



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

ΤΟΥ

Νικολάου Μπαϊραχτάρη του Γεωργίου

«Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα πρόωσης κυψελών
καυσίμου για ναυτικές εφαρμογές – Μελέτη και
σχεδιασμός των ηλεκτρονικών μετατροπέων
ισχύος του συστήματος»

Επιβλέπων: Καθηγητής Χρίστος Αθ. Φραγκόπουλος

Τριμελής επιτροπή: Χ. Φραγκόπουλος, Ι. Προυσαλίδης, Λ. Καϊκτσής

Αθήνα, Μάρτιος 2011

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Περίληψη

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος πρόωσης κυψελών καυσίμου για ναυτικές εφαρμογές με έμφαση στη μελέτη και στο σχεδιασμό των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος. Στην εποχή μας, ο συνδυασμός ηλεκτρικής πρόωσης και συστημάτων κυψελών καυσίμου αποτελεί πιθανή λύση στη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση στον τομέα των μεταφορών καθώς και στα ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα που αυτή προκαλεί. Στην εργασία μελετούνται δύο συστήματα πρόωσης ίδιας ονομαστικής ισχύος που διαφέρουν στο σύστημα τροφοδοσίας κυψελών καυσίμου. Η διαφορά αυτή απαιτεί και διαφορετικό σχεδιασμό στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής οδηγούν στη χρήση μετατροπέων συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση με διαδοχική αγωγή παράλληλων κλάδων για τον έλεγχο του ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης συνεχούς ρεύματος και άρα της έλικας του σκάφους. Στο ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα προστίθεται και μια συστοιχία συσσωρευτών για την κάλυψη των αιχμών του φορτίου και για βελτίωση της απόκρισης του συστήματος σε μεταβατικές καταστάσεις. Για καθένα από τα υποσυστήματα του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος προτείνεται αντίστοιχο πραγματικό εμπορικό προϊόν. Τέλος παρατίθενται δύο πιθανές ναυτικές εφαρμογές του συστήματος που σχεδιάστηκε.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και τον σχεδιασμό ενός ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος πρόωσης με κυψέλες καυσίμου που ελέγχεται από ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος για εφαρμογή σε ναυτικά συστήματα. Συγκεκριμένα στην εργασία περιλαμβάνονται κατά σειρά τα ακόλουθα.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στην ηλεκτρική πρόωση πλοίων. Ύστερα από μια σύντομη ιστορική αναδρομή, αναλύονται όλα τα επιμέρους συστήματα που συνθέτουν την εγκατάσταση ηλεκτρικής πρόωσης σε ένα πλοίο. Περιγράφονται οι διάφορες μορφές ηλεκτρικής πρόωσης και στο τέλος του κεφαλαίου αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια γενική αναφορά στα λειτουργικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στην εφαρμογή των κυψελών καυσίμου σε ναυτικά συστήματα. Αναφέρονται οι βασικές απαιτήσεις ασφαλείας για την εφαρμογή τους σε σκάφη και παρουσιάζονται μια σειρά από σύγχρονες ναυτικές εφαρμογές συστημάτων κυψελών καυσίμου.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναφέρεται στις βασικές τοπολογίες ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα με κυψέλες καυσίμου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων των υπό μελέτη ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων και πραγματοποιείται ο μαθηματικός σχεδιασμός των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση τη συμπεριφοράς των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος.

Στο έβδομο κεφάλαιο συνοψίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος πρόωσης και αναφέρονται τα σχετικά συμπεράσματα.

Στη συνέχεια παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Τέλος στο παράρτημα παρατίθενται τα φυλλάδια των κατασκευαστών ορισμένων στοιχείων του σχεδιασμού.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Χρίστο Φραγκόπουλο για την ανάθεση του θέματος και την επίβλεψη της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας καθώς και για την καθοριστική στήριξή του κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ιωάννη Προυσαλίδη για την πολύτιμη βοήθειά του και για τις συμβουλές του.

Τέλος οφείλω, για μια ακόμη φορά, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υλική και ηθική υποστήριξη, την συμπαράσταση και την υπομονή της.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ

A.M.	Ασύγχρονη Μηχανή
E.P.	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
MEK	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
Σ.Ρ.	Συνεχές Ρεύμα
ΣΤ	Συνεχής Τάση

AC	Alternative Current
A.E.S.	All Electric Ship
AFC	Alkaline Fuel Cell
AIM	Advanced Induction Motor
APU	Auxiliary Power Unit
BJT	Bipolar Junction Transistor
CCM	Continuous Conduction Mode
CGH ₂	Compressed Gaseous H ₂
CPP	Controllable Pitch Propeller
CSI	Current Source Inverter
DC	Direct Current
DCM	Discontinuous Conduction Mode
D.H.P.	Delivered Horse Power
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DNV	Det Norske Veritas
DP	Dynamic Positioning
DTC	Direct Torque Control
E.H.P.	Effective Horse Power
EMI	Electromagnetic Interference
ESR	Equivalent Series Resistance
FEP	Full Electric Propulsion
FPP	Fixed Pitch Propeller
GH ₂	Gaseous H ₂
GL	Germanischer Lloyd
GTO	Gate Turn – Off thyristor
HIPWM	Harmonic Injection Pulse Width Modulation
IFEP	Integrated Full Electric Propulsion
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
IMO	International Maritime Organization
LCI	Load Commutated Inverter
LH ₂	Liquid H ₂
LHV	Lower Heating Value
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
MCT	Mosfet Controlled Thyristor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell

PF	Power Factor
P.H.P.	Propeller Horse Power
PWM	Pulse Width Modulation
SCR	Silicon Controlled Rectifier
S.H.P.	Shaft Horse Power
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
T.H.P.	Thrust Horse Power
VSI	Voltage Source Inverter

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ηλεκτρική πρόωση	13
1.1 Ναυτικά συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης	13
1.2 Ιστορική αναδρομή ηλεκτροπρόωσης	16
1.3 Δομή ηλεκτρικού δικτύου πλοίων	18
1.4 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά	19
1.5 Ορολογία ηλεκτρικής πρόωσης	22
1.6 Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης	22
1.6.1 Σύγχρονος κινητήρας μονίμου μαγνήτη	23
1.6.2 Προηγμένοι κινητήρες E.P.	24
1.6.3 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής	25
1.6.4 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής	26
1.7 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης	27
1.7.1 Συνδυασμός κινητήρων E.P. με έλικες μεταβλητού βήματος	28
1.7.2 Συνδυασμός κινητήρων Σ.Ρ. έλικες σταθερού βήματος	29
1.7.3 Μετατροπείς συχνότητας	34
1.7.4 Ημιαγωγικοί διακόπτες ισχύος	39
1.8 Τεχνικές Ελέγχου Κινητήρων Πρόωσης E.P.	40
1.9 Συνεργασία έλικας και κινητήρα πρόωσης	43
1.9.1 Έλικα σταθερού βήματος	43
1.9.2 Έλικα ρυθμιζόμενου ή μεταβλητού βήματος	44
1.10 Συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης	45
1.10.1 Κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion)	45
1.10.2 Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters)	46
1.10.3 Αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod (podded propulsion)	47
1.11 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης σε μικρά σκάφη	49
1.12 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης	50
1.12.1 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης	50
1.12.2 Μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης	51
1.13 Συμπεράσματα	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κυψέλες καυσίμου	53
2.1 Βασική αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου	53
2.2 Δομή μιας κυψέλης καυσίμου	54
2.3 Σύνδεση κυψελών καυσίμου σε σειρά – Η δίπολη πλάκα	56
2.4 Τύποι κυψελών καυσίμου	57
2.5 Σύντομο ιστορικό	61
2.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα – Εφαρμογές	63
2.7 Καύσιμα κυψελών καυσίμου	66
2.8 Αποθήκευση υδρογόνου	67
2.8.1 Αποθήκευση υδρογόνου ως πεπιεσμένο αέριο	68
2.8.2 Αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή φάση	70
2.8.3 Αντιστρεπτή αποθήκευση σε μεταλλικά υβρίδια	71
2.8.4 Σύγκριση τρόπων αποθήκευσης υδρογόνου	71
2.8.5 Άλλοι τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου	72

2.9	Μεταφορά και διανομή υδρογόνου	72
2.10	Συστήματα με κυψέλες καυσίμου	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

	Ναυτικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου	75
3.1	Γενικά περί ναυτικών συστημάτων κυψελών καυσίμου	75
3.2	Συστήματα κυψελών καυσίμου για ναυτικές εφαρμογές	76
3.3	Αρχές ασφαλείας ναυτικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου	83
3.4	Σύγχρονες ναυτικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου	86
3.4.1	H ₂ Yacht	86
3.4.2	SMART H ₂ – Elding I	88
3.4.3	Zemships Project – FCS Alsterwasser	89
3.4.4	Fuel Cell Boat – Nemo H ₂	91
3.4.5	MethAPU	94
3.4.6	FellowSHIP	97
3.4.7	Άλλα προγράμματα ναυτικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου	99
3.5	Συμπεράσματα	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

	Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος συστημάτων κυψελών καυσίμου	103
4.1	Γενικά περί ηλεκτρονικών μετατροπέων κυψελών καυσίμου	103
4.2	Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή	105
4.2.1	Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης σε συνεχή τύπου buck	106
4.2.2	Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης σε συνεχή τύπου boost	112
4.2.3	Μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης συνεχούς τάσης σε συνεχή τύπου buck – boost	118
4.3	Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση	123
4.3.1	Γενικά περί αντιστροφών	123
4.3.2	Ρύθμιση στροφών ασύγχρονου κινητήρα	125
4.3.3	Μονοφασικοί αντιστροφεείς ελεγχόμενοι από τετραγωνικούς παλμούς	127
4.3.4	Τριφασικοί αντιστροφεείς ελεγχόμενοι από τετραγωνικούς παλμούς	129
4.3.5	Μέθοδοι παλμοδότησης αντιστροφών τάσης	131
4.3.5.1	Ημιτονοειδής διαμόρφωση του εύρους παλμών (SPWM)	131
4.3.5.2	Βελτιωμένες μέθοδοι διαμόρφωσης του εύρους παλμών	134

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

	Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου	137
5.1	Γενικά περί ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων	137
5.2	Περιγραφή ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος	139
5.3	Σύστημα κυψελών καυσίμου	140
5.4	Ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης	143
5.4.1	Απαιτήσεις ναυτικού ηλεκτρολογικού εξοπλισμού	144
5.4.2	Γενικά περί κινητήρα συνεχούς ρεύματος	144

5.4.3	Χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας – ροπής μηχανής Σ.Ρ.	146
5.4.3.1	Μηχανές ξένης ή παραλλήλου διέγερσης	147
5.4.3.2	Μηχανές με διέγερση σε σειρά	148
5.4.3.3	Μηχανές διπλής διέγερσης	149
5.4.3.4	Μηχανές Σ.Ρ. μονίμου μαγνήτη	150
5.4.4	Ρύθμιση στροφών μηχανών Σ.Ρ.	151
5.4.5	Επιλογή ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης	152
5.5	Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος κινητήριου συστήματος	157
5.5.1	Μετάβαση από τον κλασσικό μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ στον μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ διαδοχικής αγωγής παράλληλων κλάδων	157
5.5.2	Μαθηματικός σχεδιασμός ηλεκτρονικών μετατροπέων κινητηρίου συστήματος	165
5.5.2.1	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων	165
5.5.2.2	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων	173
5.5.2.3	Μετατροπέας ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης διαδοχικής αγωγής δύο κλάδων	179

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Προσομοίωση – Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος		185
6.1	Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης με διαδοχική αγωγή τεσσάρων κλάδων	185
6.1.1	Πρώτη περίπτωση προσομοίωσης	186
6.1.2	Δεύτερη περίπτωση προσομοίωσης	194
6.1.3	Τρίτη περίπτωση προσομοίωσης	198
6.1.4	Τέταρτη περίπτωση προσομοίωσης	201
6.1.5	Πέμπτη περίπτωση προσομοίωσης	203
6.1.6	Παρατηρήσεις	206
6.2	Μετατροπέας ανύψωσης τάσης με διαδοχική αγωγή τεσσάρων κλάδων	207
6.2.1	Πρώτη περίπτωση προσομοίωσης	209
6.2.2	Δεύτερη περίπτωση προσομοίωσης	217
6.2.3	Τρίτη περίπτωση προσομοίωσης	220
6.2.4	Παρατηρήσεις	222
6.3	Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης με διαδοχική αγωγή δύο κλάδων	223
6.3.1	Πρώτη περίπτωση προσομοίωσης – Ανύψωση τάσης	223
6.3.2	Δεύτερη περίπτωση προσομοίωσης – Υποβιβασμός τάσης	231
6.3.3	Τρίτη περίπτωση προσομοίωσης – Λόγος κατάτμησης 50 %	234
6.3.4	Παρατηρήσεις	237

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Χαρακτηριστικά ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος πρόωσης – Συμπεράσματα		239
7.1	Γενική τοπολογία συστήματος	239
7.2	Αποθήκευση και κατανάλωση καυσίμου	240
7.3	Εκτίμηση συνολικού βάρους συστήματος	242
7.4	Παραδείγματα εφαρμογής συστήματος πρόωσης σε σκάφη	243

7.5	Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις	246
-----	---	-----

	Βιβλιογραφία	249
--	---------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Μέρος Α	Χαρακτηριστικά κυψελών καυσίμου	253
Μέρος Β	Χαρακτηριστικά κινητήρα πρόωσης	259
Μέρος Γ	Χαρακτηριστικά συσσωρευτών	261
Μέρος Δ	Φυλλάδιο κατασκευαστή IGBT	263
Μέρος Ε	Φυλλάδιο κατασκευαστή διόδου ισχύος	267
Μέρος ΣΤ	Πυκνωτές Epcos	271
Μέρος Ζ	Πυκνωτές Renox – Rifa (με σπείρωμα)	273

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ηλεκτρική πρόωση

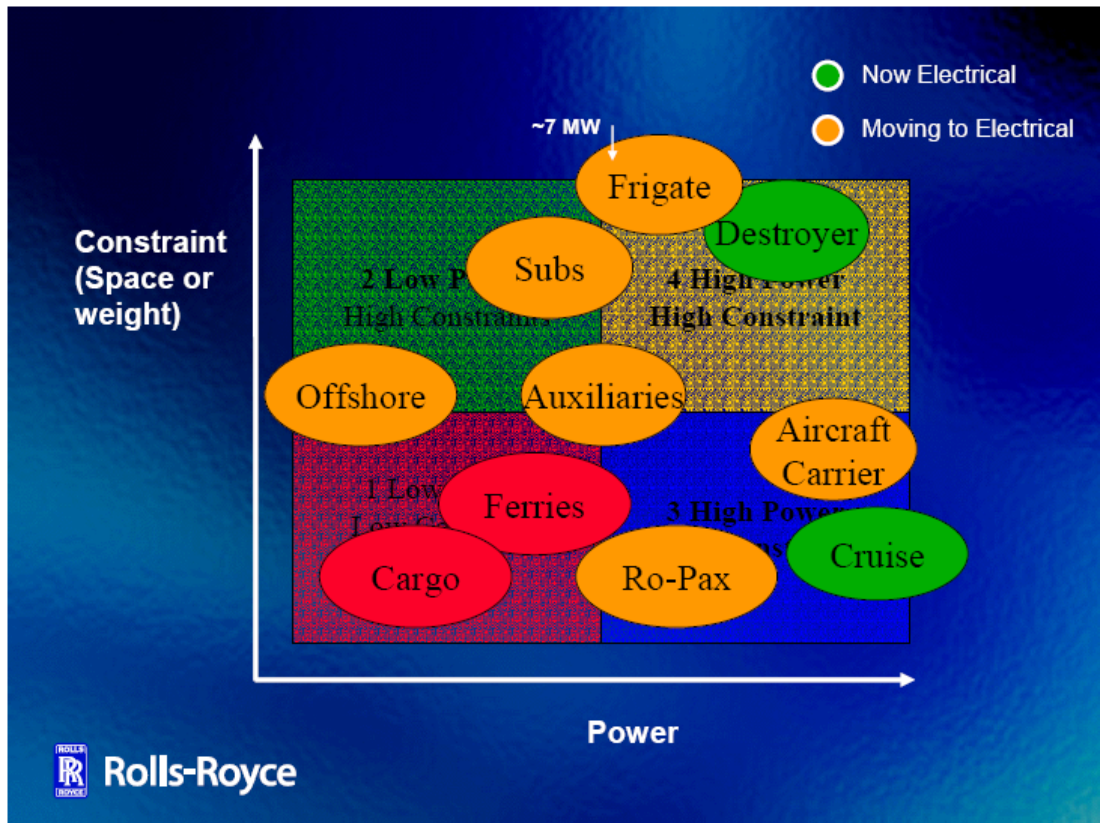
1.1 Ναυτικά συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι παρούσες σε οποιοδήποτε σκάφος, από την τροφοδότηση του εξοπλισμού επικοινωνίας και ναυσιπλοΐας, του συναγερμού και του συστήματος παρακολούθησης, των αντλιών, των ανεμιστήρων, των βαρούλκων, μέχρι την εγκατάσταση υψηλής ισχύος για την ηλεκτρική πρόωση. Η ηλεκτρική πρόωση αποτελεί μία αναδυόμενη περιοχή έρευνας για τους κλάδους της μηχανικής. Ναυπηγοί, μηχανολόγοι και ηλεκτρολόγοι μηχανικοί συνεργάζονται γύρω από κατασκευαστικά, λειτουργικά και οικονομικά ζητήματα. Η κοινή γλώσσα επικοινωνίας και η αμοιβαία κατανόηση μεταξύ των μηχανικών είναι απαραίτητα για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού μιας εγκατάστασης ηλεκτρικής πρόωσης [1].

Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται το είδος εκείνο της πρόωσης στο οποίο οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή και σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες μηχανές όπως μηχανές Diesel, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Οι συμβατικοί κινητήρες εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις ηλεκτροπρόωσης, αλλά αντί να κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με την έλικα κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες, που με τη σειρά τους τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης. Η προωστήρια εγκατάσταση συμπληρώνεται από κάποιο σύστημα ελέγχου για τον χειρισμό της, δηλαδή την κράτηση – εκκίνηση, την αυξομείωση στροφών και την αλλαγή φοράς περιστροφής των ηλεκτρικών κινητήρων [2].

Η ηλεκτροπρόωση δεν αποτελεί καινούρια έννοια, η ιδέα δημιουργήθηκε περισσότερο από 100 έτη πριν. Επί μεγάλο διάστημα, τα συστήματα ήταν του τύπου Σ.Ρ./Σ.Ρ. (συχνά συστήματα Ward – Leonard) δηλ. παραγωγή συνεχούς τάσης και κίνηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Το εναλλασσόμενο ρεύμα αρχίζει να χρησιμοποιείται στα πλοία στις αρχές της δεκαετίας του 1950, αλλά τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης εξακολουθούν να στηρίζονται σε κινητήρες Σ.Ρ., ελεγχόμενους από διατάξεις με θυρίστορς. Τα τελευταία 20 έτη η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος έφερε επανάσταση στον έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων. Η ανάπτυξη διατάξεων και τεχνικών ελέγχου κινητήρων Ε.Ρ., που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις της πρόωσης από πλευράς τόσο ευελιξίας όσο και οικονομίας καυσίμου, έδωσε τη δυνατότητα για ευρύτερη διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης σε εμπορικά πλοία και έτσι στις μέρες μας εκατοντάδες πλοίων χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες ως μέσο πρόωσης. Το 2002 η εγκατεστημένη ισχύς συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης ήταν 6 – 7 GW, εκτός των εγκαταστάσεων σε εφαρμογές πολεμικών σκαφών υποβρυχίων και επιφάνειας [1], [2].

Τη δεκαετία του '90, η ανάπτυξη των αζιμουθιακών προωστήρων, προσέφερε στα πλοία ευελιξία στις κινήσεις, ευκολία στις διελεύσεις από περιοχές υψηλής κινητικότητας και επικινδυνότητας και τη δυνατότητα δυναμικής τοποθέτησής τους (Dynamic Positioning – D.P.) [1].



Σχήμα 1.1 Σύγκριση αναγκών περιορισμού διαστάσεων (ή βάρους) σε σχέση με την ηλεκτρική ισχύ για διάφορους τύπους πλοίων (εμπορικών και πολεμικών) [2].

Ενώ παλαιότερα η ηλεκτρική πρόωση έβρισκε μόνον πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές (παγοθραυστικά, ερευνητικά σκάφη, σκάφη πόντισης καλωδίων), κατά τη δεκαετία του '90 παρουσιάζει μια έντονα αυξανόμενη διάδοση σε πλοία όπως μεγάλα επιβατηγά, οχηματαγωγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κλπ. (βλ. και Σχ. 1.1). Γενικά, η ηλεκτρική πρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών [2], [3]:

α. Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελικτικών ικανοτήτων.

Οχηματαγωγά, παγοθραυστικά, ρυμουλκά, ωκεανογραφικά, σκάφη πόντισης καλωδίων είναι τυπικά παραδείγματα σκαφών αυτής της κατηγορίας. Στις περιπτώσεις αυτές, η μεταβολή της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής της έλικας είναι συχνά ζωτικής σημασίας για την επιτυχημένη λειτουργία του σκάφους.

β. Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων.

Σκάφη με δικά τους μέσα φόρτο – εκφόρτωσης, πυροσβεστικά σκάφη, μεγάλα δεξαμενόπλοια, κ.ά. έχουν μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων, που δε συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη ισχύ πρόωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν ορισμένα δεξαμενόπλοια (π.χ. εκείνα που μεταφέρουν πετρέλαιο από τις εξέδρες εξόρυξης στη στεριά), τα οποία ξοδεύουν μεγάλο μέρος του χρόνου στη φόρτωση (4 – 10 μέρες) ενώ το ταξίδι είναι σχετικά σύντομο. Κατά τη διάρκεια της φόρτωσης η ηλεκτρική ισχύς, που απαιτείται για την κίνηση των διαφόρων μηχανημάτων, μπορεί να είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ισχύ πρόωσης. Αναφέρεται, π.χ., η

περίπτωση δεξαμενοπλοίου με ισχύ πρόωσης 19000 kW, και απαιτήσεις ισχύος 17000 kW – 22000kW κατά τη διάρκεια της φόρτωσης. Τα 6800 kW απαιτούνται από τις έλικες πλευρικής ώσης (τρεις στην πλώρη και δύο στην πρύμνη), που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του σκάφους στην κατάλληλη θέση (δυναμική τοποθέτηση – dynamic positioning – D.P.). Ας σημειωθεί ότι το πλοίο θα πρέπει να μπορεί να φορτώνει ακόμη και με κύματα ύψους 5 – 7 m. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το συγκρότημα ηλεκτρογεννητριών προσφέρει ισχύ είτε για πρόωση είτε για την κίνηση αντλιών ή μεγάλων μηχανημάτων διακίνησης φορτίου.

γ. Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης.

Τέτοιες συνθήκες παρουσιάζονται σε μεγάλα επιβατηγά πλοία και ιδιαίτερα στα κρουαζιερόπλοια, όπου οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις άνεσης και εξυπηρέτησης των επιβατών συντελούν σε αύξηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος, η οποία αρχίζει να αποτελεί σοβαρό ποσοστό της ισχύος πρόωσης φθάνοντας το 30 – 40 %. Επιπλέον, τα σύγχρονα κρουαζιερόπλοια έχουν μέγιστη ταχύτητα 21 – 22 κόμβων, στην οποία ταξιδεύουν κατά πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ κατά το μεγαλύτερο χρόνο κινούνται με ταχύτητα 9 – 14 κόμβων.

δ. Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές.

Οι αεριοστρόβιλοι και πολλές ταχύστροφες μηχανές Diesel έχουν σταθερή φορά περιστροφής και συχνά εγκαθίστανται δύο, τρεις ή και περισσότερες μονάδες, που παράγουν την απαιτούμενη συνολική ισχύ. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ηλεκτρική πρόωση προσφέρει έναν εύκολο τρόπο (ηλεκτρικής και όχι μηχανικής) σύνδεσης ενός κινητήρα πρόωσης με πολλές κύριες μηχανές, καθώς και ρύθμισης της ταχύτητας και της φοράς περιστροφής της έλικας.

ε. Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

Ηλεκτρική ενέργεια αποθηκευμένη σε συσσωρευτές καθώς και συστήματα κυψελών καυσίμου πρόσφατης τεχνολογίας χρησιμοποιούνται για την κίνηση ενός ή περισσότερων κινητήρων πρόωσης του σκάφους με σχετικά χαμηλή ταχύτητα.

Σε πολλές από τις προηγούμενες εφαρμογές (π.χ., σε μεγάλα επιβατηγά, κρουαζιερόπλοια, δεξαμενόπλοια, κλπ), είναι ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική η συνολική αντιμετώπιση των αναγκών με ένα ολοκληρωμένο σύστημα, που θα παρέχει προωστήρια, ηλεκτρική και θερμική ενέργεια από τις ίδιες τις μηχανές (κινητήρες Diesel ή αεριοστρόβιλους που κινούν γεννήτριες και τα υψηλής θερμοκρασίας καυσαερίά τους προσφέρουν χρήσιμη θερμότητα). Έτσι, π.χ., για το δεξαμενόπλοιο που αναφέρθηκε παραπάνω, επιλέχθηκε ηλεκτρική πρόωση με ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος κυκλομετατροπέα (cycloconverter) και ενεργειακό σύστημα αποτελούμενο από τέσσερα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη συνολικής ισχύος 25100 kW και ένα ακόμη ισχύος 1200 kW [3].

Ειδικά, όσον αφορά στα πολεμικά πλοία, η ηλεκτροπρόωση αποτελεί την βασική επιλογή για την κίνηση των υποβρυχίων. Η χρήση της σε πολεμικά πλοία επιφάνειας, που μέχρι σήμερα ήταν σχετικά περιορισμένη, προσελκύει ξανά το έντονο ενδιαφέρον των ναυτικών χωρών που κατασκευάζουν πολεμικά πλοία και εξετάζεται πλέον σαν υποψήφιο σύστημα για την προωστήρια εγκατάσταση της επόμενης γενιάς των μεγάλων πολεμικών πλοίων. Οι αυξημένες απαιτήσεις και οι αυστηρότερες, σε

σχέση με τα εμπορικά πλοία, προδιαγραφές του πολεμικού ναυτικού διαφόρων χωρών, τόσο από άποψης περιορισμού χώρου αλλά και απαιτήσεων του προωστηρίου συστήματος, προϋποθέτουν περισσότερη ανάπτυξη και τελειοποίηση υποσυστημάτων για να πραγματοποιηθούν τα εν δυνάμει πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης. Οι κύριες αιτίες της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος των πολεμικών ναυτικών για τη χρήση της ηλεκτροπρόωσης είναι [2], [3]:

α. Η αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στα πλοία και η τάση για την «ηλεκτροποίηση» των πλοίων με αποκορύφωση το πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship – A.E.S.), δηλαδή η τάση όλες οι λειτουργίες, κύριες και βοηθητικές, να στηρίζονται σε ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας.

β. Η ανάγκη για περισσότερο «αθόρυβη» λειτουργία των πλοίων.

γ. Η αναζήτηση συστημάτων πρόωσης με χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και μειωμένων απαιτήσεων προσωπικού.

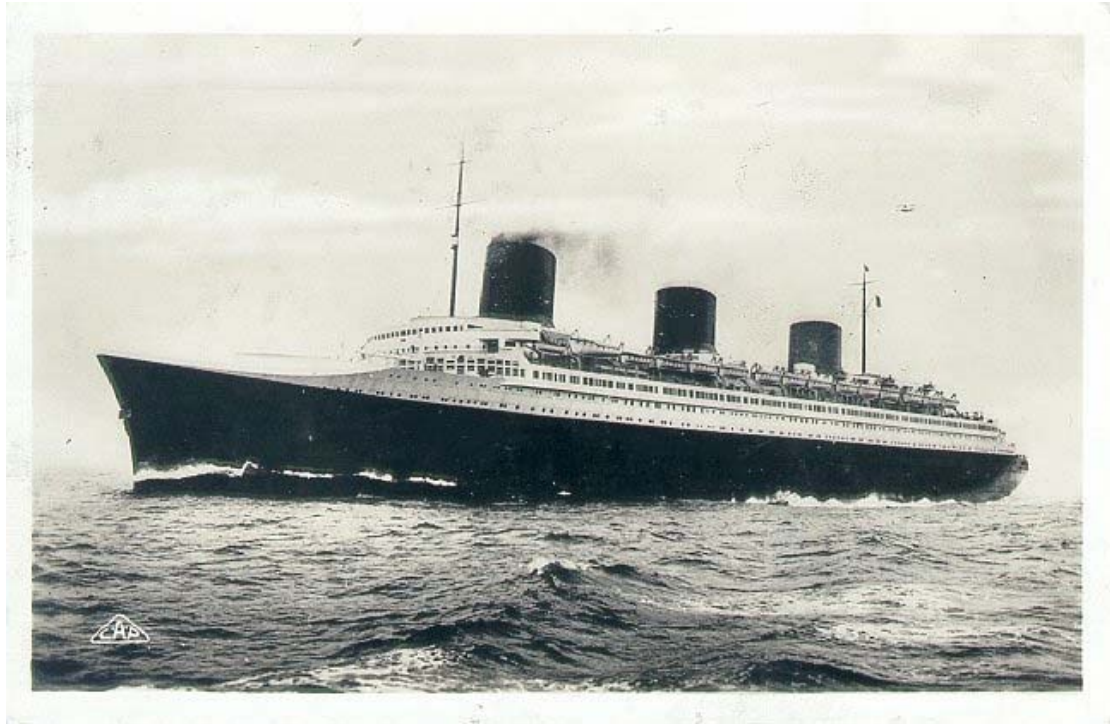
δ. Και κυρίως η ωρίμανση τεχνολογιών που απαιτούνται για να αξιοποιηθούν πλήρως τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης. Τέτοιες τεχνολογίες είναι κυρίως των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχό τους.

Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή συστήματος ηλεκτροπρόωσης για ένα πλοίο, προσφέρει περισσότερη ελευθερία στη σχεδίαση και στην επιλογή των υποσυστημάτων και της διάταξης όλης της προωστήριας και ηλεκτρικής εγκατάστασης. Σε κάθε περίπτωση αξίζει να σημειωθεί, ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι η μόνη λύση για τη βοηθητική πρόωση (δηλ. το σύστημα των πλευρικών προωστήρων που επαυξάνουν την ελικτική ικανότητα των σκαφών ιδίως εντός των λιμένων) με αξιοποίηση κυρίως επαγωγικών κινητήρων μεγάλης ισχύος (0.5 – 2.5 MW) [2].

1.2 Ιστορική αναδρομή ηλεκτροπρόωσης

Μία σειρά πειραματικών εφαρμογών ηλεκτρικής πρόωσης πραγματοποιήθηκαν στο τέλος του 19^{ου} αιώνα σε Ρωσία και Γερμανία όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης τροφοδοτούταν απευθείας από συστοιχίες συσσωρευτών. Η πρώτη γενιά ηλεκτροπρόωσης εφαρμόστηκε περί το 1920. Ήταν αποτέλεσμα του μεγάλου ανταγωνισμού για μείωση του χρόνου των υπερατλαντικών ταξιδιών, μεταξύ των ναυτιλιακών εταιριών επιβατηγών πλοίων. Η μεγάλες απαιτήσεις σε ισχύ πρόωσης καλύπτονταν τότε από στρόβιλο – ηλεκτρικά συστήματα. Το πλοίο S/S Normandie (Εικ. 1.1) χρησιμοποιούσε ένα τέτοιο σύστημα, ήταν το πρώτο σκάφος που διέσχισε τον Ατλαντικό Ωκεανό (1935) κινούμενο με 30 και πλέον κόμβους [1], [5].

Στρόβιλοι ατμού τροφοδοτούσαν τους σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες ισχύος 29 MW σε καθέναν από τους τέσσερις άξονες μετάδοσης κίνησης. Η περιστροφική ταχύτητα δινόταν από την ηλεκτρική συχνότητα των γεννητριών. Σε κανονική λειτουργία οι γεννήτριες τροφοδοτούσαν κάθε μηχανή πρόωσης ξεχωριστά, υπήρχε όμως και η δυνατότητα τροφοδότησης δύο μηχανών από μία γεννήτρια για ταξίδι χαμηλότερης ταχύτητας [1].



Εικόνα 1.1 S/S Normandie (1935) [5].

Με την εισαγωγή των μηχανών Diesel στο μέσο του 20^{ου} αιώνα, η τεχνολογία ατμοστροβίλων και η ηλεκτρική πρόωση εξαφανίστηκαν λίγο πολύ από την εμπορική ναυτιλία μέχρι τη δεκαετία του '80 [1].

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος και συγκεκριμένα των συστημάτων οδήγησης των ηλεκτρικών κινητήρων, έφεραν τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα πάλι στα πλοία. Αρχικά περί το 1970 μέσω των ανορθωτών (E.P./Σ.P.) για τον έλεγχο μηχανών πρόωσης Σ.P. και στη συνέχεια το 1980 με τη χρήση των μετατροπέων E.P./E.P. για τον έλεγχο μηχανών E.P., έχουμε τη δεύτερη γενιά ηλεκτροπρόωσης. Το προωστήριο σύστημα τροφοδοτείται πλέον από ένα ισχυρό δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας. Μέσω του ελέγχου των στροφών των ηλεκτρικών κινητήρων στρέφονται οι έλικες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propellers – FPP). Αυτές οι λύσεις αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σε ειδικές κατηγορίες πλοίων όπως ερευνητικά και παγοθραυστικά πλοία αλλά και σε κρουαζιερόπλοια. Το “S/S Queen Elizabeth II”, μετατράπηκε σε ηλεκτροκίνητο περί το 1975, στη συνέχεια ακολούθησαν και άλλα πλοία όπως τα κρουαζιερόπλοια Fantasy και Princess, shuttle tankers κ.α.. Σημειωτέον, στην άμεσα οδηγούμενη πετρελαιοκίνητη πρόωση η ώση συνήθως ελέγχεται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος αλλαγής του βήματος των ελίκων. Οι έλικες αυτές είναι γνωστές ως έλικες μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propellers – CPP) [1].

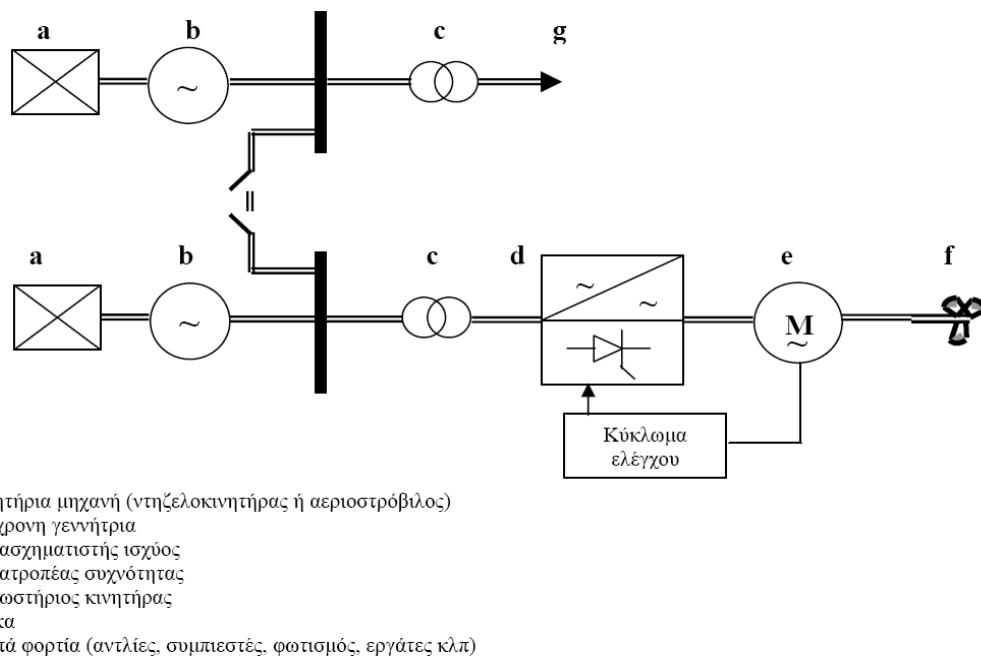
Το 1990 έκανε την εμφάνισή του το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης (podded propulsion). Σε αυτό ο ηλεκτρικός κινητήρας βρίσκεται μέσα σε μια λοβοειδή κατασκευή ποντισμένη στη θάλασσα. Η έλικα, που είναι απευθείας συνδεδεμένη με τον κινητήρα, είναι σταθερού βήματος και το όλο σύστημα έχει τη δυνατότητα περιστροφής κατά 360° προσφέροντας στο πλοίο ευκινησία και ευελιξία (maneuverability). Από την πρώτη εφαρμογή στο κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation”, τα αποτελέσματα ήταν τόσο ενθαρρυντικά ώστε να καθιερωθεί η αζιμουθιακή πρόωση στα νέα κρουαζιερόπλοια (Σχ. 1.2) [1].



Σχήμα 1.2 Κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” με azipod (κάτω δεξιά) με σημαντικό ελεύθερο χώρο [1].

1.3 Δομή ηλεκτρικού δικτύου πλοίων

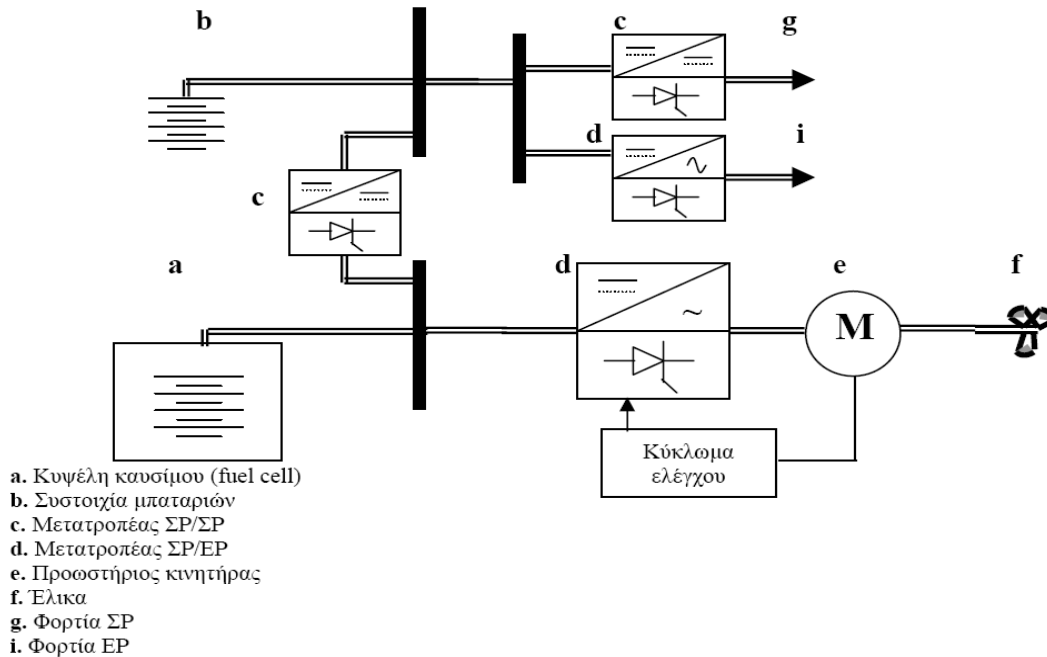
Το γενικευμένο ηλεκτρολογικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου πλοίου με ηλεκτρική πρόωση απεικονίζεται στο Σχ. 1.3. Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να είναι ενιαίο καλύπτοντας όλες τις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες ή μπορεί να αποτελείται από δύο επιμέρους υποσυστήματα, αυτό της ηλεκτροπρόωσης και εκείνο των λοιπών ηλεκτρικών φορτίων.



Σχήμα 1.3 Γενικό διάγραμμα συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου [2].

Σε πλοία με συμβατική πρόωση, ειδική υποπερίπτωση αποτελούν τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν και γεννήτριες (shaft generators) που στρέφονται από την κύρια Diesel μηχανή πρόωσης του πλοίου. Οι

γεννήτριες αυτές μπορεί να συνδέονται με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο με σύνδεσμο Σ.Ρ. (DC link) ή να τροφοδοτούν αυτόνομα μόνο μεγάλα φορτία όπως οι κινητήρες βοηθητικής πρόωσης. Επίσης, σε έκτακτες περιπτώσεις (π.χ. μεγάλης έκτασης ζημία στην κύρια μηχανή) μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα, δηλαδή ως ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης (τροφοδοτούμενες από τις άλλες ηλεκτρογεννήτριες) περιορισμένης ισχύος και να οδηγήσουν το σκάφος σε ασφαλή προορισμό [2].



Σχήμα 1.4 Γενικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πλοίου με κυψέλες καυσίμου [2].

Σημαντικά διαφορετικό είναι το ηλεκτρικό σύστημα της νέας γενιάς υποβρυχίων στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από κυψέλες καυσίμου (fuel cells) (και αποθηκεύεται σε συστοιχίες συσσωρευτών Σ.Ρ.) για να τροφοδοτήσει καταναλώσεις Σ.Ρ. αλλά και Ε.Ρ. μέσω μετατροπέων Σ.Ρ./Ε.Ρ. (Σχ. 1.4). Ηλεκτρογεννήτριες Ε.Ρ. που κινούνται με κινητήρες Diesel υφίστανται μεν, αλλά δεν αποτελούν την κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση όμως, οι κινητήρες πρόωσης είναι Ε.Ρ. [2].

1.4 Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά

Όπως αναφέρθηκε οι επιλογές για το σχεδιασμό των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτροπρόωσης είναι πολλές και κάθε μία μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες και τον ρόλο του συγκεκριμένου πλοίου. Ο σχεδιασμός ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτροπρόωσης μπορεί να αναλυθεί στην επιλογή λύσεων σε επιμέρους ζητήματα, που είναι [2]:

1. Το είδος των κινητήριων μηχανών, Diesel, αεριοστρόβιλοι (ειδικά για πιο αθόρυβη λειτουργία), ατμοστρόβιλοι (ειδικά για πυρηνοκίνητα σκάφη), συσσωρευτές ή/και ηλεκτροχημικές κυψέλες καυσίμου (fuel cells).

2. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου, όπως το είδος (DC, AC) και η τιμή της τάσης παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ισχύος (που υπαγορεύεται κυρίως από τις απαιτήσεις ισχύος πρόωσης και τη διαθεσιμότητα παρελκόμενου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (καλώδια, μονωτικά, διακόπτες πίνακες κ.λ.π.)).

3. Ο αριθμός και το είδος των γεννητριών.

4. Η παράλληλη ή μη λειτουργία των γεννητριών.

5. Το ποσοστό αυτοματισμού στη λειτουργία, φόρτωση, παραλληλισμό και κράτηση των γεννητριών.

6. Ο αριθμός και το είδος των κινητήρων πρόωσης. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι η μέγιστη ισχύς, ο όγκος και το βάρος ανά μονάδα ισχύος, ο μέσος χρόνος μεταξύ επισκευών και βλαβών και ο βαθμός απόδοσης.

7. Το είδος ελέγχου – χειρισμού των κινητήρων πρόωσης.

8. Το είδος των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος

9. Η σχεδίαση της διάταξης του ηλεκτρικού δικτύου και συγκεκριμένα:

α. Θα υπάρχει διάκριση ανάμεσα στα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου, άρα και στα ηλεκτρικά δίκτυα, σε φορτία πρόωσης και στα λοιπά. Το ζήτημα έχει να κάνει και με το βαθμό εξηλεκτρισμού του πλοίου καθώς η σχέση του ηλεκτρικού δικτύου πρόωσης με το ηλεκτρικό δίκτυο χρήσης μπορεί να είναι μία από τις παρακάτω:

α.1. Να είναι τελείως ανεξάρτητα, δηλαδή το καθένα να εξυπηρετείται από δικές του γεννήτριες και να μη συνδέονται μεταξύ τους ή αν υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης, αυτή να είναι μόνο για κατάσταση ανάγκης.

α.2. Να είναι διακριτά, αλλά να υπάρχει σύνδεση μεταξύ τους οπότε το ένα από τα δύο να μπορεί να τροφοδοτείται και από το άλλο.

α.3. Να είναι ενοποιημένα σε ένα κοινό ηλεκτρικό δίκτυο, οπότε οδηγούμαστε στο «πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο» (All Electric Ship – A.E.S.), οπότε και είναι δυνατή η βελτιστοποίηση της εκμετάλλευσης των πλεονεκτημάτων της ηλεκτροπρόωσης.

β. Στην περίπτωση που τα δύο δίκτυα συνδέονται, η επιλογή του τρόπου σύνδεσης (απευθείας μέσω πινάκων, μέσω αντιστροφών (inverters) ή άλλου μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος (power converter), μέσω ζεύγους κινητήρα – γεννήτριας, μέσω μετασχηματιστών κλπ).

γ. Από ποιο δίκτυο τροφοδοτούνται τα βοηθητικά συστήματα πρόωσης (π.χ. τα συστήματα ελέγχου – χειρισμού, ψύξης, λίπανσης).

δ. Ο τρόπος με τον οποίο διασφαλίζεται η ποιότητα ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου όσον αφορά την τάση και την συχνότητα, (θόρυβος – αρμονική παραμόρφωση) και ειδικά του δικτύου χρήσης, όταν αυτό συνδέεται με το δίκτυο

πρόωσης. Σαν κύρια πηγή δημιουργίας αρμονικών αναφέρονται τα ηλεκτρονικά ισχύος των ηλεκτροκινητήρων. Η ποιότητα των ηλεκτρικών δικτύων (συχνότητα, αρμονικές τάσεως, ταχείες διαταραχές τάσεως κλπ) καθορίζεται από τις διάφορες προδιαγραφές και τους νηογνώμονες. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν μόνο το δίκτυο χρήσης του πλοίου, δηλαδή φορτία που δεν σχετίζονται με την πρόωση. Στις περιπτώσεις ανεξαρτήτου δικτύου πρόωσης δεν υπάρχουν προς το παρόν ιδιαίτερες απαιτήσεις ποιότητας για τα φορτία της πρόωσης. Αν όμως το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ενοποιημένο πρέπει ή και το δίκτυο της πρόωσης να ικανοποιεί τις ίδιες απαιτήσεις ποιότητας, ή να λαμβάνεται μέριμνα, ώστε τυχόν «διαταραχές» στο δίκτυο πρόωσης να μην επηρεάζουν το δίκτυο χρήσης. Για δίκτυα συνεχούς ρεύματος δεν υπάρχουν ακόμη εν γένει ιδιαίτερες απαιτήσεις ποιότητας.

ε. Η διάταξη τέλος του ηλεκτρικού δικτύου πρέπει να μεγιστοποιεί την βιωσιμότητα του πλοίου.

10. Ελάχιστες απαιτήσεις σε καταστάσεις ανάγκης – Αντιμετώπιση. Για παράδειγμα μπορεί να απαιτείται εκκίνηση κινητήρα πρόωσης με μια μόνο γεννήτρια σε λειτουργική κατάσταση, η δυνατότητα τροφοδότησης του ενός δικτύου από το άλλο, η δυνατότητα ενός μόνο κινητήρα να μπορεί να κινήσει το πλοίο με μια ελάχιστη ταχύτητα, ή να απαιτείται οι (η) γεννήτριες(α) να μπορούν(εί) να τροφοδοτούν(εί) τα φορτία ανάγκης και ταυτόχρονα να κινήσουν(ει) το πλοίο με μια μικρή ταχύτητα (3 – 5 κόμβους).

11. Ο τρόπος έδρασης των μηχανημάτων, καθώς και ο (φυσικός) διαχωρισμός τους, όπως για παράδειγμα των πινάκων ηλεκτρικού δικτύου πρόωσης και χρήσης, των κινητήρων πρόωσης και των ηλεκτρονικών διατάξεων οδήγησής τους.

Ως γενικοί κανόνες – απαιτήσεις αναφέρονται:

α. Αν υπάρχει αρκετός χώρος πρέπει οι πίνακες πρόωσης και χρήσης να διαχωρίζονται φυσικά.

β. Οι κινητήρες και οι αντίστοιχοι αντιστροφείς (inverters) πρέπει να τοποθετούνται σε διαφορετικούς στεγανούς τομείς.

γ. Οι μετατροπείς (converters) πρέπει να τοποθετούνται κοντά στους κινητήρες για να μειώνεται το μήκος των καλωδίων.

δ. Τοποθέτηση των κινητήρων (που φυσικά υπαγορεύεται από την διάταξη των αξόνων) όσο πιο πύρμα γίνεται.

12. Όπως αναφέρθηκε ήδη σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτροπρόωσης είναι η ευχέρεια που παρέχει στο σχεδιαστή σχετικά με τη διάταξη των υποσυστημάτων της. Έτσι είναι δυνατό οι γεννήτριες να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε απόσταση από τους κινητήρες, σχεδόν οπουδήποτε στο πλοίο, αρκεί να μην παραβιάζονται κλασσικοί κανόνες που σχετίζονται με την ευστάθεια του πλοίου, την ισοκατανομή των φορτίων στο πλοίο, την ακουστική υπογραφή και την ευκολία επισκευής.

1.5 Ορολογία ηλεκτρικής πρόωσης

Η έρευνα γύρω από την ηλεκτρική πρόωση αναπτύσσεται ραγδαία στις μέρες μας, μια σειρά από επιστημονικούς όρους εντοπίζει κανείς στη σχετική βιβλιογραφία [2].

α. Πλήρης ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion – F.E.P.).

Η εγκατάσταση πρόωσης κατά την οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικά από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητηρίων μηχανών – γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες πρόωσης υπάρχουν αποκλειστικά για το σκοπό αυτό καθώς δεν τροφοδοτούν άλλα φορτία. Η ηλεκτρική ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.

β. Ολοκληρωμένη πλήρης ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion – I.F.E.P.).

Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητηρίων μηχανών – γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.

γ. Πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship – A.E.S.).

Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και που επιπλέον σε ευρεία έκταση επιτελεί τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.

δ. Ηλεκτρικό δίκτυο πρόωσης (Propulsion Network).

Το τμήμα εκείνο (ανεξάρτητο ή ενσωματωμένο) του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.

ε. Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσης (Ship Service System).

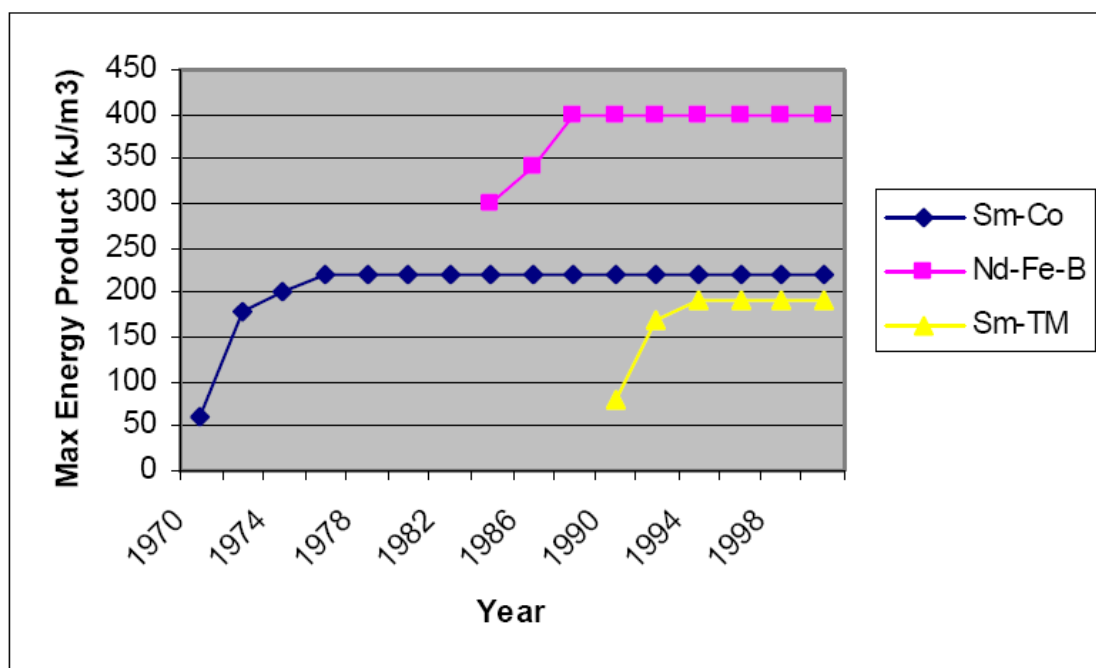
Το υπόλοιπο, πλην δικτύου πρόωσης, ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.

1.6 Ηλεκτρικοί κινητήρες πρόωσης

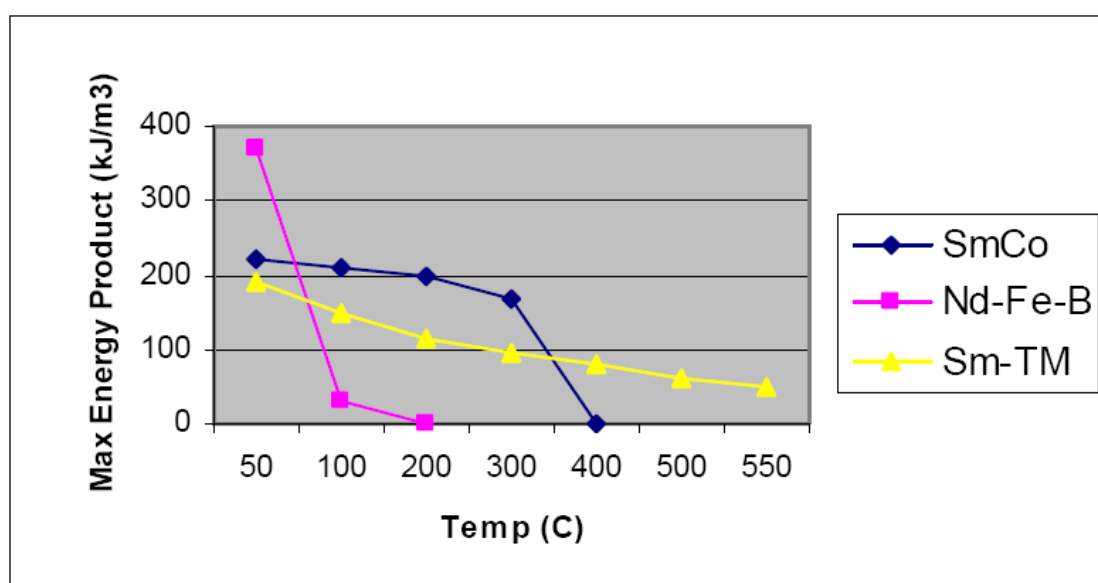
Στις πρώτες εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χρησιμοποιήθηκε ο ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος Σ.Ρ., ο οποίος και χρησιμοποιείται ακόμα σε πολλά πλοία διαφόρων τύπων. Στις περισσότερες σύγχρονες εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χρησιμοποιούνται σύγχρονοι κινητήρες με βαθμό απόδοσης 96 – 98 %, 3 – 4 % περισσότερο από τους ασύγχρονους με ονομαστική τάση λειτουργίας τα 3,3 – 6,6 kV. Μια νέα κατηγορία σύγχρονων κινητήρων έρχεται να προστεθεί στους παραπάνω, οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμου μαγνήτη με απόδοση πάνω από 98 %. Στους σύγχρονους κινητήρες μονίμου μαγνήτη το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι παράγουν το ίδιο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται στο χώρο σύγχρονα με τον δρομέα [2].

1.6.1 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

Οι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη δεν έχουν ανάγκη από μια έξτρα παροχή Σ.Ρ. για το τύλιγμα διέγερσης, ακόμη μειώνονται και οι συνολικές θερμικές απώλειες (Joule), έτσι εξηγείται και ο μεγάλος βαθμός απόδοσης. Η ιδέα της χρήσης μόνιμων μαγνητών είναι παλιά αλλά η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι που κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων μόνιμων μαγνητών (κράματα σαμαρίου – κοβαλτίου, SmCo και νεοβιδίου – σιδήρου – βορείου, NdFeB) που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, όπως είναι αυτές που αναπτύσσονται στο εσωτερικό μίας στρεφόμενης μηχανής, βλ. και Σχ. 1.5 – 1.6.

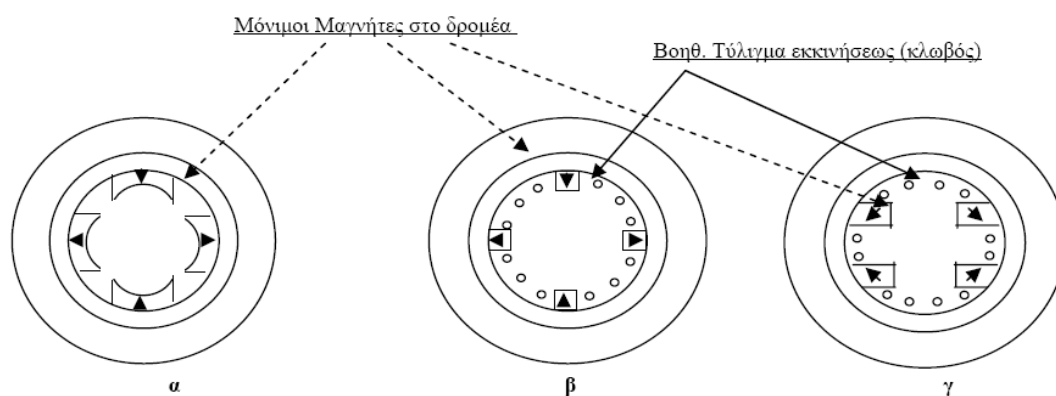


Σχήμα 1.5 Εξέλιξη τεχνολογίας μόνιμων μαγνητών τα τελευταία 30 χρόνια [2].



Σχήμα 1.6 Επιδόσεις μόνιμων μαγνητών ως προς τη θερμοκρασία μαγνήτισης [2].

Οι κινητήρες αυτοί με κατάλληλη επιλογή τυλίγματος στάτη και πόλων δρομέα μπορούν να παράγουν ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, συναγωνίζεται έτσι με μία συμβατική σύγχρονη μηχανή στα χαμηλά επίπεδα απότομων αιχμών ροπής (torque ripples) και μηχανικών δονήσεων (vibrations) (Σχ. 1.7). Τα τελευταία χρόνια ερευνάται η χρησιμοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων με υπεραγώγιμα υλικά ως κινητήρες πρόωσης, κυρίως στην Αμερική. Οι κινητήρες αυτοί, λόγω του ότι το υπεραγώγιμο υλικό παρουσιάζει μηδενική ηλεκτρική αντίσταση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, έχουν πολύ μεγάλη ισχύ ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με τους συμβατικούς κινητήρες. Θεωρούνται έτσι ιδανικοί για την πρόωση πολεμικών πλοίων όπου ο χώρος είναι περιορισμένος σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες ισχύος. Η εταιρεία American Superconductor Inc. χρηματοδοτείται από το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό για να κατασκευάσει έναν κινητήρα πρόωσης ονομαστικής ισχύος 25 MW [2].

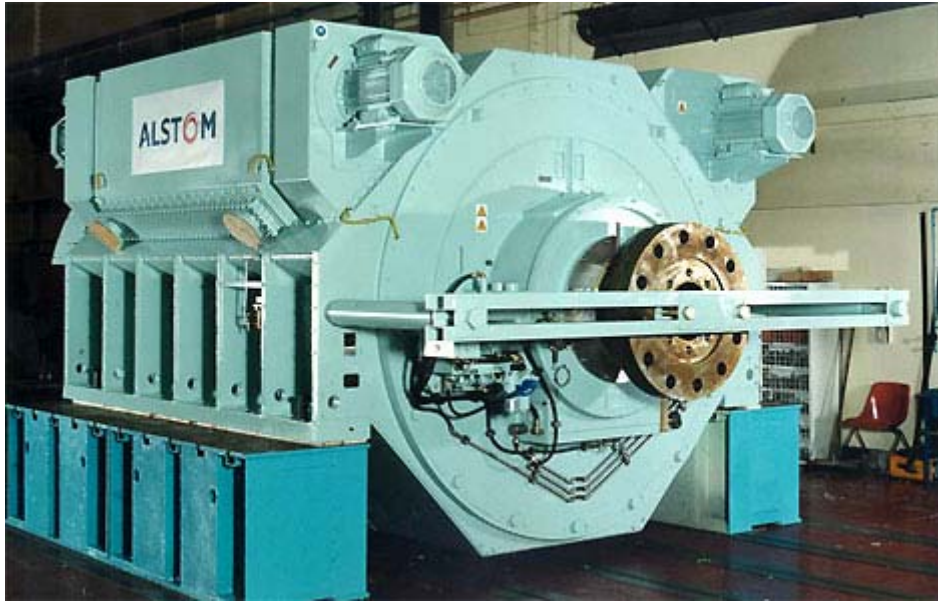


- α) οι μόνιμοι μαγνήτες στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα
- β) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα
- γ) οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα με διεύθυνση ροής εγκάρσια στον άξονα

Σχήμα 1.7 Διατάξεις σύγχρονων κινητήρων με μόνιμους μαγνήτες [2].

1.6.2 Προηγμένοι κινητήρες E.P.

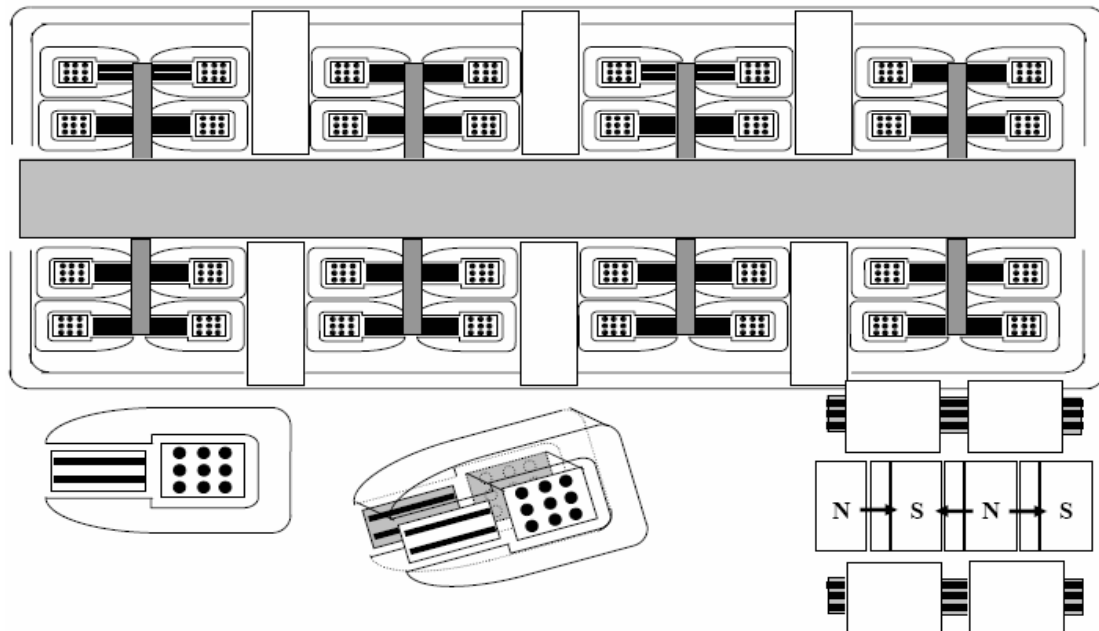
Πρόκειται για κινητήρες στους οποίους η ωφέλιμη μαγνητική ροή είναι κατά την ακτινική διεύθυνση δηλαδή όπως στις συνήθεις συμβατικές ηλεκτρικές μηχανές. Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις τέτοιων κινητήρων είναι ο κινητήρας PERMASYN της εταιρείας SIEMENS, με μόνιμους μαγνήτες SmCo που βρίσκει εφαρμογές πρόωσης μεταξύ άλλων σε υποβρύχια του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού. Ένας άλλος τύπος ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης είναι ο εξελιγμένος επαγωγικός κινητήρας (Advanced Induction Motor – AIM) (Εικ. 1.2) της ALSTOM ο οποίος έχει επιλεγεί για την πρόωση φρεγάτας (Frigate Type 45) του Βρετανικού Πολεμικού Ναυτικού. Προσφέρει υψηλή πυκνότητα ισχύος και ροπής σε σύγκριση με έναν συμβατικό επαγωγικό κινητήρα ίδιας ονομαστικής ισχύος. Η διαφορά με τον κοινό τριφασικό επαγωγικό κινητήρα είναι ότι προσφέρει την δυνατότητα λειτουργίας με 5, 10 ή 15 φάσεις με την βοήθεια εξελιγμένων ηλεκτρονικών ισχύος για να αυξηθεί η ισχύς του κινητήρα [2].



Εικόνα 1.2 Οι προηγμένες μηχανές επαγωγής (AIM) της Alstom – Converteam, ειδικά σχεδιασμένες για πρόωση, είναι μικρότερες και ελαφρύτερες από τις χρησιμοποιούμενες σύγχρονες μηχανές, καθιστώντας τις έτσι ιδιαίτερα κατάλληλες για ναυτικές εφαρμογές [6].

1.6.3 Πολυβάθμιοι κινητήρες εγκάρσιας ροής (transverse flux motors)

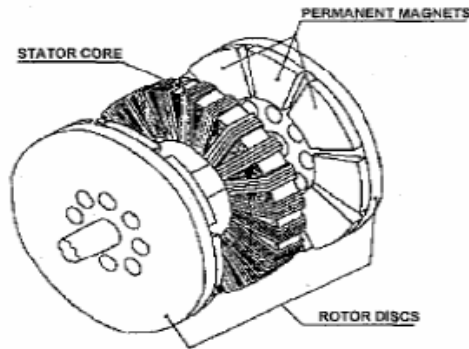
Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, προσανατολισμένους μάλιστα κατά τέτοιο τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει μέσα στο διάκενο σε διεύθυνση εν μέρει κατά την αξονική διεύθυνση και κυρίως κάθετη – εγκάρσια προς τον άξονα της μηχανής, βλ. Σχ. 1.8.



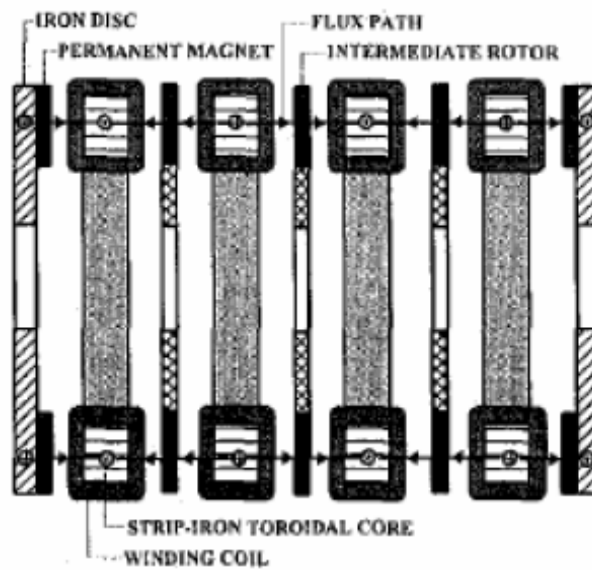
Σχήμα 1.8 Κινητήρας εγκάρσιας ροής [2].

1.6.4 Πολυβάθμιοι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors)

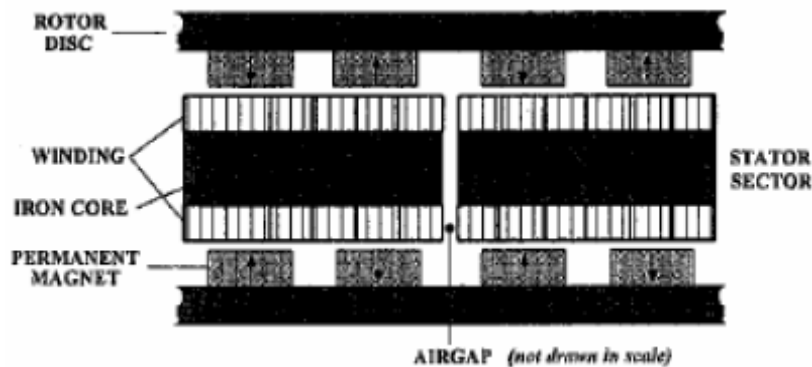
Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα, προσανατολισμένους κατά τρόπο ώστε η μαγνητική ροή να ρέει σε διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα της μηχανής (αξονική) (Σχ. 1.9 – 1.12).



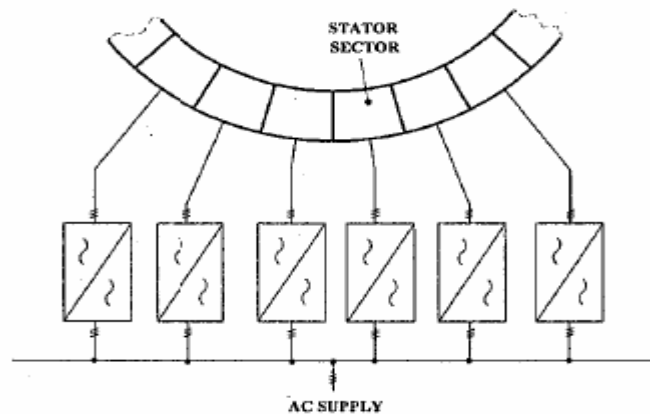
Σχήμα 1.9 Μηχανή αξονικής ροής [2].



Σχήμα 1.10 Κάθετη τομή κινητήρα αξονικής ροής με 4 σπονδύλους (modules) [2].



Σχήμα 1.11 Διάταξη στάτη αποτελούμενου από 4 επιμέρους σπονδύλους κινητήρα αξονικής ροής [2].



Σχήμα 1.12 Διάταξη μετατροπέα συχνότητας κινητήρα αξονικής ροής [2].

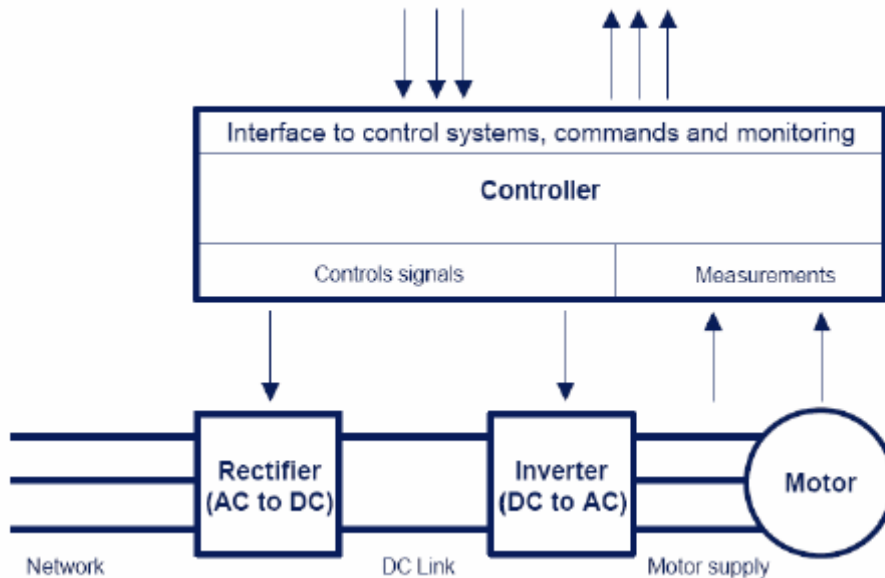
1.7 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος για οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης

Ο κυρίαρχος τύπος κύριας κίνησης για τις εγκαταστάσεις πρόωσης δυναμικής τοποθέτησης των πλοίων DP (dynamic positioning) είναι η ηλεκτρική κίνηση. Σχεδόν κάθε σύστημα DP που εγκαθίσταται στα σύγχρονα πλοία οδηγείται από μια ηλεκτρική μηχανή [4].

Στην αρχή της εφαρμογής της τεχνολογίας δυναμικής τοποθέτησης, η οποία συνέπεσε με την εμφάνιση της τεχνολογίας των ανορθωτών με θυρίστωρες (SCR – Silicon Controlled Rectifiers), χρησιμοποιούνταν είτε μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (E.P.) ελέγχοντας προωστήρες με έλικες μεταβλητού βήματος (Controllable Pitch Propellers – CPP) με σταθερή ταχύτητα περιστροφής ή ελεγχόμενες από ανορθωτές (SCR) μηχανές συνεχούς ρεύματος (Σ.Ρ.) που με τη σειρά τους ελέγχουν προωστήρες με έλικες σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propellers – FPP) με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής. Τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη των αντιστροφών (inverters) χρησιμοποιούνται και μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνδυασμό με έλικες σταθερού βήματος οπότε και με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής για τον έλεγχο της ώσης [4].

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων πρόωσης είναι [4]:

- α. Μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ. ή ελεγχόμενοι ανορθωτές E.P./Σ.Ρ. για οδήγηση κινητήρων Σ.Ρ.
- β. Μετατροπείς Σ.Ρ./E.P. για την οδήγηση ασύγχρονων και σύγχρονων κινητήρων (Σχ. 1.13).
- γ. Κυκλομετατροπείς (E.P./E.P.) (cycloconverters ή cyclo) για οδήγηση κυρίως σύγχρονων κινητήρων.

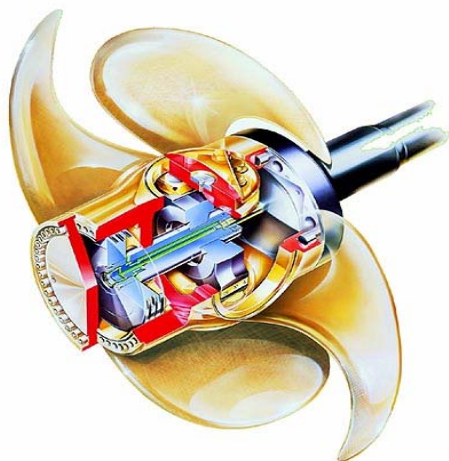


Σχήμα 1.13 Έλεγχος κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος (E.P.) [4].

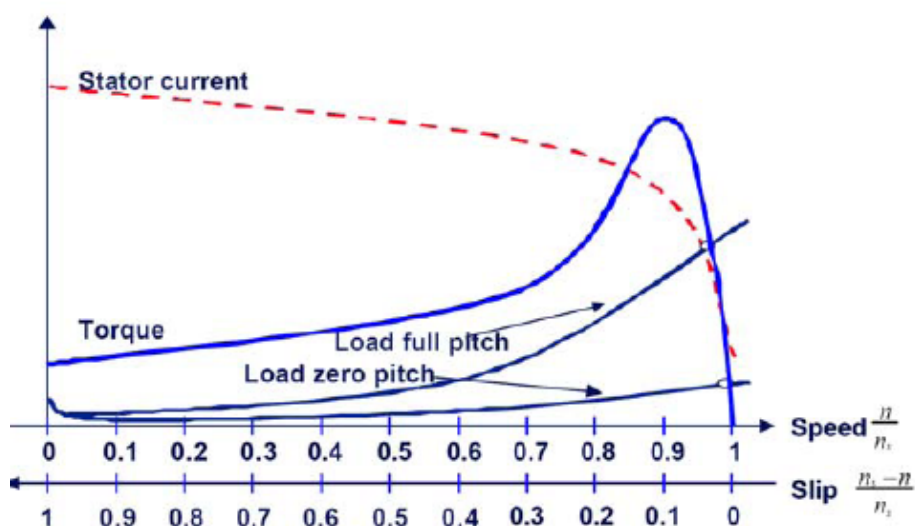
1.7.1 Συνδυασμός κινητήρα E.P. με έλικα μεταβλητού βήματος

Ο συνδυασμός κινητήρα E.P. με έλικα μεταβλητού βήματος (CPP) έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά [4]:

- α. Γεννήτριες που τροφοδοτούν το δίκτυο σταθερής τάσης (4160 - 6000 VAC) και συχνότητας.
- β. Οι έλικες στρέφονται από κινητήρες σταθερής ταχύτητας περιστροφής.
- γ. Πρόκειται για ένα σχετικά απλό ηλεκτρικό σύστημα.
- δ. Μέγιστη απόδοση μετατροπών για το σημείο ονομαστικής λειτουργίας.
- ε. Ο προωστήρας CPP είναι λιγότερο αποδοτικός από τον προωστήρα FPP για μερικές αλλαγές στο φορτίο της έλικας.
- στ. Το ηλεκτρικό κομμάτι ενός συστήματος E.P. – CPP αποτελεί μια απλή και αξιόπιστη λύση.
- ζ. Οι έλικες σταθερού βήματος FPP είναι πολύ πιο απλές στην κατασκευή και τη χρήση τους από τις έλικες ελεγχόμενου βήματος CPP (Σχ. 1.14).
- η. Σε απευθείας σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο ο ηλεκτρικός κινητήρας παρουσιάζει υψηλό ρεύμα εκκίνησης, 5 – 6 φορές πάνω από το ονομαστικό (Σχ. 1.15). Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη, ώστε να επιλεγούν οι κατάλληλες γεννήτριες που θα εκκινήσουν ένα κινητήρα μεγάλης ισχύος. Η εκκίνηση με τρίγωνο και το πέρασμα σε αστέρα χρησιμοποιείται αλλά δεν είναι η καλύτερη λύση. Συσκευές ομαλής εκκίνησης χρησιμοποιούνται όπως αυτομετασχηματιστές για καλύτερα αποτελέσματα. Οι ομαλοί εκκινήτες στερεάς κατάστασης (solid state soft starters) δεν χρησιμοποιούνται ευρέως για υψηλές στάθμες ισχύος.



Σχήμα 1.14 Έλικα μεταβλητού βήματος της Schottel [4].



Σχήμα 1.15 Χαρακτηριστικές ασύγχρονου κινητήρα απευθείας συνδεδεμένου στο δίκτυο και φορτίου με έλικα μεταβλητού βήματος (CPP) [4].

1.7.2 Συνδυασμός κινητήρα Σ.Ρ. με έλικα σταθερού βήματος

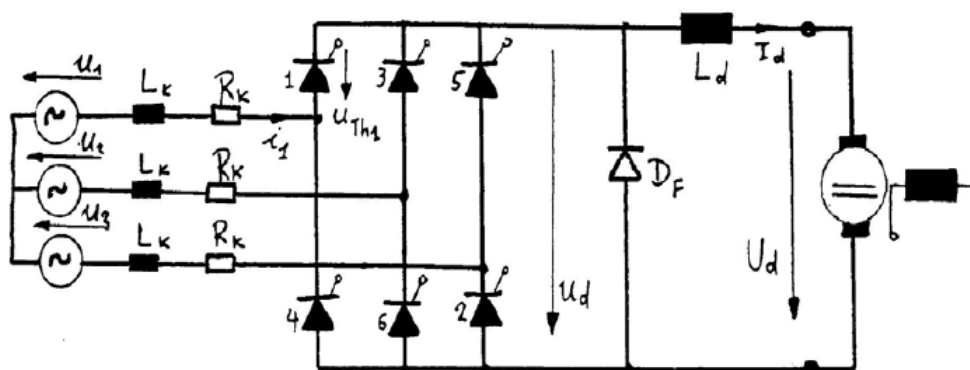
Ο συνδυασμός κινητήρα Σ.Ρ. με έλικα σταθερού βήματος (FPP) έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά [4]:

α. Εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας παράγεται από τις ντιζελογεννήτριες.

β. Έλικες σταθερού βήματος (FPP) κινούνται από κινητήρες πρόωσης Σ.Ρ.. Αλλάζοντας τις στροφές και τη φορά περιστροφής της έλικας ελέγχεται το πλάτος και η διεύθυνση της ώσης.

γ. Αυτό το είδος πρόωσης συνδυάζει, το αποδοτικό και αξιόπιστο δίκτυο Ε.Ρ. με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μηχανών Σ.Ρ., δηλαδή της υψηλής ροπής σε χαμηλές στροφές και της πολύ καλής δυνατότητας ελέγχου τους.

δ. Ελεγχόμενοι ανορθωτές γέφυρας με θυρίστορς (Silicon Controlled Rectifier – SCR) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των κινητήρων Σ.Ρ. (Σχ. 1.16).



Σχήμα 1.16 Βασική δομή μετατροπέα 6 παλμών [8].

ε. Οι στροφές της μηχανής πρόωσης εξαρτώνται από την τάση στο τύμπανο του κινητήρα.

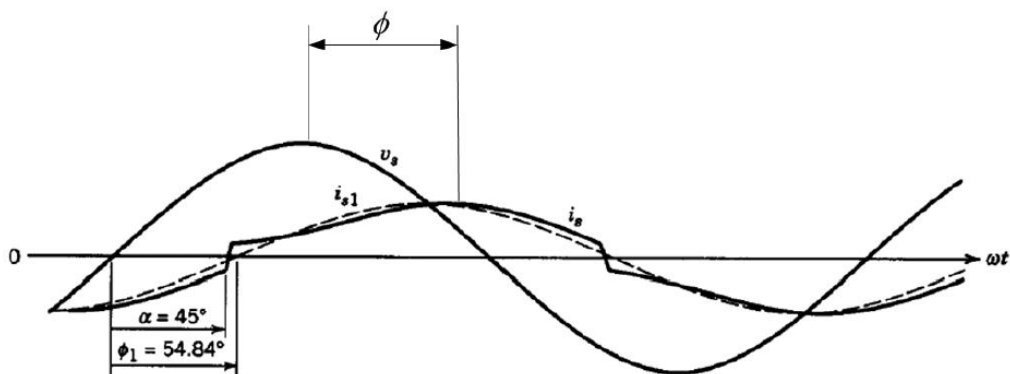
στ. Η τιμή της συνεχούς τάσης στην έξοδο της γέφυρας ελέγχεται καθυστερώντας την έναυση των θυρίστορς μέσω της γωνίας έναυσης α . Οι τιμές που μπορεί να πάρει η γωνία έναυσης είναι από 0° έως 180° οπότε και η τάση στο τύμπανο του κινητήρα πρόωσης παίρνει τιμές, $+1,35$ έως $-1,35 U_s$ (πολική τάση).

ζ. Η ροπή ελέγχεται ακριβώς και με χαμηλή κυμάτωση (εάν η επαγωγή L_d (Σχ. 1.16) είναι μεγάλη, βέβαια αυτό επιδρά αρνητικά στην δυναμική απόκριση του συστήματος καθώς αυξάνεται η σταθερά χρόνου στο τύμπανο της μηχανής Σ.Ρ.).

η. Πρακτικά, η γωνία έναυσης α είναι μεγαλύτερη από 15° για να είναι δυνατός ο έλεγχος της μηχανής σε περίπτωση βύθισης της τάσης του δικτύου και μικρότερη από 150° θεωρώντας ένα περιθώριο φάσης για το φαινόμενο της μετάβασης [7] (commutation) που εμφανίζεται στην τριφασική γέφυρα.

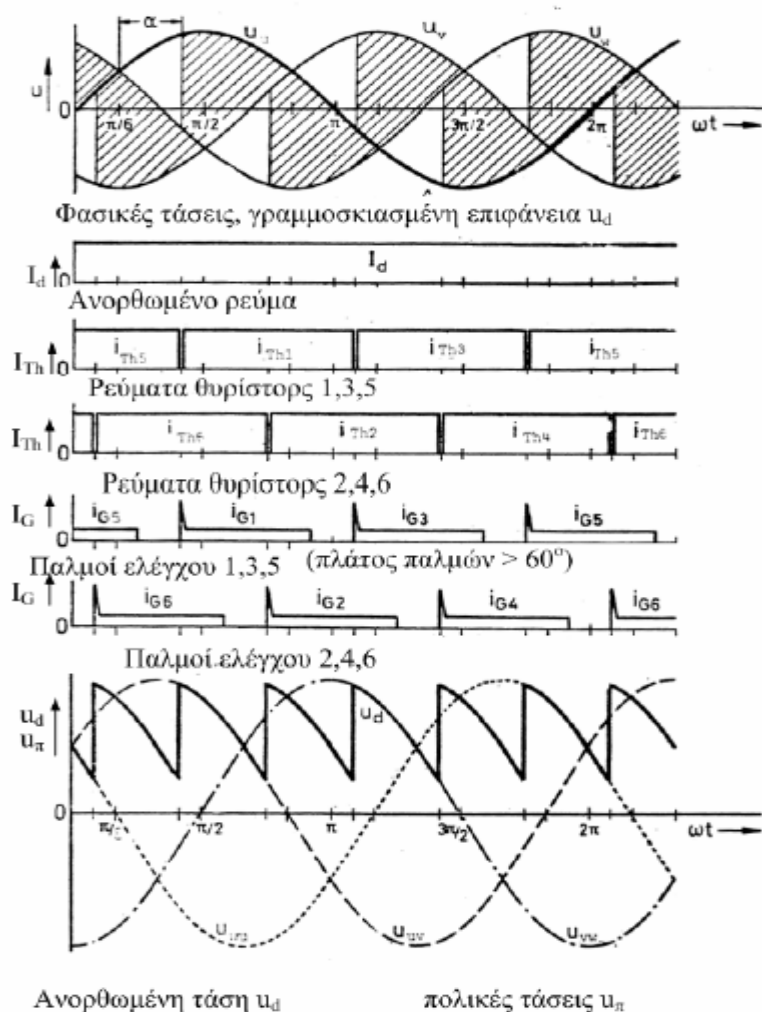
θ. Σχετικά με τον συντελεστή ισχύος (Power Factor – PF) (Σχ. 1.17). Το ρεύμα τυμπάνου λόγω της καθυστέρησης της έναυσης θα είναι μετατοπισμένο σε σχέση με την τάση του δικτύου, η διαφορά φάσης αυτή και ανάλογα με τη γωνία έναυσης α , αλλάζει τον συντελεστή ισχύος μεταξύ $0 - 0,96$. Θεωρητικά ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται από την Εξ. (1.1). Στην πράξη, για την μικρότερη γωνία έναυσης των 15° η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος είναι, σύμφωνα με την Εξ. (1.1), $0,92$.

$$PF = \frac{3}{\pi} \cos \alpha \approx 0,955 \cos \alpha \quad (1.1)$$



Σχήμα 1.17 Απεικόνιση του συντελεστή ισχύος PF [4].

ι. Σχετικά με τη απόδοση του συστήματος: Γεννήτριες Ε.Ρ., 97 %, ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, 98 %, κινητήρες πρόωσης Σ.Ρ. 94 %, μηχανικό σύστημα υποβιβασμού στροφών, 98 % (το οποίο δεν είναι πάντοτε απαραίτητο). Προκύπτει ένας συνολικός βαθμός απόδοσης 88%.



Σχήμα 1.18 Τάσεις – ρεύματα για $\alpha = 45^\circ$ και πολύ μεγάλο L_d [7].

Μειονεκτήματα [4]:

α. Υπάρχουν όρια στην τάση, τα μέγιστα όρια είναι 600 VAC/750 VDC. Αυτό οδηγεί σε μεγάλες και ακριβές μηχανές και σε καλώδια μεγάλων διατομών.

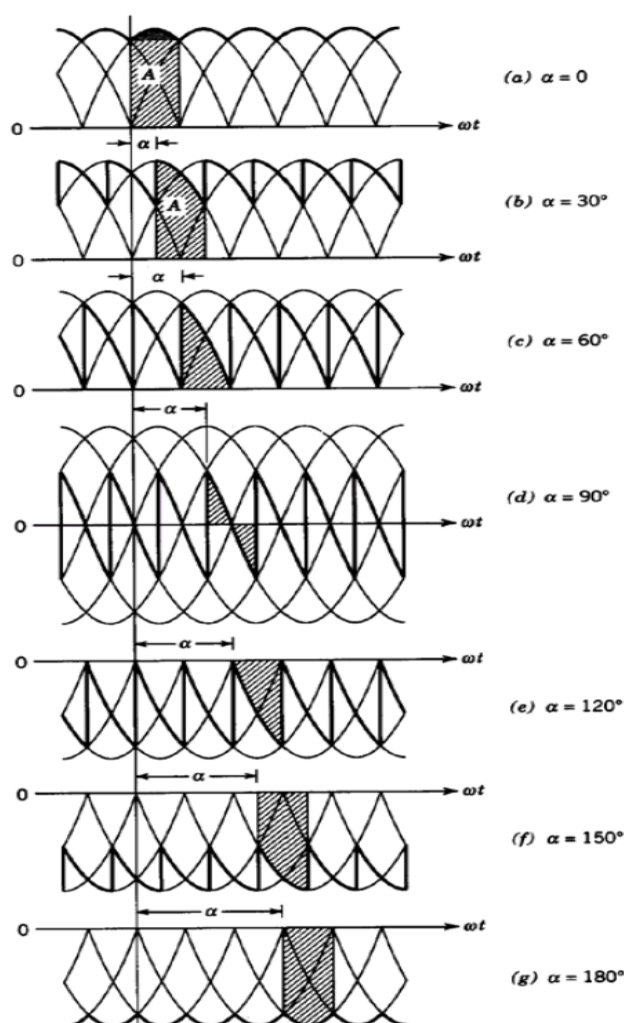
β. Η χρήση ψηκτρών στους κινητήρες Σ.Ρ., η οποίες απαιτούν τακτική συντήρηση.

γ. Το πρακτικό όριο ονομαστικής ισχύος για τους κινητήρες Σ.Ρ. είναι τα 2 – 3 MW.

δ. Ο συντελεστής ισχύος ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 0 και 0,92 (για το πρακτικό κάτω όριο των 15° για την γωνία έναυσης) για 0 έως 100 % των στροφών του κινητήρα.

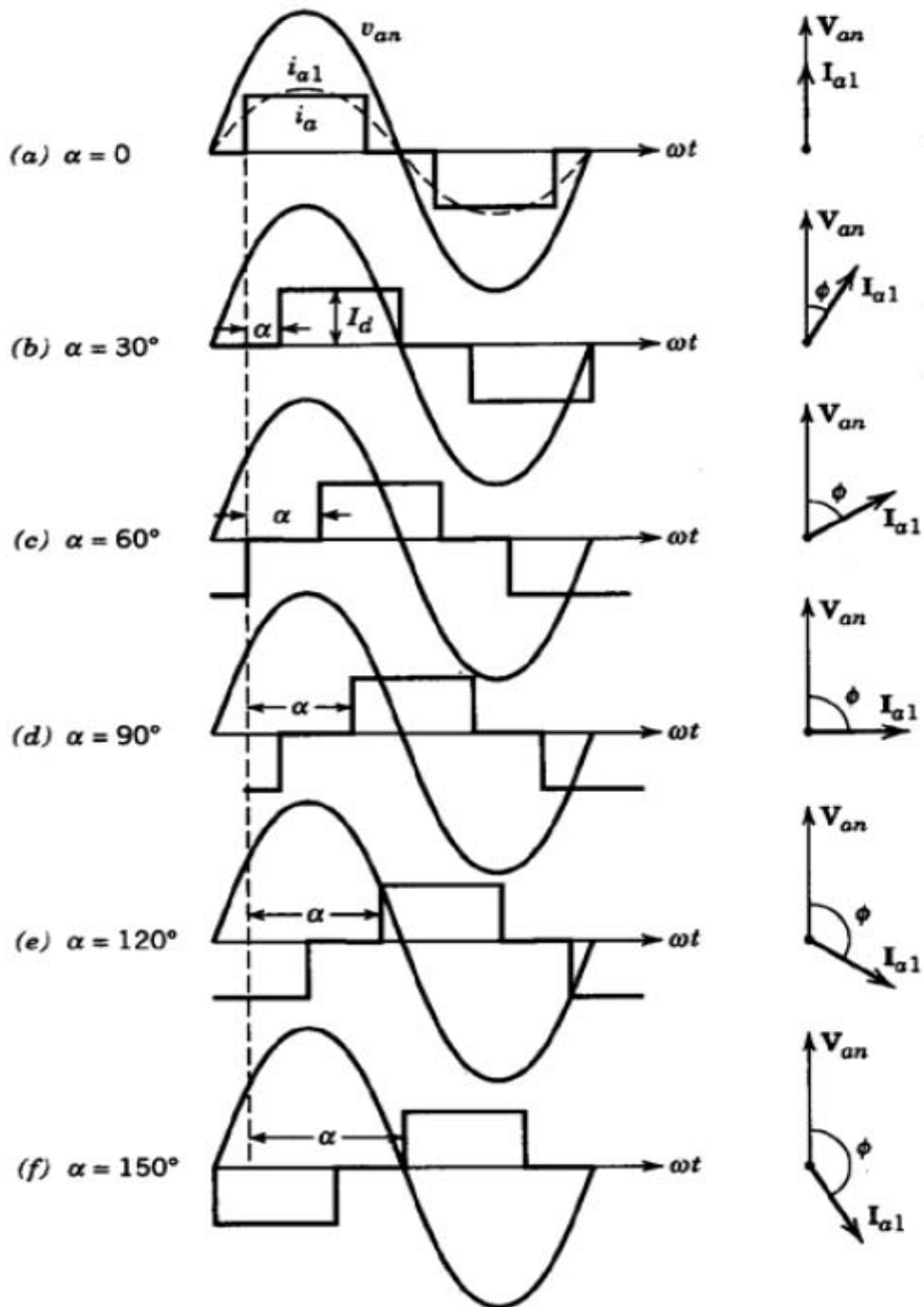
ε. Ο χώρος στον οποίον θα τοποθετηθούν τα ηλεκτρονικά ισχύος θα πρέπει να είναι καθαρός και να ψύχεται.

στ. Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Electromagnetic Interference – EMI) δρα ανεπιθύμητα στον υπόλοιπο ηλεκτρονικό εξοπλισμό του πλοίου.



Σχήμα 1.19 Κυματομορφές συνεχούς τάσης εξόδου για διαφορετικές γωνίες έναυσης, χωρίς μετάβαση ($L_k = 0$, βλ. Σχ. 1.16) [4].

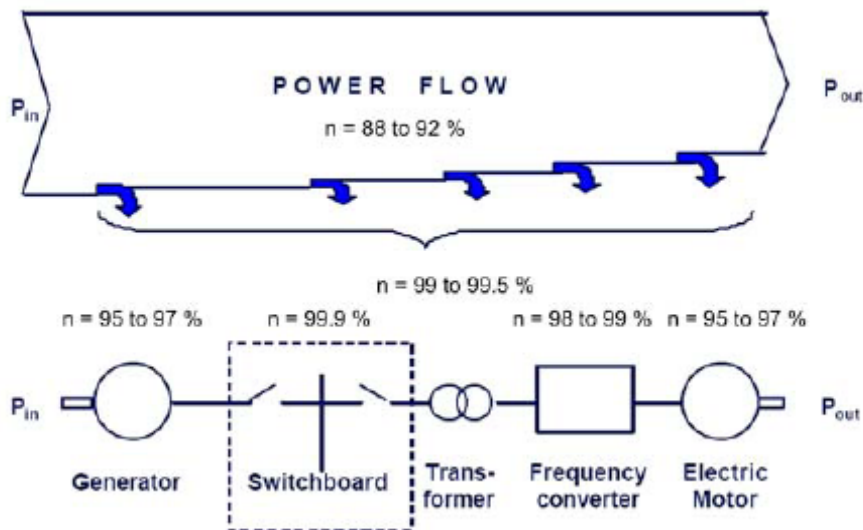
Στα Σχ. 1.18 – 1.20 παρατίθενται ενδεικτικές κυματομορφές λειτουργίας του μετατροπέα έξι παλμών.



Σχήμα 1.20 Κυματομορφές ρεύματος εισόδου για διαφορετικές εναύσεις, χωρίς μετάβαση ($L_k = 0$, βλ. Σχ. 1.16) [4].

1.7.3 Μετατροπείς συχνότητας

Στις εγκαταστάσεις Ε.Ρ., στις οποίες η συχνότητα του παραγομένου ρεύματος είναι σταθερή, η συνεχής ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα πρόωσης (και επομένως της έλικας) είναι δυνατή εάν αυτός τροφοδοτηθεί όχι απ' ευθείας από το δίκτυο αλλά από διάταξη μετατροπής της συχνότητας (Σχ. 1.21). Η διάδοση της ηλεκτρικής πρόωσης κατά τα τελευταία έτη ίσως δεν θα ήταν δυνατή χωρίς τους μετατροπείς αυτούς.



Σχήμα 1.21 Ροή ισχύος και βαθμοί απόδοσης επιμέρους συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης με μετατροπέα συχνότητας [1].

Η θεμελιώδης διάταξη μετατροπής είναι η γέφυρα 6 παλμών (ανορθωτής αλλά και κυρίως αντιστροφέας). Ωστόσο για μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων κατασκευάζονται πιο σύνθετες διατάξεις. Έτσι ένας αντιστροφέας 12 παλμών αποτελείται από δύο αντιστροφείς 6 παλμών, των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά 30°. Σε σύγχρονες ναυπηγήσεις αξιοποιούνται προς το παρόν έως και γέφυρες 24 παλμών [2].

Ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή ευρέως χρησιμοποιούμενων μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος [2]:

- **Ζεύγη ανορθωτών – αντιστροφέων SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation)**

Στις διατάξεις αυτές, αρχικά γίνεται ανόρθωση από Ε.Ρ. σε Σ.Ρ. και στη συνέχεια αντιστροφή από Σ.Ρ. σε Ε.Ρ.. Στον σύνδεσμο Σ.Ρ. (DC link) μεταξύ των δύο μετατροπέων παρεμβάλλεται κάποιο στοιχείο που διατηρεί σταθερή την τάση ή το ρεύμα που παρέχει ο μετατροπέας, όπως εξηγείται στη συνέχεια (βλ. και Πίνακα 1.1):

α) Αντιστροφείς που λειτουργούν ως πηγές ρεύματος (CSI, Current Source Inverters) με SPWM: στο σύνδεσμο Σ.Ρ. παρεμβάλλεται πηνίο που διατηρεί το ρεύμα τροφοδοσίας σταθερό με αποτέλεσμα ο μετατροπέας εμφανίζεται να λειτουργεί ως πηγή (σταθερού) ρεύματος.

β) Αντιστροφείς που λειτουργούν ως πηγές τάσης (VSI, Voltage Source Inverters) με SPWM: στο σύνδεσμο Σ.Ρ. παρεμβάλλεται πυκνωτής που διατηρεί την τάση τροφοδοσίας σταθερή με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να εμφανίζεται ότι λειτουργεί ως πηγή (σταθερής) τάσης.

γ) Συγχρομετατροπείς (synchro – converters) ή LCI (Load Commutated Inverters, LCI): πρόκειται για ειδική περίπτωση μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI) στην οποία όμως οι διακόπτες ισχύος σβήνουν μόνον με τη βοήθεια του φορτίου τους. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί το κύριο πλεονέκτημά τους καθώς δεν απαιτούνται επιπλέον βοηθητικά κυκλώματα σβέσης. Βρίσκουν εφαρμογή σε προωστήρια συστήματα με σύγχρονους κινητήρες μεγάλης ισχύος.

- **Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)**

Με τις διατάξεις αυτές επιτυγχάνεται απευθείας μετατροπή από μία μορφή Ε.Ρ. συγκεκριμένου πλάτους και συχνότητας σε άλλη μορφή Ε.Ρ. διαφορετικού πλάτους και συχνότητας. Στην περίπτωση των προωστήριων συστημάτων πλοίων, λαμβάνει χώρα υποβιβασμός συχνότητας (από 50/60 Hz σε 2 – 3 Hz).

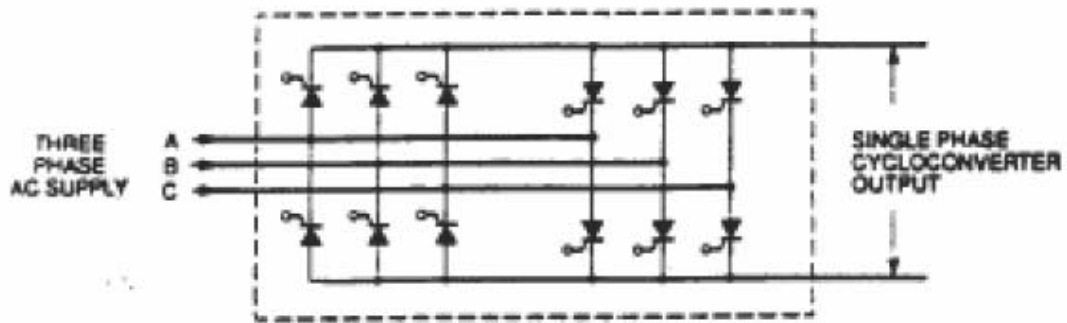
Η απλή περίπτωση ενός τριφασικού κυκλομετατροπέα 6 παλμών (6 – παλμικός) αποτελείται από 36 ελεγχόμενους διακόπτες ισχύος, 12 για κάθε φάση, βλ. Σχ. 1.22 – 1.23. Σε κάθε φάση αντιστοιχούν δύο γέφυρες διακοπών (g και o) με 6 διακόπτες η κάθε μία, βλ. Σχ. 1.23. Η μία γέφυρα είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία της κυματομορφής κατά τη θετική ημιπερίοδο και η άλλη κατά την αρνητική. Στις γέφυρες εισέρχονται όλες οι φάσεις εισόδου. Αντιπαράλληλα προς τους διακόπτες ισχύος, εν γένει, συνδέονται και δίοδοι ισχύος για να κυκλοφορούν αντίστροφης φοράς ρεύματα προστατεύοντας τους ελεγχόμενους διακόπτες (στο Σχ. 1.22 έχουν παραλειφθεί για λόγους απλότητας).

Η τεχνική ελέγχου αγωγής των διακοπών ισχύος μπορεί να ποικίλλει και σε αυτήν την περίπτωση, ωστόσο έχει επικρατήσει μία αντίστοιχη μέθοδος της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών των αντιστροφών SPWM. Στην περίπτωση αυτή, το επιθυμητό σήμα σε μία φάση εξόδου συγκρίνεται με τις τάσεις όλων των φάσεων εισόδου και στα σημεία που εξισώνονται (σημεία τομής των κυματομορφών), παράγονται σήματα αλλαγής κατάστασης των αντίστοιχων διακοπών ισχύος.

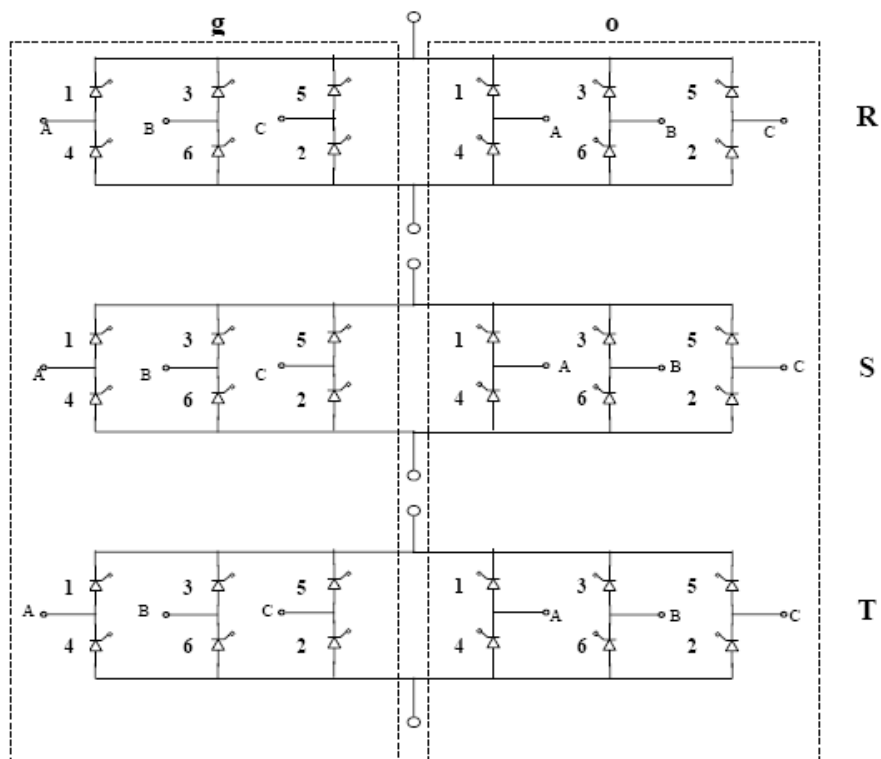
Ένας κυκλομετατροπέας 12 παλμών αποτελείται από δύο κυκλομετατροπείς 6 παλμών των οποίων οι αντίστοιχες φάσεις έχουν γωνιακή διαφορά 30°. Η διαφορά αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός μετασχηματιστή με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα από τα οποία το ένα είναι σε συνδεσμολογία κατά Υ ενώ το άλλο κατά Δ. Οι έξοδοι του κυκλομετατροπέα 12 παλμών μπορεί να τροφοδοτούν είτε ένα απλό τριφασικό τύλιγμα κινητήρα, βλ. Σχ. 1.24, είτε το διπλό τριφασικό τύλιγμα ενός ειδικού τύπου κινητήρα (Σχ. 1.25). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων.

Οι κυκλομετατροπείς πλεονεκτούν στο ότι παράγουν κυματομορφές με πολύ μικρή παραμόρφωση αλλά είναι πολυδάπανες διατάξεις με πολλούς διακόπτες ισχύος ενώ κατά τη μεταγωγή των διακοπών απαιτείται αυξημένη ακρίβεια συντονισμού από τα κυκλώματα ελέγχου.

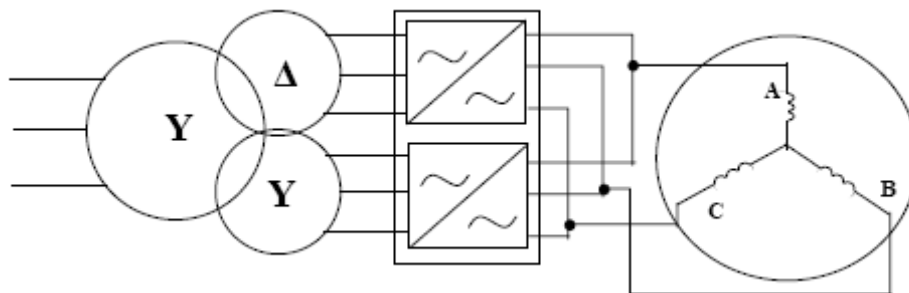
Στο Σχ. 1.26 φαίνονται συγκεντρωμένοι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς για τον έλεγχο κινητήρων Ε.Ρ. σε σχέση με το εύρος ισχύος λειτουργίας τους.



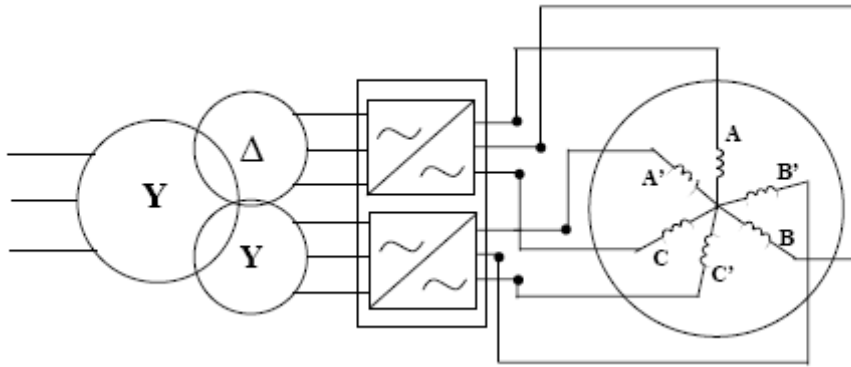
Σχήμα 1.22 Μονοφασικό κύκλωμα (δομικό στοιχείο) κυκλομετατροπέα [2].



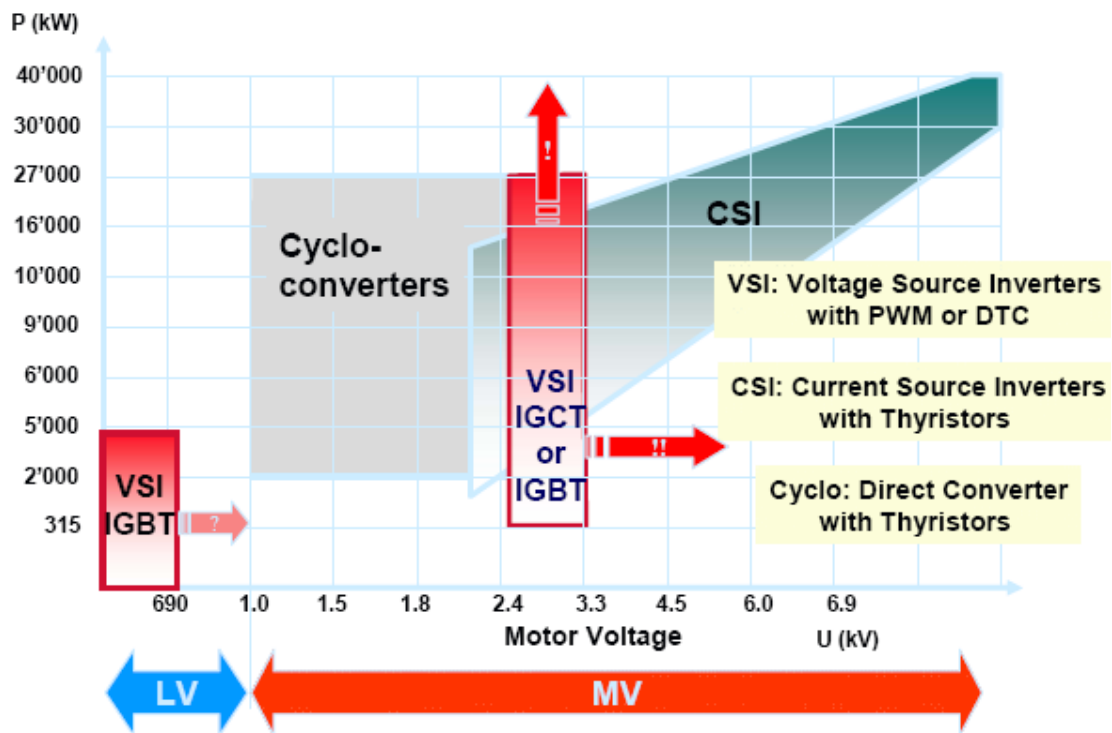
Σχήμα 1.23 Τυπικός τριφασικός κυκλομετατροπέας 6 παλμών. Με A, B, C συμβολίζονται οι τρεις φάσεις εισόδου ενώ με R, S, T οι τρεις φάσεις εξόδου. Οι φάσεις εξόδου μπορεί να συνδεθούν στο φορτίο σε συνδεσμολογία Y ή Δ [2].



Σχήμα 1.24 Κυκλομετατροπέας 12 παλμών που τροφοδοτεί τριφασικό κινητήρα [2].



Σχήμα 1.25 Κυκλομετατροπέας 12 παλμών που τροφοδοτεί διπλό τριφασικό τύλιγμα κινητήρα (τα δύο τριφασικά τυλίγματα είναι σε γωνία μεταξύ τους π.χ. 30°) [2].

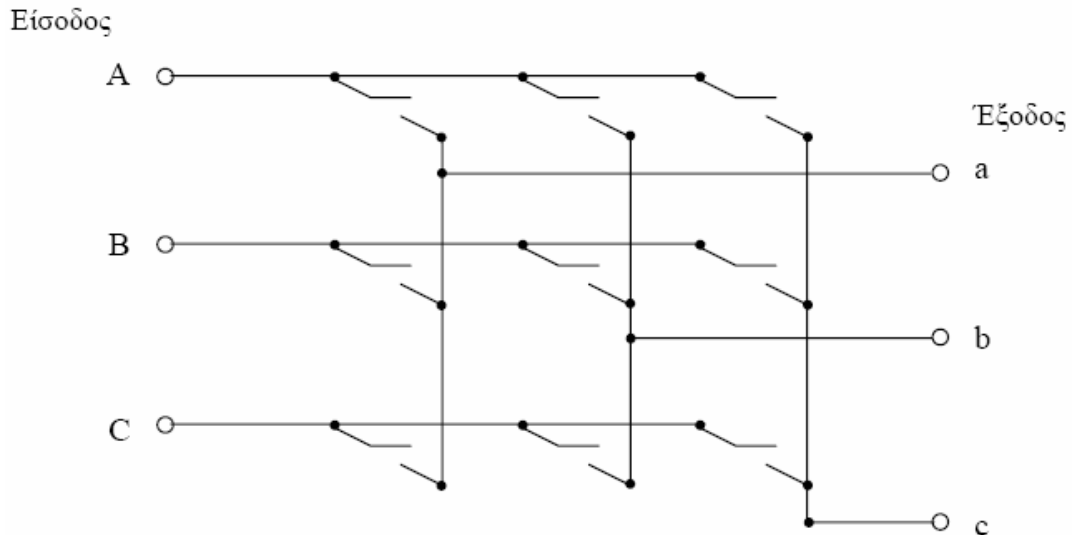


Σχήμα 1.26 Σύνοψη μετατροπέων ελέγχου κινητήρων E.P. [4].

- **Μετατροπείς τύπου μήτρας ή μητροειδείς μετατροπείς (matrix converters)**

Πρόκειται για εναλλακτική αλλά πιο γενικευμένη διάταξη κυκλομετατροπέων που ενδεχομένως να επικρατήσει καθώς δίνει τη δυνατότητα σε όλες τις φάσεις εξόδου να τροφοδοτηθούν απευθείας από όλες τις φάσεις εισόδου κατά τρόπο που καθορίζεται με ακρίβεια από το κύκλωμα ελέγχου (Σχ. 1.27). Η ουσιαστική διαφορά από τους κυκλομετατροπείς είναι στον αλγόριθμο ελέγχου έναυσης/σβέσης, που ακόμη βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο και επιτρέπει σε κάθε στιγμή την αντιστροφή ακολουθίας των φάσεων εξόδου σε σχέση με τις φάσεις εισόδου καθώς και την τροποποίηση των γωνιακών αποκλίσεων μεταξύ των τάσεων εισόδου και εξόδου με σκοπό τη ρύθμιση των συντελεστών ισχύος και στις δύο πλευρές. Προς το παρόν καμιά τέτοια διάταξη δεν έχει ενσωματωθεί σε προγράμματα ανάπτυξης για προωσθήριες διατάξεις ηλεκτρικών κινητήρων λόγω τεχνολογικών αδυναμιών

υλοποίησης, παρόλο που σε διεθνή συνέδρια έχουν προταθεί αξιόλογες μέθοδοι ελέγχου (π.χ. μέθοδος Venturini) με πολύ θετικές προοπτικές. Παρόμοια με τους κυκλομετατροπείς, οι μεταγωγές καταστάσεων (από αγωγή σε σβέση και το αντίστροφο) των ηλεκτρονικών διακοπών ενέχουν τον κίνδυνο βραχυκυκλωμάτων μεταξύ των φάσεων.



Σχήμα 1.27 Μετατροπέας τύπου μήτρας [2].

Πίνακας 1.1 Συγκεντρωτική παρουσίαση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος για ηλεκτρική πρόωση [2].

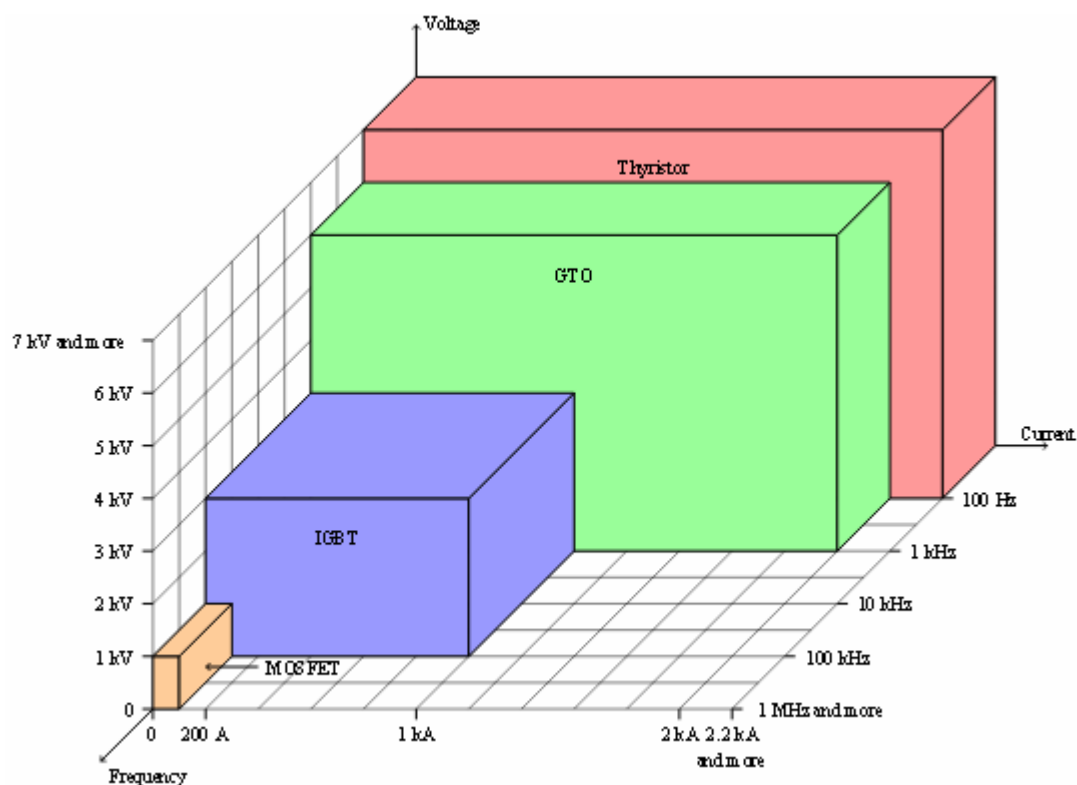
Μετατροπέας	Διάταξη	Μέγιστη ισχύς	Κυριαρχούσες αρμονικές
Ανορθωτής		>6 MVA	$6.n.f_i$
Αντιστροφέας CSI		1 MVA	$(3k\pm 1).f_0$
Αντιστροφέας LCI		>30 MVA	$(3k\pm 1).f_0$
Αντιστροφέας VSI		2 MVA	$(3k\pm 1).f_0$
Αντιστροφέας PWM		2 MVA (IGBT) 6 MVA (GTO)	$2.n.f_0$
Κυκλομετατροπέας		>30 MVA	$6.n.f_i\pm(2.p+1).f_0$

$n=1,2,3,\dots$ $k=2,4,6,\dots$ $p=0,1,2,3,\dots$ f_i =συχνότητα εισόδου f_0 =συχνότητα εξόδου

1.7.4 Ημιαγωγικοί διακόπτες ισχύος

Το κύριο χαρακτηριστικό των διακοπών ισχύος είναι ότι μπορούν να άγουν και να μην άγουν κατά ελεγχόμενο τρόπο, σύμφωνα δηλαδή με τις εντολές ελέγχου που παράγονται από το κύκλωμα ελέγχου τους. Κατασκευάζονται από ημιαγωγικά υλικά όπως και τα αντίστοιχα στοιχεία χαμηλής ισχύος. Τα τελευταία 30 χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετά είδη διακοπών ισχύος που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ισχύ αγωγής τους, τον τρόπο ελέγχου τους, τη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας τους και την τεχνολογία κατασκευής τους. Το πρώτο που αναπτύχθηκε ήταν το θυρίστορ. Είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι η τεχνολογία των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος είναι μια συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία με αποτέλεσμα νέες τεχνολογίες ημιαγωγικών στοιχείων να εμφανίζονται στην αγορά για εφαρμογή σε μετατροπείς υψηλής ισχύος αντικαθιστώντας το δύσκολα ελεγχόμενο θυρίστορ. Βέβαια να σημειωθεί ότι με τα σημερινά δεδομένα το θυρίστορ αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο των ηλεκτρονικών μετατροπέων πολύ μεγάλης ισχύος [3].

Έτσι, πέρα από το θυρίστορ, γενικά χρησιμοποιούνται, MOSFET ισχύος (Power MOSFET), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), GTO θυρίστορ (Gate Turn – Off thyristor), MCT (Mosfet Controlled Thyristor), IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) [9]. Στο Σχ. 1.28 γίνεται μία σύγκριση (ισχύος και συχνότητας λειτουργίας) των βασικών ημιαγωγικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος. Να σημειωθεί ότι αναφέρεται στην τεχνολογία του 2006.



Σχήμα 1.28 Συγκριτική παρουσίαση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, τεχνολογία του 2006 [10].

Στους μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούνται κυκλώματα προστασίας των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος (snubbers). Τα snubbers τοποθετούνται παράλληλα στα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος και τα προστατεύουν από υπερτάσεις, υπερρεύματα και υπερθέρμανση. Μπορεί να είναι παθητικά (π.χ. κλάδος RC), ή ενεργά. Δεν αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της βασικής τοπολογίας ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, αλλά είναι μία προσθήκη, συχνά απαραίτητη, για την καταστολή των ηλεκτρικών καταπονήσεων, που υφίστανται τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος του μετατροπέα. Σκοπός της χρήσης τους είναι η προστασία των στοιχείων και η αύξηση της αξιοπιστίας της όλης διάταξης. Η προσθήκη των κυκλωμάτων αυτών δημιουργεί πρόσθετα προβλήματα, όπως αύξηση κόστους, επιπλέον απώλειες, περιορισμούς στη λειτουργία της διάταξης κ.ά. Υπάρχουν τρία είδη κυκλωμάτων προστασίας ενός ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος, ανάλογα με το φαινόμενο που καταστέλλουν. Έτσι έχουμε, κυκλώματα προστασίας κατά την έναυση, κυκλώματα προστασίας κατά τη σβέση και κυκλώματα μείωσης της καταπόνησης από υπερτάσεις. Στις εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης λόγω των υψηλών επιπέδων ισχύος που λειτουργούν οι μετατροπείς τα snubbers είναι απαραίτητα για την ομαλή λειτουργία του μετατροπέα [9].

Οι διακόπτες ισχύος χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία για τη σύνθεση περίπλοκων διατάξεων που καλούνται μετατροπείς (converters) και που έχουν σκοπό τη μετατροπή Σ.Ρ. σε Σ.Ρ. διαφορετικού επιπέδου τάσης, Σ.Ρ. σε Ε.Ρ. και το αντίστροφο, και τη μετατροπή συχνότητας. Σε εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης οι δυνατότητες αυτές αξιοποιούνται στο έπακρο, καθώς οι απαιτήσεις κίνησης προϋποθέτουν μετατροπή των τάσεων αλλά και των συχνοτήτων [3].

1.8 Τεχνικές ελέγχου κινητήρων πρόωσης Ε.Ρ.

Ο έλεγχος της ταχύτητας και της ροπής ενός κινητήρα Ε.Ρ. είναι αρκετά πιο σύνθετος από την περίπτωση των κινητήρων Σ.Ρ., όπου η ροπή, M , προκύπτει ως μία ποσότητα ανάλογη του γινομένου του ρεύματος τυλίγματος διεγέρσεως (πεδίου), I_f και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου, I_T :

$$M = C\Phi I_T \text{ ή } M = k\Phi I_T \quad (1.2)$$

όπου C και k κατασκευαστικές σταθερές της μηχανής και Φ η διέγερσή της.

Στη συνέχεια ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή των μεθόδων ελέγχου κινητήρων Ε.Ρ. με έμφαση σε αυτές που εφαρμόζονται σε κινητήρες ηλεκτροπρόωσης [2].

- **Βαθμωτός έλεγχος ανοικτού ή κλειστού βρόχου (scalar control)**

Μη εφαρμόσιμος στην περίπτωση της πρόωσης, απλά ως αναφορά δίνεται η επιθυμητή μηχανική ταχύτητα χωρίς να λαμβάνεται μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας. Η τάση μεταβάλλεται αναλογικά προς την επιθυμητή ταχύτητα σε μία προσπάθεια να μην μεταβάλλεται η ροπή. Σε μία παραλλαγή αυτής της μεθόδου, λαμβάνεται μέτρηση της πραγματικής ταχύτητας που συγκρινόμενη με την επιθυμητή ταχύτητα παράγει ένα σήμα σφάλματος. Το σήμα αυτό οδηγείται σε έναν ελεγκτή PI

και παράγεται κατάλληλο σήμα έναυσης των διακοπών ισχύος. Το ίδιο σήμα ρυθμίζει και την τάση σε μία προσπάθεια να μην μεταβάλλεται η ροπή στον άξονα.

- **Έλεγχος με SPWM και CSI (μαζί με συγκριτές υστέρησης)**

Η στιγμιαία τιμή του ρεύματος εισόδου ελέγχεται συνεχώς ώστε να κυμαίνεται μεταξύ δύο οριακών τιμών κατωφλίου. Σε κάθε προσπάθεια του ρεύματος να υπερβεί τα όρια αυτά, παράγεται σήμα από τον ελεγκτή PWM που δίνει εντολή στους διακόπτες να άγουν κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αναιρεθεί η εν λόγω προδιάθεση του ρεύματος.

- **Διανυσματικός έλεγχος (vector control)**

Όπως προαναφέρθηκε, ο έλεγχος γίνεται όπως στη μηχανή Σ.Ρ. ξένης διέγερσης, όπου η ροπή, M , προκύπτει ως μία ποσότητα ανάλογη του γινομένου του ρεύματος τυλίγματος διεγέρσεως (πεδίου), I_f και του ρεύματος τυλίγματος τυμπάνου, I_T :

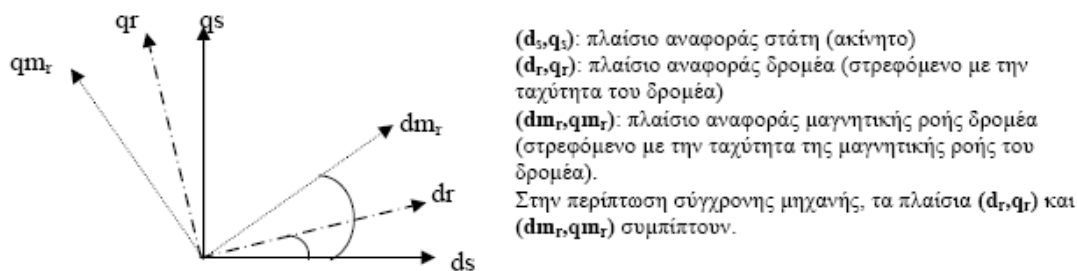
$$M = k_f I_T \quad (1.3)$$

Στην μηχανή Σ.Ρ. όμως τα δύο ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι σταθερά στο χώρο και σε διαφορά φάσης 90° μεταξύ τους. Αντιθέτως, στις μηχανές Ε.Ρ., τα πεδία αφενός στρέφονται και αφετέρου η μεταξύ τους γωνία μεταβάλλεται με τις μεταβολές στις φορτίσεις. Είναι όμως μαθηματικά δυνατόν, να αποσυζευχθούν τα ρεύματα στάτη και δρομέα σε ένα πλαίσιο αναφοράς που στρέφεται είτε με την ταχύτητα του δρομέα είτε με οποιαδήποτε άλλη ταχύτητα κατά τρόπον ώστε να θεωρηθούν ακίνητα. Κάθε ρεύμα φάσης αναλύεται σε δύο επιμέρους διανυσματικές συνιστώσες, τη συνιστώσα ευθέως άξονα (direct axis, d) και τη συνιστώσα εγκαρσίου άξονα (quadrature axis, q). Οι συνιστώσες αυτές είναι κάθετες μεταξύ τους και διατηρούνται ακίνητες ως προς το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Σημειώνεται ότι ενώ αυτός ο μαθηματικός μετασχηματισμός αποσύζευξης ήταν γνωστός εδώ και 50 χρόνια τουλάχιστον, η υλοποίησή του, όμως με ηλεκτρονικά κυκλώματα σε πραγματικό χρόνο περιστροφής των κινητήρων κατέστη δυνατή μόλις τα τελευταία 15 χρόνια. Η μεθοδολογία του μετασχηματισμού αποσύζευξης διαφέρει με τον τύπο της μηχανής (σύγχρονη ή ασύγχρονη). Γενικά έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές, ανάλογα με την εκλογή του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς από τις οποίες η πλέον διαδεδομένη είναι η μέθοδος ελέγχου με προσανατολισμό στο διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα ή έλεγχος πεδίου (field control), που αναλύεται στη συνέχεια.

- **Έλεγχος πεδίου (field control)**

Ως πλαίσιο αναφοράς εκλέγεται αυτό που στρέφεται με το διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα, βλ. Σχ. 1.29.

Ο διανυσματικός έλεγχος πεδίου του κινητήρα διακρίνεται περαιτέρω σε άμεσο και έμμεσο έλεγχο. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία του άμεσου ελέγχου η μαγνητική ροή προσδιορίζεται είτε με απευθείας μέτρηση της, είτε με χρήση μαθηματικού μοντέλου μαγνητικής ροής. Αντιθέτως, κατά τον έμμεσο έλεγχο, η μαγνητική ροή υπολογίζεται έμμεσα από μετρήσεις άλλων μεγεθών καθώς μετρώνται τα ρεύματα στο τύλιγμα του στάτη και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.



Σχήμα 1.29 Πλαίσια αναφοράς για διανυσματικό έλεγχο κινητήρων [2].

Η ροπή του ασύγχρονου κινητήρα προκύπτει να είναι το γινόμενο δύο συνιστωσών του ρεύματος του στάτη, όπως αυτό αναλύεται στο πλαίσιο αναφοράς (d_m, q_m) που στρέφεται με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα:

$$M = k I_{s,dm} I_{s,qm} \quad (1.4)$$

Σημειώνεται ότι η μέτρηση του διανύσματος μαγνητικής ροής (κατά μέτρο και γωνία) και δη στο στρεφόμενο δρομέα είναι εξαιρετικά δύσκολο να γίνει (υπεισέρχεται μεγάλο ποσοστό θορύβου, ενώ πρέπει να παρακολουθούνται συνεχώς οι μεταβολές των τιμών R και L των τυλιγμάτων διότι με την περιστροφή μεταβάλλονται λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών). Ως μειονέκτημα της μεθόδου σημειώνεται ο μεγάλος αριθμός αισθητήρων, μετατροπέων και μετρητικών που πέραν της πολυπλοκότητας που εισάγουν, αυξάνουν το κόστος αλλά και τον χρόνο απόκρισης των διατάξεων ελέγχου. Επιπλέον, με τη μέθοδο του διανυσματικού ελέγχου η ροπή ελέγχεται μόνον με έμμεσο τρόπο χωρίς να αποφεύγονται και κραδασμοί (torque ripples).

- **Άμεσος έλεγχος ροπής (direct torque control – DTC)**

Πρόκειται για ουσιαστική εξέλιξη της μεθόδου του διανυσματικού ελέγχου πεδίου (vector field control). Έτσι, και σε αυτήν την περίπτωση οι τάσεις και τα ρεύματα του στάτη μετρώνται και μετασχηματίζονται σε στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, όμως μετράται ή καλύτερα υπολογίζεται η μαγνητική ροή στον στάτη καθώς επίσης και η τιμή της ροπής στον άξονα του κινητήρα. Από τη σύγκριση των μεγεθών μαγνητικής ροής και ροπής με τις επιθυμητές τους τιμές παράγονται τα σήματα ελέγχου των μετατροπέων (για έναυση και σβέση των διακοπών). Η διαδικασία σύγκρισης στηρίζεται σε μη γραμμικές συναρτήσεις και έχει το πλεονέκτημα ότι αξιοποιεί τη διακριτή στον χρόνο συμπεριφορά των διακοπών ισχύος αυξάνοντας τελικά τη συνολική απόδοση. Η τεχνική αυτή έχει ήδη αρχίσει να εφαρμόζεται σε πλοία με ηλεκτρική πρόωση και πιο συγκεκριμένα με αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα σε συνδυασμό με σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών (Azipod, εταιρεία ABB) και κυκλομετατροπείς. Η μέθοδος πλεονεκτεί έναντι του διανυσματικού ελέγχου, καθώς ελέγχει απευθείας τη ροπή εξόδου του κινητήρα, έχει πολύ μικρότερες απαιτήσεις σε μετρήσεις και υπολογισμούς μεγεθών (π.χ. δεν είναι απαραίτητη η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής) ενώ η παραγόμενη ροπή είναι πλέον εφικτό να μην εμπεριέχει μεγάλες αιχμές (torque ripples).

1.9 Συνεργασία έλικας και κινητήρα πρόωσης

Στα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης συγκαταλέγεται και η ουσιαστική μείωση του αξονικού συστήματος των πλοίων, βλ. Σχ. 1.30.



