



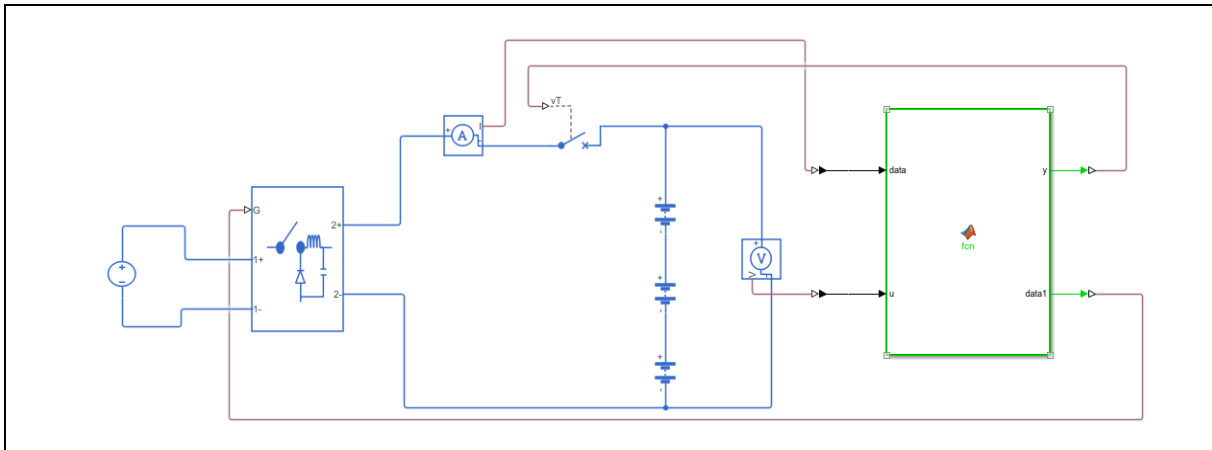
ΔΙΕΘΝΕΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΜΟΛΥΒΔΟΥ»



Του φοιτητή
Felicien Lombo Konde
Αρ. Μητρώου: 516167

Επιβλέπων
Ιορδάνης Κιοσκερίδης
Βαθμίδα Καθηγητής

Θεσσαλονίκη, Ιανουάριος 2021

Τίτλος Π.Ε. Διαχείριση και βελτιστοποίηση συστοιχίας μπαταριών μολύβδου

Κωδικός Π.Ε. 19159

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Felicien Lombo Konde

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Ιορδάνης Κιοσκερίδης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 15/11/2019

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 15/1/2021

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Felicien Lombo Konde που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στην οικογένεια μου»

Πρόλογος

Το παρόν θέμα της πτυχιακής εργασίας δημοσιεύτηκε στην ιστοσελίδα του τμήματος μετά από συνεννόηση με τον καθηγητή Ιορδάνη Κιοσκερίδη. Ήταν τον Νοεμβρίου του 2019 όταν πήγα στο γραφείο του και ζήτησα ένα θέμα πτυχιακής εργασίας που θα έχει ως κύριο αντικείμενο τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος καθώς το χειμώνα του 2021 θα ξεκινήσω το μεταπτυχιακό στα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος και ενέργειας. Πάρα τη μεγάλη θέληση μου να κάνω την κατασκευή του συστήματος που αναλύεται στις επόμενες σελίδες, η πρωτόγνωρη κατάσταση την οποία βιώνει η ανθρωπότητα το τελευταίο διάστημα (πανδημία 2020-2021) δεν μου το επιτρέπει. Παρόλα αυτά, έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια από εμένα, ώστε η προσομοίωση του συστήματος μέσω του λογισμικού Simulink του Matlab να προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματικότητα.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματεύεται το σχεδιασμό και την υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης και βελτιστοποίησης της συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τη διάταξη τροφοδοσίας και από τη διάταξη ελέγχου. Η διάταξη τροφοδοσίας αναλαμβάνει τη φόρτιση της συστοιχίας και το κύκλωμα ελέγχου αναλαμβάνει τον έλεγχο κατά τη φόρτιση για αποφυγή υπερφόρτισης.

Σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της συστοιχίας. Έτσι, εκτός από το σύστημα διαχείρισης μπαταριών κατά τη φόρτιση που υλοποιήθηκε, η παρούσα εργασία περιέχει και πρακτικές συμβουλές για την ασφαλή εκφόρτιση των μπαταριών μολύβδου. Χρησιμοποιείται ο ηλεκτρονικός μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης ο οποίος αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως buck converter για τη φόρτιση. Η τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας και η ένταση του ρεύματος που τη διαρρέει παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο από τη διάταξη ελέγχου και όταν φορτιστούν πλήρως όλες οι μπαταρίες που αποτελούν τη συστοιχία, γίνεται αυτόματος τερματισμός της φόρτισης.

Αρχικά, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών. Κατόπιν, πραγματοποιείται η θεωρητική ανάλυση των μπαταριών μολύβδου καθώς αυτές περιέχει η συστοιχία που θα φορτιστεί. Στη συνέχεια γίνεται μια αναλυτική προσέγγιση του συστήματος διαχείρισης μπαταριών (BMS - Battery Management System), όπου περιγράφονται όλα τα στοιχεία πριν την υλοποίηση τους.

Το επόμενο βήμα αποτελεί τη μελέτη, τη σχεδίαση και την προσομοίωση της διάταξης τροφοδοσίας υπό ιδανικές συνθήκες και μη στο λογισμικό Simulink του Matlab. Παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία σχεδιασμού της διάταξης. Έτσι, καθορίζονται οι προδιαγραφές και τα χαρακτηριστικά της.

Τέλος, υλοποιείται το σύστημα στο περιβάλλον Simulink του Matlab. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται επιβεβαίωση της θεωρητικής ανάλυσης που προηγήθηκε.

«Management and Optimization of lead acid battery pack»

«Felicien Lombo Konde»

Abstract

The present thesis deals with the design and implementation of battery management system for lead acid battery pack. The system is composed of a Power Electronic Converter and a charge controller. Buck converter also called DC-DC step down converter is used to charge the battery pack. During the charge, the voltage and current are monitored in real time by the charge controller in order to minimize the risk of overcharging. When the battery terminal voltage reaches the predefined value, the charge controller should automatically disconnect charger from the battery pack.

Initially, different types of batteries and problem of battery pack are discussed in a general way. Then, the lead acid batteries are closely examined. In addition, an analytical approach to battery management system for battery pack which will be designed in the current thesis is performed and the requirements discussed.

The next steps are the theoretic analysis, design and simulation of ideal and non-ideal DC-DC step down converter with Simulink of Matlab. The design process of the charger is presented in detail. All the specifications and theory of operation are analyzed as well.

Finally, the Battery management system for lead acid battery pack is implemented in Matlab/Simulink. In this way, the theoretical analysis is confirmed.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου, κ. Ιορδάνη Κιοσκερίδη, για την καθοριστική επιστημονική καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Τα δύο βιβλία που έγραψε «Ηλεκτρονικά Ισχύος» και «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος» καθώς και μια σειρά μαθημάτων που κάνει όπως τα «Ηλεκτρονικά ισχύος» και οι «Μετατροπείς ισχύος» επηρέασαν και καθόρισαν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους συμφοιτητές μου, Σπύρο Μιμιδάκη και Λευτέρη Τσελεγκίδη για την αποτελεσματική συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής και τον φίλο μου Ruben Kalanda για τις ουσιαστικές συμβουλές και προτάσεις. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την οικονομική και την ηθική υποστήριξη.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract.....	vii
Ευχαριστίες.....	viii
Περιεχόμενα.....	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων.....	xivii
Συνομογραφίες.....	xv
Κεφάλαιο 1ο: Συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ταξινόμηση των μπαταριών.....	1
1.2.1 Πρωτεύοντες μπαταρίες	1
1.2.2 Δευτερεύουσες μπαταρίες	1
1.3 Σύνδεση περισσότερων μπαταριών	1
1.3.1 Παράλληλη σύνδεση	1
1.3.2 Σύνδεση εν σειρά.....	2
1.3.3 Μεικτή σύνδεση	3
1.4 Σύντομη περιγραφή του προβλήματος με τις συστοιχίες μπαταριών.....	3
1.5 Διαχείριση και βελτιστοποίηση.....	4
1.6 Επίλογος.....	4
Κεφάλαιο 2ο: Μπαταρίες μολύβδου Οξέος	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Χαρακτηριστικά	6
2.2.1 Τάση	6
2.2.2 Χωρητικότητα	7
2.2.3 Εκφόρτιση και αυτό-εκφόρτιση	8
2.2.4 Βαθμός απόδοσης.....	9
2.2.5 Εσωτερική αντίσταση και Ηλεκτρεγερτική δύναμη.....	9
2.3 Βελτιστοποίηση της μπαταρίας μολύβδου	10
2.4 Φόρτιση.....	10
2.4.1 Μέθοδοι φόρτισης	11
2.4.1.1 Φόρτιση με σταθερή τάση (CV)	12

