



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

Σχεδιασμός και κατασκευή Dc-Dc μετατροπέα ανύψωσης τάσης για ένταξη του σε Dc μικροδίκτυο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΟΝΟΥΦΡΙΟΥ Γ. ΜΑΛΗΚΚΙΔΗ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014



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

Σχεδιασμός και κατασκευή Dc-Dc μετατροπέα ανύψωσης τάσης για ένταξη του σε Dc μικροδύκτιο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΟΝΟΥΦΡΙΟΥ Γ. ΜΑΛΗΚΚΙΔΗ

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Ιουλίου 2014

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σταύρος Σ. Παπαθανασίου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Πάυλος Γεωργιλιάκης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2014

.....
Ονούφριος Γ. Μαληκκίδης Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός
Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ονούφριος Γ. Μαληκκίδης
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη μιας διάταξης συνεχούς ρεύματος με πηγή ισχύος ένα σύστημα κυψελών καυσίμου, η σχεδίαση, προσομοίωση και κατασκευή ενός μετατροπέα ανύψωσης τάσης χαμηλού κόστους, καθώς και η μελέτη δύο διαφορετικών μεθόδων ελέγχου του συστήματος του μετατροπέα.

Στο 1^ο κεφάλαιο αρχικά μελετάται η έννοια της Κατανεμημένης Παραγωγής και τα πλεονεκτήματα της έναντι του συμβατικού ιεραρχικού τρόπου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ αναφέρονται οι μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που προσφέρουν την δυνατότητα Κατανεμημένης Παραγωγής, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις κυψέλες καυσίμου.

Στο 2^ο κεφάλαιο εισάγεται η έννοια των μικροδικτύων και των εξυπνων δικτύων. Μελετώνται τα χαρακτηριστικά τους καθώς και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι τεχνολογίες αυτές. Ειδικότερα γίνεται μελέτη των dc μικροδικτύων και σύγκριση τους με τα ac μικροδίκτυα.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα διάφορα είδη των μετατροπέων dc-dc και γίνεται μια θεωρητική ανάλυση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης (τύπου boost). Μελετάται η λειτουργία του στην κατάσταση συνεχούς αγωγής, ασυνεχούς αγωγής αλλά και το όριο συνεχούς-ασυνεχούς αγωγής. Στη συνέχεια γίνεται η σχεδίαση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης και καθορίζονται οι προδιαγραφές των επιμέρους στοιχείων που τον αποτελούν. Επίσης μελετάται η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) όπως και ο αναλογικός-ολοκληρωτικός έλεγχος.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο έλεγχος ανοικτού και κλειστού βρόχου του μετατροπέα ανύψωσης. Ειδικότερα μελετάται ο Έλεγχος Τάσης όπως και ο Έλεγχος Ρεύματος-Τάσης και αντλούνται οι συναρτήσεις μεταφοράς κλειστού βρόχου του συστήματος για τον κάθε έλεγχο. Στην συνέχεια γίνεται η μοντελοποίηση της πειραματικής διάταξης σε περιβάλλον Simulink Matlab, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον κάθε τρόπο ελέγχου. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων ελέγχου.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η κατασκευή του μετατροπέα ανύψωσης και γίνεται μια πιο αναλυτική παρουσίαση του κάθε στοιχείου της πειραματικής διάταξης. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα στοιχεία του μετατροπέα που επιλέξαμε από το εμπόριο, καθώς και η σχεδίαση της πλακέτας πάνω στη οποία συνδέθηκαν τα στοιχεία.

Στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του μικροεπεξεργαστή Arduino που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση της τεχνικής διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM.

Στο 7^ο κεφάλαιο προχωράμε στην παρουσίαση της πειραματικής διάταξης και των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων που έγιναν στο εργαστήριο. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τις θεωρητικές τιμές αλλά και με τις τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο της προσομοίωσης.

Στο 8^ο κεφάλαιο εξάγονται συμπεράσματα και προτείνονται βελτιώσεις σε τμήματα της εργασίας μας όπως και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τέλος καταγράφεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε ενώ στο Παράρτημα ενσωματώνονται τα data sheets των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν και ο κώδικας του μικροελεγκτή Arduino.

Λέξεις κλειδιά.

Κατανεμημένη Παραγωγή, Ανανεώσιμες πηγες ενεργειας, Κυψέλη καυσιμου, Μικροδίκτυα, Έξυπνα δίκτυα, Dc μικροδίκτυα, Μετατροπέας ανύψωσης τάσης, PWM, pi ελεγκτής, Έλεγχος Τάσης, Έλεγχος Ρεύματος-Τάσης, Arduino, μικροελεγκτής, λόγος κατάτμησης, χαμηλό κόστος, απόκριση συστήματος, ευστάθεια.

Abstract

The object of this work is the study of an isolated DC power arrangement using as power source a fuel cell system, the design, simulation and construction of a low cost boost converter, and the study of two different control methods of the converter.

In the first chapter initially we studied the concept of Distributed Generation and its advantages over the conventional hierarchical production of electrical power, while indicating the forms of renewable energy sources that offer the possibility of Distributed Generation, with particular emphasis on fuel cell systems.

In the second chapter, we introduce the concept of the microgrid and smart grid. We study their characteristics as well as the advantages of these technologies. In particular dc microgrids are studied and then compared with the ac microgrids to focus on the points which predominate.

In the third chapter a reference to various types of dc-dc converters takes place and a theoretical analysis of the boost converter is done. We study the operation in continuous conduction mode, discontinuous conduction and threshold continuous-discontinuous conduction. Then we design the step-up converter and we conclude the specifications of its various components. Also technique PWM (PWM) is studied as well as the proportional-integral control.

In chapter 4 open and closed loop control of boost converter is studied. Particularly voltage control and current-voltage control is studied theoretically and the transfer functions of the closed loop system for each control are pumped. Then the modeling of the experimental setup takes place in Simulink Matlab environment and exported various waveforms for each mode of control. In the end of the chapter comparison of results for each control mode is done.

In chapter 5 the construction of the boost converter is presented and a more detailed presentation of each item of the experimental setup is done. More specifically we present the converter's components that are selected as appropriate, and the design of the board. A presentation of the dc power supply and the metering devices used in the experimental setup is also done.

In chapter 6 we present the Arduino microprocessor used for the implementation of PWM technique.

In chapter 7 we proceed to the presentation of the experimental setup and the results of experimental measurements made in the laboratory.

In the 8th chapter draws conclusions and recommends improvements to parts of our research as well as recommendations for future research.

Finally recorded literature used while in Appendix incorporates the manuals of the data used.

Keywords.

Distributed Generation, Renewable Energy, Fuel Cells, Microgrids, Smart networks, Dc microgrids, boost converter, PWM, pi controller, Control Voltage Control Current-Voltage, Arduino, Microcontroller, duty cycle, low cost, response system, stability

Ευχαριστίες

Θερμά ευχαριστώ στον Αθανάσιο Βασιλάκη και την Χριστίνα Παπαδημητρίου για τις υποδείξεις και τη καθοδήγησή τους κατά τη διεξαγωγή της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης και όλα τα παιδιά του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για τις συμβουλές, τη βοήθεια και τις υποδείξεις τους στα διάφορα στάδια της έρευνας. Ιδιαίτερα ευχαριστώ στον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π για την υποστήριξη της παρούσας εργασίας.

Στους γονείς μου

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Κατανεμημένη Παραγωγή(ΚΠ)	15
1.1 Ορισμός.....	15
1.2 Σκοπός.....	15
1.3 Λόγοι ανάπτυξης της ΚΠ.....	15
1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	16
1.5 Υδρογόνο-κύτταρο καυσίμου.....	16
1.5.1 Αρχές Λειτουργίας/ Δομή	17
1.5.2 Διάφορα είδη κυττάρων καυσίμου και εφαρμογές	18
1.5.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυττάρων καυσίμου.....	20
1.5.4 Εφαρμογή κυψελών καυσίμου σε εγκαταστάσεις κτιρίων	21
1.6 Τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας στην ΚΠ	22
1.7 Η μετάβαση από το σήμερα στο αύριο	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:Μικροδίκτυα	25
2.1 Εισαγωγή, ορισμός.....	25
2.2 Θέση Εγκατάστασης	27
2.3 Διασύνδεση με το δίκτυο	27
2.3.1 Δίκτυα Διανομής και Μεταφοράς	28
2.3.2 Προδιαγραφές Σύνδεσης - Εξοπλισμός	28
2.3.3 Επιδράσεις του μικροδικτύου στην διασύνδεση με το κεντρικό δίκτυο.....	29
2.3.4 Μεταβολή της Τάσης	29
2.3.5 Ποιότητα Ισχύος	30
2.4 Πλεονεκτήματα Μικροδικτύου.....	30
2.5 Μειονεκτήματα Μικροδικτύου	30
2.6 Έξυπνα δίκτυα	31
2.6.1 Καθοριστικά χαρακτηριστικά των έξυπνων δικτύων.	32
2.6.3 Τεχνολογίες έξυπνου δικτύου.	34
2.6.4 Συσκευές έξυπνου δικτύου.	35
2.7 Dc μικροδίκτυα	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:Μετατροπείας Dc-Dc	42
3.1 Θεωρητική Ανάλυση Dc-dc μετατροπέα	42
3.2 DC - DC μετατροπείας ανύψωσης τάσης	44
3.2.1 Συνεχής Αγωγή του Ρεύματος.....	46

3.2.2	Ασυνεχής Αγωγή του Ρεύματος	47
3.2.3	Όριο Μεταξύ Συνεχούς και Ασυνεχούς Αγωγής.....	49
3.2.4	Επίδραση Παρασητικών στοιχείων.....	53
3.2.4	Κυμάτωση Της Τάσης Εξόδου	54
3.2.5	Κυματομορφές στοιχείων	55
3.2.6	Ακουστικός θόρυβος στους μετατροπείς ανύψωσης	56
3.3	Σχεδίαση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.....	58
3.3.1	Σχεδίαση Mosfet Ισχύος	59
3.3.2	Σχεδίαση Πηνίου.....	61
3.3.3	Σχεδίαση Διόδου	62
3.3.4	Σχεδίαση πυκνωτή εξόδου	64
3.4	Τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM) για τον μετατροπέα ανύψωσης Τάσης dc-dc..	66
3.5	Αναλογικός-ολοκληρωτικός έλεγχος.....	69
3.5.1	Εισαγωγή.....	69
3.5.2	Αναλογικός Έλεγχος	71
3.5.4	Ολοκληρωτικός έλεγχος.....	72
3.5.4	Φαινόμενο Integrator windup	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Έλεγχος ανοικτού και κλειστού βρόχου μετατροπέα ανύψωσης τάσης.....		76
4.1	Έλεγχος ανοικτού βρόχου.....	76
4.1.1	Μοντελοποίηση πειραματικής διάταξης.....	76
4.1.2	Αποτελέσματα Προσομοίωσης	82
4.2	Voltage-Mode Control.....	84
4.3	Current-Mode Control	86
4.3.2	Λειτουργία ελέγχου ρεύματος-τάσης.....	87
4.4	Εξισώσεις μόνιμης κατάστασης του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.....	93
4.4.1	Περιγραφή χώρου καταστάσεων για κάθε χρονικό διάστημα.	93
4.4.2	Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου Ελέγχου Τάσης.....	97
4.3.3	Συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου Ελέγχου Ρεύματος-Τάσης	97
4.5	Προσομοίωση Ελέγχου Τάσης.....	99
4.5.1	Αποτελέσματα.....	103
4.6	Προσομοίωση Ελέγχου Ρεύματος-Τάσης	112
4.5.1	Σχεδίαση	113
4.6.2	Αποτελέσματα.....	117
4.6	Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτεσμάτων-Συμπεράσματα	126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Κατασκευή μετατροπέα ανύψωσης και πειραματική διάταξη.....	130
5.1 Εισαγωγή.....	130
5.2 Κατασκευή μετατροπέα ανύψωσης	130
5.2.1 Πηνίο.....	130
5.2.2 Πυκνωτής.....	131
5.2.3 Mosfet	132
5.2.3 Δίοδος.....	132
5.2.4 Κύκλωμα Παλμοδότησης Mosfet Ισχύος	133
5.2.5 Σχεδίαση Πλακέτας.....	134
5.2.6 Ο μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης.....	135
5.2.7 Κόστος κατασκευής μετατροπέα ανύψωσης τάσης.....	136
5.3 Φορτίο εξόδου.....	137
5.4 Παλμογράφος.....	137
5.5 Τροφοδοτικό	138
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Μικροελεγκτής Arduino	139
6.1 Μικροελεγκτές.....	139
6.2 Παρουσίαση της πλατφόρμας Arduino.....	140
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αποτελέσματα πειραματικής διάταξης.....	142
7.1 Πειραματική Διάταξη.....	142
7.2 Αποτελέσματα	143
7.2.1 Μεταβολή του λόγου κατατμησης (duty cycle) για σταθερή τάση εισόδου V_{in} και σταθερό φορτίο.....	143
7.2.2 Βηματική μεταβολή του λόγου κατατμησης (duty cycle) για σταθερή τάση εισόδου.	148
7.3 Σύγκριση θεωρητικών τιμών-πειραματικών μετρήσεων	149
7.3.1 Σύγκριση γραφικών παραστάσεων τάσης εξόδου.	149
7.3.2 Βαθμός απόδοσης	152
7.3.3 Κυμάτωση Εξόδου.....	153
7.3.4 Βηματική μεταβολή του duty cycle	153
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Συμπεράσματα	155
8.1 Συμπεράσματα-παρατηρήσεις-προτάσεις για το μέλλον.....	155
Βιβλιογραφία	156
Παράρτημα	158

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:Καταναμημένη Παραγωγή(ΚΠ)

1.1 Ορισμός

Η καταναμημένη παραγωγή(ΚΠ) ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας, άμεσα συνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής, με τιμές που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1kW μέχρι 100MW. Είναι μία σχετικά καινούρια τάση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και στην βιομηχανία ηλεκτρισμού. Συχνά συναντάται και με τους εναλλακτικούς ελληνικούς όρους: διανεμημένη παραγωγή, διάσπαρτη παραγωγή, επί τόπου παραγωγή, ενσωματωμένη παραγωγή, αποκεντρωμένη παραγωγή.

Στα αγγλικά ονομάζεται ‘Distributed Generation’ ενώ συναντάται επίσης με ένα πλήθος εναλλακτικών όρων όπως: ‘embedded generation’, ‘dispersed generation’, ‘decentralised generation’.

Με την μέχρι τώρα έρευνα στην βιβλιογραφία αλλά και στις νομοθεσίες των διαφόρων κρατών φαίνεται να μην υπάρχει ομοφωνία για έναν κοινό και σαφή ορισμό πάνω στο θέμα της καταναμημένης παραγωγής. Προκειμένου να διατυπωθεί ένας ενιαίος ορισμός, αλλά και να γίνει κατανοητή η έννοια της καταναμημένης παραγωγής, είναι απαραίτητο να γίνει αναφορά πάνω σε κάποια βασικά ζητήματα που αφορούν αυτόν τον τρόπο παραγωγής όπως είναι ο σκοπός για τον οποίο γίνεται η παραγωγή, η τοποθεσία, το μέγεθος, η τεχνολογία που χρησιμοποιείται, η περιοχή που τροφοδοτεί, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον, ο τρόπος λειτουργίας, το ιδιοκτησιακό καθεστώς και το ποσοστό διείσδυσης της ΚΠ. Παρακάτω γίνεται μία περιγραφή ορισμένων από τα θέματα αυτά προκειμένου να καταστεί σαφές σε τι αναφερόμαστε όταν μιλάμε για καταναμημένη παραγωγή.[1]

Εάν θέλαμε να δώσουμε ένα ενιαίο ορισμό που μπορεί να γίνει γενικά αποδεκτός θα μπορούσαμε να πούμε ότι καταναμημένη παραγωγή είναι **οποιαδήποτε πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδεδεμένη άμεσα στο δίκτυο διανομής ή στη θέση κατανάλωσης ή πιο απλά οι μονάδες παραγωγής ενέργειας έχουν εγκατασταθεί κοντά στο σημείο κατανάλωσης (φορτίο).**[2]

1.2 Σκοπός

Σκοπός της ΚΠ είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στην καρδιά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από πολλές μικρές πηγές ενέργειας εξαρτάται δηλαδή κυρίως από την εγκατάσταση και την λειτουργία ενός συνόλου από μικρού μεγέθους, συμπαγείς και καθαρές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κοντά στη θέση του ηλεκτρικού φορτίου.

Αυτό που επιδιώκεται είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος χωρίς ωστόσο να επιβάλλεται η παραγωγή άεργου ισχύος

1.3 Λόγοι ανάπτυξης της ΚΠ

Αν και η καταναμημένη παραγωγή είχε ξεχαστεί σαν έννοια τα χρόνια που ακολούθησαν, την τελευταία δεκαετία αρχίζει να κάνει εμφανή την χρησιμότητα της και να εξετάζονται τρόποι με τους οποίους θα γίνει εφικτή η εφαρμογή της και πάλι στα σύγχρονα πλέον δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιστροφή της καταναμημένης παραγωγής στο προσκήνιο οφείλεται σε μία σειρά λόγων η οποίοι επιγραμματικά είναι οι παρακάτω :[3]

- Αυξημένη απαίτηση για ενέργεια υψηλής αξιοπιστίας
- Ανάπτυξη των τεχνολογιών καταναμημένης παραγωγής .
- Περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς
- Προβληματισμοί για της κλιματικές αλλαγές
- Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας .

Η εφαρμογή της κατανεμημένης παραγωγής προς το παρόν γίνεται σε μικρή κλίμακα λόγω οικονομικών αλλά και τεχνικών ζητημάτων, τα οποία είναι δυνατό να αντιμετωπιστούν με κατάλληλο σχεδιασμό, όμως από αρκετούς ερευνητές αναμένεται ότι μελλοντικά θα γνωρίσει ευρεία αποδοχή και χρήση.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναφέρονται οι υπάρχουσες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται καθώς επίσης γίνεται αναφορά στα οφέλη αλλά και τα προβλήματα που δημιουργούνται από την εφαρμογή αυτού του τρόπου παραγωγής στα ήδη υπάρχοντα δίκτυα.

1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Στο σημείο αυτό θεωρείται σκόπιμο να γίνει μια μικρή αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ανανεώσιμες Πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποκαλούνται οι εκμεταλλεύσιμες μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διεργασίες. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ανήκουν στις ήπιες μορφές ενέργειας, δηλαδή δεν χρειάζεται κάποια ενεργητική παρέμβαση (εξόρυξη, άντληση ή καύση) και είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Το κύριο όμως χαρακτηριστικό των ΑΠΕ είναι ότι ανανεώνονται συνεχώς και οι πηγές τους είναι ανεξάντλητες.

Σε παγκόσμιο επίπεδο οι ΑΠΕ δεν αξιοποιούνται αρκετά ακόμα και κατέχουν μικρό ποσοστό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο, μόλις το 7%. Ειδικότερα στην Ελλάδα η παραγωγή από ΑΠΕ είναι αρκετά περιορισμένη και μόνο τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να εντατικοποιείται η ενασχόληση με αυτές.

Οι βασικότερες από τις ΑΠΕ είναι η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, ενώ εξίσου σημαντικό ρόλο στις φιλικές προς το περιβάλλον μορφές ενέργειας έχουν η γεωθερμία, η ενέργεια από βιομάζα αλλά και η υδροηλεκτρική. Αναφορά πρέπει επίσης να γίνει και στην αποθήκευση ενέργειας. Στον τομέα αυτό πρωτοπορία αποτελούν οι κυψέλες καυσίμου (fuel cells), τα οποία δεν είναι συσκευές αποθήκευσης αλλά παραγωγής ενέργειας με χρήση καυσίμου το υδρογόνο. Έτσι το υδρογόνο σαν καύσιμο μπορεί να δώσει την λύση ως προς την αποθήκευση αλλά και την μεταφορά ενέργειας, τις δύο κύριες πηγές προβληματισμού των ερευνητών

1.5 Υδρογόνο-κύτταρο καυσίμου

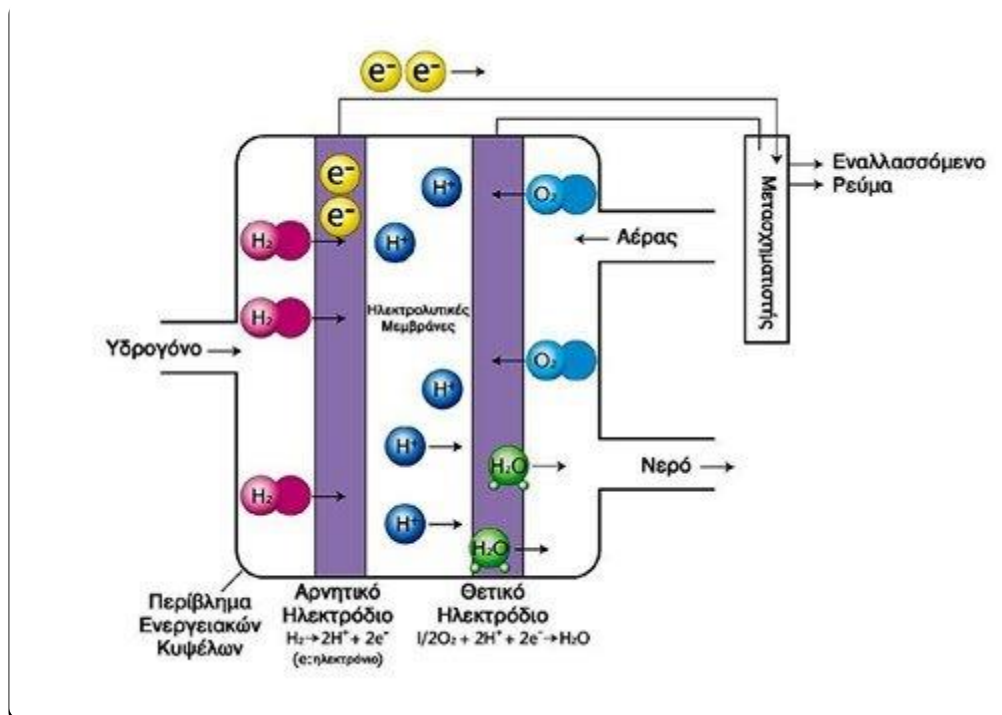
Πρόκειται για την μορφή ενέργειας την οποία χρησιμοποιούμε ως πηγή εισόδου στην διάταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας οπότε κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια πιο εκτενής αναφορά στις πρακτικές εφαρμογές.

Το κύτταρο καυσίμου (ΚΚ) είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει την χημική ενέργεια ενός παρεχόμενου αερίου καυσίμου (π.χ. μεθάνιο) σε ηλεκτρική ενέργεια (και θερμότητα) άμεσα (χωρίς ενδιάμεση θερμική ή μηχανική διεργασία) και συνεχόμενα όσο αντιδρώντα στοιχεία παρέχονται στα ηλεκτρόδιά της. Η πρώτη κυψέλη καυσίμων φτιάχτηκε το 1839 από τον Sir William Grove, έναν Ουαλλό δικαστή και πειραματικό επιστήμονα. Όμως σοβαρό ενδιαφέρον για τη κυψέλη καυσίμων ως πρακτική γεννήτρια δεν άρχισε παρά μόνο τη δεκαετία του '60, όταν επέλεξε το διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ τις κυψέλες καυσίμων κι όχι την επικίνδυνη πυρηνική ενέργεια και την ακριβότερη ηλιακή ενέργεια. Οι κυψέλες καυσίμων εφοδίασαν με ενέργεια το διαστημικό σκάφος Gemini και Apollo, και παρείχαν ακόμα ηλεκτρική ενέργεια και νερό για το Διαστημικό Λεωφορείο.

1.5.1 Αρχές Λειτουργίας/ Δομή

Μια κυψέλη καυσίμου αποτελείται από ένα αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (άνοδος), ένα θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο (κάθοδος) και μια μεμβράνη ηλεκτρολύτη.[4] Το υδρογόνο οξειδώνεται στην άνοδο και το οξυγόνο ανάγεται στην κάθοδο. Τα πρωτόνια περνούν από την άνοδο στην κάθοδο μέσα από την ηλεκτρολυτική μεμβράνη, και τα ηλεκτρόνια οδηγούνται στην κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος. Στη φύση τα μόρια δεν μπορούν να μείνουν σε ιονισμένη κατάσταση, έτσι αμέσως επανασυνδέονται με άλλα μόρια ώστε να επιστρέψουν σε ουδέτερη κατάσταση. Στις κυψέλες καυσίμου τα πρωτόνια του υδρογόνου παραμένουν σε ιονισμένη κατάσταση καθώς ταξιδεύουν από μόριο σε μόριο μέσω της χρήσης ειδικών υλικών. Τα πρωτόνια ταξιδεύουν μέσα από την μεμβράνη πολυμερούς η οποία είναι φτιαγμένη από ομάδες θειικού οξέος με βάση από Teflon. Τα ηλεκτρόνια ελκύνονται από αγώγιμα υλικά και ταξιδεύουν προς το φορτίο όταν χρειάζεται. Στην κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια, σχηματίζοντας νερό και παράγοντας θερμότητα. Η άνοδος και η κάθοδος περιέχουν έναν καταλύτη για να επιταχύνει τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις.

Μια απλή σχηματική διάταξη φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 1.1.

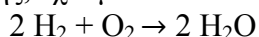


Σχήμα 1.1: σχηματική διάταξη κυψέλης καυσίμου

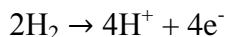
Εξισώσεις

Ακολουθούν οι βασικές εξισώσεις για την λειτουργία που περιγράψαμε

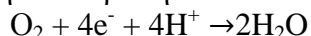
Γενικά, στην διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, έχουμε:



Στην άνοδο ενός κυττάρου καυσίμου, που έχει κάποιον όξινο ηλεκτρολύτη, το υδρογόνο που φτάνει στο ηλεκτρόδιο ιονίζεται ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και δημιουργώντας πρωτόνια, όπως δείχνει η παρακάτω αντίδραση:



Το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που έχουν φτάσει στην κάθοδο και τα πρωτόνια από τον ηλεκτρολύτη, παράγοντας νερό, κατά την αντίδραση:



Εδώ, πρέπει να σημειώσουμε ότι τα δύο ηλεκτρόδια είναι μεταξύ τους συνδεδεμένα και ότι ο ηλεκτρολύτης δεν πρέπει να επιτρέπει την διέλευση ηλεκτρονίων μέσα από αυτόν.

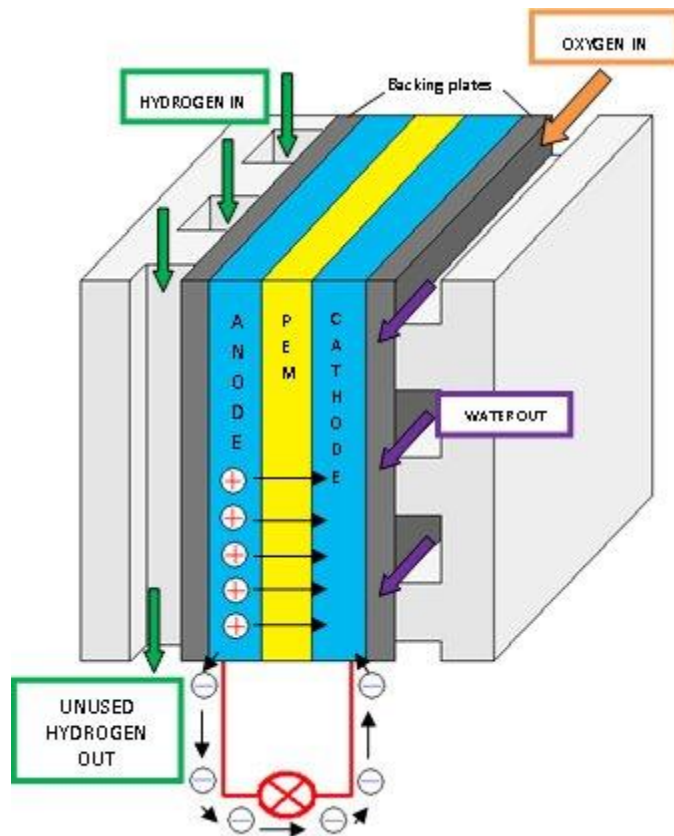
Οι παραπάνω αντιδράσεις σε μία απλή κυψέλη καυσίμου παράγει περίπου στα 0,7V. Προκειμένου να παραχθούν μεγαλύτερες (και πρακτικά αξιοποιήσιμες) τάσεις, χρησιμοποιούνται περισσότερες κυψέλες σε σειρά (fuel cell stack). Τυπικά επίπεδα ισχύος κυψελών καυσίμου είναι από 2 κιλοβάτ (kW) σε 2 μεγαβάτ (MW), και έχουν ηλεκτρική απόδοση που κυμαίνεται 45% έως 65% και επιπλέον με την ανάκτηση θερμότητας, η απόδοση μπορεί να φθάσει το 85%.

1.5.2 Διάφορα είδη κυττάρων καυσίμου και εφαρμογές

Τα διάφορα είδη κυττάρων καυσίμου διαχωρίζονται με βάση τον ηλεκτρολύτη τους. Οι διαφορετικοί τύποι έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας, διαφορετικά υλικά και ελαφρώς διαφορετική αλληλεπίδραση, αλλά η ίδια αντίδραση αποτελεί τη βάση όλων αυτών. Εξαιτίας των διαφορών στις χαρακτηριστικές λειτουργίας, κάθε τύπος προορίζεται για διαφορετικές εφαρμογές.

Οι κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC - Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) [Σχήμα 1.2] είναι ο πιο δημοφιλής τύπος κυψέλης καυσίμου και χρησιμοποιεί ως καύσιμο το υδρογόνο. Οι PEM-κυψέλες έχουν και άλλες επιλογές για καύσιμο οι οποίες κυμαίνονται από υδρογόνο ως αιθανόλη και μέχρι και υλικά που προέρχονται από βιομάζα.

Αυτά τα καύσιμα μπορούν να τροφοδοτηθούν είτε απευθείας στην κυψέλη, είτε να περάσουν πρώτα από έναν μετατροπέα (reformer) ο οποίος θα εξάγει καθαρό υδρογόνο, το οποίο ύστερα θα τροφοδοτηθεί στην κυψέλη καυσίμου.



Σχήμα 1.2: Κύτταρο καυσίμου τύπου PEM

Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά μερικές άλλες τεχνολογίες κυττάρων καυσίμου.

α) Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), όπου χρησιμοποιείται KOH ως ηλεκτρολύτης σε συγκέντρωση 85% όταν η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασία 250°C και σε συγκέντρωση 35% – 50% για θερμοκρασίες μικρότερες των 120°C. Είναι ευρέως γνωστές για την χρησιμοποίησή τους από την NASA, στο πρόγραμμα “Apollo”. Είναι το φθηνότερο είδος κυψέλης καυσίμου ως προς την κατασκευή.

β) Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), στις οποίες ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από ανθρακικά αλκάλια μέσα σε μία κεραμική μήτρα από LiAlO_2 . Οι θερμοκρασίες λειτουργίας βρίσκονται μεταξύ 600°C και 700°C. Σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες δεν απαιτούνται ευγενή μέταλλα ως καταλύτες. Αυτού του τύπου κυψέλες καυσίμου έχουν εφαρμοστεί σε πειραματικούς σταθμούς βάσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

γ) Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), στις οποίες χρησιμοποιείται ένα μη πορώδες στερεό οξείδιο ως ηλεκτρολύτης. Αυτές οι κυψέλες λειτουργούν στους 800°C με 1000°C, στις οποίες έχουμε αγωγή ιόντων οξυγόνου. Τα SOFC, όμοια με τα MCFC, χρησιμοποιούνται σε πειραματικούς σταθμούς βάσης παραγωγής αλλά και σε φορητές μονάδες ως βοηθητική πηγή σε οχήματα.

δ) Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), όπου χρησιμοποιείται πολυμερές περφλουροσουλφιδικό οξύ ως ηλεκτρολύτης. Ο καταλύτης αποτελείται από πλατίνα που εναποτίθεται σε στρώμα άνθρακα. Εάν η τροφοδοσία με υδρογόνο περιέχει μέρη μονοξειδίου του άνθρακα, τότε

χρησιμοποιούνται κράματα Pt –Ru ως καταλύτες. Η θερμοκρασία λειτουργίας αυτών των κυψελών κυμαίνεται μεταξύ 60°C και 80°C. Τα PEMFC είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικά για εφαρμογές στην αυτοκίνηση, αλλά και σε σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας για καταναεμημένη παραγωγή.

ε) Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέως (PAFC), όπου χρησιμοποιείται φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτης. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους κυμαίνεται μεταξύ 150°C και 220°C. Τα PAFC έχουν εισέλθει στην παγκόσμια αγορά σε σταθμούς βάσης με ισχύ της τάξεως των 200 kW.

1.5.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κυττάρων καυσίμου

Ας παραθέσουμε τώρα τα βασικά πλεονεκτήματα που οδηγούν στην ολοένα αυξανόμενη χρησιμοποίηση των κυττάρων καυσίμου και του υδρογόνου κατ'επέκταση, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας :

- Ελάχιστες εκπομπές ρύπων. Προστασία της ατμόσφαιρας, φιλικός προς το περιβάλλον Ηλεκτρισμός.
- Οι κυψέλες δεν έχουν κινητά μέρη. Ήσυχη λειτουργία και μικρή συντήρηση.
- Μεγάλη απόδοση στην μετατροπή ηλεκτρισμού της τάξης του 40-65% . Εξοικονόμηση ενέργειας.
- Προσαρμοζόμενος σχεδιασμός για εφαρμογές από watt μέχρι megawatt.
- Σαν αέριο ή υγρό, το υδρογόνο μπορεί εύκολα να μεταφερθεί, να φυλαχθεί και τελικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε εφαρμογή όπου χρησιμοποιούνται σήμερα τα καύσιμα.
- Κοστίζει λιγότερο για να μετακινηθεί το υδρογόνο σε άλλες ηπείρους ως συμπιεσμένο αέριο με τη βοήθεια σωλήνων, από ένα ίσο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας.
- Το υγρό υδρογόνο είναι η ασφαλέστερη και πιο οικονομική επιλογή για την κίνηση της ενέργειας από τους ωκεανούς.
- Το υδρογόνο είναι το πιο ασφαλές από όλα τα καύσιμα. Το αέριο υδρογόνο είναι 14 φορές ελαφρύτερο από τον αέρα και για αυτό διαχέεται ταχέως στην ατμόσφαιρα στην περίπτωση ενός ατυχήματος όταν τα άλλα καύσιμα έχουν επικίνδυνα μεγάλο χρόνο έως ότου να διαλυθούν στην ατμόσφαιρα.
- Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο (120,7 kJ/kg). Για παράδειγμα είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης.
- Καθαρή καύση. Όταν καίγεται με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αποτελείται περίπου από 68% άζωτο, παράγονται επίσης αμελητέες ποσότητες οξειδίων του αζώτου.
- Εξαιτίας της καθαρής καύσης του δε συμβάλει στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Το ποσό του νερού που παράγεται κατά τη καύση είναι τέτοιο ώστε να θεωρείται επίσης αμελητέο και μη ικανό να επιφέρει κάποια κλιματολογική αλλαγή ακόμα και σε περίπτωση μαζικής χρήσης.
- Μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ρυθμού κατανάλωσης των περιορισμένων φυσικών καυσίμων. Αν και σε πολλές περιπτώσεις αυτά τα ίδια καύσιμα χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υδρογόνου το ενεργειακό όφελος είναι μεγάλο. Μάλιστα, η πιο συμφέρουσα οικονομικά αυτή τη στιγμή μέθοδος παρασκευής υδρογόνου βασίζεται στη μετατροπή του μεθανίου του φυσικού αερίου.

Περνώντας τώρα στα μειονεκτήματα μπορούμε να αναφέρουμε:

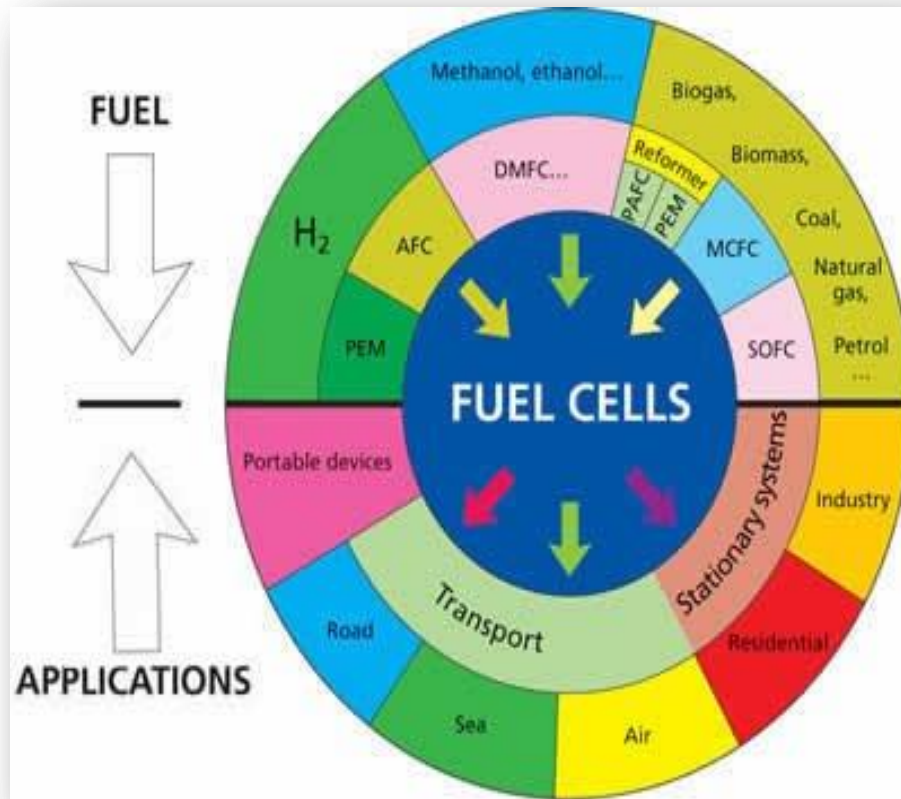
- Η αποθήκευση του. Δεδομένου του ότι το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση.
- Η έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής του.
- Η τιμή του είναι σχετικά υψηλή σε σύγκριση με αυτή της βενζίνης ή του πετρελαίου. Περισσότερο διαδεδομένη, λόγω χαμηλού κόστους, μέθοδος παραγωγής υδρογόνου αυτή τη στιγμή είναι η μετατροπή του φυσικού αερίου. Ωστόσο όσο εξελίσσονται και άλλες μέθοδοι το κόστος θα συνεχίσει να μειώνεται.
- Αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων το υδρογόνο θεωρείται περισσότερο ασφαλές από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να γίνει εξαιρετικά επικίνδυνο.
- Η αυξημένη τιμή των κυψέλων καυσίμου με τις οποίες αυτή τη στιγμή γίνεται η μεγαλύτερη εκμετάλλευση του υδρογόνου ως καύσιμο. Επιπλέον η τεχνολογία τους δε μπορεί να θεωρηθεί ολοκληρωτικά αξιόπιστη αφού προς το παρόν υπάρχουν αρκετά τεχνικά προβλήματα τα οποία αναζητούν αξιόπιστες λύσεις. Για παράδειγμα, κυψέλες προσανατολισμένες για οικιακή και μεταφορική χρήση χαρακτηρίζονται από μικρή ανοχή σε καύσιμα μη υψηλής καθαρότητας. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει το κόστος παραγωγής του καυσίμου. Κυψέλες καυσίμου προσανατολισμένες για βιομηχανική χρήση πάλι χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

1.5.4 Εφαρμογή κυψελών καυσίμου σε εγκαταστάσεις κτιρίων

Στάσιμες κυψέλες καυσίμου αυξημένου μεγέθους και σε συστοιχίες είναι ικανές να παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών μιας μεσαίας επιχείρησης ή οικίας. Ταυτόχρονα, με τις ίδιες κυψέλες μπορεί να παραχθεί αρκετή ισχύ ώστε πωλείται και στο δίκτυο. Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο (απομονωμένοι οικισμοί) γίνεται αντιληπτό ότι η χρησιμότητα των συγκεκριμένων διατάξεων κυψελών είναι ακόμα μεγαλύτερη.

Επίσης, γεννήτριες από κυψέλες καυσίμου είναι πιο αξιόπιστες από άλλου είδους γεννήτριες. Αυτό είναι πλεονέκτημα για τις εταιρίες οι οποίες εξοικονομούν χρήματα όταν η ισχύς πέφτει για κάποιο χρονικό διάστημα.[5]

Στο κυκλικό διάγραμμα που ακολουθεί [Σχήμα 1.3] συνοψίζονται τα είδη των είδη των “fuel cells” καθώς και ο τύπος καυσίμου που χρησιμοποιεί το κάθε ένα από αυτά (άνω ημικύκλιο). Παράλληλα, παρουσιάζονται μερικές από τις εφαρμογές που τα συναντάμε (κάτω ημικύκλιο).[6]



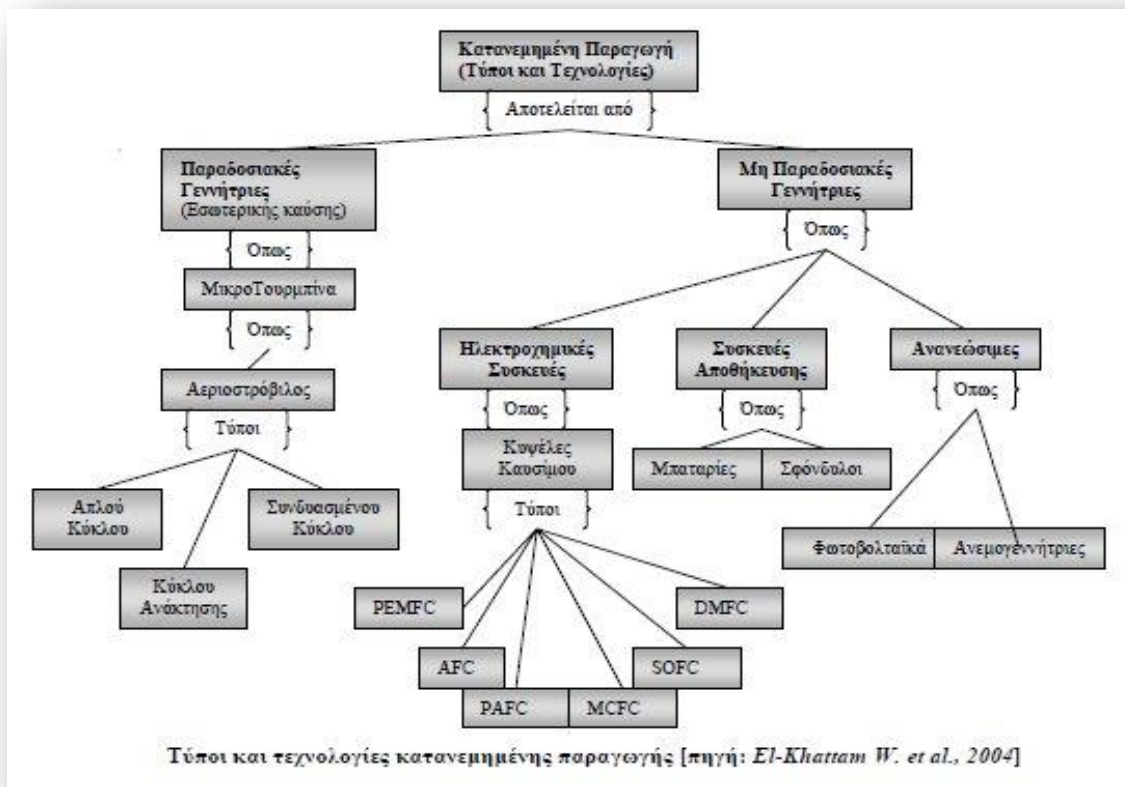
Σχήμα 1.3: είδη των είδη των “fuel cells” και μερικές από τις εφαρμογές που τα συναντάμε

1.6 Τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας στην ΚΠ

Στην κατακεκομημένη παραγωγή δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός όσον αφορά την τεχνολογία η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.[7] Ποικίλει πολύ καθώς σχεδόν κάθε υπάρχουσα τεχνολογία είναι εφαρμόσιμη(συμβατική αλλά και καινοτόμος).Μπορούν να προσδιοριστούν τρεις βασικές κατηγορίες:

- Κατακεκομημένη Παραγωγή από συνεργασία συμβατικών πηγών με ΑΠΕ όπως συνδυασμοί μικρών υδροηλεκτρικών, φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών, μηχανών diesel, ηλιοθερμικών συστημάτων,κυψελών καυσίμου και μπαταριών
- Κατακεκομημένη Παραγωγή από μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας
- Κατακεκομημένη Παραγωγή από ΑΠΕ όπως ήλιος, άνεμος, βιομάζα, υδατοπτώσεις, ενέργεια ωκεανού και γεωθερμική ενέργεια. Η κατηγορία αυτή είναι και η περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον.

Το παρακάτω σχεδιάγραμμα δίνει μια συνοπτική εικόνα για τις προαναφερθείσες τεχνολογίες:[8]



Σχήμα 1.4: Τύποι και Τεχνολογίες καταμεμημένης παραγωγής

1.7 Η μετάβαση από το σήμερα στο αύριο

Χθες

Τα υπάρχοντα δίκτυα βασίζονται κυρίως σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής που συνδέονται με συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης τα οποία με τη σειρά τους συνδέονται με συστήματα μέσης και χαμηλής τάσης.[9] Η διανομή και η μεταφορά της ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο μονοπωλιακά από δημόσιους φορείς ενώ αντίθετα στον τομέα παραγωγής είναι δυνατόν να υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός. Η παροχή ισχύος και ο έλεγχος του δικτύου γίνονται στα σημερινά δίκτυα από κεντρικές εγκαταστάσεις. Υπάρχει λίγο έως καθόλου συμμετοχή του καταναλωτή και απουσιάζει εντελώς η επικοινωνία.

Οι διασυνδέσεις αναπτύχθηκαν κυρίως για αμοιβαία υποστήριξη μεταξύ χωρών και περιφερειών σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Αύριο

Τα μελλοντικά δίκτυα διανομής θα έχουν ενεργητικό ρόλο και θα πρέπει να εξασφαλίζουν αμφίδρομη ροή ισχύος. Τα Ευρωπαϊκά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν πλέον σε ένα πλαίσιο μοντέλου αγοράς στο οποίο οι μονάδες παραγωγής διανέμονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κάθε αγοράς και το κέντρο ελέγχου του δικτύου αναλαμβάνει ένα γενικό ρόλο εποπτείας.

Μια μεγάλη ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγεται από μεγάλους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής θα προέρχεται από διεσπαρμένη παραγωγή και ΑΠΕ. Παράλληλα είναι δυνατό να χρειασθεί η ύπαρξη εφεδρείας σε περίπτωση ελλιπούς παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές. Αυτό προϋποθέτει πολλές αλλαγές στα υπάρχοντα δίκτυα διανομής και μεταφοράς αφού πολλές διασυνδέσεις και καλή επικοινωνία είναι απαραίτητη. [10]



Σχήμα 1.5: η παραγωγή από το σήμερα στο αύριο

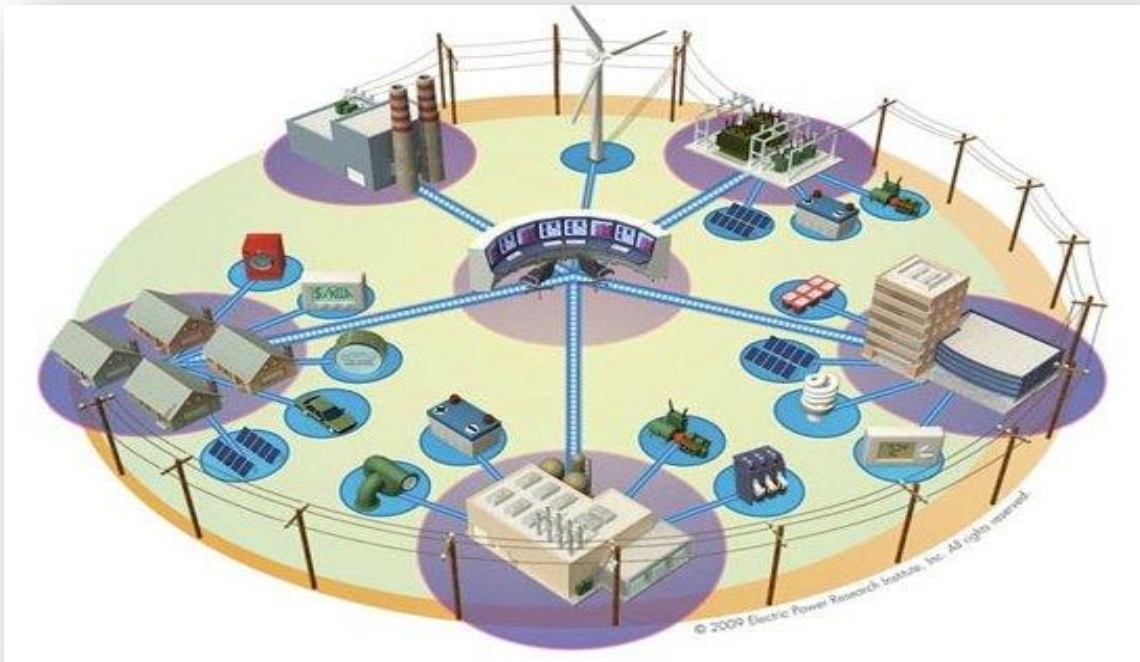
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:Μικροδίκτυα

2.1Εισαγωγή, ορισμός

Ως μικροδίκτυο ορίζεται ένα υποσύστημα του κεντρικού δικτύου συνδεδεμένο σε ένα σημείο με το δίκτυο διανομής, το οποίο περιλαμβάνει μονάδες παραγωγής, φορτία και στοιχεία αποθήκευσης της ενέργειας, ενώ μπορεί και λειτουργεί είτε συνδεδεμένο με το δημόσιο δίκτυο, είτε αυτόνομα.[11]

Ανά την υφήλιο ένα σημαντικό κομμάτι του πληθυσμού στερείται πρόσβασης στο δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ οι ενεργειακές ανάγκες ενός άλλου σημαντικού κομματιού αυξάνονται ραγδαία, με αποτέλεσμα την ανάγκη για επέκταση των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και την κατασκευή νέων σταθμών παραγωγής. Με την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας(ΑΠΕ) στην παραγωγή ενέργειας έγινε και πιο επίκαιρος ο όρος μικροδίκτυα (microgrid/ mini-grid). Η μικρό-παραγωγή, όπως ονομάζεται η παραγωγή αυτού του είδους, δεν είναι μια νέα έννοια στην ηλεκτρική παραγωγή και διανομή ενέργειας. Αναφέρεται στην παραγωγή ενέργειας που κυμαίνεται στην κλίμακα των μερικών εκατοντάδων kW. Ωστόσο, τα μικροδίκτυα είναι μια νέα έννοια που δημιουργήθηκε από την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και την αδυναμία των υπαρχόντων δικτύων να ανταπεξέλθουν αξιόπιστα σε αυτές τις απαιτήσεις.

Τα μικροδίκτυα αποτελούν, στην ουσία, μικρογραφίες του δημόσιου δικτύου και συμβάλλουν στην κατανομημένη παραγωγή, παρέχοντας την δυνατότητα σε απομονωμένους καταναλωτές να έχουν αδιάλειπτη, τοπική ηλεκτρική παροχή. Το γεγονός ότι για την παραγωγή ενέργειας χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τα βάζει στο επίκεντρο των εξελίξεων στον συγκεκριμένο τομέα, τόσο της ερευνητικής όσο και της εμπορικής δραστηριότητας.Παρακάτω φαίνεται ένα γραφικό παράδειγμα της δομής ενός μικροδικτύου. Στο κέντρο ξεχωρίζει το σύστημα ελέγχου και διαχείρισης.



Σχήμα 2.1: δομή ενός μικροδικτύου

Οι κατηγορίες των μονάδων που μπορούν να διαχωριστούν σε ένα μικροδίκτυο είναι οι εξής: μονάδες παραγωγής ενέργειας, μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και μονάδες κατανάλωσης ενέργειας - φορτία. Δεδομένου όμως πως οι μονάδες παραγωγής του μικροδικτύου παράγουν συνεχή τάση και ρεύμα, με τα μεγέθη αυτά να παράγονται συχνά και με μεταβαλλόμενο/ασταθή ρυθμό, γίνεται ευθύς αντιληπτό πως κυρίαρχο ρόλο σε ένα μικροδίκτυο παίζουν οι αντιστροφείς (inverters). Οι συσκευές αυτές είναι υπεύθυνες για την μετατροπή ρεύματος και τάσης στην τελική a/c τους μορφή, που είναι εκμεταλλεύσιμη από το δίκτυο. Αν το μικροδίκτυο χρησιμοποιεί κλασσικές μονάδες παραγωγής, όπως γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος τότε οι αντιστροφείς δεν είναι απαραίτητοι.

Οι μονάδες παραγωγής μπορούν να είναι είτε κλασσικής παραγωγής, είτε από ήπιες μορφές ενέργειας, δίνοντας πολλές δυνατότητες και μεγάλη ευχέρεια επιλογών ανάλογα με τους φυσικούς πόρους της τοποθεσίας που γίνεται η εγκατάσταση. Οι μονάδες κατανάλωσης - φορτία δεν διαχωρίζονται από τα φορτία που υπάρχουν στα ηλεκτρικά δίκτυα. Τα μικροδίκτυα εξυπηρετούν καταναλώσεις που χρειάζονται αδιάλειπτη λειτουργία και εξασφαλίζουν τη συνεχή τους τροφοδοσία με υψηλή ποιότητα ισχύος. Σημαντικό ρόλο σε ένα μικροδίκτυο έχουν οι μονάδες αποθήκευσης που είναι αυτές που εξασφαλίζουν την αυτονομία του μικροδικτύου. Οι μονάδες αυτές μπορούν να είναι είτε συσσωρευτές είτε καύσιμα που έχουν αποθηκευτεί με τη βοήθεια των μονάδων παραγωγής κατά την λειτουργία τους π.χ. Υδρογόνο.

Τυπικές πηγές ενός μικροδικτύου είναι οι γεννήτριες ντίζελ ή φυσικού αερίου, συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού (γεννήτριες, μικροστρόβιλοι), οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, οι κυψέλες καυσίμου, οι γεωθερμικοί και οι ηλιοθερμικοί σταθμοί, τα μικρά υδροηλεκτρικά, οι μονάδες που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη βιομάζα, βιοντίζελ ή οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας.

Μια συνδυασμένη χρήση των νέων τεχνολογιών συμπαραγωγής και ανανεώσιμων πηγών, θα μπορούσε ίσως να κάνει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στο μικροδίκτυο ανταγωνιστική αυτής των κεντρικών δικτύων. Η αξιόπιστη λειτουργία ενός μικροδικτύου, συνεπάγεται εκτός από την κάλυψη των απαιτήσεων ενεργού και άεργου ισχύος, και τη συνεχή ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας αυτού. Παράλληλα θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις διατάξεις προστασίας από σφάλματα, βραχυκυκλώματα ή διαρροές.

2.2 Θέση Εγκατάστασης

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί εκεί όπου υπάρχει διαθέσιμη μια από τις παραπάνω φυσικές πηγές ενέργειας και να καλύπτει τις καταναλώσεις της περιοχής που εγκαθίσταται. Η κλίμακα του μικροδικτύου ποικίλει, από μια οικία που χρησιμοποιεί ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και γεννήτριας ντίζελ ή βιοκαυσίμων, ένα νοσοκομείο που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ζεστού νερού, μέχρι και μια πόλη που τροφοδοτείται από σταθμούς βιομάζας, γεννήτριες ντίζελ και αιολικά πάρκα.

Η θέση των μονάδων παραγωγής στα μικροδίκτυα είναι συνήθως κοντά στην κατανάλωση πράγμα που ελαχιστοποιεί το κόστος μεταφοράς και διανομής, καθώς και τις απώλειες αυξάνοντας έτσι την συνολική απόδοση του συστήματος. Εκτός από τη σκοπιά της απόστασης η θέση των μονάδων παραγωγής δηλώνει και την σχέση με την τάση, που είναι η χαμηλή τάση του δικτύου και τάση των καταναλωτών.

2.3 Διασύνδεση με το δίκτυο

Ένα μικροδίκτυο μπορεί να έχει δυνατότητα διασύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μια τέτοια παραλληλισμένη λειτουργία είναι δυνατή η ανταλλαγή ενέργειας. Έχουμε παροχή πλεονάζουσας ενέργειας σ' αυτό όταν η ισχύς του φορτίου είναι μικρότερη από την παραγωγή ή απορρόφηση ενέργειας όταν οι μονάδες του μικροδικτύου δεν επαρκούν να καλύψουν τη ζήτηση ισχύος. Ακόμη σε περίπτωση μόνιμα διασυνδεδεμένης λειτουργίας είναι δυνατή η αξιόπιστη τροφοδότηση του μικροδικτύου από τις δικές του μονάδες σε περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου.

Δεδομένης της μικρής ισχύος των περισσότερων μονάδων ενός μικροδικτύου, η παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι προτιμότερο να γίνεται στην χαμηλή τάση καθώς δεν απαιτείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Το μέγεθος δηλαδή των μονάδων παραγωγής είναι ουσιαστικά αυτό που καθορίζει την στάθμη λειτουργίας. Το μέγεθός του συνολικότερα, μονάδων παραγωγής και φορτίων, καθορίζει εξάλλου και τον τρόπο διασύνδεσής του με άλλα μικροδίκτυα ή με το κεντρικό δίκτυο, στην μέση ή στην χαμηλή τάση. Προφανώς μεγάλη ισχύς απαιτεί διασύνδεση στη μέση τάση, που σημαίνει και αύξηση απωλειών. Πρέπει να τονιστεί ότι σε περιπτώσεις παραλληλισμένης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που πρωτίστως επιδιώκεται είναι να μην προκαλεί το μικροδίκτυο προβλήματα. Η ποιότητα της τάσης πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του δικτύου, η απορροφούμενη ενέργεια να μην ξεπερνά τις απαιτήσεις ενός τυπικού καταναλωτή.

Σε ένα δεύτερο στάδιο, ένα μικροδίκτυο μπορεί να συμπεριφερθεί επικουρικά στο κεντρικό δίκτυο. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβαίνει αν το μικροδίκτυο ρυθμιζόταν ώστε να μπορεί να υποστηρίξει το κεντρικό δίκτυο, π.χ. να παρέχει ή να απορροφά ενεργό ή άεργο ισχύ όταν απαιτείται, ακόμη και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Στην δεύτερη αυτή περίπτωση απαιτείται προφανώς και μια μορφή επικοινωνίας μεταξύ των κέντρων ελέγχου μικροδικτύου και κεντρικού δικτύου.

Στην συνέχεια, θα πρέπει να γίνει μια σύντομη αναφορά στις διαφορές χαρακτηριστικών ανάμεσα στα δίκτυα διανομής και μεταφοράς. Έτσι θα μπορέσουμε να παρατηρήσουμε πιο σφαιρικά την επίδραση της ενός μικροδικτύου στα υπάρχοντα δίκτυα.

2.3.1 Δίκτυα Διανομής και Μεταφοράς

Είναι σημαντικό να εξετάσουμε τα χαρακτηριστικά των δικτύων διανομής και μεταφοράς από τεχνική πλευρά καθώς εμφανίζουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ τους.