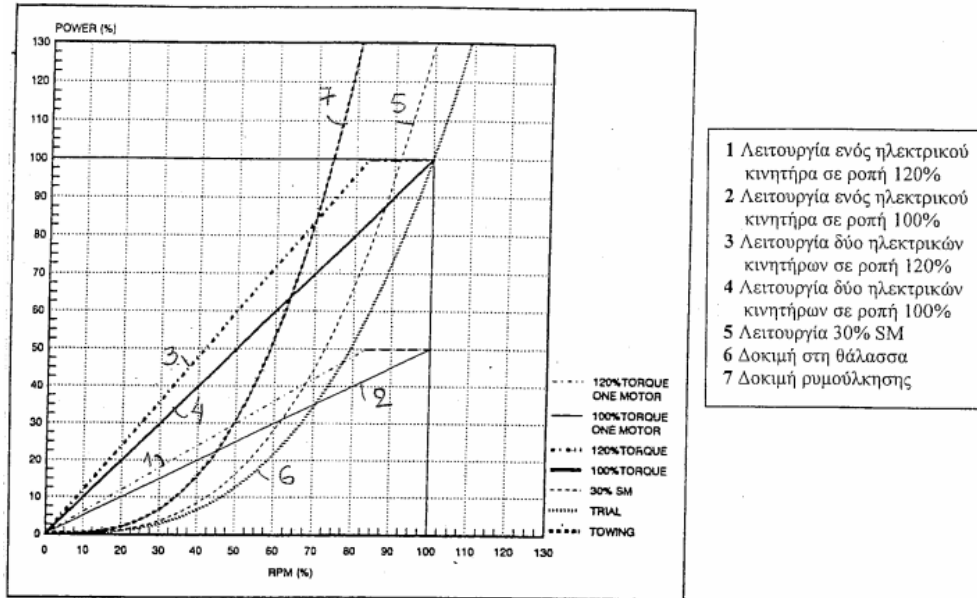
Σχήμα 1.30 Συγκριτική παρουσίαση αξονικών συστημάτων πλοίων [2].

Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης έχουν το πλεονέκτημα συνεχούς μεταβολής των στροφών σχεδόν σε όλο το διάστημα 0 – 100%. Επιπλέον, το 100% της ροπής μπορεί συνήθως να χρησιμοποιηθεί σε όλο το πεδίο λειτουργίας. Για λόγους ασφαλείας, η έλικα κινείται από δύο (ή και περισσότερους) ηλεκτροκινητήρες ίσης ισχύος. Όσον αφορά την έλικα ως μηχανικό φορτίο, ακολουθεί τον λεγόμενο «νόμο της έλικας» δηλ. η μηχανική ροπή ανάλογη του τετραγώνου της μηχανικής ταχύτητας όπως περίπου και οι φυγοκεντρικές αντλίες και οι ανεμιστήρες, αλλά μπορεί η χαρακτηριστική αυτή να είναι σταθερή (έλικα σταθερού βήματος) ή να μεταβάλλεται με αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων της (έλικα μεταβλητού βήματος) [2].

1.9.1 Έλικα σταθερού βήματος

Καθώς η υπερτάχυνση δεν είναι δυνατή, η έλικα σχεδιάζεται έτσι ώστε να απορροφά τη μέγιστη συνεχή ισχύ (σημείο MCR) σε κατάσταση δοκιμών, δηλ. πλήρες φορτίο, καθαρή γάστρα και ήρεμο καιρό. Προκειμένου να είναι δυνατή η λειτουργία με πλήρη ισχύ σε δυσμενείς συνθήκες, το σύστημα πρόωσης συνήθως υπολογίζεται για τιμή κατά 10 – 20 % μεγαλύτερη της ονομαστικής, χωρίς αύξηση της ισχύος πέρα από τη μέγιστη συνεχή (MCR). Αυτό σημαίνει υπερδιαστασιολόγηση έλικας αξονικού συστήματος – μειωτήρα – κινητήρα – μετατροπέα κατά 10 – 20 % [3].

Το Σχ. 1.31 απεικονίζει τις καμπύλες απαιτούμενης ισχύος σε διάφορες καταστάσεις, καθώς και τα όρια του πεδίου λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες συνδεδεμένους στην ίδια έλικα.

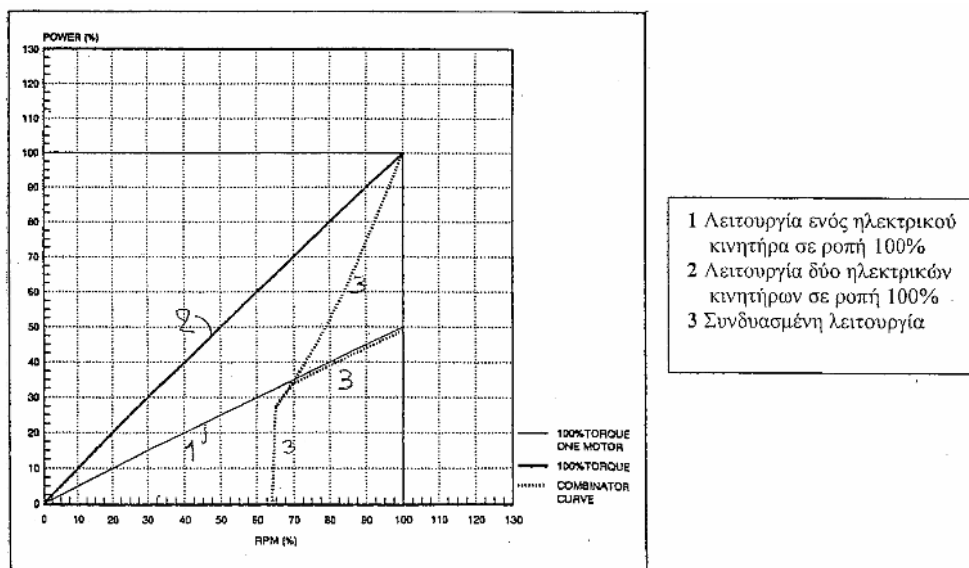


Σχήμα 1.31 Πεδίο λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες πρόωσης και έλικα σταθερού βήματος [3].

1.9.2 Έλικα ρυθμιζόμενου ή μεταβλητού βήματος

Το σύστημα είναι συχνά (ή θα έπρεπε να είναι) εφοδιασμένο με διάταξη αυτόματης επιλογής του συνδυασμού βήματος – στροφών έλικας στο διάστημα 65 – 100% των στροφών, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη λειτουργία και η καλύτερη δυνατή απόκριση κατά τους χειρισμούς. Όταν η έλικα είναι ρυθμιζόμενου βήματος δεν απαιτείται περιθώριο ροπής, διότι η μέγιστη ισχύς μπορεί σχεδόν πάντοτε να απορροφηθεί με ρύθμιση του βήματος [3].

Το Σχ. 1.32 απεικονίζει την καμπύλη της έλικας που προκύπτει με διάταξη αυτόματης επιλογής του συνδυασμού βήματος – στροφών, καθώς και τα όρια του πεδίου λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες συνδεδεμένους στην ίδια έλικα.



Σχήμα 1.32 Πεδίο λειτουργίας με έναν ή δύο ηλεκτροκινητήρες πρόωσης και έλικα ρυθμιζόμενου βήματος [3].

1.10 Συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης

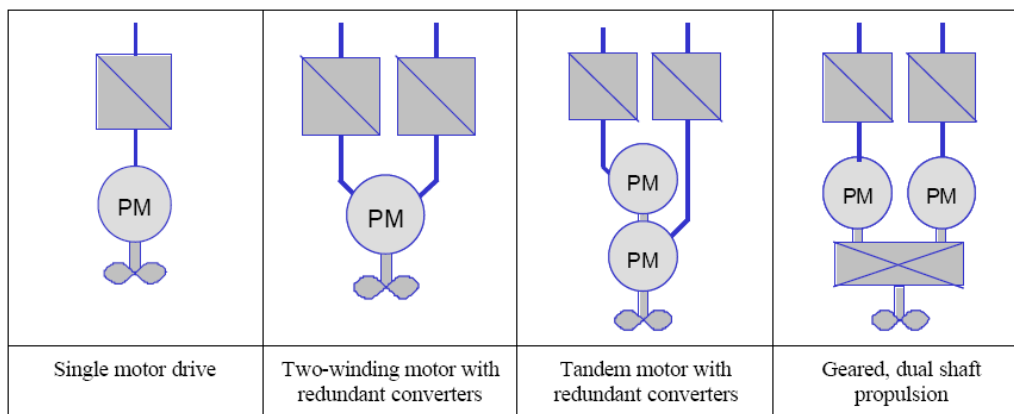
1.10.1 Κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion)

Σε αυτό το είδος πρόωσης οι έλικες ελέγχονται συνήθως από κινητήρες πρόωσης μεταβλητής ταχύτητας (Σχ. 1.33 – 1.34). Οι ηλεκτρικές μηχανές συνδέονται είτε άμεσα στον άξονα της έλικας, τρόπος απλός και στιβαρός, είτε μέσω μειωτήρων. Η χρήση μειωτήρων, οδηγεί στη χρήση μηχανών σχετικά υψηλών ονομαστικών στροφών, άρα και σε πιο συμπαγείς μηχανές. Το μειονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι ότι περιλαμβάνουν αρκετά μηχανικά υποσυστήματα, οπότε και περισσότερες μηχανικές απώλειες (βλ. Σχ. 1.35).

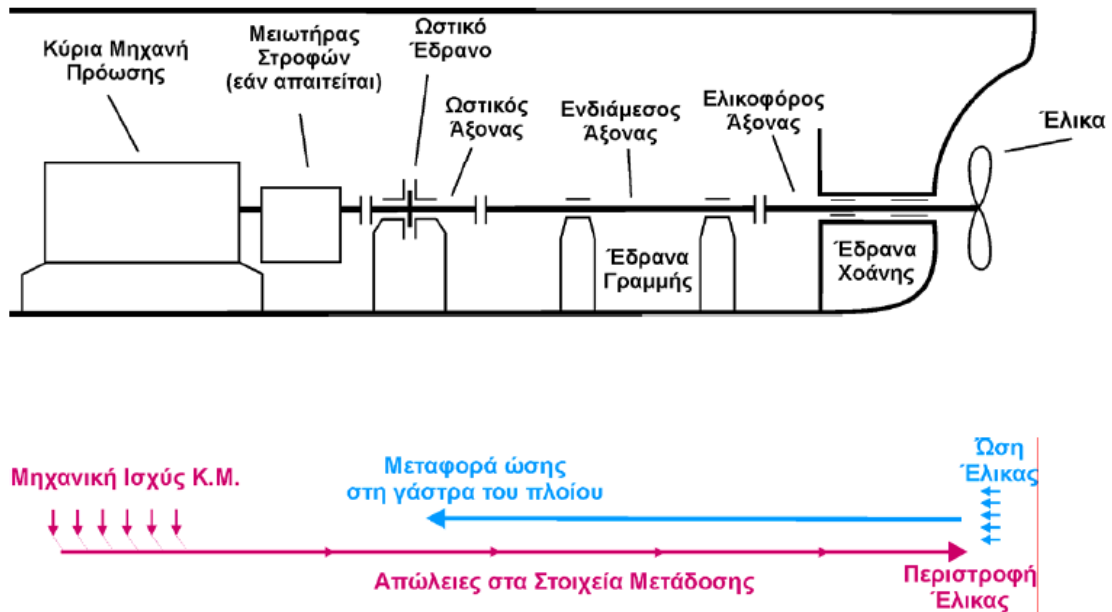


Σχήμα 1.33 Σύστημα ηλεκτροπρόωσης της Converteam [11].

Η κίνηση της έλικας με άξονα (shaft propulsion) εφαρμόζεται σε ντιζελοηλεκτρικά συστήματα πρόωσης όπου η ισχύς τους είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να προσφέρει ένα αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης, μειώνονται όμως οι ελικτικές του ικανότητες και χρειάζονται βοηθητικά μέσα ελιγμών (π.χ. έλικες πλευρικής ώσης). Επίσης είναι απαραίτητη η χρήση πηδαλίων για κάθε έλικα. Συνήθως χρησιμοποιούνται έλικες σταθερού βήματος (FPP). Σε ορισμένες εφαρμογές παρόλο που οι στροφές τις έλικας είναι μεταβλητές χρησιμοποιούνται και έλικες μεταβλητού βήματος (CPP), συνδυασμός ο οποίος οδηγεί σε μεγαλύτερες αποδόσεις έλικας [1].



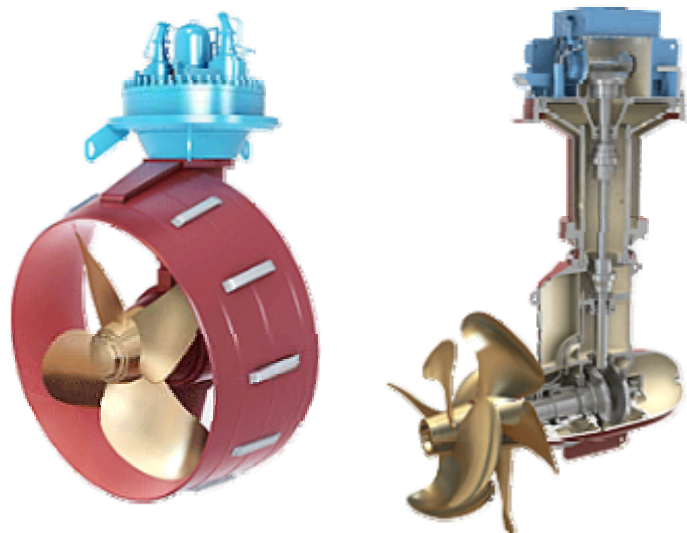
Σχήμα 1.34 Διάφορα είδη αξονικής πρόωσης [1].



Σχήμα 1.35 Γενική περιγραφή αξονικού συστήματος μεταξύ κύριας μηχανής πρόωσης και έλικας [12].

1.10.2 Αζιμουθιακοί προωστήρες (azimuth thrusters)

Αυτό το είδος προωστήρων μέσω της περιστροφής τους παράγουν ώση σε οποιαδήποτε διεύθυνση (Σχ. 1.36). Η ώση μπορεί να ελέγχεται είτε από προωστήρες με έλικες ελεγχόμενου βήματος CPP με σταθερή ταχύτητα περιστροφής είτε από προωστήρες με έλικες σταθερού βήματος FPP με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής είτε ακόμα και με προωστήρες μεταβλητού βήματος και στροφών.

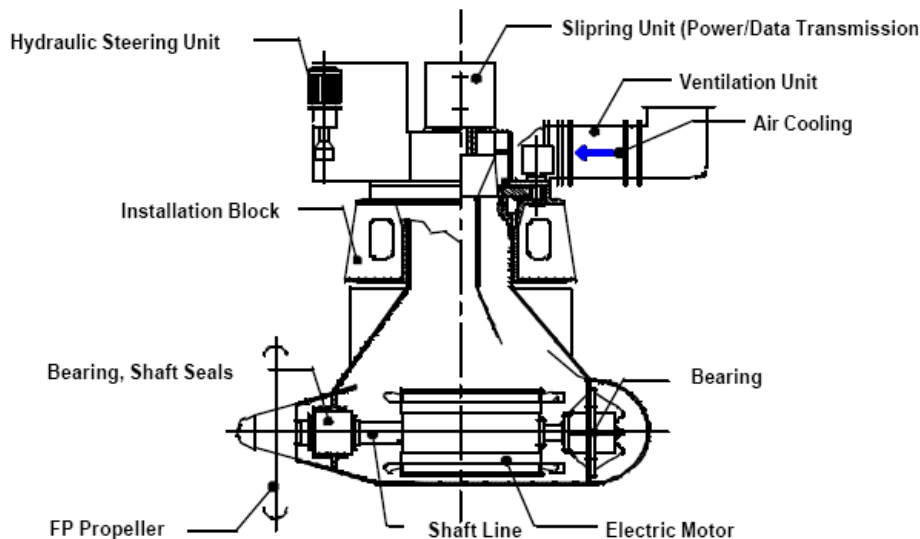


Σχήμα 1.36 Azimuth thrusters της εταιρίας Rolls Royce [13].

Οι αζιμουθιακοί προωστήρες αρχικά χρησιμοποιούνταν για να κρατούν σταθερή τη θέση ενός πλοίου και για τους ελιγμούς του. Τα τελευταία χρόνια ο συνδυασμός τους με την ηλεκτρική πρόωση οδήγησε και στην εφαρμογή τους ως κύρια μέσα πρόωσης σε εφαρμογές της τάξης των 6 – 7 MW [1].

1.10.3 Αξιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod (podded propulsion)

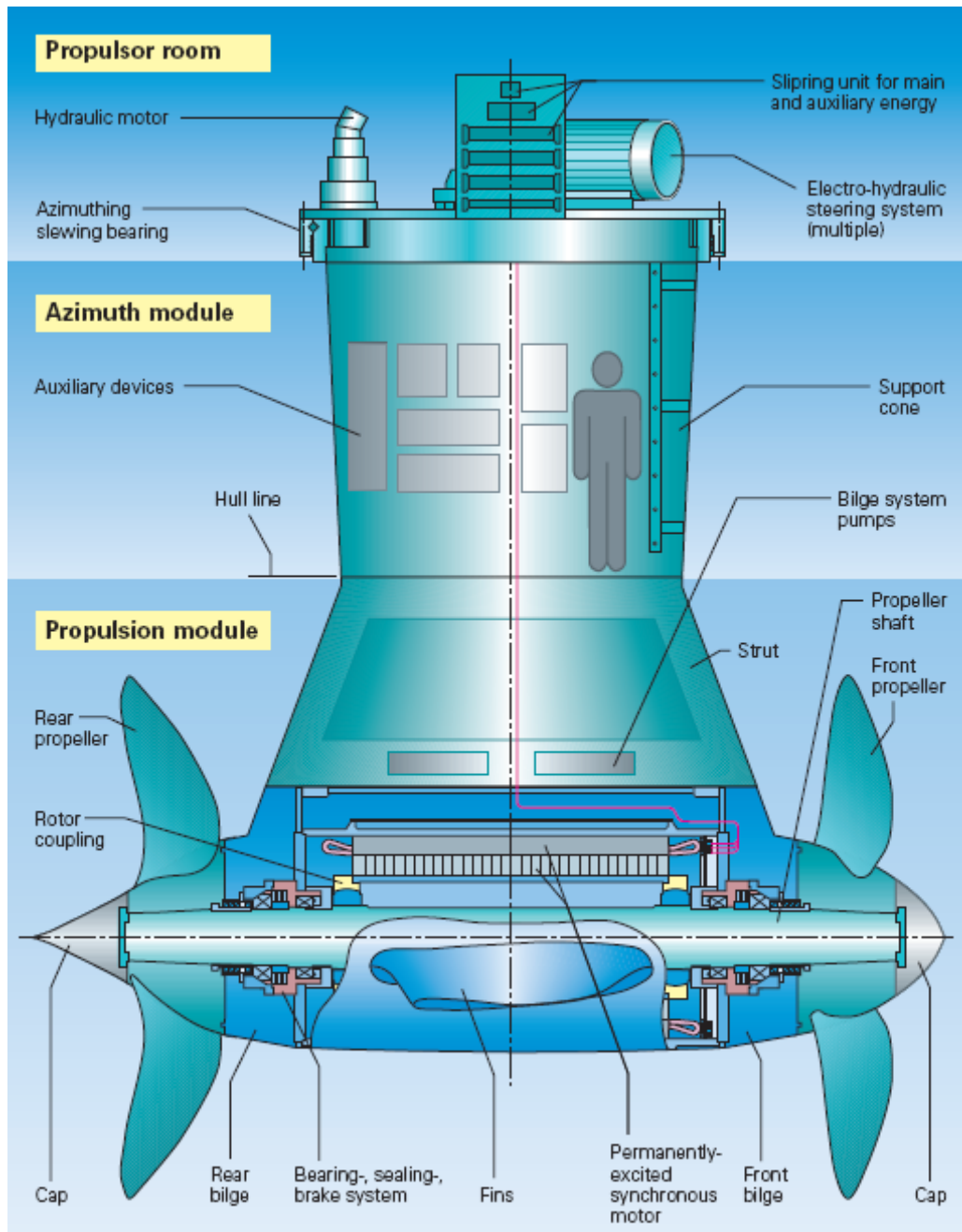
Την τελευταία δεκαετία και παράλληλα με την εισαγωγή της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίστηκε μία εναλλακτική λύση για το προωστήριο σύστημα που έχει πολλαπλά πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα ηλεκτρικού κινητήρα και έλικας είναι μία ενιαία μονάδα, εμβαπτισμένη στο νερό (Εικ. 1.3) στο πρυμναίο μέρος του πλοίου, όπως στις εξωλέμβιες (Σχ. 1.37 και 1.38). Το σύστημα μπορεί να φέρει μία ή δύο έλικες και έχει τη δυνατότητα να στρέφεται σχεδόν κατά 360° κατά την αξιμουθιακή διεύθυνση (από όπου προέρχεται και το όνομά του), δηλ. στο οριζόντιο επίπεδο, αυξάνοντας σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες ελιγμών του πλοίου, ενώ αφενός πρακτικά εκμηδενίζεται το αξονικό σύστημα και αφετέρου δεν υφίσταται μηχανισμός πηδαλιού. Επιπλέον, επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση χώρου, καθώς οι κινητήριες μηχανές έχουν μικρές διαστάσεις και το μεγαλύτερο μέρος του είναι εκτός του πλοίου, ενώ και αυτό ακόμη το αξονικό σύστημα ουσιαστικά εκμηδενίζεται οδηγώντας και σε μειωμένες ανάγκες συντήρησης.



Σχήμα 1.37 Αξιμουθιακό προωστήριο σύστημα με μία έλικα Azipod της ABB και τα επιμέρους στοιχεία του [1].



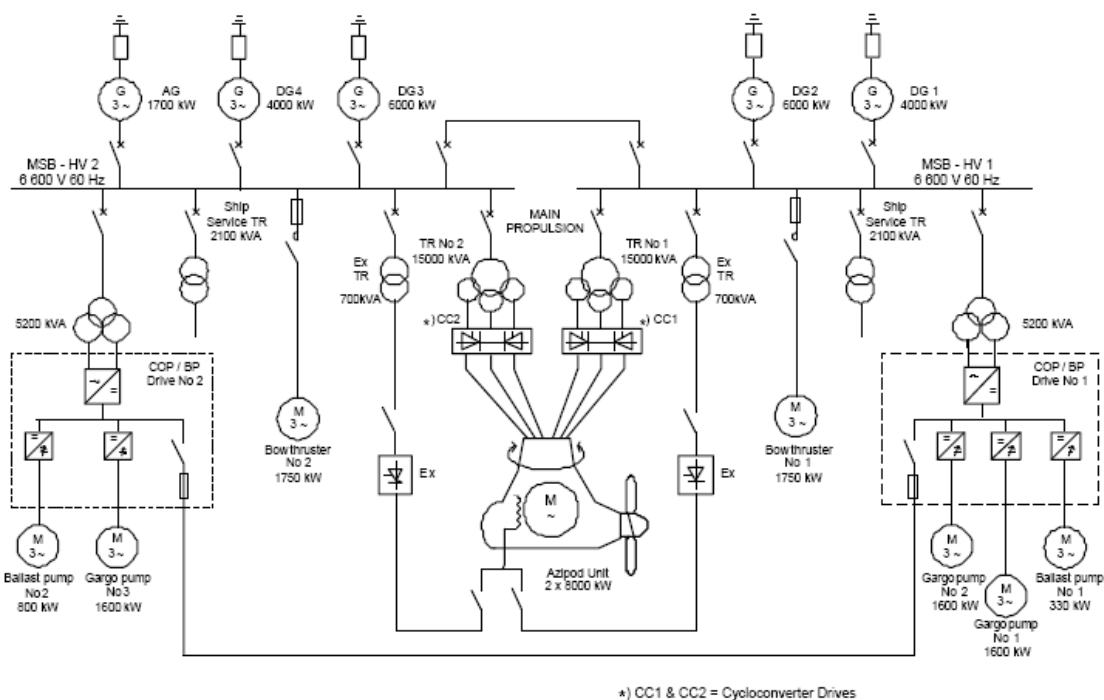
Εικόνα 1.3 Azipod thruster, ABB Marine [14].



Σχήμα 1.38 Αζιμουθιακό προωστήριο σύστημα δύο ελίκων SSP (Siemens – Schottel Propulsor) και τα επιμέρους στοιχεία του [4].

Το ενοποιημένο σύστημα κινητήρα – άξονα – έλικα έχει εξαιρετικά μικρούς χρόνους απόκρισης σε εντολές ελιγμών κάτι που ελαχιστοποιεί και τον χρόνο αποφυγής σύγκρουσης (crash – stop time).

Ο προωστήριος κινητήρας έχει περιορισμένες ανάγκες ψύξης καθώς ψύχεται από το θαλασσινό νερό στο οποίο είναι εμβαπτισμένος. Το αζιμουθιακό σύστημα πρόωσης pod χρησιμοποιείται σήμερα σε εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης της τάξης των 1 – 25 MW [1], [3]. Στο Σχ. 1.39 παρατίθεται σχηματικό της δομής του ηλεκτρικού δικτύου πρόωσης ενός συστήματος με αζιμουθιακό προωστήρα pod.



*) CC1 & CC2 = Cycloconverter Drives

Σχήμα 1.39 Δομή ηλεκτρικού δικτύου πρόωσης και αντλιών μικρού δεξαμενόπλοιου με αξιμουθιακό σύστημα Azipod [1].

1.11 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης σε μικρά σκάφη

Εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης έχουμε όπως είναι φυσικό και σε μικρότερα σκάφη, όπως σε μικρού και μεσαίου μεγέθους σκάφη αναψυχής, σε ιστιοπλοϊκά, σε αλιευτικές βάρκες κ.ά.. Χρησιμοποιούνται σαν βοηθητική αλλά και σαν κύρια πρόωση. Τα συστήματα πρόωσης είναι όμοια με αυτά των ηλεκτροκίνητων πλοίων, βέβαια μειώνεται κατά πολύ η ονομαστική ισχύς λειτουργίας και ο βαθμός πολυπλοκότητας τους.

Τα μικρά σκάφη μέχρι 6 – 7 μέτρα χρησιμοποιούν αμιγώς ηλεκτρική πρόωση, όπου μπαταρίες ή και κυψέλες καυσίμου (ανάλυση σχετικών συστημάτων ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο) τροφοδοτούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος Σ.Ρ/Σ.Ρ ή Σ.Ρ./Ε.Ρ., αναλόγως τον ηλεκτρικό κινητήρα της εφαρμογής, ελέγχουν τις στροφές της έλικας. Η ντιζελοηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερα σκάφη και έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την αντίστοιχη της στα πλοία.

Η χρήση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος Σ.Ρ. είναι ευρέως διαδεδομένη στις εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης χαμηλής ισχύος όπως και των σύγχρονων κινητήρων, κυρίως μονίμου μαγνήτη και για τα δύο είδη κινητήρων. Δε λείπουν όμως και οι ασύγχρονοι κινητήρες. Η μηχανή πρόωσης συνδέεται απευθείας ή μέσω μειωτήρων (τροχαλίες – μάντες) με τον άξονα της έλικας. Η αξιμουθιακή πρόωση (azimuth thrusters) σε αυτά τα συστήματα βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην βοηθητική πρόωση (bow thrusters) σκαφών αναψυχής. Διαδεδομένοι είναι και οι εξωλέμβιοι ηλεκτρικοί κινητήρες, στους οποίους ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να είναι έξω από το νερό, αντίστοιχα με τους συμβατικούς εξωλέμβιους κινητήρες, αλλά και μέσα στο νερό.

Ενδεικτικά, στην Εικ. 1.4 φαίνεται ένα σύστημα ηλεκτροπρόωσης της ολλανδικής εταιρείας Vetus, το οποίο βρίσκει εφαρμογές σε εγκαταστάσεις αμιγώς ηλεκτρικής αλλά και υβριδικής πρόωσης, όπου ο κινητήρας οδηγούμενος από τον κινητήρα

Diesel δρα και ως δυναμό, φορτίζοντας τους συσσωρευτές. Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται στην εφαρμογή είναι ένας σύγχρονος κινητήρας ονομαστικής τάσης 24 V και ισχύος 2.2 kW με ονομαστικό αριθμό στροφών 1200 rpm. Δοκιμές έγιναν με το παραπάνω σύστημα σε ένα σκάφος 6 μέτρων με εκτόπισμα 1.2 τόνους (4 άτομα και 4 συσσωρευτές μέσα στο σκάφος). Στα 24 V το ρεύμα που χρειάστηκε για να κινηθεί με 4.8 κόμβους ήταν 50 A. Με ονομαστική χωρητικότητα τα 352 Ah (24 V – 352 Ah (5 h)) και θεωρώντας ένα βάθος εκφόρτισης 80 % θα μπορούσε να ταξιδεύει με την ταχύτητα των 4.8 κόμβων για 6 ώρες. Για χαμηλότερες ταχύτητες αυξάνεται και η αυτονομία [16].



Εικόνα 1.4 Σύστημα ηλεκτροπρόωσης της Vetus [16].

1.12 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

1.12.1 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης, στα οποία οφείλεται και η διάδοσή της στις εφαρμογές που προαναφέρθηκαν, είναι τα ακόλουθα [2]:

- Συνεχής μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της έλικας και της ταχύτητας του πλοίου σε όλο το πεδίο 0 – 100 %.
- Γρήγορη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών και δυναμικής τοποθέτησης του σκάφους.
- Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών.
- Οικονομία καυσίμου, καθώς είναι δυνατή η επιλογή των μηχανών που θα λειτουργούν έτσι, ώστε η κάθε μια να λειτουργεί κοντά στο βέλτιστο σημείο.
- Ελευθερία στην τοποθέτηση των επιμέρους μηχανημάτων του ενεργειακού συστήματος, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους και εξοικονόμηση ωφέλιμου χώρου.

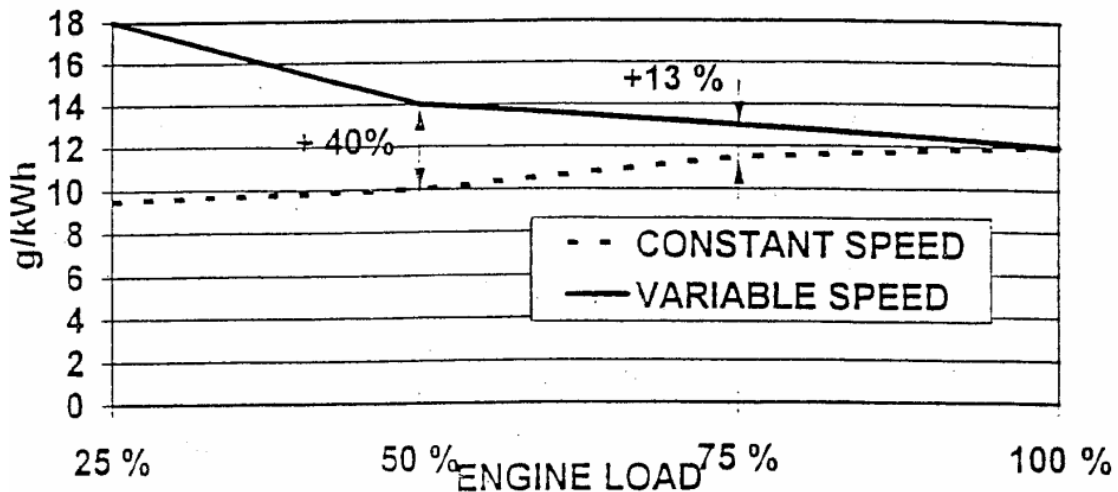
- Πλήρης εκμετάλλευση της στρεπτικής ροπής σε όλο το πεδίο λειτουργίας.
- Ευκολία αυτοματισμού.
- Αυξημένη αξιοπιστία (πολλά συστήματα συνδεδεμένα παράλληλα) και, επομένως, αυξημένη ασφάλεια.
- Περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων διότι:

α. η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως,

β. ιδιαίτερα οι εκπομπές NO_x είναι αισθητά χαμηλότερες όταν, π.χ., ένας μεσόστροφος κινητήρας Diesel λειτουργεί με σταθερές στροφές, όπως συμβαίνει στα νέα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης (βλ. Σχ. 1.40).

γ. σε εφαρμογές αμιγώς ηλεκτρικής πρόωσης με συσσωρευτές ή κυψέλες καυσίμου δεν υπάρχουν ρύποι ή είναι πολύ λιγότεροι (π.χ. σε εφαρμογές με κυψέλες καυσίμου με καύσιμο διαφορετικό του καθαρού υδρογόνου)

- Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενόπλοιων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος κατά τους χειρισμούς και τη δυναμική τοποθέτηση του σκάφους.



Σχήμα 1.40 Εκπομπές NO_x μεσόστροφων κινητήρων Diesel με βαρύ καύσιμο [3].

1.12.2 Μειονεκτήματα ηλεκτρικής πρόωσης

Τα μειονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης είναι τα εξής [2]:

α. Το υψηλό κόστος επένδυσης. Αυτό γίνεται η προσπάθεια να μειωθεί κατά το δυνατόν, αξιοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία των ηπειρωτικών ηλεκτρικών δικτύων (Commercial Off The Shelf – COTS), ωστόσο το υψηλό κόστος των κινητήρων και των διατάξεων ελέγχου τους δεν δείχνει να υπερκερνάται εύκολα.

β. Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Π.χ., σε ένα συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel – έλικας ρυθμιζόμενου βήματος, οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης είναι περίπου 4 %: 2 % στην έλικα και 2 % στον μειωτήρα, όταν η έλικα λειτουργεί στον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας/βήματος. Σε εγκατάσταση ντιζελοηλεκτρικής πρόωσης, το σύστημα μετάδοσης προκαλεί απώλειες 7 – 8 %: 3 % στις γεννήτριες, 2 % στους μετασχηματιστές και μετατροπείς συχνότητας και 2 – 3 % στους προωστήριους ηλεκτροκινητήρες. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή.

γ. Ένα πρόβλημα που προκύπτει από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι ότι εμφανίζονται προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς πέραν των χρήσιμων συχνοτήτων αναπτύσσεται και μεγάλο πλήθος αρμονικών συνιστωσών ρεύματος και τάσης. Οι αρμονικές αυτές αφενός προσαυξάνουν τη συνολική κυκλοφορούσα άεργο ισχύ στο ηλεκτρικό δίκτυο αλλά επιπλέον δημιουργούν προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Έτσι ο «ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος» που παράγεται επηρεάζει αρνητικά όλες τις ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις, πρωτίστως τα κυκλώματα ελέγχου των ίδιων των ηλεκτρονικών ισχύος, ενώ σε περιπτώσεις στρατιωτικών εφαρμογών αυξάνει τα επίπεδα της ηλεκτρομαγνητικής υπογραφής των πλοίων. Τέλος, είναι δυνατόν οι αρμονικές παραμορφώσεις των ηλεκτρικών μεγεθών να διεγείρουν ιδιοσυχνότητες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, όπως είναι τα φαινόμενα σιδηροσυντονισμού στους δρομείς των σύγχρονων γεννητριών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η σειρά αυτή των προβλημάτων λόγω της εξηλέκτρισης των συστημάτων του πλοίου αντιμετωπίζεται με εξειδικευμένες αναλύσεις και μελέτες κυρίως κατά της φάση της σχεδίασης τους ηλεκτρολογικού συστήματος.

1.13 Συμπεράσματα

Σε πολλές εφαρμογές, η συνισταμένη πλεονεκτημάτων - μειονεκτημάτων είναι θετική, οπότε η ηλεκτρική πρόωση είναι η ενδεδειγμένη λύση, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος λειτουργίας (μειωμένο πλήρωμα, οικονομικότερη συντήρηση, γρηγορότερα ταξίδια, μη αναγκαιότητα ρυμούλκησης κ.ο.κ.).

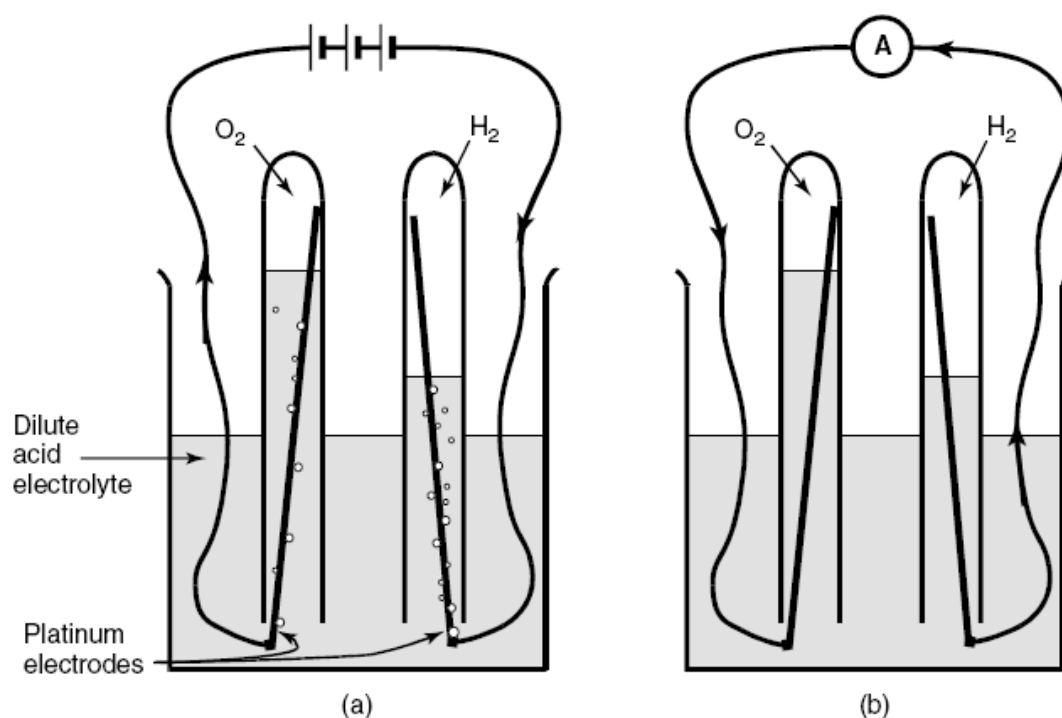
Η ηλεκτροπρόωση αποτελεί μία αρκετά δελεαστική επιλογή για τα πλοία και τα μικρότερα σκάφη που συνεχώς κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια μεταξύ των άλλων λόγω και της γενικά εντατικής εξέλιξης όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων και κυρίως στον τομέα των διατάξεων ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών ισχύος. Η έρευνα κατά την τρέχουσα περίοδο επικεντρώνεται στη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης αλλά και στην αύξηση των επιδόσεων του συνολικού συνδυασμού των διατάξεων που αξιοποιούνται από συστήματα ηλεκτροπρόωσης [2].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κυψέλες καυσίμου

2.1 Βασική αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου

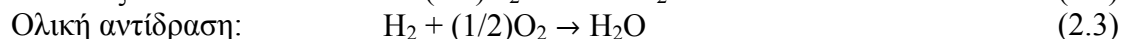
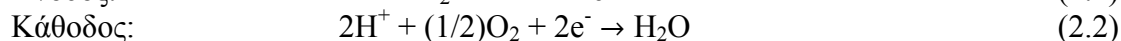
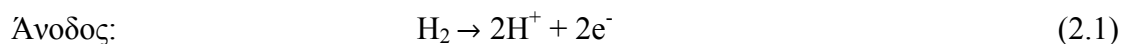
Όπως είναι γνωστό από τη Θερμοδυναμική, ο θεωρητικά μέγιστος βαθμός απόδοσης μίας θερμικής μηχανής είναι ίσος με τον βαθμό απόδοσης κύκλου Carnot, ο οποίος είναι αρκετά μικρότερος της μονάδας. Εάν η χημική ενέργεια του καυσίμου μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς τη μεσολάβηση θερμοδυναμικού κύκλου, τότε ο θεωρητικά μέγιστος βαθμός απόδοσης δεν περιορίζεται από τον βαθμό απόδοσης κύκλου Carnot. Αυτό ακριβώς συμβαίνει σε μια κυψέλη καυσίμου (fuel cell). Πρόκειται για ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρισμό, χωρίς τη μεσολάβηση της καύσης.



Σχήμα 2.1 Απεικόνιση της βασικής αρχής λειτουργίας, (a) Ηλεκτρολυτική συσκευή, (b) Κυψέλη καυσίμου, τα βέλη δείχνουν τη ροή των ηλεκτρονίων [17].

Η βασική αρχή λειτουργίας είναι πολύ απλή και απεικονίζεται στο Σχ. 2.1. Το δοχείο περιέχει αραιό διάλυμα οξέως, το οποίο είναι ο ηλεκτρολύτης. Σε δύο ανεστραμμένους δοκιμαστικούς σωλήνες, οι οποίοι αρχικά είναι γεμάτοι με ηλεκτρολύτη, βρίσκονται ηλεκτρόδια από πλατίνα. Εάν τα ηλεκτρόδια τροφοδοτηθούν με ηλεκτρικό ρεύμα από εξωτερική πηγή, το νερό ηλεκτρολύεται και παράγονται H_2 και O_2 που αποθηκεύονται στους σωλήνες (Σχ. 2.1a). Εάν η εξωτερική πηγή αντικατασταθεί από ένα ηλεκτρικό φορτίο ή αμπερόμετρο, τότε το H_2 και το O_2 αντιδρούν ηλεκτροχημικά με την παρουσία του ηλεκτρολύτη και παράγουν νερό, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται ένα ηλεκτροχημικό δυναμικό που προκαλεί ροή ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο) (Σχ. 2.1b).

Στα ηλεκτρόδια των κυψελών καυσίμου συμβαίνουν ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, οι οποίες εξαρτώνται από τον τύπο της κυψέλης καυσίμου. Για την κυψέλη καυσίμου του Σχ. 2.1b, ο ηλεκτρολύτης της οποίας είναι αραιό διάλυμα οξέως, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις είναι οι ακόλουθες.



Στην άνοδο παράγονται ιόντα H^+ (λέγονται και πρωτόνια) και ελευθερώνονται ηλεκτρόνια. Τα ιόντα μεταφέρονται στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη. Τα ηλεκτρόνια οδεύουν προς την κάθοδο, περνώντας από το φορτίο που συνδέεται μεταξύ ανόδου και καθόδου. Καθώς η αντίδραση είναι εξώθερμη, παράγεται θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα, ακόμη και για την παραγωγή πρόσθετης μηχανικής ή ηλεκτρικής ενέργειας.

Εκτός άλλων μεθόδων, το απαιτούμενο υδρογόνο παράγεται με ηλεκτρόλυση του νερού ή με αναμόρφωση υδρογονανθράκων (κυρίως φυσικού αερίου). Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, ορισμένοι τύποι κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιήσουν μονοξείδιο του άνθρακα (CO) ή μίγμα H_2 και CO ως καύσιμο, αντί του υδρογόνου.

Επιπλέον του υψηλού βαθμού απόδοσης, οι κυψέλες καυσίμου έχουν χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών και χαμηλές εκπομπές ρύπων, ιδιαίτερα οξειδίων του αζώτου, NO_x (οι χαμηλές θερμοκρασίες δεν ευνοούν τον σχηματισμό NO_x). Χάρη στα πλεονεκτήματα αυτά, το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη και τη διάδοση τους είναι έντονο [16].

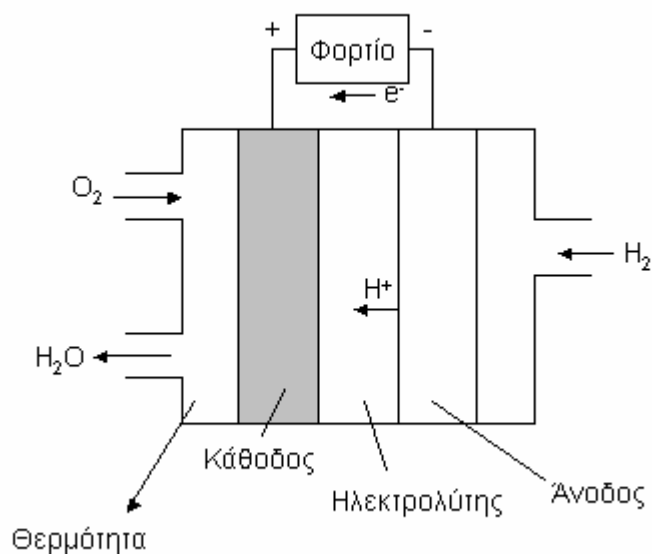
2.2 Δομή μιας κυψέλης καυσίμου

Το δυναμικό και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που αναπτύσσονται σε μια συσκευή όπως αυτή του Σχ. 2.1b, είναι πολύ χαμηλά. Οι κυριότεροι λόγοι είναι οι ακόλουθοι [16]:

- Η επιφάνεια επαφής μεταξύ του αερίου, του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη είναι πολύ μικρή: βασικά, είναι ένα μικρό δακτυλίδι, εκεί όπου το ηλεκτρόδιο αναδύεται στον ηλεκτρολύτη.
- Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι μεγάλη: ο ηλεκτρολύτης προβάλλει αντίσταση στη ροή των ιόντων.

Για να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα αυτά, τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται συνήθως με επίπεδο σχήμα και ανάμεσά τους παρεμβάλλεται ηλεκτρολύτης λεπτού πάχους, όπως στο Σχ. 2.2 (το πάχος των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη στο σχήμα αυτό είναι πολύ μεγαλύτερα των πραγματικών, για ευκρίνεια). Τα ηλεκτρόδια είναι πορώδη, ώστε να τα διαπερνούν ο ηλεκτρολύτης από τη μία πλευρά και το αέριο από την άλλη. Με τον τρόπο αυτόν, η επιφάνεια επαφής μεταξύ του αερίου, του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη είναι η μέγιστη δυνατή.

Σημειώνεται, ότι ο ηλεκτρολύτης πρέπει να επιτρέπει τη διέλευση των ιόντων μέσα από αυτόν, αλλά όχι των ηλεκτρονίων. Διαφορετικά, τα ηλεκτρόνια θα περνούσαν μέσα από τον ηλεκτρολύτη και όχι από το εξωτερικό κύκλωμα, οπότε η συσκευή θα ήταν άχρηστη.



Σχήμα 2.2 Απλοποιημένη απεικόνιση κυψέλης καυσίμου [16].

Εάν δεν ληφθούν ειδικά μέτρα, η ταχύτητα των αντιδράσεων θα είναι πολύ μικρή. Τρεις είναι οι κυριότεροι τρόποι που εφαρμόζονται στις κυψέλες καυσίμου για την αύξηση της ταχύτητας αυτής [16]:

- η αύξηση της θερμοκρασίας,
- η χρήση καταλυτών,
- η αύξηση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων.

Οι δύο πρώτοι είναι κοινοί για οποιαδήποτε αντίδραση. Ο καταλύτης στις κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιείται με τη μορφή λεπτού στρώματος (π.χ. πλατίνας) στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, τα οποία είναι κατασκευασμένα από πορώδη άνθρακα. Ο τρίτος τρόπος είναι ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των κυψελών καυσίμου και είναι πολύ σημαντικός, όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Οποιαδήποτε από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις (2.1) και (2.2) ή άλλες σε άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, απαιτεί την επαφή τριών συστατικών: του αερίου, του ηλεκτροδίου (για την απομάκρυνση ή πρόσδοση των ηλεκτρονίων) και του ηλεκτρολύτη (για την απομάκρυνση ή πρόσδοση των ιόντων). Η επαφή αυτή, συχνά αναφέρεται με τον όρο επαφή τριών φάσεων και είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για τον σχεδιασμό και τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.

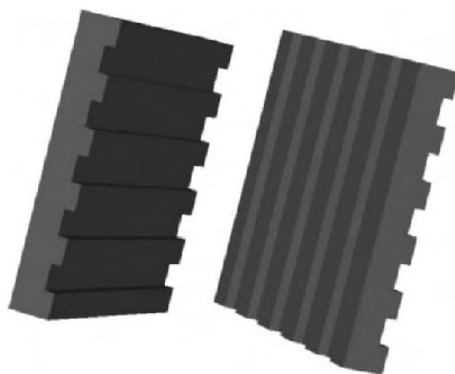
Η ταχύτητα των αντιδράσεων είναι ανάλογη της επιφάνειας επαφής των τριών φάσεων. Έτσι, η επιφάνεια αυτή είναι τόσο ζωτικής σημασίας, ώστε συχνά η συμπεριφορά των κυψελών καυσίμου αναφέρεται με την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, δηλ., την ένταση ανά μονάδα επιφάνειας των ηλεκτροδίων (συνήθως σε A/cm^2). Η ονομαστική επιφάνεια υπολογίζεται εύκολα (π.χ. μήκος επί πλάτος) και ως προς αυτήν ορίζεται η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος. Όμως, πιο σημαντική είναι η πραγματική επιφάνεια επαφής, όπως αυτή διαμορφώνεται με τους πόρους του ηλεκτροδίου, διότι από αυτήν εξαρτάται η ταχύτητα των αντιδράσεων και, επομένως,

η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Σήμερα, κατασκευάζονται ηλεκτρόδια με τέτοια μικροδομή, ώστε η πραγματική επιφάνεια επαφής να είναι εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική επιφάνεια.

Επιπλέον των κυψελών, το πλήρες σύστημα περιλαμβάνει τον αναμορφωτή καυσίμου που μετατρέπει το διαθέσιμο καύσιμο σε H_2 ή μίγμα H_2 και CO , το ψυκτικό κύκλωμα, τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της κυψέλης στην επιθυμητή μορφή, το σύστημα ρύθμισης και ελέγχου, και βοηθητικά μηχανήματα και συσκευές (αντλίες, ανεμιστήρες, εναλλάκτες θερμότητας, κλπ).

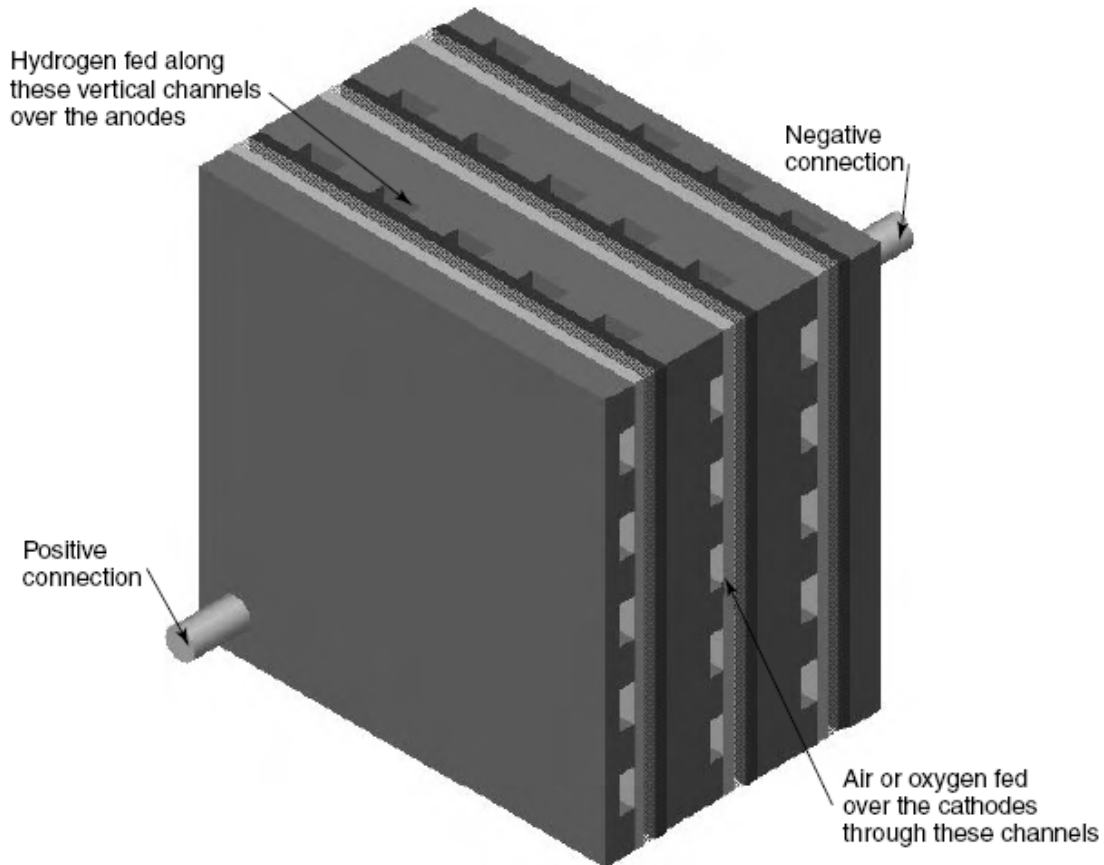
2.3 Σύνδεση κυψελών καυσίμου σε σειρά – Η δίπολη πλάκα

Μία μόνο κυψέλη αναπτύσσει χαμηλή τάση (περίπου 0,7 V). Η σύνδεση πολλών κυψελών σε σειρά επιτρέπει την παραγωγή οποιασδήποτε επιθυμητής τάσης, ενώ η παράλληλη σύνδεση δίνει την επιθυμητή ισχύ. Μια ομάδα κυψελών, συνδεδεμένων σε σειρά, λέγεται στήλη (stack). Η σύνδεση αυτή θα μπορούσε να γίνει με αγωγούς, αλλά τότε θα έπρεπε τα ηλεκτρόνια από το κάθε ηλεκτρόδιο να συγκεντρώνονται σε μία ακμή με συνέπεια τη σημαντική πτώση της τάσης. Για να περιορισθεί στο ελάχιστο η πτώση τάσης από την κίνηση των ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια, χρησιμοποιείται η δίπολη πλάκα (bipolar plate). Με αυτήν, επιτυγχάνεται επαφή σε όλη την επιφάνεια της καθόδου της μίας κυψέλης και της ανόδου της επομένης (εξ' ου και δίπολη). Η δίπολη πλάκα είναι έτσι διαμορφωμένη, ώστε να παίζει τον ρόλο διανομέα – τροφοδότη οξυγόνου στην κάθοδο, και καυσίμου στην άνοδο (βλ. Σχ. 2.3). Το υλικό κατασκευής της εξαρτάται από τον τύπο της κυψέλης καυσίμου. Έχουν χρησιμοποιηθεί: γραφίτης, ανοξείδωτος χάλυβας, καθώς και κεραμικά υλικά.



Σχήμα 2.3 Δύο δίπολες πλάκες απλής μορφής, έχουν οριζόντιες αυλακώσεις στη μία πλευρά και κατακόρυφες στην άλλη [17].

Το Σχ. 2.4 δείχνει πώς συνδέονται μεταξύ τους τρεις (ή περισσότερες) κυψέλες, σχηματίζοντας μια στήλη. Μεταξύ δύο κυψελών καυσίμου παρεμβάλλεται μία δίπολη πλάκα, ενώ στα άκρα της στήλης τοποθετούνται πλάκες που έχουν αυλακώσεις στη μία πλευρά και έναν «πόλο» στην άλλη πλευρά τους, για τη σύνδεση με άλλες στήλες ή με το εξωτερικό κύκλωμα. Με τον τρόπο αυτόν, κατασκευάζεται μια αρκετά στιβαρή στήλη. Αν και στα Σχ. 2.3 και 2.4 η δίπολη πλάκα φαίνεται απλή για λόγους εποπτείας, ο σχεδιασμός της δεν είναι απλός καθώς πρέπει να βρεθεί η μορφή εκείνη που αποτελεί συγκερασμό αντικρουόμενων απαιτήσεων όπως π.χ. μικρή αντίσταση στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά και στη ροή των αερίων. Επιπλέον, σε ορισμένους τύπους κυψελών καυσίμου, απαιτούνται πρόσθετες αυλακώσεις για την ψύξη της συσκευής. Και βέβαια, η όλη κατασκευή πρέπει να είναι στεγανή [16].



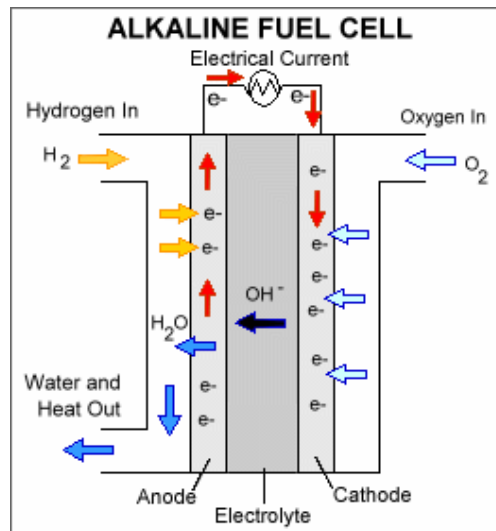
Σχήμα 2.4 Στήλη αποτελούμενη από τρεις κυψέλες καυσίμου, συνδεδεμένες μεταξύ τους με δίπολες πλάκες [17].

2.4 Τύποι κυψελών καυσίμου

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατάταξης των κυψελών καυσίμου σε τύπους, αλλά αυτός που έχει επικρατήσει στηρίζεται στον χρησιμοποιούμενο ηλεκτρολύτη. Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η θερμοκρασία λειτουργίας. Ακολουθεί σύντομη παρουσίαση των διαφόρων τύπων, με σειρά από τις χαμηλότερες προς τις υψηλότερες θερμοκρασίες [16]. Τα κύρια χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου που βρίσκουν εμπορική εφαρμογή τον τελευταίο καιρό τους συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

- **Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline Fuel Cells, AFC)**

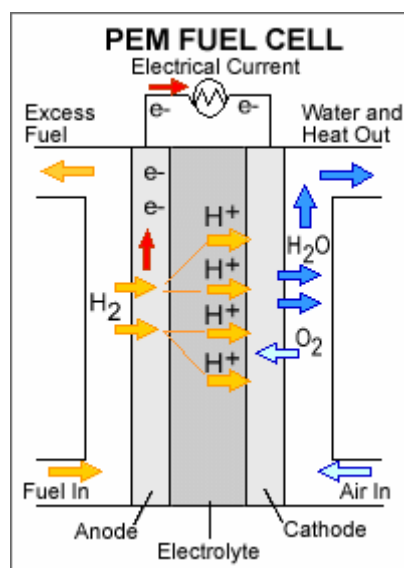
Έχουν συνήθως καυστικό κάλιο (KOH) για ηλεκτρολύτη. Τα ηλεκτρόδια είναι πορώδη και καλύπτονται με πλατίνα ως καταλύτη. Λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο ως καύσιμο, ενώ καθαρό οξυγόνο ή αέρας χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό. Αν και σε ορισμένες αξιοσημείωτες εφαρμογές οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου λειτουργούσαν σε θερμοκρασία περίπου 200°C, σήμερα η θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνήθως χαμηλότερη των 100°C, γι' αυτό και χαρακτηρίζονται ως κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας. Χρησιμοποιούνται μόνον σε ειδικές εφαρμογές (π.χ. φορητές μονάδες, διαστημικά οχήματα). Η βασική αρχή λειτουργίας μιας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου απεικονίζεται στο Σχ. 2.5.



Σχήμα 2.5 Σχηματικό και αρχή λειτουργίας αλκαλικής κυψέλης καυσίμου [21].

- **Κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEMFC)**

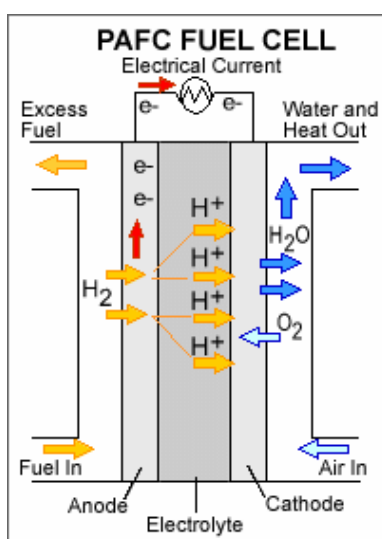
Ο ηλεκτρολύτης είναι μεμβράνη από πολυμερές στερεό. Ο στερεός και ακίνητος ηλεκτρολύτης συντελεί στο να είναι οι κυψέλες αυτές αρκετά απλές. Λειτουργούν και αυτές σε θερμοκρασία χαμηλότερη των $100^{\circ}C$ και αναπτύσσουν υψηλή πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος ($2 A/cm^2$). Η βασική αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης απεικονίζεται στο Σχ. 2.6. Οι κοινές κυψέλες πολυμερικής μεμβράνης απαιτούν υδρογόνο ως καύσιμο. Έχουν αναπτυχθεί σχετικά πρόσφατα κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης που λειτουργούν με μεθανόλη (CH_3OH), η οποία είναι υγρό καύσιμο. Η ισχύς τους είναι πολύ μικρή, αλλά προβλέπεται ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές και, γενικότερα, σε συσκευές που λειτουργούν επί μεγάλα χρονικά διαστήματα με μικρή ισχύ. Στην αγγλική ορολογία αναφέρονται με την ονομασία **Direct Methanol Fuel Cells (DMFC)** και ορισμένοι συγγραφείς τις θεωρούν χωριστό τύπο.



Σχήμα 2.6 Σχηματικό και αρχή λειτουργίας πολυμερικής κυψέλης καυσίμου [21].

- **Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)**

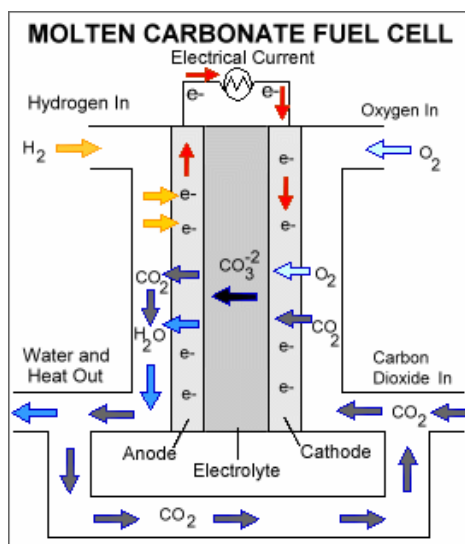
Είναι ο πρώτος τύπος κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκε και διαδόθηκε σε εμπορική κλίμακα. Τυποποιημένες μονάδες ισχύος 200 – 250 kW είναι εμπορικά διαθέσιμες είτε για απλή ηλεκτροπαραγωγή, είτε για συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, ενώ έχουν κατασκευασθεί επιδεικτικές μονάδες ισχύος 25 kW – 11 MW σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες, στις Η.Π.Α. και στην Ιαπωνία. Στο Σχ. 2.7 παρατίθεται σχηματικό της κυψέλης με τη βασική αρχή λειτουργίας της. Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από φωσφορικό οξύ (H_3PO_4). Το υδρογόνο παράγεται σε εξωτερικό αναμορφωτή. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι περίπου $200^{\circ}C$, οπότε η αποβαλλόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα για την εξυπηρέτηση θερμικών αναγκών (μονάδες συμπαραγωγής). Για την παραγωγή του υδρογόνου χρησιμοποιείται συνήθως φυσικό αέριο. Επίσης χρησιμοποιείται η μεθανόλη, ιδιαίτερα σε κυψέλες καυσίμου ηλεκτροκίνητων οχημάτων.



Σχήμα 2.7 Σχηματικό και αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέως [21].

- **Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC)**

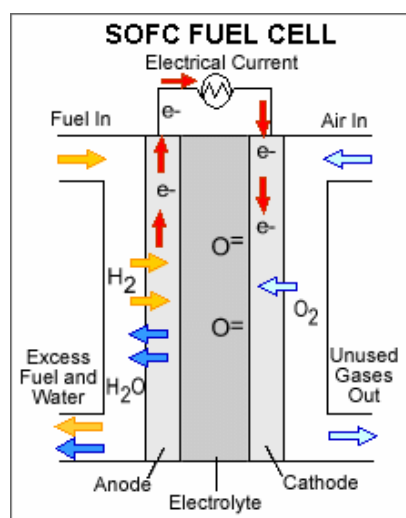
Ο ηλεκτρολύτης είναι μίγμα ανθρακικού λιθίου (Li_2CO_3) και ανθρακικού καλίου (K_2CO_3) που βρίσκεται σε υγρή φάση στη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία είναι $600 - 700^{\circ}C$. Στις θερμοκρασίες αυτές, οι ρυθμοί αντιδράσεων είναι καλοί και αρκούν φθινοί καταλύτες στα ηλεκτρόδια, όπως το νικέλιο. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται αέριο μίγμα με κύρια συστατικά H_2 , CO και CO_2 που προέρχεται από αναμόρφωση υδρογονανθράκων (π.χ. φυσικού αερίου) ή εξαερίωση άνθρακα. Προσοχή χρειάζεται ως προς τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι καυτό και διαβρωτικό υγρό. Χάρη στην υψηλή θερμοκρασία, διάφοροι υδρογονάνθρακες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο χωρίς προηγούμενη επεξεργασία, δηλ. χωρίς εξωτερική αναμόρφωση. Όταν λειτουργούν με φυσικό αέριο, στους αγωγούς διανομής του καυσίμου τοποθετούνται καταλύτες οι οποίοι με τη βοήθεια της εκλυόμενης θερμότητας διασπούν το αέριο σε H_2 , CO και CO_2 . Αυτή η ικανότητα εσωτερικής αναμόρφωσης του καυσίμου απαλλάσσει το σύστημα από την ανάγκη εξωτερικού αναμορφωτή. Η βασική αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων απεικονίζεται στο Σχ. 2.8.



Σχήμα 2.8 Σχηματικό και αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων [21].

- **Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)**

Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από κεραμικό υλικό, συνήθως οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2). Οι κυψέλες λειτουργούν σε θερμοκρασίες $600 - 1000^\circ C$, στις οποίες ο ηλεκτρολύτης εξακολουθεί να βρίσκεται σε στερεά κατάσταση. Η υψηλή θερμοκρασία συντελεί σε υψηλούς ρυθμούς αντιδράσεων, οπότε δεν απαιτούνται ακριβοί καταλύτες στα ηλεκτρόδια. Επιπλέον, κάνει δυνατή την εσωτερική αναμόρφωση υδρογονανθράκων. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται μίγμα H_2 και CO που προέρχεται από την αναμόρφωση υδρογονανθράκων (π.χ. φυσικού αερίου) ή εξαερίωση άνθρακα. Η υψηλή θερμοκρασία καθιστά αναγκαία τη χρήση κεραμικών υλικών, τα οποία παρουσιάζουν δυσκολία στην κατασκευή και τη χρήση. Χρειάζεται προσοχή ιδιαίτερα στην εκκίνηση που είναι βραδύτερη εδώ από ότι σε άλλες κυψέλες καυσίμου. Τέλος η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας κάνει τις κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου ιδιαίτερα κατάλληλες για συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Η βασική αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου απεικονίζεται στο Σχ. 2.9.



Σχήμα 2.9 Σχηματικό και αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου [21].

Πίνακας 2.1 Κύρια χαρακτηριστικά των εμπορικών κυψελών καυσίμου [16], [18].

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Ηλεκτρολύτης	Στερεό πολυμερικό	H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ + K ₂ CO ₃	ZrO ₂
Αγώγιμοι φορείς	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ⁻²
Αναμόρφωση καυσίμου	εξωτερική	εξωτερική	εξωτερική ή εσωτερική	εξωτερική ή εσωτερική
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	60 - 100	125 - 200	650 - 800	600 - 1000
Πίεση λειτουργίας (atm)	1 - 5	1 - 8	1 - 3	1 - 15
Υλικό κατασκευής ηλεκτροδίων	πορώδης άνθρακας	άνθρακας	κράματα Ni και Cr	κεραμικά και μέταλλα
Συγκέντρωση ισχύος (kW/kg)	0,220 - 0,275	~0,088	~0,037	~0,055
Βαθμός απόδοσης (LHV)	35 - 40%	35 - 40%	50 - 55%	45 - 50%

Συνοψίζοντας, στον Πίνακα 2.2 [19] συγκεντρώνονται χαρακτηριστικά λειτουργίας, αποδόσεις και κόστη ορισμένων κυψελών καυσίμου μέχρι 5 kW βασισμένα σε έρευνα του 2007 [22].

Πίνακας 2.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά, αποδόσεις και κόστη διαφόρων κυψελών καυσίμου μέχρι 5 kW [19].

	PEMFC	SOFC	PAFC	AFC
Δυναμικό λειτουργίας, V	0,59 – 0,73	0,63 – 0,75	0,64 – 0,72	0,64 – 0,82
Πυκνότητα ρεύματος λειτουργίας, A/cm ²	0,40 – 0,90	0,32 – 0,67	0,16 – 0,31	0,09 – 0,24
Πυκνότητα ισχύος, W/cm ²	0,27 – 0,56	0,22 – 0,46	0,11 – 0,21	0,06 – 0,18
Απόδοση συστοιχίας, % HHV	36,5 – 50,0	42,0 – 64,5	40,5 – 54,5	42,5 – 49,5
Απόδοση συστήματος, % HHV	23,0 – 31,5	27,0 – 41,5	26,0 – 35,0	27,0 – 32,0
Συνολική απόδοση, % HHV	63,5 – 81,5	67,0 – 71,0	74,0 – 87,0	~ 87,0
Διάρκεια ζωής, kh	7 – 21	15 – 59	30 – 53	4 – 8
Διάρκεια ζωής, χρόνια	0,7 – 2,4	1,7 – 6,7	3,5 – 6,1	0,5 – 0,9
Απενεργοποίηση, mV/χρόνο	13,1 – 74,5	28,0 – 73,6	14,9 – 39,4	78,8 – 254,0
Απενεργοποίηση, %/χρόνο	2 – 11	4 – 10	2 – 6	11 – 35
Κόστος συστοιχίας, €/kWe	300 – 900	200 – 600	-	150 – 600
Κόστος συστήματος, €/kWe	530 – 1130	680 – 1080	2500 – 5000	375 – 825
Λιανική τιμή, €/kW (στόχος)	220 – 440	510 – 970	660 – 1100	120 – 230

2.5 Σύντομο ιστορικό

• Η εφεύρεση της κυψέλης καυσίμου (1838, 1839)

Η εφεύρεση της κυψέλης καυσίμου οφείλεται στον Christian Friedrich Schonbein, καθηγητή του Πανεπιστημίου της Βασιλείας από το 1829 έως το 1868. Σε γράμμα του προς τον γνωστό Άγγλο επιστήμονα Michael Faraday το καλοκαίρι του 1838, αναφέρει πειράματα στα οποία παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα χωρίς τα ηλεκτρόδια να είναι χημικά φορτισμένα όπως στους συσσωρευτές. Στην έκδοση του Ιανουαρίου 1839 του Philosophical Magazine, περιγράφει πειράματα, με τα οποία κατόρθωσε να

παράγει ηλεκτρικό ρεύμα με χημική αντίδραση υδρογόνου και οξυγόνου πάνω σε ηλεκτρόδια από πλατίνα. Έτσι, γεννιέται η συσκευή που σήμερα είναι γνωστή ως κυψέλη καυσίμου. Ο Schonbein συνέχισε να εργάζεται στο αντικείμενο αυτό και να εξελίσσει τη θεωρία του [Sulzer Hexis].

Ο Άγγλος William Grove, φίλος του Schonbein, που ήταν δικηγόρος στο Swansea της Μεγάλης Βρετανίας, ερμήνευσε το φαινόμενο αυτό τον Φεβρουάριο του 1839 ως το αντίστροφο της ηλεκτρόλυσης και αναγνώρισε τη δυνατότητα εφαρμογής του για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ο Grove εργάστηκε εντατικά για τη βελτίωση και κατανόηση της λειτουργίας της συσκευής αυτής, την οποία τότε ονόμαζε συσσωρευτή αερίου (gas battery). Η συμβολή του ήταν τέτοια, ώστε σε πολλά βιβλία αναφέρεται, λανθασμένα, αυτός ως εφευρέτης της κυψέλης καυσίμου αντί του Schonbein. Ο Grove έγινε αργότερα καθηγητής στο Royal Institute του Λονδίνου και, ως αναγνώριση των εργασιών του, του απονεμήθηκε ο τίτλος του Λόρδου. Η κυψέλη καυσίμου του Grove είχε ηλεκτρόδια από πλατίνα και αραιό διάλυμα θειικού οξέως ως ηλεκτρολύτη. Μπορεί να θεωρηθεί ως προπομπός των σημερινών κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέως [16].

- **Τα πρώτα 100 χρόνια (1839 – 1939)**

Το 1896 στις Η.Π.Α., ο W. W. Jacques υποστήριξε πως η κυψέλη καυσίμου θα μπορούσε να κάνει το δυναμό, το οποίο είχε εφευρεθεί το 1867, να φαίνεται απηρχαιωμένο. Περιέγραψε, μάλιστα, ένα μεγάλο πλοίο με κυψέλες καυσίμου ως σύστημα πρόωσης.

Παρ' όλο που η δυνατότητα των κυψελών καυσίμου για αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναγνωρίστηκε από την αρχή, τεχνικά προβλήματα που έμεναν άλυτα επί 150 και πλέον χρόνια, δεν επέτρεψαν οι συσκευές αυτές να εφαρμοσθούν στην πράξη. Σε ερευνητικό επίπεδο, όμως, η δραστηριότητα συνεχίστηκε με αποτέλεσμα να χορηγηθούν πολλά διπλώματα ευρεσιτεχνίας, αρχικά σε χώρες της Ευρώπης και στις Η.Π.Α., αργότερα στην Ιαπωνία και αλλού. Η πρώτη περιγραφή αλκαλικής κυψέλης καυσίμου (με KOH) εμφανίζεται το 1902 από τον J. H. Reid.

Τον 19ο αιώνα, το κύριο καύσιμο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ήταν ο άνθρακας. Ήταν, λοιπόν, φυσικό να εκδηλωθεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την κατασκευή κυψελών καυσίμου που να λειτουργούν με άνθρακα. Τα σχετικά πειράματα είχαν επιτυχία, αλλά τεχνικές δυσκολίες δεν επέτρεψαν να φθάσουν οι κυψέλες αυτές στο στάδιο της εμπορικής εφαρμογής.

Η έρευνα συνεχίστηκε με ποικίλους συνδυασμούς καυσίμου, ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίων. Παρ' όλες τις προσπάθειες, μέχρι το 1940 οι κυψέλες καυσίμου παρέμεναν σε πολύ μικρό μέγεθος, η διάρκεια ζωής τους ήταν πολύ μικρή, και δεν ξεπέρασαν το ερευνητικό στάδιο [16].

- **Η σύγχρονη εποχή (1939 – σήμερα)**

Το πέρασμα από την έρευνα στην τεχνολογική ανάπτυξη αρχίζει με τον F. T. Bacon (Μεγάλη Βρετανία), ο οποίος το 1939 κατασκεύασε κυψέλη καυσίμου αμφίδρομης λειτουργίας με διάλυμα KOH ως ηλεκτρολύτη και τα εξής λειτουργικά χαρακτηριστικά: πίεση αερίων 220 bar, πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος 13 mA/cm², μέγιστη τάση 0,89 V. Το 1954, ο Bacon επιδεικνύει σε έκθεση, κυψέλη καυσίμου ισχύος 150 W με πίεση λειτουργίας 41 bar και θερμοκρασία 200°C. Τον Αύγουστο του 1959 παρουσίασε μια άλλη κυψέλη ισχύος 6 kW με πυκνότητα ρεύματος 700 mA/cm², πίεση λειτουργίας 38 bar και θερμοκρασία 200°C και ανέφερε πως θα

μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση περονοφόρου οχήματος ή τη λειτουργία συσκευής συγκολλήσεων.

Εξελίξεις των κυψελών καυσίμου του Bacon (τρεις κυψέλες KOH ισχύος 1,4 kW η κάθε μία) χρησιμοποιήθηκαν στα διαστημόπλοια Απόλλων (1967 – 1972). Στο διαστημικό πρόγραμμα Gemini (1962 – 1966) χρησιμοποιήθηκαν κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης, ισχύος 1 kW. Έτσι, στις διαστημικές πτήσεις οι κυψέλες καυσίμου βρήκαν την πρώτη πρακτική εφαρμογή τους. Βέβαια στις εφαρμογές αυτές, το υψηλό κόστος και η μικρή διάρκεια ζωής (περίπου 400 h) δεν ήταν απαγορευτικά στοιχεία.

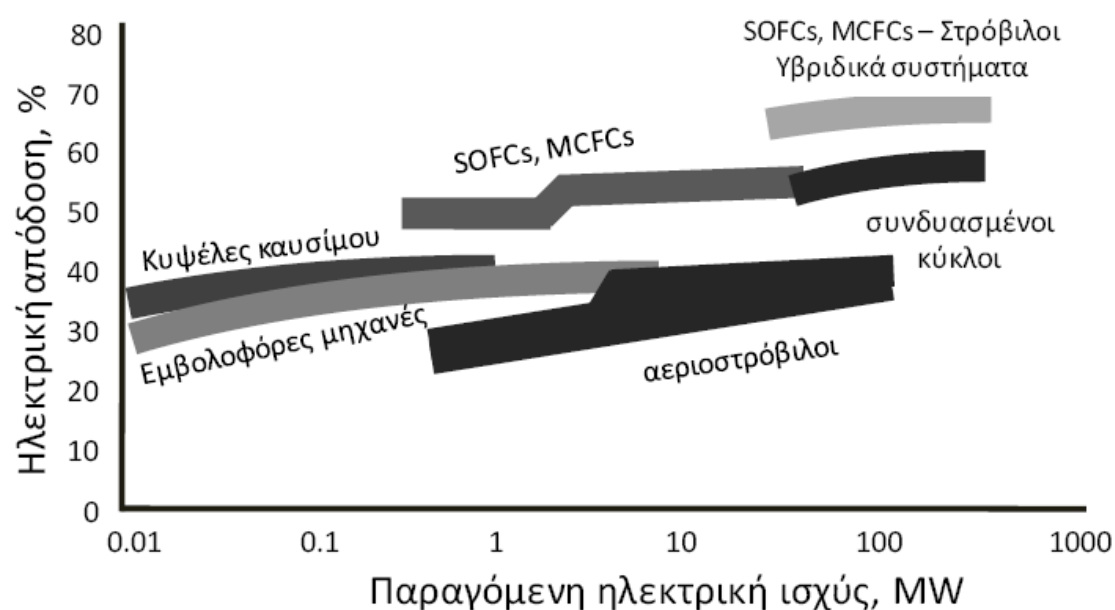
Η πετρελαϊκή κρίση του 1973 προκάλεσε την ανανέωση του ενδιαφέροντος και την αναζωογόνηση των δραστηριοτήτων για την ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου. Παράλληλα με τη Μεγάλη Βρετανία και τις Η.Π.Α., εμφανίζεται δραστηριότητα στην πρώην Ε.Σ.Σ.Δ., τη Γερμανία, την Ιαπωνία και την Ολλανδία. Αναπτύσσονται διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, η διάρκεια ζωής ξεπερνά τις 10000 h, και κατασκευάζονται πιλοτικές μονάδες ισχύος από μερικά kW μέχρι 20 MW.

Σήμερα, τυποποιημένες μονάδες φωσφορικού οξέως, ισχύος 200 – 250 kW είναι εμπορικά διαθέσιμες για στατικές εφαρμογές και λειτουργούν συνήθως με φυσικό αέριο. Αξιόλογη προσπάθεια καταβάλλεται για την ανάπτυξη κυψελών καυσίμου (κυρίως πολυμερικής μεμβράνης) για την κίνηση αυτοκινήτων, και βιομηχανικών κυψελών μέσης και μεγάλης κλίμακας (κυρίως στερεού οξειδίου και τηγμένων ανθρακικών αλάτων) [16].

2.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα – Εφαρμογές

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών ενεργειακών συστημάτων τα οποία, αυτά είναι [16], [18]:

- Υψηλός βαθμός απόδοσης



Σχήμα 2.10 Σύγκριση απόδοσης (% LHV) διάφορων ενεργειακών συστημάτων [19].

Η χημική ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο βαθμός απόδοσης είναι σχεδόν ανεξάρτητος του μεγέθους (ισχύος) του συστήματος, ώστε μικρές μονάδες να έχουν εξίσου καλό βαθμό απόδοσης σε σχέση με μεγαλύτερες. Οι σημερινές κυψέλες καυσίμου επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης των 40 – 55 % ως προς την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (LHV) ανεξάρτητα από το μέγεθός τους, ενώ οι υβριδικοί κύκλοι αεριοστροβίλων – κυψελών καυσίμου είναι δυνατό να υπερβούν το 70 % με βάση την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (LHV) (Σχ. 2.10).

- **Χαμηλές εκπομπές ρύπων**

Με το υδρογόνο ως καύσιμο, ως προϊόν έχουμε μόνον υδρατμούς. Βέβαια αν το υδρογόνο παράγεται με αναμόρφωση υδρογονανθράκων, τότε οι εκπομπές CO₂ είναι αναπόφευκτες αλλά αισθητά χαμηλότερες λόγω υψηλότερου βαθμού απόδοσης. Οι εκπομπές NO_x είναι αμελητέες, καθώς οι χαμηλές θερμοκρασίες δεν ευνοούν τον σχηματισμό τους.

- **Χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών**

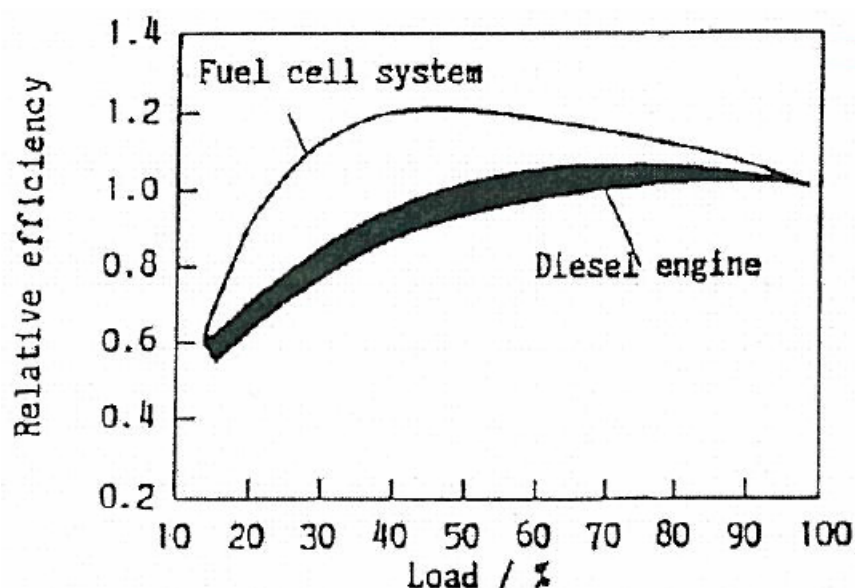
Λόγω της έλλειψης κινούμενων μερών, εκτός από αυτά των βοηθητικών συστημάτων που είναι απαραίτητα σε κάθε ενεργειακό σύστημα (π.χ. αντλίες, ανεμιστήρες, μετασχηματιστές).

- **Υψηλή αξιοπιστία και χαμηλές ανάγκες συντήρησης**

Οι κυψέλες καυσίμου, όπως έχει αναφερθεί, δεν έχουν κινούμενα μέρη γεγονός που αυξάνει την αξιοπιστία και μειώνει τις ανάγκες συντήρησης του συστήματος.

- **Υψηλή απόδοση υπό μερικό φορτίο**

Ο βαθμός απόδοσης αυξάνεται υπό μερικό φορτίο, χαρακτηριστικό πολύ σημαντικό ειδικά για εφαρμογές σε μέσα μεταφοράς (Σχ. 2.11).



Σχήμα 2.11 Τυπική μεταβολή του βαθμού απόδοσης κυψελών καυσίμου και κινητήρων Diesel συναρτήσει του φορτίου [16].

- **Δυνατότητα χρήσης διαφορετικών καυσίμων ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης καυσίμου**
- **Ευχέρεια στον σχεδιασμό του συστήματος**

Ένα σύστημα κυψελών καυσίμου αποτελείται από διαφορετικές μονάδες. Το χαρακτηριστικό αυτό παρέχει ευελιξία στο σχεδιαστή όσον αφορά τις απαιτήσεις ισχύος αλλά και τον χώρο τοποθέτησης του συστήματος.

Πέρα από τα πλεονεκτήματα υπάρχουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα που εμποδίζουν την ευρεία ανάπτυξη και εμπορική εφαρμογή των συστημάτων κυψελών καυσίμου. Αυτά είναι [16]:

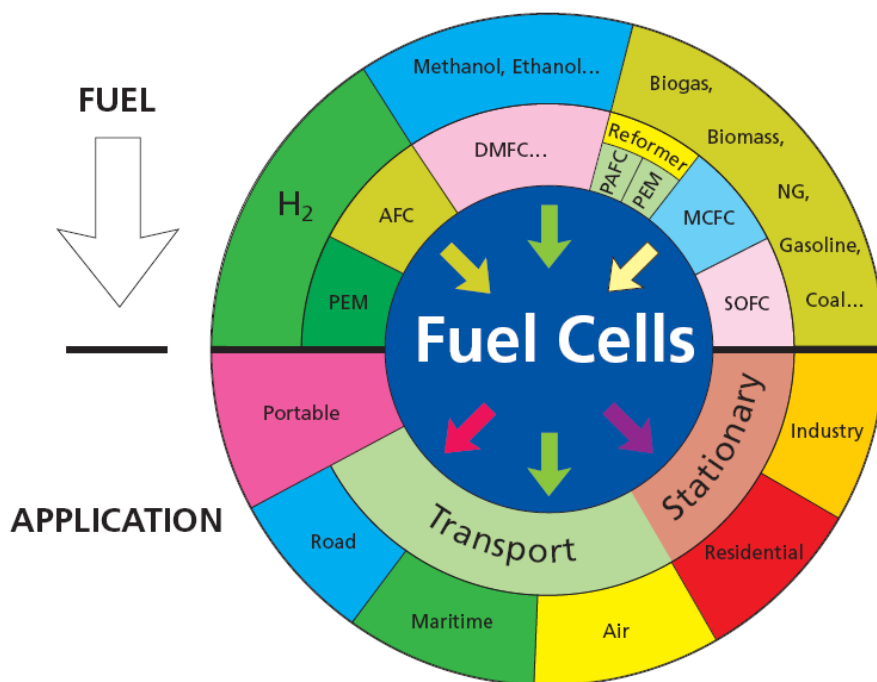
- **Το υψηλό κόστος ανεξάρτητα από τον τύπο κυψέλης καυσίμου**
- **Η σχετικά χαμηλή συγκέντρωση ισχύος**
- **Ο χρόνος ζωής μιας κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τα συμβατικά ενεργειακά συστήματα**
- **Η παραγωγή και διάθεση του καυσίμου – υδρογόνου**

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών τόσο από πλευράς ισχύος (από μερικά Watts μέχρι δεκάδες MW), όσο και είδους. Αναφέρονται μερικά παραδείγματα (βλ. και Σχ. 2.12) [16].

Φορητές ηλεκτρονικές συσκευές (φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, κλπ): Το εύρος ισχύος είναι 1 – 100 W. Κατάλληλες είναι οι κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC) και ιδιαίτερα εκείνες που χρησιμοποιούν μεθανόλη (DMFC). Κύρια πλεονεκτήματα ως προς τους συσσωρευτές, τους οποίους αντικαθιστούν, είναι η υψηλότερη απόδοση, η υψηλότερη αποδοδόμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου και η ταχύτερη επαναφόρτιση.

Αυτοκίνητα, σκάφη και μονάδες συμπαραγωγής σε κατοικίες: Το εύρος ισχύος είναι 1 – 100 kW. Κατάλληλες κυψέλες καυσίμου είναι οι αλκαλικές (AFC), οι πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC), οι φωσφορικού οξέως (PAFC) και οι στερεού οξειδίου (SOFC). Κύρια πλεονεκτήματα ως προς τις μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι η υψηλή απόδοση, η χαμηλή στάθμη θορύβου και η δυνατότητα μηδενικών εκπομπών ρύπων στον τόπο λειτουργίας.

Λεωφορεία, πλοία, τοπικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, μονάδες συμπαραγωγής του τριτογενούς και του βιομηχανικού τομέα: Το εύρος ισχύος είναι 100 kW – 10 MW. Κατάλληλες κυψέλες καυσίμου είναι οι πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC), οι φωσφορικού οξέως (PAFC), οι τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC) και οι στερεού οξειδίου (SOFC). Κύρια πλεονεκτήματα ως προς τα συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι η υψηλή απόδοση, η χαμηλή στάθμη θορύβου και οι χαμηλές εκπομπές ρύπων.



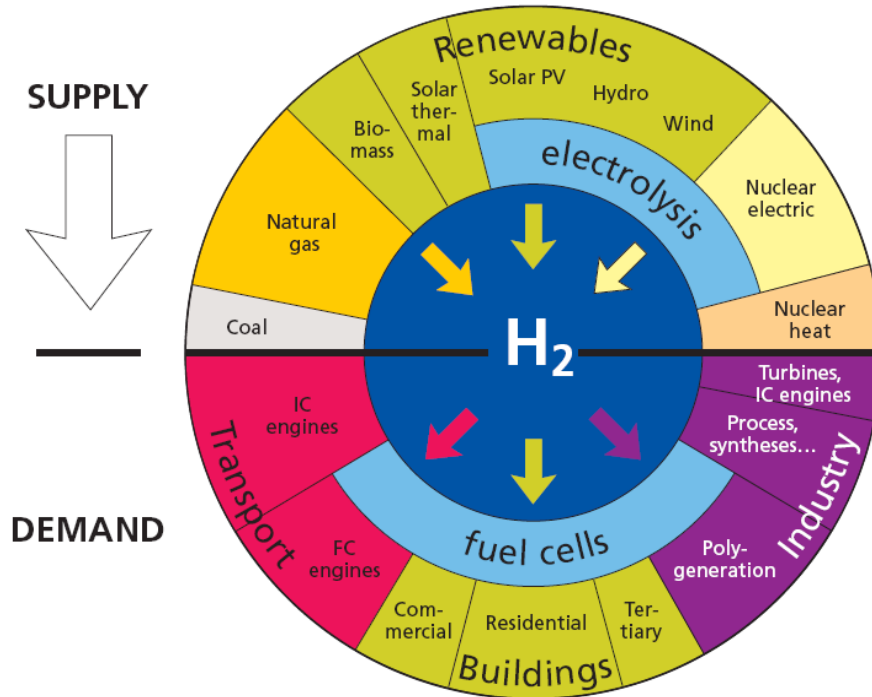
Σχήμα 2.12 Εφαρμογές και Καύσιμα κυψελών καυσίμου [20].

2.7 Καύσιμα κυψελών καυσίμου

Το κατ' εξοχήν καύσιμο για τις κυψέλες καυσίμου είναι το υδρογόνο, χάρη στην ευκολία με την οποία συμμετέχει στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις και στην καθαρότητα του: το μόνο προϊόν των αντιδράσεων είναι το νερό. Όμως, το υδρογόνο δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση και, επομένως, πρέπει να παραχθεί. Επίσης, υπάρχει ανάγκη αποθήκευσης και μεταφοράς, όταν η παραγωγή και η κατανάλωση δεν συμπίπτουν χρονικά ή τοπικά. Επιπλέον του υδρογόνου, η μεθανόλη (CH_3OH) μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε ειδικές κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (DMFC), ενώ και άλλοι υδρογονάνθρακες μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά προς το παρόν μόνον με αναμόρφωση. Οι βασικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου είναι [16]:

- Παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση
- Παραγωγή υδρογόνου με αναμόρφωση υδρογονανθράκων
- Βιολογική παραγωγή υδρογόνου

Παραλλαγές των παραπάνω μεθόδων χρησιμοποιούνται επίσης στην παραγωγή υδρογόνου με τη βασική αρχή όμως να παραμένει η ίδια [19]. Αξίζει να σημειωθεί ότι βιοαέρια ή βιοϋγρά, δηλ. αέρια ή υγρά καύσιμα που παράγονται με διάφορες διεργασίες από βιομάζα, είναι κατάλληλα για κυψέλες καυσίμου είτε απευθείας (κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων και στερεού οξειδίου), είτε μετά από αναμόρφωση. Ένα παράδειγμα βιοϋγρού είναι η μεθανόλη. Στο Σχ. 2.13 συγκεντρώνονται μέθοδοι παραγωγής, ενεργειακοί μετατροπείς και εφαρμογές του υδρογόνου.



Σχήμα 2.13 Υδρογόνο: Παραγωγή, ενεργειακοί μετατροπείς, εφαρμογές [20].

2.8 Αποθήκευση υδρογόνου

Σε αρκετές εφαρμογές κυψελών καυσίμου, (π.χ. σε οχήματα, φορητές συσκευές, μονάδες μικρής ισχύος, κλπ), δεν είναι δυνατή ή συμφέρουσα η επί τόπου παραγωγή και άμεση χρήση του υδρογόνου. Προκύπτει, λοιπόν, ανάγκη αποθήκευσης ή και μεταφοράς του υδρογόνου. Η παραγωγή και αποθήκευση του υδρογόνου μπορεί, επίσης, να είναι ένας καλός τρόπος αποθήκευσης ενέργειας όταν π.χ. υπάρχει περίσσεια ηλεκτρισμού από ανεμογεννήτριες, υδροηλεκτρικούς σταθμούς ή άλλες ανανεώσιμες πηγές, η παραγωγή των οποίων δεν συμπίπτει χρονικά με την κατανάλωση [16].

Είναι αναμενόμενο ότι η οικονομία του υδρογόνου απαιτεί δύο τύπους συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου, έναν για στατικές εφαρμογές και έναν για κινητές εφαρμογές (οχήματα). Κάθε σύστημα έχει τις δικούς του περιορισμούς και απαιτήσεις. Ωστόσο, είναι αποδεδειγμένο ότι οι κινητές εφαρμογές είναι πολύ πιο απαιτητικές αντιμετωπίζοντας τις παρακάτω ανάγκες [19]:

- Υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο υδρογόνου ανά μονάδα όγκου, εξαιτίας περιορισμών χώρου και βάρους, ειδικά στα μέσα μεταφοράς.
- Χαμηλές πιέσεις λειτουργίας για λόγους ασφαλείας.
- Θερμοκρασία λειτουργίας από -50°C ως 150°C .
- Υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και από-φόρτισης του υδρογόνου για εφοδιασμό κινητών μέσων σε σύντομους χρόνους.
- Σχετικά χαμηλό κόστος του συστήματος αποθήκευσης.

Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις επιβάλλουν την αντιμετώπιση αρκετών επιστημονικών και τεχνολογικών προκλήσεων για την ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων αποθήκευσης σε κινητές εφαρμογές. Δυστυχώς, μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου που να ανταποκρίνονται σε όλα τα παραπάνω κριτήρια. Οι στατικές εφαρμογές, από την άλλη, δεν έχουν περιορισμούς βάρους και χώρου, μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και έχουν την επιπλέον ικανότητα να αντισταθμίζουν τους χαμηλούς ρυθμούς αντίδρασης [19].

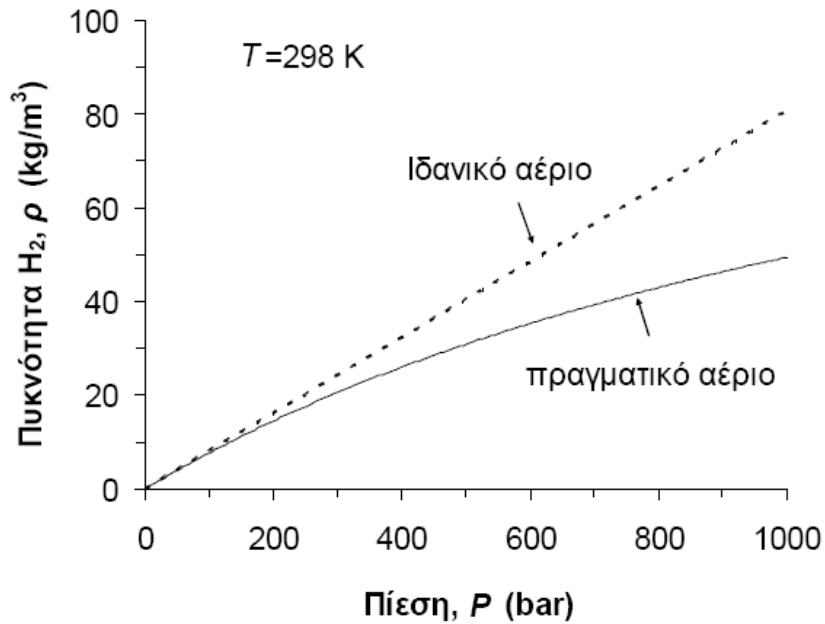
Η αποθήκευση του υδρογόνου είναι ένα αρκετά δύσκολο πρόβλημα για τους ακόλουθους λόγους. Αν και το υδρογόνο έχει μια από τις μεγαλύτερες τιμές της θερμογόνου ικανότητας ανά μονάδα μάζας, η πυκνότητα του είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα η θερμογόνος ικανότητα ανά μονάδα όγκου να είναι πολύ μικρή (βλ. Πίνακα 2.3). Επομένως, για να αποθηκευθεί μεγάλη μάζα υδρογόνου σε μικρό όγκο, πρέπει να χρησιμοποιηθούν υψηλές πιέσεις (βλ. Σχ. 2.14). Επιπλέον, η υγροποίηση του είναι δύσκολη διότι δεν αρκεί να συμπιεσθεί, αλλά πρέπει και να ψυχθεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (περίπου 22 K). Ακόμη και σε υγρή μορφή, η πυκνότητα του είναι αρκετά χαμηλή (περίπου 71 kg/m³) [16]. Οι σύγχρονες εμπορικά εφαρμόσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης H₂ έχουν επικεντρωθεί σε δοχεία υψηλής πίεσης (250 –700 bar) ή σε υγρό υδρογόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (20 – 30 K). Αποθήκευση του υδρογόνου σε εξαντλημένους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων αποτελεί μια πιθανή εναλλακτική λύση, αποδοτική σε κόστος, αλλά μόνο για στατικές εφαρμογές. Η χρήση προηγμένων υλικών για την αποθήκευση του υδρογόνου που περιλαμβάνουν προσροφητές, μεταλλικά και χημικά υδρίδια κλπ, μπορεί να αποτελέσει μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση, ωστόσο, η ανάγκη για μεγάλες ποσότητες των υλικών αυτών σε συνδυασμό με το κόστος καθώς και ζητήματα αντιστρεπτότητας και κυκλικής σταθερότητας περιορίζουν προς το παρόν την παραπάνω μέθοδο σε εφαρμογές μικρής κλίμακας [19].

Πίνακας 2.3 Ενεργειακές πυκνότητες διαφόρων καυσίμων [19].

Καύσιμο	Ενεργειακή πυκνότητα κατά βάρος (kWh/kg)	Ενεργειακή πυκνότητα κατ' όγκο (kWh/lit)
Βενζίνη	12,7	8,7
Diesel	12,6	10,6
Λιγνίτης	8,2	7,6
Φυσικό αέριο	13,9	2,6
Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)	13,9	5,6
Υδρογόνο-αέριο (200 bar)	33,3	0,53
Υδρογόνο-υγρό	33,3	2,37
Μεθανόλη	5,6	4,4

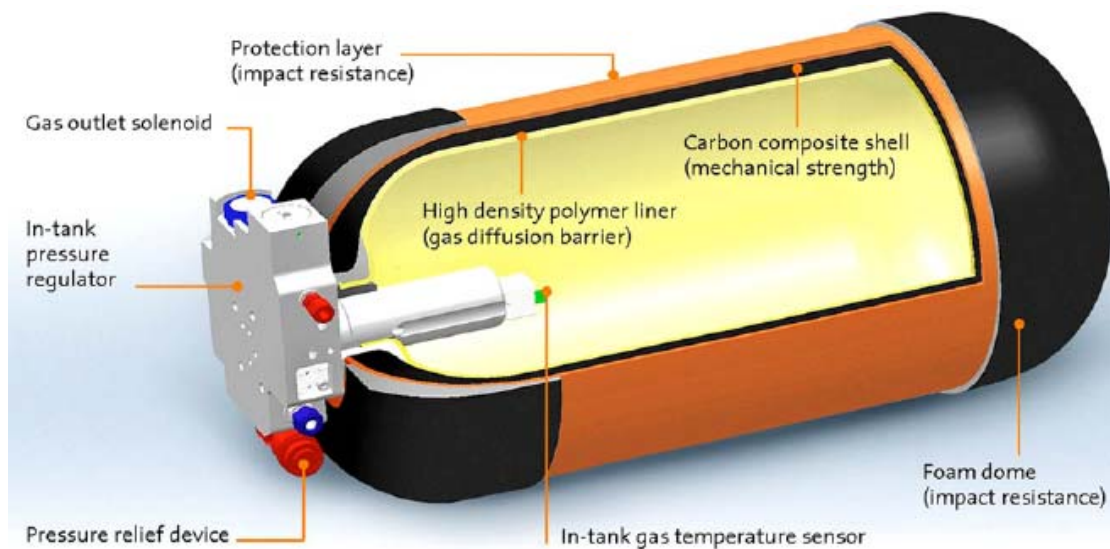
2.8.1 Αποθήκευση υδρογόνου ως πεπιεσμένο αέριο

Η αποθήκευση πεπιεσμένου αερίου υδρογόνου σε κυλινδρικές φιάλες είναι ο πιο απλός και διαδεδομένος τρόπος αποθήκευσης σε μικρές ποσότητες. Οι εταιρείες παραγωγής υδρογόνου διαθέτουν τέτοιες φιάλες σε ποικίλα μεγέθη. Στις περισσότερες εφαρμογές, οι φιάλες κατασκευάζονται από χάλυβα (για πίεση μέχρι 200 bar) ή από αλουμίνιο, ενισχυμένο με fiberglass (για πίεση μέχρι 300 bar) [16].



Σχήμα 2.14 Η πυκνότητα του αερίου H_2 ως συνάρτηση της πίεσης σε θερμοκρασία δωματίου [19].

Από το Σχ. 2.14 διαπιστώνεται ότι σε θερμοκρασία δωματίου, η πυκνότητα του συμπιεσμένου υδρογόνου στα 350 bar είναι περίπου 23 g/l, και στα 700 bar είναι περίπου 40 g/l. Βιομηχανικά πρότυπα για αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου είναι στα 350 bar, με έναν απώτερο στόχο τα 700 bar. Δοχεία πίεσης έως 700 bar μπορούν να πετύχουν πυκνότητα αποθήκευσης περίπου 6 % κατά βάρος και 30 g/l. Ωστόσο απαιτούν τη χρήση ακριβών σύνθετων υλικών ώστε να επιτευχθούν οι διαφορετικοί στόχοι. Ο συνδυασμός ποικιλίας διαφορετικών υλικών αυξάνει σημαντικά το κόστος του δοχείου αποθήκευσης. Σχηματική απεικόνιση ενός πρότυπου δοχείου αποθήκευσης αερίου υδρογόνου υψηλής πίεσης φαίνεται στο Σχ. 2.15 [19].



Σχήμα 2.15 Πρότυπο δοχείο αποθήκευσης αερίου υδρογόνου υψηλής πίεσης [23].

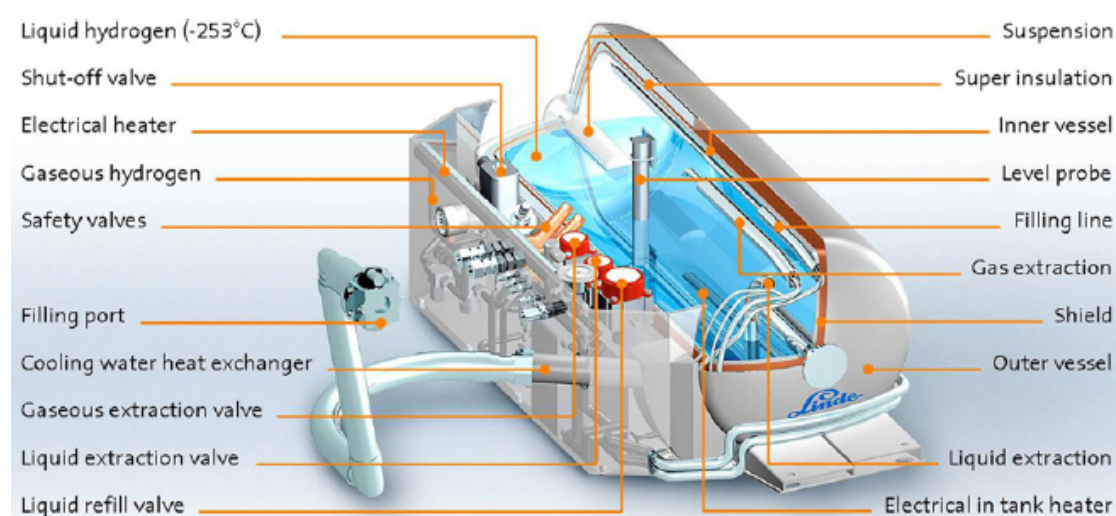
Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της αποθήκευσης συμπιεσμένου υδρογόνου (CGH₂) είναι ότι αποτελεί μία σχετικά απλή και ταχεία διαδικασία, αφού ο εφοδιασμός της δεξαμενής ενός συμβατικού οχήματος μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα σε 3 λεπτά. Εξαιτίας αυτών των πλεονεκτημάτων, η μέθοδος CGH₂ έχει υιοθετηθεί σε πολλά πρωτότυπα οχήματα με κυψέλες καυσίμου [24]. Τα κύρια μειονεκτήματα σχετίζονται με τις σχετικά χαμηλές ογκομετρικές και σταθμικές πυκνότητες, συγκρινόμενες με διαφορετικές μεθόδους αποθήκευσης. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα για τη διαδεδομένη χρήση της μεθόδου είναι η φοβία του κοινού για τα θέματα ασφαλείας που σχετίζεται με τις εξαιρετικά υψηλές πιέσεις των δοχείων υδρογόνου κατά τη λειτουργία ενός κοινού επιβατικού αυτοκινήτου. Εντούτοις, πρόσφατα αποτελέσματα δοκιμών έχουν δείξει ότι σύνθετα δοχεία που λειτουργούν σε πιέσεις των 700 bar είναι πιθανό να είναι στην πραγματικότητα πιο ασφαλή από ότι τα δοχεία χαμηλής πίεσης που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία [19].

2.8.2 Αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή φάση

Για εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται μεγάλες ποσότητες υδρογόνου, προτιμάται η αποθήκευση σε υγρή μορφή σε θερμοκρασία περίπου 22 K και πίεση χαμηλότερη των 3 bar. Οι δεξαμενές έχουν διπλά τοιχώματα με κενό ανάμεσα τους, ώστε να περιορίζεται η μεταφορά θερμότητας. Στο Σχ. 2.16 φαίνεται μία κρυογενική δεξαμενή αποθήκευσης υγρού υδρογόνου (LH₂).

Όταν ένα υγρό προέρχεται από αέριο που ψύχεται σε τόσο χαμηλές θερμοκρασίες, λέγεται κρυογενικό υγρό. Όμως, αυτός ο τρόπος αποθήκευσης έχει δύο σοβαρά μειονεκτήματα [16]:

- Η αναπόφευκτη εισροή θερμότητας προκαλεί εξάτμιση του υδρογόνου και για να διατηρείται η πίεση σε αποδεκτά επίπεδα, πρέπει να διαφεύγει διαρκώς ορισμένη ποσότητα υδρογόνου, είτε αυτό χρησιμοποιείται είτε όχι.
- Η ψύξη και υγροποίηση απαιτεί ενέργεια που μπορεί να αποτελεί το 25 – 40 % της θερμότητας ικανότητας του υδρογόνου.



Σχήμα 2.16 Δεξαμενή αποθήκευσης υγρού υδρογόνου [23].

2.8.3 Αντιστρεπτή αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια

Ορισμένα μέταλλα, ιδιαίτερα ορισμένα κράματα του σιδήρου, τιτανίου, μαγγανίου, νικελίου, χρωμίου και άλλων μετάλλων, αντιδρούν με το υδρογόνο και σχηματίζουν μεταλλικά υδρίδια με μια αντίδραση, η οποία μπορεί εύκολα να ελεγχθεί. Η γενική εξίσωση είναι [16]:



Ένα παράδειγμα είναι το υδρίδιο τιτανίου και σιδήρου: TiFeH₂. Από πλευράς βάρους, η αποθήκευση σε TiFeH₂ μειονεκτεί. Όμως από πλευράς όγκου, είναι ένα από τα καλύτερα υλικά, καθώς αποθηκεύει περισσότερη μάζα υδρογόνου ανά μονάδα όγκου ακόμη και από το υγρό υδρογόνο. Η αντίδραση (2.4) είναι ελαφρά εξώθερμη προς τα δεξιά και ενδόθερμη προς τα αριστερά. Επομένως για την απελευθέρωση του υδρογόνου απαιτείται η πρόσδοση μικρού ποσού θερμότητας, κάτι που δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς η θερμότητα αυτή μπορεί να προέλθει από την κυψέλη καυσίμου.

Στο δοχείο, στο οποίο βρίσκεται το μεταλλικό υδρίδιο, η πίεση είναι χαμηλή (2 – 3 bar), γι' αυτό και αυτός ο τρόπος αποθήκευσης είναι από τους πιο ασφαλείς. Η αποθήκευση σε μεταλλικά υδρίδια προτιμάται σε εφαρμογές στις οποίες μεγαλύτερη σημασία έχει ο όγκος παρά το βάρος, όπως π.χ. σε πλοία και υποβρύχια, στα οποία προστίθεται βάρος ως έρμα. Αυτός ο τρόπος εφαρμόζεται στα νέα υποβρύχια που ναυπηγούνται για το Ελληνικό Πολεμικό Ναυτικό [16].

2.8.4 Σύγκριση τρόπων αποθήκευσης υδρογόνου

Κάθε μέθοδος αποθήκευσης έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, με αποτέλεσμα καμία να μην είναι απόλυτα ικανοποιητική. Για τον λόγο αυτόν, η άμεση χρήση του υδρογόνου πρέπει να προτιμάται όποτε αυτό είναι δυνατό. Όταν η αποθήκευση είναι αναπόφευκτη, η επιλογή του τρόπου αποτελεί αντικείμενο προσεκτικής μελέτης για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Δύο από τα σημαντικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των μέσων αποθήκευσης, είναι το βάρος και ο όγκος ανά μονάδα μάζας αποθηκευμένου υδρογόνου. Στους Πίνακες 2.4 και 2.5, δίνονται ορισμένα συγκριτικά στοιχεία για διάφορους τρόπους αποθήκευσης [16].

Πίνακας 2.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά αποθήκευσης υδρογόνου σε κυλίνδρους (δεν περιλαμβάνεται το βάρος των εξαρτημάτων όπως βαλβίδων, ρυθμιστών πίεσης, κλπ.) [16].

	Χαλύβδινος κύλινδρος 2 It, 200 bar	Συνθετικός κύλινδρος 147 It, 300 bar	Κρυσταλλικό δοχείο για αυτοκίνητα
Φάση υδρογόνου	Αέρια	Αέρια	Υγρή
Μάζα άδειου δοχείου	3,0 kg	100 kg	51,5 kg
Μάζα υδρογόνου	0,036 kg	3,1 kg	8,5 kg
Απόδοση αποθήκευσης (μάζα H ₂ /μάζα δοχείου)	1,2 %	3,1 %	14,2 %
Ειδική ενέργεια	0,47 kWh/kg	1,2 kWh/kg	5,57 kWh/kg
Όγκος δοχείου	2,2 It	220 It	200 It
Μάζα H ₂ /μονάδα όγκου	0,016 kg/It	0,014 kg/It	0,0425 kg/It

Πίνακας 2.5 Συγκριτικά δεδομένα αποθήκευσης υδρογόνου (περιλαμβάνεται και το βάρος των εξαρτημάτων όπως βαλβίδων, ρυθμιστών πίεσης, κλπ.) [16].

Μέθοδος	Απόδοση αποθήκευσης: μάζα H ₂ /μάζα δοχείου (%)	Πυκνότητα αποθήκευσης: μάζα H ₂ /όγκος δοχείου (kg H ₂ /lt)
Κύλινδροι υψηλής πίεσης	0,7 – 3,0	0,015
Κρυογενικό υγρό	14,2	0,040
Μεταλλικό υδρίδιο	0,65	0,028
Μεθανόλη	6,9	0,055

2.8.5 Άλλοι τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου

Σε ερευνητικό στάδιο βρίσκεται η αποθήκευση υδρογόνου σε νανοσωληνικές άνθρακα. Φορείς υδρογόνου μπορούν να αποτελέσουν επίσης ορισμένες χημικές ενώσεις όπως π.χ. η μεθανόλη (CH₃OH), τα αλκαλικά μεταλλικά υδρίδια (CaH₂, NaH), η αμμωνία (NH₃), κ.ά.. Οι ενώσεις αυτές παρασκευάζονται τεχνητά, γι' αυτό και ονομάζονται συνθετικά καύσιμα [16].

2.9 Μεταφορά και διανομή υδρογόνου

Το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες ποσότητες μέσω υπόγειων αγωγών (αέριο υδρογόνο) ή με δεξαμενόπλοια (υγρό υδρογόνο). Επί του παρόντος, η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών χρησιμοποιείται είτε σε σύνδεση μεταξύ της παραγωγής και των γύρω χώρων χρήσης (μέχρι 10 km) ή σε πιο εκτεταμένα δίκτυα (περίπου 200 km). Για την κατασκευή των αγωγών υδρογόνου, είναι αναγκαία η χρήση του χάλυβα που είναι ανθεκτικός ως προς την ευθραυστότητα κατά την χρήση υδρογόνου υπό πίεση, ιδίως για το πολύ καθαρό υδρογόνο (περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 99,5 %). Εμβολοφόροι συμπιεστές αερίου που χρησιμοποιούνται για το φυσικό αέριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το υδρογόνο χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις του σχεδιασμού. Ωστόσο, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην σφράγιση (για την αποφυγή διαρροών του υδρογόνου) και την επιλογή των βασικών υλικών για τα μέρη που υπόκεινται σε μηχανική κόπωση. Η χρήση των φυγοκεντρικών συμπιεστών για το υδρογόνο δημιουργεί περισσότερα προβλήματα που οφείλονται στην εξαιρετική ελαφρότητα του υδρογόνου [19].

Προς αντιμετώπιση της ζήτησης της κατανάλωσης, το υδρογόνο μπορεί να μεταφέρεται και να διανέμεται σε περιφερειακό επίπεδο, είτε ως αέριο είτε ως υγρό, με αγωγούς ή σε ειδικές περιπτώσεις, σε δοχεία με οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές. Αέριο (και υγρό) υδρογόνο κατά την μεταφορά υπόκειται σε αυστηρές ρυθμίσεις που να διασφαλίζουν τη δημόσια ασφάλεια, η οποίες σε ορισμένες χώρες είναι πολύ περιοριστικές [19].

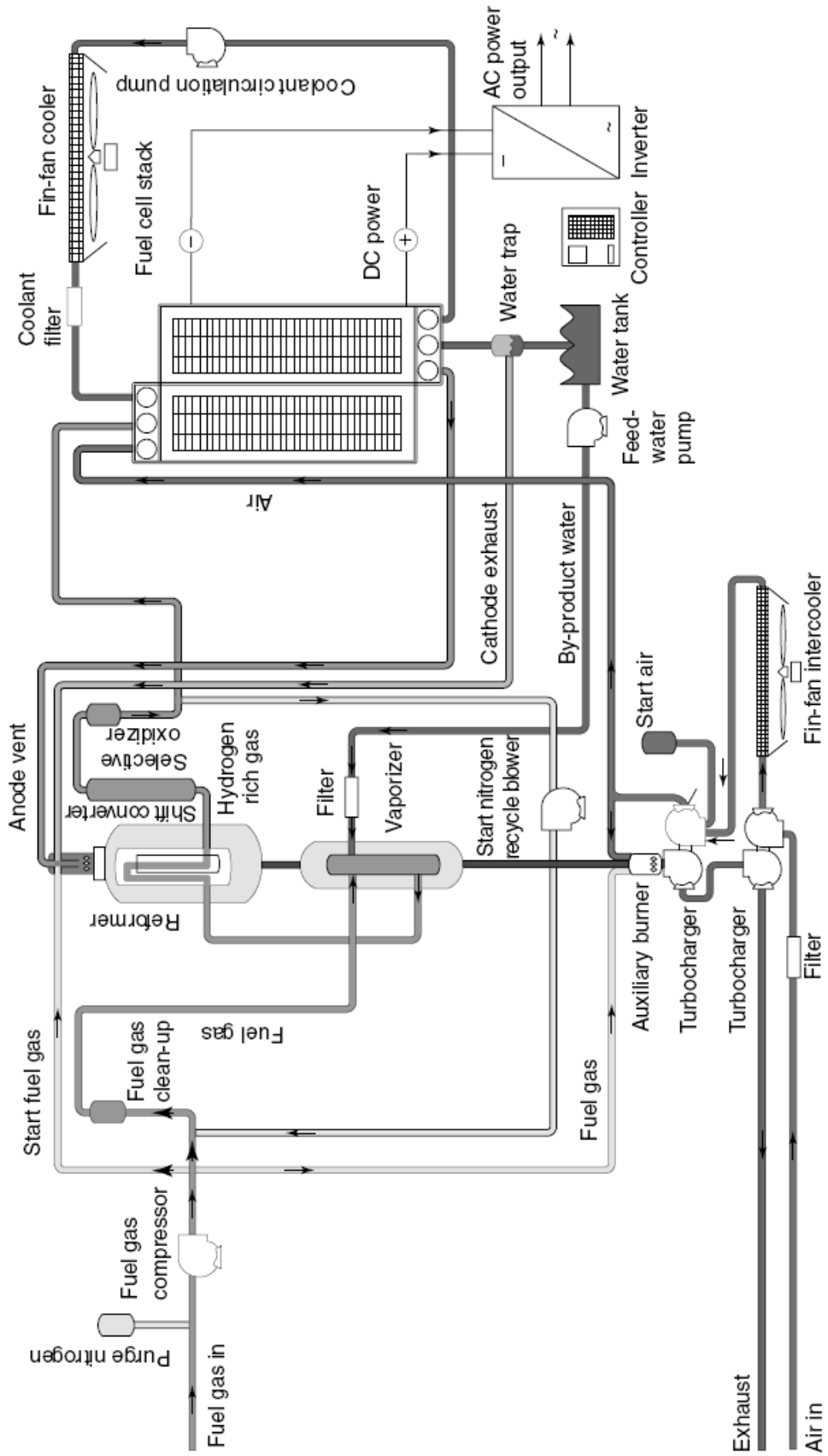
Όπως κάθε άλλο καύσιμο ή φορέας ενέργειας, το υδρογόνο ενέχει κινδύνους, αν δεν χρησιμοποιείται σωστά ή ελέγχεται. Τα ειδικά φυσικά χαρακτηριστικά του υδρογόνου και οι ιδιότητες που του προσδίδουν είναι αρκετά διαφορετικές από τα κοινά καύσιμα. Ορισμένες από αυτές τις ιδιότητες καθιστούν το υδρογόνο δυνητικά λιγότερο επικίνδυνο, ενώ άλλα χαρακτηριστικά του υδρογόνου θα μπορούσαν να το καταστήσουν πιο επικίνδυνο σε ορισμένες περιπτώσεις [19]. Τόσο κατά την αποθήκευση όσο και κατά την μεταφορά και χρήση, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή διότι το υδρογόνο είναι εύφλεκτο, διαρρέει εύκολα από βαλβίδες και μικρούς πόρους, και σε ορισμένη αναλογία με το οξυγόνο σχηματίζει εκρηκτικό μίγμα [16].

2.10 Συστήματα με κυψέλες καυσίμου

Στα προηγούμενα κεφάλαια, δόθηκε έμφαση στην ίδια την κυψέλη καυσίμου, ως μια ηλεκτροχημική συσκευή. Όμως, η κυψέλη καυσίμου υποστηρίζεται κατά τη λειτουργία της από βοηθητικά μηχανήματα και συσκευές, το είδος και η δομή των οποίων εξαρτώνται από το είδος της κυψέλης καυσίμου, το είδος του καυσίμου, την ανάγκη αναμόρφωσης (εάν υπάρχει), την πίεση λειτουργίας, κλπ.

Ο σχεδιασμός του όλου συστήματος χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε όχι μόνον η συμπεριφορά του να είναι ικανοποιητική τόσο σε σταθερή όσο και σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, αλλά και η ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία των βοηθητικών μηχανημάτων και συσκευών να είναι η ελάχιστη δυνατή. Η ισχύς αυτή αφαιρείται από την ισχύ της κυψέλης καυσίμου (συνήθως αποτελεί το 10 – 15 % αυτής) και πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν κατά τον υπολογισμό του καθαρού βαθμού απόδοσης του συστήματος. Ένα παράδειγμα πλήρους συστήματος με πολυμερική κυψέλη καυσίμου δείχνει το Σχ. 2.17 στο οποίο απεικονίζονται τα ακόλουθα [16]:

- Φιάλη αζώτου, για την απόπλυση του δικτύου πριν από την έναρξη λειτουργίας (Purge nitrogen).
- Ανεμιστήρας για την κυκλοφορία του αζώτου (Start nitrogen recycle blower).
- Συμπιεστής αερίου καυσίμου (Fuel gas compressor). Το σύστημα λειτουργεί με φυσικό αέριο.
- Συσκευή καθαρισμού του αερίου καυσίμου (Fuel gas clean-up).
- Αναμορφωτής καυσίμου (Reformer).
- Συσκευή μετατροπής του CO σε CO₂ (Shift converter).
- Συσκευή επιλεκτικής οξειδωσης (Selective oxidizer). Με τη βοήθεια καταλύτη, μετατρέπει σε CO₂ το CO, το οποίο ενδεχομένως έφυγε από την προηγούμενη συσκευή.
- Εξατμιστής (Vaporizer). Παράγει τον ατμό που χρειάζεται για τη μετατροπή του CO σε CO₂.
- Συστοιχία κυψελών καυσίμου (Fuel cell stack).
- Αντλία κυκλοφορίας του ψυκτικού υγρού (Coolant circulating pump).
- Ψυγείο του ψυκτικού υγρού (Fin-fan cooler). Αποτελείται από πτερυγοφόρο εναλλάκτη θερμότητας και ανεμιστήρα.
- Διάφορα φίλτρα (Filter).
- Φιάλη αέρα εκκίνησης (Start air).
- Δύο στροβιλοπληρωτές (Turbocharger). Ανεβάζουν την πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα στην πίεση λειτουργίας της κυψέλης.
- Βοηθητικός καυστήρας (Auxiliary burner). Προσφέρει τη θερμότητα που χρειάζεται ο εξατμιστής και το καυσαέριο για τη λειτουργία των στροβιλοπληρωτών.
- Ενδιάμεσο ψυγείο του αέρα (Fin-fan intercooler). Αποτελείται από πτερυγοφόρο εναλλάκτη θερμότητας και ανεμιστήρα.
- Παγίδα νερού (Water trap).
- Αντλία τροφοδοτικού νερού (Feed water pump).
- Δεξαμενή νερού (water tank).
- Διάταξη αυτοματισμού (Controller).
- Αντιστροφείας (Inverter). Μετατρέπει το συνεχές σε εναλλασσόμενο ρεύμα.



Σχήμα 2.17 Διάγραμμα ροής συστήματος με κυψέλη καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC) της εταιρείας Ballard, ισχύος 250 kW [19].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ναυτικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου

3.1 Γενικά περί ναυτικών συστημάτων κυψελών καυσίμου

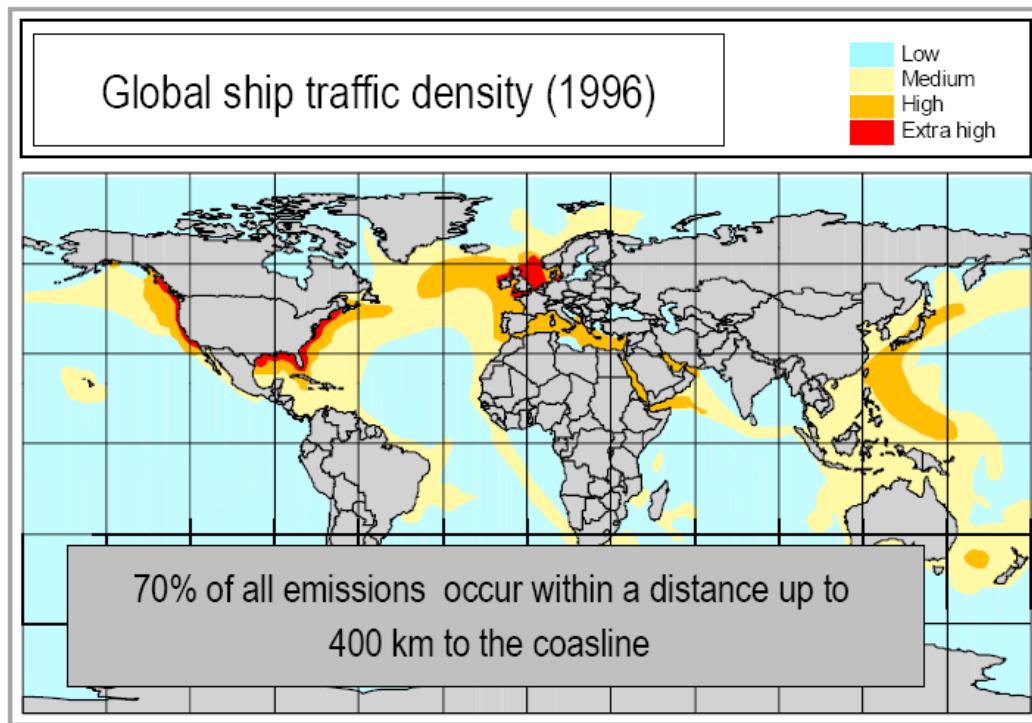
Όπως έχει αναφερθεί, η τεχνολογία των συστημάτων κυψελών καυσίμου έχει βρει εφαρμογή στην διαστημική βιομηχανία από τα μέσα περίπου του προηγούμενου αιώνα. Οι τάξεις ισχύος των εφαρμογών ποικίλουν, από τα μερικά ή δεκάδες kW για εφαρμογές σε μικρά μέσα μεταφοράς μέχρι και την τάξη των MW για ηπειρωτικές εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην εποχή μας το ενδιαφέρον και η έρευνα εστιάζονται στην ανάπτυξη εφαρμογών που θα συμφέρουν οικονομικά ώστε να εισέλθουν δυναμικά στην αγορά ενέργειας [24].

Σχετικά με τις ναυτικές εφαρμογές, έχει προταθεί η χρήση κυψελών καυσίμου για εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης αλλά και ως βοηθητική πηγή ενέργειας σε κρουαζιερόπλοια, φορηγίδες, οχηματαγωγά, ερευνητικά σκάφη, ποντοπόρα ρυμουλκά, σκάφη αναψυχής, ιστιοπλοϊκά σκάφη, υποβρύχια κ.α.. Να σημειωθεί ότι η πρώτη ουσιαστική εμπορική ναυτική εφαρμογή ήταν η χρήση κυψελών καυσίμου σε υποβρύχια. Προτείνετε επίσης η χρήση κυψελών καυσίμου ως πηγή ενέργειας για πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, για υποβρύχιες δραστηριότητες (π.χ. μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα) και για κατεψυγμένα εμπορευματοκιβώτια στα αντίστοιχα πλοία. Από τις εφαρμογές που προτάθηκαν παραπάνω αρκετές έχουν πραγματοποιηθεί ή βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης, άλλες απαιτούν κάποια χρόνια ακόμα ώστε να είναι τεχνολογικά ώριμες και οικονομικά συμφέρουσες και άλλες εφαρμογές (π.χ. υποβρύχια δεξαμενόπλοια με κυψέλες καυσίμου) ίσως απαιτούν αρκετά περισσότερα χρόνια για την ανάπτυξή τους [24].

Τα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου έναντι των συμβατικών ενεργειακών συστημάτων αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (Ενότητα 2.6). Τα πλεονεκτήματα αυτά αποτελούν ταυτόχρονα και επιθυμητά χαρακτηριστικά κάθε σύγχρονου ναυτικού ενεργειακού συστήματος. Όμως, η ευρύτερη διάδοση τους στα πλοία θα εξαρτηθεί από το κατά πόσο θα αντιμετωπισθούν με επιτυχία τα ακόλουθα θέματα [16]:

- Η μείωση του βάρους και του όγκου της συστοιχίας κυψελών καυσίμου.
- Η μείωση του βάρους και του όγκου βοηθητικών μηχανημάτων και συσκευών π.χ. αναμορφωτών καυσίμου, εναλλακτών θερμότητας.
- Η βελτίωση του βαθμού απόδοσης, ώστε να φθάσει στα επίπεδα του βαθμού απόδοσης μεγάλων κινητήρων Diesel (γύρω στο 50 %).
- Η βελτίωση της απόκρισης των αναμορφωτών σε μεταβολές φορτίου.
- Η μείωση του κόστους.
- Η ανάπτυξη υποδομής για την προμήθεια κατάλληλων καυσίμων (υδρογόνου, μεθανόλης, LNG, LPG).

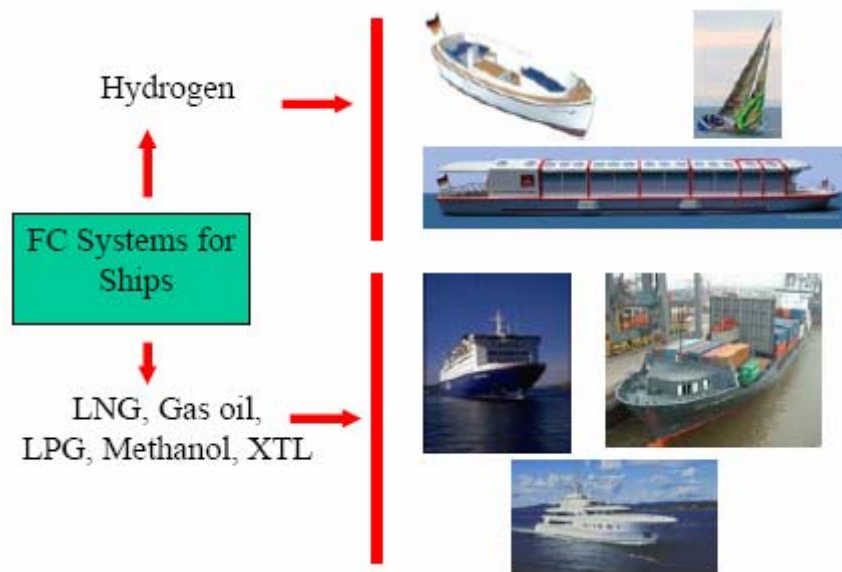
Τις τελευταίες δεκαετίες, η ραγδαία αύξηση των θαλάσσιων μεταφορών έχει άμεσο αντίκτυπο στη ναυτική βιομηχανία. Η σύγχρονη ναυτική βιομηχανία χαρακτηρίζεται από την αυξανόμενη ανάγκη για τη βελτίωση της ασφάλειας και της απόδοσης των συστημάτων που την απαρτίζουν σε συνδυασμό με την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Σχ. 3.1). Για τους παραπάνω λόγους, εμφανίζονται νέες προσεγγίσεις στο σχεδιασμό των ναυτικών συστημάτων. Μια πιθανή προσέγγιση είναι και η χρήση των κυψελών καυσίμου τόσο για κύρια πρόωση αλλά και ως βοηθητική πηγή ενέργειας [24].



Σχήμα 3.1 Πυκνότητα θαλασσιών μεταφορών ανά την κόσμο (δεδομένα 1996) [26].