2.4.1.2	Φόρτιση με σταθερό ρεύμα (CC)	13
2.4.1.3	Φόρτιση με συνδυασμό (CCCV)	14
2.5	Επιλογή μεθόδου φόρτισης συσσωρευτών.....	14
2.6	Ρυθμός φόρτισης	15
2.7	Μεγέθη εκτίμησης κατάστασης μπαταριών	15
2.8	Προσομοίωση συσσωρευτή μολύβδου.....	16
2.9	Επίλογος.....	20
Κεφάλαιο 3ο:	Αναλυτική προσέγγιση του συστήματος διαχείρισης συστοιχίας μπαταριών.....	21
3.1	Εισαγωγή.....	21
3.2	Προσέγγιση και προϋποθέσεις	22
3.2.1	Φορτιστής	22
3.2.2	Διακόπτης κυκλώματος	23
3.2.3	Μικροελεγκτής	24
3.2.4	Μετρητικό ρεύματος	25
3.2.5	Μετρητικό τάσης	26
3.3	Επίλογος.....	26
Κεφάλαιο 4ο:	Θεωρητική ανάλυση της διάταξης φόρτισης συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου	27
4.1	Εισαγωγή.....	27
4.2	Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος υποβιβασμού της τάσης (Buck Converter).....	28
4.2.1	Τρόποι λειτουργίας	29
4.2.1.1	Συνεχής λειτουργία	29
4.2.1.2	Ασυνεχής λειτουργία	31
4.2.2	Κύκλωμα ισχύος	32
4.2.2.1	Το MOSFET ισχύος	32
4.2.2.2	Δίοδος ελεύθερης ροής	33
4.2.2.3	Φίλτρο εξόδου	33
4.2.3	Πηγή τροφοδοσίας του μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης	35
4.3	Έλεγχος της διάταξης.....	36
4.3.1	Διαμόρφωση εύρους παλμών(PWM)	36
4.3.2	PID ελεγκτές	37
4.4	Επίλογος.....	38
Κεφάλαιο 5ο:	Προσομοίωση και υλοποίηση της διάταξης φόρτισης	39
5.1	Εισαγωγή.....	39
5.2	Προδιαγραφές της διάταξης.....	39

5.3	Σχεδίαση και προσομοίωση ιδανικής διάταξης φόρτισης.....	39
5.4	Σχεδίαση και προσομοίωση πραγματικής διάταξης φόρτισης -Επιλογή στοιχείων για Κατασκευή.....	45
5.4.1	Πηγή τροφοδοσίας της διάταξης	45
5.4.1.1	Επιλογή του μετασχηματιστή	45
5.4.1.2	Επιλογή ανορθωτή γέφυρας	46
5.4.1.3	Επιλογή πυκνωτή εισόδου	47
5.4.2	Κύκλωμα ισχύος.....	47
5.4.2.1	Επιλογή MOSFET	47
5.4.2.2	Επιλογή πηνίου	48
5.4.2.3	Επιλογή διόδου	48
5.4.2.4	Επιλογή πυκνωτή εξόδου	49
5.4.2.5	Επιλογή snubber	49
5.5	Παραγωγή των παλμών ελέγχου από το βοηθητικό μικροεπεξεργαστή της Simulink	50
5.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης της διάταξης τροφοδοσίας μέσω του λογισμικού Simulink	51
5.7	Σχεδιασμός της πλακέτας διάταξης φόρτισης	54
5.8	Επίλογος	55
Κεφάλαιο 6ο: Υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης και βελτιστοποίησης συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου		
6.1	Εισαγωγή.....	56
6.2	Προδιαγραφές του συστήματος.....	56
6.3	Συστοιχία μπαταριών	56
6.4	Διάταξη ελέγχου	57
6.4.1	Μετρητικό ρεύματος	57
6.4.2	Μετρητικό τάσης	58
6.5	Φορτιστής	59
6.6	Σχεδιασμός της πλακέτας διάταξης φόρτισης	59
6.7	Μικροελεγκτής	59
6.8	Διακόπτης κυκλώματος	60
6.9	Οδηγός πύλης	60
6.10	Τροφοδοτικό συνεχούς τάσης	61
6.11	Αποτελέσματα της προσομοίωσης συστήματος	62
6.11.1	Φόρτιση της συστοιχίας με σταθερό ρεύμα(CC)	64
Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης		
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Παράλληλη σύνδεση των μπαταριών	2
Σχήμα 1.2: Σύνδεση εν σειρά των μπαταριών	2
Σχήμα 1.3: Μεικτή σύνδεση εν σειρά των μπαταριών.....	3
Σχήμα 2.1: Μέρη συσσωρευτή μολύβδου οξέος.....	6
Σχήμα 2.2: Τάση ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με τη στάθμη φόρτισης	6
Σχήμα 2.3: Διαδικασία εκφόρτισης.....	8
Σχήμα 2.4: Διαδικασία φόρτισης.....	11
Σχήμα 2.5: Μεταβολή της τάσης και του ρεύματος κατά την φόρτιση με σταθερή τάση	12
Σχήμα 2.6: Μεταβολή της τάσης και του ρεύματος κατά την φόρτιση με σταθερό ρεύμα	13
Σχήμα 2.7: Μεταβολή της τάσης και του ρεύματος κατά την φόρτιση με CCCV	14
Σχήμα 2.8: Μοντέλο συσσωρευτών του Simulink.....	16
Σχήμα 2.9: Παράμετροι μοντέλου συσσωρευτή	16
Σχήμα 2.10: Φύλλο δεδομένων – μπαταρία μολύβδου	17
Σχήμα 2.11: Μοντέλο απεικόνισης του ρεύματος, της τάσης και της SoC μιας μπαταρίας	18
Σχήμα 2.12: Ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου των συσσωρευτών της Simulink	18
Σχήμα 2.13: Εξισώσεις φόρτισης κι εκφόρτισης μπαταριών μολύβδου-οξέος.....	18
Σχήμα 2.14: Καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας	19
Σχήμα 2.15: Χαρακτηριστική καμπύλη φόρτισης ηλεκτροχημικών συσσωρευτών	19
Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος διαχείρισης μπαταριών	21
Σχήμα 3.2: Φορτιστής taper-Current.....	22
Σχήμα 3.3: Μεταβολή της τάσης και του ρεύματος κατά τη φόρτιση με taper-Current.....	23
Σχήμα 3.4: Σύνδεση διακόπτη κυκλώματος με άλλες μονάδες του συστήματος.....	24
Σχήμα 3.5: Σύνδεση μικροελεγκτή με άλλες μονάδες του συστήματος	25
Σχήμα 3.6: Σύνδεση μετρητικού ρεύματος με άλλες μονάδες του συστήματος	25
Σχήμα 3.7: Σύνδεση μετρητικού τάσης με άλλες μονάδες.....	26
Σχήμα 4.1: Δομικό διάγραμμα μετατροπής εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή	27
Σχήμα 4.2: Κυκλωματική δομή του μετατροπέα buck.....	28
Σχήμα 4.3: Κυματομορφές στο μετατροπέα όταν λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος.....	30
Σχήμα 4.4: Κυματομορφές στο μετατροπέα όταν λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος.....	31
Σχήμα 4.5: Κυκλωματικό σύμβολο του MOSFET ισχύος.....	32
Σχήμα 4.6: Κυματομορφή της τάσης στο πυκνωτή εξομάλυνσης	35
Σχήμα 4.7: Παραδείγματα PWM παλμών με εύρος παλμού 20%, 40%, 60%, 80%.....	36
Σχήμα 4.8: Λειτουργικό διάγραμμα του διαμορφωτή εύρους παλμών.....	37
Σχήμα 4.9: Τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών. Σήματα συγκριτή, τάση εξόδου	37
Σχήμα 4.10: Block διάγραμμα ενός PI ελεγκτή σε κλειστό βρόχο	38
Σχήμα 5.1: Ιδανικός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος υποβιβασμού της τάσης.....	41
Σχήμα 5.2: Κυματομορφή της τάσης εισόδου στο μετατροπέα	42
Σχήμα 5.3: Κυματομορφή της τάσης εξόδου	42
Σχήμα 5.4: Κυματομορφή της τάσης πηνίου	43
Σχήμα 5.5: Κυματομορφή του ρεύματος πηνίου.....	43
Σχήμα 5.6: Κυματομορφή του ρεύματος εξόδου	44
Σχήμα 5.7: Κυματομορφή του ρεύματος που διαρρέει τον πυκνωτή.....	44
Σχήμα 5.8: Παράμετροι βοηθητικού μετασχηματιστή.....	46
Σχήμα 5.9: Ανορθωτής γέφυρας SCAJ15FF.....	46