- 1) Πρώτον, τα δίκτυα διανομής έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικό σκοπό από αυτά της μεταφοράς, με κύρια διαφορά ότι τα συστήματα διανομής δεν έχουν προβλέψει για τη σύνδεση τους με μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, η σύνδεση της κατανεμημένης παραγωγής οδηγεί σε αλλαγή της τιμής του ρεύματος σφάλματος, ως εκ τούτου, ενδέχεται να απαιτηθεί επανασχεδιασμός του τοπικού συστήματος προστασίας από σφάλματα. Επιπλέον, τα δίκτυα διανομής είναι συνήθως ακτινικά (ή βροχοειδή που λειτουργούν ακτινικά) και όχι διασυνδεδεμένα, δηλαδή η ροή ενέργειας στα δίκτυα αυτά είναι συνήθως προς μία διεύθυνση οπότε με τη σύνδεση μονάδων παραγωγής ενός μικροδικτύου η ροή ισχύος αλλάζει.
- 2) Δεύτερον, οι γραμμές υψηλής τάσης, π.χ. γραμμές μεταφοράς έχουν χαμηλή αντίσταση σε σύγκριση με τους αγωγούς χαμηλής τάσης των δικτύων διανομής. Στις γραμμές μεταφοράς η επίδραση της αντίστασης καλωδίου (R) στην πτώση τάσης είναι μικρή, αφού το μέγεθός της είναι εν γένει λιγότερο από την αντίδραση (X), δηλαδή $X / R > 5$. Ως εκ τούτου, η αντίδραση είναι η πιο σημαντική παράμετρος στην πτώση τάσης και τις απώλειες των αγωγών. Στα συστήματα διανομής, ωστόσο, η αντίσταση στις γραμμές είναι συχνά μεγαλύτερη ή τουλάχιστον παρόμοια με την αυτεπαγωγή. Οπότε η αντίσταση της γραμμής διανομής προκαλεί σημαντική πτώση τάσης κατά μήκος των γραμμών διανομής και συνεπώς παρουσιάζονται αυξημένες οι απώλειες γραμμής. Η σύνδεση της κατανεμημένης παραγωγής μπορεί επομένως να έχει σημαντική επιρροή στο τοπικό επίπεδο τάσης.
- 3) Τρίτον, η χαμηλή τάση στα άκρα των συστημάτων διανομής δεν είναι συνήθως συνδεδεμένη με τα συστήματα επιτήρησης και ελέγχου δεδομένων (SCADA), συνεπώς η συλλογή δεδομένων που απαιτούνται για τον τοπικό έλεγχο του συστήματος διανομής, όπως και των μονάδων παραγωγής του μικροδικτύου είναι αρκετά δύσκολη. Η πολυπλοκότητα συλλογής δεδομένων για τον έλεγχο του συστήματος σε ανταγωνιστικές αγορές αυξάνεται λόγω του γεγονότος ότι οι ανεξάρτητοι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν τις μονάδες τους, σύμφωνα με τα μηνύματα των τιμών της αγοράς, που δεν αντιστοιχούν απαραίτητα στις απαιτήσεις των συστημάτων ελέγχου στις τοπικές περιοχές παραγωγής και διανομής.

2.3.2 Προδιαγραφές Σύνδεσης - Εξοπλισμός

Η τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η σύνδεση του μικροδικτύου με το δίκτυο μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την παραδοσιακή κεντρική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες, ικανές να ελέγχουν την απόδοση έργου ισχύος στο σύστημα. Οι μεγάλες μονάδες κατανεμημένης παραγωγής επίσης, αξιοποιώντας φυσικό αέριο, για παράδειγμα, κάνουν χρήση σύγχρονων γεννητριών.

Οι μεσαίου αλλά ιδιαίτερα οι μικρού μεγέθους μονάδες κατανεμημένης παραγωγής συχνά

χρησιμοποιούν ασύγχρονες γεννήτριες (επίσης γνωστές ως επαγωγικές γεννήτριες), δεδομένου ότι είναι σημαντικά φθηνότερες από τις σύγχρονες γεννήτριες. Οι ασύγχρονες γεννήτριες ωστόσο, έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά λειτουργίας από τις σύγχρονες. Για παράδειγμα, μια απευθείας διασυνδεδεμένη ασύγχρονη γεννήτρια δεν είναι σε θέση για την παροχή άεργου ισχύος αλλά απαιτεί άεργο ισχύ από το δίκτυο κατά τη διάρκεια της εκκίνησης της διαδικασίας και εν λειτουργία . Διαφορετικές τεχνικές επιλογές υπάρχουν για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα της διασύνδεσης ασύγχρονης γεννήτριας , από μονάδες κατανεμημένης παραγωγής , όπως πυκνωτές και ηλεκτρονικά ισχύος.

Και τέλος, οι πολύ μικρές μονάδες , όπως τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, οι μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου πρέπει να συνδεθούν μέσω διεπαφής (μετατροπέας) με το δίκτυο, καθώς αυτά τα μικροσυστήματα παράγουν συνεχές ρεύμα. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά ισχύος προσφέρουν διαφορετικές λύσεις για τη μετατροπή του ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο και την παραγωγή ενεργούς / άεργου ισχύος με την απαιτούμενη συχνότητα. Οι μετατροπείς αυτοί εισάγουν «επίσης νέα ζητήματα ελέγχου και νέες δυνατότητες » για την ολοκλήρωση των δικτύων αφού μπορεί να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο της τάσης στο δίκτυο διανομής , για παράδειγμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ένα πρόβλημα που μπορεί να προκύψει είναι ότι οι μετατροπείς αλληλεπιδρούν μέσω του δικτύου διανομής πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε διακυμάνσεις στην παροχή ρεύματος ή σε ταλαντώσεις στα δίκτυα διανομής . Ωστόσο, τέτοιες περιπτώσεις φαίνεται να είναι πολύ σπάνιες.

2.3.3 Επιδράσεις του μικροδικτύου στην διασύνδεση με το κεντρικό δίκτυο

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις επιδράσεις από την επικείμενη διασπαρμένη παραγωγή ενέργειας.

Οι επιδράσεις εν συντομία συνοψίζονται στις εξής παρακάτω:

- Αλλαγές στο επίπεδο της τάσης των δικτύων
- Ποιότητα της παραγόμενης ισχύος
- Μεταβολή των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου- αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης.
- Τροποποίηση των μηχανισμών προστασίας του δικτύου.
- Αύξηση των παραγόμενων αρμονικών στο δίκτυο από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.
- Επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος

2.3.4 Μεταβολή της Τάσης

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές για την διατήρηση της τάσεως στα επιθυμητά όρια.

- Κυρίως ρυθμίζεται ο λόγος μέσης /χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή του υποσταθμού ώστε να διατηρείται η τάση στα επιθυμητά όρια.
- Η αντίστροφη ροή ισχύος και η προκαλούμενη ανύψωση της τάσης μπορεί να περιοριστεί είτε αναστρέφοντας την ροή άεργου ισχύος χρησιμοποιώντας ασύγχρονες γεννήτριες ή υποδιεγείροντας τις σύγχρονες γεννήτριες.
- Σε πολλά δίκτυα χρησιμοποιούνται εξελιγμένες τεχνικές ελέγχου της τάσης μέσω ρύθμισης των λήψεων του αυτομετασχηματιστή σύμφωνα με την εκτίμηση της πτώσης τάσης από μετρήσεις του ρεύματος.
- Ανάγκη να καθιερωθούν στοχαστικά όρια για την διακύμανση της τάσης, όπως π.χ. γίνεται στο πρότυπο EN 50160

2.3.5 Ποιότητα Ισχύος

Για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας της ισχύος λαμβάνονται υπόψη κυρίως δυο παράγοντες :

- Οι μεταβατικές διακυμάνσεις της τάσης.
- Η παρουσία αρμονικών στο δίκτυο.

Ένα σημαντικό ζήτημα για την ποιότητα ισχύος είναι οι βυθίσεις της τάσης που ορίζονται ως μειώσεις της τάσης (από 10% έως και το 90% της ονομαστικής τιμής) σε χρονικά διαστήματα μεταξύ μισού κύκλου μέχρι και αρκετών λεπτών.

Εάν κατά την ζεύξη/ απόζευξη των γεννητριών επιτρέπεται η ανταλλαγή μεγάλων ρευμάτων με το δίκτυο τότε μπορεί να εμφανιστούν μεταβατικές διαταραχές στην τάση του δικτύου.

Τα προβλήματα αυτά μπορούν να περιοριστούν με την χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων και σωστό συγχρονισμό των σύγχρονων γεννητριών κατά την ζεύξη τους με το σύστημα.

2.4 Πλεονεκτήματα Μικροδικτύου

Εν συντομία παρουσιάζουμε τα σημαντικότερα οφέλη ενός μικροδικτύου:

- Απόδοση ενέργειας: Η συνολική απόδοση της ενέργειας αυξάνεται με τις εφαρμογές συμπαραγωγής, που αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων. Έτσι, ενώ μέχρι τη δημιουργία των μικροδικτύων είχαμε μεγάλη κεντρική παραγωγή ισχύος και τοπική παραγωγή θερμότητας, με την δημιουργία των μικροδικτύων τόσο η παραγωγή ισχύος όσο και θερμότητας γίνεται τοπικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κατανάλωση της ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα να μειώνεται κατά το 1/3.
- Ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας
- Αυξημένη αξιοπιστία και προσαρμοστικότητα του συστήματος ενέργειας
- Υψηλή μείωση των απωλειών από μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, αφού η παραγωγή γίνεται τοπικά
- Οφέλη για το δίκτυο όπως δυνατότητα τοπικής παραγωγής, ελέγχου τάσης και συχνότητας
- Σε περιόδους αιχμής φορτίου αποτρέπει την κατάρρευση μειώνοντας το φορτίο του δικτύου
- Το μικροδίκτυο μπορεί να ενεργήσει για να μετριάσει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για τους χρήστες της, δημιουργώντας το σύνολο ή μέρος του ζητούμενου φορτίου

Και στον περιβαλλοντικό τομέα:

- Σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα
- Τα μικροδίκτυα ενισχύουν (ΑΠΕ) την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Οι επιπτώσεις από την χρήση μεγάλων γεωγραφικών εκτάσεων (για εγκαταστάσεις κτλ) αποφεύγονται

2.5 Μειονεκτήματα Μικροδικτύου

Όπως κάθε νέα τεχνολογία, έτσι και το μικροδίκτυο έχει ορισμένα μειονεκτήματα, τα οποία ωστόσο δεν είναι σε καμία περίπτωση ικανά να το επισκιάσουν. Αυτά είναι:

- Η τάση, η συχνότητα και η ισχύς της ποιότητας είναι τρεις κύριες παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν και να ελέγχονται σε αποδεκτά επίπεδα, ενώ παράλληλα διατηρείται το ισοζύγιο ενέργειας και ισχύος
- Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να αποθηκεύεται σε συστοιχίες μπαταριών, με αποτέλεσμα να απαιτείται αρκετός χώρος αλλά και συντήρηση
- Ο επανασυγχρονισμός με το κεντρικό δίκτυο παρουσιάζει δυσκολία
- Η τοποθέτηση αξιόπιστων διατάξεων προστασίας αποτελεί μια εκ των σημαντικότερων προκλήσεων σε ότι αφορά την λειτουργία ενός μικροδικτύου

- Θέματα όπως η αναμονή φορτίου και η ακριβής μέτρηση της ενέργειας (παραγόμενης και λαμβανόμενης από το δίκτυο) ίσως σταθούν εμπόδια στην ανάπτυξη των μικροδυσκίων αρχικά
- Πρότυπα διασύνδεσης πρέπει να αναπτυχθούν για να εξασφαλιστεί η συνοχή. (Ωστόσο το IEEE P1547, ένα πρότυπο που προτείνεται από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών καταλήγει στην πλήρωση αυτού του κενού)

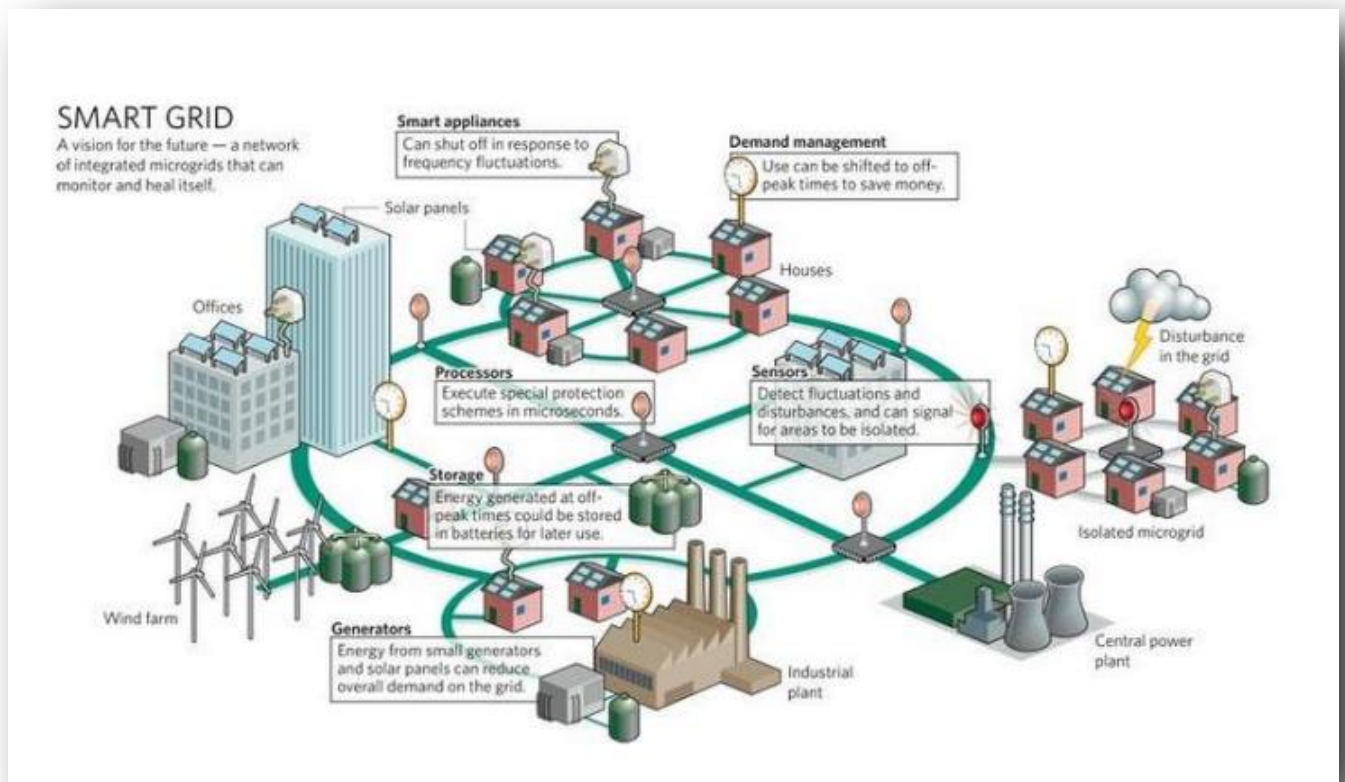
2.6 Έξυπνα δίκτυα

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζουν διάφορα θέματα.[12] Κάποια από αυτά είναι η σχετικά χαμηλή απόδοση και οι υψηλές απώλειες, ενώ η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που έχουν να αντιμετωπίσουν. Πέραν αυτού, η ανάγκη για διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο υπάρχον δίκτυο ώστε να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις εξαιτίας της εκμετάλλευσης ορυκτών καυσίμων οδηγεί σε μια νέα εποχή για τον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και δημιουργεί νέες προκλήσεις για την επιτυχή ενσωμάτωσή τους. Επιπλέον, ένα άλλο νέο ζήτημα είναι η προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων (plug in hybrid electric vehicles), αφού αναμένεται να αποτελέσουν ένα επιπλέον σημαντικό μεγάλο φορτίο. Η αντιμετώπιση θεμάτων αξιοπιστίας του δικτύου, όπως τυχαία συμβάντα, αλλά και θεμάτων ασφάλειας κρίνεται επιτακτική. Όλα τα παραπάνω, οδηγούν στην εξέλιξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μια προσπάθεια αντιμετώπισης όλων αυτών των ζητημάτων με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Αυτή η κατεύθυνση αναβάθμισης των υφιστάμενων δικτύων αποτελεί τα έξυπνα δίκτυα. Χαρακτηριστικό των έξυπνων δικτύων είναι η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ καταναλωτών και προμηθευτών ηλεκτρικής ενέργειας. Τα έξυπνα δίκτυα χρησιμοποιούν αισθητήρες, μετρητές, ψηφιακά συστήματα ελέγχου και εργαλεία ανάλυσης δεδομένων για την αυτοματοποίηση, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της αμφίδρομης ροής ενέργειας σε όλες τις λειτουργίες από το σταθμό ηλεκτροπαραγωγής μέχρι τα σπίτια των καταναλωτών.

Με την αξιοποίηση των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών, των στρατηγικών διαχείρισης και απόκρισης της ζήτησης (Demand side management/Demand response) και των on-line υπηρεσιών καταφέρνει να ενισχύσει την αξιοπιστία του δικτύου. Το έξυπνο δίκτυο παρακολουθεί και καλύπτει τις ανάγκες των χρηστών, συντονίζοντας τις δυνατότητες των παραγωγών, των διαχειριστών, των δικτύων και των καταναλωτών με το ελάχιστο κόστος και επίδραση στο περιβάλλον. Η δυνατότητα ανταλλαγής πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στους καταναλωτές να ελέγχουν την κατανάλωσή τους, να εξοικονομούν ενέργεια και να αποκρίνονται σε αυξημένες τιμές ηλεκτρισμού ή σε κρίσιμα γεγονότα.

Η Εταιρεία Παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ESCO) ή ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (DSO) μπορεί να βελτιστοποιεί την απόδοση του δικτύου διανομής, να προλαμβάνει τις διακοπές παροχής, να αποκαθιστά ταχύτερα τις βλάβες που προκαλούν διακοπές και να επιτρέπει στους πελάτες να διαχειρίζονται την κατανάλωση ρεύματος αναλυτικά, μέχρι και το επίπεδο της μεμονωμένης διασυνδεδεμένης ηλεκτρικής συσκευής.

Τα έξυπνα δίκτυα μπορούν επίσης να ενσωματώνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή, και να αλληλεπιδρούν σε τοπικό επίπεδο με διανεμημένες πηγές ενέργειας ή με συνδεδεμένα ηλεκτροκίνητα οχήματα.



Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση έξυπνου δικτύου

2.6.1 Καθοριστικά χαρακτηριστικά των έξυπνων δικτύων.

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός έξυπνου δικτύου είναι :

- Κάθε έξυπνο δίκτυο παρέχει μια διασύνδεση μεταξύ των συσκευών του καταναλωτή και των επενδυτικών αγαθών του συστήματος ενέργειας (σταθμοί παραγωγής, δίκτυα μεταφοράς και διανομής). Αυτού του είδους η αμφίδρομη επικοινωνία επιτρέπει στον καταναλωτή να ελέγχει την κατανάλωση του και του προσφέρει περισσότερες επιλογές. Επιπλέον, ενισχύει την διαχείριση της ζήτησης (DSM) από τους διαχειριστές του συστήματος που μπορούν να ελέγχουν με ευκολία τα διαθέσιμα φορτία, καθώς το σύστημα αποκτά ευελιξία και προσαρμοστικότητα.
- Το έξυπνο δίκτυο είναι τουλάχιστον ημιαυτόνομο. Με την χρησιμοποίηση έξυπνων συστημάτων (εξελιγμένοι αισθητήρες) και την παρακολούθηση του δικτύου ενεργοποιείται η απόκριση σε ερεθίσματα, με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Το έξυπνο δίκτυο αξιοποιεί με το βέλτιστο τρόπο τον εξοπλισμό του συστήματος ενέργειας. Η αξιοπιστία του δικτύου ενισχύεται και αναβάλλονται επεκτάσεις των δικτύων μεταφοράς και η κατασκευή επιπλέον σταθμών παραγωγής μέσω στρατηγικών απόκρισης που βελτιστοποιούν την ροή ισχύος μεταξύ των υφιστάμενων δικτύων.

- Εξαιτίας της δυνατότητας επικοινωνίας κατά τις ώρες αιχμής και την πιθανή απόκριση του καταναλωτή σε σήματα που φέρουν πληροφορίες για αυξημένες τιμές, το επίπεδο μέγιστης ζήτησης μειώνεται και ως επακόλουθο μειώνεται η ανάγκη για παραγωγή ενέργειας από τις ακριβότερες μονάδες.
- Το έξυπνο δίκτυο υποστηρίζει την διείσδυση κατανεμημένης παραγωγής στο υπάρχον συμβατικό σύστημα παραγωγής. Βελτιωμένη επικοινωνία και προηγμένες τεχνολογίες μέτρησης δίνουν την δυνατότητα για έξυπνη ενσωμάτωση της διανεμημένης παραγωγής. Αυτό προτρέπει τους καταναλωτές (οικιακούς, εμπορικούς, βιομηχανικούς) να επανεκτιμήσουν την πιθανότητα εγκατάστασης εξοπλισμού τοπικής παραγωγής ενέργειας στο χώρο τους. Έτσι ο καταναλωτής μετατρέπεται σε παραγωγό και καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας ταυτόχρονα (prosumer).

2.6.2 Βασικές διαφορές μεταξύ έξυπνου δικτύου και συμβατικού δικτύου.

Το συμβατικό δίκτυο απέχει σε μεγάλο βαθμό από την έννοια του έξυπνου δικτύου. Από τη σύγκριση τους προκύπτουν σημαντικές διαφορές, κάποιες από τις οποίες περιγράφονται παρακάτω.

- Το έξυπνο δίκτυο είναι προσαρμοστικό και έχει την δυνατότητα αυτοίασης. Εστιάζει στην πρόληψη, ανιχνεύει πιθανά προβλήματα και αποκρίνεται άμεσα χωρίς να επιδρά στον καταναλωτή. Αντιθέτως, στο συμβατικό δίκτυο υπάρχουν δυσλειτουργίες που συχνά καταλήγουν σε εκτεταμένες διακοπές ρεύματος (blackout) ώστε να αποτραπούν περαιτέρω ζημιές.
- Οι καταναλωτές σε ένα έξυπνο δίκτυο έχουν πολλές επιλογές, είναι ενημερωμένοι και συμμετέχουν ενεργά στην αγορά ενέργειας.
- Το υπάρχον δίκτυο είναι ευάλωτο σε καταπονήσεις και φυσικές καταστροφές ενώ το έξυπνο δίκτυο είναι ανθεκτικό σε τέτοιους κινδύνους με ικανότητα ταχείας αποκατάστασης της βλάβης.
- Το επίκεντρο του συμβατικού δικτύου είναι η προσφορά αδιάλειπτης ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να εστιάζει σε θέματα ποιότητας της παρεχόμενης ενέργειας. Σε αντίθεση με τους στόχους ενός ευφυούς δικτύου να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των καταναλωτών προσφέροντας υψηλής ποιότητας ηλεκτρική ενέργεια ή διαφορετικές ποιότητες σε διαφορετικές τιμές.
- Τα ευφυή δίκτυα διευκολύνουν όλες τις επιλογές παραγωγής (ανανεώσιμες πηγές, διανεμημένη παραγωγή) και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στο σημερινό δίκτυο κεντρικής παραγωγής όπου με δυσκολία ενσωματώνονται τα παραπάνω.
- Το έξυπνο δίκτυο χρησιμοποιεί ψηφιακές διατάξεις, πληθώρα αισθητήρων, φορητές συσκευές έλεγχου και αμφίδρομη επικοινωνία. Τα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν στο συμβατικό δίκτυο αφού διαθέτει ελάχιστους αισθητήρες, δεν υπάρχει παρακολούθηση και αμφίδρομη ροή πληροφοριών.

2.6.3 Τεχνολογίες έξυπνου δικτύου.

Για τον εκσυγχρονισμό ενός συμβατικού δικτύου και την εξέλιξη του ώστε να αποκτήσει ευφυΐα απαιτείται η υιοθέτηση κάποιων τεχνολογιών. Κάποιες βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης ενώ άλλες έχουν ήδη εφαρμοστεί. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι τεχνολογίες του ευφυούς δικτύου:

Γενική παρακολούθηση και έλεγχος.

Πρόκειται για γενική παρακολούθηση (monitoring) όλου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η παρακολούθηση γίνεται σε πραγματικό χρόνο και αφορά τις λειτουργίες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής και τις διασυνδέσεις μεταξύ διάφορων περιοχών.

Έτσι μειώνονται οι πιθανότητες εμφάνισης σφαλμάτων στο δίκτυο και παρέχεται εποπτεία σε ειδικού τύπου τεχνολογίες παραγωγής όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επίσης, τα δεδομένα που συγκεντρώνονται αποτελούν τη βάση για τις στρατηγικές λήψης αποφάσεων.

Information Communication Technology (ICT).

Αποτελεί την υποδομή της μεταφοράς της πληροφορίας. Το έξυπνο δίκτυο προϋποθέτει τη μεταφορά πληροφορίας διπλής ροής και μέσα για την επίτευξη αυτής της λειτουργίας είναι το διαδίκτυο, τα τηλεφωνικά δίκτυα, τα ραδιοφωνικά δίκτυα κτλ.

ΑΠΕ και διανεμημένη παραγωγή.

Η αποκέντρωση της παραγωγής έχει απασχολήσει τους φορείς λήψης αποφάσεων στην αγορά ενέργειας. Η διανεμημένη παραγωγή προσφέρει λύσεις για κάλυψη απομονωμένων φορτίων. Εμπορικά κτίρια και κατοικίες θα μπορούσαν να καλύπτουν μέρος των αναγκών τους από μονάδες διανεμημένης παραγωγής. Το ευφύες δίκτυο περιλαμβάνει μονάδες ελέγχου και αποθηκευτικά μέσα για τη βέλτιστη λειτουργία τους.

Διαχείριση του δικτύου διανομής.

Το έξυπνο δίκτυο χρησιμοποιεί αισθητήρες σε καλώδια τροφοδοσίας και μετασχηματιστές, αυτόματους διακόπτες και εισάγει αυτοματισμούς στους υποσταθμούς που συμβάλλουν στην σταθεροποίηση της τάσης, στην ανίχνευση των σφαλμάτων και στη μείωση του χρόνου αποκατάστασης αυτών.

Εξελιγμένη υποδομή μέτρησης (Advanced Metering Infrastructure, AMI).

Το AMI είναι από τις βασικότερες τεχνολογίες ευφυούς δικτύου και παρέχει αμφίδρομη επικοινωνία, καταγραφή του φορτίου σε πραγματικό χρόνο, αποστολή δεδομένων που αφορούν τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας κ.α. Χρησιμοποιεί έξυπνους μετρητές και αισθητήρες για την καταγραφή των δεδομένων των φορτίων τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τα πρότυπα της κατανάλωσης.

Υποδομή υποστήριξης της λειτουργίας ηλεκτρικών οχημάτων.

Για την υποστήριξη των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτούνται συστήματα για τη σύνδεση και τη φόρτιση τους. Το ευφύες δίκτυο έχει την δυνατότητα να επιτρέψει την διείσδυση τους στην σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός από περιβαλλοντικό όφελος τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να συμβάλλουν στην μείωση της αιχμής του φορτίου, σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ως συσκευές αποθήκευσης φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας φορτίζοντας τα σε ώρες χαμηλής ζήτησης και έχουν την δυνατότητα να την προσφέρουν στο δίκτυο σε περιόδους αιχμής.

Συστήματα στην πλευρά των καταναλωτών.

Είναι οι διατάξεις και οι εφαρμογές που αποσκοπούν στον έλεγχο της κατανάλωσης και στην εγκατάσταση έξυπνων συσκευών. Νέες προσεγγίσεις προτείνουν την ανάπτυξη εφαρμογών για συσκευές κινητής τηλεφωνίας αλλά και τη χρήση των μέσων κοινωνικής δικτύωσης για την δημιουργία τάσεων ευρείας αποδοχής της ενεργειακής αποδοτικότητας.

2.6.4 Συσκευές έξυπνου δικτύου.

Σταθερές συσκευές :

- Συσκευές εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) καθώς και συσκευές διανεμημένου αυτόματου ελέγχου (distribution automation, DA).
- Συσκευές αυτοματοποιημένης μέτρησης (Automation Meter Reading, AMR) και έξυπνους μετρητές (smart meters).
- Συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου και συστήματα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management Systems, EMS).

Κινητές συσκευές :

- Ασύρματοι αποστολείς δεδομένων και ήχου (voice and data dispatch radios).
- Συσκευές προσδιορισμού γεωγραφικής θέσης (GPS).
- Συσκευές αυτόματου εντοπισμού οχήματος (automatic vehicle location, AVL).
- Φορητοί υπολογιστές.
- Κινητά τηλέφωνα και άλλες συσκευές τηλεπικοινωνίας με πρόσβαση στο internet.

2.7 Dc μικροδίκτυα

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάστηκε για να μεταφέρει το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) των κεντρικών σταθμών παραγωγής, μέσω των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης και γραμμών διανομής τάσης , σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν την ισχύ στα φώτα πυρακτώσεως , κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, και άλλο εξοπλισμό AC . Ο εξοπλισμός ευρείας κατανάλωσης του σήμερα και η κατανεμημένη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας του αύριο, απαιτεί από εμάς να επανεξετάσουμε αυτό το μοντέλο .[13]

Ηλεκτρονικές συσκευές (όπως υπολογιστές , λαμπτήρες φθορισμού , συστήματα μετάδοσης μεταβλητής ταχύτητας , και πολλές άλλες συσκευές και εξοπλισμός νοικοκυριών και των επιχειρήσεων) χρειάζονται συνεχές ρεύμα (DC) εισόδου. Ωστόσο, όλες αυτές οι συσκευές απαιτούν μετατροπή DC του εναλλασσόμενου ρεύματος του κτιρίου σε συνεχές για χρήση , και η μετατροπή αυτή χρησιμοποιεί συνήθως αναποτελεσματικούς ανορθωτές . Επιπλέον , κατανεμημένη από ανανεώσιμες πηγές ενέργεια (όπως η ηλιακή στέγης) παράγει συνεχές ρεύμα , αλλά θα πρέπει να μετατραπεί σε AC για να μεταφερθεί στο ηλεκτρικό σύστημα του κτιρίου , και αργότερα , να μετατραπεί σε DC για πολλές τελικές χρήσεις . Αυτές οι μετατροπές AC - DC (ή DC - AC - DC στην περίπτωση της ηλιακής στέγης) οδηγούν σε σημαντικές απώλειες ενέργειας .

Μια πιθανή λύση είναι ένα μικροδίκτυο DC , η οποία είναι ένα δίκτυο DC στο εσωτερικό ενός κτιρίου (ή διαφόρων κτιρίων) που ελαχιστοποιεί ή εξαλείφει εντελώς αυτές τις απώλειες μετατροπής . Στο σύστημα μικροδικτύου DC , το εναλλασσόμενο ρεύμα μετατρέπεται σε DC κατά την είσοδο στο δίκτυο DC με ένα ανορθωτή υψηλής απόδοσης , το οποία στη συνέχεια διανέμει την ισχύ άμεσα σε DC εξοπλισμό που εξυπηρετούνται από το δίκτυο DC . Κατά μέσο όρο , το σύστημα αυτό μειώνει τις AC σε DC απώλειες μετατροπής από μια μέση απώλεια περίπου 32 % στο 10 %

.Επιπλέον,φωτοβολταϊκά στέγης (PV) και άλλες κατανεμημένες πηγές DC μπορούν να τροφοδοτήσουν απευθείας τον DC εξοπλισμό , μέσω του συνεχούς μικροδικτύου , χωρίς την απώλεια διπλής μετατροπής (DC σε AC σε DC) , η οποία θα απαιτείτο εάν η DC παραγωγή τροφοδοτείται σε ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος .

Προκειμένου το Σ.Η.Ε κάθε χώρας να ανταποκριθεί στις σύγχρονες ανάγκες των πελατών του δικτύου σήμερα, θα πρέπει να εξετάσουμε τα διαθέσιμα εργαλεία μέσω των DC μικροδικτύων, τα οποία μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση των ηλεκτρονικών συσκευών, την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, και την αποκεντρωμένη παραγωγή.Κάθε ένα από τα χαρακτηριστικά ενός έξυπνου δικτύου που αναφέρθηκαν προηγουμένως ,μπορεί να προωθηθεί μέσω της χρήσης των DC μικροδικτύων, και συχνά με μικρότερο κόστος, μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα από τα μεγέθη που εφαρμόζονται στο μεγαλύτερο δίκτυο AC.

Τί μπορούν να κάνουν τα DC μικροδίκτυα ;

Πώς θα βλέπαμε το δίκτυο αν η αρχιτεκτονική του βελτιστοποιούσε τις ηλιακή PV παραγωγή, και μεγιστοποιούσε την απόδοση όλων των ηλεκτρονικών συσκευών μας; Ποια οφέλη θα αποκτούσε από την περαιτέρω επιτάχυνση των δύο αυτών ταχέως αναπτυσσόμενων στοιχείων της Εξίσωσης της Ισχύος(Παραγωγή+απώλειες γραμμών και μεταφοράς=κατανάλωση);

Ας αρχίσουμε με τις DC ηλεκτρονικές συσκευές , οι οποίες αντιπροσωπεύουν το 50 % του ηλεκτρικού φορτίου σε πολλά κτίρια σήμερα . Στα 50 χρόνια μετά την έλευση των ημι - αγωγών σε καταναλωτικά προϊόντα , οι ηλεκτρονικές συσκευές συναντιούνται παντού. Η Πληροφορική και η σύνδεση στο Internet εμφανίζονται σε πολλές συσκευές ,οι λάμπες πυρακτώσεως δίνουν το δρόμο στα ηλεκτρονικά

(είτε φθορισμού ή LED) και οι φορητές ηλεκτρονικές συσκευές συνεχίζουν να πολλαπλασιάζονται . Ένα άλλο στοιχείο της αυξανόμενου φορτίου DC είναι οι Variable Frequency Drives (VFD) για τους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Αυτές οι ηλεκτρονικές συσκευές έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του σχεδόν πανταχού παρόν κινητήρα επαγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος. Με την εγκατάσταση VFDs μπροστά από AC κινητήρες τους, οι ιδιοκτήτες κτιρίων και διαχειριστές είναι σε θέση να ελέγχουν την ταχύτητα του κινητήρα, ο οποίος αποδίδει ένα τεράστιο όφελος : για κάθε ένα όγδοο που ο κινητήρας επιβραδύνει στην ταχύτητα , το ένα τρίτο της ενέργειας αποθηκεύεται .

Έτσι κάθε κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος που συνδέεται με ένα VFD μπορεί να γίνει μια συσκευή που καταναλώνει DC ρεύμα, όπως κινητό τηλέφωνο, laptop, LCD ή plasma τηλεόραση και γενικά τα φώτα.

Ας φανταστούμε αυτά τα φορτία που διανέμονται σε όλο το κτίριο, όπως είναι σήμερα και να φανταστούμε πώς θα πρέπει να τα τροφοδοτήσουμε, δανειζόμενοι κατευθυντήριες αρχές του Smart Grid για την καλύτερη βελτιστοποιημένη Εξίσωση Ισχύος. Επειδή μας ενδιαφέρει η αξιοπιστία και η απόδοση του συστήματος, θέλουμε να δημιουργήσουμε ένα περιβάλλον συνεχούς για να μεταφέρει την ισχύ σε αυτά τα φορτία, όπως οι τηλεπικοινωνίες έχουν κάνει ιστορικά στους σταθμούς μεταγωγής, και, πιο πρόσφατα, για την υποστήριξη των servers σε εφαρμογές κέντρων δεδομένων.

Αλλά η καλύτερη απόδοση είναι μόνο το αρχικό όφελος που φέρνει ένα DC μικροδίκτυο επειδή ένα δίκτυο συνεχούς ρεύματος δεν χρειάζεται την απαραίτητη AC σε DC μετατροπή τροφοδοσίας (όπως το βίσμα που συνδέεται στο φορητό υπολογιστή σας) για κάθε ηλεκτρονική συσκευή. Ως μια αναγκαιότητα, τα τροφοδοτικά που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά επιβάλλουν απώλειες για την ισχύ κάθε συσκευής, συνήθως 15% έως 40%. Όλες αυτές οι απώλειες σε ένα μικροδίκτυο DC μπορούν να μειωθούν εύκολα σε 10% έως 15% με τη χρήση μια υψηλότερη απόδοσης ανόρθωση για πολλά φορτία.

Ένα άλλο όφελος της απόφασης για την ενσωμάτωση DC μικροδίκτυα είναι η ανώτερη συμβατότητα του συνεχούς ρεύματος με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας . Κατά τη διάρκεια κάθε μεγάλης διακοπή ρεύματος δικτύου (blackout) οι ειδικοί σημειώνουν ότι η περαιτέρω ανάπτυξη της αποθήκευσης ενέργειας σε κλίμακα μικροδικτύου θα βελτιώσει κατά πολύ τη σταθερότητα του δικτύου. Η έννοια αυτή , ενώ είναι τεχνικά εφικτό , εμφανίζεται ανέφικτη γιατί φέρνει μια εικόνα απο γιγαντιαία C - Cell Μπαταρία στην έρημο που θα διατηρήσει το δίκτυο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης . Αυτό θα ήταν απλά πάρα πολύ ακριβό για να έχει και πολύ νόημα . Από την άλλη πλευρά , χρησιμοποιώντας την καταναεμημένη ενέργεια από μπαταρίες συνδεδεμένες στο δίκτυο DC μεγιστοποιείται η ισχύ της μπαταρίας , αποφεύγοντας τη μετατροπή της εξόδου της , αλλά και ισούται με το άθροισμα των μερών της συνολικής ισχύος , έτσι ώστε 1000 οι μικρές μπαταρίες που η κάθεμια έχει την ικανότητα να τρέξει ένα laptop για 10 ώρες και χρειάζεται 100 watts ,ισούται με 1 μεγαβατώρα ακριβώς σαν να ήρθε από μια γιγαντιαία μπαταρία . Αλλά αυτή η αναλογία είναι πολύ γενναιόδωρη με το τελευταίο : η ισχύς από τη μακρινή μπαταρία θα υποστεί άλλες απώλειες τις οποίες η τοπική μπαταρία δεν θα υποστεί. Αυτές περιλαμβάνουν τις απώλειες αναστροφής (που πηγαίνει από την DC μπαταρία στο AC του δικτύου) , οι απώλειες μεταφοράς και διανομής (υπολογίζεται σε 7 έως 11 % από την Επιτροπή Ενέργειας των Η.Π.Α) και, τέλος, οι απώλειες μετατροπής σε συνεχές όταν φτάνει στο ηλεκτρονικό φορτίο σας . Συλλογικά , αυτές οι απώλειες θα μπορούσαν να προσθέσουν έως και όσο το 41 % της ενέργειας που τελικά παραδίδονται σε συσκευές.

Αυτές οι απώλειες μετατροπής και απώλειες γραμμής μπορούν σε μεγάλο βαθμό να αποφευχθούν με τη χρήση καταναμημένων μπαταριών σε DC μικροδίκτυα. Έτσι, παρόλο που το μικροδίκτυο βελτιώνει την οικονομία των μπαταριών (οι οποίες είναι οι ίδιες DC συσκευές) με το πάντρεμα τους στενά με τις συσκευές DC, υποστηρίζουν το δίκτυο, και έτσι η αποθήκευση μπορεί να βοηθήσει στην ανάπτυξη του μικροδικτύου DC σε προτίμηση από μεγάλα κεντρικά συστήματα αποθήκευσης της μπαταρίας.

Ευτυχώς, προσθέτοντας DC αποθήκευση σε ένα μικροδίκτυο DC είναι ένα σχετικά απλό κομμάτι της εφαρμοσμένης μηχανικής σε σύγκριση με τις επιπλοκές της ενσωμάτωσης DC αποθήκευσης στον τομέα AC όπου απαιτείται πρόσθετο υλικό.

Επιπλέον, έχουμε σε αυτό το σύνολο του κτιρίου με DC φορτία, την ευκαιρία να ενταχθούν - σε υψηλότερη απόδοση - άλλοι τρόποι ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι εγγενώς DC πηγές, όπως η ηλιακή PV, μικρές ανεμογεννήτριες, ή κυψέλες καυσίμου. Σε αντίθεση με τα AC συστήματα, αυτά τα διαφορετικά στοιχεία μπορούν να δουλέψουν σε αρμονία χωρίς να απαιτείται συμφωνία φάσης. Σε ένα DC σύστημα, μόνο η τάση πρέπει να εξεταστεί, ενώ τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος απαιτούν από κάθε στοιχείο να έχει τις ίδιες κύματομορφές ή να συγχρονιστούν για να λειτουργήσει. Ο συντονισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω μιας πολύπλοκης συσκευής που ονομάζεται ένας αντιστροφάας, η οποία παρέχει το αιώνιο αδύναμο κρίκο στα καταναμημένα συστήματα παραγωγής.

Το μικροδίκτυο DC έτσι μπορεί να φιλοξενήσει πολλές εισόδους DC επειδή έχουν ένα κοινό ρεύμα. Έτσι, δεδομένης μιας ισχυρής γεννήτριας και άφθονου χώρου αποθήκευσης, τώρα έχουμε ένα αρκετά αποτελεσματικό τοπικό δίκτυο που χρησιμοποιεί ηλιακή φωτοβολταϊκή και ενσωματώνει την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλότερες αποδόσεις από ό, τι είναι δυνατό με ένα συμβατικό σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος. Υπάρχουσες συσκευές plug-in αποτελούν μεταβατική πρόκληση για τα DC μικροδίκτυα, διότι μέχρι τα προϊόντα αυτά να αντικατασταθούν από κάποια που θα χρησιμοποιούν μια σταθερή τάση, δεν μπορούν να συνδεθούν χωρίς DC σε DC μετατροπέα.

Το μικροδίκτυο DC μπορεί επίσης να απλοποιήσει και να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του τρόπου με τον οποίο συδέονται τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEV) και των ηλεκτρικών οχημάτων (EV) στο δίκτυο. Αντί να απαιτείται από το δίκτυο να διαπραγματευτεί ευκαιριακούς δωρητές και ζητούντες ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία θα μπορούσε να έχει μεγάλες αρνητικές επιπτώσεις στη σταθερότητα του δικτύου, ένα DC μικροδίκτυο μπορεί να συμπεριφερθεί ως ένα αποτελεσματικό απομονωτή, βελτιστοποιώντας την παραγωγή και την αποθήκευση, και αυξάνοντας την αξιοπιστία του δικτύου. Επιπλέον, επειδή η συνεχής ισχύς δεν έχει καμία φάση για να ταιριάζει, η σύνδεση με το όχημα είναι απλοποιημένη, παρέχοντας μια πιο αποτελεσματική διαδρομή για την μπαταρία του DC. Ως σύστημα, το μικροδίκτυο DC δημιουργεί επίσης περισσότερες δυνατότητες αποθήκευσης ή παραγωγής ισχύος του οχήματος, επιτρέποντας είτε υψηλή αποδοτικότητα στη χρήση απομονωμένης χρήσης, ή την αποστολή της ενέργειας στο δίκτυο. Η επιλογή αυτή είναι πολύτιμη και θα βοηθήσει στη δημιουργία πιο αποτελεσματικών αγορών για όλες τις ΚΠ που συνδέονται με αυτόν τον τρόπο σε όλο το σύστημα.

Η μάχη AC εναντίον DC

Κοιτάζοντας πίσω έναν αιώνα στο αγώνα για την κυριαρχία στο χώρο της ηλεκτρικής ενέργειας, έλαβε χώρα μια μεγάλη μάχη για το ποια μορφή ρεύματος θα επικρατήσει AC ή DC. Για μας έχει αξία να κρατήσουμε τέσσερα σημαντικά σημεία :

1. η χονδρική παραγωγή ενέργειας σε μεγάλες εγκαταστάσεις ήταν φθηνότερη από ό, τι σε πολλούς μικρούς καταναμημένους σταθμούς
2. η AC ισχύς θα μπορούσε να διανύσει μεγάλες αποστάσεις με χαμηλές απώλειες, σε αντίθεση με DC
3. λαμπτήρες πυρακτώσεως που ήταν η πλειοψηφία του φορτίου λειτουργούσαν με AC ρεύμα
4. οι ημιαγωγοί δεν είχε ακόμα εφευρεθεί.

Τα γεγονότα αυτά οδήγησαν σε θρίαμβο του Westinghouse πάνω στον Edison με πολλούς τρόπους. Ωστόσο, είναι επίσης ο λόγος για τον οποίο πρέπει να ξανασκεφτούμε ορισμένα από τα επιχειρήματα του Edison για την καλύτερη εξυπηρέτηση του φορτίου σήμερα. Οι κατευθυντήριες αρχές των Έξυπνων Δικτύων μας θυμίζουν, ότι η Εξίσωση Ισχύος μας πρέπει να προστατεύει αποτελεσματικά κότερα το περιβάλλον, και έχει μια αυξανόμενη ανάγκη για Καταναμημένα Παραγωγή DC, όπως η ηλιακή φωτοβολταϊκή και DC αποθήκευσης. Εν τω μεταξύ, οι ηλεκτρονικές συσκευές είναι το ταχύτερα αναπτυσσόμενο τμήμα του φορτίου.

Παραδείγματα της σύγκλισης των μικροδίκτυα DC και το Smart Grid περιλαμβάνει το έργο πάνω από 50 εταιρειών που έχουν δημιουργήσει μια ομάδα για την προώθηση του συνεχούς ρεύματος στα δίκτυα χαμηλής τάσης. Αυτή η ομάδα αναμένει ότι η δυναμική των LED ως πηγή φωτός για τις κοινές εφαρμογές φωτισμού θα συνεχιστεί και τελικά θα κυριαρχήσουν στην αγορά φωτισμού. Όχι συμπτωματικά, 24-volt DC είναι το πρώτο πρότυπο συνεχούς ρεύματος που έχει δημιουργηθεί.

Αν όλες οι ηλιακές στέγες που έχουν εγκατασταθεί στις ΗΠΑ κάθε χρόνο έχουν καθοριστεί για τη διανομή σε DC φωτισμό, τα συστήματα αυτά θα φιλοξενήσουν πάνω από ένα Gigawatt της ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας κατά τα πρώτα δύο years. Ομοίως, ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να ενσωματωθεί στη φυσική της μορφή DC σε 99% απόδοση σε ένα τμήμα της μετατόπισης φορτίων κλιματισμού, ενδεχομένως παρέχοντας πάνω από 50 Twh μέγιστου φορτίου κάθε χρόνο.

Αυτή είναι ενέργεια που, όπως στο παράδειγμα του φωτισμού, φέρνει τόσο στους χρήστες όσο και στους παραγωγούς βασικά οφέλη που το μοντέλο AC δεν προσφέρει, αποφεύγοντας απώλειες μεταφοράς και διανομής, καθώς και οι απώλειες μετατροπής στο κτήριο.

Το Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Berkeley (LBNL) υπολόγισε ότι το συνολικό ποσό της ενέργειας που ρέει σε εξωτερικά τροφοδοτικά για τις ηλεκτρονικές συσκευές στις ΗΠΑ είναι περίπου 290 Twh/year. Η αμερικανική Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος (EPA) και το DOE's Energy Star υπολογίζουν ότι το 1/3 με 1/2 της ενέργειας που τροφοδοτεί αυτές τις συσκευές χάνεται ως θερμότητα. Αυτό τελικά σημαίνει ότι περίπου 100-150 TWh / έτος χάνονται σε αυτές τις μετατροπές.

Τα περισσότερα διαθέσιμα δεδομένα ηλεκτρικής ενέργειας από το εθνικό δίκτυο είναι από τα τελικά φορτία του δικτύου, και όχι από το πώς χρησιμοποιείται η ενέργεια. Παίρνοντας δεδομένα μεγάλο βαθμό από την αμερικανική Energy Information Administration του ανά κατηγορία, μπορούμε να αρχίσουμε να οικοδομήσουμε αξιολόγηση για την δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση DC μικροδικτύων. Για την εξοικονόμηση που προέρχεται από τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της τροφοδοσίας, θεωρούμε 70 % ή 75 % απόδοση ως μέσο εύρος για τροφοδοτικά AC, η οποία είναι γενναιόδωρη με δεδομένες τις εκτιμήσεις του LBNL, και 90 % χρησιμοποιείται για το μετατροπέα υψηλής απόδοσης που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα μικροδίκτυο DC. Αυτοί οι μετατροπείς

είναι σήμερα διαθέσιμοι στην αγορά. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τους εν λόγω τομείς , τα σχετικά φορτία , και το δυναμικό εξοικονόμησης

Πίνακας 2.1

<u>Συσκευή</u>	<u>MWh που χρησιμοποιήθηκε</u>	<u>Δυνατότητα Εξ/σης</u>	<u>εξοικονόμηση MWh</u> <u>Απο dc μικροδίκτυα</u>
Ψυγεία	160,158,600	40%	64,063,440
Φωτισμός	103,113,000	15%	15,466,950
Ανεμιστήρες Φούρνων	39,193,200	25%	9,798,300
Μικροκύματα	19,801,800	15%	2,970,270
Τηλεόραση	33,960,600	15%	5,094,090
VCR / DVD	11,593,800	15%	1,739,070
Καλωδιακή	2,975,400	15%	446,310
Δορυφορικοί δίσκοι	1,846,800	15%	277,020
Υπολογιστές Γραφείου	17,647,200	15%	2,647,080
Φορητοί υπολογιστές	1,333,800	15%	200,070
Εκτυπωτές	4,617,000	15%	692,550
Αντλίες πισίνας	10,054,800	25%	2,513,700
Ανεμιστήρες οροφής	9,849,600	30%	2,954,880
Αντλίες νερού	5,643,000	25%	1,410,750
Στερεοφωνικά Συστήματα	5,130,000	15%	769,500
Ψύξη	3,283,200	25%	820,800
Φορητά Στερεοφωνικά	718,200	15%	107,730
Τηλεφωνητές	4,514,400	15%	677,160
Επαν/μενα εργαλεία	2,154,600	15%	323,190
Άλλα	82,285,200	10%	8,228,520
Σύνολο	519,874,200		121,201,380

Πίνακας 2.2

Συνοπτικός πίνακας σε TW(terrawatts)(2006)*

<u>Τομέας</u>	<u>Δυνατότητα εξοικονόμησης</u>	<u>Δυνατότητα βελτίωσης απόδοσης</u>	<u>Δυνατότητα Εξ.Συνολικού φορτίου</u>
Οικιστικός	121	25,32%	2.98%
Εμπορικός	123	19,03%	3.03%
Βιομηχανικός	77	20%	1.90%
Κέντρα Δεδομένων	15	28%	0.37%
Συνολικά	337	21.50%	8.28%

*dc microgrids benefits and barriers, Yale School

Συμπεράσματα

1.Εξοικονόμηση συνολικής παραγωγής (MW)

Αυτά τα μεγάλα δυνητικά οφέλη από την απόδοση θα έχουν άμεση θετική επίπτωση στην συνολική παραγωγή και στο σχεδιασμό προς όφελος όλων των ενδιαφερομένων μερών στο δίκτυο.

Χρησιμοποιώντας σύγχρονα δεδομένα από το 2006 για την ανάλυση του φορτίου μας, μπορούμε να δούμε πώς ένα μικρότερο φορτίο θα αποφέρει μεγάλα οφέλη.Εξοικονομώντας 337 TWh της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για παράδειγμα, οι διαχειριστές των δικτύων θα μπορούσαν να έχουν τη δυνατότητα να κλείσουν ή να αποφύγουν την κατασκευή περίπου 75 GW σταθμών παραγωγής.

2.Δίκτυα μεταφοράς και διανομής

Το κύριο πλεονέκτημα της AC είναι η αποτελεσματικότητά της ως προς τη διαχείριση και μεταφοράς ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Μείωση φορτίων κατά την τελική χρήση και αύξηση της τοπικής παραγωγής μειώνει τα συνολικά φορτία του δικτύου. Άλλα συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης DC δεν emπίπτουν στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας ανάλυσης.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί, ωστόσο, ότι οι βραχυπρόθεσμες γραμμές υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος που λειτουργούν μεταξύ των μεγάλων εδαφικών υπηρεσιών του δικτύου, έτσι ώστε αυτά τα μεγάλα δίκτυα εναλασσομένου ρεύματος να είναι συγχρονισμένα και μπορούν να παραμένουν συνδεδεμένοι μεταξύ τους χωρίς το βάρος ταιριάζουν ακριβώς με τη φάση του γείτονά τους.

Αυτή η απομονωμένη περιοχή είναι σημαντική όταν ένα μεγάλο τμήμα

του δικτύου βγαίνει εκτός λειτουργίας για οποιαδήποτε λόγο.Με χρήση DC στις γειτονικές περιοχές του δικτύου, η on-line επιστροφή είναι ευκολότερη όταν η επανερχόμενη γεννήτρια δεν πρέπει να συγχρονιστεί με μια ακριβή φάση ενός συνδεδεμένου συστήματος.

3. Πρόσθετα οφέλη για την επί τόπου παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από DC πηγές (π.χ. ηλιακή PV, μικρές ανεμογεννήτριες, οι κυψέλες καυσίμου και γεννήτριες DC)

Επειδή τα DC μικροδίκτυα είναι πιο αποτελεσματικά, παράγουν λιγότερη θερμότητα στο εσωτερικό του κτιρίου.Όπως είδαμε στην εφαρμογή των κέντρων δεδομένων, αυτό το ηλεκτρικό όφελος της αποδοτικότητας μπορεί να είναι διπλό λόγω του ότι αποφεύγεται ένα σημαντικό φορτίο ψύξης. Το όφελος αυτό είναι παρόν σε όλα τα μικροδίκτυα DC, αλλά δεν έχει διαμορφωθεί πέρα από το παράδειγμα των κέντρων δεδομένων στην παρούσα ανάλυση.

4. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι πολλαπλές μικροπηγές ρεύματος DC στο μικροδίκτυο μπορούν να λειτουργήσουν πιο αρμονικά . Καμία αντιστοίχιση φάσης δεν απαιτείται όπως σε συστήματα εναλασσομένου ρεύματος, και η αποτελεσματικότητας που παρατηρήθηκε εκτείνεται σε μπαταρίες, μικρές ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου και γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Το τελευταίο έχει μεγάλες δυνατότητες με την έννοια ότι θα μπορούσε να ανταποκριθεί σύντομα σε πραγματικό χρόνο για την αύξηση της ζήτησης του φορτίου

5.Συνδυάζοντας πολλαπλές μικροπηγές αυξάνεται η πιθανότητα ότι πολλά διαφορετικά καύσιμα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθεί στο κτήριο, η οποία αυξάνει την εγγενή ασφάλεια του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:Μετατροπéας Dc-Dc

3.1 Θεωρητική Ανάλυση Dc-dc μετατροπέα

Μετατροπéες συνεχούς ρεύματος είναι εκείνες οι διατάξεις ισχύος που επιτελούν τη μετατροπή μιας τάσης συνεχούς μορφής, σε συνεχή τάση με ρυθμιζόμενο σταθερό πλάτος ή καιπολικότητα.

Στους διακοπτικούς μετατροπéες, η μετατροπή της συνεχούς τάσης επιτελείται από διακόπτες, οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλή συχνότητα (Θυρίστορ, IGBT, MOSFET, BJT). Τα διακοπτικά αυτά στοιχεία ελέγχονται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να μεταβαίνουν περιοδικά από την κατάσταση αγωγής (turn on) σε κατάσταση αποκοπής (turn off) και αντίστροφα. Το γεγονός αυτό έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την δημιουργία παλμικών τάσεων μεταβλητού (χρονικού) εύρους. Ο χρόνος αγωγής του διακοπτικού στοιχείου (ton) προς την διακοπτική περίοδο (Ts) λειτουργίας ονομάζεται χρόνος κατάτμησης (Duty cycle). Η παλμική τάση εξομαλύνεται με την βοήθεια ενός φίλτρου στην έξοδο του οποίου παίρνουμε συνεχή τάση. Έτσι, με την βοήθεια του χρόνου κατάτμησης επιτυγχάνεται ρύθμιση του της τάσης εξόδου του μετατροπέα η οποία εφαρμόζεται σε ένα φορτίο.[14]

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

Κατηγορίες μετατροπέων Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή Τάση (DC-DC Converters)

Οι μετατροπéες συνεχούς ρεύματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου τους είναι γαλβανικά απομονωμένη από την είσοδο.

1. Μετατροπéες DC-DC χωρίς μετασχηματιστή απομόνωσης. (Single-Ended DC-DC Converters).
2. Μετατροπéες DC-DC με μετασχηματιστή απομόνωσης

Μια δεύτερη κατηγοριοποίηση των μετατροπέων βασίζεται στο αν η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την τάση εισόδου. Έτσι έχουμε τις εξής κατηγορίες:

1. Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου (**BUCK**).
2. Μετατροπέας ανύψωσης τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου (**BOOST**).
3. Μικτός (υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης) μετατροπέας εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου (**BUCK-BOOST**).

Άλλες δύο κύριες κατηγορίες μετατροπέων είναι

4. Μετατροπέας του **CUK**.
5. Μετατροπέας με **πλήρη γέφυρα**.

Από αυτούς τους πέντε μετατροπéες DC-DC, μόνο οι μετατροπéες υποβιβασμού και ανύψωσης της τάσης είναι οι βασικές τοπολογίες. Τόσο ο μικτός όσο και ο μετατροπέας του **CUK** είναι συνδυασμοί των δυο βασικών τοπολογιών. Ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα προκύπτει από το μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.

Στο υπό μελέτη σύστημα ο μετατροπέας είναι ένας μετατροπέας ανύψωσης και σταθεροποίησης της τάσης εξόδου του. Υπάρχουν πολλοί μετατροπéες DC-DC που είναι κατάλληλοι για την απαραίτητη ανύψωση και σταθεροποίηση τάσης εξόδου του μετατροπέα, ορισμένοι από τους οποίους είναι ο μετατροπέας Full-bridge με μετασχηματιστή απομόνωσης, ο μετατροπέας Push-Pull Double Inductor,

ο μετατροπέας του Cuk, ο μετατροπέας Flyback κλπ. Ωστόσο η πλέον κατάλληλη τοπολογία για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ο βασικός boost ή step up μετατροπέας.

Κριτήρια επιλογής μετατροπέα-πλεονεκτήματα μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Τα κύρια πλεονεκτήματα του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι τα εξής:

1. Το χαμηλό κόστος του
2. Η απλή σχεδίασή του
3. Το γεγονός ότι το ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο (στη συγκεκριμένη εφαρμογή το Mosfet) είναι γειωμένο στην πηγή (source), το οποίο συνεπάγεται την εύκολη οδήγησή του.

3.2 DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Η περιγραφή ισχύει και εδώ για μη διακοπτόμενο ρεύμα πηνίου.

Παραδοχές

Η ανάλυση του μετατροπέα ανύψωσης αρχίζει με τις ακόλουθες παραδοχές:

1. Το MOSFET ισχύος και η διόδος είναι ιδανικοί διακόπτες.
2. Η χωρητικότητα εξόδου τρανζίστορ, η χωρητικότητα της διόδου, και οι διακοπετικές απώλειες είναι μηδέν.
3. Τα παθητικά στοιχεία είναι γραμμικά, χρονικά αναλλοίωτα, και ανεξάρτητα συχνότητας.
4. Η σύνθετη αντίσταση εξόδου της πηγής V_d τάση εισόδου είναι μηδέν τόσο για dc όσο και για ac εξαρτήματα.