3.2 Συστήματα κυψελών καυσίμου για ναυτικές εφαρμογές

Έχει ήδη αναφερθεί πως τα συστήματα κυψελών καυσίμου χαρακτηρίζονται από τη χαμηλή στάθμη θορύβου, τις μηδενικές ή σχεδόν μηδενικές εκπομπές NO_x και τον υψηλό βαθμό απόδοσης ακόμη και υπό μερικό φορτίο. Το μεγάλο μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος και η χαμηλή ειδική ισχύς (kW/kg) ανεξάρτητα από τον τύπο κυψέλης καυσίμου. Η διάρκεια ζωής είναι επίσης ένα μεγάλο θέμα για τις περισσότερες κυψέλες καυσίμου. Η μεταφορά και η τιμή του καυσίμου αποτελούν εμπόδια στην ευρύτερη αξιοποίηση της τεχνολογίας. Το καθαρό υδρογόνο, που τεχνολογικά αποτελεί το προτιμώμενο καύσιμο, δεν είναι ευρέως διαθέσιμο, υπάρχουν μόνο μερικοί σταθμοί ανεφοδιασμού και ελάχιστοι απ' αυτούς είναι διαθέσιμοι για ναυτικές εφαρμογές. Σε εφαρμογές σχετικά χαμηλής ισχύος, π.χ. μικρά επιβατηγά πλοία και μικρά σκάφη αναψυχής, ο ανεφοδιασμός μπορεί να πραγματοποιείται από ένα σταθμό. Αντίθετα, σε εφαρμογές μεγαλύτερης ισχύος, και λαμβάνοντας υπ' όψιν το χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο του υδρογόνου στη μονάδα του όγκου, απαιτείται μια διαφορετική προσέγγιση στα θέματα μεταφοράς και ανεφοδιασμού του καυσίμου (Σχ. 3.2). Ο μεγάλος απαιτούμενος χώρος αποτελεί έναν περιοριστικό παράγοντα στην χρήση του υδρογόνου σαν εναλλακτικό καύσιμο σε ναυτικές εφαρμογές [26].



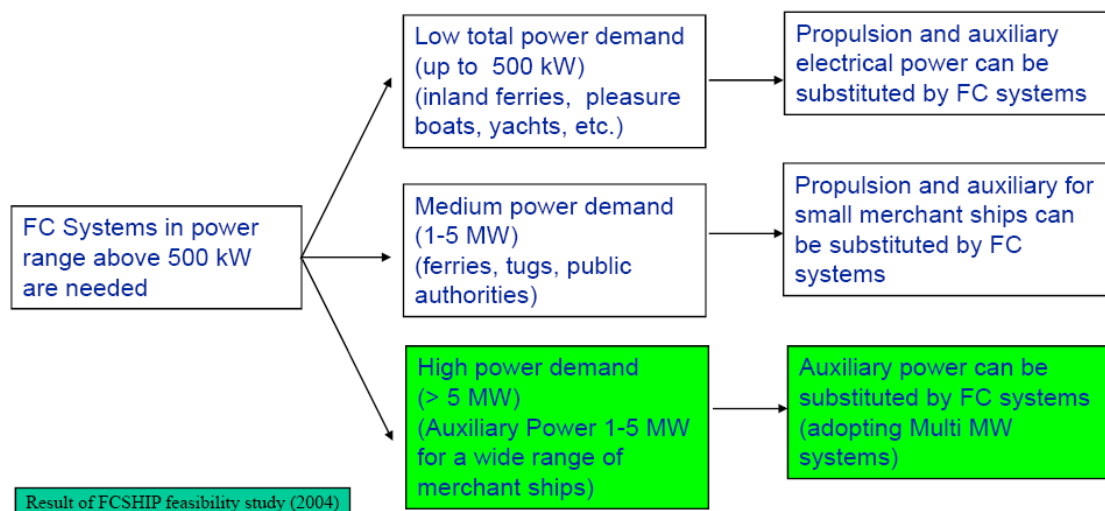
Σχήμα 3.2 Καύσιμα ναυτικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου [27].

Για τη χρήση διαφορετικών του υδρογόνου καυσίμων σε κυψέλες καυσίμου απαιτούνται συστήματα αναμόρφωσης. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί πολλά διαφορετικά συστήματα αναμόρφωσης καυσίμου. Πρόκληση γι' αυτά τα συστήματα αποτελεί ή όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απουσία θειούχων ενώσεων στο τελικό καύσιμο, ειδικά για καύσιμα ναυτικών εφαρμογών. Αλλαγές στους διεθνείς κανονισμούς, π.χ. χρήση φυσικού αερίου ως καύσιμο (ήδη από τα μέσα του 2010) σε συνδυασμό με περιβαλλοντικές απαιτήσεις για χαμηλότερη συγκέντρωση θείου στα καύσιμα δρουν προωθητικά στη χρήση συστημάτων αναμόρφωσης στο μέλλον. Ο IMO (International Maritime Organization) έχει αρχίσει την ανάπτυξη ενός διεθνούς κώδικα που θα επιτρέψει την χρήση διάφορων αέριων καυσίμων αλλά και υγρών με σημείο ανάφλεξης κάτω των 60°C. Αυτές οι εξελίξεις φαίνεται πως θα υποστηρίξουν την χρήση των συστημάτων κυψελών καυσίμου στη διεθνή ναυτιλία [26].

Στα ναυτικά ενεργειακά συστήματα εφαρμογή βρίσκουν τόσο οι κυψέλες χαμηλής όσο και οι κυψέλες υψηλής θερμοκρασίας. Στην περίπτωση των κυψελών καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας, οι κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC) φαίνεται πως είναι η καλύτερη λύση για εφαρμογές που χρησιμοποιούν ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο ενσωματώνοντας ταυτόχρονα και πολύ καλό επίπεδο τεχνογνωσίας. Σε περίπτωση που η PEMFC λειτουργεί με αναμορφωμένο καύσιμο δεν μπορεί να ανταγωνιστεί τον βαθμό απόδοσης μιας συμβατικής μηχανής εσωτερικής καύσης. Από την κατηγορία των κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας κατάλληλες για εφαρμογή είναι οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC) και οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC). Τα τρία παραπάνω συστήματα συνήθως λειτουργούν με ένα σύστημα αναμόρφωσης υδρογονανθράκων για παραγωγή υδρογόνου. Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) βρίσκουν ευρεία εμπορική εφαρμογή, οπότε μπορούν να αποτελέσουν και μια εναλλακτική λύση για ναυτικά ενεργειακά συστήματα πλοίων. Ο χαμηλός όμως βαθμός απόδοσής τους σε σχέση με τους συμβατικούς ενεργειακούς μετατροπείς των πλοίων καθιστά μη συμφέρουσα την χρήση τους. Οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC) και στερεού οξειδίου (SOFC) είναι οι πιο πολλά υποσχόμενες για εφαρμογές

σε ναυτικά ενεργειακά συστήματα. Ο υψηλός βαθμός απόδοσης τους, οι σχετικά χαμηλές απαιτήσεις ποιότητας καυσίμου και αέρα και η δυνατότητα συμπαράγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογή στα πλοία. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί μόνο μερικές εφαρμογές SOFC υψηλής σχετικά ισχύος. Βάσει του επιπέδου ανάπτυξης των κυψελών καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC) φαίνεται πως αποτελούν την περισσότερο υποσχόμενη τεχνολογία συστημάτων κυψελών καυσίμου για εφαρμογή σε μελλοντικά ναυτικά ενεργειακά συστήματα [26].

Θεωρητικά, τα συστήματα κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε ναυτική εφαρμογή ενεργειακού συστήματος. Από τα σκάφη αναψυχής και τα αλιευτικά σκάφη μέχρι τα φορτηγά και επιβατηγά πλοία. Επίσης μπορούν να βρουν εφαρμογές σε υποβρύχια και πολεμικά πλοία. Όμως, βάσει των υψηλών απαιτήσεων ισχύος στα πλοία (πάνω από 100 MW για κύρια πρόωση και 12 MW σε βοηθητικές μονάδες για ένα μεγάλο containership), πρέπει να σημειωθεί ότι τα τωρινά συστήματα κυψελών καυσίμου είναι κατάλληλα για περιορισμένο αριθμό εφαρμογών. Τα κύρια προβλήματα εστιάζονται στην μεταφορά, διάθεση και αποθήκευση του καυσίμου και στο γεγονός ότι τα τωρινά συστήματα κυψελών καυσίμου δεν ξεπερνούν τα 350 kW ως ξεχωριστή μονάδα. Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα FC Ship, τα συστήματα κυψελών καυσίμου με ονομαστική ισχύ μονάδας μεταξύ 0,5 MW έως 1MW είναι αυτά που απαιτούνται για ναυτικές εφαρμογές (Σχ. 3.3) [26].



Σχήμα 3.3 Κατάλληλα συστήματα κυψελών καυσίμου για εμπορικές ναυτικές εφαρμογές [27].

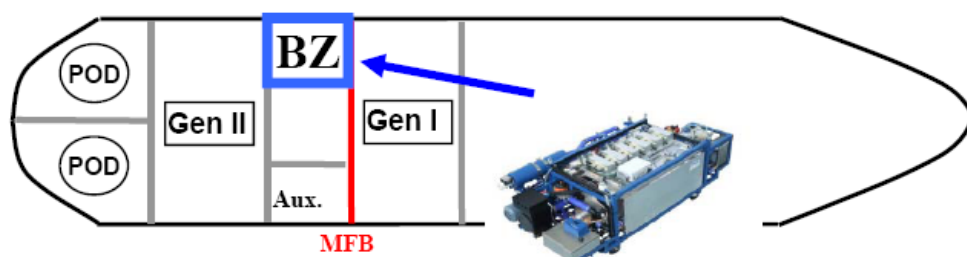
Για ισχύ πάνω από 500 kW τα συστήματα κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές κύριας πρόωσης αλλά και ως βοηθητικές μονάδες ενέργειας. Εφαρμογές κύριας πρόωσης αφορούν κυρίως σκάφη αναψυχής, yachts, σκάφη που πλέουν σε λίμνες και ποτάμια, κλπ. Οι απαιτήσεις σε ισχύ πρόωσης για τα ποντοπόρα πλοία είναι πολύ υψηλές, οπότε σε αυτήν την περίπτωση τα συστήματα κυψελών καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βοηθητικές πηγές ενέργειας. Ήδη υπάρχουν εφαρμογές σε επιβατηγά και ερευνητικά πλοία και σε μεγάλα yachts. Με τη χρήση 3 – 4 μονάδων κυψελών καυσίμου με ισχύ 500 kW/μονάδα και άνω, είναι εφικτή η τροφοδότηση πάνω από το 90 % της απαιτούμενης ενέργειας των βοηθητικών χρήσεων και μηχανημάτων μεγάλων πλοίων [26].

Πέρα από τις απαιτήσεις ισχύος τα συστήματα κυψελών καυσίμου πρέπει να μπορούν να λειτουργήσουν κάτω από τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα πλοίο που ταξιδεύει στη θάλασσα όπως μεγάλες κλίσεις και επιταχύνσεις του σκάφους και κραδασμοί. Ο περιβάλλον αέρας χαρακτηρίζεται από υψηλή αλατότητα και υγρασία, επίσης περιέχει υπολείμματα καυσίμων. Το ενεργειακό σύστημα πρέπει να λειτουργεί αποδοτικά υπό πλήρες φορτίο μέχρι και τους 45°C (θερμοκρασία περιβάλλοντος) και ο ηλεκτρικός εξοπλισμός μέχρι και τους 55°C (θερμοκρασία περιβάλλοντος) [27].

Τα συστήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται και θα χρησιμοποιηθούν περισσότερο στο μέλλον σε εφαρμογές όπου τα πλεονεκτήματα από μια τέτοιου είδους εφαρμογή υπερέχουν και είναι σημαντικότερα από το προκύπτον κόστος. Το πιο κοινό παράδειγμα είναι η εφαρμογή συστημάτων του γερμανικού κατασκευαστή HDW σε πολεμικά υποβρύχια της Γερμανίας, της Ιταλίας, της Ελλάδας και άλλων χωρών. Άλλες πιθανές εφαρμογές των συστημάτων κυψελών καυσίμου θα είναι σε περιπτώσεις όπου η περιοχή στην οποία δραστηριοποιείται το πλοίο απαιτεί την χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας διαφορετικών του πετρελαίου λόγω περιβαλλοντικών περιορισμών [26].

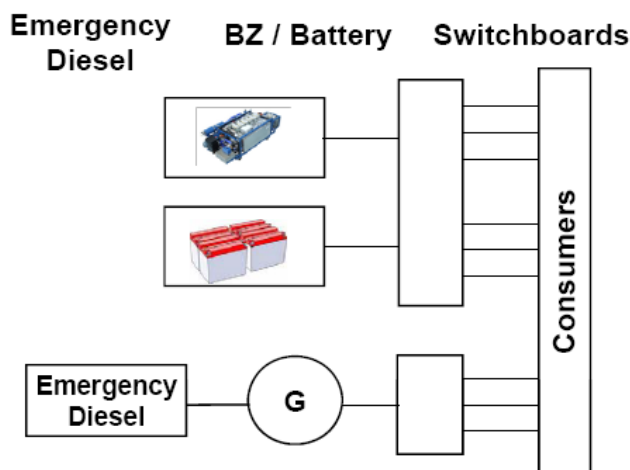
Σε γενικές γραμμές η εφαρμογή των συστημάτων κυψελών καυσίμου στα ναυτικά ενεργειακά συστήματα γίνεται είτε πρόκειται να γίνει στο μέλλον με τους παρακάτω τρόπους, χωρίς όμως αυτοί να αποτελούν μονόδρομους [27]:

- Τροφοδότηση του κύριου φορτίου παράλληλα με ντιζελογεννήτριες.



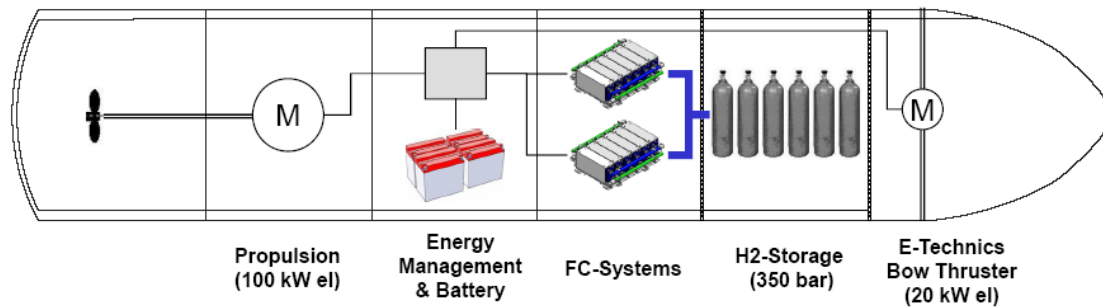
Σχήμα 3.4 Εφαρμογή κυψέλης καυσίμου ως βοηθητική πηγή ενέργειας παράλληλα με MEK [27].

- Τροφοδότηση των βοηθητικών καταναλώσεων από υβριδικό σύστημα Κυψέλης καυσίμου – Συσσωρευτών – MEK.



Σχήμα 3.5 Εφαρμογή υβριδικού συστήματος ως βοηθητική πηγή ενέργειας [27].

- Κύρια πρόωση και βοηθητικές καταναλώσεις από υβριδικό σύστημα Κυψέλης καυσίμου – Συσσωρευτών – ΜΕΚ.



Σχήμα 3.6 Εφαρμογή συστήματος κυψέλης καυσίμου – συσσωρευτών ως κύρια πηγή ενέργειας [27].

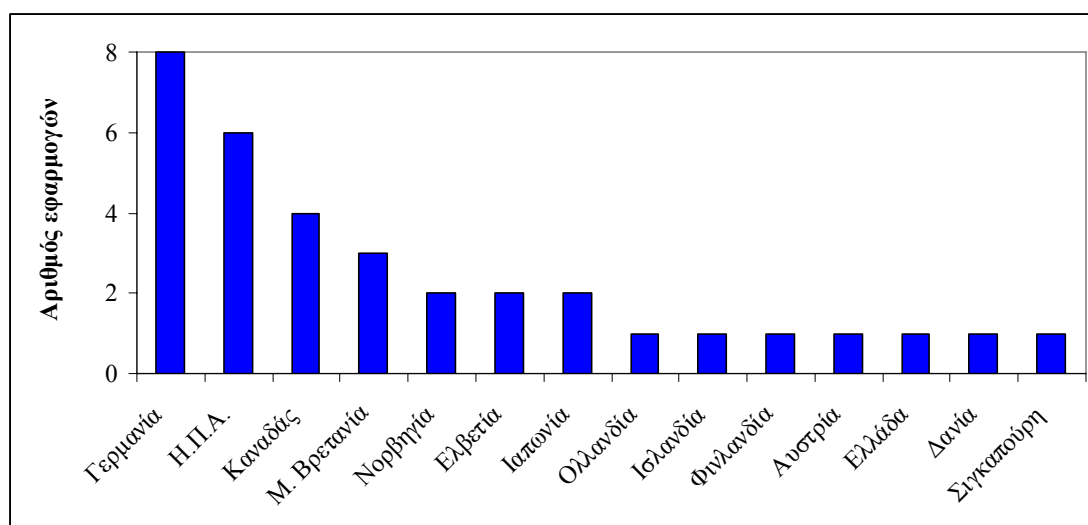
Πίνακας 3.1 Διεθνή προγράμματα ναυτικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου [28].

Διεθνή προγράμματα ναυτικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου					
Προμηθευτές	Χώρα	Τύπος	Ισχύς	Έτος	Χαρακτηριστικά εφαρμογής
Μη πυρηνικά υποβρύχια					
General Dynamic/ Allis-Chalmers	Η.Π.Α.	AFC	Άγνωστη	1964	<i>Star I</i> , 1040 kg, 1 άτομο, υδροζίνη (N ₂ H ₄)/O ₂
Lockheed Missiles & Space Systems	Η.Π.Α.	AFC	30 kW	1967	<i>Deep Quest</i> , 5 άτομα, κυψέλη καυσίμου της UTC
ThyssenKrupp Marine systems/HDW	Γερμανία	PEMFC	9x34 kW 2x120 kW	2005	<i>SiNavy PEMFC – Siemens</i> , class 212A, U31, U32 του Γερμανικού Π.Ν., εφαρμογή στα Π.Ν. άλλων 7 χωρών
Μη επανδρωμένα / Αυτόνομα υποβρύχια σκάφη (UUV / AUV submersibles)					
ISE Research Ltd	Καναδάς	Al/O ₂	100 kW	1987	<i>ARCS research AUV</i> , μήκος 6,4 m, υβριδικό σύστημα με συσσωρευτές NiCd
Perry Technologies/ Ballard	Η.Π.Α./ Καναδάς	PEMFC	3 kW	1989	<i>PC-14</i>
FFI Norwegian Def. Research Est.	Νορβηγία	Al/H ₂ O ₂	35-50 kW	2000	<i>HUGIN</i> , μήκος 5,3 m, βάθος σχεδίασης 3000 m
Atlas Elektronik/ZSW	Γερμανία	PEMFC	160 kW	2002	<i>DeepC</i> , κυψέλη της ZSW
Mitsubishi Heavy Industries	Ιαπωνία	PEMFC	4 kW	2004	<i>Urashima</i> , 317 km δοκιμών σε βάθος 800 m, μεταλλικά υβρίδια για αποθήκευση H ₂
Υachts / Ιστιοπλοϊκά σκάφη					
Yuasa Corporation	Ιαπωνία	DMFC	30 W	2002	<i>Malt's Mermaid III</i> , 5,8 m, χρήση κυψέλης ως βοηθητική πηγή ενέργειας (APU) κατά τη διάσχιση του Ειρηνικού
IESE – EIVD	Ελβετία	PEMFC	300 W	2002	<i>Branec III</i> , κυψέλη καυσίμου ως βοηθητική πηγή ενέργειας κατά τον υπερατλαντικό αγώνα Route de Rhum (6600 km)
MTU CFC Solutions/ Ballard	Γερμανία/ Καναδάς	PEMFC	4,8 kW	2003	<i>No 1</i> , yacht 12 m, κυψέλη καυσίμου της CoolCell, υβριδικό σύστημα με συσσωρευτές, ως βοηθητική πηγή ενέργειας

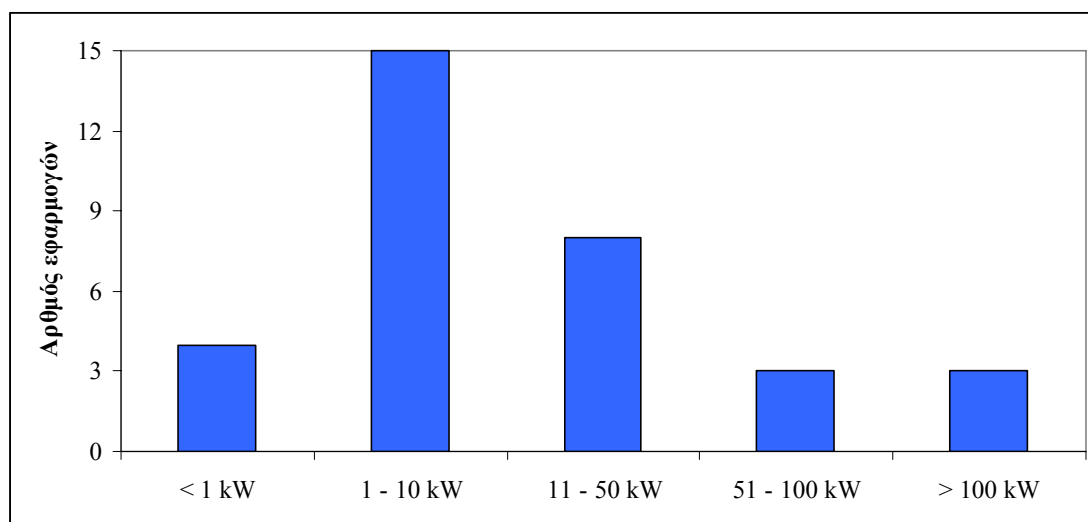
Συνέχεια Πίνακα					
Max Power	Γερμανία	DMFC	1,2 kW	2004	<i>Mamelie</i> , μήκος 15 m, συμμετείχε στον αγώνα North Atlantic Challenge
Voller Energy	Μεγάλη Βρετανία	PEMFC	5 kW	2007	<i>Emerald Benetau 411</i> , μήκος 12 m, συμμετείχε στον υπερατλαντικό αγώνα ARC, χρήση αναμορφωμένου LPG
SFC Smart Fuel Cell	Γερμανία	DMFC	1,6 kW 2,2 kW	2009	<i>Rogo 2</i> , με την κυψέλη καυσίμου EFOY 2200 τερμάτισε 2 ^ο στον υπερατλαντικό αγώνα Transat 6.50 και το <i>Nightlife</i> με EFOY 1600 1 ^ο στην κατηγορία του, στο Atlantic Rally for Cruisers
Ερευνητικά σκάφη					
Icelandic New Energy/ Ballard	Ισλανδία/ Καναδάς	PEMFC	10 kW	2009	<i>Elding</i> , 125 tons, υβριδικό σύστημα κυψέλης καυσίμου και συσσωρευτών-βοηθητική πηγή ενέργειας
MTU Onsite Energy/ Wartsila	Γερμανία/ Νορβηγία	MCFC	320 kW	2009	<i>Viking Lady</i> , 5900 tons, βοηθητική πηγή ενέργειας
Θαλάσσια ταξί / ferries					
Etaing GmbH	Γερμανία	AFC	6,9 kW	2000	<i>Hydra</i> , 22 επιβάτες, ταχύτητα 9 km/h, μεταλλικά υβρίδια για αποθήκευση H ₂
Duffy Electric Boat/ Anuvu/ Millennium Cell	Η.Π.Α.	PEMFC	3 kW	2003	<i>Duffy water taxi</i> , 18 επιβάτες, υβρίδια Νατρίου (Na) για αποθήκευση H ₂ της εταιρίας Millennium Cell
Proton Motor	Γερμανία	PEMFC	6-20 kW	2008	<i>FCS Alsterwasser</i> , 100 επιβ. Zemships project, εφαρμογή για κύρια πρόωση μαζί με συσσωρευτές τύπου gel
Fuel Cell Boat BV	Ολλανδία	PEMFC	60-70 kW	2009	<i>Nemo H₂</i> , μήκος 22 m, 82 επιβάτες, υβριδικό σύστημα με συσσωρευτές για κύρια πρόωση
Σκάφη αναψυχής					
Hydrocell Oy	Φινλανδία	AFC	30 kW	2000	Δύο διαφορετικές εφαρμογές σε σκάφη, χρήση της HC-100 κυλινδρικής κυψέλης, yamaha ηλεκτρικός κινητήρας, μεταλλικά υβρίδια για αποθήκευση H ₂
IESE – EIVD/ Zetek Power	Ελβετία/ Μεγάλη Βρετανία	PEMFC	3 kW	2003	<i>Hydroxy 3000 catamaran</i> και άλλα δύο σκάφη σε παλαιότερες εφαρμογές
University of Birmingham	Μεγάλη Βρετανία	PEMFC	5 kW	2007	<i>Ross Barlow</i> , εργασία φοιτητών, μεταλλικά υβρίδια για αποθήκευση H ₂
Horizon Fuel Cell/ Plug Power	Σιγκαπούρη/Η.Π.Α.	PEMFC	300 W	2007	Αλιευτική βάρκα, ηλεκτρικός κινητήρας για πρόωση
Fronius International/ Bitter GmbH	Αυστρία	PEMFC	4 kW	2009	<i>Riviera 600</i> , μήκος 16 m, H ₂ υπό υψηλή πίεση, ενταγμένο στο Future Project Hydrogen
IRD Fuel Cell Technology	Δανία	DMFC	500W	2009	Βάρκα μήκους 6.4 m, χρήση της κυψέλης καυσίμου για τη φόρτιση συσσωρευτών

Συνέχεια Πίνακα					
Tropical Green Technologies	Ελλάδα	PEMFC	1 kW	2009	Δοκιμή μονάδας RFC-1000 σε σκάφος, παραγωγή H ₂ από αναμορφωμένο LPG
Rensselaer Polytechnic Institute	Η.Π.Α.	PEMFC	4.4 kW	2009	New Clermont, μήκους 6.7 m ιστιοπλοϊκό σκάφος, εργασία φοιτητών, δύο κυψέλες καυσίμου της Plug Power

Σημείωση: Τα παραπάνω προγράμματα αναφέρεται πως είχαν, έστω και μικρής διάρκειας, εφαρμογή στο νερό. Σε όλα τα προγράμματα, εκτός από αυτά που επισημαίνεται στα χαρακτηριστικά τους, χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο υδρογόνο το οποίο βρισκόταν στο σκάφος υπό πίεση σε ειδικά δοχεία.



Σχήμα 3.7 Αριθμός εφαρμογών ανά χώρα [28].



Σχήμα 3.8 Αριθμός εφαρμογών ανά εύρος ισχύος [28].

Στον Πίνακα 3.1 παραπάνω φαίνονται συγκεντρωμένες πολλές από τις εφαρμογές συστημάτων κυψελών καυσίμου σε ναυτικά ενεργειακά συστήματα μαζί με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους από το 1964 μέχρι και τις μέρες μας. Όπως

σημειώνεται και στον πίνακα, τα προγράμματα που παρουσιάζονται αναφέρεται πως είχαν, έστω και μικρής διάρκειας, εφαρμογή στο νερό. Επίσης, σε όλα τα προγράμματα, εκτός από αυτά που επισημαίνεται στα χαρακτηριστικά τους, χρησιμοποιήθηκε ως καύσιμο υδρογόνο το οποίο βρισκόταν στο σκάφος υπό πίεση σε ειδικά δοχεία. Στα δύο διαγράμματα συσχετίζεται ο αριθμός των εφαρμογών α) με την χώρα που συμμετείχε στην ανάπτυξη της εφαρμογής (Σχ. 3.7) και β) με το εύρος ισχύος (Σχ. 3.8). Όπως παρατηρούμε, οι περισσότερες εφαρμογές αναφέρονται σε λίγα ή μερικές δεκάδες kW, ενώ λίγες είναι οι εφαρμογές πάνω από 100 kW. Τα δεδομένα προέρχονται από τον Πίνακα 3.1 [28].

3.3 Αρχές ασφαλείας ναυτικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου

Για την εφαρμογή κυψελών καυσίμου σε ναυτικά συστήματα απαιτείται η τήρηση ορισμένων κανόνων – αρχών, ώστε το σύστημα να έχει το ίδιο επίπεδο ασφαλείας με τα συμβατικά ναυτικά ενεργειακά συστήματα. Οι σημαντικότερες απ' αυτές αναφέρονται παρακάτω και εφαρμόζονται τόσο σε μεγάλα συστήματα όσο και σε μικρότερα (π.χ. μέχρι και μερικά kW) [26].

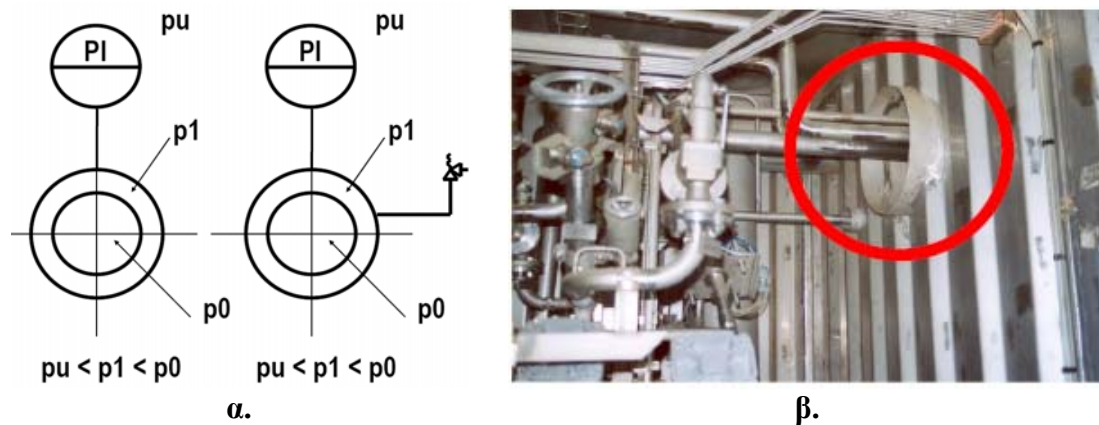
- **Κριτήριο απλής αστοχίας (single failure criterion)**

Το κριτήριο απλής αστοχίας εφαρμόζεται γενικά στους κανονισμούς. Το σύστημα κυψελών καυσίμου πρέπει να είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε σε περίπτωση αστοχίας κάποιου υποσυστήματός του να μην προκληθούν επικίνδυνες καταστάσεις. Επομένως, όλα τα επιμέρους τμήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια του συστήματος πρέπει να είναι πιστοποιημένα για τη χρήση τους.

- **Αρχή του διπλού τοιχώματος για την τροφοδοσία του αερίου – υδρογόνου (two barrier principle for gas supply)**

Οι σωλήνες διπλού τοιχώματος για την τροφοδοσία του αερίου καυσίμου προσφέρουν περισσότερη ασφάλεια στη μεταφορά και στη χρήση του καυσίμου, σε περίπτωση π.χ. που έχουμε αστοχία στο εσωτερικό τοίχωμα. Η αρχή του διπλού τοιχώματος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω των σωλήνων – αγωγών διπλού τοιχώματος (double wall pipe, Σχ. 3.9α) είτε μέσω τοποθέτησης σωλήνα απλού τοιχώματος στο εσωτερικό του αγωγού απομάκρυνσης αερίων (ventilation duct, Σχ. 3.9β) σε συνδυασμό με αεριοστεγή υποσυστήματα (π.χ. αεριοστεγής χώρος αποθήκευσης H₂, ή αεριοστεγές περίβλημα στην κυψέλη καυσίμου κλπ). Αστοχία στον αγωγό διπλού τοιχώματος μπορεί να ανιχνευθεί με έναν αισθητήρα πίεσης στο εσωτερικό των τοιχωμάτων του αγωγού. Για το λόγο αυτό η πίεση μεταξύ των τοιχωμάτων πρέπει να είναι μικρότερη από την πίεση του εσωτερικού τοιχώματος και μεγαλύτερη από την πίεση του περιβάλλοντος χώρου, ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί τυχόν αστοχία μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού τοιχώματος του αγωγού.

Αστοχία στην περίπτωση αγωγού απλού τοιχώματος στο εσωτερικό του αγωγού απομάκρυνσης αερίων μπορεί να ανιχνευθεί από έναν αισθητήρα αερίου στο τέλος του καναλιού απομάκρυνσης.



Σχήμα 3.9 Αρχή του διπλού τοιχώματος για την τροφοδοσία του αερίου, α. Αγωγός διπλού τοιχώματος, β. Αγωγός αερίου καυσίμου στο εσωτερικό του αγωγού απομάκρυνσης αερίων [26].

- **Διαχωρισμός των επιμέρους συστημάτων (separation of systems)**

Εν γένει, τα υποσυστήματα που απαιτούν αυξημένη ασφάλεια πρέπει να βρίσκονται σε αεριοστεγείς (gas tight) χώρους χωρίς την πιθανότητα εμφάνισης επικίνδυνων (ατμοσφαιρικών) συνθηκών. Απαιτείται, η χρήση διαφορετικού καναλιού γενικού εξαερισμού και απομάκρυνσης του αερίου καυσίμου (υδρογόνου), π.χ. λόγω διαρροών, και ο διαχωρισμός των επιμέρους τμημάτων του συστήματος από πιθανές πηγές ανάφλεξης με επαρκή μόνωση κατά των πυρκαγιών και αυτόματα συστήματα πυρόσβεσης. Η αποθήκευση του καυσίμου και η τοποθέτηση των κυψελών καυσίμου πρέπει να γίνονται σε ξεχωριστούς χώρους και όχι στο μηχανοστάσιο του σκάφους.

- **Ασφαλής απομάκρυνση των αερίων (safe venting of gases)**

Για την ασφαλή λειτουργία ενός συστήματος κυψελών καυσίμου απαιτείται η εγκατάσταση αρκετών διαφορετικών συστημάτων διεξόδου των αερίων (π.χ. λόγω διαρροών). Στην περίπτωση χρήσης αερίου υδρογόνου υψηλής πίεσης (300 – 350 bar) ως καύσιμο, που χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, οι φιάλες σε περίπτωση φωτιάς μπορούν να αποσυμπιεστούν μέσω της τήξης κατάλληλων βαλβίδων (melting plugs). Η συνήθης εγκατάσταση εξαερισμού περιλαμβάνει τα κανάλια διεξόδου αερίου από τους χώρους αποθήκευσης του καυσίμου αλλά και από τον χώρο τοποθέτησης της κυψέλης, ο οποίος μπορεί να περιέχει εύφλεκτα αέρια. Τα κανάλια πρέπει να είναι τοποθετημένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε, σε συνδυασμό με την υπόλοιπη εγκατάσταση, να ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος πυρκαγιών και εκρήξεων.

- **Προστασία έναντι έκρηξης (explosion protection)**

Για την αποφυγή εκρήξεων όλοι οι χώροι όπου υπάρχουν εύφλεκτα αέρια πρέπει να είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι για τέτοιου είδους χρήση. Η κλασική προστασία έναντι εκρήξεων συνίσταται στα παρακάτω:

1. Πρόληψη έναντι εκρηκτικής ατμόσφαιρας.
2. Περιορισμός των πιθανών πηγών ανάφλεξης.
3. Σχεδιασμός με στόχο τον περιορισμό των επιπτώσεων έκρηξης.

- **Προστασία λόγω της υψηλής πίεσης των φιαλών αποθήκευσης (protection of high pressure storage vessel)**

Μια από τις σημαντικότερες αστοχίες που μπορεί να συμβεί είναι η ρήξη σε φιάλη αποθήκευσης καυσίμου λόγω υπερπίεσης, φωτιάς, κλπ. Γενικά, πρέπει να διασφαλιστεί ότι τα συστήματα αγωγών, σχεδιασμένα για χαμηλότερες πιέσεις, πρέπει να προστατεύονται από υπερπίεσεις.

- **Προστασία από εξωτερικές επιδράσεις (protection of external influences)**

Για την αποφυγή αρνητικών επιδράσεων στο σύστημα κυψελών καυσίμου, αυτό θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο σύμφωνα με τις τυπικές περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα πλοίο. Επιπλέον, το σύστημα κυψελών καυσίμου πρέπει να προστατεύεται από εξωτερικές επιδράσεις όπως συγκρούσεις, μηχανικές καταστροφές και πυρκαγιές. Ειδικά στα ναυτικά συστήματα η πυρκαγιά είναι η πιο κρίσιμη αστοχία. Για την αποφυγή προβλημάτων προερχομένων από εξωτερικούς παράγοντες πρέπει κατά το σχεδιασμό να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα όπως σωστή τοποθέτηση των κυψελών καυσίμου στον κατάλληλο χώρο, προστασία των αγωγών αερίου καυσίμου με κατάλληλες κατασκευές και ικανή παθητική και ενεργητική προστασία έναντι πυρκαγιών (κατάλληλη μόνωση, αυτόματα συστήματα πυρόσβεσης).

- **Συστήματα ελέγχου ασφαλείας (safety monitoring systems)**

Τα σημαντικότερα συστήματα ελέγχου ασφαλείας είναι τα συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς και διαρροής αερίων τόσο στο χώρο αποθήκευσης του καυσίμου όσο και στο χώρο τοποθέτησης της κυψέλης καυσίμου. Ανάλογα με την εφαρμογή και την χωροταξία των επιμέρους συστημάτων σε σχέση με τους αισθητήρες ανίχνευσης, τίθενται όρια ασφαλούς λειτουργίας και παύσης της λειτουργίας. Σε περίπτωση σφάλματος στο σύστημα απαγωγής των αερίων απαιτείται η απενεργοποίηση του συστήματος για την αποφυγή ανεπιθύμητων επικίνδυνων καταστάσεων.

- **Θέματα για περαιτέρω εξέταση**

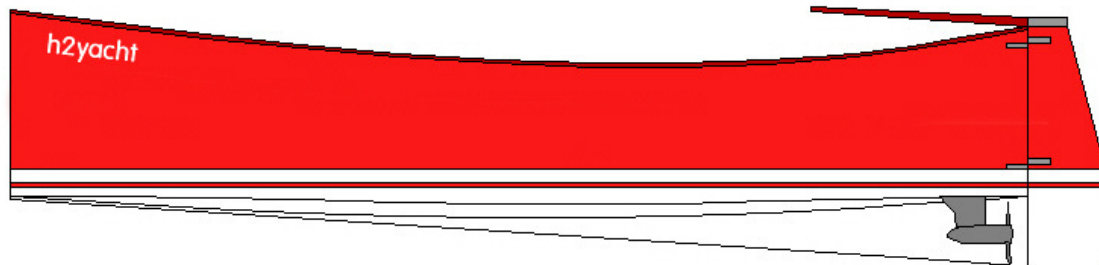
Πέρα από τις τεχνικές λεπτομέρειες του σχεδιασμού του συστήματος, πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπ' όψιν και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού. Γι' αυτό το λόγο στο εγχειρίδιο χρήσης του συστήματος πρέπει να υπάρχει μια λεπτομερής ανάλυση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του, δηλαδή τις διαδικασίες κατά την έναρξη και παύση λειτουργίας του συστήματος καθώς και κατά την παύση της λειτουργίας σε περίπτωση ανάγκης. Πριν την τελική χρήση του συστήματος πρέπει να γίνουν δοκιμές σύμφωνα με το πλάνο της λειτουργίας για το οποίο έχει σχεδιασθεί. Οι δοκιμές σχετίζονται με την πίεση λειτουργίας και τις αντοχές του συστήματος, με το επίπεδο στεγανότητας (όσον αφορά τα αέρια που μπορεί να διαρρέουν), με το σύστημα ασφαλείας καθώς και με δοκιμές της κυψέλης καυσίμου. Ύστερα από ένα χρονικό διάστημα λειτουργίας, είναι απαραίτητη η περιοδική επιθεώρηση όλων των επιμέρους συστημάτων ώστε να πιστοποιηθεί το επίπεδο ασφαλείας του συστήματος. Αυτή μπορεί να περιλαμβάνει για παράδειγμα, βαθμονόμηση των αισθητήρων του συστήματος, περιοδικό έλεγχο των φιαλών – δεξαμενών αποθήκευσης του καυσίμου, έλεγχο του συστήματος ασφαλείας, κλπ.

3.4 Σύγχρονες ναυτικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη δραστηριότητα στην περιοχή της έρευνας και ανάπτυξης ναυτικών συστημάτων κυψελών καυσίμου. Μέχρι το 2005 οι περισσότερες εφαρμογές αφορούσαν κυρίως μερικά kW, στις μέρες μας περάσαμε στις αρκετές δεκάδες έως και μερικές εκατοντάδες kW και στόχος του μέλλοντος είναι τα MW, ώστε να μπορέσουν να αποτελέσουν βοηθητικές πηγές ενέργειας μεγάλων ποντοπόρων πλοίων αλλά και για εφαρμογές κύριας πρόωσης μικρότερων πλοίων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι σύμφωνα με τον Γερμανικό Νηογνώμονα (Germanischer Lloyd – GL), στο μέλλον πρόκειται να ανοίξει μια μεγάλη αγορά για τις κυψέλες καυσίμου στην τροφοδότηση των βοηθητικών καταναλώσεων πλοίων. Η εγκατεστημένη βοηθητική ισχύς ποντοπόρων πλοίων υπολογίζεται στα περίπου 160 GW παγκοσμίως. Αυτή θα μπορούσε να καλυφθεί από κυψέλες καυσίμου με στόχο την ελάττωση των εκπεμπόμενων ρύπων [29]. Από τα παραπάνω εξηγείται και η εμπλοκή του Γερμανικού Νηογνώμονα σε πολλά σχετικά προγράμματα. Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε μια σειρά σύγχρονων ναυτικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου.

3.4.1 H₂Yacht

Η γερμανική εταιρεία H₂Yacht ιδρύθηκε το 2004 και ασχολείται με την κατασκευή μικρών σκαφών αναψυχής που χρησιμοποιούν ως πηγή ενέργειας κυψέλες καυσίμου. Μέχρι σήμερα έχει αναπτύξει δύο σκάφη εκ των οποίων το πρώτο (H₂Yacht 540, 2005, Σχ. 3.10, Εικ. 3.1) ήταν σε ερευνητικό στάδιο ενώ το δεύτερο (AMS H₂Yacht 675, 2007, Εικ. 3.2 – 3.3) είναι διαθέσιμο προς αγορά. Τα σκάφη είναι πιστοποιημένα από τον Γερμανικό Νηογνώμονα (Germanischer Lloyd – GL).



Σχήμα 3.10 H₂Yacht 540 [30].



Εικόνα 3.1 H₂Yacht 540 [32].

Πίνακας 3.2 Κύρια χαρακτηριστικά των εφαρμογών της H₂Yacht [30], [32].

	H ₂ Yacht 540	AMS H ₂ Yacht 675
Μήκος	5,4 m	6,75 m
Πλάτος	2,01 m	2,44 m
Κατηγορία σχεδιασμού	C (inland waters)	D (coastal waters)
Προτεινόμενο φορτίο	6 άτομα (600 kg)	8 άτομα (800 kg)
Κυψέλη καυσίμου PEM	24 V / 1,2 kW (Ballard Nexa)	2 x (24V / 1,2 kW) = 2,4 kW
Μέθοδος ψύξης κυψέλης	Αέρας	Νερό
Συσσωρευτές ασφαλείας	24 V / 90 Ah	24 V / 225 Ah
Καύσιμο	Υδρογόνο 5.0	Υδρογόνο 5.0
Χωρητικότητα καυσίμου	8 Normal m ³	15 Normal m ³
Αποθήκευση καυσίμου	2 steel tubes x 20 L = 40 L (200 bar)	6 Al-C tubes x 10 L = 60 L (300 bar)
Ηλεκτρικός κινητήρας	2 Minn Kota EM54 x 672 W = 1,34 kW	Vetus electric drive 2,2 kW
Έλικα	2 δίφτερες	1 τρίφτερη
Ταχύτητα πλεύσης	4 knots	5 knots



Εικόνα 3.2 Το εσωτερικό του H₂Yacht 675, διακρίνονται από την πλώρη προς την πρύμνη οι φιάλες αποθήκευσης του H₂, οι κυψέλες καυσίμου και ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης [30].



Εικόνα 3.3 AMS H₂Yacht 675 [32].

3.4.2 SMART H₂ – Elding I

Στα πλαίσια του ισλανδικού προγράμματος SMART H₂ (Sustainable Marine & Road Transport, 2007 – 2010) αναπτύχθηκε μια ναυτική εφαρμογή κυψελών καυσίμου στο τουριστικό σκάφος παρατήρησης φαλαινών Elding I. Πρόκειται για ένα σκάφος εκτοπίσματος 125 τόνων με δυνατότητα μεταφοράς 150 επιβατών (βλ. Εικ. 3.4). Στο πλοίο τοποθετήθηκε ένα υβριδικό σύστημα κυψέλης καυσίμου – συσσωρευτών ως βοηθητικό ενεργειακό σύστημα. Η κυψέλη καυσίμου έχει ονομαστική ισχύ 10 kW, είναι κατασκευής της εταιρίας Ballard και λειτουργεί με καθαρό υδρογόνο το οποίο αποθηκεύεται σε φιάλες πίεσης 350 bar. Οι συσσωρευτές έχουν ονομαστική ισχύ 15 kW. Το πλοίο άρχισε να λειτουργεί τον Απρίλιο του 2008. Το σύστημα κυψελών καυσίμου που τοποθετήθηκε στο σκάφος είναι πιστοποιημένο από τον Γερμανικό Νηογνώμονα.

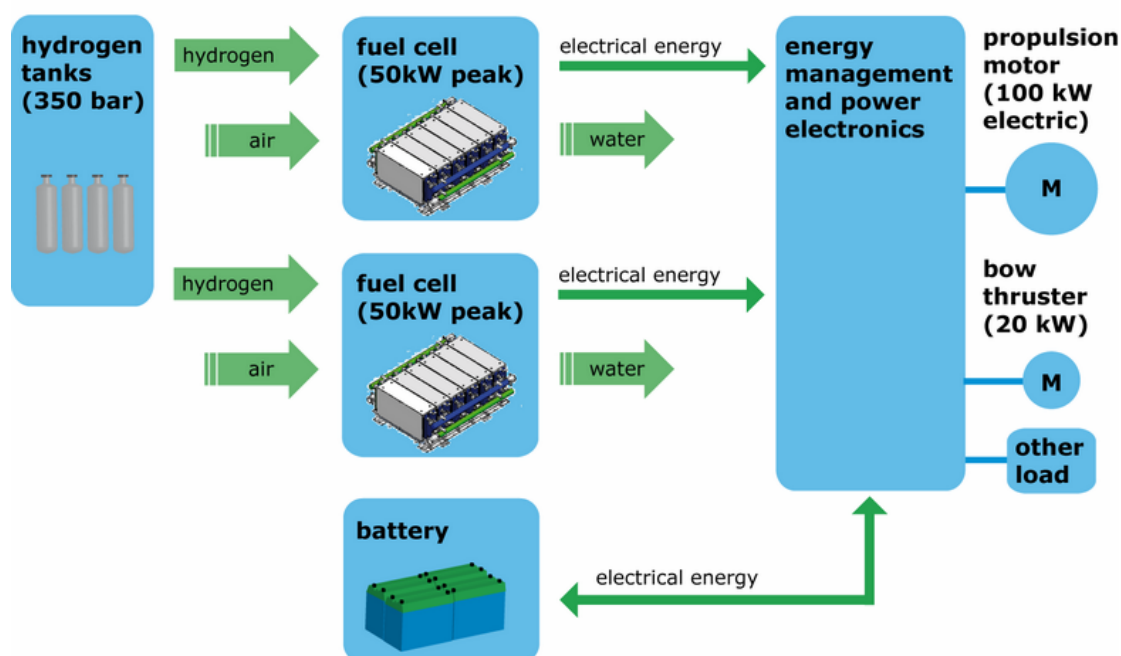


Εικόνα 3.4 Το σκάφος Elding I [33].

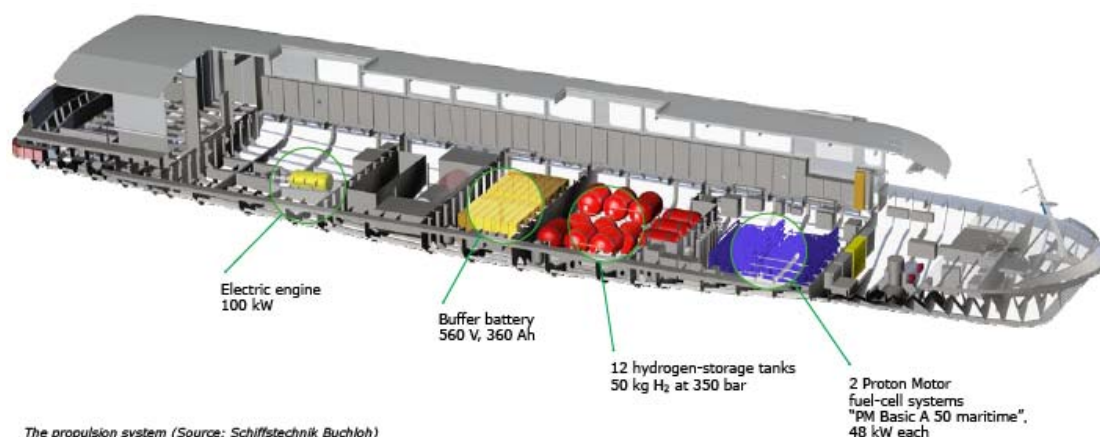
3.4.3 Zemships Project – FCS Alsterwasser

Το πρόγραμμα Zemships (Zero Emissions Ships, 2007 – 2010), στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος EU – Life, έχει ως σκοπό να εξετάσει την λειτουργία ενός πλοίου μηδενικών εκπεμπόμενων ρύπων που πλέει σε μια περιβαλλοντικά ευαίσθητη περιοχή και να προωθήσει αυτήν την τεχνολογία για μελλοντικές ναυτικές εφαρμογές. Η καθέλκυση του σκάφους έγινε τον Αύγουστο του 2008. Το πρόγραμμα Zemships είναι η πρώτη εμπορική εφαρμογή συστήματος κυψελών καυσίμου σε ένα επιβατηγό πλοίο αυτού του μεγέθους. Η πιστοποίηση του σκάφους πραγματοποιήθηκε από το Γερμανικό Νηογνώμονα. Στο Σχ. 3.11 φαίνεται το ενεργειακό σύστημα του πλοίου με τα επιμέρους στοιχεία του. Στο Σχ. 3.12 φαίνεται το πλοίο και η τρόπος τοποθέτησης των επιμέρους συστημάτων στο εσωτερικό του. Στον Πίνακα 3.3 καταγράφονται τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής.

Principle of the hybrid fuel cell propulsion system



Σχήμα 3.11 Το ενεργειακό σύστημα του FCS Alsterwasser [34].



The propulsion system (Source: Schiffstechnik Buchloh)

Σχήμα 3.12 Τρόπος τοποθέτησης επιμέρους συστημάτων στο εσωτερικό του πλοίου [35].

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά εφαρμογής Zemships [34].

Τεχνικά χαρακτηριστικά πλοίου	
Κατηγορία πλοίου	Πλοίο Κυψελών καυσίμου με άδεια πλεύσης στην περιοχή του λιμανιού και πιστοποίηση από GL
Επιβάτες	Άνω των 100
Ολικό μήκος	25,46 m
Πλάτος	5,36 m
Ύψος άνω της ισάλου	2,65 m
Ολικό εκτόπισμα	72 tons υπό πλήρες φορτίο
Βύθισμα (με επιβάτες)	1,33 m
Μέγιστη ταχύτητα πλεύσης	15 km/h ή 8,1 knots
Υλικά κατασκευής	Χάλυβας και αλουμίνιο
Σύστημα πρόωσης πλοίου	
Τύπος κυψέλης καυσίμου	Proton Motor PM600, Κυψέλη καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC)
Τύπος συστήματος κυψελών καυσίμου	Proton Motor “PM Basic A 50 Maritime”
Αριθμός συστημάτων κυψελών καυσίμου στο πλοίο	2
Μέγιστη ισχύς μονάδας συστήματος κυψελών καυσίμου	48 kW
Μέγιστος βαθμός απόδοσης	> 50%
Θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης καυσίμου	< 70°C
Συνολικό βάρος μονάδας συστήματος κυψελών καυσίμου	Περί τα 500 kg
Μέγεθος μονάδας συστήματος κυψελών καυσίμου	2200 x 1100 x 900 mm
Συσσωρευτές ασφαλείας	Τύπου Lead – gel, 560 V (7 x 80 V), 360 Ah
Τύπος ηλεκτρικού κινητήρα	Εναλλασσόμενου Ρεύματος 100 kW
Αποθήκευση υδρογόνου	Αέριο H ₂ (GH ₂) 350 bar / 15°C
Τυπική περίοδος ανεφοδιασμού	Κάθε 2 με 3 ημέρες



Εικόνα 3.5 Μονάδα του συστήματος κυψελών καυσίμου, PM Basic A 50 Maritime, του πλοίου [35].



Εικόνα 3.6 Το πλοίο FCS Alsterwasser [34].

Αξίζει να σημειωθεί, ότι στα πλαίσια του προγράμματος Zemships κατασκευάστηκε και ένας σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου (Εικ. 3.7). Ο χρόνος που χρειάζεται για να γεμίσουν οι φιάλες του πλοίου με τα 50 kg / 350 bar υδρογόνου είναι 12 λεπτά. Το υδρογόνο μεταφέρεται στον σταθμό σε υγρή μορφή από ειδικά βυτιοφόρα σε θερμοκρασία $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Μόνο όταν έχουμε ανεφοδιασμό του πλοίου το υδρογόνο αεριοποιείται και συμπιέζεται στα 450 bar [34].

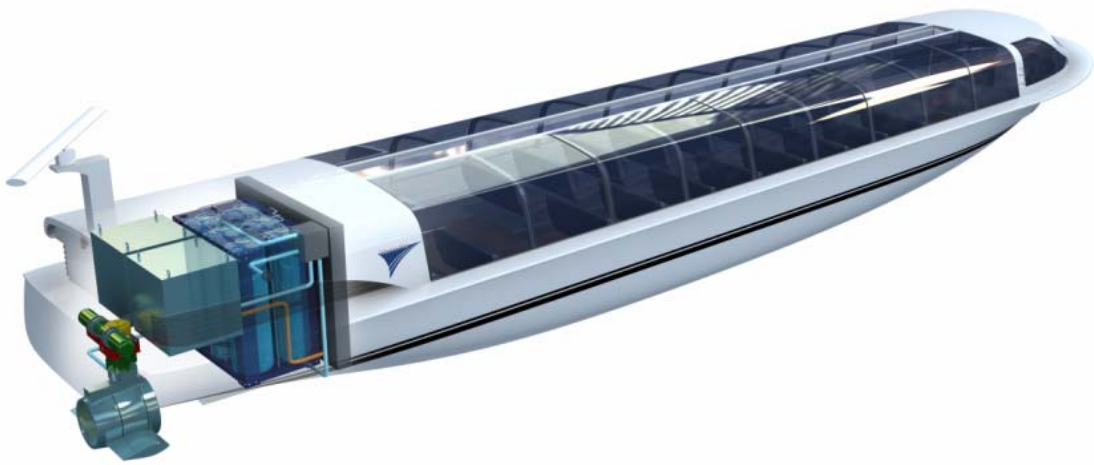


Εικόνα 3.7 Σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου [34].

3.4.4 Fuel Cell Boat – Nemo H₂

Σκοπός του προγράμματος Fuel Cell Boat (Amsterdam, 2005 – 2010) ήταν η ανάπτυξη ενός επιβατηγού πλοίου ενδοχώριων μεταφορών με σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου και ταυτόχρονα την ανάπτυξη τεχνολογίας για τον ανεφοδιασμό του σκάφους. Η καθέλκυση του πλοίου (Εικ. 3.8) πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2009. Για πρόωση χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρικοί προωστήρες εκ των οποίων ο ένας είναι τοποθετημένος στην πλώρη και λειτουργεί ως προωστήρας πλευρικής ώσης (bow thruster).

Το ενεργειακό σύστημα του πλοίου αποτελείται από 2 συστήματα κυψελών καυσίμου σχετικά μεγάλης ισχύος και από μια συστοιχία συσσωρευτών. Οι κυψέλες καυσίμου είναι πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC) της εταιρίας Nedstack και ως καύσιμο χρησιμοποιούν υδρογόνο υψηλής καθαρότητας. Το υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης στην στεριά και στον μέλλον η απαραίτητη ενέργεια για την ηλεκτρόλυση θα παρέχεται από το αιολικό πάρκο της Βόρειας Θάλασσας (North Sea Windfarm). Τα κύρια χαρακτηριστικά της εφαρμογής, σύμφωνα με τον πιο πρόσφατο σχεδιασμό, παρατίθενται στον Πίνακα 3.4. Και σε αυτό το πρόγραμμα η πιστοποίηση έχει γίνει από τον Γερμανικό Νηογνώμονα (GL). Στο Σχ. 3.13 φαίνεται το σκάφος της εφαρμογής, στο πίσω μέρος διακρίνονται κατά σειρά, ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης, τα δύο συστήματα κυψελών καυσίμου και οι φιάλες αποθήκευσης του καυσίμου.



Σχήμα 3.13 Το σκάφος Nemo H₂ του προγράμματος Fuel Cell Boat [37].



Εικόνα 3.8 Το σκάφος Nemo H₂ στο λιμάνι του Amsterdam [36].

Πίνακας 3.4 Τα βασικά χαρακτηριστικά της εφαρμογής Fuel Cell Boat [31], [36], [37].

Επιβάτες	87 + 1 (πλήρωμα), σχεδιασμένο για 100
Ολικό μήκος	21,95 m
Πλάτος	4,25 m
Βύθισμα	1 m
Εκτόπισμα	Περί τους 40 tons.
Ηλεκτρικός προωστήρας	Voith Inline Propulsor, αζιμουθιακός προωστήρας, δι-κατευθυντήρια έλικα, περιστροφή πάνω από 180°, 75 kW
Βοηθητικός προωστήρας πλώρης (bow thruster)	Kalkman Epsilon bow thruster 11 kW, σύστημα υδρο-προώθησης (water jet), περιστροφή 360°, δυνατότητα κίνησης πρόσω και ανάποδα, λειτουργεί και ως βοηθητικός προωστήρας, σε περίπτωση ανάγκης μπορεί να οδηγήσει το πλοίο πίσω στο μόλο
Ενεργειακό σύστημα	Υβριδικό σύστημα κυψελών καυσίμου (2 κυψέλες καυσίμου συνολικής ισχύος 60 – 70 kW) – συσσωρευτών (30 – 50 kW), το σύστημα κυψελών καυσίμου λειτουργεί σε μέγιστη απόδοση υπό σταθερό φορτίο, τυχόν αιχμές του φορτίου καλύπτονται από την ισχυρή συστοιχία συσσωρευτών
Αποθήκευση υδρογόνου	24 kg καυσίμου σε 6 φιάλες (1266 L) στα 350 bar
Μέγιστη ταχύτητα πλεύσης	16 km/h ή 8,6 knots
Διάρκεια ταξιδιού	9 ώρες με 7,5 knots
Κατανάλωση υδρογόνου	Περί τα 60 Nm ³ ανά ταξίδι, εξαρτώμενο από την ταχύτητα

Στην Εικ. 3.9 φαίνεται ο τρόπος τοποθέτησης του καυσίμου σε φιάλες υψηλής πίεσης στην πρύμνη του σκάφους. Στην Εικ. 3.10 φαίνεται το αζιμουθιακό σύστημα κύριας πρόωσης και το ηλεκτρομηχανικό σύστημα περιστροφής του.



Εικόνα 3.9 Τοποθέτηση συστήματος κυψελών καυσίμου και φιαλών αποθήκευσης υδρογόνου [36].



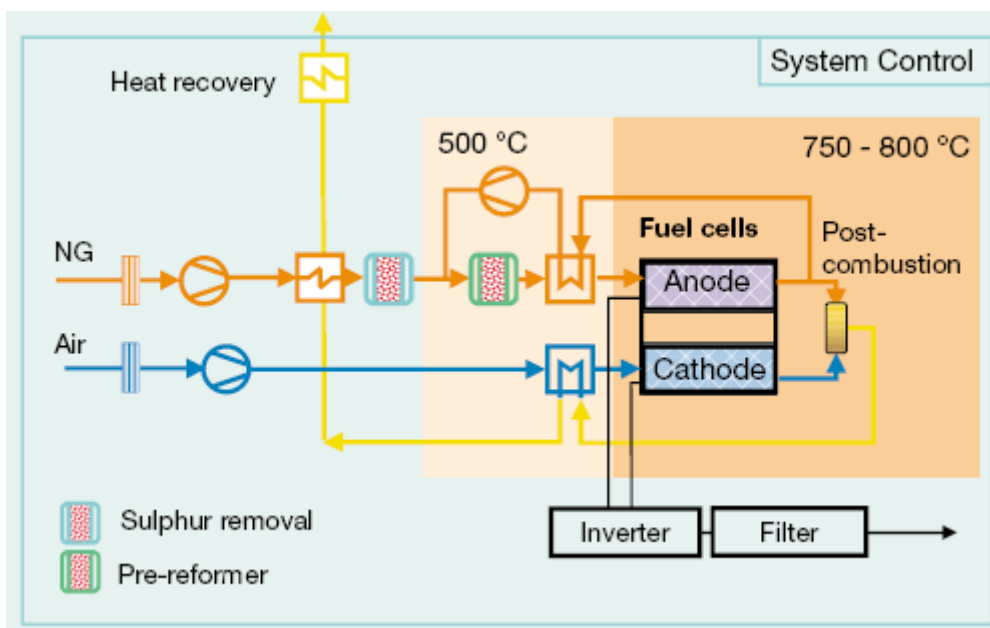
Εικόνα 3.10 Ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης και το ηλεκτρομηχανικό σύστημα περιστροφής του [36].

3.4.5 MethAPU

Το πρόγραμμα MethAPU (Validation of a Renewable Methanol Based Auxiliary Power Unit, 2006 – 2009) είχε σκοπό την ανάπτυξη και εφαρμογή ενός βοηθητικού ενεργειακού συστήματος κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) ισχύος 250 kW χρησιμοποιώντας ως καύσιμο τη μεθανόλη συμπεριλαμβανομένων των τεχνολογιών αναμόρφωσης και αποθήκευσης του καυσίμου. Αρχικά, η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε με την τοποθέτηση πειραματικού συστήματος κυψελών καυσίμου 20 kW σε ένα εμπορικό πλοίο μεταφοράς αυτοκινήτων. Το πλοίο μήκους 227,9 m με ισχύ κύριας μηχανής 14,7 MW είναι το M/V Undine της Wallenius Lines (Εικ. 3.11) και το σύστημα κυψελών καυσίμου αναπτύχθηκε από την Wartsila. Η μονάδα των 20 kW (περί τους 3 tons) τοποθετήθηκε στο σκάφος τον Σεπτέμβριο του 2010, λειτουργεί ως βοηθητική μονάδα ισχύος (Auxiliary Power Unit – APU) και στο μέλλον, ύστερα από τις απαραίτητες δοκιμές, πρόκειται να αντικατασταθεί από μια μεγαλύτερη των 250 kW. Το σύστημα τοποθετήθηκε στο κατάστρωμα του πλοίου μέσα σε container και περιλαμβάνει το σύστημα κυψελών καυσίμου, τα συστήματα αποθήκευσης και αναμόρφωσης της μεθανόλης ενώ ταυτόχρονα αποτελεί και τον χώρο των δοκιμών (Εικ. 3.12 – 3.13).



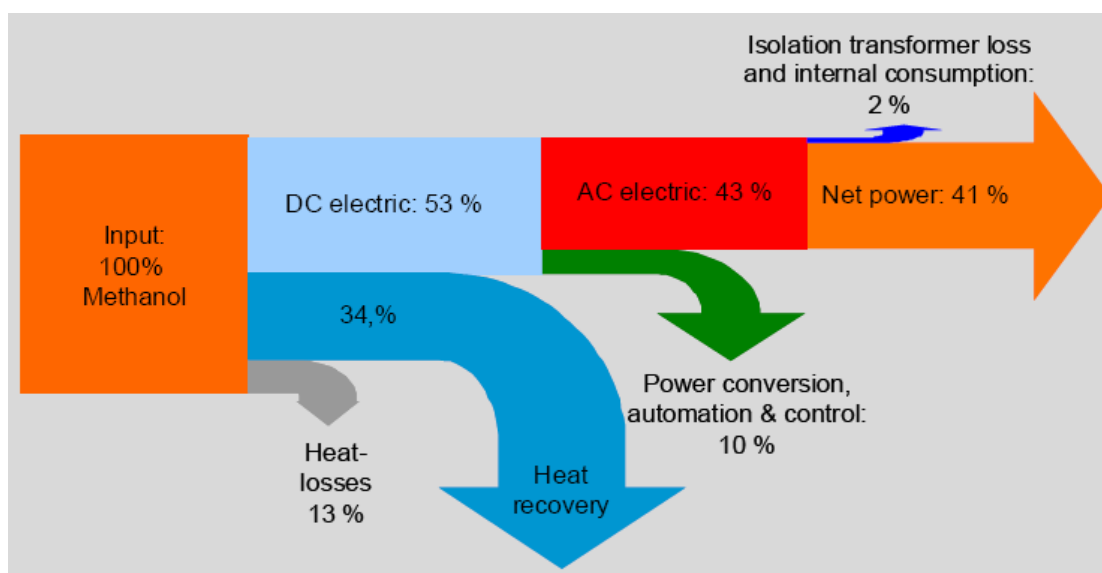
Εικόνα 3.11 Το πλοίο M/V Undine της εφαρμογής [39].



Σχήμα 3.14 Σχηματικό συστήματος SOFC [39].

Στο Σχ. 3.14 φαίνεται ένα σχηματικό του συστήματος SOFC που χρησιμοποιεί ως καύσιμο φυσικό αέριο. Το σύστημα αυτό είναι ακριβώς αντίστοιχο και στην περίπτωση χρήσης μεθανόλης ως καύσιμο όπως στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

Το καύσιμο (μεθανόλη ή φυσικό αέριο) αποθειώνεται και αναμορφώνεται σε ένα πρώτο στάδιο πριν εισέλθει στην κυψέλη καυσίμου. Τα αέρια που υπολείπονται, καίγονται σε έναν καταλυτικό καυστήρα απ' όπου και ανακτάται θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος της εφαρμογής που προκύπτει είναι 41% (LHV) (Σχ. 3.15). Η πιστοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε από τον Lloyd's Register.



Σχήμα 3.15 Ισολογισμός απόδοσης της εφαρμογής [39].



Εικόνα 3.12 Τοποθέτηση του συστήματος κυψελών καυσίμου στο κατάστρωμα του πλοίου [38].



Εικόνα 3.13 Το σύστημα κυψελών καυσίμου WFC20 της Wartsila στο εσωτερικό του container [38].

3.4.6 FellowSHIP

Στα πλαίσια του προγράμματος FellowSHIP (Fuel Cells for Low Emission Ships, 2003 – 2010) σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε ένα σύστημα κυψελών καυσίμου για ναυτικές και θαλάσσιες εφαρμογές. Τον Απρίλιο του 2009 τοποθετήθηκε ένα σύστημα κυψελών καυσίμου στο πλοίο Viking Lady (Εικ. 3.14). Το πλοίο Viking Lady είναι ένα σκάφος τροφοδοσίας θαλάσσιων πλατφόρμων εξόρυξης υδρογονανθράκων αλλά και γενικότερων δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την ανοικτή θάλασσα (offshore supply vessel). Η πιστοποίηση πραγματοποιήθηκε από τον Νορβηγικό Νηογνώμονα (Det Norske Veritas – DNV). Η ισχύς του συστήματος κυψελών καυσίμου της εφαρμογής είναι περί τα 320 kW και λειτουργεί ως βοηθητική ενεργειακή μονάδα, τροφοδοτώντας το ενεργειακό σύστημα του πλοίου. Πρόκειται για το σύστημα κυψελών καυσίμου hotmodule HM400N της MTU και αποτελείται από κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC). Καύσιμο του συστήματος είναι το φυσικό αέριο. Το καύσιμο είναι διαθέσιμο στο σκάφος υπό τη μορφή υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) και δημιουργείται ψύχοντας το στους -161°C . Η αεριοποίηση του, ώστε να έλθει σε κατάλληλη αέρια μορφή για καύση στην κυψέλη καυσίμου, πραγματοποιείται από ένα εξωτερικό σύστημα εξάτμισης το οποίο βρίσκεται πάνω στο πλοίο και αποτελεί μέρος του συστήματος.



Εικόνα 3.14 Το σκάφος Viking Lady [40].

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) είναι προϊόν επεξεργασίας του πετρελαίου που παράγεται επιτόπου στις πλατφόρμες εξόρυξης υδρογονανθράκων όπου το Viking Lady δραστηριοποιείται, οπότε και ο ανεφοδιασμός του αποτελεί ένα σχετικά εύκολο θέμα. Το LNG χρησιμοποιείται και ως εναλλακτικό καύσιμο για τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη του συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης του πλοίου.

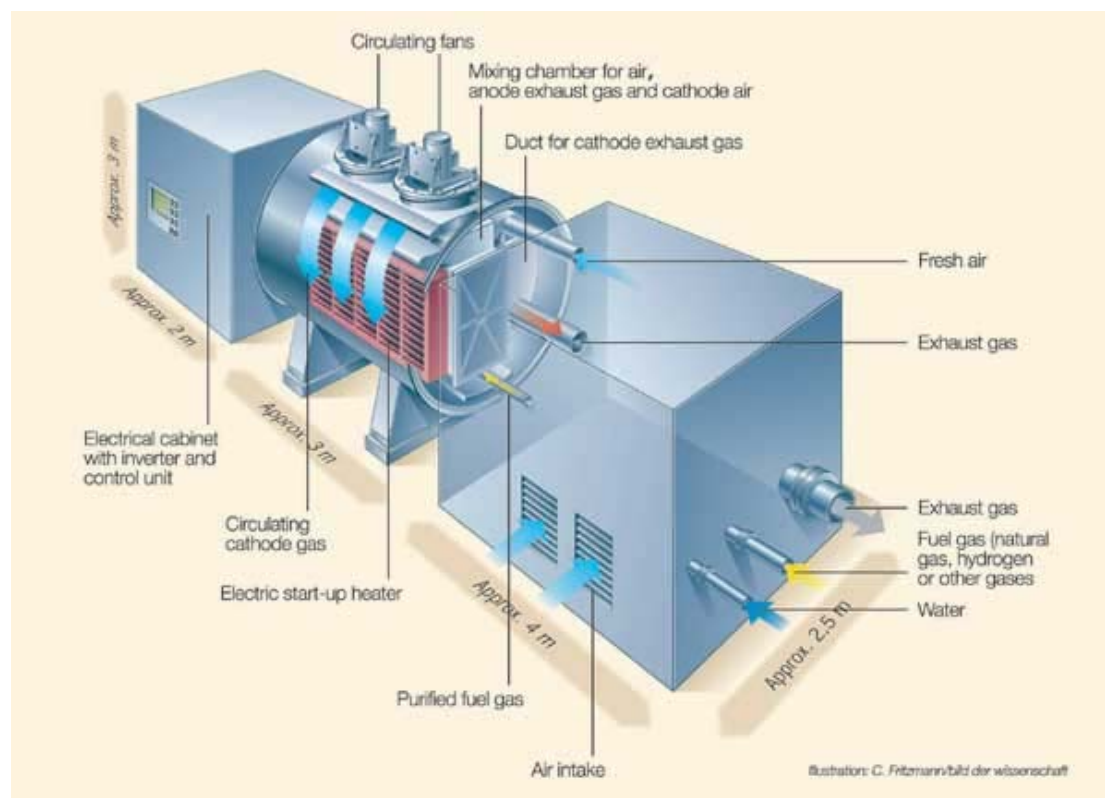
Το σύστημα κυψελών καυσίμου 320 kW όπως έχει αναφερθεί αποτελείται από κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων οι οποίες ως κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας λειτουργούν περί τους 600°C . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας 400°C η οποία χρησιμοποιείται σε ενεργειακές ανάγκες του σκάφους όπως θέρμανση και ψύξη των εσωτερικών χώρων

του πλοίου. Έτσι η ολική απόδοση φτάνει το 90 %. Στον Πίνακα 3.5 περιλαμβάνονται κάποια από τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής.

Στο Σχ. 3.16 φαίνεται το hotmodule της MTU. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τις κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων, τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό (inverter, μετασχηματιστές, μονάδα ελέγχου) και τη μονάδα επεξεργασίας του καυσίμου.

Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά της εφαρμογής FellowSHIP [40], [41].

Μήκος	92,2 m
Πλάτος	21 m
Βύθισμα	7,6 m
Μικτό βάρος	6100 tons
Προσωπικό	25 άτομα (240 σε περίπτωση ανάγκης)
Μέγιστη ταχύτητα	15 knots
Κατηγορία σχεδιασμού	DNV 1A1, Supply Vessel
Ηλεκτροπαραγωγή ζεύγη ηλεκτρικής πρόωσης	4 x 2,01 MW, εναλλακτικής καύσης diesel ή LNG
Σύστημα κυψελών καυσίμου	320 kW MTU, HM400 N
Ηλεκτρική απόδοση συστήματος κυψελών καυσίμου (ακαθάριστη)	Περίπου 49 %
Διαστάσεις συστήματος HM400 N με όλα τα υποσυστήματα	10000 x 3000 x 3900 mm



Σχήμα 3.16 Σχηματικό συστήματος hotmodule της MTU [42].



Εικόνα 3.15 Τοποθέτηση συστήματος κυψελών καυσίμου στο πλοίο Viking Lady [40].

3.4.7 Άλλα προγράμματα ναυτικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου

Αξίζει να γίνει αναφορά σε άλλα δύο προγράμματα τα οποία σχετίζονται με την εφαρμογή κυψελών καυσίμου σε ναυτικά ενεργειακά συστήματα, χωρίς όμως να έχουν τοποθετηθεί μέχρι σήμερα σε πλοία.

Το πρόγραμμα **MC – War** (Molten Carbonate Fuel Cells for Waterborne Application, 2005 – 2011), αποτελεί ένα ευρωπαϊκό πρόγραμμα στο οποίο συμμετέχει και το Ε.Μ.Π.. Το υπό ανάπτυξη σύστημα αποτελείται από κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC) και ως καύσιμο θα χρησιμοποιεί πετρέλαιο (marine diesel) ύστερα από την κατάλληλη επεξεργασία του (αποθείωση και αναμόρφωση). Το πρόγραμμα MC – War στοχεύει [43]:

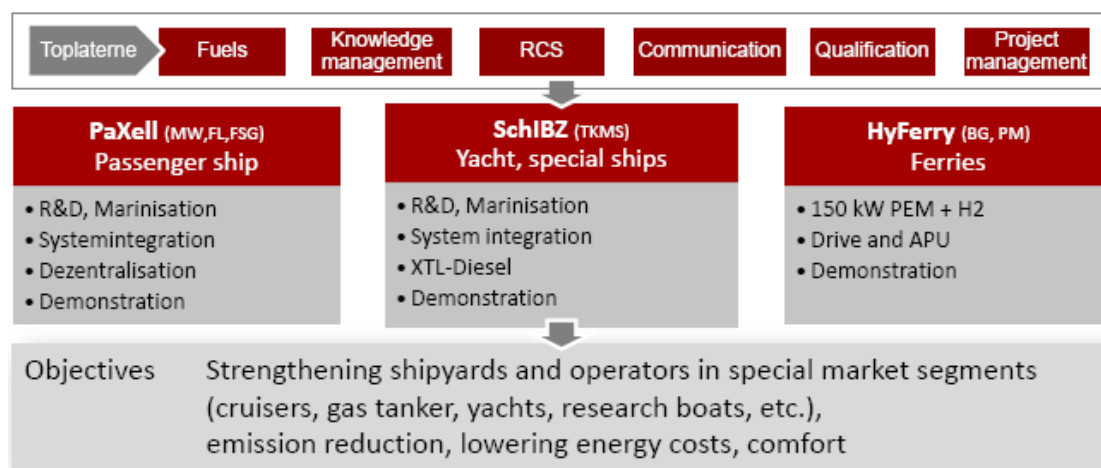
- α) στην τεχνολογική βελτίωση των συστημάτων κυψελών καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC) συμπεριλαμβανομένων των βοηθητικών συστημάτων ώστε να επιτραπεί η αποδοτική, αξιόπιστη και ασφαλής εφαρμογή τους στα πλοία,
- β) στην τεχνολογική βελτίωση των συστημάτων επεξεργασίας καυσίμου (αποθείωση και αναμόρφωση),
- γ) στην επίτευξη υψηλού επιπέδου συνεργασίας μεταξύ κυψέλης καυσίμου, αναμορφωτή καυσίμου και πλοίου,
- δ) στην ανάπτυξη και δοκιμή μιας βοηθητικής ενεργειακής μονάδας (APU) ισχύος 150 kW για εφαρμογή σε πλοίο καθώς και στη διερεύνηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας της για μελλοντική μεταπήδηση στην κλίμακα των MW και

ε) στην μελέτη των απαιτήσεων του πλοίου καθώς και στη μελέτη πιθανής αντικατάστασης (μερικής ή και ολικής) των συμβατικών ηλεκτροπαραγωγών ζευγών ενός πλοίου από κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC).

Η εταιρία κατασκευής του συστήματος κυψελών καυσίμου είναι η ιταλική Ansaldo Fuel Cells.

Το νεοσύστατο πρόγραμμα **e4ships** (2009 – 2014) του Εθνικού Προγράμματος Καινοτομίας (National Innovation Program – NIP) της Γερμανίας διαιρείται σε 4 υποπρογράμματα. Απ’ αυτά, ένα (Project Toplaterne) σχετίζεται με τη συλλογή εμπειρίας και πληροφοριών από τα υπόλοιπα τρία, τα οποία αποτελούν τα προγράμματα ναυτικών εφαρμογών κυψελών καυσίμου (Σχ. 3.17). Τα τρία προγράμματα που σχετίζονται με την εφαρμογή κυψελών καυσίμου σε πλοία είναι [44]:

- Το πρόγραμμα SchIBZ που σχετίζεται με την ανάπτυξη ενός συστήματος MCFC 500 kW με καύσιμο XTL (συνθετικό καύσιμο μίξης φυσικού αερίου (GTL – Gas To Liquid), άνθρακα (CTL) και βιομάζας (BTL)). Το σύστημα θα αποτελέσει βοηθητική μονάδα ενέργειας για το ενεργειακό σύστημα του φορτηγού πλοίου Cellus και βασίζεται στο hotmodule της MTU (βλ. εφαρμογή FelloSHIP).
- Το πρόγραμμα Pa – X – ell που σχετίζεται με την εφαρμογή ενός συστήματος MCFC 1 MW της MTU με καύσιμο υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Το πλοίο της εφαρμογής θα είναι ένα κρουαζιερόπλοιο της γερμανικής AIDA Cruises.
- Το πρόγραμμα Hy – Ferry που σχετίζεται με την εφαρμογή ενός υβριδικού συστήματος κυψελών καυσίμου PEMFC 150 kW και συσσωρευτών ιόντων λιθίου (Li – ion) για πλοία ενδοχώριων και παράκτιων δραστηριοτήτων. Η κυψέλη καυσίμου θα αναπτυχθεί από την γερμανική Proton Motor.



Σχήμα 3.17 Δομή του προγράμματος e4ships [20].

3.5 Συμπεράσματα

Περιβαλλοντικοί λόγοι και περιορισμοί, καθώς και η ανάγκη χρήσης εναλλακτικών – καθαρών πηγών ενέργειας στη ναυτιλία συντελούν ώστε τα συστήματα κυψελών καυσίμου να κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος στη ναυτική βιομηχανία ως πηγή καθαρής ενέργειας για εφαρμογή στα ενεργειακά συστήματα των πλοίων. Μέχρι σήμερα οι περισσότερες ναυτικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου είχαν επιδεικτικό χαρακτήρα. Εξαιρετική αποτελεί η χρήση κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC) σε υποβρύχια που σχεδιάστηκαν από τα γερμανικά ναυπηγεία HDW σε συνεργασία με την εταιρεία SIEMENS [26].

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης (PEMFC) μόλις τα τελευταία χρόνια έκαναν την εμφάνισή τους στην αγορά. Οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, ειδικά οι κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC), πιθανώς θα εμφανιστούν στην αγορά τα επόμενα 5 με 10 χρόνια. Όμως, λόγω των μεγάλων απαιτήσεων ισχύος των ναυτικών ενεργειακών συστημάτων οι κυψέλες καυσίμου δεν θα αντικαταστήσουν τις συμβατικές μηχανές των μεγάλων πλοίων, τάξης πολλών MW, στο εγγύς μέλλον [26].

Η υιοθέτηση των συστημάτων κυψελών καυσίμου αρχικά θα βρει εφαρμογή στην αντικατάσταση των βοηθητικών ενεργειακών μονάδων ενός πλοίου. Μάλιστα σε ειδικές εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν πολύ καλή εναλλακτική λύση ως προς τα παραδοσιακά συστήματα. Ειδικά σε σκάφη αναψυχής, σε σκάφη ενδοχώριων μεταφορών και οχηματαγωγά και γενικά σε εφαρμογές χαμηλής σχετικά ισχύος (μέχρι και περίπου 150 – 200 kW) όπου αρκεί ένας περιοδικός ανεφοδιασμός από την στεριά οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια καλή λύση. Σε αυτές τις ειδικές αγορές η ανάπτυξη της αγοράς κυψελών καυσίμου αναμένεται να αρχίσει σύντομα, μέσα στα επόμενα χρόνια [26].

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος συστημάτων κυψελών καυσίμου

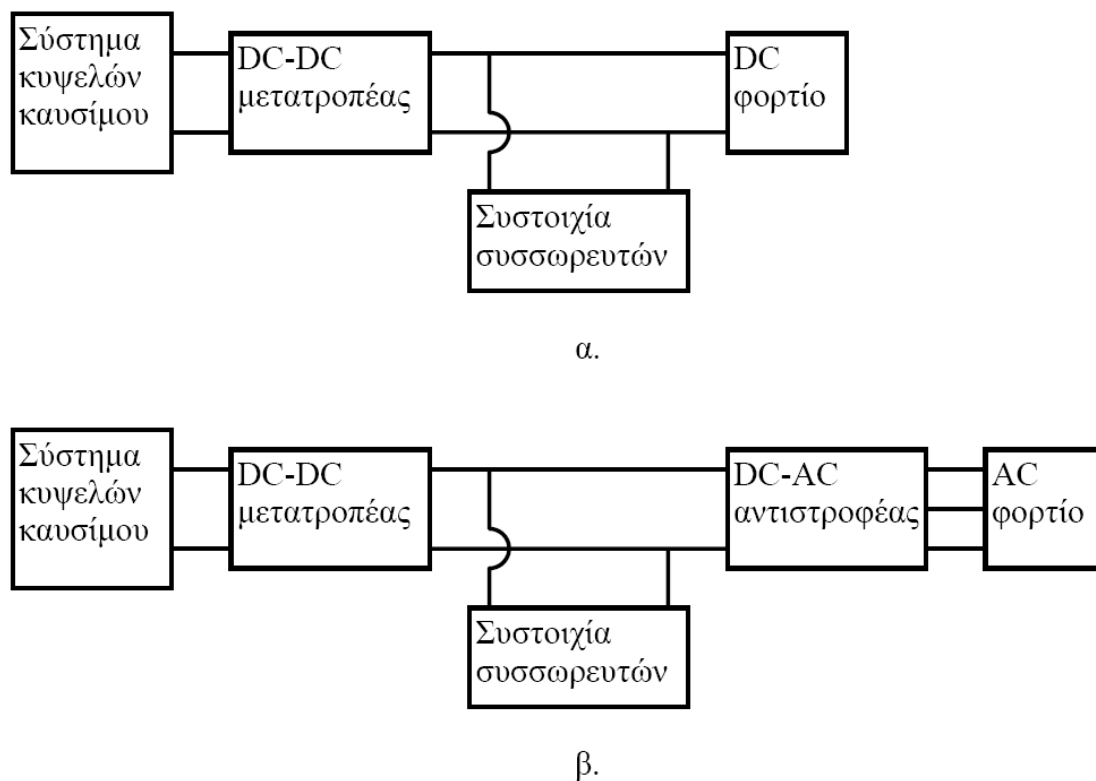
4.1 Γενικά περί ηλεκτρονικών μετατροπέων κυψελών καυσίμου

Ένα ηλεκτρικό σύστημα είναι απαραίτητο για να διαχειριστεί την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, που μετατρέπουν τη συνεχή τάση που παράγεται από τη συστοιχία, είτε σε συνεχή τάση άλλου επιπέδου είτε σε εναλλασσόμενη τάση οποιασδήποτε συχνότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις των φορτίων. Γίνεται αντιληπτό ότι τα χαρακτηριστικά και το είδος των μετατροπέων που συνδέονται στην έξοδο των κυψελών καυσίμου εξαρτώνται άμεσα από τις προδιαγραφές του φορτίου, οι οποίες πέραν του επιπέδου και της μορφής της τάσης, περιλαμβάνουν την ποιότητα ισχύος, το αρμονικό περιεχόμενο καθώς και την αντοχή σε μεταβατικά φαινόμενα. Το ηλεκτρικό δυναμικό μιας κυψέλης μεταβάλλεται έντονα με τις μεταβολές του ρεύματος φορτίου και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την πίεση λειτουργίας της κυψέλης καθώς και την παροχή καυσίμου και οξυγόνου. Η διακύμανση της ηλεκτρικής τάσης στην περιοχή λειτουργίας της κυψέλης είναι της τάξης του 30 έως 40 % επί της ονομαστικής της τιμής. Ελάχιστα είδη φορτίων μπορούν να έχουν ανοχή σε τέτοιες μεγάλες διακυμάνσεις. Επομένως κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη μιας βαθμίδας για τη ρύθμιση της παραγόμενης, από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου, τάσης. Η βαθμίδα αυτή είναι ένας μετατροπέας συνεχούς τάσης σε συνεχή (Μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ ή DC-DC Converter)¹ ο οποίος, ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου, μπορεί ή να υποβιβάζει, ή να ανυψώνει, ή και να υποβιβάζει και να ανυψώνει την παραγόμενη τάση της κυψέλης. Στην περίπτωση τροφοδοσίας φορτίων εναλλασσόμενου ρεύματος μετά τον μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ ακολουθεί ένας αντιστροφέας (inverter) για τη μετατροπή της παραγόμενης συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη (βλ. και Σχ. 4.1) [45].

Στο Σχ. 4.1 φαίνεται η τοπολογία ενός υβριδικού συστήματος κυψελών καυσίμου και συσσωρευτών και οι βαθμίδες των ηλεκτρονικών ισχύος που απαιτούνται για να τροφοδοτούν τα διάφορα φορτία. Ένα τέτοιο σύστημα για να είναι ικανό να λειτουργεί ως αξιόπιστη πηγή ισχύος πρέπει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά [46]:

- Χαμηλό κόστος εφαρμογής.
- Υψηλό βαθμό απόδοσης και υψηλή πυκνότητα ισχύος.
- Χαμηλό πλάτος κυμάτωσης του ρεύματος από τις κυψέλες καυσίμου, με στόχο τη μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής τους.
- Γρήγορη και δυναμική απόκριση του συστήματος, για ρύθμιση της συνεχούς τάσης και για τον έλεγχο του παραγόμενου ρεύματος.

¹ Η χρήση του ΣΤ-ΣΤ αντί του Σ.Ρ./Σ.Ρ. δεν διαφέρει, μάλιστα χρησιμοποιείται ώστε να τονίζεται το λειτουργικό χαρακτηριστικό αυτών των μετατροπέων ισχύος, μέσω των οποίων ρυθμίζεται η τάση.



Σχήμα 4.1 Τοπολογία υβριδικού συστήματος κυψελών καυσίμου – συσσωρευτών με τους κατάλληλους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος α. για DC φορτίο, β. για AC φορτίο [46].

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 (30 – 60 s) δημιουργεί πρόσθετες δυσκολίες ελέγχου στις επόμενες βαθμίδες μετατροπής ισχύος. Επομένως, απαιτείται κάποιος τύπος συμπληρωματικής αποθήκευσης ενέργειας (υπερπυκνωτές ή μπαταρίες). Οι μπαταρίες είναι κοινή επιλογή και μπορεί να είναι καλή αν χρησιμοποιηθεί μια συστοιχία μπαταριών χαμηλής τάσης (π.χ. 84 V). Αυτή η συστοιχία χαμηλής τάσης, η οποία δεν απαιτεί σύστημα διαχείρισης μπαταριών (battery management system – BMS), μπορεί να τοποθετηθεί μετά από την έξοδο του dc – dc μετατροπέα (βλ. Σχ. 4.1). Εάν χρησιμοποιηθεί συστοιχία μπαταριών υψηλής τάσης (π.χ. 340 V), τότε, λόγω του μεγάλου αριθμού μονάδων συσσωρευτών σε σειρά θα χρειαστεί ένα μεγάλο κόστους σύστημα διαχείρισης μπαταριών και συχνά θα οδηγεί σε καταστάσεις αστάθειας [46].

Να σημειωθεί ότι, δεδομένης της φύσης του φορτίου που θεωρείται στην παρούσα εργασία, όπου ως κινητήρας πρόωσης για το ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα θα χρησιμοποιηθεί ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος, το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στην ανάπτυξη των βασικών τοπολογιών μετατροπέων ΣΤ-ΣΤ. Οι βασικοί μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ αποτελούν το δομικό στοιχείο και την βάση κάθε άλλης παραλλαγής μετατροπέων ΣΤ-ΣΤ των διάφορων εφαρμογών. Επιπλέον όπως εξηγήθηκε, αποτελούν, στις περισσότερες εφαρμογές, αναπόσπαστο κομμάτι του συστήματος ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος που χρησιμοποιούνται στα συστήματα κυψελών καυσίμου (βλ. και Σχ. 4.1).

4.2 Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή

Μία από τις κατηγορίες των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος είναι οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση μεταβαλλόμενου εύρους (Μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ, DC-DC Converters) [9], [47], [48], [49]. Πρόκειται για ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος οι οποίοι τροφοδοτούνται από μία συνεχή τάση, παρέχουν στην έξοδο μία συνεχή τάση και περιέχουν ένα τουλάχιστον ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακοπτικό στοιχείο (τρανζίστορ ισχύος ή θυρίστορ). Το στοιχείο αυτό ελέγχεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μεταβαίνει, περιοδικά, από την κατάσταση πλήρους αγωγής (turn – on) στην κατάσταση πλήρους αποκοπής (turn – off) και αντίστροφα. Το γεγονός αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη δημιουργία παλμικών τάσεων μεταβλητού (χρονικού) εύρους. Ο χρόνος αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου t_{on} προς τη διακοπτική περίοδο λειτουργίας T_s ονομάζεται λόγος κατάτμησης δ (duty cycle). Η παλμική τάση εξομαλύνεται με τη βοήθεια ενός φίλτρου, στην έξοδο του οποίου λαμβάνουμε μία συνεχή τάση. Έτσι, με τη μεταβολή του λόγου κατάτμησης επιτυγχάνεται ρύθμιση της συνεχούς τάσης εξόδου του μετατροπέα, η οποία εφαρμόζεται σ' ένα φορτίο.

Υπενθυμίζεται ότι, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται, ως ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο, ένα τρανζίστορ ισχύος (όπως MOSFET, IGBT), τότε η έναυση και η σβέση του πραγματοποιούνται από το κύκλωμα παλμοδότησης, το οποίο συνδέεται στο ηλεκτρόδιο ελέγχου του. Αντίθετα αν χρησιμοποιηθεί ένα θυρίστορ ως ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο, τότε απαιτείται η χρήση ενός βοηθητικού κυκλώματος για τη σβέση του.

Για τον έλεγχο αυτών των μετατροπέων χρησιμοποιείται, κυρίως, η τεχνική της διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (Pulse Width Modulation – P.W.M.). Η τεχνική αυτή συνίσταται στο να διατηρείται σταθερή τη συχνότητα έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων (συχνότητα λειτουργίας του μετατροπέα) και να μεταβάλλεται ο χρόνος αγωγής (άρα και ο χρόνος αποκοπής) των στοιχείων αυτών. Με την περιοδική έναυση και σβέση του ημιαγωγικού στοιχείου παίρνουμε ως αποτέλεσμα μία παλμική τάση, μετά από εξομάλυνση της οποίας λαμβάνουμε στην έξοδο του μετατροπέα την επιθυμητή συνεχή τάση.

Αναφερόμενοι στους μετατροπείς, που χρησιμοποιούν τη διαμόρφωση του εύρους των παλμών για τον έλεγχο της ισχύος, θα σημειώσουμε ότι υπάρχουν πολλές διαφορετικές τοπολογίες, κάθε μια από τις οποίες έχει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Οι τοπολογίες αυτές μπορούν να χωρισθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ήτοι:

- Μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ χωρίς μετασχηματιστή απομόνωσης (Single – Ended DC-DC Converters).
- Μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ με μετασχηματιστή απομόνωσης.

Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση των μετατροπέων ΣΤ-ΣΤ βασίζεται στο εάν η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου. Έτσι υφίστανται τρεις βασικές κατηγορίες:

- Μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ με τους οποίους επιτυγχάνεται υποβιβασμός της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου (step-down ή buck converters).

- Μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ με τους οποίους επιτυγχάνεται ανύψωση της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου (step-up ή boost converters).
- Μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ με τους οποίους επιτυγχάνεται υποβιβασμός ή ανύψωση της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου, ανάλογα με τη σχέση του χρόνου αγωγής προς το χρόνο αποκοπής του ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος (step-down/up ή buck-boost converters).

Η θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας των παραπάνω μετατροπέων πραγματοποιείται στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας και στηρίζεται στην υπόθεση ότι όλα τα στοιχεία του κυκλώματος είναι ιδανικά. Δηλαδή οι ημιαγωγικοί διακόπτες παρουσιάζουν μηδενικούς χρόνους έναυσης και σβέσης, μηδενικές απώλειες αγωγής και μηδενική πτώση τάσης, καθώς και ότι ο πυκνωτής εξόδου είναι πολύ μεγάλος (ώστε η τάση εξόδου να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή) [48], [49].

Η λειτουργία των μετατροπέων που ελέγχονται με την τεχνική της P.W.M. μπορεί να είναι είτε στην περιοχή συνεχούς αγωγής ρεύματος, είτε στην περιοχή ασυνεχούς αγωγής ρεύματος [48].

- Ως συνεχής αγωγή (Continuous Conduction Mode, CCM) ορίζεται η κατάσταση λειτουργίας όπου το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης είναι πάντα μεγαλύτερο του μηδενός.
- Ως ασυνεχής αγωγή (Discontinuous Conduction Mode, DCM) ορίζεται η κατάσταση λειτουργίας όπου το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης παρουσιάζει διαστήματα όπου μηδενίζεται.

Ακολουθούν ορισμένοι συμβολισμοί, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν στην θεωρητική ανάλυση των μετατροπέων [48].

Λόγος κατάτμησης δ (duty cycle): Η σχετική διάρκεια αγωγής, $\delta = \frac{t_{on}}{T_s}$ (4.1)

t_{on} : το χρονικό διάστημα στο οποίο το διακοπτικό στοιχείο άγει

t_{off} : το χρονικό διάστημα στο οποίο το διακοπτικό στοιχείο δεν άγει

T_s : η διακοπτική περίοδος λειτουργίας, $T_s = t_{on} + t_{off}$

f_s : η διακοπτική συχνότητα λειτουργίας, $f_s = 1/T_s$

V_i : συνεχής μέση τάση εισόδου

V_o : συνεχής μέση τάση εξόδου

I_i : μέσο ρεύμα εισόδου

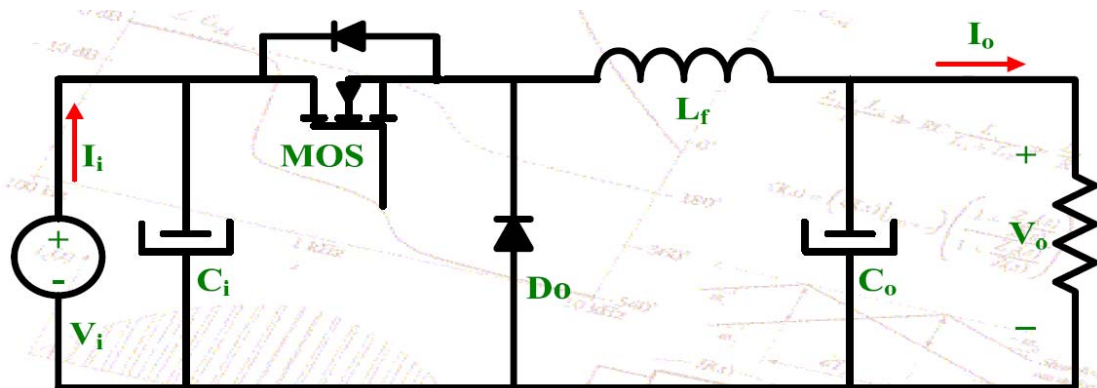
I_o : μέσο ρεύμα εξόδου

L_f : το πηνίο εξομάλυνσης του μετατροπέα

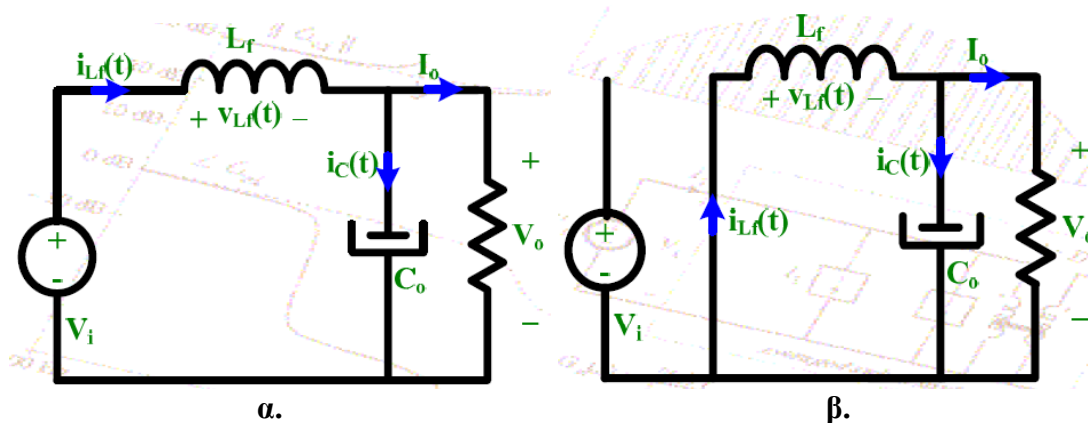
4.2.1 Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης σε συνεχή τύπου buck

Στο Σχ. 4.2, παρατίθεται το κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα τύπου buck. Για την θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα τύπου buck θεωρούμε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ότι βρισκόμαστε σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και ότι τα ημιαγωγικά στοιχεία είναι ιδανικά (μηδενικοί χρόνοι έναυσης και σβέσης, μηδενικές απώλειες αγωγής, μηδενική πτώση τάσης κ.ά.). Επίσης το

πηνίο εξομάλυνσης L_f θεωρείται πολύ μεγάλο, όπως επίσης και ο πυκνωτής εξόδου C_o . Έτσι η τάση εξόδου V_o μπορεί να θεωρηθεί, πρακτικά, σταθερή.



Σχήμα 4.2 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα τύπου buck [48].



Σχήμα 4.3 Οι δύο καταστάσεις λειτουργίας του μετατροπέα τύπου buck, α. το τρανζίστορ άγει, β. το τρανζίστορ δεν άγει [48].

Η λειτουργία της τοπολογίας αυτής, σε μόνιμη κατάσταση, συνοψίζεται ως εξής:

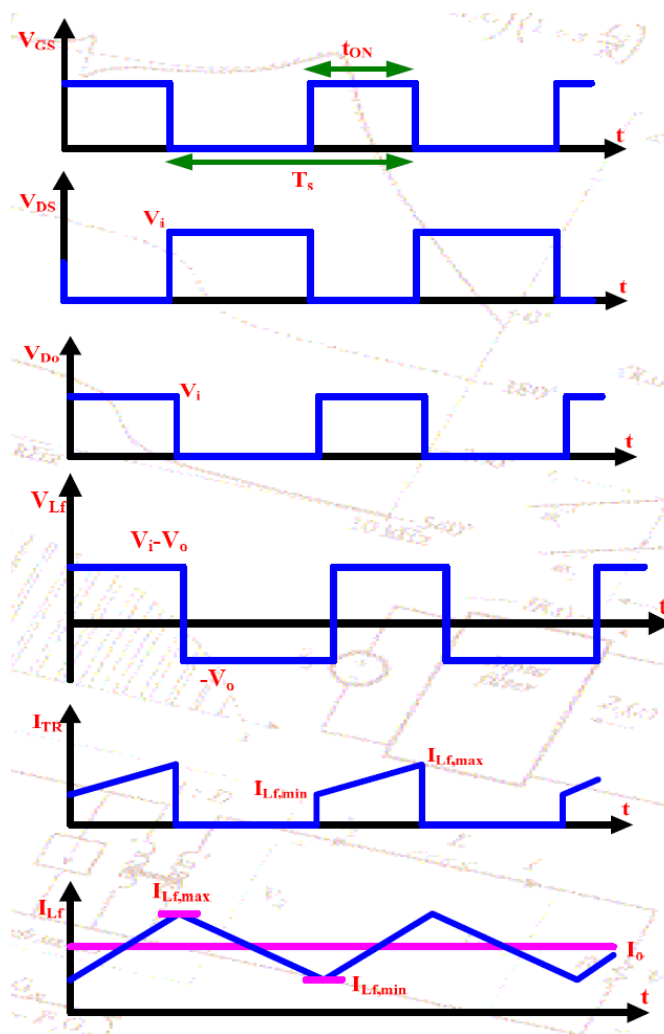
- Όταν το τρανζίστορ (τρανζίστορ τύπου MOSFET στο συγκεκριμένο σχηματικό) άγει, η ενέργεια μεταφέρεται απ' ευθείας από την είσοδο στην έξοδο και συγχρόνως ένα τμήμα της αποθηκεύεται στην επαγωγή L_f . Η διόδος D_o (δίοδος ελεύθερης διέλευσης) πολώνεται αναστροφα (από την τάση εισόδου V_i) και δεν άγει. Το ισοδύναμο κύκλωμα για την κατάσταση αυτή φαίνεται στο Σχ. 4.3α.
- Όταν το τρανζίστορ δεν άγει, η επαγωγή L_f τείνει να διατηρήσει το ρεύμα στην ίδια κατεύθυνση (ενεργώντας ως πηγή ρεύματος). Επομένως η διαφορά δυναμικού στα άκρα της επαγωγής αυτής αναστρέφεται και η διόδος ελεύθερης διέλευσης D_o άγει. Το ισοδύναμο κύκλωμα για την κατάσταση αυτή φαίνεται στο Σχ. 4.3β.

Η τιμή της τάσης εξόδου V_o μπορεί, πρακτικά, να μεταβληθεί, μεταβάλλοντας το χρόνο αγωγής t_{on} του ημιαγωγικού στοιχείου και διατηρώντας σταθερή τη διακοπτική περίοδο λειτουργίας T_S (Pulse Width Modulation – P.W.M.), μεταβάλλοντας δηλαδή το λόγο κατάτμησης δ .

Ανάλογα με το αν ρέει συνεχώς ή όχι ρεύμα δια μέσω του πηνίου εξομάλυνσης L_f , μπορούν να εμφανισθούν δύο περιπτώσεις λειτουργίας:

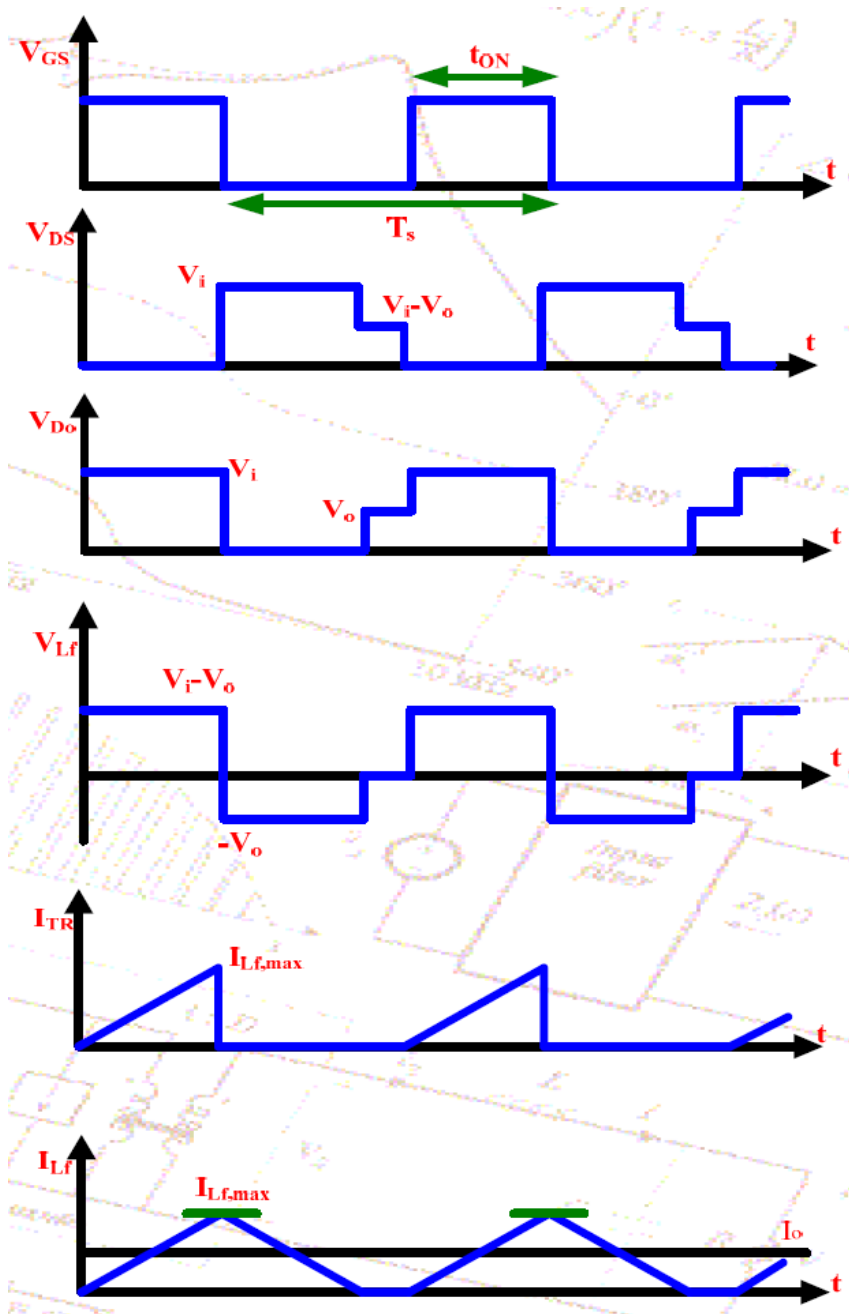
1. Το ρεύμα I_L , που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης L_f , να μην έχει μηδενισθεί όταν το τρανζίστορ ανάψει και πάλι. Αυτό σημαίνει ότι το πηνίο εξομάλυνσης διαρρέεται από ρεύμα καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου. Στην περίπτωση αυτή βρισκόμαστε στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής – Continuous Conduction Mode (CCM).
2. Το ρεύμα I_L , που διαρρέει το πηνίο εξομάλυνσης L_f , να είναι ασυνεχές, δηλαδή να μηδενίζεται για κάποιο χρονικό διάστημα (προφανώς όταν το τρανζίστορ είναι σε κατάσταση αποκοπής). Στην περίπτωση αυτή βρισκόμαστε στην περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής - Discontinuous Conduction Mode (DCM).

Όπως θα γίνει κατανοητό και παρακάτω, η επιλογή της τιμής της επαγωγής είναι αυτή που καθορίζει σε ποια περίπτωση αγωγής θα λειτουργεί ο μετατροπέας. Η λειτουργία στην συνεχή αγωγή απαιτεί τη χρήση πηνίου μεγαλύτερης τιμής επαγωγής από την λειτουργία σε ασυνεχή αγωγή, στην οποία έχουμε σχετικά μικρές τιμές πηνίων.



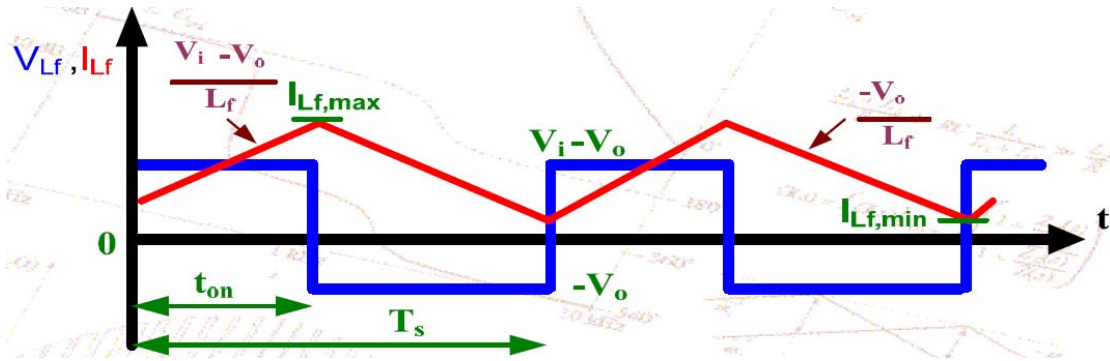
Σχήμα 4.4 Θεωρητικές κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του μετατροπέα τύπου buck για τη συνεχή αγωγή [48].

Στα Σχ. 4.4 και 4.5 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος, που αντιστοιχούν στην ιδανική λειτουργία του μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ τύπου buck, σε μόνιμη κατάσταση (steady – state) λειτουργίας, για τη συνεχή και για την ασυνεχή αγωγή αντίστοιχα.



Σχήμα 4.5 Θεωρητικές κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του μετατροπέα τύπου buck για την ασυνεχή αγωγή [48].

Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του μετατροπέα τύπου buck βασίζονται στη λογική της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας, γεγονός που σημαίνει ότι η μέση τιμή της τάσης στο πηνίο εξομάλυνσης είναι μηδενική. Οι εξισώσεις που παρατίθενται στη συνέχεια δίνουν την τάση και το ρεύμα στην έξοδο του μετατροπέα για τις δύο περιπτώσεις αγωγής, τη συνεχή και την ασυνεχή καθώς και το όριο μετάβασης από τη μία στην άλλη κατάσταση.



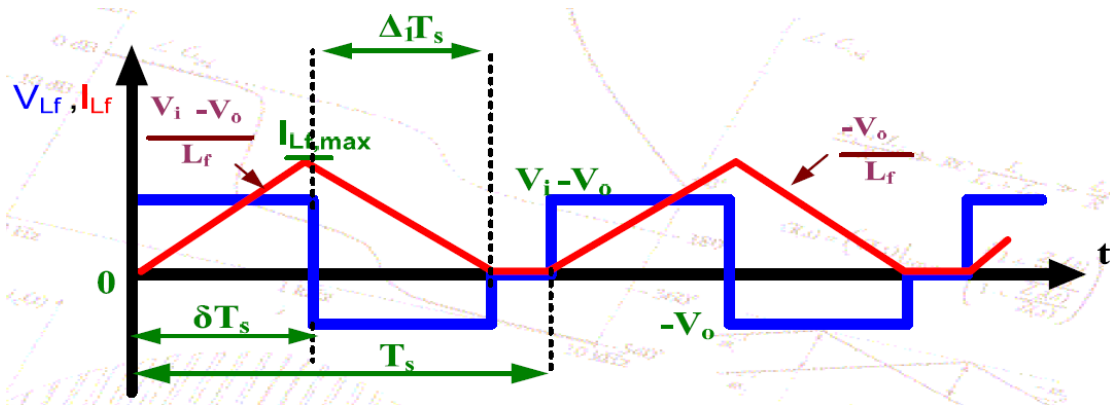
Σχήμα 4.6 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για τη συνεχή αγωγή [48].

Για τη συνεχή αγωγή (Σχ. 4.6) ισχύουν οι εξισώσεις [48]:

$$V_o = \delta \cdot V_i \quad (4.2)$$

$$I_o = \frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2} \quad (4.3)$$

$$I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_i - V_o}{L_f} \cdot \delta \cdot T_s = \frac{V_o}{L_f} \cdot (1 - \delta) \cdot T_s \quad (4.4)$$



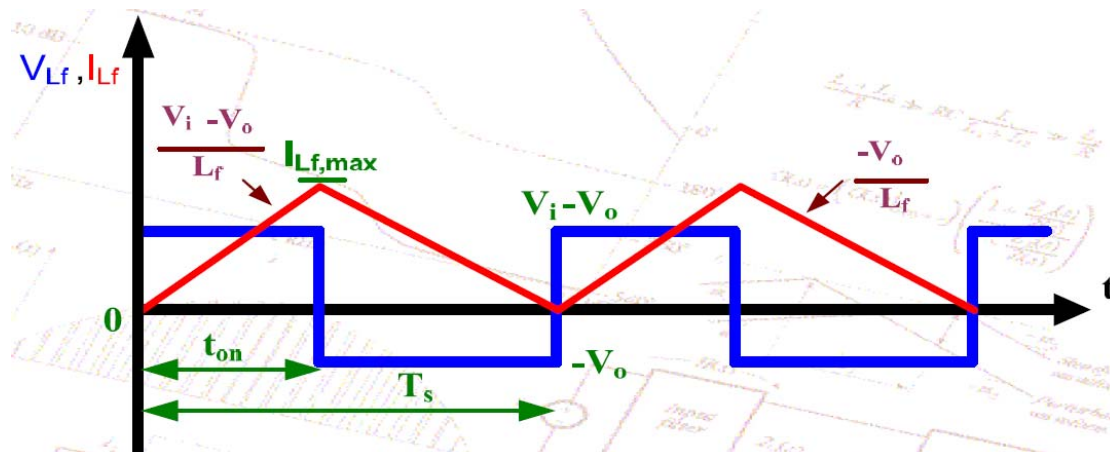
Σχήμα 4.7 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για την ασυνεχή αγωγή [48].

Για την ασυνεχή αγωγή (Σχ. 4.7) ισχύει η εξίσωση [48]:

$$V_o = V_i \cdot \frac{\delta^2}{2} \cdot \frac{1}{\frac{\delta^2}{2} + \frac{I_o}{\left(\frac{V_i \cdot T_s}{L_f}\right)}} \quad (4.5)$$

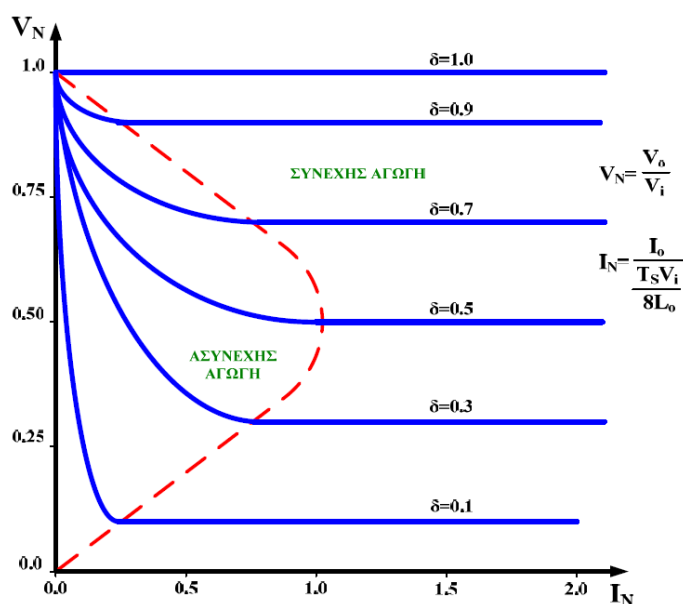
Για το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής (Σχ. 4.8) ισχύει η εξίσωση [48]:

$$I_{o,b} = \frac{V_i - V_o}{L_f} \cdot \frac{\delta \cdot T_s}{2} = \frac{\delta \cdot (1 - \delta)}{2} \cdot \frac{V_i \cdot T_s}{L_f}, V_i = \text{const.} \quad (4.6)$$

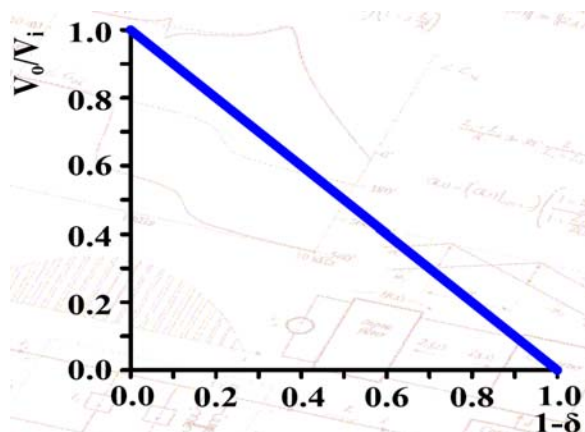


Σχήμα 4.8 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής [48].

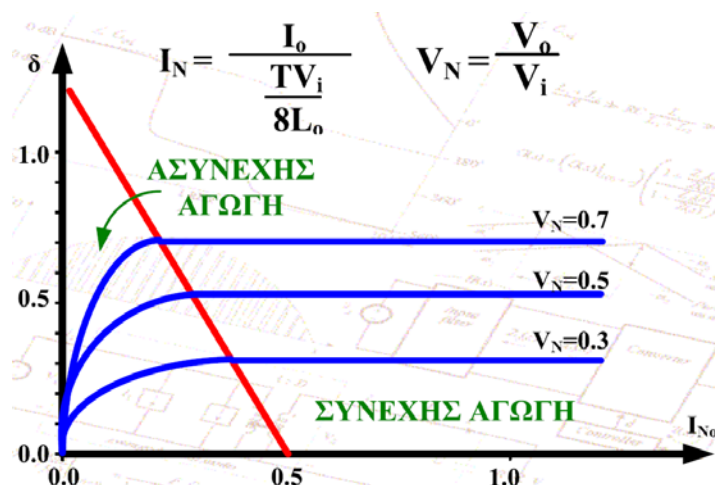
Στο Σχ. 4.8 παρατηρούμε ότι η επιλογή της τιμής της επαγωγής είναι αυτή που καθορίζει σε ποια περίπτωση αγωγής θα λειτουργεί ο μετατροπέας. Για επιλογή μεγαλύτερης τιμής επαγωγής, μειώνεται η κλίση της κυματομορφής του ρεύματος του πηνίου, οπότε το ρεύμα ξεπερνάει το όριο και ο μετατροπέας λειτουργεί στη συνεχή αγωγή. Για επιλογή μικρότερης τιμής επαγωγής, αυξάνεται η κλίση της κυματομορφής του ρεύματος του πηνίου, οπότε το ρεύμα μηδενίζεται σε κάποια σημεία, άρα ο μετατροπέας λειτουργεί στην ασυνεχή αγωγή. Από την Εξ. (4.6) λύνοντας ως προς L_f , για συγκεκριμένο ρεύμα εξόδου υπολογίζουμε την τιμή πηνίου για την οποία ο μετατροπέας λειτουργεί στο όριο (με τον δείκτη b να υποδηλώνει το όριο – boundary). Επιλέγοντας μεγαλύτερη τιμή έχουμε λειτουργία σε συνεχή αγωγή και για μικρότερη στην ασυνεχή. Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν οι χαρακτηριστικές εξόδου του μετατροπέα που φαίνονται στα τρία σχήματα που ακολουθούν (Σχ. 4.9 – 4.11). Μία παρατήρηση σχετικά με την κλίση των χαρακτηριστικών του μετατροπέα στη συνεχή αγωγή (Σχ. 4.9) είναι ότι επειδή όλα τα στοιχεία του κυκλώματος έχουν θεωρηθεί ιδανικά, η κλίση αυτή είναι μηδενική. Στην πράξη όμως υπεισέρχονται κάποιες απώλειες στα διάφορα μη ιδανικά στοιχεία, άρα και μία αρνητική κλίση στις χαρακτηριστικές της τάξης του 10 %.



Σχήμα 4.9 Χαρακτηριστικές εξόδου μετατροπέα τύπου buck για $V_i =$ σταθερή [47].



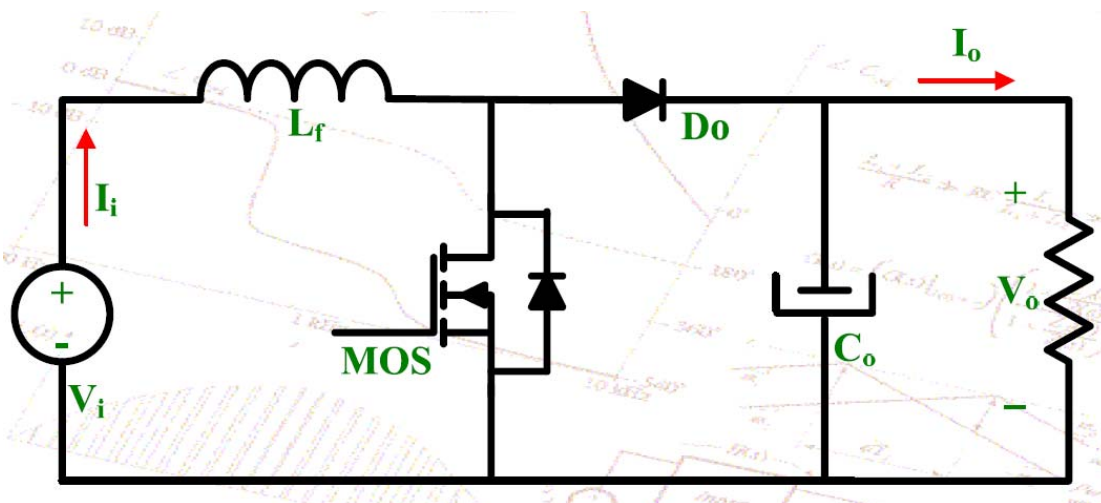
Σχήμα 4.10 Χαρακτηριστική εξόδου μετατροπέα τύπου buck στη συνεχή αγωγή [48].



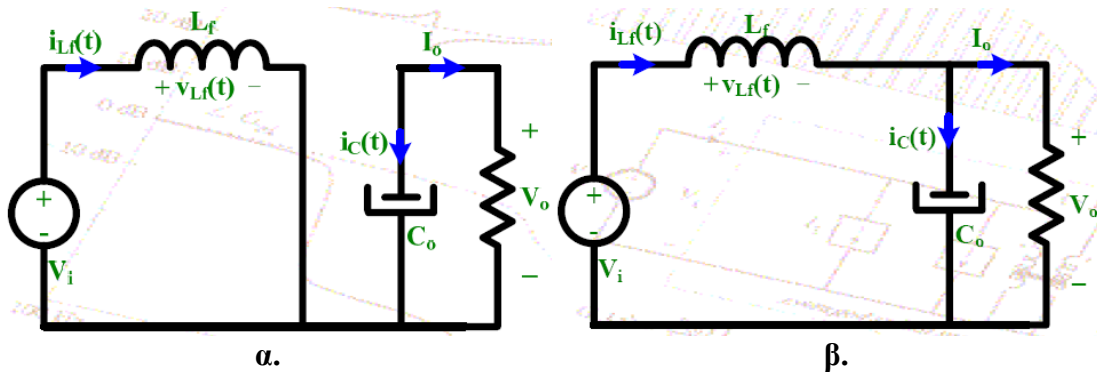
Σχήμα 4.11 Χαρακτηριστικές εξόδου μετατροπέα τύπου buck για $V_o =$ σταθερή [48].

4.2.2 Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης σε συνεχή τύπου boost

Στο Σχ. 4.12 φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα του ηλεκτρονικού μετατροπέα ανύψωσης τάσης τύπου boost. Ισχύουν και εδώ οι ίδιες παραδοχές που έγιναν και στη θεωρητική ανάλυση του μετατροπέα buck.



Σχήμα 4.12 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα τύπου boost [48].

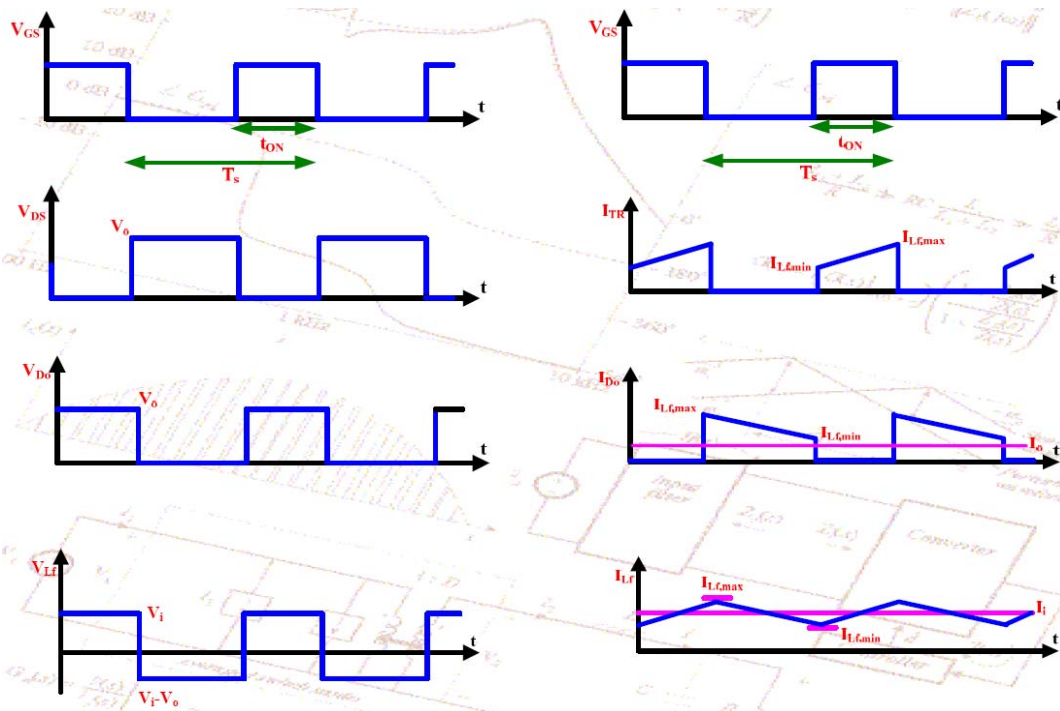


Σχήμα 4.13 Οι δύο καταστάσεις λειτουργίας του μετατροπέα τύπου boost, α. το τρανζίστορ άγει, β. το τρανζίστορ δεν άγει [48].

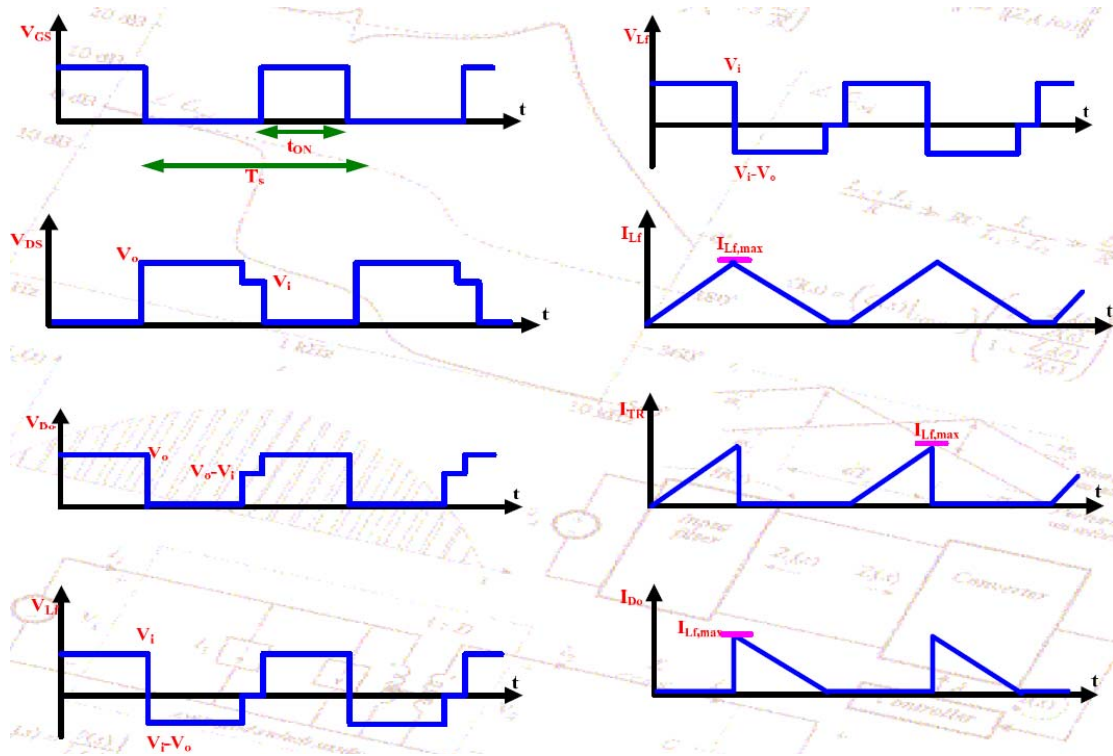
Όπως υποδηλώνει το όνομα του μετατροπέα, η τάση εξόδου είναι πάντα μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Η λειτουργία της τοπολογίας αυτής, σε μόνιμη κατάσταση, συνοψίζεται ως εξής:

- Όταν το τρανζίστορ άγει, αποθηκεύεται ενέργεια στην επαγωγή. Η διόδος ελεύθερης διέλευσης πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει, απομονώνοντας τη βαθμίδα εξόδου (βλ. Σχ. 4.13α).
- Όταν το τρανζίστορ δεν άγει, η βαθμίδα εξόδου απορροφά ενέργεια από την επαγωγή και από την είσοδο. Η διαφορά δυναμικού στα άκρα της επαγωγής αυτής αναστρέφεται και η διόδος άγει (βλ. Σχ. 4.13β).

Στα Σχ. 4.14 και 4.15 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος, που αντιστοιχούν στην ιδανική λειτουργία του μετατροπέα boost για τη συνεχή και ασυνεχή αγωγή αντίστοιχα.

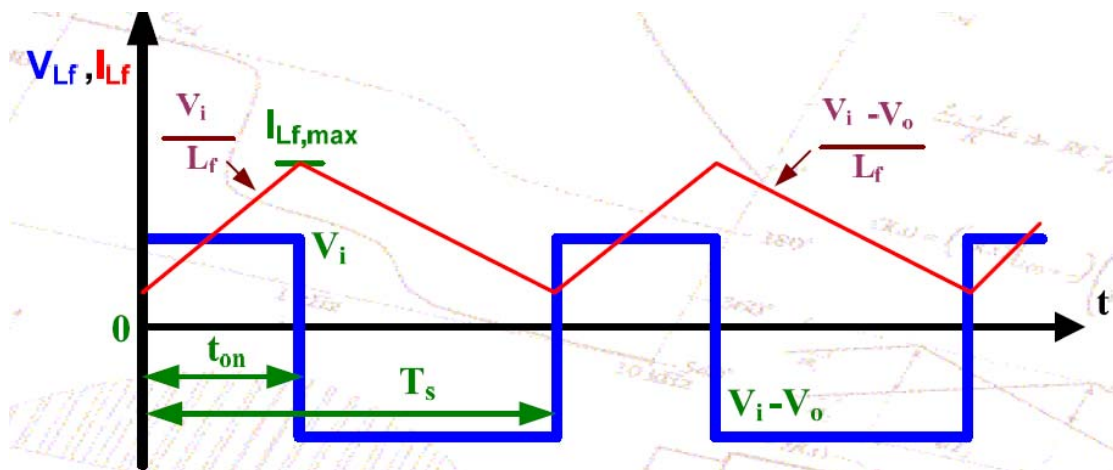


Σχήμα 4.14 Θεωρητικές κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του μετατροπέα τύπου boost για τη συνεχή αγωγή [48].



Σχήμα 4.15 Θεωρητικές κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του μετατροπέα τύπου boost για την ασυνεχή αγωγή [48].