Σχήμα 5.10: Πυκνωτής ΕΚΜΗ101VRT103MB80T.....	47
Σχήμα 5.11: MOSFET IRF6643TRPBF	47
Σχήμα 5.12: Πηνίο PM3700-30-RC.....	48
Σχήμα 5.13: Δίοδος 1N5405	48
Σχήμα 5.14: Πυκνωτής εξόδου EEV-EB2C330SQ	49
Σχήμα 5.15: Κύκλωμα προστασίας του MOSFET.....	49
Σχήμα 5.16: Επιδράσεις των μεταβολών των κερδών ενός ελεγκτή PID	50
Σχήμα 5.17: Μοντέλο προσημείωσης διάταξης φόρτισης	50
Σχήμα 5.18: Κυματομορφές των τάσεων στο πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα του Μ/Σ	51
Σχήμα 5.19: Κυματομορφή της τάσης εισόδου στο μετατροπέα από την γέφυρα ανόρθωσης.....	51
Σχήμα 5.20: Παλμοί οδήγησης του MOSFET	52
Σχήμα 5.21: Κυματομορφή της τάσης στο πηνίο σε κατάσταση ισορροπίας	52
Σχήμα 5.22: Κυματομορφή του ρεύματος στο πηνίο.....	53
Σχήμα 5.23: Κυμάτωση του ρεύματος εξόδου σε κατάσταση ισορροπίας	53
Σχήμα 5.24: Κυμάτωση της τάσης εξόδου σε κατάσταση ισορροπίας	54
Σχήμα 5.25: Κυκλωματική δομή της διάταξης φόρτισης.....	54
Σχήμα 5.26: Σχεδίαση της τυπωμένης πλακέτας διάταξης φόρτισης.....	55
Σχήμα 6.1:Χαρακτηριστικά της μπαταρίας.....	56
Σχήμα 6.2: Μετρητικό ρεύματος ACS712ELCTR-05B-T της εταιρείας ALLIGRO microsystem.....	57
Σχήμα 6.3: Συνδεσμολογία μετρητικού ρεύματος ACS712ELCTR-05B-T	57
Σχήμα 6.4: Λειτουργικό διάγραμμα του μετρητικού ρεύματος ACS712ELCTR-05B-T	57
Σχήμα 6.5: Κύκλωμα μέτρησης και υποβιβασμού της τάσης στους ακροδέκτες της συστοιχίας	58
Σχήμα 6.6: Σχεδίαση της πλακέτας διάταξης φόρτισης	59
Σχήμα 6.7: Η αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO UNO	59
Σχήμα 6.8: Προδιάγραφες της αναπτυξιακής πλακέτας ARDUINO UNO.....	60
Σχήμα 6.9: Λειτουργικό διάγραμμα ADuM3221	60
Σχήμα 6.10: Περιγραφή ακροδεκτών του ADuM3221	61
Σχήμα 6.11: Γραμμικό τροφοδοτικό 12V	61
Σχήμα 6.12: Σταθεροποιητής 7812 της εταιρείας Texas Instruments.....	62
Σχήμα 6.13: Μοντέλο επίβλεψης ηλεκτροχημικών συσσωρευτών στη Simulink/Matlab.....	62
Σχήμα 6.14: Διάγραμμα ροής κλειστού βρόχου MATLAB.....	63
Σχήμα 6.15: Φόρτιση της συστοιχίας με σταθερό ρεύμα	64

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα του παραδείγματος.....	10
Πίνακας 2.2: Μετρήσεις κατά την φόρτιση με σταθερή τάση	12
Πίνακας 2.3: Μετρήσεις κατά την φόρτιση με σταθερό ρεύμα	13
Πίνακας 3.1: Ενδεικτικοί ρυθμοί φόρτισης συσσωρευτών	15

Συντομογραφίες

Εξ.	Εξίσωση
Σχ.	Σχήμα
Μ/Σ	Μετασηματιστής
μ/ε	Μικροελεγκτής
CC	Constant Current
CV	Constant Voltage
CCCV	Constant Current Constant Voltage
C	Capacity
BMS	Battery Management System
Ah	Ampere hour
SOC	State of charge
SOH	State of health
DOD	Depth of discharge
DC	Direct current
AC	Alternating current
PWM	Pulse width modulation
CCM	Continuous conduction mode
DCM	Discontinuons conduction mode
VOC	Open circuit voltage

Κεφάλαιο 1ο: Συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών

1.1 Εισαγωγή

Οι μπαταρίες είναι γνώστες ως συσκευές που μετατρέπουν μέσω μίας ηλεκτροχημικής αντίδρασης τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η εφεύρεση της πρώτης επαναφορτιζόμενης μπαταρίας χρονολογείται από το 1859 και οι διαδοχικές βελτιώσεις της τεχνολογίας της, έχουν αλλάξει σημαντικά την καθημερινότητα μας. Οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις των αυτοκινήτων έχουν οδηγήσει τις εταιρείες στην παραγωγή διαφορετικών ειδών μπαταριών. Ωστόσο, η διαχείριση και βελτιστοποίηση αυτών των μπαταριών, παραμένουν ακόμα και σήμερα μια απαιτητική και πολύπλοκη διαδικασία. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μια γενική και σύντομη αναφορά στους συσσωρευτές και ταυτόχρονα περιγράφεται η ανάγκη αποτελεσματικής παρακολούθησης κατά τη λειτουργία τους .

1.2 Ταξινόμηση των μπαταριών

Υπάρχουν δύο είδη μπαταριών, οι πρωτεύοντες ή πρωτογενείς μπαταρίες (Primary batteries) και οι δευτερογενείς ή δευτερεύουσες μπαταρίες (Secondary batteries). Η κατηγοριοποίηση αναφέρεται στην ικανότητα τους να επαναφορτίζονται.

1.2.1 Πρωτεύοντες μπαταρίες

Οι πρωτεύοντες μπαταρίες ή μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, δεν έχουν τη δυνατότητα επαναφοράς στην αρχική τους κατάσταση. Εκφορτίζονται μια φορά και κατόπιν απορρίπτονται. Οι αλκαλικές είναι οι πλέον διαδεδομένες πρωτεύοντες μπαταρίες, οι οποίες αν εκφορτιστούν μια φορά, δε μπορούν να ξανά λειτουργήσουν.

1.2.2 Δευτερεύουσες μπαταρίες

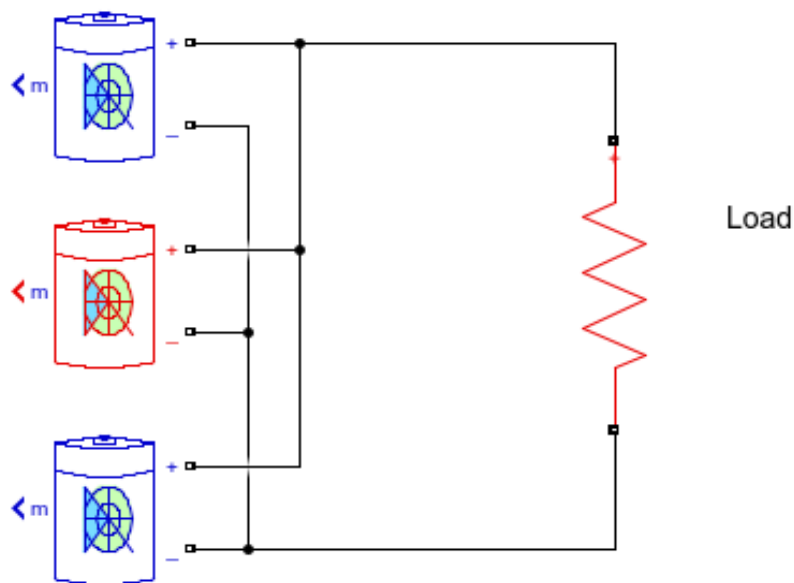
Οι Δευτερεύουσες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες έχουν την δυνατότητα να φορτίζονται και να αποφορτίζονται. Η κατηγορία αυτή αποτελεί συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Ένα από τα βασικότερα αφορά τους πολλαπλούς κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης. Οι πλέον διαδεδομένες δευτερεύουσες μπαταρίες είναι οι μολύβδου-οξέος (Pb), οι Νικελίου – υδριδίου μετάλλου (NiMH), οι Νικελίου - Καδμίου (Ni-Cd) και οι ιόντων λιθίου.

1.3 Σύνδεση περισσότερων Μπαταριών

Πολλές φορές για να καλύψουμε την ανάγκες μας, χρησιμοποιούμε περισσότερες από μία μπαταρία για την αύξηση της τάσης είτε της χωρητικότητας. Διακρίνονται τρεις τρόποι σύνδεσης μπαταριών: Παράλληλη σύνδεση, Σύνδεση εν σειρά και Μεικτή σύνδεση.