Ο DC - DC μετατροπέας ανύψωσης τάσης (step up ή boost DC - DC converter), παράγει μέση τάση εξόδου V_o μεγαλύτερη από την DC τάση εισόδου του V_d . Σε αυτή την περίπτωση, η τάση εισόδου V_d και η τάση εξόδου V_o συνδέονται με τη σχετική διάρκεια αγωγής D σύμφωνα με τη Σχέση 3.1

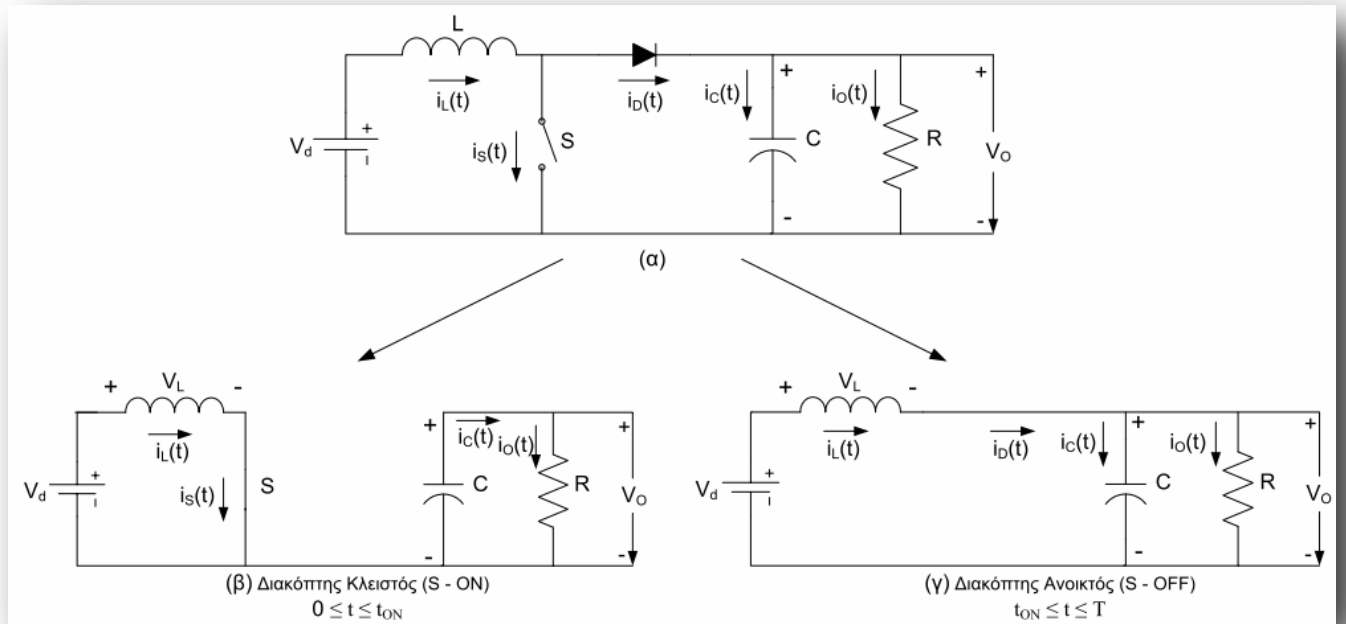
$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D} \quad \text{Σχέση 3.1}$$

Και θεωρώντας ένα κύκλωμα χωρίς απώλειες, η ισχύς εξόδου P_o είναι ίση με την ισχύ εισόδου P_d και άρα προκύπτει η ανάλογη Σχέση 3.2 για το ρεύμα εισόδου I_d , το ρεύμα εξόδου I_o και τη σχετικό λόγο κατάτμησης (duty cycle) D :

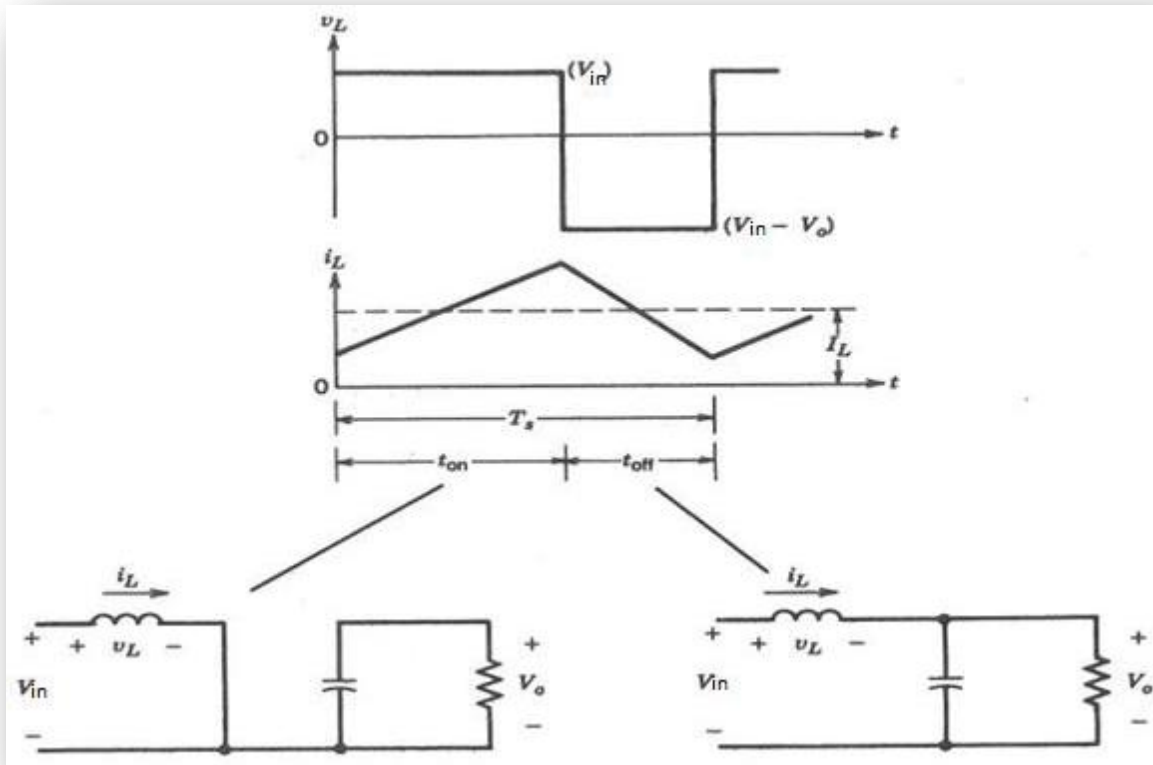
$$P_d = P_o \Rightarrow V_d * I_d = V_o * I_o \Rightarrow$$

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{V_d}{V_o} \Rightarrow \frac{I_o}{I_d} = (1 - D) \quad \text{Σχέση 3.2}$$

Η σχετική διάρκεια αγωγής δίνεται και πάλι από τη Σχέση 3.2. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το κύκλωμα του DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης, καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα για τις δύο καταστάσεις του ημιαγωγικού διακόπτη. Στα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζεται και η φορά ροής των ρευμάτων των στοιχείων.[15]



Σχήμα 3.1: το κύκλωμα του DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης



Σχήμα 3.2: ο μετατροπέας στις καταστάσεις on και off

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.1(β), κατά τη διάρκεια που ο διακόπτης S είναι κλειστός το ρεύμα του πηνίου περνάει από αυτόν, ενώ η διάοδος βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, απομονώνοντας τη βαθμίδα εξόδου από το υπόλοιπο κύκλωμα. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται η τάση εισόδου $V_L = V_d$ και το ρεύμα του αυξάνει. Επομένως, κατά το χρόνο $0 - t_{ON}$ το πηνίο αποταμιεύει ενέργεια.

Όταν ο διακόπτης S βρεθεί σε κατάσταση αποκοπής, η αποθηκευμένη στο πηνίο ενέργεια αποδίδεται στη βαθμίδα μέσω της διάοδος. Όταν η διάοδος είναι αγώγιμη, το πηνίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή εξόδου, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.1 (γ), και η τάση του γίνεται $V_L = V_d - V_o$.

3.2.1 Συνεχής Αγωγή του Ρεύματος

Στη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή ρεύματος, ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου υπολογίζεται από τη μέση τάση στα άκρα της επαγωγής, η οποία είναι ίση με το μηδέν. Ισχύει,

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0$$

και διαιρώντας και τα 2 σκέλη με T_s προκύπτει,

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad \text{Σχέση 3.3}$$

Θεωρώντας μηδενικές τις απώλειες του κυκλώματος έχουμε

$$P_d = P_o, \quad V_d I_d = V_o I_o \quad \text{και} \quad \frac{I_o}{I_d} = (1 - D) \quad \text{Σχέση 3.4}$$

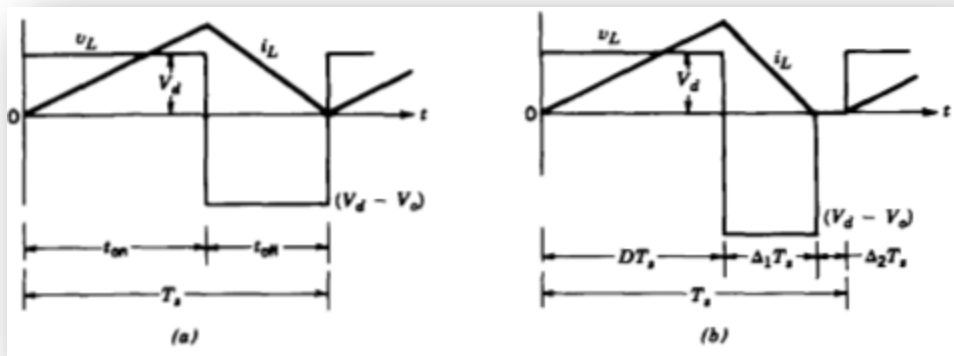
Όπου το ρεύμα εισόδου I_d είναι το μέσο ρεύμα που διαρρέει το πηνίο και ισούται με

$$I_d = \frac{I_{L, \max} + I_{L, \min}}{2}$$

Και το ρεύμα εξόδου I_o είναι η μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει την δίοδο.

3.2.2 Ασυνεχής Αγωγή του Ρεύματος

Για να κατανοήσουμε την ασυνεχή κατάσταση αγωγής του ρεύματος πρέπει να θεωρήσουμε, καθώς η ισχύς εξόδου μειώνεται, τα V_d και D παραμένουν σταθερά (παρόλο που στην πραγματικότητα το D μεταβάλλεται ώστε να κρατά το V_o σταθερό). Το Σχήμα 3.3 συγκρίνει τις κυματομορφές στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς αγωγής θεωρώντας τα V_d και D σταθερά.



Σχήμα 3.3: κυματομορφές μετατροπέα ανύψωσης (α)όριο συνεχούς-ασυνεχούς αγωγής (β)ασυνεχής αγωγή

Στο Σχήμα 3.3(β) η ασυνεχής αγωγή του ρεύματος προκαλείται από την μειωμένη $P_o (= P_d)$ ή το μειωμένο το $I_L (= I_d)$ αφού η V_d παραμένει σταθερή. Εφόσον το είναι ίδιο και στους δύο τρόπους λειτουργίας του σχήματος 3.3, μια χαμηλότερη τιμή για το I_L (κι έτσι για ένα ασυνεχές I_L) είναι δυνατή μόνο αν αυξηθεί η V_o όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3(β) κάτι που σημαίνει ότι το πηνίο προσφέρει την ίδια ενέργεια σε μικρότερο χρόνο.

Αν εξισώσουμε το ολοκλήρωμα της τάσης του πηνίου στο διάστημα μιας περιόδου με το μηδέν προκύπτει.

$$\int_0^{T_s} V(t) dt = 0 \Rightarrow V_d * D * T_s + (V_d - V_o) \Delta 1 * T_s = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{\Delta 1 + D}{\Delta 1} \quad \text{Σχέση 3.5}$$

Κι αφού $P_o = P_d$ έχουμε

$$\frac{I_o}{I_d} = \frac{\Delta 1}{\Delta 1 + D} \quad \text{Σχέση 3.6}$$

Από Σχήμα 3.3(β), το μέσο ρεύμα εισόδου, το οποίο είναι επίσης ίσο με το ρεύμα του πηνίου προκύπτει

$$I_d = \frac{V_d}{2 * L} * D * T_s * (D + \Delta 1) \quad \text{Σχέση 3.7}$$

Χρησιμοποιώντας τώρα τη Σχέση 3.6 και Σχέση 3.7 έχουμε

$$I_o = \frac{V_d * T_s}{2 * L} * D * \Delta 1 \quad \text{Σχέση 3.8}$$

Στην πράξη εφόσον η V_o διατηρείται σταθερή και ο λόγος D μεταβάλλεται ανταποκρινόμενος στις μεταβολές της V_d , είναι χρησιμότερο να βρεθεί ο ζητούμενος λόγος D ως συνάρτηση του ρεύματος φορτίου για διάφορες τιμές του V_o/V_d .

Προκύπτει

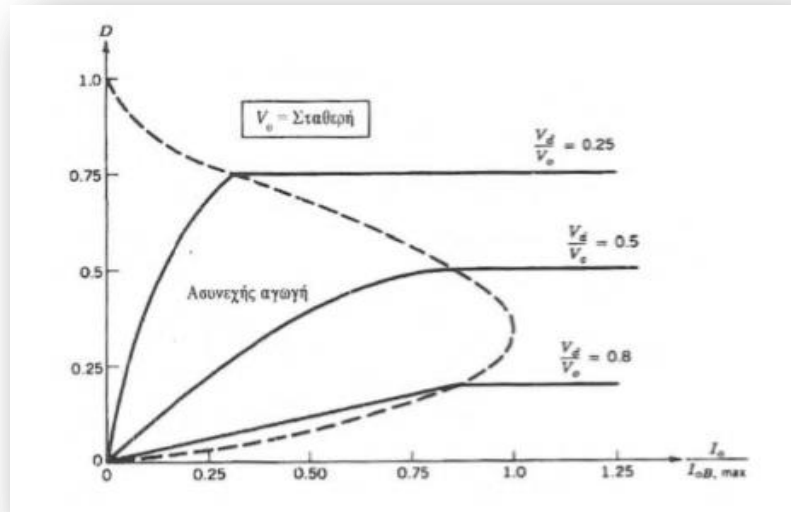
$$D = \left[\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \left(\frac{I_o}{I_{o,b,max}} \right) \right]^{1/2} \quad \text{Σχέση 3.9}$$

Στο Σχήμα 3.4 ο λόγος D σχεδιάζεται ως συνάρτηση του $I_o/I_{o,b,max}$ για διάφορες τιμές του V_d/V_o . Το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής ρεύματος είναι η καμπύλη που σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή. [16]

Στη λειτουργία ασυνεχούς ρεύματος, αν η V_o δεν ελέγχεται κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου μετάβασης, μεταφέρεται από την είσοδο στον πυκνωτή εξόδου και στο φορτίο, τουλάχιστον, η ενέργεια

$$E = \frac{L}{2} * I_{l,peak}^2 = \frac{(V_d * D * T_s)^2}{2L} \quad \text{Σχέση 3.10}$$

Αν το φορτίο δεν μπορεί να απορροφήσει αυτή την ενέργεια, η τάση του πυκνωτή V_o θα αυξηθεί ώστε να επέλθει ενεργειακή ισορροπία. Αν το φορτίο γίνει πολύ μικρό, η αύξηση της V_o μπορεί να προκαλέσει καταστροφή του πυκνωτή ή να αναπτυχθεί μια επικίνδυνα υψηλή τάση.

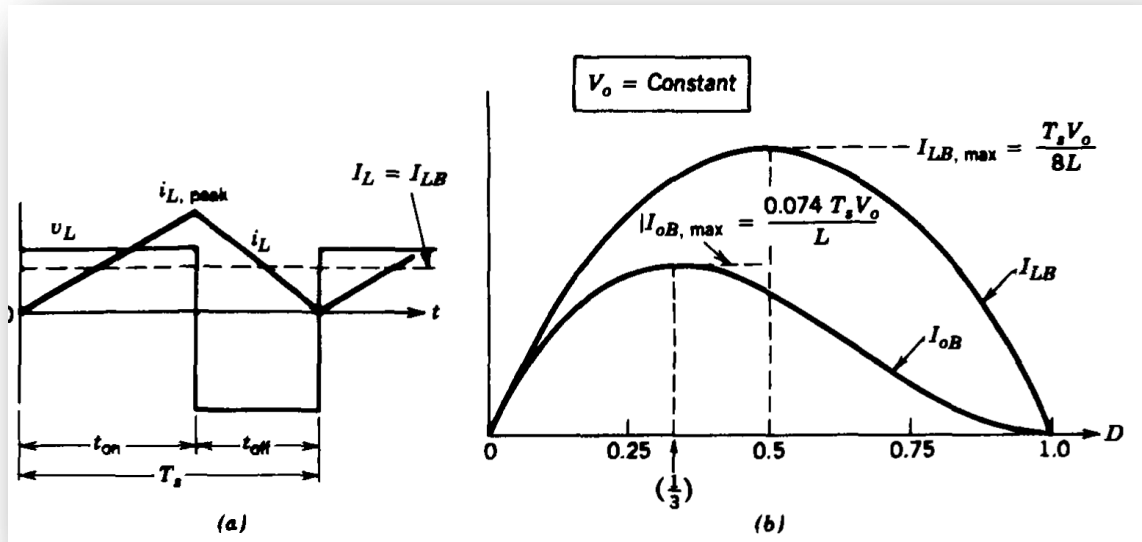


Σχήμα 3.4: χαρακτηριστικές του μετατροπέα ανύψωσης με σταθερή V_o

3.2.3 Όριο Μεταξύ Συνεχούς και Ασυνεχούς Αγωγής

Στο επόμενο Σχήμα φαίνονται τα οι κυματομορφές στα όρια συνεχούς λειτουργίας. Εξ ορισμού σε αυτή την κατάσταση το ρεύμα του πηνίου I_L μηδενίζεται στο τέλος κάθε περιόδου που ο διακόπτης είναι σε κατάσταση off. Η μέση τιμή του ρεύματος σε αυτό το όριο είναι

$$I_{Lb} = \frac{1}{2} I_{L, \text{peak}} = \frac{1Vd}{2L} \text{ ton} = \frac{TsVoD(1-D)}{2L} \quad \text{Σχέση 3.11}$$



Σχήμα 3.4: Μετατροπέας ανύψωσης στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς λειτουργίας

Παρατηρώντας ότι στον μετατροπέα ανύψωσης τάσης το ρεύμα εισόδου είναι ίσο με το ρεύμα του πηνίου και χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.10) και (3.11) βλέπουμε ότι το ρεύμα εξόδου στο όριο συνεχούς-ασυνεχούς κατάστασης λειτουργίας ισούτε με

$$I_{OB} = \frac{T_s V_o}{2L} D(1-D)^2 \quad \text{Σχέση 3.12}$$

Στις περισσότερες εφαρμογές απαιτείται από τον μετατροπέα ανύψωσης να διατηρεί την τάση εξόδου σταθερή. Έτσι κρατώντας σταθερό το V_o , στο σχήμα (β) φαίνεται η γραφική παράσταση του I_{OB} συναρτήσει του D . Διατηρώντας το V_o σταθερό και μεταβάλλοντας το D συνεπάγεται ότι η τάση εισόδου μεταβάλλεται.

Το Σχήμα 3.4 δείχνει ότι παίρνουμε μέγιστη τιμή του I_{LB} για $D=0.5$

$$I_{LB,max} = \frac{T_s V_o}{8L} \quad \text{Σχέση 3.13}$$

Ενώ το Σχήμα 3.4 (β) δείχνει ότι για δεδομένο D με σταθερό V_o αν το μέσο ρεύμα φορτίου πέσει κάτω από το I_{OB} η αγωγή του ρεύματος θα γίνει ασυνεχής.

Στη συνέχεια από τις σχέσεις

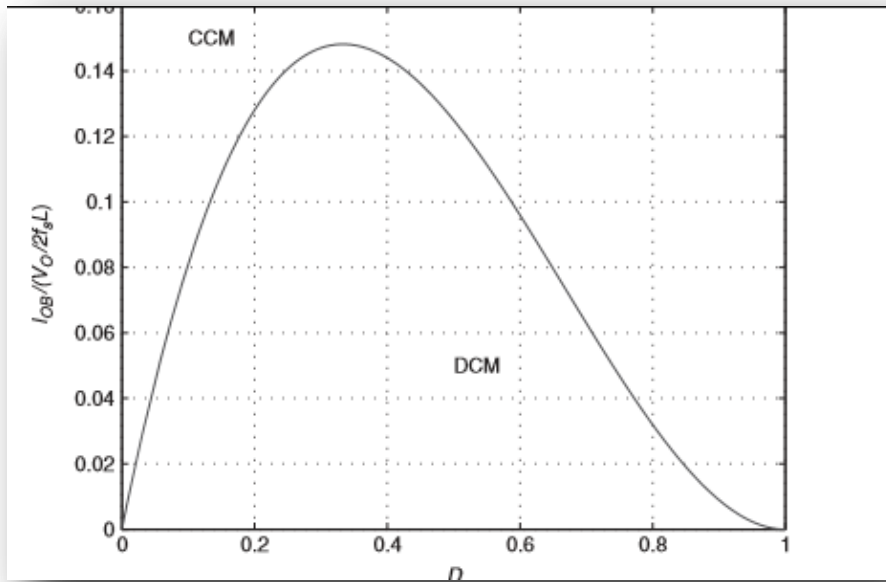
$$M_{V,DC} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{i_i}{i_o} = \frac{1}{1-D} \quad \text{και} \quad I_{LB} = \frac{i_L}{2} = \frac{V_o D(1-D)}{2f_s L}$$

προκύπτει

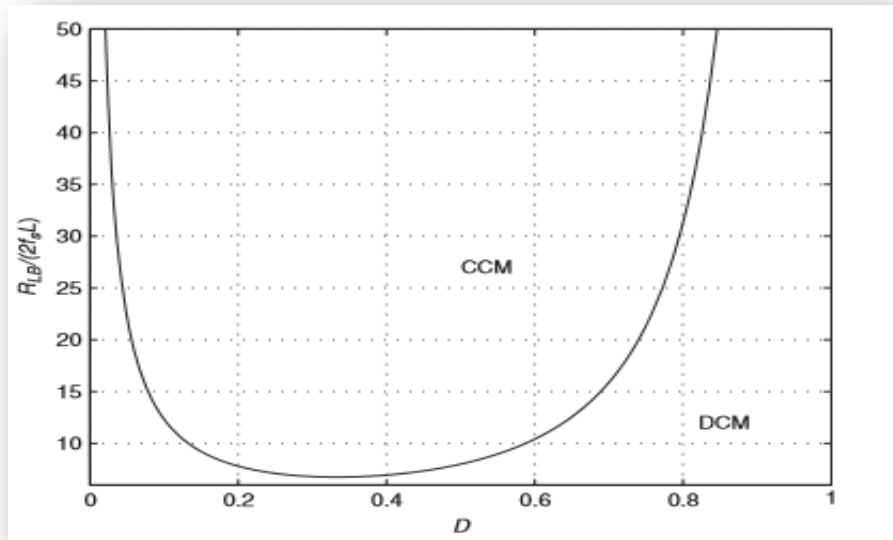
$$I_{ob} = I_{ib}(1 - D) = \frac{V_o D(1-D)^2}{2fsL} = \frac{V_o(Mvdc-1)}{2fsLMvdc^3} \text{ Σχέση 3.14}$$

Και το οριακό φορτίο

$$Rlb = \frac{V_o}{I_{ob}} = \frac{2fsL}{D(1-D)^2} = \frac{2fsLMvdc^3}{Mvdc-1} \text{ Σχέση 3.15}$$



Σχήμα 3.5: Κανονικοποιημένο ρεύμα εξόδου $I_{OB}/(V_o/2fsL)$ στο όριο CCM/DCM συναρτήσει του D



Σχήμα 3.6: Κανονικοποιημένο ωμικό φορτίο $R_{LB}/(2f_sL)$ στο όριο CCM/DCM συναρτήσει του D

Για να βρούμε το μέγιστο I_{ob} υπολογίζουμε την παράγωγο της σχέσης

$$I_{ob} = I_{ib}(1 - D) = \frac{V_o D(1 - D)^2}{2f_s L}$$

Έχουμε

$$\frac{dI_{ob}}{dD} = \frac{V_o}{2f_s L} (1 - 4D + 3D^2) = 0 \text{ Σχέση 3.16}$$

Άρα το I_{ob} έχει μέγιστο στο $D=1/3=0.33$ που αντιστοιχεί σε $M_{v,dc}=1.5$ οπότε

$$I_{OBmax} = \frac{2V_o}{27f_s L_{min}} \text{ Σχέση 3.17}$$

Και η ελάχιστη τιμή της αντίστασης του φορτίου στο όριο συνεχούς λειτουργίας είναι

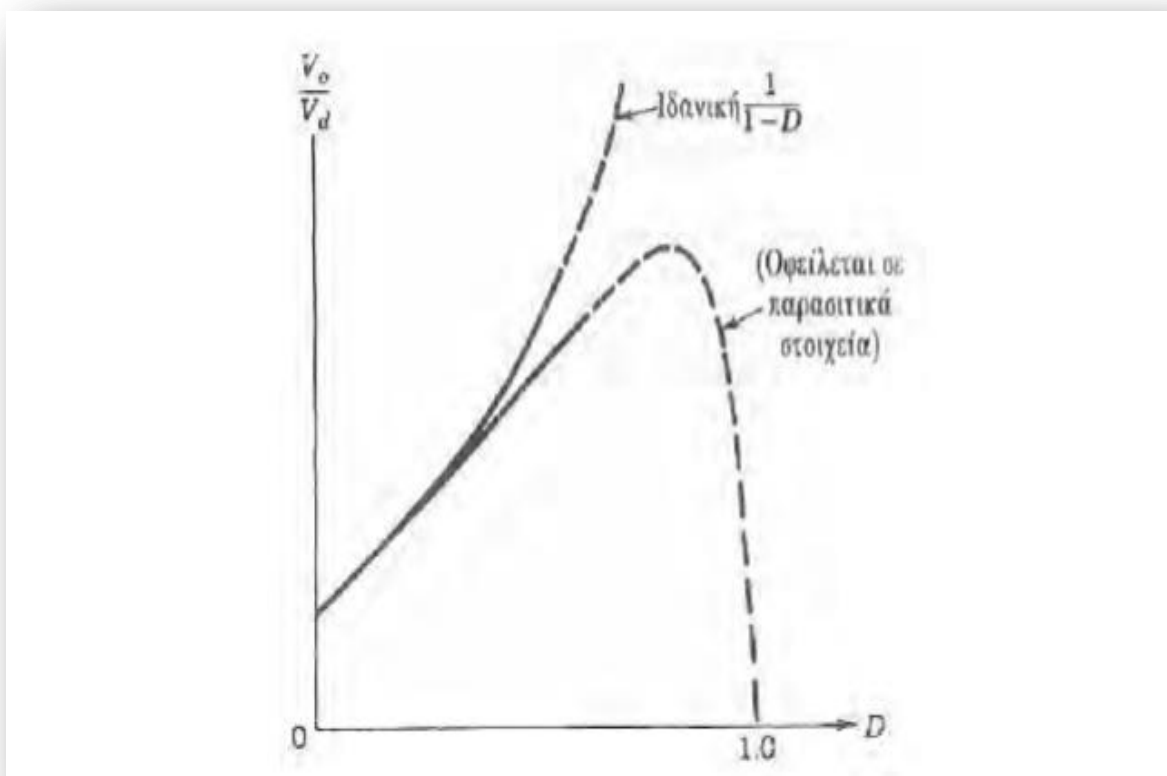
$$R_{LBmin} = \frac{V_o}{I_{OBmax}} = 13.5f_s L_{min} \text{ Σχέση 3.18}$$

Έτσι χρησιμοποιώντας την σχέση $I_{obmax} = I_{omin} = V_o/R_{Lmax}$ φτάνουμε στην τελική σχέση που μας δίνει την ελάχιστη τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου L_{min} για να παραμένουμε σε συνεχή αγωγή ανεξαρτήτως του λόγου κατάτμησης D .

$$L_{min} = \frac{2}{27} * \frac{V_o}{f_s * I_{obmax}} = \frac{2}{27} * \frac{R_{Lmax}}{f_s} \text{ Σχέση 3.19}$$

3.2.4 Επίδραση Παρασιτικών στοιχείων

Τα παρασιτικά στοιχεία σε ένα μετατροπέα dc-dc οφείλονται στις απώλειες που σχετίζονται με το πηνίο, τον πυκνωτή, το διακόπτη και την διόδο. [16] Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ποιοτικά η επίδραση των παρασιτικών αυτών στοιχείων στο λόγο μετατροπής της τάσης. Αντίθετα με την ιδανική χαρακτηριστική, στην πράξη ο λόγος $\frac{V_o}{V_d}$ μειώνεται, καθώς ο λόγος D πλησιάζει τη μονάδα. Εξαιτίας της πολύ μικρής αξιοποίησης του διακόπτη στις μεγάλες τιμές του λόγου D , οι καμπύλες αυτές σχεδιάζονται με διακεκομμένη γραμμή. Τα παρασιτικά αυτά στοιχεία αγνοήθηκαν στην απλοποιημένη ανάλυση που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν σε προγράμματα προσομοίωσης κυκλωμάτων σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, για την σχεδίαση τέτοιων μετατροπέων.



Σχήμα 3.7: Χαρακτηριστική καμπύλη V_o/V_d του μετατροπέα boost ως συνάρτηση του λόγου κατάτμησης D

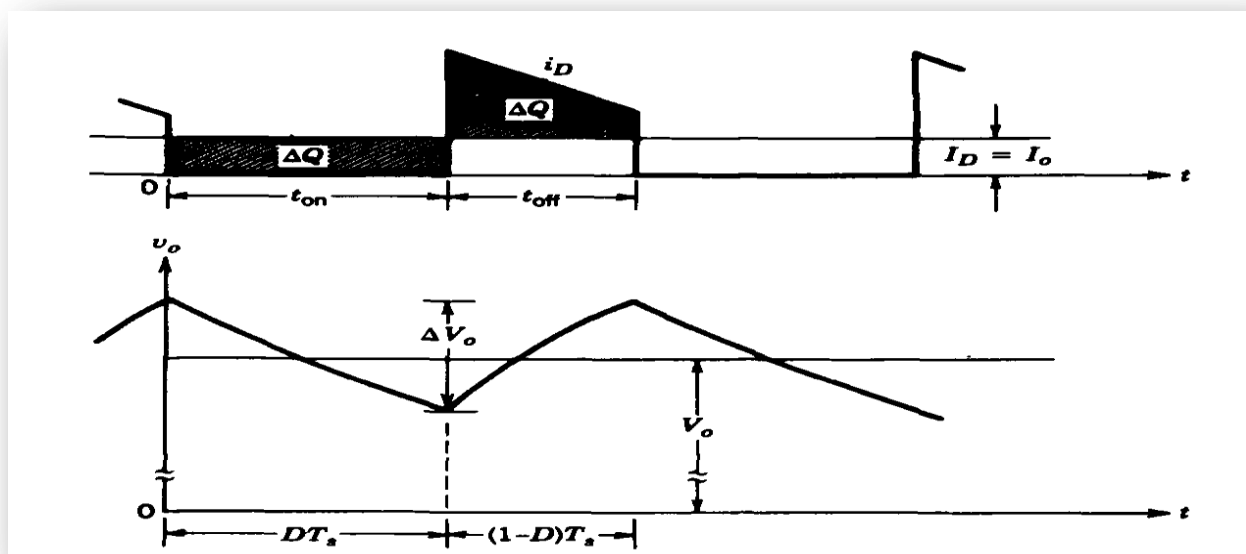
3.2.4 Κυμάτωση Της Τάσης Εξόδου

Στον υπολογισμό της κυμάτωσης της τάσης εξόδου με συνεχή αγωγή του ρεύματος, θεωρούμε ότι η μέση τιμή του ρεύματος στη δίοδο ρέει στο φορτίο, ενώ όλες τις ημιτονοειδείς συνιστώσες του i_D τις φέρει ο πυκνωτής. [17] Η μέση τιμή του ρεύματος στον πυκνωτή είναι μηδέν και η κυμάτωση της Τάσης εξόδου ορίζεται από τη σχέση

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o D T_s}{C} = \frac{V_o D T_s}{RC}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D T_s}{RC} = \frac{D T_s}{\tau} \quad \text{Σχέση 3.20}$$

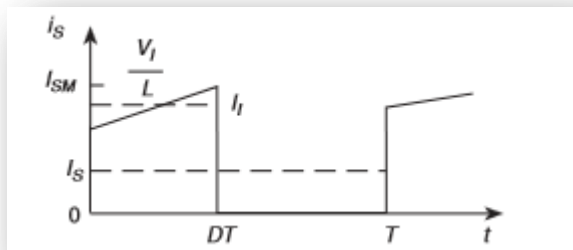
Όπου $\tau = RC$ σταθερά χρόνου



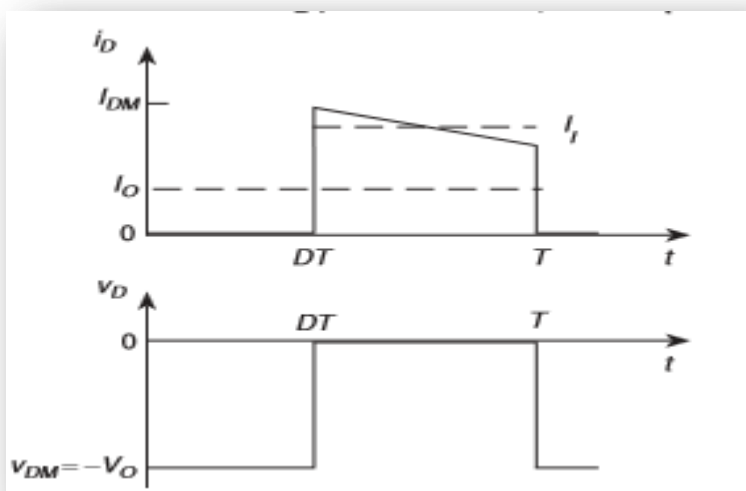
Σχήμα 3.8: κυματομορφές εξόδου μετατροπέα ανύψωσης

3.2.5 Κυματομορφές στοιχείων

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα ρεύματα του διακόπτη I_S και της διόδου I_D , όπου κατά το χρόνο $0 - t_{ON}$ το ρεύμα πηνίου διέρχεται από το διακόπτη και το ρεύμα της διόδου είναι μηδέν, ενώ κατά το χρόνο $t_{ON} - T$ το ρεύμα του πηνίου διαρρέει τη δίοδο και το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδέν:

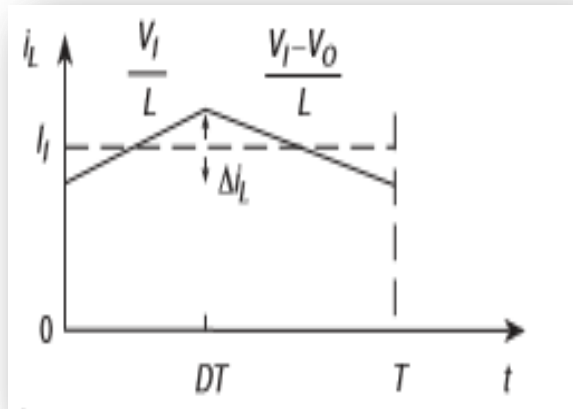


Σχήμα 3.9: Κυματομορφή ρεύματος διόκοπτη I_S



Σχήμα 3.10: Κυματομορφές ρεύματος I_D και τάσης V_D διόδου μετατροπέα ανύψωσης

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.11, τα ρεύματα του διακόπτη και της διόδου σχηματίζουν το συνολικό ρεύμα πηνίου.



Σχήμα 3.11: συνολικό ρεύμα πηνίου

Όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής η τάση του είναι μηδέν, ενώ κατά την κατάσταση αποκοπής, η τάση στα άκρα του είναι ίση με την τάση εξόδου V_0 .

Όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, η διόδος δεν άγει και η τάση στα άκρα της είναι ίση με την τάση εξόδου V_0 . Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει γιατί οι κυματομορφές αναφέρονται στην τάση ανόδου καθόδου της διόδου, η οποία έχει αντίθετη πολικότητα από την τάση εξόδου.

Τέλος, όταν ο διακόπτης δεν άγει, η διόδος γίνεται αγωγίμη και η τάση στα άκρα της είναι μηδέν.

3.2.6 Ακουστικός θόρυβος στους μετατροπείς ανύψωσης

Κατανόηση των αιτιών που προκαλούν θόρυβο [18]

Ένας dc/dc μετατροπέας ανύψωσης τάσης παράγει ακουστικό θόρυβο. Πηγή αυτού του θορύβου είναι το πηνίο. Υπεύθυνο για το μεγαλύτερο μέρος του θορύβου του πηνίου είναι ένα φαινόμενο που αναφέρεται στην διεθνή βιβλιογραφία ως *magnetostriction*. Με πολύ απλά λόγια, όταν ο πυρήνας του πηνίου μαγνητίζεται εκείνος διαστέλλεται, ενώ καθώς απομαγνητίζεται συστέλλεται επανερχόμενος στις αρχικές του διαστάσεις. Αυτή η κίνηση προκαλεί δονήσεις και επομένως ακουστικό θόρυβο. Στο πηνίο ενός dc/dc μετατροπέα ανύψωσης τάσης διεγείρεται μαγνητικά από το ρεύμα του και μια διαστολή (άνοδος ρεύματος) και συστολή (πτώση ρεύματος) λαμβάνει χώρα σε κάθε διακοπτική περίοδο. Έτσι παράγεται θόρυβος του οποίου η συχνότητα είναι ίση με εκείνη του ρεύματός του, δηλαδή ίση με τη διακοπτική συχνότητα. Το πλάτος της κυμάτωσης της ροής καθορίζει το βαθμό συστολής και διαστολής του πυρήνα και αρα την ένταση του παραγόμενου θορύβου.

Ένα μικρότερο ποσοστό του θορύβου του πηνίου παράγεται από τα τυλίγματα. Αιτία είναι οι μηχανικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των τυλιγμάτων που γειτνιάζουν καθώς αυτά διαρρέονται από ρεύμα που έχουν αποτέλεσμα να προκαλεί δονήσεις αρα και ακουστικό θόρυβο ο οποίος έχει συχνότητα ίση με τη συχνότητα του ρεύματος του πηνίου. Η ένταση του θορύβου εξαρτάται από την κυμάτωση του ρεύματος του πηνίου.

Απόλυτο κατώφλι ακοής (Absolute Threshold of Hearing, ATH)

Το απόλυτο κατώφλι της ακοής είναι η ελάχιστη ένταση ενός ήχου συγκεκριμένης συχνότητας που μπορεί να γίνει αντιληπτός από το ανθρώπινο αυτί. Οι καμπύλες του σχήματος 3.13 δείχνουν το ATH σε dB για διάφορες ηλικιακές ομάδες ως συνάρτηση της συχνότητας του ήχου. Οι καμπύλες αυτές

εκτιμήθηκαν από τον Eberhard Zwicker1 ως αποτέλεσμα πειραματικών μετρήσεων σε ανθρώπους διαφόρων ηλικιών.

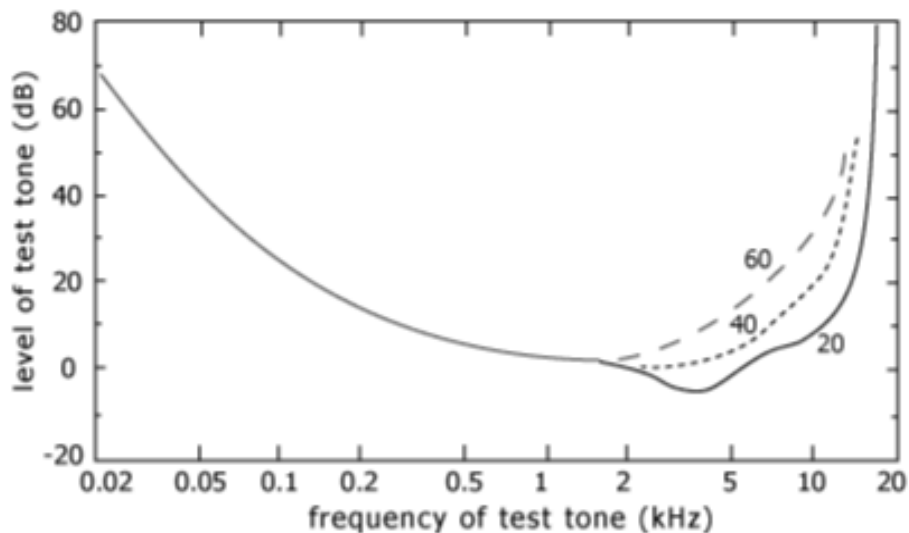


Figure2.11: Απόλυτο κατώφλι ακοής

Σχήμα 3.13: απόλυτο κατώφλι ακοής

Είναι εμφανές ότι η εκλογή της διακοπτικής συχνότητας είναι αποτέλεσμα ενός συμβιβασμού μεταξύ της ανάγκης για χαμηλές διακοπτικές απώλειες και εκείνες για παραγωγή θορύβου σε συχνότητα που δε μπορεί να γίνει αντιληπτή από τον άνθρωπο. Στο σχήμα 3.13 φαίνεται ότι προκειμένου ο παραγόμενος θόρυβος να μην είναι εύκολα ανιχνεύσιμος από το ανθρώπινο αυτί, η συχνότητά του – αρα και η διακοπτική συχνότητα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή (16kHz και πάνω). Στη εφαρμογή της παρούσας διπλωματικής επιλέξαμε για $f_s=20\text{kHz}$.

3.3 Σχεδίαση του μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα εξετάσουμε πως επιλέγουμε τις τιμές των στοιχείων του μετατροπέα ανύψωσης, δηλαδή την σχεδίαση του μετατροπέα. [15] Τα στοιχεία στα οποία θα αναφερθούμε είναι το ημιαγωγικό διακοπτικό στοιχείο (MOSFET ισχύος), το πηνίο, ο πυκνωτής εξόδου και η διάοδος.

Αρχικό δεδομένο είναι η τιμή της τάσης εισόδου $V_{in}=38V$. Αυτό προκύπτει από τον τύπο της εισόδου της ηλεκτρικής ενέργειας που στο σύστημά μας είναι μια κυψέλη καυσίμου με τάση εξόδου στα 300W, $V_{out}=38V$. Εκτενέστερη παρουσίαση της μηχανής υδρογόνου της Ballard γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Όπως δείχνει το Σχήμα 3.4 για τη μέγιστη μεταφορά ηλεκτρικής Ισχύος επιτυγχάνεται όταν ο συντελεστής χρησιμοποίησης duty cycle του μετατροπέα είναι $D=1/3$.

Έχοντας ως δεδομένο την τιμή της τάσης εισόδου του μετατροπέα $V_{in}=38V$ και από τον τύπο $\frac{V_o}{V_d} = \frac{1}{1-D}$. Προκύπτει ότι $V_o=57V$. Στρογγυλοποιώντας στην πλησιέστερη δεκάδα έχουμε $V_o=60V$, και άρα $D=0.367\%$.

Όπως ήδη αναφέρθηκε η μέγιστη ισχύς εισόδου είναι $P_{in,max}=300W$
Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας παρουσιάζει απώλειες στη μέγιστη ισχύ έχουμε
 $P_{out,max}=300*1,0=300W$.

Το αντίστοιχο ρεύμα εξόδου

$$I_{o,max}=P_o/V_o=300/60=5A \text{ ενώ η αντίστοιχη}$$

$$R_{L, \min} = \frac{V_o^2}{P_{o,max}} = \frac{60^2}{300} = 12 \Omega \text{ Εξ.3.21}$$

Απαιτώντας $I_{o, \min} = 5\%I_{o, \max}$ έχουμε

$$I_{o, \min} = 0.05 * 5 = 0,25A \text{ Εξ.3.22}$$

ενώ η αντίστοιχη

$$R_{L, \max} = \frac{V_o}{I_{o,\min}} = \frac{60}{0,25} = 240 \Omega \text{ Εξ.3.23}$$

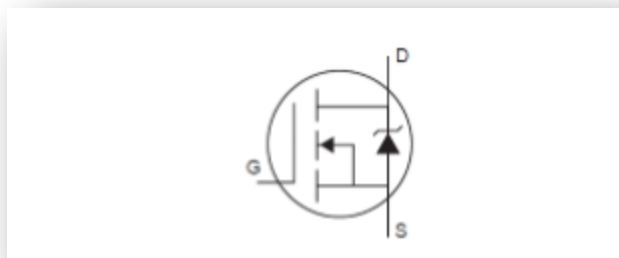
Επίσης επιλέγουμε για διακοπτική συχνότητα $f_s=20kHz$ που μας επιτρέπει να μην έχουμε πολλές απώλειες λόγω ανοιγοκλεισίματος του τρανζίστορ.

Επιθυμούμε να είμαστε σε Κατάσταση Συνεχούς Αγωγής, δηλαδή θέλουμε το ρεύμα του πηνίου να μην μηδενίζεται στο τέλος του κύκλου λειτουργίας.

3.3.1 Σχεδίαση Mosfet Ισχύος

Σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στους dc-dc μετατροπείς (στην παρούσα εργασία $f_s=20\text{kHz}$), το MOSFET αποτελεί την πιο συμφέρουσα λύση επιλογή από άποψη απόδοσης και κόστους. Τα κρίσιμα χαρακτηριστικά με βάση τα οποία γίνεται η επιλογή του Mosfet είναι

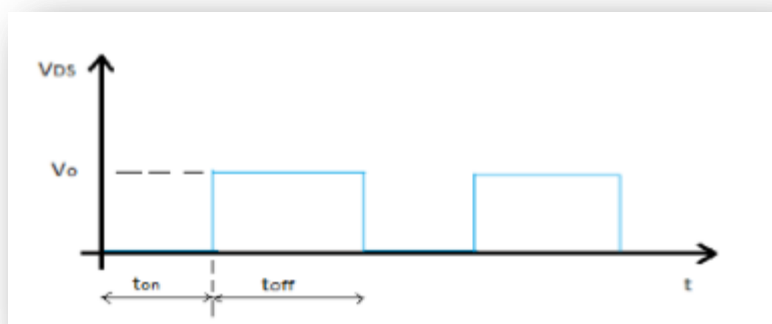
- η μέγιστη τάση την οποία πρέπει να αποκόψει (τάση διάσπασης ορθής πόλωσης) V_{dss} καθώς και η ενεργός τιμή του ρεύματος που το διαρρέει σε κατάσταση αγωγής I_{mos} .
- Οφείλει επίσης να διαθέτει τη μικρότερη δυνατή αντίσταση μεταξύ υποδοχής (Drain) και πηγής (Source) $R_{DS(on)}$, ώστε να περιορίζονται στο ελάχιστο οι απώλειες αγωγής.



Σχήμα 3.14: Mosfet Ισχύος

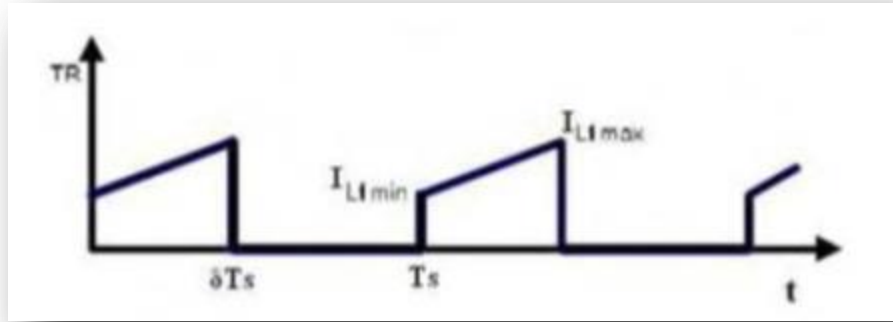
Στο Σχήμα 3.15 φαίνεται η τάση στα άκρα του διακοπτικού στοιχείου συναρτήσει του χρόνου. Η μέγιστη τάση εμφανίζεται στα άκρα του Mosfet όταν βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής και ισούται με την τάση εξόδου

$$V_{ds,peak}=60V$$



Σχήμα 3.15: Η τάση στα άκρα του διακοπτικού στοιχείου συναρτήσει του χρόνου.

Η ενεργός τιμή του ρεύματος που διαρρέει το διακοπτικό στοιχείο μπορεί να υπολογιστεί με βάση την κυματομορφή του, η οποία φαίνεται στο σχήμα 3.16



Σχήμα 3.16: Το ρεύμα που διαρρέει το διακοπτικό στοιχείο συναρτήσει του χρόνου.

Η σχέση υπολογισμού του ρεύματος είναι η εξής

$$I_{MOS} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{T_s} i_{MOS}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \cdot \int_0^{DT_s} i_{MOS}^2(t) dt}$$

Θεωρώντας ότι το ρεύμα εισόδου του μετατροπέα είναι σταθερό δηλαδή, $I_{Lf,max}=I_{Lf,min}=I_{in}$ έχουμε,

$$I_{mos} = \sqrt{\frac{1}{T_s} * \int_0^{DT_s} I_{in}^2 dt} \Rightarrow$$

$$I_{mos} = I_{in}\sqrt{D} \quad \text{Εξ.3.25}$$

Το μέγιστο ρεύμα στην είσοδο $I_{in,max}$ υπολογίζεται από την Ισχύ εισόδου $P_{in}=300W$

$$I_{in,max} = 300/60 = 5A \quad \text{Εξ.3.26}$$

Με λόγο κατάτμησης $D=0.367$ προκύπτει η μέγιστη ενεργός τιμή του ρεύματος που διαρρέει το διακοπτικό στοιχείο

$$I_{mos,max} = 5 * \sqrt{0.367} = 3.03A \quad \text{Εξ.3.27}$$

Το Mosfet που θα επιλεγεί θα πρέπει να διαθέτει τάση διάσπασης ορθής πόλωσης V_{dss} μεγαλύτερη από 60 V, με επιπρόσθετο περιθώριο για απότομες αιχμές τάσεως. Ακόμα θα πρέπει να έχει $I_{mos,max}$ τουλάχιστον 1.5 φορές μεγαλύτερο από 3.03 A, δηλαδή

$$I_{mos,max} = 4.54 A \quad \text{Εξ.3.28}$$

Το Mosfet που επιλέγεται με βάση τα πιο πάνω χαρακτηριστικά είναι το IPA086N10N3 G της εταιρείας Infineon οποίο παρουσιάζεται πιο αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3.2 Σχεδίαση Πηνίου

Η επιλογή του κατάλληλου του πηνίου είναι το βασικότερο σημείο στη σχεδίαση ενός μετατροπέα boost. Όταν επιλέγουμε το πηνίο για ένα μετατροπέα DC-DC, θα πρέπει να εξετάζονται οι εξής παράμετροι.

- Η αυτεπαγωγή L_f του πηνίου είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο της επιθυμητής κυμάτωσης του ρεύματος που το διαρρέει (ρεύμα εισόδου) και οφείλει να διατηρεί τη κυμάτωση αυτή μέσα στα επιθυμητά όρια. Ο λόγος είναι ότι η υψηλή κυμάτωση ρεύματος οδηγεί σε υψηλές αιχμές ρεύματος, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη πιθανότητα κορεσμού του πηνίου και υψηλότερες διακοπτικές απώλειες στο Mosfet.
- Η πιο κρίσιμη παράμετρος είναι το ρεύμα κορεσμού του πηνίου. Εάν το ρεύμα κορεσμού του επαγωγέα είναι μικρότερο από το απαιτούμενο ρεύμα κορυφής του μετατροπέα, τότε ο μετατροπέας δεν θα είναι σε θέση να παρέχει την απαραίτητη ισχύ εξόδου. Το πηνίο θα πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί την ενεργό τιμή του ρεύματος που το διαρρέει, δηλαδή τα τυλίγματα του απαιτείται να έχουν την κατάλληλη διατομή, και την υψηλή διακοπτική συχνότητα στην οποία θα λειτουργεί
- Πρέπει να λαμβάνεται υπ όψη η θερμοκρασία του πηνίου, η οποία πρέπει να διατηρείται στα επιτρεπτά όρια. Υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει αφ' ενός διάσπαση της μόνωσης μεταξύ των τυλιγμάτων, και αφ' ετέρου απώλεια των μαγνητικών ιδιοτήτων του πυρήνα αν η θερμοκρασία του μαγνητικού υλικού ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή (θερμοκρασία Curie). Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε κατατροφή του πηνίου
- Πρέπει να εξεταστεί η DC αντίσταση του πηνίου.
- Τέλος, το βάρος και το κόστος της κατασκευής αποτελούν παράγοντες που πρέπει να μελετηθούν.

Γιατί Λειτουργία Συνεχούς Αγωγής (CCM);

Επιλέγουμε ο μετατροπέας να δουλεύει σε Λειτουργία Συνεχούς Αγωγής (CCM), δηλαδή το ρεύμα του πηνίου δεν θα γνωρίζει διαστήματα μηδενισμού και άρα δεν θα είναι παλμικό.

- Έτσι επιτυγχάνονται μικρότερες και λιγότερο απότομες μεταβολές του ρεύματος τόσο στο πηνίο, όσο και στο διακόπτη, το οποίο συμβαίνει στη μείωση των υπερτάσεων εξαιτίας της ύπαρξης παρασιτικών επαγωγών στο κύκλωμα. Ελαχιστοποιείται δηλαδή ο κίνδυνος καταστροφής του μετατροπέα από πιθανή εκτίναξη της τάσης εξόδου σε πολύ υψηλές τιμές.
- Ακόμα, οι αρμονικές στο ρεύμα εισόδου, που ταυτίζεται με το ρεύμα του πηνίου, θα είναι πολύ λίγες.
- Τέλος η συνάρτηση μεταφοράς του μετατροπέα boost σε CCM είναι πολύ πιο απλή από αυτήν σε DCM, πράγμα που απλουστεύει τον έλεγχο του μετατροπέα.

Το άμεσο μειονέκτημα της CCM είναι ότι το πηνίο πρέπει να είναι μεγάλο σε τιμή κι άρα σε μέγεθος.

Υπολογίζουμε την ελάχιστη τιμή της αυτεπαγωγής L που μας εξασφαλίζει την λειτουργία συνεχούς αγωγής από τη σχέση

$$L_{\min} = \frac{2}{27} * \frac{V_o}{f_s * I_{o, \max}} = \frac{2}{27} * \frac{R I_{\max}}{f_s}$$

$$\text{Όπου } R_{L_{\max}} = \frac{V_o^2}{P_{o, \min}} = \frac{60^2}{15} = 240 \Omega$$

$$L_{min} = \frac{2 \cdot 240}{27 \cdot 20000} = 0,888 \text{mH} \text{ Εξ.3.29}$$

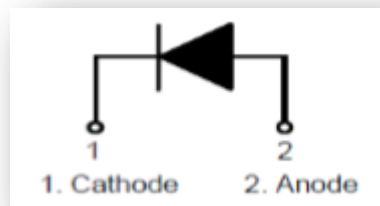
Το πηνίο που επιλέγεται με βάση τα πιο πάνω χαρακτηριστικά είναι το πηνίο SC 10-10 J² με **L=1,59mH** στα 20kHz οποίο παρουσιάζεται πιο αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3.3 Σχεδίαση Διόδου

Τα σημαντικότερα κριτήρια της επιλογής της διόδου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι η τάσης διάσπασης ανάστροφης πόλωσης V_{RRM} , η οποία είναι η μέγιστη ανάστροφη τάση που μπορεί να αποκόψει η διόδος χωρίς να οδηγηθεί σε ανάστροφη αγωγή, η μέση τιμή του ρεύματος αγωγής που την διαρρέει σε κατάσταση αγωγής και η πτώση τάσης κατά την αγωγή της.

Πιο αναλυτικά οι τέσσερις παράγοντες που καθορίζουν την σχεδίαση της διόδου

- Πρώτον, η ανάστροφη τάση διάσπασης της διόδου V_{RRM} πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη τάση στην έξοδο του μετατροπέα, εξαιτίας των αιχμών τάσης και των μεταβατικών φαινομένων που είναι δυνατό να συμβούν, ενώ το ρεύμα της διόδου $I_{D(AV)}$ οφείλει να είναι τουλάχιστον 2 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα για λειτουργία σε μέγιστη ισχύ
- Δεύτερον, η διόδος πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί με το προς τα εμπρός ρεύμα που θα ρέει μέσω της διόδου από το πηνίο. Σε έναν μετατροπέα DC-DC, αυτό το ρεύμα (I_{PK}) μπορεί να είναι αρκετές εκατοντάδες mA.
- Τρίτον, για να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια ισχύος όταν η διόδος άγει, η τάση προς τα εμπρός θα πρέπει να είναι όσο μικρό όσο είναι δυνατόν. Ορισμένες εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιήσουν ακόμη και διόδους Schottky, επειδή έχουν μια πολύ χαμηλότερη τάση προς τα εμπρός.
- Τέλος, η επιλέγοντας μιας διόδου με ένα σύντομο χρόνο ανάστροφης-ανάκτησης (reverse-recovery time) θα περιορίσει την επιβάρυνση απώλειων λόγω φορτίου εξόδου που επιστρέφει στην είσοδο, όταν η διόδος μεταβαίνει από τη κατάσταση αγωγής σε κατάσταση μη-αγωγής.



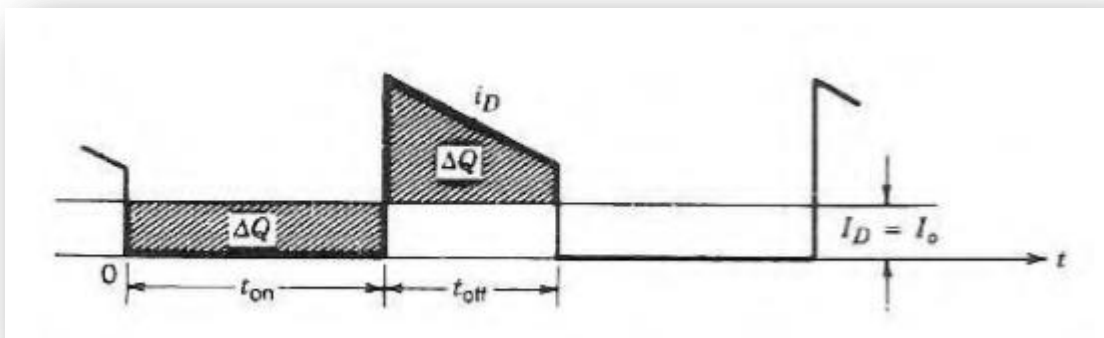
Σχήμα 3.17: μοντέλο διόδου

Η διόδος έρχεται σε κατάσταση αγωγής όταν το Mosfet παύει να άγει, κι έτσι παρέχει μονοπάτι για το ρεύμα του πηνίου. Η τάση στα άκρα της διόδου συναρτηθεί του χρόνου είναι μια κυματομορφή

αντίθετη και συμπληρωματική της κυματομορφής της τάσης στα άκρα του Mosfet η οποία δόθηκε σε προηγούμενο σχήμα. Άρα η μέγιστη ανάστροφη τάση ισούται με την τάση εξόδου, δηλαδή

$$V_{dr,peak} = 60V$$

Η μέση τιμή του ρεύματος που διαρρέει την διόδο, το οποίο στην ουσία είναι το ρεύμα εξόδου ή ρεύμα φορτίου μετατροπέα μπορεί να υπολογιστεί με βάση την κυματομορφή του η οποία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και είναι η εξής



Σχήμα 3.18: ρεύμα που διαρρέει την διόδο

$$I_{D(AV)} = \frac{1}{T_s} * \int_0^{T_s} i_D(t) dt \Rightarrow$$

$$I_{D(AV)} = I_o \quad \text{Εξ.3.30}$$

Μέγιστο ρεύμα εξόδου έχουμε όταν έχουμε μέγιστο ρεύμα εισόδου δηλαδή $I_{in,max} = 5 \text{ A}$. Άρα το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει την διόδο $I_{D(AV),max}$ ισούται με

$$I_{D(AV),max} = I_{in,max} (1-D) = 5 * (1-0.367) = 3.167 \text{ A}$$

Οπότε η διόδος που θα επιλέξουμε για την κατασκευή πρέπει να έχει ως χαρακτηριστικό

$$I_{D(AV),max} > 2 * 3.167 = 6.33 \text{ A} \quad \text{Εξ.3.31}$$

Τέλος η πτώση τάσης V_{FM} πάνω στη διόδο κατά την αγωγή της αποτελεί την κύρια αιτία των απωλειών της διόδου, διότι, όπως προκύπτει από το σχήμα οι απώλειες αγωγής της διόδου δίνονται από την σχέση:

$$P_F = I_{D,rms}^2 * R_{on} + I_{D(AV)} * V_{FM} \quad \text{Εξ.3.32}$$

Όπου το R_{on} είναι πολύ μικρό ($\sim m\Omega$). Άρα η πτώση τάσης V_{FM} (τυπική τιμή 1V), κυρίως καθορίζει τις απώλειες αγωγής γι' αυτό θέλουμε να έχει τη μικρότερη δυνατή τιμή. Οι διακοπτικές απώλειες, που λαμβάνουν χώρα κατά την μετάβαση από την αγωγή στην αποκοπή και αντίστροφα, είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις απώλειες αγωγής και συνήθως παραλείπονται.

Η διόδος που επιλέγεται με βάση τα πιο πάνω χαρακτηριστικά είναι η DPG30C200PB της εταιρείας IXYS η οποία παρουσιάζεται πιο αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3.4 Σχεδίαση πυκνωτή εξόδου

Ο πυκνωτής στην έξοδο του μετατροπέα λειτουργεί ως φίλτρο αποκοπής των αρμονικών της τάσης. Η επιλογή του γίνεται με βάση την χωρητικότητα και τη μέγιστη τάση που αντέχει στα άκρα του. Η τιμή του πυκνωτή εξόδου μπορεί να υπολογιστεί από την κυμάτωση της τάσης εξόδου.

Η κυμάτωση από κορυφή σε κορυφή της τάσης εξόδου μπορεί να υπολογιστεί από θεωρώντας τις κυματομορφές που δίνονται στο Σχήμα 3.19 για τη λειτουργία συνεχούς αγωγής του ρεύματος. Υποθέτοντας ότι όλες οι συνιστώσες του ρεύματος της διόδου i_D ρέουν δια μέσου του πυκνωτή, και ότι η μέση τιμή του ρέει δια μέσου του ωμικού φορτίου, το γραμμοσκιασμένο μέρος του σχήματος αναπαριστά ένα φορτίο ΔQ .