Όπως και στο μετατροπέα τύπου buck, έτσι και εδώ, η ασυνεχής και συνεχής αγωγή έχει να κάνει με το αν υπάρχουν ή όχι διαστήματα μηδενισμού στο ρεύμα του πηνίου L_f αντίστοιχα. Προσοχή το πηνίο L_f τώρα βρίσκεται στην είσοδο του μετατροπέα, οπότε η μέση του τιμή θα αντιστοιχεί στο μέσο ρεύμα εισόδου. Το μέσο ρεύμα εξόδου, όπως είναι φυσικό, θα ισούται με τη μέση τιμή του ρεύματος της διόδου ελεύθερης διέλευσης



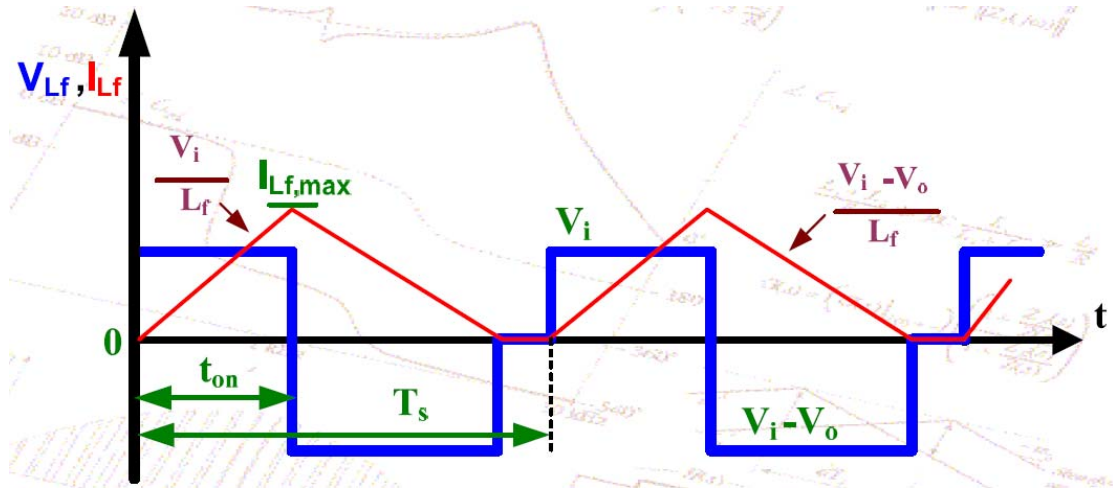
Σχήμα 4.16 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για τη συνεχή αγωγή [48].

Για τη συνεχή αγωγή (Σχ. 4.16) ισχύουν οι εξισώσεις [48]:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - \delta} \tag{4.7}$$

$$I_i = \frac{(I_{L,max} + I_{L,min})}{2} \quad (4.8)$$

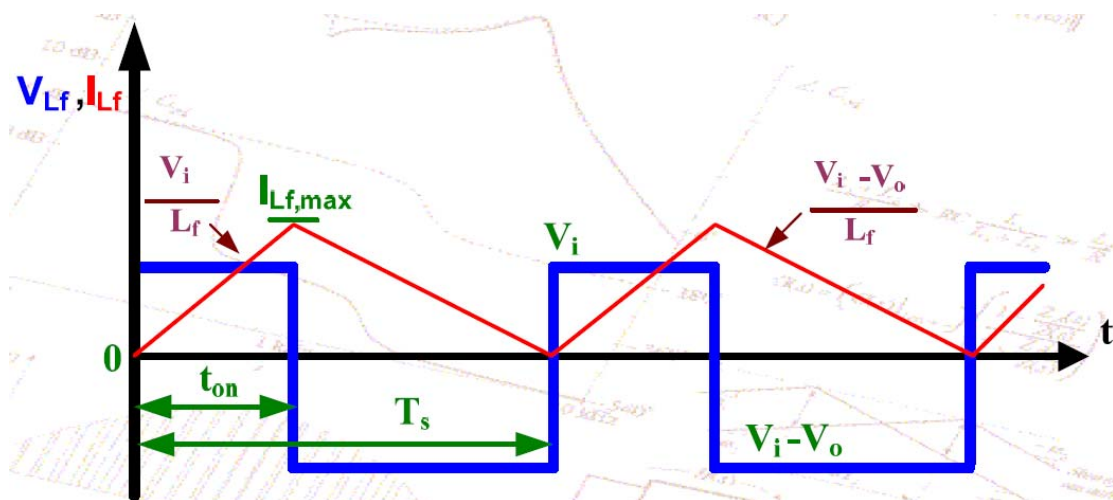
$$I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_i}{L_f} \cdot \delta \cdot T_s = \frac{V_o - V_i}{L_f} \cdot (1 - \delta) \cdot T_s \quad (4.9)$$



Σχήμα 4.17 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για την ασυνεχή αγωγή [48].

Για την ασυνεχή αγωγή (Σχ. 4.17) ισχύει η εξίσωση [48]:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{2 \frac{I_o}{\left(\frac{V_i \cdot T_s}{L_f}\right)} + \delta^2}{2 \frac{I_o}{\left(\frac{V_i \cdot T_s}{L_f}\right)}} \quad (4.10)$$



Σχήμα 4.18 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής [48].

Για το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής (Σχ. 4.18) ισχύουν οι εξισώσεις [48], [49]:

$$I_{L,b} = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} I_L dt = \frac{1}{T_S} \frac{T_S \cdot I_{L,max}}{2} = \frac{1}{2} I_{L,max} = \frac{1}{2} \frac{V_i}{L_f} \cdot t_{on} \Rightarrow \quad (4.11)$$

$$I_{L,b} = \frac{1}{2} \frac{V_i}{L_f} \delta T_S = \frac{T_S \cdot V_o}{2L_f} \delta \cdot (1-\delta)$$

Οπότε για μηδενικές απώλειες και από την εξίσωση (4.7) ισχύει:

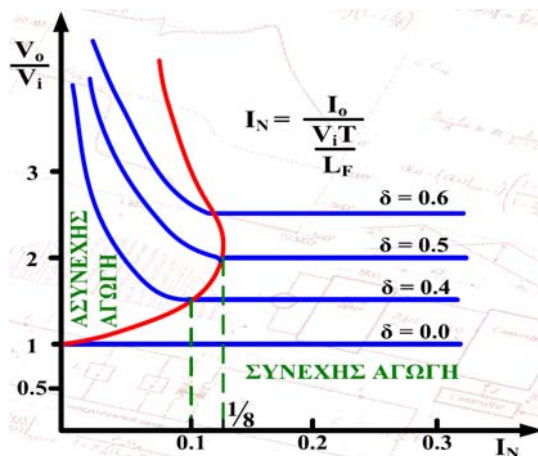
$$P_i = P_o \Rightarrow V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o \Rightarrow \frac{I_i}{I_o} = \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow \frac{I_i}{I_o} = \frac{1}{1-\delta} \quad (4.12)$$

Άρα, υπολογίζεται το μέσο ρεύμα εξόδου στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής για τον μετατροπέα boost:

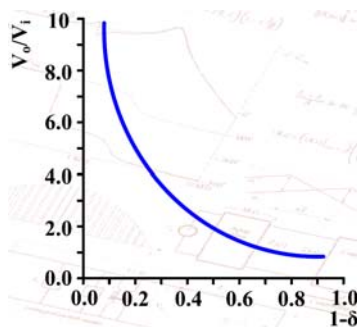
$$I_i = I_L \Rightarrow I_L = \frac{I_o}{1-\delta} \Rightarrow I_o = I_L \cdot (1-\delta) \Rightarrow \quad (4.13)$$

$$I_{o,b} = \frac{T_S \cdot V_o}{2L_f} \delta \cdot (1-\delta)^2 = \frac{T_S \cdot V_i}{2L_f} \delta \cdot (1-\delta), V_i = \text{const.}$$

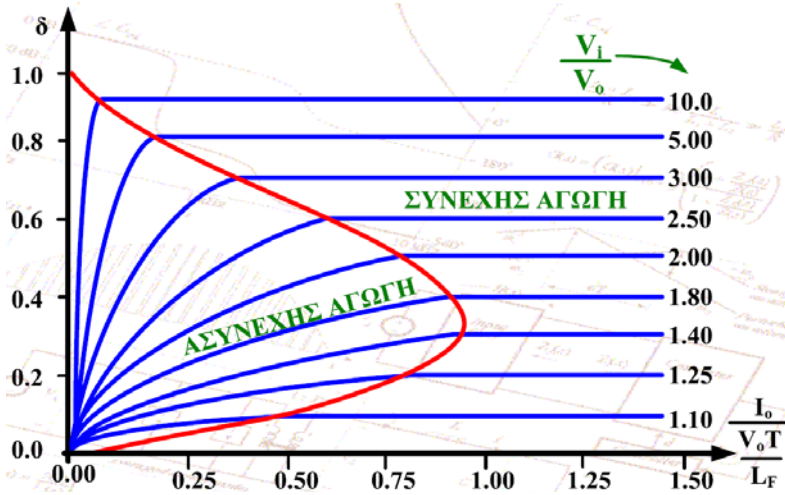
Παρακάτω στα Σχ. 4.19 – 4.21 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές εξόδου του μετατροπέα boost.



Σχήμα 4.19 Χαρακτηριστικές εξόδου μετατροπέα τύπου boost για $V_i = \text{σταθερή}$ [48].

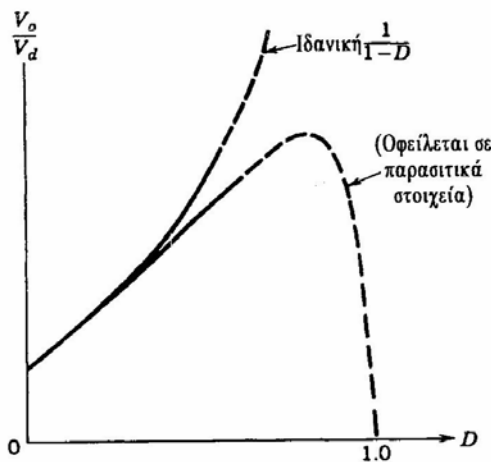


Σχήμα 4.20 Χαρακτηριστική εξόδου μετατροπέα τύπου boost στη συνεχή αγωγή [48].



Σχήμα 4.21 Χαρακτηριστικές εξόδου μετατροπέα τύπου boost για $V_o = \text{σταθερή}$ [48].

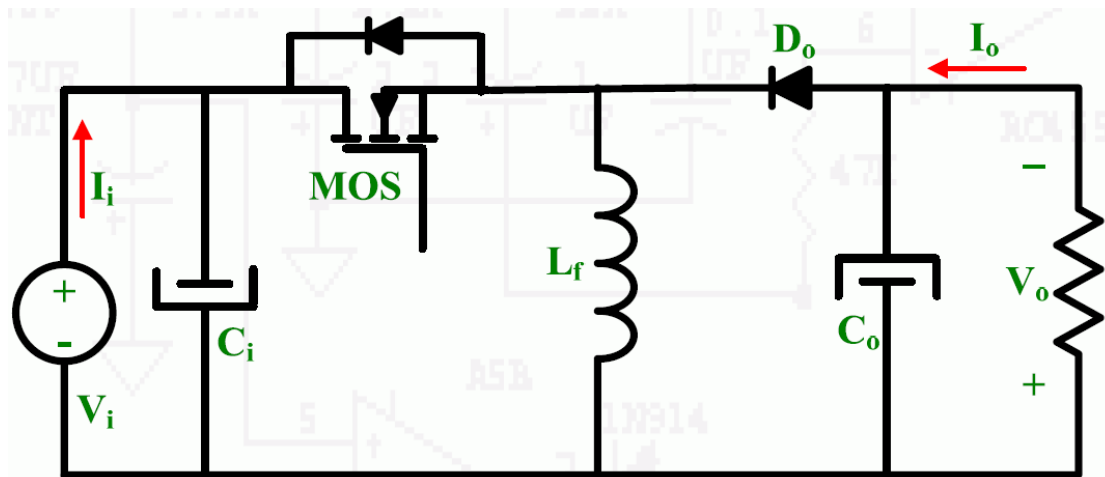
Στην παραπάνω ανάλυση θεωρήθηκαν ιδανικά τα στοιχεία του κυκλώματος. Όμως, είναι σημαντικό να σημειωθεί, ότι στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης τα διάφορα παρασιτικά στοιχεία που σχετίζονται με το πηνίο, τον πυκνωτή, το τρανζίστορ και τη δίοδο διαφοροποιούν την ιδανική λειτουργία του μετατροπέα. Στο Σχ. 4.22 φαίνεται ποιοτικά η επίδραση αυτών των παρασιτικών στοιχείων στο λόγο της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου. Αντίθετα με την ιδανική χαρακτηριστική, στην πράξη ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου (V_o/V_d) μειώνεται, καθώς ο λόγος κατάτμησης D (ή δ σύμφωνα με τον συμβολισμό που χρησιμοποιείται εδώ) πλησιάζει τη μονάδα. Εξ' αιτίας της πολύ μικρής αξιοποίησης του διακόπτη (τρανζίστορ) στις μεγάλες τιμές του λόγου κατάτμησης D (ή δ), οι καμπύλες στην περιοχή αυτή σημειώνονται με διακεκομμένες γραμμές. Σε αυτές τις μεγάλες τιμές του λόγου κατάτμησης, δηλ. πάνω από 0,6 – 0,7 η συνδυασμένη επίδραση παρασιτικών στοιχείων και υψηλών απωλειών στα ημιαγωγικά στοιχεία καθιστά ανέφικτη την λειτουργία του μετατροπέα στην περιοχή αυτή. Οπότε, βάσει της σημερινής τεχνολογίας ημιαγωγικών στοιχείων, ο λόγος ενίσχυσης της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου, σύμφωνα με την εξίσωση (4.7), δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από περίπου 3.



Σχήμα 4.22 Ποιοτική μεταβολή του λόγου της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου σε σχέση με το λόγο κατάτμησης D στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης – Επίδραση των παρασιτικών στοιχείων [49].

4.2.3 Μετατροπέας υποβιβασμού – ανύψωσης συνεχούς τάσης σε συνεχή τύπου buck – boost

Στο Σχ. 4.23 φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα του ηλεκτρονικού μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης τύπου buck-boost.



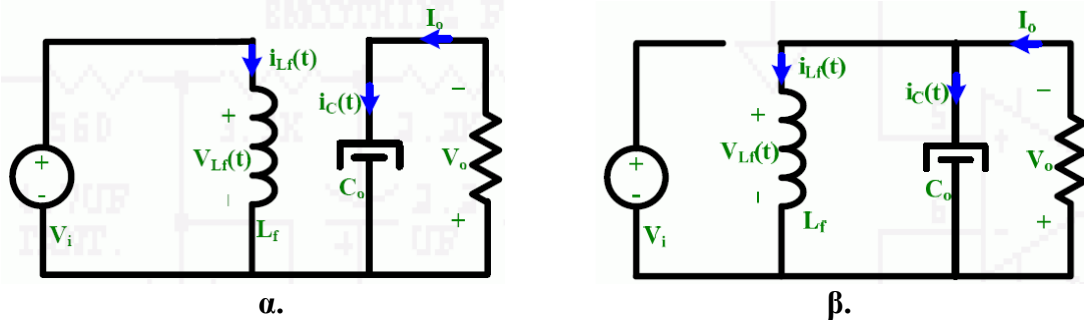
Σχήμα 4.23 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα τύπου buck-boost [48].

Ένας μικτός μετατροπέας ΣΤ-ΣΤ μπορεί να σχηματιστεί με τη σύνδεση στη σειρά των δύο βασικών μετατροπέων ΣΤ-ΣΤ, του μετατροπέα υποβιβασμού και του μετατροπέα ανύψωσης. Στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας και για συνεχή αγωγή, ο λόγος μετατροπής της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου, είναι το γινόμενο των λόγων μετατροπής των δύο μετατροπέων που είναι συνδεδεμένοι στη σειρά (θεωρώντας ότι οι διακόπτες και των δύο μετατροπέων έχουν τον ίδιο λόγο κατάτμησης δ):

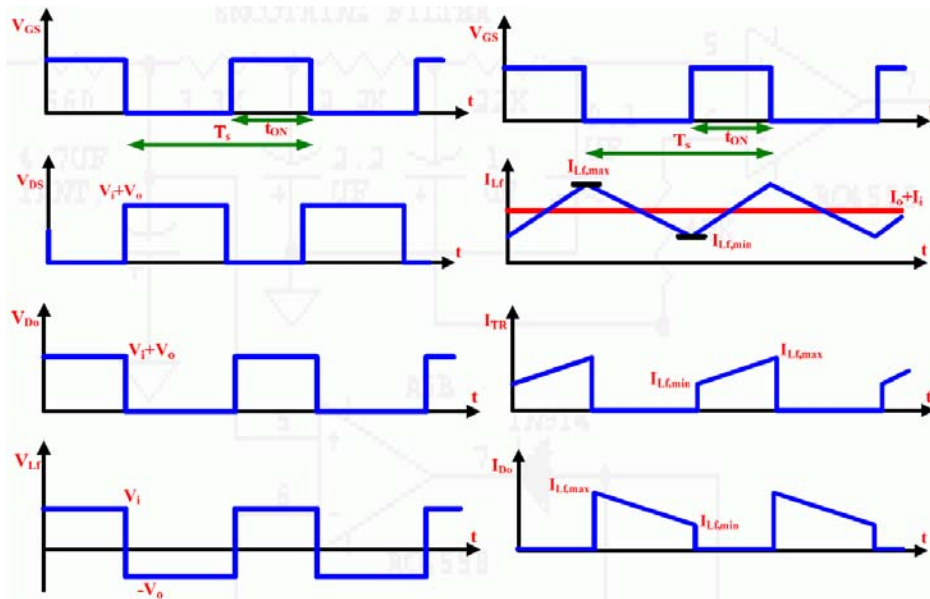
$$\frac{V_o}{V_i} = \delta \frac{1}{1-\delta} \quad (4.14)$$

Αυτό επιτρέπει στην τάση εξόδου να είναι υψηλότερη ($\delta > 0,5$) ή χαμηλότερη ($\delta < 0,5$) από την τάση εισόδου, ανάλογα με την τιμή του λόγου δ. Συνδυασμός των δύο βασικών τοπολογιών μετατροπέων υποβιβασμού και ανύψωσης οδηγεί στον ενιαίο μικτό μετατροπέα (βλ. Σχ. 4.23). Η λειτουργία της τοπολογίας αυτής, σε μόνιμη κατάσταση, συνοψίζεται ως εξής:

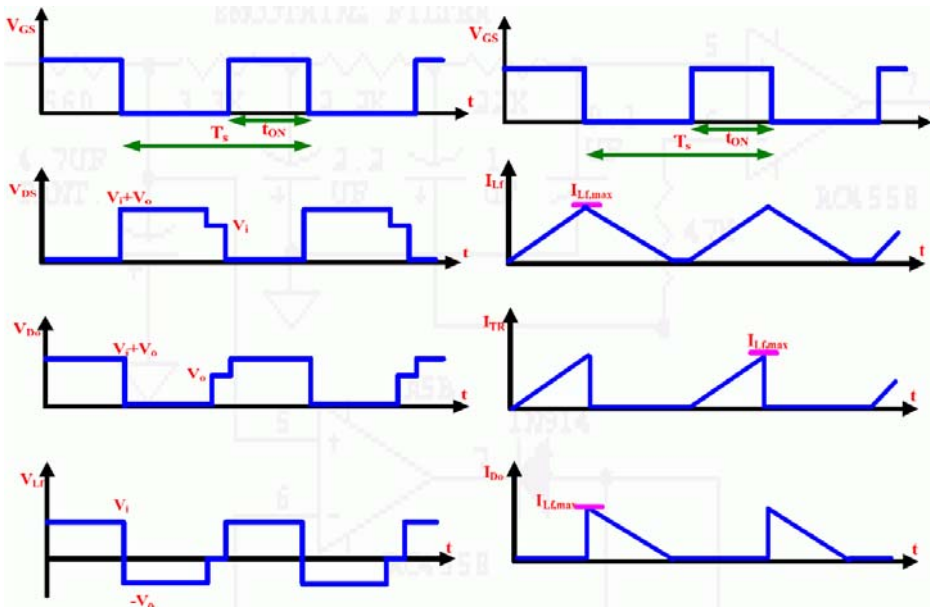
- Όταν το τρανζίστορ άγει η είσοδος παρέχει ενέργεια στην αυτεπαγωγή. Η διόδος ελεύθερης διέλευσης πολώνεται ανάστροφα και δεν άγει (βλ. Σχ. 4.24α).
- Όταν το τρανζίστορ δεν άγει, η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στην αυτεπαγωγή μεταφέρεται στη έξοδο. Σε αυτό το χρονικό διάστημα δεν παρέχεται ενέργεια από την είσοδο (βλ. Σχ. 4.24β).



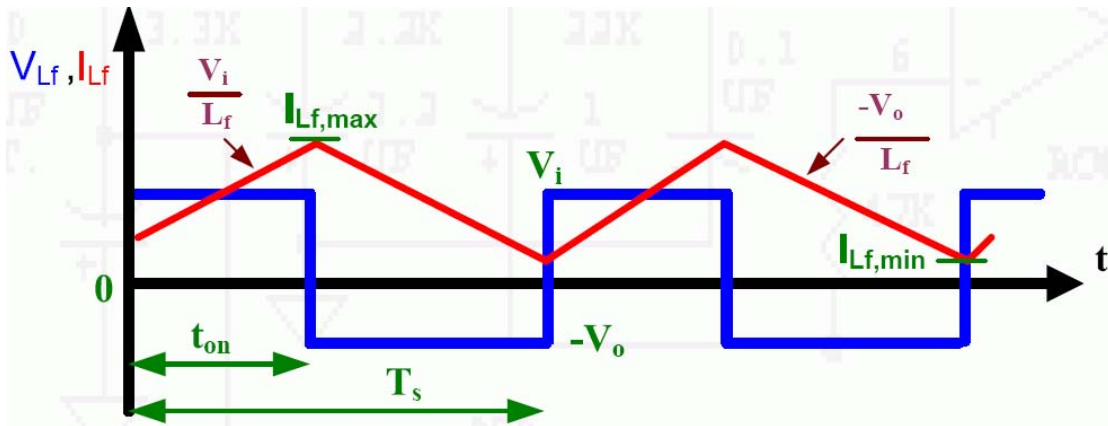
Σχήμα 4.24 Οι δύο καταστάσεις λειτουργίας του μετατροπέα τύπου buck-boost, α. το τρανζίστορ άγει, β. το τρανζίστορ δεν άγει [48].



Σχήμα 4.25 Θεωρητικές κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του μετατροπέα τύπου buck-boost για τη συνεχή αγωγή [48].



Σχήμα 4.26 Θεωρητικές κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του μετατροπέα τύπου buck-boost για την ασυνεχή αγωγή [48].



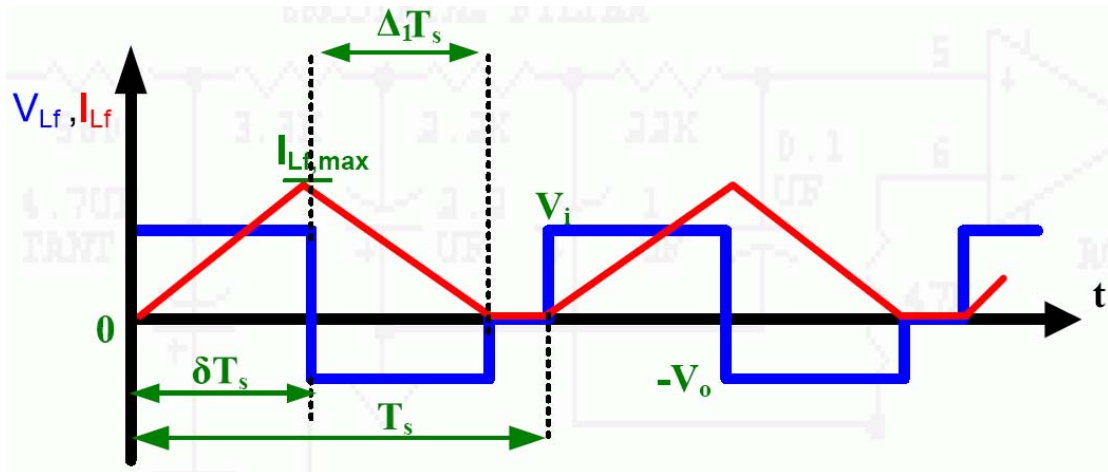
Σχήμα 4.27 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για τη συνεχή αγωγή [48].

Για τη συνεχή αγωγή (Σχ. 4.27) ισχύουν οι εξισώσεις [48]:

$$\frac{V_o}{V_i} = \delta \frac{1}{1-\delta} \quad (4.14)$$

$$I_o + I_i = \frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2} \quad (4.15)$$

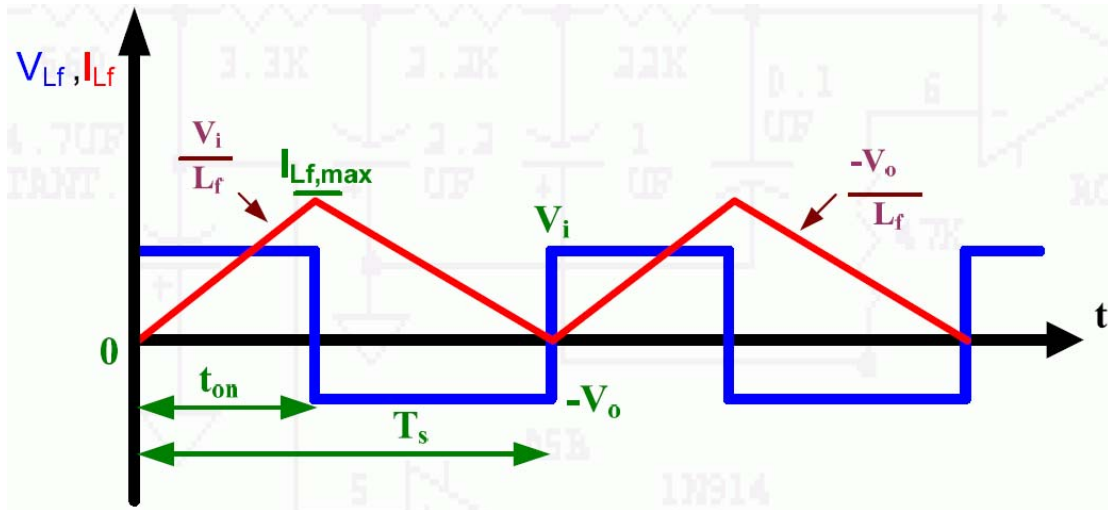
$$I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_i}{L_f} \delta \cdot T_s = \frac{V_o}{L_f} (1-\delta) \cdot T_s \quad (4.16)$$



Σχήμα 4.28 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για την ασυνεχή αγωγή [48].

Για την ασυνεχή αγωγή (Σχ. 4.28) ισχύει η εξίσωση [48]:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\delta^2}{2 \left(\frac{I_o}{V_i \cdot T_s / L_f} \right)} \quad (4.17)$$



Σχήμα 4.29 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής [48].

Για το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής (Σχ. 4.29) ισχύουν [48], [49]:

$$I_{L,b} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} I_L dt = \frac{1}{T_s} \cdot T_s \cdot \frac{I_{L,max}}{2} = \frac{1}{2} I_{L,max} = \frac{1}{2} \frac{V_i}{L_f} \cdot t_{on} \Rightarrow I_{L,b} = \frac{1}{2} \frac{V_i \cdot T_s}{L_f} \delta \quad (4.18)$$

Στον μετατροπέα buck-boost ισχύουν:

$$P_i = P_o \Rightarrow V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o \Rightarrow \frac{I_i}{I_o} = \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow \frac{I_i}{I_o} = \frac{\delta}{1-\delta} \quad (4.19)$$

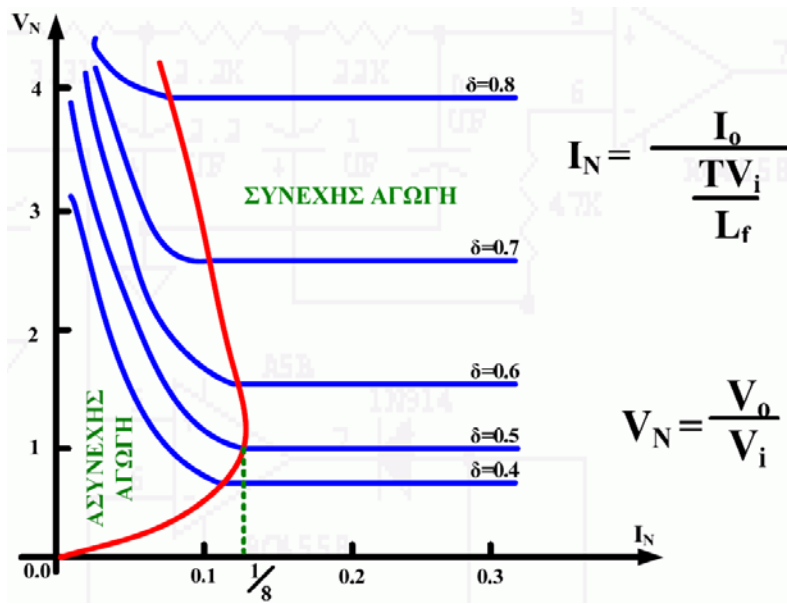
$$I_L = I_i + I_o \Rightarrow I_L = I_o \frac{\delta}{(1-\delta)} + I_o \Rightarrow I_L = \frac{I_o}{(1-\delta)} \Rightarrow I_o = I_L \cdot (1-\delta) \quad (4.20)$$

$$I_{o,b} = \frac{V_i \cdot T_s}{L_f} \frac{\delta \cdot (1-\delta)}{2} = \frac{V_o \cdot T_s}{2 \cdot L_f} \cdot (1-\delta)^2 \quad (4.21)$$

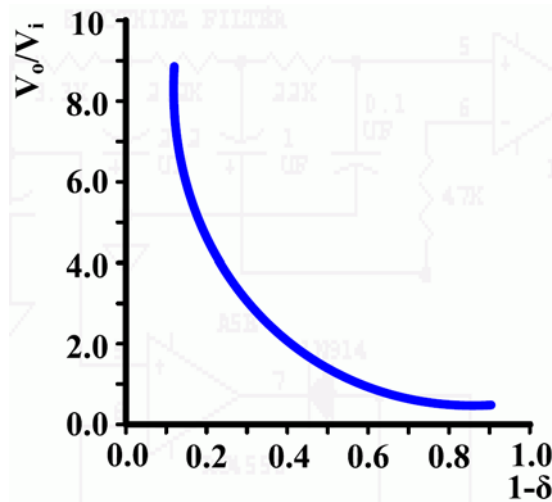
Όπως και στους βασικούς τύπους μετατροπέων, έτσι και εδώ, η ασυνεχής και η συνεχής αγωγή έχει να κάνει με το αν υπάρχουν ή όχι διαστήματα μηδενισμού στο ρεύμα του πηνίου L_f αντίστοιχα. Το μέσο ρεύμα του πηνίου L_f ισούται με το άθροισμα των μέσων τιμών των ρευμάτων εισόδου (μέσο ρεύμα τρανζίστορ) και εξόδου (μέση τιμή του ρεύματος της διόδου ελεύθερης διέλευσης) (βλ. και Εξ. 4.20).

Στα Σχ. 4.30 έως 4.32 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές εξόδου του μετατροπέα buck-boost.

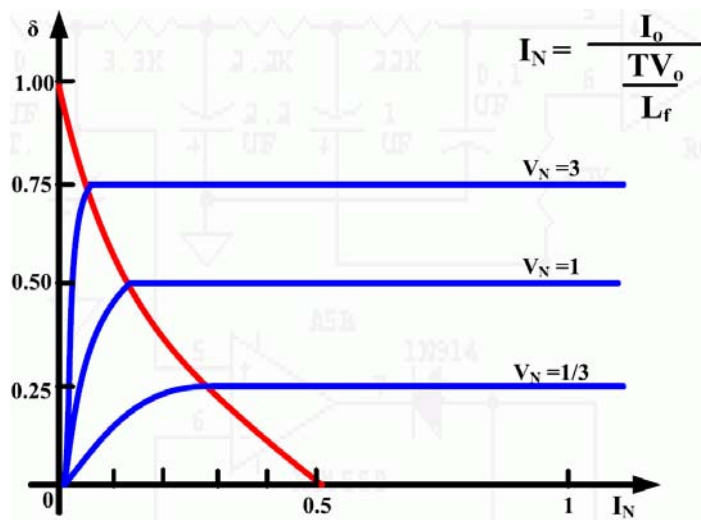
Στο Σχ. 4.33 φαίνεται η σημαντική επίδραση των παρασιτικών στοιχείων στον μετατροπέα buck-boost όπου πάλι περιορίζεται η ανύψωση της τάσης κατά τη λειτουργία του μετατροπέα buck-boost ως boost ($0,5 < \delta < 0,6-0,7$). Οι διακεκομμένες καμπύλες σημειώνουν την περιοχή της πολύ μικρής αξιοποίησης του διακόπτη, όπου οι μεγάλοι λόγοι κατάτμησης D (ή δ) καθίστανται μη υλοποιήσιμοι.



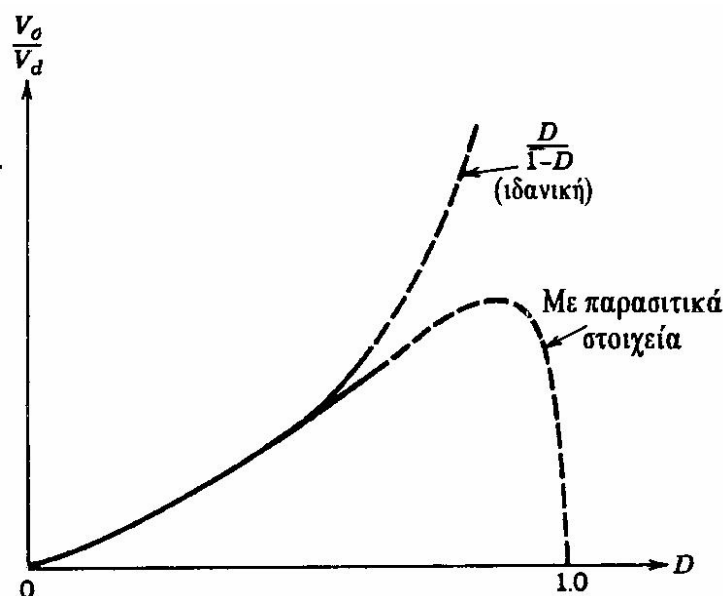
Σχήμα 4.30 Χαρακτηριστικές εξόδου μετατροπέα τύπου buck-boost για $V_i =$ σταθερή [48].



Σχήμα 4.31 Χαρακτηριστική εξόδου μετατροπέα τύπου buck-boost στη συνεχή αγωγή [48].



Σχήμα 4.32 Χαρακτηριστικές εξόδου μετατροπέα τύπου buck-boost για $V_o =$ σταθερή [48].



Σχήμα 4.33 Ποιοτική μεταβολή του λόγου της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου σε σχέση με το λόγο κατάτμησης D στον μικτό μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης – Επίδραση των παρασιτικών στοιχείων [49].

4.3 Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης που θεωρείται στην παρούσα εργασία είναι κινητήρας συνεχούς ρεύματος. Όμως για λόγους πληρότητας σχετικά με τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος που βρίσκουν εφαρμογή στα συστήματα κυψελών καυσίμου θα γίνει αναφορά και στους μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη.

4.3.1 Γενικά περί αντιστροφών

Το πρόβλημα της δημιουργίας μιας πηγής εναλλασσόμενης τάσης με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος προέκυψε πριν από πολλές δεκαετίες. Λύση στο πρόβλημα αυτό αποτελεί η μετατροπή μιας συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη, μονοφασική ή τριφασική, με τη βοήθεια ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, των λεγόμενων αντιστροφών (inverters) [9]. Οι αντιστροφείς έχουν εφαρμογές σε πολλές περιοχές, μερικές από τις οποίες είναι:

- Συστήματα αδιάκοπης παροχής ισχύος (UPS).
- Συστήματα ελέγχου στροφών ή ροπής ηλεκτρικών κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος.
- Συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας με επαγωγή.
- Συστήματα μετατροπής και ελέγχου της τάσης εξόδου συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι αντιστροφείς μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κυρίως κατηγορίες:

1. Στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας (με δύο ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία) ή σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (με τέσσερα ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία).
2. Στους τριφασικούς αντιστροφείς (με έξι ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία).

Επίσης κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες μπορεί να υποδιαιρεθεί στις εξής δύο κατηγορίες:

1. Στους αντιστροφείς που λειτουργούν ως πηγές ρεύματος (CSI, Current Source Inverters)
2. Στους αντιστροφείς που λειτουργούν ως πηγές τάσης (VSI, Voltage Source Inverters)

Οι αντιστροφείς που θα εξετασθούν στη συνέχεια και οι οποίοι έχουν τις περισσότερες εφαρμογές στην πράξη είναι αυτοί που λειτουργούν ως πηγές τάσης, τροφοδοτούμενοι από μια πηγή συνεχούς τάσης.

Η συνεχής τάση που τροφοδοτεί έναν αντιστροφέα μπορεί να προέρχεται από ένα συσσωρευτή. Ωστόσο στις περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές παρέχεται από ένα ανορθωτικό σύστημα, που αποτελείται είτε από διόδους είτε από θυρίστορ. Η ανορθωμένη τάση σταθεροποιείται με τη βοήθεια ηλεκτρολυτικών πυκνωτών μεγάλης χωρητικότητας, οι οποίοι συνδέονται στους ακροδέκτες εισόδου του αντιστροφέα.

Ως ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία των οποίων ελέγχεται μόνο η έναυση (π.χ. θυρίστορ) ή στοιχεία των οποίων ελέγχεται τόσο η έναυση όσο και η σβέση (π.χ. διάφορα τρανζίστορ όπως BJT, MOSFET, IGBT, GTO θυρίστορ ή MCT). Ιδιαίτερο γνώρισμα των αντιστροφέων με θυρίστορ είναι η αναγκαιότητα ύπαρξης κυκλώματος εξαναγκασμένης σβέσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τρανζίστορ ισχύος η σβέση του διακοπτικού στοιχείου επιτυγχάνεται από το ηλεκτρόδιο ελέγχου του, με άμεσο αποτέλεσμα το κύκλωμα ισχύος του μετατροφέα να απλοποιείται σημαντικά.

Η συχνότητα στην έξοδο του αντιστροφέα καθορίζεται από τον ρυθμό έναυσης και σβέσης των ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων και επομένως παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης αυτής μέσω του κυκλώματος παλμοδότησης του αντιστροφέα. Όμως η διακοπτική λειτουργία του αντιστροφέα έχει, συνήθως, ως αποτέλεσμα μη ημιτονοειδείς κυματομορφές τάσης και ρεύματος στην έξοδο του. Το φίλτράρισμα των ανώτερων αρμονικών στην έξοδο του αντιστροφέα δεν είναι εύκολο, ειδικά στην περίπτωση κατά την οποία η συχνότητα των ανώτερων αρμονικών μεταβάλλεται και βρίσκεται κοντά στη συχνότητα της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το βάρος, ο όγκος και το κόστος του αντιστροφέα.

Ειδικότερα, σε περίπτωση τροφοδοσίας ενός κινητήρα εναλλασσομένου ρεύματος οι ανώτερες αρμονικές που παρουσιάζονται σε χαμηλές συχνότητες μπορούν να προκαλέσουν μηχανικές ταλαντώσεις στον άξονα του κινητήρα. Το γεγονός αυτό είναι ανεπιθύμητο σε οποιαδήποτε εφαρμογή. Επίσης έχει παρατηρηθεί πως, όσο υψηλότερα σε συχνότητα βρίσκονται οι ανώτερες αρμονικές τόσο πιο μικρός είναι

και ο θόρυβος που δημιουργεί ο ελεγχόμενος από τον αντιστροφέα κινητήρας εναλλασσομένου ρεύματος.

Για όλους τους παραπάνω λόγους η δημιουργία κυματομορφών με το μικρότερο δυνατό αρμονικό περιεχόμενο και ανώτερες αρμονικές που να εντοπίζονται σε όσο το δυνατό υψηλότερες συχνότητες, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους των κατασκευαστών βιομηχανικών αντιστροφών.

Μια επιπλέον απαίτηση που υπάρχει από έναν αντιστροφέα, όταν αυτός τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο (όπως π.χ. ο ασύγχρονος κινητήρας), είναι η τάση εξόδου του να μεταβάλλεται αναλογικά με τη συχνότητα της βασικής αρμονικής, έτσι ώστε να διατηρούνται οι κατάλληλες μαγνητικές συνθήκες στο φορτίο.

4.3.2 Ρύθμιση στροφών ασύγχρονου κινητήρα

Είναι γνωστό πως η χρήση του ασύγχρονου κινητήρα στα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα είναι ευρύτατα διαδεδομένη λόγω της απλής κατασκευής του, της εύκολης λειτουργίας του, του χαμηλού κόστους του και της μεγάλης διάρκειας ζωής του. Ο ασύγχρονος κινητήρας δεν έχει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης. Οι τάσεις και τα ρεύματα επάγονται στο δρομέα του σύμφωνα με της αρχές λειτουργίας ενός μετασχηματιστή. Σε αυτό οφείλει και την ονομασία του ως «επαγωγικός» κινητήρας. Ουσιαστικά, ένας ασύγχρονος κινητήρας είναι ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής. Η τριφασική τροφοδοσία δημιουργεί, στο διάκενο, ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο αλληλεπιδρά με τα ρεύματα του ρότορα, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ροπή. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, που ονομάζεται και σύγχρονη ταχύτητα του ασύγχρονου κινητήρα, είναι ανάλογη της συχνότητας f_δ της εναλλασσόμενης τριφασικής τάσης τροφοδοσίας. Δηλαδή:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_\delta}{p} \text{ rpm} \quad (4.22)$$

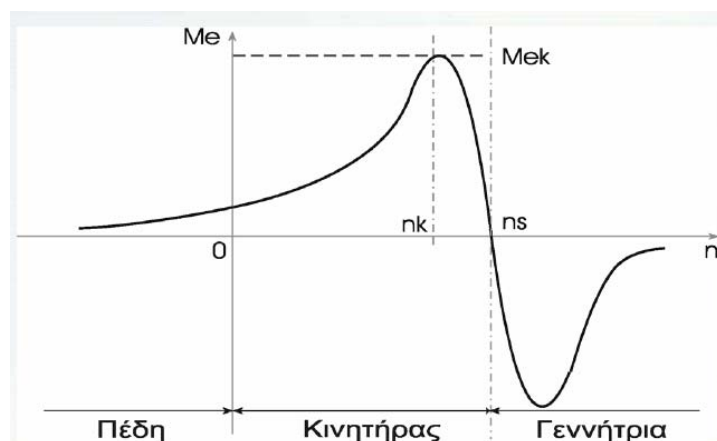
όπου p ο αριθμός πόλων της ασύγχρονης μηχανής και n_s η ταχύτητα σε στροφές ανά λεπτό (rpm – revolutions per minute) του μαγνητικού πεδίου.

Ο ασύγχρονος κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητα n_m που βρίσκεται πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, χωρίς ποτέ να την αποκτά, γιατί πρέπει πάντα να υφίσταται κάποια σχετική κίνηση, που να εξασφαλίζει την επαγωγή τάσης στο δρομέα.

$$n_m = (1 - s) \cdot n_s = \frac{60 \cdot f_\delta}{p} \cdot (1 - s) \text{ rpm} \quad (4.23)$$

όπου s η ολίσθηση της ασύγχρονης μηχανής.

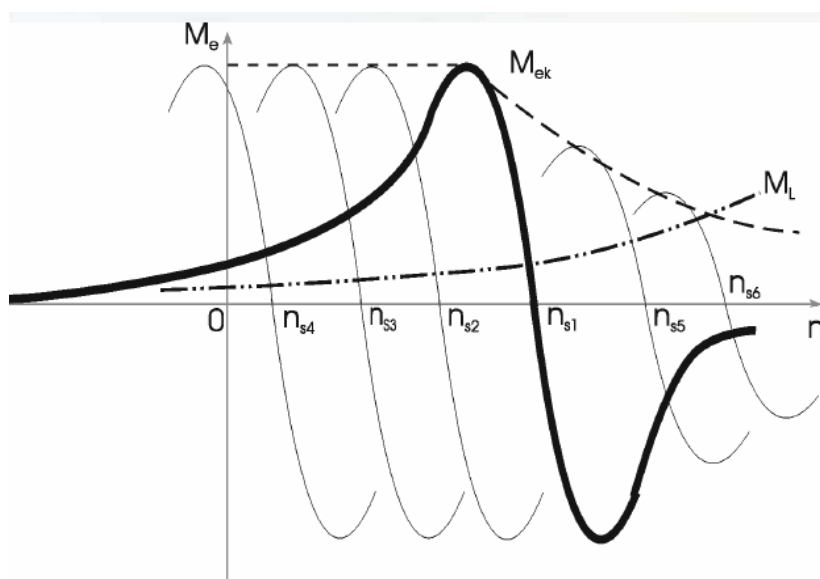
Στο Σχ. 4.34 δίνεται το διάγραμμα ροπής – στροφών ενός ασύγχρονου κινητήρα. Σημειώνεται ότι η ροπή ανατροπής (σημειώνεται ως M_{ek}) είναι πρακτικά 3 – 4 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα.



Σχήμα 4.34 Χαρακτηριστική ροπής στροφών ασύγχρονου κινητήρα [9].

Η ρύθμιση των στροφών ενός ασύγχρονου κινητήρα μπορεί να γίνει με ποικίλους τρόπους. Ενδεικτικά αναφέρονται η ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας μέσω μετασχηματιστή ή μέσω μετατροπέα με αντιπαράλληλα θυρίστορ, η αλλαγή του αριθμού ζευγών πόλων, η σύνδεση εξωτερικής αντίστασης στο δρομέα για την περίπτωση ασύγχρονης μηχανής με δακτυλιοφόρο δρομέα, η μεταβολή της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας του στάτη.

Η ρύθμιση των στροφών ασύγχρονου κινητήρα με μεταβολή της συχνότητας της τάσης που εφαρμόζεται στον στάτη προσφέρει τα περισσότερα πλεονεκτήματα. Πιο συγκεκριμένα, μεταβάλλοντας τη συχνότητα (f) της τάσης τροφοδοσίας, μετατοπίζεται παράλληλα η χαρακτηριστική καμπύλη ροπής στροφών, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.35, με άμεσο αποτέλεσμα τη ρύθμιση των στροφών. Όμως, η μέθοδος αυτή απαιτεί και ταυτόχρονη μεταβολή της ενεργού τιμής της τάσης (U), ώστε ο λόγος U/f να διατηρείται σταθερός και τα μαγνητικά χαρακτηριστικά της μηχανής να διατηρούνται σταθερά ώστε να μην οδηγείται στον κόρο. Αυτό επιβάλλεται από το γεγονός, ότι τα επαγωγικά φορτία παρουσιάζουν εμπέδηση ανάλογη της συχνότητας και συνεπώς, για να μην υπερβούμε το ονομαστικό ρεύμα, πρέπει να μεταβάλλεται η ενεργός τιμή της τάσης ανάλογα προς τη συχνότητα. Επίσης με τον τρόπο αυτό διατηρούμε τη ροπή ανατροπής M_{ek} , που είναι ανάλογη του λόγου U/f , σταθερή.

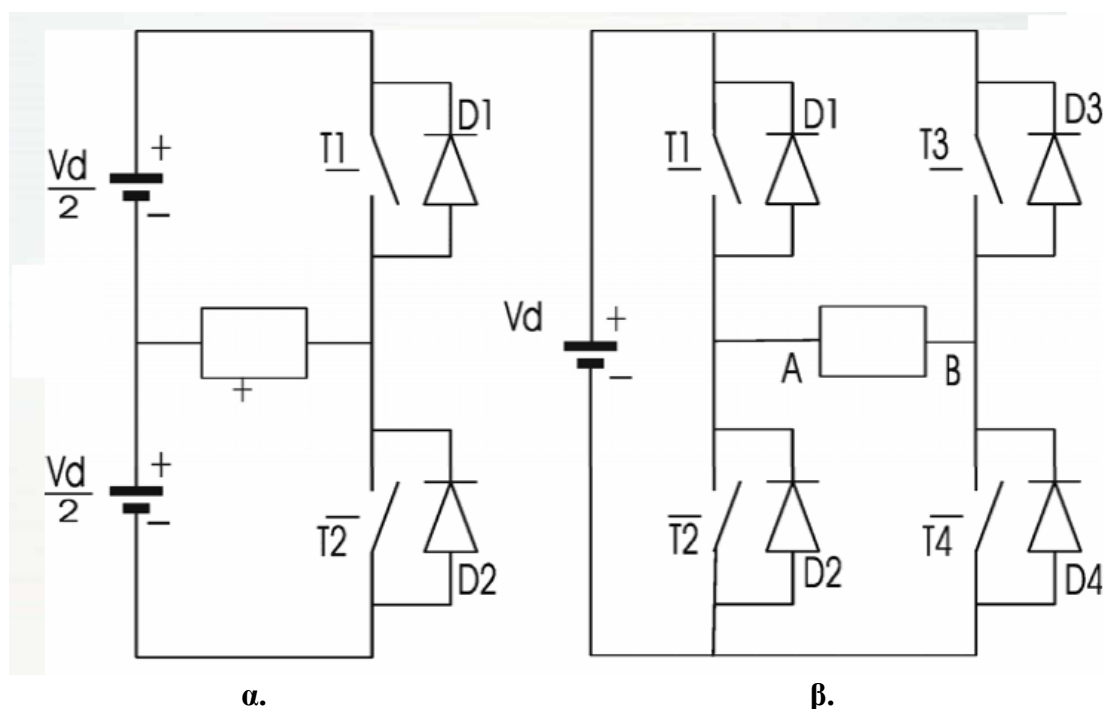


Σχήμα 4.35 Ρύθμιση στροφών ασύγχρονου κινητήρα [9].

Οι ζητούμενες μεταβολές μπορούν να προέλθουν, χρησιμοποιώντας έναν αντιστροφέα τάσης.

4.3.3 Μονοφασικοί αντιστροφείς ελεγχόμενοι από τετραγωνικούς παλμούς

Η συνδεσμολογία των δύο βασικών διατάξεων μονοφασικών αντιστροφέων τάσης, δηλαδή της Ημιγέφυρας (Half – Bridge Inverter) και της Πλήρους Γέφυρας (Full – Bridge Inverter), με ιδανικούς διακόπτες, δίδεται στο Σχ. 4.36. Οι διακόπτες μπορούν να αντικατασταθούν από οποιοδήποτε ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος ή ακόμα και από θυρίστορ με το κύκλωμα σβέσης τους, χωρίς η γενική λειτουργία του κυκλώματος να αλλάξει.



Σχήμα 4.36 Συνδεσμολογίες μονοφασικών αντιστροφέων τάσης, α. αντιστροφέας ημιγέφυρας, β. αντιστροφέας πλήρους γέφυρας [9].

Κάθε ημιαγωγικό στοιχείο επιτρέπει τη ροή ρεύματος, όταν αυτό άγει, κατά τη μία φορά, ενώ η αντιπαράλληλη διόδος επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Η παρουσία των αντιπαράλληλων διόδων είναι απαραίτητη όταν το φορτίο είναι επαγωγικής φύσης, διότι δίνουν ένα δρόμο επιστροφής του ρεύματος, άρα και της ενέργειας, από το φορτίο στη συνεχή τάση τροφοδοσίας στην είσοδο του αντιστροφέα.

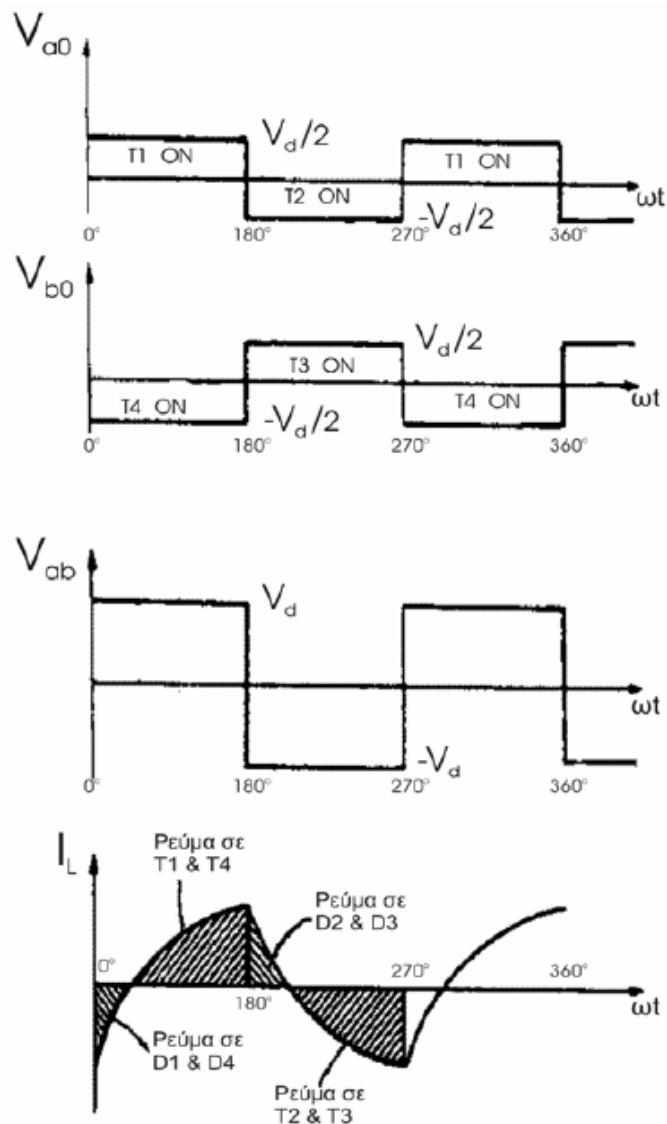
Στη συνδεσμολογία ημιγέφυρας (Σχ. 4.36α) ανάβοντας και σβήνοντας εναλλάξ τους ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες T1 και T2 παράγεται μια τετραγωνική εναλλασσόμενη κυματομορφή τάσης πάνω στους ακροδέκτες του φορτίου. Η μέγιστη τιμή τάσης που εφαρμόζεται πάνω στο φορτίο είναι $V_d/2$ και η ελάχιστη $-V_d/2$. Η συνδεσμολογία αυτή αποτελεί το βασικό στοιχείο δόμησης του μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους καθώς και του τριφασικού αντιστροφέα.

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 4.36β, ο μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας αποτελείται από δύο ημιγέφυρες. Έτσι αποφεύγεται η μεσαία λήψη στη συνεχή τροφοδοσία, αλλά χρειάζονται περισσότερα ημιαγωγικά στοιχεία. Οι ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες στο μονοφασικό αντιστροφέα με συνδεσμολογία

πλήρους γέφυρας αναβοσβήνουν σε διαγώνια ζευγάρια. Όταν δηλαδή T1 και T4 είναι σε αγωγή, T3 και T2 είναι σε αποκοπή και το αντίθετο. Έτσι πάνω στο φορτίο εμφανίζεται μία τετραγωνική τάση από V_d έως $-V_d$.

Όταν το φορτίο είναι καθαρά ωμικής φύσης, τότε και το ρεύμα έχει παρόμοια μορφή με την τάση και οι αντιπαράλληλες διόδους δεν έχουν ενεργό ρόλο στη λειτουργία του κυκλώματος.

Στην περίπτωση όμως που το φορτίο είναι επαγωγικής φύσης τα πράγματα είναι διαφορετικά. Ας υποθέσουμε αρχικά ότι σε αγωγή βρίσκονται T1 και T4 και το ρεύμα ρέει στο φορτίο από το σημείο A προς το σημείο B. Όταν δοθεί εντολή και T1 και T4 έρθουν σε αποκοπή, ενώ T3 και T2 σε αγωγή, η πολικότητα της τάσης πάνω στο φορτίο θα αλλάξει, το ρεύμα όμως για ένα χρονικό διάστημα θα συνεχίσει να ρέει με την ίδια φορά, λόγω της καθυστέρησης που εισάγει το επαγωγικό φορτίο. Έτσι το ρεύμα, γι' αυτό το χρονικό διάστημα, θα ρέει διαμέσου των διόδων D3 και D2, επιστρέφοντας ενέργεια στην πηγή τροφοδοσίας. Οι κυματομορφές τάσεων και ρεύματος, για την περίπτωση ενός ωμικού – επαγωγικού φορτίου, δίδονται στο Σχ. 4.37.

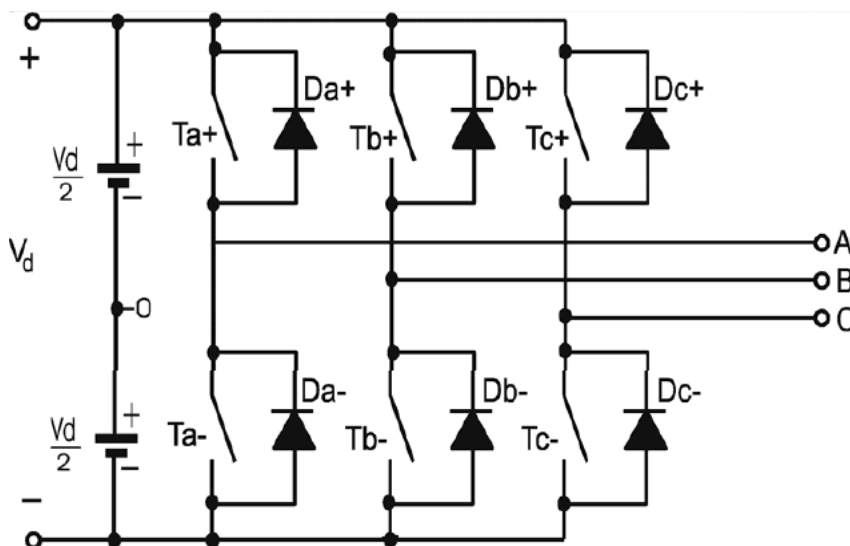


Σχήμα 4.37 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος της μονοφασικής πλήρους γέφυρας με ωμικό – επαγωγικό φορτίο [9].

Όσον αφορά το αρμονικό περιεχόμενο στην έξοδο ενός τέτοιου είδους αντιστροφέα, εκτός από τη βασική αρμονική, η οποία βρίσκεται στη συχνότητα της τετραγωνικής κυματομορφής, εμφανίζονται και ανώτερες αρμονικές σε συχνότητες που είναι μονά ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας της βασικής αρμονικής. Αν για παράδειγμα, με κατάλληλη παλμοδότηση, επιτύχουμε στην έξοδο του μονοφασικού αντιστροφέα έναν τετραγωνικό παλμό συχνότητας 30 Hz, τότε εκτός από τη βασική αρμονική στα 30 Hz, θα έχουμε και ανώτερες αρμονικές, οι οποίες θα έχουν συχνότητες 90 Hz (3x30 Hz), 150 Hz (5x30 Hz), 210 Hz (7x30 Hz), 270 Hz (9x30 Hz), 330 Hz (11x30 Hz) 390 Hz (13x30 Hz) κ.ο.κ. και ενεργές (όπως και οι μέγιστες) τιμές που φθίνουν σχεδόν εκθετικά. Με τον έλεγχο με τετραγωνικούς παλμούς δεν είναι δυνατό να μεταβληθεί η βασική αρμονική της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

4.3.4 Τριφασικοί αντιστροφείς ελεγχόμενοι από τετραγωνικούς παλμούς

Ο τριφασικός αντιστροφέας τάσης σχηματίζεται, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.38, προσθέτοντας άλλον έναν κλάδο στη μονοφασική γέφυρα που περιγράφηκε προηγουμένως. Η λειτουργία της τριφασικής γέφυρας είναι ανάλογη με αυτή της μονοφασικής.

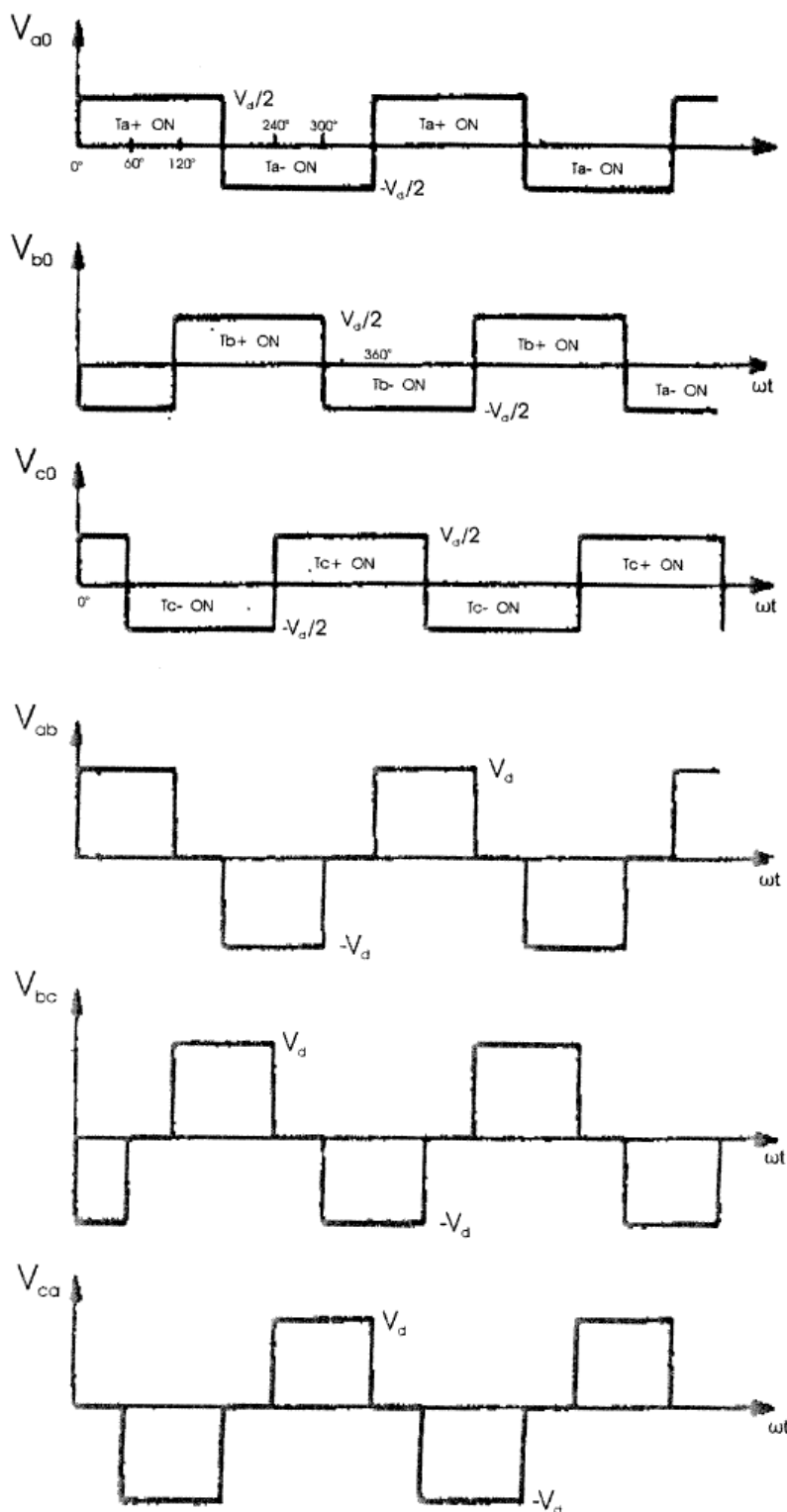


Σχήμα 4.38 Τριφασικός αντιστροφέας τάσης [9].

Κάθε ημιαγωγικό στοιχείο ανάβει και σβήνει για 180° και κάθε ακροδέκτης εξόδου (A, B, και C) συνδέεται εναλλάξ για κάθε ημιπερίοδο στο θετικό ή στον αρνητικό πόλο της συνεχούς τροφοδοσίας. Η τριφασική έξοδος επιτυγχάνεται προκαλώντας μια καθυστέρηση φάσεως 120° μεταξύ των παλμών έναυσης του κάθε κλάδου της γέφυρας, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.39. Όσον αφορά το αρμονικό περιεχόμενο της πολικής τάσης εξόδου, η μόνη διαφορά με το αρμονικό περιεχόμενο του προηγούμενου αντιστροφέα είναι ότι η τρίτη αρμονική είναι μηδέν. Αυτό συμβαίνει διότι η τρίτη αρμονική της φάσης A και η τρίτη αρμονική της φάσης B αλληλοαναιρούνται, υπολογίζοντας τη διαφορά μεταξύ τους, η οποία προφανώς είναι η πολική τάση V_{AB} .

Όπως εύκολα μπορεί να φανεί από τα προηγούμενα, με την παλμοδότηση αυτή είναι δυνατό να ρυθμίσουμε τη συχνότητα της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, όχι όμως και το πλάτος της. Για το λόγο αυτό, η γέφυρα ανόρθωσης που τροφοδοτεί τον αντιστροφέα είναι συνήθως ελεγχόμενη γέφυρα με θυρίστωρ, για

να γίνεται δυνατή με τη συνολική διάταξη η ρύθμιση και του πλάτους της τάσης εξόδου. Λόγω της μορφής της, η τάση εξόδου περιέχει πλήθος ανωτέρων αρμονικών, αποτελέσματα των οποίων είναι η υπερθέρμανση των τυλιγμάτων και οι κυματώσεις της ροπής του κινητήρα που οδηγεί ο αντιστροφέας. Η εμφάνιση ανωτέρων αρμονικών έχει επιπτώσεις και στη λειτουργία του δικτύου τροφοδοσίας, για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η χρήση φίλτρων.

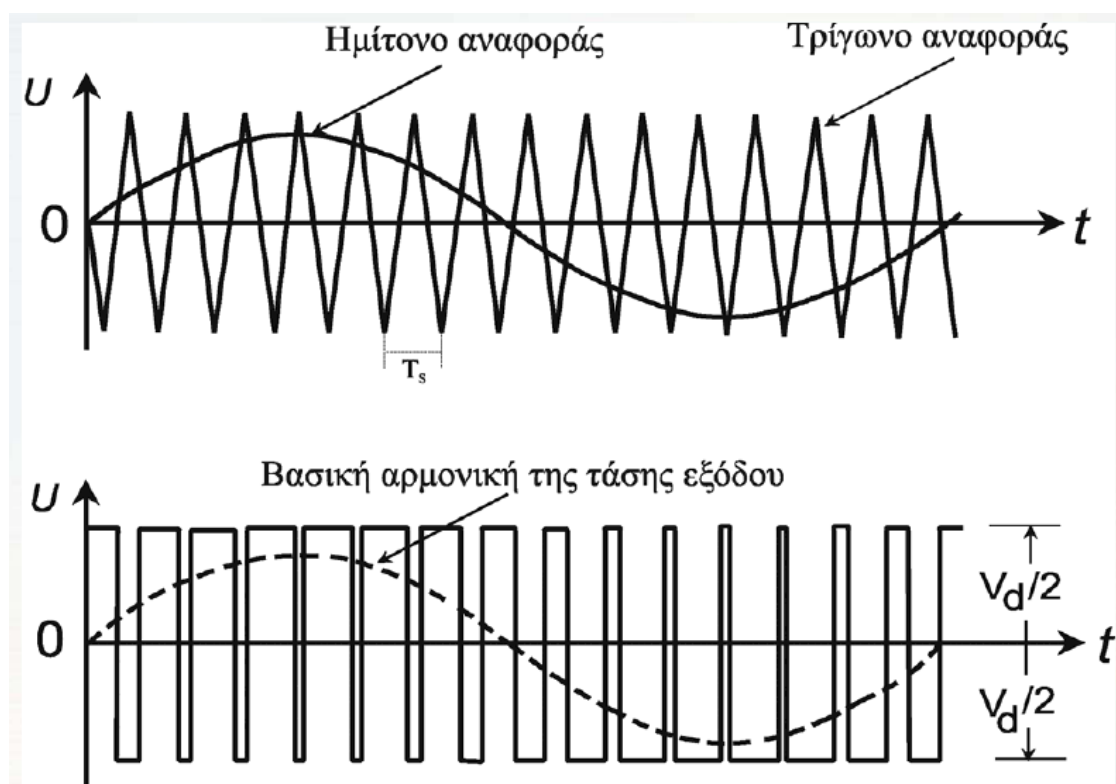


Σχήμα 4.39 Κυματομορφές τάσης στην έξοδο του τριφασικού αντιστροφέα έξι παλμών [9].

4.3.5 Μέθοδοι παλμοδότησης αντιστροφών τάσης

4.3.5.1 Ημιτονοειδής διαμόρφωση του εύρους παλμών (SPWM)

Το γεγονός ότι στην ημιτονοειδή διαμόρφωση του εύρους των παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation – SPWM) το μόνο που αλλάζει είναι η μεθοδολογία παραγωγής των παλμών έναυσης και σβέσης των ημιαγωγικών στοιχείων, μας επιτρέπει να διατηρήσουμε το κύκλωμα ισχύος που αναλύσαμε προηγουμένως καθώς και τη λογική λειτουργίας του. Ο έλεγχος της βασικής αρμονικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα, μπορεί να επιτευχθεί με τη μεταβολή του εύρους των παλμών, μεταβάλλοντας δηλαδή τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τα στοιχεία του αντιστροφέα άγουν ή όχι. Η τεχνική αυτή, με την οποία επιτυγχάνεται ο έλεγχος της βασικής αρμονικής τάσης εξόδου, μέσω της αυξομείωσης του εύρους των παλμών της τάσης εξόδου, ονομάζεται Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation, PWM).



Σχήμα 4.40 Μέθοδος παραγωγής παλμών τύπου SPWM [9].

Εάν τώρα εμείς επιθυμούμε να πάρουμε μια τάση στην έξοδο, που να πλησιάζει όσο το δυνατόν περισσότερο το ημίτονο, δεν έχουμε παρά να μεταβάλουμε με ημιτονοειδή τρόπο το εύρος των παλμών (Sinusoidal PWM). Η μέθοδος με την οποία μπορούμε να επιτύχουμε παραγωγή παλμών SPWM παρουσιάζεται στο Σχ. 4.40. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, δημιουργούμε μια ημιτονοειδή κυματομορφή η οποία ονομάζεται κυματομορφή αναφοράς και μια τριγωνική κυματομορφή, η οποία ονομάζεται κυματομορφή φορέα. Στη συνέχεια οι δύο παραπάνω κυματομορφές συγκρίνονται μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης είναι μια λογική στάθμη 0, όταν το τρίγωνο είναι μεγαλύτερο του ημίτονου και μια λογική στάθμη 1, όταν

συμβαίνει το αντίθετο. Όπως διαπιστώνεται και από το σχήμα, το αποτέλεσμα της σύγκρισης εξαρτάται από τα σημεία τομής των δύο κυματομορφών.

Λαμβάνοντας υπόψη τους ακόλουθους ορισμούς:

- A_{sin} : Το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς
- A_{tri} : Το πλάτος της κυματομορφής φορέα
- F_{sin} : Η συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς
- F_{tri} : Η συχνότητα της κυματομορφής φορέα
- M_A : Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους
- M_F : Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας

όπου,

$$M_A = \frac{A_{sin}}{A_{tri}} \quad M_F = \frac{F_{sin}}{F_{tri}} \quad (4.24)$$

μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι αυξομειώνοντας το συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους M_A (από 0 έως 1) μεταβάλλεται το εύρος των παλμών της κυματομορφής που προκύπτει από τη σύγκριση. Η διακοπτική συχνότητα της κυματομορφής PWM είναι ίση με F_{tri} . Κάνοντας ανάλυση Fourier στην κυματομορφή που προκύπτει από την παραπάνω σύγκριση, διαπιστώνουμε ότι η βασική της αρμονική έχει συχνότητα F_{sin} (τη συχνότητα κυματομορφής αναφοράς) και πλάτος ανάλογο του M_A (του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους).

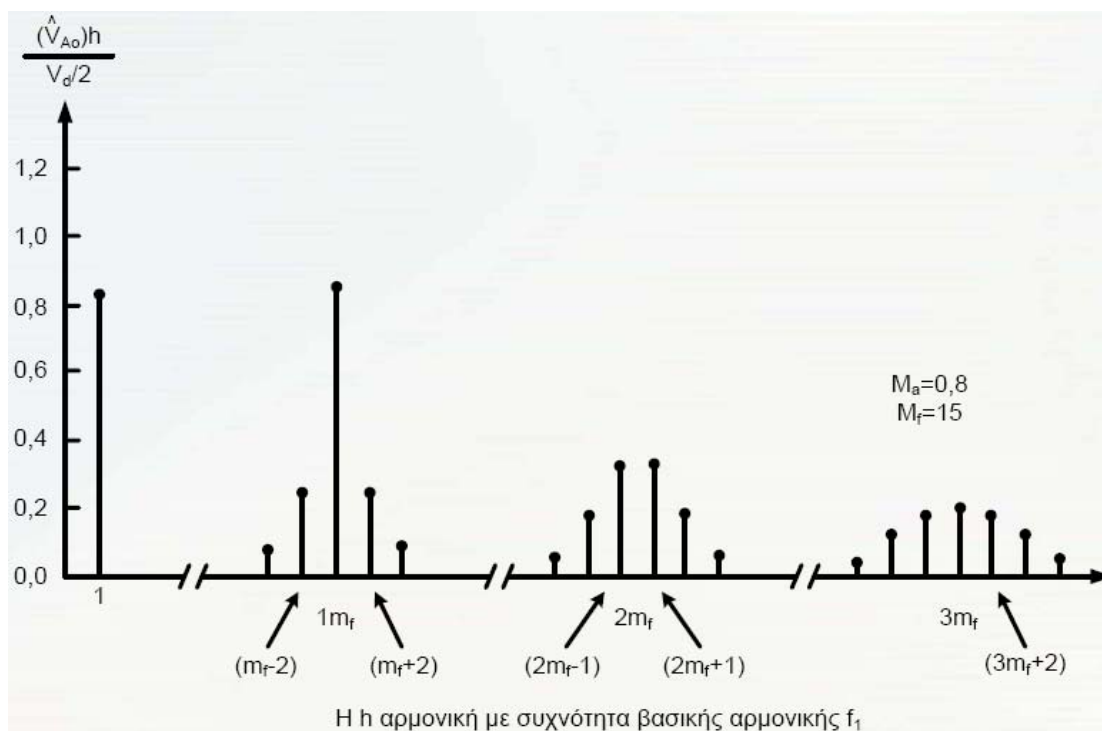
Οι ανώτερες αρμονικές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε ζώνες συχνοτήτων, γύρω από τα ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας του τριγώνου. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη ομάδα περιέχει μια κεντρική αρμονική σε συχνότητα F_{tri} καθώς επίσης και ένα σύνολο αρμονικών δεξιά και αριστερά της συχνότητας αυτής που δίνονται από τη σχέση:

$$F_v = F_{tri} \pm 2 \cdot n \cdot F_{sin} \quad (4.25)$$

Στη δεύτερη ομάδα ισχύει:

$$F_v = 2 \cdot F_{tri} \pm (2 \cdot (n - 1)) \cdot F_{sin} \quad (4.26)$$

Για την τρίτη ομάδα ισχύει ότι και στην πρώτη, μόνο που η κεντρική αρμονική είναι σε συχνότητα $3 \cdot F_{tri}$. Στην τέταρτη ομάδα ισχύει ότι και για την δεύτερη, αλλά με κεντρική συχνότητα $4 \cdot F_{tri}$. Η συλλογιστική αυτή ισχύει και για τις υπόλοιπες ομάδες ανωτέρων αρμονικών, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.41.



Σχήμα 4.41 Αρμονικό περιεχόμενο ημιτονοειδούς PWM [9].

Ως γενικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε, πως ανώτερες αρμονικές εμφανίζονται σε συχνότητες που ακολουθούν τη σχέση:

$$F_v = n \cdot F_{tri} \pm k \cdot F_{sin} \quad (4.27)$$

όπου $n = 1, 2, 3$ και $k = 1, 3, 5, \dots$ εάν n άρτιος ή $k = 2, 4, 6, \dots$ εάν n περιττός.

Όπως βλέπουμε, το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου είναι καλύτερο σε σχέση με τον αντιστροφέα έξι τετραγωνικών παλμών, ιδίως στις χαμηλές συχνότητες όπου πλέον δεν υπάρχουν αρμονικές, οι οποίες θα μπορούσαν να δημιουργήσουν προβλήματα στη λειτουργία της συσκευής που ο αντιστροφέας τροφοδοτεί. Παρ' όλα αυτά, όπως μπορεί να φανεί εύκολα και στο προηγούμενο σχήμα, υπάρχουν αρμονικές σε συχνότητες πολλαπλάσιες της συχνότητας παλμοδότησης, οι οποίες, ανάλογα με τη διακοπτική συχνότητα είναι δυνατόν να δημιουργήσουν ακουστικούς θορύβους ή ανεπιθύμητες παρεμβολές σε παρακείμενες συσκευές.

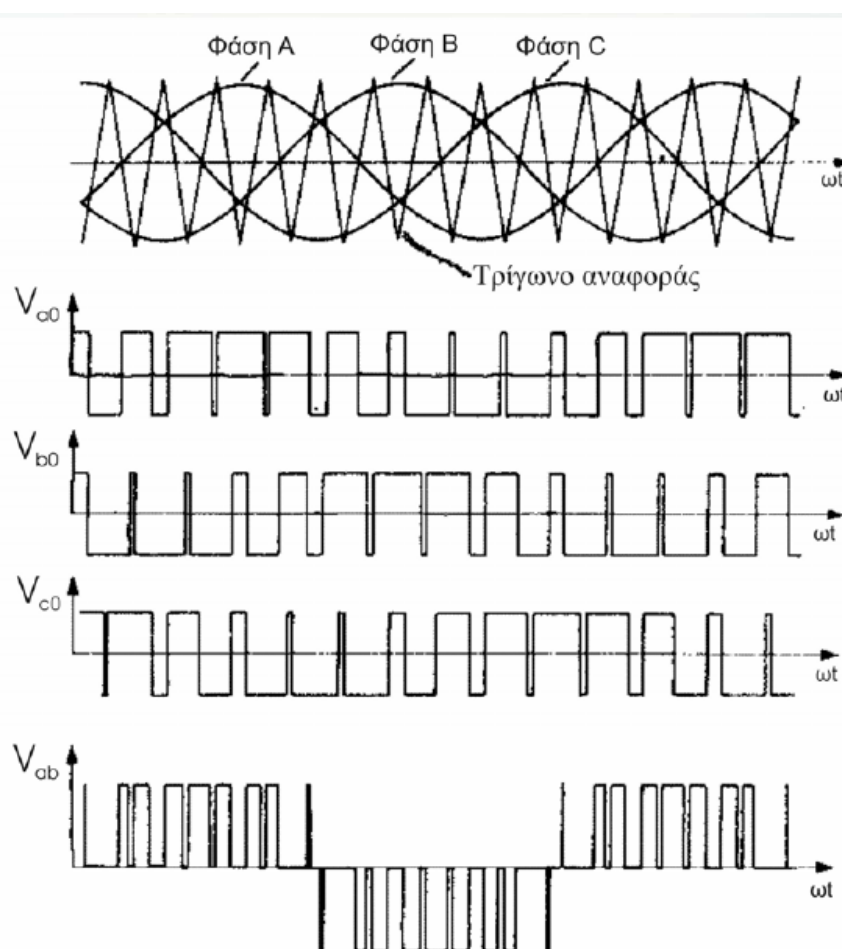
Για να παλμοδοτήσουμε έναν τριφασικό αντιστροφέα τάσης δημιουργούμε τρία ημίτονα αναφοράς (ένα για κάθε φάση) με διαφορά φάσης 120° μεταξύ τους, τα οποία συγκρίνουμε με την ίδια τριγωνική κυματομορφή (βλ. Σχ. 4.42). Όπως προκύπτει από την ανάλυση Fourier, η ενεργός τιμή της βασικής αρμονικής της πολικής τάσης συναρτήσει της συνεχούς τάσης εισόδου είναι:

$$V_{o,ll,rms} = 0,61 \cdot V_{dc} \cdot M_A \quad (4.28)$$

Ένα βασικό πρόβλημα που εμφανίζουν οι αντιστροφείς τάσης, είναι η ατελής εκμετάλλευση της τάσης εισόδου, φαινόμενο που παρουσιάζεται τόσο στους μονοφασικούς όσο και στους τριφασικούς μετατροπείς.

Υπάρχουν δύο είδη ημιτονοειδούς PWM, η ασύγχρονη και η σύγχρονη PWM. Στην ασύγχρονη PWM, επιλέγεται αρχικά μια συχνότητα φορέα (συχνότητα τριγώνου) και παραμένει σταθερή, καθώς η συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς (συχνότητα ημίτονου) μεταβάλλεται. Στη σύγχρονη PWM επιλέγεται αρχικά ένας λόγος διαμόρφωσης συχνότητας (M_F), ο οποίος διατηρείται σταθερός καθώς η συχνότητα αναφοράς μεταβάλλεται. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει πως η συχνότητα του φορέα πρέπει να μεταβάλλεται μαζί με τη συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς.

Η μέθοδος της σύγχρονης SPWM είναι χρήσιμη, διότι αποκλείει την εμφάνιση υποαρμονικών (αρμονικές σε συχνότητες κάτω από τη συχνότητα της βασικής). Ωστόσο η χρησιμοποίησή της έχει νόημα, μόνο όταν η συχνότητα του φορέα είναι μικρή (κάτω του 1 kHz). Αντίθετα όταν η F_{tri} είναι αρκετά υψηλή (ή για την ακρίβεια όταν $F_{tri} \gg F_{sin}$) τότε δεν προκύπτει πρόβλημα υποαρμονικών αφού το πλάτος των υψηλών αρμονικών που πλησιάζουν τη βασική είναι τόσο μικρό που πρακτικά θεωρείται μηδενικό.



Σχήμα 4.42 Κυματομορφές τάσης στην έξοδο του τριφασικού αντιστροφέα τάσης με παλμοδότηση SPWM [9].

4.3.5.2 Βελτιωμένες μέθοδοι διαμόρφωσης του εύρους παλμών

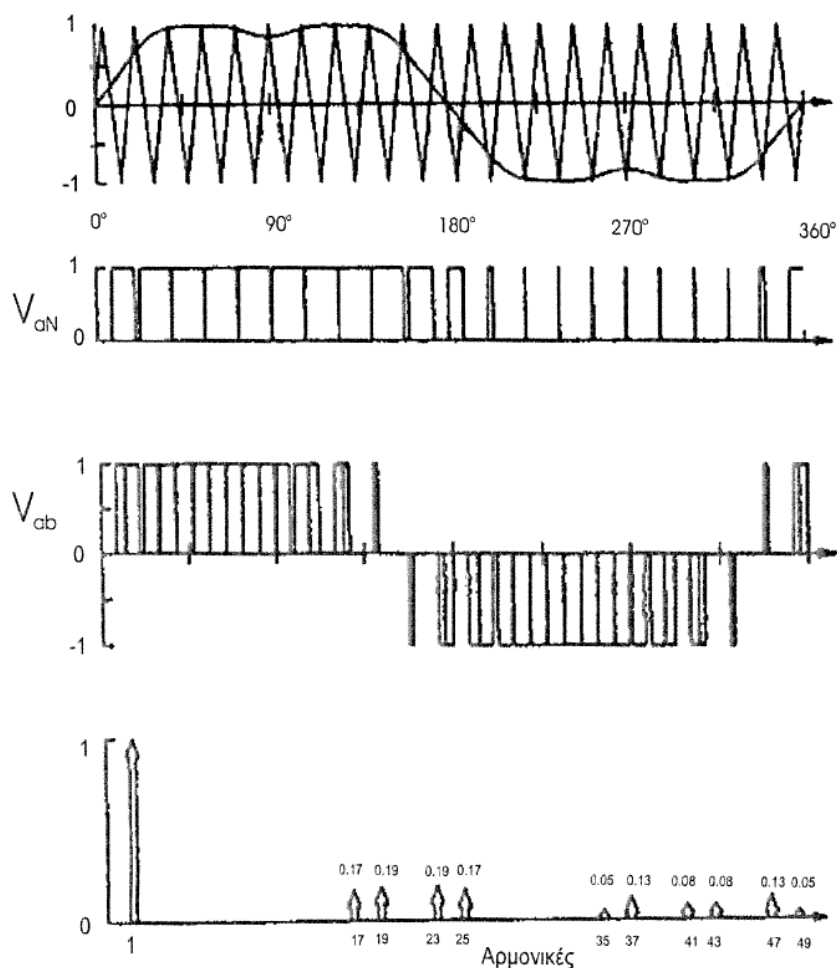
Υπάρχουν νέες μέθοδοι διαμόρφωσης του εύρους των παλμών (PWM), οι οποίες έχουν ως βάση την κλασική SPWM και προσδίδουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά, κυρίως όσον αφορά το αρμονικό περιεχόμενο που παρουσιάζουν. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι μέθοδοι έχουν ως στόχο:

- Την αύξηση του πλάτους της βασικής αρμονικής της πολικής τάσης.
- Τη μείωση του πλάτους των ανώτερων αρμονικών.

Το μόνο που αλλάζει, σε σχέση πάντα με την κλασική μέθοδο, είναι η κυματομορφή αναφοράς, ενώ η υπόλοιπη λογική παραμένει ίδια. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν τεχνικές με ημίτονα αναφοράς εμπλουτισμένα σε ανώτερες αρμονικές 3^{ης} τάξης, με τις οποίες είναι δυνατή η δημιουργία τάσεων εξόδου ενεργού τιμής όσο και της τάσης εισόδου. Οι επιπλέον αρμονικές 3^{ης} τάξης που δημιουργήθηκαν σκόπιμα στη έξοδο, αλληλοαναιρούνται και δεν επηρεάζουν καθόλου τη λειτουργία των αντιστροφών ούτε το αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος.

1. Πρώτη μέθοδος – Μέθοδος HIPWM

Η πρώτη μέθοδος ονομάζεται PWM Τεχνικής Έγχυσης Αρμονικών (Harmonic Injection PWM technique – HIPWM) και φαίνεται στο Σχ. 4.43. Αυτή η μέθοδος προκύπτει από την κλασική SPWM, εισάγοντας στην κυματομορφή αναφοράς αρμονικές, των οποίων οι συχνότητες είναι τριπλά πολλαπλάσια της βασικής αρμονικής. Το αποτέλεσμα είναι μια ημιτονοειδής κυματομορφή με σχεδόν επίπεδη κορυφή, η οποία όταν εφαρμοστεί, επιτρέπει υπερδιαμόρφωση (σε σχέση με την κλασική μέθοδο) και βελτιώνει το αρμονικό περιεχόμενο της πολικής τάσης.

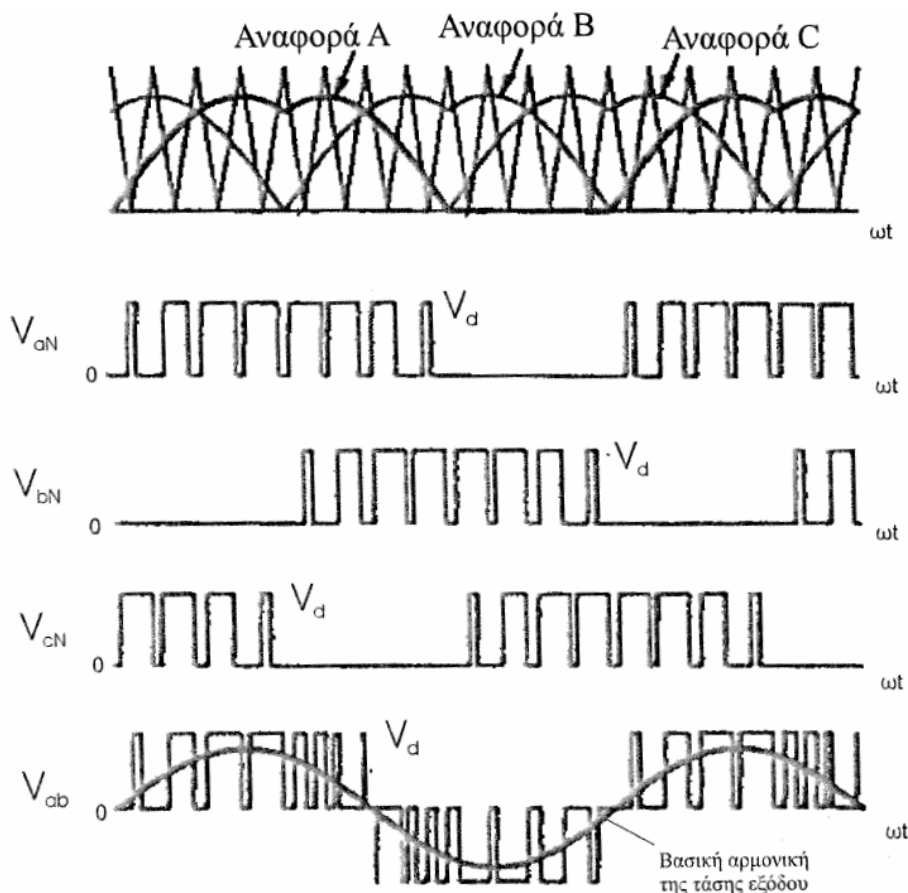


Σχήμα 4.43 PWM Τεχνικής Έγχυσης Αρμονικών (HIPWM) [9].

2. Δεύτερη μέθοδος

Η δεύτερη μέθοδος, που δεν αναφέρεται στη βιβλιογραφία με κάποιο συγκεκριμένο όνομα, παρουσιάζει πρόσθετα πλεονεκτήματα.

Για να έχουμε ημιτονοειδή πολική τάση δεν είναι απαραίτητο η κάθε φασική να είναι ημιτονοειδής κυματομορφή. Στην κυματομορφή αναφοράς για ένα τριφασικό αντιστροφέα μπορούν να προστεθούν 3^η-πλάσιες αρμονικές στη κλασσική τριφασική ημιτονοειδή κυματομορφή. Χρησιμοποιώντας τη νέα αυτή κυματομορφή αναφοράς, οι πολικές τάσεις του αντιστροφέα γίνονται ημιτονοειδείς PWM κυματομορφές (βλ. Σχ. 4.44), το πλάτος της βασικής αρμονικής αυξάνεται κατά 15 % σε σχέση με την κλασσική μέθοδο και ο αριθμός των μεταβάσεων του αντιστροφέα (ένανση – σβέση) μειώνεται κατά 2/3 σε σχέση με την SPWM. Τα παραπάνω σημαίνουν ότι η πηγή τροφοδοσίας χρησιμοποιείται αποτελεσματικότερα και ότι μειώνονται οι διακοπτικές απώλειες, πράγμα που σημαίνει μείωση της θερμότητας των ημιαγωγικών στοιχείων. Το τελευταίο συμπέρασμα είναι πολύ σημαντικό, ιδίως όταν θέλουμε να έχουμε υψηλή συχνότητα φορέα, γιατί με αυτό τον τρόπο καταπονούμε λιγότερο τα στοιχεία μας.



Σχήμα 4.44 Δεύτερη βελτιωμένη μέθοδος για τριφασικό αντιστροφέα [9].

Βάσει πειραματικών στοιχείων [9], προκύπτει ότι και οι τρεις μέθοδοι έχουν εξίσου καλό αρμονικό περιεχόμενο. Συγκρίνοντας όμως τα μέγιστα πλάτη της κάθε ομάδας αρμονικών για τις τρεις μεθόδους, παρατηρούμε την ανωτερότητα της HIPWM. Η μέθοδος αυτή μας δίνει και μεγαλύτερο πλάτος της βασικής αρμονικής, αλλά και μικρότερο πλάτος για τις αρμονικές των δύο ανώτερων ομάδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφούν τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος πρόωσης κυψελών καυσίμου που μελετάται στην παρούσα εργασία. Από τα χαρακτηριστικά αυτά θα προκύψουν οι απαιτήσεις σχεδιασμού της τοπολογίας ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος.

5.1 Γενικά περί ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων

Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα περιλαμβάνουν τους μηχανισμούς, που σκοπό έχουν να δημιουργήσουν κίνηση, όπου έχουμε μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή, προκειμένου να παράγουμε ένα ορισμένο έργο. Τα συστήματα αυτά αποτελούν το σημαντικότερο μέρος μιας αυτοματοποιημένης βιομηχανικής παραγωγής αλλά και των σύγχρονων ηλεκτροκίνητων μέσων μεταφοράς. Μέσω αυτών μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ένα επιθυμητό πρόγραμμα κίνησης τόσο στα μέσα μεταφοράς όσο και στους μηχανισμούς κατεργασίας και επεξεργασίας προϊόντων διαφόρων μορφών. Αναλυτικότερα, τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα πρέπει να επιλύουν τα ακόλουθα προβλήματα [50]:

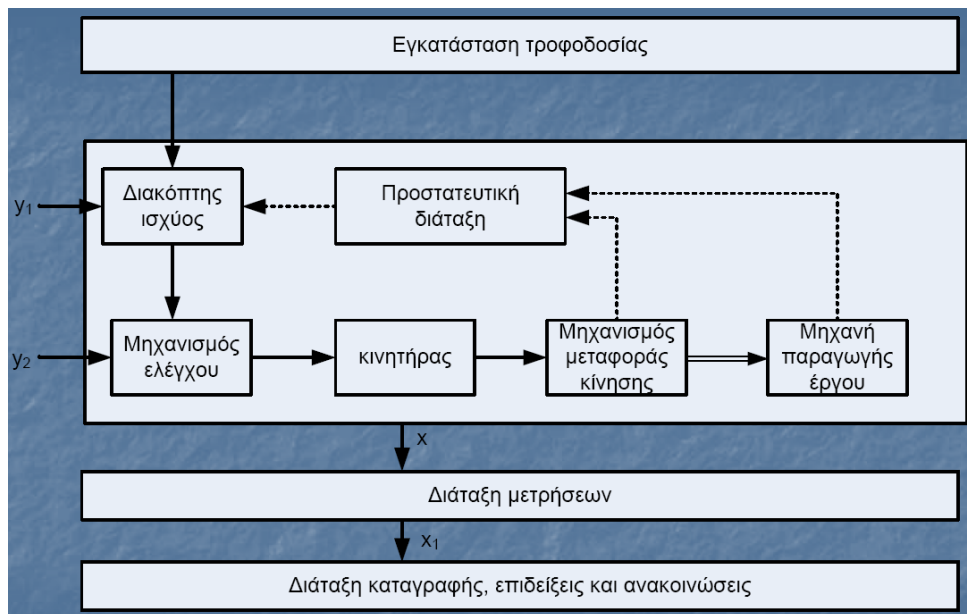
1. Προσφορά μηχανικής ενέργειας μέσω μετατροπής ηλεκτρικής, κατά το δυνατόν πλησίον στον τόπο κατανάλωσης.
2. Προσφορά της αναγκαίας ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τις ανάγκες του καταναλωτή μέσω κατάλληλων εγκαταστάσεων τροφοδοσίας.
3. Έλεγχος της ηλεκτρικής κυρίως, αλλά και της μηχανικής ενέργειας, με μηχανισμούς που καταναλώνουν όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια.
4. Αξιοπιστία των μηχανισμών προστασίας, σύνδεσης και αποσύνδεσης ώστε να εξασφαλισθεί η ακίνδυνη εργασία του προσωπικού και η ακίνδυνη λειτουργία των διαφόρων τεχνικών διατάξεων.
5. Ακριβής επεξεργασία των εντολών, που δίνονται είτε από κάποιο πρόσωπο είτε από κάποια τεχνική διάταξη, οι οποίες αποβλέπουν στην πραγματοποίηση κάποιας προδιαγεγραμμένης διαδικασίας.
6. Καταγραφή και μέτρηση διαφόρων μεγεθών τα οποία είναι σημαντικά για την παρακολούθηση της διαδικασίας, για την επισήμανση κινδύνων, για τον εντοπισμό βλαβών, για να δοθούν εντός του συστήματος απαραίτητες εντολές, επίσης για τη μεταβίβαση στοιχείων ή εντολών σε άλλο σύστημα, όπου πιθανώς να γίνει έλεγχος και ανάλυση της ποιότητας παραγωγής κλπ.

Όλα τα παραπάνω προβλήματα, ίσως και άλλα ακόμη δευτερεύουσας σημασίας, επιλύονται στη σύγχρονη τεχνολογία με τη βοήθεια των μετατροπέων ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας, δηλαδή ηλεκτρικές μηχανές με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Εκτός των τριών αυτών σημαντικών παραγόντων, σπουδαίο ρόλο παίζουν οι μετρήσεις, διάφορες ηλεκτρονικές διατάξεις και οι υπολογιστές για την επεξεργασία πληροφοριών.

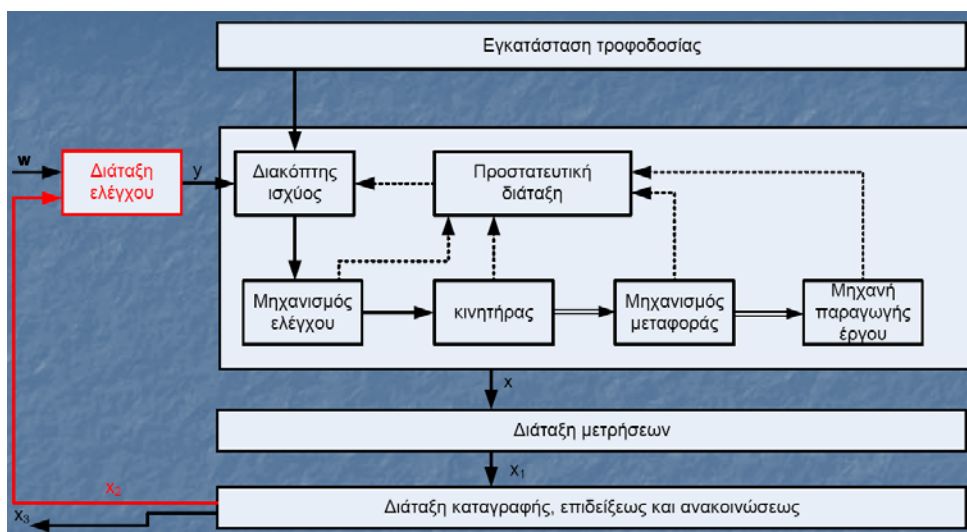
Σχετικά με τη δομή των συστημάτων αυτών μπορούμε να διακρίνουμε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη (Σχ. 5.1) ανήκουν τα στοιχειώδη συστήματα, τα οποία μπορούμε να ονομάσουμε κλασικά, διότι σκοπό έχουν να εξασφαλίσουν κίνηση

χωρίς έλεγχο ταχύτητας και γενικά χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις. Στη δεύτερη κατηγορία (Σχ. 5.2) κατατάσσουμε τα αυτοματοποιημένα συστήματα, τα οποία εκτελούν ορισμένες λειτουργίες αυτόματα και σε ένα ευρύ φάσμα. Στην τρίτη κατηγορία (Σχ. 5.3) ανήκουν τα σύνθετα αυτοματοποιημένα συστήματα, τα οποία εκτελούν πολύπλοκες αυτόματες λειτουργίες σύμφωνα με ορισμένη ιεράρχηση. Στα Σχ. 5.1 – 5.3 βλέπουμε τη βασική δομή υπό μορφή χονδρικών διαγραμμάτων των τριών προαναφερθέντων κατηγοριών αντίστοιχα. Όσον αφορά τα σύμβολα ισχύουν τα παρακάτω:

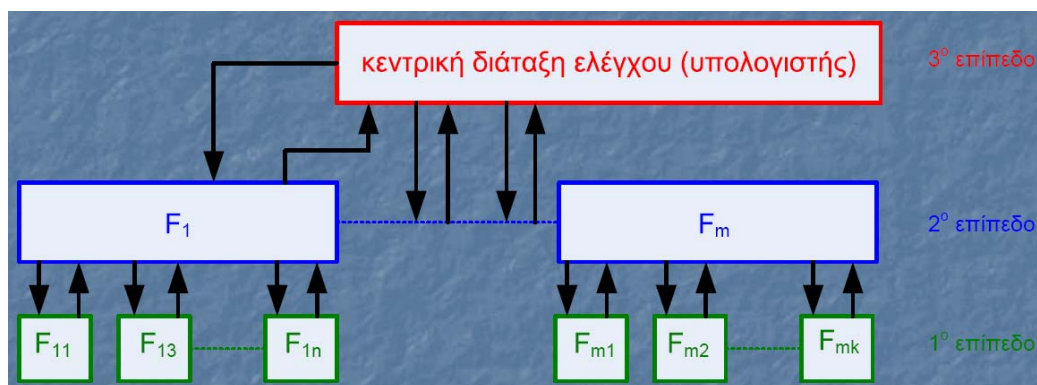
- ροή ηλεκτρικής ενέργειας
- ⇒ ροή μηχανικής ενέργειας
- - → ροή σημάτων κινδύνου
- x μεγέθη εξόδου
- y μεγέθη ρυθμιζόμενα
- x_3 μεγέθη εξόδου προς άλλο σύστημα
- w μέγεθος αναφοράς προερχόμενο είτε από ένα μοναδικό στοιχείο είτε από άλλο σύστημα



Σχήμα 5.1 Χονδρικό διάγραμμα στοιχειώδους ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος [50].



Σχήμα 5.2 Χονδρικό διάγραμμα αυτοματοποιημένου ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος [50].



Σχήμα 5.3 Σύνθετο αυτοματοποιημένο σύστημα [50].

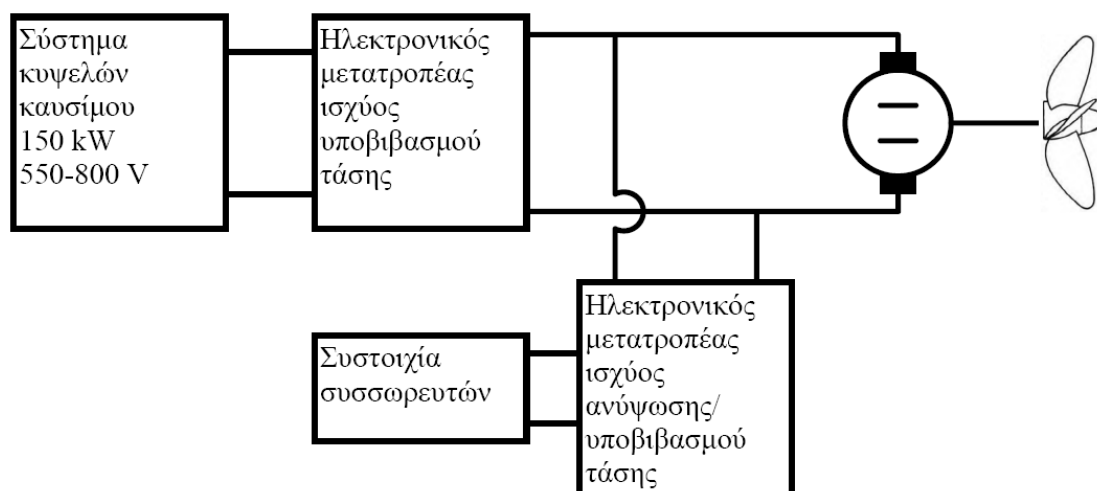
5.2 Περιγραφή ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος

Βάσει του Σχ. 5.1, σχετικά με τα κύρια στοιχεία του υπό μελέτη ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος, η κύρια εγκατάσταση τροφοδοσίας θα είναι το σύστημα κυψελών καυσίμου, ο μηχανισμός ελέγχου είναι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος, ως κινητήρα έχουμε τον ηλεκτρικό κινητήρα πρόωσης συνεχούς ρεύματος και ως μηχανή παραγωγής έργου την έλικα του σκάφους. Θα μελετηθούν δύο διαφορετικά είδη ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων πρόωσης. Η διαφορά μεταξύ των συστημάτων έχει να κάνει με την εγκατάσταση τροφοδοσίας όπου στην πρώτη περίπτωση θα θεωρηθεί μία μονάδα κυψελών καυσίμου (βλ. Σχ. 5.4) ενώ στη δεύτερη δύο μονάδες κυψελών καυσίμου εν παραλλήλω (βλ. Σχ. 5.5). Ως εκ τούτου, όπως θα γίνει κατανοητό στη συνέχεια, απαιτείται διαφορετικός σχεδιασμός για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς του κάθε συστήματος. Η συνολική ονομαστική ισχύς είναι ίδια και για τα δύο συστήματα, οπότε ο ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης θα είναι ο ίδιος και στις δύο περιπτώσεις.

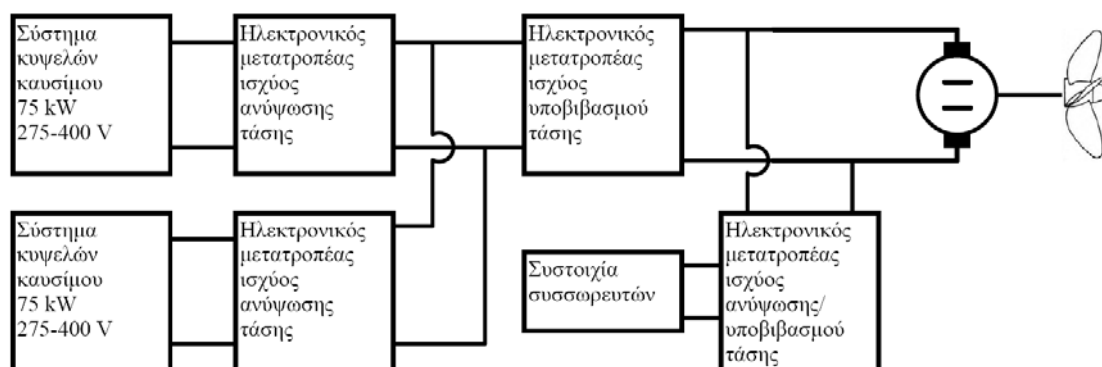
Η μικτή ηλεκτρική ισχύς των δύο συστημάτων, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, είναι ίση με 150 kW. Όμως σε αυτήν έχει συνυπολογιστεί η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται για τη λειτουργία των βοηθητικών μηχανημάτων και συσκευών (συνήθως αποτελεί το 10 – 15 % αυτής [16]). Έτσι η καθαρή ηλεκτρική ισχύς των κυψελών καυσίμου είναι περί τα 130 kW [51], [52]. Η καθαρή ηλεκτρική ισχύς είναι αυτή που θα θεωρηθεί για την επιλογή του κατάλληλου κινητήρα πρόωσης.

Επίσης πέρα των κυψελών καυσίμου, θα χρησιμοποιηθεί ως βοηθητική ενεργειακή πηγή μια συστοιχία συσσωρευτών ισχύος, όπως συνηθίζεται σε αντίστοιχα συστήματα πρόωσης [34], [36], για λόγους ασφαλείας, για βελτίωση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος [46] αλλά και για την κάλυψη των αιχμών του φορτίου. Η συστοιχία συσσωρευτών φορτίζεται από πηγή ενέργειας εκτός ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος και όταν απαιτείται αποδίδει την αποθηκευμένη ενέργεια της. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η χρήση κατάλληλου ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.

Τα δύο συστήματα που θα μελετηθούν φαίνονται αντίστοιχα στα Σχ. 5.4 και 5.5 που ακολουθούν.



Σχήμα 5.4 Σύστημα με μία μονάδα κυψελών καυσίμου.



Σχήμα 5.5 Σύστημα με δύο μονάδες κυψελών καυσίμου εν παραλλήλω.

5.3 Σύστημα κυψελών καυσίμου

Πηγή ενέργειας του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος πρόωσης αποτελεί το σύστημα κυψελών καυσίμου. Στην παρούσα εργασία, ύστερα από σχετική έρευνα αγοράς συστημάτων κυψελών καυσίμου στην τάξη των 100 kW, αλλά και βιβλιογραφική επισκόπηση αντίστοιχων συστημάτων [51], καταλήξαμε στη χρησιμοποίηση του συστήματος κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης Heavy Duty 6 (HD6) της Ballard το οποίο φαίνεται, σύμφωνα με τα στοιχεία των κατασκευαστών, να συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα ώστε να καταστεί κατάλληλο για μια εφαρμογή ναυτικής πρόωσης. Στον Πίνακα 5.1 παρατίθεται μια σύγκριση συστημάτων κυψελών καυσίμου για την εφαρμογή τους σε ένα ναυτικό ενεργειακό σύστημα [51]. Μια φωτογραφία του HD6 φαίνεται στην Εικ. 1.

Στον Πίνακα 5.2 συγκεντρώνονται τα χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται στην εργασία. Πρόκειται για συστήματα κυψελών καυσίμου της ίδιας τεχνολογίας (HD6 Ballard) με διαφορετική παραγόμενη ισχύ.

Πίνακας 5.1 Σύγκριση διαφορετικών μονάδων PEMFC για τη μελέτη χρήσης τους σε ναυτικό ενεργειακό σύστημα πρόωσης του Πολεμικού Ναυτικού των Η.Π.Α. [51], [53].

Παράμετροι	SIEMENS (BZM 120)	BALLARD (HD6)	HELIOCENTRICS (HyPM HD65)
Ονομαστική ισχύς	120 kW	~130 kW	65 kW
Εύρος τάσης λειτουργίας	208-243 V	550-800 V	218-305 V
Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας	560 A	300 A	300 A
Βαθμός απόδοσης	58 %	55 – 60 %	55 %
Όγκος	466 L	558 L	199 L
Βάρος	900 kg	< 400 kg	321 kg
Θερμοκρασία λειτουργίας	80°C	63°C	65°C
Πυκνότητα ισχύος	0,258 kW/L	0,233 kW/L	0,327 kW/L
Ισχύς / Βάρος	133,33 W/kg	325 W/kg	202,49 W/kg
Κόστος	~1200 \$/kW	~1200 \$/kW	~1200 \$/kW



Εικόνα 5.1 Το σύστημα κυψελών καυσίμου HD6 της Ballard [53].

Οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε κυψέλη καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης είναι, σύμφωνα και με όσα έχουν ειπωθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο [51]:

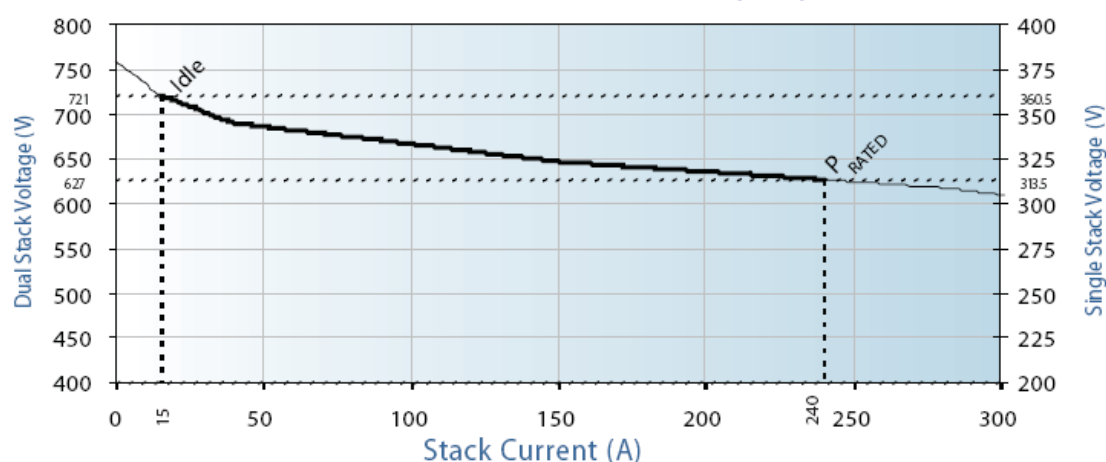
- Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας είναι επιθυμητή, καθώς επιτρέπει την γρήγορη εκκίνηση και παύση της λειτουργίας της κυψέλης αλλά και την πραγματοποίηση δραστηριοτήτων του προσωπικού στο χώρο που είναι τοποθετημένη.
- Το σύστημα PEMFC δύναται να λειτουργεί ακόμα και σε θερμοκρασίες μικρότερες της ονομαστικής θερμοκρασίας λειτουργίας.
- Πρόκειται για μια στιβαρή κατασκευή, λόγω του στερεού ηλεκτρολύτη, χαρακτηριστικό πολύ σημαντικό για μια ναυτική εφαρμογή
- Έχει υψηλό επίπεδο τεχνογνωσίας, έχει δοκιμαστεί σε διάφορες εφαρμογές και υπάρχουν μονάδες PEMFC διαθέσιμες στην αγορά, έτοιμες για εφαρμογή.

- Έχει σχετικά υψηλή διάρκεια ζωής σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη κυψελών καυσίμου.
- Έχει σχετικά υψηλή συγκέντρωση ισχύος και χαμηλή μείωση της παραγόμενης τάσης με το πέρασμα του χρόνου.

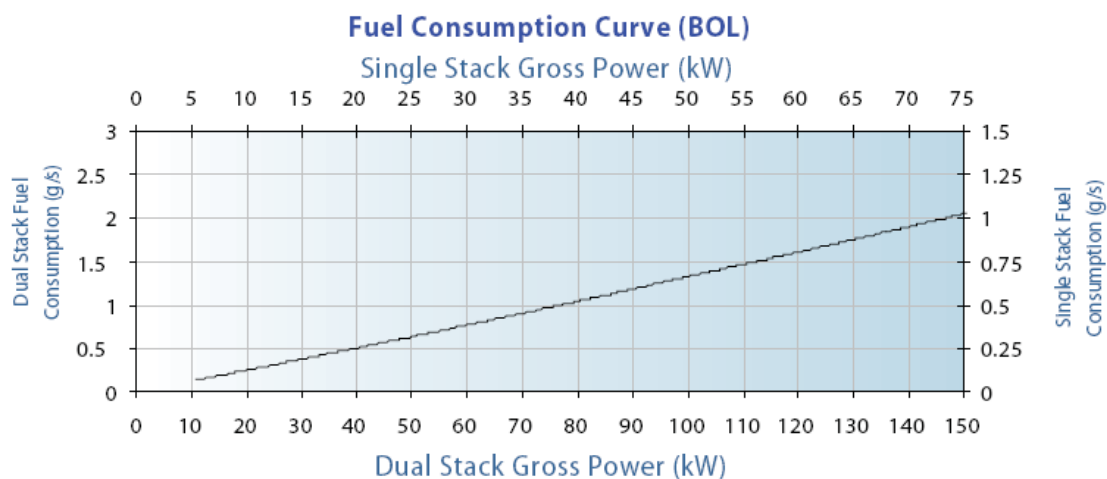
Πίνακας 5.2 Τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων κυψελών καυσίμου HD6 του υπό μελέτη ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος [53].

Μικτή ισχύς	75 kW	150 kW
Όνομαστική ισχύς	~65 kW	~130 kW
Παραγόμενη τάση	275-400 V	550-800 V
Μέγιστο ρεύμα	300 A	300 A
Βαθμός απόδοσης συστήματος (LHV)	~55-60 %	
Βάρος (dry)	< 350 kg	< 400 kg
Διαστάσεις (L x W x H)	1270 x 870 x 505 mm	
Όγκος	0,558 m ³	
Θερμοκρασία λειτουργίας	63°C	
Καύσιμο	Αέριο υδρογόνο (GH ₂) καθαρότητας 99,999 %	
Κατανάλωση καυσίμου (μέγιστη υπό ονομαστικό φορτίο) (Σχ. 5.7)	1,1 g/s	2,2 g/s
Οξειδωτικό	Αέρας	
Ψυκτικό μέσο	Μίγμα απιονισμένου νερού και αιθυλενογλυκόλης	
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (περιβάλλοντος)	-20 – 60°C	
Ελάχιστη θερμοκρασίας εκκίνησης	> 0°C	
Πίεση καυσίμου (ελάχιστη)	12 bar(g)	
Πίεση καυσίμου (ονομαστική)	16 bar(g)	
Πίεση οξειδωτικού	1,2 bar(g)	
Έξτρα χαρακτηριστικά	Control Area Network (CAN), IP54	

Electrical Polarization Curve (BOL)



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα παραγόμενης τάσης συναρτήσει του ρεύματος των δύο συστημάτων κυψελών καυσίμου του υπό μελέτη συστήματος [ηλεκτρονική επικοινωνία με Mr. Daljit Bawa, Ballard Power Systems, daljit.bawa@ballard.com].



Σχήμα 5.7 Χαρακτηριστική κατανάλωσης καυσίμου των δύο συστημάτων κυψελών καυσίμου του υπό μελέτη συστήματος [ηλεκτρονική επικοινωνία με Mr. Daljit Bawa, Ballard Power Systems, daljit.bawa@ballard.com].

Στο Σχ. 5.6 παρατίθεται η χαρακτηριστική παραγόμενης τάσης – ρεύματος των δύο συστημάτων κυψελών καυσίμου. Η χαρακτηριστική αυτή θα αποτελέσει σημαντικό βοήθημα στη σχεδίαση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος του συστήματος. Στο Σχ. 5.7 παρατίθεται η χαρακτηριστική κατανάλωσης καυσίμου των δύο συστημάτων. Στο Παράρτημα, στο τέλος της εργασίας, παρατίθενται τα ενημερωτικά φυλλάδια του κατασκευαστή από τα οποία προήλθαν οι παραπάνω πληροφορίες.

Να σημειωθεί ότι στο σχεδιασμό του δεύτερου συστήματος (βλ. Σχ. 5.5) έχουμε παραλληλισμό συστημάτων κυψελών καυσίμου με σκοπό την επίτευξη της απαιτούμενης ισχύος ($2 \times 65 \text{ kW}$ (καθαρή ισχύς) = 130 kW). Όταν έχουμε παραλληλισμό κυψελών καυσίμου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα δημιουργίας ρευμάτων που να κυκλοφορούν πίσω στις κυψέλες καυσίμου [51]. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις κατασκευαστικές ατέλειες των παραλληλισμένων συστημάτων οι οποίες δεν τα καθιστούν επακριβώς όμοια. Αυτά τα ρεύματα πρέπει να περιορισθούν καθώς επιδρούν αρνητικά στην απόδοση και στην γενικότερη λειτουργία της κυψέλης. Για το σκοπό αυτό, εν σειρά με κάθε μία από τις κυψέλες πρέπει να παρεμβληθεί μία διάοδος ή κάποια άλλη προστατευτική διάταξη που δεν θα επιτρέπει την κυκλοφορία κυκλικών ρευμάτων, βέβαια η χρήση της διάοδου συνεπάγεται αύξηση των απωλειών, οπότε και μείωση του συνολικού βαθμού απόδοσης.

5.4 Ηλεκτρικός κινητήρας πρόωσης

Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως ως κινητήρας πρόωσης επιλέχθηκε ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης (Σ.Ρ. – DC). Οι κύριοι λόγοι επιλογής του κινητήρα Σ.Ρ. είναι το γεγονός ότι ο έλεγχος ενός τέτοιου είδους κινητήρα είναι σχετικά απλός, άμεσος και υψηλού επιπέδου όσον αφορά την απόκρισή του στις εντολές του ρυθμιστή του. Θεωρώντας την τοπολογία του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος με τη μία μονάδα κυψελών καυσίμου (βλ. Σχ. 5.4) μπορούμε, όπως θα φανεί παρακάτω, να ρυθμίσουμε την παραγόμενη, από την κυψέλη, συνεχή τάση και τις στροφές του κινητήρα μέσω του ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Στην περίπτωση χρήσης κινητήρα Ε.Ρ. συνήθως απαιτείται η χρήση ενός επιπλέον αντιστροφέα για τον έλεγχο του κινητήρα γεγονός που μειώνει τον συντελεστή

απόδοσης του συστήματος. Τέλος το είδος του υπό μελέτη συστήματος και το επίπεδο ισχύος του επιτρέπουν την υιοθέτηση ενός δικτύου Σ.Ρ. ως κύριο δίκτυο του σκάφους, αν και στις περισσότερες ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις πλοίων επικρατούν τα δίκτυα Ε.Ρ. [3]. Στην παρούσα ενότητα θα γίνεται μια γενική αναφορά στους κινητήρες Σ.Ρ. και στη συνέχεια παρατίθενται οι δυνατές επιλογές κινητήρα από εμπορικά μοντέλα κατασκευαστών σύμφωνα με τις απαιτήσεις του παρόντος σχεδιασμού.

5.4.1 Απαιτήσεις ναυτικού ηλεκτρολογικού εξοπλισμού

Δύο από τις σημαντικότερες απαιτήσεις για την επιλογή και εγκατάσταση του ηλεκτρολογικού υλικού των πλοίων είναι [3]: (α) Εξαιρετική αξιοπιστία, ιδιαίτερα για τα στοιχεία της εγκατάστασης που έχουν σχέση με ζωτικές λειτουργίες του σκάφους (πρόωση, πηδαλιουχία, φωτισμός ναυσιπλοΐας, τηλεπικοινωνία), (β) Ασφάλεια από πλευράς πυρκαγιάς: υλικά άκαυστα ή τουλάχιστον βραδύκαυστα, αποφυγή σπινθηρισμών κλπ..

Οι ηλεκτρικές μηχανές και συσκευές πρέπει να είναι ικανές να λειτουργούν ακόμη και με κλίση 15° προς τα δεξιά ή αριστερά, με διατοιχισμό $22,5^\circ$, με διαμήκη κλίση 5° και προνευστασμό $7,5^\circ$ [3]. Πρέπει επίσης να μπορούν να λειτουργούν ικανοποιητικά σε τελική θερμοκρασία έως 85°C όταν βρίσκονται εκτός μηχανοστασίου ή $90-95^\circ\text{C}$ όταν βρίσκονται στο μηχανοστάσιο. Η τελική θερμοκρασία καθορίζεται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τη θέρμανση του μηχανήματος κατά τη λειτουργία του. Ας σημειωθεί ότι η θερμοκρασία αυτή επηρεάζει τόσο την απόδοση του μηχανήματος όσο και τη διάρκεια ζωής του. Για παράδειγμα, μια επαφή ή ένας αυτόματος διακόπτης μπορεί να μη λειτουργήσει εάν υπερθερμανθεί. Όταν η θερμοκρασία αυξάνει, η τάση μιας γεννήτριας πέφτει, ενώ η ταχύτητα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αυξάνει. Είναι απαραίτητος λοιπόν ο αερισμός των μηχανών, που όταν δεν είναι επαρκής για τη διατήρηση των θερμοκρασιών σε χαμηλά επίπεδα, συμπληρώνεται με κατάλληλο σύστημα ψύξης.

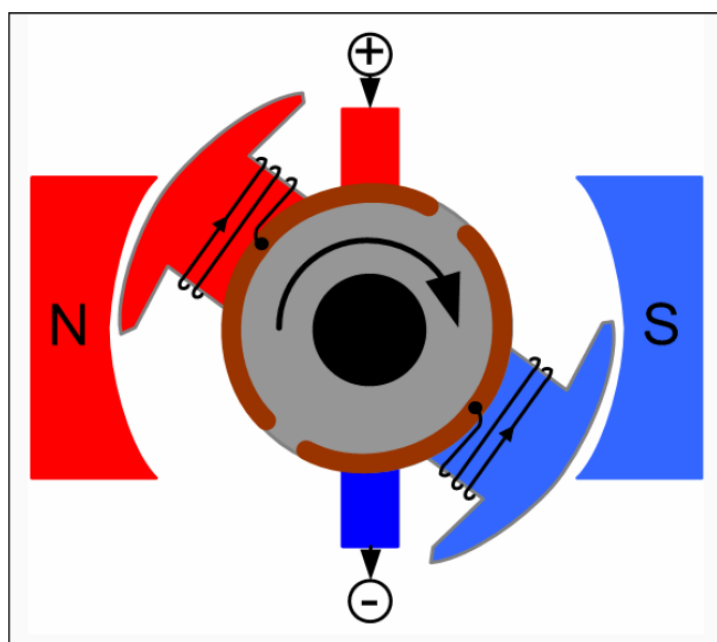
Συνιστάται η τοποθέτηση των μηχανών με τον άξονα περιστροφής τους είτε κατακόρυφο είτε παράλληλο με την τρόπιδα του πλοίου. Εάν η τοποθέτηση κατά το εγκάρσιο επίπεδο είναι αναπόφευκτη, θα πρέπει να ληφθούν μέτρα (τοποθέτηση ωστικών εδράνων, κλπ.), ώστε να αποφευχθούν χτυπήματα του άξονα ή προβλήματα λίπανσης των εδράνων κατά τους διατοιχισμούς του πλοίου [3].

5.4.2 Γενικά περί κινητήρα συνεχούς ρεύματος

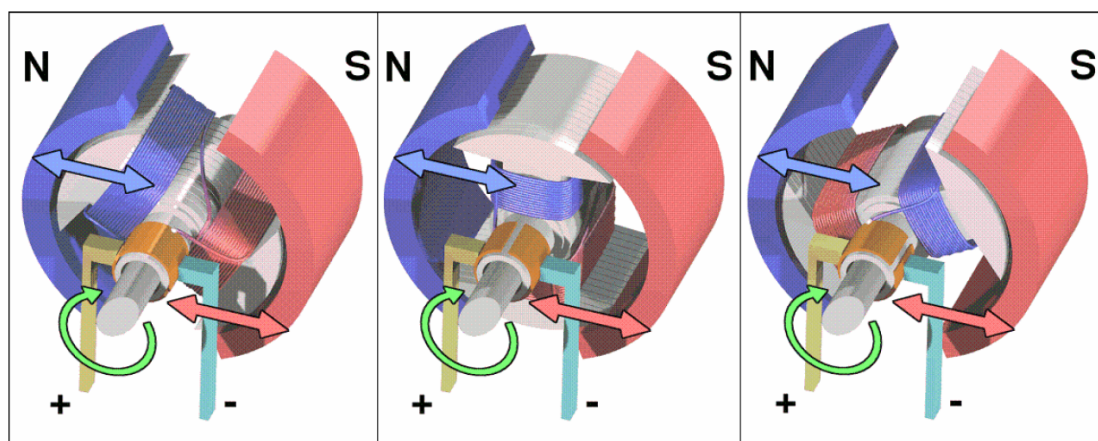
Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούν για την τροφοδοσία τους συνεχές ρεύμα, όπως φανερώνει και η ονομασία τους. Κατασκευαστικά αποτελούνται από ένα ακίνητο μέρος, το στάτη, και ένα περιστρεφόμενο, το δρομέα. Ο άξονας κίνησης της μηχανής είναι επέκταση του δρομέα. Λειτουργικά αποτελούνται από τον ηλεκτρομαγνήτη διέγερσης, τον συλλέκτη, τις ψήκτρες και έναν μόνιμο μαγνήτη (βλ. Σχ. 5.8 και 5.9).

Η αρχή λειτουργίας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος βασίζεται στις δυνάμεις αλληλεπίδρασης που υπάρχουν μεταξύ δύο μαγνητικών υλικών. Συγκεκριμένα ενός μόνιμου μαγνήτη και του τροφοδοτημένου με συνεχές ρεύμα τυλίγματος διέγερσης, ο οποίος συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης. Ανάλογα με τον προσανατολισμό τους οι δυνάμεις αυτές μπορεί να είναι ελκτικές ή απωστικές. Η τοποθέτηση του μόνιμου μαγνήτη και του τυλίγματος διέγερσης είναι τέτοια, ώστε σε κάθε στιγμή οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ τους να δημιουργούν μια ροπή που θα τείνει να περιστρέψει

τον δρομέα κατά την επιθυμητή κατεύθυνση. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει η ροή του ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης να αλλάζει φορά, ανάλογα με τη θέση του τυλίγματος ως προς τον μόνιμο μαγνήτη. Αυτό γίνεται με τη χρήση του συλλέκτη και των ψήκτρων. Ο συλλέκτης περιστρέφεται μαζί με τον δρομέα ενώ οι ψήκτρες παραμένουν σταθερές. Έτσι ανάλογα με τη θέση του συλλέκτη ως προς τις ψήκτρες εναλλάσσεται η ροή ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης. Παρόλο που η μηχανή τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα, το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα.



Σχήμα 5.8 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος δύο πόλων [54].



Σχήμα 5.9 Απεικόνιση κινητήρα συνεχούς ρεύματος σε διαδοχικές θέσεις κατά τη διάρκεια περιστροφής του δρομέα [54].

Υπάρχουν διάφορα είδη μηχανών συνεχούς ρεύματος. Το τύλιγμα διέγερσης μπορεί να βρίσκεται τοποθετημένο είτε στον στάτη είτε στον δρομέα. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και μόνιμο μαγνήτη, των οποίων η λειτουργία περιγράφηκε προηγουμένως, ήταν οι πρώτοι που ανακαλύφθηκαν. Αργότερα δημιουργήθηκαν και κινητήρες συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα αντί μόνιμου μαγνήτη.

Σε αυτούς το τύλιγμα διέγερσης μπορεί να τοποθετηθεί σε σειρά ή παράλληλα / ανεξάρτητα με το τύλιγμα του τυμπάνου [54].

5.4.3 Χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας – ροπής μηχανής Σ.Ρ.

Εάν μια μηχανή προσλαμβάνει ρεύμα, τότε μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική, δηλαδή λειτουργεί ως κινητήρας. Για τους κινητήρες ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η σχέση μεταξύ στροφών και αναπτυσσόμενης ροπής και αποτελεί την κατεξοχήν χαρακτηριστική αυτών. Ένας κινητήρας είναι δυνατόν αμέσως να μετατραπεί σε γεννήτρια, εάν η εσωτερική τάση δηλαδή η τάση εξ' επαγωγής του τυμπάνου γίνει μεγαλύτερη της τάσης των ακροδεκτών [55].

Για τη μελέτη της λειτουργίας της μηχανής συνεχούς ρεύματος, παρατίθενται όλες οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία τους και παρέχουν τη δυνατότητα να διακρίνουμε εύκολα πότε μια μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας και πότε ως γεννήτρια [55].

Εξίσωση τάσεων:

$$U_T = U_{επ} \pm R_T I_T + U_{\Psi} \quad (5.1)$$

όπου

U_T η τάση τυμπάνου.

$U_{επ}$ η τάση εξ' επαγωγής.

R_T η αντίσταση τυμπάνου.

I_T το ρεύμα τυμπάνου.

U_{Ψ} η τάση ψηκτρών λόγω της αντίστασης επαφής, μικρή και συνήθως παραλείπεται.

Εξίσωση τάσεων εξ' επαγωγής:

$$U_{επ} = C\Phi\Omega \quad (5.2)$$

όπου

C κατασκευαστική σταθερά της μηχανής.

Φ η μαγνητική ροή.

Ω η γωνιακή ταχύτητα.

Εξίσωση ρευμάτων:

$$I_T = I \pm I_F \quad (5.3)$$

όπου I_F το ρεύμα διέγερσης.

Εξίσωση εσωτερικής ροπής:

$$M = C\Phi I_T \quad (5.4)$$

όπου M η ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Εξισώσεις ισχύος για κινητήρα:

$$P_{\pi\rho} = U_T I_T \quad (5.5)$$

$$P_{\alpha\pi} = M\Omega = U_{\varepsilon\pi} I_T \quad (5.6)$$

όπου $P_{\pi\rho}$, η προσλαμβανόμενη ισχύς και $P_{\alpha\pi}$, η αποδιδόμενη, επίσης έχουν αμεληθεί οι απώλειες λόγω τριβής, οι οποίες προστίθενται στο 2^ο μέλος της Εξ. (5.6).

Εξισώσεις ισχύος για γεννήτρια:

$$P_{\pi\rho} = M\Omega = U_{\varepsilon\pi} I_T \quad (5.7)$$

$$P_{\alpha\pi} = U_T I_T \quad (5.8)$$

Το αρνητικό πρόσημο στις εξισώσεις (5.1) και (5.3) ισχύει για την περίπτωση κατά την οποία η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Από τις Εξ. (5.1), (5.2) και (5.4) προκύπτει η σχέση μεταξύ ταχύτητας Ω και ροπής. Με αντικατάσταση προκύπτει:

$$\Omega = \frac{U_T}{C\Phi} \mp \frac{R_T}{(C\Phi)^2} M \quad (5.9)$$

Στην Εξ. (5.9) και μόνο για τα πρόσημα ισχύει – για κινητήρες και + για γεννήτριες. Εάν θεωρηθεί $M = 0$, δηλαδή η ροπή και συνεπώς το ρεύμα μηδενισθούν, θα προκύψει η ταχύτητα Ω_0 στην κατάσταση εν κενώ:

$$\Omega_0 = \frac{U_T}{C\Phi} \quad (5.10)$$

Συνήθως και τα δύο μέλη της Εξ. (5.9) διαιρούνται δια του Ω_0 και τελικά η εξίσωση ροπής ταχύτητας για κινητήρα χρησιμοποιείται υπό την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\Omega}{\Omega_0} = 1 - \frac{R_T}{U_T} \cdot \frac{1}{C\Phi} M \quad (5.11)$$

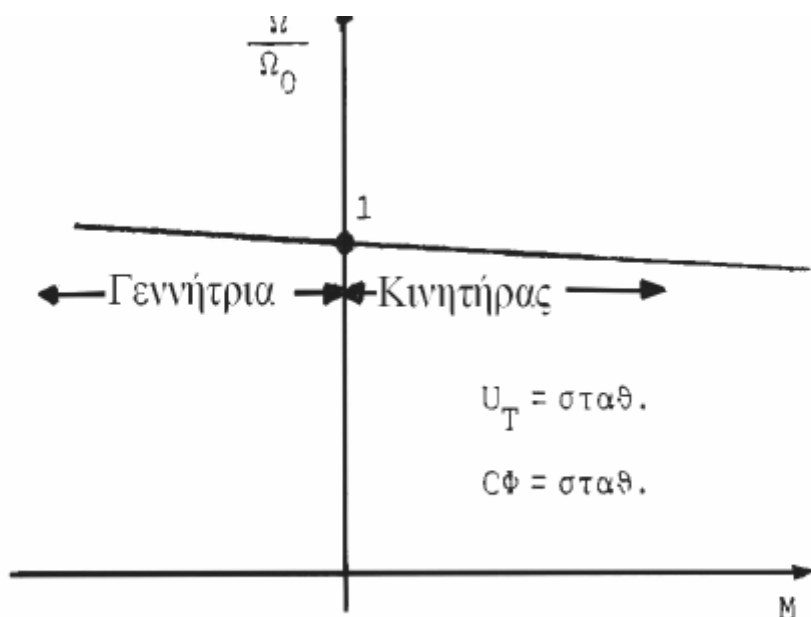
Με τη βοήθεια της Εξ. (5.11) είμαστε σε θέση να χαράξουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες για τους διάφορους τύπους μηχανών συνεχούς ρεύματος.