1.3.1 Παράλληλη σύνδεση

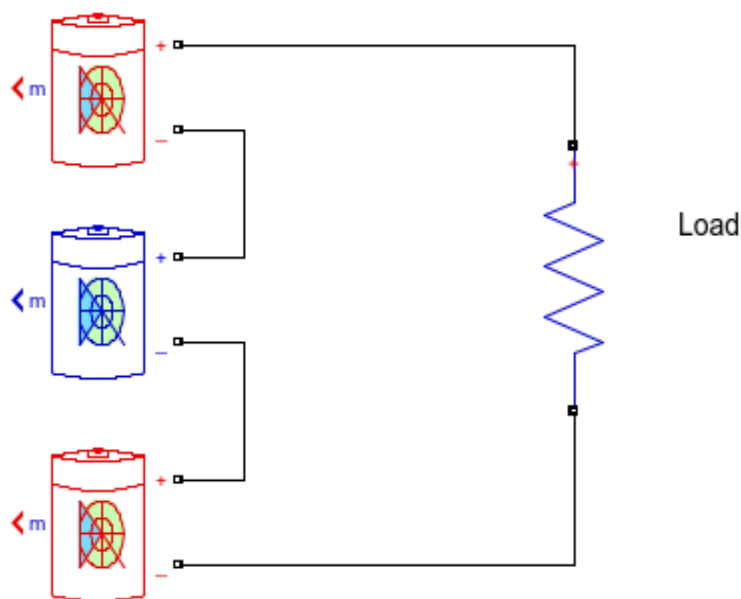
Εάν συνδέσουμε δύο ή περισσότερες μπαταρίες παράλληλα, δηλαδή όλοι οι θετικοί πόλοι μαζί και οι αρνητικοί μαζί , τότε θεωρητικά αυξάνεται η χωρητικότητα ενώ η τάση παραμένει αμετάβλητη. Έστω ότι έχουμε τρεις μπαταρίες 12V και χωρητικότητα 10Ah συνδεδεμένες παράλληλα. Θεωρητικά, Θα έχουμε πάντα 12V αλλά η χωρητικότητα θα πολλαπλασιαστεί ανάλογα με τον αριθμό των συσσωρευτών. Δηλαδή, στην περίπτωση μας η χωρητικότητα θα γίνει 30Ah. Η παράλληλη σύνδεση χρησιμοποιείται συχνά στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Εικονίζεται η παράλληλη σύνδεση των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Παράλληλη σύνδεση των μπαταριών

1.3.2 Σύνδεση εν σειρά

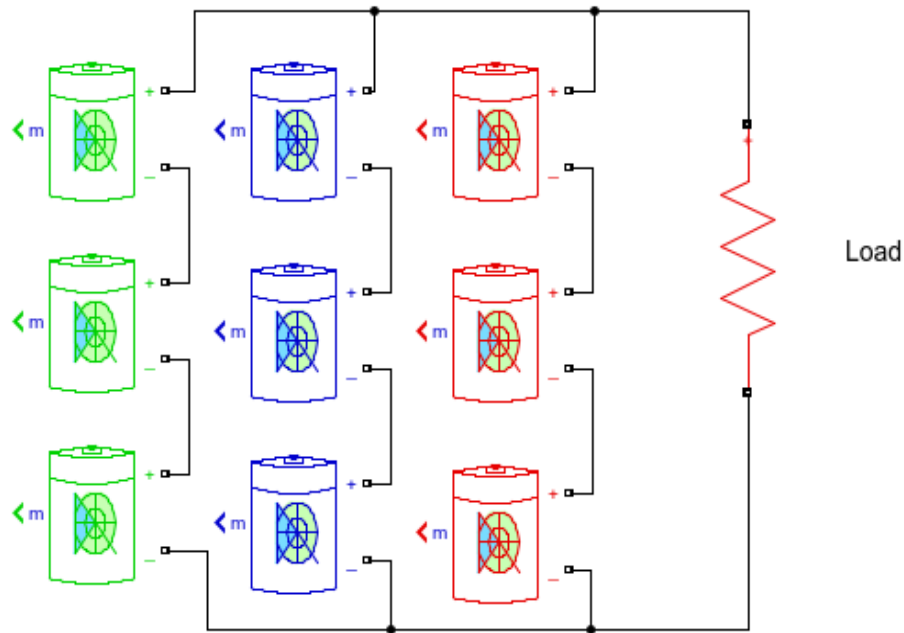
Με την σύνδεση εν σειρά, όπου συνδέουμε τον ένα αρνητικό πόλο της μιας με το θετικό της άλλης (σχήμα 1.2). Θεωρητικά, η τάση πολλαπλασιάζεται ανάλογα με τον αριθμό των συσσωρευτών, ενώ αντίθετα η χωρητικότητα παραμένει η ίδια με αυτήν της κάθε μπαταρίας. Έστω ότι έχουμε τρεις μπαταρίες 12V και χωρητικότητα 10Ah συνδεδεμένες σε σειρά. Θεωρητικά, θα έχουμε πάντα 10Ah ενώ η τάση ακροδεκτών θα πολλαπλασιαστεί ανάλογα με τον αριθμό των συνδεδεμένων συσσωρευτών. Δηλαδή, στην περίπτωση μας, η τάση στους ακροδέκτες εξόδου της συνδεσμολογίας θα γίνει 36V. Η μπαταρία 12V, αποτελείται συνήθως από έξι στοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά για την αύξηση της τάσης. Τέλος, εικονίζεται η σύνδεση εν σειρά των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Σύνδεση εν σειρά των μπαταριών

1.3.3 Μεικτή σύνδεση

Υπάρχει και η τρίτη περίπτωση, δηλαδή ένας συνδυασμός των δύο. Σε μια μεικτή σύνδεση, όπως αυτή του σχήματος 1.3, μπορούμε να αυξάνουμε την χωρητικότητα και την τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών. Αν συνδέσουμε σε σειρά τρία ξεχωριστά συστήματα τριών μπαταριών 12V και 10Ah μεταξύ τους (οπότε κάθε σύστημα θα έχει 36 Volt και 10 Ah) και στη συνέχεια κάνουμε παράλληλη σύνδεση των τριών συστημάτων, η χωρητικότητα θα γίνει 30 Ah και η τάση στην έξοδο του συστήματος θα είναι 36 Volt. Τέλος, κάνοντας τη μεικτή σύνδεση των μπαταριών, καταφέραμε να αυξήσουμε την χωρητικότητα και την τάση στους ακροδέκτες του συστήματος.



Σχήμα 1.3: Μεικτή σύνδεση εν σειρά των μπαταριών

1.4 Σύντομη περιγραφή του προβλήματος με τις συστοιχίες μπαταριών

Η βασική ηλεκτροχημική μονάδα σ'έναν συσσωρευτή λέγεται στοιχείο. Ο συσσωρευτής αποτελείται συνήθως από πολλά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά για την αύξηση της τάσης. Ωστόσο, τα στοιχεία σε μια μπαταρία δεν έχουν συνήθως ίδιες παραμέτρους λόγω των ανακολουθιών κατασκευής. Δεν φορτίζονται ούτε εκφορτίζονται με τον ίδιο ρυθμό. Ακόμα και κατά την αποθήκευσή τους, η αυτό-εκφόρτιση δεν είναι ίδια. Κάποιο στοιχείο θα χάσει περισσότερο φορτίο και κάποιο λιγότερο. Το ίδιο φαινόμενο συμβαίνει και όταν φορτίζεται ή εκφορτίζεται μια συστοιχία μπαταριών. Μια συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών θεωρείται άρτια όταν συνδεθούν οι μπαταρίες με ίδια χαρακτηριστικά τάσης, χωρητικότητας και ίδιας φυσικής κατάστασης. Δεν υπάρχει στην πραγματικότητα μια τέτοια συστοιχία. Οι μπαταρίες μπορεί να παρασκευαστούν με τον ίδιο τρόπο, την ίδια θεωρητικά στιγμή, θα έχουν πάντα μικρές διαφορές στις λειτουργικές παραμέτρους τους.

Οι ενέργειες που πραγματοποιούνται σε μια συστοιχία μπαταριών κατά την φόρτιση και εκφόρτιση περιγράφονται ως εξής:

- Καθώς φορτίζεται η συστοιχία που συνήθως περιέχει πολλές μπαταρίες συνδεδεμένες σε τρόπους που αναλύονται στην ενότητα 1.3, η μπαταρία με το μεγαλύτερο φορτίο θα φτάσει πρώτη στην πλήρη φόρτιση, ενώ η μπαταρία με το μικρότερο φορτίο θα απέχει αρκετά από την

πλήρη φόρτισή της. Συνεχίζοντας την φόρτιση για να φορτιστούν οι υπολειπόμενες μπαταρίες, θα υπερφορτιστεί η ήδη φορτισμένη.

- Καθώς εκφορτίζεται, η μπαταρία με χαμηλότερο φορτίο θα αδειάσει πρώτη, ενώ την ίδια στιγμή μία με την μεγαλύτερη ενέργεια θα απέχει πολύ από την πλήρη εκφόρτιση της. Μια τελείως αφόρτιστη μπαταρία ανάμεσα σε φορτισμένες, κινδυνεύει να αντιστρέψει την πολικότητά της και να καταστραφεί.