Επομένως η από κορυφή σε κορυφή κυμάτωση της τάσης είναι:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o * D * T_s}{C} \Rightarrow$$

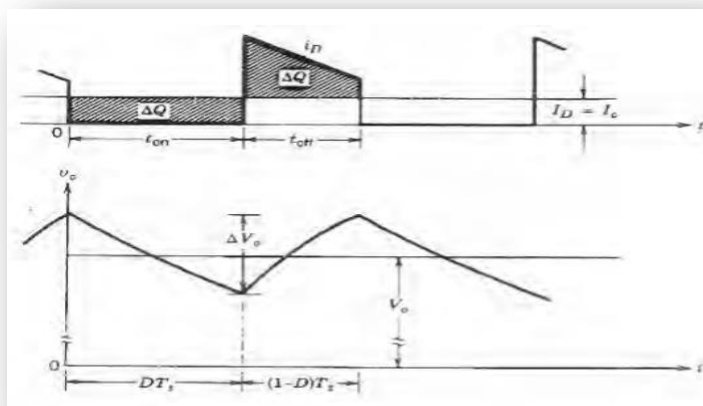
$$\Delta V_o = \frac{V_o * D * T_s}{R * C}$$

Για λειτουργία του μετατροπέα υπό μέγιστη ισχύ έχουμε $R_{L,min}=12\Omega$

Και υποθέτοντας ότι η κυμάτωση της τάσης ισούται με 1% της τάσης εξόδου,

Δηλ. $V_o=0,01*60=0,6V$, είναι αποδεκτή η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή εξόδου σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση

$$C_{min} = \frac{60*0,367*0,00005}{12*0,6} = 153\mu F \quad \text{Εξ.3.33}$$



Σχήμα 3.19: Κυμάτωση της τάσης εξόδου του μετατροπέα.

Ο πυκνωτής εξόδου που επιλέγεται με βάση τα πιο πάνω χαρακτηριστικά είναι ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής της εταιρίας Nichicon με χωρητικότητα $C=470\mu\text{F}$ ο οποίος παρουσιάζεται πιο αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο. Σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση υπολογίζεται η θεωρητική τιμή της κυμάτωση.

$$\Delta V_o = \frac{V_o * D * T_s}{R * C} = 0,19V \text{ Εξ.3.34}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένας πυκνωτής στην πραγματικότητα δεν είναι μια καθαρή χωρητικότητα C . Σε σειρά με την χωρητικότητα υπάρχει μια παρασιτική αντίσταση (ESR) και μια παρασιτική αυτεπαγωγή (ESL). Η μια παρασιτική αντίσταση είναι αυτή που δημιουργεί κυρίως προβλήματα γιατί επηρεάζει πιο πολύ την κυμάτωση της τάσης του πυκνωτή. Για τον λόγο αυτό προτιμάται η χρήση πολλών πυκνωτών παράλληλα συνδεδεμένων προκειμένου να πάρουμε την επιθυμητή χωρητικότητα, ελαχιστοποιώντας έτσι την συνολική (ESR).

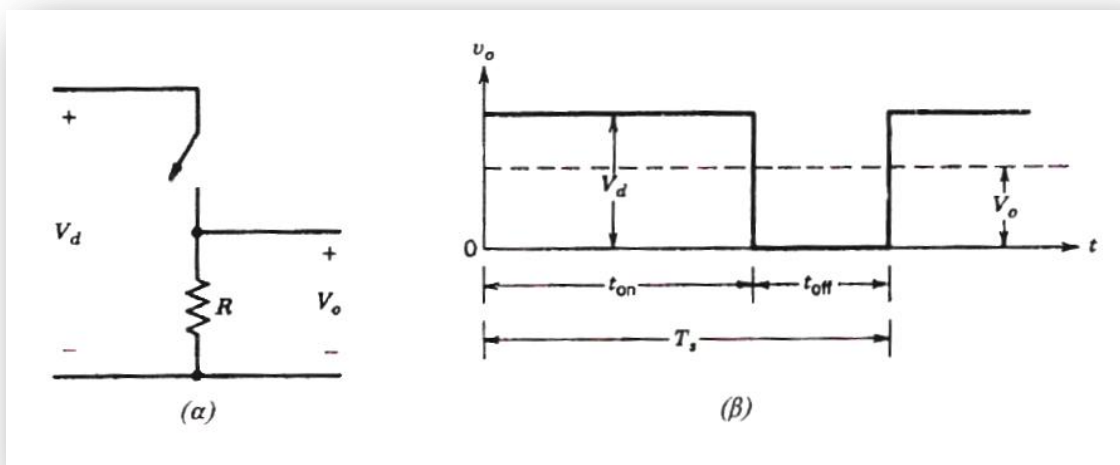
3.4 Τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM) για τον μετατροπέα ανύψωσης Τάσης dc-dc.

Στους μετατροπείς DC-DC η μέση τάση εξόδου πρέπει να ελέγχεται, ώστε να είναι σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι η τάση εισόδου και το φορτίο μπορούν να αυξομειώνονται. Οι μετατροπείς DC-DC διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούν έναν ή περισσότερους διακόπτες για το μετασχηματισμό της DC τάσης από ένα επίπεδο σε ένα άλλο.

Σ' ένα DC-DC μετατροπέα με δεδομένη τάση εισόδου, η μέση τάση εξόδου ρυθμίζεται ελέγχοντας τους χρόνους έναυσης και σβέσης (t_{on} και t_{off}) των διακοπών.

Ένας DC-DC μετατροπέας είναι αυτός του Σχήματος 3.20α. Η μέση τιμή V_o της τάσης εξόδου U_o , στο Σχήμα 3.20β, εξαρτάται από τους χρόνους t_{on} και t_{off} . Μια από τις μεθόδους ελέγχου της μέσης τάσης εξόδου χρησιμοποιεί σταθερή συχνότητα μετάβασης (και συνεπώς σταθερή περίοδο μετάβασης $T_s=t_{on}+t_{off}$) και ρύθμιση της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Σ' αυτήν τη μέθοδο, που ονομάζεται μετάβαση με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse-Width Modulation, PWM), μεταβάλλεται ο λόγος κατάτμησης (duty ratio) $D=t_{on}/T_s$, που ορίζεται ως ο λόγος της διάρκειας κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός προς την περίοδο μετάβασης.

Η άλλη μέθοδος ελέγχου είναι γενικότερη. Σύμφωνα με αυτήν μεταβάλλονται, τόσο η συχνότητα μετάβασης (και η περίοδος), όσο και η διάρκεια κατά την οποία ο διακόπτης είναι κλειστός. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε μετατροπείς DC-DC που χρησιμοποιούν thyristors με εξαναγκασμένη μετάβαση. Οι μεταβολές της συχνότητας μετάβασης καθιστούν δύσκολο το φιλτράρισμα της κυμάτωσης των κυματομορφών της εισόδου και της εξόδου.



Σχήμα 3.20: Διακοπτικοί DC-DC μετατροπείς

Συνοψίζοντας η μεταβολή του λόγου κατάτμησης (duty cycle D) επιτυγχάνεται με δυο τρόπους:

1. Με σταθερή συχνότητα (δηλαδή, $f=1/T$ =σταθερο) και μεταβάλλοντας το χρόνο αγωγής ton (P.W.M.).
2. Έχοντας το ton ή το toff σταθερό και μεταβάλλοντας την περίοδο T του παλμού (frequency modulation).

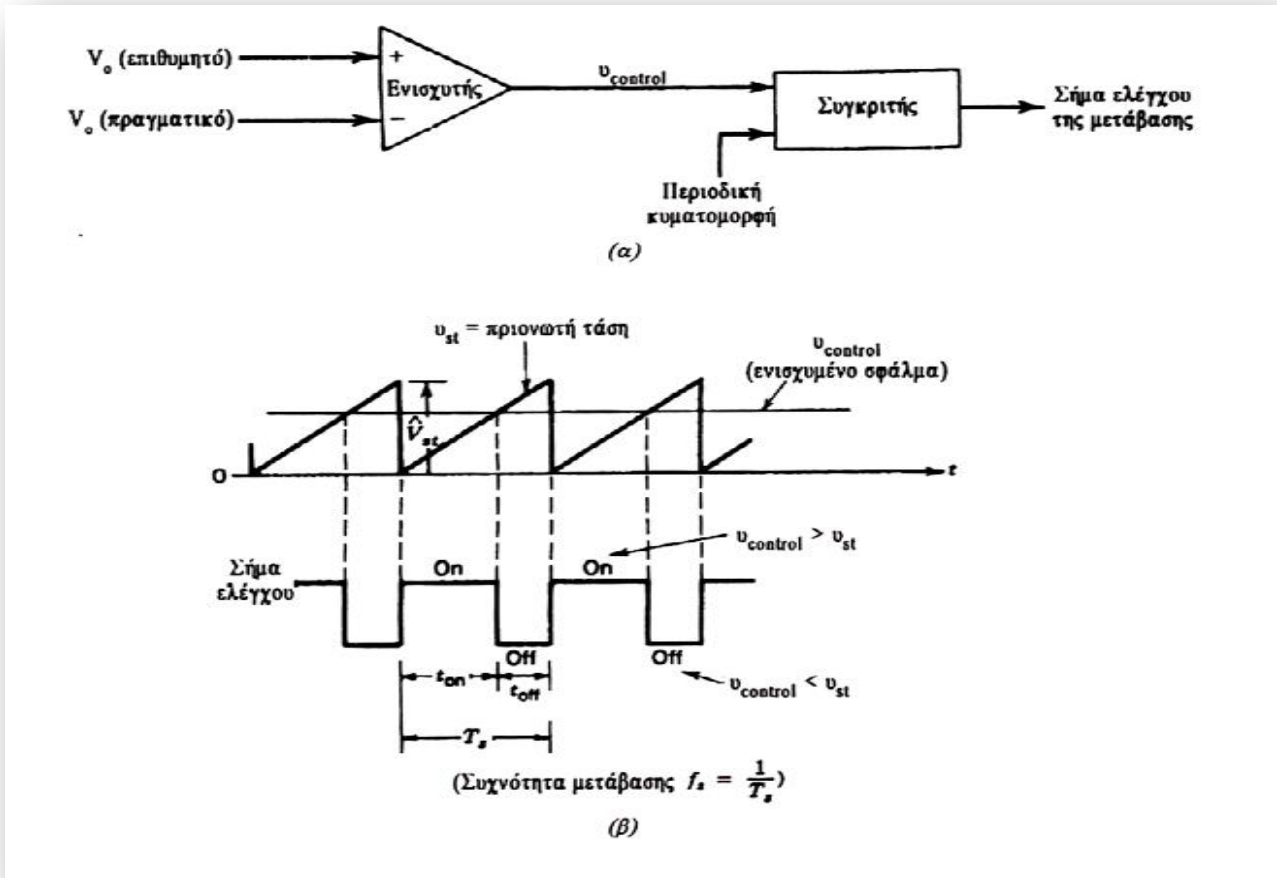
Η δεύτερη μέθοδος παρουσιάζει το εξής μειονεκτήματα:

- Για τη μεταβολή της τάσης, η συχνότητα πρέπει να μεταβάλλεται σε αρκετά μεγάλη κλίμακα, γεγονός που δυσκολεύει την σχεδίαση των απαιτούμενων φίλτρων. Επίσης στις υψηλές συχνότητες, παρουσιάζεται έντονη ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση.

Στη διαμόρφωση με PWM με σταθερή συχνότητα μετάβασης, το σήμα ελέγχου του διακόπτη, το οποίο ελέγχει την κατάσταση του (κλειστός ή ανοιχτός), παράγεται με τη σύγκριση του επιπέδου τάσης του σήματος ελέγχου $V_{control}$ με μια περιοδική κυματομορφή σταθερού πλάτους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21. Γενικά, το σήμα της τάσης ελέγχου λαμβάνεται ενισχύοντας το σφάλμα ή τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής τάσης εξόδου και της επιθυμητής της τιμής. Η συχνότητα της περιοδικής κυματομορφής (συνήθως είναι πριονωτή), καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης.

Στον έλεγχο με PWM η συχνότητα αυτή διατηρείται σταθερή και επιλέγεται σε μια περιοχή από μερικά kHz μέχρι μερικές εκατοντάδες kHz. Όταν το ενισχυμένο σήμα σφάλματος, που μεταβάλλεται πολύ αργά με τον χρόνο σε σχέση με τη συχνότητα μετάβασης, είναι μεγαλύτερο από την πριονωτή κυματομορφή, το σήμα ελέγχου του διακόπτη γίνεται high, προκαλώντας το κλείσιμο του διακόπτη. Διαφορετικά, ο διακόπτης είναι ανοιχτός. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.21, ο λόγος κατάτμησης μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της $V_{control}$ και του πλάτους της πριονωτής κυματομορφής V_{st} , ως ακολούθως:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{V_{control}}{V_{st}} \quad \text{Σχέση 3.35}$$



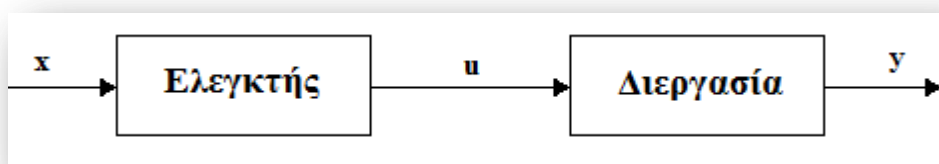
Σχήμα 3.21: Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού α) λειτουργικό διάγραμμα β) σήματα συγκριτή.

3.5 Αναλογικός-ολοκληρωτικός έλεγχος

3.5.1 Εισαγωγή

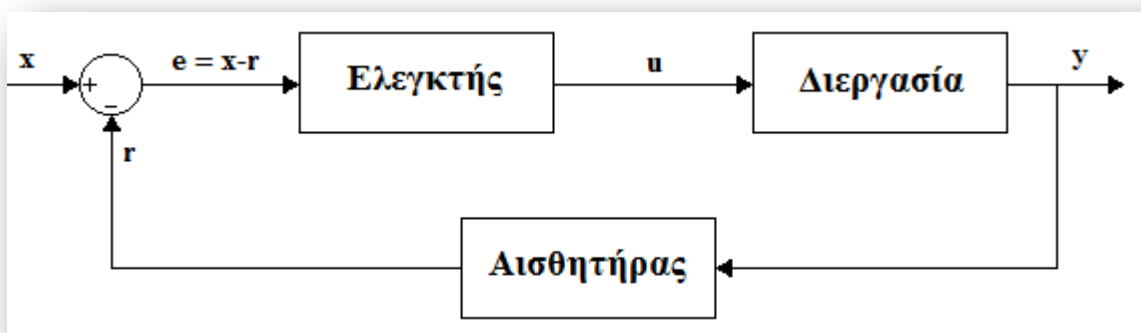
Σε όλα τα σύγχρονα συστήματα είναι απαραίτητη η παρουσία ενός ελεγκτή, στόχος του οποίου είναι η εξασφάλιση της επιθυμητής απόκρισης. Τα συστήματα ελέγχου μπορεί να είναι είτε ανοιχτού είτε κλειστού βρόχου.[19]

Σε ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου ο ελεγκτής ελέγχει το σήμα στην είσοδο της διεργασίας, την μεταβλητή ελέγχου, βασισμένος σε ένα σήμα διέγερσης στην είσοδό του. Η δομή ενός συστήματος ανοιχτού βρόχου φαίνεται στο Σχήμα 3.22, όπου μπορούμε να διακρίνουμε το σήμα διέγερσης στην είσοδο του ελεγκτή x , την μεταβλητή ελέγχου u και το σήμα y στην έξοδο της διεργασίας, δηλαδή την απόκρισή του συστήματος.



Σχήμα 3.22: Δομή συστήματος ανοιχτού βρόχου

Αντίθετα ένα σύστημα κλειστού βρόχου λειτουργεί με ανάδραση, δηλαδή με την αξιοποίηση ενός σήματος που προκύπτει από μέτρηση της εξόδου της διεργασίας. Στην περίπτωση αυτή ο ελεγκτής ελέγχει την μεταβλητή ελέγχου στην είσοδο της διεργασίας βασισμένος σε ένα σήμα σφάλματος που προκύπτει από την διαφορά ενός σήματος αναφοράς και του σήματος ανάδρασης. Η δομή ενός συστήματος κλειστού βρόχου φαίνεται στο Σχήμα 3.23, όπου διακρίνουμε επιπλέον το σήμα αναφοράς x , το σήμα ανάδρασης r και το σήμα σφάλματος e που προκύπτει από την διαφορά τους.

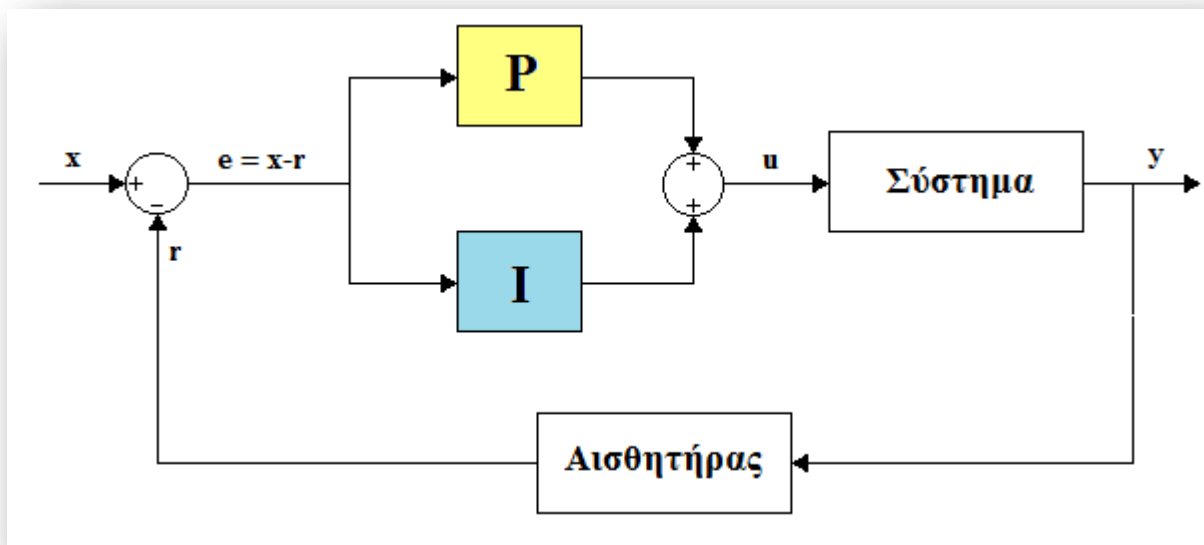


Σχήμα 3.23: Δομή συστήματος κλειστού βρόχου

Η υλοποίηση του ελεγκτή μπορεί να γίνει από διάφορους αλγόριθμους, ο καθένας με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του. Ένας από τους πιο διαδεδομένους ελεγκτές είναι ο αναλογικός-ολοκληρωτικός (**Proportional-Integral, PI**) ελεγκτής που χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό τις τελευταίες δεκαετίες σε βιομηχανικές διεργασίες. Με τον PI ελεγκτή μπορούμε να πετύχουμε την αυτόματη ρύθμιση της διεργασίας μας μέσω της παρακάτω διαδικασίας:

1. Μέτρηση της απόκρισης του συστήματος y , από την οποία προκύπτει το σήμα ανάδρασης r
2. Αφαίρεση του σήματος ανάδρασης r από το σήμα αναφοράς x . Από την διαφορά τους προκύπτει το σήμα σφάλματος e
3. Ρύθμιση της μεταβλητής ελέγχου u στη έξοδο του ελεγκτή, αξιοποιώντας το σήμα σφάλματος e .

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, απώτερος στόχος του PI ελεγκτή είναι η απόκριση του συστήματος να γίνεται και να παραμένει ίση με το επιθυμητό σήμα αναφοράς. Στο σχήμα 3.24 φαίνεται η δομή ενός συστήματος κλειστού βρόχου με χρήση PI ελεγκτή. Η υλοποίησή του ελεγκτή γίνεται με την βοήθεια δύο όρων, του αναλογικού **P** και του ολοκληρωτικού **I**, οι οποίοι επιδρούν επί του σφάλματος προκειμένου να ρυθμίσουν την μεταβλητή ελέγχου στην είσοδο του συστήματος. Η μεταβλητή ελέγχου u επιδρά στο σύστημα με τέτοιο τρόπο, ώστε η έξοδος του y να ακολουθεί κάθε φορά την τιμή του σήματος αναφοράς x που επιβάλουμε στην είσοδο και να διατηρείται σε αυτή όταν κάποια εξωτερική διαταραχή τείνει να την αλλάξει, οδηγώντας τελικά σε μηδενισμό του σφάλματος.



Σχήμα 3.24: Υλοποίηση PI ελεγκτή

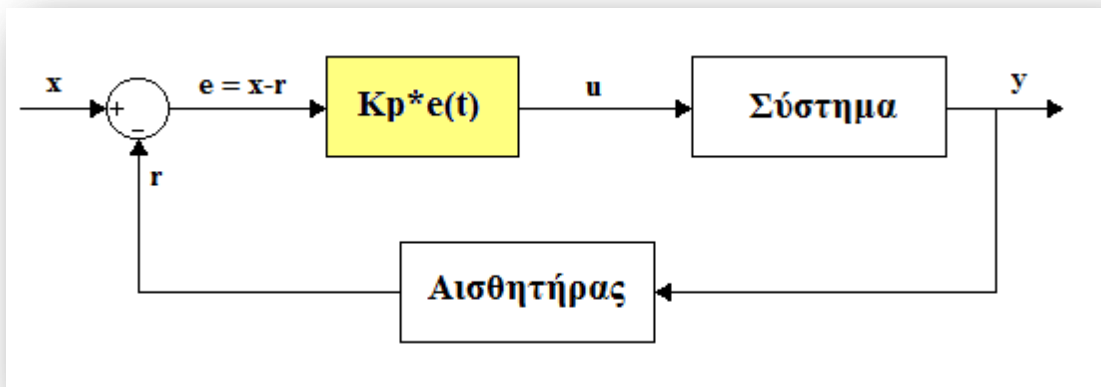
Στις επόμενες παραγράφους γίνεται η περιγραφή της λειτουργίας των όρων του PI ελεγκτή καθώς και ορισμένων χαρακτηριστικών του.

3.5.2 Αναλογικός Έλεγχος

Ο αναλογικός όρος του ΠΙ ελεγκτή παράγει μία τιμή στην έξοδό του, που είναι αναλογική ως προς την παρούσα τιμή του σφάλματος. Η αντίδρασή του είναι άμμεση και συνεισφέρει κατά τον μεγαλύτερο βαθμό στην μεταβολή της μεταβλητής ελέγχου, επηρεάζει συνεπώς σημαντικά την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος ελέγχου. Η ρύθμισή του γίνεται με την βοήθεια μιας σταθεράς, του αναλογικού κέρδους K_p , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:[20]

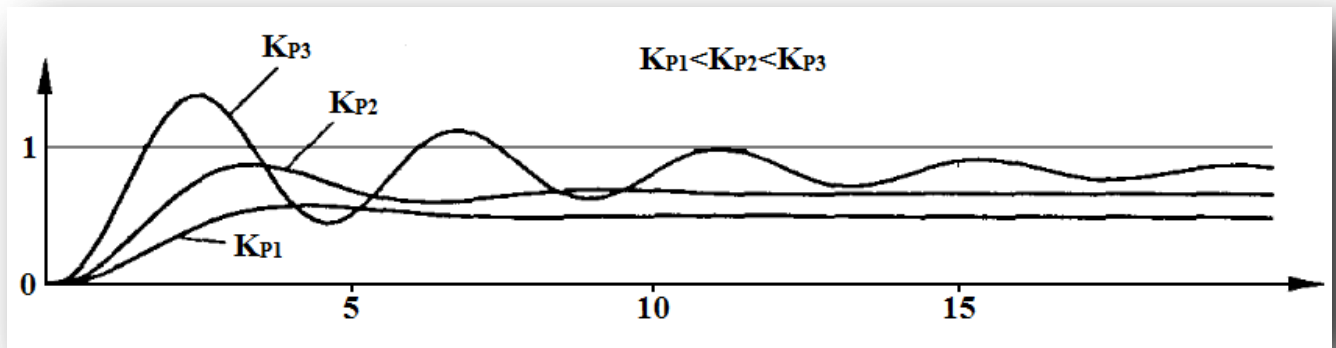
$$P = u(t) = K_p * e(t) = K_p * (x(t) - r(t))$$

Η υλοποίηση ενός αναλογικού ελεγκτή, δηλαδή ενός συστήματος ελέγχου που υφίσταται την δράση μόνο του αναλογικού όρου, φαίνεται στο Σχήμα 3.25



Σχήμα 3.25: Υλοποίηση αναλογικού ελεγκτή

Μια μεγάλη τιμή του αναλογικού κέρδους οδηγεί σε μεγάλη μεταβολή της μεταβλητή ελέγχου, για δεδομένη μεταβολή στο σφάλμα, προσδίδοντας στην απόκριση του συστήματος ταλαντωτική συμπεριφορά. Σε περίπτωση που το κέρδος είναι πολύ μεγάλο, το σύστημά μπορεί να γίνει ασταθές. Αντίθετα για μικρές τιμές του κέρδους, η μεταβλητή ελέγχου μεταβάλλεται με μικρό ρυθμό, ακόμα και για μεγάλες τιμές σφάλματος, κάνοντας την απόκριση του συστήματος πιο αργή. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί, όπου παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα της απόκρισης ενός συστήματος που ελέγχεται από έναν αναλογικό ελεγκτή σε μια μοναδιαία βηματική μεταβολή του σήματος αναφοράς. Στο παράδειγμα αυτό καταγράφονται τρεις διαφορετικές αποκρίσεις του συστήματος για τρία διαφορετικά αναλογικά κέρδη (K_{P1}, K_{P2}, K_{P3}).



Σχήμα 3.26: Απόκριση συστήματος με αναλογικό ελεγκτή σε μοναδιαία βηματική διέγερση

Παρατηρούμε την αύξηση στην ταχύτητα απόκρισης που συμβαίνει με την αύξηση του κέρδους, καθώς και την ταλαντωτική συμπεριφορά, με υπερέγερση πάνω από την μονάδα, για κέρδος K_{P3} .

Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που μπορούμε να βγάλουμε, με την βοήθεια του σχήματος, είναι ότι η τελική τιμή της εξόδου του συστήματος παρουσιάζει απόκλιση από την επιθυμητή τιμή του σήματος αναφοράς, συνεπώς και το τελικό σφάλμα στην είσοδο του ελεγκτή είναι μη μηδενικό. Η δημιουργία σφάλματος μόνιμης κατάστασης αποτελεί το βασικό μειονέκτημα του αναλογικού ελεγκτή, ο οποίος δεν μπορεί να οδηγήσει σε μηδενισμό του σφάλματος, καθώς όπως είναι λογικό αυτό θα μηδένιζε και την μεταβλητή ελέγχου. Παρατηρούμε ωστόσο ότι η αύξηση του αναλογικού κέρδους οδηγεί σε μείωση του σφάλματος μόνιμης κατάστασης

3.5.4 Ολοκληρωτικός έλεγχος

Ο ολοκληρωτικός όρος του ΠΙ ελεγκτή παράγει μία τιμή στην έξοδό του, που είναι αναλογική ως προς όλες τις προηγούμενες τιμές του σφάλματος. Η βασική του λειτουργία είναι η εξασφάλιση της ισότητας μεταξύ της εξόδου της διεργασίας και της τιμής του σήματος αναφοράς στην μόνιμη κατάσταση, δηλαδή η μεταβολή της μεταβλητής ελέγχου κατά τέτοιον τρόπο ώστε το σφάλμα μόνιμης κατάστασης, που δημιουργείται από τον αναλογικό όρο, να οδηγείται σε μηδενισμό. Με τον ολοκληρωτικό έλεγχο, ένα θετικό σφάλμα θα οδηγεί συνεχώς στην αύξηση της μεταβλητής ελέγχου, ενώ ένα αρνητικό σφάλμα θα οδηγεί συνεχώς στην μείωση της μεταβλητής ελέγχου, έως τον τελικό μηδενισμό του.[21]

Η ρύθμισή του ολοκληρωτικού όρου γίνεται με την βοήθεια επίσης μιας σταθεράς, του ολοκληρωτικού κέρδους K_i , η οποία σχετίζεται αναλογικά με το ολοκλήρωμα του σήματος σφάλματος σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

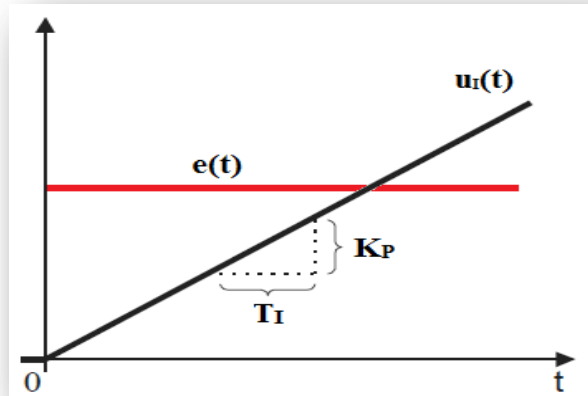
$$I = K_i \int_0^T e(t) dt \quad \text{Εξ.3.36}$$

Μια ολοκληρωμένη μαθηματική διατύπωση του ΠΙ ελεγκτή είναι η παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 u(t) &= K_p * e(t) + K_i * \int_0^T e(t) dt \\
 &= K_p * [e(t) + \frac{1}{T_i} * \int_0^T e(t) dt] \text{ Εξ.3.37}
 \end{aligned}$$

όπου το T_i ονομάζεται σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης και ισχύει $K_i = K_p/T_i$

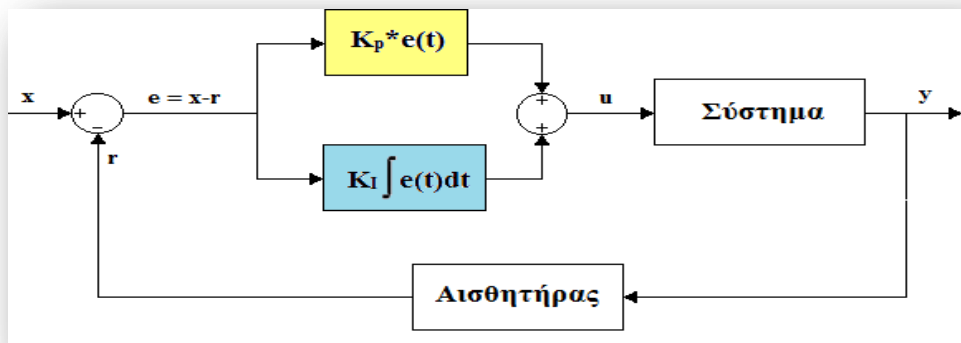
Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε την συμπεριφορά του ολοκληρωτικού όρου σε μια βηματική αλλαγή του σήματος αναφοράς, η οποία δημιουργεί και το αντίστοιχο σφάλμα.



Σχήμα 3.26: Λειτουργία ολοκληρωτικού όρου υπό την παρουσία σφάλματος

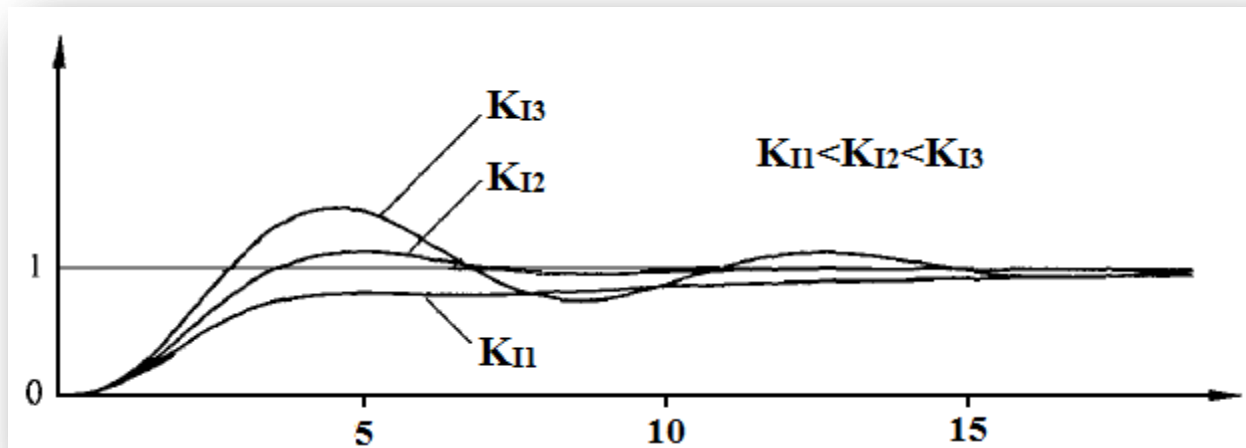
Μπορούμε να διακρίνουμε την αντίδραση του ολοκληρωτικού όρου, η οποία οδηγεί σε μια βαθμιαία μεταβολή της μεταβλητής ελέγχου, καθώς και την εξάρτηση της μεταβολής αυτής από την τιμή της σταθεράς χρόνου ολοκλήρωσης. Όσο μικραίνει η σταθερά T_i , άρα μεγαλώνει το ολοκληρωτικό κέρδος K_i , τόσο πιο έντονα τείνει να μεταβληθεί η μεταβλητή ελέγχου και αντίστροφα.

Η υλοποίηση του PI ελεγκτή, με τις μαθηματικές εκφράσεις των όρων του, φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 3.27:



Σχήμα 3.27: Υλοποίηση PI ελεγκτή

Στο Σχήμα 3.28 παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα απόκρισης ενός συστήματος, ελεγχόμενο από PI ελεγκτή, σε μια μοναδιαία βηματική μεταβολή του σήματος αναφοράς. Στο σχήμα καταγράφεται η απόκριση για τρία διαφορετικά κέρδη του ολοκληρωτικού όρου, θεωρώντας το κέρδος του αναλογικού όρου σταθερό.



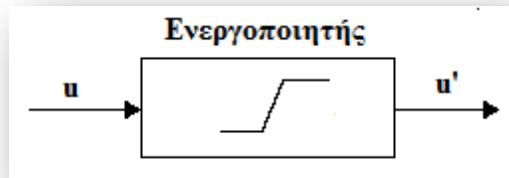
Σχήμα 3.28: Απόκριση συστήματος με PI ελεγκτή σε μοναδιαία βηματική διέγερση

Παρατηρώντας το Σχήμα 3.28 διαπιστώνουμε την βασική λειτουργία του ολοκληρωτικού όρου, δηλαδή τον μηδενισμό του σφάλματος, καθώς η απόκριση του συστήματος τείνει στην μονάδα για τις διάφορες τιμές του ολοκληρωτικού κέρδους. Επιπλέον, συγκρίνοντας με το Σχήμα 3.26, παρατηρούμε μια συνολική μείωση στην ταχύτητα απόκρισης, σαν συνέπεια της βαθμιαίας μεταβολής της μεταβλητής ελέγχου που εισάγει ο ολοκληρωτικός όρος. Η αύξηση της τιμής του ολοκληρωτικού κέρδους αυξάνει και την ταχύτητά απόκρισης, προσδίδει ωστόσο στην έξοδο του συστήματος μια πιο ταλαντωτική συμπεριφορά.

3.5.4 Φαινόμενο Integrator windup

Μια από τις βασικές αιτίες που οδηγούν σε υποβάθμιση της απόδοσης του PI ελεγκτή είναι το φαινόμενο που σχετίζεται με τον ολοκληρωτικό όρο του και αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως integrator windup phenomenon. Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, ο ολοκληρωτικός όρος δρά επί του αθροιστικού σφάλματος στην διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, επηρεάζοντας την μεταβλητή ελέγχου με τέτοιον τρόπο, ώστε τελικά να οδηγεί στον μηδενισμό του. Όταν συμβεί μια μεγάλη μεταβολή στο σήμα αναφοράς ή μια μεγάλη εξωτερική διαταραχή, ο ολοκληρωτικός όρος αθροίζει ένα σημαντικό σφάλμα, το οποίο προκαλεί μια μεγάλη μεταβολή στην μεταβλητή ελέγχου.

Σε πολλά συστήματα υπάρχουν φυσικοί περιορισμοί, για παράδειγμα η ταχύτητα ενός κινητήρα δεν μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή ή μια βαλβίδα μπορεί να είναι απο τελείως ανοικτή έως τελείως κλειστή. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο έλεγχος μπορεί να δίνει οποιαδήποτε μεγάλη τιμή στην μεταβλητή ελέγχου που επιδρά στα αντίστοιχα μεγέθη τέτοιων συστημάτων, στην πράξη όμως αυτή περιορίζεται σε ένα εύρος που καθορίζεται απο τα όρια του εκάστοτε συστήματος. Αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί με τον ενεργοποιητή του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.29, όπου ενώ στην είσοδό του δέχεται οποιαδήποτε τιμή u του στείλει ο ελεγκτής, στην έξοδό του περνούν αυτούσιες οι εντός ορίων του συστήματος τιμές u' . Οι εκτός ορίων τιμές εξισώνονται με τις οριακές, δηλαδή όταν $u > u_{max}$ τότε $u' = u_{max}$ ενώ όταν $u < u_{min}$ τότε $u' = u_{min}$.



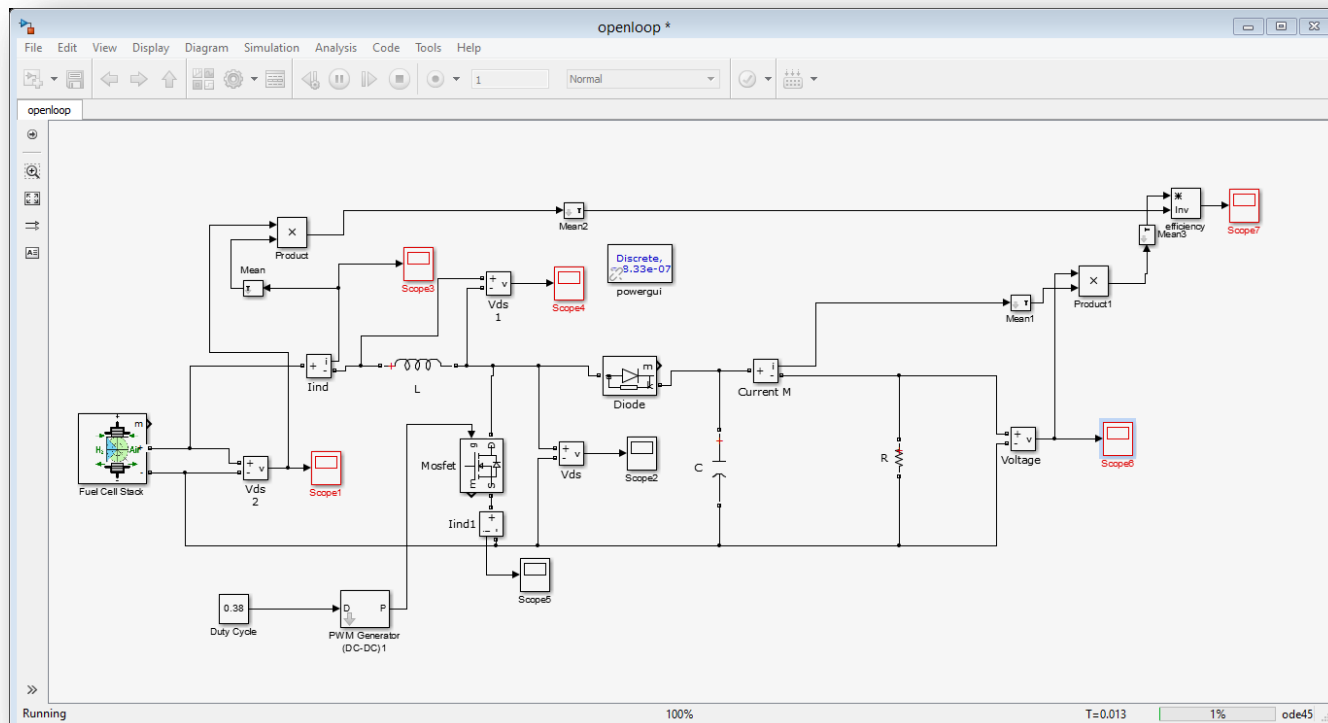
Σχήμα 3.29: μοντέλο του ενεργοποιητή

Οι οριακές τιμές της μεταβλητής ελέγχου αναφέρονται ως τιμές κορεσμού αυτής. Όταν η μεταβλητή ελέγχου φτάσει την τιμή κορεσμού της, παραμένει σε αυτή χωρίς να μπορεί να επηρεάσει την έξοδο του συστήματος, συνεπώς ο έλεγχος παρακάμπτεται και το σύστημα λειτουργεί σαν σύστημα ανοιχτού βρόχου, με αποτέλεσμα τον μη μηδενισμό του σφάλματος. Ο ολοκλητωρικός όρος του ελεγκτή συνεχίζει να αθροίζει το σφάλμα που παραμένει, οδηγώντας την έξοδό του σε μεγάλες τιμές (wind up). Για να επιστρέψει σε φυσιολογικά επίπεδα, οπότε μπορεί να αρχίσει και πάλι να λειτουργεί ο έλεγχος, απαιτείται αρκετό χρονικό διάστημα όπου το σφάλμα θα έχει αντίθετο πρόσημο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Έλεγχος ανοικτού και κλειστού βρόχου μετατροπέα ανύψωσης τάσης

4.1 Έλεγχος ανοικτού βρόχου

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε το μοντέλο του μετατροπέα με εφαρμογή ελέγχου ανοικτού βρόχου. Η αρχή λειτουργίας του ελέγχου ανοικτού βρόχου είναι πολύ απλή. Ουσιαστικά έχοντας παράξει τον παλμό που ανοιγοκλείνει το διακοπτικό στοιχείο του μετατροπέα μέσω της ρουτίνας PWM, μεταβάλλουμε την είσοδο της ρουτίνας που οδηγεί σε μεταβολή του λόγου κατάτμησης D (duty cycle) και κατ'επέκταση σε μεταβολή της τάσης εξόδου V_{out} .



Σχήμα 4.1: το μοντέλο του μετατροπέα στον έλεγχο τάσης ανοικτού βρόχου

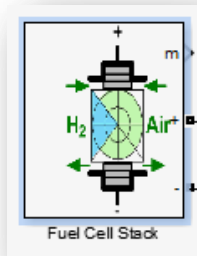
4.1.1 Μοντελοποίηση πειραματικής διάταξης

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε το σχεδιασμό και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της πειραματικής διάταξης συνεχούς ρεύματος εφαρμόζοντας έλεγχο τάσης ανοικτού βρόχου. Σημειώνεται ότι η συχνότητα λειτουργίας του τρανζίστορ είναι $f=20\text{kHz}$ και πως η προσομοίωση γίνεται σε διακριτό χρόνο με περίοδο δειγματοληψίας $T_s=8.33\text{e-}07\text{s}$

Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί η το μοντέλο αποτελείται από μια κυψέλη καυσίμου, τον μετατροπέα και το φορτίο (μεταβλητό).

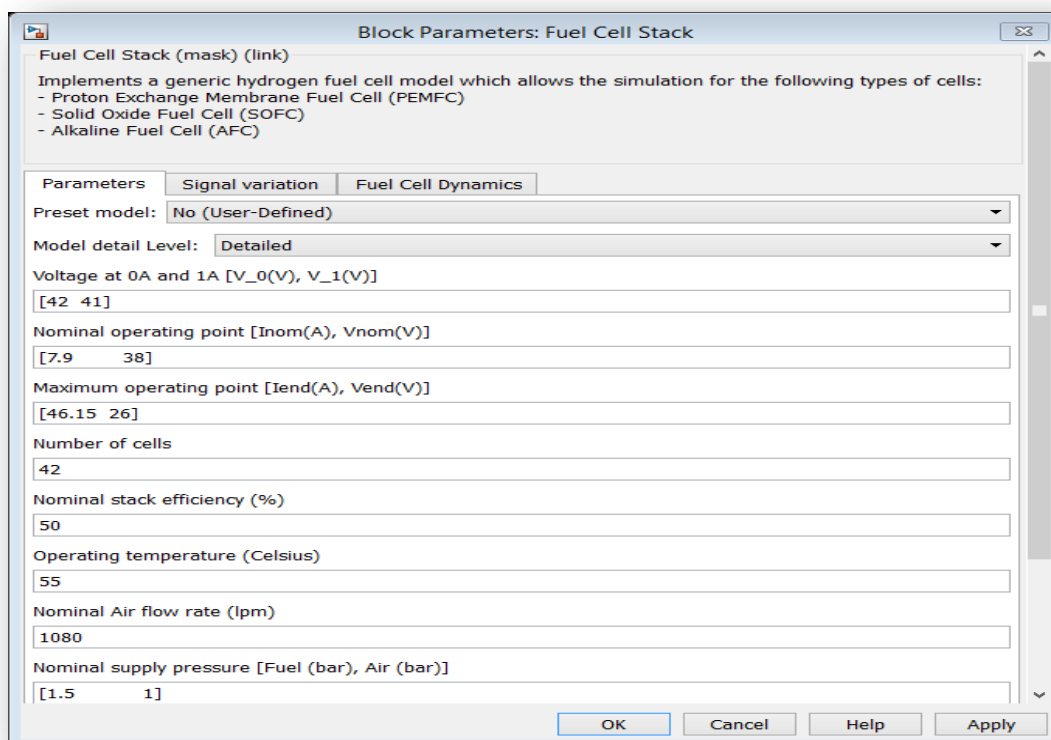
Ως πηγή εισόδου του συστήματος χρησιμοποιούμε ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου.

Από την βιβλιοθήκη Simscap του Simulink πήραμε το έτοιμο μοντέλο μιας κυψέλης καυσίμου και το παραμετροποιήσαμε κατάλληλα ώστε να συμφωνεί με τις παραμέτρους της κυψέλης που έχουμε στο εργαστήριο.



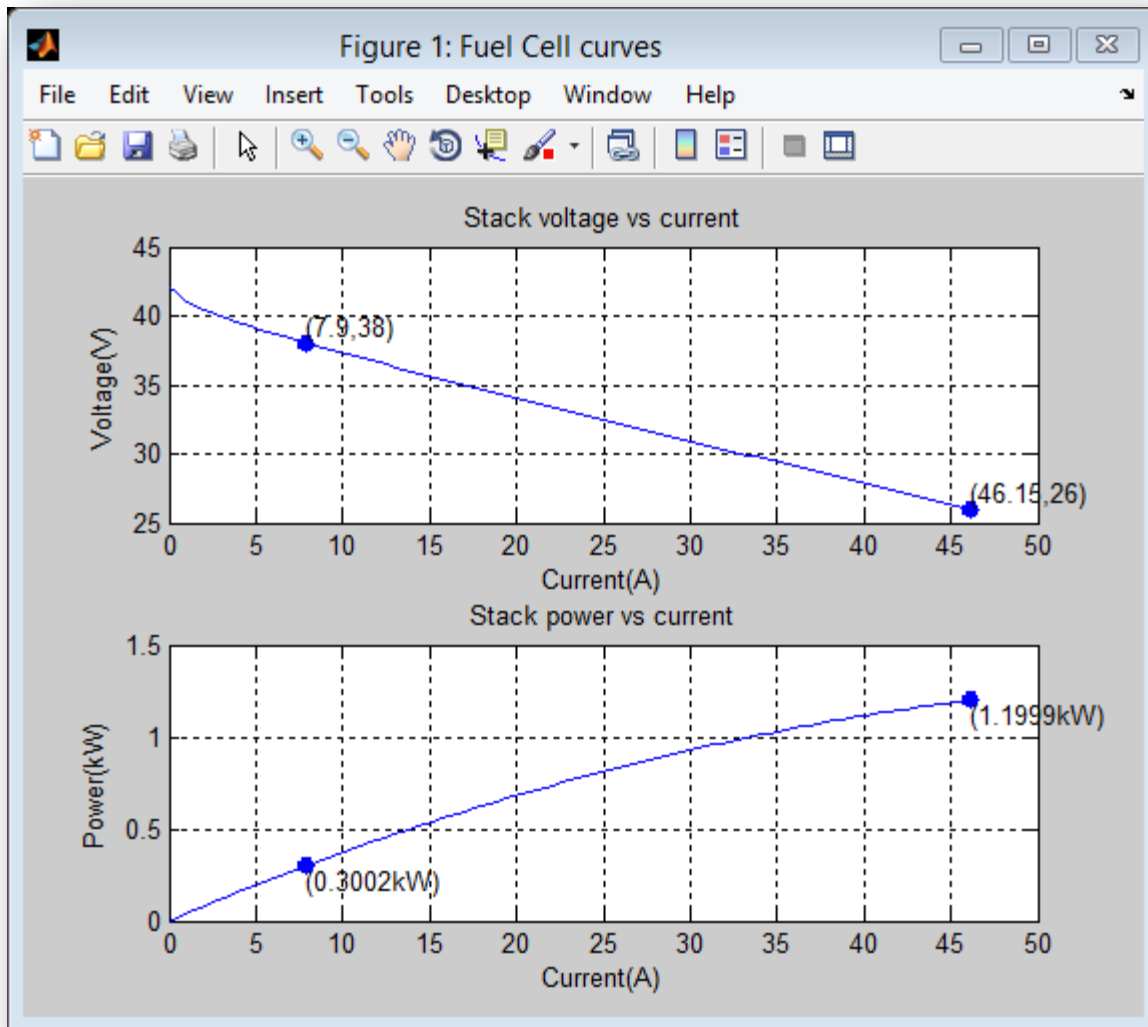
Σχήμα 4.2: Το μοντέλο της κυψέλης καυσίμου

Στην συνέχεια περάσαμε τις παραμέτρους στο μοντέλο μας.



Σχήμα 4.3: παραμετρικοποίηση κυψέλης καυσίμου

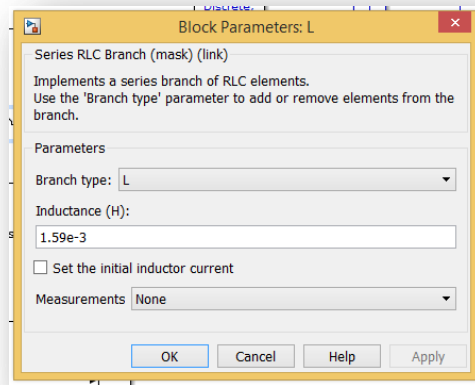
Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες της κυψέλης καυσίμου για ονομαστική λειτουργία στα 300W.



Σχήμα 4.4: χαρακτηριστικές καμπύλες κυψέλης καυσίμου

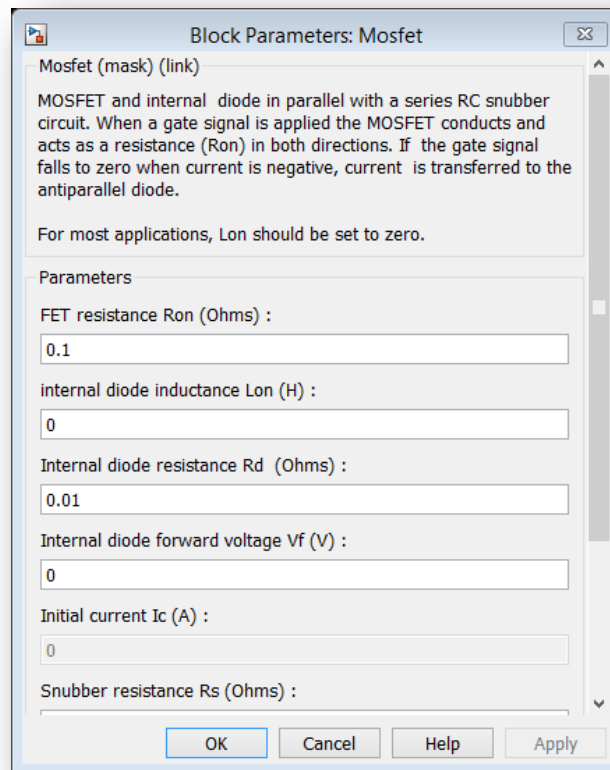
Ο μετατροπέας αποτελείται από το πηνίο, το τρανζίστορ Mosfet, την διόδο και τον πυκνωτή. Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων αυτών φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν

Πηνίο



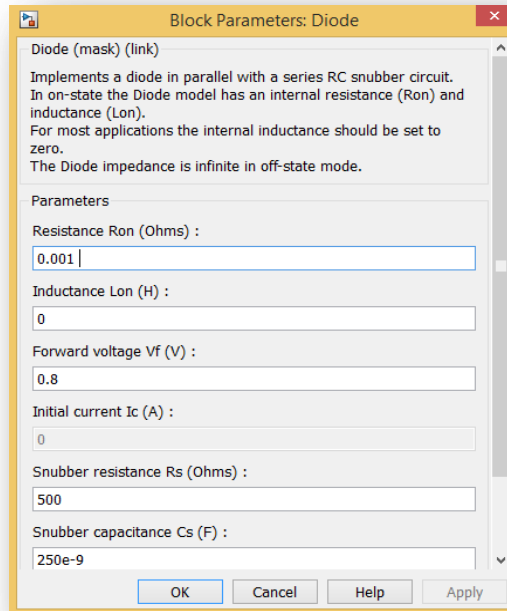
Σχήμα 4.5: παραμετρικοποίηση πηνίου μεταροπέα

Mosfet



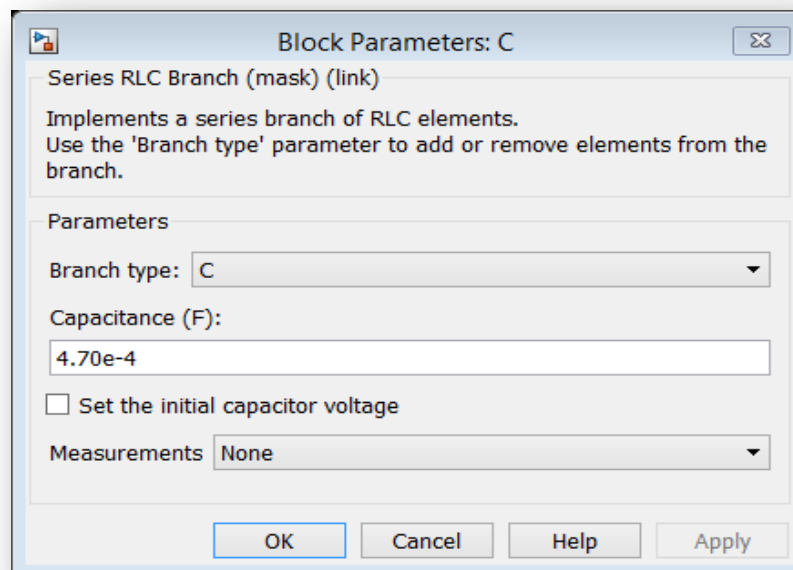
Σχήμα 4.6: παραμετρικοποίηση Mosfet μεταροπέα

Δίοδος



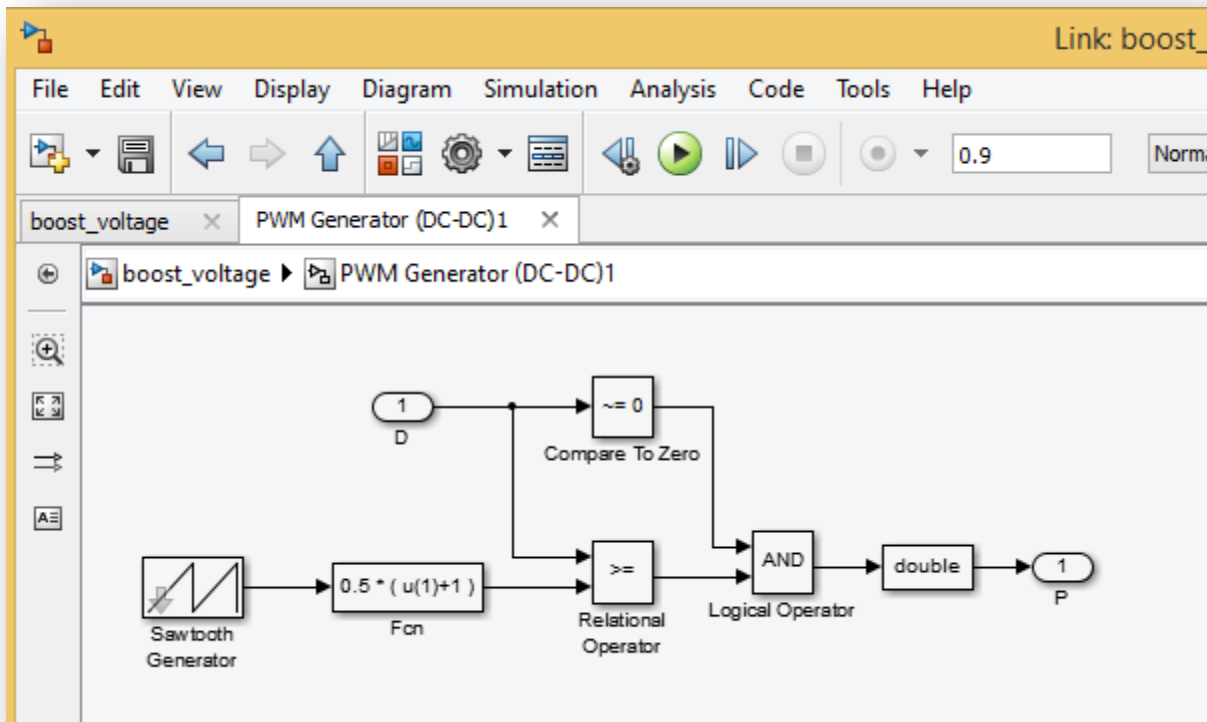
Σχήμα 4.7: παραμετρικοποίηση διόδου μεταροπέα

Πυκνωτής



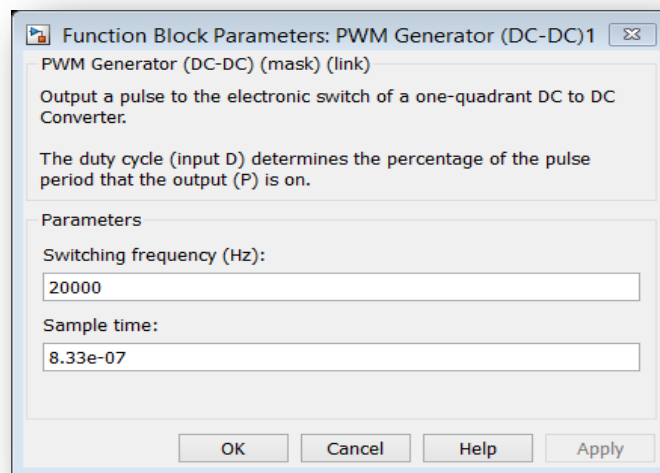
Σχήμα 4.8: παραμετρικοποίηση πυκνίου μεταροπέα

Όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα ο Έλεγχος Τάσης γίνεται συγκρίνοντας το σήμα της τάσης εξόδου με ένα σήμα τάσης αναφοράς, το ρεύμα σφάλματος ελέγχεται από έναν ρι ελεγκτή και η το σήμα αυτό ελέγχει το λόγο κατάτμησης (duty cycle) ως είσοδος της ρουτίνας pwm η οποία φαίνεται αναλυτικότερα πιο κάτω.



