopinath et al, "Development of a low cost Fuel Cell Inverter System with DSP control," IEEE Power Electronics Specialists Conference 2002, PESC'02 pp. 309 – 314.
- [46] S.N. Manias, "Voltage Source Converters for DC Grid Wind Farm Applications," IEEE PESC'03 Tutorial.
- [47] S. N. Manias, P. D. Ziogas and G. Olivier, "Bilateral DC to AC converter using a high frequency link," IEE Proceedings, PART-B, Vol. 134, No 1, Jan. 1987.

- [48] M. Prodanovic, T.C. Green, "Control and Filter Design of Three-Phase Inverters for High Power Quality Grid Connection" IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 18, No. 1, Jan. 2003, pp. 373-380.
- [49] Y. Xue, L. Chang "Closed-Loop SPWM Control for Grid-Connected Buck-Boost Inverters", Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference 2004, PESC'04, pp. 3366-3371.
- [50] E. Twining, D.G. Holmes "Grid Current Regulation of a Three-Phase Voltage Source Inverter with an LCL Input Filter", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 18, No. 3, May 2003, pp.888-895.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΠΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

1. G. C. Ioannidis, G. Charokopos, P. Marabeas, S. N. Manias, "A Mixed-Mode PWM Controller", International Journal of Electronics, Taylor & Francis, May 2010.

Δημοσιεύσεις σε συνέδρια και ημερίδες

1. P. G. Marambeas, V. G. Agelidis, S. N. Manias, "A Novel Dual Mode Power Conversion Topology for Regenerative Fuel Cell System", MED Power 2004, November 14-17, Lemesos, Cyprus.
2. P. G. Marambeas, P. Bauer, S. N. Manias, "Power Quality Computer Animations for Undergraduate Education", MED Power 2004, November 14-17, Lemesos, Cyprus.
3. Π.Γ. Μαραμπέας, Σ.Ν. Μανιάς, "Μετατροπείς Ισχύος για Κυψέλες Καυσίμου σε Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς", Διημερίδα Τ.Ε.Ε, 12-13 Ιαν. 2006, Αθήνα..
4. Π.Γ. Μαραμπέας, Σ.Ν. Μανιάς, "Βοήθημα Ηλεκτρονικής Μάθησης για το Μάθημα της Ποιότητας Ηλεκτρικής Ισχύος", Διημερίδα Τ.Ε.Ε, 5-6 Απρ. 2006, Αθήνα.
5. P.G. Marambeas, F. Stergiopoulos, S. Papathanasiou, P. Bauer, S.N. Manias, "Interactive Multimedia Material for an Electrical Power Quality Course", PESC'06.
6. P. Marambeas, S. Papathanassiou, S.N. Manias, S. Mouroutsos, G. Ioannidis, "A power electronics conversion topology for regenerative fuel cell systems", PESC '08.

7. P. Panagis, F. Stergiopoulos, P. Marambeas, S.N. Manias, "Comparison of State of the Art Multilevel Inverters", PESC '08.
8. G. Ioannidis, G. Xarokopos, P. Marambeas, S.N. Manias, "A new mixed-mode programming in PWM controllers", PESC '08.