1.5 Διαχείριση και βελτιστοποίηση μπαταριών

Ο ρυθμός εκφόρτισης, το βάθος της εκφόρτισης, η θερμοκρασία λειτουργίας αλλά και η μέθοδος φόρτισης είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν κατά βάθος τη διάρκεια ζωής των επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Έτσι, ανάλογα με τον είδος μπαταρίας που χρησιμοποιείται πρέπει να λειτουργούν κάτω από κάποιους συγκεκριμένους περιορισμούς ώστε να διασφαλιστεί η μέγιστη διάρκεια ζωής τους. Αν δεν τηρούνται ορισμένοι περιορισμοί, τότε όσο καλά και αν είναι σχεδιασμένη η μπαταρία και όσο καλά χαρακτηριστικά και αν έχει, θα αλλοιωθεί η μπαταρία σε μεγάλο βαθμό σε μικρό χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό, οδήγησε την επιστημονική κοινότητα να αναπτύξει συστήματα διαχείρισης μπαταριών (Battery management system- BMS). Τα συστήματα αυτά, περιέχουν διατάξεις μετρήσεων (μετρητικά ρεύματος, τάσης και θερμοκρασίας), διατάξεις τροφοδοσίας και ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου των μετρούμενων μεγεθών. Η σχεδίαση και κατασκευή ενός συστήματος διαχείρισης ηλεκτροχημικών συσσωρευτών είναι μια εξαιρετικά πολύπλοκη διαδικασία. Σε κάθε περίπτωση, σχεδιάζεται ανάλογα με τα δεδομένα του προβλήματος ή από τις ανάγκες του συστήματος.

Παρουσιάζονται τα βήματα σχεδίασης και υλοποίησης ενός BMS για την διαχείριση και βελτιστοποίηση συστοιχίας μπαταριών μολύβδου στα κεφάλαια που ακολουθούν.

1.6 Επίλογος

Υπάρχουν δύο είδη μπαταριών, πρωτογενείς μπαταρίες (Primary batteries) και οι δευτερογενείς μπαταρίες (Secondary batteries). Η πρώτη κατηγορία δεν επαναφορτίζονται ενώ η δεύτερη έχει τη δυνατότητα επαναφοράς στην αρχική της κατάσταση. Η εφεύρεση της πρώτης επαναφορτιζόμενης μπαταρίας χρονολογείται από το 1859.

Η συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών αποτελείται συνήθως από περισσότερες μπαταρίες συνδεδεμένες είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Συνδέονται σε σειρά για την αύξηση της τάσης στους ακροδέκτες της συστοιχίας. Όταν υπάρχει απαίτηση μιας μεγάλης χωρητικότητας, όπως συνήθως συμβαίνει στα φωτοβολταϊκά συστήματα, τότε η σύνδεση των μπαταριών παράλληλα είναι καλή λύση.

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση της συστοιχίας είναι ότι οι συσσωρευτές δεν παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά. Δεν φορτίζονται ούτε εκφορτίζονται με τον ίδιο ρυθμό, ο χρόνος φόρτισης δεν είναι ίδιος λόγω των ασυνεπειών κατασκευής. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε υπερφόρτιση ή και σε υποφόρτιση κάποιων ηλεκτροχημικών συσσωρευτών που τελικά έχει αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση της συστοιχίας. Πιο πρακτικά, όταν φορτίζεται η συστοιχία, η μπαταρία με το μεγαλύτερο φορτίο θα φτάσει πρώτη στην πλήρη φόρτιση. Συνεχίζοντας την φόρτιση για να φορτιστούν οι υπολειπόμενες μπαταρίες, θα υπερφορτιστεί η ήδη φορτισμένη. Γίνεται ακριβώς το αντίθετο κατά την διαδικασία εκφόρτισης. Δηλαδή, η μπαταρία με χαμηλότερο φορτίο θα αδειάσει πρώτα, ενώ την ίδια στιγμή μία με την μεγαλύτερη ενέργεια θα απέχει πολύ από την πλήρη εκφόρτιση του. Η διάρκεια ζωής της συστοιχίας μπαταριών εξαρτάται έντονα από τον ρυθμό εκφόρτισης, την θερμοκρασία λειτουργίας, τον ρυθμό φόρτισης αλλά και από τη μέθοδο φόρτισης. Η σωστή διαχείριση της, επιβάλλει την παρακολούθηση αυτών των μεγεθών κατά τη λειτουργία της.

Κεφάλαιο 2ο: Μπαταρίες Μολύβδου – Οξέος

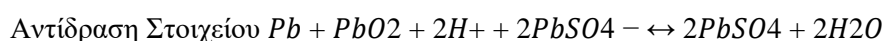
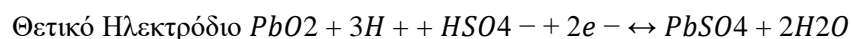
2.1 Εισαγωγή

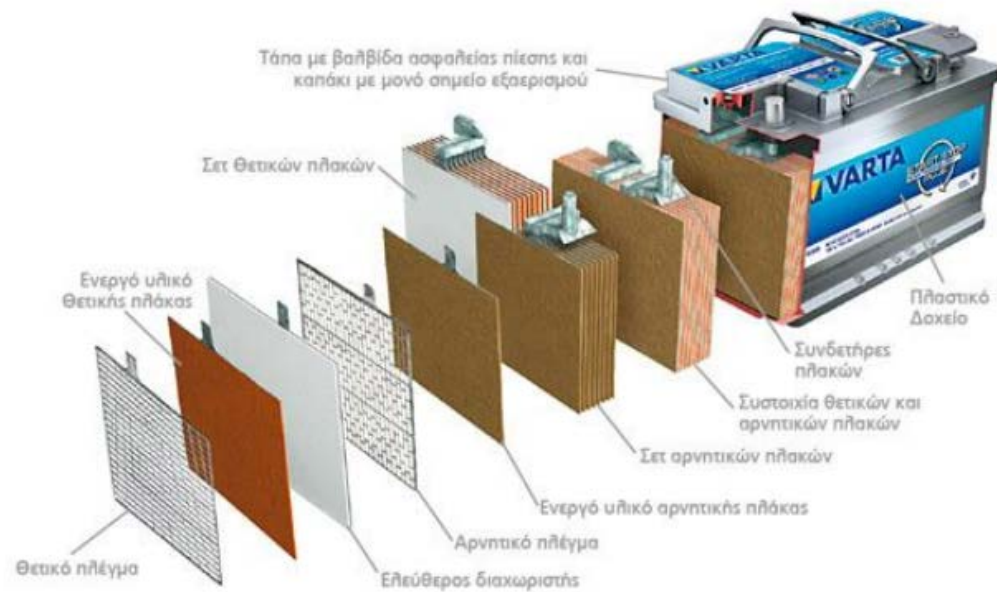
Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούν τον παλιότερο τύπο επαναφορτιζόμενης μπαταρίας και παραμένουν το ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Διακρίνονται δύο τύποι μπαταριών μολύβδου: μπαταρίες μολύβδου ανοιχτού τύπου και μπαταρίες μολύβδου κλειστού τύπου. Η εφεύρεση της πρώτης μπαταρίας μολύβδου-οξέος, από το Γάλλο φυσικό Gaston Planté χρονολογείται από το 1859, περίπου 40 χρόνια πριν ξεκινήσουν οι μπαταρίες νικελίου να τις ανταγωνίζονται. Οι ανοιχτού τύπου μπαταρίες χρειάζονται συντήρηση, κάτι το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται η, ανά διαστήματα, ρίψη νερού στη μπαταρία. Ο συγκεκριμένος τύπος μπαταριών τείνει να εκλείψει εξαιτίας των λειτουργιών μειονεκτημάτων του και της απαίτησης τακτικής επιθεώρησης της στάθμης του ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, η χρήση τους εγκυμονεί κίνδυνους, εξαιτίας της απελευθέρωσης υδρογόνου κατά το στάδιο της πλήρης φόρτισης. Οι κλειστού τύπου μπαταρίες οι οποίες διακρίνονται σε AGM (Absorbed Glass Mat) και σε gel, δεν απαιτούν συντήρηση και έχουν ευρέως αντικαταστήσει τις ανοιχτού τύπου μπαταρίες, κυρίως για λόγους ασφαλείας. Συχνά υπήρξαν εκτιμήσεις ότι οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος θα αντικατασταθούν από άλλης τεχνολογίας μπαταρίες, ωστόσο ο συγκεκριμένος τύπος μπαταριών διατήρησε τη δημοτικότητά κυρίως στα οχήματα εξαιτίας των χαρακτηριστικών του.