5.4.3.1 Μηχανές ξένης ή παραλλήλου διέγερσης

Σε αυτές τις μηχανές η διέγερση μπορεί να διατηρηθεί σταθερή, ανεξάρτητη από το φορτίο της μηχανής. Η τάση στους ακροδέκτες εάν δεν υπάρχει σκοπιμότητα μεταβολής της διατηρείται σταθερή. Εάν λοιπόν $U_T =$ σταθερό και $C\Phi =$ σταθερό, τότε γνωρίζουμε την ταχύτητα εν κενώ Ω_0 και η εξίσωση $\Omega = f(M)$ (βλ. Εξ. (5.11)) αποκτά την μορφή:

$$\frac{\Omega}{\Omega_0} = 1 - KM \quad (5.12)$$

Για τη μηχανή παραλλήλου διέγερσης σταθερή U_T σημαίνει και σταθερή ροή Φ . Στο Σχ. 5.10 απεικονίζεται η χαρακτηριστική αυτής της μηχανής.



Σχήμα 5.10 Καμπύλη ταχύτητας – ροπής μηχανών ξένης ή παραλλήλου διέγερσης [55].

Κατά τη λειτουργία των μηχανών ως κινητήρες έχουμε μικρή πτώση της ταχύτητας αυξανόμενης της ροπής, ενώ κατά τη λειτουργία ως γεννήτρια έχουμε μικρή αύξηση. Παρατηρούμε ότι η μηχανές ξένης διέγερσης έχουν σχεδόν σταθερή ταχύτητα μεταβαλλόμενης της ροπής, δηλαδή του φορτίου και αυτό είναι μια σπουδαία ιδιότητα, την οποία χρησιμοποιούμε πολύ στις διάφορες εφαρμογές [55].

5.4.3.2 Μηχανές με διέγερση σε σειρά

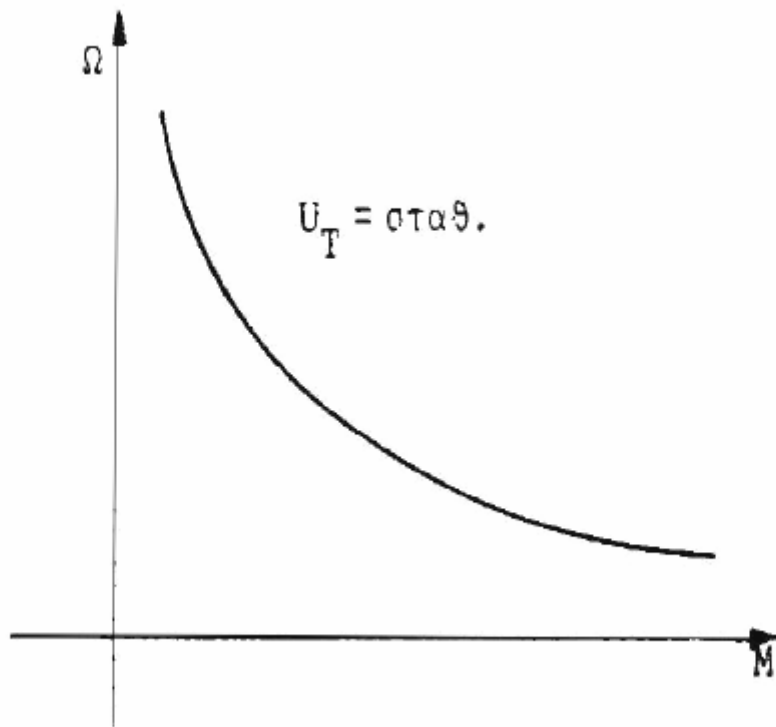
Στις μηχανές με διέγερση σε σειρά το ρεύμα, το οποίο δημιουργεί τη μαγνητική ροή, παράγει συγχρόνως και τη ροπή. Για τη μηχανή αυτή ισχύει:

$$\Phi = KI, \quad M = C\Phi I = \frac{C}{K} \Phi^2 = CKI^2 \quad (5.13)$$

οπότε η Εξ. (5.9) παίρνει τη μορφή:

$$\Omega = \frac{U_T}{\sqrt{KC}\sqrt{M}} - \frac{R_T}{KC} \quad (5.14)$$

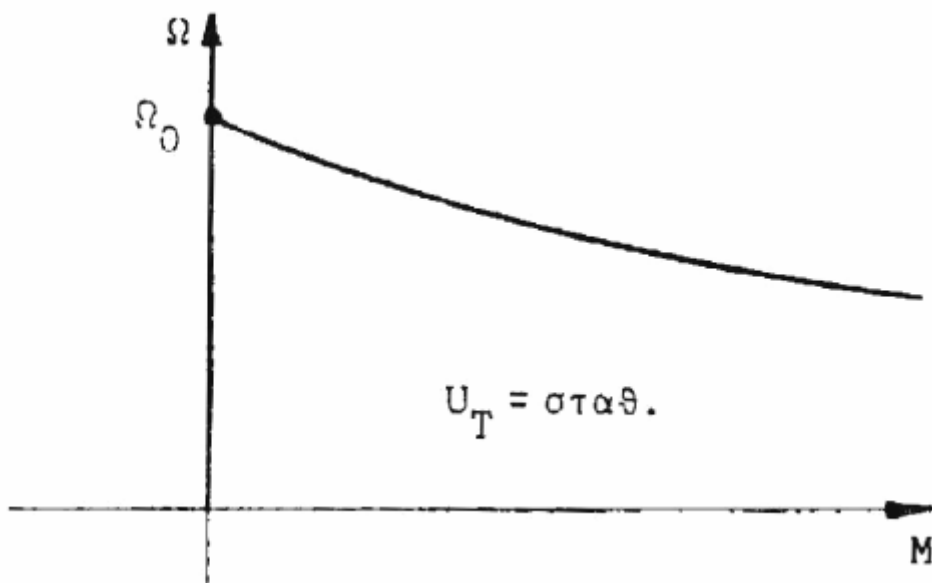
Η Εξ. (5.14) απεικονίζεται στο Σχ. 5.11. Για μικρές τιμές της ροπής η ταχύτητα γίνεται πολύ μεγάλη, ενώ σε μικρές ταχύτητες η ροπή αποκτά μεγάλες τιμές. Η μηχανή αυτή βρίσκει εφαρμογή κυρίως ως κινητήρας σε κινητήρια συστήματα, στα οποία κατά την εκκίνηση απαιτείται πολύ μεγάλη ροπή, όπως συμβαίνει στους σιδηροδρομικούς συρμούς. Πέραν αυτής της εφαρμογής η χρησιμοποίησή της είναι περιορισμένης έκτασης [55].



Σχήμα 5.11 Χαρακτηριστική ταχύτητας - ροπής μηχανών με διέγερση σε σειρά [55].

5.4.3.3 Μηχανές διπλής διέγερσης

Στο Σχ. 5.12 απεικονίζεται η χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – ταχύτητας για μία μηχανή με διπλή διέγερση. Λόγω της παράλληλης διέγερσης για $M = 0$, η μηχανή έχει πεπερασμένη ταχύτητα Ω_0 . Όταν η ροπή μεγαλώσει οι στροφές μειώνονται. Η σύγκριση είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την μηχανή παραλλήλου διέγερσης.



Σχήμα 5.12 Χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής μηχανής διπλής διέγερσης [55].

5.4.3.4 Μηχανές Σ.Ρ. μόνιμου μαγνήτη

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών και συγκεκριμένα η πρόοδος στην τεχνολογία των μόνιμων μαγνητών επηρεάζει σημαντικά την περιοχή των ηλεκτρικών μηχανών. Οι μόνιμοι μαγνήτες αντικαθιστούν τα τυλίγματα διέγερσης των ηλεκτρικών μηχανών. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης μίας μηχανής καθώς μηδενίζονται οι απώλειες στα τυλίγματα διέγερσης. Η μείωση των απωλειών συντελεί και στη μείωση της εκπεμπόμενης θερμότητας (φαινόμενο Joule) στις μηχανές, άρα μπορεί να οδηγήσει σε πιο συμπαγείς (compact) κατασκευές. Βέβαια πέρα από τα καλά που προσφέρει η χρήση μόνιμων μαγνητών πρέπει να σημειωθεί και η περιορισμένη διάρκεια ζωής που έχουν, καθώς κάποια στιγμή έρχεται η απομαγνήτιση. Η τεχνολογική πρόοδος τα τελευταία χρόνια όμως, κατέστησε δυνατή την κατασκευή κραμάτων μόνιμων μαγνητών που έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν σταθερή τη μαγνήτισή τους για αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, όπως έχει αναφερθεί και στο 1^ο κεφάλαιο. Τέλος υπάρχουν περιορισμοί στην κατασκευή κινητήρων μεγάλης ονομαστικής ισχύος.

Η χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη μοιάζει με αυτήν του κινητήρα ξένης ή παραλλήλου διέγερσης (βλ. και Σχ. 5.10). Η χρήση του μόνιμου μαγνήτη έχει σαν αποτέλεσμα το $C\Phi$ να είναι σταθερό. Άρα αν θεωρήσουμε και την R_T σταθερή τότε η Εξ. (5.9), γράφεται:

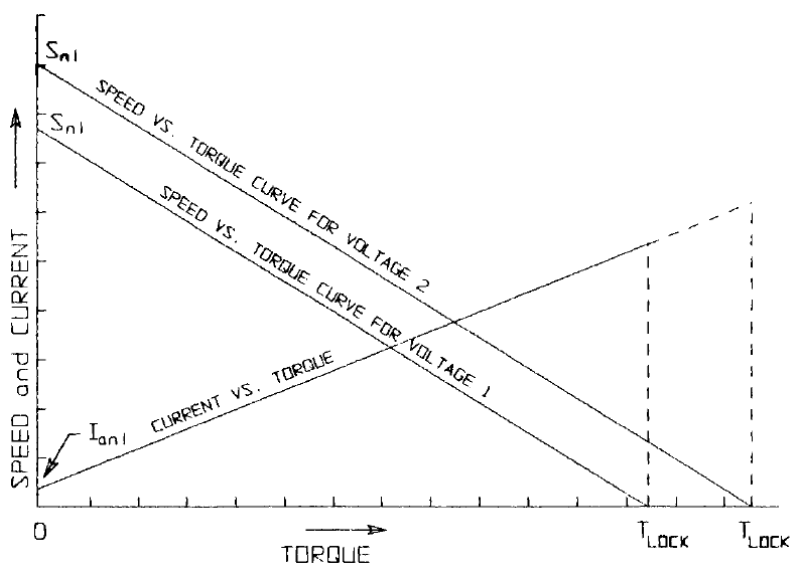
$$\Omega = -aM + bU_T \quad (5.15)$$

όπου a και b σταθερές.

Επίσης με $C\Phi = \text{σταθερό}$, προκύπτει από την Εξ. (5.4) η εξίσωση:

$$M = K \cdot I_T \quad (5.16)$$

Στο Σχ. 5.13 φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας και ροπής – ρεύματος σε κοινό διάγραμμα.



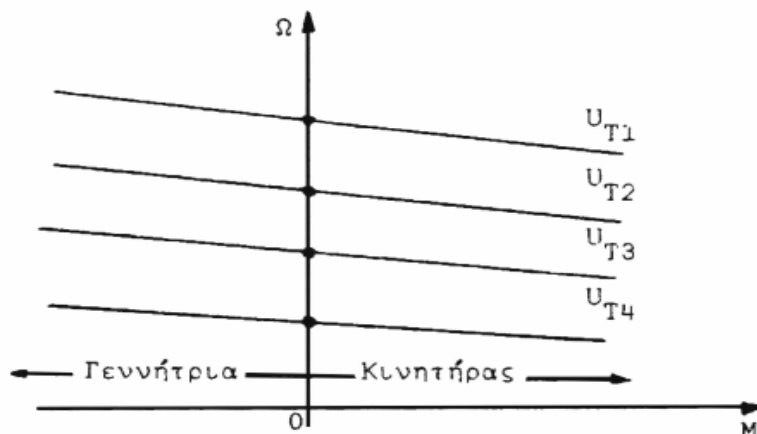
Σχήμα 5.13 Χαρακτηριστικές ταχύτητας και ρεύματος συναρτήσει της ροπής κινητήρα Σ.Ρ. μόνιμου μαγνήτη [56].

5.4.4 Ρύθμιση στροφών μηχανών Σ.Ρ.

Οι μέθοδοι ρύθμισης των στροφών των μηχανών Σ.Ρ. γίνονται κατανοητές αν μελετήσει κανείς την Εξ. (5.9).

$$\Omega = \frac{U_T}{C\Phi} \mp \frac{R_T}{(C\Phi)^2} M \quad (5.9)$$

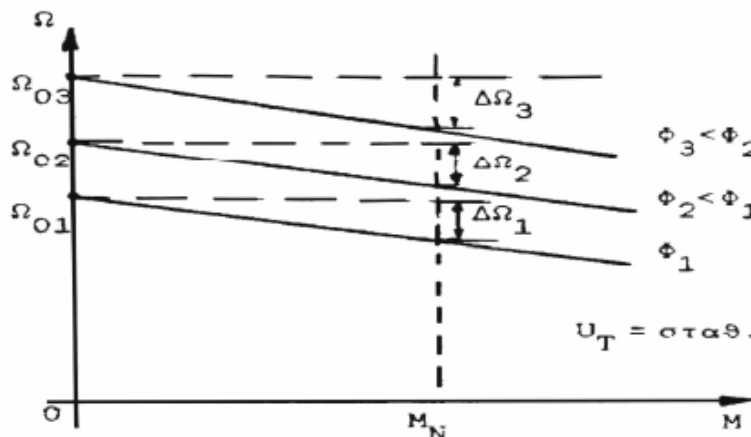
1. Μέσω της τάσης τυμπάνου U_T (Σχ. 5.14).



Σχήμα 5.14 Ρύθμιση των στροφών μέσω της μεταβολής της τάσης τυμπάνου [55].

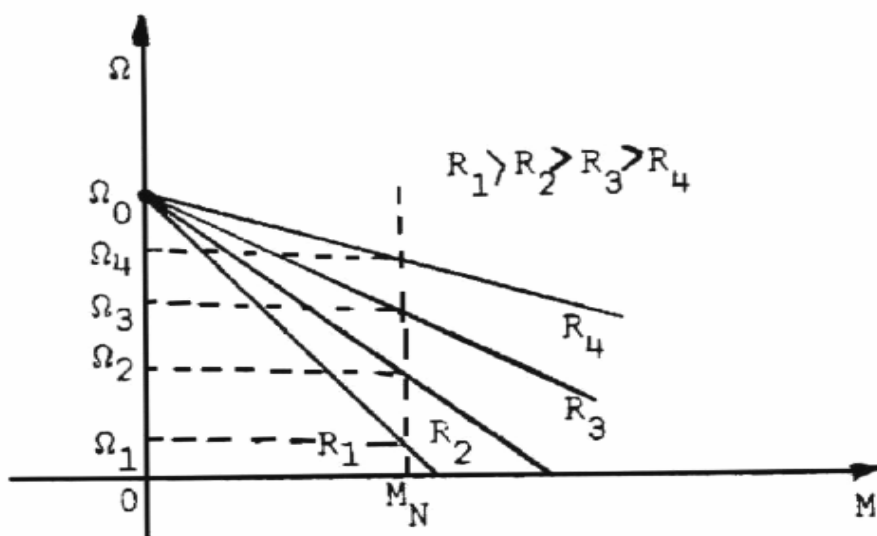
Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των στροφών του κινητήρα πρόωσης της μελέτης αυτής. Η παραγόμενη, από τις κυβέλες καυσίμου, τάση ρυθμίζεται μέσω των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος από την τάση των 0 V έως την ονομαστική τάση του ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης. Έτσι μπορούμε ανά πάσα στιγμή να ελέγχουμε τις στροφές του κινητήρα και άρα της έλικας του σκάφους. Και στις δύο περιπτώσεις ηλεκτρικών κινητήριων συστήματος που μελετώνται οι στροφές του ηλεκτρικού κινητήρα ρυθμίζονται, δια μεταβολής της τάσης του τυμπάνου του, μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

2. Μέσω μεταβολής της μαγνητικής ροής Φ (Σχ. 5.15)



Σχήμα 5.15 Ρύθμιση των στροφών μέσω της μεταβολής της μαγνητικής ροής [55].

3. Μέσω μίας αντίστασης που συνδέεται σε σειρά με το τύμπανο (Σχ. 5.16)



Σχήμα 5.16 Ρύθμιση των στροφών μέσω εν σειρά αντίστασης στο τύμπανο [55].

Από τις παραπάνω μεθόδους ρύθμισης των στροφών μίας μηχανής συνεχούς ρεύματος η καλύτερη και αποδοτικότερη μέθοδος είναι μέσω της μεταβολής της τάσης τυμπάνου. Η μέθοδος αυτή έχει μεγάλη περιοχή ρύθμισης, $-U_N \leq U_T \leq U_N$, οπότε και η Ω μεταβάλλεται στην περιοχή $-\Omega_N \leq \Omega \leq \Omega_N$.

5.4.5 Επιλογή ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης

Η βελτιστοποίηση της κατασκευής και της λειτουργίας ενός κινητηρίου συστήματος απαιτεί την προσαρμογή του κινητήρα στις ανάγκες και εν γένει στις λειτουργικές ιδιότητες της μηχανής παραγωγής έργου. Η προσαρμογή αυτή στηρίζεται στη φυσική συμπεριφορά, στην μορφή της κατασκευής, στον τρόπο ψύξεως και στο είδος προστασίας του κινητήρα. Εκτός από την προσαρμογή αυτή που αφορά το καθαρά τεχνικό μέρος, πρέπει επίσης η βελτιστοποίηση να περιλαμβάνει οικονομοτεχνικά θέματα, στηριζόμενοι στις αρχές, ότι το κόστος κατασκευής και λειτουργίας πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρό, η αξιοπιστία της λειτουργίας να είναι υψηλή και ο χώρος που απαιτεί ολόκληρη η εγκατάσταση να είναι όσο είναι δυνατόν μικρότερος. Για να κινήσουμε μία μηχανή παραγωγής έργου πρέπει να επιλέξουμε έναν κινητήρα, του οποίου τα μηχανικά χαρακτηριστικά ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της λειτουργίας και εξασφαλίζουν ευστάθεια λειτουργίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η ονομαστική ισχύς, η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας, οι δυνατότητες ελέγχου της ταχύτητας, το μέγεθος της ροπής εκκίνησης και της ροπής πέδησης, η συμπεριφορά του κινητήρα στα μεταβατικά φαινόμενα και η επίδραση της ροπής αδρανείας [50].

Η επιλογή ενός ηλεκτρικού κινητήρα κατά πρώτον γίνεται με κριτήρια την ισχύ, τη ροπή και τον αριθμό στροφών. Επειδή οι ηλεκτρικοί κινητήρες, εκτός από τις μηχανές μεγάλης ισχύος κατασκευάζονται μαζικά και κατά σειρές ισχύος, είμαστε υποχρεωμένοι στις περισσότερες περιπτώσεις να επιλέξουμε τον κινητήρα μας από τις σειρές αυτές, που περιλαμβάνονται στους εμπορικούς καταλόγους των κατασκευαστών. Συνήθως, στις διάφορες εφαρμογές επιλέγονται ασύγχρονοι κινητήρες με σύγχρονο αριθμό στροφών 1500 και 1000 rpm, καθώς και κινητήρες συνεχούς με ονομαστικούς αριθμούς στροφών τη ίδια τάξης, Μηχανές με 3000 rpm

συνοδεύονται από ισχυρούς θορύβους και αποφεύγονται. Μηχανές με μικρότερους αριθμούς στροφών έχουν μεγαλύτερο βάρος και γενικά δε συνηθίζονται, χρησιμοποιούνται δε σε ειδικές περιπτώσεις και κυρίως όταν πρόκειται για μεγάλη ισχύ. Η ονομαστική ισχύς είναι καθοριστικός παράγοντας για τον προσδιορισμό του κόστους του κινητήρα. Πρέπει δε να επιλέγουμε τη σωστή ισχύ για δύο λόγους. Μικρότερη ισχύς από την απαιτούμενη δεν αρκεί να κινηθεί η μηχανή παραγωγής έργου και να παράγει το απαιτούμενο έργο, έτσι δε φθάνουμε την προγραμματισμένη παραγωγή, εξ' άλλου υπερφόρτιση του κινητήρα προκαλεί βλάβες και τον θέτει εκτός λειτουργίας. Μεγαλύτερη ισχύς του κινητήρα από την απαιτούμενη από το φορτίο έχει δύο άσχημα επακόλουθα, την επένδυση κεφαλαίου χωρίς εκμετάλλευση και το μειωμένο συντελεστή απόδοσης. Όλες οι παραπάνω παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη αφού πρώτα αντιμετωπιστούν δύο βασικά προβλήματα, (α) η μέγιστη ροπή φορτίου και (β) η θέρμανση του κινητήρα [50].

Στο εμπόριο υπάρχει σχετικά μεγάλη ποικιλία όσον αφορά την ονομαστική ισχύ, την ονομαστική τάση λειτουργίας και τις ονομαστικές στροφές ανά λεπτό κινητήρων συνεχούς ρεύματος ξένης ή παράλληλης διέγερσης. Ύστερα από έρευνα αγοράς και λαμβανομένων υπόψη των υπολοίπων χαρακτηριστικών του κινητήριου συστήματος, με έμφαση στο συνδυασμό εύρους παραγόμενης τάσης κυψέλης καυσίμου και κατάλληλου ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος προέκυψαν οι κινητήρες των οποίων τα κύρια χαρακτηριστικά παρατίθενται στον Πίνακα 5.3.

Η έρευνα αγοράς εστιάστηκε σε κινητήρες ισχύος περί τα 120 kW, λαμβανομένης υπόψη της καθαρής ισχύος της κυψέλης δηλαδή περί τα 130 kW. Σε περίπτωση που η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό μερικό φορτίο, π.χ. για την ονομαστική ισχύ του κινητήρα πρόωσης, τότε όπως έχει αναφερθεί και στο 1^ο κεφάλαιο, στα πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου, αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης της κυψέλης και άρα όλου του κινητήριου συστήματος. Οπότε η λειτουργία της κυψέλης υπό μερικό φορτίο δεν αποτελεί πρόβλημα.

Όσον αφορά την ονομαστική τάση λειτουργίας η έρευνα εστίασε στην περιοχή των 400 – 500 V ώστε να ταιριάζουν με τα χαρακτηριστικά της κυψέλης. Αν θεωρηθεί το πρώτο υπό μελέτη κινητήριο σύστημα με τη μία μονάδα κυψελών καυσίμου (βλ. Σχ. 5.4) τότε η παραγόμενη τάση των κυψελών κυμαίνεται μεταξύ 800 V και 550 V. Συνεπώς, για οποιοδήποτε επίπεδο παραγόμενης τάσης μπορούμε μέσω ενός μετατροπέα υποβιβασμού να ρυθμίζουμε την τάση τυμπάνου από 0 V μέχρι και την ονομαστική τάση του κινητήρα οπότε να ελέγχουμε τις στροφές του κινητήρα από 0 μέχρι τον ονομαστικό αριθμό.

Αν τώρα θεωρηθεί το δεύτερο υπό μελέτη κινητήριο σύστημα με τις δύο μονάδες κυψελών καυσίμου (βλ. Σχ. 5.5) τότε η παραγόμενη τάση των κυψελών κυμαίνεται μεταξύ 400 V και 275 V σε καθένα από τα δύο παραλληλισμένα συστήματα κυψελών καυσίμου. Οπότε απαιτείται η ανύψωσή της για να ταιριάζει με αυτήν του κινητήρα. Αυτό θα γίνει μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης (έναν για κάθε κυψέλη) ο οποίος θα ανυψώνει στα 500 V ανεξάρτητα από την τάση που παράγει η κυψέλη. Όμως, όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης έχει περιορισμό στην ανύψωση. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι μέχρι περίπου τριπλάσια της τάσης εισόδου του μετατροπέα. Στην παρούσα μελέτη ο λόγος ανύψωσης των 500 V προς τα 275 V είναι αρκετά μικρότερος του τρία οπότε καθιστά το μετατροπέα πρακτικά υλοποιήσιμο. Από εκεί και πέρα εφόσον πραγματοποιήθηκε ανύψωση στα 500 V μπορούμε, όπως και στην περίπτωση του συστήματος με τη μία μονάδα κυψελών καυσίμου, μέσω ενός μετατροπέα υποβιβασμού να ρυθμίσουμε αυτήν την τάση ώστε να ελέγξουμε τις στροφές του κινητήρα πρόωσης οπότε και της έλικας.

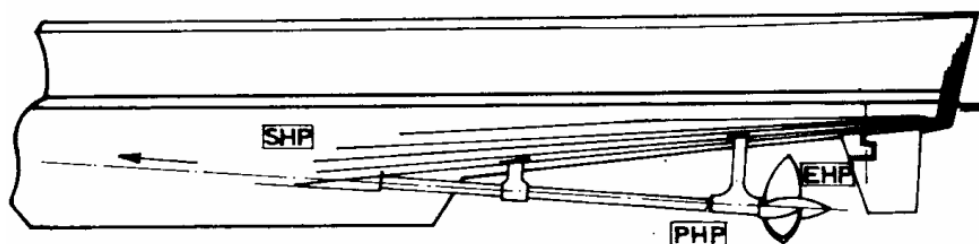
Πίνακας 5.3 Βασικά χαρακτηριστικά κινητήρων Σ.Ρ με σκοπό την μελέτη χρήσης τους ως κινητήρες πρόωσης στο υπό μελέτη ναυτικό κινητήριο σύστημα [57], [58], [59].

Παράμετροι	ABB DMI200H	SIEMENS Size 200	BRUSATORI ML200 S
Τύπος μηχανής	Ξένης διέγερσης	Ξένης διέγερσης	Ξένης διέγερσης
Ονομαστική ισχύς (P_N)	124 kW	123 kW	122 kW
Ονομαστική τάση (V_N)	470 V	470 V	440 V
Ονομαστικό ρεύμα (I_N)	293 A	288 A	304 A
Βαθμός απόδοσης (η)	88,2 %	89 %	91 %
Ονομαστικές στροφές (n_N)	1407 rpm	1510 rpm	1540 rpm
Ονομαστική ροπή (M_N)	843 Nm	780 Nm	754 Nm
Αντίσταση τυμπάνου (R_T)	110 mΩ	117 mΩ	42 mΩ
Επαγωγή τυμπάνου (L_T)	2,03 mH	2,29 mH	2,2 mH
Ονομαστική ισχύς διέγερσης (P_{fN})	2750 W	2800 W	2080 W
Ονομαστική τάση διέγερσης (I_{fN})	110-400 V DC συνήθως 310 V	110-500 V DC	55-330 V DC
Ροπή αδράνειας (J)	1,0 kgm ²	1,2 kgm ²	0,56 kgm ²
Βάρος	500 kg	610-710 kg ανάλογα με το είδος ψύξης	610 kg
Όγκος (προσέγγιση IP23, μέγιστες διαστάσεις LxWxH)	0,42 m ³	0,53 m ³	0,39 m ³
Ψυκτικό μέσο	Αέρας ή νερό	Αέρας ή νερό	Αέρας
Προστασία	IP23, IP54, IP55	IP23 και IP54	IP23, IP44, IP54, IP55

Η επιλογή ονομαστικής τάσης κινητήρα περί τα 500 V έχει ως συνέπεια ένα υψηλό ρεύμα περί τα 300 A για την επίτευξη της ισχύος των 120 kW. Τόσο το υψηλό ρεύμα τροφοδοσίας των κινητήρων πρόωσης όσο και το υψηλό ρεύμα των κυβελών καυσίμου (μέγιστο 300 A) απαιτεί διαφορετικό, από τον συμβατικό (4^ο κεφάλαιο), σχεδιασμό για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Θα χρησιμοποιηθούν μετατροπείς διαδοχικής αγωγής (interleaved converters), για τους οποίους θα ακολουθηθεί αναλυτική μελέτη και σχεδίαση παρακάτω.

Όσον αφορά τις ονομαστικές στροφές του κινητήρα επιλέχθηκαν περί τις 1500 rpm με εύρος ελέγχου από 0 μέχρι 1500 rpm μέσω του ηλεκτρονικού μετατροπέα. Σε περίπτωση που η έλικα σταθερού βήματος έχει μικρότερο ονομαστικό αριθμό στροφών, μπορούμε μέσω μειωτήρα να ταιριάζουμε τους ονομαστικούς αριθμούς στροφών κινητήρα και έλικας. Ή για να αποφύγουμε την ύπαρξη μειωτήρα να επιλέξουμε κινητήρα διαφορετικών ονομαστικών στροφών στα ίδια επίπεδα τάσης και ισχύος κάτι τι οποίο είναι εφικτό λόγω της ποικιλίας λύσεων. Πάντως στα πλαίσια της παρούσας μελέτης θα θεωρήσουμε ότι έλικα και ηλεκτρικός κινητήρας συνδέονται απ' ευθείας χωρίς μειωτήρα (γεγονός το οποίο μειώνει τις απώλειες του αξονικού συστήματος) και στρέφονται με τον ίδιο αριθμό στροφών.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθούμε σε ορισμένα σημαντικά μεγέθη για την κατανόηση των θεμάτων ισχύος και απόδοσης του συστήματος πρόωσης ενός σκάφους [12], [60].



Σχήμα 5.17 Ισχύες κατά μήκος του άξονα μεταξύ μηχανής πρόωσης και έλικας [60].

Η ισχύς ρυμούλκησης P_E ή E.H.P. (Effective Horse Power) είναι αυτή που απαιτείται να υπερνικήσει την αντίσταση για δεδομένη ταχύτητα πλεύσης V_s . Για να καταλήξουμε στην απαίτηση ισχύος στον άξονα (και στην απαίτηση ισχύος της κύριας μηχανής) πρέπει να συνυπολογίσουμε όλους τους παράγοντες απωλειών (βλ. και Σχ. 5.17). Ισχύουν οι εξισώσεις [12]:

Βαθμός απόδοσης γάστρας η_H :

$$\eta_H = \frac{P_E}{P_T} = \frac{1-t}{1-w} \quad (5.17)$$

όπου

P_E η ισχύς ρυμούλκησης.

P_T η ισχύς ώσης ή T.H.P. (Thrust Horse Power).

t ο συντελεστής μείωσης ώσης.

w ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου.

Ο βαθμός απόδοσης γάστρας κυμαίνεται μεταξύ 1,1 και 1,4 [12].

Βαθμός απόδοσης έλικας η_P :

$$\eta_P = \frac{P_T}{P_D} = \eta_O \cdot \eta_R \quad (5.18)$$

όπου

P_D η ισχύς που προσδίδεται στην έλικα ή D.H.P. (Delivered Horse Power) ή P.H.P (Propeller Horse Power), βλ. Σχ. 5.17.

η_O ο βαθμός απόδοσης έλικας σε ελεύθερη ροή, μεταξύ 0,35 και 0,75 [12].

η_R ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής, μεταξύ 1,0 και 1,07 [12].

Βαθμός απόδοσης πρόωσης η_D :

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_D} = \frac{P_E}{P_T} \cdot \frac{P_T}{P_D} = \eta_H \cdot \eta_P = \eta_H \cdot \eta_O \cdot \eta_R \quad (5.19)$$

Βαθμός απόδοσης άξονα η_S :

$$\eta_S = \frac{P_D}{P_S} \quad (5.20)$$

όπου

P_S η ισχύς που παράγει η κύρια μηχανή ή S.H.P. (Shaft Horse Power).

Ο βαθμός απόδοσης του άξονα μπορεί να μεταβάλλεται από 0,96 έως 0,995 [12].

Ολικός βαθμός απόδοσης η_T

$$\eta_T = \frac{P_E}{P_S} = \frac{E.H.P.}{S.H.P.} = \frac{P_E}{P_D} \cdot \frac{P_D}{P_S} = \eta_D \cdot \eta_S = \eta_H \cdot \eta_O \cdot \eta_R \cdot \eta_S \quad (5.21)$$

Στην παρούσα μελέτη θα υποθέσουμε έναν ολικό βαθμό απόδοσης ίσο με:

$$\eta_T = \eta_H \cdot \eta_O \cdot \eta_R \cdot \eta_S = 1,2 \cdot 0,6 \cdot 1,03 \cdot 0,985 \Rightarrow \eta_T = 0,73 \quad (5.22)$$

Να σημειωθεί ότι κατά το σχεδιασμό ενός σκάφους προκύπτει η ισχύς ρυμούλκησης, από πειράματα σε μοντέλα, και από εκεί μέσω της Εξ. (5.21) προκύπτει η ισχύς της κύριας μηχανής P_S (S.H.P.). Η παρούσα εργασία, επειδή εστιάζει περισσότερο στο ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα και στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, ακολουθεί κατά κάποιο τρόπο αντίστροφη πορεία. Θεωρείτε ένα ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα κυψελών καυσίμου δεδομένης ονομαστικής ισχύος (120 kW), το οποίο προτείνεται ως εναλλακτικό ενεργειακό σύστημα πρόωσης για ένα δεδομένο σκάφος, όπως θα φανεί σε σχετικό παράδειγμα στο τελευταίο κεφάλαιο.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει και η ονομαστική ροπή Q της έλικας ίση με [12]:

$$Q = \frac{P_D}{2\pi \cdot n} = \frac{0,985 \cdot P_S}{2\pi \cdot \frac{1500}{60s}} [\text{Nm}] \quad (5.23)$$

Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται στην ροπή της έλικας με τη δεδομένη επιλογή κινητήρα και θα πρέπει κατά την εφαρμογή του κινητηρίου συστήματος σε ένα σκάφος να ανταποκρίνεται στα λειτουργικά χαρακτηριστικά του φορτίου του και να καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις του.

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος υπάρχει ένα επιτρεπτό όριο σχετικά με τη μέγιστη ροπή οπότε και το μέγιστο ρεύμα τυμπάνου. Για μηχανές χωρίς τύλιγμα αντιστάθμισης είναι 2 – 2,5 M_N , ενώ για τις μηχανές με τύλιγμα αντιστάθμισης είναι 4 – 4,5 M_N [50]. Για τους κινητήρες του παραπάνω πίνακα είναι δυνατές και οι δύο παραλλαγές.

Σημαντική είναι επίσης η τιμή της ροπής αδράνειας του κινητήρα που θα επιλεγεί. Μικρότερη ροπή αδράνειας σημαίνει περισσότερο «ευκίνητη» μηχανή με καλύτερα χαρακτηριστικά απόκρισης σε μεταβατικές καταστάσεις.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις, ως κινητήρας πρόωσης επιλέχθηκε ο ML200 S (Εικ. 5.2) της ιταλικής εταιρείας Brusatori, χωρίς να σημαίνει ότι οι άλλοι δύο κινητήρες αποκλείονται. Ο κινητήρας αυτός καταλαμβάνει τον μικρότερο όγκο και έχει χαμηλό βάρος (συμπεριλαμβανομένου και το συστήματος ψύξης με αέρα). Έχει πολύ μικρότερη ροπή αδράνειας, οπότε και καλύτερα δυναμικά χαρακτηριστικά, από τους άλλους δύο και έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης ίσο με

91 %. Επίσης οι κινητήρες αυτής της εταιρείας είναι πιστοποιημένοι από τον Νορβηγικό Νηογνώμονα (Det Norske Veritas – DNV). Κατά την παραγγελία του κινητήρα ο σχεδιαστής του ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος μπορεί να επιλέξει τον τρόπο ψύξης μεταξύ IC06, IC17 και IC37 και προστασίας IP23, IP44, IP54 και IP55. Για τη λειτουργία του συστήματος ψύξης με ξένο ανεμιστήρα (βλ. και Εικ. 5.2) χρησιμοποιείται ένα κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος ο οποίος μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω ενός μικρού αντιστροφέα. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος ψύξης για τον κινητήρα ML200 S παρατίθενται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4 Χαρακτηριστικά συστήματος ψύξης του κινητήρα Σ.Ρ. Brusatori ML200 S [59].

	Παροχή αέρα	Πίεση	Ισχύς κινητήρα Ε.Ρ.	Ρεύμα (στα 380 V)
ML200 S	0,58 m ³ /s	10 mbar	2,2 kW	5 A



Εικόνα 5.2 Μορφή κινητήρα συνεχούς ρεύματος της Brusatori [59].

5.5 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος κινητηρίου συστήματος

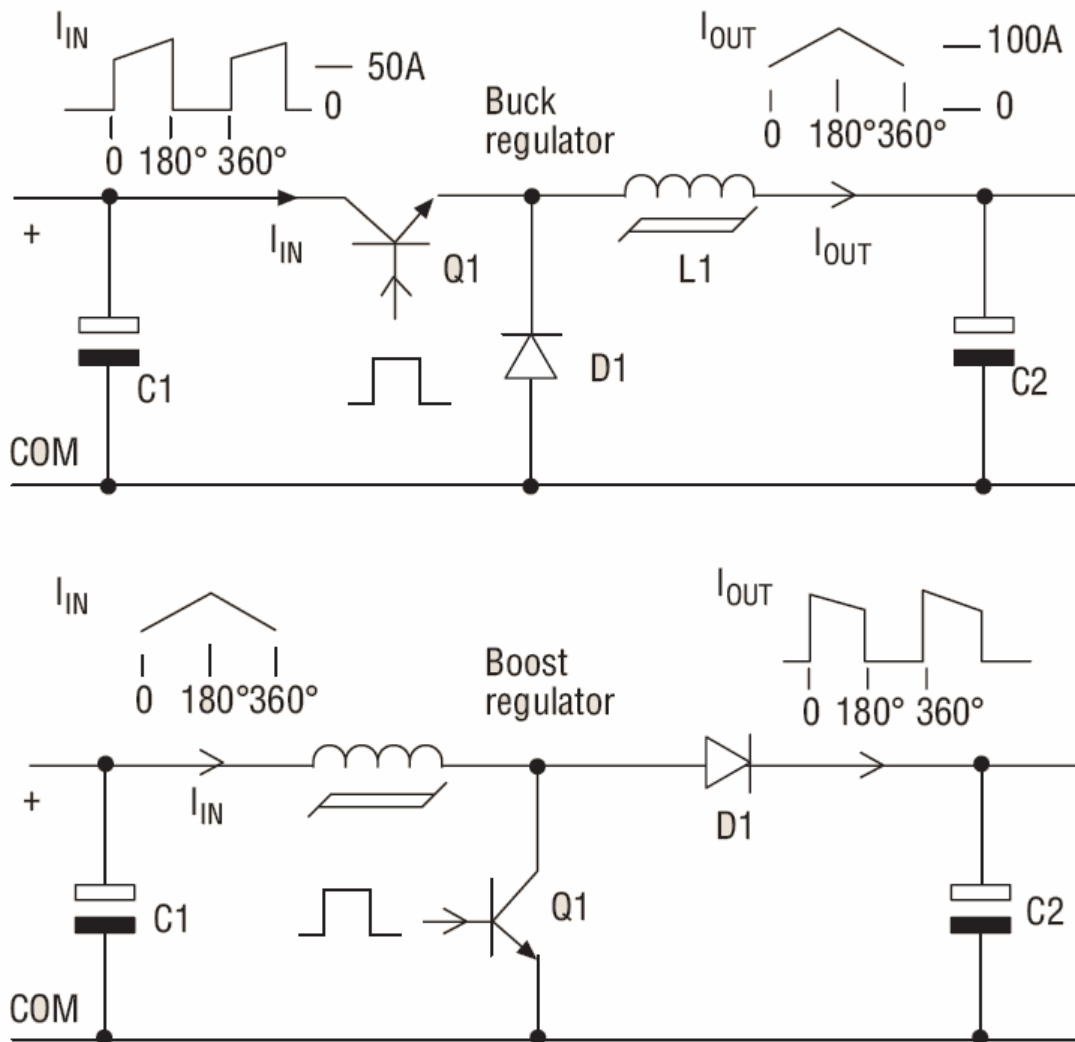
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η επιλογή ονομαστικής τάσης για τον κινητήρα πρόωσης περί τα 500 V έχει ως συνέπεια ένα υψηλό ρεύμα περί τα 300 A για την επίτευξη της ισχύος των 120 kW. Τόσο το υψηλό ρεύμα τροφοδοσίας των κινητήρων πρόωσης όσο και το υψηλό ρεύμα που παράγουν τα συστήματα κυψελών καυσίμου (ονομαστικό 240 A και μέγιστο 300 A) απαιτεί διαφορετικό, από τον συμβατικό (4^ο κεφάλαιο), σχεδιασμό για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Για το σκοπό αυτό, θα χρησιμοποιηθούν μετατροπείς ΣΤ-ΣΤ διαδοχικής αγωγής παράλληλων κλάδων (Multi-channel interleaved dc-dc converters) οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα διαχείρισης υψηλών τιμών ρεύματος. Τα χαρακτηριστικά περιγράφονται παρακάτω [61], [62], [63], [64].

5.5.1 Μετάβαση από τον κλασσικό μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ στον μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ διαδοχικής αγωγής παράλληλων κλάδων

Στο Σχ. 5.18 παρατηρούμε ότι ο μετατροπέας τύπου buck, χαρακτηρίζεται από συνεχές ρεύμα παλμικού τύπου στην είσοδο του και συνεχές τριγωνικό ρεύμα στην

έξοδο του με μία κυμάτωση η οποία όπως έχει αναφερθεί εξαρτάται από το μέγεθος του πηνίου εξόδου. Σε εφαρμογές υψηλού ρεύματος, σαν την παρούσα εφαρμογή, τα παλμικά ρεύματα μπορεί να προκαλέσουν μεγάλο πρόβλημα στους πυκνωτές εξομαλύνσης τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο του μετατροπέα, ανάλογα με το που εμφανίζονται [64]. Στον μετατροπέα τύπου boost το παλμικό ρεύμα εμφανίζεται στην έξοδο ενώ το τριγωνικό στην είσοδο, λόγω της εκεί παρουσίας του πηνίου.

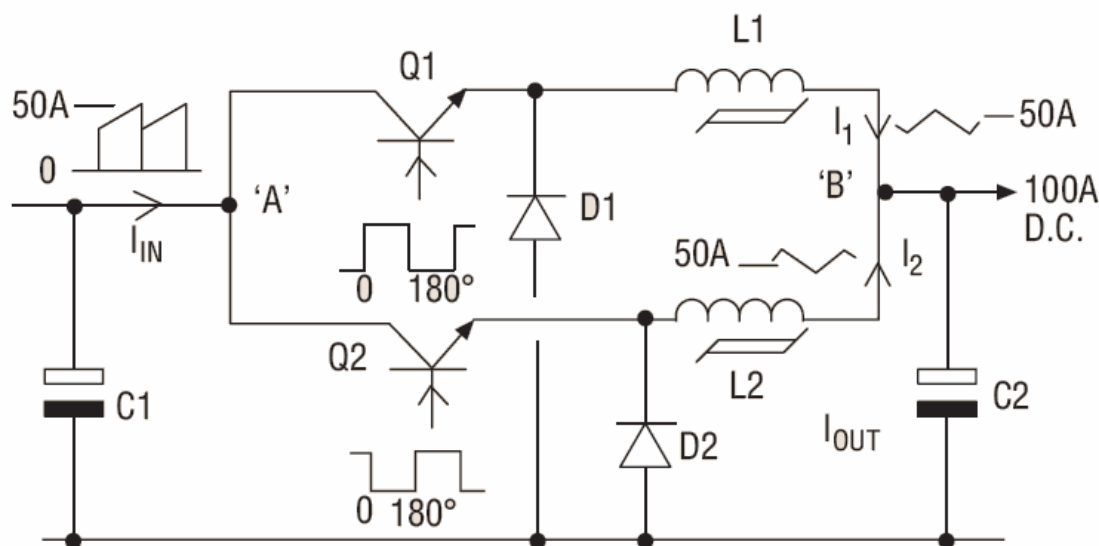
Στο ίδιο σχήμα (Σχ. 5.18), θεωρούμε τον τυπικό μετατροπέα buck, υποθέτοντας ότι επιλέγουμε τον μετατροπέα αυτόν για να τροφοδοτήσουμε ένα φορτίο², από μία πηγή των 24 V, με 100 A στα 12 V. Το ρεύμα εξόδου θα έχει μία μέση τιμή 100 A και μία κυμάτωση στην τριγωνική κυματομορφή περί του 10 % (10 A peak to peak). Η κυμάτωση αυτή μπορεί να αντιμετωπιστεί από έναν παράλληλο συνδυασμό πυκνωτών στην έξοδο, λογικού μεγέθους. Όμως το παλμικό ρεύμα υψηλής τιμής στην είσοδο του μετατροπέα θα απαιτούσε μία τεράστια συστοιχία πυκνωτών για να το εξομαλύνουν επαρκώς [64].



Σχήμα 5.18 Τυπικοί μετατροπείς buck και boost με τις χαρακτηριστικές κυματομορφές στην είσοδο και στην έξοδό τους, επεξεργασία από [64].

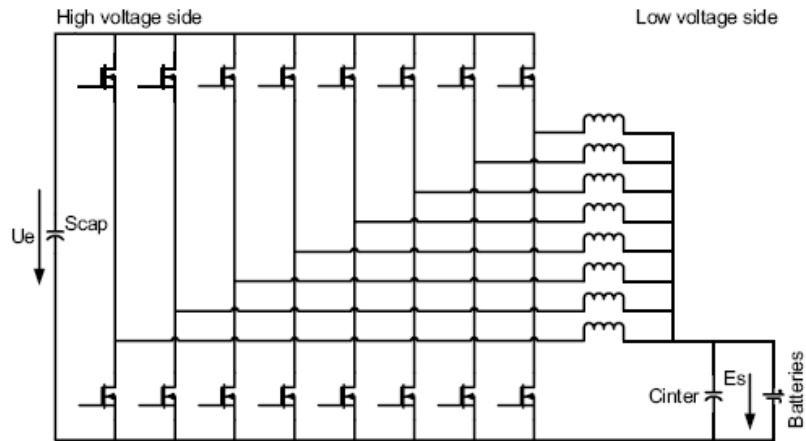
² Τα συγκεκριμένα επίπεδα τάσης δεν ανταποκρίνονται στα επίπεδα τάσης της παρούσας μελέτης. Προέρχονται από εργασία [64] που έχει σκοπό την κατανόηση των πλεονεκτημάτων των μετατροπέων διαδοχικής αγωγής (interleaved converters). Με αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται και εδώ.

Στο Σχ. 5.19 βλέπουμε τον συνδυασμό δύο μετατροπέων buck, η τοπολογία αυτή μειώνει τις απαιτήσεις χρήσης φίλτρων μεγάλου μεγέθους. Επίσης με αυτόν τον παράλληλο συνδυασμό το συνολικό ρεύμα μοιράζεται εξίσου σε κάθε κανάλι, έτσι μειώνονται οι απώλειες (I^2R) κατά 50 %. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου μετατροπέα είναι πως τα κανάλια άγουν διαδοχικά, και όχι ταυτόχρονα, με διαφορά φάσης $360^\circ/N = 180^\circ$ ($N = 2$ παράλληλα κανάλια). Έτσι σε καθέναν από τους buck θα εισέρχεται ένα παλμικό ρεύμα με μία περίοδο αγωγής ίση με το 50 % του συνολικού κύκλου. Καθυστερώντας την αγωγή του τρανζίστορ Q2 κατά 180° σε σχέση με αυτή του Q1 το ρεύμα στο αθροιστικό σημείο εισόδου 'A' (βλ. Σχ. 5.19) θα είναι ένα σχεδόν σταθερό ρεύμα 50 A στα 24 V όπως δείχνει και το Σχ. 5.19. Στο αθροιστικό σημείο εξόδου 'B' τα δύο ρεύματα προστίθενται και μας δίνουν το συνολικό ρεύμα των 100 A στα 12 V. Το συνολικό ρεύμα στην έξοδο προκύπτει από την άθροιση δύο όμοιων τριγωνικών ρευμάτων με διαφορά φάσης 180° (καθώς το ρεύμα στο L1 αυξάνεται, στο L2 μειώνεται), άρα θα έχει μικρότερη κυμάτωση και διπλάσια συχνότητα, στοιχεία που οδηγούν σε μικρότερα φίλτρα [64]. Παρατηρώντας το Σχ. 5.19, κατανοούμε πως η ιδανική λειτουργία θα διαφέρει σε περίπτωση που ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου είναι διαφορετικός του $1/2$, οπότε και ο λόγος κατάτμησης δ του μετατροπέα υποβιβασμού που λειτουργεί σε συνεχή αγωγή (CCM) είναι ίσος με 0,5. Βέβαια όπως και να έχει η κυμάτωση στα ρεύματα θα είναι σίγουρα μικρότερη και μικρότερα φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

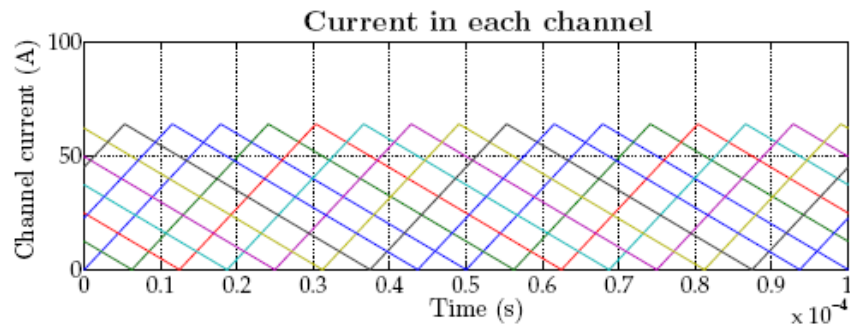


Σχήμα 5.19 Ο συνδυασμός δύο μετατροπέων buck μειώνει το μέγεθος των φίλτρων όπως προκύπτει από τις κυματομορφές στην είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα, επεξεργασία από [64].

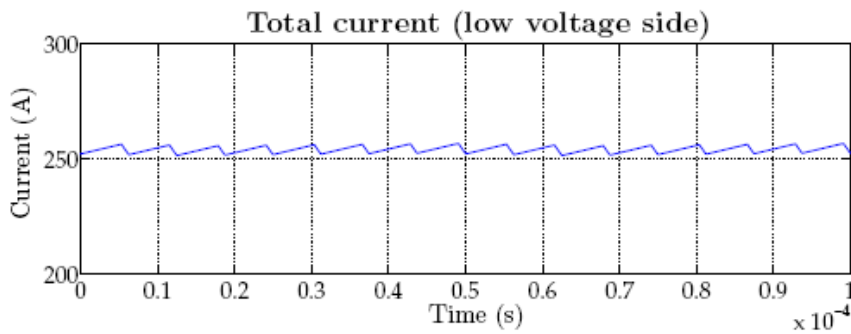
Στο Σχ. 5.20 φαίνεται μία εφαρμογή [63] με έναν μετατροπέα 8 καναλιών, εδώ οι δίοδοι έχουν αντικατασταθεί από τρανζίστορ, γεγονός που από τη μία αυξάνει τις απαιτήσεις ελέγχου αλλά από την άλλη αυξάνει την απόδοση του μετατροπέα (synchronous buck converter). Τα πλεονεκτήματα που περιγράφηκαν παραπάνω αντικατοπτρίζονται και στα Σχ. 5.21 και 5.22, όπου φαίνονται οι κυματομορφές προσομοίωσης για τα ρεύματα στα πηνία και στην έξοδο αντίστοιχα. Η κυμάτωση του ρεύματος στην έξοδο έχει μειωθεί αισθητά και η οχταπλάσια συχνότητά του οδηγεί στη χρήση μικρότερων φίλτρων.



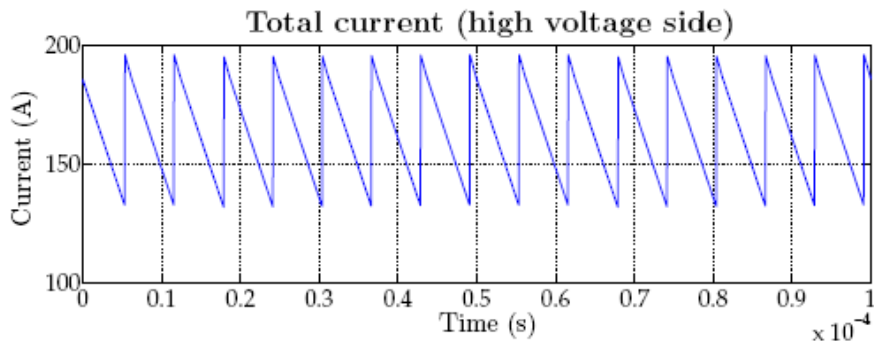
Σχήμα 5.20 Σχηματικό μετατροπέα διαδοχικής αγωγής 8 καναλιών (8-channels interleaved dc-dc converter [63]).



Σχήμα 5.21 Ρεύματα πηνίων στον μετατροπέα 8 καναλιών [63].



Σχήμα 5.22 Ρεύμα εξόδου μετατροπέα 8 καναλιών με εμφανή τη μείωση της κυμάτωσης [63].

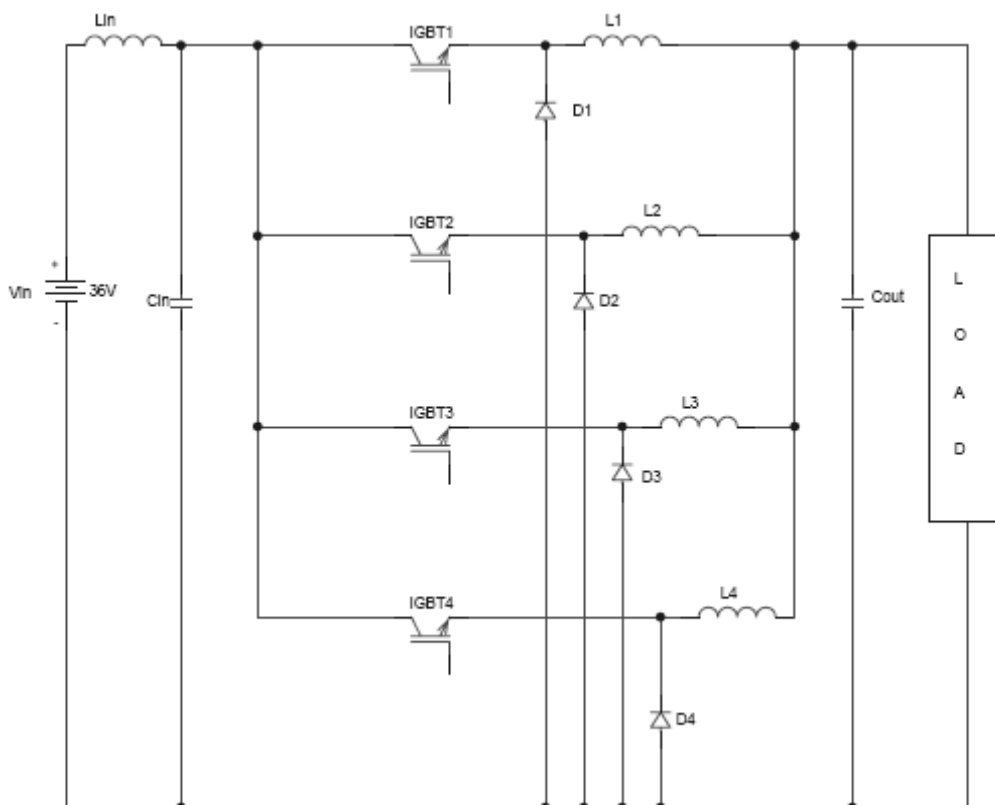


Σχήμα 5.23 Ρεύμα εισόδου μετατροπέα 8 καναλιών [63].

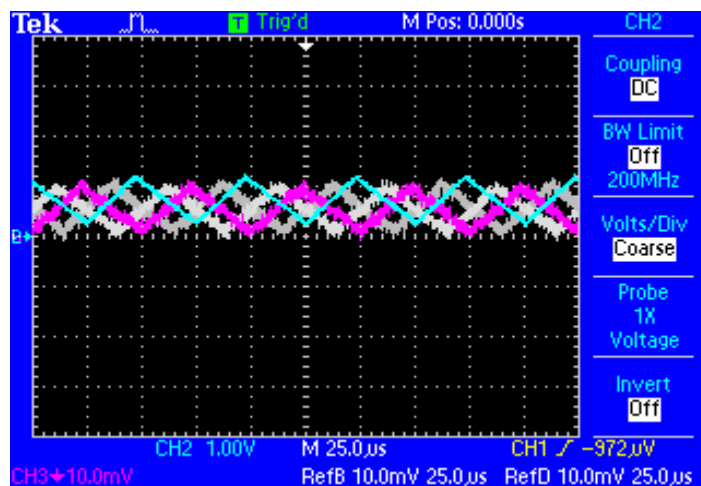
Στο Σχ. 5.23 φαίνεται το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα 8 καναλιών της παραπάνω εφαρμογής, το οποίο σε περίπτωση χρήσης τυπικού buck με ένα κανάλι, σε κάθε περίοδο θα έφτανε ως το μηδέν, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο την ήδη μεγάλη κυμάτωση.

Άλλο ένα σχηματικό εφαρμογής ηλεκτρονικού μετατροπέα διαδοχικής αγωγής φαίνεται στο Σχ. 5.24. Ο ηλεκτρονικός αυτός μετατροπέας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε, με σκοπό τον έλεγχο των στροφών του 2,6 μέτρων ηλεκτροκίνητου σκάφους του Εργαστηρίου Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας του Πανεπιστημίου Πατρών, και υποβιβάζει την τάση των συσσωρευτών (36 V) με σκοπό την ρύθμιση της τάσης τυμπάνου του κινητήρα πρόωσης (0 – 24 V) ισχύος 1,5 kW.

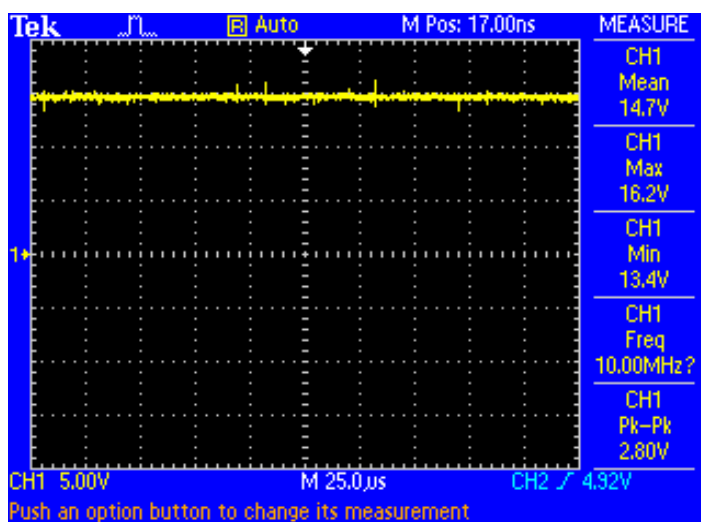
Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.24, ο μετατροπέας αποτελείται από τέσσερα κανάλια. Κάθε κανάλι έχει ένα IGBT, μία δίοδο ισχύος και ένα πηνίο εξομάλυνσης. Στην είσοδο του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων υπάρχει ένα φίλτρο LC και στην έξοδο ένας πυκνωτής ο οποίος παίρνει την εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος εξόδου, ώστε στην έξοδο να προκύπτει μια ουσιαστικά σταθερή τάση (βλ. Σχ. 5.26). Το φίλτρο LC χρησιμοποιείται ώστε να μην καταπονούνται οι συσσωρευτές με τα παλμικά ρεύματα που δημιουργεί ο μετατροπέας (βλ. Σχ. 5.27) [61]. Στο Σχ. 5.25 φαίνονται τα τριγωνικά ρεύματα των τεσσάρων πηνίων του μετατροπέα με εμφανή την διαφορά τάσης των 90° ($360^\circ/4$), λόγω των τεσσάρων παράλληλων κλάδων, τα ρεύματα αυτά αθροιζόμενα αποτελούν το ρεύμα εξόδου.



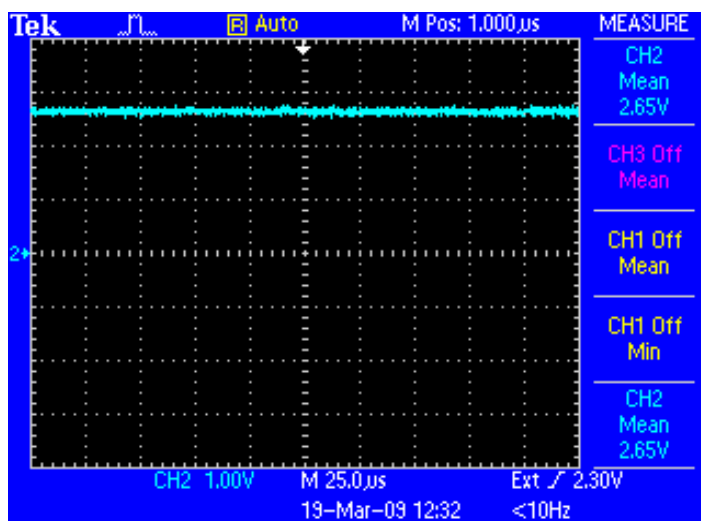
Σχήμα 5.24 Σχηματικό ηλεκτρονικού μετατροπέα υποβιβασμού τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων [61].



Σχήμα 5.25 Πειραματικές κυματομορφές ρευμάτων πηνίων για $\delta = 45\%$ και φορτίο μικρότερο του ονομαστικού, διακρίνεται η διαφορά φάσης του $1/4$ της περιόδου [61].

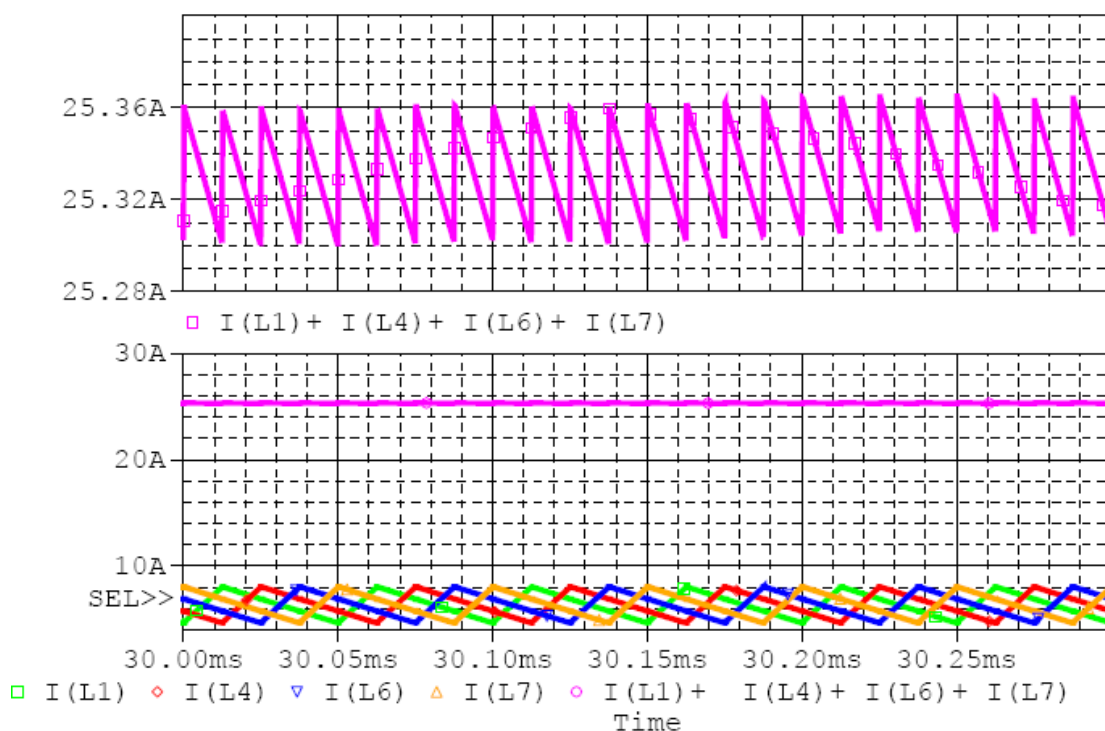


Σχήμα 5.26 Πειραματική κυματομορφή συνεχούς τάσης εξόδου, πλήρως εξομαλυμένης, για $\delta = 45\%$ και φορτίο μικρότερο του ονομαστικού [61].



Σχήμα 5.27 Πειραματική κυματομορφή συνεχούς ρεύματος εισόδου πριν το φίλτρο LC, πλήρως εξομαλυμένο, για $\delta = 50\%$ και φορτίο μικρότερο του ονομαστικού [61].

Στο Σχ. 5.28 παρατηρούμε το ρεύμα εξόδου ως άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων των πηνίων για λόγο κατάτμησης $\delta = 25\%$. Για το συγκεκριμένο δ το οποίο ισούται και με $1/N$, όπου $N = 4$, ο αριθμός των παράλληλων καναλιών, το ρεύμα εξόδου πριν τον πυκνωτή εξόδου παρουσιάζει την μικρότερη δυνατή κυμάτωση, για ένα μετατροπέα 4 καναλιών. Αντίστοιχα σε περίπτωση χρήσης 8 καναλιών το αντίστοιχο δ που αντιστοιχεί στην μικρότερη κυμάτωση για το ρεύμα εξόδου θα ήταν το $\delta = 1/8 = 12,5\%$. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό όλων των μετατροπέων διαδοχικής αγωγής παράλληλων κλάδων [61].



Σχήμα 5.28 Κυματομορφές προσομοίωσης ρεύματος εξόδου πριν το φίλτρο εξόδου και ρεύμα εξόδου πριν το φίλτρο ως άθροισμα των ρευμάτων των πηνίων για $\delta = 25\%$, περίπτωση εμφάνισης της μικρότερης κυμάτωσης [61].

Στον Πίνακα 5.5 παρατίθενται αποτελέσματα από προσομοιώσεις που έγιναν, για διαφορετικό αριθμό καναλιών N . Είναι εμφανής η μείωση της κυμάτωσης του ρεύματος εξόδου. Οι τιμές των ρευμάτων εξόδου και τάσεων εξόδου και η συχνότητα λειτουργίας (20 kHz) ήταν οι ίδιες για κάθε προσομοίωση [62].

Πίνακας 5.5 Κυμάτωση και συχνότητα κυματομορφής ρεύματος εξόδου για διαφορετικό αριθμό παράλληλων καναλιών N [62].

	Κυμάτωση κυματομορφής ρεύματος εξόδου	Συχνότητα κυματομορφής ρεύματος εξόδου
$N = 1$ (τυπικός buck μετατροπέας)	3,8 A	20 kHz
$N = 2$ κανάλια διαδοχικής αγωγής	1,8 A	40 kHz (2 x 20 kHz)
$N = 4$ κανάλια διαδοχικής αγωγής	0,84 A	80 kHz (4 x 20 kHz)

Από τα παραπάνω μπορούμε να συνοψίσουμε τα χαρακτηριστικά των μετατροπέων διαδοχικής αγωγής [61], [61]. Το συνολικό ρεύμα μοιράζεται εξίσου σε κάθε κανάλι, έτσι μειώνονται οι απώλειες αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων. Η μείωση αυτών των απωλειών είναι ανάλογη με τον αριθμό των παράλληλων καναλιών N (βλ. Εξ. (5.26)) [62].

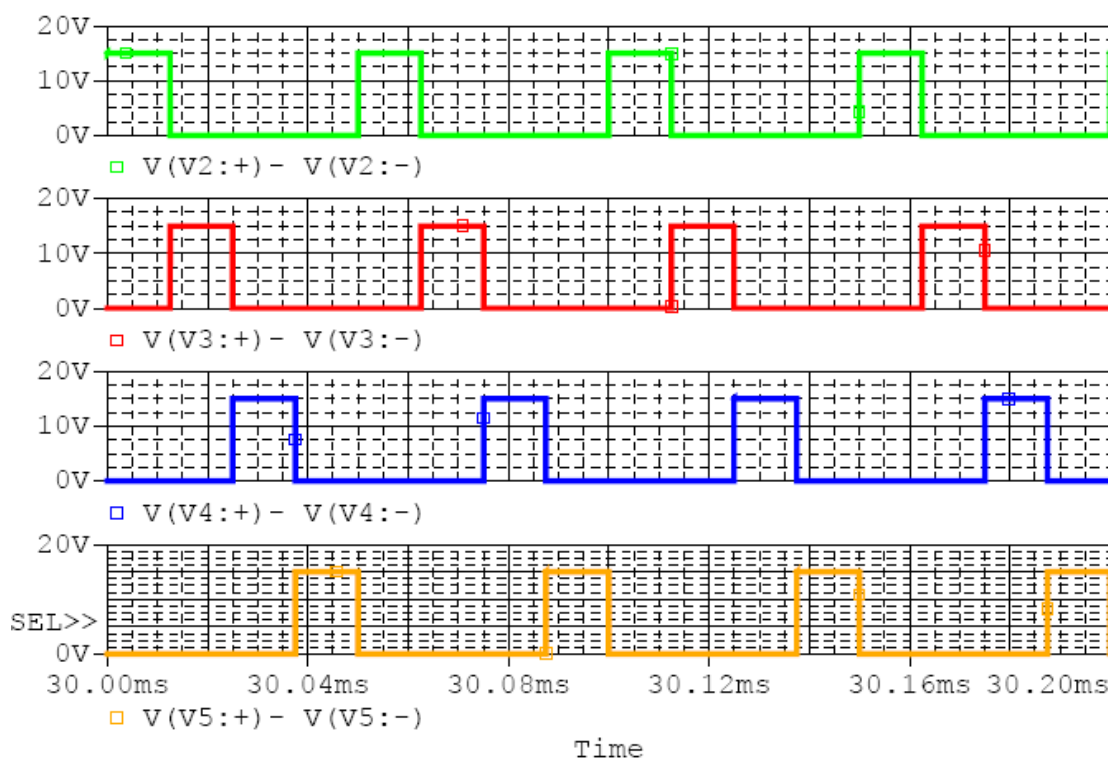
$$P_{\text{COND.LOSS.TYPICAL}} = I_{\text{TOTAL}}^2 R_{\text{ON}} \quad (5.24)$$

$$P_{\text{COND.LOSS.INTERLEAVED}} = N I_{\text{CHANNEL}}^2 R_{\text{ON}} = N \left(\frac{I_{\text{TOTAL}}}{N} \right)^2 R_{\text{ON}} \quad (5.25)$$

$$P_{\text{COND.LOSS.INTERLEAVED}} = \frac{1}{N} I_{\text{TOTAL}}^2 R_{\text{ON}} = \frac{1}{N} P_{\text{COND.LOSS.TYPICAL}} \quad (5.26)$$

όπου

- I_{TOTAL} το συνολικό ρεύμα.
- I_{CHANNEL} το ρεύμα σε κάθε κανάλι.
- R_{ON} η αντίσταση αγωγής του ημιαγωγικού στοιχείου.
- $P_{\text{COND.LOSS.TYPICAL}}$ οι απώλειες αγωγής ημιαγωγικού στοιχείου σε τυπικό μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ.
- $P_{\text{COND.LOSS.INTERLEAVED}}$ οι απώλειες αγωγής ημιαγωγικού στοιχείου σε μετατροπέα ΣΤ-ΣΤ διαδοχικής αγωγής.



Σχήμα 5.29 Πάλμοι στα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία ενός μετατροπέα διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων, με $\delta = 25\%$ και διακοπτική συχνότητα 20 kHz [61].

Σχετικά με την κυμάτωση του ρεύματος εξόδου (buck) ή εισόδου (boost), αυτή μειώνεται αρκετά σε σχέση με τους κλασσικούς μετατροπείς ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η συχνότητά της, οπότε τελικά μειώνεται το μέγεθος των απαιτούμενων φίλτρων. Τα παράλληλα κανάλια μας επιτρέπουν να διαχειριστούμε μεγάλες τιμές

ρεύματος που είναι και το ζητούμενο της εφαρμογής. Ωστόσο προσθέτοντας κανάλια, προσθέτονται επιπλέον ημιαγωγικά στοιχεία, που σημαίνει αύξηση διακοπτικών απωλειών, μεγέθους και κόστους. Τελικά όμως οι διακοπτικές απώλειες των ημιαγωγικών στοιχείων παραμένουν σταθερές καθώς το ρεύμα που τα διαρρέει, λόγω παραλληλισμού, μειώνεται. Περισσότερα κανάλια σημαίνουν πιο πολύπλοκο σύστημα παλμοδότησης. Τα κανάλια άγουν διαδοχικά, με τη διαφορά φάσης μεταξύ των καναλιών να είναι $360^\circ/N$. Στο Σχ. 5.29 φαίνεται η διαφορά φάσης (90°) για ένα μετατροπέα τεσσάρων κλάδων και $\delta = 25\%$.

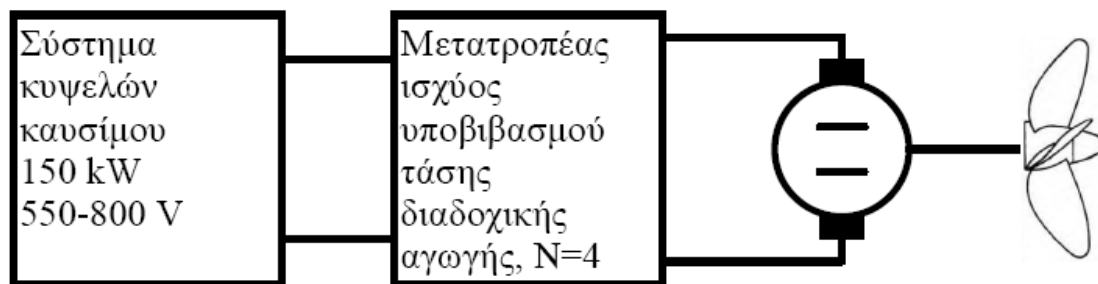
Για τη διερεύνηση της λειτουργίας των ηλεκτρονικών μετατροπέων των δύο ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων πρόωσης που μελετώνται και τη σχεδίαση τους πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με το πρόγραμμα PSpice. Τα αποτελέσματα εξηγούν όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα και δίνουν μία σαφή εικόνα της λειτουργίας του μετατροπέα στον σχεδιαστή του μετατροπέα, ο οποίος πλέον μπορεί να περάσει στα στάδια του σχεδιασμού και της κατασκευής ευκολότερα. Πριν την παρουσίαση των προσομοιώσεων θα ακολουθήσει ο μαθηματικός σχεδιασμός των μετατροπέων από τον οποίον θα προκύψουν οι τιμές των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν τα κυκλώματα των προσομοιώσεων. Οι τιμές αυτές αποτελούν το σημείο αναφοράς για την πραγματοποίησή τους. Το πλεονέκτημα που δίνει στο σχεδιαστή η προσομοίωση είναι να πειραματιστεί με διάφορες τιμές για τα επιμέρους στοιχεία και μέσα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων να καταλήξει σε αυτά που θεωρεί καλύτερα. Σε αυτά στη συνέχεια θα βασιστεί για τον σχεδιασμό και την κατασκευή του μετατροπέα.

5.5.2 Μαθηματικός σχεδιασμός ηλεκτρονικών μετατροπέων κινητηρίου συστήματος

Σε όλους τους μαθηματικούς σχεδιασμούς [9], [61] που θα ακολουθήσουν τα στοιχεία των κυκλωμάτων θα θεωρηθούν ιδανικά. Όλοι οι μετατροπείς σχεδιάζονται για να λειτουργούν στη συνεχή κατάσταση αγωγής (CCM). Ως ημιαγωγικά στοιχεία θα χρησιμοποιηθούν IGBTs και δίοδοι. Η επιλογή των IGBTs οφείλεται στην χρήση διακοπτικής συχνότητας στα 25 kHz στα υψηλά επίπεδα ισχύος για τα οποία θα σχεδιαστεί για να λειτουργεί ο μετατροπέας. Επίσης οι συμβολισμοί είναι σύμφωνοι με όλους τους προηγούμενους.

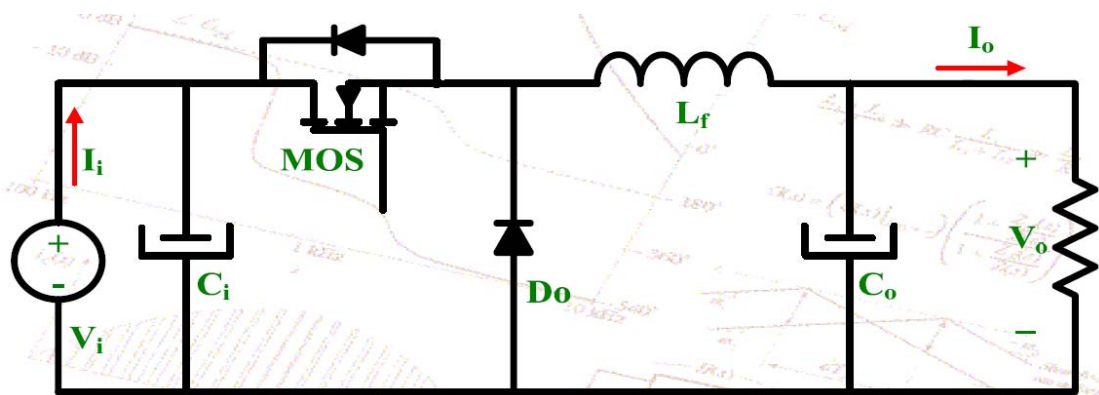
5.5.2.1 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων

Θεωρούμε το πρώτο υπό μελέτη ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα με τη μία μονάδα κυψελών καυσίμου. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω αυτό το σύστημα κυψελών καυσίμου παράγει τάση μεταξύ 800 V και 550 V και μέγιστο ρεύμα 300 A. Οπότε για τον έλεγχο των στροφών του κινητήρα πρόωσης ονομαστικής τάσης 440 V (brusatori) απαιτείται ο υποβιβασμός αυτής της τάσης σε 0 – 440 V. Κατάλληλο σύστημα ελέγχου θα παρακολουθεί την τάση της κυψέλης και αναλόγως με τις στροφές που θέλουμε στην έλικα θα παλμοδοτούνται τα ημιαγωγικά στοιχεία του μετατροπέα υποβιβασμού διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων. Απλοποιημένο σχηματικό της τοπολογίας του συστήματος φαίνεται στο Σχ. 5.30. Ο μετατροπέας των συσσωρευτών θα σχεδιαστεί ξεχωριστά παρακάτω γι' αυτό και παραλείφθηκε. Ο μαθηματικός σχεδιασμός στηρίζεται σε μεγάλο μέρος στις εξισώσεις για τα διάφορα είδη μετατροπέων του προηγούμενου κεφαλαίου.



Σχήμα 5.30 Απλοποιημένο διάγραμμα του πρώτου υπό μελέτη κινητήριου συστήματος.

Ο μετατροπέας θα σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί στη συνεχή κατάσταση αγωγής (CCM). Για τους υπολογισμούς θα θεωρήσουμε πάλι τον μετατροπέα buck (Σχ. 5.31) και θα υπολογιστούν τα στοιχεία ενός από τους τέσσερις κλάδους, τα οποία όμως είναι ίδια και για καθένα από τους υπόλοιπους κλάδους.



Σχήμα 5.31 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα τύπου buck [48].

Έχει αναφερθεί πως αυτό που καθορίζει τη λειτουργία του μετατροπέα σε συνεχή ή ασυνεχή αγωγή είναι το μέγεθος της επαγωγής L_f .

$$I_{L,b} = I_{o,b} = \frac{V_i - V_o}{L_f} \cdot \frac{\delta \cdot T_s}{2} = \frac{\delta \cdot (1 - \delta)}{2} \cdot \frac{V_i \cdot T_s}{L_f} \quad (5.27)$$

Λύνοντας την Εξ. (5.27) ως προς L_f , υπολογίζεται η τιμή του πηνίου για την οποία ο μετατροπέας λειτουργεί στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής, επομένως με την επιλογή μιας τιμής μεγαλύτερης από αυτή ο μετατροπέας μας θα λειτουργεί στη συνεχή αγωγή. Ο υπολογισμός αυτός απαιτεί τη θεώρηση του μικρότερου ρεύματος το οποίο θα «τραβήξει» ο μετατροπέας. Αυτό γιατί ο υπολογισμός γίνεται για το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής. Έτσι σε περίπτωση μικρότερου ρεύματος από αυτό που θεωρήσαμε θα έχουμε πλέον λειτουργία σε ασυνεχή αγωγή κάτι που είναι ανεπιθύμητο. Εμείς θεωρούμε στο σχεδιασμό μια σχετικά πολύ μικρή τιμή ρεύματος για τα δεδομένα της εφαρμογής. Πρόκειται για το ρεύμα που προκύπτει σε άφορτη λειτουργία (idle operation) του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα – κινητήρα³. Από το Σχ. 5.6 προκύπτουν:

$$V_{idle} = 721 \text{ V και } I_{idle} = 15 \text{ A.}$$

³ Σε αυτήν την περίπτωση λειτουργίας θεωρείται ότι η έλικα δεν είναι συνδεδεμένη με το υπόλοιπο σύστημα.

Όπως αναφέραμε στην αρχή της παρούσας ενότητας θεωρούμε ιδανικά τα στοιχεία που απαρτίζουν τον μετατροπέα. Οπότε ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα θα ισούται με τη μονάδα.

$$\eta = 1 \Rightarrow \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} = 1 \Rightarrow V_o \cdot I_o = V_i \cdot I_i \quad (5.28)$$

Για την άφορτη λειτουργία που θεωρήθηκε το μικρότερο δυνατό ρεύμα εξόδου είναι:

$$V_o \cdot I_{o,\min} = V_{\text{idle}} \cdot I_{\text{idle}} \Rightarrow I_{o,\min} = \frac{V_{\text{idle}} \cdot I_{\text{idle}}}{V_N} = \frac{721\text{V} \cdot 15\text{A}}{440\text{V}} = 24,58\text{A} \quad (5.29)$$

όπου V_N η ονομαστική τάση τυμπάνου του κινητήρα που ταυτίζεται με την έξοδο του μετατροπέα. Πρόκειται για έναν αυστηρό σχεδιασμό καθώς με τον κινητήρα υπό φορτίο, το ρεύμα εξόδου θα είναι σίγουρα μεγαλύτερο, μας εξασφαλίζει όμως τη λειτουργία σε συνεχή αγωγή. Εφόσον έχει θεωρηθεί μετατροπέας τεσσάρων κλάδων, το ρεύμα σε κάθε κλάδο θα είναι:

$$I_{o,b} = \frac{I_{o,\min}}{4} = \frac{24,58\text{A}}{4} = 6,145\text{A} \quad (5.30)$$

Οπότε επιλέγοντας διακοπτική συχνότητα $f_s = 25 \text{ kHz}$ και για λόγο κατάτμησης δ ,

$$\delta = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_N}{V_{\text{idle}}} = \frac{440\text{V}}{721\text{V}} = 0,61 \quad (5.31)$$

από την Εξ. (5.27) προκύπτει:

$$I_{o,b} = \frac{\delta \cdot (1 - \delta)}{2} \cdot \frac{V_i}{L_f \cdot f_s} \Rightarrow L_{f,\min} = \frac{\delta \cdot (1 - \delta)}{2} \cdot \frac{V_i}{I_{o,b} \cdot f_s} \Rightarrow \quad (5.32)$$

$$L_{f,\min} = \frac{0,61 \cdot (1 - 0,61)}{2} \cdot \frac{721\text{V}}{6,145\text{A} \cdot 25 \cdot 10^3 \text{Hz}} = 558,3 \mu\text{H}$$

Υπολογίστηκε ότι η μικρότερη τιμή επαγωγής για τη λειτουργία στο όριο είναι:

$$L_{f,\min} = 558,3 \mu\text{H}$$

Άρα επιλέγοντας μία τιμή μεγαλύτερη από 558,3 μH για καθένα από τα πηνία των τεσσάρων κλάδων ο μετατροπέας θα λειτουργεί στην συνεχή αγωγή. Όπως εξηγήσαμε η τελική τιμή θα προκύψει από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

Θεωρούμε το Σχ. 5.32, θα υπολογιστούν τα $I_{L,\max}$ και $I_{L,\min}$ για την ονομαστική κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα, δηλαδή για:

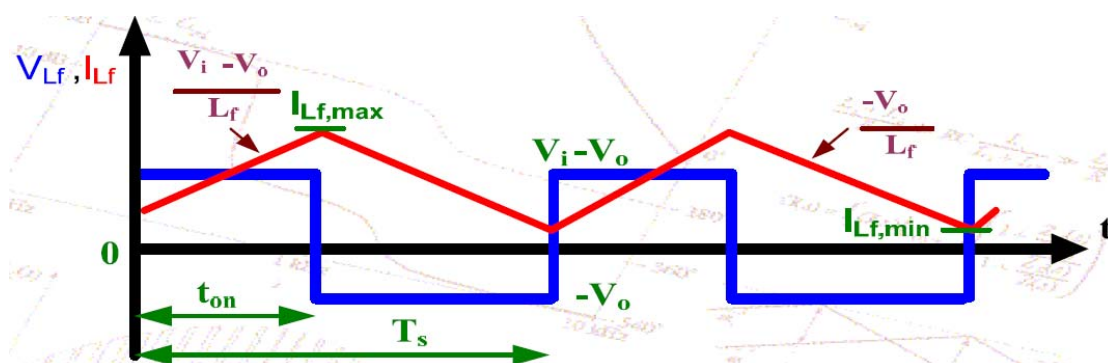
$$V_o = V_N = 440 \text{ V και } I_o = I_N = 304 \text{ A.}$$

Σε αυτή την κατάσταση θεωρούμε πως και η κυψέλη καυσίμου θα λειτουργεί στην ονομαστική της κατάσταση (rated operation) οπότε από το Σχ. 5.6 έχουμε,

$$V_i = V_{\text{rated}} = 627 \text{ V}, \text{ άρα } \delta = \frac{V_o}{V_i} = \frac{440\text{V}}{627\text{V}} = 0,7 \quad (5.33)$$

Εφόσον έχουμε τέσσερις κλάδους το ρεύμα σε κάθε κλάδο, με την θεώρηση ότι ο κινητήρας τροφοδοτείται εξ ολοκλήρου από την κυψέλη καυσίμου, θα είναι:

$$I_{o,\text{channel}} = \frac{I_o}{4} = \frac{304\text{A}}{4} = 76\text{A} \quad (5.34)$$



Σχήμα 5.32 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για τη συνεχή αγωγή μετατροπέα buck [48].

Για τη συνεχή αγωγή ισχύουν οι εξισώσεις:

$$V_o = \delta \cdot V_i \quad (5.35)$$

$$I_o = \frac{I_{L,\text{max}} + I_{L,\text{min}}}{2} \quad (5.36)$$

$$I_{L,\text{max}} - I_{L,\text{min}} = \frac{V_i - V_o}{L_f} \cdot \delta \cdot T_s = \frac{V_o}{L_f} \cdot (1 - \delta) \cdot T_s \quad (5.37)$$

Από την Εξ. (5.36) προκύπτει:

$$I_{L,\text{max}} + I_{L,\text{min}} = 2 \cdot I_o \quad (5.38)$$

Με πρόσθεση κατά μέλη των (5.36) και (5.38) προκύπτει:

$$I_{L,\text{max}} = \frac{V_o}{2 \cdot L_f} (1 - \delta) T_s + I_o = \frac{440\text{V}}{2 \cdot 558,3 \cdot 10^{-6} \text{H}} \frac{(1 - 0,7)}{25 \cdot 10^3 \text{Hz}} + 76\text{A} \Rightarrow \quad (5.39)$$

$$I_{L,\text{max}} = 4,73\text{A} + 76\text{A} = 80,73\text{A}$$

Άρα, από την Εξ. (5.38) έχουμε:

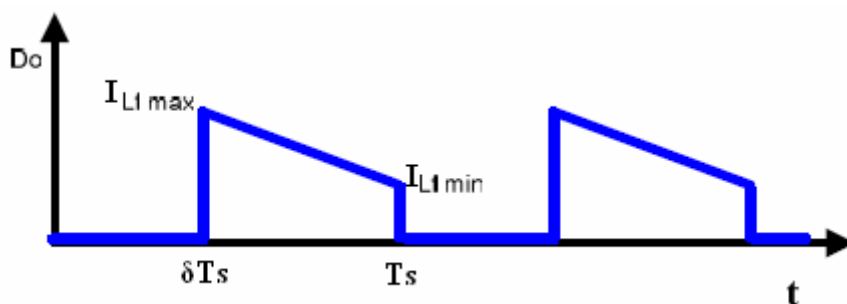
$$I_{L,\text{min}} = 2 \cdot I_o - I_{L,\text{max}} = 2 \cdot 76\text{A} - 80,73\text{A} = 71,27\text{A} \quad (5.40)$$

Άρα από την Εξ. (5.37) προκύπτει η κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου σε καθέναν από τους τέσσερις κλάδους ίση με:

$$\Delta I_L = I_{L,max} - I_{L,min} = 9,46A \quad (5.41)$$

Τα $I_{L,max}$ και $I_{L,min}$ θα είναι σίγουρα μικρότερα από αυτά στο τελικό κύκλωμα, καθώς θα καταλήξουμε ύστερα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε σχετικά μεγαλύτερο πηνίο, επίσης λόγω της χρήσης των παράλληλων καναλιών η κυμάτωση στο ρεύμα εξόδου μειώνεται ακόμα περισσότερο.

Για την επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων του κυκλώματος, διόδου και IGBT θα βασιστούμε στο μέσο ρεύμα που τα διαρρέει και στη μέγιστη τάση που εφαρμόζεται σε αυτά, άρα πρέπει να έχουμε μία εικόνα του μέσου ρεύματος στη διόδο και στο IGBT κάθε κλάδου. Η μέγιστη τάση που εφαρμόζεται και στα δύο στοιχεία ισούται με τη μέγιστη τάση εισόδου, οπότε είναι τα 800 V (βλ. κυματομορφές προηγούμενου κεφαλαίου). Το μέσο ρεύμα της διόδου υπολογίζεται από την κυματομορφή του ρεύματος διόδου (βλ. Σχ. 5.33):



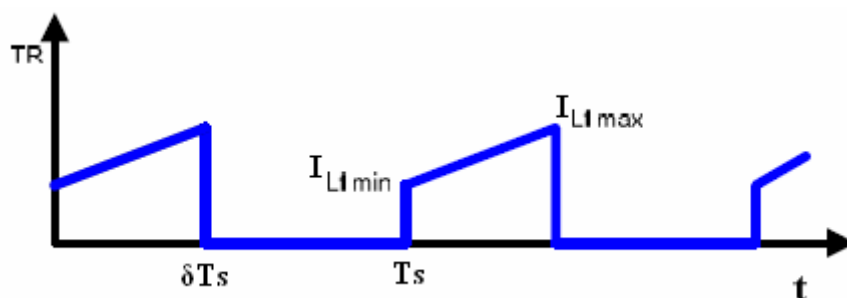
Σχήμα 5.33 Ρεύμα διόδου σε μετατροπέα buck για τη συνεχή αγωγή [47].

$$I_{D_o} = \frac{1}{T_s} \int_{\delta T_s}^{T_s} I_{D_o}(t) dt = \frac{1}{T_s} E = \frac{1}{X_s} \cdot \frac{71,27 + 80,73}{2} (X_s - \delta X_s) \Rightarrow \quad (5.42)$$

$$I_{D_o} = \frac{152}{2} (1 - 0,7) = 22,8A$$

όπου E, το εμβαδόν του τραπεζιού σχήματος της θεωρητικής κυματομορφής.

Το μέσο ρεύμα του τρανζίστορ υπολογίζεται από την κυματομορφή του τρανζίστορ (βλ. Σχ. 5.34):



Σχήμα 5.34 Ρεύμα τρανζίστορ σε μετατροπέα buck για τη συνεχή αγωγή [47].

$$I_{TR} = \frac{1}{T_S} \int_0^{\delta T_S} I_{TR}(t) dt = \frac{1}{T_S} E = \frac{1}{X_S} \cdot \frac{71,27 + 80,73}{2} \delta X_S \Rightarrow \quad (5.43)$$

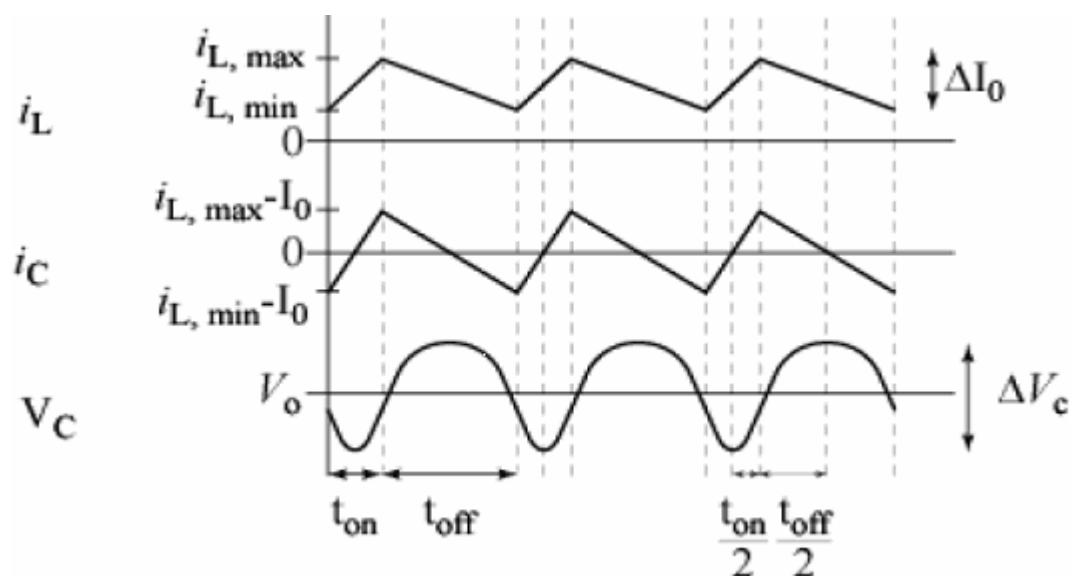
$$I_{TR} = \frac{152}{2} 0,7 = 53,2 A$$

Έχοντας τα δεδομένα για τον ένα κλάδο θα υπολογιστεί η χωρητικότητα του πυκνωτή εξόδου σαν να είχαμε τον ένα από τους τέσσερις κλάδους. Η θεώρηση αυτή οδηγεί στον υπολογισμό μεγαλύτερου πυκνωτή εξόδου από αυτόν που χρειάζεται ο μετατροπέας διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων, όπως θα εξηγηθεί μετά τον υπολογισμό του, άρα βρισκόμαστε από την ασφαλή πλευρά όσον αφορά τη λειτουργία του κυκλώματος.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 5.35 ο πυκνωτής «παίρνει» την εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος πηνίου για αυτό και η μέση τιμή του ρεύματος στον πυκνωτή, ως εναλλασσόμενο ρεύμα, έχει μέση τιμή μηδέν.

$$\text{Ισχύει, } I_L = I_C + I_o \quad (5.44)$$

και εφόσον ο πυκνωτής παίρνει την εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος στο πηνίο, τότε η μέση τιμή του ρεύματος στο πηνίο είναι, όπως ξέρουμε, η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου.



Σχήμα 5.35 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος στον πυκνωτή εξόδου [61].

Έχουμε για τη συνεχή αγωγή:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{C,max} = I_{L,max} - I_o \\ I_{C,min} = I_{L,min} - I_o \end{array} \right\} \Rightarrow I_{C,max} - I_{C,min} = I_{L,max} - I_{L,min} \Rightarrow \Delta I_C = \Delta I_L \quad (5.45)$$

Κάθε πυκνωτής λόγω κατασκευής του παρουσιάζει μια εσωτερική παρασιτική αντίσταση (ESR – Equivalent Series Resistance) και μια εσωτερική παρασιτική επαγωγή (ESL). Την κυμάτωση της τάσης σε ένα πυκνωτή επηρεάζει κατά κύριο λόγο η εσωτερική παρασιτική αντίσταση (ESR). Η ESR, σύμφωνα με τους

κατασκευαστές, για πυκνωτές ονομαστικής τάσης περί τα 450 V, είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων mΩ και μειώνεται περίπου στο μισό για συχνότητες κυματομορφής του ρεύματος πυκνωτή άνω των 10 kHz [66]. Εμείς στον υπολογισμό μας, βασισμένοι στα στοιχεία των κατασκευαστών και στις απαιτήσεις του σχεδιασμού μας θα θεωρήσουμε μια ESR = 300 mΩ. Άρα ισχύει:

$$\Delta V_{C_0} = \Delta I_{C_0} \cdot (ESR) = 9,46A \cdot 0,3\Omega = 2,838V \quad (5.46)$$

Η χωρητικότητα του πυκνωτή εξόδου υπολογίζεται από την Εξ. (5.47) [9], [49]:

$$C_o = \frac{V_o \cdot T^2 \cdot (1-\delta)}{8 \cdot L_f \cdot \Delta V_{C_0}} \quad (5.47)$$

όπου T, είναι η περίοδος κυματομορφής του ρεύματος πυκνωτή, η οποία στην περίπτωση του απλού μετατροπέα τύπου buck ταυτίζεται με τη συχνότητα λειτουργίας. Οπότε υπολογίζουμε την χωρητικότητα του πυκνωτή, ίση με:

$$C_o = \frac{V_o \cdot T^2 \cdot (1-\delta)}{8 \cdot L_f \cdot \Delta V_{C_0}} = \frac{440V \cdot (1-0,7)}{8 \cdot 558,3\mu H \cdot 2,838V \cdot (25 \cdot 10^3 \text{ Hz})^2} \approx 16.67\mu F \quad (5.48)$$

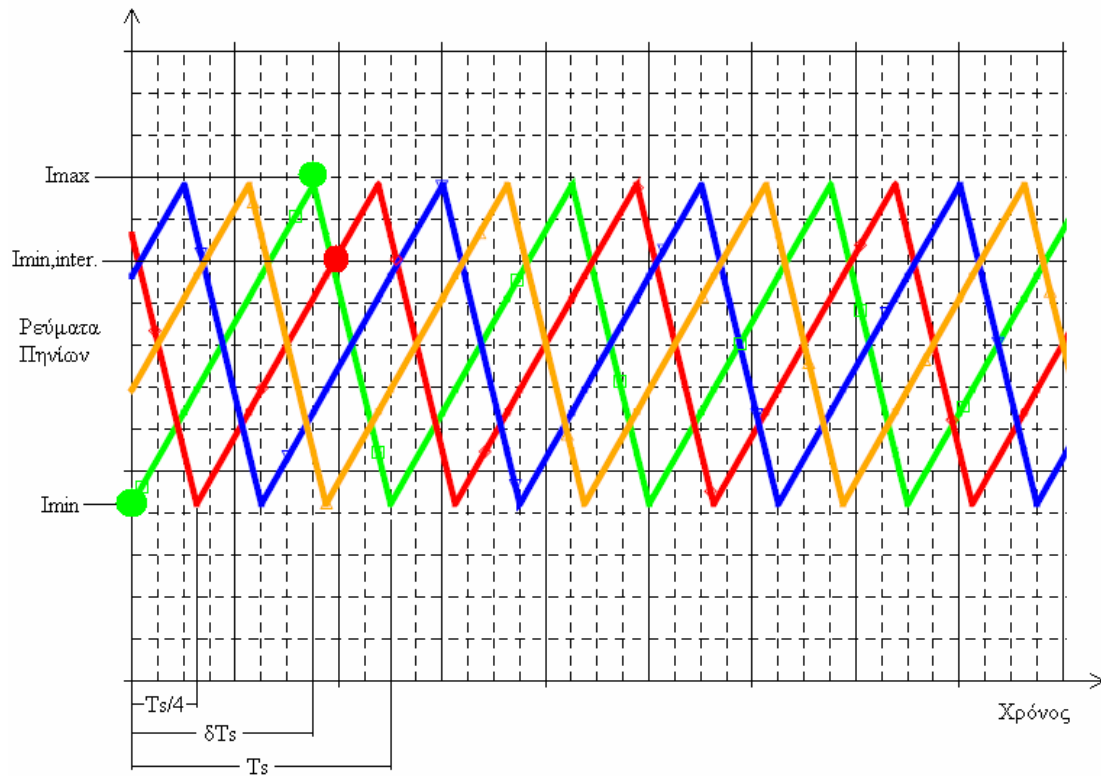
Σε περίπτωση που απαιτείται μείωση της κυμάτωσης επιλέγουμε πυκνωτή με μεγαλύτερη χωρητικότητα, βασισμένοι και στις διακριτές τιμές χωρητικότητας των κατασκευαστών.

Στην περίπτωση του μετατροπέα διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων της εφαρμογής μας, το ρεύμα στον πυκνωτή εξόδου θα έχει συχνότητα τετραπλάσια από τη συχνότητα λειτουργίας. Επίσης στην εφαρμογή θα χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερο πηνίο το οποίο θα μειώσει την κυμάτωση. Έχοντας αυτά στο νου μας και θεωρώντας την Εξ. (5.47), αντιλαμβανόμαστε πως η απαραίτητη χωρητικότητα για τον πυκνωτή εξόδου στον μετατροπέα διαδοχικής αγωγής είναι πολύ μικρότερη. Έτσι έρχεται να επιβεβαιωθεί το πλεονέκτημα των μικρότερων φίλτρων στους μετατροπείς αυτού του είδους. Για την τελική επιλογή χωρητικότητας πρέπει να θεωρηθεί και ένα ποσοστό ανοχής $\pm 20\%$ επί της ονομαστικής τιμής, σύμφωνα με στοιχεία των κατασκευαστών [66].

Ακολουθεί ενδεικτικός υπολογισμός της χωρητικότητας σε μετατροπέα υποβιβασμού διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων. Θεωρείτε το Σχ. 5.36 το οποίο εξετάζεται ποιοτικά. Θα υπολογιστεί το $I_{\min,inter}$. Αν αφαιρέσουμε την τιμή αυτή από το $I_{L,max}$ θα πάρουμε την κυμάτωση του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα διαδοχικής αγωγής. Σε σχέση με τους προηγούμενους συμβολισμούς ισχύουν, $I_{\max} = I_{L,max}$, $I_{\min} = I_{L,min}$. Η τιμή $I_{\min,inter}$ θα προκύψει από το σημείο τομής δύο διαδοχικών ρευμάτων πηνίων. Θεωρώ χρονικό διάστημα μιας περιόδου ίσο με T_s . Θεωρώ τα σημεία (x , y) = (t , I):

(δT_s , I_{\max}) και (T_s , I_{\min}) από τα οποία περνάει η ευθεία:

$$y = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{T_s (\delta - 1)} x + I_{\min} - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{(\delta - 1)} \quad (5.49)$$



Σχήμα 5.36 Προσδιορισμός κυμάτωσης ρεύματος εξόδου μετατροπέα διαδοχικής αγωγής.

και τα $(\delta T_s + T_s/4, I_{\max})$ και $(T_s/4, I_{\min})$ από τα οποία περνάει η ευθεία:

$$y = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{T_s \delta} x + I_{\min} - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{4\delta} \quad (5.50)$$

Εξισώνοντας τις (5.49) και (5.50) προκύπτει:

$$x = \frac{3\delta + 1}{4} T_s \quad (5.51)$$

Από τις Εξ. (5.50) και (5.51) προκύπτει:

$$I_{\min,inter.} = \frac{3}{4}(I_{\max} - I_{\min}) + I_{\min} \quad (5.52)$$

Άρα για την κυμάτωση του ρεύματος εξόδου μετατροπέα υποβιβασμού διαδοχικής αγωγής θα ισχύει:

$$\Delta I_o = I_{L,\max} - I_{\min,inter} = I_{L,\max} - \frac{3}{4}(I_{L,\max} - I_{L,\min}) - I_{L,\min} = \frac{1}{4}(I_{L,\max} - I_{L,\min}) \quad (5.53)$$

Οπότε από την Εξ. (5.46) θα ισχύει:

$$\Delta V_{Co} = \Delta I_{Co} \cdot (ESR) = \frac{9,46A \cdot 0,3\Omega}{4} = 0,7095V \quad (5.54)$$

$$C_o = \frac{V_o \cdot T^2 \cdot (1 - \delta)}{8 \cdot L_f \cdot \Delta V_{C_o}} = \frac{440V \cdot (1 - 0,7)}{8 \cdot 558,3\mu H \cdot 0,7095V \cdot (4 \cdot 25 \cdot 10^3 \text{ Hz})^2} \approx 4,17\mu F \quad (5.55)$$

Προκύπτει τέσσερις φορές μικρότερη χωρητικότητα.

Στην είσοδο του ηλεκτρονικού μετατροπέα διαδοχικής αγωγής θα τοποθετηθεί ένα φίλτρο LC (βλ. π.χ. Σχ. 5.24). Όπως έχει αναφερθεί, στον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης το ρεύμα στην είσοδο είναι παλμικό. Στην εφαρμογή μας, με το σύστημα κυψελών καυσίμου ως πηγή ενέργειας, ο μετατροπέας θα «παίρνει» από την κυψέλη καυσίμου το παλμικό του ρεύμα, το οποίο είναι ανεπιθύμητο καθώς επηρεάζει αρνητικά την λειτουργία της κυψέλης [65]. Για να το αποφύγουμε αυτό τοποθετούμε ένα φίλτρο LC.

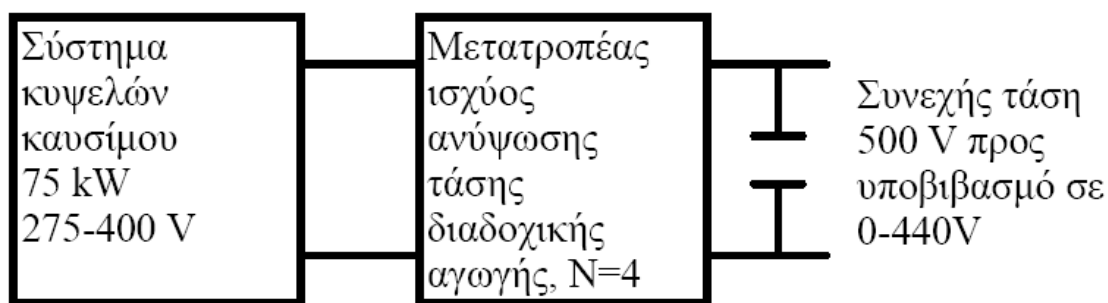
Το παλμικό ρεύμα εισόδου παρουσιάζει μία συχνότητα 100 kHz, ίδια με αυτή του ρεύματος εξόδου ως τετραπλάσια της διακοπτικής συχνότητας των 25 kHz, λόγω των τεσσάρων παράλληλων καναλιών ($N = 4$). Το φίλτρο LC σχεδιάζεται έτσι ώστε να «κόβει» την συχνότητα των 100 kHz, και αυτό γίνεται τοποθετώντας τη συχνότητα αποκοπής του φίλτρου, f_0 , τουλάχιστον 10 φορές κάτω από αυτή που θέλουμε να αποκόψουμε. Η συχνότητα αποκοπής δίνεται από την εξίσωση:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} \\ \omega_0 = 2\pi f_0 \end{array} \right\} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C_i}} < \frac{N \cdot f_s}{10} \quad (5.56)$$

Ο υπολογισμός του φίλτρου θα βασιστεί στα δεδομένα της προσομοίωσης, οπότε και οι τιμές του θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

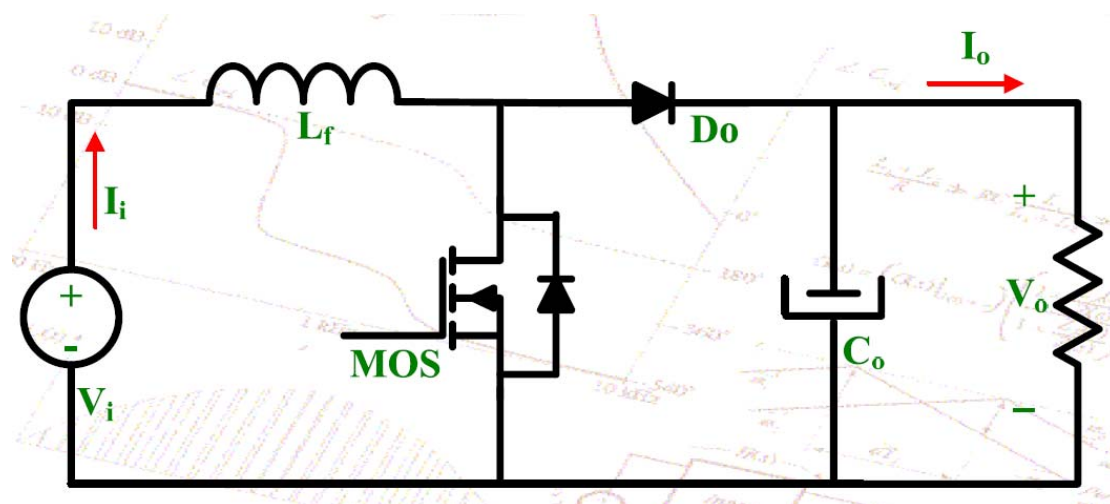
5.5.2.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων

Θεωρούμε το δεύτερο υπό μελέτη ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα με τις δύο παράλληλες μονάδες κυψελών καυσίμου. Η παραγόμενη τάση των κυψελών αυτών κυμαίνεται μεταξύ 400 V και 275 V σε καθένα από τα δύο παραλληλισμένα συστήματα κυψελών καυσίμου, οπότε απαιτείται η ανύψωσή της για να ταιριάξει με αυτήν του κινητήρα. Αυτό θα γίνει μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης (έναν για κάθε κυψέλη), ο οποίος θα ανυψώνει στα 500 V ανεξάρτητα από την τάση που παράγει η κυψέλη, μέσω κατάλληλου συστήματος παλμοδότησης. Εφόσον πραγματοποιήθηκε ανύψωση στα 500 V μπορούμε, όπως και στην περίπτωση του συστήματος με τη μία μονάδα κυψελών καυσίμου, μέσω ενός μετατροπέα υποβιβασμού να ρυθμίσουμε αυτήν την τάση (0 V – 440V) ώστε να ελέγξουμε τις στροφές του κινητήρα πρόωσης. Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί ο μετατροπέας ανύψωσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων του καθενός από τα δύο συστήματα κυψελών καυσίμου. Ο απαιτούμενος μετατροπέας υποβιβασμού θα είναι ίδιος με αυτόν που μελετήθηκε προηγουμένως, μάλιστα στην είσοδό του δεν θα απαιτείται πλέον φίλτρο LC καθώς η τάση θα έρχεται εξομαλυμένη από τους προηγούμενους μετατροπέες ανύψωσης. Απλοποιημένο σχηματικό της τοπολογίας του συστήματος που θα μελετηθεί φαίνεται στο Σχ. 5.37.



Σχήμα 5.37 Απλοποιημένο διάγραμμα του δεύτερου υπό μελέτη συστήματος.

Ο μετατροπέας θα σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί στη συνεχή κατάσταση αγωγής (CCM). Για τους υπολογισμούς θα θεωρήσουμε πάλι τον μετατροπέα boost (Σχ. 5.38) και θα υπολογιστούν τα στοιχεία ενός από τους τέσσερις κλάδους, τα οποία όμως είναι ίδια και για καθένα από τους υπόλοιπους κλάδους.



Σχήμα 5.38 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα τύπου boost [48].

Έχει αναφερθεί, πως αυτό που καθορίζει τη λειτουργία του μετατροπέα σε συνεχή ή ασυνεχή αγωγή είναι το μέγεθος της επαγωγής L_f . Για το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ισχύουν:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-\delta} \Rightarrow (1-\delta)V_o = V_i \Rightarrow \delta = \frac{V_o - V_i}{V_o} \quad (5.57)$$

$$I_{L,b} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} I_L dt = \frac{1}{T_s} \frac{T_s \cdot I_{L,max}}{2} = \frac{1}{2} I_{L,max} = \frac{1}{2} \frac{V_i}{L_f} \cdot t_{on} \Rightarrow \quad (5.58)$$

$$I_{L,b} = \frac{1}{2} \frac{V_i}{L_f} \delta T_s = \frac{T_s \cdot V_o}{2L_f} \delta \cdot (1-\delta)$$

Οπότε για μηδενικές απώλειες και από την Εξ. (5.57) ισχύει:

$$P_i = P_o \Rightarrow V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o \Rightarrow \frac{I_i}{I_o} = \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow \frac{I_i}{I_o} = \frac{1}{1-\delta} \quad (5.59)$$

Άρα, υπολογίζεται το μέσο ρεύμα εξόδου στο όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής για τον μετατροπέα boost:

$$I_i = I_L \Rightarrow I_L = \frac{I_o}{1-\delta} \Rightarrow I_o = I_L \cdot (1-\delta) \Rightarrow \quad (5.60)$$

$$I_{o,b} = \frac{T_s \cdot V_o}{2L_f} \delta \cdot (1-\delta)^2 = \frac{T_s \cdot V_i}{2L_f} \delta \cdot (1-\delta)$$

Στον μετατροπέα boost, το ρεύμα του πηνίου ισούται με το ρεύμα εισόδου. Από το Σχ. 5.6, για το ρεύμα που προκύπτει από την άφορτη λειτουργία (idle operation) του συστήματος κυψέλης καυσίμου – μετατροπέα – κινητήρα, έχουμε:

$$V_{idle} = 360,5 \text{ V και } I_{idle} = 15 \text{ A.}$$

$$I_{idle} = I_{i,b} = I_{L,b} = \frac{1}{2} \frac{V_i}{L_f} \delta T_s \quad (5.61)$$

Στην έξοδο υπάρχει πάντα σταθερή συνεχής τάση 500 V, οπότε από την Εξ. (5.57), ο παραπάνω υπολογισμός θα γίνει για λόγο κατάτμησης δ ίσο με:

$$\delta = \frac{V_o - V_{idle}}{V_o} \Rightarrow \delta = \frac{500\text{V} - 360,5\text{V}}{500\text{V}} = 0,279 \quad (5.62)$$

Εφόσον έχει θεωρηθεί μετατροπέας τεσσάρων κλάδων, το ρεύμα που θα εισέρχεται σε κάθε κλάδο θα είναι:

$$I_{i,b} = \frac{I_{i,\min}}{4} = \frac{15\text{A}}{4} = 3,75\text{A} \quad (5.63)$$

$$L_{f,\min} = \frac{1}{2} \frac{V_{idle}}{I_{i,b}} \delta T_s = \frac{1}{2} \frac{360,5\text{V}}{3,75\text{A} \cdot (25 \cdot 10^3 \text{Hz})} 0,279 = 536,424 \mu\text{H} \quad (5.64)$$

Υπολογίστηκε ότι η μικρότερη τιμή επαγωγής για τη λειτουργία στο όριο είναι:

$$L_{f,\min} = 536,424 \mu\text{H}$$

Άρα επιλέγοντας μία τιμή μεγαλύτερη από 536,424 μH για καθένα από τα πηνία των τεσσάρων κλάδων ο μετατροπέας θα λειτουργεί στην συνεχή αγωγή.

Θεωρούμε το Σχ. 5.39. Θα υπολογιστούν τα $I_{L,\max}$ και $I_{L,\min}$ για την ονομαστική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές από το Σχ. 5.6. Έχουμε:

$$V_{\text{rated}} = 313,5 \text{ V και } I_{\text{rated}} = 240 \text{ A}$$

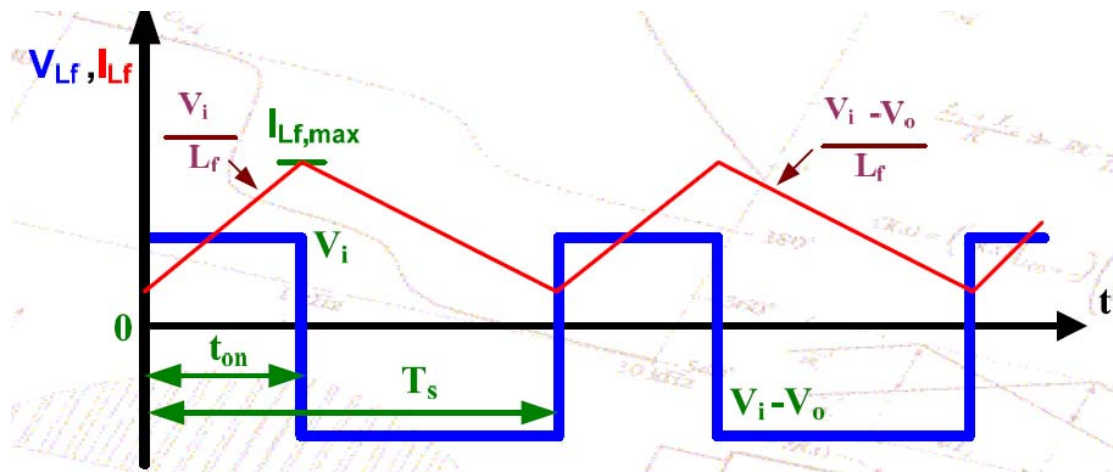
Οπότε για $V_o = 500 \text{ V}$ και θεωρώντας βαθμό απόδοσης για το μετατροπέα μονάδα, προκύπτει $I_o = 150,48 \text{ A}$.

Το ρεύμα που θα εισέρχεται σε κάθε κλάδο θα είναι ίσο με:

$$I_{i,\text{channel}} = \frac{I_{\text{rated}}}{4} = \frac{240\text{A}}{4} = 60\text{A} \quad (5.65)$$

Ο λόγος κατάτμησης σε αυτήν την περίπτωση είναι ίσος με:

$$\delta = \frac{V_o - V_{\text{rated}}}{V_o} \Rightarrow \delta = \frac{500\text{V} - 313,5\text{V}}{500\text{V}} = 0,373 \quad (5.66)$$



Σχήμα 5.39 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για τη συνεχή αγωγή μετατροπέα boost [48].

$$I_i = \frac{(I_{L,\text{max}} + I_{L,\text{min}})}{2} \quad (5.67)$$

$$I_{L,\text{max}} - I_{L,\text{min}} = \frac{V_i}{L_f} \cdot \delta \cdot T_s = \frac{V_o - V_i}{L_f} \cdot (1 - \delta) \cdot T_s \quad (5.68)$$

Από την Εξ. (5.67) έχουμε:

$$I_{L,\text{max}} + I_{L,\text{min}} = 2 \cdot I_i \quad (5.69)$$

Προσθέτω κατά μέλη τις Εξ. (5.68) και (5.69) και προκύπτει:

$$I_{L,\text{max}} = \frac{V_i}{2 \cdot L_f} \cdot \delta \cdot T_s + I_i = \frac{313,5\text{V}}{2 \cdot 536,424\mu\text{H} \cdot 25 \cdot 10^3 \text{Hz}} \cdot 0,373 + 60\text{A} \Rightarrow \quad (5.70)$$

$$I_{L,\text{max}} = 4,36\text{A} + 60\text{A} = 64,36\text{A}$$

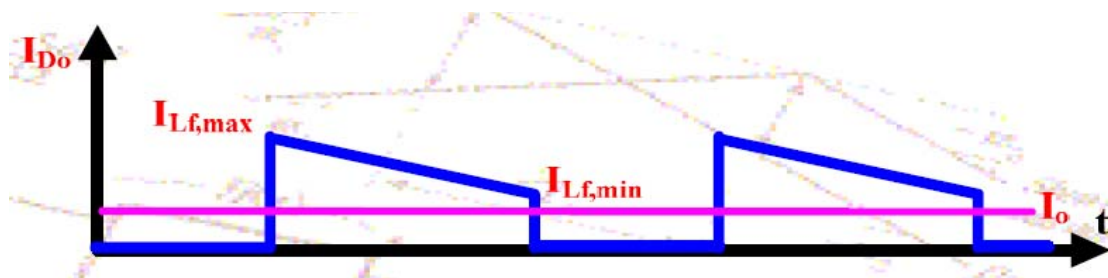
$$I_{L,\text{min}} = 2I_i - I_{L,\text{max}} = 120\text{A} - 64,36\text{A} = 55,64\text{A} \quad (5.71)$$

Άρα από την Εξ. (5.36) προκύπτει η κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου σε καθέναν από τους τέσσερις κλάδους ίση με:

$$\Delta I_L = \Delta I_i = I_{L,max} - I_{L,min} = 8,72A \quad (5.72)$$

Τα $I_{L,max}$ και $I_{L,min}$ θα είναι σίγουρα μικρότερα από αυτά στο τελικό κύκλωμα, καθώς θα καταλήξουμε ύστερα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε σχετικά μεγαλύτερο πηνίο. Επίσης, λόγω της χρήσης των παράλληλων καναλιών η κυμάτωση στο ρεύμα εξόδου μειώνεται ακόμα περισσότερο.

Για την επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων του κυκλώματος, διόδου και IGBT, θα βασιστούμε στο μέσο ρεύμα που τα διαρρέει και στη μέγιστη τάση που εφαρμόζεται σε αυτά, άρα πρέπει να έχουμε μία εικόνα του μέσου ρεύματος στη diode και στο IGBT κάθε κλάδου. Η μέγιστη τάση που εφαρμόζεται και στα δύο στοιχεία ισούται με τη μέγιστη τάση εξόδου, οπότε είναι τα 500 V (βλ. κυματομορφές προηγούμενου κεφαλαίου). Το μέσο ρεύμα της diode, το οποίο να σημειωθεί ότι ταυτίζεται με το ρεύμα εξόδου, υπολογίζεται από την κυματομορφή του ρεύματος diode (βλ. Σχ. 5.40).

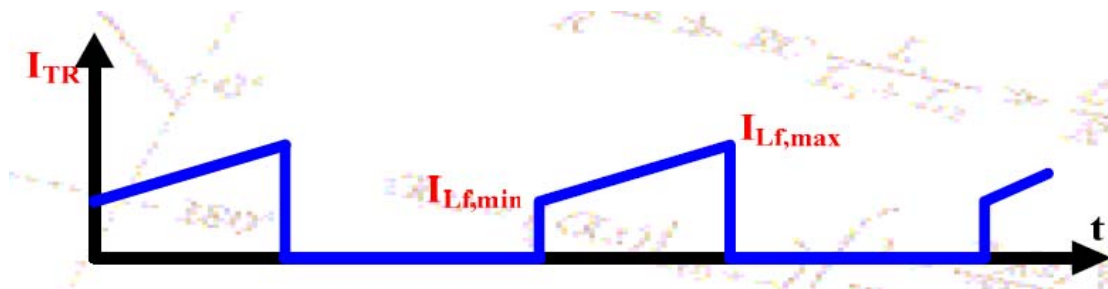


Σχήμα 5.40 Ρεύμα diode σε μετατροπέα boost για τη συνεχή αγωγή [48].

$$I_{Do} = \frac{1}{T_s} \int_{\delta T_s}^{T_s} I_{Do}(t) dt = \frac{1}{T_s} E = \frac{1}{X_s} \cdot \frac{55,64 + 64,36}{2} (X_s - \delta X_s) \Rightarrow \quad (5.73)$$

$$I_{Do} = \frac{120}{2} (1 - 0,373) = 37,62A$$

Το μέσο ρεύμα του τρανζίστορ υπολογίζεται από την κυματομορφή του τρανζίστορ (βλ. Σχ. 5.41) και ισούται με τη διαφορά του ρεύματος diode από το ρεύμα εισόδου.



Σχήμα 5.41 Ρεύμα τρανζίστορ σε μετατροπέα boost για τη συνεχή αγωγή [48].

$$I_{TR} = \frac{1}{T_s} \int_0^{\delta T_s} I_{TR}(t) dt = \frac{1}{T_s} E = \frac{1}{X_s} \cdot \frac{55,64 + 64,36}{2} \delta X_s \Rightarrow \quad (5.74)$$

$$I_{TR} = \frac{120A}{2} 0,373 = 22,38A$$

Έχοντας τα δεδομένα για τον ένα κλάδο θα υπολογιστεί ενδεικτικά η χωρητικότητα του πυκνωτή εξόδου σαν να είχαμε τον ένα από τους τέσσερις κλάδους. Η θεώρηση αυτή οδηγεί στον υπολογισμό μεγαλύτερου πυκνωτή εξόδου από αυτόν που χρειάζεται ο μετατροπέας διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων, άρα βρισκόμαστε από την ασφαλή πλευρά όσον αφορά τη λειτουργία του κυκλώματος. Ο πυκνωτής εξόδου παίρνει την εναλλασσόμενη συνιστώσα του ρεύματος διόδου, για αυτό και η μέση τιμή του ρεύματος στον πυκνωτή, ως εναλλασσόμενο ρεύμα, έχει μέση τιμή μηδέν. Ισχύει:

$$I_D = I_C + I_o \quad (5.75)$$

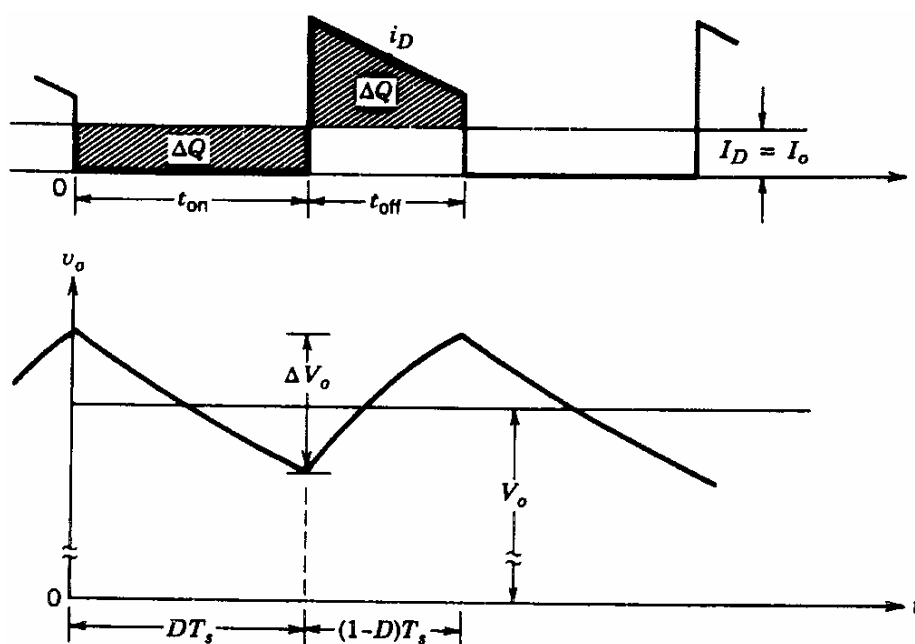
Έχουμε για τη συνεχή αγωγή:

$$\begin{cases} I_{C,max} = I_{D,max} - I_o \\ I_{C,min} = I_{D,min} - I_o \end{cases} \Rightarrow I_{C,max} - I_{C,min} = I_{D,max} - 0 = I_{L,max} \Rightarrow \Delta I_C = I_{L,max} \quad (5.76)$$

Όμοια με την περίπτωση μετατροπέα τύπου buck, θεωρούμε μια ESR = 300 mΩ:

$$\Delta V_o = \Delta V_{C_o} = \Delta I_{C_o} \cdot (ESR) = 64,36A \cdot 0,3\Omega = 19,308V \quad (5.77)$$

Στο Σχ. 5.42 φαίνεται το ρεύμα στη διόδο (ίσο με το ρεύμα εξόδου) και η τάση εξόδου.



Σχήμα 5.42 Ρεύμα διόδου – εξόδου και κυμάτωση τάσης εξόδου [49].

Η τιμή της χωρητικότητας που προκύπτει παρακάτω (Εξ. (5.78)), είναι πολύ μικρότερη ως προς την απαιτούμενη, καθώς υπάρχει μεγάλη κυμάτωση στην τάση εξόδου (Εξ. (5.77)). Άρα πρέπει τελικά να επιλεγεί μεγαλύτερη τιμή χωρητικότητας πυκνωτή εξόδου (όσον αφορά τον υποθετικό μαθηματικό σχεδιασμό) ώστε να μειωθεί αισθητά αυτή η κυμάτωση. Ισχύει ο τύπος [49]:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C_o} = \frac{I_o \cdot \delta \cdot T_s}{C_o} \Rightarrow C_o = \frac{I_o \cdot \delta \cdot T_s}{\Delta V_o} = \frac{150,48A \cdot 0,373}{19,308V \cdot 25 \cdot 10^3 \text{ Hz}} \approx 116,3\mu\text{F} \quad (5.78)$$

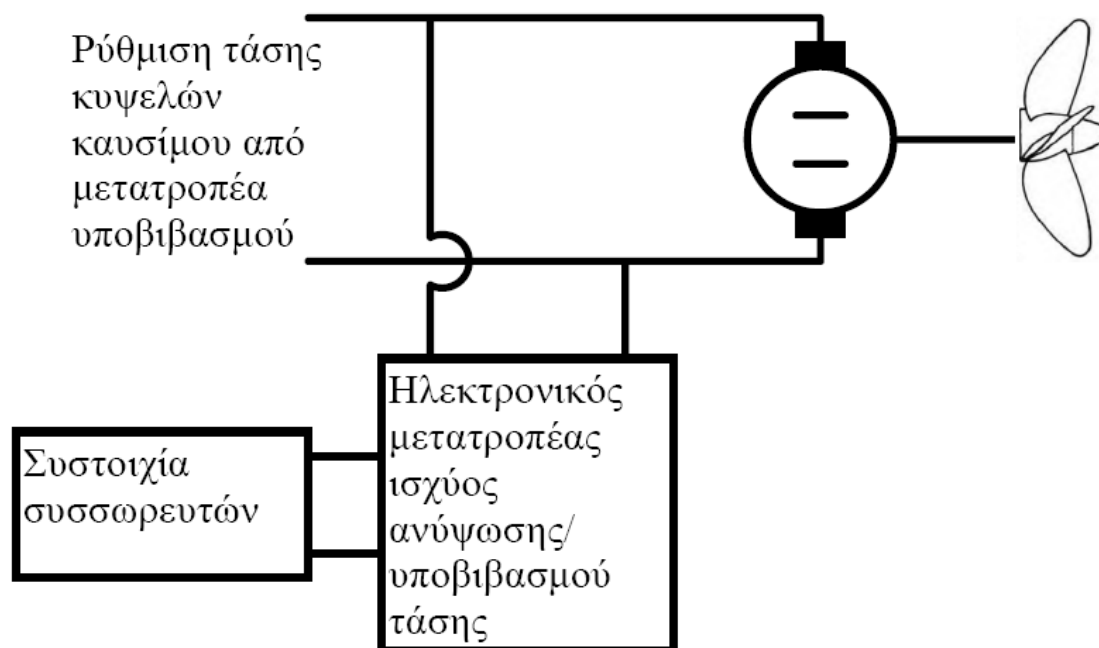
Στην περίπτωση του μετατροπέα διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων της εφαρμογής μας το ρεύμα στον πυκνωτή εξόδου θα έχει συχνότητα τετραπλάσια από τη συχνότητα λειτουργίας, επίσης το ρεύμα της διόδου δεν θα φθάνει κάθε φορά στο μηδέν με αποτέλεσμα τελικά να μειώνεται η κυμάτωσή του. Έχοντας αυτά στο νου μας, αντιλαμβανόμαστε πως η απαραίτητη χωρητικότητα για τον πυκνωτή εξόδου στο μετατροπέα υποβιβασμού τάσης διαδοχικής αγωγής θα είναι μικρότερη από αυτήν για τον τυπικό μετατροπέα buck.