Σχήμα 4.9: η ρουτίνα PWM

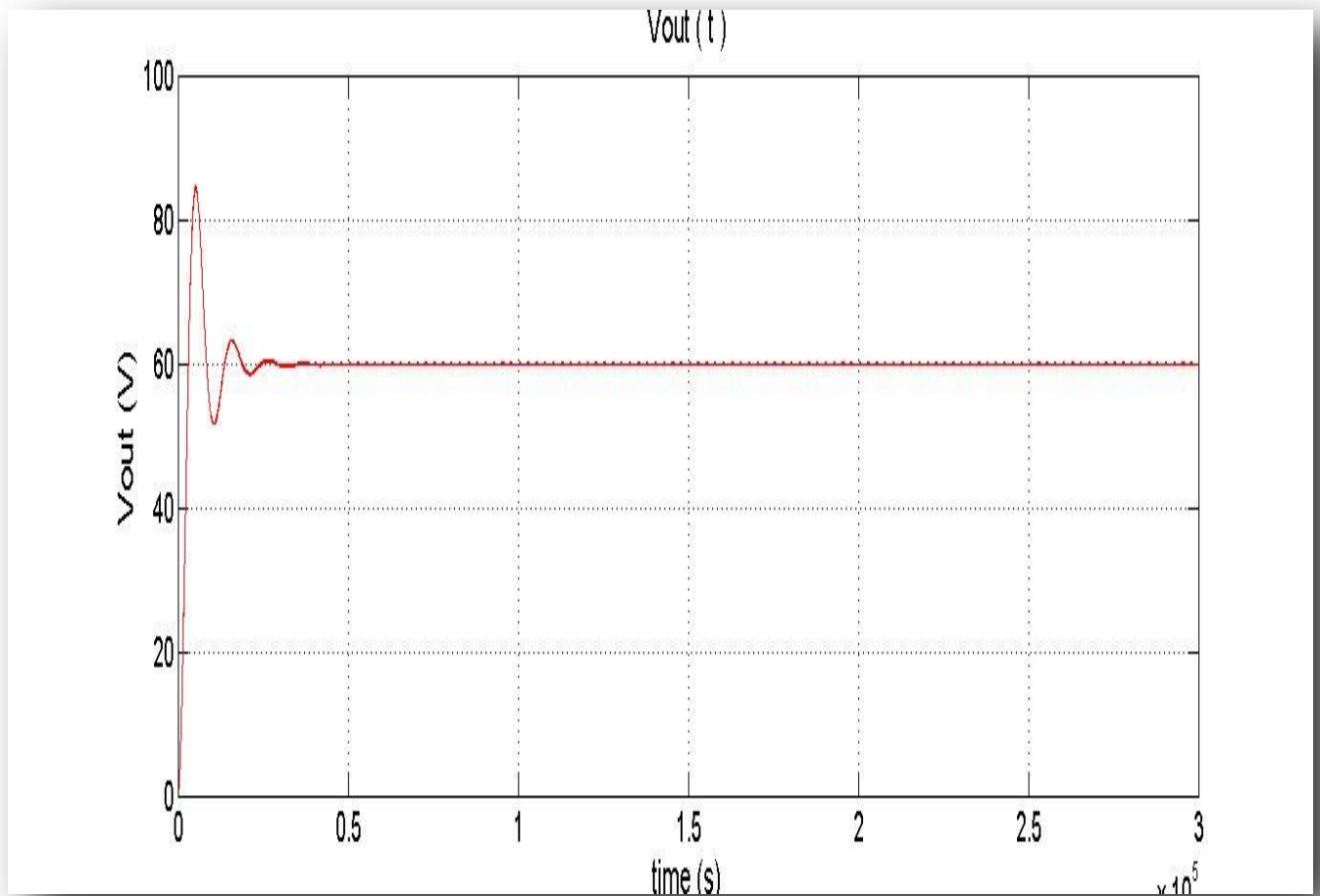
Παράμετροι PWM



Σχήμα 4.10: παραμετροποίηση της ρουτίνας PWM

4.1.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης εξόδου για τιμή $D=0.38$

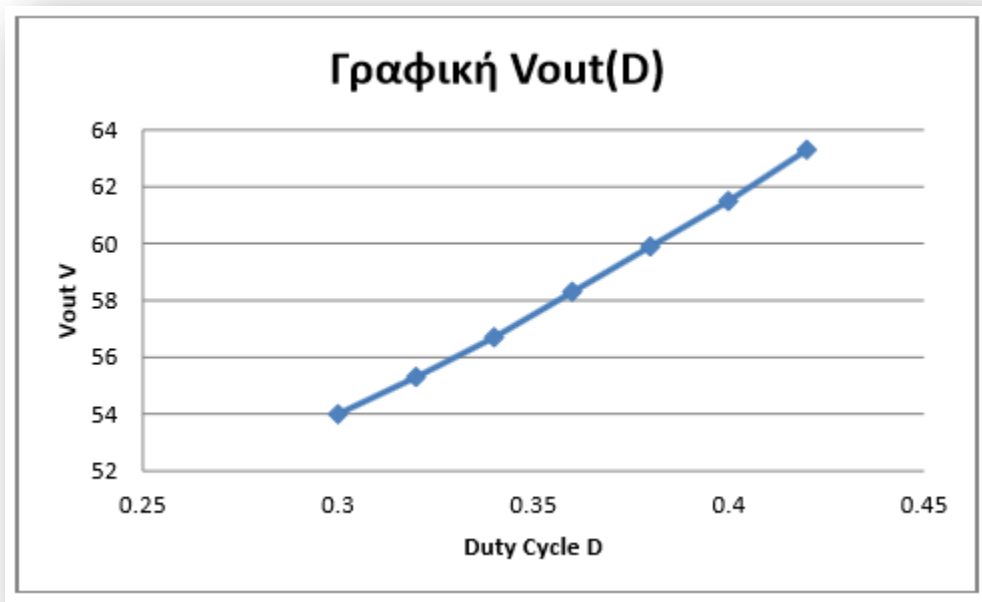


Σχήμα 4.11: κυματομορφή V_{out} για $D=0.38$

Πίνακας 4.1

Duty Cycle D	V_{out} (V)
0.30	54V
0.32	55.3V
0.34	56.7V
0.36	58.3V
0.38	60.0V
0.40	61.5V
0.42	63.3V

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση $V_{out}(D)$



Σχήμα 4.12: η γραφική παράσταση $V_{out}(D)$

4.2 Voltage-Mode Control

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα μελετήσουμε το μοντέλο του μετατροπέα με εφαρμογή του ελέγχου τάσης κλειστού βρόχου. Οι διάφορες συναρτήσεις μεταφοράς στη συνέχεια εξετάζονται και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο πρόγραμμα Simulink Matlab.

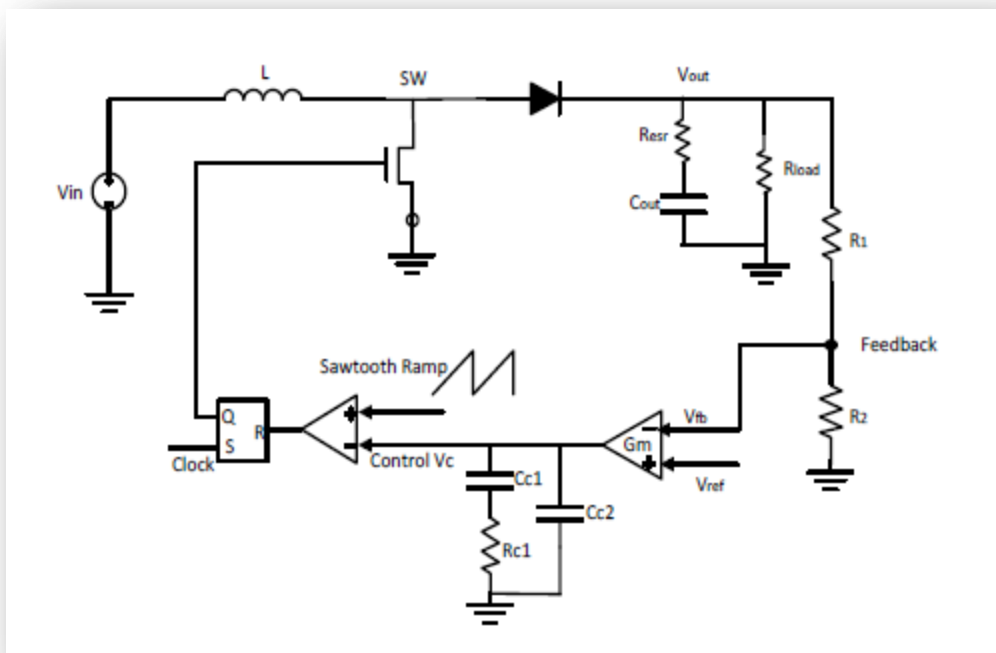
Τα συστήματα κλειστού βρόχου εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του ανοικτού βρόχου ορισμένα από τα οποία είναι τα εξής:[22]

1. Μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση ισορροπίας
2. Μείωση της επίδρασης από διάφορα σήματα διαταραχής (ιδιότητα απόρριψης διαταραχών)
3. Μείωση της ευαισθησίας τους στις διάφορες μεταβολές των παραμέτρων τους

Ωστόσο εμφανίζουν και κάποια μειονεκτήματα όπως

1. Αυξημένη πολυπλοκότητα, διότι έχουμε την εισαγωγή μετρητικών οργάνων (π.χ) αισθητήρων τα οποία αυξάνουν το κόστος και εισάγουν θόρυβο

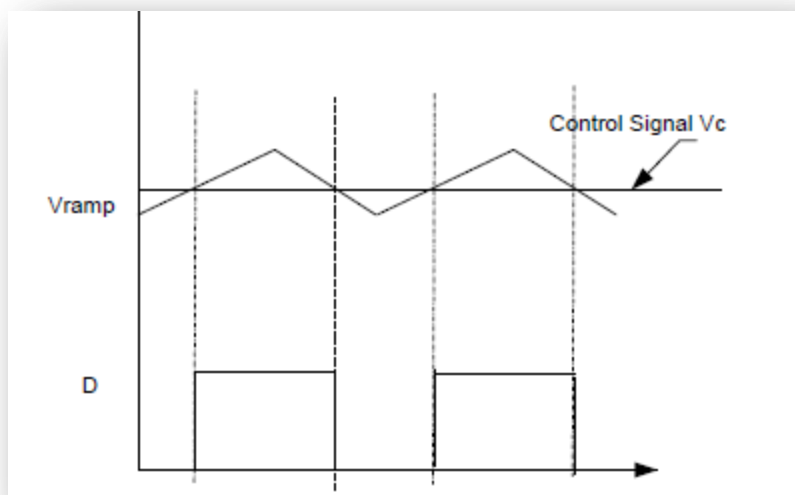
Για τη ρύθμιση της τάσης εξόδου, η τεχνική Pulse Width Modulation-(PWM) είναι απαραίτητη για την προσαρμογή του συντελεστή χρησιμοποίησης D ώστε να ληφθεί η επιθυμητή τάση εξόδου. Υπάρχουν δύο μέθοδοι ελέγχου για μετατροπέα ανύψωσης: η Voltage Mode Control (VMC) και Current Mode Control (CMC).



Σχήμα 4.13: Έλεγχος τάσης κλειστού βρόχου

Το μπλοκ διάγραμμα ενός μετατροπέα ανύψωσης με έλεγχο τάσης απεικονίζεται στο Σχήμα 4.13. Η τάση εξόδου του μετατροπέα παρακολουθείται μέσω ενός διαιρέτη τάσης. Η τάση στην ανάδραση συγκρίνεται με την τάση αναφοράς από τον ενισχυτή σφάλματος για να δημιουργήσει ένα ρεύμα σφάλματος μέσω της διαγωγιμότητας του ενισχυτή σφάλματος. Μετά από να περνώντας από την αντίσταση αντιστάθμισης, το ρεύμα σφάλματος μετατρέπεται για τον έλεγχο της τάσης και συνδέεται με το διαμορφωτή πλάτους παλμού (PWM) που οδηγεί το MOSFET

Κατά τον έλεγχο τάσης, αυτή η τάση ελέγχου συγκρίνεται με μια πριονωτή ράμπα. Όταν μεταβάλλεται η τάση εξόδου του μετατροπέα, η τάση ελέγχου V_c αλλάζει επίσης και ως εκ τούτου προκαλεί το λόγο κατάτμησης του διακόπτη ισχύος να αλλάξει. Όσο υψηλότερη είναι η τάση σφάλματος, τόσο περισσότερο διαρκεί ο συντελεστής χρησιμοποίησης. Αυτή η αλλαγή του λόγου κατάτμησης ρυθμίζει την τάση εξόδου ώστε να μειωθεί στο σήμα σφάλματος τάσης στο μηδέν. Οι κυματομορφές του σήματος ελέγχου V_c , του ρεύματος του διακόπτη και του συντελεστής χρησιμοποίησης δίδονται στο Σχήμα 4.14



Σχήμα 4.14: οι κυματομορφές V_c, I_L, D

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόγχου Ελέγχου Τάσης του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι η εξής

$$\frac{V(s)}{d(s)} = \frac{V_g}{D'} * \frac{[1 - s(\frac{L}{D'^2 * R})]}{[1 + s(\frac{L}{D'^2 * R}) + s^2(\frac{L * C}{D'^2})]} \quad \text{Εξ. 4.1}$$

Η μέθοδος εξαγωγής της παρουσιάζεται στην ενότητα που ακολουθεί

4.3 Current-Mode Control

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα μελετήσουμε το μοντέλο του μετατροπέα με εφαρμογή του ελέγχου ρεύματος-τάσης.

4.3.1 Εισαγωγή

Κατά τον έλεγχο ρεύματος-τάσης, το ρεύμα του πηνίου ανατροφοδοτείται σε ένα εσωτερικό βρόχο ελέγχου και η τάση εξόδου ανατροφοδοτείται σε ένα εξωτερικό βρόχο ελέγχου. Ο έλεγχος ρεύματος-τάσης επίσης ονομάζεται προγραμματισμένος έλεγχος ρεύματος ή έλεγχος εγγεόμενου ρεύματος. Περιγραφές ελέγχου ρεύματος-τάσης μπορούν να βρεθούν στα παραδείγματα των Kislovski, Redl και Sokal (1991, Κεφάλαιο 5), Erickson και Maksimovic (2000, κεφάλαιο 12), και Mitchell (1988, Κεφάλαιο 6).[22]

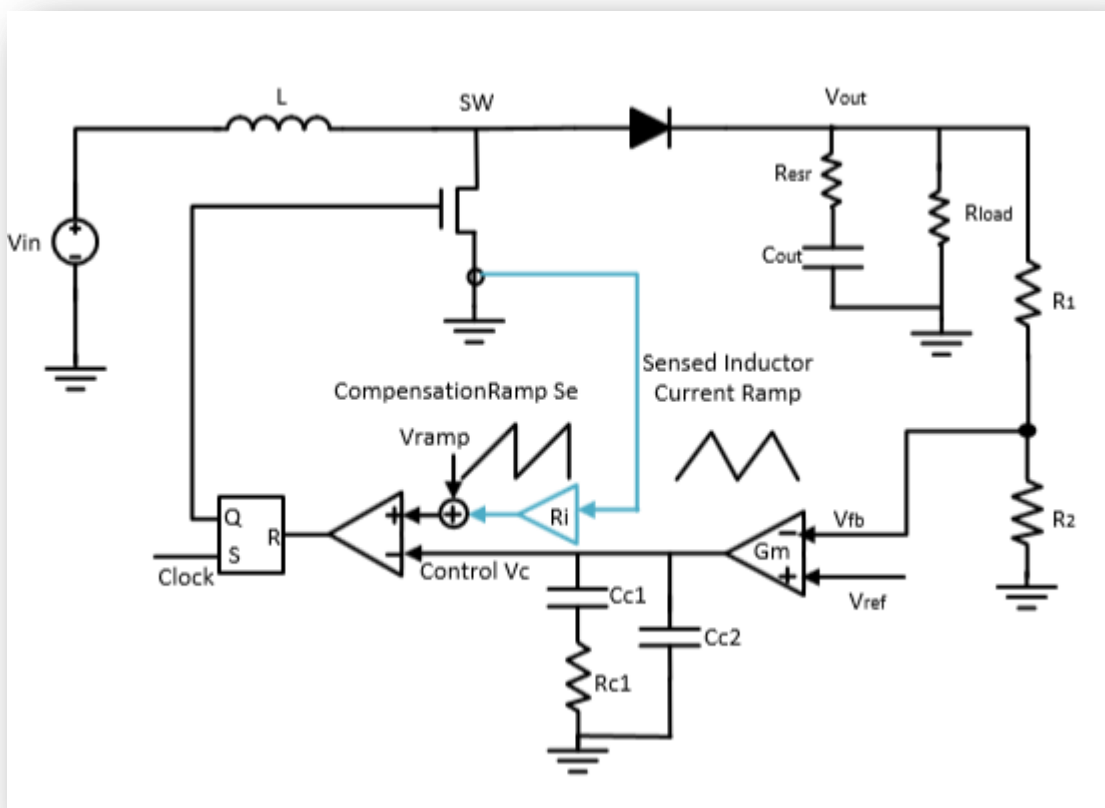
Ένας μεγάλος αριθμός των μοντέλων συνεχούς χρόνου για τον έλεγχο ρεύματος-τάσης έχουν παρουσιαστεί κατά τη διάρκεια των ετών. Μερικά από αυτά τα μοντέλα έχουν σκοπό να είναι ακριβή και στις υψηλές συχνότητες. Τα μοντέλα που παρουσιάζονται από τον Ridley (1991), Tan και Middlebrook (1995), και Tymerski και Li (1993) έχουν σχεδιαστεί για να είναι ακριβή από DC στο ήμισυ της διακοπτικής συχνότητας. Η κύρια διαφορά μεταξύ των μοντέλων Ridley και Tan είναι η μοντελοποίηση του κέρδους του βρόχου ρεύματος. Ο Tymerski και Li (1993) παρουσιάζουν ένα μοντέλο μόνιμης κατάστασης, ενώ τα μοντέλα των Ridley και Tan χρησιμοποιούν το διακοπτικό μοντέλο PWM (Vorperian, 1990)[22]

Στο Tymerski (1994), χρησιμοποιείται η θεωρία των χρονικώς μεταβαλλόμενα συστημάτων για να αντλήσει τα μοντέλα για τη συνάρτηση της συχνότητας και αξιώνονται για να είναι ακριβή για όλες τις συχνότητες. Μόνο η συνάρτηση της συχνότητας ελέγχος-προς-έξοδο προκύπτει (μέχρι τώρα) σε περίπτωση όπου χρησιμοποιείται έλεγχος ρεύματος-τάσης. Το μοντέλο είναι πιο περίπλοκο από ό, τι τα προαναφερθέντα μοντέλα. Όταν η συνάρτηση συχνότητας ελέγχος-προς-έξοδο ενός μετατροπέα χρησιμοποιείται για να σχεδιάσει έναν ελεγκτή, η συχνότητα διαστήματος dc μέχρι το ήμισυ της διακοπτικής συχνότητας είναι η πιο ενδιαφέρουσα. Τα προαναφερθέντα μοντέλα μπορούν, επομένως, να είναι αρκετά καλά κατά το σχεδιασμό ενός ελεγκτή.

Όταν απαιτείται ένα ακριβές μοντέλο ελέγχου ρεύματος-τάσης, αυτό που παρουσίασε Ridley (1991) επιλέγεται συχνά. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι αυτό των Lo και King (1999), όπου η επιλογή ήταν μεταξύ των μοντέλων Ridley και Tan. Κατά τους Lo και King (1999)[22], το μοντέλο Tan θεωρείται ύποπτο ενώ κι άλλοι συγγραφείς έχουν επίσης εκφράσει την άποψη αυτή.

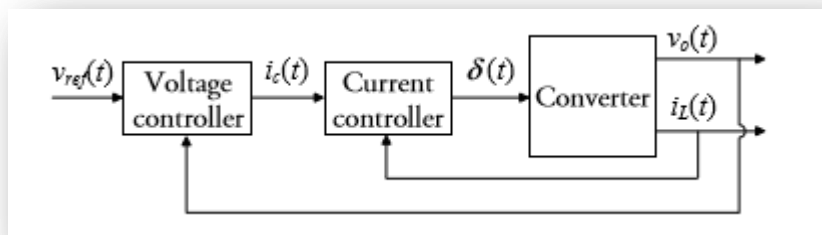
4.3.2 Λειτουργία ελέγχου ρεύματος-τάσης

Η λειτουργία και η εφαρμογή του ελέγχου ρεύματος-τάσης συζητούνται σε αυτή την ενότητα. Κατά τον έλεγχο ρεύματος-τάσης, δύο βρόχοι ελέγχου χρησιμοποιούνται (Redl και Sokal, 1986). Δείτε το Σχήμα 3.1. [22] Ο εσωτερικός βρόχος είναι γρήγορος και ελέγχει το ρεύμα πηνίου, $i_L(t)$. Ο εξωτερικός βρόχος είναι βραδύτερος και ελέγχει την τάση εξόδου, $v_o(t)$. Το ρεύμα του πηνίου ανατροφοδοτείται μέσω του ελεγκτή ρεύματος στο εσωτερικό βρόχο, ενώ η τάση εξόδου ανατροφοδοτείται μέσω του ελεγκτή τάσης στον εξωτερικό βρόχο. Ο ελεγκτής τάσης έχει την v_{ref} ως σήμα αναφοράς (t). Ο ελεγκτής τάσης της προσπαθεί να πάρει $v_o(t)$ ίσο προς $v_{ref}(t)$ με την αλλαγή του σήματος ελέγχου του, $i_c(t)$. Αυτό το σήμα χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως το σήμα αναφοράς για τον ελεγκτή ρεύματος. Ο ελεγκτής ρεύματος έχει ως στόχο το $i_L(t)$ να ισούται με το $i_c(t)$ (κατά μία έννοια) με αλλαγή του σήματος ελέγχου, $\delta(t)$, η οποία είναι το σήμα εισόδου (έλεγχος) του μετατροπέα. Έτσι, ο έλεγχος ρεύματος-τάσης είναι μια εφαρμογή του κασκοδικού ελέγχου (Goodwin, Graebe και Salgado, 2001, Τμήμα 10.7).

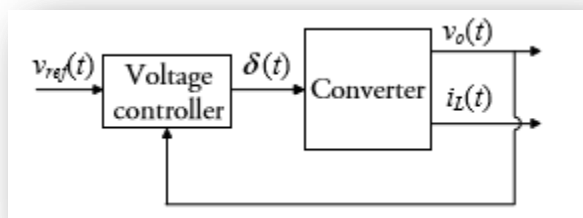


Σχήμα 4.15: κύκλωμα ελέγχου ρεύματος-τάσης

Στην περίπτωση του ελέγχου ρεύματος τάσης, το σήμα ελέγχου του ελεγκτή τάσης είναι αναλογικό και το σήμα ελέγχου του ελεγκτή ρεύματος είναι ψηφιακό(δυναδικό).

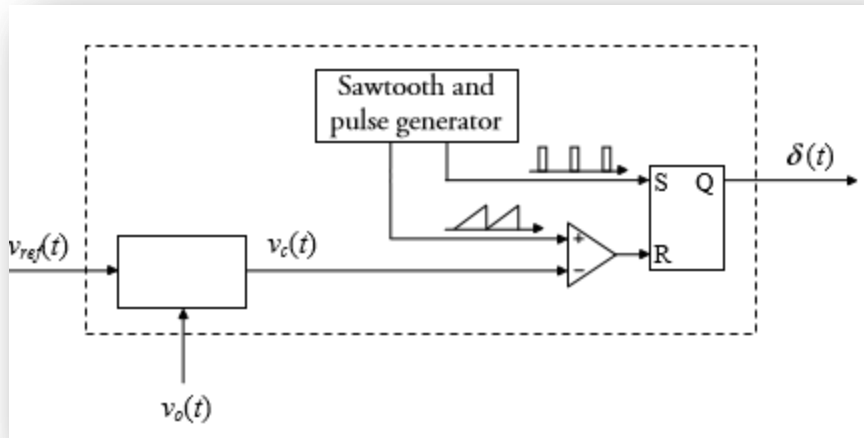


Σχήμα 4.16: έλεγχος ρεύματος-τάσης

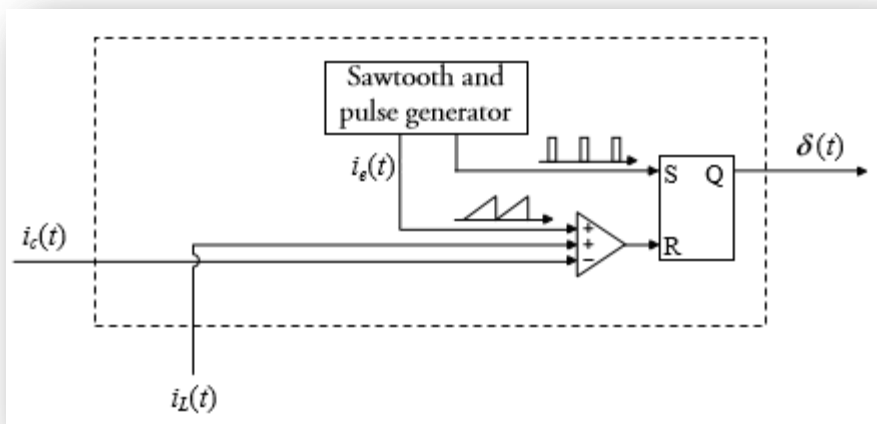


Σχήμα 4.17: έλεγχος τάσης

Στην περίπτωση του ελέγχου τάσης λειτουργίας, βλέπε Σχήμα 4.16, το σήμα ελέγχου του ελεγκτή τάσης είναι ψηφιακό χρησιμοποιώντας το $\delta(t)$. Δεν υπάρχει κανένας ελεγκτής ρεύματος και το ρεύμα του πηνίου δεν χρειάζεται να μετρηθεί. Ένας ελεγκτής τάσης φαίνεται στο Σχήμα 4.17. Το πρώτο (αριστερά) μέρος είναι συνήθως ένας ενισχυτής σφάλματος τάσης και το σήμα εξόδου του, $V_C(t)$, είναι αναλογικό. Το δεύτερο (δεξιά) μέρος του ελεγκτή είναι ένας διαμορφωτής πλάτους παλμών. Ο λόγος κατάτμησης, $d(t)$, εξαρτάται γραμμικά από το σήμα ελέγχου $V_C(t)$. Το κέρδος αυτής της γραμμικότητας εξαρτάται από την τιμή peak-to-peak του πριονωτού σήματος. Η μέγιστη τιμή του πριονωτού σήματος είναι ίση με το 1 και γι' αυτό ο λόγος κατάτμησης, $d(t)$, είναι ίσο με το σήμα d . Ο Έλεγχος τάσης ονομάζεται επίσης έλεγχος λόγου κατάτμησης.

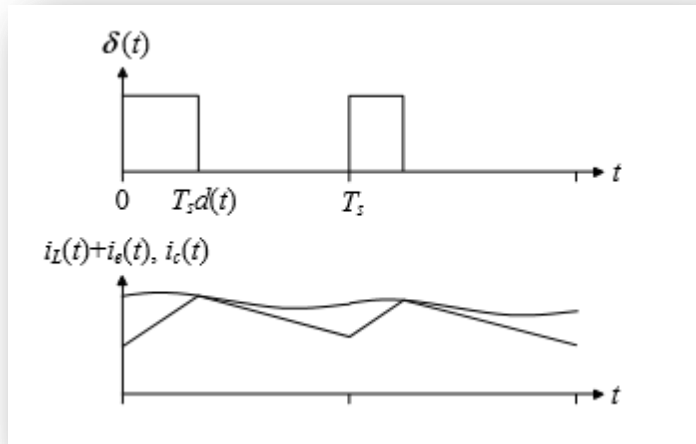


Σχήμα 4.18: ένας ελεγκτής τάσης σε έλεγχο τάσης



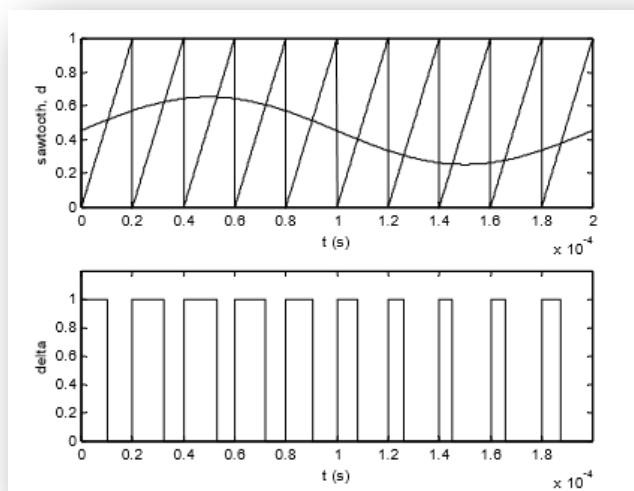
Σχήμα 4.19: ο ελεγκτής ρεύματος στον έλεγχο ρεύματος τάσης

Ένα τυπικός ελεγκτής ρεύματος στον έλεγχο ρεύματος-τάσης υλοποιείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19. Το ρεύμα αιχμής του πηνίου ελέγχεται και ως εκ τούτου, η μέθοδος αυτή ονομάζεται έλεγχος ρεύματος αιχμής. Αυτός είναι ο πιο κοινός τύπος ελέγχου ρεύματος-τάσης και η λέξη "αιχμής" παραλήπεται. Αν συγκρίνουμε το Σχήμα 4.19 και Σχήμα 4.18, ο ελεγκτής ρεύματος φαίνεται να αποτελείται μόνο από ένα διαμορφωτή. Οι Kislovski, Redl και Sokal (1991, Κεφάλαιο 5) χρησιμοποιούν το όνομα ελεγκτής ρεύματος διαμορφωτή αντί ελεγκτή ρεύματος.



Σχήμα 4.20: οι κυματομορφές των σημάτων του ελεγκτή ρεύματος στον έλεγχο ρεύματος-τάσης

Ο έλεγχος μέσης τιμής ρεύματος-τάσης είναι ένα άλλο είδος του ελέγχου ρεύματος-τάσης (Kislovski, Redl και Sokal, 1991, Κεφάλαιο 5). Το πρώτο μέρος του ελεγκτή μέσης τιμής ρεύματος του ελέγχου ρεύματος-τάσης είναι ένας ενισχυτής σφάλματος ρεύματος. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι κατάλληλο για να ονομάσουμε το σημερινό ελεγκτή ρεύματος ως ένα διαμορφωτή γιατί μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από περισσότερα από ένα διαμορφωτές (συγκρίνετε με τον ελεγκτή τάσης στον έλεγχο τάσης). Το τρέχον όνομα το ελεγκτή μπορεί ως εκ τούτου, να θεωρηθεί ως το πιο γενικό και χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία. Ο διαμορφωτής θεωρείται ως ένα (μικρό ή μεγάλο) μέρος του ελεγκτή ρεύματος.



Σχήμα 4.21: οι κυματομορφές σε ένα διαμορφωτή PWM

Τώρα θα εξηγηθεί η λειτουργία του ελεγκτή ρεύματος στο έλεγχο ρεύματος (αιχμής) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19. Για μια στιγμή ας υποθέσουμε ότι το πριονωτό σήμα, δηλαδή το $ie(t)$, δεν είναι υπάρχει. Η περίοδος του σήματος από τον παλμό γεννήτριας είναι ίση με T_s και το σήμα θέτει το SR - μάνταλο. Κάθε φορά που αυτό συμβαίνει, το τρανζίστορ ενεργοποιείται και το ρεύμα του πηνίου, $i_L(t)$, αρχίζει να αυξάνει όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Όταν η τιμή του $i_L(t)$ γίνεται μεγαλύτερη από το σήμα $ic(t)$, το SR - μάνταλο επαναφέρεται και το $i_L(t)$, τότε μειώνεται έως ότου ένα νέο σύνολο παλμών δημιουργηθεί. Αυτή είναι η ίδια λειτουργία όπως το διαμορφωτή πλάτους παλμού στο Σχήμα 4.18, εκτός από ότι το ρεύμα του πηνίου, $i_L(t)$, αντικαθιστά το πριονωτό σήμα. Συγκρίνετε τις κυματομορφές που εμφανίζονται στο Σχήμα 4.20 και Σχήμα 4.21. Το σήμα $IC(t)$ είναι το σήμα αναφοράς του ελεγκτή ρεύματος. Ο ελεγκτής ρεύματος προσπαθεί να πάρει την τιμή του $i_L(t)$ να γίνει ίση με την τιμή του $ic(t)$ με την έννοια ότι είναι η μέγιστη τιμή του $i_L(t)$ που έχει σημασία.

Στον έλεγχο μέσης τιμής του ρεύματος η μέση τιμή της $i_L(t)$ που έχει σημασία. Ο ελεγκτής ρεύματος (αιχμής) είναι γρήγορος, δεδομένου ότι καταφέρνει να κάνει τη μέγιστη τιμή του $i_L(t)$ ίση με την τιμή του $ic(t)$ άμεσα. Το εσωτερικό σύστημα κλειστού βρόχου (αιχμής) στον έλεγχο ρεύματος-τάσης μπορεί επομένως να θεωρηθεί ως μία πηγή ρεύματος.

Για να είναι συμβατή με τους ορισμούς που γίνονται από Ridley (1991), το πριονωτό σήμα, δηλαδή $ie(i)$, από τώρα και στο εξής καλείται η εξωτερική ράμπα. Η ανατροφοδότηση του $i_L(t)$ μπορεί να προκαλέσει αστάθεια (Erickson και Maksimovic, 2000, Τμήμα 12.1). Ο έλεγχος του ρεύματος πηνίου είναι ασταθής εάν ο λόγος κατάτμησης μόνιμης κατάστασης, D , είναι μεγαλύτερος από 0,5. Είναι ασταθές με την έννοια ότι λόγος κατάτμησης, $d(t)$, ποτέ δεν φτάνει σε ένα σταθερό επίπεδο, ακόμη και αν το $IC(t)$ είναι σταθερό. Ωστόσο, είναι σταθερός με την έννοια ότι η μέγιστη τιμή της $i_L(t)$ είναι ίση με το $ic(t)$.

Είναι δυνατόν να έχουμε ευστάθεια και στην περίπτωση όπου το D είναι μεγαλύτερο από 0.5 αν η χρησιμοποιηθεί αντισταθμισμένη κλίση. Με αντιστάθμιση κλίσης, το $ic(t)$ συγκρίνεται με το άθροισμα των $i_L(t)$ και της εξωτερικής ράμπας, δηλαδή $ie(t)$. Η κλίση του αθροίσματος είναι μεγαλύτερο από ό,τι η κλίση της $i_L(t)$ μόνο. Η χαρακτηριστική τιμή α ορίζεται πλέον ως

$$\alpha = \frac{M_2 - M_e}{M_1 + M_e},$$

όπου M_e είναι η κλίση του $ie(t)$, M_1 είναι η κλίση του $i_L(t)$, ενώ το τρανζίστορ είναι σε λειτουργία και $-M_2$ είναι η κλίση του $i_L(t)$, όσο το τρανζίστορ απενεργοποιημένο. Κανένας από τα M_e, M_1, M_2 δεν είναι αρνητικά με αυτούς τους ορισμούς. Το M_e πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε $\alpha < 1$ για να έχουμε ευστάθεια.

Το ρεύμα του πηνίου ελέγχεται στον έλεγχο ρεύματος λειτουργίας και θα πρέπει να ανατροφοδοτείται. Ωστόσο, δεν είναι πάντα απαραίτητο να μετρηθεί άμεσα το ρεύμα του πηνίου. Μπορεί για παράδειγμα να είναι δυνατόν να μετρηθεί και να ανατροφοδοτούν το ρεύμα τρανζίστορ αντ' αυτού, δεδομένου ότι έχει την ίδια κυματομορφή, όπως το ρεύμα του πηνίου κατά ένα συγκεκριμένο κομμάτι της διακοπτικής περιόδου.

Η ενότητα τελειώνει εξετάζοντας ορισμένες ιδιότητες που μπορούν να ληφθούν με χρήση του μετρούμενο ρεύμα πηνίου.

- Στον έλεγχο ρεύματος(αιχμής)-τάσης,περιορισμός ρεύματος επιτυγχάνεται αυτόματα δεδομένου ότι το ρεύμα κορυφής είναι ελεγχόμενη πράγμα που συνεπάγεται καλύτερη προστασία του μετατροπέα.
- Είναι εύκολο να συνδέσετε διάφορους μετατροπείς παράλληλα.
- Ο ελεγκτής τάσης είναι ευκολότερο να σχεδιάσει δεδομένου ότι η διαδικασία πρέπει να ελέγχεται είναι 1^{ης} τάξης αντί 2^{ας} .
- Ένα μειονέκτημα είναι ότι η σύνθετη αντίσταση εξόδου είναι υψηλή.

4.4 Εξισώσεις μόνιμης κατάστασης του μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Μοντέλο του μετατροπέα Boost

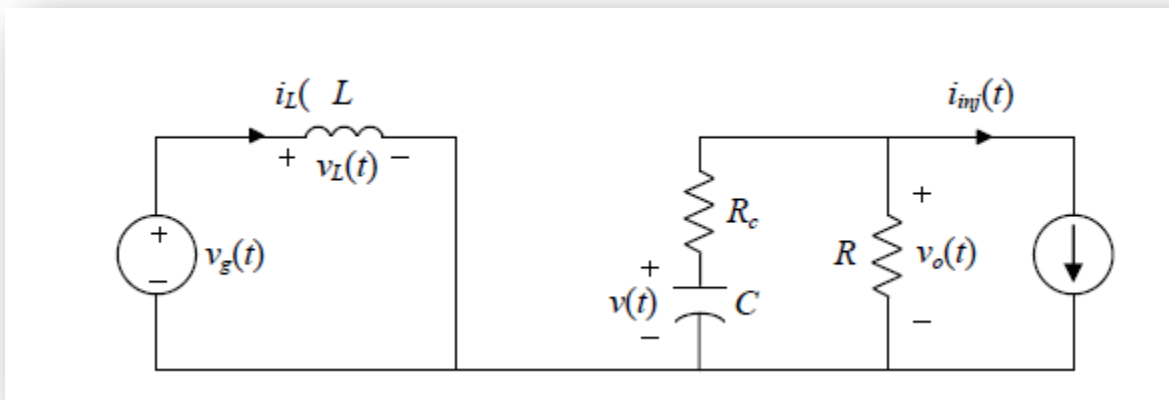
Σε αυτή την ενότητα εξάγεται ένα γραμμικά χρονικά αναλλοίωτο μοντέλο του μετατροπέα ανύψωσης τάσης μέσω του χώρου κατάστασης μέσου όρου.

4.4.1 Περιγραφή χώρου καταστάσεων για κάθε χρονικό διάστημα.

Σε αυτή την υποενότητα, οι περιγραφές του χώρου καταστάσεων του μετατροπέα ανύψωσης προκύπτουν για τις περιπτώσεις όπου το τρανζίστορ λειτουργεί στην κατάσταση-on και στην κατάσταση-off.

Ενώ το τρανζίστορ είναι σε λειτουργία, η τάση στα άκρα του τρανζίστορ είναι μηδέν και η διόδος δεν άγει. Το κύκλωμα στο Σχήμα 4.22 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα μοντέλο του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη διάρκεια ton . Στο σχήμα 4.22, μια πηγή ρεύματος προστίθεται.

Από το Σχήμα 4.22, λαμβάνονται οι ακόλουθες εξισώσεις:



Σχήμα 4.22: μοντέλο του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη διάρκεια ton

$$\text{Εξ 4.2} \quad \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{1}{L} v_g(t),$$

$$\text{Εξ 4.3} \quad \frac{dv(t)}{dt} = \frac{1}{C} \left(-\frac{v_o(t)}{R} - i_{inj}(t) \right),$$

$$\text{Εξ 4.4} \quad v_o(t) = v(t) + R_c \left(-\frac{v_o(t)}{R} - i_{inj}(t) \right).$$

Η Εξ 4.4 ξαναγράφεται

$$\text{Εξ 4.5} \quad v_o(t) + \frac{R_c}{R} v_o(t) = v(t) - R_c i_{inj}(t),$$

$$\text{Εξ 4.6} \quad v_o(t) = \frac{v(t) - R_c i_{inj}(t)}{1 + R_c/R},$$

$$\text{Εξ 4.7} \quad v_o(t) = \frac{R}{R + R_c} v(t) - \frac{RR_c}{R + R_c} i_{inj}(t).$$

Αντικαθιστούμε το V_o από την Εξ 4.7 στην Εξ 4.3

$$\text{Εξ 4.8} \quad \frac{dv(t)}{dt} = -\frac{1}{(R + R_c)C} v(t) + \frac{R_c}{(R + R_c)C} i_{inj}(t) - \frac{1}{C} i_{inj}(t).$$

Η οποία απλοποιείται στην

$$\text{Εξ 4.9} \quad \frac{dv(t)}{dt} = -\frac{1}{(R + R_c)C} v(t) - \frac{R}{(R + R_c)C} i_{inj}(t).$$

Χρησιμοποιώντας τις Εξ 4.2,Εξ 4.7 και Εξ 4.9 προκύπτει το ακόλουθο σύστημα χώρου καταστάσεων

όπου

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_1\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}_1\mathbf{u}(t) \end{cases}$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v(t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} v_g(t) \\ i_{inj}(t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{y}(t) = v_o(t),$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{(R + R_c)C} \end{bmatrix},$$

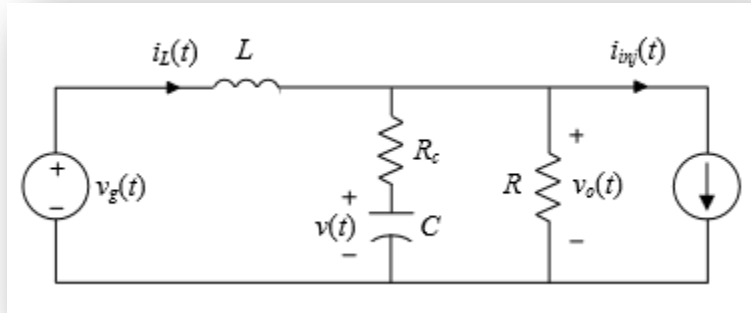
$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{(R + R_c)C} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{R}{R + R_c} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{RR_c}{R + R_c} \end{bmatrix}.$$

Εξ 4.10

Ενώ το τρανζίστορ είναι απενεργοποιημένο, η τάση στα άκρα της διόδου είναι ίση με μηδέν. Το κύκλωμα στο Σχήμα 4.23 μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί ως ένα μοντέλο του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη διάρκεια της t_{off} . Το μοντέλο χώρου κατάστασης του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη διάρκεια της t_{off} είναι έτσι



Σχήμα 4.23: μοντέλο του μετατροπέα ανύψωσης κατά τη διάρκεια t_{off}

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = \mathbf{A}_2 x(t) + \mathbf{B}_2 u(t), \\ y(t) = \mathbf{C}_2 x(t) + \mathbf{E}_2 u(t) \end{cases}$$

όπου

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{RR_c}{(R+R_c)L} & -\frac{R}{(R+R_c)L} \\ \frac{R}{(R+R_c)C} & -\frac{1}{(R+R_c)C} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{RR_c}{(R+R_c)L} \\ 0 & -\frac{R}{(R+R_c)C} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} \frac{RR_c}{R+R_c} & \frac{R}{R+R_c} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{RR_c}{R+R_c} \end{bmatrix} = \mathbf{E}_1.$$

Εξ 4.11

Εφαρμόζοντας στις εξισώσεις του χώρου καταστάσεων κανόνες του χώρου καταστάσεων μέσω όρου σε συνδιασμό με την εφαρμογή της διαδικασίας γραμμικοποίησης καταλήγουμε στην συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόγχου του Ελέγχου Τάσης και του Ελέγχου Ρεύματος-Τάσης.

4.4.2 Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόγχου Ελέγχου Τάσης

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόγχου Ελέγχου Τάσης του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι η εξής

$$\frac{V(s)}{d(s)} = \frac{Vg}{D'} * \frac{[1 - s(\frac{L}{D'^2 * R})]}{[1 + s(\frac{L}{D'^2 * R}) + s^2(\frac{L * C}{D'^2})]}$$

Εξ 4.12

4.3.3 Συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόγχου Ελέγχου Ρεύματος-Τάσης

Η συνάρτηση μεταφοράς του εξωτερικού κλειστού βρόγχου τάσης στον έλεγχο Ρεύματος-Τάσης του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι η εξής

$$\begin{aligned} \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} &= \frac{RR_c D'}{R+R_c} \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} + \frac{R}{R+R_c} \frac{\hat{v}(s)}{\hat{d}(s)} - \frac{R_c D V_g}{(R D' + R_c) D'} = \dots = \\ &= \frac{V_g (R+R_c)}{(R D' + R_c) D'} \frac{(R D'^2 - s L D)(1 + s R_c C)}{R D' (R D' + R_c) / (R+R_c) + s(L + R R_c C D') + s^2 (R+R_c) L C}. \end{aligned}$$

Η οποία απλοποιείται σε

$$\frac{V_o(s)}{d(s)} = \frac{VgR - \left(\frac{VgL}{D'}\right)s}{(RD'^2) + (L)s + (RLC)s^2}$$

Εξ 4.13

Ενώ η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του εσωτερικού βρόχου του ρεύματος είναι

$$\frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{\frac{V_g}{D'} \left(1 + \frac{RDD'}{RD'+R_c} + s(R+R_c)C \right)}{RD'(RD'+R_c)/(R+R_c) + s(L+RR_cCD') + s^2(R+R_c)LC'}$$

Η οποία απλοποιείται σε

$$\frac{I_L(s)}{d(s)} = \frac{\frac{Vg}{D'}(1+D) + \left(\frac{RCVg}{D'}\right)s}{RD'^2 + (L)s + (RLC)s^2}$$

Εξ 4.14

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες τιμές των στοιχείων.

Η μελέτη του μετατροπέα ανύψωσης έχει παρουσιαστεί εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο.

$V_g=38V$

$R_c=0$

$R=12 \Omega$

$D'=0.633$

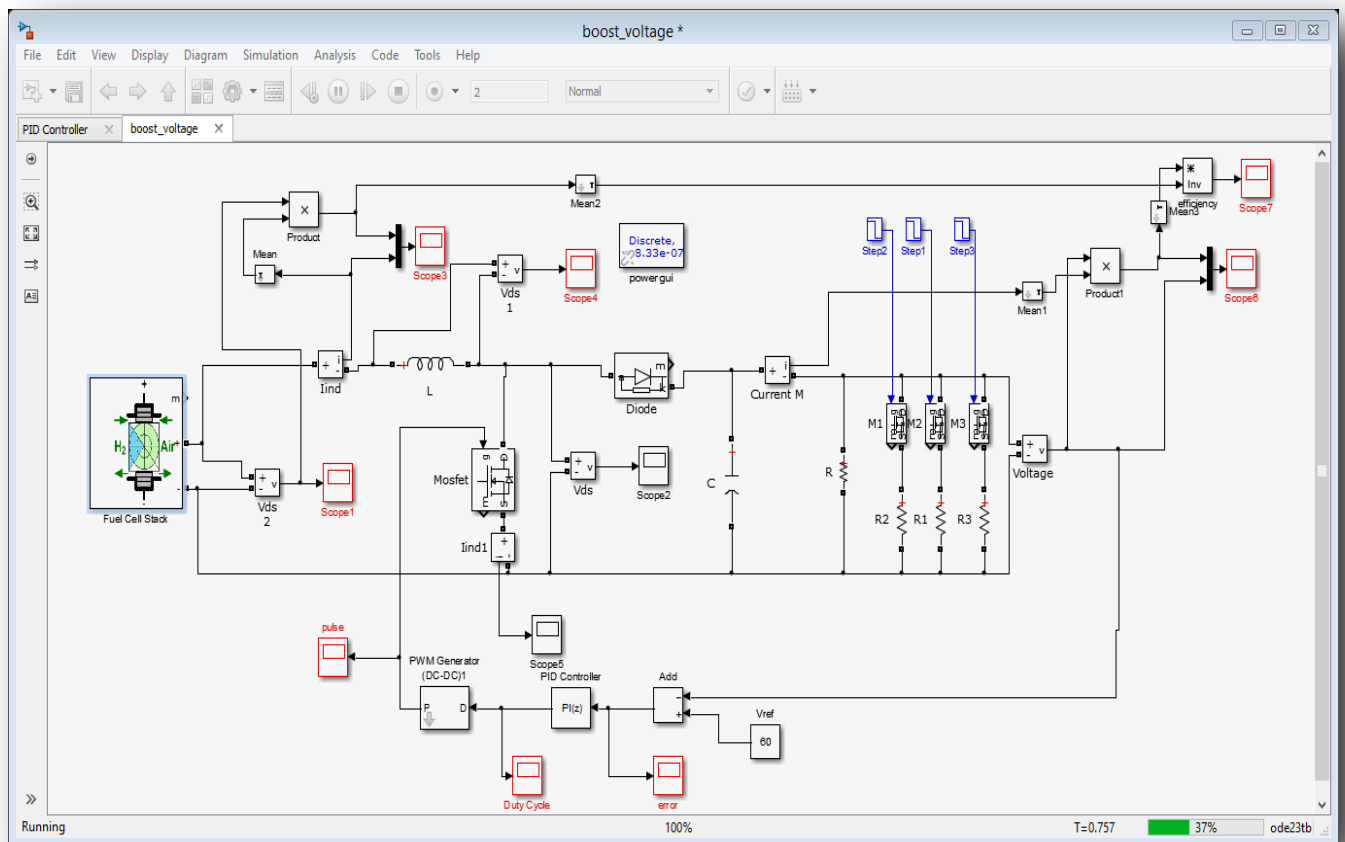
$L=1.59mH$

$C=470\mu F$

4.5 Προσομοίωση Ελέγχου Τάσης

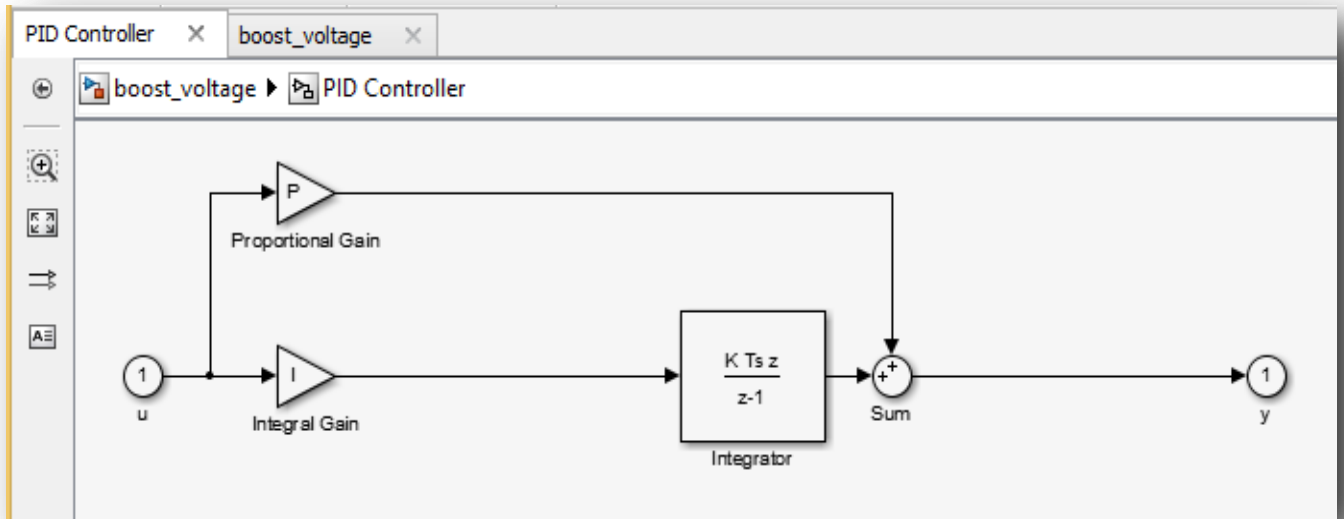
Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε το σχεδιασμό και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της πειραματικής διάταξης συνεχούς ρεύματος εφαρμόζοντας έλεγχο τάσης. Σημειώνεται ότι η συχνότητα λειτουργίας του τρανζίστορ είναι $f=20\text{kHz}$ και πως η προσομοίωση γίνεται σε διακριτό χρόνο με περίοδο δειγματοληψίας $T_s=8.33\text{e-}07\text{s}$

Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί η το μοντέλο αποτελείται από μια κυψέλη καυσίμου, τον μετατροπέα και το φορτίο (μεταβλητό).

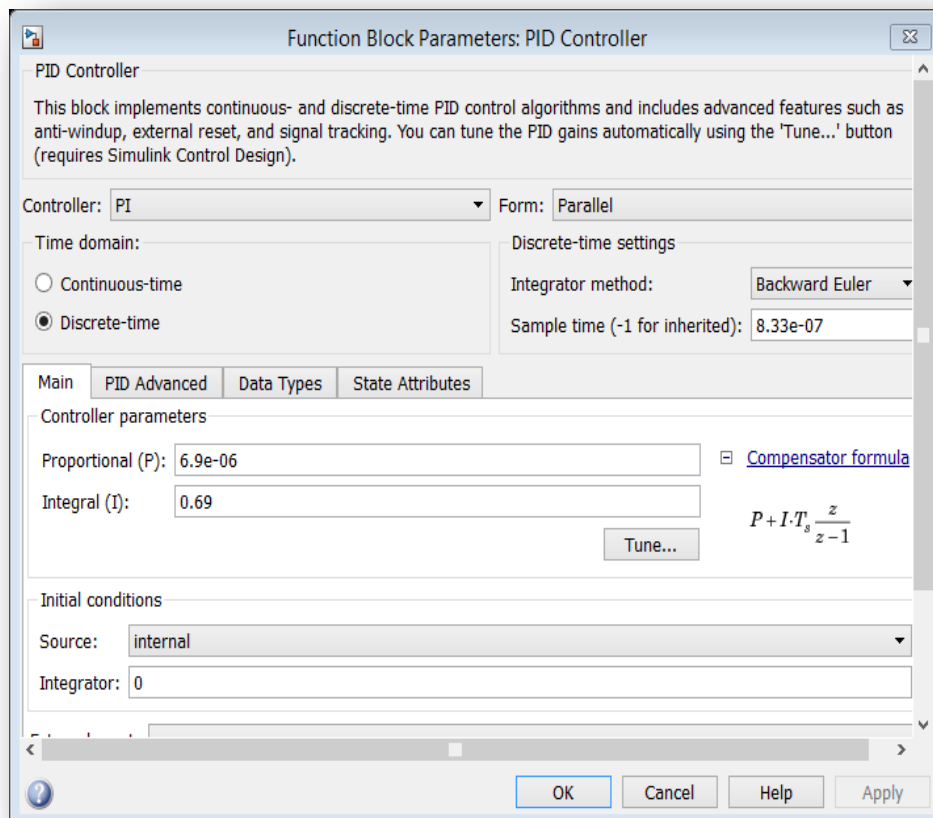


Σχήμα 4.11: Μοντέλο Ελέγχου Τάσης

Ως συνέχεια του μοντέλου ελέγχου ανοικτού βρόχου προσθέτουμε στο κύκλωμα τον κλειστό βρόχο ελέγχου. Η τάση εξόδου συγκρίνεται με μια σταθερά 60V που είναι η επιθυμητή σταθεροποιημένη τάση εξόδου του μετατροπέα. Το σφάλμα ελέγχεται από ένα P ελεγκτή και η έξοδος του αποτελεί είσοδο της ρουτίνας PWM για την παραγωγή του κατάλληλου παλμού που οδηγεί το διακοπτικό στοιχείο ώστε η τάση να παραμείνει σταθερή 60V. Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε τις παραμέτρους του P ελεγκτή καθώς και την διαδικασία εξαγωγής των παραμέτρων αυτών.



Σχήμα 4.25: Ο ελεγκτής *pi*



Σχήμα 4.26: παραμετρικοποίηση *pi* ελεγκτή

Σε προηγούμενη ενότητα είχαμε καταλήξει στη συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του ελέγχου τάσης.

$$\frac{V(s)}{d(s)} = \frac{Vg}{D'} * \frac{[1 - s(\frac{L}{D'^2 * R})]}{[1 + s(\frac{L}{D'^2 * R}) + s^2(\frac{L * C}{D'^2})]}$$

Εξ 4.12

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Matlab και την εντολή

sys=tf(num,den)

λαμβάνουμε την συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου συνεχούς χρόνου του συστήματος

$$\frac{V(s)}{d(s)} = \frac{[38 - s(0.01257)]}{[1 + s(2.093e - 04) + s^2(1.181e - 06)]}$$

Εξ 4.15

η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.27.

```
>> sys=tf(num,den)

sys =

          -0.01257 s + 38
-----
 1.181e-06 s^2 + 0.0002093 s + 0.633

Continuous-time transfer function.
```

Σχήμα 4.27: η συνάρτηση μεταφοράς συνεχούς χρόνου

Με την εντολή

sysd = c2d(sys,Ts);

δημιουργείται η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου διακριτού χρόνου του συστήματος όπου

$$Ts = \frac{1}{60 * fmax} = \frac{1}{60 * 20000} = 8.33e - 07s$$

είναι η περίοδος δειγματοληψίας η οποία ικανοποιεί το θεώρημα δειγματοληψίας του Nyquist.