Παρότι επιδεικνύει πολύ μικρές αναλογίες ενέργειας-βάρους και ενέργειας-όγκου, η μπαταρία μολύβδου-οξέος έχει μια επιτυχημένη παρουσία στο εμπόριο πάνω από έναν αιώνα και έχει βελτιωθεί σημαντικά. Με τις βελτιώσεις που έχουν γίνει, έχουν επιτευχθεί μπαταρίες με τάσεις από 100 έως 300 Volt και με ομοιόμορφη απόδοση καθώς έχουν και υψηλή ηλεκτρική αποδοτικότητα ανάκαμψης 75-80%. Αυτό καθιστά τις μπαταρίες αυτές ελκυστικές για εφαρμογές σε αυτοκίνητα, λεωφορεία και σκάφη, ως μπαταρίες φόρτισης, καθώς και σε μεγάλες βιομηχανικές μηχανές, αναπηρικές καρέκλες, καρτσάκια γκολφ και άλλα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς και για συστήματα φωτισμού ασφαλείας και συστήματα UPS σε υπηρεσίες ζωτικής σημασίας όπως νοσοκομεία. Ένα από τα μειονεκτήματα των μπαταριών μολύβδου οξέος είναι ότι έχουν πολύ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, έτσι είναι μεγάλες σε μέγεθος. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι ο μολύβδος είναι ιδιαίτερα δηλητηριώδης για τους ανθρώπους και τα ζώα, επομένως πρέπει να απορρίπτονται με φιλικό τρόπο για το περιβάλλον. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι οι πλέον κατάλληλες για εφαρμογές όπου απαιτείται μια ανθεκτική και οικονομικά αποδοτική μπαταρία, της οποίας το βάρος και το μέγεθος δεν αποτελούν πρόβλημα.

Όπως συμβαίνει και στους άλλους τύπους μπαταριών, η λειτουργία της μπαταρίας μολύβδου οξέος βασίζεται σε μία χημική αντίδραση. Στο εσωτερικό της, η κάθοδος είναι διοξείδιο του μολύβδου (PbO₂), η άνοδος είναι μολύβδος (Pb) και ο ηλεκτρολύτης είναι θειικό οξύ. Μία μπαταρία 24 Volt αποτελείται από δώδεκα ταυτόσημα κελιά 2 Volt. Κάθε κελί περιέχει πλάκες μολύβδου διαφορετικής σύνθεσης μέσα σε αραιό θειικό οξύ. Οι καθαρές πλάκες μολύβδου που συνδέονται με τον αρνητικό ακροδέκτη της μπαταρίας αντιδρούν με τα ιόντα θειικής ρίζας για το σχηματισμό θειικού μολύβδου και έτσι γίνονται αρνητικά φορτισμένες, εφόσον τροφοδοτούν δύο θετικά φορτία.

Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται σε ένα στοιχείο μπαταρίας μολύβδου – οξέος περιγράφονται ως εξής:



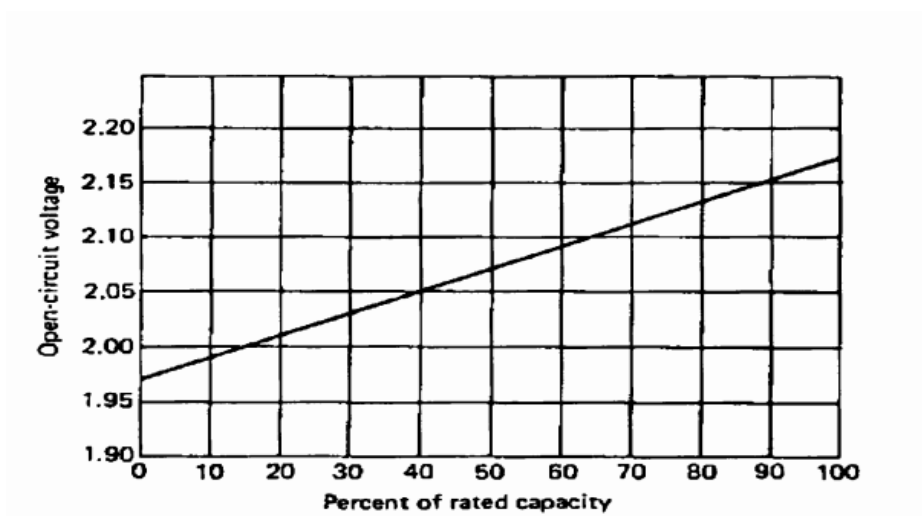


Σχήμα 2.1: Μέρη συσσωρευτή μολύβδου οξέος [1]

2.2 Χαρακτηριστικά των συσσωρευτών μολύβδου οξέος

2.2.1 Τάση

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας είναι η τάση ακροδεκτών. Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου μιας μπαταρίας μολύβδου είναι 2 Volt. Οι συγκεκριμένες μπαταρίες κατασκευάζονται συνήθως σε 6V και 12V. Για να δημιουργηθεί μια μπαταρία που να έχει τάση 6 Volt, συνδέονται σε σειρά τρία στοιχεία και αντίστοιχα εκείνη των 12V αποτελείται από έξι στοιχεία. Οι τιμές για μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία είναι 2.45/στοιχείο. Σε μια εκφορτισμένη μπαταρία είναι 1.75/στοιχείο σε ρεύματα εκφόρτισης έως 0.2C, 1.70/στοιχείο σε ρεύματα εκφόρτισης έως 0.5 – 0.6C και 1.50/στοιχείο σε ρεύματα εκφόρτισης 1-2C. Γενικά, η τάση στους πόλους της μπαταρίας διατηρείται σχετικά σταθερή μέχρι μια στάθμη εκφόρτισης και μειώνεται απότομα στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι στις μπαταρίες μολύβδου, η τάση στους πόλους χωρίς φορτίο εξαρτάται έντονα από τη θερμοκρασία.



Σχήμα 2.2: Τάση ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με τη στάθμη φόρτισης [2]

Στο σχήμα 2.2 εικονίζεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος ως προς τη στάθμη φόρτισης σε θερμοκρασία 20°C. Στην θερμοκρασία αυτή, η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι περίπου ίση με 2.16V/στοιχείο σε στάθμη φόρτισης 100% και 1.94/στοιχείο σε πλήρη εκφόρτιση. Σε κάθε περίπτωση, η τάση αυτή, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας

2.2.2 Χωρητικότητα

Άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συσσωρευτών είναι η χωρητικότητά τους. Το μέγεθος αυτό εκφράζει το αποθηκευμένο φορτίο της μπαταρίας και είναι ανάλογο με την επιφάνεια των ηλεκτροδίων που είναι εκτεθειμένα στον ηλεκτρολύτη. Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας μπαταρίας είναι τα αμπερώρια (Ah). Η τιμή της, η οποία ορίζεται από τον κατασκευαστή αποτελεί την ονομαστική χωρητικότητα και αναφέρεται σε συγκεκριμένες τιμές του ρεύματος εκφόρτισης και της θερμοκρασίας. Η τιμή του ρεύματος εκφόρτισης είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την χωρητικότητα της μπαταρίας, και λαμβάνεται ίση με C/10A είτε C/20 όπου C εκφράζει τη θεωρητική χωρητικότητα. Πιο συγκεκριμένα, μια μπαταρία με ονομαστική τιμή 10Ah σε ρεύμα C/10A, μπορεί θεωρητικά να παρέχει 1A σε διάστημα 10 ωρών. Όταν το φορτίο τραβάει ρεύμα μεγαλύτερο από 1A, τότε μειώνεται η χωρητικότητα. Αντίστοιχα, η χωρητικότητα αυξάνεται ως προς την ονομαστική, σε μικρότερους αριθμούς εκφόρτισης. Δηλαδή αν το φορτίο τραβήξει μικρότερο ρεύμα από 1A, αυξάνεται η χωρητικότητα. Όμως, στις πρακτικές εφαρμογές, καμία μπαταρία δεν μπορεί να αποδώσει το 100%.