Είναι εμφανής η ανάγκη χρησιμοποίησης πολύ μεγαλύτερου πυκνωτή εξόδου σε σχέση με τον μετατροπέα buck. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ρεύμα εξόδου στον boost είναι παλμικού τύπου, οπότε έχει και μεγαλύτερη κυμάτωση.

Η τελική τιμή τόσο της χωρητικότητας του πυκνωτή εξόδου όσο και του φίλτρου LC στην είσοδο του μετατροπέα θα προκύψουν από την προσομοίωσή του.

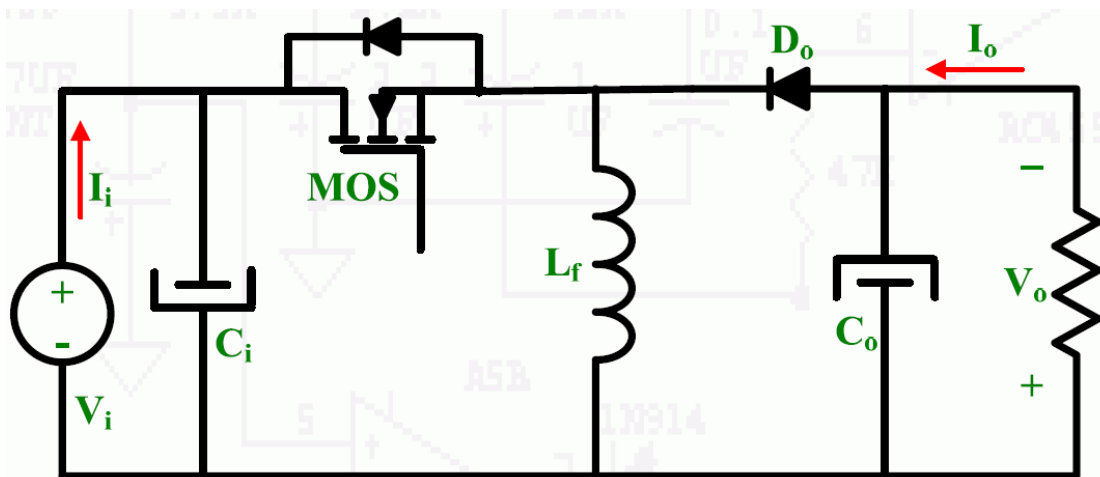
5.5.2.3 Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης διαδοχικής αγωγής δύο κλάδων

Στο Σχ. 5.43 φαίνεται απλοποιημένο σχηματικό του κινητήριου συστήματος, με τον μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης για τη διαχείριση της ενέργειας των συσσωρευτών ασφαλείας.



Σχήμα 5.43 Απλοποιημένο διάγραμμα κινητήριου συστήματος για τη μελέτη της λειτουργίας των συσσωρευτών ασφαλείας.

Σε αυτό το σύστημα οι συσσωρευτές, ονομαστικής τάσης 240 V, θεωρώντας την εν σειρά σύνδεση είκοσι (20) συσσωρευτών 12 V, χρησιμοποιούνται για την κάλυψη αιχμών φορτίου (μέχρι και 10 % αύξηση του φορτίου) αλλά και για βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος. Επίσης θεωρούμε πως η φόρτισή τους πραγματοποιείται από εξωτερική πηγή ενέργειας εκτός κινητήριου συστήματος. Όταν απαιτείται η εκφόρτισή τους ο μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης είτε ανυψώνει είτε υποβιβάζει την τάση των συσσωρευτών στην τάση τροφοδοσίας του κινητήρα πρόωσης που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 440 V. Σε αυτόν τον μετατροπέα θα χρησιμοποιηθούν δύο (N = 2) παράλληλα κανάλια διαδοχικής αγωγής. Προσοχή πρέπει να δοθεί κατά τη συνδεσμολογία, καθώς η τάση εξόδου του μετατροπέα buck-boost (Σχ. 5.44) είναι αντίθετης πολικότητας. Θεωρείται η χρήση συσσωρευτών βαθιάς εκφόρτισης (deep cycle), ώστε να αντλείται το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας απ' αυτές, χωρίς να προκαλούνται βλάβες. Ο μετατροπέας θα σχεδιαστεί με το μέγιστο ρεύμα εξόδου του να είναι ίσο με 30 A, δηλαδή 10 % του ονομαστικού ρεύματος τυμπάνου, έτσι ώστε να καλύπτει 10 % αύξηση στο φορτίο του κινητήρα. Το χρονικό διάστημα κατά το οποίο θα μπορεί να τροφοδοτείται ο κινητήρας πρόωσης με το πρόσθετο ρεύμα εξαρτάται από την χωρητικότητα (Ah) των συσσωρευτών.



Σχήμα 5.44 Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα τύπου buck-boost [48].

Για τη συνεχή αγωγή μετατροπέα buck-boost ισχύει η εξίσωση:

$$\frac{V_o}{V_i} = \delta \frac{1}{1 - \delta} \quad (5.79)$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω θεωρούμε μέγιστο ρεύμα εξόδου ίσο με 30 A. Η μέγιστη τάση εξόδου του μετατροπέα θα είναι ίση με την ονομαστική τάση τυμπάνου, δηλαδή ίση με 440V. Η τάση εισόδου του μετατροπέα είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική τάση των συσσωρευτών, δηλαδή 240 V. Να σημειωθεί ότι αυτή η τάση μπορεί να μεταβάλλεται λόγω της μεταβολής της τάσης κάθε συσσωρευτή στο διάστημα 9 – 13 V. Οπότε απαιτείται και ένα σύστημα εποπτείας της τάσης αυτής. Για το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ισχύουν (βλ. Κεφάλαιο 4):

$$I_{L,b} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} I_L dt = \frac{1}{T_s} \frac{T_s \cdot I_{L,max}}{2} = \frac{1}{2} I_{L,max} = \frac{1}{2} \frac{V_i}{L_f} \cdot t_{on} \Rightarrow I_{L,b} = \frac{1}{2} \frac{V_i \cdot T_s}{L_f} \delta \quad (5.80)$$

Στον μετατροπέα buck-boost μηδενικών απωλειών ισχύουν:

$$P_i = P_o \Rightarrow V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o \Rightarrow \frac{I_i}{I_o} = \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow \frac{I_i}{I_o} = \frac{\delta}{1-\delta} \quad (5.81)$$

$$I_L = I_i + I_o \Rightarrow I_L = I_o \frac{\delta}{(1-\delta)} + I_o \Rightarrow I_L = \frac{I_o}{(1-\delta)} \Rightarrow I_o = I_L \cdot (1-\delta) \quad (5.82)$$

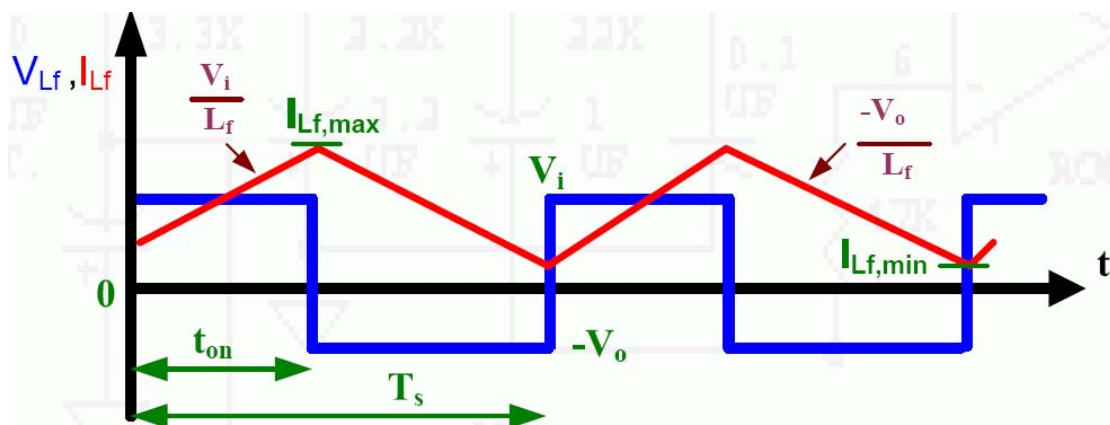
$$I_{o,b} = \frac{V_i \cdot T_s}{L_f} \frac{\delta \cdot (1-\delta)}{2} = \frac{V_o \cdot T_s}{2 \cdot L_f} \cdot (1-\delta)^2 \quad (5.83)$$

Θεωρώ ότι το ελάχιστο ρεύμα εξόδου θα είναι ίσο με 4 A, οπότε 2 A ανά κλάδο⁴, και η διακοπτική συχνότητα 25 kHz. Ο λόγος $\delta(1-\delta)/2$ μεγιστοποιείται για $\delta = 0,5$. Οπότε, για δεδομένο ελάχιστο ρεύμα και δεδομένη τάση εισόδου από την Εξ. (5.83) προκύπτει η μεγαλύτερη δυνατή τιμή πηνίου για λειτουργία στο όριο. Οπότε επιλέγοντας ακόμα μεγαλύτερη θα είμαι σίγουρα στη συνεχή αγωγή.

$$L_{f,min} = \frac{V_i \cdot T_s}{I_{o,b,channel}} \frac{\delta \cdot (1-\delta)}{2} = \frac{240V}{2A \cdot 25kHz} \frac{0,5 \cdot (1-0,5)}{2} = 600\mu H \quad (5.84)$$

Άρα επιλέγοντας μία τιμή μεγαλύτερη από 600 μH για το πηνίο ο μετατροπέας θα λειτουργεί στην συνεχή αγωγή.

Θεωρούμε το Σχ. 5.45, θα υπολογιστούν τα $I_{L,max}$ και $I_{L,min}$. Ο υπολογισμός θα γίνει για $I_o = 30$ A, $V_o = 440$ V, $V_i = 240$ V, και από τα γνωστά $I_i = 55$ A, οπότε σε καθένα από τους δύο κλάδους θα έχω τη μισή ένταση ρεύματος. Για τη συνεχή αγωγή μετατροπέα buck-boost ισχύουν οι εξισώσεις που ακολουθούν παρακάτω.



Σχήμα 5.45 Ρεύμα και τάση στο πηνίο για τη συνεχή αγωγή μετατροπέα buck-boost [48].

⁴ Πρόκειται για μια υποθετική επιλογή ελαχίστου ρεύματος με σκοπό τον ενδεικτικό υπολογισμό του απαραίτητου πηνίου. Το πηνίο που προκύπτει από τον υπολογισμό είναι ούτως ή άλλως μεγάλο οπότε ο μετατροπέας δύναται να λειτουργήσει ακόμα και υπό μικρότερο ρεύμα αν και η φύση του φορτίου δεν απαιτεί τόσο μικρά ρεύματα.

$$I_o + I_i = \frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2} \quad (5.85)$$

$$I_{L,max} - I_{L,min} = \frac{V_i}{L_f} \delta \cdot T_s = \frac{V_o}{L_f} (1-\delta) \cdot T_s \quad (5.86)$$

$$I_{L,max} + I_{L,min} = 2(I_o + I_i) \quad (5.87)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\delta}{1-\delta} \Rightarrow V_o - \delta V_o = \delta V_i \Rightarrow \delta = \frac{V_o}{V_o + V_i} \Rightarrow \quad (5.88)$$

$$\delta = \frac{V_o}{V_o + V_i} = \frac{440V}{440V + 240V} = 0,647$$

Προσθέτουμε κατά μέλη τις Εξ. (5.86) και (5.87) και προκύπτει:

$$I_{L,max} = \frac{V_i}{2L_f} \delta \cdot T_s + (I_o + I_i) = \frac{240V}{2 \cdot 600\mu H \cdot 25 \cdot 10^3} \cdot 0,647 + (15A + 27,5A) \Rightarrow \quad (5.89)$$

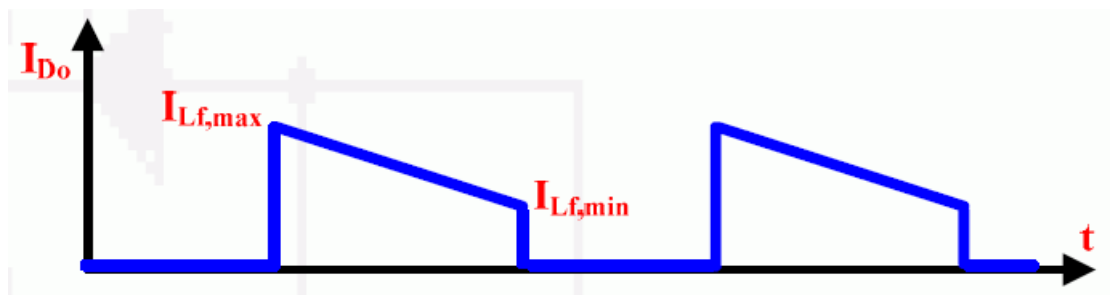
$$I_{L,max} = 5,176A + 42,5A = 47,676A$$

$$I_{L,min} = 2(I_o + I_i) - I_{L,max} = 2 \cdot 42,5A - 47,676 = 37,324A \quad (5.90)$$

Για την επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων του κυκλώματος, διόδου και IGBT, θα βασιστούμε στο μέσο ρεύμα που τα διαρρέει και στη μέγιστη τάση που εφαρμόζεται σε αυτά, άρα πρέπει να έχουμε μία εικόνα του μέσου ρεύματος στη διόδο και στο IGBT κάθε κλάδου. Η μέγιστη τάση που εφαρμόζεται και στα δύο στοιχεία ισούται με το άθροισμα της τάσης εισόδου με τη μέγιστη τάση εξόδου, οπότε είναι τα 680 V (βλ. κυματομορφές προηγούμενου κεφαλαίου). Το μέσο ρεύμα της διόδου, το οποίο να σημειωθεί ότι ταυτίζεται με το ρεύμα εξόδου, υπολογίζεται από την κυματομορφή του ρεύματος διόδου (βλ. Σχ. 5.46).

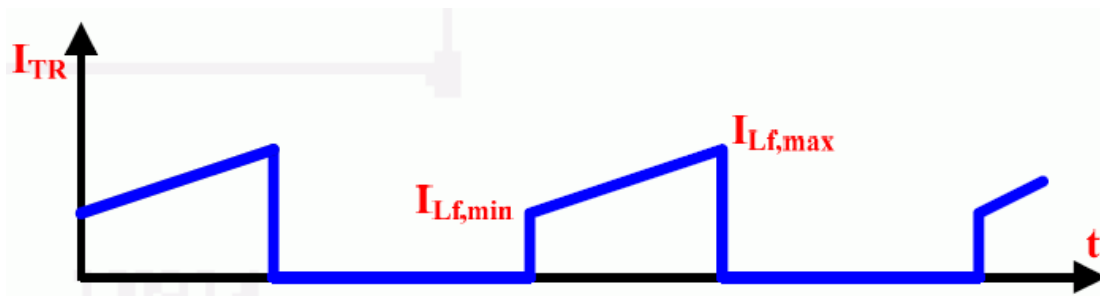
$$I_{D_o} = \frac{1}{T_s} \int_{\delta T_s}^{T_s} I_{D_o}(t) dt = \frac{1}{T_s} E = \frac{1}{X_s} \cdot \frac{47,676 + 37,324}{2} (X_s - \delta X_s) \Rightarrow \quad (5.91)$$

$$I_{D_o} = \frac{85}{2} (1 - 0,647) = 15A$$



Σχήμα 5.46 Ρεύμα διόδου σε μετατροπέα buck-boost για τη συνεχή αγωγή [48].

Το μέσο ρεύμα του τρανζίστορ υπολογίζεται από την κυματομορφή του τρανζίστορ (βλ. Σχ. 5.47) και ισούται με το ρεύμα εισόδου.



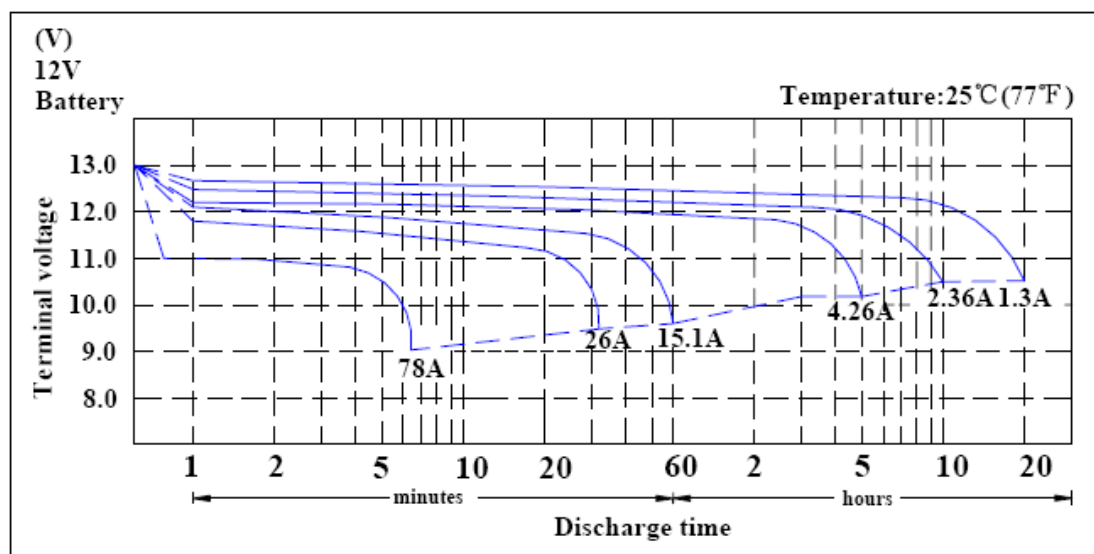
Σχήμα 5.47 Ρεύμα τρανζίστορ σε μετατροπέα buck-boost για τη συνεχή αγωγή [48].

$$I_{TR} = \frac{1}{T_s} \int_0^{\delta T_s} I_{TR}(t) dt = \frac{1}{T_s} E = \frac{1}{X_s} \cdot \frac{47,676 + 37,324}{2} \delta X_s \Rightarrow \quad (5.92)$$

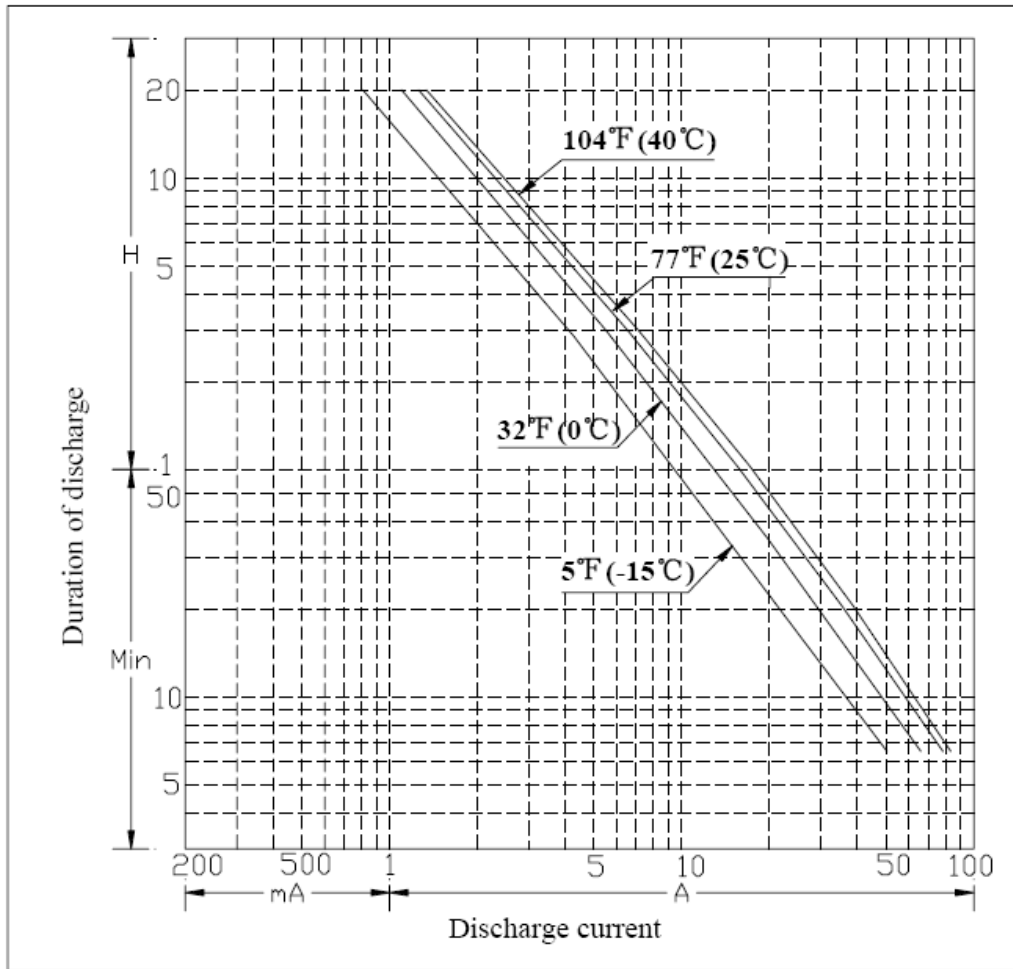
$$I_{TR} = \frac{85A}{2} 0,647 = 27,5A$$

Για την κυμάτωση της τάσης εξόδου ισχύει αντίστοιχα ό,τι αναφέρθηκε και στον μετατροπέα boost, οπότε και εδώ, η τελική τιμή τόσο της χωρητικότητας του πυκνωτή εξόδου όσο και του φίλτρου LC στην είσοδο του μετατροπέα θα προκύψουν από την προσομοίωσή του.

Στα Σχ. 5.48 και 5.49 παρατίθενται ενδεικτικά οι χαρακτηριστικές εκφόρτισης ενός, υποψήφιου προς χρήση, συσσωρευτή. Για $I_o = 30 A$, $V_o = 440 V$, $V_i = 240 V$, οπότε $I_i = 55 A =$ ρεύμα εκφόρτισης, από τα σχήματα βλέπουμε ότι μπορούμε να τροφοδοτούμε για περίπου 10 λεπτά ($25^\circ C$). Σε περίπτωση που πρέπει να αυξηθεί περισσότερο ο χρόνος της βοηθητικής τροφοδοσίας πρέπει να αυξηθεί η χωρητικότητα των συσσωρευτών, οπότε και το βάρος τους. Οι συγκεκριμένοι ζυγίζουν 10 kg έκαστος, οπότε όλη η συστοιχία ζυγίζει 200 kg.



Σχήμα 5.48 Χαρακτηριστική εκφόρτισης συσσωρευτή DC26Ah – 12 V [67].



Σχήμα 5.49 Χρόνος εκφόρτισης συναρτήσει ρεύματος εκφόρτισης συσσωρευτή DC26Ah – 12 V [67].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Προσομοίωση – Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των επιμέρους ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος των δύο υπό μελέτη ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με το πρόγραμμα PSpice Schematics. Η διακοπτική συχνότητα όλων των μετατροπέων ισχύος επιλέχθηκε στα 25 kHz και, όπως έχει αναφερθεί, σχεδιάστηκαν ώστε να λειτουργούν στη συνεχή κατάσταση αγωγής (CCM). Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μαζί με σχεδιαστικά χαρακτηριστικά για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς, με σειρά αντίστοιχη του μαθηματικού σχεδιασμού που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

6.1 Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης με διαδοχική αγωγή τεσσάρων κλάδων

Στο πρώτο σύστημα που μελετάται, με τη μία μονάδα κυψελών καυσίμου, για τη ρύθμιση της τάσης τυμπάνου (0 – 440 V) του κινητήρα πρόωσης, μέσω υποβιβασμού της τάσης του συστήματος κυψελών καυσίμου (800 – 550 V), χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης σε συνεχή με διαδοχική αγωγή τεσσάρων κλάδων. Στο Σχ. 6.1 φαίνεται η τοπολογία του ηλεκτρονικού μετατροπέα, με τις τιμές να αντιστοιχούν σε μία από τις περιπτώσεις λειτουργίας που μελετήθηκαν. Τα πηνία τελικά επιλέχθηκαν με επαγωγή 560 μH, με την οποία επιτυγχάνεται η λειτουργία σε συνεχή αγωγή (CCM) βάσει των απαιτήσεων του φορτίου. Πληροφορίες σχετικά με τις απαιτήσεις σχεδιασμού και κατασκευής των πηνίων μπορούν να αναζητηθούν στην βιβλιογραφική αναφορά [61].

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπου στη λεζάντα κάθε σχήματος – κυματομορφής δίνονται και πληροφορίες για την εκάστοτε εξεταζόμενη περίπτωση λειτουργίας. Θα εξεταστούν πέντε διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας ενδεικτικές της περιοχής λειτουργίας του κινητήριου συστήματος κυψέλης καυσίμου – ηλεκτρονικού μετατροπέα υποβιβασμού – κινητήρα – έλικας.

Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος κατά την οποία η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό την ονομαστική της τάση (627 V), ο κινητήρας στρέφεται υπό ονομαστικό φορτίο με την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του. Από την προσομοίωση στο ονομαστικό αυτό σημείο λειτουργίας θα προκύψει ο σχεδιασμός των φίλτρων του μετατροπέα και η επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων που το απαρτίζουν. Τα φίλτρα εισόδου και εξόδου σχεδιάζονται για ένα σημείο λειτουργίας και ελέγχεται η ικανοποιητική λειτουργία τους για τα υπόλοιπα σημεία λειτουργίας του μετατροπέα.

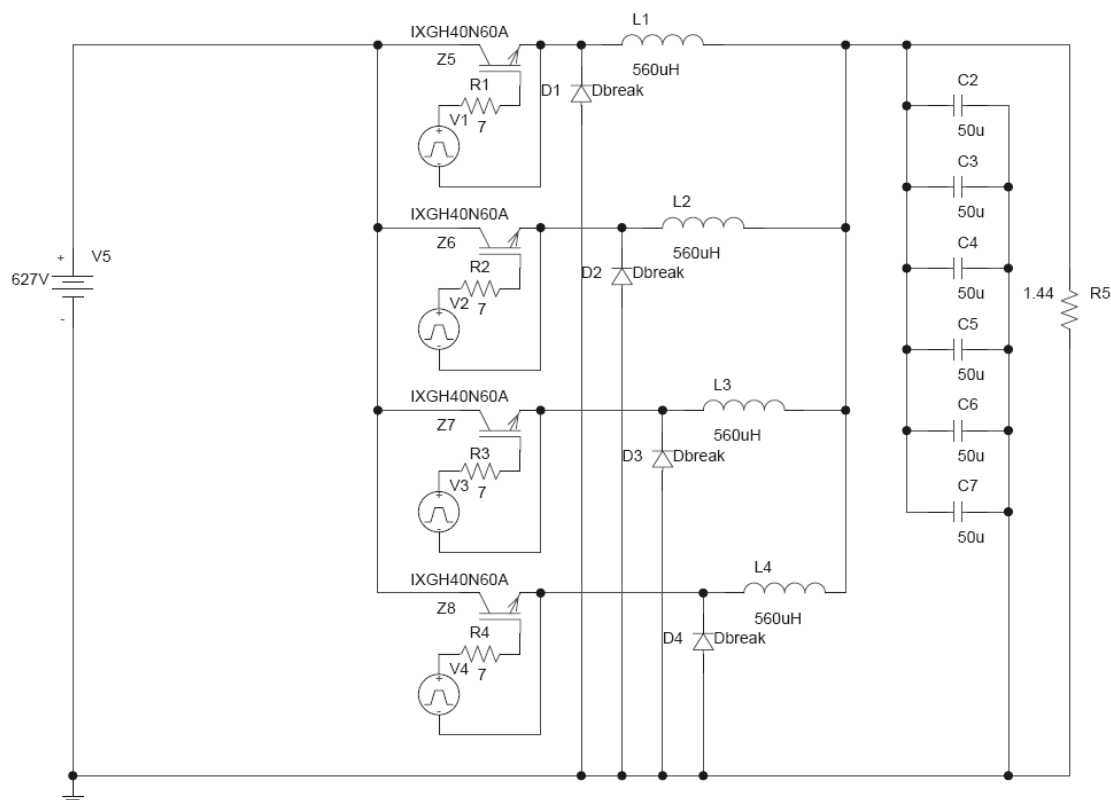
Στην δεύτερη περίπτωση θα θεωρηθεί η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου υπό την ελάχιστη δυνατή τάση της (550 V). Όπως και στην πρώτη, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση, θεωρούμε τον κινητήρα πρόωσης να στρέφεται υπό ονομαστικό φορτίο με την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του, ύστερα από κατάλληλη επιλογή του λόγου κατάτμησης δ .

Στην τρίτη περίπτωση θα θεωρηθεί τάση λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου μεγαλύτερη της ονομαστικής και μία περίπτωση φορτίου όπου ο κινητήρας πρόωσης

στρέφεται με το 1/2 του ονομαστικού αριθμού στροφών οπότε, βάσει θεωρίας⁵, η έλικα σταθερού βήματος απαιτεί το 1/8 της ονομαστικής ισχύος.

Στην τέταρτη περίπτωση θα θεωρηθεί τάση λειτουργίας της κυψέλης μεγαλύτερη της ονομαστικής και μια περίπτωση φορτίου όπου προκύπτει πολύ μικρό ρεύμα τυμπάνου.

Στην πέμπτη περίπτωση θεωρείται φορτίο που αντιστοιχεί στη λειτουργία συγκεκριμένου σκάφους (βλ. και Πίνακα 7.5, Κεφάλαιο 7).



Σχήμα 6.1 Σχηματικό μετατροπέα υποβιβασμού τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων.

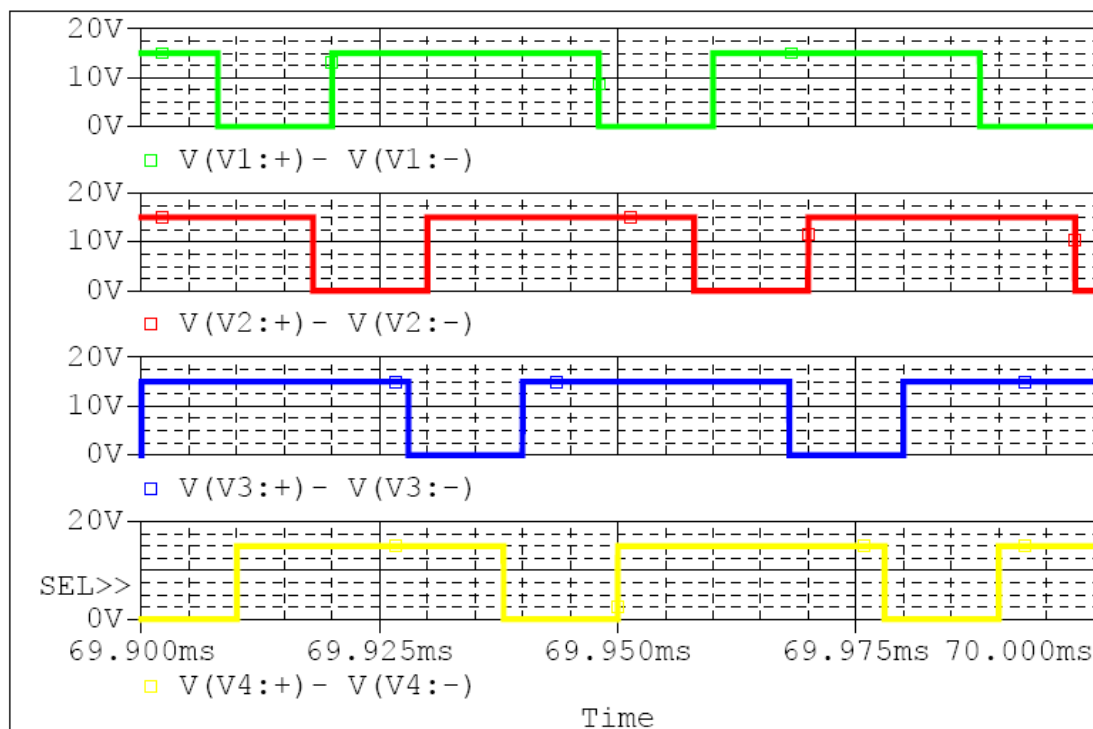
6.1.1 Πρώτη περίπτωση προσομοίωσης

Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό ονομαστική τάση, 627 V, και ο κινητήρας πρόωσης στρέφεται με ονομαστικές στροφές υπό ονομαστικό φορτίο. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1 Δεδομένα 1^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα υποβιβασμού.

Τάση εισόδου (V_i)	627 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	214,6 A
Λόγος κατάτμησης (δ)	0,7
Τάση εξόδου (V_o)	435,7 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	302,7 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,98

⁵ Για έλικα σταθερού βήματος, ισχύει γενικά η κυβική παραβολή, δηλ. η ισχύς που απορροφά η έλικα είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας περιστροφής της.



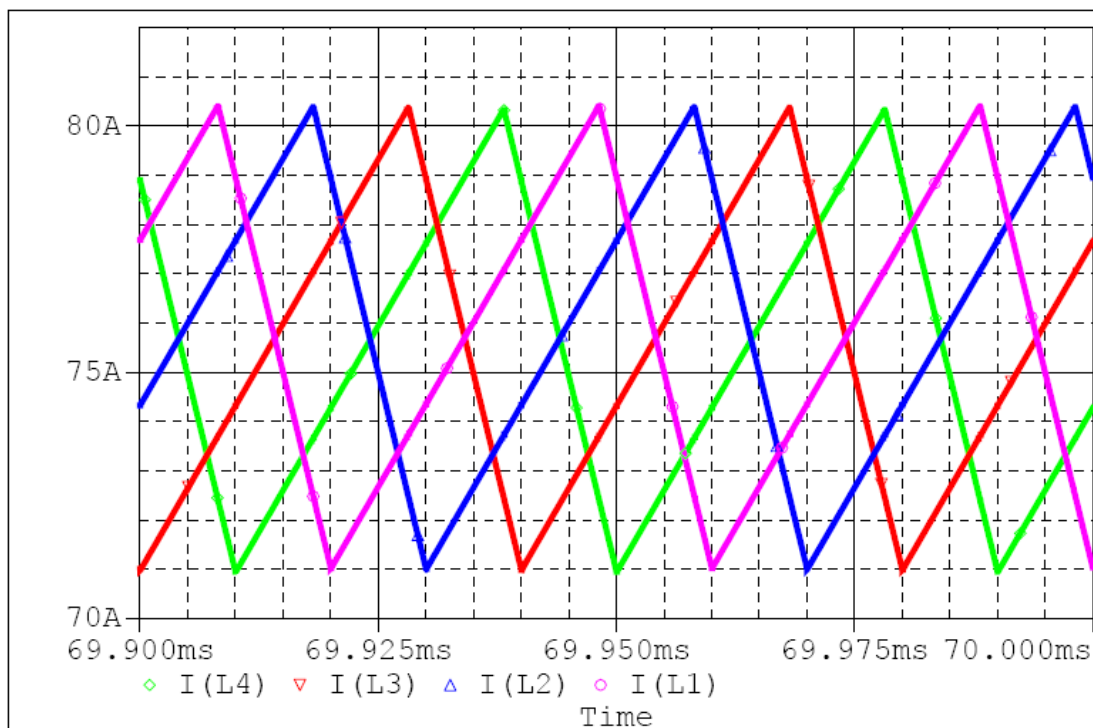
Σχήμα 6.2 Παλμοί ελέγχου έναυσης και σβέσης των IGBTs με $\delta = 0,7$, διακοπτική περίοδο $40 \mu s$ και διαφορά φάσης 90° , (αποτελέσματα προσομοίωσης).

Στο Σχ. 6.2 φαίνονται οι παλμοί με τους οποίους αναβοσβήνουν τα IGBTs για $\delta = 0,7$, με κατάλληλο εύρος τάσης $0 - 15 V$. Για την παραγωγή αυτών των παλμών απαιτείται κατάλληλο σύστημα παλμοδότησης [61]. Μια πολύ καλή και σχετικά εύκολη λύση για την παραγωγή τους αποτελεί ο μικροελεγκτής (μ/ε) dsPIC30F2020 (Σχ. 6.3) της Microchip, ο οποίος περιλαμβάνει, πέραν των υπολοίπων, και τέσσερις εξόδους PWM. Στις τέσσερις αυτές γεννήτριες PWM μπορούμε να ελέγχουμε μέσω των αντίστοιχων καταχωρητών την περίοδό τους, τον λόγο κατάτμησής τους και την καθυστέρηση έναυσής τους, οπότε και τη διαφορά φάσης μεταξύ τους.

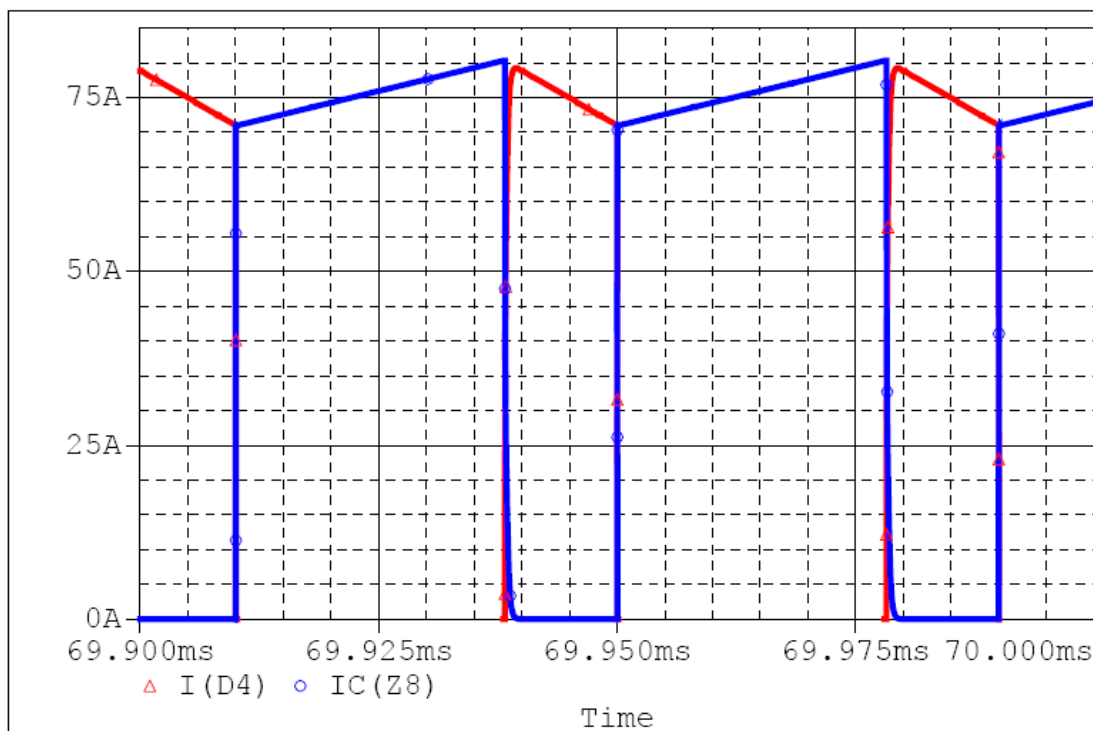
28-Pin SDIP and SOIC

MCLR	1	28	AVDD
AN0/CMP1A/CN2/RB0	2	27	AVSS
AN1/CMP1B/CN3/RB1	3	26	PWM1L/RE0
AN2/CMP1C/CMP2A/CN4/RB2	4	25	PWM1H/RE1
AN3/CMP1D/CMP2B/CN5/RB3	5	24	PWM2L/RE2
AN4/CMP2C/CMP3A/CN6/RB4	6	23	PWM2H/RE3
AN5/CMP2D/CMP3B/CN7/RB5	7	22	PWM3L/RE4
VSS	8	21	PWM3H/RE5
AN6/CMP3C/CMP4A/OSC1/CLKI/RB6	9	20	VDD
AN7/CMP3D/CMP4B/OSC2/CLKO/RB7	10	19	VSS
PGD1/EMUD1/PWM4H/T2CK/U1ATX/CN1/RE7	11	18	PGC/EMUC/SDI1/SDA/U1RX/RF7
PGC1/EMUC1/EXTREF/PWM4L/T1CK/U1ARX/CN0/RE6	12	17	PGD/EMUD/SDO1/SCL/U1TX/RF8
VDD	13	16	SFLT2/INT0/OCFLTA/RA9
PGD2/EMUD2/SCK1/SFLT3/OC2/INT2/RF6	14	15	PGC2/EMUC2/OC1/SFLT1/IC1/INT1/RD0

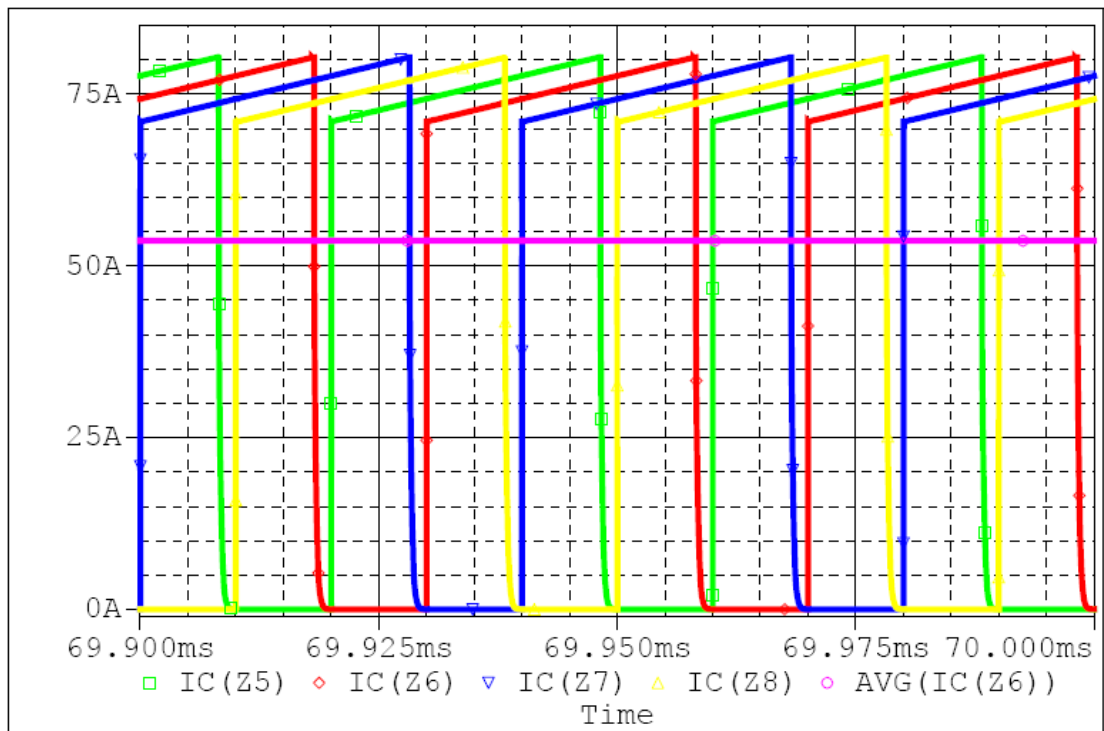
Σχήμα 6.3 Σχηματικό μ/ε dsPIC30F2020 [61].



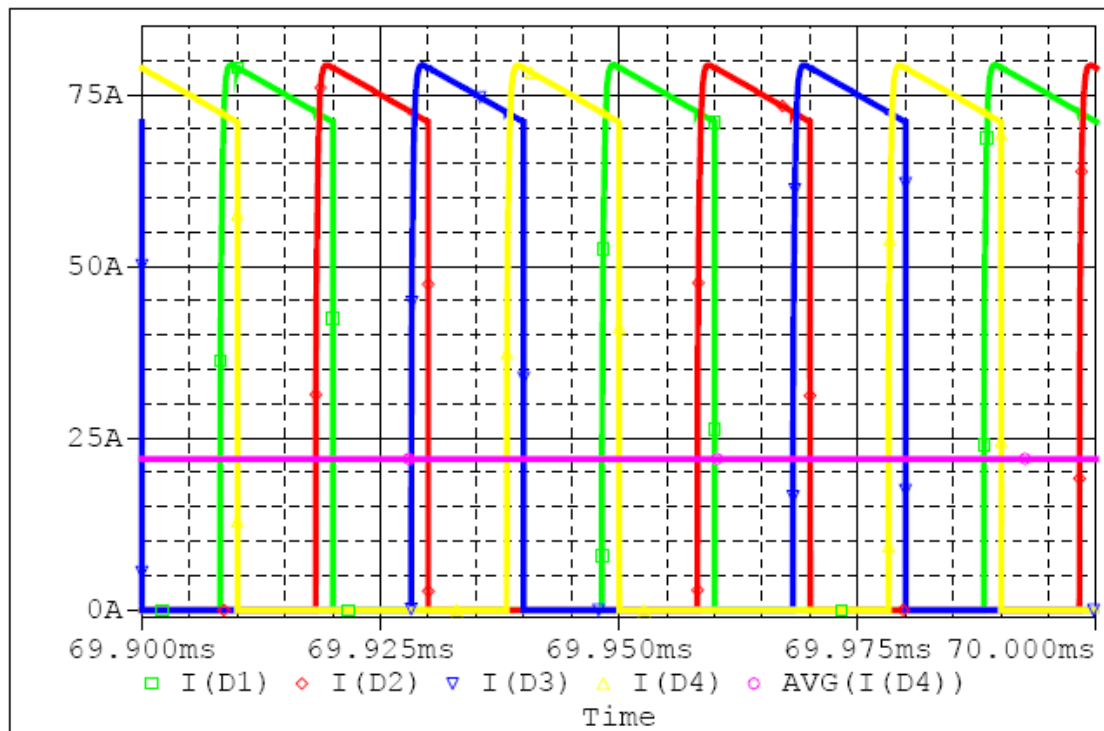
Σχήμα 6.4 Τριγωνικά ρεύματα πηνίων σε καθένα από τα τέσσερα κανάλια του μετατροπέα με διαφορά φάσης 90° ($10 \mu s$), $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



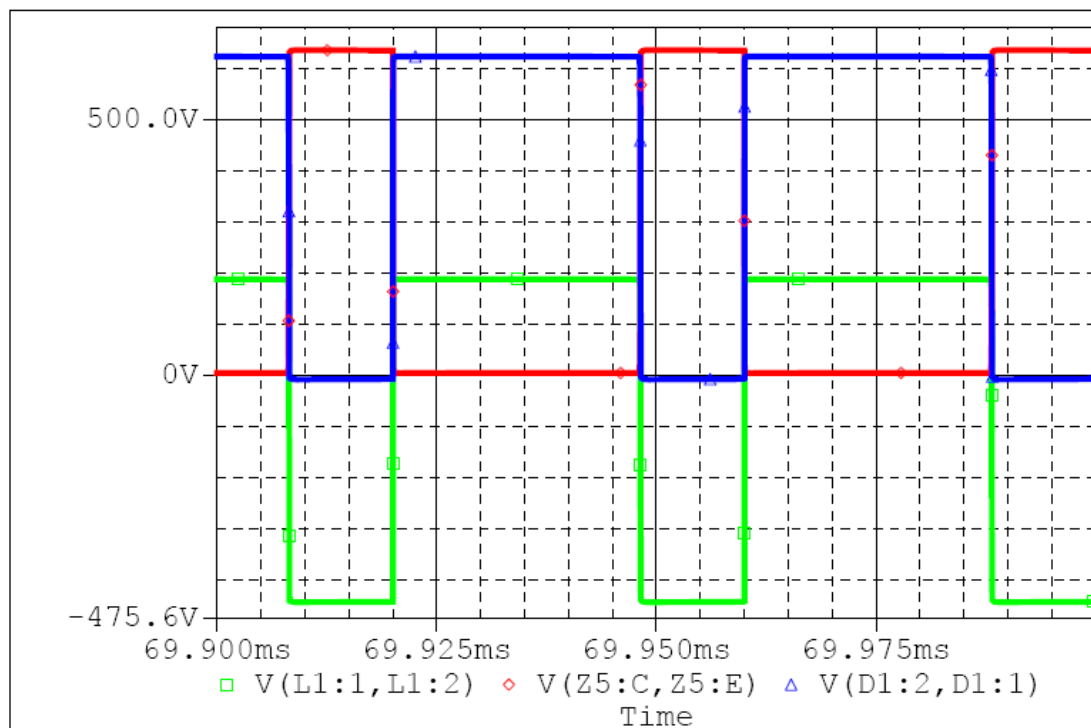
Σχήμα 6.5 Ρεύμα τρανζίστορ και διόδου 4^{ου} κλάδου με συμπληρωματική αγωγή, το άθροισμα τους δίνει το ρεύμα στο πηνίο του 4^{ου} κλάδου, $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.6 Ρεύματα στα IGBTs με διαφορά φάσης 90° , και μέσο ρεύμα τρανζίστορ ανά κλάδο του μετατροπέα, $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.7 Ρεύματα στις διόδους με διαφορά φάσης 90° , και μέσο ρεύμα διόδου ανά κλάδο, $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



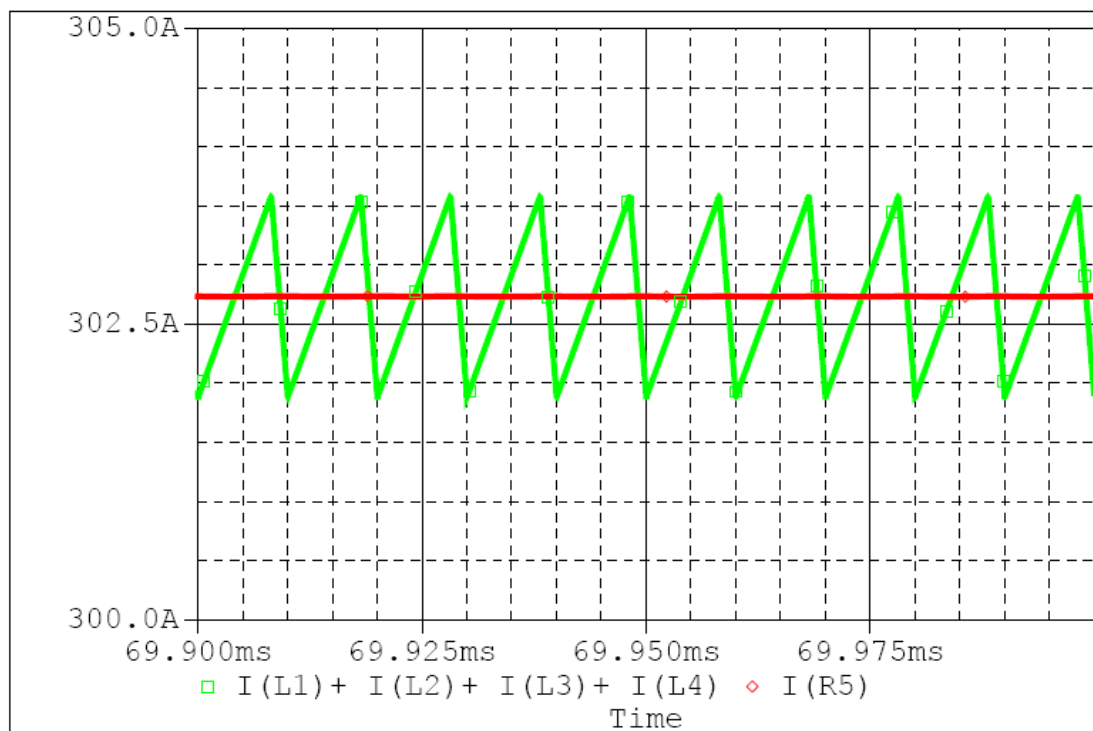
Σχήμα 6.8 Τάσεις σε πηνίο, τρανζίστορ και δίοδο, $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

Από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα μπορούμε να επιλέξουμε κατάλληλα IGBT και δίοδο για καθέναν από τους τέσσερις κλάδους, βάσει μέσου ρεύματος, μέγιστης τάσης και διακοπτικής συχνότητας. Γενικά, η επιλογή των κατάλληλων ημιαγωγικών στοιχείων είναι πολύ βασική για τη σωστή λειτουργία του μετατροπέα. Όσον αφορά τα διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλων ισχύων, μπορούμε να πούμε ότι υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά είδη. Αυτά είναι το θυρίστορ, το GTO, το IGBT και το MOSFET. Τα θυρίστορ έχουν ένα βασικό μειονέκτημα, δεν μπορούν να σβήσουν εξαναγκασμένα αλλά μόνο όταν το ρεύμα που τα διαρρέει πάρει πολύ μικρή τιμή. Το μειονέκτημα αυτό διορθώνεται με τα GTOs (Gate Turn-off Thyristor), τα οποία όμως δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές συχνότητες. Τα δύο παραπάνω στοιχεία, λόγω των περιορισμών τους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή μας και περιοριζόμαστε στη χρήση IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ή MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Λόγω όμως του υψηλού ρεύματος λειτουργίας των στοιχείων και της υψηλής τάσης στην οποία θα πρέπει να λειτουργούν επιλέγουμε τη χρήση IGBTs με διακοπτική συχνότητα λειτουργίας 25 kHz (βλ. και 1^ο κεφάλαιο Σχ. 1.28). Για IGBT προτείνεται το MDI200-12A4 της Ixys [68], χωρίς αυτό να αποτελεί μοναδική επιλογή καθώς υπάρχουν αρκετές εμπορικές λύσεις. Το συγκεκριμένο μπορεί να λειτουργήσει υπό μέγιστη τάση 1200 V και μέγιστο μέσο ρεύμα 180 A (85°C). Επίσης είναι κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής συχνότητας. Στο παράρτημα παρατίθεται το φυλλάδιο χαρακτηριστικών (datasheet) του. Το συγκεκριμένο IGBT module περιλαμβάνει και δίοδο ισχύος τοποθετημένη κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να συντίθεται ένας κλάδος μετατροπέα buck (χωρίς το πηνίο βέβαια), έτσι με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται χώρος. Σε περίπτωση χρήσης ξεχωριστού IGBT και δίοδου, ως δίοδος ελεύθερης διέλευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η «γρήγορη» (fast recovery) δίοδος RHRG75120 της Fairchild [69]. Μπορεί να λειτουργήσει υπό μέγιστη τάση

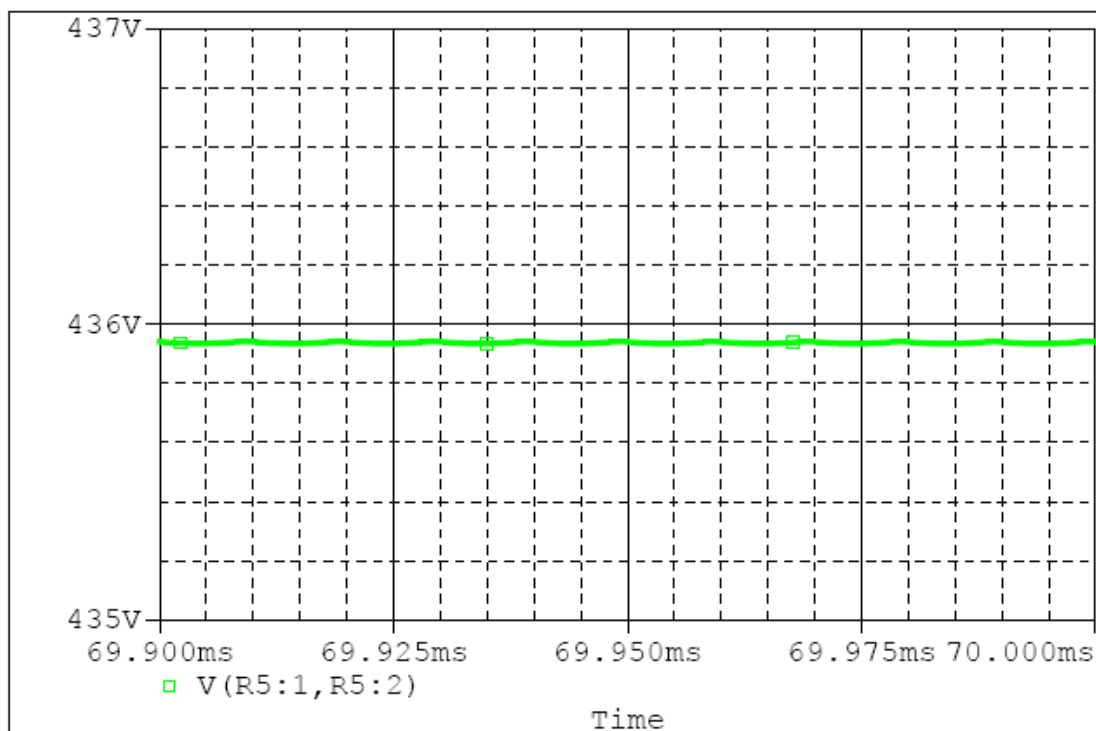
1200 V και μέγιστο μέσο ρεύμα 75 A (42°C). Το φυλλάδιο χαρακτηριστικών της διόδου παρατίθεται στο παράρτημα.

Στο Σχ. 6.9 φαίνεται το ρεύμα εξόδου πριν και μετά την εξομάλυνσή του. Η κυμάτωση του είναι περίπου 1,7 A. Η εναλλασσόμενη συνιστώσα φιλτράρεται από το φίλτρο εξόδου. Ως φίλτρο στην έξοδο χρησιμοποιήθηκε μία συστοιχία πυκνωτών που απαρτίζεται από την παράλληλη σύνδεση έξι κλάδων, με κάθε κλάδο να έχει δύο εν σειρά πυκνωτές ονομαστικής χωρητικότητας 100 μF έκαστος και τάση 450 V. Οπότε προκύπτει η συνολική χωρητικότητα των 300 μF . Η εν σειρά σύνδεση επιτρέπει τη λειτουργία στα 900 V (η μέγιστη τάση εξόδου είναι 440 V) και η σύνδεση εν παραλλήλω αυξάνει την συνολική χωρητικότητα, μειώνει την συνολική παρασιτική αντίσταση (ESR) σε περίπου 250 m Ω και καλύπτει τις απαιτήσεις ελάχιστης ενεργούς τιμής ρεύματος του συγκεκριμένου πυκνωτή, $I_{\text{rms,AC}} = 1 \text{ A}$ (85°C), όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.11, όπου προκύπτει μια πολύ μικρή ενεργός τιμή. Στο παράρτημα παρατίθεται μέρος του φυλλαδίου των χαρακτηριστικών του πυκνωτή εξόδου (Epcos) [66].

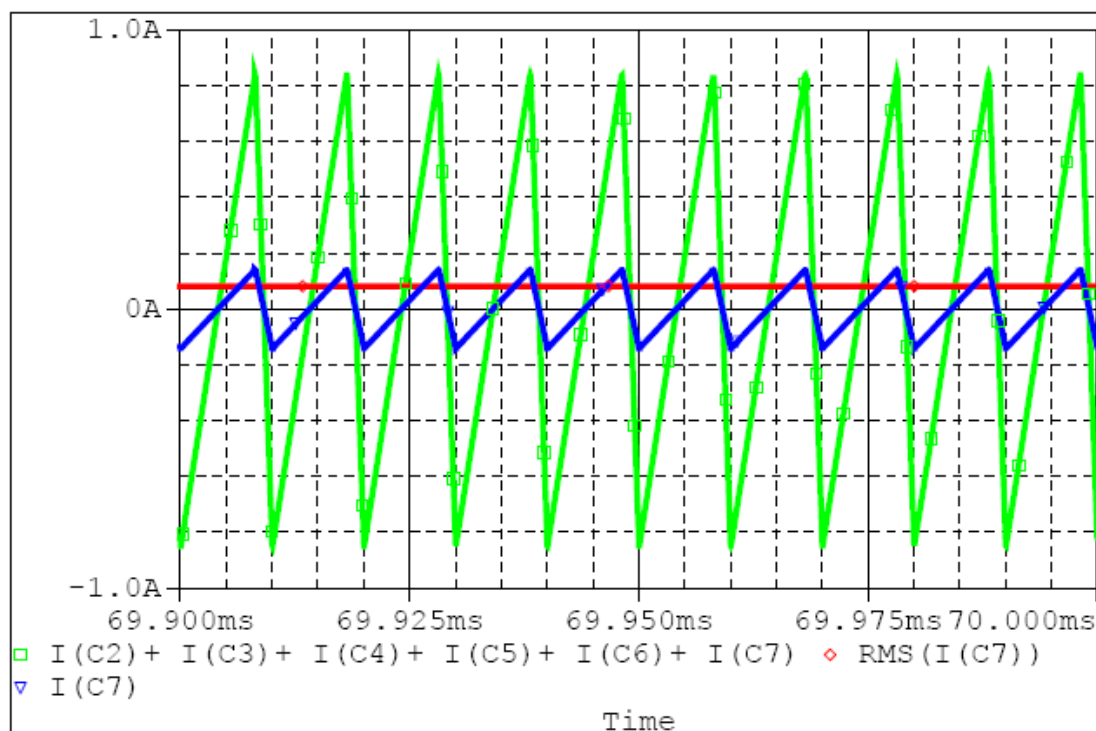
Στο Σχ. 6.10 φαίνεται η συνεχής τάση εξόδου του μετατροπέα με μία κυμάτωση της τάξης των μερικών mV. Σε περίπτωση που θέλουμε να εκμηδενίσουμε την κυμάτωση της τάσης εξόδου μπορούμε να αυξήσουμε την χωρητικότητα του φίλτρου εξόδου προσθέτοντας π.χ. έναν ή και περισσότερους παράλληλους κλάδους. Μια άλλη λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε πυκνωτή με σπείρωμα [66], ο οποίος έχει χαμηλή ESR και υψηλές αντοχές σε ενεργό τιμή ρεύματος πυκνωτή. Η τελευταία λύση απαιτεί την ψύξη του πυκνωτή ενώ και στις δύο εναλλακτικές αυξάνεται το μέγεθος του φίλτρου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι αν προστεθούν τέσσερις επιπλέον όμοιοι κλάδοι η χωρητικότητα αυξάνεται στα 500 μF με ταυτόχρονη αύξηση του βάρους της συστοιχίας κατά 66,7 % στα 320 g. Αν αντικατασταθεί από μια συστοιχία δύο εν σειρά πυκνωτών με σπείρωμα 1000 μF έκαστος (βλ. Παράρτημα Revox Rifa), η χωρητικότητα αυξάνεται στο 500 μF και το βάρος κατά 145 % στα 530 g [66].



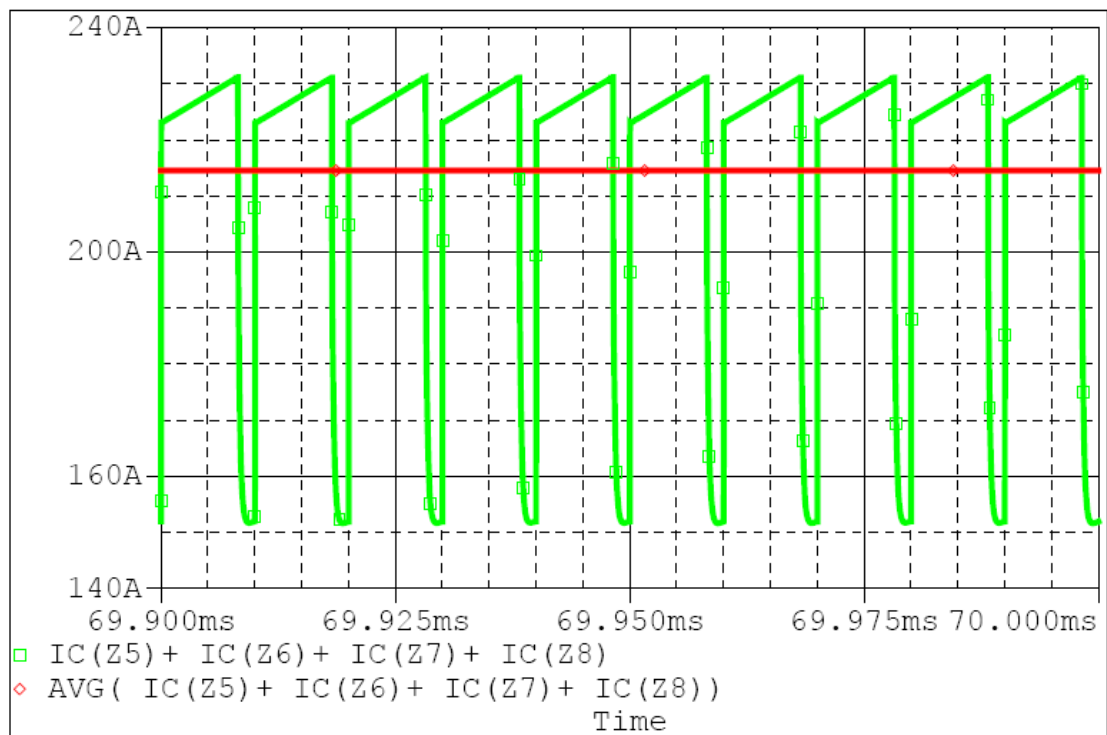
Σχήμα 6.9 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $4 \times 25 \text{ kHz} = 100 \text{ kHz}$ και μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του, $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



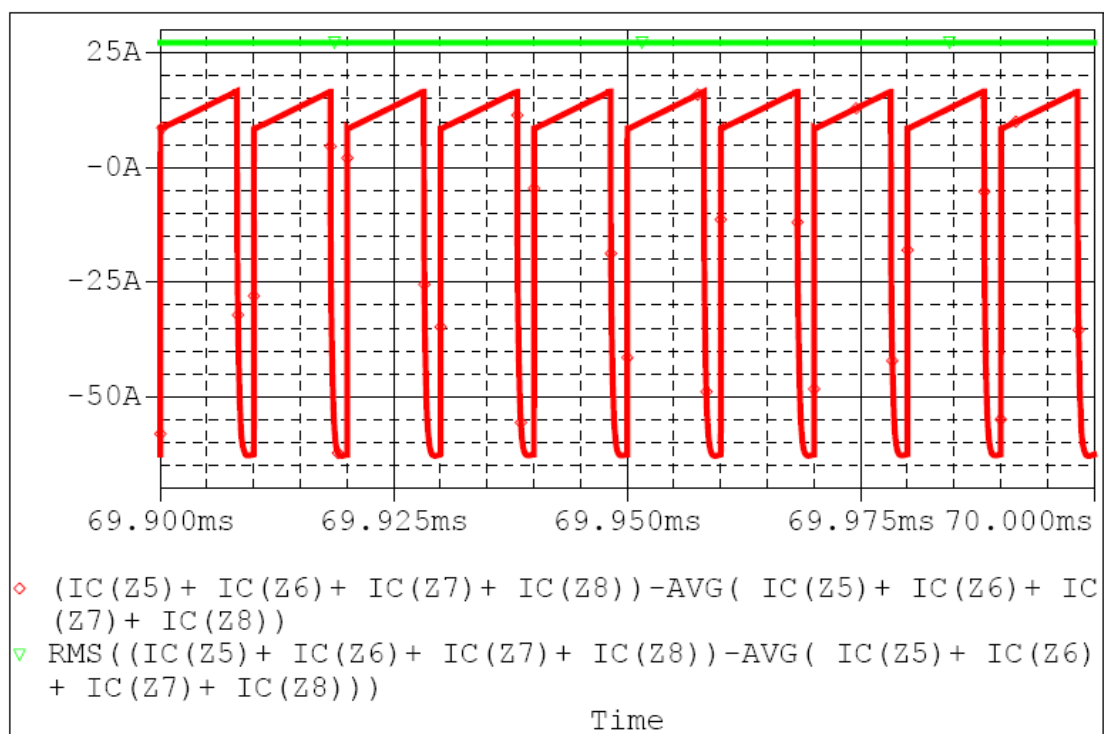
Σχήμα 6.10 Εξομαλυμένη τάση εξόδου, $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.11 Κυμάτωση ρεύματος εξόδου ίση με το εναλλασσόμενο ρεύμα συστοιχίας πυκνωτών, ρεύμα κλάδου συστοιχίας πυκνωτών και ενεργός τιμή κλάδου, $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.12 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.13 Κυμάτωση ρεύματος εισόδου, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εισόδου, $\delta = 0,7$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

Στο Σχ. 6.12 φαίνεται το συνολικό ρεύμα εισόδου. Αυτό είναι και το ρεύμα με το οποίο πρέπει να τροφοδοτούν οι κυψέλες καυσίμου. Βλέπουμε πως παρουσιάζει μια μεγάλη κυμάτωση, που είναι χαρακτηριστικό της εισόδου των μετατροπέων υποβιβασμού και έχει μια συχνότητα κυματομορφής τετραπλάσια (100 kHz) της

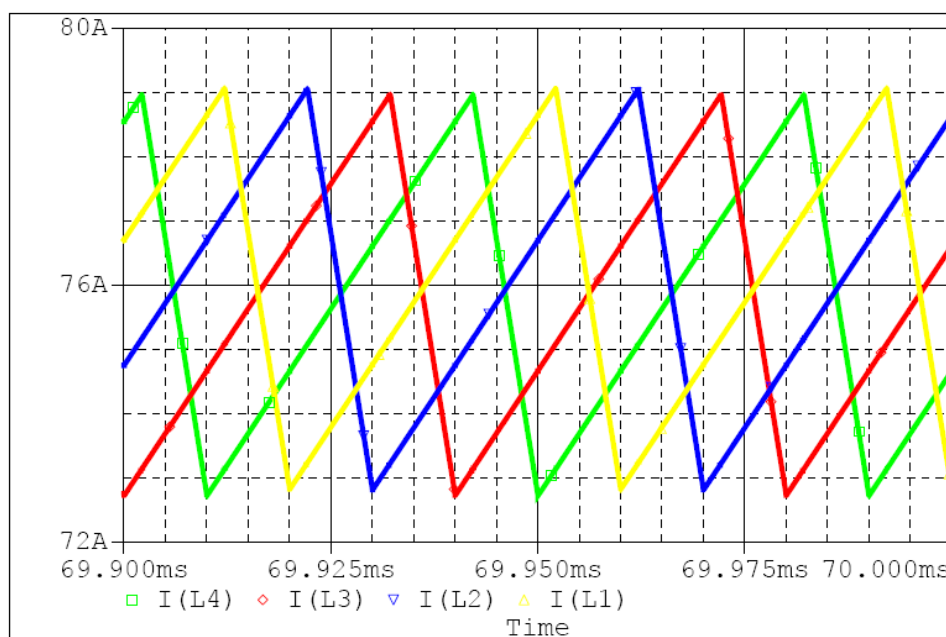
διακοπτικής συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε ένα φίλτρο LC για να αποκόψουμε την συχνότητα αυτή και για να αποφύγουμε το «επίπονο» αυτό ρεύμα για τις κυψέλες καυσίμου. Η χωρητικότητα θα προκύψει από δύο παράλληλους κλάδους με καθέναν να περιλαμβάνει δύο εν σειρά πυκνωτές (με σπείρωμα) των 2200 μF / 450 V, άρα συνολικά 2,2 mF (βλ. Παράρτημα πυκνωτές Revox Rifa). Σύμφωνα με το Σχ. 6.13 η επιτρεπόμενη συνολική ενεργός τιμή είναι περίπου 27 A, οπότε ακόμη και η χρήση ενός κλάδου ($I_{\text{rms,AC}} = 35,6 \text{ A}$ (85°C)) θα αρκούσε για την τήρηση του ορίου, προστέθηκε όμως ο επιπλέον κλάδος για αύξηση της χωρητικότητας και για να κρατήσουμε την ESR σε χαμηλά επίπεδα. Οπότε επιλέγοντας ένα πηνίο 10 μH , προκύπτει μια συχνότητα αποκοπής $f_0 \approx 1,1 \text{ kHz}$, που είναι πολύ μικρότερη του 1/10 (βλ. προηγούμενο κεφάλαιο) της συχνότητας που θέλουμε να αποκόψουμε, δηλ. τα 100 kHz.

6.1.2 Δεύτερη περίπτωση προσομοίωσης

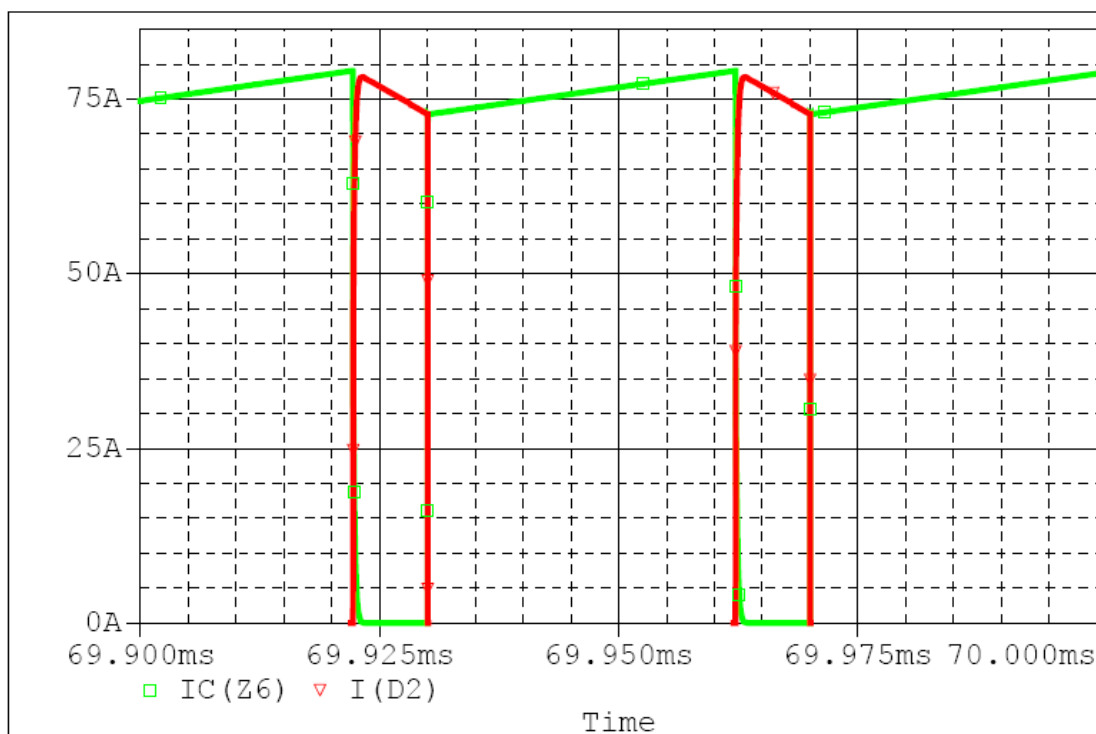
Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό τη μικρότερη δυνατή τάση, 550 V, και ο κινητήρας πρόωσης στρέφεται με ονομαστικές στροφές υπό ονομαστικό φορτίο. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2 Δεδομένα 2^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα υποβιβασμού.

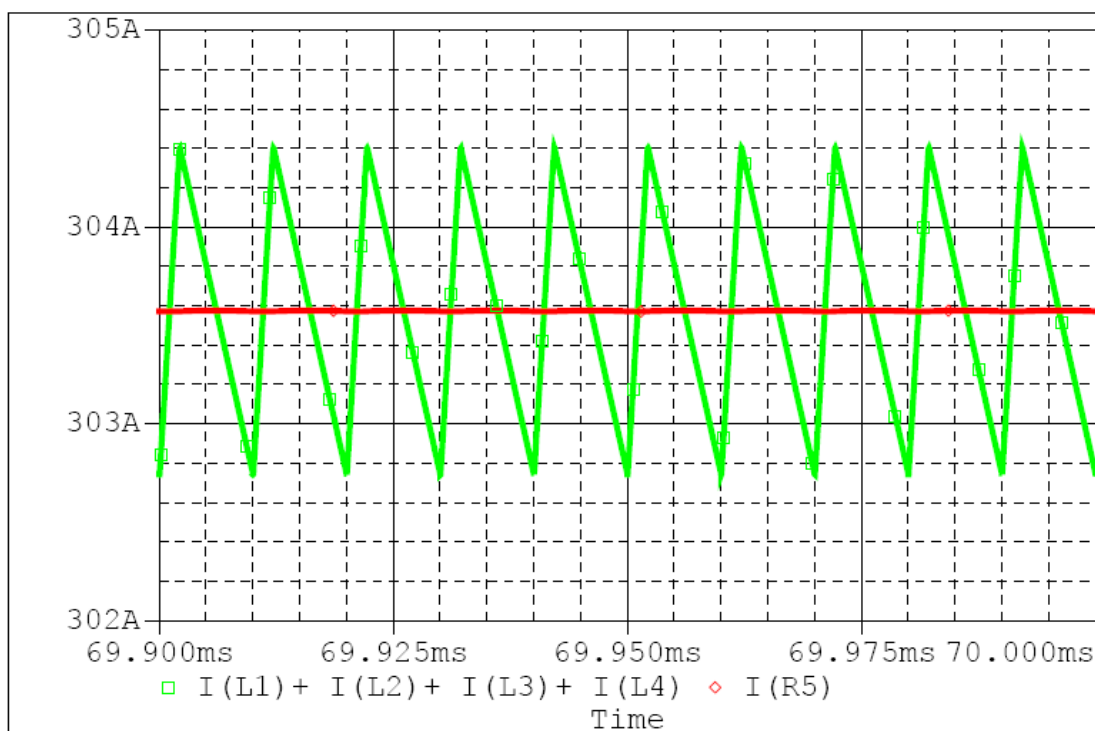
Τάση εισόδου (V_i)	550 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	245 A
Λόγος κατάτμησης (δ)	0,8
Τάση εξόδου (V_o)	437,1 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	303,6 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,98



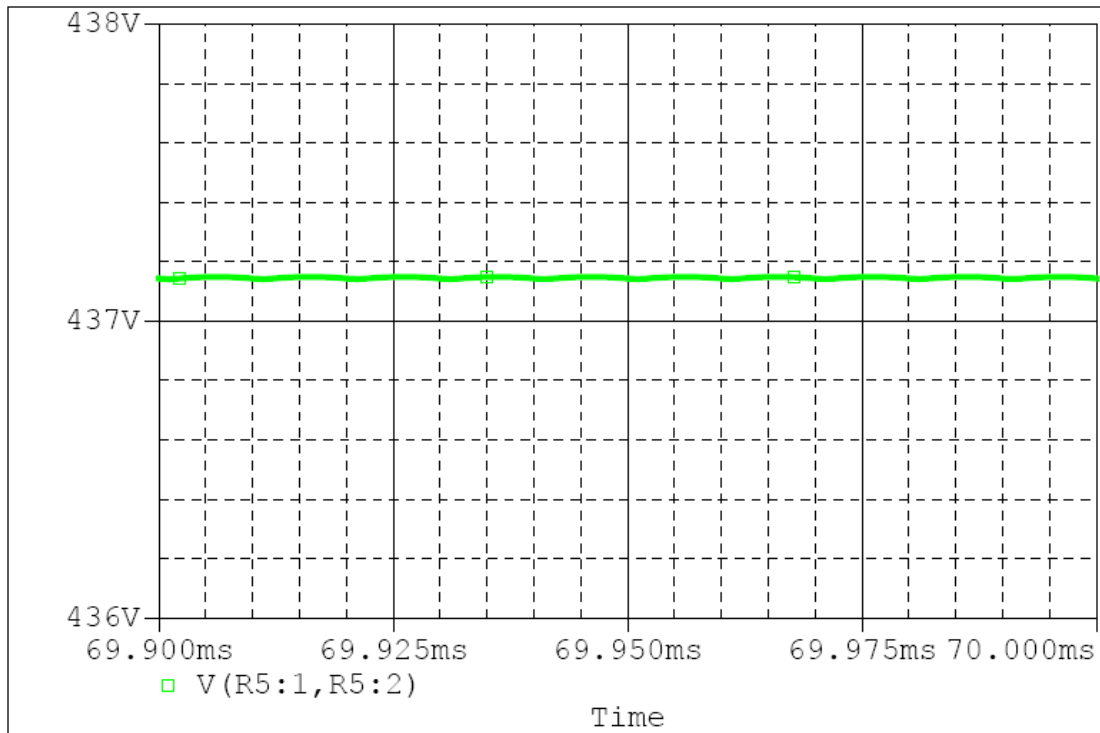
Σχήμα 6.14 Τριγωνικά ρεύματα πηνίων σε καθένα από τα τέσσερα κανάλια του μετατροπέα με διαφορά φάσης 90° (10 μs), $\delta = 0,8$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



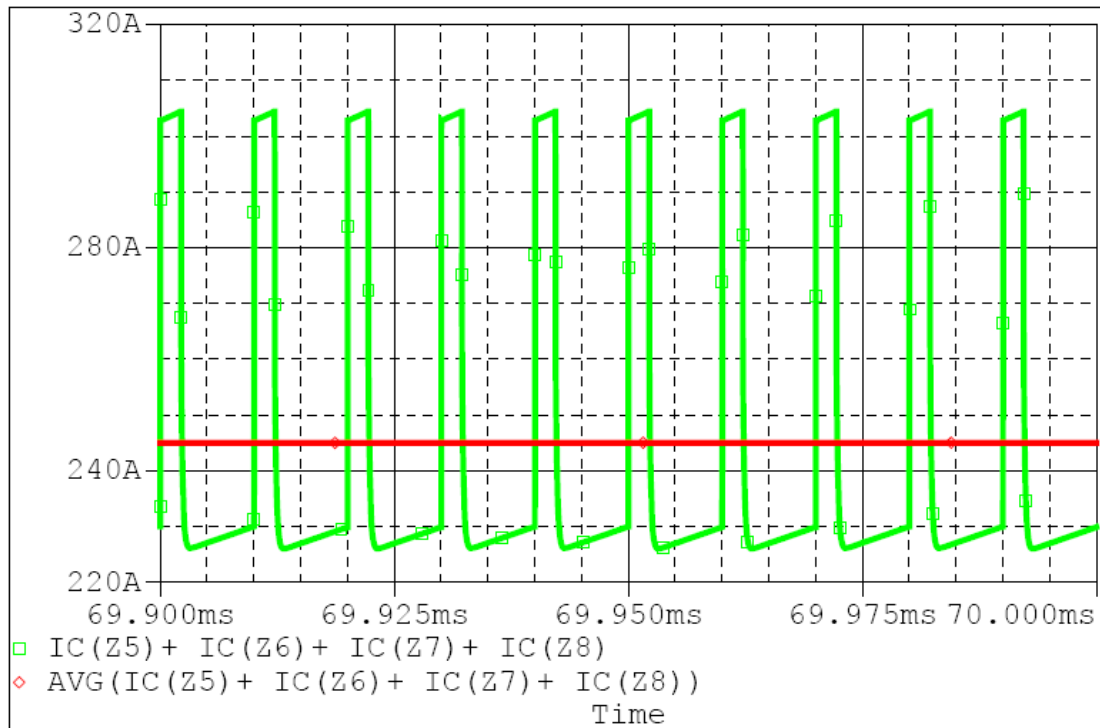
Σχήμα 6.15 Ρεύμα τρανζίστορ και διόδου 2^ο κλάδου με συμπληρωματική αγωγή, το άθροισμα τους δίνει το ρεύμα στο πηνίο του 2^ο κλάδου, $\delta = 0,8$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



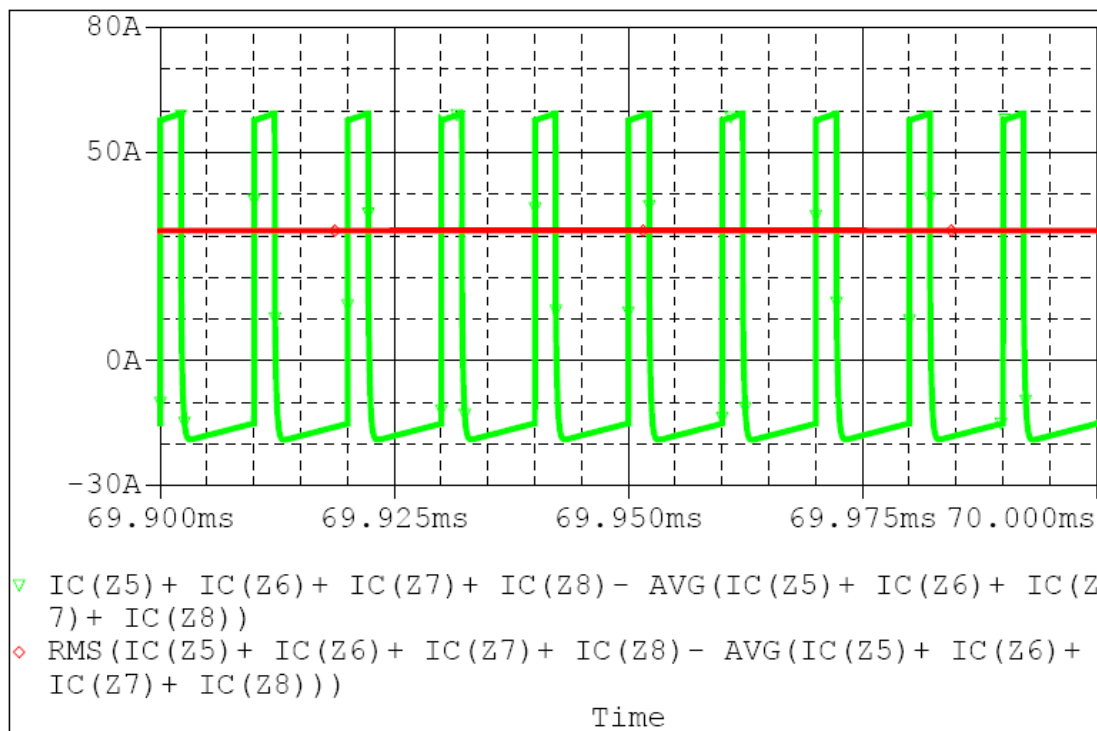
Σχήμα 6.16 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $4 \times 25 \text{ kHz} = 100 \text{ kHz}$ και μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του, $\delta = 0,8$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



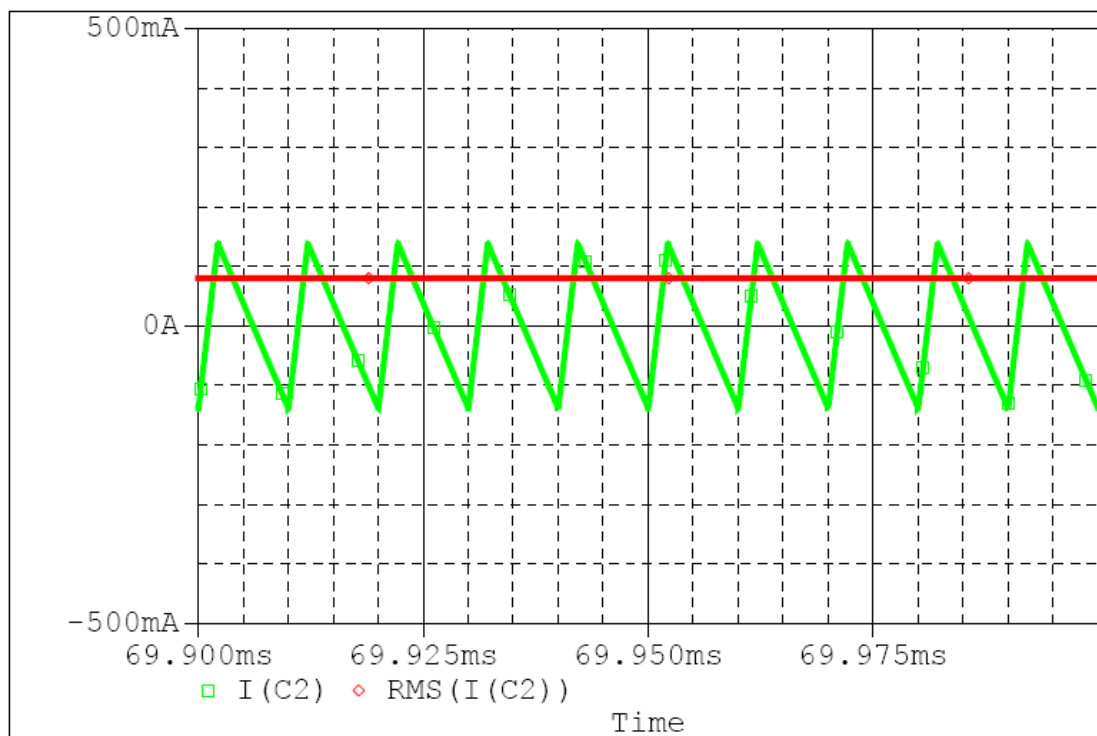
Σχήμα 6.17 Εξομαλυμένη τάση εξόδου, $\delta = 0,8$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.18 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,8$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.19 Κυμάτωση ρεύματος εισόδου, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εισόδου, $\delta = 0,8$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



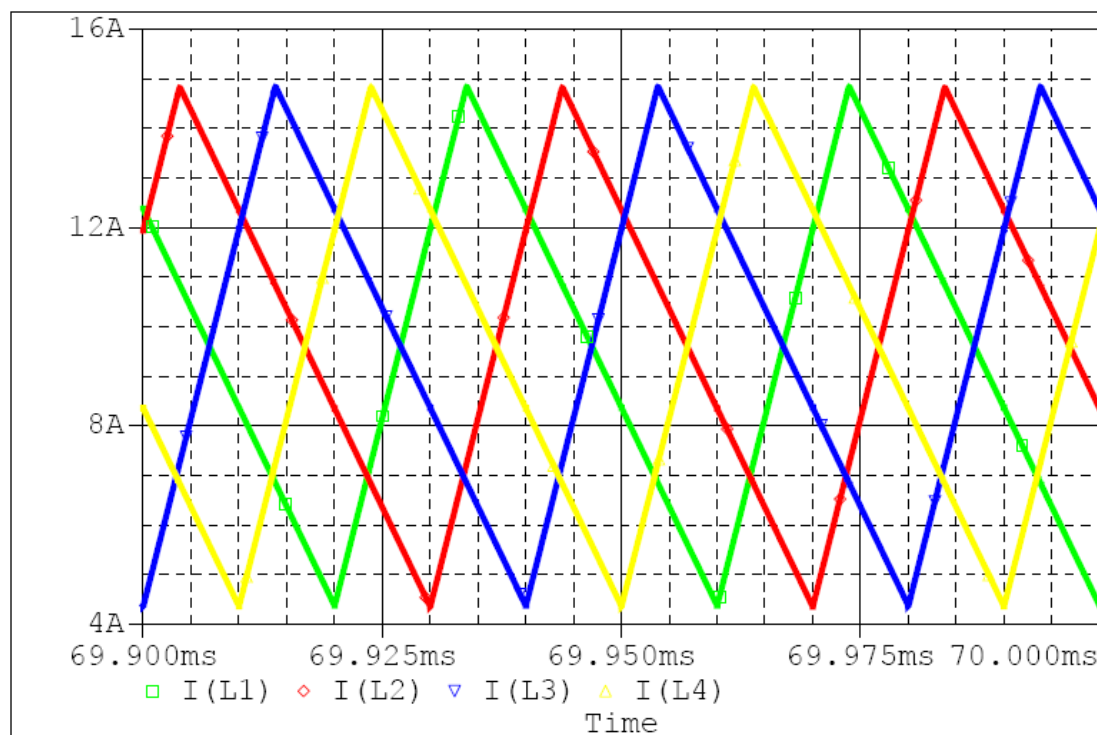
Σχήμα 6.20 Ρεύμα κλάδου συστοιχίας πυκνωτών κα ενεργός τιμή κλάδου, $\delta = 0,8$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

6.1.3 Τρίτη περίπτωση προσομοίωσης

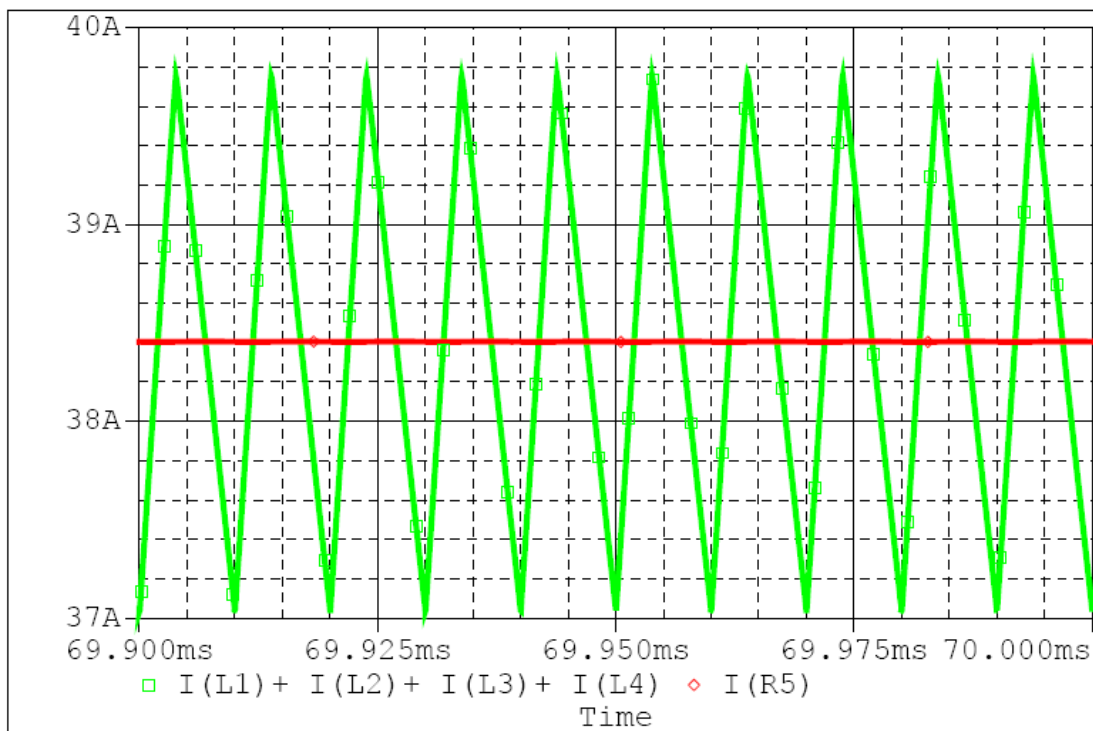
Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό μεγαλύτερη της ονομαστικής τάση, 650 V, και ο κινητήρας πρόωσης στρέφεται με στροφές μισές των ονομαστικών, οπότε βάσει κυβικής παραβολής, με το 1/8 του ονομαστικού φορτίου. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3 Δεδομένα 3^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα υποβιβασμού.

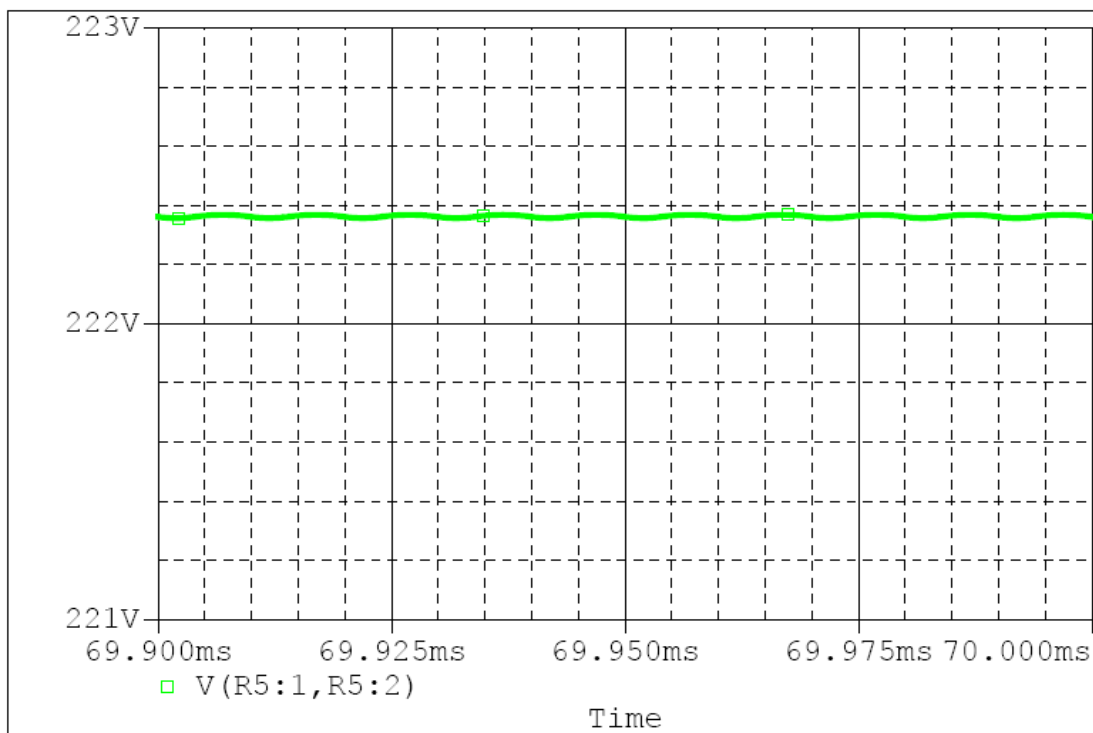
Τάση εισόδου (V_i)	650 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	13,6 A
Λόγος κατάτμησης (δ)	0,34
Τάση εξόδου (V_o)	222,4 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	38,4 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,97



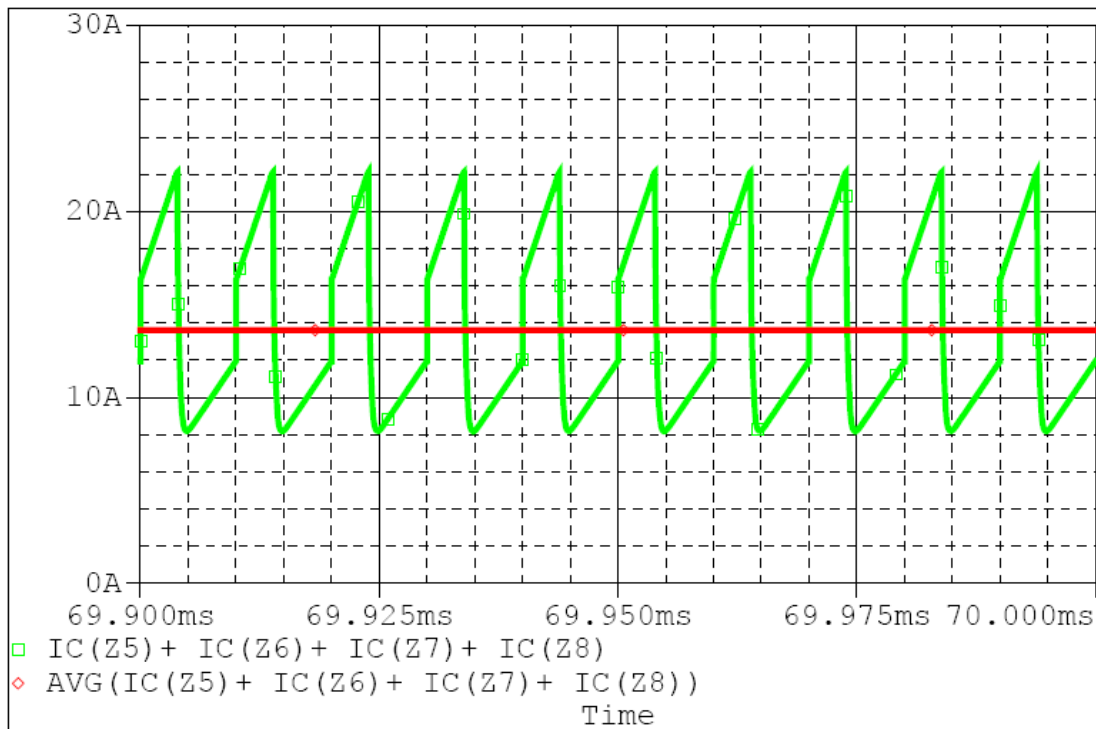
Σχήμα 6.21 Τριγωνικά ρεύματα πηνίων σε καθένα από τα τέσσερα κανάλια του μετατροπέα με διαφορά φάσης 90° (10 μ s), $\delta = 0,34$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



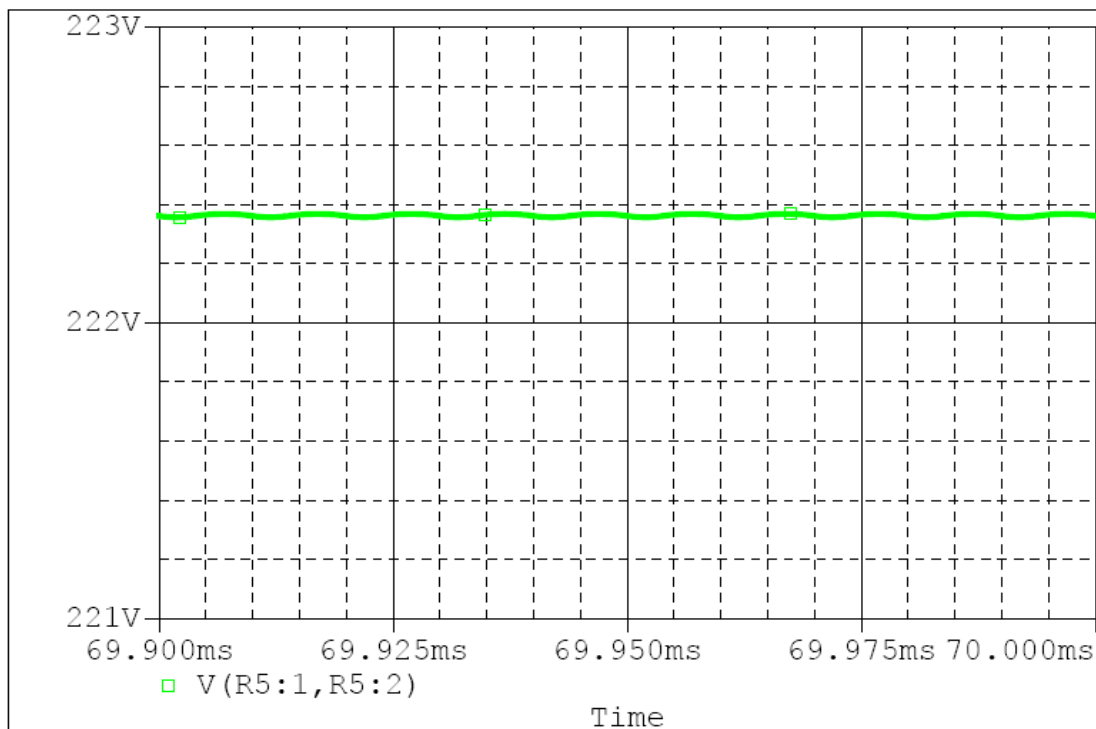
Σχήμα 6.22 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $4 \times 25 \text{ kHz} = 100 \text{ kHz}$ και μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του, $\delta = 0,34$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.23 Εξομαλυμένη τάση εξόδου, $\delta = 0,34$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.24 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,34$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



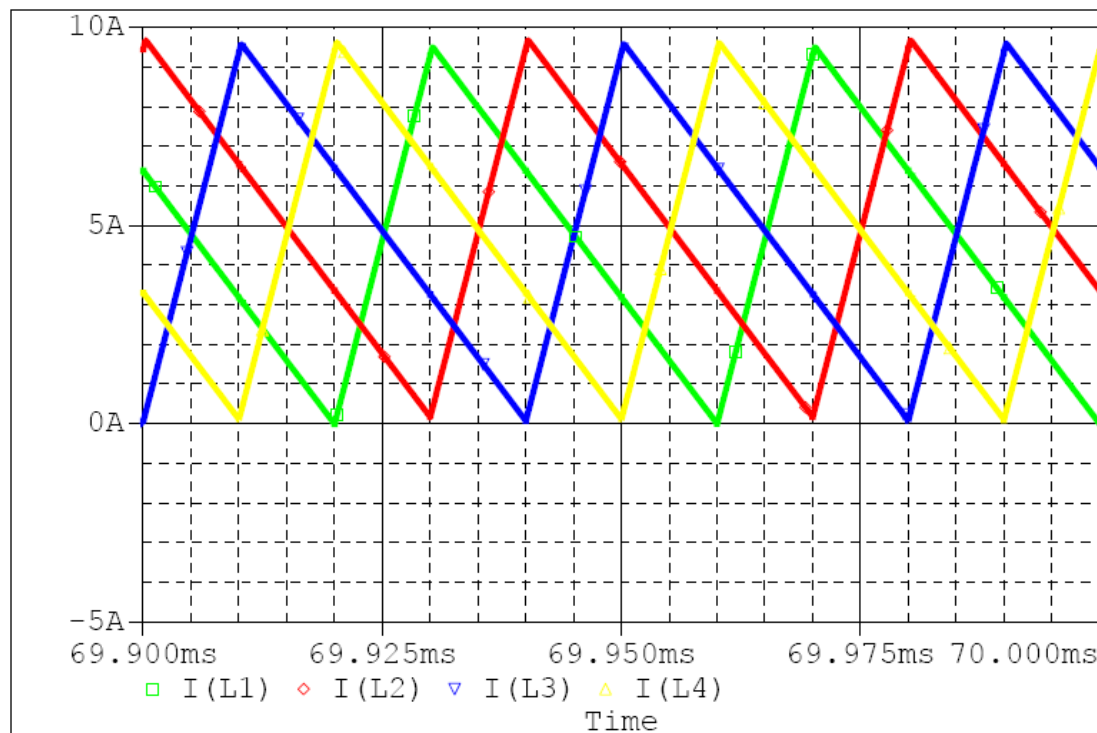
Σχήμα 6.25 Τάσεις σε πηνίο, τρανζίστορ και δίοδο, $\delta = 0,34$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

6.1.4 Τέταρτη περίπτωση προσομοίωσης

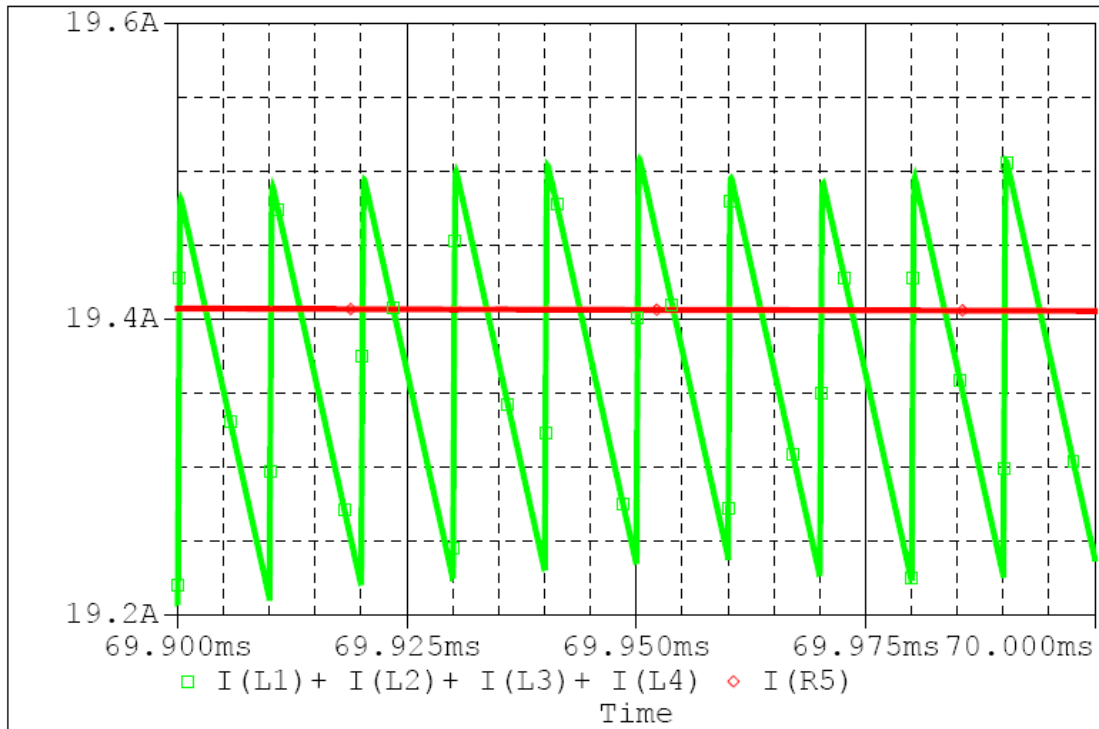
Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό τάση μεγαλύτερης της ονομαστικής, 700 V, για λόγο κατάτμησης $\delta = 0,25$. Η τάση εξόδου που προκύπτει έχει μέση τιμή 177,6 V. Ο κινητήρας υπό αυτήν την τάση στρέφεται με μειωμένο αριθμό στροφών οπότε και η έλικα απαιτεί σχετικά μικρό ρεύμα. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4 Δεδομένα 4^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα υποβιβασμού.

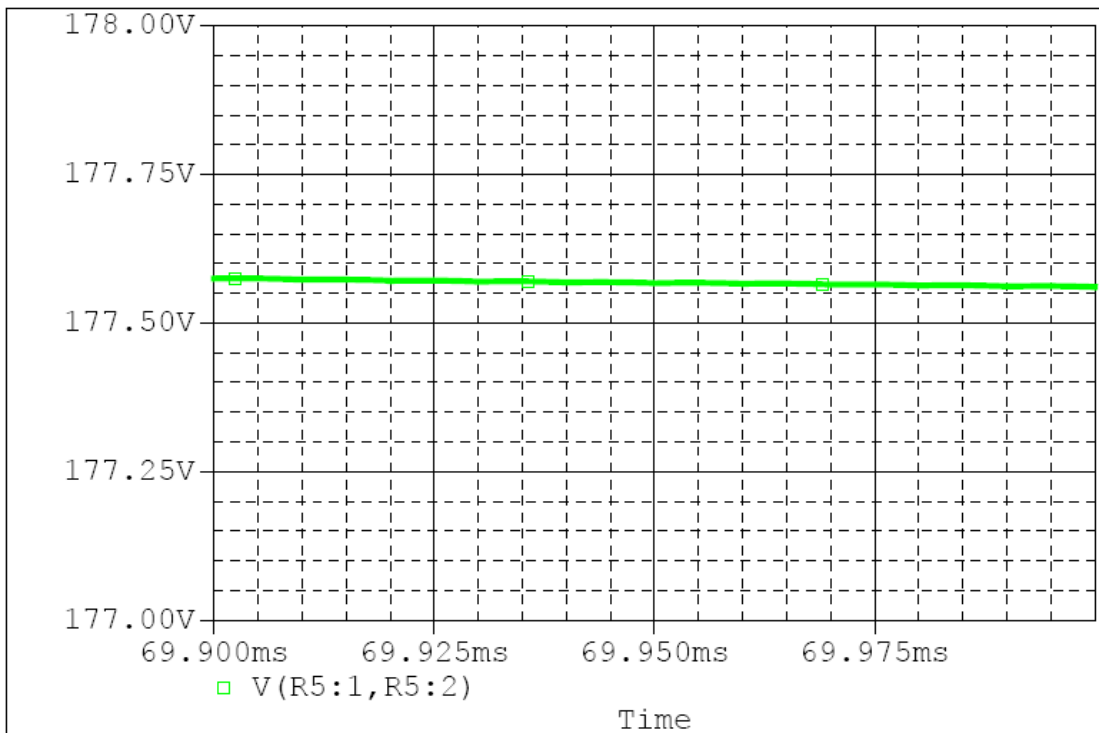
Τάση εισόδου (V_i)	700 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	5,3 A
Λόγος κατάτμησης (δ)	0,25
Τάση εξόδου (V_o)	177,6 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	19,4 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,93



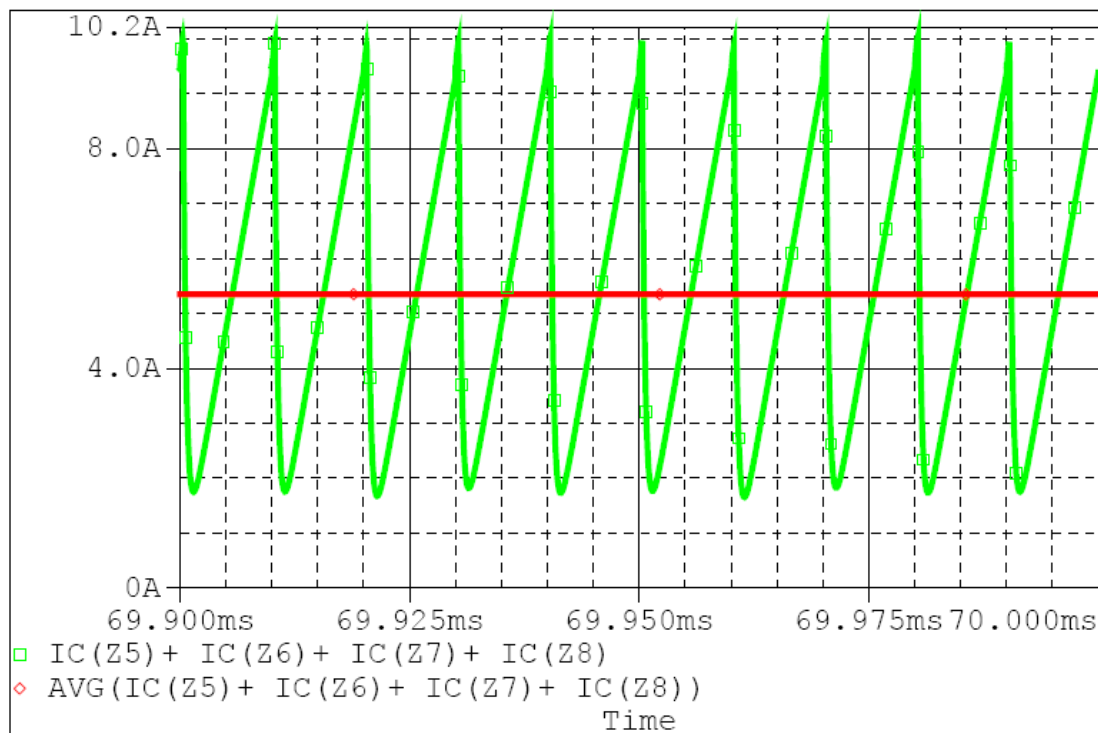
Σχήμα 6.26 Τριγωνικά ρεύματα πηνίων σε καθένα από τα τέσσερα κανάλια του μετατροπέα με διαφορά φάσης 90° (10 μ s), $\delta = 0,25$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.27 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $4 \times 25 \text{ kHz} = 100 \text{ kHz}$ και μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του, $\delta = 0,25$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.28 Τάση εξόδου για $\delta = 0,25$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



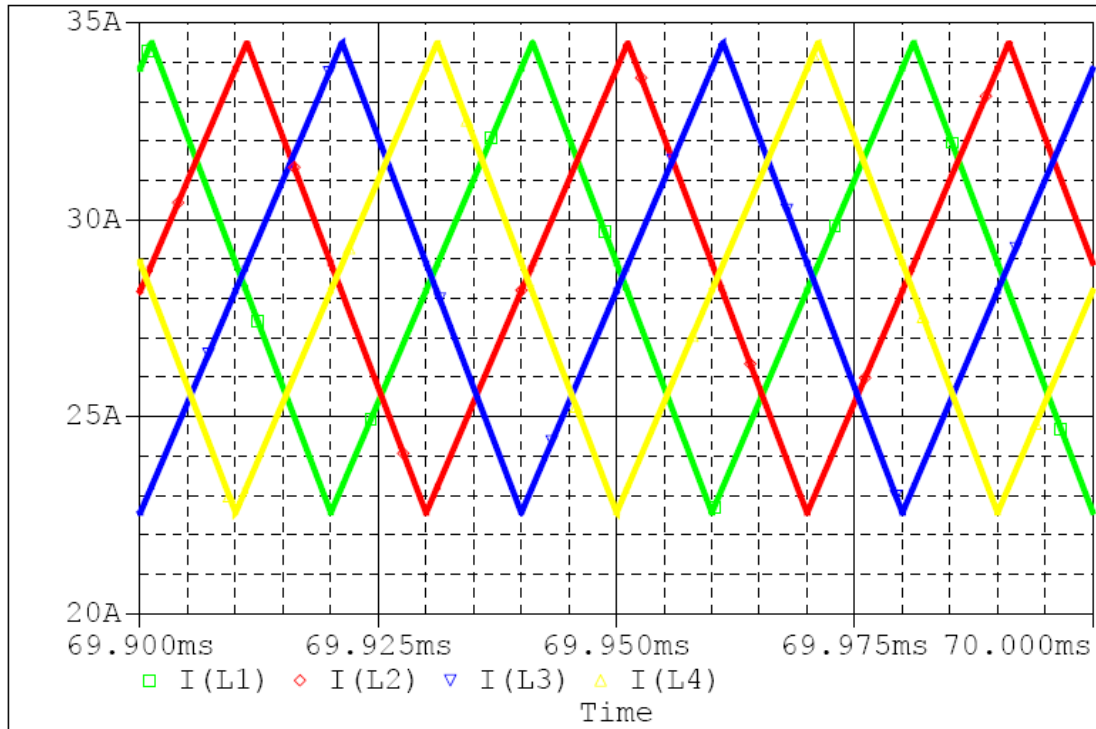
Σχήμα 6.29 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,25$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

6.1.5 Πέμπτη περίπτωση προσομοίωσης

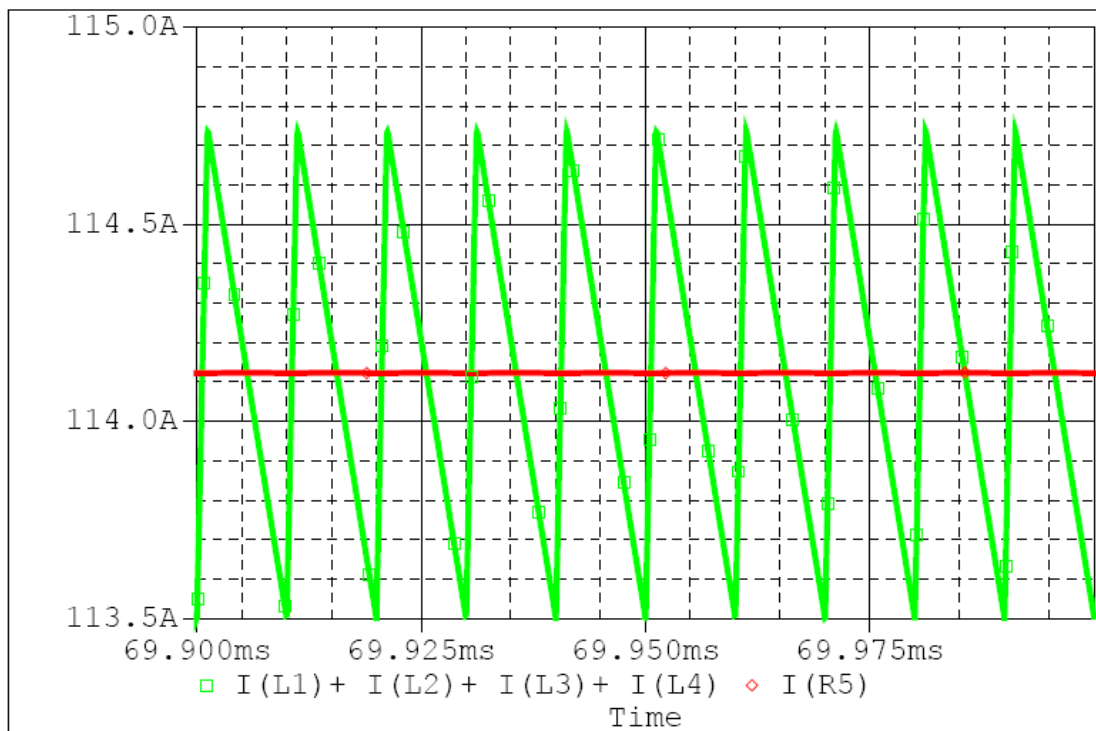
Θεωρούνται τα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών και ισχύος ρυμούλκησης συγκεκριμένου σκάφους, βλ. Πίνακα 7.5, 7^ο Κεφάλαιο. Το σκάφος αυτό, όπως θα εξηγηθεί στο 7^ο Κεφάλαιο, αποτελεί πιθανή ναυτική εφαρμογή του συστήματος που μελετάται. Βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών η απαιτούμενη ισχύς ρυμούλκησης του περιορίζει την εφαρμογή του συστήματός μας (E.H.P. = 121 PS) στο διάστημα ισχύων ρυμούλκησης μεταξύ 45,9 και 122,1 PS και την ταχύτητα του σκάφους στο διάστημα μεταξύ 8 και 10 κόμβων. Θέτοντας την ονομαστική κατάσταση λειτουργίας του κινητήριου συστήματος στο άνω άκρο των παραπάνω διαστημάτων (122,1 PS – 10 knots) θα μελετηθεί η λειτουργία για την περίπτωση 45,9 PS – 8 knots. Ως ταχύτητα περιστροφής της έλικας (και του κινητήρα πρόωσης) θεωρείται το 80 % του ονομαστικού αριθμού στροφών οπότε και η τάση τυμπάνου του κινητήρα (ή τάση εξόδου του μετατροπέα) θα πρέπει να είναι ίση με 352 V. Σε αυτήν την περίπτωση η έλικα απαιτεί το 37,6 % του ονομαστικού φορτίου. Θεωρείται η λειτουργία της κυψέλης υπό τάση μεγαλύτερη της ονομαστικής ίση με 670 V.

Πίνακας 6.5 Δεδομένα 5^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα υποβιβασμού.

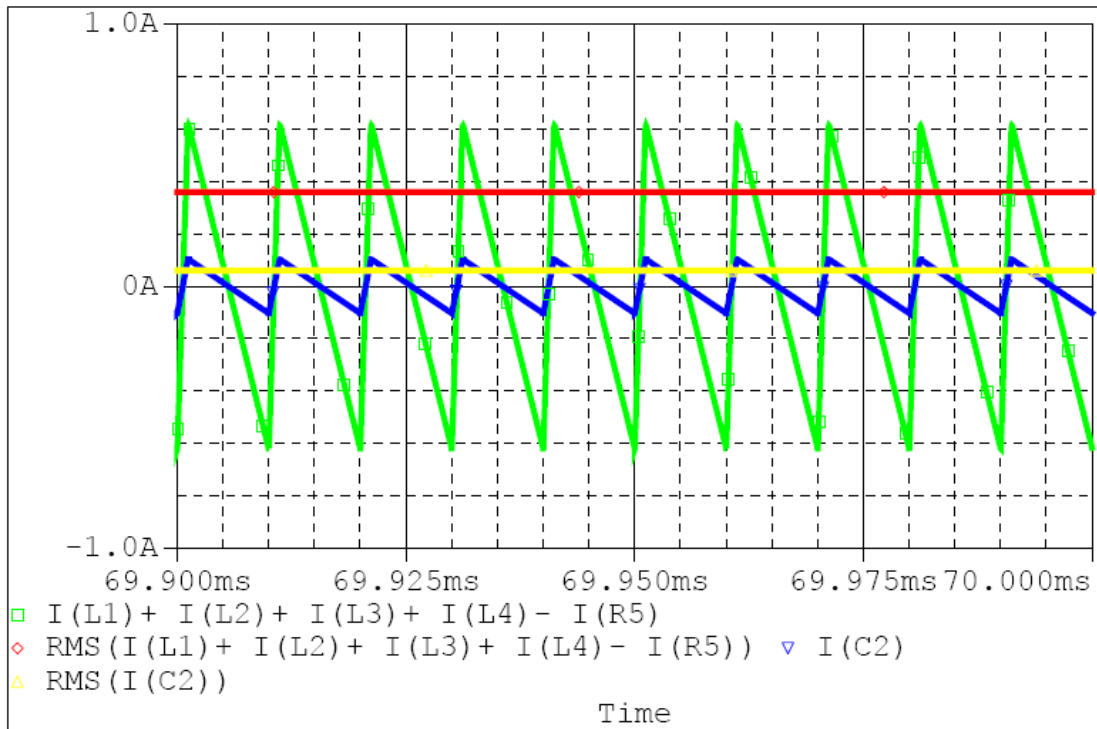
Τάση εισόδου (V_i)	670 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	61,4 A
Λόγος κατάμησης (δ)	0,525
Τάση εξόδου (V_o)	351,5 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	114,1 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,97



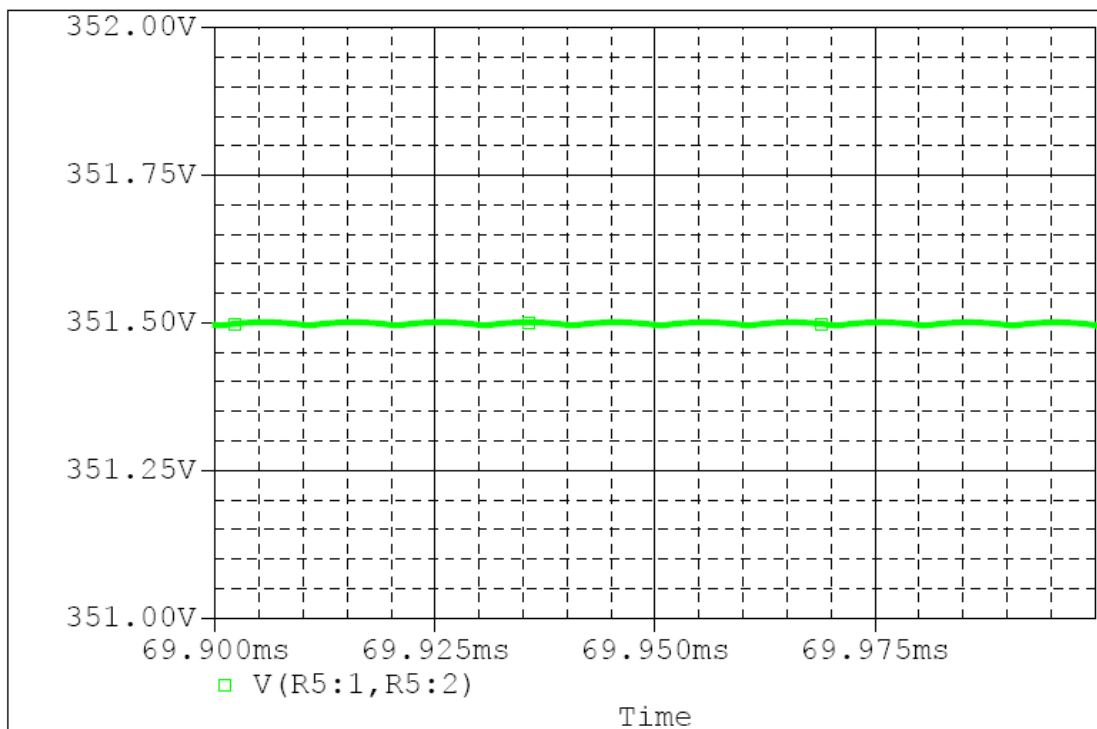
Σχήμα 6.30 Τριγωνικά ρεύματα πηνίων σε καθένα από τα τέσσερα κανάλια του μετατροπέα με διαφορά φάσης 90° ($10 \mu s$), $\delta = 0,525$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



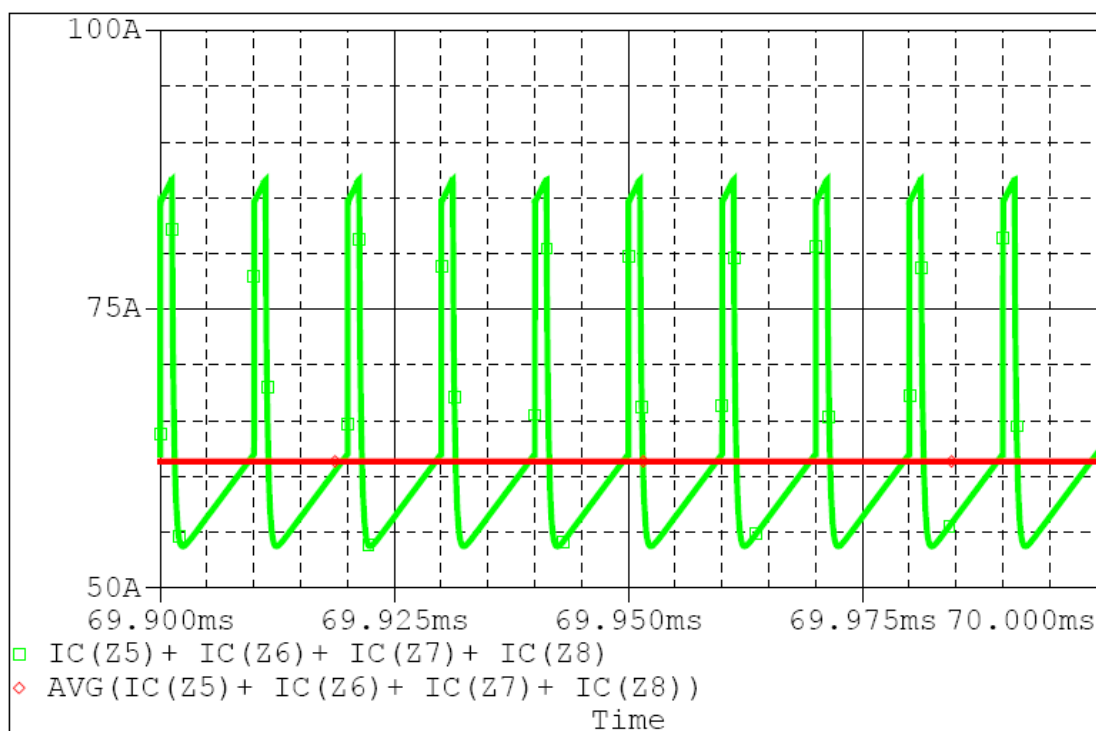
Σχήμα 6.31 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $4 \times 25 \text{ kHz} = 100 \text{ kHz}$ και μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του, $\delta = 0,525$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.32 Κυμάτωση ρεύματος εξόδου ίση με το εναλλασσόμενο ρεύμα συστοιχίας πυκνωτών, ενεργός τιμή εναλλασσόμενου ρεύματος συστοιχίας πυκνωτών, ρεύμα κλάδου συστοιχίας πυκνωτών και ενεργός τιμή κλάδου, $\delta = 0,525$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.33 Εξομαλυνόμενη τάση εξόδου για $\delta = 0,525$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.34 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,525$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

6.1.6 Παρατηρήσεις

Από τις παραπάνω κυματομορφές προκύπτει ότι ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα υποβιβασμού τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων, που προκύπτει από την προσομοίωση, είναι περίπου 98 % στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας του (βλ. Πίνακες 6.1 – 6.2). Όσο απομακρυνόμαστε από την ονομαστική λειτουργία ο βαθμός απόδοσης μειώνεται και ειδικά για περιπτώσεις μικρών ρευμάτων εξόδου (βλ. 4^η περίπτωση προσομοίωσης).

Στις εξομαλυσμένες κυματομορφές ρευμάτων και τάσεων εξόδου υπάρχει μια πολύ μικρή κυμάτωση της τάξης των mA και mV αντίστοιχα (βλ. και Πίνακα 6.6). Αυτή η κυμάτωση είναι αποδεκτή και δεν μειώθηκε ακόμα περισσότερο, μέσω της χρήσης πρόσθετων πυκνωτών, για να μην αυξηθεί ο όγκος των φίλτρων, όπως εξηγήθηκε στην πρώτη περίπτωση προσομοίωσης. Η ποσοστιαία κυμάτωση αυτή έχει τις μικρότερες τιμές: α) στην ονομαστική κατάσταση (βλ. 1^η περίπτωση προσομοίωσης), καθώς γι' αυτήν έγινε ο υπολογισμός του φίλτρου εξόδου, και β) στην 5^η περίπτωση προσομοίωσης, όπου παρατηρείται ακόμα μικρότερη κυμάτωση από αυτήν της ονομαστικής λειτουργίας. Στον Πίνακα 6.6 παρατίθενται οι τιμές της κυμάτωσης στο ρεύμα και στην τάση εξόδου μετά την εξομάλυνσή τους.

Ειδικά στην 4^η περίπτωση προσομοίωσης όπου το ρεύμα εξόδου που προκύπτει είναι μικρό (περί το 10 % του ονομαστικού) είναι εμφανής η αύξηση της κυμάτωσης τόσο σε απόλυτες τιμές όσο και ποσοστιαία. Ο λόγος κατάτμησης σε αυτήν την περίπτωση είναι ίσος με $1/N$, $N = 4$ ο αριθμός των καναλιών. Όπως έχει αναφερθεί αυτός ο λόγος κατάτμησης θεωρείται ευνοϊκός για την λειτουργία των μετατροπέων αυτού του είδους. Παρατηρείται όμως ότι τα πλεονεκτήματα αυτού του λόγου κατάτμησης γίνονται εμφανή μόνο σε περιπτώσεις λειτουργίας που αυτός συνδυάζεται με την ονομαστική λειτουργία του μετατροπέα.