Η συνάτηση μεταφοράς διακριτού χρόνου είναι η

$$\frac{V(z)}{d(z)} = \frac{[0.008877 - z(0.008855)]}{[0.9999 - z(2) + z^2]}$$

Εξ 4.16

```
sysd =
-0.008855 z + 0.008877
-----
z^2 - 2 z + 0.9999
Sample time: 8.33e-07 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Σχήμα 4.28: συνάρτηση μεταφοράς διακριτού χρόνου

Έπειτα με την εκτέλεση της εντολής pidtool(sysd,'pi') εμφανίζεται το εργαλείο pid όπου προκύπτουν οι τιμές των κερδων K_p και K_i του pi ελεγκτή τάσης ώστε το σύστημα να παραμένει σε ευστάθεια.

Controller parameters	
	Tuned
K_p	6.9197e-06
K_i	0.69197
K_d	
T_f	

Σχήμα 4.29: οι παράμετροι K_p, K_i του pi ελεγκτή

Φορτίο

Το φορτίο αποτελείται αρχικά από 4 αντιστάσεις $R_1=96\Omega$, $R_2=96\Omega$, $R_3=48\Omega$ και $R_4=24\Omega$ παράλληλα συνδεδεμένες.

Αρχικά έχουμε $R=12\Omega$ που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ εξόδου του συστήματος.

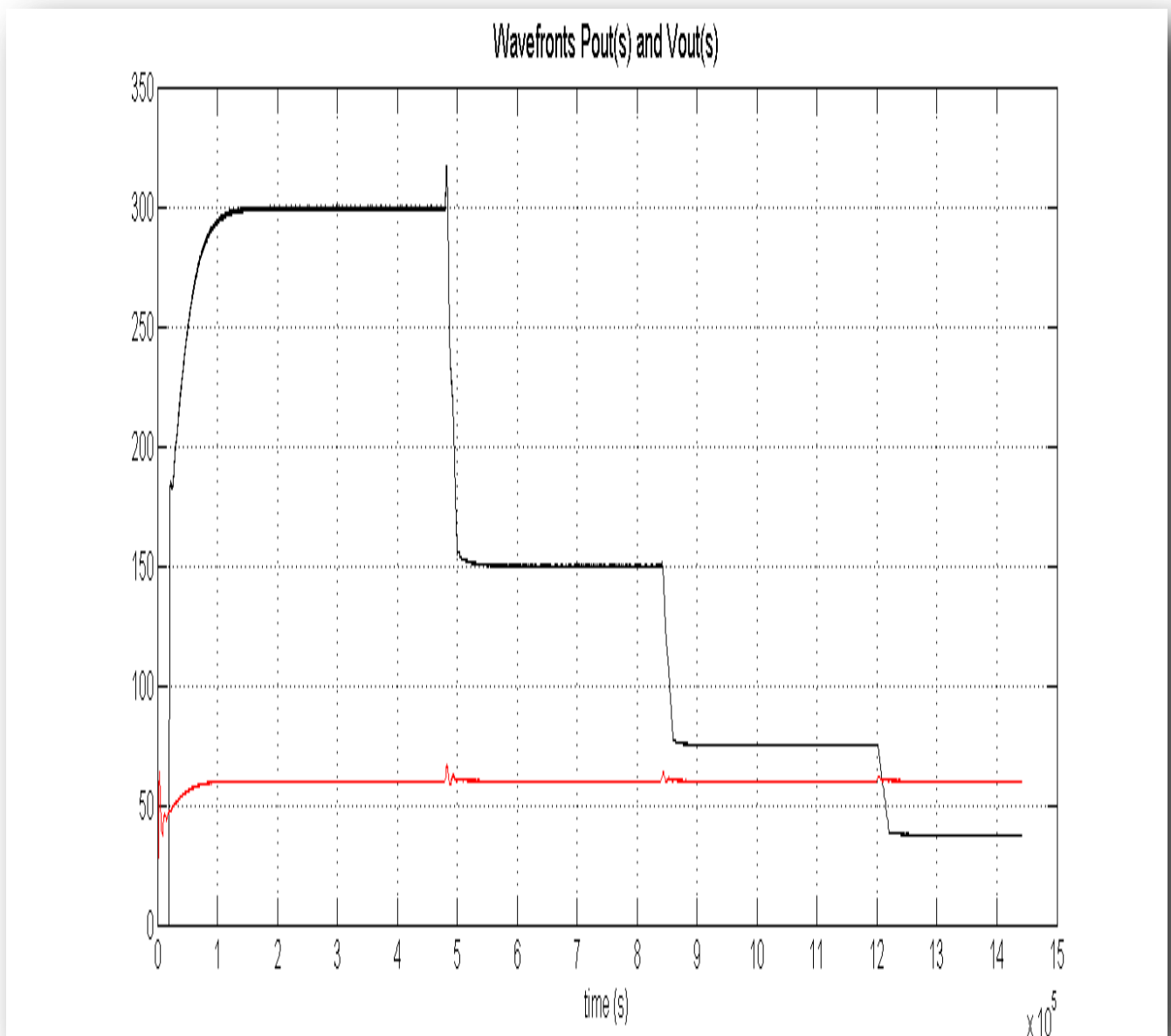
Στα 0,4s η $R_4=24\Omega$ βγαίνει εκτός οπότε $R_{tot}'=24\Omega$,

Στα 0,7s η $R_3=48\Omega$ βγαίνει εκτός οπότε $R_{tot}''=48\Omega$,

Στα 1,0s η $R_4=96\Omega$ βγαίνει εκτός οπότε $R_{tot}'''=96\Omega$,

4.5.1 Αποτελέσματα

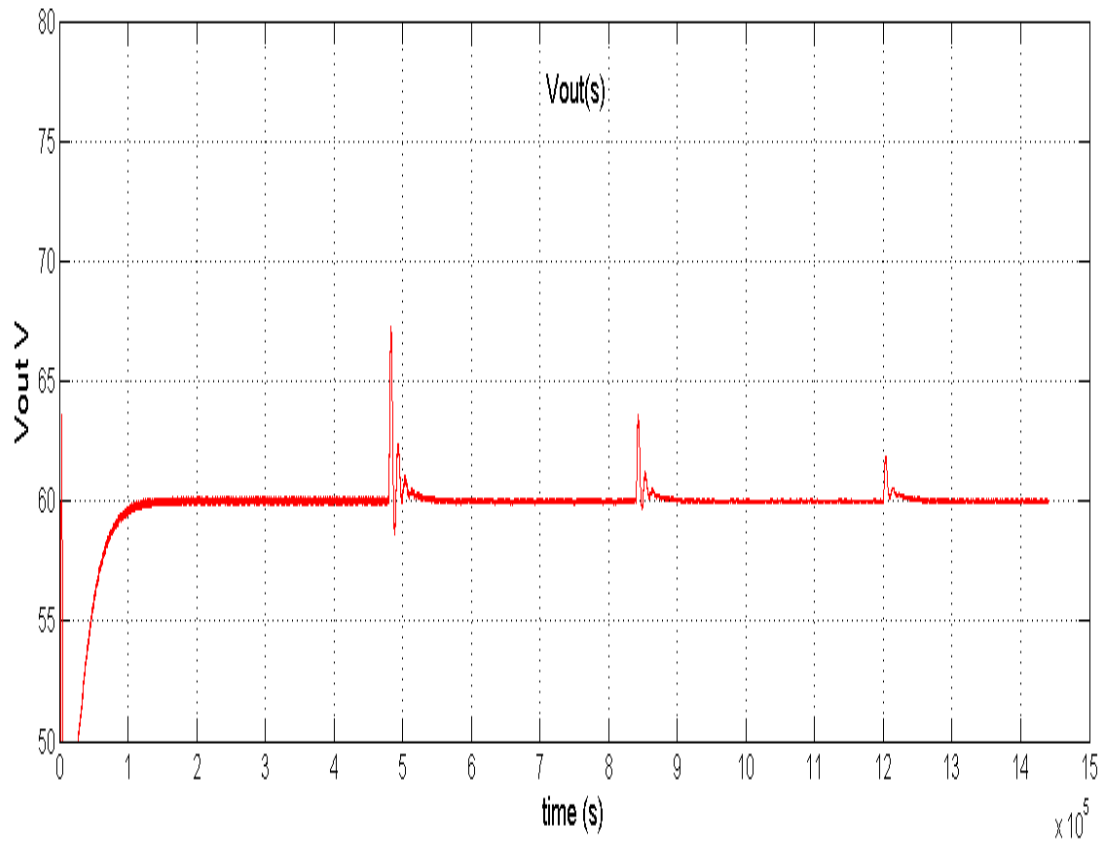
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν. Τα αποτελέσματα για τον έλεγχο τάσης θα συγκριθούν με αυτά του ελέγχου τάσης-ρεύματος.



Σχήμα 4.30: Vout, Pout

Πίνακας 4.2

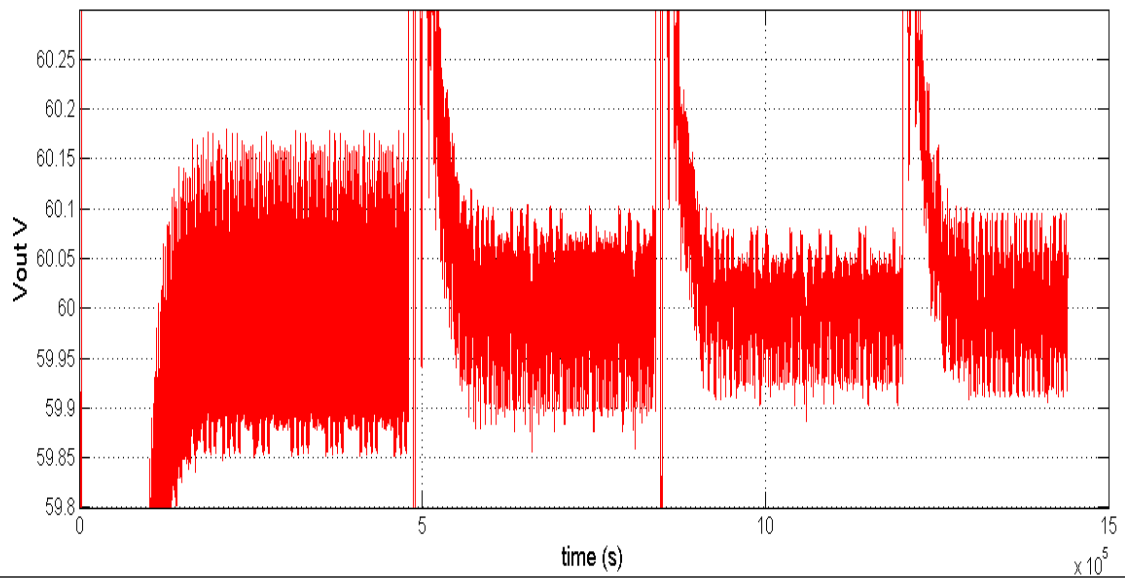
Χρόνος	Φορτίο	Τάση	Ισχύς
0.0	12Ω	60V	300W
0.47	24Ω	60V	150W
0.85	48Ω	60V	75W
1.2	96Ω	60V	37.5W



Σχήμα 4.31: κυματομορφή V_{out}

Πίνακας 4.3

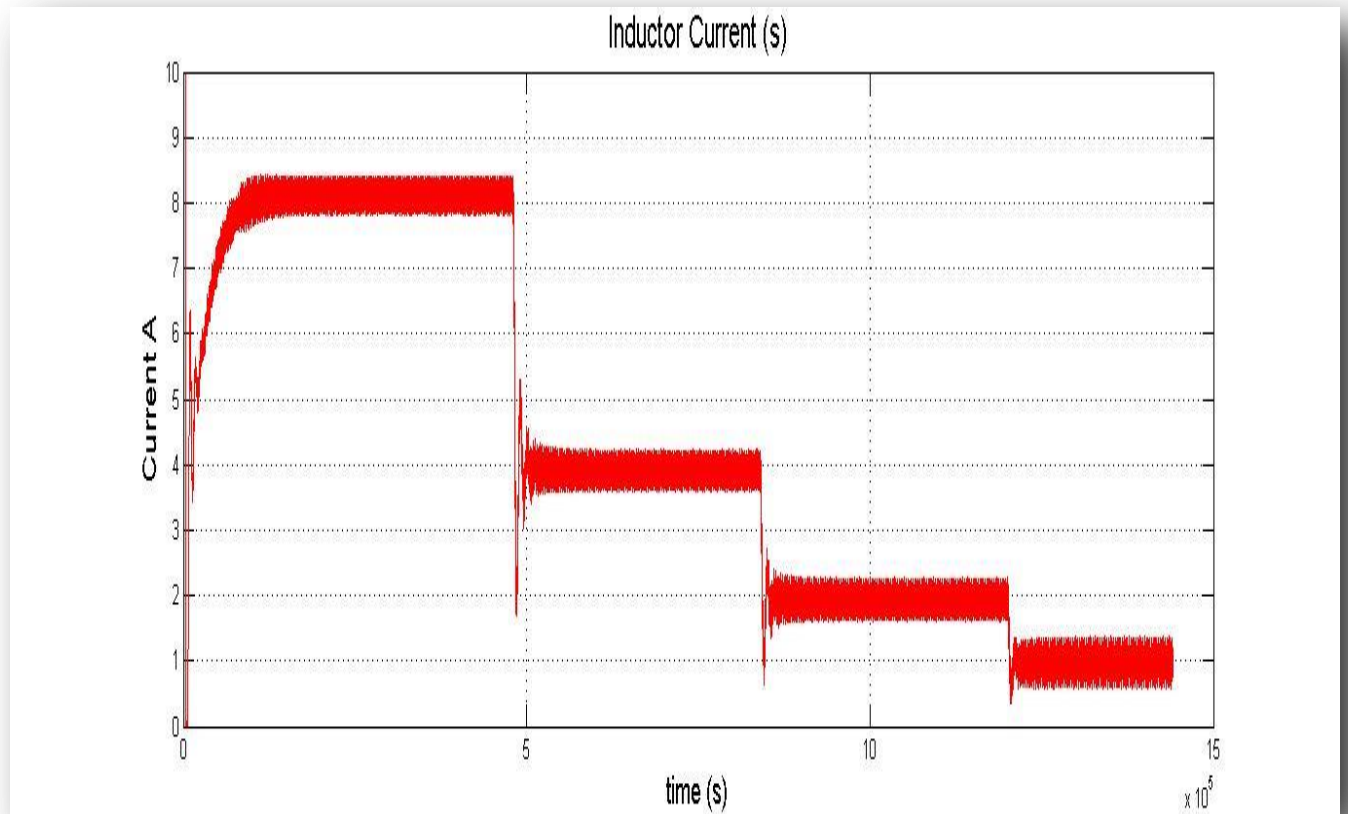
Φορτίο	Χρόνος Απόκρισης	V_{max}
12Ω	0.15s	-
24Ω	0.05s	68V
48Ω	0.04s	63V
96Ω	0.03s	62V



Σχήμα 4.32: διακύμανση τάσης ΔV_{out}

Πίνακας 4.4

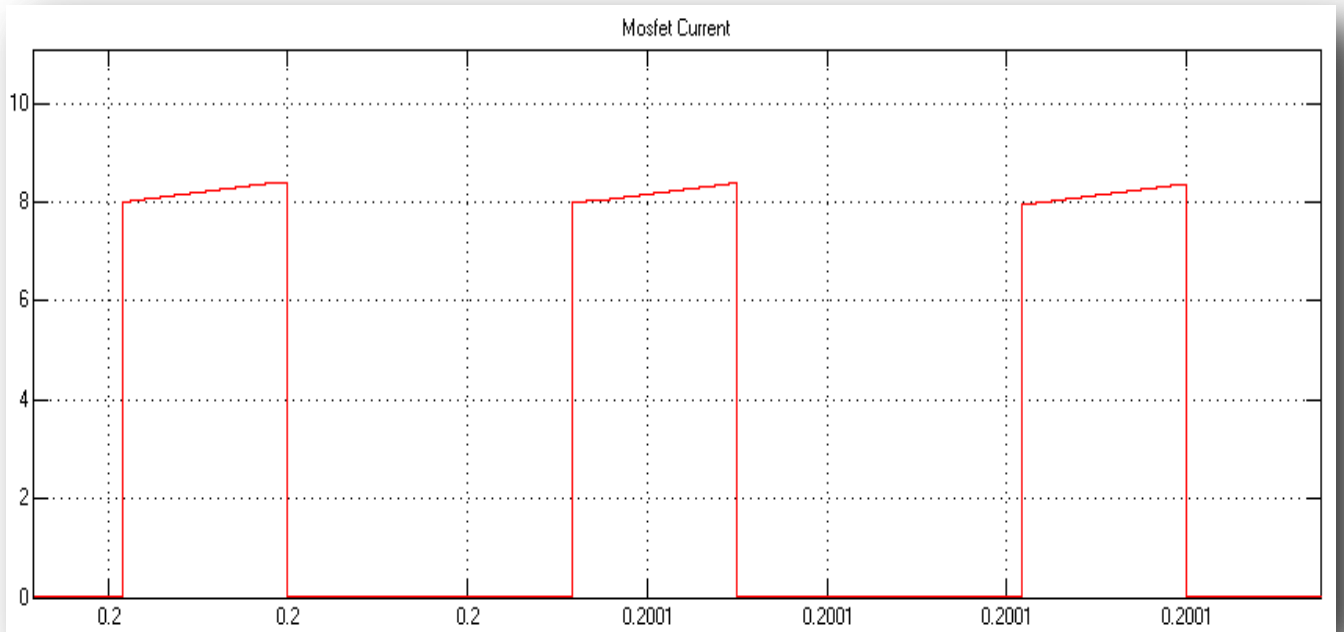
Φορτίο	ΔV_{out}
12	0.18V
24	0.10V
48	0.08V
96	0.10V



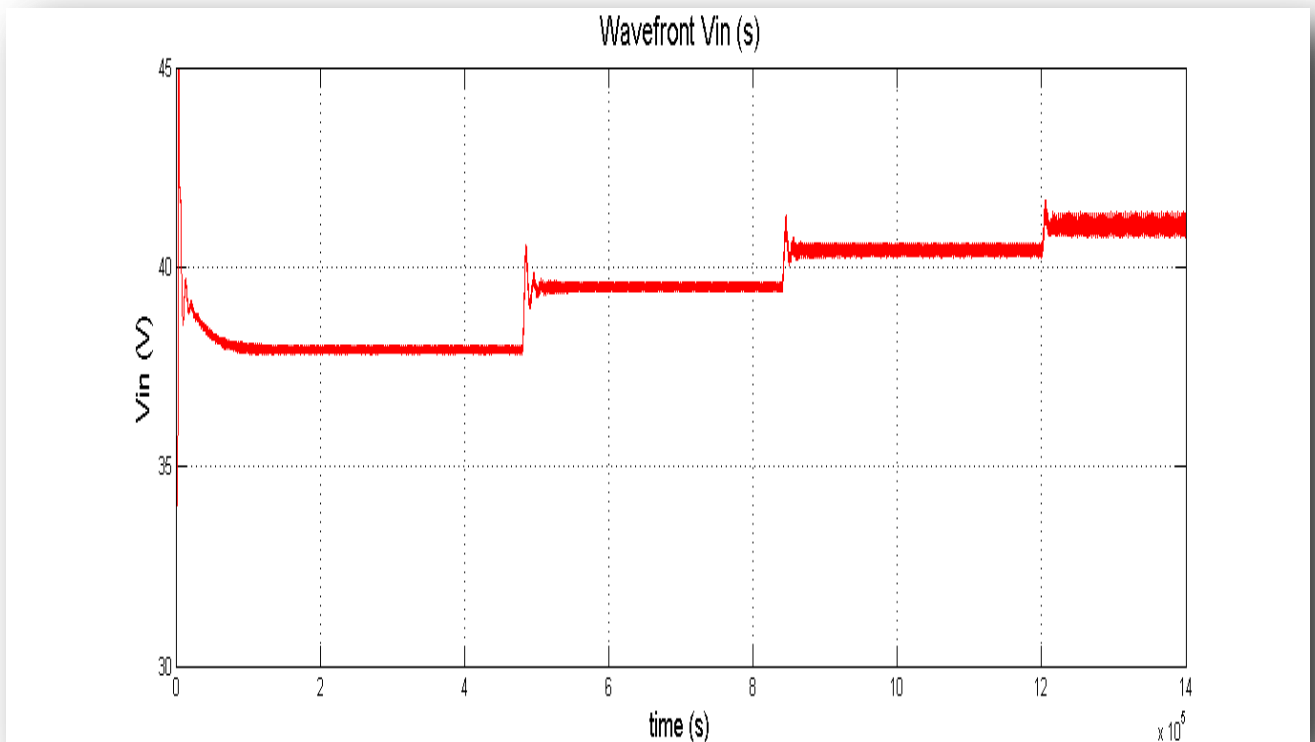
Σχήμα 4.33: το ρεύμα πηνίου I_L

Πίνακας 4.4

Φορτίο	I_L
12	8A
24	4A
48	2A
96	1A



Σχήμα 4.34: το ρεύμα του Mosfet Ισχύος



Σχήμα 4.35: η τάση εισόδου V_{in}

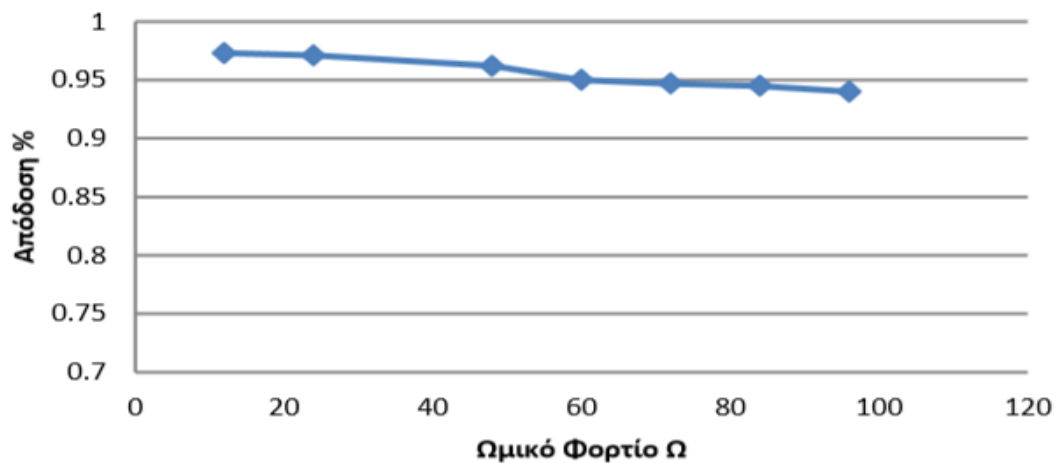
Πίνακας 4.5

Φορτίο	Vin
12	38V
24	39.5V
48	40.5V
96	41V

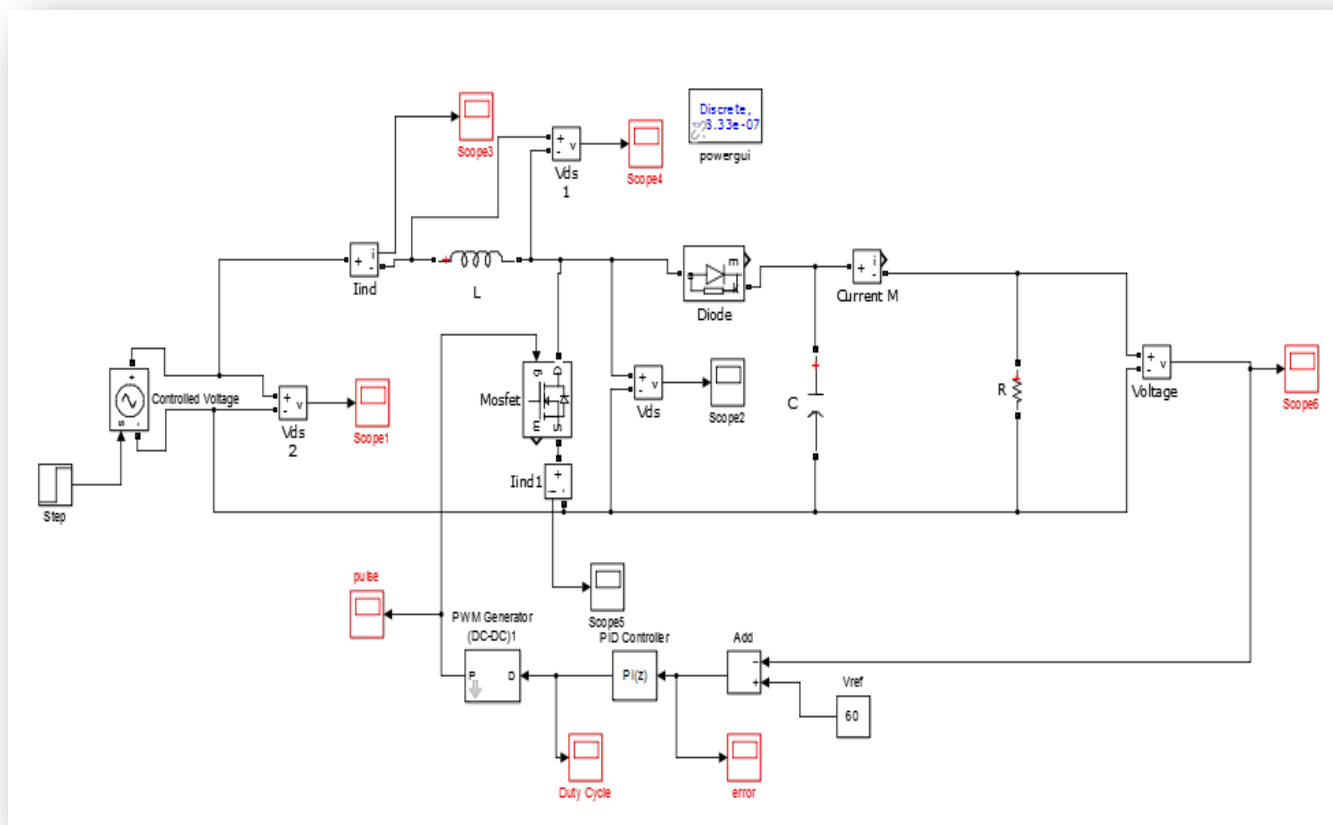
Απόδοση Συστήματος
Πίνακας 4.6

Φορτίο	Απόδοση
12	0.973
24	0.971
48	0.962
60	0.950
72	0.947
84	0.945
96	0.94

Απόδοση Μετατροπέα

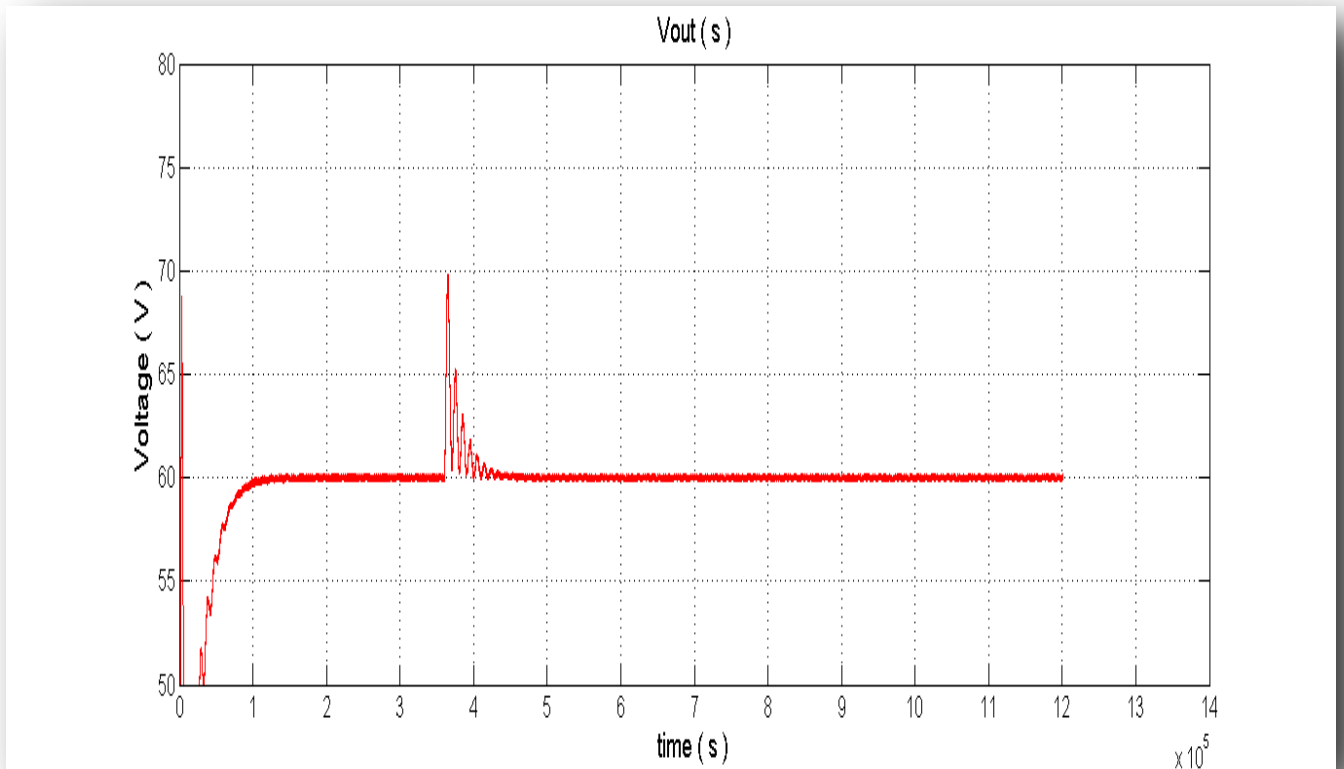


Στην συνέχεια κρατώντας σταθερό το φορτίο στα 12Ω μεταβάλλουμε βηματικά την τάση εισόδου V_{in} από 38V σε 42V με την χρήση μιας ελεγχόμενης πηγής τάσης. Το μοντέλο της προσομοίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.36



Σχήμα 4.36: Το μοντέλο για βηματική μεταβολή της τάσης εισόδου

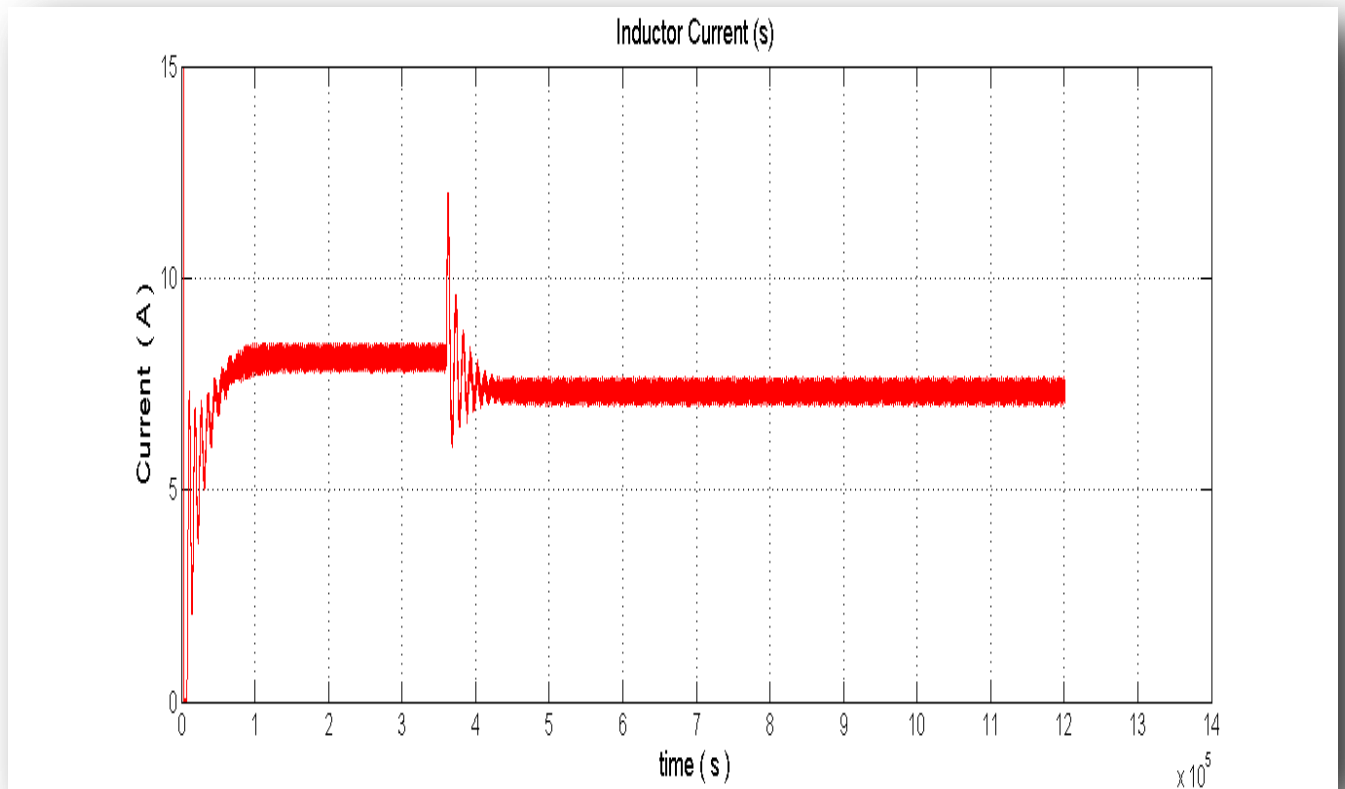
Στο Σχήμα 4.37 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης εξόδου



Σχήμα 4.37: η κυματομορφή της τάσης εξόδου

Παρατηρούμε ότι η υπέρταση που εφαρμόζεται στην έξοδο του μετατροπέα είναι ίση με 70V και ο χρόνος απόσβεσης της είναι ίσος με 0.15s

Στο Σχήμα 4.38 παρουσιάζεται η κυματομορφή του ρεύματος του πηνίου.



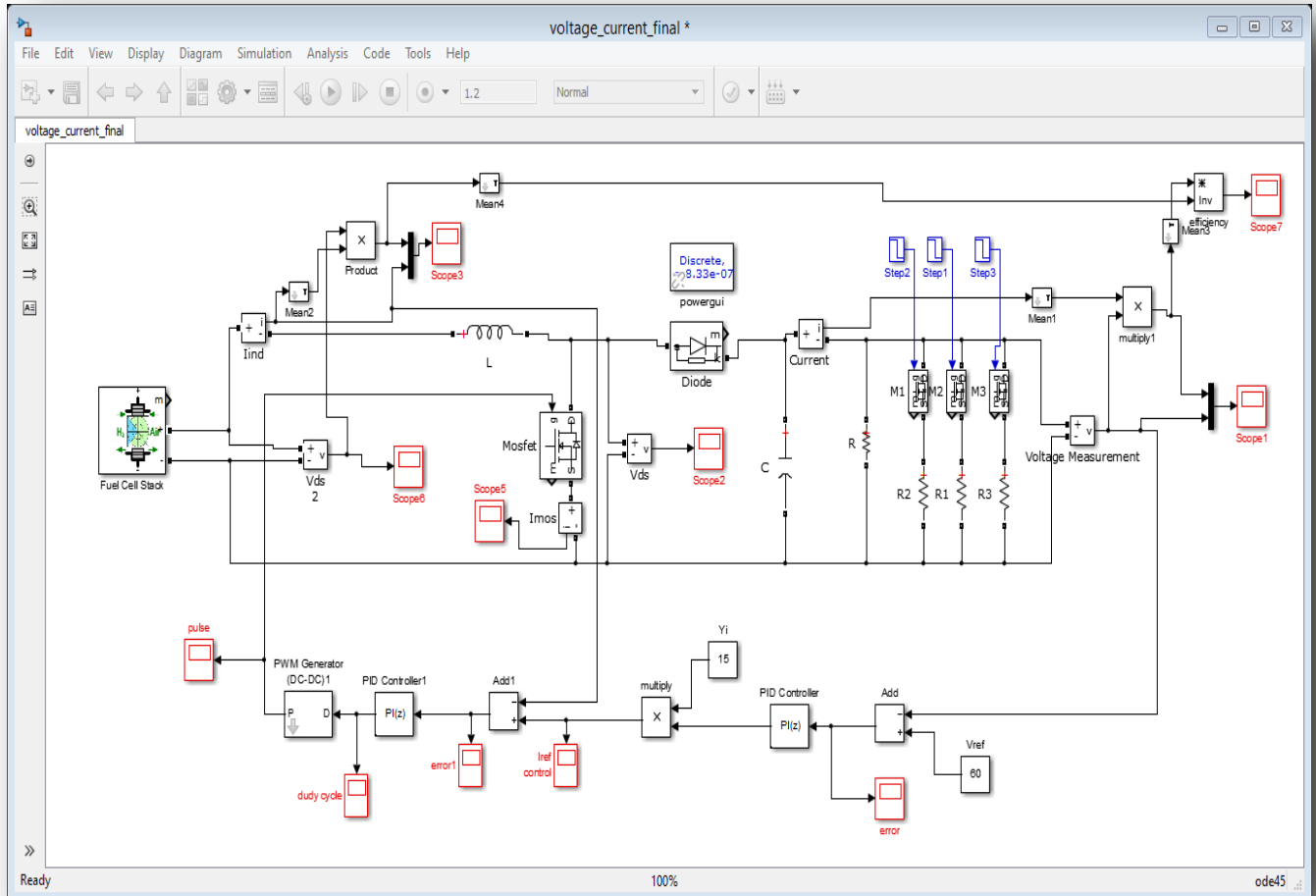
Σχήμα 4.38: η κυματομορφή του ρεύματος πηνίου

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή ρεύματος ισούται με $I_{L,max}=12A$.

4.6 Προσομοίωση Ελέγχου Ρεύματος-Τάσης

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε το σχεδιασμό και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της πειραματικής διάταξης συνεχούς ρεύματος εφαρμόζοντας έλεγχο ρεύματος-τάσης.

Όπως φαίνεται και στο επόμενο Σχήμα 4.39 το μοντέλο της διάταξης μας είναι ίδια με το μοντέλο του ελέγχου τάσης με μόνη διαφορά ότι τώρα έχει προστεθεί ακόμα ένας βρόχος ελέγχου του ρεύματος του τρανζιστορ.



Σχήμα 4.39: το μοντέλο για τον έλεγχο Ρεύματος-Τάσης

4.5.1 Σχεδίαση

Στον έλεγχο ρεύματος-τάσης χρησιμοποιούμε δύο ελεγκτές pi . Οι παράμετροι τους υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο.

Επειδή στην έξοδο του ελεγκτή τάσης λαμβάνουμε ένα πολύ ασθενές σήμα είναι αναγκαία η ενίσχυσή του ώστε να είναι το νέο σήμα να είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το ρεύμα του πηνίου με το οποίο συγκρίνεται. Ουσιαστικά η σταθερή παράμετρος παίζει τον ρόλο μιας εικονικής αγωγιμότητας. Λάβαμε καλύτερες κυματομορφές εξόδου για τιμή $Yi=15$. Θα μπορούσαμε εναλλακτικά να υποβιβάσουμε το ρεύμα του πηνίου με μια εικονική αντίσταση Ri .

Η συνάρτηση μεταφοράς τάσης κλειστού βρόχου είναι

$$\frac{V_o}{d} = \frac{VgR - \left(\frac{VgL}{D'}\right) * s}{RD'^2 + L * s + RLC * s^2}$$

Με την χρήση του Matlab εξάγονται η συνάρτηση μεταφοράς τάσης κλειστού βρόχου συνεχούς και διακριτού χρόνου όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.40 και Σχήμα 4.41.

$$\frac{V(s)}{d(s)} = \frac{[456 - s(0.09545)]}{[4.808 + s(0.0016) + s^2(8.968e - 06)]}$$

Εξ 4.17

$$\frac{V(z)}{d(z)} = \frac{[0.008883 - z(0.008848)]}{[0.9999 - z(2) + z^2]}$$

Εξ 4.18

Όπου πάλι

$$Ts = \frac{1}{60 * fmax} = \frac{1}{60 * 20000} = 8.33e - 07s$$

```
>> sys=tf(num,den)

sys =

      -0.09545 s + 456
-----
 8.968e-06 s^2 + 0.00159 s + 4.808

Continuous-time transfer function.
```

Σχήμα 4.40: συνάρτηση μεταφοράς τάσης συνεχούς χρόνου

Και

```
sysd =

 -0.008848 z + 0.008883
-----
      z^2 - 2 z + 0.9999

Sample time: 8.33e-07 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Σχήμα 4.41: συνάρτηση μεταφοράς τάσης διακριτού χρόνου

Έπειτα με την εκτέλεση της εντολής `pidtool(sysd,'pi')` εμφανίζεται το εργαλείο pid tuner όπου προκείμεν οι τιμές των κερδων K_p και K_i του pi ελεγκτή ώστε το σύστημα να παραμένει σε ευστάθεια.

Controller parameters	
	Tuned
Kp	1.4508e-05
Ki	0.58031
Kd	
Tf	

Σχήμα 4.42: οι τιμές των παραμέτρων K_p, K_i του p_i ελεγκτή.

Όμοια και για τον εσωτερικό βρόχο η συνάρτηση μεταφοράς του ρεύματος είναι.

$$\frac{i(s)}{d(s)} = \frac{\frac{Vg}{D'}(2 - D') - \left(\frac{VgRC}{D'}\right) * s}{RD'^2 + L * s + RLC * s^2}$$

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου συνεχούς χρόνου του ρεύματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.43.

$$\frac{i(s)}{d(s)} = \frac{(82.06) - (0.3386)s}{4.808 + (0.00159)s + (8.968e - 06)s^2}$$

Εξ 4.19

```

SYS =

      -0.3386 s + 82.06
-----
 8.968e-06 s^2 + 0.00159 s + 4.808

Continuous-time transfer function.

```

Σχήμα 4.43: Συνάρτηση μεταφοράς συνεχούς χρόνου του ρεύματος

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου διακριτού χρόνου του ρεύματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.44.

$$\frac{i(z)}{d(z)} = \frac{(0.5929) - (0.4664)z}{0.9912 - (1.99)z + z^2}$$

Εξ 4.20

```
>> SYSDD = c2d(sys,Ts)

SYSDD =

      -0.4664 z + 0.5929
      -----
      z^2 - 1.99 z + 0.9912
```

Σχήμα 4.45: Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου διακριτού χρόνου του ρεύματος

Και με την χρήση του εργαλείου PID tuner λαμβάνουμε τις τιμές των παραμέτρων K_p, K_i του pi ελεγκτή του ρεύματος ώστε το σύστημα να παραμένει σε ευστάθεια.

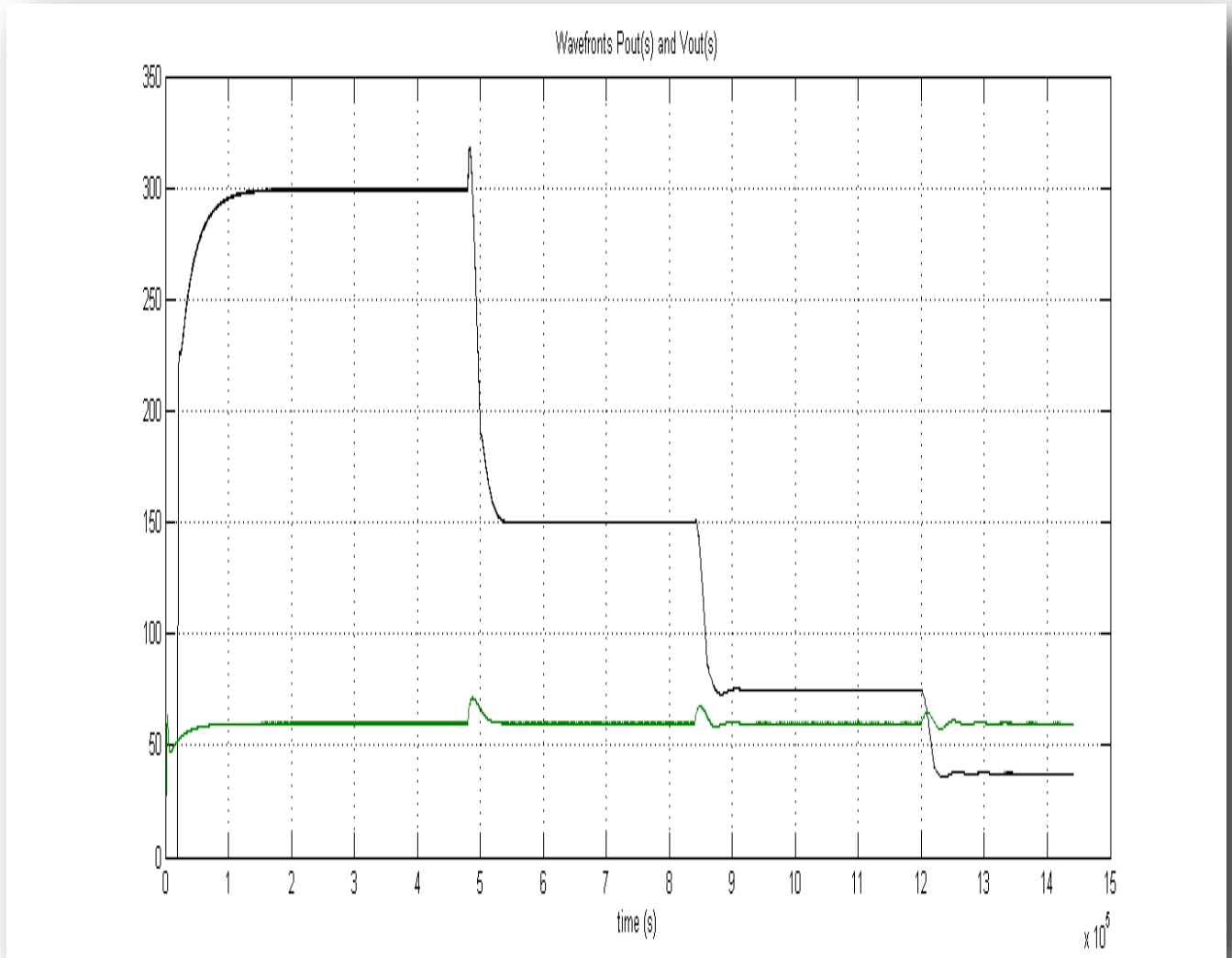
Controller parameters	
	Tuned
K_p	0.38394
K_i	995.1005
K_d	
T_f	

Σχήμα 4.45: οι τιμές των παραμέτρων K_p, K_i του pi ελεγκτή

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων K_p, K_i των ελεγκτών τάσης και ρεύματος προκύπτουν μετά από την δοκιμή μιας πλειάδας συνδιασμών των παραμέτρων αυτών με κριτήριο η αρχική απόκριση του συστήματος να είναι η ίδια με τον Έλεγχο Τάσης, έτσι ώστε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας να είναι συγκρίσιμα.

4.6.2 Αποτελέσματα

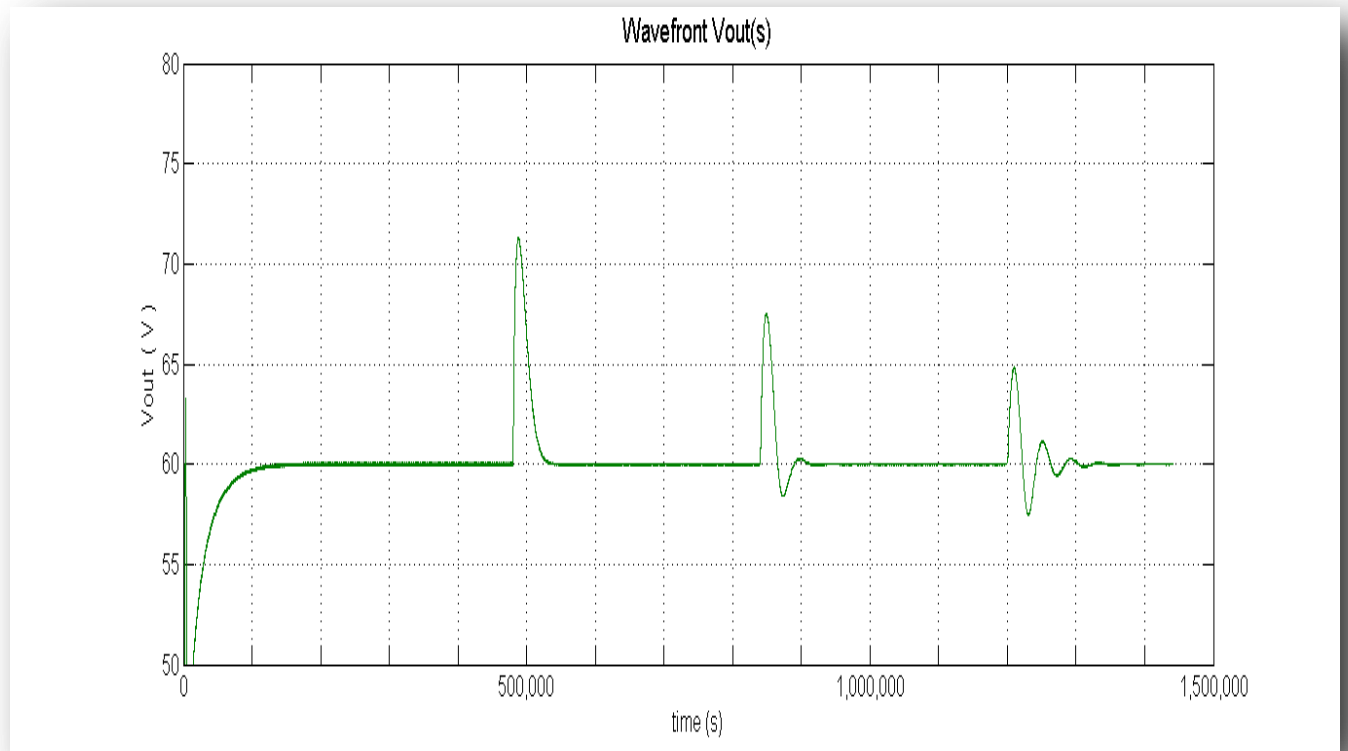
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι κυματομορφές που λαμβάνουμε από την εκτέλεση των προσομοιώσεων καθώς και τα αποτελέσματα σε μορφή πινάκων.



Σχήμα 4.51: Κυματομορφές Vout, Pout

Πίνακας 4.8

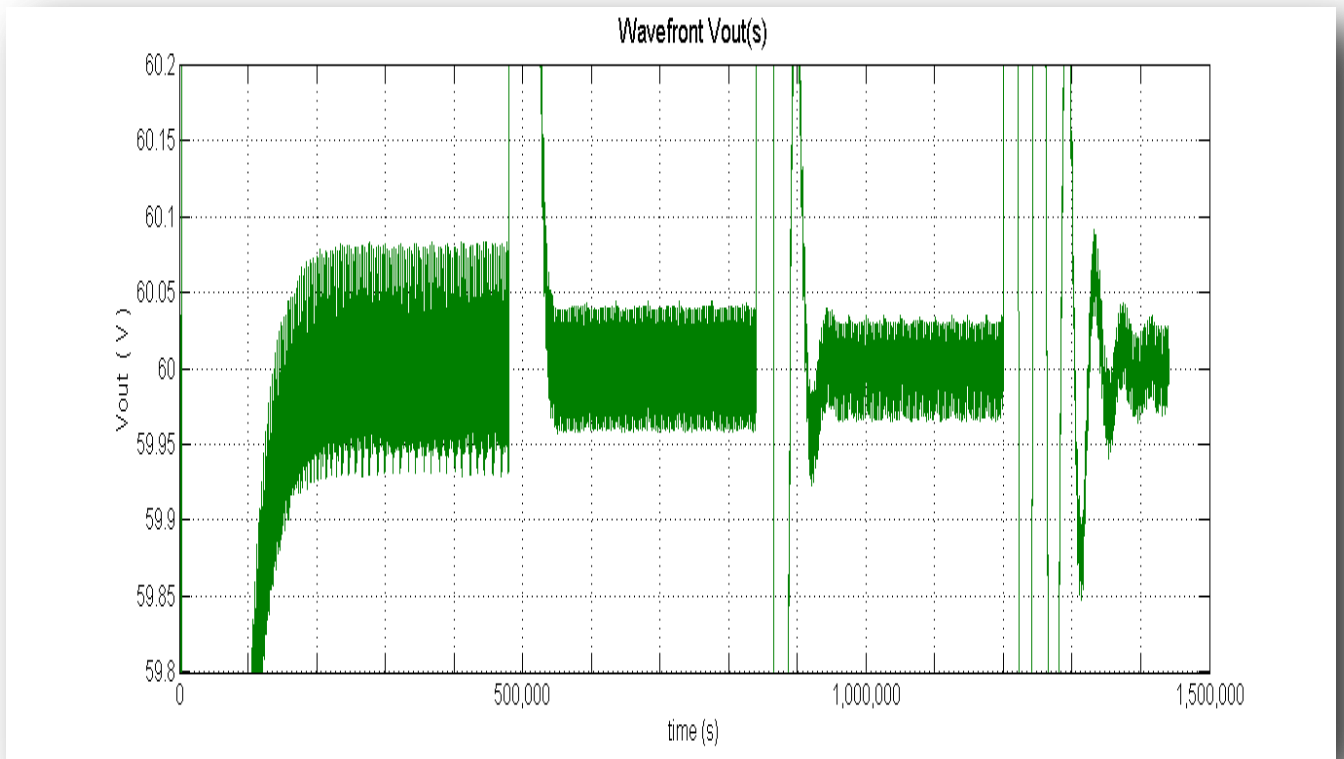
Χρόνος	Φορτίο	Τάση	Ισχύς
0.0	12Ω	60V	300W
0.47	24Ω	60V	150W
0.85	48Ω	60V	75W
1.2	96Ω	60V	37.5W



Σχήμα 4.52: κυματομορφή V_{out}

Πίνακας 4.9

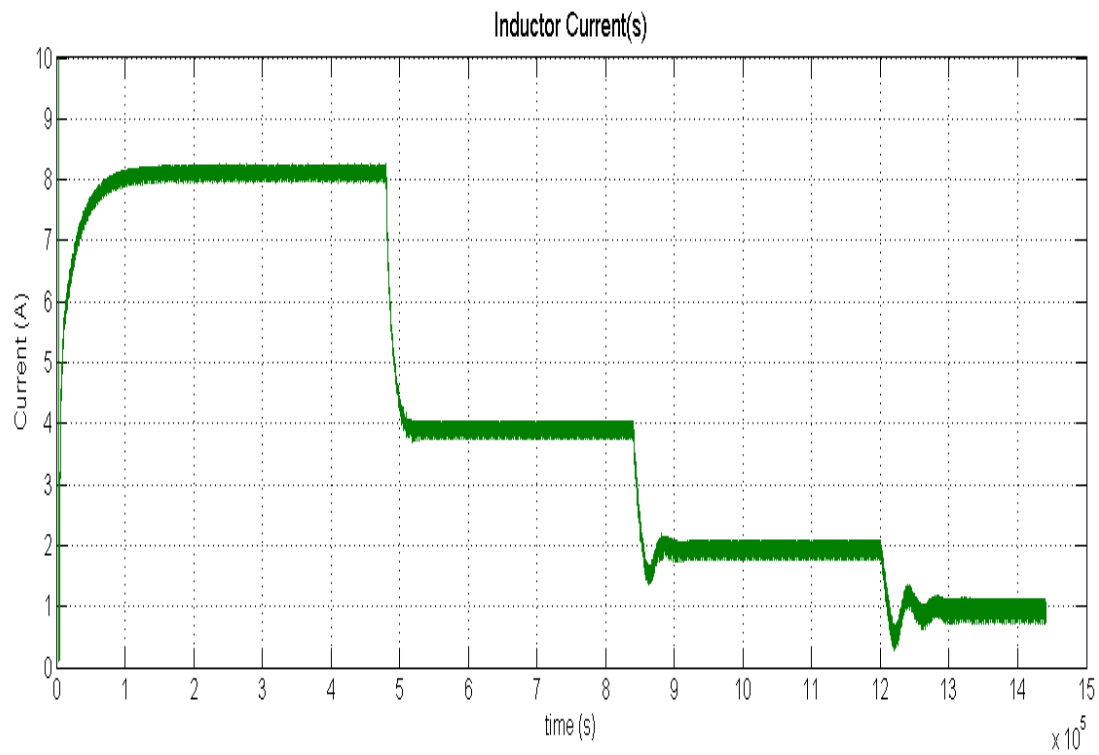
Φορτίο	Χρόνος Απόκρισης	V_{max}
12	0.15s	-
24	0.05s	72V
48	0.07s	67V
96	0.10s	65V



Σχήμα 4.53: διακύμανση τάσης ΔV_{out}

Πίνακας 4.10

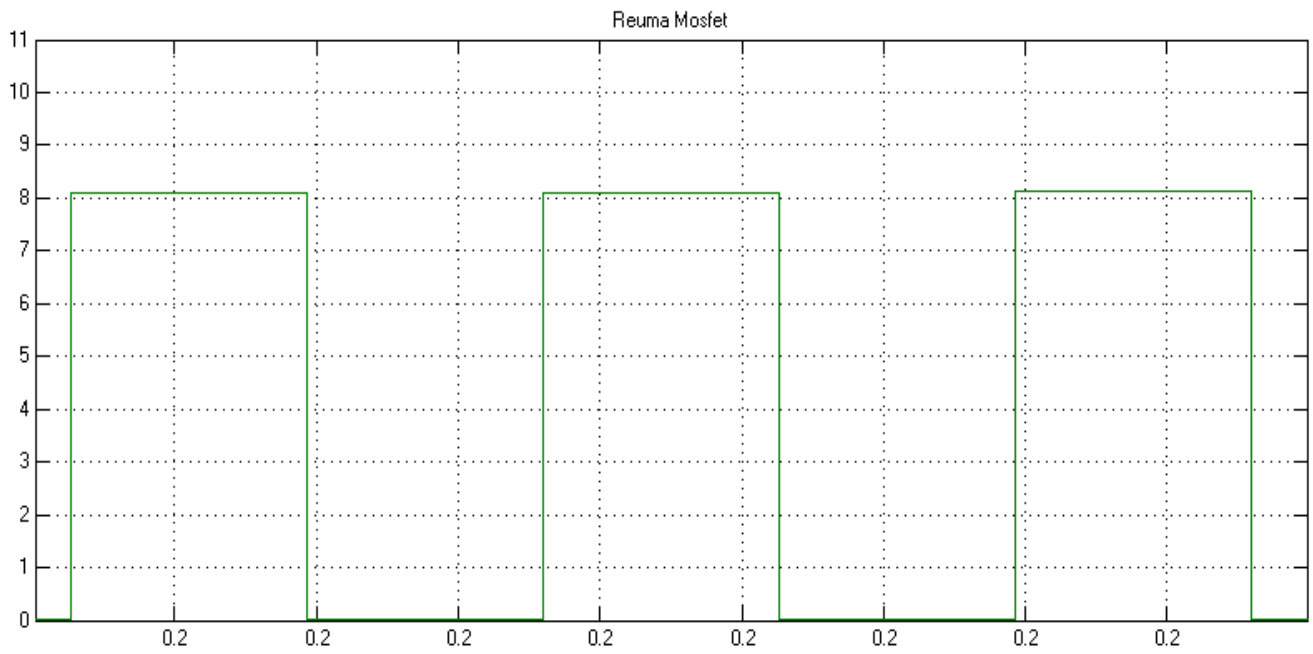
Φορτίο	ΔV_{out}
12	0.08V
24	0.04V
48	0.04V
96	0.04V



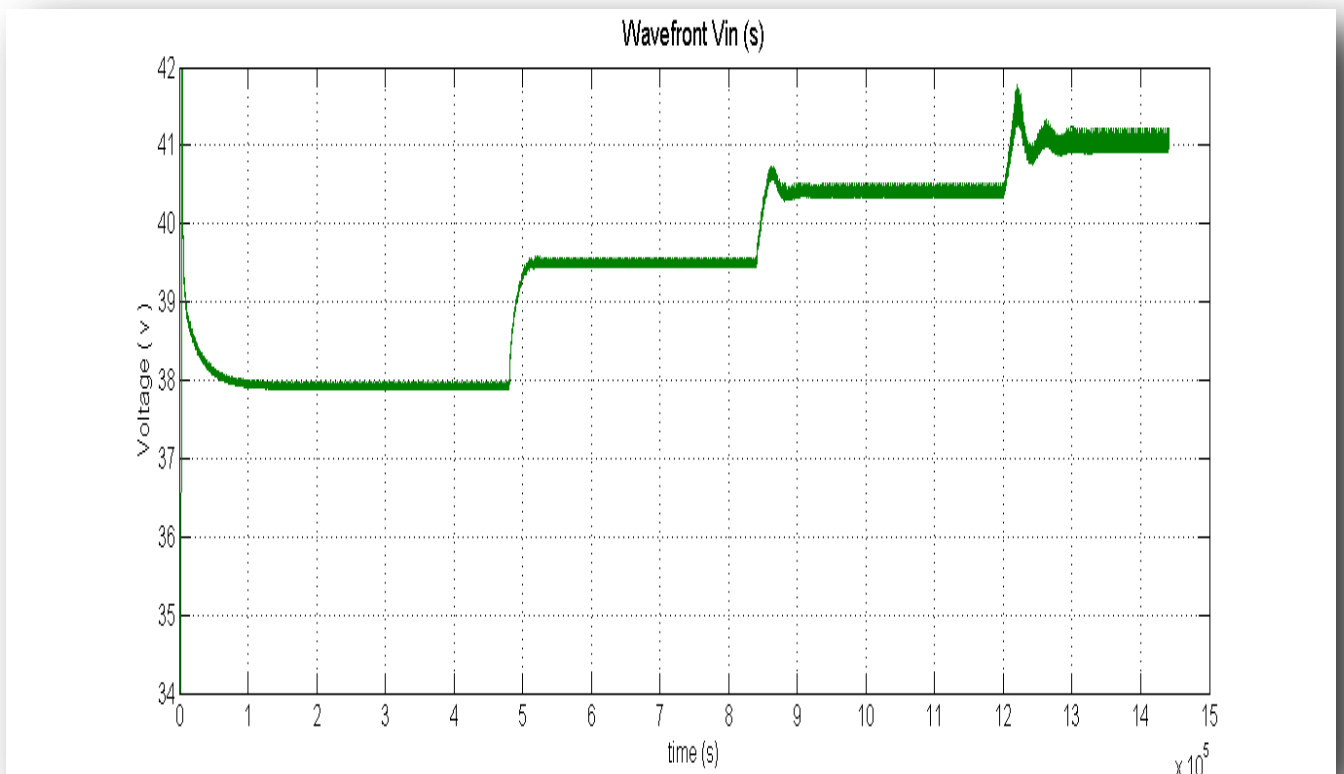
Σχήμα 4.54: το ρεύμα πηνίου I_L

Πίνακας 4.11

Φορτίο	I_L
12	8A
24	4A
48	2A
96	1A



Σχήμα 4.55: το ρεύμα του Mosfet Ισχύος



Σχήμα 4.56: η τάση εισόδου Vin

Πίνακας 4.12

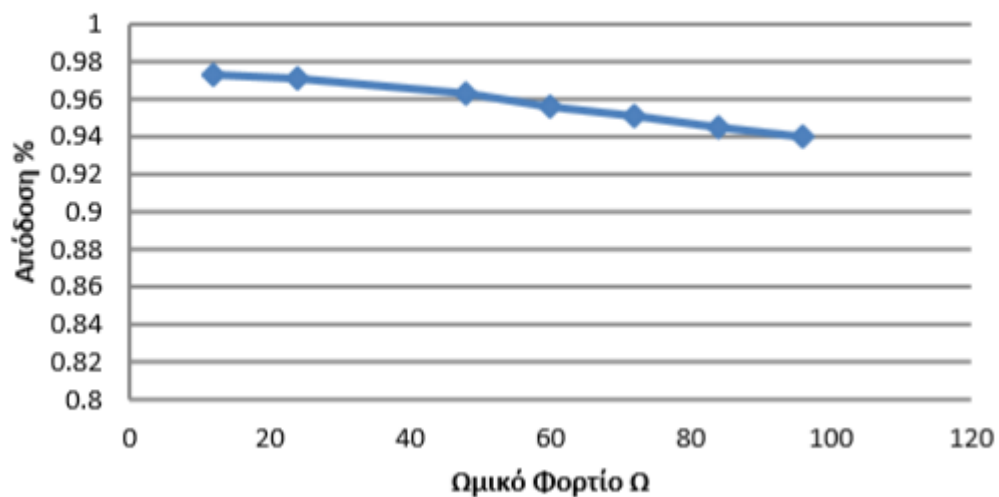
Φορτίο	Vin
12	38V
24	39.5V
48	40.5V
96	41V