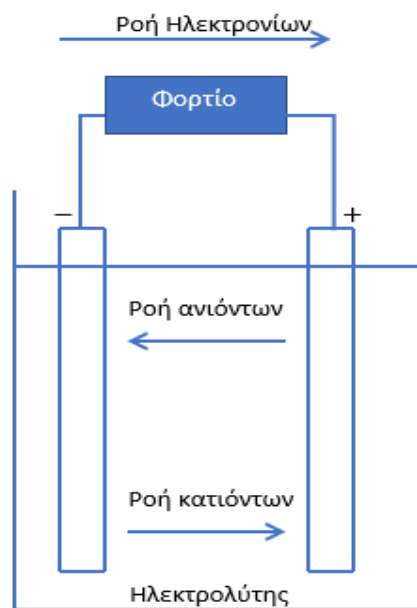
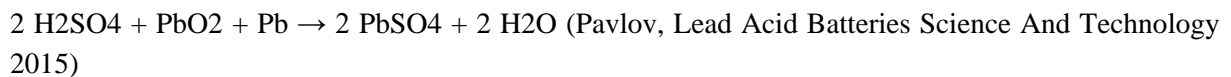
Η χωρητικότητα επηρεάζεται κυρίως από τους εξής παράγοντες :

- Το ρυθμό εκφόρτισης: επιβάλλεται από τους κατασκευαστές να λαμβάνεται ίση με C/10A είτε C/20 όπου C εκφράζει τη χωρητικότητα της μπαταρίας.
- Την τάση αποκοπής: Όταν η τάση στους πόλους της μπαταρίας μειωθεί κάτω μια τιμή, η οποία καθορίζεται συνήθως από τους κατασκευαστές και έχει εξάρτηση από το ρυθμό εκφόρτισης, πρέπει να αποσυνδεθεί από το φορτίο και να φορτιστεί αμέσως. Σε κάθε περίπτωση, ο διαχειριστής της μπαταρίας πρέπει να επιλέξει ένα κατάλληλο ρυθμό εκφόρτισης, έτσι ώστε η τάση στους ακροδέκτες να μην φτάσει την τάση αποκοπής.
- Τη θερμοκρασία: συχνά, η ονομαστική χωρητικότητα ορίζεται στους 20°C. Η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται με την μείωση της θερμοκρασίας από τους 20°C. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στους 0°C, η μείωση της διαθέσιμης χωρητικότητας είναι περίπου 15%. Η αύξηση της θερμοκρασίας από τους 20°C αυξάνει ελάχιστα την χωρητικότητα ενώ είναι επιβλαβής στην διάρκεια ζωής του στοιχείου. Στους 40°C παρατηρείται μια αύξηση της διαθέσιμης χωρητικότητας περίπου ίση με 5%.
- Το ρυθμό αυτοεκφόρτισης: η αποφόρτιση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία της αποθήκης συσσωρευτών πρέπει να είναι 20°C είτε μικρότερη. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι σχετικά χαμηλός. Η μπαταρία μολύβδου αποφορτίζεται με ρυθμό από 3 έως 5% το μήνα.
- Τη γήρανση: παρατηρείται μείωση χωρητικότητας της μπαταρίας κατά την διάρκεια του χρόνου ζωής η οποία εξαρτάται από εσωτερική κατασκευαστική δομή και τις συνθήκες λειτουργίας.
- Τη θειίκωση: Θειίκωση είναι η περίπτωση όπου κρύσταλλοι θειικού μολύβδου επικάθονται στα ηλεκτρόδια, εμποδίζοντας την περαιτέρω επικοινωνία με το άμεσο περιβάλλον τους. Η θειίκωση μειώνει τη χωρητικότητα κι ελαττώνει την τάση εκφόρτισης, με συνέπεια η τάση αποκοπής να παρουσιάζεται σε υψηλότερες στάθμες φόρτισης (SOC) σε σχέση με ένα στοιχείο που δεν έχει υποστεί θειίκωση [5].

2.2.3 Εκφόρτιση και Αυτο-εκφόρτιση

Η μπαταρία είναι μια χημική πηγή ρεύματος ικανή να αποθηκεύσει την ηλεκτρική ενέργεια αφού την μετατρέψει σε χημική και όταν χρειαστεί να την μεταφέρει στο εξωτερικό κύκλωμα με το οποίο είναι συνδεδεμένη. Κατά την διαδικασία εκφόρτισης, γίνονται οι εξής ενέργειες: τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από το εξωτερικό φορτίο από την άνοδο προς την κάθοδο, η οποία δέχεται και τα ηλεκτρόνια. Για να ολοκληρωθεί το ηλεκτρικό κύκλωμα χρησιμοποιείται ο ηλεκτρολύτης και η ροή των ανιόντων και των κατιόντων προς την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα.

Η χημική αντίδραση που πραγματοποιείται στο εσωτερικό της μπαταρίας μολύβδου κατά την διαδικασία της εκφόρτισης είναι η εξής:



Σχήμα 2.3: Διαδικασία εκφόρτισης

Η βαθιά εκφόρτιση της μπαταρίας μολύβδου, επηρεάζει αρνητικά νομίμως την χωρητικότητα της. Για τον λόγο αυτό, όταν η τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας μπαταριών μειωθεί κάτω από μία καθορισμένη τιμή κατωφλιού, η οποία συνήθως αναφέρεται στις προδιαγραφές ως cut-off Voltage, η μπαταρία πρέπει να αποσυντεθεί από το φορτίο ώστε να αποφευχθεί μια βαθιά εκφόρτιση που στη συνέχεια θα προκαλέσει μείωση της χωρητικότητας της. Ακόμη, ο ρυθμός με τον οποίον εκφορτίζεται μια μπαταρία, παίζει καθοριστικό ρόλο στη χωρητικότητα της μπαταρίας. Έτσι, μία μπαταρία που εκφορτίζεται με υψηλό ρεύμα, έχει μικρότερη επίπτωση στη μπαταρία σε σχέση με μια αργή εκφόρτιση με μικρό ρεύμα. Η γήρανση (aging) ονομάζεται η μείωση της χωρητικότητας από τη χρήση ενός συσσωρευτή. Όταν η χωρητικότητα της μπαταρίας μολύβδου σε πλήρη φόρτιση μειωθεί στο 60% της ονομαστικής της χωρητικότητας, θεωρείται ότι η μπαταρία έφτασε στο τέλος του κύκλου ζωής της. Όταν μια μπαταρία παραμένει αχρησιμοποίητη, αποφορτίζεται με το ρυθμό από 3 έως 5% το μήνα. Ο ρυθμός αποφόρτισης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι, η θερμοκρασία της αποθήκης της συστοιχίας των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών πρέπει να είναι 20°C είτε χαμηλότερη. Εν τω μεταξύ, η φόρτιση των αποθηκευμένων συσσωρευτών πρέπει να γίνεται κάθε έξι μήνες. Σε κάθε περίπτωση, μόλις μειωθεί η χωρητικότητά τους στο 70% της ονομαστικής πρέπει να φορτίζονται για την βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής τους.

2.2.4 Βαθμός Απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης είναι ένα χαρακτηριστικό μέγεθος κάθε μπαταρίας και ορίζεται σαν ο λόγος της ενέργειας που ανακτάται και της ενέργειας που αποθηκεύεται. Συμβολίζεται με το η και ισούται με:

$$\eta = \frac{W_{ut}}{W_{st}} \quad (2.1)$$

Η βαθιά εκφόρτιση, η θερμοκρασία λειτουργίας και η υπερφόρτιση είναι από τους παράγοντες που έχουν επίπτωση στην απόδοση της μπαταρίας. Όταν μια μπαταρία μολύβδου παραμένει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να χρησιμοποιείται, πρέπει μετά από μία πλήρη φορτίση να εμφανίζει τάση ανοιχτού κυκλώματος μεγαλύτερη από 2V/στοιχείο για να θεωρείται αποδοτική.

2.2.5 Εσωτερική αντίσταση και Ηλεκτρεγερτική δύναμη

Κατά την ροή των ηλεκτρονίων, η μπαταρία εμφανίζει μια αντίσταση στο εσωτερικό της. Οι κατασκευαστές φροντίζουν να είναι ελάχιστη διότι μεγάλη αντίσταση σημαίνει μεγάλη πτώση τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Η συγκεκριμένη αντίσταση εξαρτάται από τη στάθμη φόρτισης, τη θερμοκρασία λειτουργίας, την ηλικία, το ρεύμα εκφόρτισης και τη χημική σύσταση των στοιχείων. Η μέγιστη τάση που μπορεί να παρέχει ένας συσσωρευτής μεταξύ των ακροδεκτών του ονομάζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Αυτή η τάση αναφέρεται και ως τάση ανοιχτού κυκλώματος. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι περίπου ίση με 2.16V/στοιχείο σε κατάσταση φόρτισης 100% και 1.94V/στοιχείο σε θερμοκρασία 20°C. Βλέπε το σχήμα 2.2.