Πίνακας 6.6 Κυματώσεις ρεύματος και τάσης εξόδου για διαφορετικές περιπτώσεις προσομοιώσεων στον μετατροπέα υποβιβασμού διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων.

	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
Κυμάτωση ρεύματος (mA)	9	9,5	2,1	14,4	2
Κυμάτωση τάσης (mV)	13	14	12	130	6,8
Κυμάτωση ρεύματος (%)	0,00297	0,00313	0,00547	0,074	0,00175
Κυμάτωση τάσης (%)	0,00298	0,00320	0,00539	0,073	0,00193

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6 φαίνεται πως η επιλογή του φίλτρου εξόδου για τον μετατροπέα υποβιβασμού τάσης προσφέρει πολύ καλή εξομάλυνση και για καταστάσεις λειτουργίας πέραν της ονομαστικής. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για μία εφαρμογή πλωτού μέσου μεταφοράς όπου η λειτουργία υπό μερικό φορτίο είναι συχνή. Οι ποσοστιαίες κυματώσεις εξόδου αυξάνονται στην 4^η περίπτωση που εξετάστηκε όπου το ρεύμα εξόδου ήταν πολύ μικρό. Να σημειωθεί ότι η τιμή του ρεύματος αυτού είναι κοντά στο ελάχιστο ρεύμα για το οποίο σχεδιάστηκαν τα πηνία (βλ. και Σχ. 6.26). Αξίζει σε αυτό το σημείο να προταθεί, για περαιτέρω μελλοντική διερεύνηση, η ενδεχόμενη χρήση ενεργού φίλτρου στην έξοδο (με διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία) του οποίου η συχνότητα συντονισμού θα μπορεί να προσαρμόζεται κατά περίπτωση.

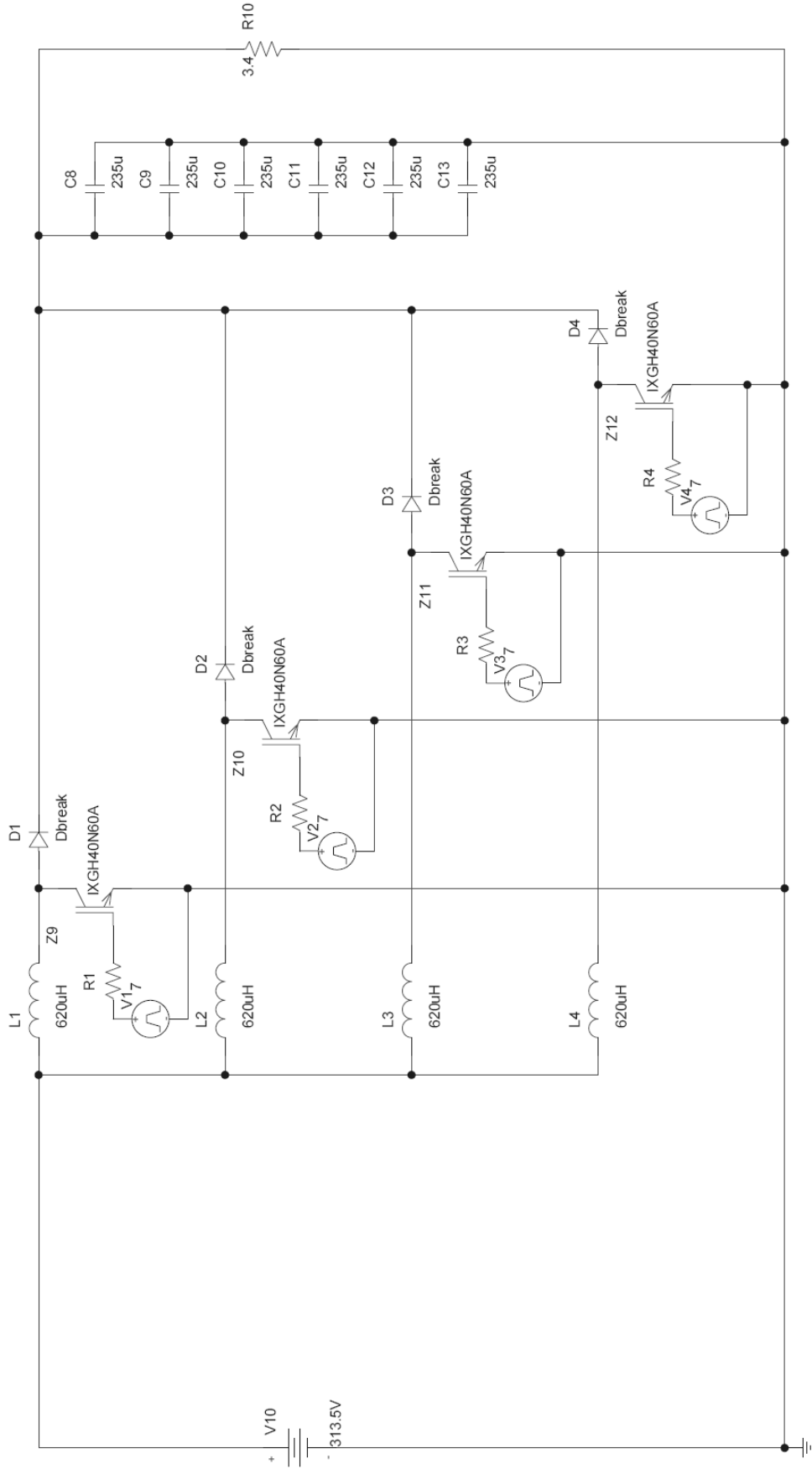
Σημαντική είναι η τοποθέτηση του φίλτρου LC στην είσοδο, ώστε να εξομαλύνεται η μεγάλη κυμάτωση του ρεύματος εισόδου από τις κυψέλες καυσίμου σε αποδεκτά όρια για τη λειτουργία της κυψέλης. Τα όρια αυτά σχετίζονται με την ισχύ της κυψέλης καυσίμου και την κατασκευή της [65].

6.2 Μετατροπέας ανύψωσης τάσης με διαδοχική αγωγή τεσσάρων κλάδων

Στο δεύτερο υπό μελέτη σύστημα, με τις δύο παραλληλισμένες μονάδες κυψελών καυσίμου, η παραγόμενη τάση κυμαίνεται μεταξύ 400 V και 275 V. Για να «ταιριάξει» με την ονομαστική τάση τροφοδοσίας του κινητήρα πρόωσης την ανυψώνουμε στα 500 V και στη συνέχεια μέσω ενός μετατροπέα υποβιβασμού την ρυθμίζουμε από 0 – 440 V με σκοπό τον έλεγχο των στροφών του κινητήρα. Σαν μετατροπέα υποβιβασμού χρησιμοποιούμε έναν όμοιο με τον παραπάνω μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με διαδοχική αγωγή τεσσάρων κλάδων. Μάλιστα δεν απαιτείται η χρήση του φίλτρου LC στην είσοδό του, καθώς η τάση θα έρχεται εξομαλυσμένη από τον μετατροπέα ανύψωσης καθεμίας από τις δύο παραλληλισμένες μονάδες. Κάθε μονάδα κυψελών καυσίμου έχει τον δικό της μετατροπέα ανύψωσης τάσης για τον οποίον θα παρατεθούν παρακάτω τα αποτελέσματα προσομοίωσης. Στο Σχ. 6.35 φαίνεται η τοπολογία του ηλεκτρονικού μετατροπέα ανύψωσης, με τις τιμές να αντιστοιχούν σε μία από τις περιπτώσεις λειτουργίας που μελετήθηκαν. Τα πηνία τελικά επιλέχθηκαν με επαγωγή 620 μH, με την οποία επιτυγχάνεται η λειτουργία σε συνεχή αγωγή βάσει των απαιτήσεων του φορτίου.

Για την παραγωγή των παλμών ελέγχου των IGBTs μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως και στο μετατροπέα υποβιβασμού που περιγράφηκε παραπάνω, ο μικροελεγκτής dsPIC30F2020 της Microchip.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, όπου στη λεζάντα κάθε σχήματος – κυματομορφής δίνονται και πληροφορίες για την λειτουργία της εκάστοτε εξεταζόμενης περίπτωσης.



Σχήμα 6.35 Σχηματικό μετατροπέα ανύψωσης τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις του μετατροπέα ανύψωσης τάσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων ακολουθείται αντίστοιχη λογική με αυτήν των προσομοιώσεων του μετατροπέα υποβιβασμού (Ενότητα 6.1), ώστε να καλυφθεί το εύρος λειτουργίας του. Σε αυτήν την περίπτωση η έξοδος του μετατροπέα ανύψωσης δεν συνδέεται απ' ευθείας με τους ακροδέκτες του κινητήρα πρόωσης αλλά αποτελεί είσοδο για τον μετατροπέα υποβιβασμού. Στη συνέχεια, μέσω του μετατροπέα υποβιβασμού ρυθμίζεται η τάση τυμπάνου του κινητήρα πρόωσης οπότε ελέγχονται και οι στροφές της έλικας.

Συγκεκριμένα στην πρώτη περίπτωση προσομοίωσης θεωρείται λειτουργία της μιας παραλληλισμένης μονάδας κυψελών καυσίμου υπό ονομαστική τάση (313,5 V). Η τάση εξόδου του μετατροπέα είναι πάντα, μέσω κατάλληλης παλμοδότησης, ίση με 500 V. Όσον αφορά το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα, προκύπτει από τη λειτουργία του κινητήρα υπό ονομαστικό φορτίο. Από την προσομοίωση στο ονομαστικό αυτό σημείο λειτουργίας θα προκύψει ο σχεδιασμός των φίλτρων του μετατροπέα και η επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων που το απαρτίζουν.

Στην δεύτερη περίπτωση θεωρείται λειτουργία της κυψέλης καυσίμου υπό την μικρότερη δυνατή τάση, 275 V. Η τάση εξόδου είναι 500 V και το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα προκύπτει και σε αυτήν την περίπτωση από την λειτουργία του κινητήρα υπό ονομαστικό φορτίο.

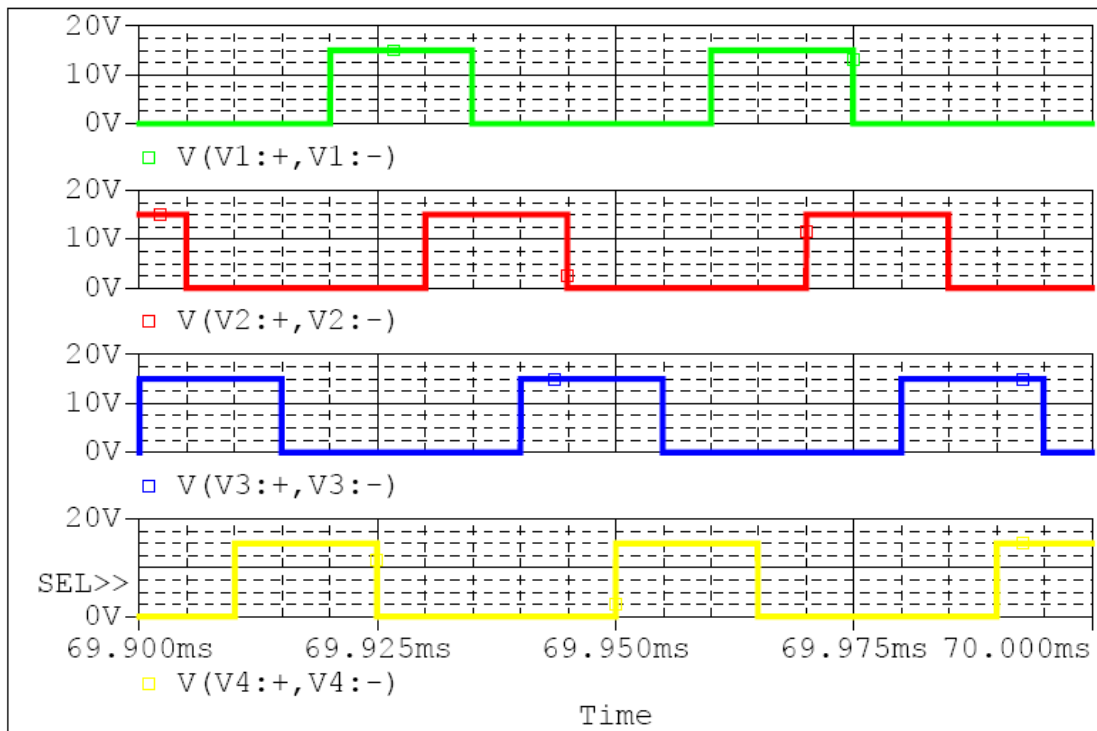
Στην τρίτη περίπτωση θα θεωρηθεί τάση λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου μεγαλύτερη της ονομαστικής (330 V) και μία περίπτωση φορτίου όπου το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα είναι το μισό από αυτό της ονομαστικής κατάστασης λειτουργίας του ώστε να ανταποκρίνεται σε μια περίπτωση λειτουργίας υπό μερικό φορτίο.

6.2.1 Πρώτη περίπτωση προσομοίωσης

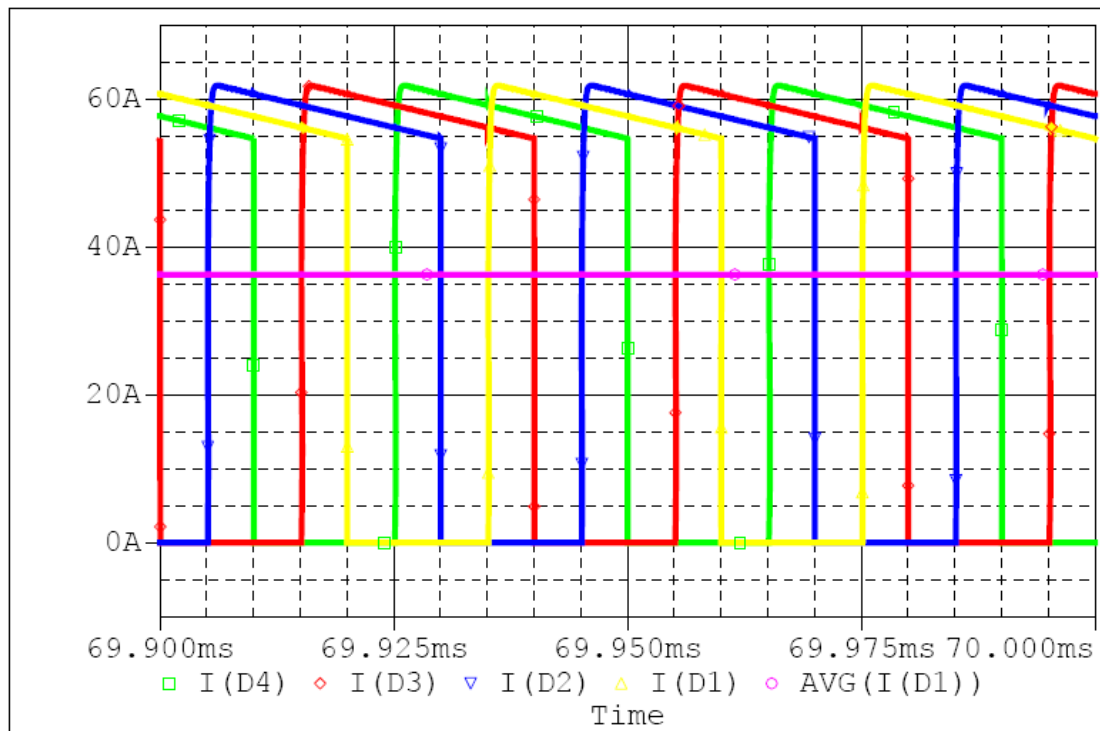
Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό ονομαστική τάση, 313,5 V. Στην έξοδο του μετατροπέα η τάση είναι 500 V, ανεξάρτητης της τάσης εισόδου μέσω κατάλληλου συστήματος ελέγχου του λόγου κατάτμησης. Θεωρείται ονομαστική λειτουργία του κινητήρα. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7 Δεδομένα 1^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα ανύψωσης.

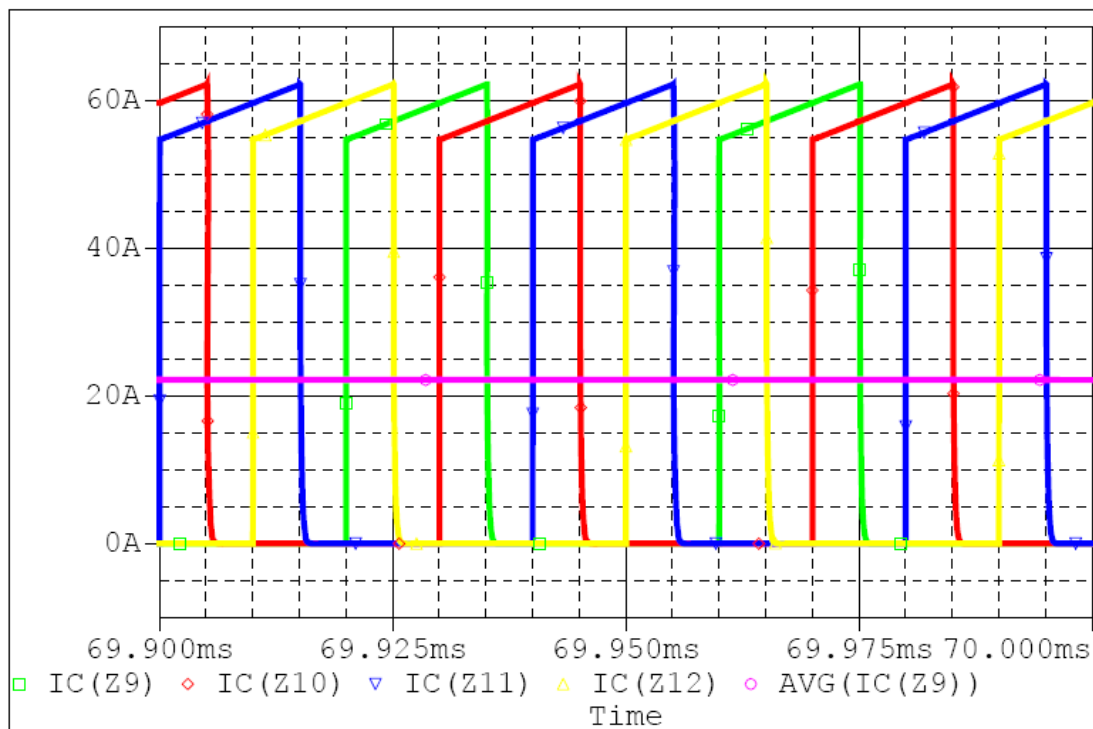
Τάση εισόδου (V_i)	313,5 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	234 A
Λόγος κατάτμησης (δ)	0,373
Τάση εξόδου (V_o)	493,7 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	145,2 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,98



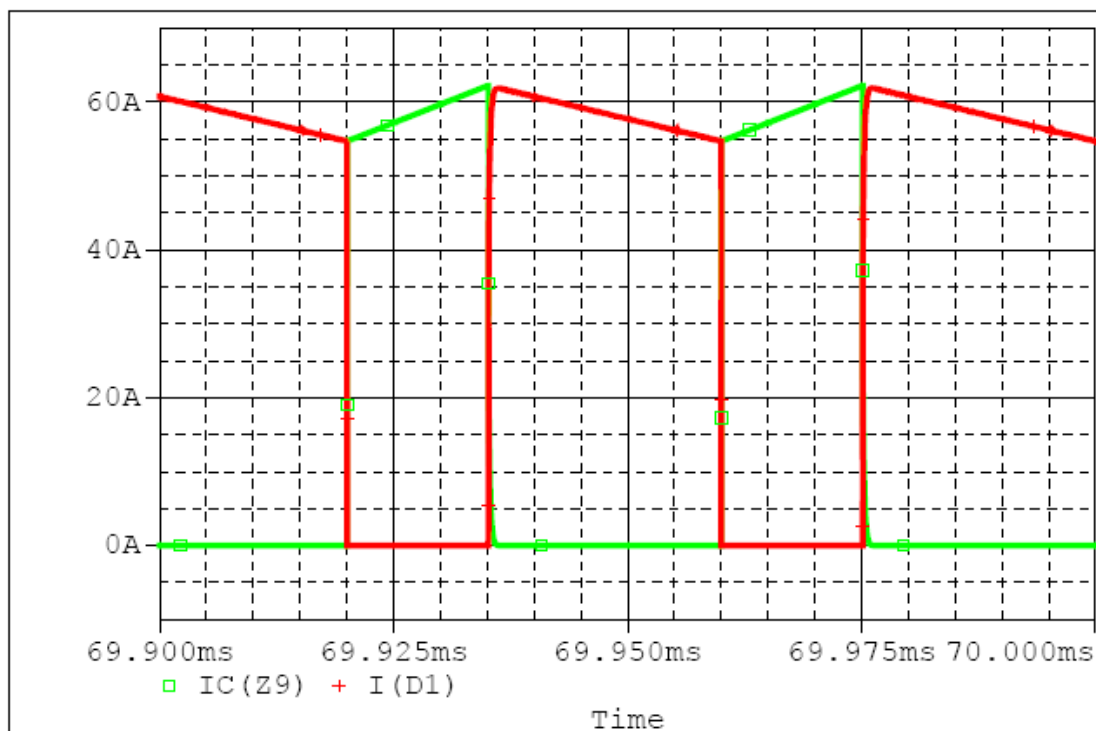
Σχήμα 6.36 Παλμοί ελέγχου έναυσης και σβέσης των IGBTs με $\delta = 0,373$, διακοπτική περίοδο $40 \mu\text{s}$ και διαφορά φάσης 90° , (αποτελέσματα προσομοίωσης).



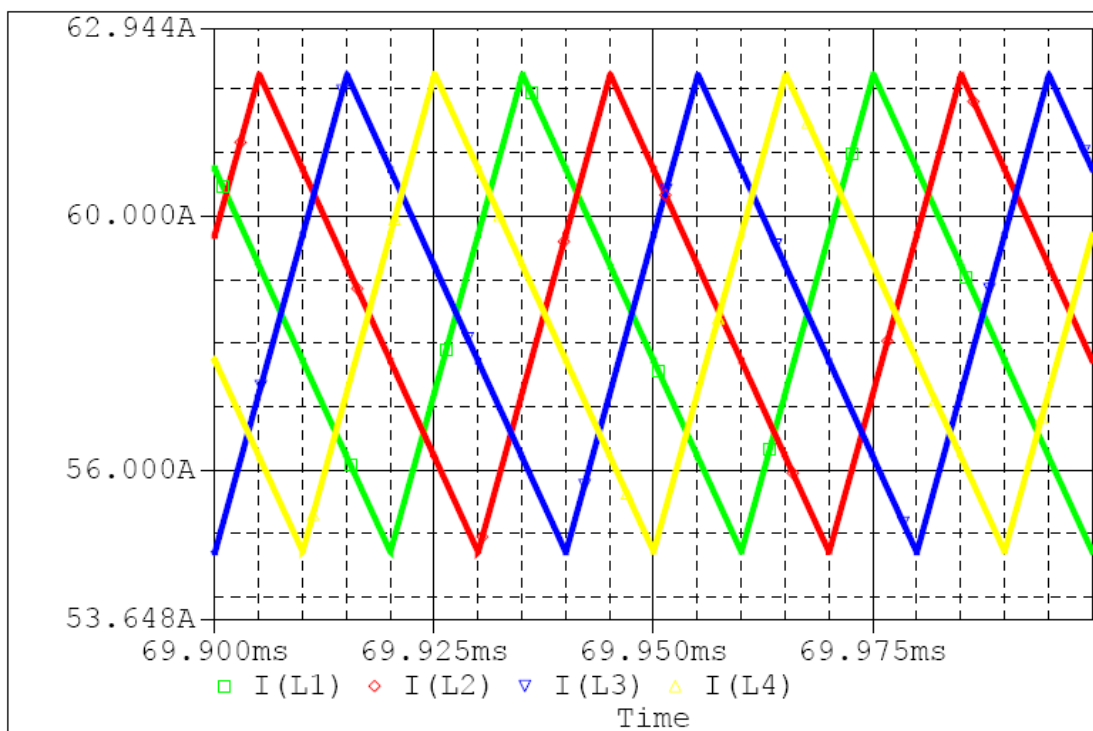
Σχήμα 6.37 Ρεύματα στις διόδους με διαφορά φάσης 90° , και μέσο ρεύμα διόδου ανά κλάδο, $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



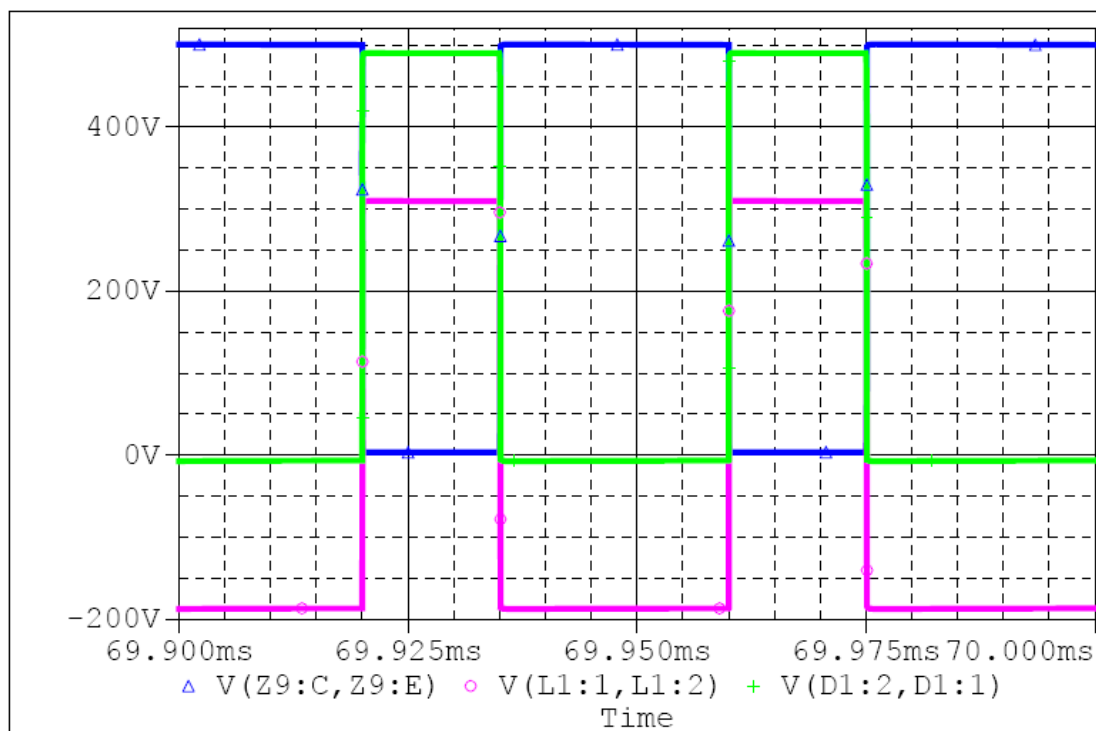
Σχήμα 6.38 Ρεύματα στα IGBTs με διαφορά φάσης 90° , και μέσο ρεύμα τρανζίστορ ανά κλάδο του μετατροπέα, $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.39 Ρεύμα τρανζίστορ και διόδου 1^{o} κλάδου με συμπληρωματική αγωγή, το άθροισμα τους δίνει το ρεύμα στο πηνίο του 1^{o} κλάδου, $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

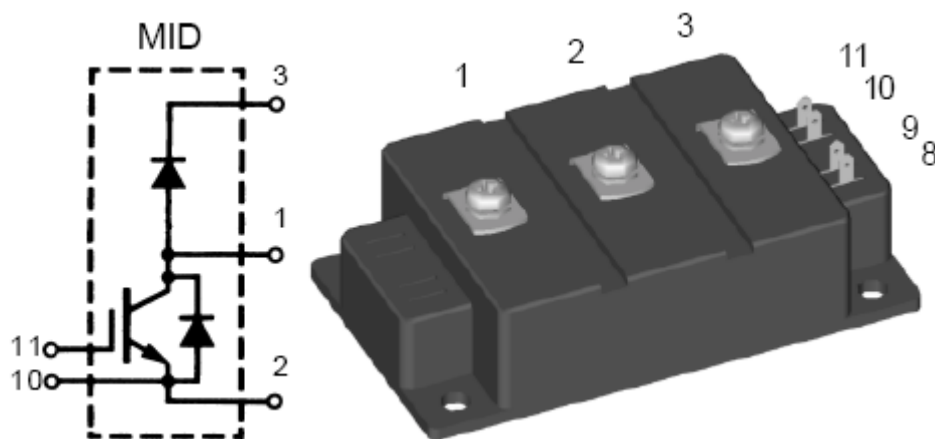


Σχήμα 6.40 Τριγωνικά ρεύματα πηνίων σε καθένα από τα τέσσερα κανάλια του μετατροπέα με διαφορά φάσης 90° (10 μ s), $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.41 Τάσεις σε τρανζίστορ, πηνίο και δίοδο, $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

Από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα μπορούμε να επιλέξουμε κατάλληλα IGBT και δίοδο για καθέναν από τους τέσσερις κλάδους, βάσει μέσου ρεύματος, μέγιστης τάσης και διακοπτικής συχνότητας. Προτείνεται αντίστοιχη λύση με αυτή του μετατροπέα υποβιβασμού, με τη χρήση του MID200-12A4 της Ixys [68]. Το συγκεκριμένο IGBT module περιλαμβάνει και δίοδο ισχύος τοποθετημένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συντίθεται ένας κλάδος μετατροπέα boost (βλ. και Σχ. 6.42).



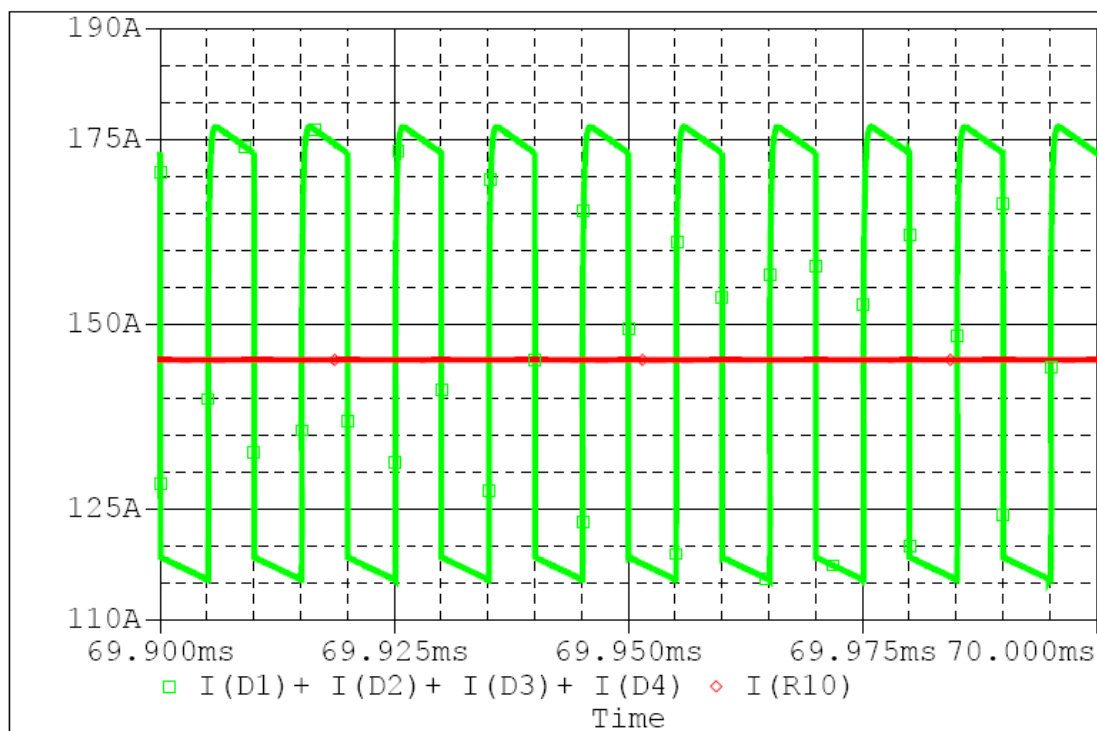
Σχήμα 6.42 IGBT module MID200-12A4 της Ixys [68].

Στο Σχ. 6.43 φαίνεται το ρεύμα εξόδου πριν και μετά την εξομάλυνσή του. Η κυμάτωση του είναι μεγάλη, περίπου 63 A. Η μεγάλη κυμάτωση στην έξοδο είναι χαρακτηριστικό των μετατροπέων ανύψωσης λόγω της παλμικής μορφής του ρεύματος εξόδου.

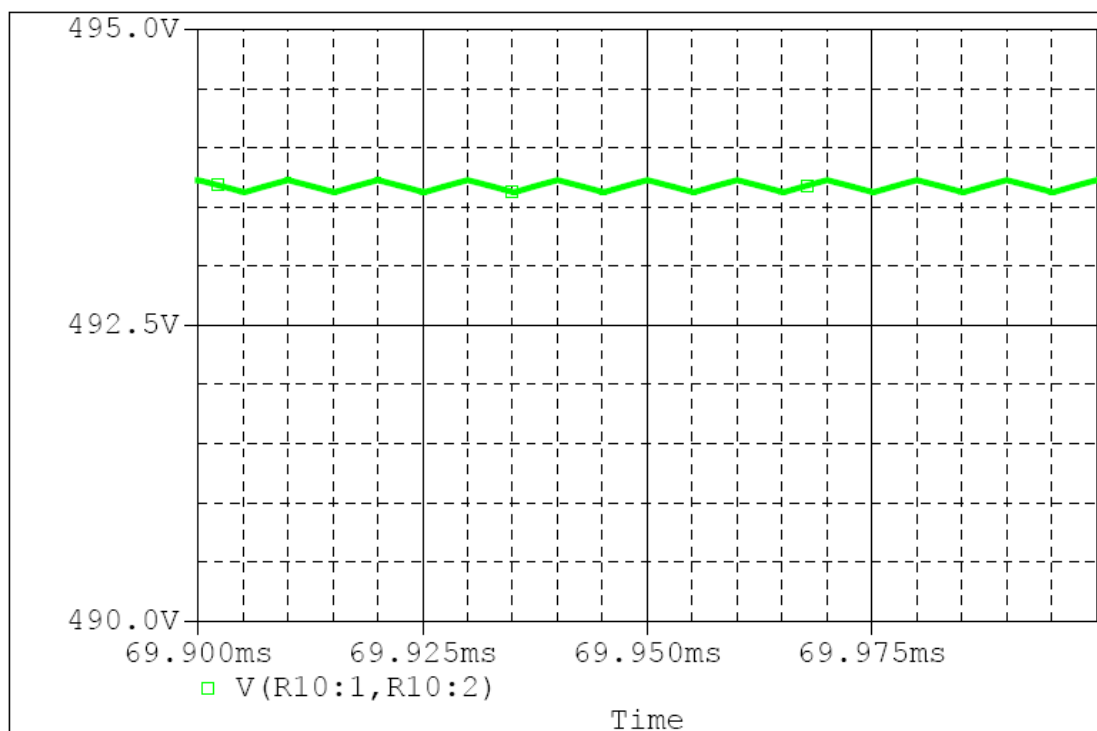
Ως φίλτρο στην έξοδο χρησιμοποιήθηκε μία συστοιχία πυκνωτών (με σπείρωμα) που απαρτίζεται από την παράλληλη σύνδεση έξι κλάδων, με κάθε κλάδο να έχει δύο εν σειρά πυκνωτές ονομαστικής χωρητικότητας 470 μF έκαστος και τάση 450 V. Οπότε προκύπτει η συνολική χωρητικότητα των 1410 μF . Η εν σειρά σύνδεση επιτρέπει τη λειτουργία στα 900 V (η μέγιστη τάση εξόδου είναι 500 V) και η σύνδεση εν παράλληλω αυξάνει την συνολική χωρητικότητα, μειώνει την συνολική ESR σε περίπου 20 m Ω και καλύπτει τις απαιτήσεις ελάχιστης ενεργούς τιμής ρεύματος του συγκεκριμένου πυκνωτή, $I_{\text{rms,AC}} = 17,5 \text{ A}$ (40°C / 10 kHz), όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.45. Στο παράρτημα παρατίθεται μέρος του φυλλαδίου των χαρακτηριστικών του πυκνωτή εξόδου (Revox Rifa) [66].

Στο Σχ. 6.44 φαίνεται η συνεχής τάση εξόδου του μετατροπέα με μία κυμάτωση της τάξης των μερικών mV. Σε περίπτωση που θέλουμε να εκμηδενίσουμε την κυμάτωση της τάσης εξόδου μπορούμε να αυξήσουμε την χωρητικότητα του φίλτρου εξόδου προσθέτοντας π.χ. έναν ή και περισσότερους παράλληλους κλάδους.

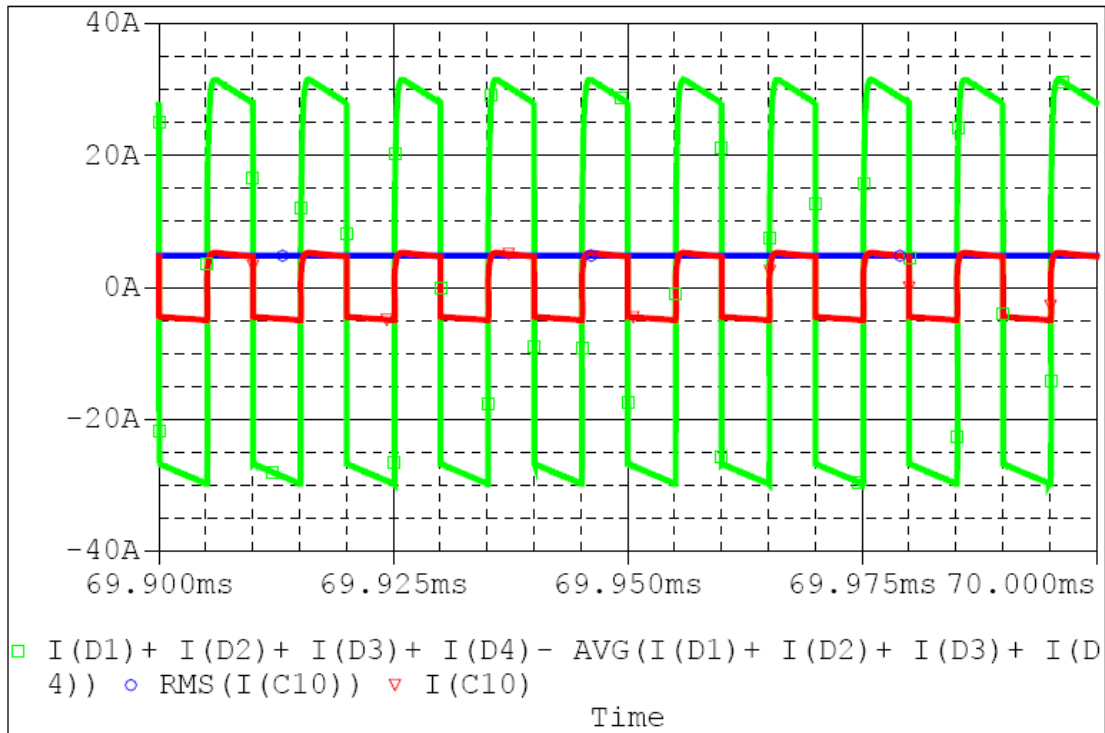
Καθénas από τους πυκνωτές που απαρτίζουν το φίλτρο εξόδου έχει διαστάσεις (διάμετρος επί μήκος) $D \times L = 50 \times 75 \text{ mm}$ και βάρος 180 g [66], χωρίς να συνυπολογίζεται το βάρος της ψήκτρας που απαιτείται για την απαγωγή της θερμότητας. Προκύπτει έτσι ένα συνολικό βάρος συστοιχίας πυκνωτών ίσο με 2,16 kg το οποίο με την πρόσθεση δύο επιπλέον παράλληλων κλάδων (ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητα κατά 470 μF και να μειωθεί η κυμάτωση) αυξάνεται στα 2,88 kg. Είναι εμφανές ότι το παλμικού τύπου ρεύμα στην έξοδο του μετατροπέα ανύψωσης οδηγεί σε μεγαλύτερο φίλτρο σε σχέση με το φίλτρο εξόδου του μετατροπέα υποβιβασμού.



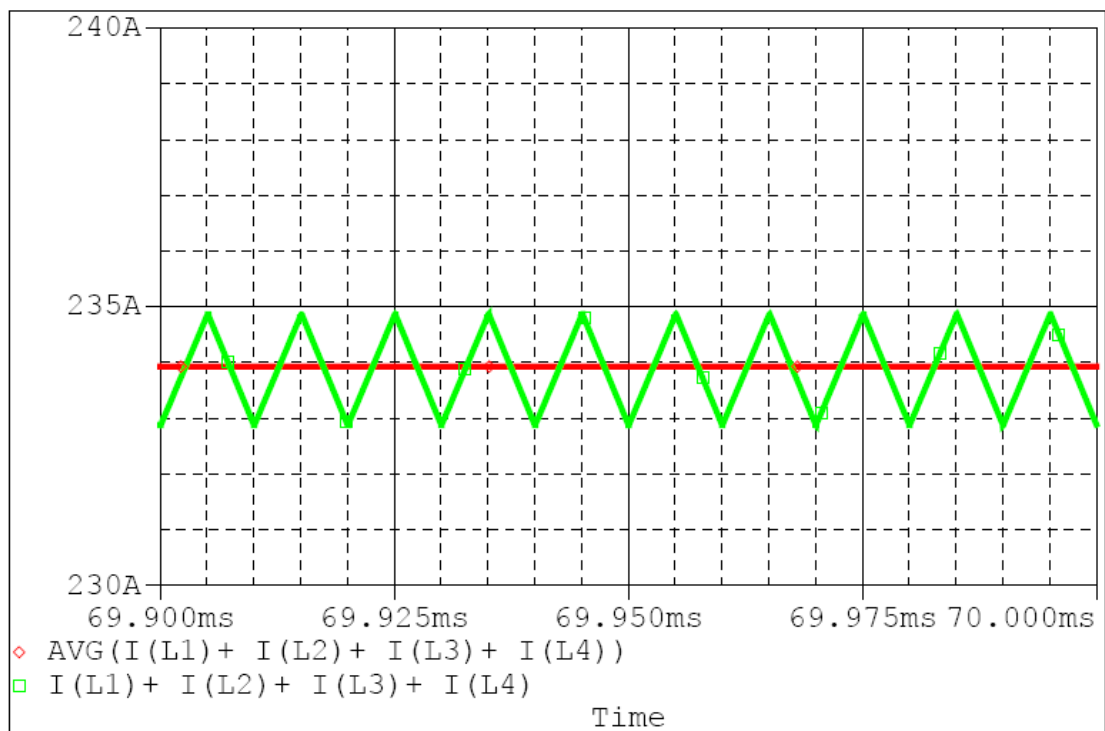
Σχήμα 6.43 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $4 \times 25 \text{ kHz} = 100 \text{ kHz}$ και μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του, $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



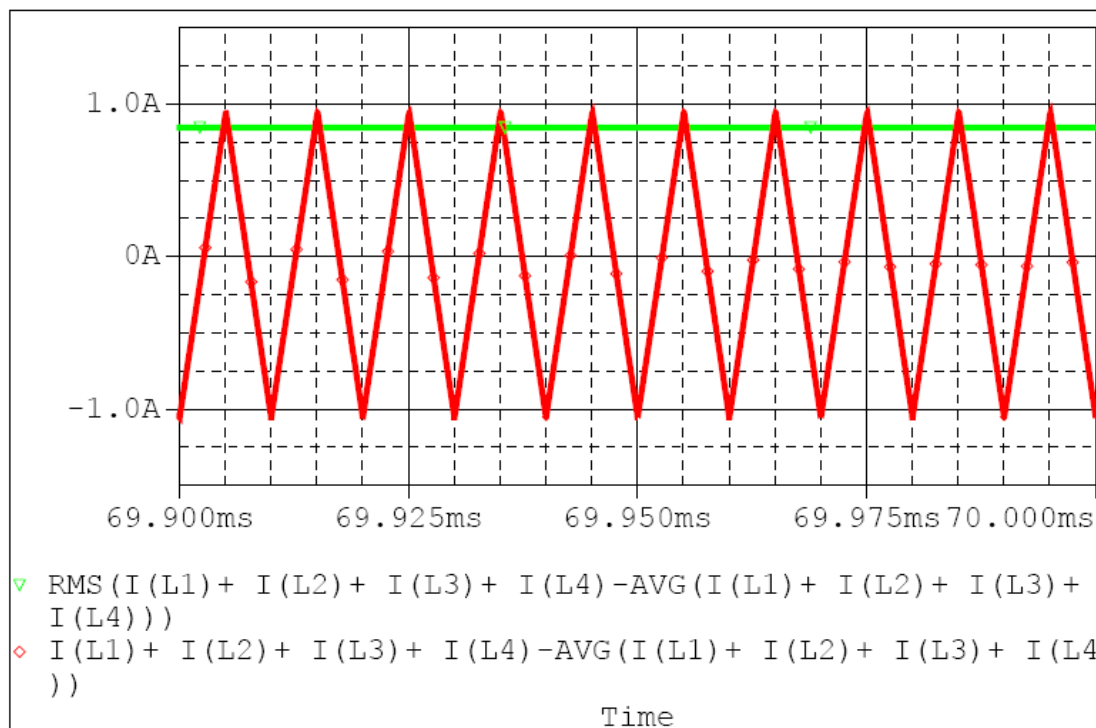
Σχήμα 6.44 Εξομαλυμένη τάση εξόδου, $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.45 Κυμάτωση ρεύματος εξόδου ίση με το εναλλασσόμενο ρεύμα συστοιχίας πυκνωτών, ρεύμα κλάδου συστοιχίας πυκνωτών και ενεργός τιμή κλάδου, $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.46 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.47 Κυμάτωση ρεύματος εισόδου, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εισόδου, $\delta = 0,373$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

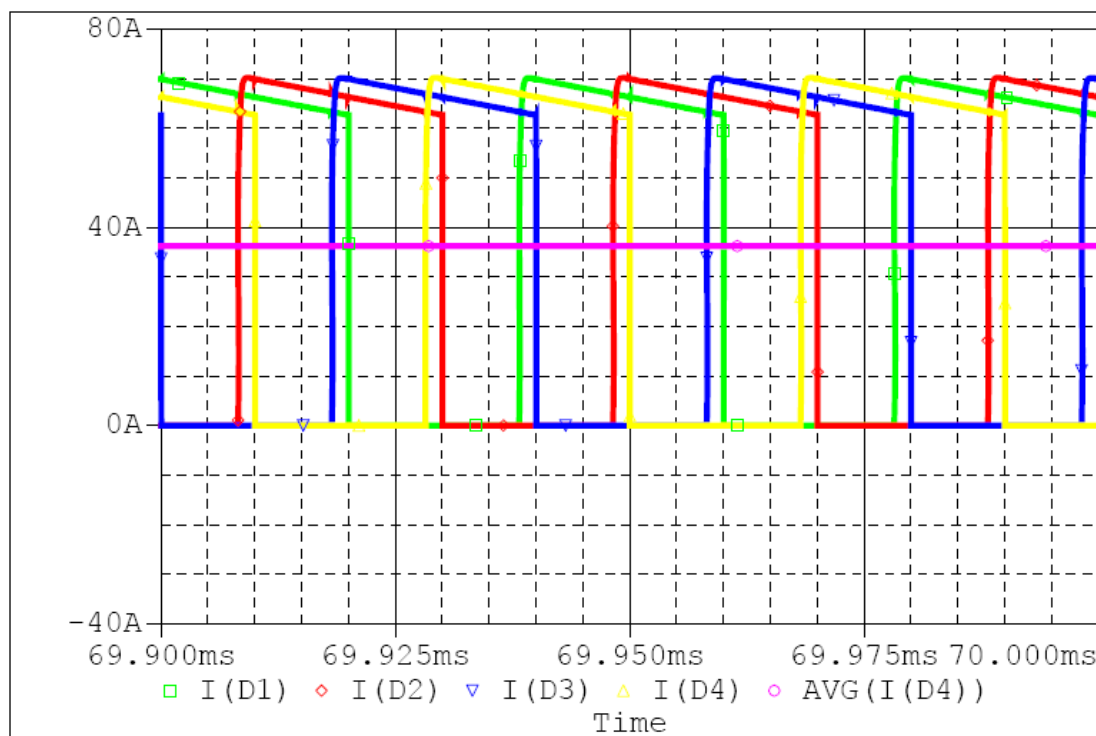
Στο Σχ. 6.46 φαίνεται το συνολικό ρεύμα εισόδου. Αυτό είναι και το ρεύμα με το οποίο πρέπει να τροφοδοτούν οι κυψέλες καυσίμου. Βλέπουμε πως παρουσιάζει πολύ μικρή κυμάτωση, που είναι χαρακτηριστικό της εισόδου των μετατροπέων ανώψωσης και έχει μια συχνότητα κυματομορφής τετραπλάσια (100 kHz) της διακοπτικής συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε ένα φίλτρο LC για να αποκόψουμε την συχνότητα αυτή και για να αποφύγουμε το τριγωνικό αυτό ρεύμα για τις κυψέλες καυσίμου, το οποίο βέβαια να σημειωθεί, ότι είναι προτιμότερο από το αντίστοιχο ρεύμα στην είσοδο του μετατροπέα υποβιβασμού στο πρώτο υπό μελέτη σύστημα. Η χωρητικότητα θα προκύψει από τρεις παράλληλους κλάδους με καθέναν να περιλαμβάνει δύο εν σειρά πυκνωτές των 470 μF / 450 V, άρα συνολικά 705 μF (βλ. Παράρτημα πυκνωτές Epcos). Σύμφωνα με το Σχ. 6.47 η επιτρεπόμενη συνολική ενεργός τιμή είναι περίπου 0,8 A, οπότε ακόμη και η χρήση ενός κλάδου ($I_{\text{rms,AC}} = 3,6 \text{ A}$ (85°C / 20 kHz)) θα αρκούσε για την τήρηση του ορίου, προστέθηκαν όμως άλλοι δύο κλάδοι για αύξηση της χωρητικότητας και για να κρατήσουμε την ESR σε χαμηλά επίπεδα. Οπότε επιλέγοντας ένα πηνίο 10 μH , προκύπτει μια συχνότητα αποκοπής $f_0 \approx 1,9 \text{ kHz}$, που είναι πολύ μικρότερη του 1/10 (βλ. προηγούμενο κεφάλαιο) της συχνότητας που θέλουμε να αποκόψουμε, δηλ. τα 100 kHz.

6.2.2 Δεύτερη περίπτωση προσομοίωσης

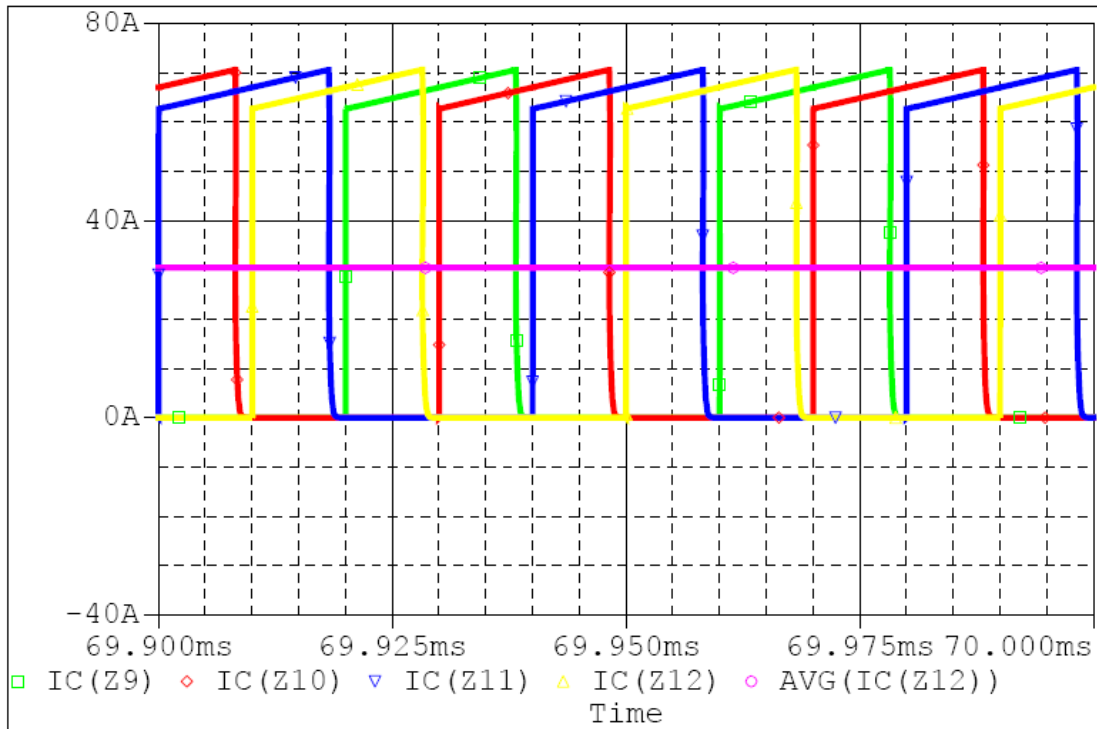
Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό την μικρότερη δυνατή τάση, 275 V. Στην έξοδο του μετατροπέα η τάση είναι 500 V. Θεωρείται λειτουργία του κινητήρα υπό ονομαστικό φορτίο. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.8.

Πίνακας 6.8 Δεδομένα 2^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα ανύψωσης.

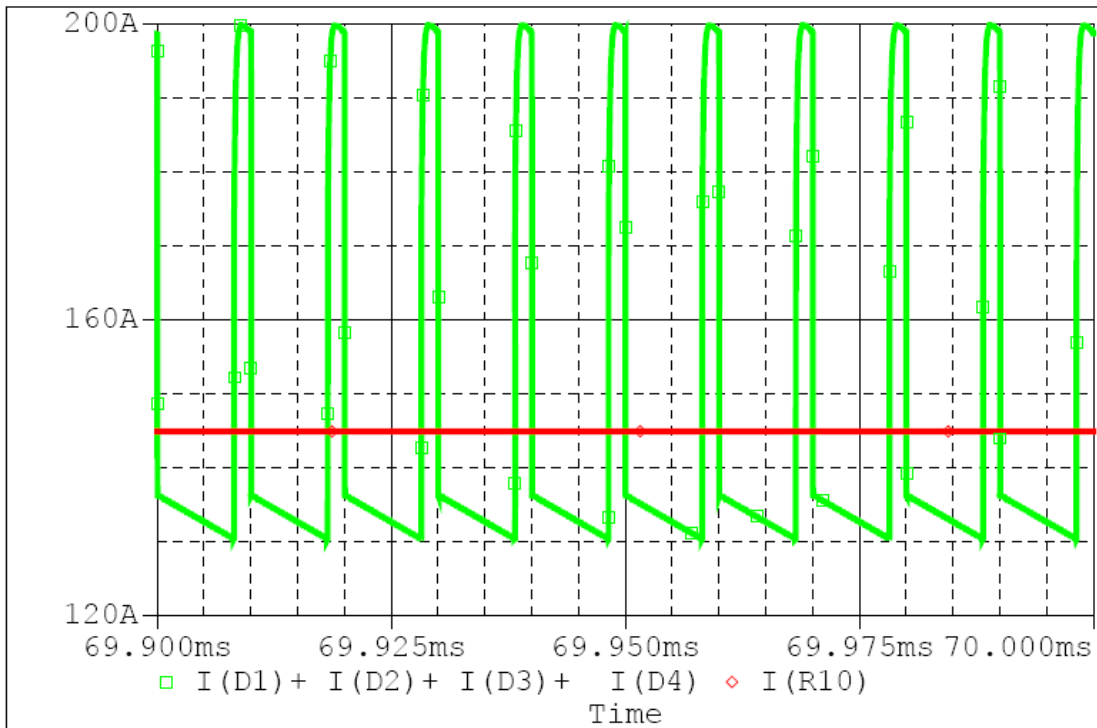
Τάση εισόδου (V_i)	275 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	266.6 A
Λόγος κατάμησης (δ)	0.45
Τάση εξόδου (V_o)	492,6 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	144,9 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,97



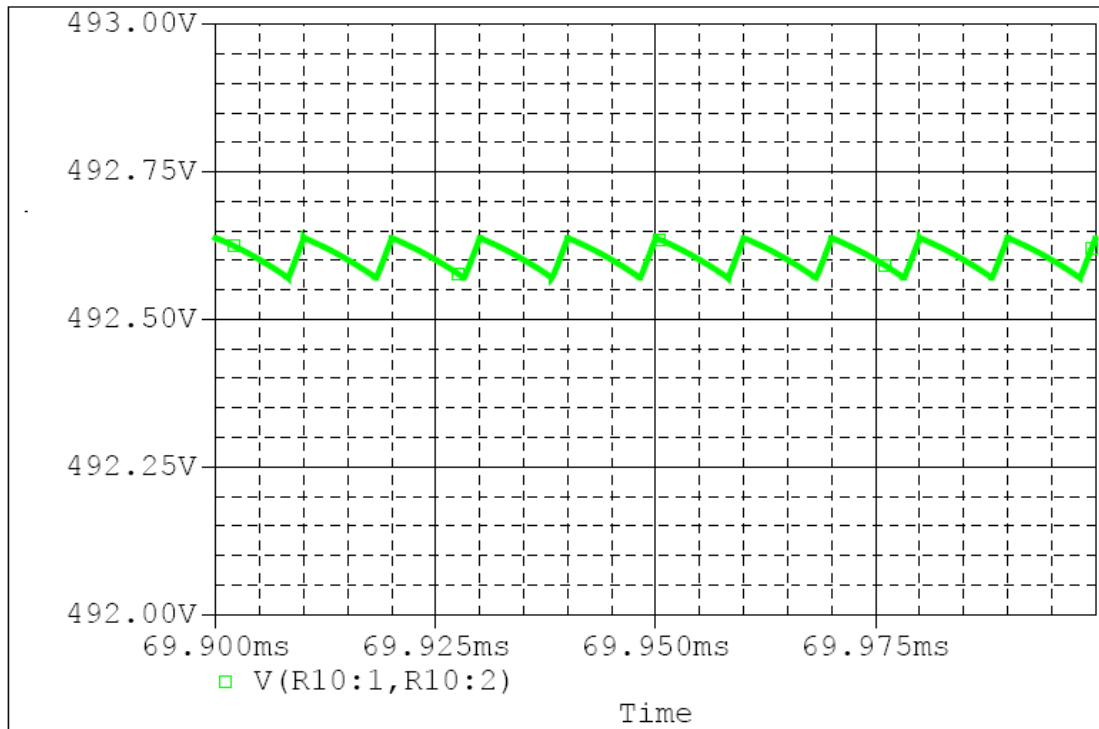
Σχήμα 6.48 Ρεύματα στις διόδους με διαφορά φάσης 90°, και μέσο ρεύμα διόδου ανά κλάδο, $\delta = 0,45$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



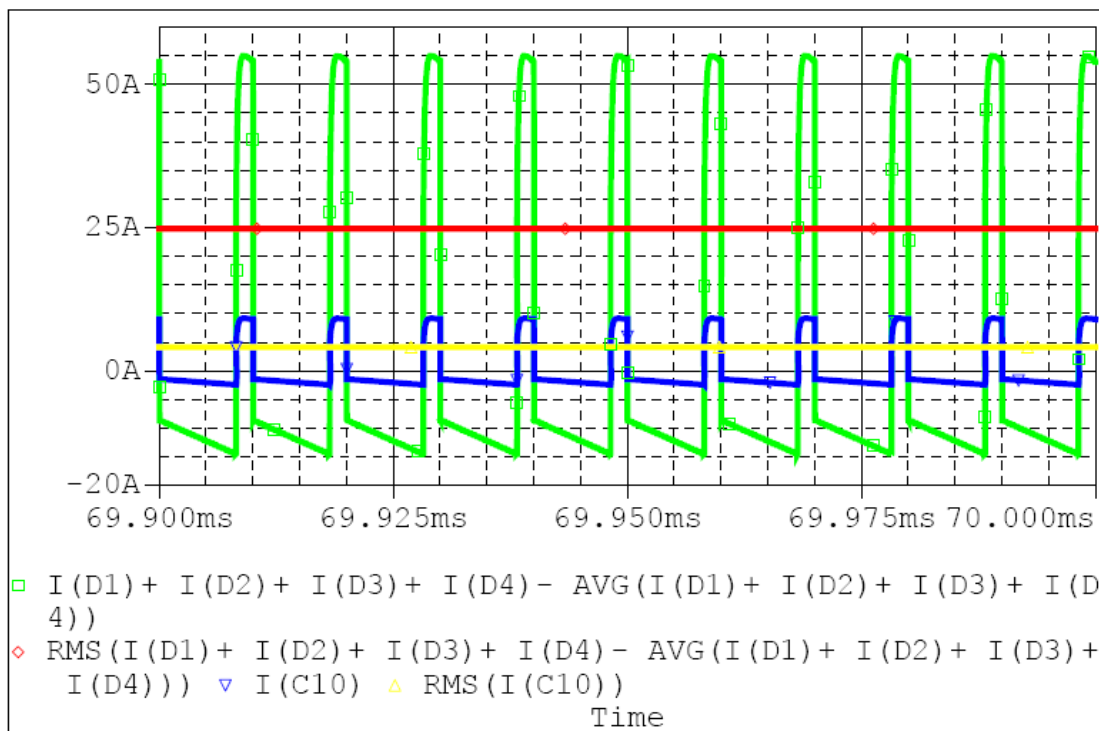
Σχήμα 6.49 Ρεύματα στα IGBTs με διαφορά φάσης 90° , και μέσο ρεύμα τρανζίστορ ανά κλάδο του μετατροπέα, $\delta = 0,45$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



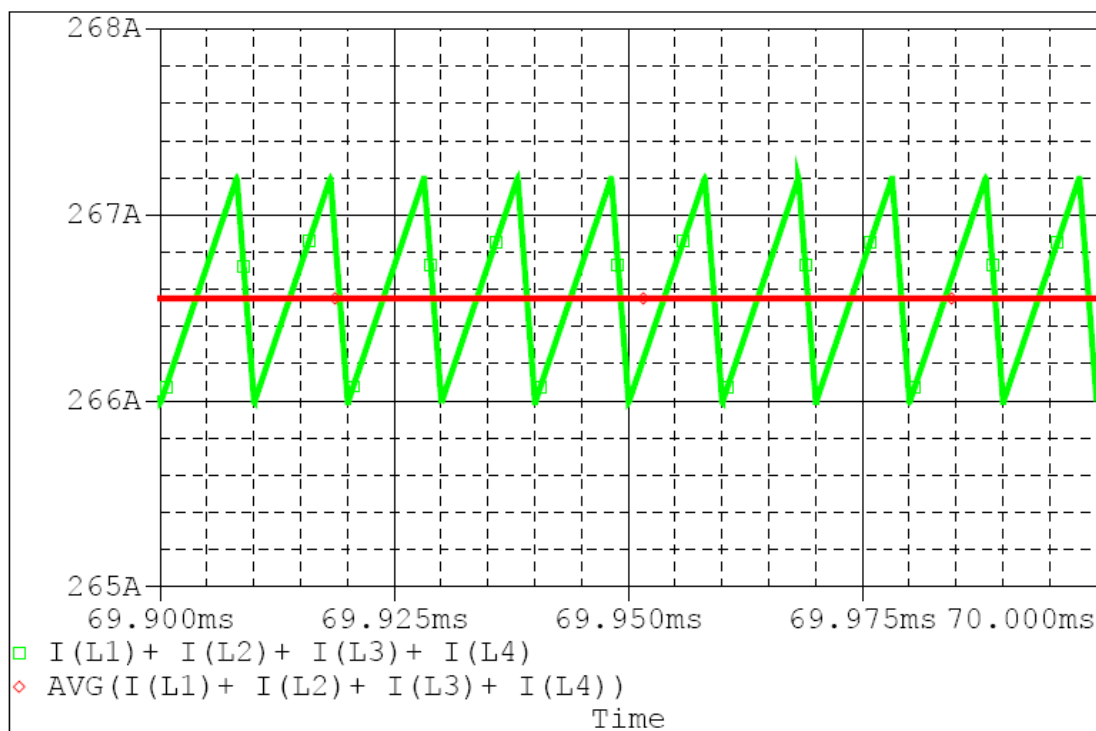
Σχήμα 6.50 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $4 \times 25 \text{ kHz} = 100 \text{ kHz}$ και μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του, $\delta = 0,45$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.51 Εξομαλυμένη τάση εξόδου, $\delta = 0,45$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.52 Κυμάτωση ρεύματος εξόδου ίση με το εναλλασσόμενο ρεύμα συστοιχίας πυκνωτών, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εξόδου, ρεύμα κλάδου συστοιχίας πυκνωτών και ενεργός τιμή κλάδου, $\delta = 0,45$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



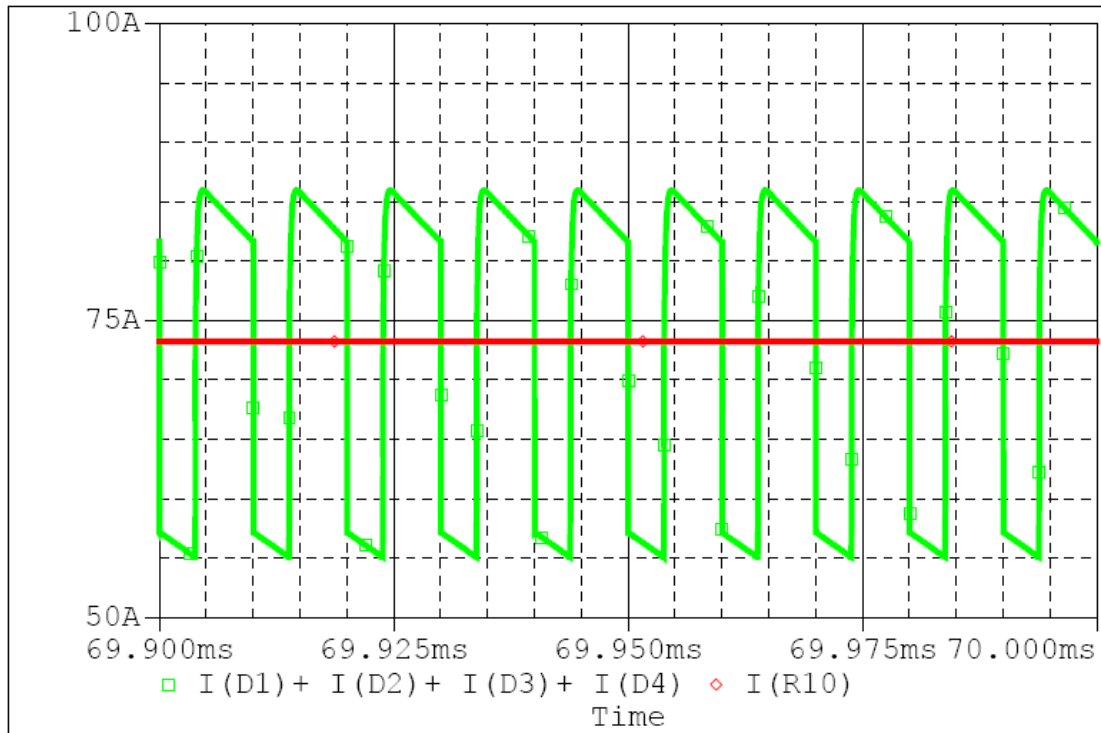
Σχήμα 6.53 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,45$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

6.2.3 Τρίτη περίπτωση προσομοίωσης

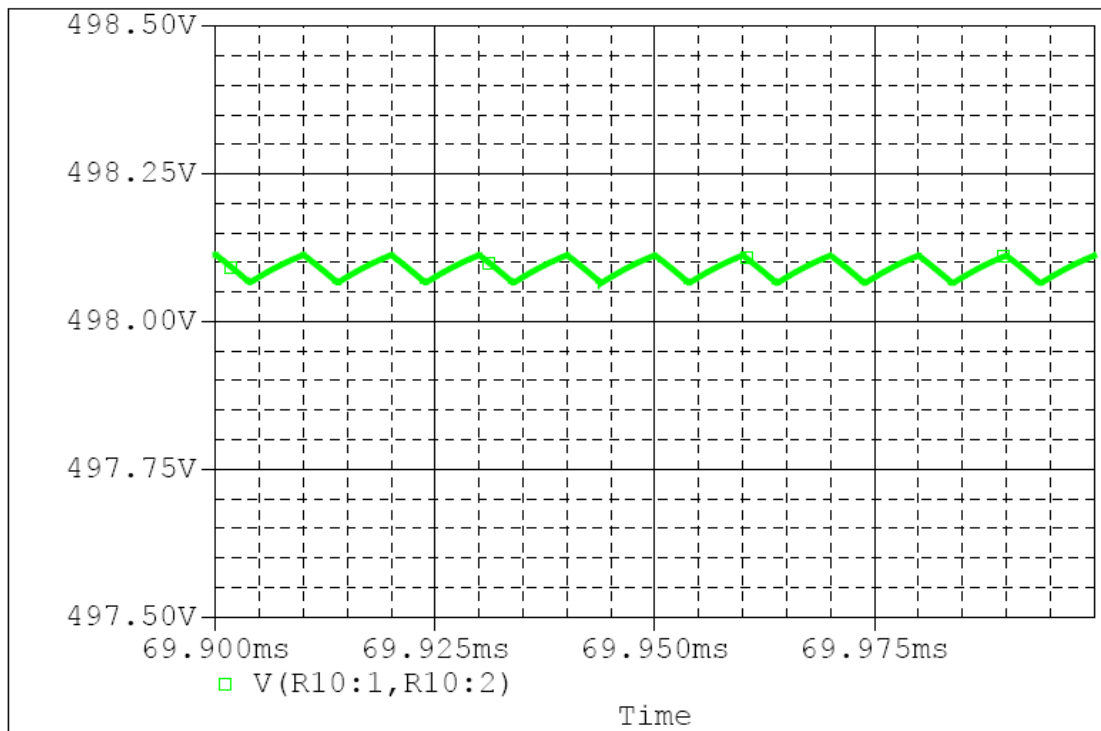
Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί υπό τάση μεγαλύτερη της ονομαστικής, 330 V. Στην έξοδο του μετατροπέα η τάση είναι 500 V. Θεωρείται μία περίπτωση φορτίου όπου το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης είναι το μισό από αυτό της ονομαστικής κατάστασης λειτουργίας του. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.9.

Πίνακας 6.9 Δεδομένα 3^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα ανύψωσης.

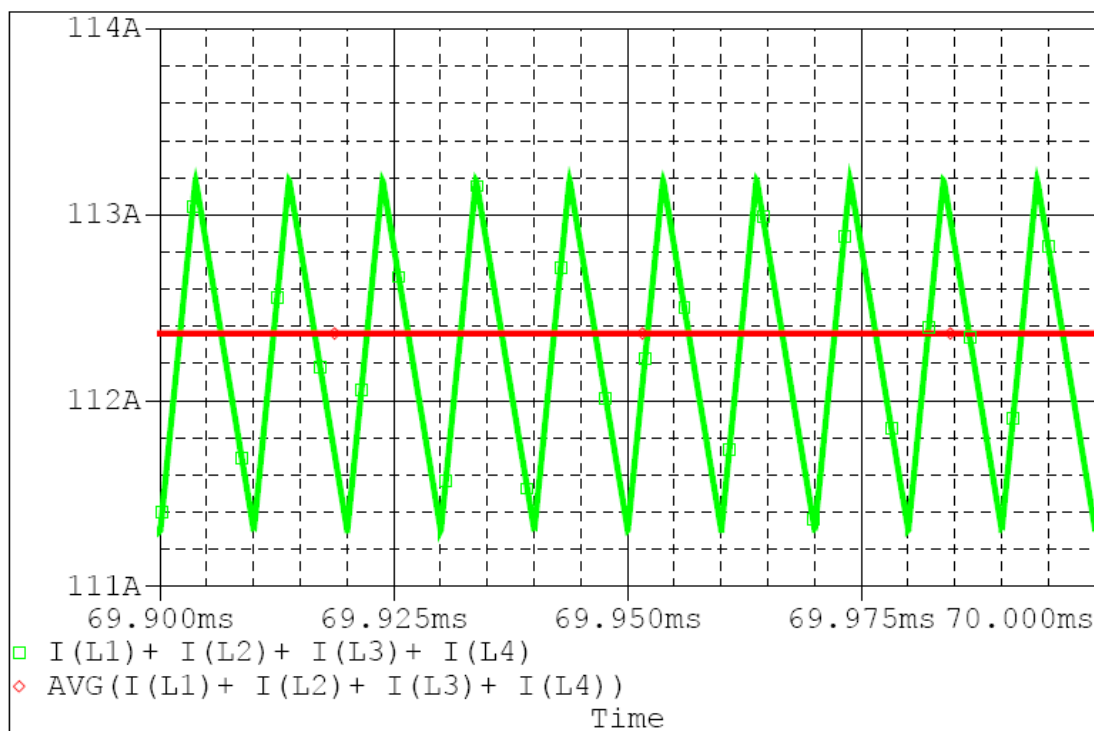
Τάση εισόδου (V_i)	330 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	112,4 A
Λόγος κατάτμησης (δ)	0,34
Τάση εξόδου (V_o)	498 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	73,3 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,98



Σχήμα 6.54 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $4 \times 25 \text{ kHz} = 100 \text{ kHz}$ και μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του, $\delta = 0,34$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.55 Εξομαλυσμένη τάση εξόδου, $\delta = 0,34$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.56 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,34$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

6.2.4 Παρατηρήσεις

Ο μετατροπέας ανύψωσης διαδοχικής αγωγής απαιτεί τη χρήση μεγάλων σχετικά φίλτρων στην έξοδο του λόγω του παλμικού ρεύματος εξόδου, εν αντιθέσει, με τον μετατροπέα υποβιβασμού που απαιτεί την ύπαρξη μεγάλων φίλτρων στην είσοδό του. Αυτό είναι σημαντικό, ειδικά σε εφαρμογές κυψελών καυσίμου, όπου μπορούμε με ένα σχετικά μικρό φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα ανύψωσης να αντλούμε ένα σταθερό ρεύμα απ' αυτές. Από τις προσομοιώσεις φαίνεται πως ο μετατροπέας ανύψωσης διατηρεί τον υψηλό βαθμό απόδοσής του (98 %) ακόμα και υπό μερικό φορτίο (βλ. 3^η περίπτωση προσομοίωσης). Ο συνδυασμός δύο μετατροπέων ανύψωσης και ενός υποβιβασμού για τον έλεγχο του κινητήρα πρόωσης μειώνει τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος αλλά από την άλλη πλευρά η ύπαρξη ενός «ισχυρού» φίλτρου εξόδου (από τον μετατροπέα ανύψωσης) στην είσοδο του μετατροπέα υποβιβασμού διαδοχικής αγωγής δεν απαιτεί τη χρήση ενός πρόσθετου φίλτρου εισόδου στον τελευταίο. Στον Πίνακα 6.10 παρατίθενται οι απόλυτες και ποσοστιαίες τιμές κυμάτωσης ρεύματος και τάσης εξόδου μετά την εξομάλυνσή τους. Παρατηρούμε ότι σε λειτουργία υπό μεγαλύτερη τάση εισόδου και υπό μερικό φορτίο έχουμε μικρότερη κυμάτωση τόσο στην τάση όσο και στο ρεύμα εξόδου (3^η περίπτωση προσομοίωσης).

Πίνακας 6.10 Κυματώσεις ρεύματος και τάσης εξόδου για διαφορετικές περιπτώσεις προσομοιώσεων στον μετατροπέα ανύψωσης διαδοχικής αγωγής τεσσάρων κλάδων.

	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Κυμάτωση ρεύματος εξόδου (mA)	30	20,3	7,1
Κυμάτωση τάσης εξόδου (mV)	103	68,9	49
Κυμάτωση ρεύματος εξόδου (%)	0,021	0,014	0,0096
Κυμάτωση τάσης εξόδου (%)	0,021	0,014	0,0098

6.3 Μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης με διαδοχική αγωγή δύο κλάδων

Και τα δύο ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα συμπληρώνονται από ένα βοηθητικό ενεργειακό σύστημα που αποτελείται από μια συστοιχία συσσωρευτών. Η δομή και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της συστοιχίας περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και είναι ακριβώς ίδια και για τα δύο υπό μελέτη συστήματα. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος είναι ένας μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού διαδοχικής αγωγής, ο οποίος ανάλογα με την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα πρόωσης (0 – 440 V), είτε ανυψώνει ($\delta > 0,5$), είτε υποβιβάζει ($\delta < 0,5$) την τάση των συσσωρευτών (20 x 12 V = 240 V). Στο Σχ. 6.57 φαίνεται η τοπολογία του ηλεκτρονικού μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού, με τις τιμές να αντιστοιχούν σε μία από τις περιπτώσεις λειτουργίας που μελετήθηκαν. Τα πηνία τελικά επιλέχθηκαν με επαγωγή 600 μH , με την οποία επιτυγχάνεται η λειτουργία σε συνεχή αγωγή βάσει των απαιτήσεων του φορτίου. Για την παραγωγή των παλμών ελέγχου των IGBTs και εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μικροελεγκτής dsPIC30F2020 της Microchip. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μετατροπέα.

Η πρώτη περίπτωση προσομοίωσης αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου η τάση στον κινητήρα πρόωσης είναι ίση με την ονομαστική του, οπότε απαιτείται ανύψωση της τάσης των συσσωρευτών (240 V). Θεωρείται η ονομαστική λειτουργία για την οποίαν έχουν σχεδιασθεί δηλαδή για τροφοδότηση με ρεύμα 10 % του ονομαστικού ρεύματος του κινητήρα πρόωσης για κάλυψη π.χ. μιας αιχμής φορτίου.

Στην δεύτερη προσομοίωση η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ισούται με το ένα τέταρτο την ονομαστικής του, οπότε απαιτείται υποβιβασμός της τάσης των συσσωρευτών. Θεωρείται τροφοδότηση με ρεύμα 10 % του ονομαστικού ρεύματος του κινητήρα πρόωσης για βελτίωση π.χ. της απόκρισης του συστήματος σε μια μεταβατική κατάσταση.

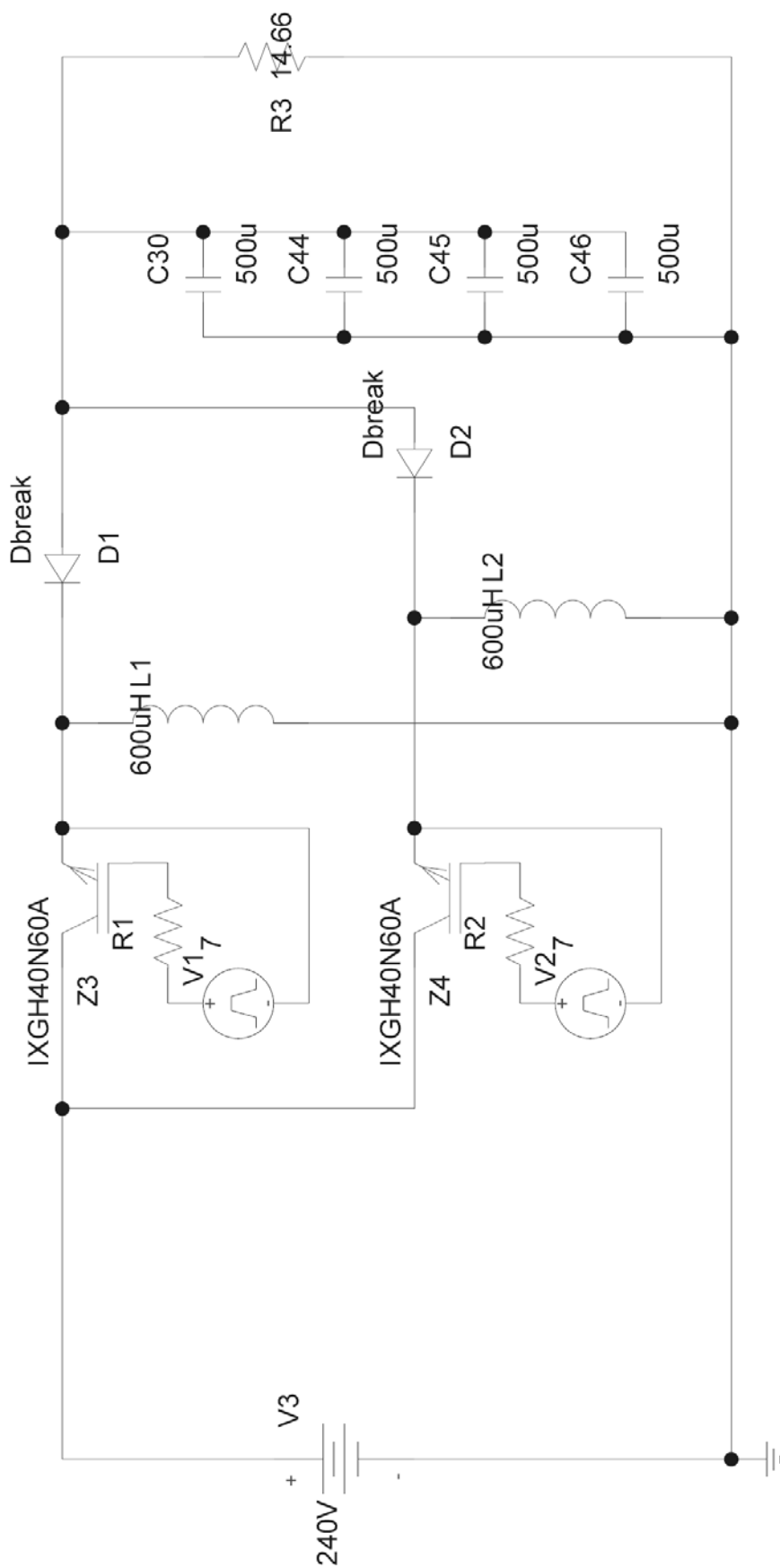
Στην τρίτη προσομοίωση, τάση συσσωρευτών και τάση τροφοδοσίας κινητήρα από τον κύριο μετατροπέα συμπίπτουν. Οι συσσωρευτές τροφοδοτούν με ρεύμα 10 % του ονομαστικού ρεύματος τυμπάνου.

6.3.1 Πρώτη περίπτωση προσομοίωσης – Ανύψωση τάσης

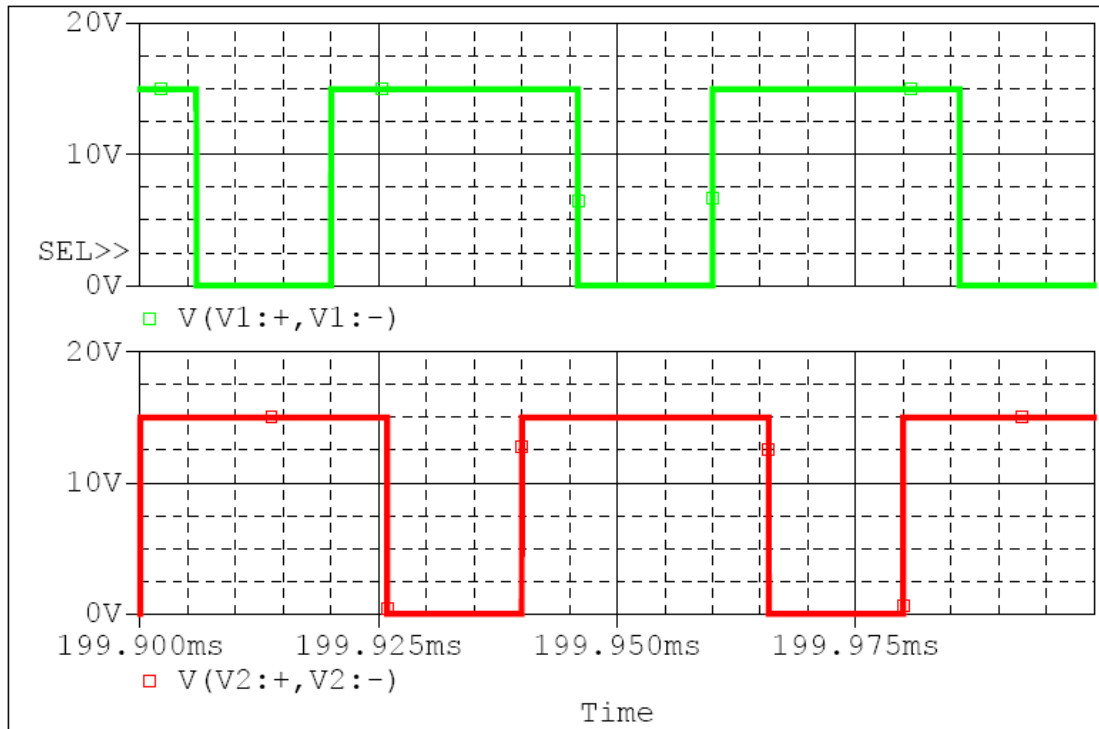
Ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση από τον κύριο μετατροπέα. Οι συσσωρευτές τροφοδοτούν με ρεύμα 10 % του ονομαστικού ρεύματος τυμπάνου. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.11.

Πίνακας 6.11 Δεδομένα 1^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού.

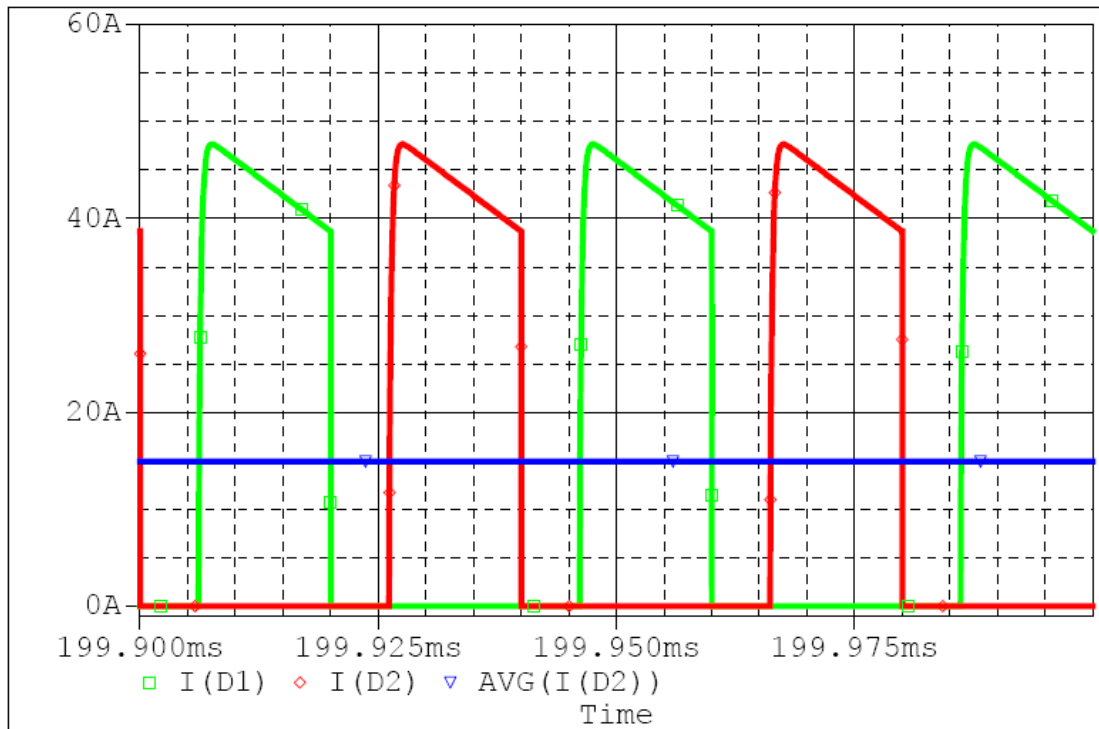
Τάση εισόδου (V_i)	240 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	57,7 A
Λόγος κατάτμησης (δ)	0,647
Τάση εξόδου (V_o)	437,3 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	29,8 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,94



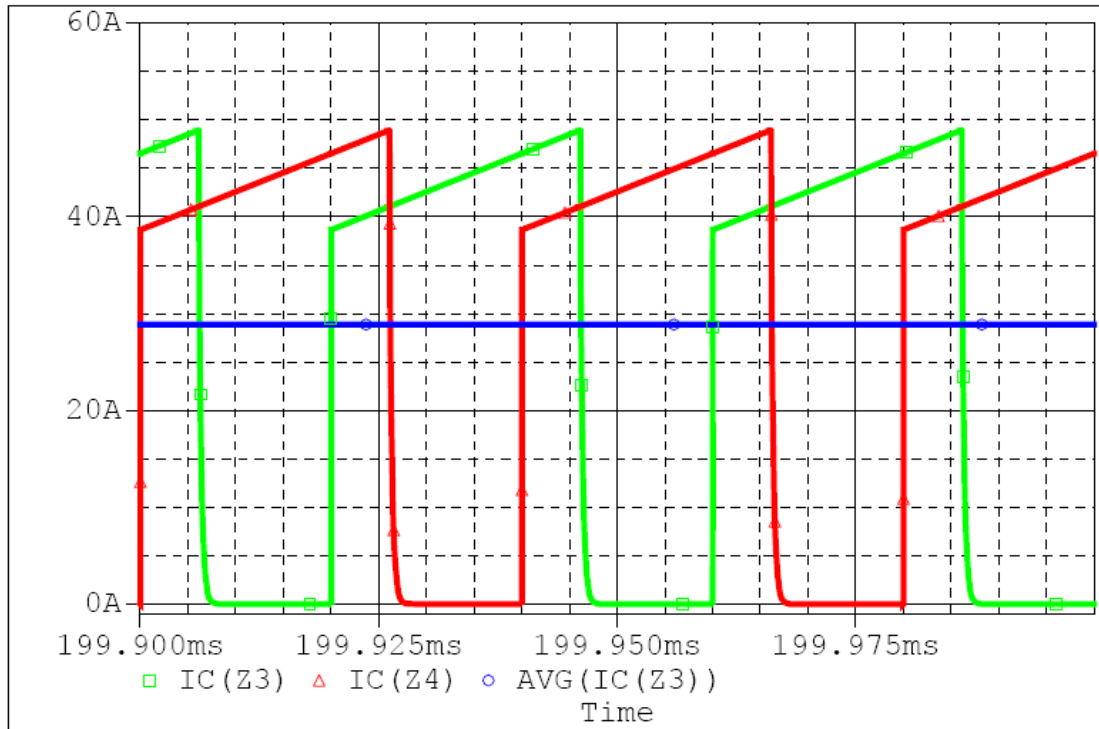
Σχήμα 6.57 Σχηματικό μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού διαδοχικής αγωγής δύο κλάδων.



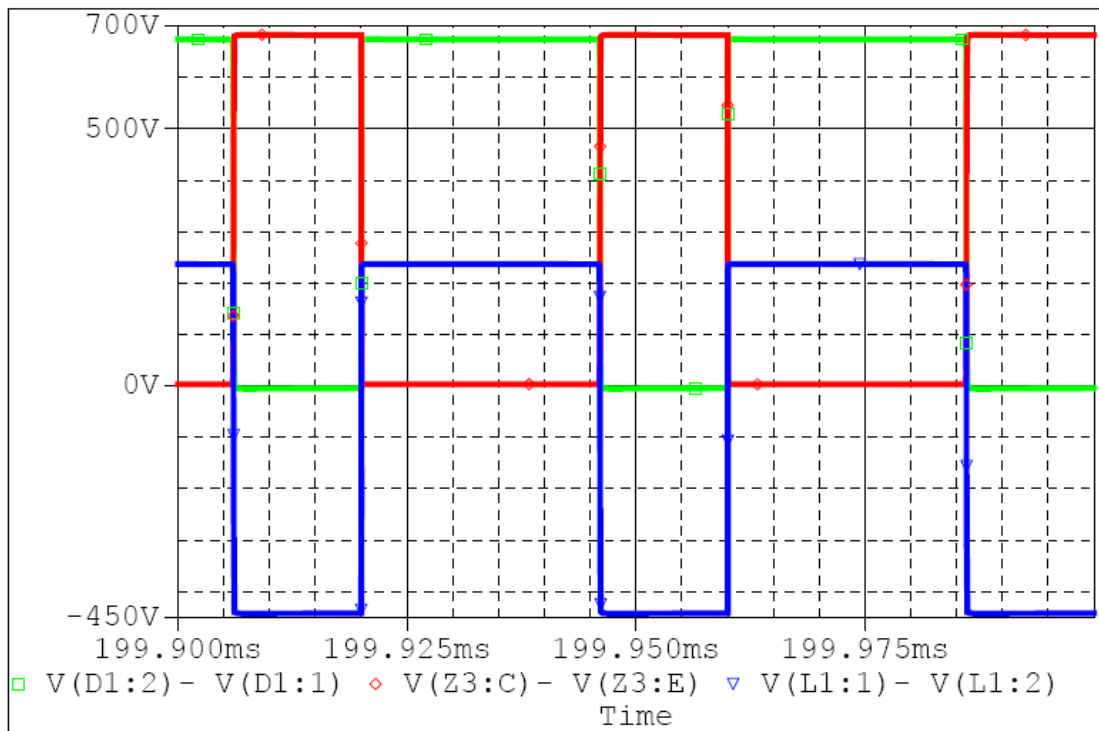
Σχήμα 6.58 Παλμοί ελέγχου έναυσης και σβέσης των IGBTs με $\delta = 0,647$, διακοπτική περίοδο $40 \mu\text{s}$ και διαφορά φάσης 180° (αποτελέσματα προσομοίωσης).



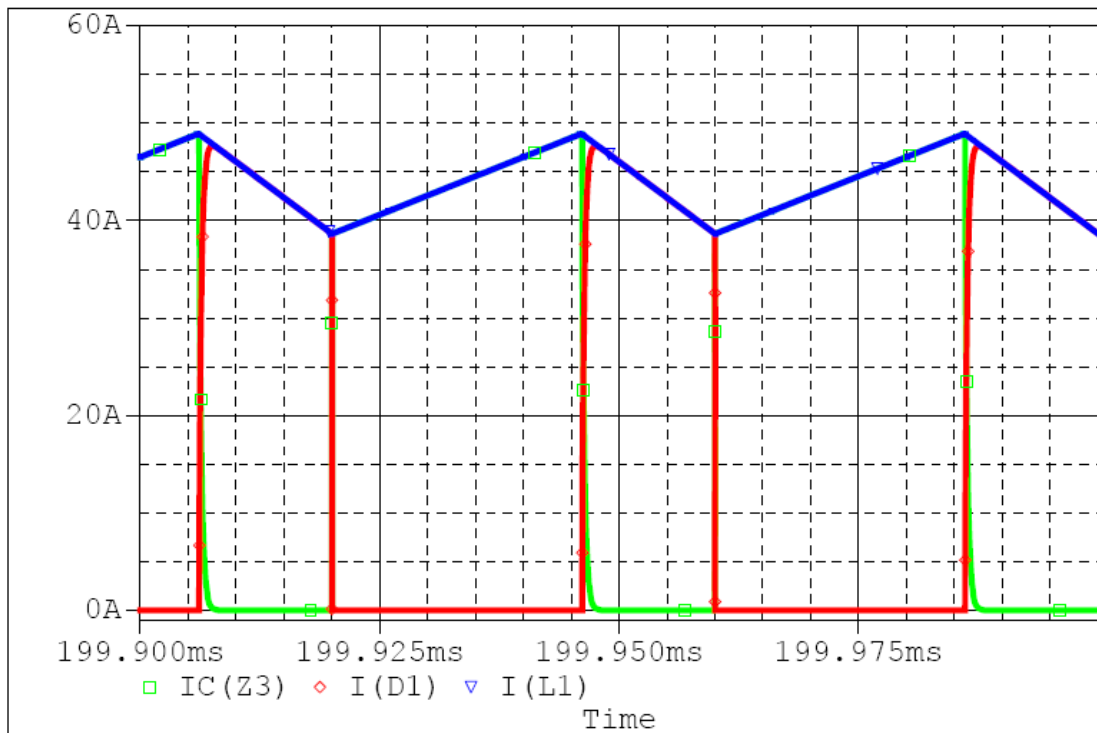
Σχήμα 6.59 Ρεύματα στις διόδους με διαφορά φάσης 180° , και μέσο ρεύμα διόδου ανά κλάδο, $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



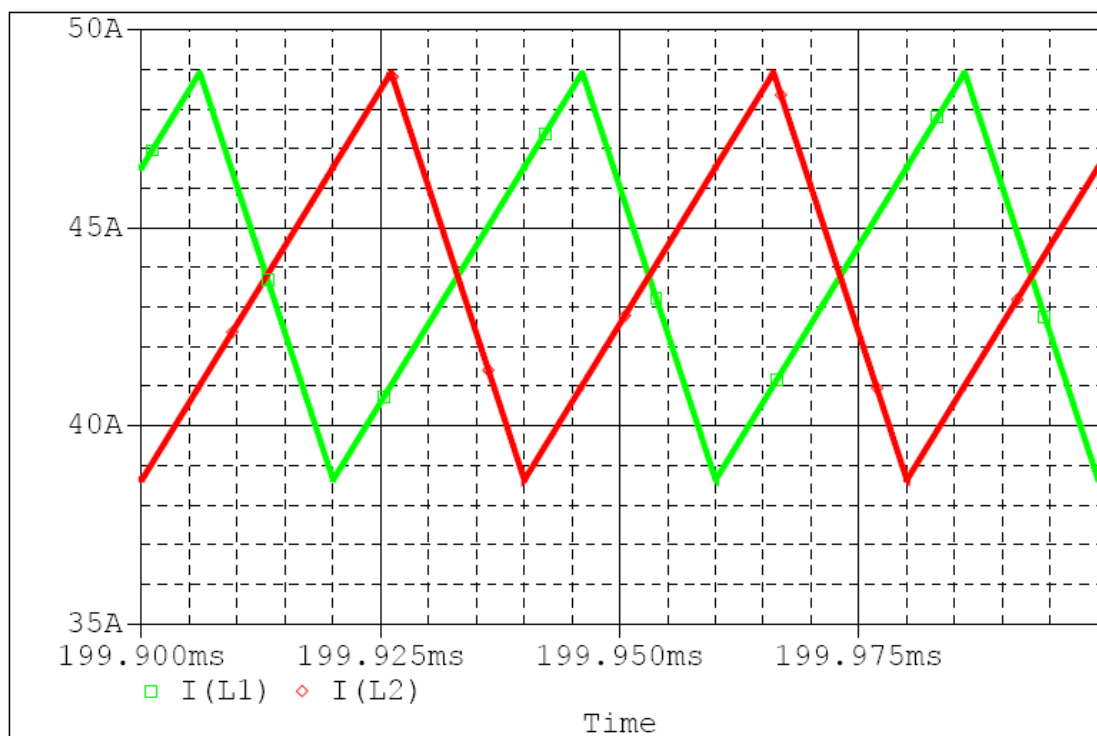
Σχήμα 6.60 Ρεύματα στα IGBTs με διαφορά φάσης 180° , και μέσο ρεύμα τρανζίστορ ανά κλάδο του μετατροπέα, $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



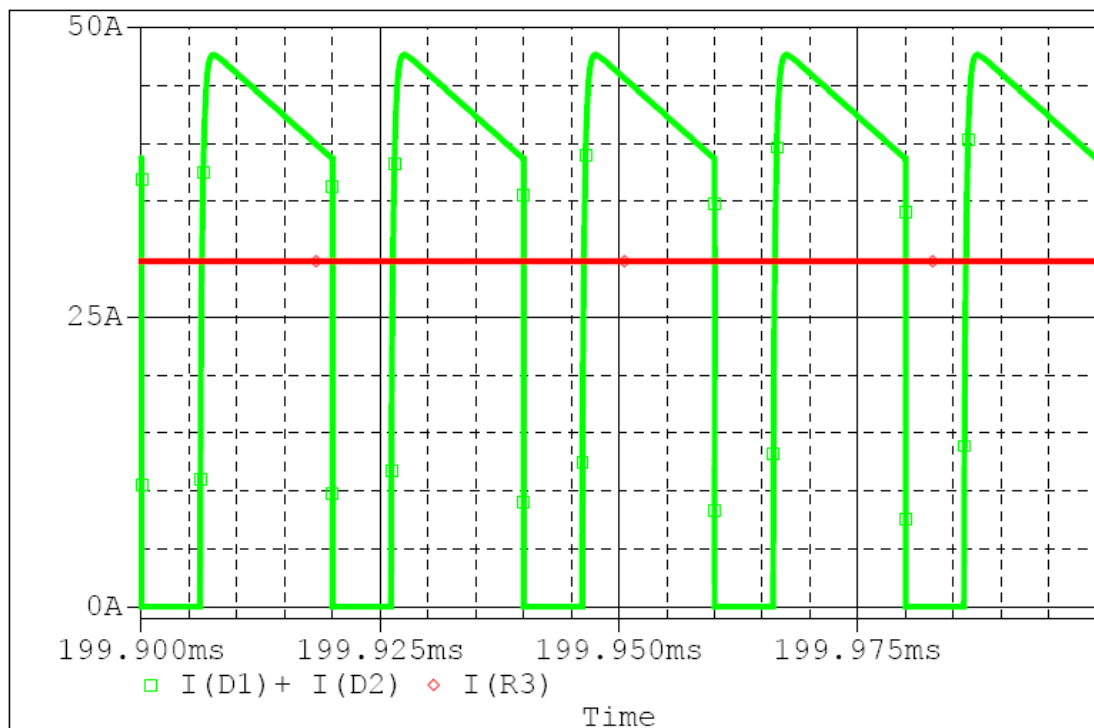
Σχήμα 6.61 Τάσεις σε δίοδο, τρανζίστορ και πηνίο, $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.62 Ρεύματα σε τρανζίστορ, δίοδο και πηνίο, $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

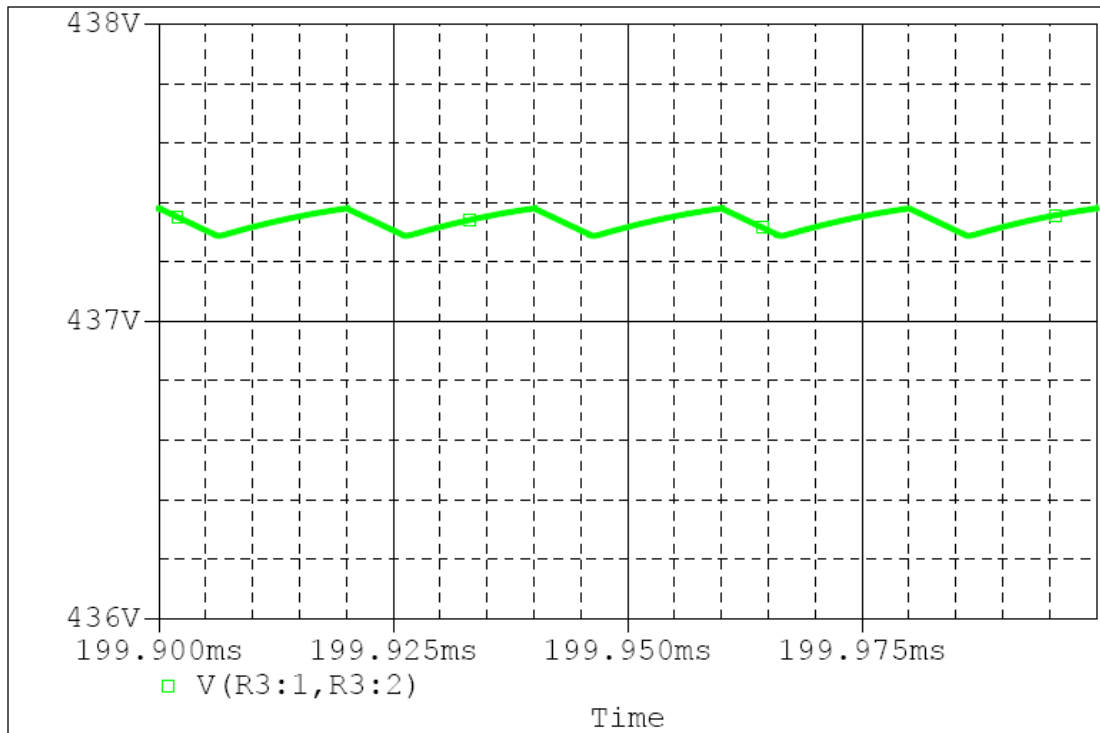


Σχήμα 6.63 Τριγωνικά ρεύματα πηνίων σε καθένα από τα δύο κανάλια του μετατροπέα με διαφορά φάσης 180° ($20 \mu s$), $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

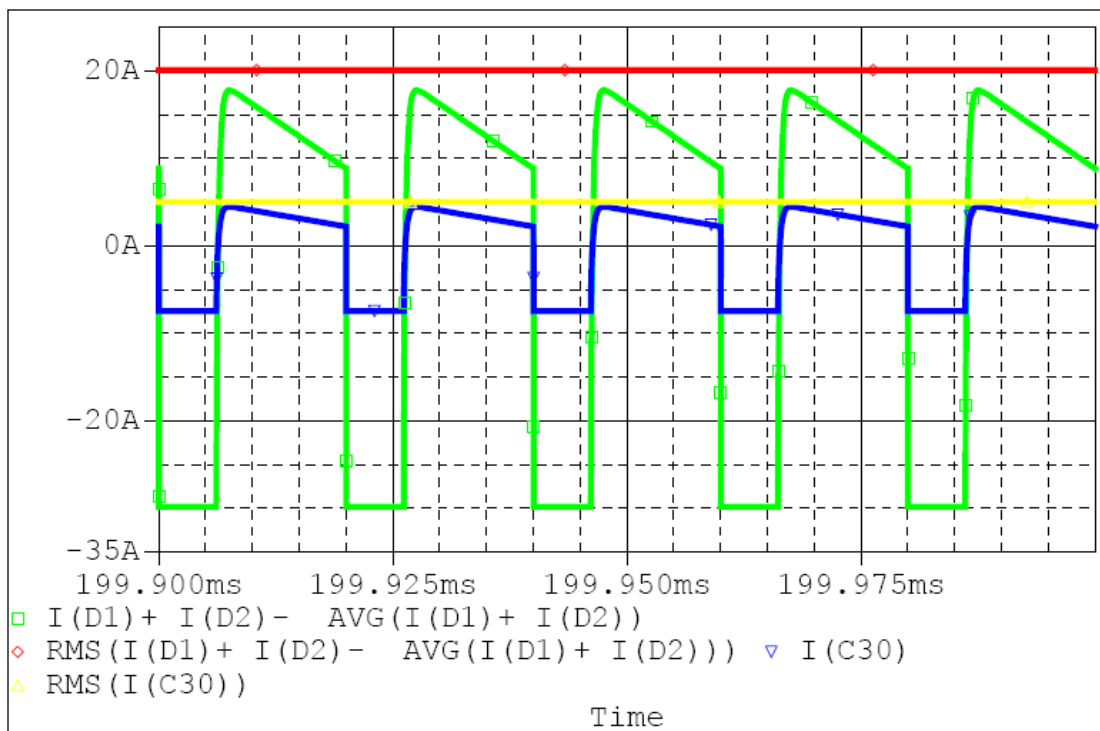


Σχήμα 6.64 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $2 \times 25 \text{ kHz} = 50 \text{ kHz}$ και μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του, $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

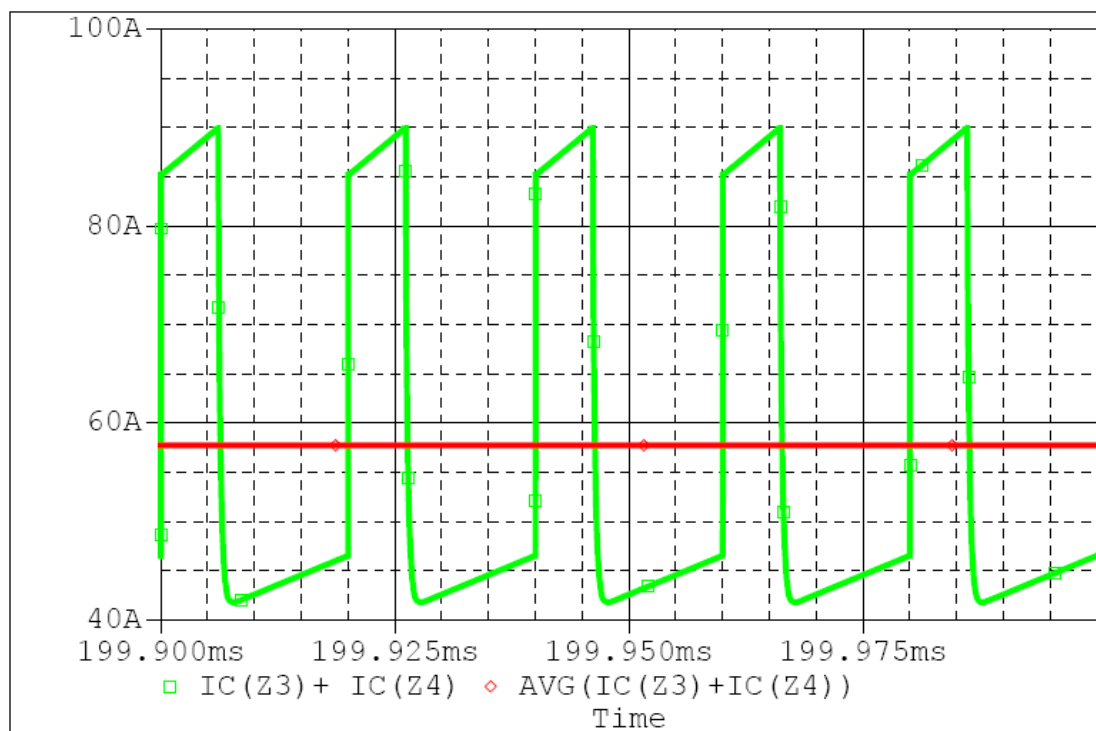
Στο Σχ. 6.64 φαίνεται το ρεύμα εξόδου πριν και μετά την εξομάλυνσή του. Η κυμάτωση του είναι μεγάλη, περίπου 47 A. Η μεγάλη κυμάτωση τόσο στην έξοδο όσο και στην είσοδο είναι χαρακτηριστικό των μετατροπέων ανύψωσης-υποβιβασμού λόγω της παλμικής μορφής των ρευμάτων εξόδου και εισόδου. Ως φίλτρο στην έξοδο χρησιμοποιήθηκε μία συστοιχία πυκνωτών (με σπείρωμα) που απαρτίζεται από την παράλληλη σύνδεση τεσσάρων κλάδων, με κάθε κλάδο να έχει δύο εν σειρά πυκνωτές ονομαστικής χωρητικότητας 1000 μF έκαστος και τάση 450 V. Οπότε προκύπτει η συνολική χωρητικότητα των 2000 μF . Η εν σειρά σύνδεση επιτρέπει τη λειτουργία στα 900 V (η μέγιστη τάση εξόδου είναι 440 V) και η σύνδεση εν παραλλήλω αυξάνει την συνολική χωρητικότητα, μειώνει την συνολική ESR σε περίπου 15 m Ω και καλύπτει τις απαιτήσεις ελάχιστης ενεργούς τιμής ρεύματος του συγκεκριμένου πυκνωτή, $I_{\text{rms,AC}} = 23,6 \text{ A}$ (40°C / 10 kHz), όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.66. Στο παράρτημα παρατίθεται μέρος του φυλλαδίου των χαρακτηριστικών του πυκνωτή εξόδου (Revox Rifa) [66]. Στο Σχ. 6.65 φαίνεται η συνεχής τάση εξόδου του μετατροπέα με μία κυμάτωση της τάξης των μερικών mV. Σε περίπτωση που θέλουμε να εκμηδενίσουμε την κυμάτωση της τάσης εξόδου μπορούμε να αυξήσουμε την χωρητικότητα του φίλτρου εξόδου προσθέτοντας π.χ. έναν ή και περισσότερους παράλληλους κλάδους.



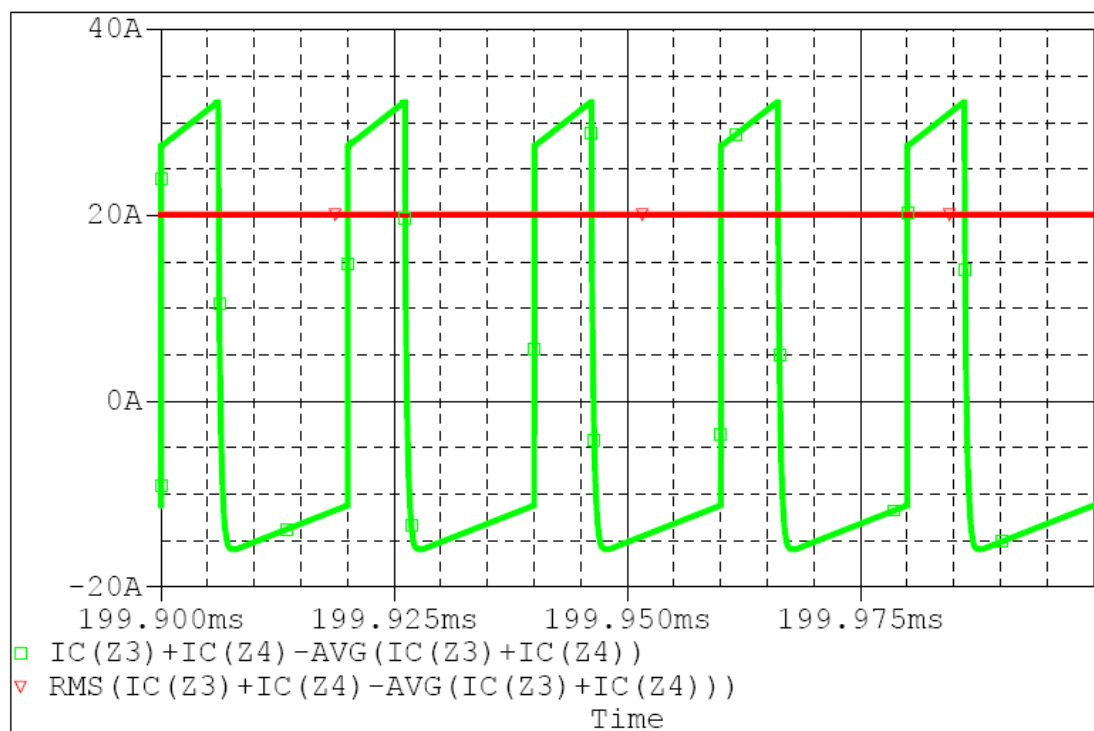
Σχήμα 6.65 Εξομαλυμένη τάση εξόδου, $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.66 Κυμάτωση ρεύματος εξόδου ίση με το εναλλασσόμενο ρεύμα συστοιχίας πυκνωτών, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εξόδου, ρεύμα κλάδου συστοιχίας πυκνωτών και ενεργός τιμή κλάδου, $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.67 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.68 Κυμάτωση ρεύματος εισόδου, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εισόδου, $\delta = 0,647$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

Στο Σχ. 6.67 φαίνεται το συνολικό ρεύμα εισόδου. Αυτό είναι και το ρεύμα με το οποίο πρέπει να τροφοδοτούν οι συσσωρευτές. Βλέπουμε πως παρουσιάζει μεγάλη κυμάτωση, που είναι χαρακτηριστικό της εισόδου των μετατροπέων ανύψωσης-υποβιβασμού και έχει μια συχνότητα κυματομορφής διπλάσια (50 kHz) της

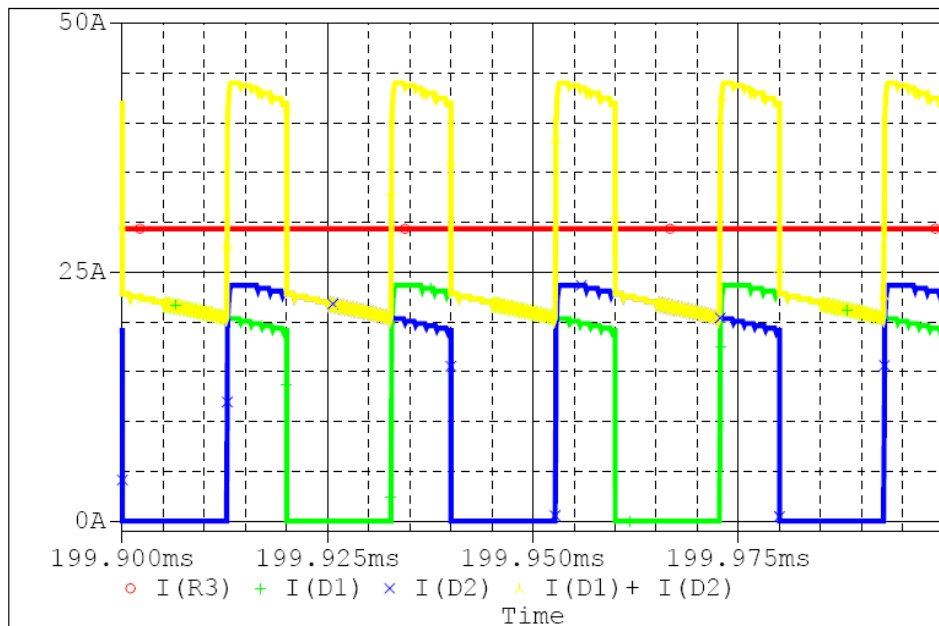
διακοπτικής συχνότητας. Σε αυτήν την περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε ένα φίλτρο LC για να αποκόψουμε την συχνότητα αυτή και για να αποφύγουμε το «επάδυνο» αυτό ρεύμα για τους συσσωρευτές. Η χωρητικότητα θα προκύψει από δύο παράλληλους κλάδους με έναν πυκνωτή ανά κλάδο των 1000 μF / 450 V, άρα συνολικά 2000 μF (βλ. Παράρτημα πυκνωτές Revox-Rifa). Σύμφωνα με το Σχ. 6.68 η επιτρεπόμενη συνολική ενεργός τιμή είναι περίπου 20 A, οπότε ακόμη και η χρήση ενός κλάδου ($I_{\text{rms,AC}} = 23,6 \text{ A}$ (40°C / 10 kHz)) θα αρκούσε για την τήρηση του ορίου, προστέθηκε όμως άλλος ένας κλάδος για αύξηση της χωρητικότητας και για να κρατήσουμε την ESR σε χαμηλά επίπεδα. Οπότε επιλέγοντας ένα πηνίο 5 μH , προκύπτει μια συχνότητα αποκοπής $f_0 \approx 1,13 \text{ kHz}$, που είναι μικρότερη του 1/10 (βλ. προηγούμενο κεφάλαιο) της συχνότητας που θέλουμε να αποκόψουμε, δηλ. τα 50 kHz.

6.3.2 Δεύτερη περίπτωση προσομοίωσης – Υποβιβασμός τάσης

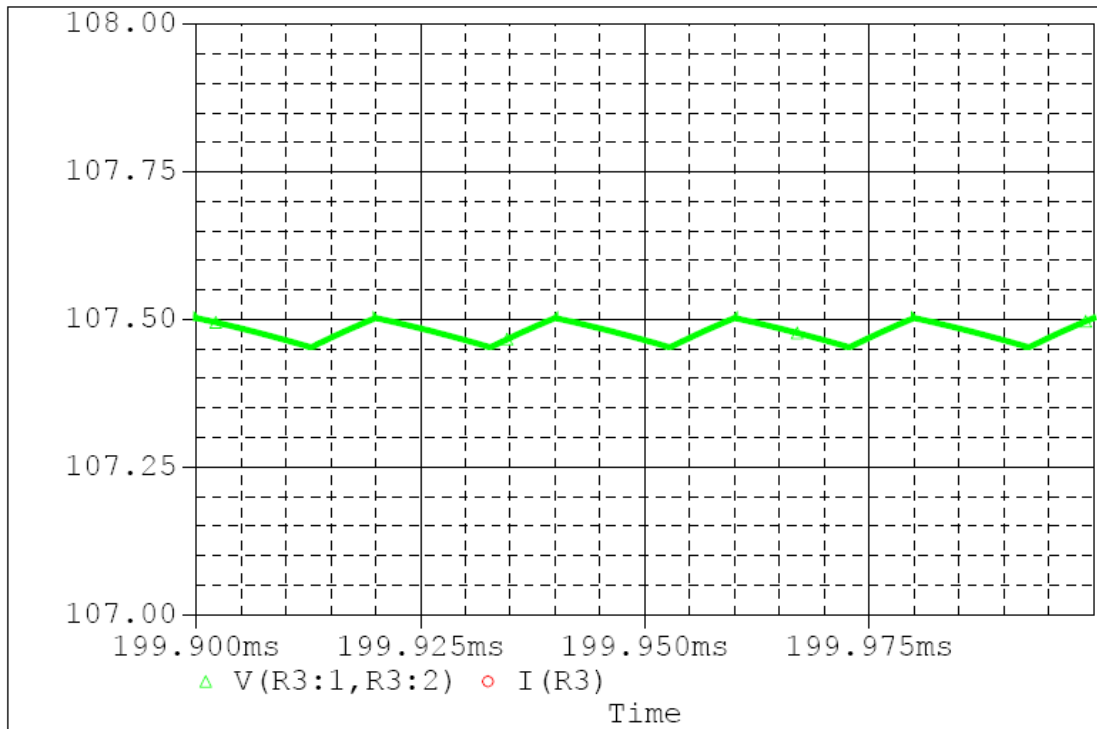
Ο κινητήρας τροφοδοτείται με το ¼ της ονομαστικής τάσης του από τον κύριο μετατροπέα. Οι συσσωρευτές τροφοδοτούν με ρεύμα 10 % του ονομαστικού ρεύματος τυμπάνου. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.12.

Πίνακας 6.12 Δεδομένα 2^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού.

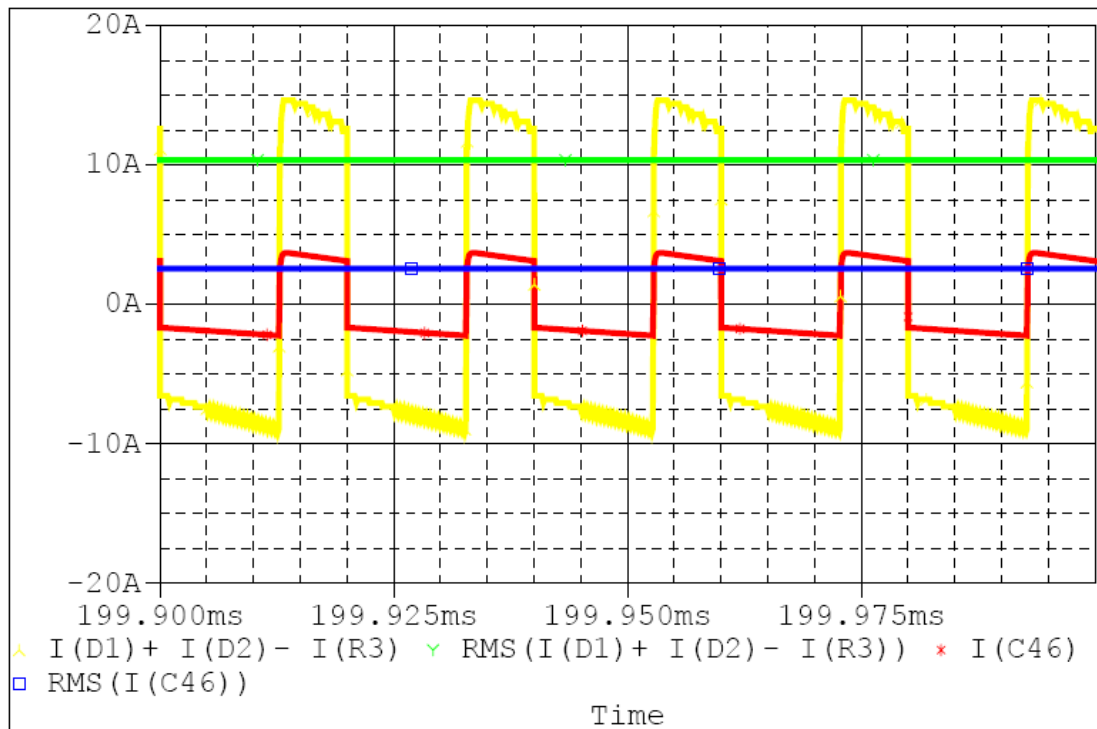
Τάση εισόδου (V_i)	240 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	13,8 A
Λόγος κατάτμησης (δ)	0,314
Τάση εξόδου (V_o)	107,5 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	29,4 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,95



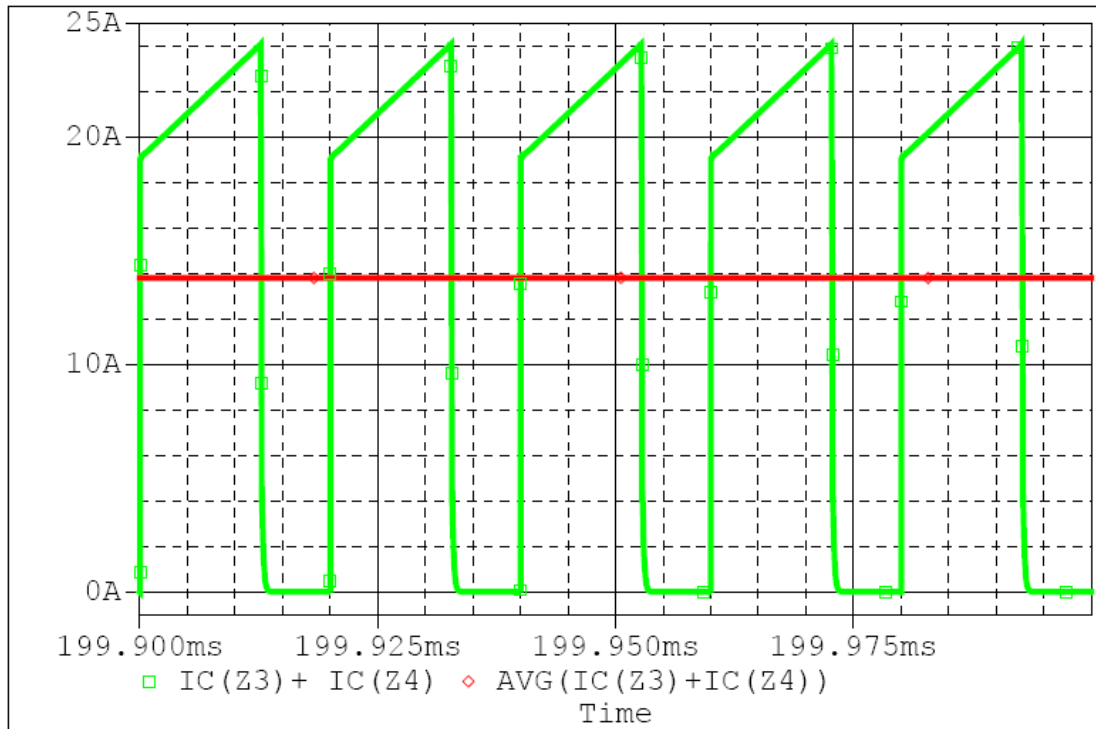
Σχήμα 6.69 Ρεύμα εξόδου με συχνότητα $2 \times 25 \text{ kHz} = 50 \text{ kHz}$, μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του και ρεύματα στις διόδους, $\delta = 0,314$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



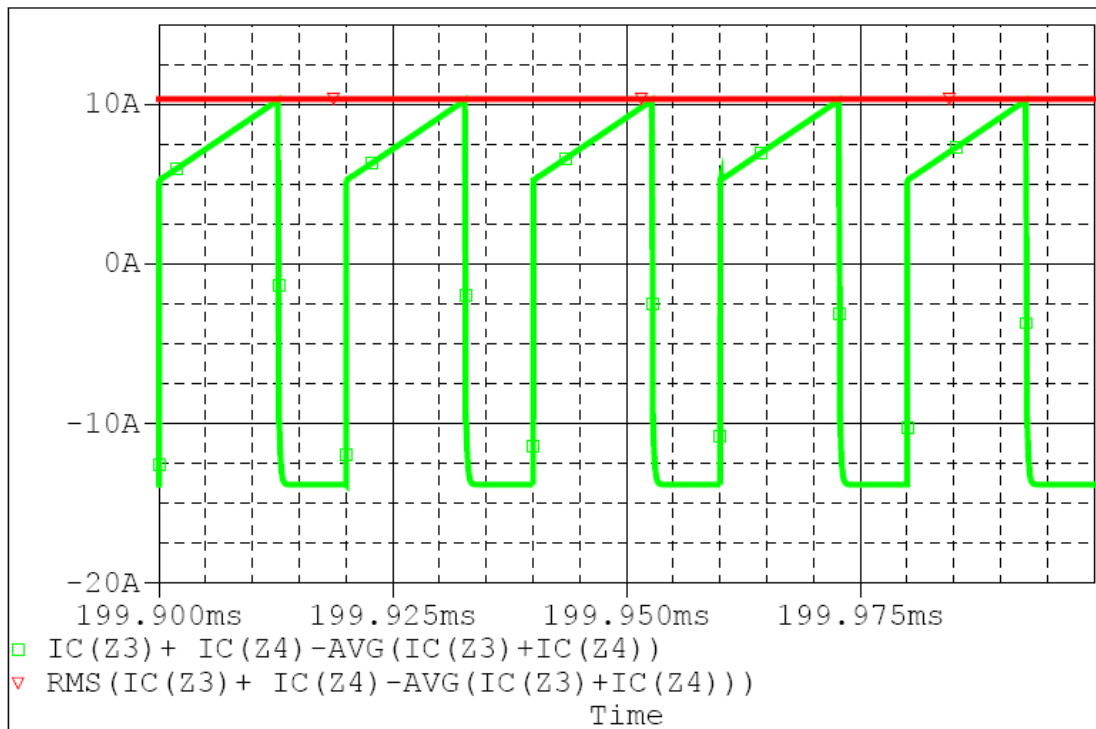
Σχήμα 6.70 Εξομαλυνμένη τάση εξόδου, $\delta = 0,314$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.71 Κυμάτωση ρεύματος εξόδου ίση με το εναλλασσόμενο ρεύμα συστοιχίας πυκνωτών, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εξόδου, ρεύμα κλάδου συστοιχίας πυκνωτών και ενεργός τιμή κλάδου, $\delta = 0,314$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.72 Συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,314$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



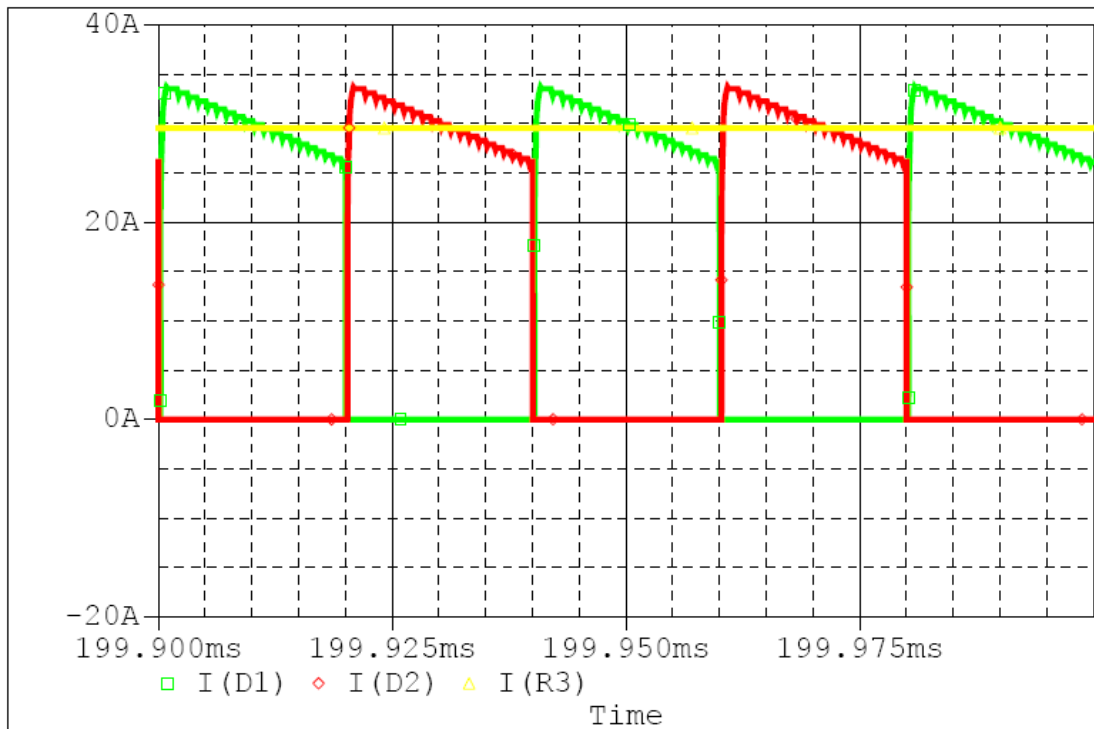
Σχήμα 6.73 Κυμάτωση ρεύματος εισόδου, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εισόδου, $\delta = 0,314$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

6.3.3 Τρίτη περίπτωση προσομοίωσης – Λόγος κατάτμησης 50 %

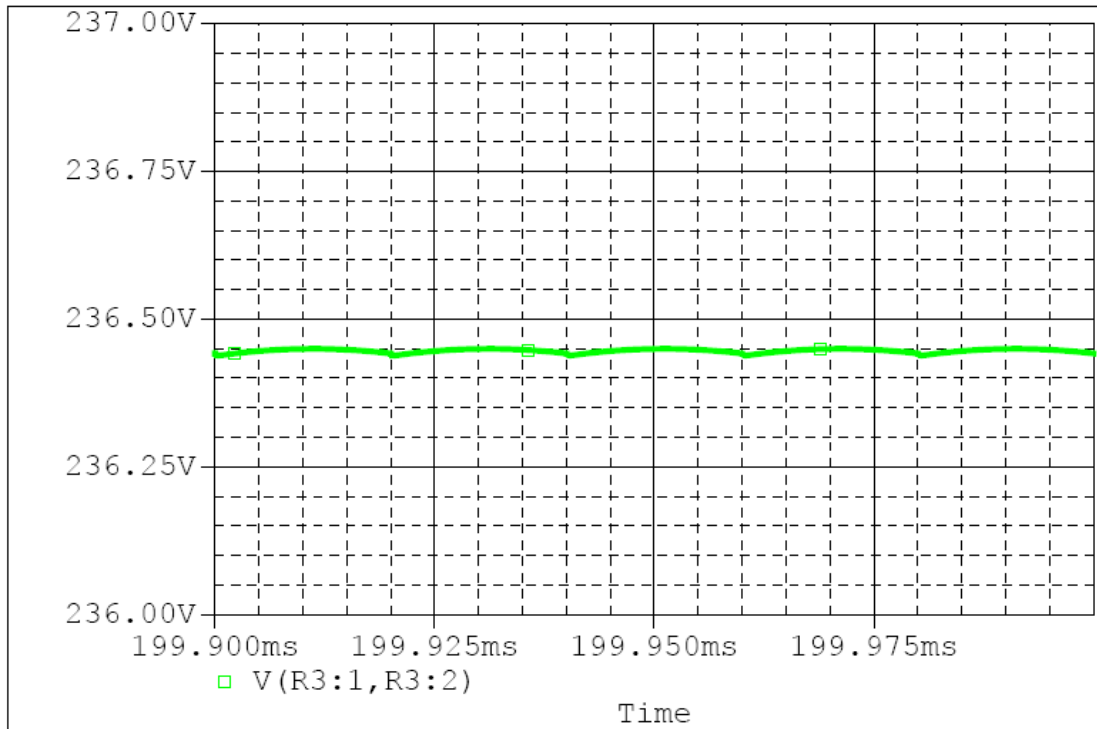
Τάση συσσωρευτών και τάση τροφοδοσίας κινητήρα από τον κύριο μετατροπέα συμπίπτουν. Οι συσσωρευτές τροφοδοτούν με ρεύμα 10 % του ονομαστικού ρεύματος τυμπάνου. Τα δεδομένα – αποτελέσματα αυτής της περίπτωσης προσομοίωσης φαίνονται στον Πίνακα 6.13.