Απόδοση Συστήματος

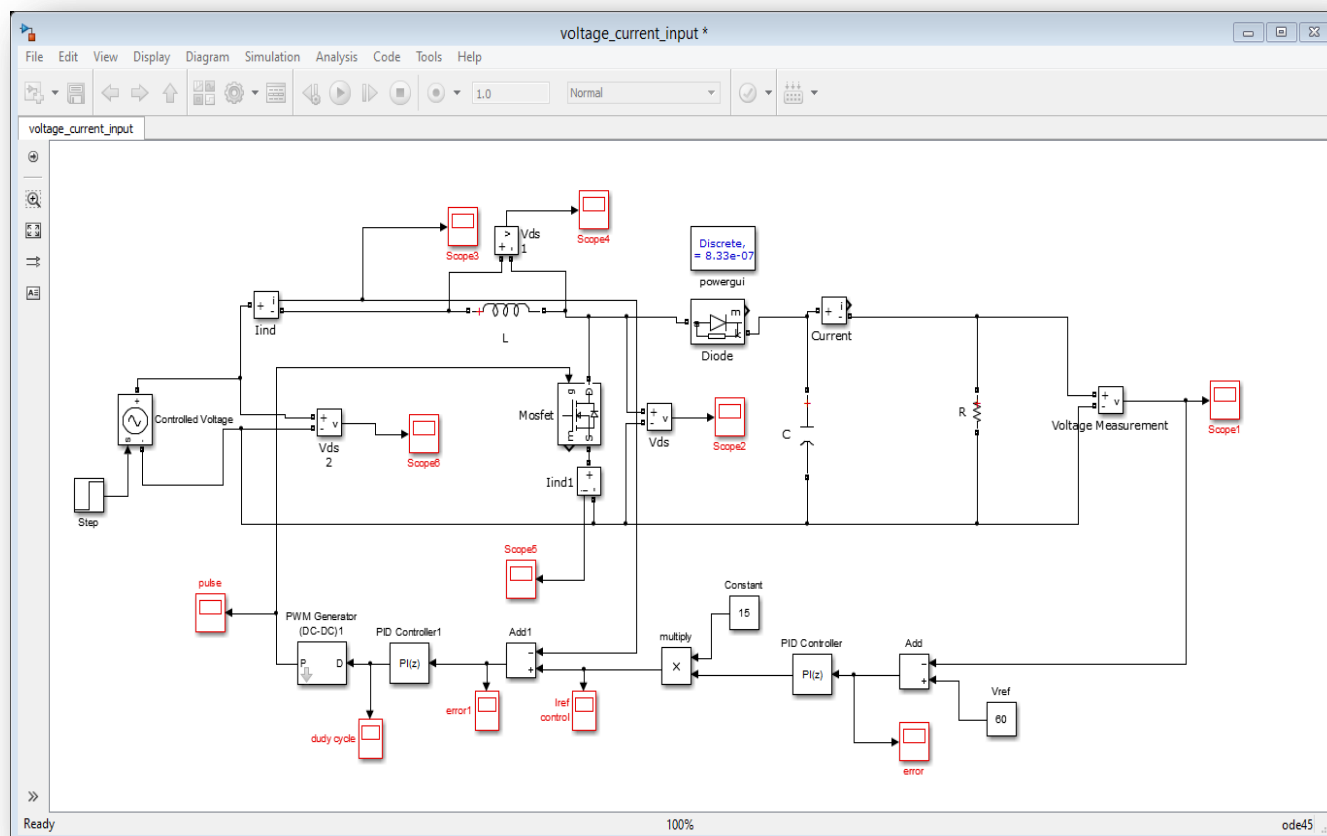
Πίνακας 4.13

Φορτίο	Απόδοση
12	0.973
24	0.971
48	0.963
60	0.956
72	0.951
84	0.945
96	0.94

Απόδοση Μετατροπέα

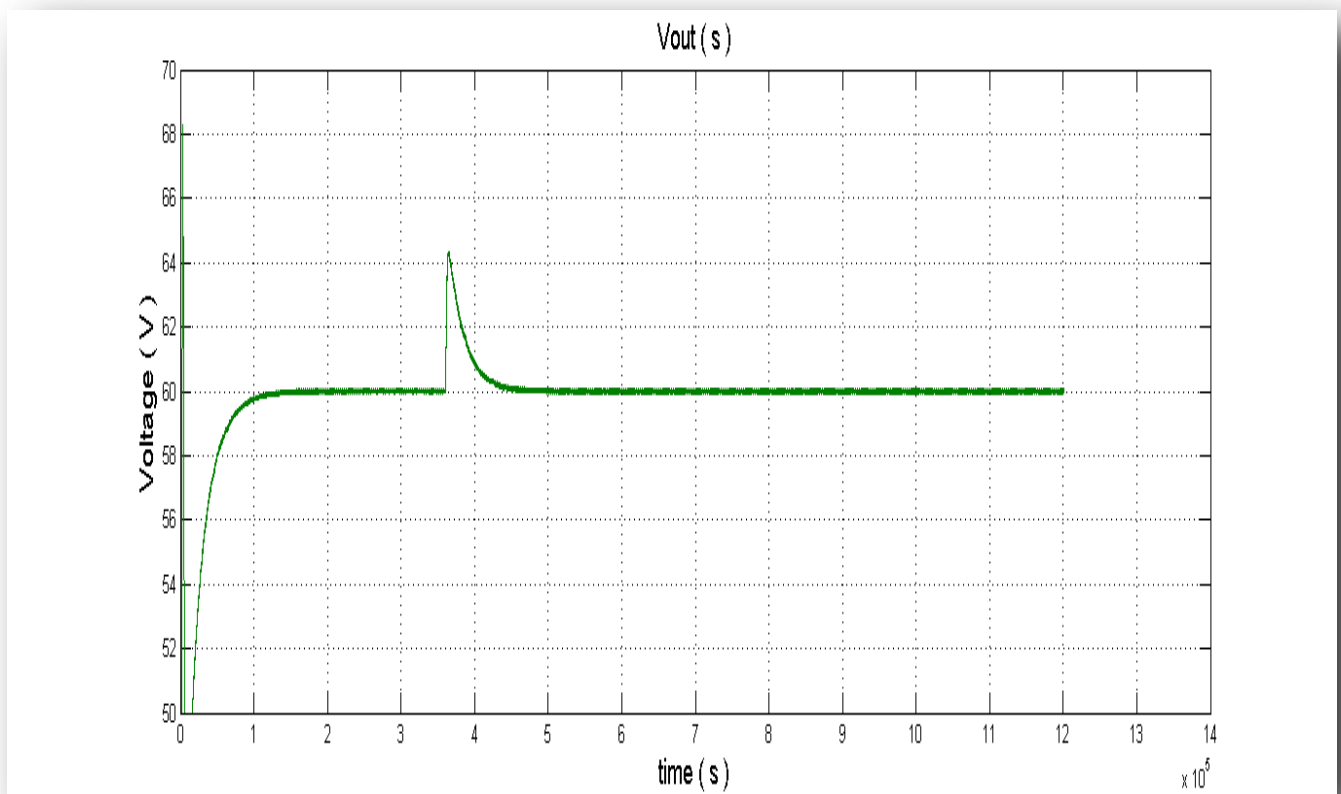


Στην συνέχεια κρατώντας σταθερό το φορτίο στα 12 Ω μεταβάλλουμε βηματικά την τάση εισόδου V_{in} από 38V σε 42V με την χρήση μιας ελεγχόμενης πηγής τάσης. Το μοντέλο της προσομοίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.57



Σχήμα 4.57: Το μοντέλο για βηματική μεταβολή της τάσης εισόδου

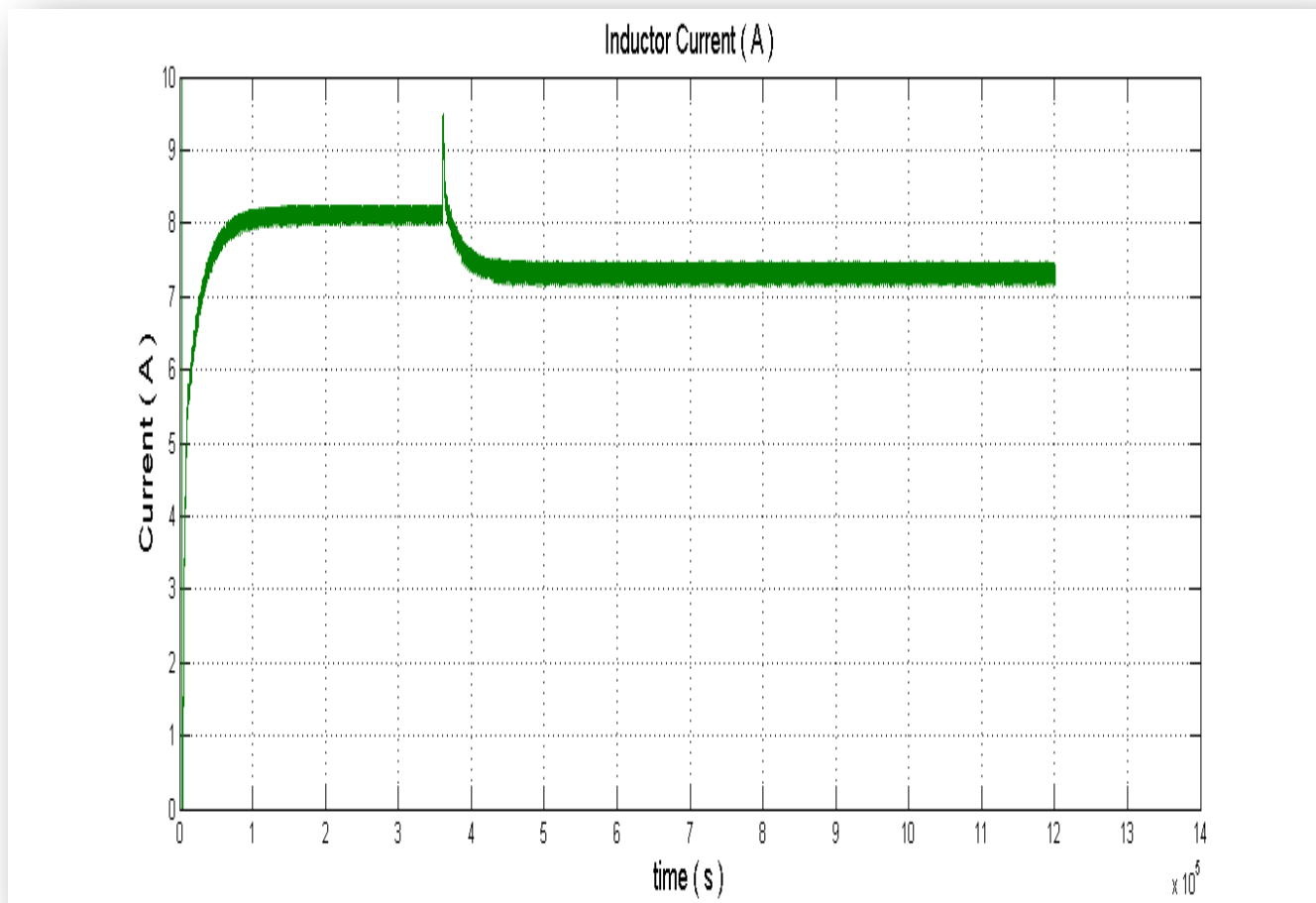
Στο Σχήμα 4.58 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης εξόδου



Σχήμα 4.58: η κυματομορφή της τάσης εξόδου

Παρατηρούμε ότι η υπέρταση που εφαρμόζεται στην έξοδο του μετατροπέα είναι ίση με 64.2V και ο χρόνος απόσβεσης της είναι ίσος με 0.1s

Στο Σχήμα 4.59 παρουσιάζεται η κυματομορφή του ρεύματος του πηνίου



Σχήμα 4.59: η κυματομορφή του ρεύματος πηνίου

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή ρεύματος ισούται με $I_{L,max}=9.5A$.

4.6 Παρατηρήσεις-Σύγκριση Αποτεσμάτων-Συμπεράσματα

Στο Πίνακα 4.14 και Πίνακα 4.15 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα από διάφορες παραμέτρους που θεωρούμε σημαντικές για την σύγκριση των δύο διαφορετικών ελέγχων:

Πίνακας 4.14.Αποτελέσματα Ελέγχου Τάσης

(α)για μεταβολή R_{out}

Φορτίο	Χρόνος Απόκρισης	V_{max}	ΔV_{out}
12	0.15s	-	0.18V
24	0.05s	68V	0.1V
48	0.04s	63V	0.08V
96	0.03s	62V	0.1V

(β)για μεταβολή V_{in}

V_{max}	I_{L,max}	Dt
70V	12A	0.15s

Πίνακας 4.15 Αποτελέσματα Ελέγχου Ρεύματος-Τάσης

(α)για μεταβολή R_{out}

Φορτίο	Χρόνος Απόκρισης	Vmax	ΔV_{out}
12	0.15s	-	0.08V
24	0.05s	72V	0.04V
48	0.07s	67V	0.04V
96	0.1s	65V	0.04V

(β)για μεταβολή V_{in}

Vmax	$I_{L,max}$	dt
64.2V	9.5A	0.1s

Συγκρίνοντας τις κυματομορφές και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους προηγούμενους πίνακες για τις δύο τρόπους ελέγχου κλειστού βρόχου, Τάσης και Ρεύματος-Τάσης, κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

1. Στον Έλεγχο Τάσης κατά την εκκίνηση της κυψέλης καυσίμου απαιτείται χρόνος $t_1=0.15s$ για να εφαρμοστεί τάση 60V στο φορτίο, όπως και στον Έλεγχο Ρεύματος-Τάσης.
2. Όταν μεταβληθεί το φορτίο από τα 12Ω στα 24Ω τόσο στον Έλεγχο Τάσης όσο και στον Έλεγχο Ρεύματος-Τάσης απαιτείται χρόνος $t_2=0.05s$ για να αποκατασταθεί η τάση 60V στο φορτίο.
3. Όταν μεταβληθεί το φορτίο από τα 24Ω στα 48Ω στον Έλεγχο Τάσης απαιτείται χρόνος $t_3=0.04s$ για να αποκατασταθεί η τάση 60V στο φορτίο, ενώ στον Έλεγχο Ρεύματος-Τάσης απαιτείται χρόνος $t_3=0.05s$ για την αποκατάσταση της τάσης.

4. Όταν μεταβληθεί το φορτίο από τα 48Ω στα 96Ω στον Έλεγχο Τάσης απαιτείται χρόνος $t_3=0.03s$ για να αποκατασταθεί η τάση $60V$ στο φορτίο, ενώ στον Έλεγχο Ρεύματος-Τάσης απαιτείται χρόνος $t_3=0.1s$ για την αποκατάσταση της τάσης.
5. Στον Έλεγχο Τάσης έχουμε διακύμανση της τάσης εξόδου $\Delta V=0.18V$, ενώ στον Έλεγχο Ρεύματος-Τάσης έχουμε διακύμανση της τάσης εξόδου $\Delta V=0.08V$ στα 12Ω .
6. Η απόδοση του μετατροπέα είναι ίδια για τους δύο τρόπους.
7. Κατά την βηματική μεταβολή της τάσης εισόδου στον Έλεγχο Τάσης έχουμε $V_{max}=70V$, $I_{max}=12A$, και χρόνο αποκατάστασης $dt=0.15s$ ενώ στον Έλεγχο Ρεύματος-Τάσης έχουμε $V_{max}=64.2V$, $I_{max}=9.5A$, και χρόνο αποκατάστασης $dt=0.1s$.

Συμπεράσματα

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα.

- Απόκριση.
Ο Έλεγχος Τάσης είναι πιο γρήγορος και έχει ως αποτέλεσμα να αποσβένει απότομές μεταβολές της τάσης σε μικρότερο χρονικό διάστημα.
- Ακρίβεια.
Ο Έλεγχος Ρεύματος-Τάσης προσφέρει μικρότερη διακύμανση στην τάση εξόδου.
- Απόδοση
Η απόδοση του μετατροπέα είναι ίδια και στους δύο ελέγχους.
- Προστασία.
Ο έλεγχος ρεύματος-τάσης προσφέρει καλύτερη προστασία στον μετατροπέα ανύψωσης αφού μας δίνει την δυνατότητα να ελέγξουμε άμεσα το ρεύμα του πηνίου. Μπορούμε έτσι να καθορίσουμε μια μέγιστη τιμή ρεύματος την οποία ο εσωτερικός ελεγκτής ρεύματος θα εξασφαλίζει ότι δεν θα ξεπεραστεί.

ΜΕΡΟΣ Β-ΠΕΙΡΑΜΑ

Κατασκευή μετατροπέα και μετρήσεις ανοικτού βρόχου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Κατασκευή μετατροπέα ανύψωσης και πειραματική διάταξη

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε την πειραματική διάταξη της παρούσας εργασίας η οποία αποτελείται από την ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος 150 W, τον μετατροπέα ανύψωσης τάσης που κατασκευάστηκε για τους σκοπούς της εργασίας αυτής, το κύκλωμα παλμοδότησης, το dc φορτίο που θέλουμε να τροφοδοτήσουμε, τα μετρητικά όργανα και τις περιφερειακές συσκευές.

5.2 Κατασκευή μετατροπέα ανύψωσης

Στο κεφάλαιο 3 είχαμε δει την σχεδίαση του μετατροπέα ανύψωσης. Για να προχωρήσουμε στην υλοποίηση του μετατροπέα χρειάστηκε να βρούμε τα κατάλληλα στοιχεία από το εμπόριο. Επειδή οι τιμές των στοιχείων είναι τυποποιημένες δουλέψαμε με στοιχεία οι τιμές των οποίων προσέγγιζαν σε ικανοποιητικό βαθμό τις θεωρητικές τιμές.

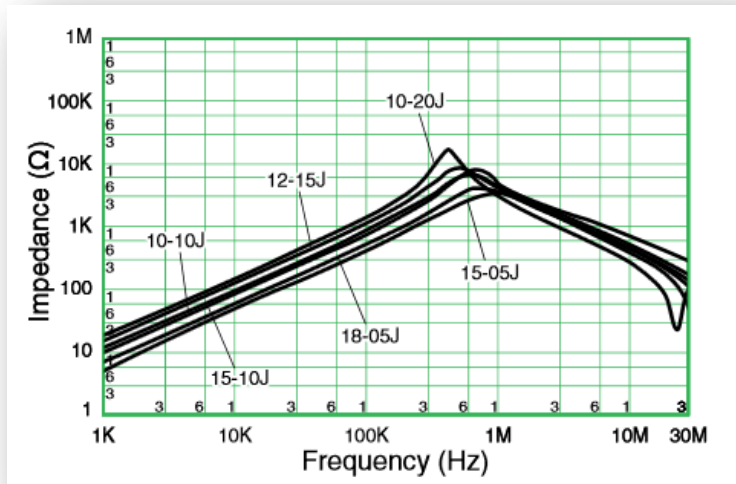
5.2.1 Πηνίο

Το πηνίο είναι το μοντέλο SC 10-10 J² της εταιρείας Kemet Charged και έχει αντοχή ρεύματος dc μέχρι 18 A. Η dc αντίσταση του πηνίου είναι πάρα πολύ μικρή $R_{dc}=7m\Omega$



Σχήμα 5.1: το πηνίο SC 10-10 J²

Η τιμή της αυτεπαγωγής του για συχνότητα λειτουργίας $f=20kHz$ είναι ίση με $L=1.59mH$ όπως προκύπτει από την γραφική παράσταση που ακολουθεί.



Σχήμα 5.2: γραφική παράσταση ωμικής αντίδρασης του πηνίου συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας

$$\text{Ισχύει } R = \omega L = 2\pi f L$$

$$\text{Οπότε } L = \frac{R}{2\pi f} = \frac{200}{2\pi \cdot 20000} = 1.59\text{mH}$$

5.2.2 Πυκνωτής

Ο πυκνωτής που επιλέξαμε είναι ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής χωρητικότητας $C=470\mu\text{F}$ της εταιρείας Nichicon που μας δίνει την επιθυμητή κυμάτωση της τάσης εξόδου. Ο πυκνωτής παρουσιάζεται στο Σχήμα που ακολουθεί.

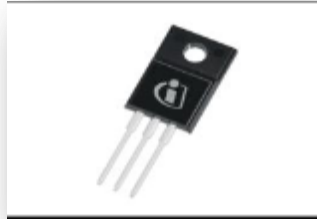


Σχήμα 5.3: ο ηλεκτροχημικός πυκνωτής χωρητικότητας $C=470\mu\text{F}$ της εταιρείας Nichicon

5.2.3 Mosfet

Το Mosfet ισχύος που χρησιμοποιήσαμε στην κατασκευή του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι το IPA086N10N3G της εταιρείας Infineon τύπου-n με τα εξής βασικά χαρακτηριστικά

- τάση διάσπασης ορθής πόλωσης $V_{dss} = 100V$ καθώς και η ενεργός τιμή του ρεύματος που το διαρρέει σε κατάσταση αγωγής $I_{mos}=45A$.
- αντίσταση μεταξύ υποδοχής (Drain) και πηγής (Source) $R_{DS(on),max}=8.6m\Omega$ που κρίνεται πολύ ικανοποιητική και μας επιτρέπει να έχουμε πολύ μικρές απώλειες αγωγής.



Σχήμα 5.4: Το Mosfet ισχύος IPA086N10N3G της Infineon

Επιπλέον λόγοι που διαλέξαμε αυτό το διακοπτικό στοιχείο και όχι κάποιο άλλο από τα εναλλακτικά είναι γιατί είχε καλά χαρακτηριστικά αγωγής, καθώς και η τεχνική συσκευασίας (TO-220FP) μας βόλεψε γιατί η πλάτη του είναι μονωμένη και είναι πιο εύκολη η σύνδεσή του στην ψυχρά.

5.2.3 Δίοδος

Η δίοδος που χρησιμοποιήσαμε στην κατασκευή του μετατροπέα ανύψωσης τάσης είναι το μοντέλο DPG30C200PB της εταιρείας IXYS που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5 με τα εξής βασικά ονομαστικά χαρακτηριστικά :

- ανάστροφη τάση διάσπασης της διόδου $V_{RRM} = 200$
- ρεύμα της διόδου $I_{D(AV)} = 15 A$
- χρόνος αναστροφής-ανάκτησης(reverse-recovery time)=35 ns.

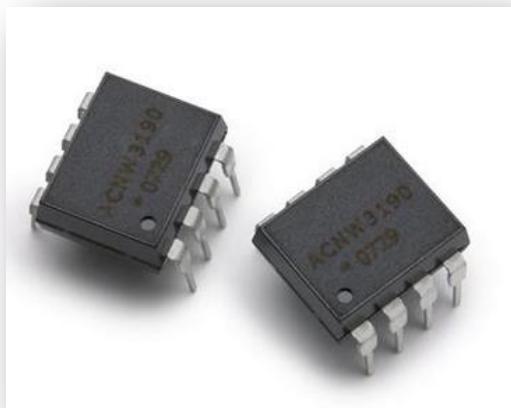


Σχήμα 5.5: Η δίοδος DPG30C200PB της εταιρείας IXYS

5.2.4 Κύκλωμα Παλμοδότησης Mosfet Ισχύος

Για λόγους προστασίας θέλουμε να απομονώσουμε το κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα από την είσοδο. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο πέρα από την απομόνωση που προσφέρει είναι υπεύθυνο για την ορθή πόλωση του Mosfet Ισχύος ρυθμίζοντας την τάση στην είσοδο του και παρέχοντας την απαιτούμενη ενέργεια.

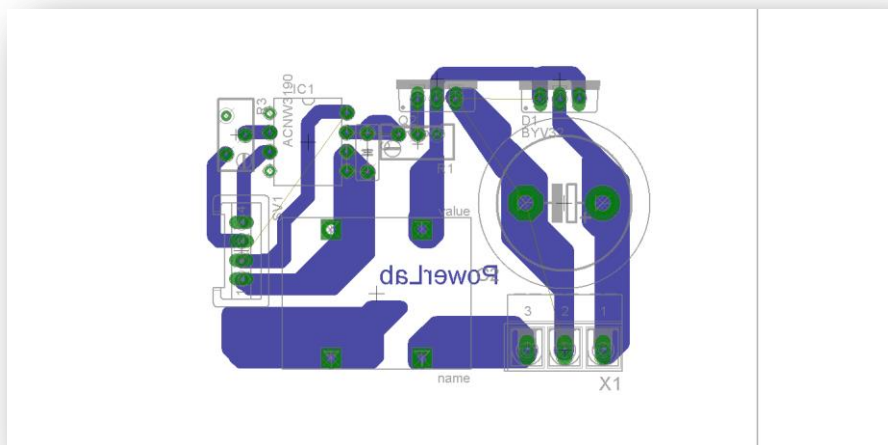
Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιούμε είναι το ACNW3190 της Avago και φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα. Η αντίσταση που χρησιμοποιούμε στην είσοδο του drive είναι $R_{in}=190\Omega$ και στην έξοδο $R_g = 5.7\Omega$, ενώ οι κεραμικοί πυκνωτές είναι $0.1\mu F$.



Σχήμα 5.6: Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ACNW3190 της Avago

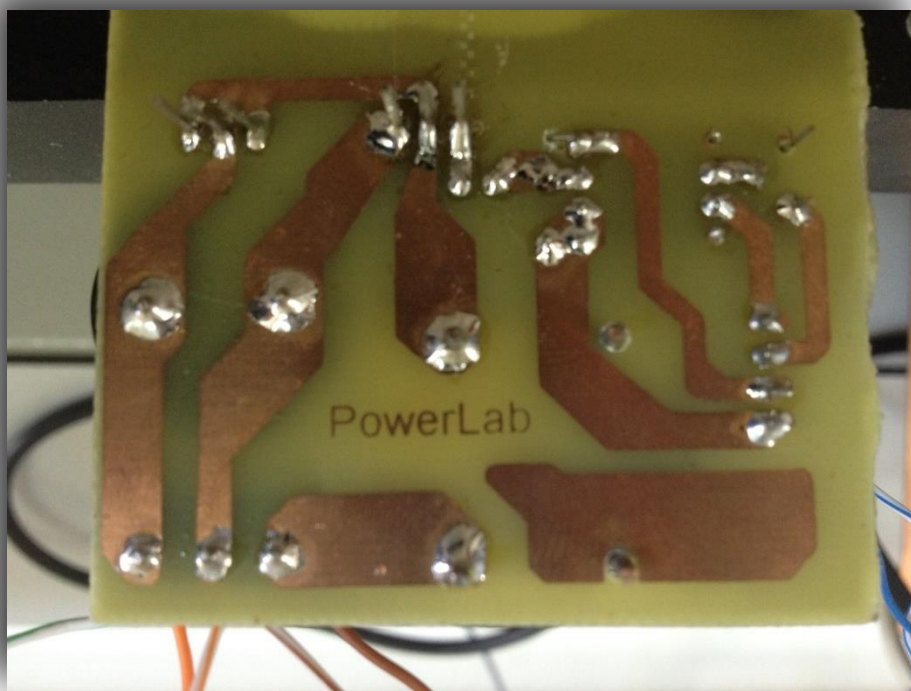
5.2.5 Σχεδίαση Πλακέτας

Η σχεδίαση της πλακέτας έγινε στο πρόγραμμα Eagle και το τύπωμα της έγινε με την χρήση του απαιτούμενου εξοπλισμού στο εργαστήριο. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται η μάσκα της πλακέτας η οποία εξάγεται από τον υπολογιστή και τυπώνεται πάνω σε πλαστική διαφάνεια.



Σχήμα 5.7: η μάσκα της πλακέτας όπως σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Eagle

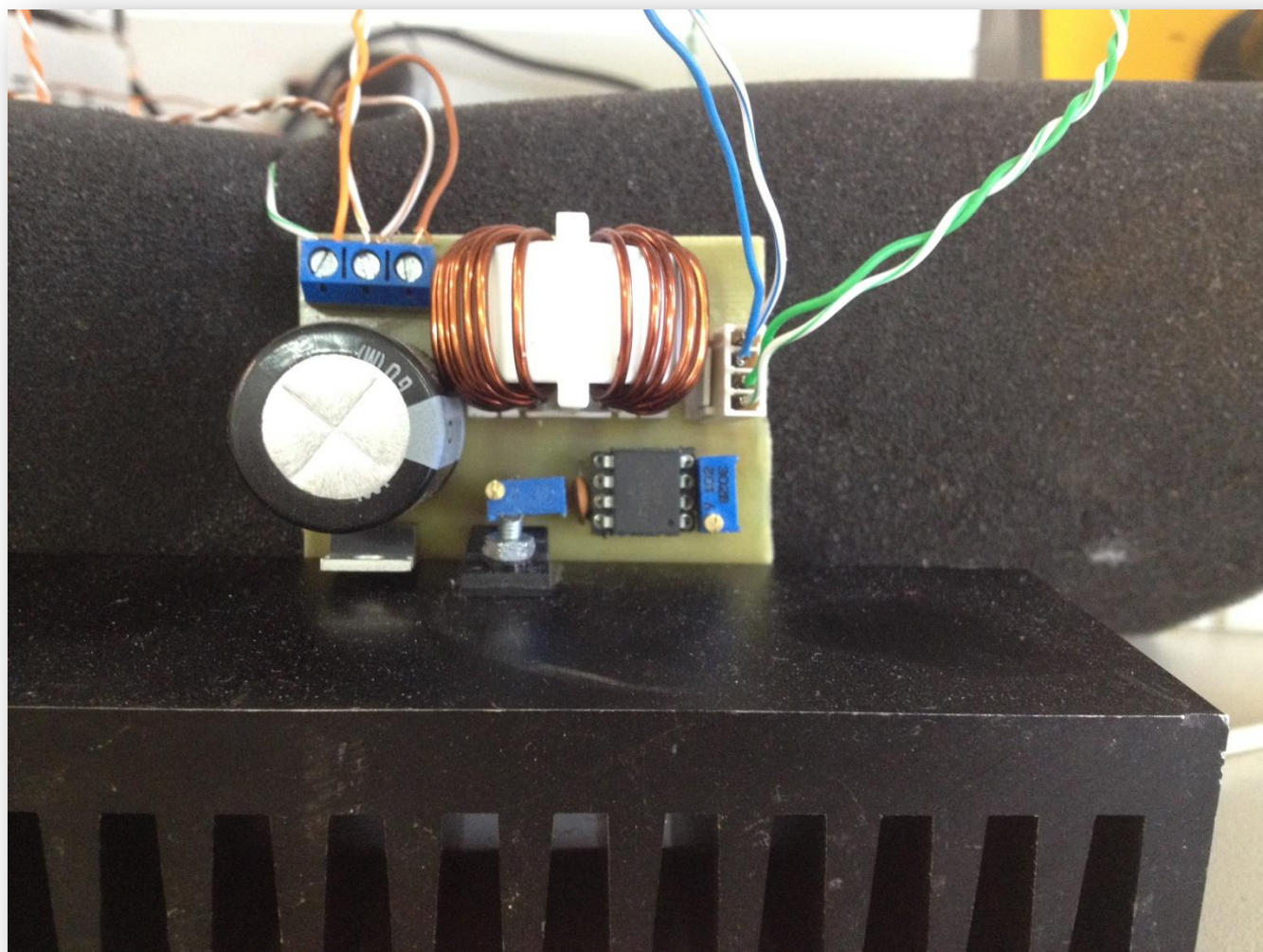
Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η πλακέτα στην τελική της μορφή.



Σχήμα 5.8: η πλακέτα στην τελική της μορφή

5.2.6 Ο μετατροπέας Ανύψωσης Τάσης

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται σε φωτογραφία ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης μετά την σύνδεση όλων των στοιχείων στην πλακέτα.



Σχήμα 5.9: ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης

5.2.7 Κόστος κατασκευής μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζεται συνοπτικά το συνολικό κόστος για την κατασκευή του μετατροπέα ανύψωσης

Πίνακας 5.1

Στοιχείο	Αριθμός	Κόστος
Mosfet Ισχύος	1	1.69 Ευρώ
Δίοδος	1	1.69 Ευρώ
Πηνίο	1	2.05 Ευρώ
Πυκνωτής	1	2.68 Ευρώ
Ολοκληρωμένο κύκλωμα	1	4.85 Ευρώ
Αντίσταση	3	1.00 Ευρώ
Τύπωμα πλακέτας	1	1.00 Ευρώ
Συνολικό Κόστος		14.96 Ευρώ

5.3 Φορτίο εξόδου

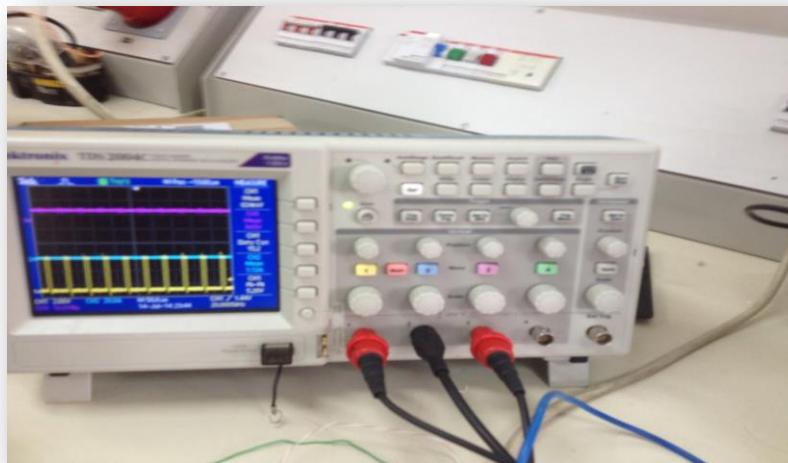
Το φορτίο που τροφοδοτεί το σύστημά μας είναι μια μεταβλητή ωμική αντίσταση που μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 200 Ω. Το ωμικό φορτίο φαίνεται σε φωτογραφία στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10: το ωμικό φορτίο της πειραματικής διάταξης

5.4 Παλμογράφος

Για να λάβουμε τις διάφορες κυματομορφές που μας ενδιαφέρουν χρησιμοποιήσαμε τον παλμογράφο του εργαστηρίου ο οποίος είναι ο Tektronix TSD 2004. Στο Σχήμα 5.11 απεικονίζεται ο παλμογράφος του εργαστηρίου.

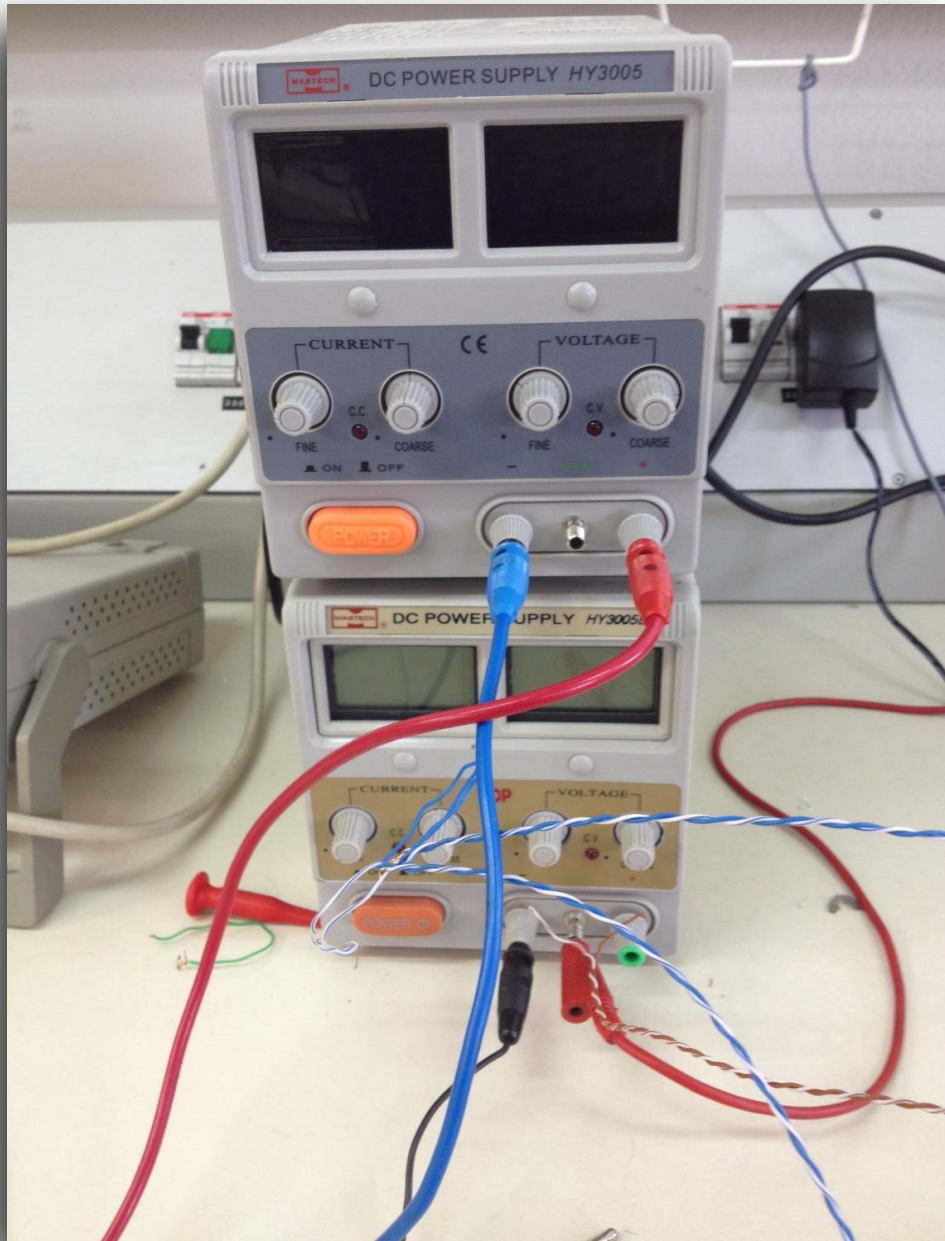


Σχήμα 5.11: ο Tektronix TSD 2004

5.5 Τροφοδοτικό

Για την εφαρμογή της απαιτούμενης πόλωσης στο Mosfet Ισχύος χρησιμοποιούμε ένα τροφοδοτικό συνεχούς τάσης. Η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του Mosfet Ισχύος είναι $V = \pm 15V$ όπως ορίζεται από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του.

Ακόμα ένα όμοιο τροφοδοτικό χρησιμοποιείται ως πηγή συνεχούς ρεύματος στην είσοδο του μετατροπέα ανύψωσης με μέγιστη ισχύ $P_{max}=150\text{ W}$. Τα δύο τροφοδοτικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.12



Σχήμα 5.12: το τροφοδοτικό συνεχούς τάσης του εργαστηρίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Μικροελεγκτής Arduino

6.1 Μικροελεγκτές

Λίγα λόγια για τους μικροελεγκτές.[24]

Οι μη εμπορικοί ελεγκτές παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των αντίστοιχων εμπορικών κάποια από τα οποία είναι το μικρό κόστος, η ευκολία στην κατασκευή, η απλότητα στη σχεδίαση και την επισκευή του κυκλώματος σε περίπτωση βλάβης. Παρουσιάζουν όμως και αρκετά μειονεκτήματα σημαντικότερο από τα οποία είναι κατά τη γνώμη μας η μονολιθικότητα του κυκλώματος, υπό την έννοια ότι κάθε πλακέτα είναι φτιαγμένη για συγκεκριμένο τύπο σύνδεσης ,πχ 12V ή 24V, και κατ' αυτόν τον τρόπο οποιαδήποτε αλλαγή στο σύστημα απαιτεί είτε αλλαγή των ολοκληρωμένων , είτε ολόκληρης της σχεδίασης για να προστεθούν - αφαιρεθούν ολοκληρωμένα ή και υποκυκλώματα.

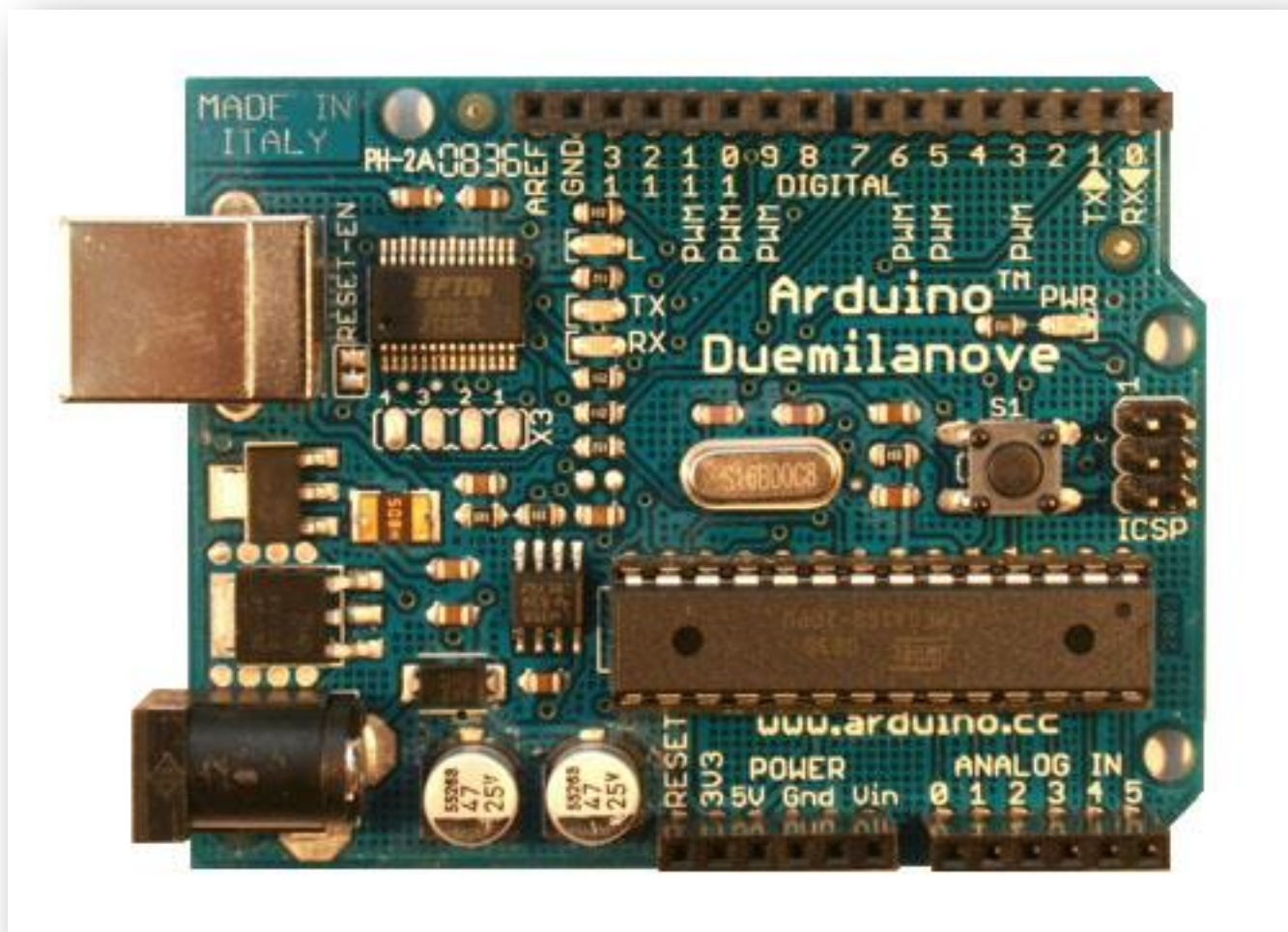
Άμεση λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνουν οι μικροελεγκτές, οι οποίοι σε αντίθεση με τα ολοκληρωμένα που παίζουν το ρόλο του “εγκέφαλου” στα κυκλώματα με τρόπο μονολιθικό και επικεντρωμένο αποκλειστικά σε μία και μόνο λειτουργία, επιτελούν περισσότερες λειτουργίες ενώ η μεγάλη ταχύτητα επεξεργασίας που παρουσιάζουν, μειώνουν τις καθυστερήσεις και επιτρέπουν τον έλεγχο και τη συντονισμένη λειτουργία μεγαλύτερων και πίο πολύπλοκων κυκλωματικών διατάξεων. Επίσης προσφέρουν τη δυνατότητα επαναπρογραμματισμού τους μέσω εφαρμογών κυρίως σε υπολογιστικά συστήματα και επομένως οποιαδήποτε αλλαγή απαιτείται απλώς προγραμματίζεται ο μικροελεγκτής σε πολύ λίγο χρονικό διάστημα και χωρίς ιδιαίτερο κόπο. Τέλος λόγω της υπολογιστικής τους ταχύτητας αλλά και του τρόπου που διαχειρίζονται τις διάφορες εισόδους – εξόδους τους μπορούν πολύ εύκολα να προγραμματιστούν για να ελέγχουν και να συντονίζουν τη λειτουργία διάφορων τύπων αισθητήρων, όπως θερμοκρασίας, υγρασίας μέχρι πολύποκες διατάξεις βιομηχανικών αισθητήρων ελέγχου αλλά και πλήθος εποπτικών μέσων όπως οθόνες.

Όταν δε οι μικροελεγκτές αποτελούν μέρος ολοκληρωμένων διατάξεων και πλατφορμών τότε οι δυνατότητες τους αυξάνονται ακόμα περισσότερο καθώς υπάρχει πληθώρα “ασπίδων” (shields) που έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την συνεργασία με τις προαναφερθείσες διατάξεις και επιτρέπουν και από άποψη λογισμικού προγραμματισμού (programming software) αλλά και υλικού (hardware) λειτουργίες αρκετά εξελιγμένες όπως είναι η ανταλλαγή δεδομένων με τον υπολογιστή (ethernet – wireless shields) διατάξεις οθονών (LCD Shields), πλήθος μηχανικών διατάξεων (Servo shields), ακόμα και ασπίδων τηλεπικοινωνιακών σκοπών (GSM shields). Και η λίστα είναι σχεδόν χωρίς τέλος....

Η ύπαρξη έτοιμων shields μειώνει το κόστος κατασκευής κάποιου κομματιού πίο εξειδικευμένου από το μηδέν, πχ μία διάταξη ασύρματης επικοινωνίας με τον υπολογιστή, ενώ επιτρέπουν μέσω της ευελιξίας της κατασκευαστικής τους αρχής, την επέκταση της λειτουργίας των διατάξεων χωρίς να επιβαρύνει τις υπόλοιπες λειτουργίες του κυκλώματος προφανώς μέσω της ευελιξίας και ταχύτητας του ίδιου του μικροελεγκτή. Επίσης το γεγονός ότι η διαδικασία προγραμματισμού τους βασίζεται πάνω σε αρχές και εργαλεία ανοιχτού κώδικα, επιτρέπει τον πειραματισμό και τη δημιουργία με απλό τρόπο, κυκλωματικών διατάξεων και εφαρμογών που χωρίς τους μικροελεγκτές θα απαιτούσαν πολλαπλάσιο κόπο, χρόνο, κόστος και σε κάποιες περιπτώσεις θα ήταν σχεδόν αδύνατη η δημιουργία τους.

6.2 Παρουσίαση της πλατφόρμας Arduino

Μία από τις πιο διαδεδομένες πλατφόρμες με τα χαρακτηριστικά που είδαμε παραπάνω είναι η πλατφόρμα Arduino :



Σχήμα 6.1: Η πλατφόρμα Arduino Duemilanove

Ο Arduino μπορεί να “αισθανθεί” το περιβάλλον τριγύρω του μέσω σημάτων που δέχεται στις διάφορες εισόδους του διαμέσω αισθητήρων μεγάλης γκάμα και με τη σειρά του μπορεί να επηρεάσει το περιβάλλον του μέσω των εξόδων του και των κυκλωματικών διατάξεων που συνδέονται σε αυτές. Ο μικροελεγκτής του είναι ο ATmega328 και μπορεί να προγραμματιστεί σε γλώσσα Arduino, η οποία βασίζεται στη Wiring και μοιάζει αρκετά στη δομή και στη σύνταξη της με τη γλώσσα C. Το περιβάλλον ανάπτυξης είναι βασισμένο και αναπτυγμένο σε Processing και μπορεί είτε να αξιοποιηθεί μόνο του είτε να επικοινωνήσει με πλήθος λογισμικού όπως είναι το MaxMSP, Flash, Processing και πολλά άλλα. Ακόμα και τα σχέδια κατασκευής του είναι ανοιχτού κώδικα, όπως και όλα τα προγράμματα που συνοδεύουν τα shields του ή τις διάφορες εφαρμογές που πραγματοποιούν οι χρήστες του, επομένως έχουμε να κάνουμε με ένα αρκετά πλούσιο πεδίο πειραματισμού, μία αρκετά

ενεργή κοινότητα και πλούσια γκάμα είτε συναρμολογημένων shields είτε βιβλιοθήκες και εξαρτήματα που έχουν δημιουργηθεί και δοκιμαστεί από την κοινότητά του.

Οι δυνατότητες που προσφέρει σε συνδυασμό με το μικρό κόστος του, τις πλούσιες βιβλιοθήκες του αλλά και της κοινότητας του το καθιστούν κατά τη γνώμη μας ιδανική πλατφόρμα κατασκευής, έρευνας αλλά και ανάπτυξης εφαρμογών που απαιτούν ακρίβεια, ταχύτητα, προσθήκη αισθητήρων αλλά και ελέγχου μηχανισμών και διατάξεων.

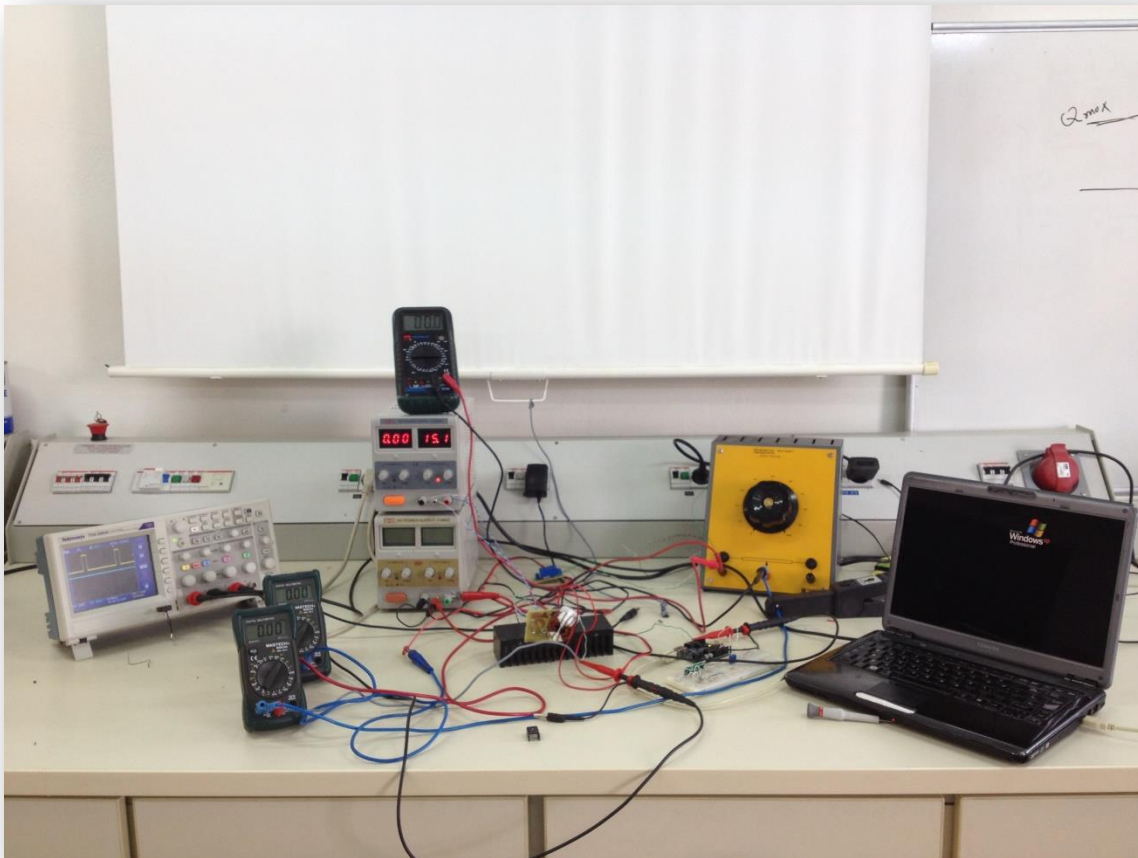
Ο κώδικας του ελέγχου ανοικτού βρόχου βρίσκεται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας και μας δίνει την δυνατότητα να δώσουμε εντολή για μετάβαση σε συγκεκριμένη τιμή του συντελεστή κατάτμησης D σε πραγματικό χρόνο. Ουσιαστικά ο μικροεπεξεργαστής Arduino χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της τεχνικής PWM. Ακόμα μας προσφέρει τη δυνατότητα να μεταβιβάσουμε τον μετατροπέα σε κατάσταση μη-λειτουργίας σε περίπτωση που το ρεύμα του Mosfet Ισχύος λάβει στιγμιαία πολύ μεγάλη τιμή ώστε να αποτραπεί καταστροφή του μετατροπέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αποτελέσματα πειραματικής διάταξης

7.1 Πειραματική Διάταξη

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε την πειραματική διάταξη που υλοποιήσαμε στο εργαστήριο για το πειραματικό έλεγχο της λειτουργίας του μετατροπέα ανύψωσης.

Τα κύρια μέρη της πειραματικής διάταξης είναι ένα τροφοδοτικό συνεχούς τάσης $V_{in}=30V$, ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης και το ωμικό φορτίο στην έξοδο του μετατροπέα. Για την ορθή πόλωση του Mosfet ισχύος εφαρμόζεται στο κύκλωμα οδήγησης του μια συνεχής τάση $V = \pm 15V$ από το τροφοδοτικό. Επίσης χρησιμοποιείται ο μικροεπεξεργαστής Arduino για την παραγωγή των παλμων PWM, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με έναν υπολογιστή ώστε σε πραγματικό χρόνο να μπορούμε να δίνουμε εντολή για μεταβολή του λόγου κατάτμησης (duty cycle D). Τέλος η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου περιλαμβάνει τα μετρητικά όργανα (παλμογράφος, αμπεροτσιμπίδα, βολτόμετρο) για την μέτρηση του ρεύματος και της τάσης στην είσοδο και την έξοδο του μετατροπέα. Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η περιγραφή της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου.



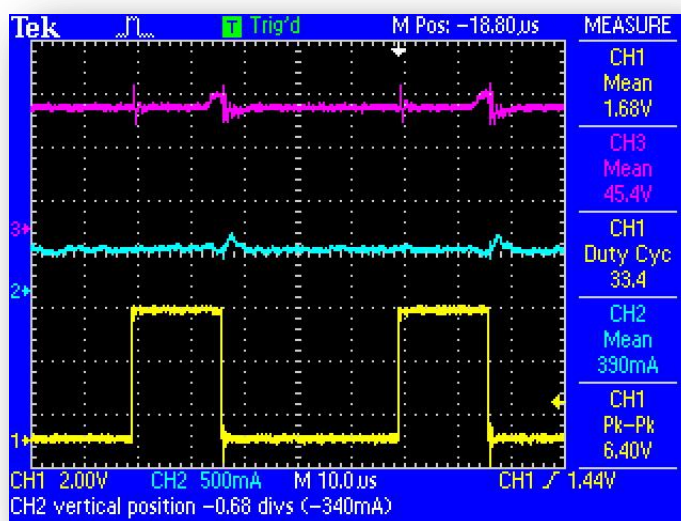
Σχήμα 7.1: η πειραματική διάταξη του εργαστηρίου

7.2 Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λάβαμε κατά την διεξαγωγή του πειράματος.

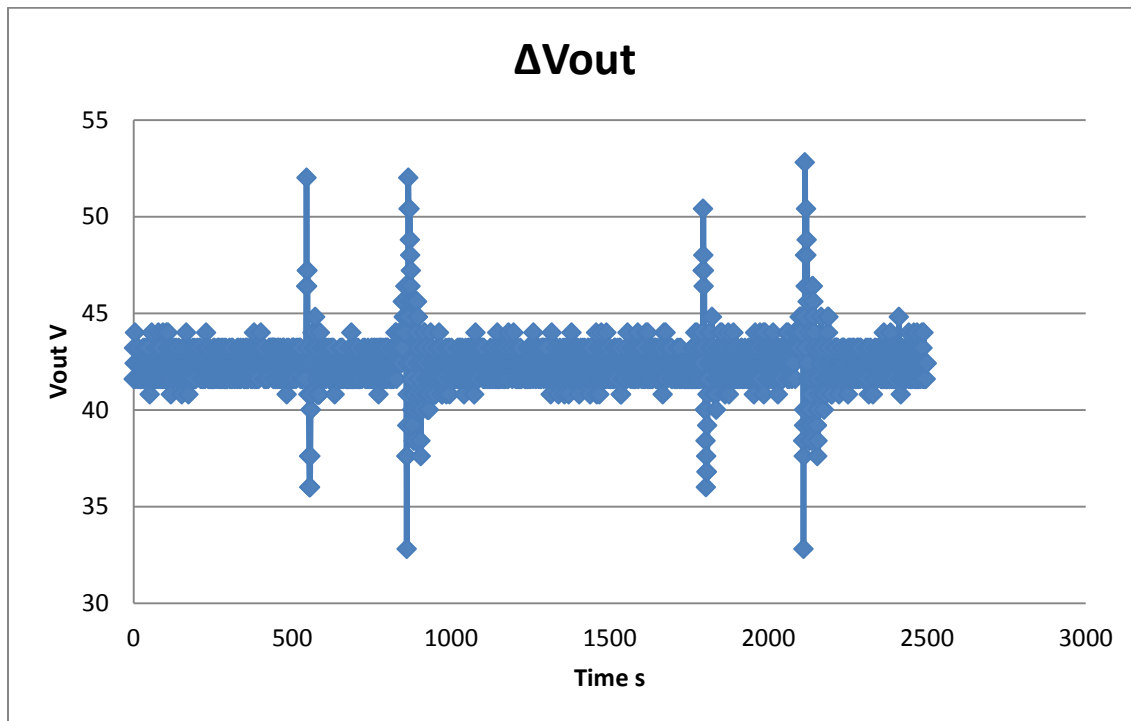
7.2.1 Μεταβολή του λόγου κατατμησης (duty cycle) για σταθερή τάση εισόδου V_{in} και σταθερό φορτίο

Σ' αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πήραμε μεταβάλλοντας το λόγο κατάτμησης και κρατώντας σταθερή την τάση εισόδου με σταθερό φορτίο $R_{out}=120 \Omega$. Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης εξόδου για $D=0.4$ όπως και ο τετραγωνικός παλμός έναυσης-σβέσης του διακοπτικού στοιχείου.



Σχήμα 7.2: η κυματομορφή της τάσης εξόδου, του ρεύματος εξόδου και του τετραγωνικού παλμού για $D=0.334$

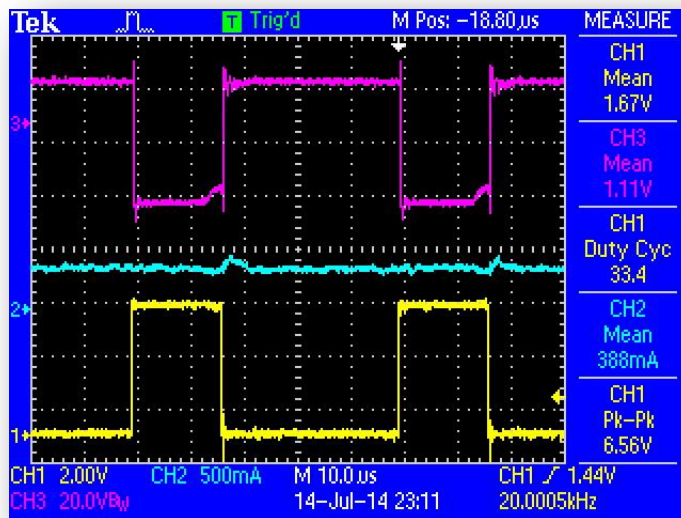
Από τα δεδομένα που πήραμε από τον παλμογράφο φτιάξαμε την γραφική $\Delta V_{out}(t)$ ώστε να είναι πιο ευδιάκριτη η μεταβολή της τάσης.



Σχήμα 7.3: η κυμάτωση της τάσης εξόδου

Παρατηρούμε πως η κυμάτωση της τάσης εξόδου (ΔV_{out}) είναι περίπου 4% και παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη κατά την μεταβολή του D.

Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του τετραγωνικού παλμού στην είσοδο του Mosfet και το ρεύμα εξόδου για duty cycle $D=0.33$



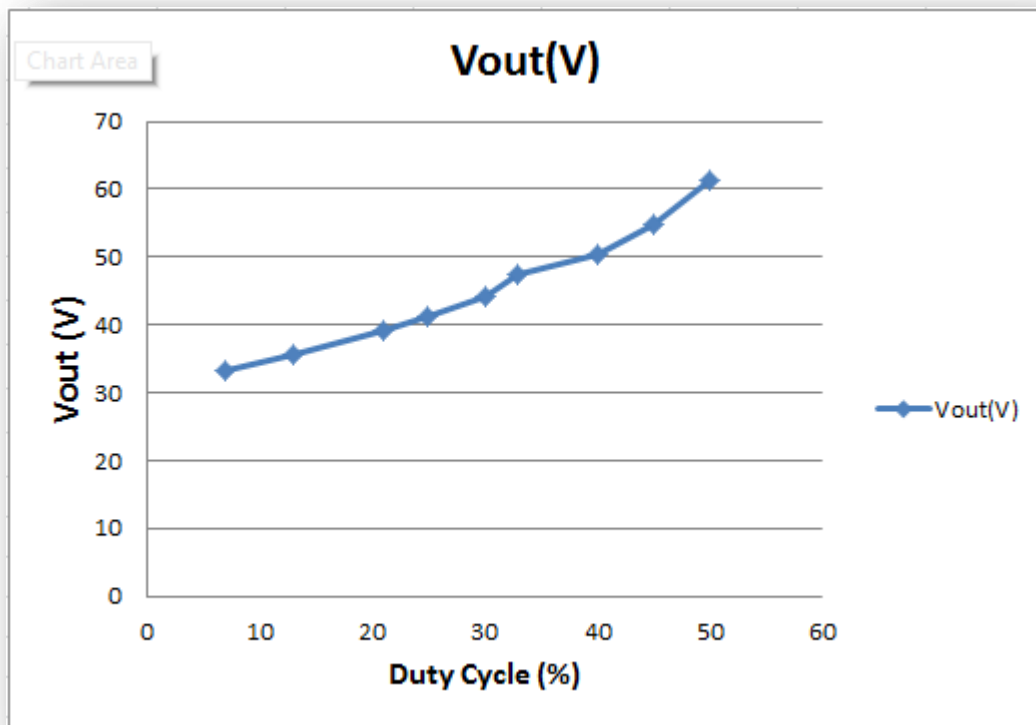
Σχήμα 7.4: το ρεύμα εξόδου για $D=0.334$

Στο Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων για 9 διακριτές τιμές του duty cycle με εύρος μετρήσεων από 7% έως 50% για φορτίο $R=157 \Omega$.

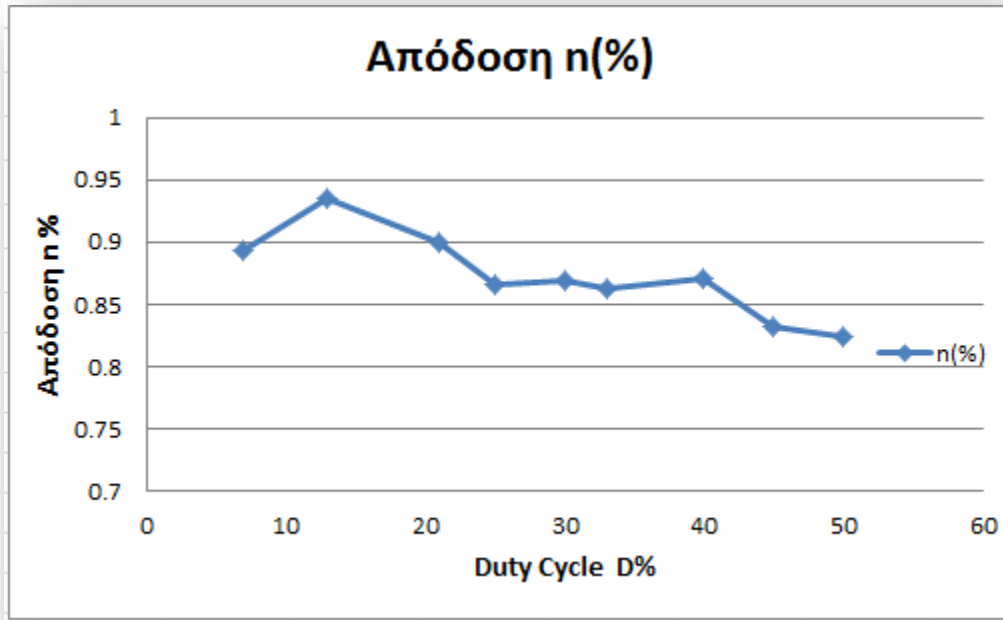
Πίνακας 7.1

D(%)	Vin(V)	Iin(A)	Vout(V)	Iout(A)	Pin(W)	Pout(W)	η (%)
7	31.3	0.25	33.3	0.21	7.825	6.993	0.893674
13	31.3	0.28	35.6	0.23	8.764	8.188	0.934277
21	31.1	0.35	39.2	0.25	10.885	9.8	0.900322
25	31	0.4	41.3	0.26	12.4	10.738	0.865968
30	30.9	0.46	44.1	0.28	14.214	12.348	0.868721
33	30.6	0.54	47.5	0.3	16.524	14.25	0.862382
40	30.8	0.6	50.3	0.32	18.48	16.096	0.870996
45	30.8	0.75	54.9	0.35	23.1	19.215	0.831818
50	30.5	0.95	61.2	0.39	28.975	23.868	0.823745

Γραφικές $V_{out}(d)$ και $\eta(d)$



Σχήμα 7.5: η γραφική $V_{out}(d)$ για $R=157 \Omega$.



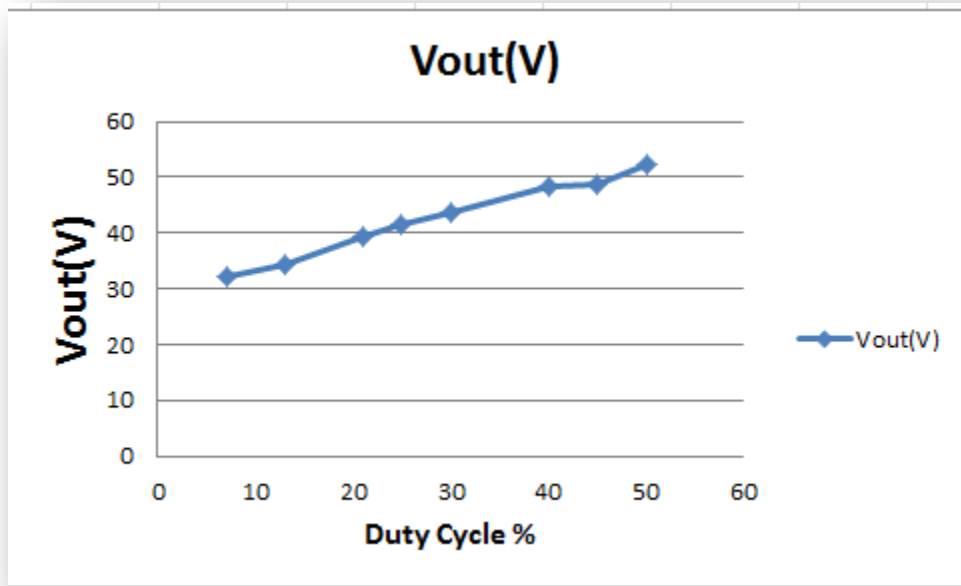
Σχήμα 7.6: η γραφική $\eta(d)$ για $R=157 \Omega$.

Στο Πίνακα 7.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων για 9 διακριτές τιμές του duty cycle με εύρος μετρήσεων από 7% έως 50% για φορτίο $R= 28.5 \Omega$.

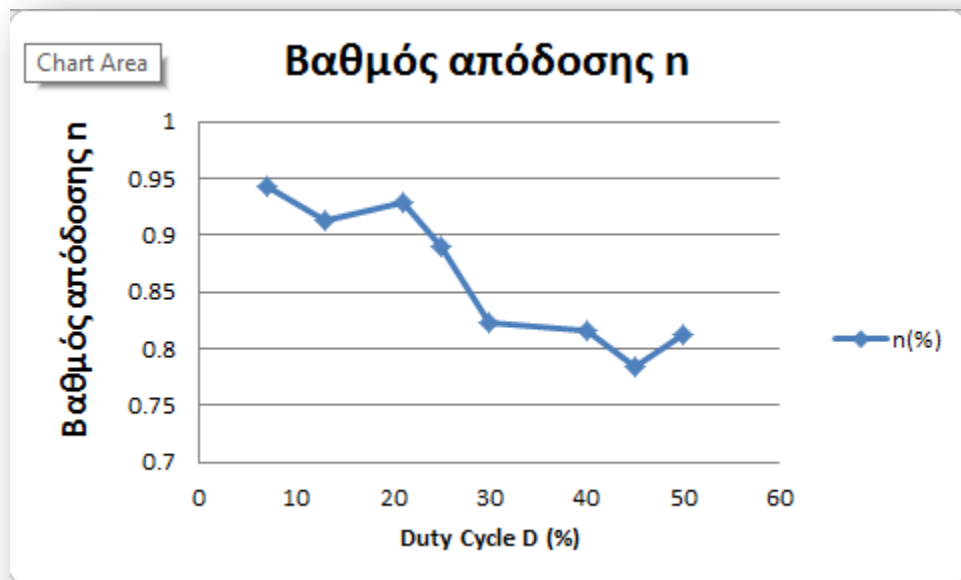
Πίνακας 7.2

D(%)	Vin(V)	Iin(A)	Vout(V)	Iout(A)	Pin(W)	Pout(W)	$\eta(\%)$
7	31.1	1.24	32.2	1.13	38.564	36.386	0.943522
13	31	1.45	34.2	1.2	44.95	41.04	0.913014
21	30.9	1.9	39.5	1.38	58.71	54.51	0.928462
25	30.8	2.18	41.5	1.44	67.144	59.76	0.890027
30	30.6	2.66	43.8	1.53	81.396	67.014	0.823308
40	28.4	3.52	48.3	1.69	99.968	81.627	0.816531
45	26.7	4	48.7	1.72	106.8	83.764	0.784307
50	27.4	4.1	52.2	1.75	112.34	91.35	0.813156

Όπως και πριν εξάγονται οι γραφικές $V_{out}(d)$ και $\eta(d)$



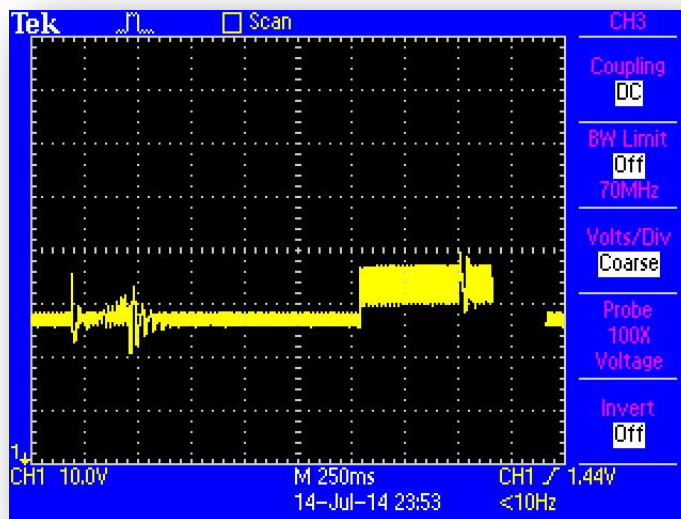
Σχήμα 7.7: η γραφική $V_{out}(d)$ για φορτίο $R= 28.5 \Omega$.



Σχήμα 7.8: η γραφική $\eta(d)$ για φορτίο $R= 28.5 \Omega$.

7.2.2 Βηματική μεταβολή του λόγου κατατμησης (duty cycle) για σταθερή τάση εισόδου.

Στο Σχήμα παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης εξόδου για βηματική μεταβολή του λόγου κατάτμησης από 15% σε 33% διατηρώντας σταθερό το φορτίο $R_{out}=86.7 \Omega$



Σχήμα 7.9: η κυματομορφή της τάσης εξόδου για βηματική μεταβολή του λόγου κατάτμησης από 15% σε 33%

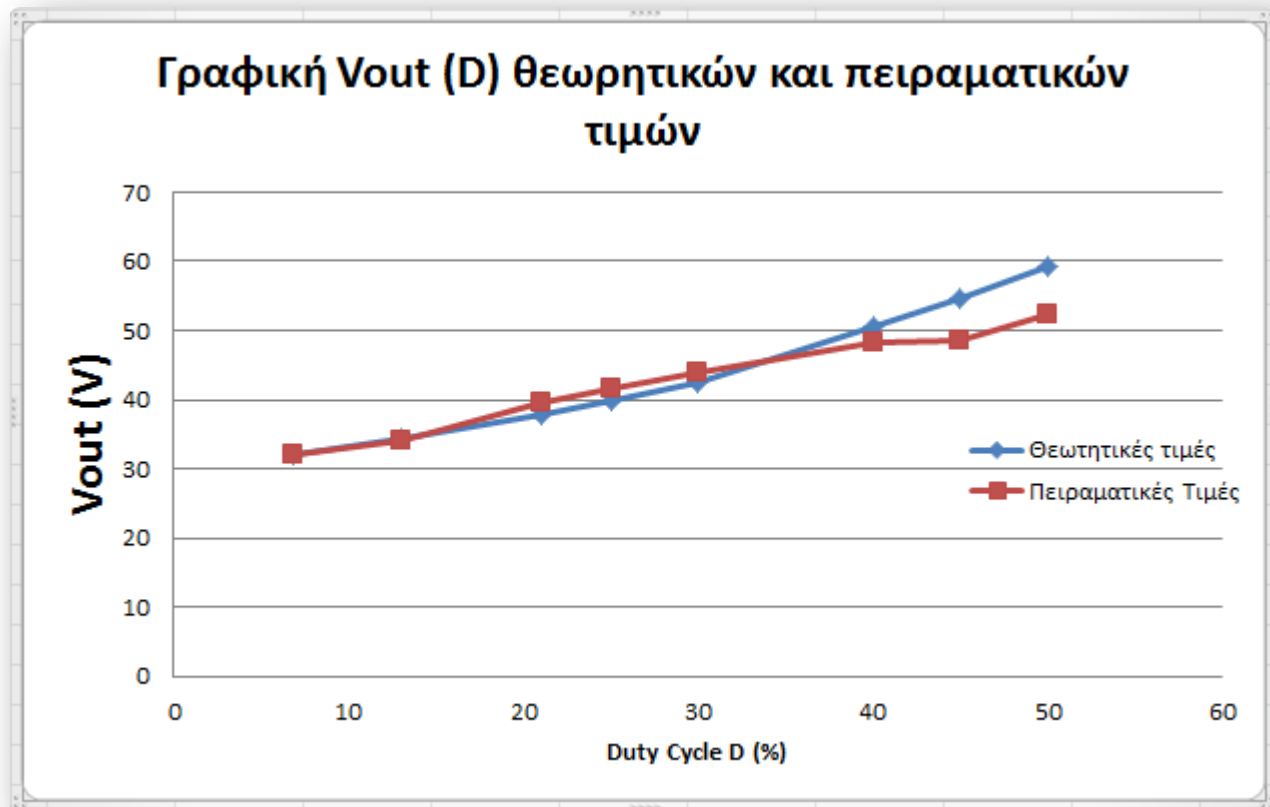
7.3 Συγκριση θεωρητικών τιμών-πειράτικών μετρήσεων

Στην ενότητα αυτή γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων που λάβαμε στο εργαστήριο με τις θεωρητικές τιμές που υπολογίσαμε.

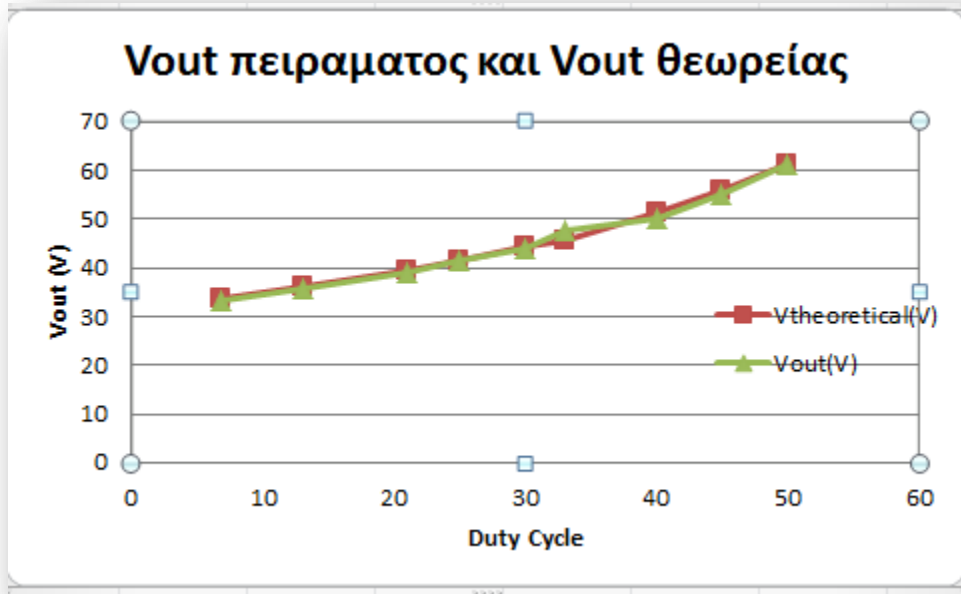
Επίσης για τις ίδιες τιμές τάσης εισόδου και duty cycle λαμβάνουμε τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του μετατροπέα ελέγχου ανοικτού βρόχου και τα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα πειραματικά.

7.3.1 Σύγκριση γραφικών παραστάσεων τάσης εξόδου.

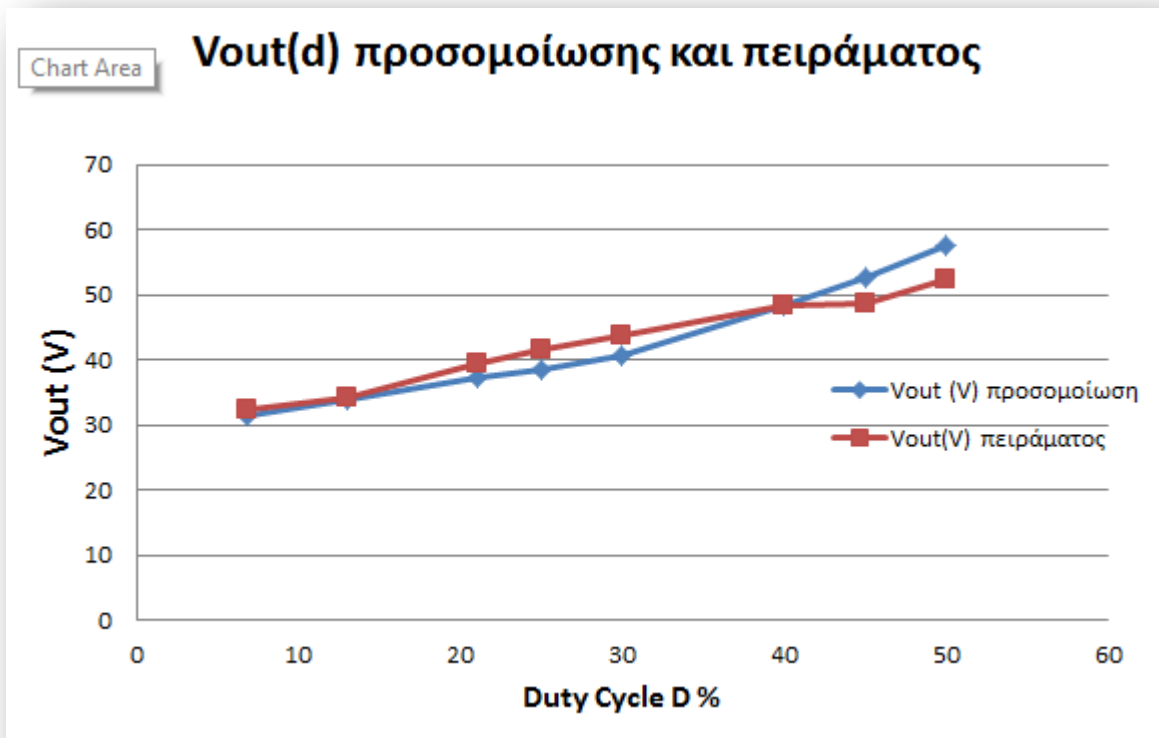
Στις πιο κάτω γραφικές παρουσιάζονται οι καμπύλες της τάσης εξόδου συναρτήσει του λόγου κατάτμησης.



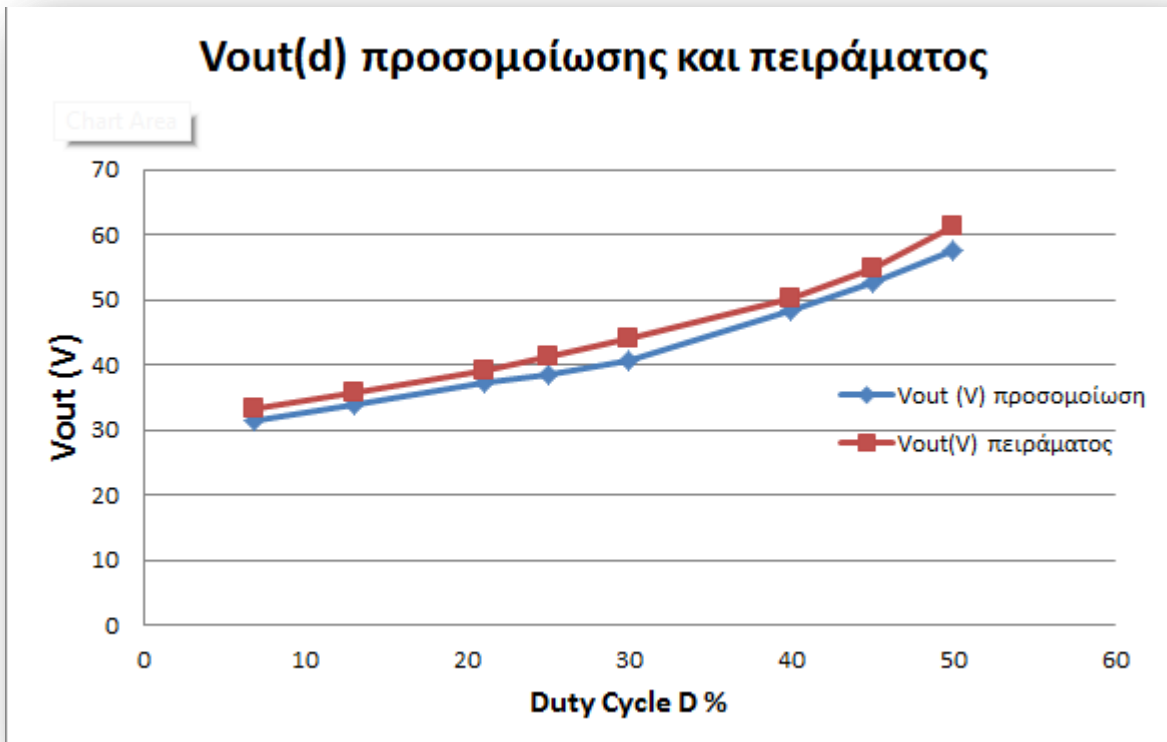
Σχήμα 7.10: γραφική $V_{out}(d)$ θεωρητικών και πειραματικών τιμών $R= 28.5 \Omega$



Σχήμα 7.11: γραφική $V_{out}(d)$ θεωρητικών και πειραματικών τιμών για $R=157 \Omega$



Σχήμα 7.12: γραφική $V_{out}(d)$ προσομοιωτικών και πειραματικών τιμών για $R=28.5 \Omega$



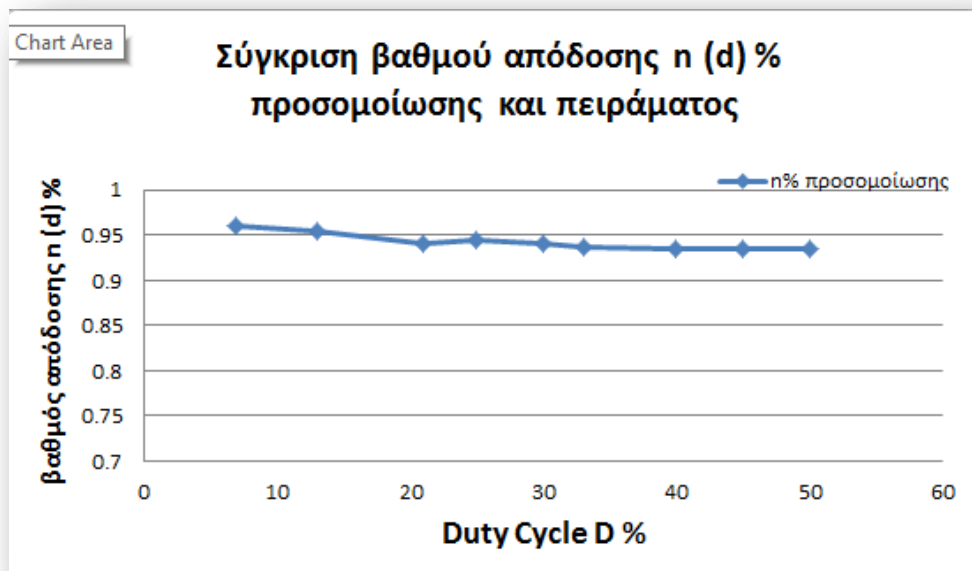
Σχήμα 7.13: γραφική $V_{out}(d)$ προσομοιωτικών και πειραματικών τιμών για $R= 157 \Omega$

Παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων προσεγγίζουν με μεγάλη ακρίβεια τις θεωρητικές τιμές και με ακόμα μεγαλύτερη τις τιμές από τον προσομοιωτικό μας μοντέλο.

7.3.2 Βαθμός απόδοσης

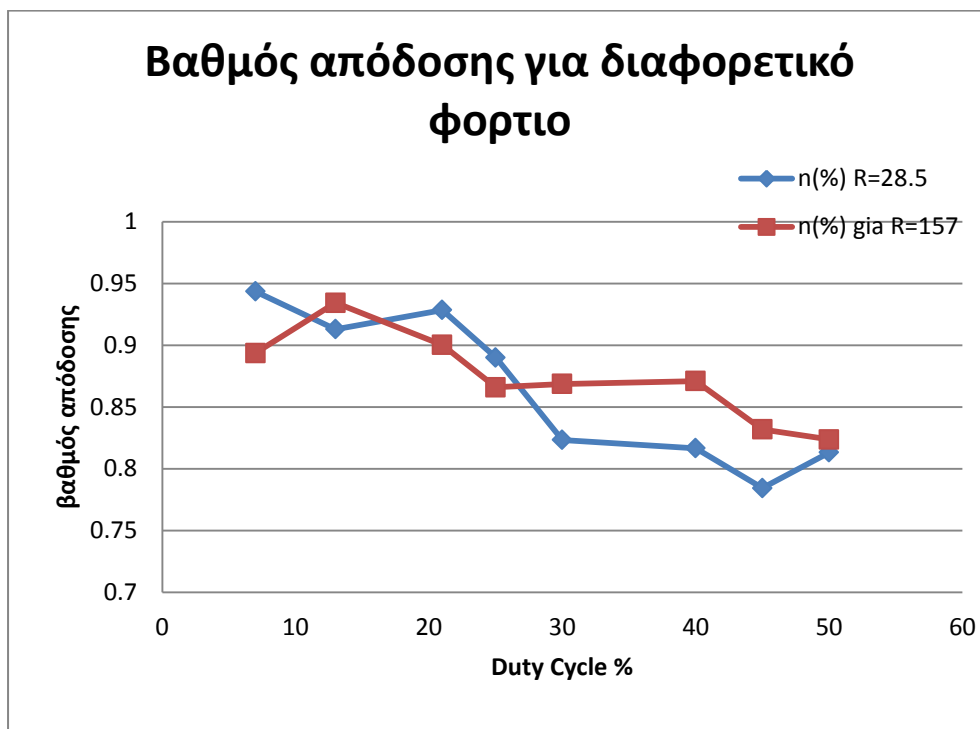
Η θεωρητική τιμή του βαθμού απόδοσης είναι ίση με $n=100\%$

Από το μοντέλο της προσομοίωσης λαμβάνουμε την γραφική βαθμού απόδοσης συναρτήσει του D.



Σχήμα 7.14: γραφική $n(d)$ προσομοίωσης

Από τις πειραματικές μας μετρήσεις λαμβάνουμε την γραφική παράσταση βαθμού απόδοσης συναρτήσει του D



Σχήμα 7.15: γραφική $n(d)$ για $R= 28.5 \Omega$ και $R= 157 \Omega$

Παρατηρούμε πως οι πειραματικές μετρήσεις μας αποκλίνουν από το θεωρητικό βαθμό απόδοσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την ανάλυση και την σχεδίαση του μετατροπέα ανύψωσης θεωρήσαμε ότι το διακοπτικό στοιχείο και η διάοδος συμπεριφέρονται ως ιδανικοί διακόπτες ενώ θεωρήσαμε την ωμική αντίσταση του πυκνωτή μηδενική. Ακόμα δεν λάβαμε υπ όψιν την dc αντίσταση του πηνίου και την αντίσταση που παρουσιάζουν τα καλώδια και οι ενώσεις στην πλακέτα του μετατροπέα.

Τα αποτελέσματα από το προσομοιωτικό μας μοντέλο και πάλι παρουσιάζουν απόκλιση σε σχέση με τις πειραματικές μας μετρήσεις και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη μοντελοποίηση των στοιχείων του μετατροπέα δεν λάβαμε υπ όψιν τη μη-γραμμική συμπεριφορά των στοιχείων.

Παρόλαυτά η συμπεριφορά του μετατροπέα ανύψωσης ως προς τον βαθμό απόδοσης κρίνεται ικανοποιητική.

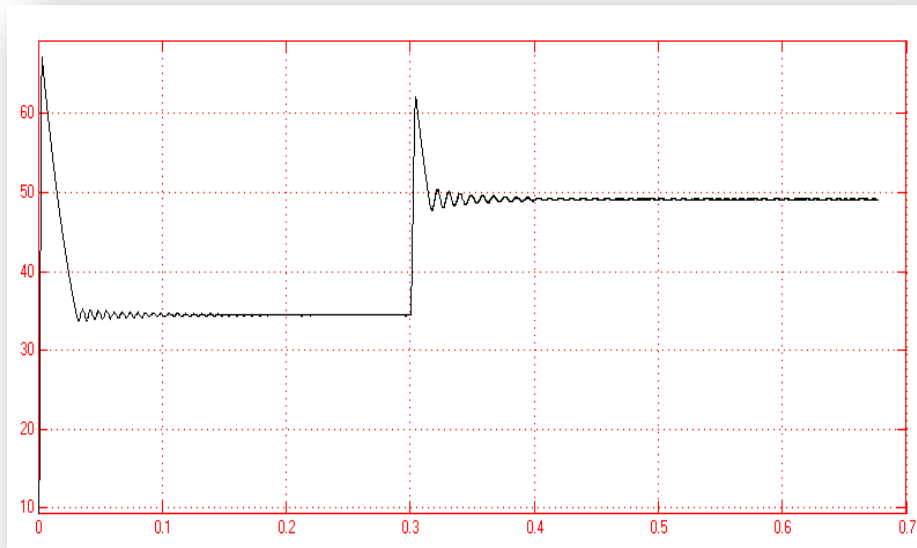
7.3.3 Κυμάτωση Εξόδου.

Η θεωρητική τιμή της κυμάτωσης εξόδου είναι ίση με $\Delta V_o = 0,19V$ ενώ από το προσομοιωτικό μας μοντέλο η ΔV_o κυμαίνεται από τιμές 0.05 V έως 0.2V.

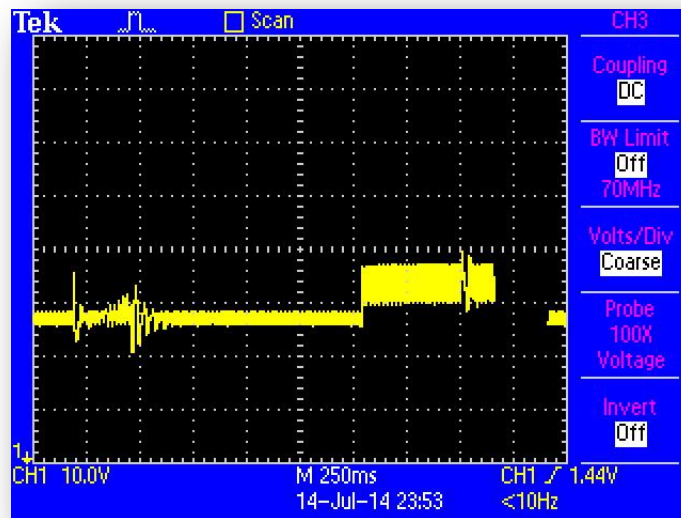
Από τις πειραματικές μας μετρήσεις η ΔV_o είναι σταθερή και ίση με 2.0 V.

7.3.4 Βηματική μεταβολή του duty cycle

Στη μέτρηση που κάναμε για την βηματική μεταβολή του duty cycle παρατηρούμε ότι η κυματομορφή που λάβαμε από τον παλμογράφο και που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4 προσεγγίζει κατά πολύ την κυματομορφή που λάμβανουμε από την προσομοίωση τόσο σε στην τιμή τάσης όσο και στον χρόνο απόκρισης.



Σχήμα 7.16: η τάση εξόδου για βηματική μεταβολή του λόγου κατάτμησης από 15% σε 33%



Σχήμα 7.17: η τάσης εξόδου για βηματική μεταβολή του λόγου κατάτμησης από 15% σε 33%

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Συμπεράσματα

8.1 Συμπεράσματα-παρατηρήσεις-προτάσεις για το μέλλον

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένας dc-dc μετατροπέας ανύψωσης τάσης. Η λειτουργία του μετατροπέα αξιολογήθηκε μέσα από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο. Επιπλέον διερευνήθηκαν διαφορετικοί τρόποι ελέγχου της διάταξης συνεχούς ρεύματος για την οποία προορίζεται ο μετατροπέας, και έγινε σύγκριση των μεθόδων ελέγχου μέσω εργαλείων προσομοίωσης.

Στα εξομοιωτικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον Simulink Matlab μελετήσαμε τον Έλεγχο Τάσης κλειστού βρόχου καθώς και τον Έλεγχο Ρεύματος-Τάσης κλειστού βρόχου. Από τα αποτελέσματα που λάβαμε καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι ο Έλεγχος Τάσης προσφέρει μικρότερη μεταβολή στην τάση εξόδου κατά την μεταβολή φορτίου και έχει ελαφρώς μικρότερη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Από την άλλη μεριά ο έλεγχος ρεύματος προσφέρει τη δυνατότητα οριοθέτησης της μέγιστη τιμής του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο και άρα προστασία τόσο στο πηνίο όσο και στο διακοπτικό στοιχείο. Επιπλέον, η υπερύψωση της τάσης εξόδου παρουσιάζει μικρότερη μεταβολή ενώ αποσβάζεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του ελέγχου ρεύματος-τάσης είναι το γεγονός πως υποστηρίζει τον παραλληλισμό διαφορετικών πηγών συνεχούς ρεύματος πράγμα που καθιστά δυνατό τον έλεγχο ενός μικροδικτύου συνεχούς ρεύματος ώστε το σύστημα να παραμένει σε ευστάθεια κατά την εμφάνιση δυναμικών μεταβολών.

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων ανοικτού βρόχου δείχνουν ότι ο μετατροπέας λειτουργεί με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης όπως και με ικανοποιητική τιμή στην κυμάτωση εξόδου. Σε επόμενο στάδιο, θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθούν οι δυνατοτητες βελτίωσης του βαθμού απόδοσης καθώς και η μείωση στην κυμάτωση έξοδο του μετατροπέα.

Παρατηρήσαμε επίσης ότι υπάρχει μεγάλο πεδίο έρευνας στον τομέα του ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα σε μελλοντικό στάδιο έρευνας μπορούν να μελετηθούν και να υλοποιηθούν πειραματικά οι δύο έλεγχοι κλειστού βρόχου τάσης και ρεύματος-τάσης που ήδη μελετήθηκαν σε προσομοιωτικό επίπεδο για την διάταξη του εργαστηρίου. Πεδίο έρευνας υπάρχει ακόμα και σε διαφορετικούς τρόπους υλοποίησης του ελέγχου ρεύματος-τάσης αφού πέρα από το ρεύμα του πηνίου το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως μέγεθος ελέγχου στην παρούσα εργασία, ο έλεγχος θα μπορούσε να εφαρμοστεί στο ρεύμα που διαρρέει είτε το διακοπτικό στοιχείο είτε το ρεύμα εξόδου. Ακόμα θα μπορούσαν να υλοποιηθούν διαφορετικοί μέθοδοι ελέγχου (π.χ. fuzzy control, μη γραμμικοί ελεγκτές).

Τέλος τεράστιο ενδιαφέρον θα είχε η εφαρμογή ελέγχου σε ένα μικροδίκτυο dc ρεύματος το οποίο θα αποτελούνταν έναν αριθμό διάφορων μικροπηγών dc ρεύματος (π.χ. κυψέλη καυσίμου, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες, υπερπυκνωτές) και αντίστοιχο αριθμό μετατροπέων dc-dc.

Βιβλιογραφία

- [1] Ackerman T., Andersson G., Soder L. “Distributed generation: a definition’, Electric Power Systems Research 57, 2001, p.p. 195-204.
- [2] Αναστασία Σαφιγιάννη, “Διείσδυση μονάδων κατανεμημένης παραγωγής σε σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας”.
- [3] Γεώργιος Κατσαρός , “Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση μικροδικτύου”, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Οκτώβριος 2012
- [4] Σάββας Τσοτουλίδης, “Καθαρή παραγωγή ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου – εφαρμογές” Πανεπιστήμιο Πάτρας,2010.
- [5] Supsamaniam Srinivasm: ‘Fuel Cells from Fundamentals to Applications’, Springer, 2006.
- [6] Andrew Dicks, James Larminie, ‘Fuel Cell Systems Explained’, Wiley 2nd edition, 2003.
- [7] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D’haeseleer,—Distributed generation: definition, benefits and issues, Int. Journal Energy Policy, Vol. 33, No 6, April 2005, pp787-798
- [8] N. Hatziaargyriou, G. Kariniotakis, N. Jenkins, J. Pecas Lopes, J. Oyarzabal, ‘Modeling of Microsources for security studies’, CIGRE, Paris 30 Aug – 3 Sep. 2004.
- [9] Νίκος Χατζηαργυριου «Μικροδίκτυα, Συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής στην Χαμηλή Τάση», Δελτίο ΠΣΔΜ-Η,Οκτώβριος 2006
- [10] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, ‘Embedded Generation’, IEEE July 2000
- [11] <http://www.geni.org/globalenergy/library/technicalarticles/transmission/green.venturebeat.com/how-microgrids-will-change-the-way/index.shtml>
- [12] S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley , Microgrids and Active Distribution Networks
- [13] Paul Savage, Robert R. Nordhaus, and Sean P. Jamieson- DC Microgrids: Benefits and Barriers , Yale School,Ohio(USA)
- [14] <http://spectrum.ieee.org/green-tech/buildings/dc-microgrids-and-the-virtues-of-local-electricity>
- [15] Marian K. Kazimierczuk, ‘Pulse-width Modulated Dc-Dc Converters’, John Wiley and Sons.
- [16]N.Mohan,T.Undelend,W,Robbins, ‘Power Electronics Converters,Application, and Design’, Wiley 3rd Edition.
- [17] <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN4332.pdf>

- [18] Κωνσταντίνος Ιωάννης Παπάς, Διπλωματική Εργασία «Μελέτη,προσομοίωση και κατασκευή διάταξης διασύνδεσης ανεμόγεννήτριας 1kW με το δίκτυο», Πάτρα 2011.
- [19] http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
- [20] K. Astrom, T. Hagglund: ‘PID Controllers: Theory, Design and Tuning’, (1995)
- [21] Antonio Visioli: ‘Practical PID Control’, Springer (2006)
- [22] Bengt Johansson, Improved Models for DC-DC Converters ,Lund University(2003)
- [23] G. Sevjidsuren, E. Uyanga, B. Bumaa, E. Temujin, P. Altantsog and D. Sangaa Exergy Analysis of 1.2 kW Nexa™ Fuel Cell Module (2012)
- [24] Θωμας Παζιος, Διπλωματική Εργασία «Μελέτη σύνδεσης μικρών ανεμογεννητριών σε μικρής κλίμακας εφαρμογές με αποθήκευση σε συσσωρευτές και μελέτη,σχεδίαση και κατασκευή ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών με απορριπτικό φορτίο» Ε.Μ.Π,Αθήνα (2012)

Παράρτημα Α

Κώδικας Arduino

```
//////////////////////////////////////////////////////////////////
// DECLARATIONS
//////////////////////////////////////////////////////////////////
/* VNH2SP30 pin definitions
// with 20kHz PWM pinout is changed, you CANNOT stack the motomonster anymore!
Arduino /..Motomonster1
.....GND <-> GND pin
.....5V <-> 5V
.....pin 7 <-> pin 4 inA motor1
.....pin 8 <-> pin 8 inB motor1
.....pin 9 <-> pin 5 pwm motor1
*/

const int analogInPin = A0; // Analog input pin that the potentiometer is attached to
const int pwmpin = 9; // PWM input

#define potR A5
//////////////////////////////////////////////////////////////////
// INITIALIZATION
//////////////////////////////////////////////////////////////////
void analogWriteSAH_Init( void )
{
  // Stop the timer while we muck with it

  TCCR1B = (0 << ICNC1) | (0 << ICES1) | (0 << WGM13) | (0 << WGM12) | (0 << CS12) | (0 << CS11) | (0 <<
CS10);

  // Set the timer to mode 14...
  //
  // Mode WGM13 WGM12 WGM11 WGM10 Timer/Counter Mode of Operation TOP Update of OCR1x at
TOV1 Flag Set on
  //      CTC1 PWM11 PWM10
  // ---- ---- -----
  // 14  1  1  1  0  Fast PWM                          ICR1 BOTTOM                          TOP

  // Set output on Channel A and B to...
  //
  // COM1z1 COM1z0 Description
  // ---- ---- -----
  // 1  0  Clear OC1A/OC1B on Compare Match (Set output to low level).

  TCCR1A =
  (1 << COM1A1) | (0 << COM1A0) | // COM1A1, COM1A0 = 1, 0
  (1 << COM1B1) | (0 << COM1B0) |
  (1 << WGM11) | (0 << WGM10); // WGM11, WGM10 = 1, 0

  // Set TOP to...
  //
  // fclk_I/O = 16000000
  // N = 1
  // TOP = 799
  //
```

```

// fOCnxPWM = fclk_I/O / (N * (1 + TOP))
// fOCnxPWM = 16000000 / (1 * (1 + 799))
// fOCnxPWM = 16000000 / 800
// fOCnxPWM = 20000

ICR1 = 799;

// Ensure the first slope is complete

TCNT1 = 0;

// Ensure Channel A and B start at zero / off

OCR1A = 0;
OCR1B = 0;

// We don't need no stinkin interrupts

TIMSK1 = (0 << ICIE1) | (0 << OCIE1B) | (0 << OCIE1A) | (0 << TOIE1);

// Ensure the Channel A and B pins are configured for output
DDRB |= (1 << DDB1);
DDRB |= (1 << DDB2);

// Start the timer...
//
// CS12 CS11 CS10 Description
// ---- ---- ---- -----
// 0   0   1   clkI/O/1 (No prescaling)

TCCR1B =
  (0 << ICNC1) | (0 << ICES1) |
  (1 << WGM13) | (1 << WGM12) |           // WGM13, WGM12 = 1, 1
  (0 << CS12) | (0 << CS11) | (1 << CS10);
}

void analogWriteD9( uint16_t value )
{
  // My variable value varies from 0 to 1024
  // but awaited range in OCR1A is from 0 to 799 and nothing else!
  OCR1A = constrain(map(value, 0, 1024, 0, 799), 0, 799);
}

////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
void setup()
{
  analogWriteSAH_Init();
  // initialization of Arduino's pins
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pwmpin, OUTPUT);
}
////////////////////////////////////////////////////////////////
//////////////////////////////////////////////////////////////// Main Loop //////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////
void loop()

```

```
{
  int sensor;
  sensor = analogRead(analogInPin);
  Serial.print("sensor = ");
  Serial.print(sensor);
  Serial.print("\n");
  //sensor = 200;//analogRead(potR); // range 0-1024
  analogWriteD9(sensor);
}
```

Παράρτημα Β

Κυψέλη καυσίμου Nexa

Η ενεργειακή κυψέλη η οποία προορίζεται ως πηγή εισόδου του μετατροπέα ανύψωσης τάσης ο οποίος κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι της εταιρίας Ballard Power Systems και ανήκει στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Ο τύπος του ενεργειακού συστήματος είναι ο Nexa™. Το ενεργειακό αυτό σύστημα είναι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα ενεργειακών κυψέλων σχεδιασμένο για να ενσωματώνεται σε προϊόντα για κινητές εφαρμογές και για ενεργειακή υποστήριξη σε διάφορα συστήματα. Είναι έτοιμο να εφαρμοστεί σε μια πληθώρα προϊόντων για οικιακές και εμπορικές εφαρμογές.[23]

Το Nexa™ παράγει μέχρι 1200Watt μέγιστη ισχύ με συνεχή τάση εξόδου 26V. Με την χρήση μιας εξωτερικής παροχής καυσίμου, η λειτουργία του μπορεί να είναι συνεχής, περιοριζόμενη μόνο από τη χωρητικότητα της δεξαμενής καυσίμου. Χρησιμοποιώντας το υδρογόνο ως καύσιμο, το Nexa™ είναι απολύτως αθόρυβο και παράγει μηδενικές εκπομπές επικίνδυνων αερίων, επιτρέποντας τη χρησιμοποίησή του σε κλειστούς χώρους. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το Nexa™



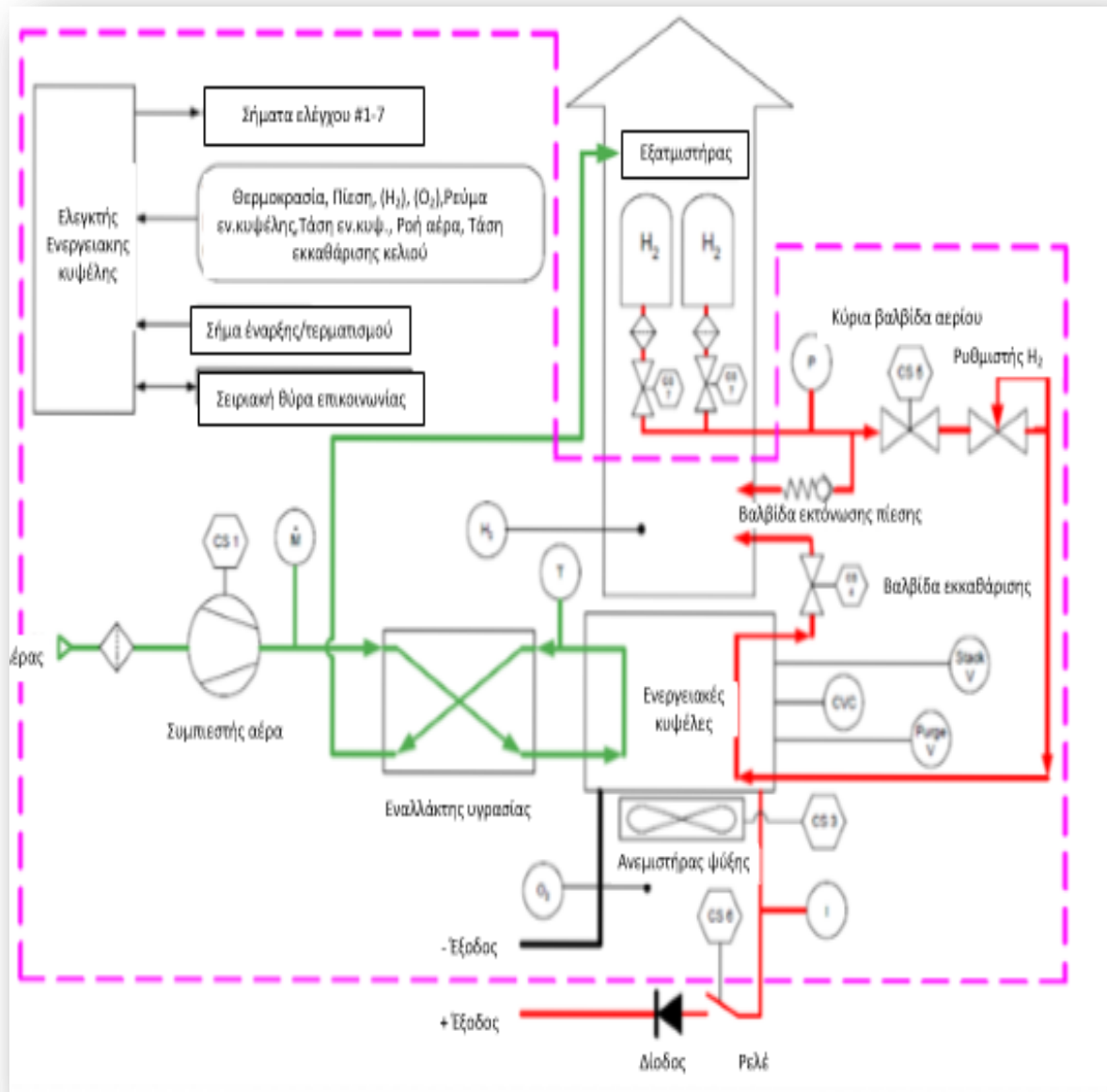
Σχήμα 1: το Nexa™

Γενική περιγραφή

Το ενεργειακό σύστημα Nexa™ είναι ένα πλήρως ενοποιημένο σύστημα που παρέχει μη σταθεροποιημένη συνεχή ισχύ, με καύσιμο το υδρογόνο και το νερό. Αποτελείται από ενεργειακές κυψέλες της Ballard, όπως επίσης και το βοηθητικό εξοπλισμό που είναι απαραίτητος για τη λειτουργία μιας ενεργειακής κυψέλης. Βοηθητικά υποσυστήματα είναι το σύστημα διανομής του υδρογόνου, το σύστημα παροχής οξυγόνου και το σύστημα ψύξης. Αισθητήρες καταγράφουν τη λειτουργία του

συστήματος και το σύστημα ελέγχου μαζί με το μικροεπεξεργαστή αυτοματοποιούν πλήρως τη λειτουργία του.

Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει ένα δομικό διάγραμμα του Nexa™. Το διάγραμμα δείχνει επίσης το όριο του συστήματος Nexa™ και τα απαραίτητα διασυνδεδεμένα στοιχεία για να λειτουργήσει σαν μια πηγή συνεχούς τάσης. Το υδρογόνο, αέρας που χρησιμοποιείται ως καύσιμο και αέρας που χρησιμοποιείται για τη ψύξη πρέπει να παρέχονται στο σύστημα όπως φαίνεται στο σχήμα. Επαγόμενος αέρας, νερό και επαγόμενο ψυκτικό εκπέμπονται. Το ενεργειακό σύστημα Nexa™ παρέχει μη σταθεροποιημένη συνεχή ισχύ και διασυνδέεται συνήθως σε εξωτερικά ενεργειακά συστήματα. Για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων στο ξεκίνημα και στο κλείσιμο της συσκευής χρειάζεται να συνδεθούν μπαταρίες. Τέλος, ένα επικοινωνιακό σύστημα πρέπει να παρέχεται στο Nexa™ ώστε να δίνονται σήματα έναρξης και διακοπής της λειτουργίας του.



Σχήμα 2: Διάγραμμα του ενεργειακού συστήματος Nexa™

Χαρακτηριστικές συσκευής

Χαρακτηριστική πόλωσης.

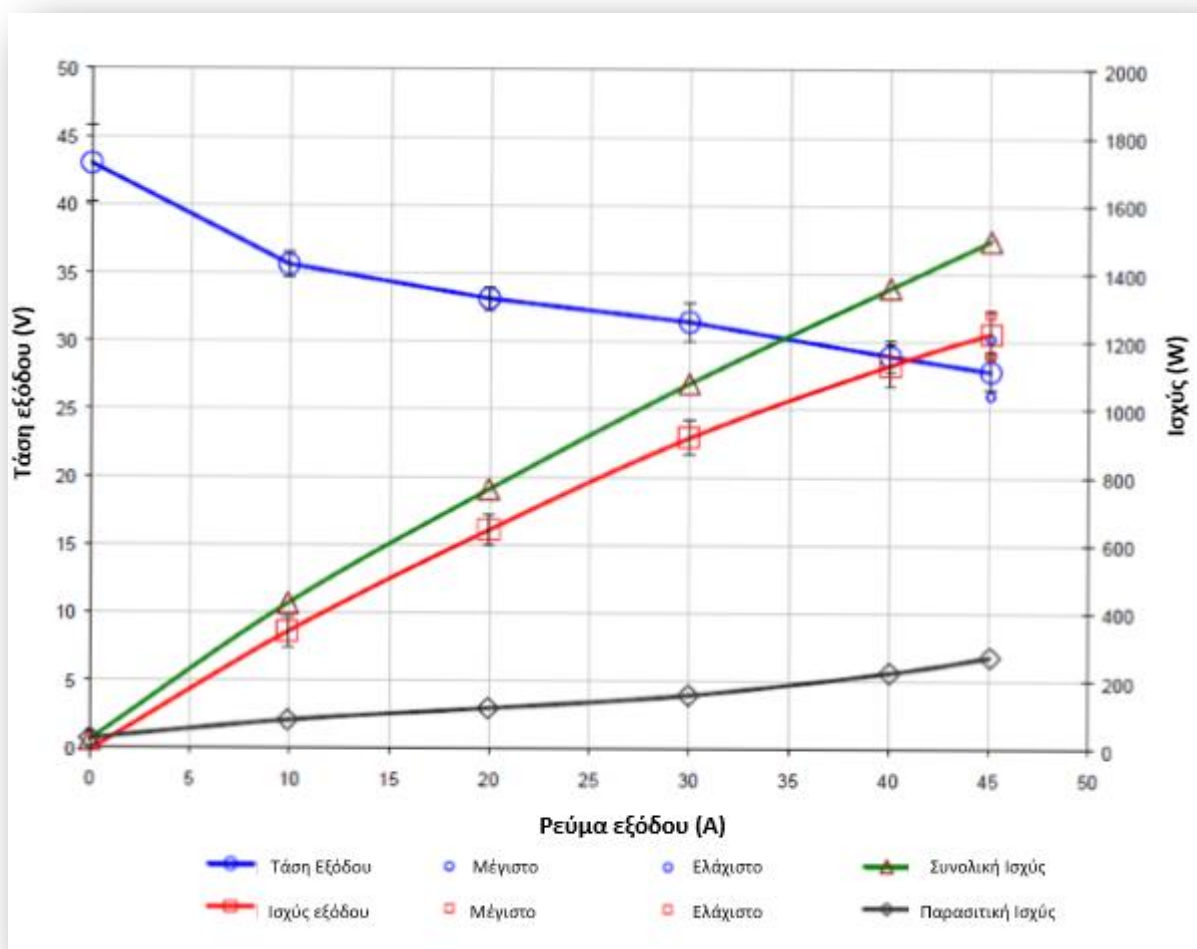
Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει τις χαρακτηριστικές πόλωσης του συστήματος Nexa™.

Η μεταβολή στην απόδοση που συμβαίνει από σύστημα σε σύστημα απεικονίζεται με την ελάχιστη και τη μέγιστη απόδοση που μπορεί να εμφανιστεί. Η ισχύς εξόδου μεταβάλλεται από 0 όταν το σύστημα είναι άεργο μέχρι 1200Watt σε πλήρες φορτίο.

Σαν ισχύ εξόδου ορίζουμε την ισχύ την οποία διοχετεύουμε προς το φορτίο για κατανάλωση. Το ρεύμα εξόδου των ενεργειακών κυψέλων μεταβάλλεται από 0 μέχρι 46 A σε πλήρες φορτίο. Σαν ρεύμα εξόδου εννοούμε το ρεύμα το οποίο παράγεται από τις ενεργειακές κυψέλες και διοχετεύεται για

κατανάλωση προς το φορτίο και όχι το συνολικό ρεύμα που παράγεται, διότι υπάρχει ένα ποσό ρεύματος, το οποίο καταναλώνεται από το βοηθητικό σύστημα. Η τάση εξόδου μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο σύμφωνα με τις καμπύλες πόλωσης των ενεργειακών κυψελών. Η τάση εν κενώ σε ένα σύστημα Nexa™ είναι περίπου 43V. Σε πλήρες φορτίο η τάση εξόδου μεταβάλλεται από 26Vdc έως 29Vdc, ανάλογα με τα χρόνια που έχει λειτουργήσει το σύστημα.

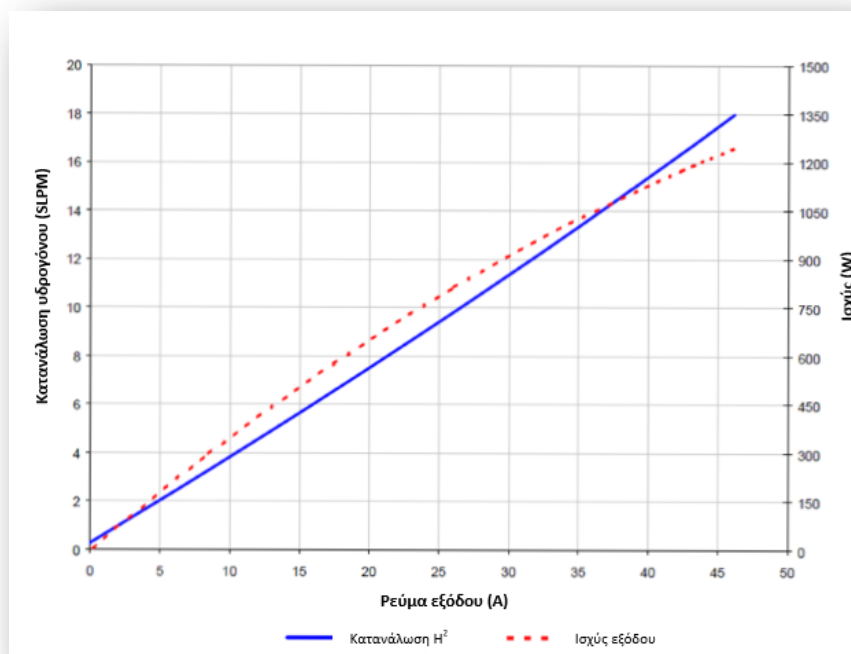
Το σχήμα απεικονίζει επίσης την παρασιτική ισχύ σαν συνάρτηση της τάσης και του ρεύματος εξόδου των ενεργειακών κυψελών. Για να υποστηρίξει τη λειτουργία του Nexa™, ο σωρός των ενεργειακών κυψελών παρέχει ενέργεια στην αντλία αέρα, στη φτερωτή ψύξης, στους αισθητήρες στους ενεργοποιητές και στους ελεγκτές, το οποίο εκφράζεται μέσω της παρασιτικής ισχύος. Οι ενεργειακές απαιτήσεις του βοηθητικού συστήματος στην εν κενώ λειτουργία είναι 35W. Η ισχύς του βοηθητικού συστήματος αυξάνει με την αύξηση του ρεύματος, κυρίως για να υποστηρίξει περισσότερη επάρκεια αέρα μέσω της αντλίας και για την αποτελεσματική ψύξη.



Σχήμα 3: Καμπύλες πόλωσης και ισχύος

Κατανάλωση υδρογόνου

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την κατανάλωση υδρογόνου συναρτήσει του ρεύματος εξόδου και της μέσης ισχύος εξόδου. Η μέγιστη κατανάλωση υδρογόνου σε ονομαστικές συνθήκες δεν ξεπερνά τα 18 slpm. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η κατανάλωση υδρογόνου είναι ανάλογη του συνολικού ρεύματος των ενεργειακών κυψελών και σχεδόν είναι ανάλογη του ρεύματος εξόδου.

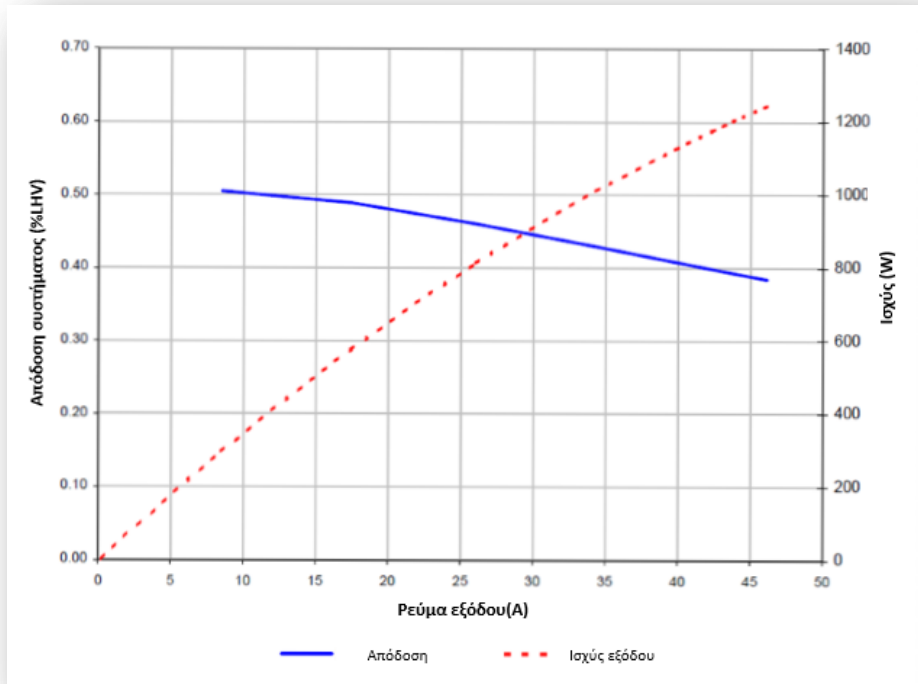


Σχήμα 4: γραφική παράσταση κατανάλωσης υδρογόνου συναρτήσει του ρεύματος εξόδου

Απόδοση

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει την απόδοση του Nexa™, συναρτήσει του ρεύματος εξόδου και της μέσης ισχύος εξόδου. Η απόδοση του συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα, καθορίζεται από το ποσοστό της ισχύος εξόδου ως προς το ποσό υδρογόνου που καταναλώνεται στην χημική αντίδραση που συμβαίνει στις ενεργειακές κυψέλες.

Η απόδοση του συστήματος είναι περίπου 38% σε πλήρες φορτίο. Η μέγιστη απόδοση είναι περίπου 50% και συμβαίνει σε ισχύ εξόδου περίπου 300W. Η απόδοση του συστήματος πέφτει για φορτίο πάνω από 300W, διότι αυξάνεται η απαιτούμενη ισχύς που καταναλώνει το βοηθητικό σύστημα.



Σχήμα 5: γραφική παράσταση της απόδοσης του συστήματος συναρτήσει του ρεύματος εξόδου