Πίνακας 6.13 Δεδομένα 3^{ης} περίπτωσης προσομοίωσης για μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού.

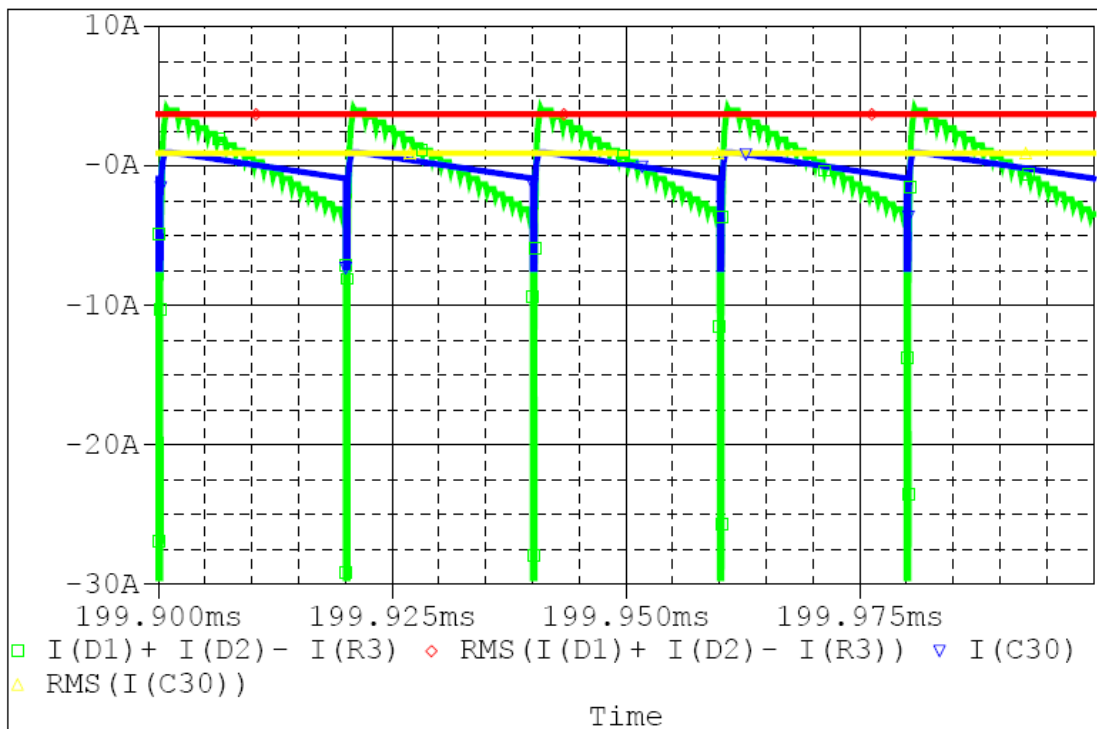
Τάση εισόδου (V_i)	240 V
Μέσο ρεύμα εισόδου (I_i)	30,4 A
Λόγος κατάτμησης (δ)	0,5
Τάση εξόδου (V_o)	236,4 V
Μέσο ρεύμα εξόδου (I_o)	29,6 A
Βαθμός απόδοσης μετατροπέα $\left(\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot I_i} \right)$	0,96



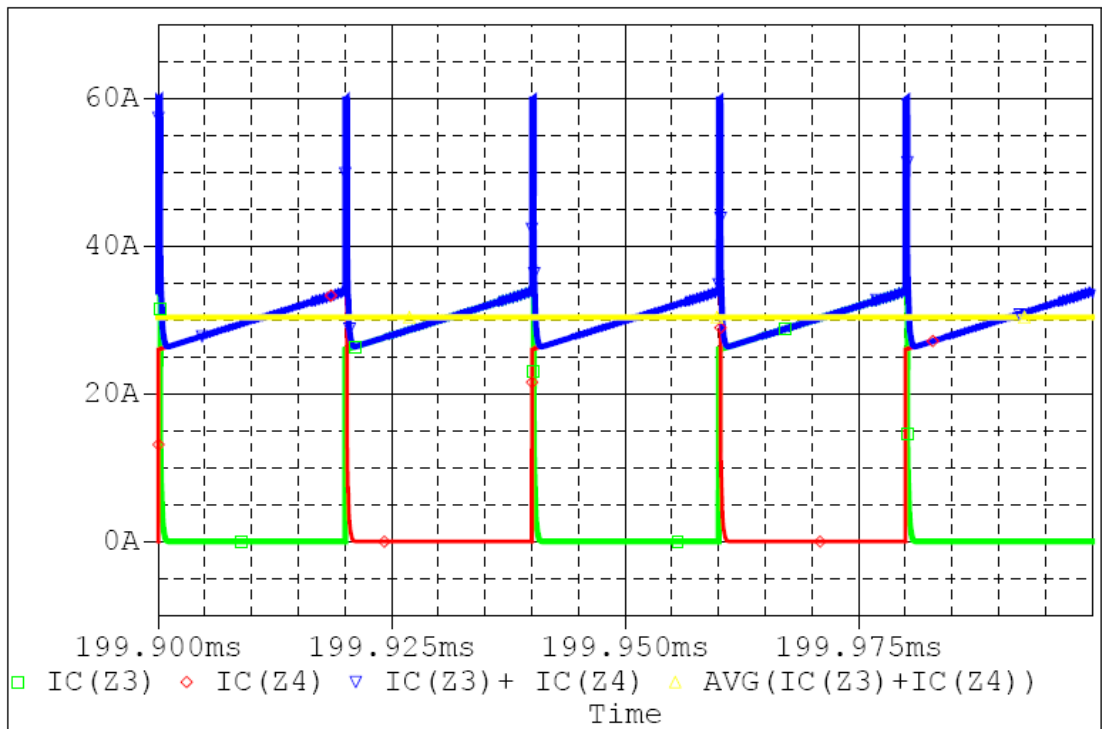
Σχήμα 6.74 Μέσο ρεύμα εξόδου ύστερα από την εξομάλυνσή του και ρεύματα στις διόδους, $\delta = 0,5$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



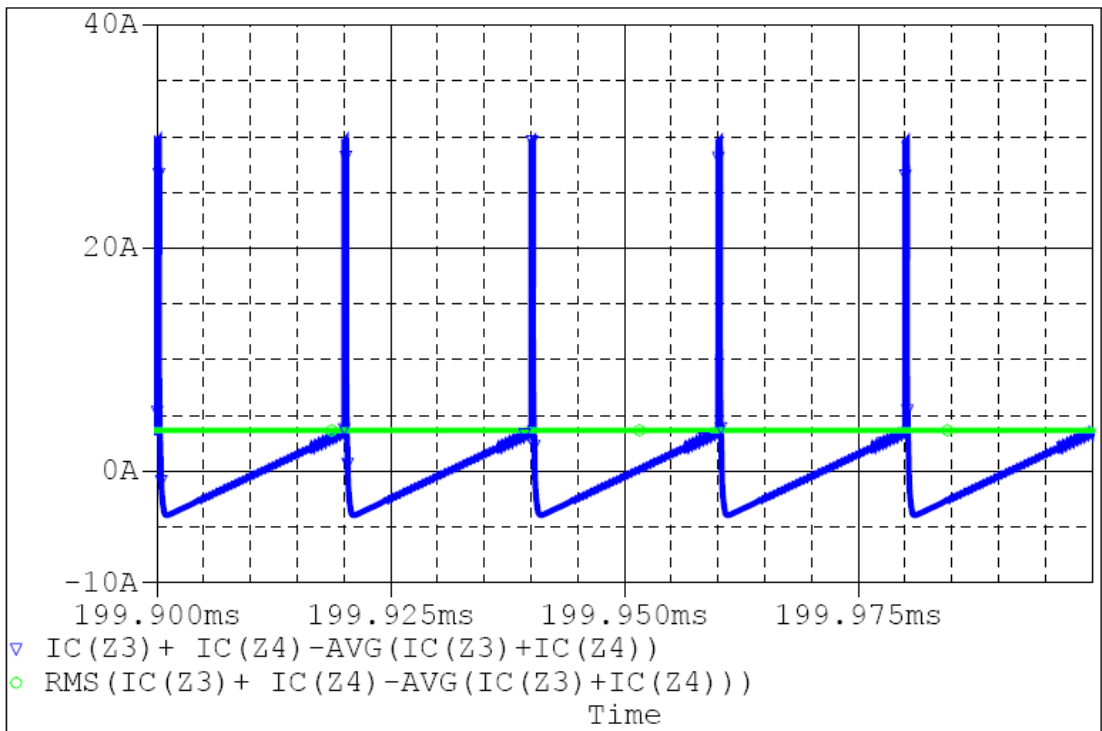
Σχήμα 6.75 Εξομαλυμένη τάση εξόδου, $\delta = 0,5$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.76 Κυμάτωση ρεύματος εξόδου ίση με το εναλλασσόμενο ρεύμα συστοιχίας πυκνωτών, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εξόδου, ρεύμα κλάδου συστοιχίας πυκνωτών και ενεργός τιμή κλάδου, $\delta = 0,5$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.77 Ρεύματα στα IGBTs, συνολικό ρεύμα εισόδου και μέσο ρεύμα εισόδου, $\delta = 0,5$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).



Σχήμα 6.78 Κυμάτωση ρεύματος εισόδου, ενεργός τιμή κυμάτωσης ρεύματος εισόδου, $\delta = 0,5$ (αποτελέσματα προσομοίωσης).

6.3.4 Παρατηρήσεις

Ως ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία ισχύος προτείνονται τα IGBT modules που χρησιμοποιήθηκαν και στους δύο προηγούμενους μετατροπείς. Αν και τα ρεύματα που διαρρέουν τα στοιχεία στον μετατροπέα buck-boost είναι μικρότερα, προτείνεται αυτή η λύση, ώστε σε περίπτωση που απαιτηθεί, να τροφοδοτήσουν τον κινητήρα πρόωσης με μεγαλύτερο ρεύμα από αυτό που έχουν σχεδιασθεί (10 % ονομαστικού). Σε αυτήν την περίπτωση δεν θα χρησιμοποιηθεί η διόδος που περιλαμβάνουν τα modules και είναι απαραίτητη η χρήση ξεχωριστής διόδου. Ως διόδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή που προτάθηκε ως εναλλακτική λύση στον μετατροπέα υποβιβασμού, RHRG75120 της Fairchild (βλ. και Παράρτημα).

Στην ειδική περίπτωση όπου η ονομαστική τάση των συσσωρευτών συμπίπτει με την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα πρόωσης, δεν απαιτείται ανύψωση ή υποβιβασμός, οπότε ο λόγος κατάμησης ισούται με $\frac{1}{2}$ οπότε είναι και ίσος με τον λόγο $1/N$, $N = 2$. Έτσι εξηγούνται οι μικρότερες κυματώσεις στα ρεύματα και στις τάσεις εξόδου και εισόδου του μετατροπέα (Πίνακας 6.14).

Ο θεωρητικός βαθμός απόδοσης που προκύπτει από την προσομοίωση για τον μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού είναι περίπου 95 %. Είναι μικρότερος από τον θεωρητικό ονομαστικό βαθμό απόδοσης των μετατροπέων υποβιβασμού και ανύψωσης. Ως παράλληλο ξεχωριστό σύστημα η βοηθητική ενεργειακή πηγή δεν συνεισφέρει άμεσα στον συνολικό ονομαστικό βαθμό απόδοσης του κινητήριου συστήματος. Μπορεί όμως να συνεισφέρει έμμεσα βελτιώνοντας την απόκριση του κινητήριου συστήματος σε μεταβατικές καταστάσεις.

Πίνακας 6.14 Κυματώσεις ρεύματος και τάσης εξόδου για διαφορετικές περιπτώσεις προσομοιώσεων στον μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού διαδοχικής αγωγής δύο κλάδων.

	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Κυμάτωση ρεύματος εξόδου (mA)	6,47	13,6	1,4
Κυμάτωση τάσης εξόδου (mV)	96,3	50	11,26
Κυμάτωση ρεύματος εξόδου (%)	0,0217	0,0463	0,00473
Κυμάτωση τάσης εξόδου (%)	0,0220	0,0465	0,00477

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

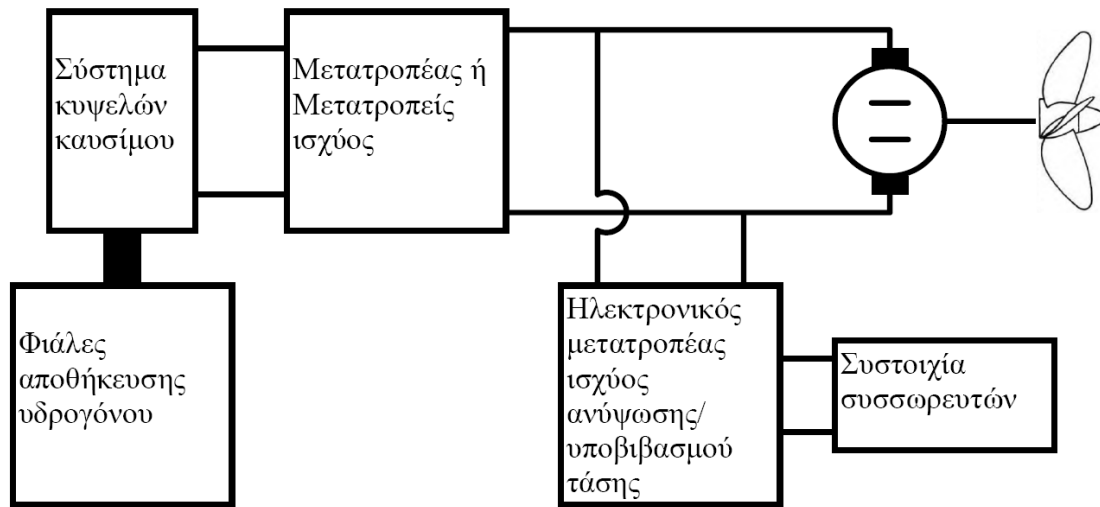
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Χαρακτηριστικά ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος πρόωσης – Συμπεράσματα

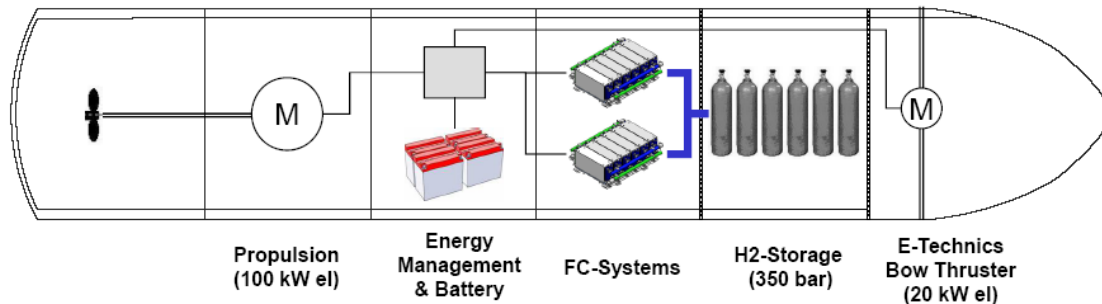
Στο τελευταίο κεφάλαιο θα γίνει μια τεχνική περιγραφή των κύριων υποσυστημάτων που απαρτίζουν το ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα με σκοπό την εκτίμηση του μεγέθους τους. Θα παρουσιασθούν δύο πιθανές εφαρμογές σε σκάφη των οποίων οι απαιτήσεις ισχύος ταιριάζουν με την ισχύ του συστήματος που μελετήθηκε. Τέλος θα γίνει η εξαγωγή των συμπερασμάτων σχετικών με τη δομή και τη λειτουργία του συστήματος που σχεδιάστηκε.

7.1 Γενική τοπολογία συστήματος

Στο Σχ. 7.1 φαίνεται η γενική τοπολογία του κινητήριου συστήματος πρόωσης. Ιδιαίτερη προσοχή και βαρύτητα πρέπει να δοθεί στον σχεδιασμό και στον χωρισμό των επιμέρους συστημάτων για να καλύπτουν τις αρχές ασφαλείας ναυτικών εφαρμογών κυσέλων καυσίμου που αναφέρονται στην παράγραφο 3.3 στο τρίτο κεφάλαιο. Μια βασική αρχή ασφαλείας είναι ο διαχωρισμός των επιμέρους συστημάτων που απαρτίζουν το ενεργειακό σύστημα πρόωσης.



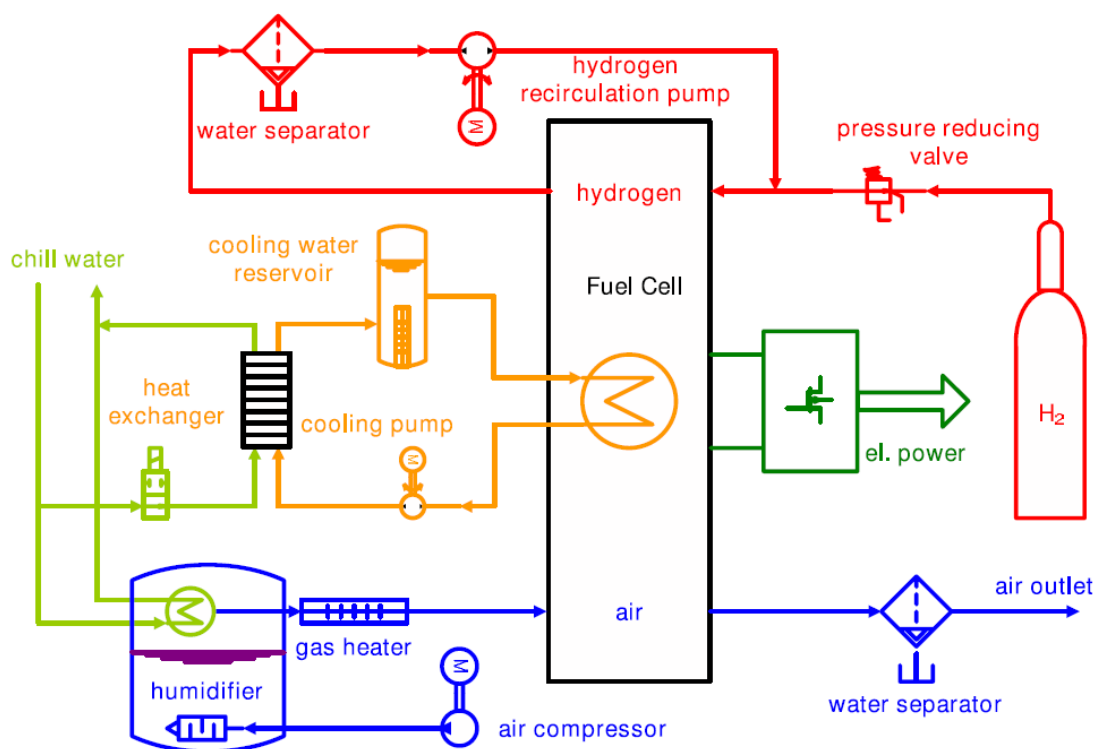
Σχήμα 7.1 Γενική τοπολογία ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος πρόωσης.



Σχήμα 7.2 Διαχωρισμός των υποσυστημάτων του ενεργειακού συστήματος πρόωσης [27].

Στο Σχ. 7.2 παρουσιάζεται ένα πολύ σημαντικό κριτήριο ασφάλειας, ο διαχωρισμός των υποσυστημάτων του ενεργειακού συστήματος πρόωσης, όπως αυτό εφαρμόστηκε σε αντίστοιχη ναυτική εφαρμογή κυψελών καυσίμου [34]. Αντίστοιχος διαχωρισμός προτείνεται και για το υπό μελέτη σύστημα.

Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου απαιτεί τη χρήση μιας σειράς βοηθητικών μηχανημάτων. Όπως έχουμε αναφέρει, οι βοηθητικές συσκευές αντλούν το 10 – 15 % της παραγόμενης ενέργειας.



Σχήμα 7.3 Σχηματική αναπαράσταση ενός πλήρους συστήματος κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης [70].

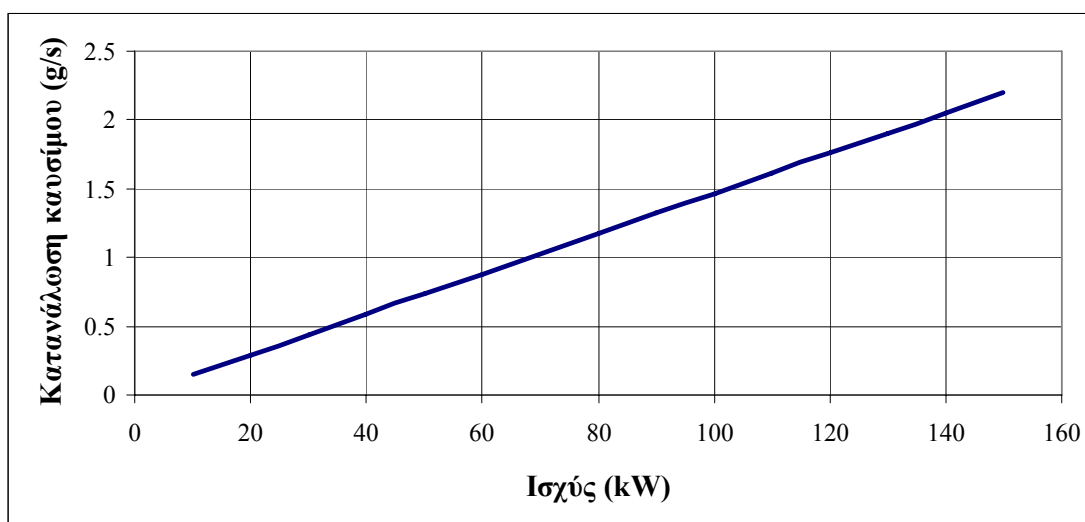
Στην παράγραφο 2.10 του δεύτερου κεφαλαίου έχει περιγραφεί ένα σύστημα κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης μαζί με τα βοηθητικά του μηχανήματα. Στο Σχ. 7.3 φαίνεται ένα σχηματικό πλήρους συστήματος κυψέλης καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης μαζί με τα βοηθητικά του μηχανήματα το οποίο προτείνεται για το σύστημα του παρόντος σχεδιασμού. Το βάρος του και ο όγκος του πρέπει να ληφθεί υπόψη στον προσδιορισμό του συνολικού μεγέθους του συστήματος.

7.2 Αποθήκευση και κατανάλωση καυσίμου

Για την αποθήκευση του καυσίμου θα θεωρηθεί η χρήση συνθετικών κυλίνδρων που περιέχουν πεπιεσμένο αέριο υδρογόνο. Τα χαρακτηριστικά της κάθε φιάλης συνοψίζονται στον Πίνακα 7.1. Θα χρησιμοποιηθούν 15 συνθετικοί κύλινδροι υψηλής πίεσης (300 bar) οι οποίοι θα περιέχουν συνολικά 46,5 kg καυσίμου καθαρότητας 99,999 %, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή [53]. Από πληροφορίες του κατασκευαστή (βλ. και παράγραφο 5.3 κεφάλαιο 5) προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις (Σχ. 7.4 και 7.5) σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου και την διάρκεια πλεύσης του σκάφους για διάφορες τιμές ισχύος.

Πίνακας 7.1 Χαρακτηριστικά μεθόδου αποθήκευσης καυσίμου [16].

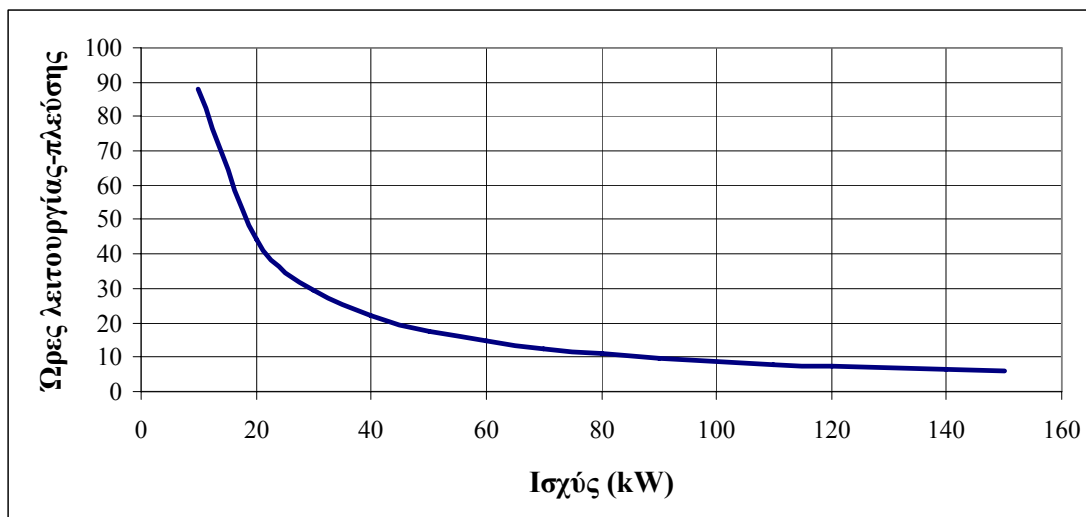
	Συνθετικός κύλινδρος 147 L, 300 bar
Φάση υδρογόνου	Αέρια
Μάζα άδειου δοχείου	100 kg
Μάζα υδρογόνου	3,1 kg
Απόδοση αποθήκευσης (μάζα H ₂ /μάζα δοχείου)	3,1 %
Ειδική ενέργεια	1,2 kWh/kg
Όγκος δοχείου	220 L
Μάζα H ₂ /μονάδα όγκου	0,014 kg/L



Σχήμα 7.4 Κατανάλωση καυσίμου συναρτήσει της μικτής ισχύος της κυψέλης καυσίμου.

Πίνακας 7.2 Ώρες λειτουργίας και κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με την ισχύ της κυψέλης καυσίμου.

Μικτή ισχύς (kW)	Κατανάλωση καυσίμου (g/s)	Ώρες λειτουργίας (για 46,5 kg καύσιμο)
0	0	-
10	0.146666667	88.0681818
20	0.293333333	44.0340909
30	0.44	29.3560606
40	0.586666667	22.0170455
50	0.733333333	17.6136364
60	0.88	14.6780303
70	1.026666667	12.5811688
80	1.173333333	11.0085227
90	1.32	9.78535354
100	1.466666667	8.80681818
110	1.613333333	8.00619835
120	1.76	7.33901515
130	1.906666667	6.77447552
140	2.053333333	6.29058442
150	2.2	5.87121212



Σχήμα 7.5 Ώρες λειτουργίας συναρτήσει της μικτής ισχύος της κυψέλης καυσίμου.

Από το Σχ. 7.5 και τον Πίνακα 7.2 παρατηρούμε ότι το σκάφος δύναται να κινείται χρησιμοποιώντας το σύνολο της ονομαστικής ισχύος περί τις έξι ώρες. Βέβαια στην πραγματικότητα δεν λειτουργεί συνέχεια υπό τη μέγιστη ισχύ, οπότε θα αυξηθούν και οι ώρες πλεύσης του.

Το καθαρό βάρος κάθε φιάλης είναι 103 kg, οπότε οι 15 φιάλες ζυγίζουν 1545 kg και καταλαμβάνουν έναν όγκο περί τα 3300 L ή 3,3 m³.

7.3 Εκτίμηση συνολικού βάρους συστήματος

Για την εκτίμηση του συνολικού βάρους του συστήματος θα ληφθούν υπόψη τα βάρη των υποσυστημάτων που το απαρτίζουν. Από πληροφορίες του κεφαλαίου 5 προκύπτουν τα βάρη του συστήματος κυψελών καυσίμου και του κινητήρα πρόωσης. Για το βάρος των βοηθητικών μηχανημάτων για την λειτουργία της κυψέλης θεωρήθηκε ένα ποσοστό⁶ επί του καθαρού βάρους της κυψέλης ίσο με 30 % [71]. Σε περίπτωση χρήσης συσσωρευτών μεγαλύτερης χωρητικότητας, σε σχέση με αυτούς που προτάθηκαν στο κεφάλαιο 5, πρέπει να συνεκτιμηθεί το επιπλέον βάρος τους.

Πίνακας 7.3 Εκτιμώμενο βάρος των υπό μελέτη συστημάτων.

	Πρώτο σύστημα (150 kW)	Δεύτερο σύστημα (2 x 75 kW)
Κυψέλες καυσίμου (καθαρό βάρος)	400 kg	700 kg (2 x 350 kg)
Βοηθητικά μηχανήματα κυψελών (30 % του συνολικού βάρους κυψελών)	120 kg	210 kg
Κινητήρας πρόωσης	610 kg	610 kg
Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος	50 kg	100 kg
Αποθήκευση καυσίμου – υδρογόνου	1545 kg	1545 kg
Συσσωρευτές ασφαλείας	200 kg	200 kg
Σύνολο	2965 kg	3365 kg

⁶ Η θεώρηση του ποσοστού αυτού προήλθε από τα δεδομένα μιας μελέτης συστήματος κυψελών καυσίμου [71] η οποία περιελάμβανε και πληροφορίες για το μέγεθος των βοηθητικών μηχανημάτων του συστήματος. Τα δεδομένα αυτά προσαρμόστηκαν στα χαρακτηριστικά της παρούσας μελέτης.

Στον Πίνακα 7.3 συνοψίζονται τα παραπάνω δεδομένα και προκύπτει το τελικό εκτιμώμενο βάρος για τα δύο υπό μελέτη συστήματα.

Στον Πίνακα 7.4 έχουν συγκεντρωθεί οι εκτιμώμενοι όγκοι που καταλαμβάνουν τα επιμέρους συστήματα ως μονάδες σύμφωνα με τις πληροφορίες των κατασκευαστών. Μαζί με το βάρος, οι όγκοι των επιμέρους συστημάτων, είναι απαραίτητα στον σχεδιαστή του συστήματος με σκοπό την απώτερη εφαρμογή τους σε ένα σκάφος.

Πίνακας 7.4 Εκτιμώμενοι όγκοι μονάδων υποσυστημάτων κινητηρίου συστήματος.

Κυψέλες καυσίμου	0,55 m ³
Κινητήρας πρόωσης	0,39 m ³
Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος	0,5 – 0,8 m ³
Αποθήκευση καυσίμου – υδρογόνου	3,3 m ³
Συσσωρευτές ασφαλείας	0,1 m ³

Από τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται πως το μεγαλύτερο μερίδιο στην εκτίμηση του συνολικού μεγέθους τους σκάφους έχει το σύστημα της αποθήκευσης του καυσίμου. Είναι σημαντικός ο σωστός σχεδιασμός του ώστε να πληροί τόσο τις απαιτήσεις ισχύος και αυτονομίας όσο και τις απαιτήσεις χώρου και ασφάλειας του σκάφους.

7.4 Παραδείγματα εφαρμογής συστήματος πρόωσης σε σκάφη

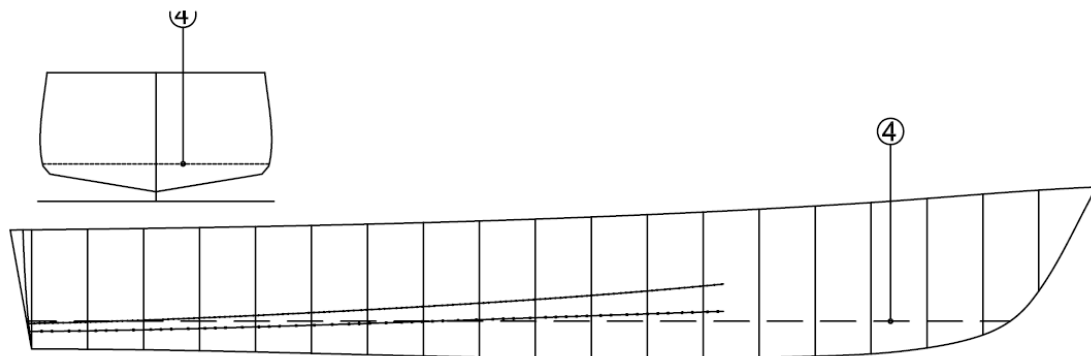
Στο κεφάλαιο 5 θεωρήσαμε τον ολικό βαθμό απόδοσης πρόωσης ίσο με 0,73. Αυτός ο ολικός βαθμός απόδοσης, για τη δεδομένη ονομαστική ισχύ του ηλεκτρικού κινητήρα πρόωσης, 122 kW (ή 166 PS), έχει ως αποτέλεσμα μια ισχύ ρυμούλκησης ίση με 121 PS. Στους Πίνακες 7.5 και 7.6 παρατίθενται τα αποτελέσματα δοκιμών και ισχύος ρυμούλκησης δύο μοντέλων σκαφών, όπως τα παρείχε ο κ. Γρηγόρης Γρηγορόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.. Το πρώτο είναι ένας σκάφος ημιεκτοπίσματος με εκτόπισμα 59,7 τόνους και το δεύτερο είναι μία ολισθακάτος εκτοπίσματος 9,91 τόνων.

Το πρώτο σκάφος, με το μεγάλο εκτόπισμα, έχει ένα μήκος ισάλου 19,68 m. Βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμών η απαιτούμενη ισχύς ρυμούλκησης του περιορίζει την εφαρμογή του συστήματός μας (E.H.P. = 121 PS) στο διάστημα ισχύων ρυμούλκησης μεταξύ 45,9 και 122,1 PS και την ταχύτητα του σκάφους στο διάστημα μεταξύ 8 και 10 κόμβων (Πίνακας 7.5), ύστερα και από την κατάλληλη επιλογή έλικας. Παρόλο που τα διαστήματα αυτά είναι περιορισμένα, λόγω του μεγαλύτερου εκτοπίσματος οπότε και του διαθέσιμου χώρου, είναι πιθανότερη η εφαρμογή του συστήματος πρόωσης που σχεδιάστηκε σε ένα τέτοιου είδους σκάφος καθώς παρέχει περισσότερη ευχέρεια στο σχεδιαστή για την τοποθέτηση των επιμέρους συστημάτων στους διαθέσιμους χώρους του σκάφους.

Η δυνατή ισχύς ρυμούλκησης που προκύπτει από τον σχεδιασμό του ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος μπορεί να καλύψει το μεγαλύτερο μέρος των απαιτήσεων ισχύος ρυμούλκησης στην περίπτωση της ολισθακάτου με μήκος ισάλου 14,76 m. Το αντίστοιχο διάστημα ισχύων ρυμούλκησης είναι εδώ μεταξύ 3,7 και 114,2 PS, πάντα όμως με την προϋπόθεση να διατηρείται η σχεδιαστική τιμή του εκτοπίσματος. Το αντίστοιχο διάστημα ταχυτήτων, που μπορούν να αναπτυχθούν, είναι μεταξύ 5,17 και 18,03 κόμβων (Πίνακας 7.6). Στο Σχ. 7.6 φαίνεται το σχέδιο γραμμών της γάστρας της ολισθακάτου.

Πίνακας 7.5 Αποτελέσματα δοκιμών και ρυμούλκησης για σκάφος ημικτοπίσματος εκτοπίσματος 59,7 τόνων [Δεδομένα από Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Γ. Ι. Γρηγορόπουλο].

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΙΣΧΥΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΕΩΣ										
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ C2 : Δ=59.703 mt, έμπροσθη διαγωγή 0.345 m, αρχική μορφή πλήρης										
Ship Name	:M/Y ALIKI									
Test Condition	: C2									
Model Number	: 161-01					Date : 03.05.2001				
Model Scale =	1: 10					Trip Wires :YES				
Ship Data					Model Data					
LWL	:	19.68	Metres	LWL	:	1.968	Metres			
T	:	1.71	Metres	T	:	0.171	Metres			
Trim	:	0.345m by bow								
Wetted Surf.:		112.10	m ²	Wetted Sur.:		1.121	m ²			
S. W. Temp.:		15.00	Degrees	F. W. Temp.:		17.00	Degrees			
Dcf*1000	:	0.4000								
VM	FN	VS	RNS	CFS	CTS	RS	EHP	Vkn	RS/DISPL	
m/s		m/s	*10 ⁻⁸	*10 ³	*10 ³	Kp	PS	Knots	Kp/Ton	
1.301	0.296	4.11	0.681	2.204	8.424	836	45.9	8.00	14.003	
1.464	0.333	4.63	0.767	2.166	10.384	1305	80.6	9.00	21.858	
1.627	0.370	5.15	0.852	2.132	11.468	1780	122.1	10.00	29.814	
1.789	0.407	5.66	0.937	2.103	12.039	2259	170.4	11.00	37.842	
1.952	0.444	6.17	1.023	2.077	14.161	3164	260.4	12.00	52.990	
2.115	0.481	6.69	1.108	2.053	15.898	4170	371.9	13.00	69.844	
2.277	0.518	7.20	1.193	2.031	16.812	5111	490.7	14.00	85.603	
2.440	0.555	7.72	1.278	2.011	16.197	5654	581.7	15.00	94.703	
2.607	0.593	8.24	1.366	1.992	15.011	5982	657.5	16.03	100.195	
2.770	0.630	8.76	1.451	1.975	13.845	6229	727.5	17.03	104.331	
2.928	0.666	9.26	1.534	1.960	12.778	6423	793.0	18.00	107.586	
3.098	0.705	9.80	1.623	1.945	11.845	6666	870.7	19.04	111.649	
3.261	0.742	10.31	1.708	1.931	11.074	6905	949.4	20.05	115.649	
Displacement in S.W. = 59.70 Tonnes										



Σχήμα 7.6 Σχέδιο γραμμών γάστρας μοντέλου ολισθακάτου NTUA 113/95 [Δεδομένα από Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Γ. Ι. Γρηγορόπουλο].

Πίνακας 7.6 Αποτελέσματα δοκιμών και ρυμούλκησης για ολισθάκατο εκτοπίσματος 9,91 τόνων [Δεδομένα από Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Γ. Ι. Γρηγορόπουλο].

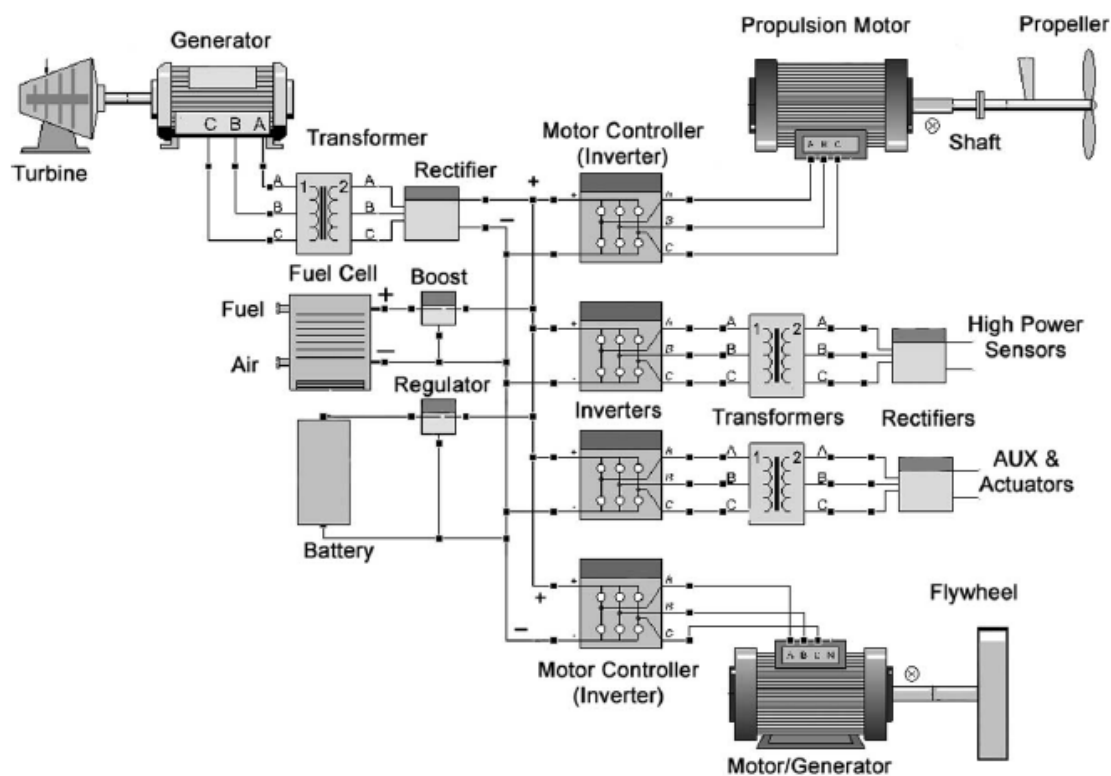
Ship Name : NTUA 113/95																																																																																																																																																																																																																	
Test Condition : CDL=3.00																																																																																																																																																																																																																	
Model Number : 113-95	Date : 03-04-1999																																																																																																																																																																																																																
Model Scale = 1: 7	Trip Wires :NO																																																																																																																																																																																																																
Ship Data																																																																																																																																																																																																																	
LWL : 14.76 Metres	Model Data																																																																																																																																																																																																																
BWL : 3.42 Metres	LWL : 2.109 Metres																																																																																																																																																																																																																
T : 0.56 Metres	BWL : 0.488 Metres																																																																																																																																																																																																																
Trim : LEVEL KEEL	T : 0.080 Metres																																																																																																																																																																																																																
Wetted Surf.: 39.58 m ²	Wetted Sur.: 0.808 m ²																																																																																																																																																																																																																
S. W. Temp. : 15.00 Degrees	F. W. Temp.: 25.50 Degrees																																																																																																																																																																																																																
Dcf*1000 : 0.0000																																																																																																																																																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>VM</th> <th>FN</th> <th>VS</th> <th>RNS</th> <th>CFS</th> <th>CTS</th> <th>RS</th> <th>EHP</th> <th>Vkn</th> <th>RS/DISPL</th> </tr> <tr> <th>m/s</th> <th></th> <th>m/s</th> <th>*10⁻⁸</th> <th>*10³</th> <th>*10³</th> <th>Kp</th> <th>PS</th> <th>Knots</th> <th>Kp/Ton</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.005</td><td>0.221</td><td>2.66</td><td>0.330</td><td>2.462</td><td>7.139</td><td>104</td><td>3.7</td><td>5.17</td><td>10.549</td></tr> <tr><td>1.251</td><td>0.275</td><td>3.31</td><td>0.411</td><td>2.380</td><td>8.083</td><td>183</td><td>8.1</td><td>6.43</td><td>18.506</td></tr> <tr><td>1.501</td><td>0.330</td><td>3.97</td><td>0.493</td><td>2.314</td><td>9.121</td><td>298</td><td>15.8</td><td>7.72</td><td>30.063</td></tr> <tr><td>1.746</td><td>0.384</td><td>4.62</td><td>0.574</td><td>2.261</td><td>9.191</td><td>406</td><td>25.0</td><td>8.98</td><td>40.993</td></tr> <tr><td>2.000</td><td>0.440</td><td>5.29</td><td>0.657</td><td>2.216</td><td>8.954</td><td>519</td><td>36.6</td><td>10.29</td><td>52.398</td></tr> <tr><td>2.252</td><td>0.495</td><td>5.96</td><td>0.740</td><td>2.177</td><td>8.009</td><td>589</td><td>46.8</td><td>11.58</td><td>59.425</td></tr> <tr><td>2.501</td><td>0.550</td><td>6.62</td><td>0.822</td><td>2.144</td><td>7.346</td><td>666</td><td>58.7</td><td>12.86</td><td>67.219</td></tr> <tr><td>2.752</td><td>0.605</td><td>7.28</td><td>0.905</td><td>2.114</td><td>6.550</td><td>719</td><td>69.8</td><td>14.15</td><td>72.577</td></tr> <tr><td>3.000</td><td>0.660</td><td>7.94</td><td>0.986</td><td>2.088</td><td>5.943</td><td>775</td><td>82.0</td><td>15.43</td><td>78.250</td></tr> <tr><td>3.252</td><td>0.715</td><td>8.60</td><td>1.069</td><td>2.063</td><td>5.501</td><td>843</td><td>96.7</td><td>16.72</td><td>85.109</td></tr> <tr><td>3.505</td><td>0.771</td><td>9.27</td><td>1.152</td><td>2.041</td><td>5.186</td><td>923</td><td>114.2</td><td>18.03</td><td>93.213</td></tr> <tr><td>3.749</td><td>0.824</td><td>9.92</td><td>1.232</td><td>2.022</td><td>4.877</td><td>993</td><td>131.4</td><td>19.28</td><td>100.275</td></tr> <tr><td>4.015</td><td>0.883</td><td>10.62</td><td>1.320</td><td>2.002</td><td>4.656</td><td>1088</td><td>154.0</td><td>20.65</td><td>109.799</td></tr> <tr><td>4.259</td><td>0.936</td><td>11.27</td><td>1.400</td><td>1.985</td><td>4.480</td><td>1178</td><td>176.9</td><td>21.90</td><td>118.888</td></tr> <tr><td>4.509</td><td>0.991</td><td>11.93</td><td>1.482</td><td>1.970</td><td>4.343</td><td>1280</td><td>203.5</td><td>23.19</td><td>129.177</td></tr> <tr><td>4.741</td><td>1.042</td><td>12.54</td><td>1.558</td><td>1.956</td><td>4.203</td><td>1369</td><td>229.0</td><td>24.38</td><td>138.205</td></tr> <tr><td>4.981</td><td>1.095</td><td>13.18</td><td>1.637</td><td>1.942</td><td>4.041</td><td>1453</td><td>255.3</td><td>25.62</td><td>146.672</td></tr> <tr><td>5.205</td><td>1.144</td><td>13.77</td><td>1.711</td><td>1.930</td><td>3.854</td><td>1513</td><td>277.8</td><td>26.77</td><td>152.738</td></tr> </tbody> </table>										VM	FN	VS	RNS	CFS	CTS	RS	EHP	Vkn	RS/DISPL	m/s		m/s	*10 ⁻⁸	*10 ³	*10 ³	Kp	PS	Knots	Kp/Ton	1.005	0.221	2.66	0.330	2.462	7.139	104	3.7	5.17	10.549	1.251	0.275	3.31	0.411	2.380	8.083	183	8.1	6.43	18.506	1.501	0.330	3.97	0.493	2.314	9.121	298	15.8	7.72	30.063	1.746	0.384	4.62	0.574	2.261	9.191	406	25.0	8.98	40.993	2.000	0.440	5.29	0.657	2.216	8.954	519	36.6	10.29	52.398	2.252	0.495	5.96	0.740	2.177	8.009	589	46.8	11.58	59.425	2.501	0.550	6.62	0.822	2.144	7.346	666	58.7	12.86	67.219	2.752	0.605	7.28	0.905	2.114	6.550	719	69.8	14.15	72.577	3.000	0.660	7.94	0.986	2.088	5.943	775	82.0	15.43	78.250	3.252	0.715	8.60	1.069	2.063	5.501	843	96.7	16.72	85.109	3.505	0.771	9.27	1.152	2.041	5.186	923	114.2	18.03	93.213	3.749	0.824	9.92	1.232	2.022	4.877	993	131.4	19.28	100.275	4.015	0.883	10.62	1.320	2.002	4.656	1088	154.0	20.65	109.799	4.259	0.936	11.27	1.400	1.985	4.480	1178	176.9	21.90	118.888	4.509	0.991	11.93	1.482	1.970	4.343	1280	203.5	23.19	129.177	4.741	1.042	12.54	1.558	1.956	4.203	1369	229.0	24.38	138.205	4.981	1.095	13.18	1.637	1.942	4.041	1453	255.3	25.62	146.672	5.205	1.144	13.77	1.711	1.930	3.854	1513	277.8	26.77	152.738
VM	FN	VS	RNS	CFS	CTS	RS	EHP	Vkn	RS/DISPL																																																																																																																																																																																																								
m/s		m/s	*10 ⁻⁸	*10 ³	*10 ³	Kp	PS	Knots	Kp/Ton																																																																																																																																																																																																								
1.005	0.221	2.66	0.330	2.462	7.139	104	3.7	5.17	10.549																																																																																																																																																																																																								
1.251	0.275	3.31	0.411	2.380	8.083	183	8.1	6.43	18.506																																																																																																																																																																																																								
1.501	0.330	3.97	0.493	2.314	9.121	298	15.8	7.72	30.063																																																																																																																																																																																																								
1.746	0.384	4.62	0.574	2.261	9.191	406	25.0	8.98	40.993																																																																																																																																																																																																								
2.000	0.440	5.29	0.657	2.216	8.954	519	36.6	10.29	52.398																																																																																																																																																																																																								
2.252	0.495	5.96	0.740	2.177	8.009	589	46.8	11.58	59.425																																																																																																																																																																																																								
2.501	0.550	6.62	0.822	2.144	7.346	666	58.7	12.86	67.219																																																																																																																																																																																																								
2.752	0.605	7.28	0.905	2.114	6.550	719	69.8	14.15	72.577																																																																																																																																																																																																								
3.000	0.660	7.94	0.986	2.088	5.943	775	82.0	15.43	78.250																																																																																																																																																																																																								
3.252	0.715	8.60	1.069	2.063	5.501	843	96.7	16.72	85.109																																																																																																																																																																																																								
3.505	0.771	9.27	1.152	2.041	5.186	923	114.2	18.03	93.213																																																																																																																																																																																																								
3.749	0.824	9.92	1.232	2.022	4.877	993	131.4	19.28	100.275																																																																																																																																																																																																								
4.015	0.883	10.62	1.320	2.002	4.656	1088	154.0	20.65	109.799																																																																																																																																																																																																								
4.259	0.936	11.27	1.400	1.985	4.480	1178	176.9	21.90	118.888																																																																																																																																																																																																								
4.509	0.991	11.93	1.482	1.970	4.343	1280	203.5	23.19	129.177																																																																																																																																																																																																								
4.741	1.042	12.54	1.558	1.956	4.203	1369	229.0	24.38	138.205																																																																																																																																																																																																								
4.981	1.095	13.18	1.637	1.942	4.041	1453	255.3	25.62	146.672																																																																																																																																																																																																								
5.205	1.144	13.77	1.711	1.930	3.854	1513	277.8	26.77	152.738																																																																																																																																																																																																								
Displacement in S.W. = 9.91 Tonnes																																																																																																																																																																																																																	

Γενικά, κατά την σχεδίαση ενός ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος πρόωσης κυβελών καυσίμου, ο σχεδιαστής πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός ώστε το σύστημα που θα προκύψει, πέραν των υπολοίπων απαιτήσεων (π.χ. ισχύς και ασφάλεια), να καλύπτει τις απαιτήσεις χώρου και κατανομής βαρών ενός σκάφους. Αυτό είναι πολύ σημαντικό όταν το σκάφος υπάρχει ήδη και πρόκειται να αντικαταστήσουμε το συμβατικό σύστημα πρόωσής του με το προωστήριο σύστημα κυβελών καυσίμου. Όταν όμως πραγματοποιείται από την αρχή ο σχεδιασμός ενός σκάφους το οποίο θα έχει ηλεκτρικό προωστήριο σύστημα κυβελών καυσίμου παρέχεται, όπως είναι φυσικό, μεγαλύτερη ευχέρεια σχεδιασμού.

7.5 Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα πρόωσης κυψελών καυσίμου. Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα σε συνδυασμό με εναλλακτικές ενεργειακές πηγές φαίνεται πως στο άμεσο μέλλον θα απασχολήσουν και την κατηγορία των ναυτικών συστημάτων πρόωσης. Κλειδί στην εφαρμογή αυτών των συστημάτων αποτελούν οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος με σκοπό την διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχ. 7.7 φαίνεται ένα προηγμένο ναυτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [72]. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από συνδυασμό αεριοστροβίλου – γεννήτριας, από κυψέλες καυσίμου και συσσωρευτές και έτσι τροφοδοτείται ο κινητήρας πρόωσης. Πέρα των συσσωρευτών μπορεί να αποθηκευτεί ενέργεια και σε ένα σύστημα σφονδύλου – ηλεκτρικής μηχανής.

Σκοπός του σχεδιασμού ήταν το σύστημα που θα προκύψει να διακρίνεται για την απλότητά του και την αξιοπιστία του, δεδομένης της πολυπλοκότητας που εισάγει στο σύστημα η σχετικά νέα τεχνολογία ενός συστήματος κυψελών καυσίμου ως κύρια ενεργειακή πηγή.



Σχήμα 7.7 Προηγμένο ναυτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [72].

Η επιλογή ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ως κινητήρα πρόωσης με βαθμό απόδοσης 91 %, απλουστεύει το σύστημα ελέγχου του και προσφέρει ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης στο κινητήριο σύστημα. Η κυψέλη καυσίμου, όπως αναφέρθηκε στο πέμπτο κεφάλαιο έχει βαθμό απόδοσης⁷ που κυμαίνεται μεταξύ 55 % και 60 %.

⁷ Βαθμός απόδοσης του συστήματος κυψελών καυσίμου που προέκυψε ύστερα από τη θεώρηση (σύμφωνα με τον κατασκευαστή [53]) ενός πρόσθετου ποσοστού μείωσης 5 – 10 % στον βαθμό απόδοσης της συστοιχίας (stack) κυψελών καυσίμου. Ο βαθμός απόδοσης της συστοιχίας (stack) κυψελών καυσίμου βρίσκεται στο διάστημα 62 – 71 % [53].

Αν θεωρήσουμε το πρώτο υπό μελέτη σύστημα, ο ηλεκτρονικός μετατροπέας υποβιβασμού έχει έναν ονομαστικό βαθμό απόδοσης περίπου 98 % οπότε ο βαθμός απόδοσης στον άξονα του κινητήρα, θεωρώντας τον χαμηλότερο βαθμό απόδοσης για την κυψέλη καυσίμου, είναι περίπου 49 %. Στο δεύτερο υπό μελέτη σύστημα πέραν του μετατροπέα υποβιβασμού για τον έλεγχο των στροφών της έλικας, υπάρχει και ο μετατροπέας ανύψωσης. Εισάγεται έτσι ένας ακόμα μετατροπέας ισχύος με ονομαστικό βαθμό απόδοσης 98 %, οπότε και ο βαθμός απόδοσης στον άξονα του κινητήρα πρόωσης μειώνεται σε 48 %. Το σύστημα των συσσωρευτών ως παράλληλο ξεχωριστό σύστημα δεν επιδρά άμεσα στον βαθμό απόδοσης, έμμεσα όμως βελτιώνει την απόκριση του συστήματος σε μεταβατικές καταστάσεις.

Σχετικά με τα δύο κινητήρια συστήματα που προτάθηκαν, το πρώτο έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από το δεύτερο και το μέγεθός του είναι μικρότερο. Το δεύτερο όμως κινητήριο σύστημα με τις δύο παραλληλισμένες κυψέλες κρίνεται περισσότερο αξιόπιστο, καθώς σε περίπτωση βλάβης του ενός από τα δύο συστήματα κυψελών καυσίμου, το σκάφος θα μπορεί να πλεύσει μέσω της τροφοδοσίας του κινητήρα πρόωσης μόνο από τη μία κυψέλη καυσίμου. Επίσης στο δεύτερο υπό μελέτη σύστημα η χρήση μετατροπέα ανύψωσης για την ρύθμιση της τάσης των κυψελών καυσίμου έχει σαν αποτέλεσμα ένα ρεύμα εισόδου μικρότερης κυμάτωσης (τριγωνικό ρεύμα) από το αντίστοιχο ρεύμα στον μετατροπέα υποβιβασμού (παλμικό ρεύμα) του πρώτου υπό μελέτη συστήματος. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για μια εφαρμογή με πηγή ενέργειας κυψέλη καυσίμου όπου μειώνεται το μέγεθος του απαραίτητου φίλτρου LC στην είσοδο του μετατροπέα ώστε να μην καταπονούνται οι κυψέλες καυσίμου με κυματώσεις ρευμάτων.

Η σχεδίαση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος ως μετατροπέων ΣΤ-ΣΤ με διαδοχική αγωγή παράλληλων κλάδων προσφέρει επίσης αξιοπιστία στο σύστημα. Σε περίπτωση βλάβης (π.χ. σε ημιαγωγικό διακοπτικό στοιχείο) σε έναν από τους κλάδους ο μετατροπέας δεν βγαίνει εκτός λειτουργίας, μπορεί λόγω της αντοχής των υπολοίπων στοιχείων να λειτουργήσει. Αυτό θα γίνει διακόπτοντας την παλμοδότηση του κλάδου με το πρόβλημα. Μπορεί ακόμα, να λειτουργήσει και με ένα κλάδο υπό χαμηλότερη όμως ισχύ και σαφώς χαμηλότερο βαθμό απόδοσης.

Όπως έχει αναφερθεί και στο 6^ο Κεφάλαιο (Ενότητα 6.1.6), προτείνεται, για περαιτέρω μελλοντική διερεύνηση, η ενδεχόμενη χρήση ενεργού φίλτρου στην έξοδο των μετατροπέων (με διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία) του οποίου η συχνότητα συντονισμού θα μπορεί να προσαρμόζεται κατά περίπτωση.

Για τους συσσωρευτές επιλέχθηκε ένας μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού ο οποίος δεν είναι αμφικατευθυντήριος, οπότε οι συσσωρευτές δεν μπορούν να φορτιστούν από τις κυψέλες σε περίπτωση λειτουργίας υπό μερικό φορτίο, ή όταν το σκάφος βρίσκεται στο λιμάνι. Ο αμφικατευθυντήριος μετατροπέας απαιτεί διαφορετικό σχεδιασμό και αποτελεί μια προτεινόμενη βελτίωση. Επίσης αν το σύστημα που σχεδιάστηκε εφαρμοζόταν σε υβριδικό σύστημα με συμβατική ενεργειακή πηγή, θα ήταν σημαντικό να μελετηθεί η λειτουργία του κινητήρα πρόωσης ως μηχανή τεσσάρων τεταρτημορίων, όπου θα υπήρχε η δυνατότητα μέσω του κατάλληλου αμφικατευθυντήριου μετατροπέα να φορτίζονται οι συσσωρευτές και από την ηλεκτρική μηχανή και έτσι να αποθηκεύεται ενέργεια για τις διάφορες ενεργειακές ανάγκες του σκάφους.

Μία άλλη σημαντική βελτίωση του ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος είναι η χρήση κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος ως κινητήρα πρόωσης. Ειδικά, ο συνδυασμός ενός υψηλής απόδοσης αντιστροφέα με έναν σύγχρονο κινητήρα μόνιμων μαγνητών (βλ. 1^ο Κεφάλαιο) μπορεί να αυξήσει τελικά τον βαθμό απόδοσης του συστήματος.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Βιβλιογραφία

- [1] A. K. Adnanes, «Maritime electrical installations and diesel – electric propulsion», Tutorial Report/Textbook, ABB Marine AS, Oslo, Norway, 2003.
- [2] Ι. Κ. Χατζηλάου, Ι. Μ. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, Ι. Κ. Γύπαρης, Π. Βαλλιανάτος, «Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο», Διήμερο ΤΕΕ: «Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη Κατάσταση και Προοπτικές», Αθήνα, 12 – 13 Ιανουαρίου 2006.
- [3] Χ. Α. Φραγκόπουλος, Ι. Μ. Προυσαλίδης, «Ενεργειακά Συστήματα Πλοίου, Τεύχος Α', Ηλεκτρολογικές Εγκαταστάσεις – Εισαγωγή στον Αυτοματισμό», ΕΜΠ, Αθήνα, 2005.
- [4] D. Radan, «Power electronic converters for ship propulsion electric motors», Marine Cybernetics – Energy Management Systems, Part of the NTNU project: All Electric Ship, Department of Marine Technology, NTNU, Trondheim, Norway, 2004.
- [5] <http://www.greatships.net/normandie.html>, 2/2011.
- [6] <http://www.naval-technology.com>, 5/2009.
- [7] Αθανάσιος Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρονικά Ισχύος, Θυρίστρον, Μετατροπείς, Εφαρμογές», Τμήμα εκτυπώσεων τυπογραφείου Πανεπιστημίου Πατρών, 2006.
- [8] Εμμανουήλ Κ. Τατάκης, «Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος Ι», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2007.
- [9] Εμμανουήλ Κ. Τατάκης, «Σημειώσεις μαθήματος, Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003.
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Power_semiconductor_device, 2/2011.
- [11] <http://www.convertteam.com>, 2/2011.
- [12] Ν. Π. Κυρτάτος, «Ηλεκτρονικές σημειώσεις μαθήματος Εγκαταστάσεων Πρόωσης – Κεφάλαιο 3, Απαιτήσεις Πρόωσης / Ναυτικοί Κινητήρες», ΣΝΜΜ, ΕΜΠ, 2009, http://www.lme.ntua.gr/les_egastaseis.html, 2/2011.
- [13] <http://www.rolls-royce.com/marine>, 2/2011.
- [14] <http://www.abb.com/marine>, 2/2011.
- [15] <http://www.vetus.nl>, 2/2011.
- [16] Χ. Α. Φραγκόπουλος, «Προηγμένα Ναυτικά και Θαλάσσια Ενεργειακά Συστήματα», Δ.Π.Μ.Σ. Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2006.
- [17] J. Larminie, A. Dicks, «Fuel Cell Systems Explained», J. Wiley & Sons, Enland, 2003.
- [18] N. Monanteras, L. G. Nakos, C. A. Frangopoulos, «Marine Applications of Fuel Cells – An Overview», International Association of Mechanical Engineers (IASME), Issue 2, Volume 1, April 2004, pp. 330 – 336.
- [19] Σ. Βουτετάκης, Ε. Κικκινίδης, Γ. Μαρνέλλος, Λ. Ντζιαχρήστος, Ι. Παναπακίδης, «Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του “καυσίμου του μέλλοντος” - H₂», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ), Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2010.
- [20] <http://ec.europa.eu/research>, 12/2010.
- [21] <http://www.eere.energy.gov>, 2/2011.
- [22] <http://www.fuelcells.bham.ac.uk/staffell.shtml>, 2/2011.

- [23] R. Von Helmholt, U. Eberle, «Fuel cell vehicles: Status 2007», Journal of Power Sources, Volume 165, Issue 2, 20 March 2007, pp. 833 – 843.
- [24] M. Krcum, A. Gudelj, Z. Juric, «Fuel Cells for Marine Application», 46th International Symposium Electronics in Marine (ELMAR-2004), 16-18 June 2004, Zadar, Croatia.
- [25] C. Bourne, T. Nietsch, D. Griffiths, J. Morley, «Applications of fuel cells in surface ships», Rolls-Royce Strategic Systems Engineering, 2001.
- [26] F. Vogler, G. Wursig, «Safety considerations and approval procedures for the installation of fuel cells on board of ships», International Conference on Hydrogen Safety (ICH3), 16-18 September 2009, Corsica, France.
- [27] F. Vogler, «Fuel Cell Systems in Maritime Applications», Final Zemships Conference, 20 April 2010, Hamburg, Germany.
- [28] V. P. McConnell, «Now, voyager? The increasing marine use of fuel cells», Fuel Cell Bulletin, May 2010.
- [29] Fuel Cells Bulletin, October 2010, pp. 3 – 4.
- [30] F. Vogler, «FC-Systems on Board of Watercrafts – An Early Market?», International Conference and Trade Fair on Hydrogen and Fuel Cell Technologies, H₂Expo 2006, 25 – 26 October, Hamburg, Germany.
- [31] A. Overdiep, «Fuel Cell Boat B.V. presentation», Final Zemships Conference, 20 April 2010, Hamburg, Germany.
- [32] <http://h2yacht.com>, 12/2010.
- [33] <http://www.hydrogen.is>, 12/2010.
- [34] <http://www.zemships.eu>, 12/2010.
- [35] <http://www.protonmotor.de>, 12/2010.
- [36] <http://www.fuelcellboat.nl>, 12/2010.
- [37] <http://www.nedstack.com>, 12/2010.
- [38] <http://www.methapu.eu>, 12/2010.
- [39] <http://www.wartsila.com>, 12/2010.
- [40] <http://vikinglady.no>, 12/2010.
- [41] <http://www.mtu-online.com>, 12/2010.
- [42] <http://www.fuelcelltoday.com>, 12/2010.
- [43] <http://www.mc-wap.cetena.it>, 12/2010.
- [44] <http://www.e4ships.de>, 1/2011.
- [45] Σ. Τσοτουλίδης, Α. Σαφάκας, «Καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου – Εφαρμογές», Συνέδριο ΤΕΕ: «Ενέργεια: Σημερινή εικόνα – Σχεδιασμός – Προοπτικές», Αθήνα, 8 – 10 Μαρτίου 2010.
- [46] Π. Γ. Μαραμπέας, Σ. Ν. Μανιάς, «Μετατροπείς ισχύος για κυψέλες καυσίμου σε ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς», Διήμερο ΤΕΕ: «Ηλεκτροκίνητα Μέσα Μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη Κατάσταση και Προοπτικές», Αθήνα, 12 – 13 Ιανουαρίου 2006.
- [47] Εμμανουήλ Κ. Τατάκης, «Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος II», Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.
- [48] Εμμανουήλ Κ. Τατάκης, «Διαλέξεις μαθήματος 9^{ου} εξαμήνου: Ηλεκτρονικά Στοιχεία Ισχύος και Βιομηχανικές Εφαρμογές», Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2007.
- [49] N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, «Power Electronics, Converters, Applications and Design», John Wiley & Sons, Inc, 1995, μεταφρασμένο στην ελληνική γλώσσα με τίτλο: «Ηλεκτρονικά Ισχύος, Μετατροπείς, Εφαρμογές, Σχεδίαση, Δεύτερη Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 1996.

- [50] Αθανάσιος Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα», Οργανισμός Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων, Αθήνα, 1985.
- [51] L. Luckose, H. L. Hess, B. K. Johnson, «Fuel cell propulsion system for marine applications», Electric Ship Technologies Symposium 2009 (ESTS 2009), IEEE, Baltimore, Maryland, USA, 20 – 22 April 2009, pp. 574 – 580.
- [52] D. Bawa, «Next generation fuel cell module for heavy duty applications», Alternative Transport Energies Conference, Perth, Western Australia, 10 – 13 September 2006, <http://www.transport.wa.gov.au>, 1/2011.
- [53] <http://www.ballard.com>, 11/2010.
- [54] Αθανάσιος Ζερβάκος, «Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρονικής διάταξης για υβριδικό όχημα – Ανάκτηση ενέργειας», Διπλωματική εργασία υπ’ αριθμόν 270, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009.
- [55] Αθανάσιος Ν. Σαφάκας, «Ηλεκτρικές Μηχανές Α», Τμήμα εκτυπώσεων τυπογραφείου Πανεπιστημίου Πατρών, 2005.
- [56] W. H. Yeadon, A. W. Yeadon, «Handbook of small electric motors», McGraw Hill, 2001.
- [57] <http://www.abb.com>, 11/2010.
- [58] <http://www.siemens.com>, 11/2010.
- [59] <http://www.brusatori.it>, 11/2010.
- [60] Ε. Ν. Ζωγραφάκης, «Στοιχεία Ναυπηγίας», Ίδρυμα Ευγενίδου, Βιβλιοθήκη του Ναυτικού, Αθήνα, 1997.
- [61] Νικόλαος Γ. Μπαϊραχτάρης, «Μελέτη και κατασκευή συστήματος ελέγχου ηλεκτροκίνητου μικρού πλωτού μέσου μεταφοράς», Διπλωματική Εργασία υπ’ αριθμόν 278, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ιούνιος 2009.
- [62] N. Bairachtaris, V. Petroulas, A. Safacas, E. Tatakis, S. Tsotoulidis, «Design and construction of a four-channel interleaved buck dc/dc converter for an electric boat application», International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS 2010), 19 – 21 October 2010, Bologna, Italy.
- [63] B. Destraz, Y. Louvrier, A. Rufer, «High Efficient Interleaved Multi-channel dc/dc Converter Dedicated to Mobile Applications», Industry Applications Conference 2006, 41st IAS Annual Meeting Conference Record of the 2006 IEEE, Tampa, Florida, USA, 8 – 12 October 2006, pp. 2518 – 2523.
- [64] K. Billings, «Advantages of Interleaving Converters», Power Electronics Technology magazine, November 2003, <http://powerelectronics.com>, 3/2011.
- [65] P. Thounthong, B. Davat, S. Rael, P. Sethakul, «Fuel Cell High-Power Applications», IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 3, no. 1, March 2009, pp. 32 – 46.
- [66] <http://gr.rsdelivers.com>, 2/2011.
- [67] <http://www.fullriver.com>, 3/2011.
- [68] <http://www.ixys.com>, 2/2011.
- [69] <http://www.fairchildsemi.com>, 2/2011.
- [70] F. Grasser, A. Rufer, «A fully analytical PEM fuel cell system model for control applications», Industry Applications Conference 2006, 41st IAS Annual Meeting Conference Record of the 2006 IEEE, Tampa, Florida, USA, 8 – 12 October 2006, pp. 2162 – 2168.

- [71] A. Mak, J. Meier, «Fuel cell auxiliary power study», NASA, USA, February 2007, Volume 1: RASER Task Order 5, pp. 105 – 107.
- [72] T. Ericson, N. Hingorani, Y. Khersonsky, «Power electronics and future marine electrical systems» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 1, January – February 2006, pp. 155 – 163.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Μέρος Α: Χαρακτηριστικά κυψελών καυσίμου [53]



FCvelocity-HD6

Ballard Experience

Since 1992, Ballard Power Systems has developed and demonstrated five generations of heavy duty fuel cell modules for bus applications. Demonstration programs and field trials have been held in the US, Canada, Western Europe, Iceland, Australia and China. Ballard powered buses have accumulated more than 200,000 hours of operation, covering more than three million kilometers and transporting more than seven million passengers.

6th Generation Module

Based on the state of the art automotive fuel cell stack, Ballard's FCvelocity-HD6 fuel cell module offers a design ideal for integration into bus applications.

With the next generation Ballard® fuel cell at its core, the FCvelocity-HD6 establishes a new standard for cost, through design for volume manufacturing, and compatibility with customer system requirements. The heavy duty power-module features a control unit that can interface with a system controller, making it a plug and play application for any fuel cell or hybrid fuel cell bus platform.

This next generation module also offers significant advances in durability, power density and fuel efficiency.

Availability

Please contact any of the following Ballard representatives for discussions on Ballard's next generation heavy duty fuel cell module.

- Daljit Bawa (daljit.bawa@ballard.com)
- Jeff Grant (jeff.grant@ballard.com)

PRODUCT SPECIFICATIONS

Gross Power:		75 kW	150 kW
Performance:	DC voltage	275 – 400V	550 – 800V
	Maximum current	300A	300A
Physical:	Weight (dry)	< 350 kg (<700 lbs)	< 400 kg (< 990 lbs)
	Length x width x height (without controller box)	1270 x 870 x 505 mm (50 x 34 x 20 in)	
	Volume	0.55m ³ (19.6 cubic ft)	
Fuel:	Gaseous hydrogen	Commercial grade (per SAE J2719)	
Oxidant:	Air		
Coolant:	50/50 Pure Ethylene Glycol and Water		
Operating Conditions:	Temperature (nominal)	63°C (149°F)	
	Fuel pressure (minimum)	12 barg	
	Air pressure (nominal)	1.2 barg	
Additional Features:	Control interface	CANbus	
	Enclosure	IP53	

Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems, Inc. reserves the right to change specifications, product appearance or to discontinue products at any time (04/2010).

BALLARD®, Ballard®, Powered by Ballard®, FCgen™ and FCvelocity™ are trademarks of Ballard Power Systems Inc. SPCS101744-0G

Ballard Power Systems, Inc.
9000 Glenlyon Parkway
Burnaby, British Columbia
Canada, V5J 5J8

TEL: (+1) 604.454.0900
FAX: (+1) 604.412.4700
www.ballard.com



SMARTER ENERGY THROUGH FOCUSED FUEL CELL INNOVATION



PEM Fuel Cell Product Portfolio

Ballard Power Systems offers a comprehensive portfolio of PEM (proton exchange membrane) fuel cell stack products designed to meet needs in a wide range of motive and stationary power applications. Contact us at marketing@ballard.com to discuss your requirements.

PRODUCTS						
COMMERCIAL INFORMATION	Market	Material Handling	Bus and Heavy Duty	Backup Power	Backup Power	CHP (Combined Heat & Power)
	Application	Forklift trucks – classes I, II and III	Transit buses	Emergency telecom network outages	Supplemental power for telecom networks	Residential Cogeneration
	Durability/Lifetime Target	Up to 10,000 hrs	Up to 6,000 hrs	Up to 4,000 hrs	Up to 8,000 hrs	Up to 40,000 hrs
	Primary Benefits (versus Incumbent solution)	Positive economic payback through higher productivity; environmental benefits	Reduction in greenhouse gas emissions; zero point of use emissions; operating efficiency gains	Positive economic payback through higher reliability; environmental benefits	Positive economic payback through higher fuel efficiency, reliability and runtime; flexible fuelling using natural gas, propane or methanol; environmental benefits	Positive economic payback through reduced dependency on electricity grid; environmental benefits
PHYSICAL CHARACTERISTICS	Length	107 – 313mm	1446mm	110 – 495mm	230 – 530mm ⁴	347mm
	Width	760mm	871mm	103mm	490mm ⁴	158mm
	Height	60mm	496mm	351mm	180mm ⁴	259mm
	Weight (dry)	7.2 – 17 kg	250 – 355 kg	4 – 15kg	~6 – 29 kg	12 kg
	Number Cells (min/max)	25 – 110	Not applicable	10 – 80	25 – 125	46
PERFORMANCE	Rated Gross Power (beginning of life)	4.4 – 19.3 kW	75 and 150 kW	0.3 – 3.4 kW	2.3 – 11.3 kW ²	1.2 kW
	Rated Current	300 Amps	240 Amps	65 Amps	135 Amps	40 Amps
	DC Voltage	15 – 64 Volts	313 – 626 Volts	6.4 – 51 Volts	17 – 84 Volts	31 Volts
	Cell Efficiency (reference to LHV) ³	47 – 71%	62 – 71%	51 – 67%	54 – 64%	54 – 63%

NOTES: 1 Currently in development
 2 LHV=Lower Heating Value & represents the energy available in H2 fuel. To compare, diesel engine efficiency typically ~20%. Fuel cell system efficiency will be lower than stack efficiency because of parasitic losses - expect an additional 5-10% loss in efficiency.
 3 Power output based on non-reformate hydrogen
 4 Values subject to change

CONTINUES ON OVERLEAF >



SMARTER ENERGY THROUGH FOCUSED FUEL CELL INNOVATION



CONTINUED FROM FRONT

PRODUCTS					
Fuel Composition⁵	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen or reformat	Hydrogen or reformat (>72% H ₂ , <10ppm CO typical)
Fuel Consumption (max continuous power)	~53 – 230 sL / min	1.1 – 2.2 g/s	~5 – 40 sL / min	~24 – 120 sL / min (w/ H ₂ recirc)	22.3 sL/min (80% used by fuel cell, 20% waste used by reformer)
Fuel Pressure	1.2 bar(g)	16 bar(g)	0.15 – 0.5 bar(g)	0.3 bar(g)	0.24 bar(g)
Fuel Pressure Drop	0.18 bar	Not applicable	0.004 bar	0.1 bar	0.11 bar
Fuel Humidity	95% RH	Dry	Dry	> 90% RH	> 90% RH
Oxidant Composition	Air	Air	Air	Air	Air
Oxidant Pressure	1.0 bar(g)	1.2 bar(g)	Ambient	0.3 bar(g)	0.15 bar(g)
Oxidant Pressure Drop	0.45 bar	1.16 bar(g)	~150 Pa @ max ambient temp.	0.18 bar	0.09 bar
Oxidant Humidity	> 90% RH	Ambient	0 – 100% RH (ambient)	> 90% RH	> 90% RH
Coolant	De-ionized Water and/or Ethylene Glycol mix	De-ionized Water / Ethylene Glycol mix	Air	De-ionized water	De-ionized water
Cooling Inlet Temperature	40° – 70°C	40° – 70°C	40° – 70°C	40° – 70°C	50° – 60°C
Maximum Coolant Pressure Drop	0.53 bar	~0.6 bar	same as oxidant pressure drop	TBD – In development	0.11 bar
Ambient Temperature (Operating)	-25° – 75°C	-20° – 60°C	-20° – 52°C	-25° – 75°C	-25° – 75°C
Min. Stack Startup Temperature	>0°C	>0°C	-10°C	>0°C	>0°C
Additional Features	Meets automotive shock & vibration requirements	CANbus control interface; IP54 enclosure	Simplified system design – open cathode stack	Optional processes available to enhance product life	

NOTES: ⁵ For hydrogen applications, Ballard recommends hydrogen purity of 99.999% or better.



Ballard Power Systems, Inc. is recognized as a world leader in the design, development, manufacture and sale of clean energy fuel cell products. Our **FCgen** family of stationary power products and **FCvelocity** family of motive power products offer important business benefits not available from traditional power sources. Learn how to put fuel cells to work, contact us: marketing@ballard.com or call (+1) 604.454.0900

Ballard Power Systems, Inc.
 9000 Glenlyon Parkway
 Burnaby, British Columbia
 Canada V5J 5J8
 TEL: (+1) 604.454.0900
 FAX: (+1) 604.412.4700
www.ballard.com

Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems, Inc. reserves the right to change specifications, product appearance or to discontinue products at any time (04/2009).

BALLARD, Ballard®, Powered by Ballard®, FCgen™ and FCvelocity™ are trademarks of Ballard Power Systems Inc.

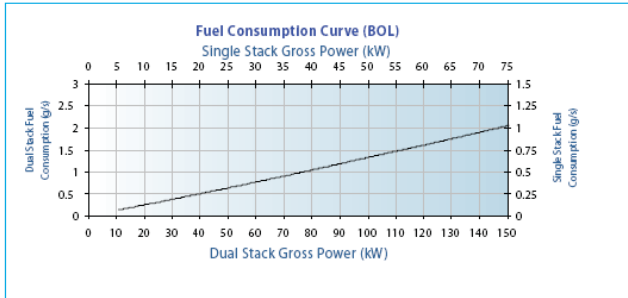
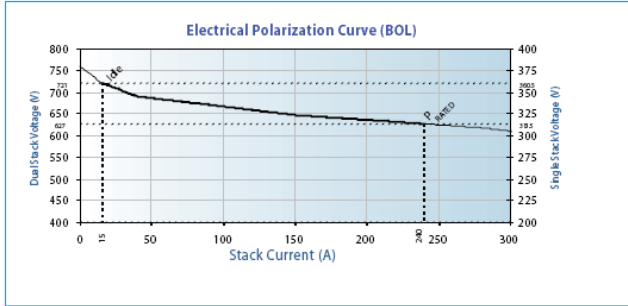
HD6™ Performance Curves

Accelerating Fuel Cell Market Adoption



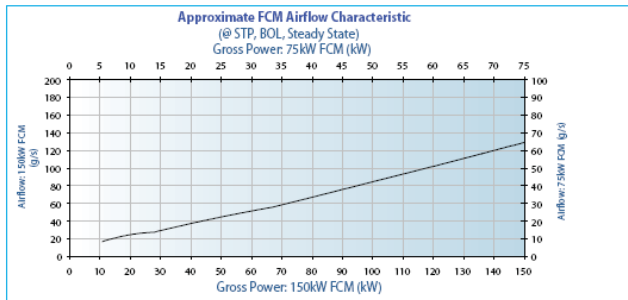
HD6 Performance

The following performance curves are meant to aid the system integrator in modelling overall performance, efficiency, and fuel consumption. Tabulated data is available from Ballard upon request.



Airflow Specification

While the Air Delivery System must follow airflow demand control signals from the HD6, the integrator can expect the following approximate airflow requirements for various loads.



Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems Inc. reserves the right to change specifications, product appearance or to discontinue products at any time. Ballard LOGO and Power to Change the World are registered trademarks of Ballard Power Systems Inc. © 2007 Ballard Power Systems Inc. PRINTED IN CANADA

Air Purity Specification

The integrator must provide sufficient particulate and hydrocarbon filtration of the air to prevent contamination of the fuel cell stacks. The integrator must also prevent any oil or graphite from the air compressor from contaminating the airflow. The purity of the air delivered must meet the following table.

Species	Allowable Limits	Units
Ozone (O3)	<1	PPM
Hydrogen (H2)	<1	%vol
Sulphur Dioxide (SO2)	<0.0033	PPM
CO	<5	PPM
CO2	<1	%vol
Benzene (C6H6)	<0.005	PPM
Toluene (C7H8)	<0.003	PPM
Nitrogen Dioxide (NO2)	<0.017	PPM
Nitrogen Oxide (NO)	<0.0083	PPM
Ammonia (NH3)	<4	PPB
Ammonium PM10	<2	µg / m3
Particulate Size	<80	µm
Particulate Quantity	TBD	
Total Metal Contaminants	TBD	

H2 Purity Specification

Hydrogen purity must meet or exceed the levels specified in SAE J2719. For reference, the allowable impurities in Table 1 of SAE J2719 are listed here:

Species	Allowable Limits	Units
Water	< 5	µmol/mol
Hydrocarbons	<2	µmol/mol
O2	<5	µmol/mol
He, N2, Ar	<100	µmol/mol
CO	<0.2	µmol/mol
CO2	<1	µmol/mol
Sulphur Compounds	<0.004	µmol/mol
Formaldehyde	<0.01	µmol/mol
Formic Acid	<0.2	µmol/mol
Ammonia	<0.1	µmol/mol
Total Halogenates	<0.05	µmol/mol
Particulate Size	<10	µm
Particulate Concentration	<1	µg/L

t) 604-454-0900
f) 604-412-4700
www.ballard.com

Ballard Power Systems Inc.
9000 Glenlyon Parkway
Burnaby, British Columbia
Canada V5J 5J8

HD6™ Performance Curves

Accelerating Fuel Cell Market Adoption



H₂ Delivery System Flow Rate

The fuel delivery system must be capable of providing sufficient flow to the HD6 at all times to prevent fuel starvation. Transient flow may be handled using suitable buffer volume as mentioned on the previous page.

Condition	Flow	
	75kW	150kW
Maximum Transient Flow	1.3 g/s	2.4 g/s
Maximum Continuous Flow	1.1 g/s	2.2 g/s

Stack Cooling Specification

The stack cooling coolant shall meet the following requirements:

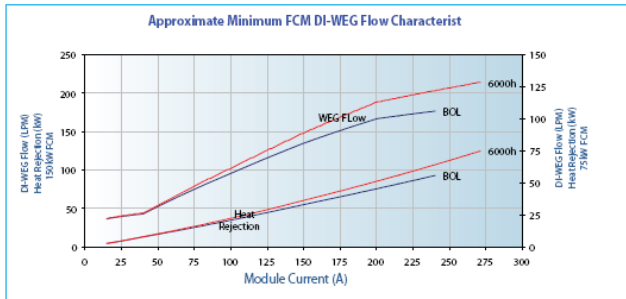
Property	Value
Electrical Conductivity	5µS
Ethylene Glycol Max.	50%
DI Water	Balance
Max. Particulate Size	100 µm

Stack Cooling Flow Rate Specification

The integrator must provide adequate flow to the FCM in order to satisfy its cooling requirements.

Condition	Flow	
	75kW	150kW
Maximum Continuous Flow	125 LPM	250 LPM

While the integrator must meet or exceed the DI-WEG flow indicated by CAN signal WEG-SP, the following curve can be used to predict the required WEG flow:



Stack Cooling Inlet Temperature Specification

Nominal stack cooling inlet temperature should be controlled to the temperature specified below. Temporary excursions up to the maximum indicated can be tolerated, but power derating may occur. Operation below the nominal supply temperature may also result in reduced power.

Freeze Protection

The integrator must also provide a suitable means to prevent the HD6 from freezing during prolonged shutdowns in subzero environments. Typically, this will involve using a supplemental pump and heater connected to the electrical utility to maintain a minimum temperature in the stack cooling loop. The integrator must consider the inlet temperature at startup, when coolant starts to flow, that inlet temperature to the HD6 never dips to subzero temperatures

Property	Value
Nominal DI-WEG Supply Temperature	50 - 60° C
Maximum DI-WEG Supply Temperature	66 °C
Minimum DI-WEG Supply Temperature	> 5° C

Condenser Cooling Flow Rate Specification

The integrator must provide a minimum flow rate to the condenser. Excess flow will not harm the module, so long as the maximum pressure requirement is not exceeded.

Module Version	Coolant ¹	Condenser Flow Rate
75kW	Water	>5LPM
75kW	WEG	>6LPM
150kW	Water	>10LPM
150kW	WEG	>12LPM

Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems Inc. reserves the right to change specifications, product appearance or to discontinue products at any time (07/07)
 Ballard LOGO and Power to Change the World are registered trademarks of Ballard Power Systems Inc.
 © 2007 Ballard Power Systems Inc. PRINTED IN CANADA

t) 604-454-0900
 f) 604-412-4700
 www.ballard.com

Ballard Power Systems Inc.
 9000 Glenlyon Parkway
 Burnaby, British Columbia
 Canada V5J 5J8

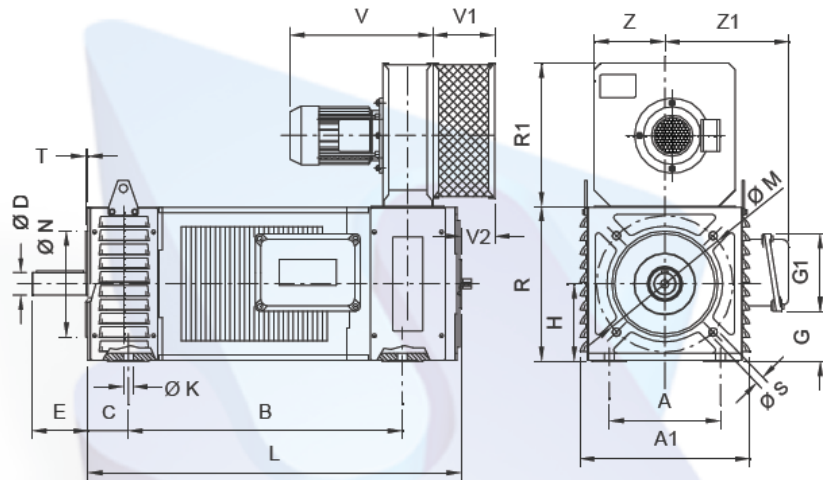
Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Μέρος Β: Χαρακτηριστικά κινητήρα πρόωσης [59]

Ventilazione	Cooling	IC06-IC17-IC37	ML 200 S
Protezione	Protection	IP 23 S	
Potenza eccitazione	Excitation power	2080 W	
Inerzia	Inertia	0,56 Kgm ²	
Velocità massima meccanica	Maximum mechanical speed	3300 rpm	
Massa	Mass	610 Kg	

Codice Code	Velocità base [rpm] Base speed [rpm]			Potenza Power [KW]	Corrente Current [A]	Rendimento Efficiency [%]	Resistenza Resistance [Ohm]	Induttanza Inductance [mH]	Coppia Torque [Nm]
	400V	440V	520V						
1	400	450	550	34	106	80,5	0,25	9,2	817
				38	105	81,5			
				45	103	83,5			
2	470	517	611	39	119	81,5	0,23	8,6	789
				43	118	82,5			
				51	114	84,5			
3	525	580	682	42	128	82,5	0,2	7,9	769
				47	127	83,5			
				55	124	85,5			
4	600	660	780	49	148	83,5	0,175	7,1	786
				54	147	84,5			
				64	143	86,5			
5	650	715	845	54	162	84	0,15	6,4	796
				60	159	85			
				70	155	87			
6	720	792	936	60	177	85	0,13	5,8	796
				66	174	86			
				78	170	88			
7	800	880	1040	66	192	86	0,11	5,3	786
				73	189	87			
				86	185	89			
8	900	990	1170	74	213	87	0,091	4,9	786
				82	211	88			
				96	207	90			
9	1140	1254	1482	92	261	88	0,071	3,5	769
				101	258	89			
				119	253	91			
10	1270	1397	1651	102	288	89	0,05	2,7	769
				113	285	90			
				133	278	92			
11	1400	1540	1820	111	307	90	0,042	2,2	754
				122	304	91			
				144	297	93			
12	1570	1727	2041	122	336	91	0,035	1,9	744
				135	333	92			
				159	325	94			
13	1760	1936	2288	135	368	92	0,025	1,4	734
				149	364	93			
				176	356	95			
14	2025	2225		153	411	93	0,018	1	721
				168	407	95			

Dimensioni di ingombro ML160 - 450 Overall dimensions ML160 - 450

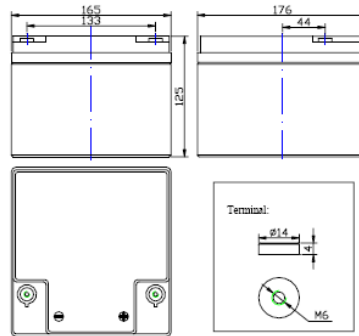


Tipo Type		N	M	S	T	H	R	C	B	L	A	A1	K	G	V	V1	Z	Z1	R1		
ML 160	S	250	300	18	5	160	330	108	330	603	254	330	14	160	360	135	160	250	320		
	M								390	663											
	L								470	740											
ML 180	S	250	300			180	370	121	121	460	750	279	370	16	150		420	180	280	380	
	M									550	840										
	L									610	900										
ML 200	S	300	350			200	410	133	133	520	845	318	405	20	190		420	200	300	380	
	M									610	935										
	L									670	985										
ML 225	S	350	400			225	460	149	149	593	975	356	455	20	190		450	165	225	360	430
	M									643	1025										
	L									703	1085										
	X			783	1165																
ML 250	S	450	500	250	510	168	168	752	1100	406	505	27	190	450	165	250	415	430			
	M							872	1220												
	L							952	1300												
ML 280	S	500	550	280	570	190	190	864	1260	457	565	27	270	510	180	280	520	510			
	M							924	1340												
	L							994	1450												
	X							1064	1530												
ML 315	S	500	550	315	640	216	216	980	1480	508	635	27	290	540	180	315	585	600			
	M							1060	1550												
	L							1150	1620												
ML 355	S	500	550	355	720	254	254	1070	1650	610	715	30	370	580	200	355	625	600			
	M							1180	1730												
	L							1290	1810												
ML 400	S	500	550	400	810	280	280	1170	1790	686	810	30	410	620	220	400	710	710			
	M							1290	1860												
	L							1400	1930												
	X							1500	2040												
ML 450	S	500	550	450	910	315	315	1200	1950	800	910	35	460	670	220	450	770	760			
	M							1320	2050												
	L							1430	2150												
	X							1540	2260												

	160	180	200	225	250	280	315	355	400	450
D	55k6	60m6	65m6	75m6	90m6	95m6	100m6	110m6	130m6	160m6
E	110	140	140	140	170	170	210	210	250	280
F	16	18	18	20	25	25	28	28	32	40
GA	59	64	69	79,5	95	100	106	116	137	169
dxi	M16x36	M20x50	M20x50	M20x50	M20x50	M20x50	M20x50	M20x50	M20x50	M24x80

Μέρος Γ: Χαρακτηριστικά συσσωρευτών [67]

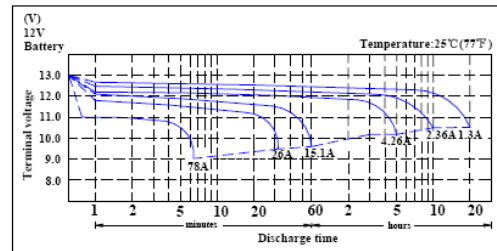
□ DC26-12



Specifications

Nominal Voltage		12V
Rated Capacity (20 hour rate)		26AH
Dimension	Total Height (with terminals)	125mm(4.92inches)
	Height	125mm(4.92inches)
	Length	165mm(6.50inches)
	Width	176mm(6.93 inches)
Weight		Approx.10.0kg (22.0lbs)

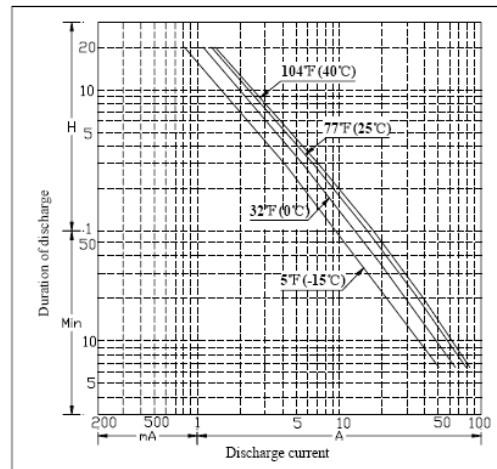
Discharge characteristics 77°F (25°C)



Characteristics

Capacity 77°F (25°C)	20 hour rate (1.3A to 10.5Volts)	26AH
	10 hour rate (2.34A to 10.5Volts)	23.4AH
	5 hour rate (4.26A to 10.2Volts)	21.3AH
Internal Resistance	Full charged Battery 77°F (25°C)	10m Ω
Capacity affected by Temperature (20 hour rate)	104°F (40°C)	102%
	77°F (25°C)	100%
	32°F (0°C)	85%
	5°F (-15°C)	65%
Self-Discharge 77°F (25°C)	Capacity after 3 month storage	91%
	Capacity after 6 month storage	82%
	Capacity after 12 month storage	64%
Standard Terminal	M6	
Max. Discharge Current 77°F (25°C)	390A (5s)	
Cranking Performance	Cranking Amps (30-sec amps to 7.2V @ 32° F (0° C)	200A
	Cold Cranking Amps (30-sec amps to 7.2V @ 0° F (-18° C)	165A
Reserve Capacity (Minutes to 10.5V at 80°F (27°C)	@ 25Amps	30Min
	@ 75Amps	-
Charging (Constant Voltage)	Cycle	Initial Charging Current 5.2A Or Small 14.5V~14.9V/77°F (25°C)
	Float	13.6V~13.8V/77°F (25°C)

Duration of discharge vs. Discharge current



Constant Current Discharge Rating Amperes @ 77 °F (25°C)

Cut off voltage V/cell	15M	30M	45M	1H	2H	3H	5H	8H	10H	12H	20H	24H
1.75V	38	24	18	14.3	8.0	5.9	4.1	2.8	2.34	1.99	1.30	1.09

FULLRIVER

DC BATTERIES

This information is generally descriptive only and is not intended to make or imply any representation, guarantee or warranty with respect to any cells and batteries. Cell and battery designs/specification are subject to modification without notice. Contact Fullriver for the latest information.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Μέρος Δ: Φυλλάδιο κατασκευαστή IGBT [68]

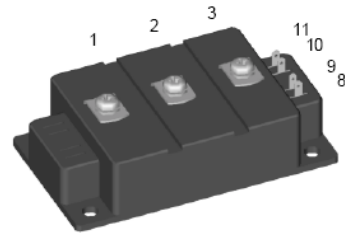
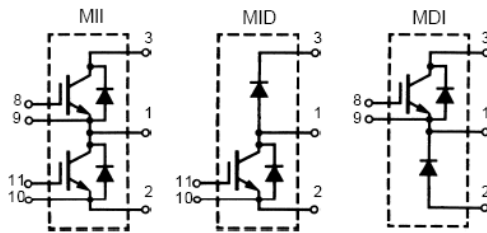


MII 200-12 A4 MID 200-12 A4
MDI 200-12 A4

IGBT Modules

Short Circuit SOA Capability
Square RBSOA

$I_{C25} = 270 \text{ A}$
 $V_{CES} = 1200 \text{ V}$
 $V_{CE(sat) \text{ typ.}} = 2.2 \text{ V}$



E 72873

Symbol	Conditions	Maximum Ratings	
V_{CES}	$T_J = 25^\circ\text{C to } 150^\circ\text{C}$	1200	V
V_{CGR}	$T_J = 25^\circ\text{C to } 150^\circ\text{C}; R_{GE} = 20 \text{ k}\Omega$	1200	V
V_{GES}	Continuous	± 20	V
V_{GEM}	Transient	± 30	V
I_{C25}	$T_C = 25^\circ\text{C}$	270	A
I_{C80}	$T_C = 80^\circ\text{C}$	180	A
I_{CM}	$T_C = 80^\circ\text{C}, t_p = 1 \text{ ms}$	360	A
t_{SC} (SCSOA)	$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}, V_{CE} = V_{CES}, T_J = 125^\circ\text{C}$ $R_G = 6.8 \Omega$, non repetitive	10	μs
RBSOA	$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}, T_J = 125^\circ\text{C}, R_G = 6.8 \Omega$ Clamped inductive load, $L = 100 \mu\text{H}$	$I_{CM} = 360$ $V_{CEK} \leq V_{CES}$	A
P_{tot}	$T_C = 25^\circ\text{C}$	1130	W
T_J		150	$^\circ\text{C}$
T_{stg}		-40 ... +150	$^\circ\text{C}$
V_{ISOL}	50/60 Hz, RMS $t = 1 \text{ min}$ $I_{ISOL} \leq 1 \text{ mA}$ $t = 1 \text{ s}$ Insulating material: Al_2O_3	4000 4800	V~ V~
M_d	Mounting torque (module) (terminals)	2.25-2.75 20-25 2.5-3.7 22-33	Nm lb.in. Nm lb.in.
d_s	Creepage distance on surface	10	mm
d_A	Strike distance through air	9.6	mm
a	Max. allowable acceleration	50	m/s^2
Weight	Typical	250 8.8	g oz.

Features

- NPT IGBT technology
- low saturation voltage
- low switching losses
- switching frequency up to 30 kHz
- square RBSOA, no latch up
- high short circuit capability
- positive temperature coefficient for easy paralleling
- MOS input, voltage controlled
- ultra fast free wheeling diodes
- package with DCB ceramic base plate
- isolation voltage 4800 V
- UL registered E72873

Advantages

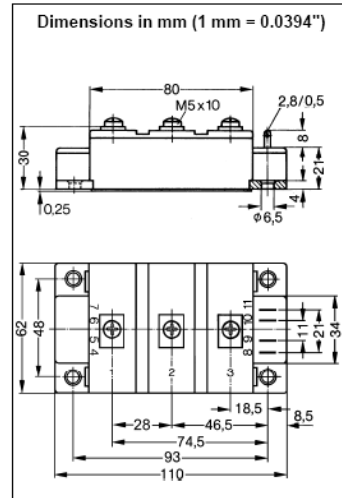
- space and weight savings
- reduced protection circuits

Typical Applications

- AC and DC motor control
- AC servo and robot drives
- power supplies
- welding inverters

Data according to a single IGBT/FRED unless otherwise stated.

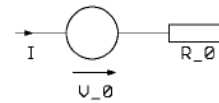
Symbol	Conditions	Characteristic Values ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
$V_{(BR)CES}$	$V_{GE} = 0\text{ V}$	1200		V
$V_{GE(th)}$	$I_C = 6\text{ mA}, V_{CE} = V_{GE}$	4.5		6.5 V
I_{CES}	$V_{CE} = V_{CES}$ $T_J = 25^\circ\text{C}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$		15	10 mA mA
I_{GES}	$V_{CE} = 0\text{ V}, V_{GE} = \pm 20\text{ V}$			$\pm 700\text{ nA}$
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 150\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$		2.2	2.7 V
C_{ies}	$V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz}$		11	nF
C_{oes}		1.5	nF	
C_{res}		0.65	nF	
$t_{d(on)}$	Inductive load, $T_J = 125^\circ\text{C}$ $I_C = 150\text{ A}, V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $V_{CE} = 600\text{ V}, R_G = 6.8\ \Omega$		100	ns
t_r			50	ns
$t_{d(off)}$			650	ns
t_f			50	ns
E_{on}			24.2	mJ
E_{off}			21	mJ
R_{thJC}				0.11 K/W
R_{thJS}	with heatsink compound		0.22	K/W



Symbol	Conditions	Characteristic Values ($T_J = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified)		
		min.	typ.	max.
V_F	$I_F = 150\text{ A}, V_{GE} = 0\text{ V},$ $I_F = 150\text{ A}, V_{GE} = 0\text{ V}, T_J = 125^\circ\text{C}$		2.2	2.5 V
I_F	$T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 80^\circ\text{C}$			300 A 200 A
I_{RM}	$I_F = 150\text{ A}, V_{GE} = 0\text{ V}, -di_F/dt = 1200\text{ A}/\mu\text{s}$		125	A
t_{rr}	$T_J = 125^\circ\text{C}, V_R = 600\text{ V}$		200	ns
R_{thJC}				0.23 K/W
R_{thJS}	with heatsink compound		0.45	K/W

Equivalent Circuits for Simulation

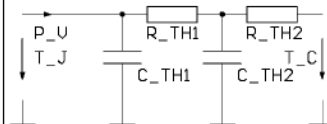
Conduction



IGBT (typ. at $V_{GE} = 15\text{ V}; T_J = 125^\circ\text{C}$)
 $V_\theta = 1.5\text{ V}; R_\theta = 7.0\text{ m}\Omega$

Free Wheeling Diode (typ. at $T_J = 125^\circ\text{C}$)
 $V_\theta = 1.3\text{ V}; R_\theta = 3.4\text{ m}\Omega$

Thermal Response



IGBT (typ.)
 $C_{th1} = 0.40\text{ J/K}; R_{th1} = 0.110\text{ K/W}$
 $C_{th2} = 0.93\text{ J/K}; R_{th2} = 0.003\text{ K/W}$

Free Wheeling Diode (typ.)
 $C_{th1} = 0.28\text{ J/K}; R_{th1} = 0.226\text{ K/W}$
 $C_{th2} = 0.51\text{ J/K}; R_{th2} = 0.005\text{ K/W}$

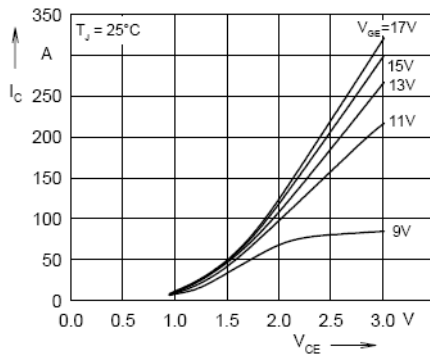


Fig. 1 Typ. output characteristics

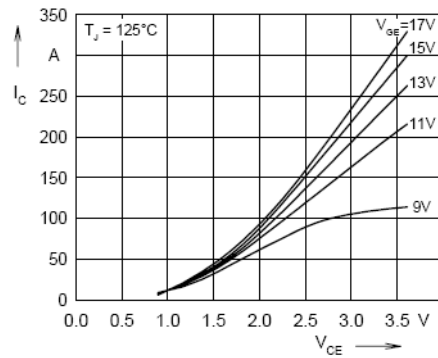


Fig. 2 Typ. output characteristics

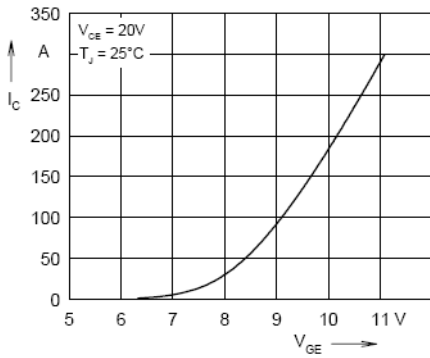


Fig. 3 Typ. transfer characteristics

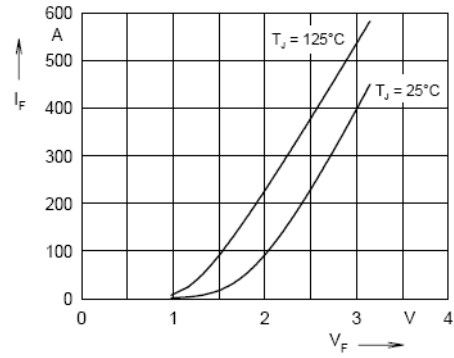


Fig. 4 Typ. forward characteristics of free wheeling diode

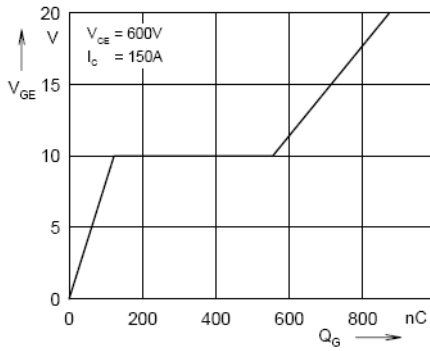


Fig. 5 Typ. turn on gate charge

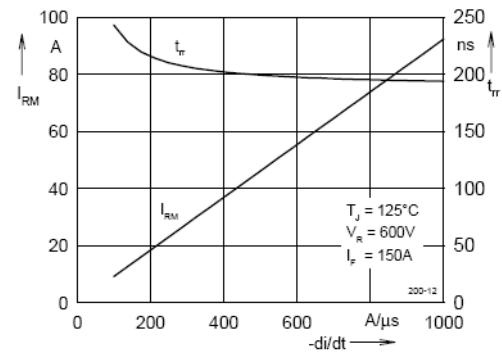


Fig. 6 Typ. turn off characteristics of free wheeling diode

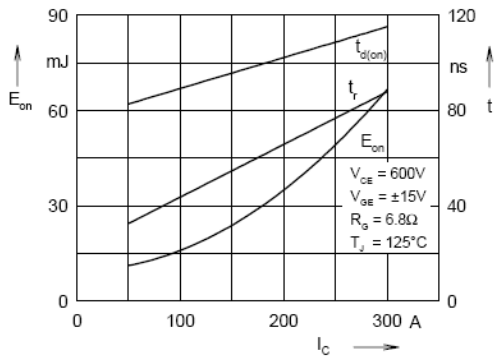


Fig. 7 Typ. turn on energy and switching times versus collector current

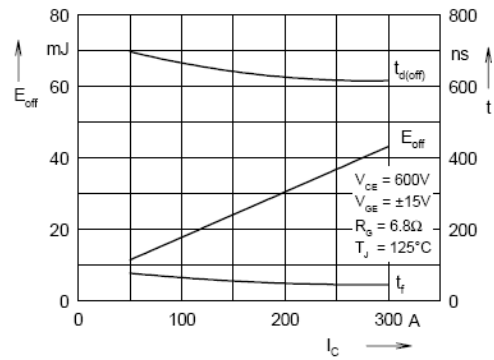


Fig. 8 Typ. turn off energy and switching times versus collector current

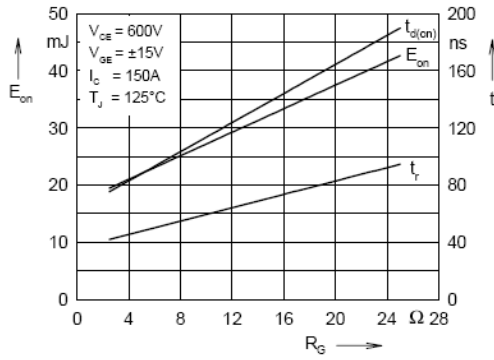


Fig. 9 Typ. turn on energy and switching times versus gate resistor

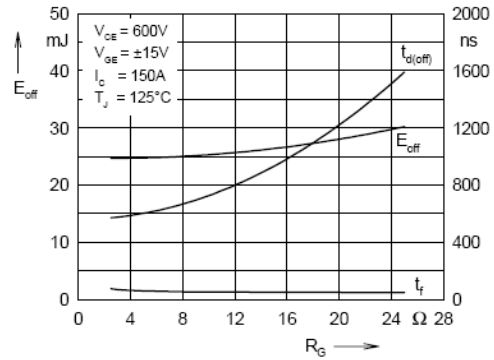


Fig. 10 Typ. turn off energy and switching times versus gate resistor

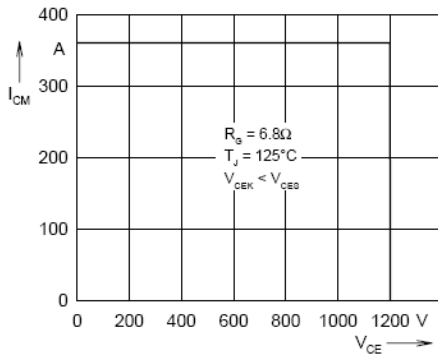


Fig. 11 Reverse biased safe operating area RBSOA

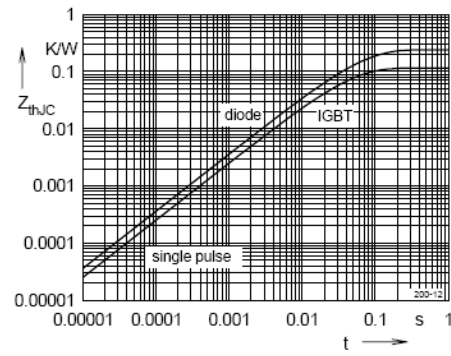


Fig. 12 Typ. transient thermal impedance

Μέρος Ε: Φυλλάδιο κατασκευαστή διόδου ισχύος [69]



RHRG75120

Data Sheet

October 2008

75A, 1200V Hyperfast Diode

The RHRG75120 is a hyperfast diode with soft recovery characteristics ($t_{rr} < 85ns$). It has half the recovery time of ultrafast diodes and is silicon nitride passivated ion-implanted epitaxial planar construction.

This device is intended for use as a freewheeling/clamping diode and rectifier in a variety of high frequency switching power supplies and other power switching applications. Its low stored charge and hyperfast soft recovery characteristic minimize ringing and electrical noise in many power switching circuits, thus reducing power loss in the switching transistors.

Formerly developmental type TA49042.

Ordering Information

PART NUMBER	PACKAGE	BRAND
RHRG75120	TO-247	RHRG75120

NOTE: When ordering, use the entire part number.

Symbol



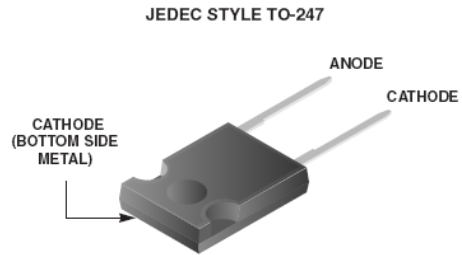
Features

- Hyperfast with Soft Recovery <85ns
- Operating Temperature 175°C
- Reverse Voltage 1200V
- Avalanche Energy Rated
- Planar Construction

Applications

- Switching Power Supplies
- Power Switching Circuits
- General Purpose

Packaging



Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ C$

	RHRG75120	UNITS
Peak Repetitive Reverse Voltage V_{RRM}	1200	V
Working Peak Reverse Voltage V_{RWM}	1200	V
DC Blocking Voltage V_R	1200	V
Average Rectified Forward Current $I_{F(AV)}$ ($T_C = 42^\circ C$)	75	A
Repetitive Peak Surge Current I_{FRM} (Square Wave, 20kHz)	150	A
Nonrepetitive Peak Surge Current I_{FSM} (Halfwave, 1 Phase, 60Hz)	500	A
Maximum Power Dissipation P_D	190	W
Avalanche Energy (See Figures 7 and 8) E_{AVL}	50	mJ
Operating and Storage Temperature T_{STG}, T_J	-65 to 175	°C

RHRG75120

Electrical Specifications $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

SYMBOL	TEST CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNITS
V_F	$I_F = 75\text{A}$	-	-	3.2	V
	$I_F = 75\text{A}, T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	2.6	V
I_R	$V_R = 1200\text{V}$	-	-	250	μA
	$V_R = 1200\text{V}, T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	2	mA
t_{rr}	$I_F = 1\text{A}, dI_F/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	85	ns
	$I_F = 75\text{A}, dI_F/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	-	100	ns
t_a	$I_F = 75\text{A}, dI_F/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	60	-	ns
t_b	$I_F = 75\text{A}, dI_F/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	-	25	-	ns
$R_{\theta JC}$		-	-	0.8	$^\circ\text{C}/\text{W}$

DEFINITIONS

V_F = Instantaneous forward voltage ($p_w = 300\mu\text{s}$, $D = 2\%$).

I_R = Instantaneous reverse current.

t_{rr} = Reverse recovery time (See Figure 6), summation of $t_a + t_b$.

t_a = Time to reach peak reverse current (See Figure 6).

t_b = Time from peak I_{RM} to projected zero crossing of I_{RM} based on a straight line from peak I_{RM} through 25% of I_{RM} (See Figure 6).

$R_{\theta JC}$ = Thermal resistance junction to case.

p_w = Pulse width.

D = Duty cycle.

Typical Performance Curves

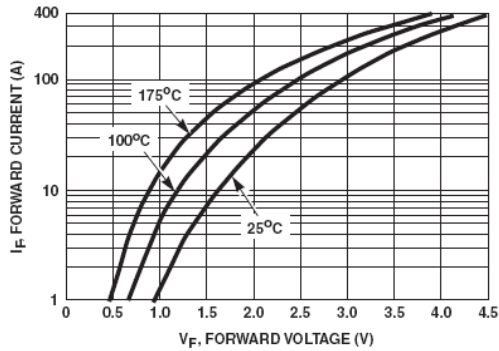


FIGURE 1. FORWARD CURRENT vs FORWARD VOLTAGE

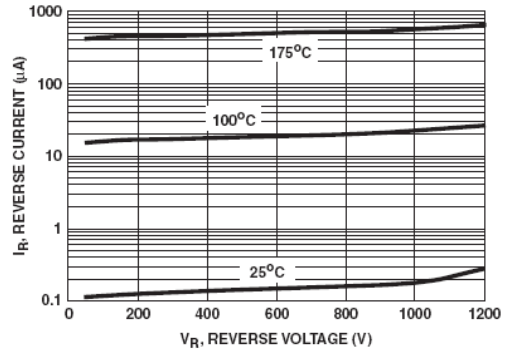


FIGURE 2. REVERSE CURRENT vs REVERSE VOLTAGE

RHRG75120

Typical Performance Curves (Continued)

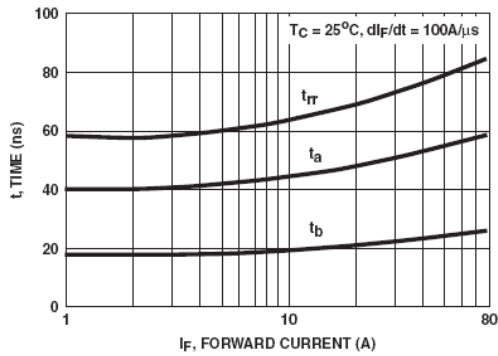


FIGURE 3. t_{tr} , t_a AND t_b CURVES vs FORWARD CURRENT

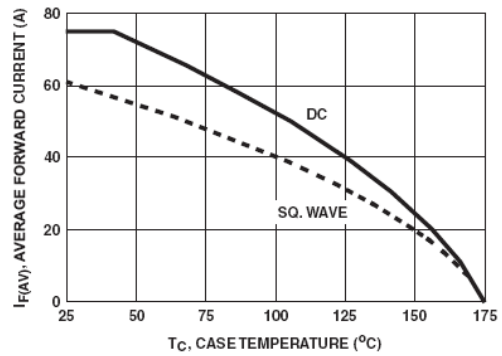


FIGURE 4. CURRENT DERATING CURVE

Test Circuits and Waveforms

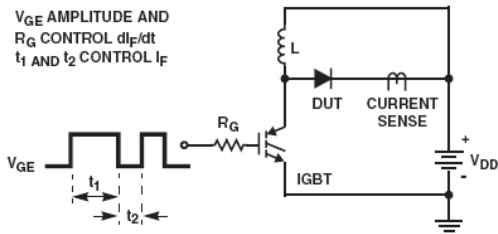


FIGURE 5. t_{tr} TEST CIRCUIT

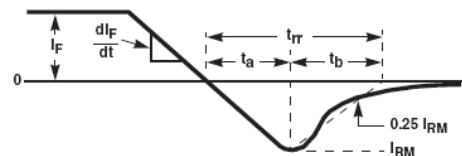


FIGURE 6. t_{tr} WAVEFORMS AND DEFINITIONS

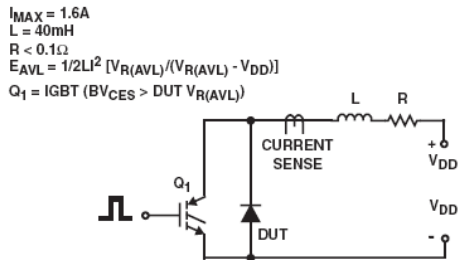


FIGURE 7. AVALANCHE ENERGY TEST CIRCUIT

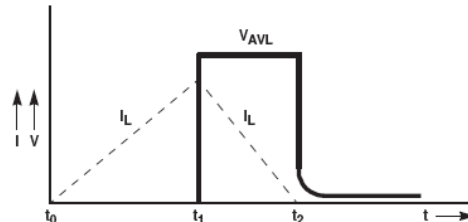


FIGURE 8. AVALANCHE CURRENT AND VOLTAGE WAVEFORMS

RHRG75120



TRADEMARKS



The following includes registered and unregistered trademarks and service marks, owned by Fairchild Semiconductor and/or its global subsidiaries, and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

Build it Now™
 CorePLUS™
 CorePOWER™
 CROSSVOLT™
 CTL™
 Current Transfer Logic™
 EcoSPARK®
 EfficientMax™
 EZSWITCH™ *

 Fairchild®
 Fairchild Semiconductor®
 FACT Quiet Series™
 FACT®
 FAST®
 FastvCore™
 FlashWriter® *
 FPS™
 F-PFS™

FRFET®
 Global Power ResourceSM
 Green FPS™
 Green FPS™ e-Series™
 GTO™
 IntelliMAX™
 ISOPLANAR™
 MegaBuck™
 MICROCOUPLER™
 MicroFET™
 MicroPak™
 MillerDrive™
 MotionMax™
 Motion-SPM™
 OPTOLOGIC®
 OPTOPLANAR®

 PDP SPM™
 Power-SPM™
 PowerTrench®
 PowerXS™

Programmable Active Droop™
 QFET®
 QS™
 Quiet Series™
 RapidConfigure™

 Saving our world, 1mW /W /kW at a time™
 SmartMax™
 SMART START™
 SPM®
 STEALTH™
 SuperFET™
 SuperSOT™-3
 SuperSOT™-6
 SuperSOT™-8
 SupreMOS™
 SyncFET™

 SYSTEM®
 GENERAL
 The Power Franchise®

the power franchise
 TinyBoost™
 TinyBuck™
 TinyLogic®
 TINYOPTO™
 TinyPower™
 TinyPWM™
 TinyWire™
 µSerDes™

 UHC®
 Ultra FRFET™
 UniFET™
 VCX™
 VisualMax™
 XS™

* EZSWITCH™ and FlashWriter® are trademarks of System General Corporation, used under license by Fairchild Semiconductor.

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION, OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS. THESE SPECIFICATIONS DO NOT EXPAND THE TERMS OF FAIRCHILD'S WORLDWIDE TERMS AND CONDITIONS, SPECIFICALLY THE WARRANTY THEREIN, WHICH COVERS THESE PRODUCTS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.
2. A critical component in any component of a life support, device, or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

ANTI-COUNTERFEITING POLICY

Fairchild Semiconductor Corporation's Anti-Counterfeiting Policy. Fairchild's Anti-Counterfeiting Policy is also stated on our external website, www.fairchildsemi.com, under Sales Support.

Counterfeiting of semiconductor parts is a growing problem in the industry. All manufactures of semiconductor products are experiencing counterfeiting of their parts. Customers who inadvertently purchase counterfeit parts experience many problems such as loss of brand reputation, substandard performance, failed application, and increased cost of production and manufacturing delays. Fairchild is taking strong measures to protect ourselves and our customers from the proliferation of counterfeit parts. Fairchild strongly encourages customers to purchase Fairchild parts either directly from Fairchild or from Authorized Fairchild Distributors who are listed by country on our web page cited above. Products customers buy either from fairchild directly or from Authorized Fairchild Distributors are genuine parts, have full traceability, meet Fairchild's quality standards for handling and storage and provide access to Fairchild's full range of up-to-date technical and product information. Fairchild and our Authorized Distributors will stand behind all warranties and will appropriately address and warranty issues that may arise. Fairchild will not provide any warranty coverage or other assistance for parts bought from Unauthorized Sources. Fairchild is committed to combat this global problem and encourage our customers to do their part in stopping this practice by buying direct or from authorized distributors.

PRODUCT STATUS DEFINITIONS

Definition of Terms

Datasheet Identification	Product Status	Definition
Advance Information	Formative / In Design	Datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice.
Preliminary	First Production	Datasheet contains preliminary data; supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve design.
No Identification Needed	Full Production	Datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice to improve the design.
Obsolete	Not In Production	Datasheet contains specifications on a product that is discontinued by Fairchild Semiconductor. The datasheet is for reference information only.

Rev. I37

Μέρος ΣΤ: Πυκνωτές Epcos [66]



B43501

Long Life – 85 °C

U_R	C_R	Case dimensions	ESR_{typ}	ESR_{max}	Z_{max}	$I_{~max}$	$I_{~R}^{1)}$	Ordering code ²⁾
VDC	100 Hz 20 °C μF	$d \times l$ mm	100 Hz 20 °C mΩ	100 Hz 20 °C mΩ	10 kHz 20 °C mΩ	100 Hz 40 °C A	100 Hz 85 °C A	
420	100	22 × 30	1330	1990	1600	1,74	0,79	B43501A0107M000
	100	25 × 25	1330	1990	1600	1,77	0,80	B43501E0107M000
	120	22 × 30	1110	1660	1330	2,06	0,94	B43501A0127M000
	150	22 × 40	890	1330	1070	2,37	1,08	B43501A0157M000
	150	25 × 35	890	1330	1070	2,44	1,11	B43501E0157M000
	180	25 × 35	740	1110	890	2,67	1,21	B43501A0187M000
	180	30 × 30	740	1110	890	2,76	1,26	B43501E0187M000
	220	25 × 40	610	910	730	3,11	1,41	B43501A0227M000
	220	30 × 35	610	910	730	3,22	1,46	B43501E0227M000
	270	30 × 35	500	740	590	3,57	1,62	B43501A0277M000
	270	35 × 30	500	740	590	3,76	1,71	B43501E0277M000
	330	30 × 45	410	610	490	4,32	1,96	B43501A0337M000
	330	35 × 35	410	610	490	4,37	1,98	B43501E0337M000
	390	30 × 50	350	520	410	4,89	2,22	B43501A0397M000
	470	35 × 45	290	430	340	5,69	2,58	B43501A0477M000
	560	35 × 50	240	360	290	6,45	2,93	B43501A0567M000
450	47	22 × 25	2830	4240	3400	1,1	0,51	B43501A5476M000
	68	22 × 30	1960	2930	2350	1,4	0,65	B43501A5686M000
	68	25 × 25	1960	2930	2350	1,5	0,66	B43501B5686M000
	100	22 × 40	1330	1990	1600	1,9	0,88	B43501A5107M000
	100	25 × 30	1330	1990	1600	1,9	0,86	B43501B5107M000
	100	30 × 25	1330	1990	1600	1,9	0,90	B43501C5107M000
	150	25 × 40	890	1330	1070	2,6	1,2	B43501A5157M000
	150	30 × 30	890	1330	1070	2,5	1,1	B43501B5157M000
	180	30 × 35	750	1100	890	2,9	1,3	B43501A5187M000
	220	30 × 40	610	910	730	3,4	1,5	B43501A5227M000
	270	30 × 45	500	740	600	3,9	1,8	B43501A5277M000
	330	35 × 40	410	610	490	4,6	2,1	B43501A5337M000
	470	35 × 50	290	430	350	5,9	2,7	B43501A5477M000

Preferred types

1) 120 Hz conversion factor of ripple current: $I_{~}(120 \text{ Hz}) = 1,03 \cdot I_{~}(100 \text{ Hz})$

2) Ordering code for standard terminals (6,3 mm).

To determine the ordering code for short terminals (4,5 mm) and 3 terminals (4,5 mm) see page 238.

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Μέρος Ζ: Πυκνωτές Revox – Rifa (με σπείρωμα) [66]

PEH 200

ARTICLE TABLE PEH 200 (85°C)									
C _R	D x L	Case code	I _{RAC} [*]	I _{RAC} [*]	I _{RAC} [*]	ESR [*]	ESR [*]	L _{ESL} Approx.	Article code 1st block
			85°C	50°C	40°C	20°C	20°C		
μF	mm		100 Hz A	10 kHz A	10 kHz A	100 Hz mΩ	100 kHz mΩ	nH	
250 VDC (U_R)									
4700	90 x 78	M	12.7	44.2	30.4	30	18	16	PEH200SM4470M
6800	75 x 105	T	14.7	51.5	36.5	20	12	17	PEH200ST4680M
6800	90 x 98	N	15.8	52.1	37.3	21	13	16	PEH200SN4680M
10000	75 x 145	V	18.0	59.0	44.0	14	9	17	PEH200SV5100M
12000	75 x 145	V	18.8	58.6	43.6	14	9	17	PEH200SV512AM
15000	75 x 220	X	20.6	61.6	49.2	10	6	17	PEH200SX5150M
15000	90 x 145	Y	21.8	60.1	45.5	12	8	16	PEH200SY5150M
350 VDC (U_R)									
220	35 x 51	A	2.0	13.7	8.8	360	170	12	PEH200JA3220M
330	35 x 60	B	2.6	16.6	11.0	240	110	12	PEH200UB3330M
470	35 x 75	C	3.2	19.3	13.4	170	79	12	PEH200UC3470M
680	35 x 95	D	3.8	21.9	16.0	120	55	12	PEH200UD3680M
680	50 x 49	G	4.0	20.7	12.6	130	66	16	PEH200UG3680M
1000	50 x 75	H	5.5	28.8	19.5	85	41	16	PEH200UH4100M
1500	50 x 95	J	6.8	32.9	23.4	57	28	16	PEH200UJ4150M
2200	65 x 105	O	9.4	39.8	29.2	41	21	16	PEH200UO4220M
2200	75 x 78	L	9.8	43.5	29.4	41	21	17	PEH200UL4220M
3300	65 x 105	O	10.9	38.6	27.5	31	17	16	PEH200UO4330M
3300	90 x 78	M	13.1	54.0	37.0	28	15	16	PEH200UM4330M
4700	75 x 115	U	14.5	54.7	39.5	20	11	17	PEH200UU4470M
4700	90 x 98	N	15.0	51.3	36.7	22	13	16	PEH200UN4470M
6800	75 x 145	V	16.8	57.0	42.3	15	8	17	PEH200UV4680M
10000	75 x 220	X	19.4	60.8	48.5	11	7	17	PEH200UX5100M
10000	90 x 145	Y	23.3	75.2	56.9	11	6	16	PEH200UY5100M
15000	90 x 220	Z	27.3	79.8	64.4	8	5	16	PEH200UZ515AM
385 VDC (U_R)									
220	35 x 51	A	2.1	14.6	9.3	330	150	12	PEH200XA3220M
330	35 x 75	C	2.7	17.0	12.0	220	97	12	PEH200XC3330M
470	35 x 95	D	3.3	19.1	14.2	150	69	12	PEH200XD3470M
470	50 x 49	G	3.6	20.9	12.8	160	78	16	PEH200XG3470M
680	50 x 75	H	4.7	26.8	18.4	110	51	16	PEH200XH3680M
1000	50 x 95	J	5.9	31.7	22.8	76	35	16	PEH200XJ4100M
1500	50 x 105	K	7.1	34.1	24.7	52	25	16	PEH200XK4150M
2200	65 x 105	O	9.6	36.7	26.1	38	20	16	PEH200XO4220M
2200	75 x 78	L	10.0	42.7	28.8	38	20	17	PEH200XL4220M
3300	75 x 105	T	12.8	52.5	37.4	25	13	17	PEH200XT4330M
3300	90 x 78	M	13.3	52.6	36.0	26	14	16	PEH200XM4330M
4700	75 x 145	V	15.2	57.6	43.9	19	11	17	PEH200XV4470M
4700	90 x 98	N	16.6	62.4	44.4	19	10	16	PEH200XN4470M
6800	90 x 145	Y	20.9	74.8	57.2	14	8	16	PEH200XY4680M
6800	75 x 220	X	17.4	58.9	47.0	14	8	17	PEH200XX4680M
400 VDC (U_R)									
220	35 x 51	A	2.2	11.4	9.6	310	130	12	PEH200VA3220M
330	35 x 75	C	2.8	14.3	12.6	210	90	12	PEH200VC3330M
470	35 x 95	D	3.4	16.5	14.8	140	63	12	PEH200VD3470M
470	50 x 49	G	3.7	15.0	12.7	150	73	16	PEH200VG3470M
680	50 x 75	H	4.9	21.2	18.3	110	55	16	PEH200VH3680M
1000	50 x 95	J	5.9	24.2	21.3	76	38	16	PEH200VJ4100M
1500	65 x 105	O	9.1	49.1	35.1	53	27	16	PEH200VO415AQ
1500	75 x 78	L	8.8	34.0	29.0	52	27	17	PEH200VL4150M
2200	65 x 105	O	9.6	29.1	25.6	39	21	16	PEH200VO4220M
2200	90 x 78	M	11.8	44.1	37.1	36	19	16	PEH200VM4220M
3300	65 x 105	O	11.0	30.5	26.7	29	16	16	PEH200VO433AM
3300	75 x 115	U	13.8	52.0	45.7	22	10	17	PEH200VU433AQ
3300	90 x 98	N	14.9	52.8	45.2	25	13	16	PEH200VN4330M

* Maximum values. ** 2 m/s forced air, studmounted on 3°C/W aluminium chassis. Items marked in bold, are available on short lead-times

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.