Η εσωτερική αντίσταση συνδέεται με την ηλεκτρεγερτική δύναμη, με τη σχέση

$$U = E - IR \quad (2.2)$$

Εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας μπορεί θεωρητικά να υπολογιστεί ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- Μετράμε την τάση στους πόλους της μπαταρίας χωρίς φορτίο και την καταγράφουμε
- Συνδέσουμε ένα φορτίο (R) και μετράμε το ρεύμα που το διαρρέει
- Μετράμε την τάση στους πόλους της μπαταρίας με το φορτίο (R) και την καταγράφουμε
- Χρησιμοποιούμε τη σχέση (2.2)

Όπου:

- U = Τάση στους πόλους της μπαταρίας με φορτίο
- E = Τάση στους πόλους της μπαταρίας χωρίς φορτίο (ηλεκτρεγερτική δύναμη)
- I = Ρεύμα που περνάει
- R = εσωτερική αντίσταση

Παράδειγμα

Μια μπαταρία μολύβδου με εσωτερική αντίσταση 0.02Ω και Ηλεκτρεγερτική δύναμη 12V. Να υπολογιστούν οι τιμές της τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας όταν διαρρέεται από ρεύμα (α) 1A, (β) 2A, (γ) 5A, (δ) 10A, (ε) 12A, (ζ) 15A;

- $U = E - IR = 12 - (1 \times 0.02) = 11.98$
- $U = E - IR = 12 - (2 \times 0.02) = 11.96$
- $U = E - IR = 12 - (5 \times 0.02) = 11.90$
- $U = E - IR = 12 - (10 \times 0.02) = 11.80$

- $U = E - IR = 12 - (12 \times 0.02) = 11.76$
- $U = E - R = 12 - (15 \times 0.02) = 11.70$

Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα του παραδείγματος

Ηλεκτρεγερτική δύναμη (V)	Εσωτερική αντίσταση(Ω)	Ρεύμα (I)	Τάση ακροδεκτών(V)
12	0.02	1	11.98
12	0.02	2	11.96
12	0.02	5	11.90
12	0.02	10	11.80
12	0.02	12	11.76
12	0.02	15	11.70

Στο πίνακα 2.1, αναφέρονται τα αποτελέσματα του πρόβλημα που τέθηκε παραπάνω. Ο σκοπός ήταν να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας όταν διαρρέεται από διαφορετικές τιμές του ρεύματος. Το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι η τάση ακροδεκτών μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος. Τα αποτελέσματα προέκυψαν εφαρμόζοντας την σχέση (2.2)

2.3 Βελτιστοποίηση της μπαταρίας μολύβδου

Στη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών μολύβδου πρέπει:

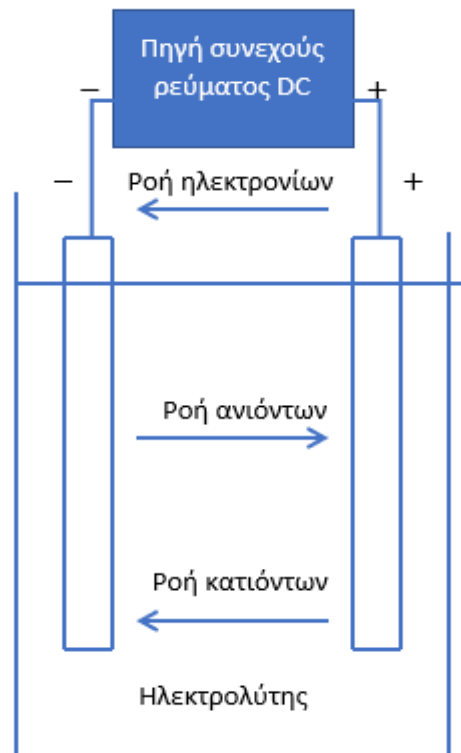
- Να μη μένει παραπάνω από ένα μήνα χωρίς να φορτισθεί
- Η αποθήκευση να γίνεται σε θερμοκρασία 20°C είτε χαμηλότερη
- Το ρεύμα φόρτισης να είναι μικρότερο από 0.3C
- Η τιμή του ρεύματος εκφόρτισης να λαμβάνεται ίση με C/10A, είτε C/20A,
- Να μη την αφήνουμε να αδειάσει τελείως
- Να αποσυνδεθεί η μπαταρία από το φορτίο όταν η τάση στους ακροδέκτες μειωθεί κάτω από την τάση κατωφλίου
- Να φορτίζονται μόλις η χωρητικότητα τους μειωθεί περίπου στο 70% της ονομαστικής

2.4 Φόρτιση

Κατά την διαδικασία φόρτισης, η συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών συνδέεται με πηγή συνεχούς ρεύματος (dc) για να αποθηκεύσει την ηλεκτρική ενέργεια αφού την μετατρέψει σε χημική και όταν χρειαστεί την μεταφέρει στο εξωτερικό κύκλωμα με το οποίο είναι συνδεδεμένες.

Μπορούμε να συνδέσουμε μπαταρίες είτε σε σειρά είτε παράλληλα και να τις φορτίσουμε ως μια συστοιχία. Ωστόσο, οι μπαταρίες δεν έχουν πάντα τις ίδιους παραμέτρους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην γήρανση, στην χημική σύσταση και σε πολλές άλλες ασυνέπειες κατασκευής. Κατά την φόρτιση, για να μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε τις αρνητικές επιπτώσεις λόγω των διαφορετικών παραμέτρων των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών που αποτελούν την συστοιχία, πρέπει όλοι οι συσσωρευτές να έχουν κοινά χαρακτηριστικά. Ένα απλό κύκλωμα φόρτισης μιας συστοιχίας μπαταριών μολύβδου αποτελείται από μια διάταξη υποβιβασμού της ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου σε μια επιθυμητή τιμή, μια διάταξη ανόρθωσης και μια ωμική αντίσταση για την μέτρηση του ρεύματος που ρέει μέσα από την συστοιχία.

Ο τρόπος φόρτισης μιας μπαταρίας μολύβδου έχει μεγάλη σημασία. Μια καλύτερη και αποδοτική μέθοδος φόρτισης της συστοιχία μπαταριών μολύβδου επιβάλλει αρχικά τη φόρτιση με σταθερό ρεύμα ενώ ελέγχεται αυστηρώς η τάση. Όταν η τιμή του ρεύματος φτάσει μια προκαθορισμένη στάθμη, ο φορτιστής αλλάζει τον τρόπο λειτουργίας του και επιβάλλει στη συστοιχία συσσωρευτών μια σταθερή τάση. Κατά την φάση φόρτισης με σταθερή τάση, πρέπει να ελέγχεται αυστηρώς το ρεύμα που διαρρέει τη συστοιχία. Όταν οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αναμονής, πρέπει να διατηρούνται σε κατάσταση πλήρους φόρτισης. Στις περιπτώσεις αυτές, χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος φόρτισης με σταθερή τάση συντήρησης. Δηλαδή, ο φόρτισης πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει μια σταθερή τάση 2.25-2.30/στοιχείο. Πολλές φορές, η τάση αυτή αναφέρεται και ως τάση συντήρησης η τάση float.



Σχήμα 2.4: Διαδικασία φόρτισης

2.4.1 Μέθοδοι φόρτισης

Υπάρχουν πολλές παράμετροι φόρτισης και διαφέρουν με βάση την εφαρμογή και τον τύπο της συγκεκριμένης μπαταρίας. Ορισμένες μέθοδοι φόρτισης μπορεί να έχουν αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση της συστοιχίας μπαταριών ή ακόμα και να προκαλέσουν επικίνδυνες καταστάσεις. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου φόρτισης και του κατάλληλου φορτιστή της μπαταρίας μολύβδου είναι πολύ σημαντική για την αξιόπιστη λειτουργία της στην εφαρμογή για την οποία έχει επιλέγει. Ένας λάθος τρόπος φόρτισης θα έχει αρνητικές επιπτώσεις όχι μόνο στην απόδοση της μπαταρίας αλλά και στην διάρκεια ζωής της. Μια συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μπορεί να φορτιστεί εφαρμόζοντας στους ακροδέκτες της μια σταθερή τάση ενώ ελέγχεται συνεχώς το ρεύμα ή ένα σταθερό ρεύμα με έλεγχο της τάσης ή και ένα συνδυασμό αυτών των δύο μεθόδων για την μείωση της διάρκειας φόρτισης. Οι λεπτομέρειες που αφορούν αυτές τις τρεις μεθόδους φόρτισης δίνονται στις ενότητες (2.4.1.1), (2.4.1.2) και (2.4.1.3).

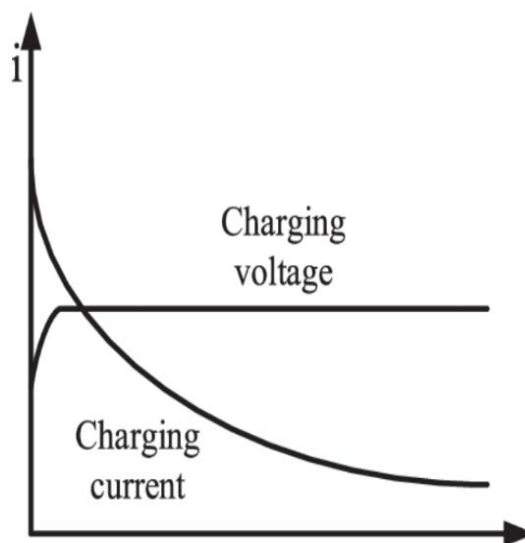
2.4.1.1 Φόρτιση με σταθερή τάση (CV)

Είναι μια από τις αποτελεσματικές μέθοδοι φόρτισης της μπαταρίας μολύβδου. Φόρτιση με σταθερή τάση σημαίνει απλά ότι ο φορτιστής παρέχει καθ' όλη τη διαδικασία φόρτισης μια αμετάβλητη τάση στη μπαταρία ενώ το ρεύμα μεταβάλλεται ανάλογα με τη στάθμη φόρτισης. Η τάση που παρέχει ο φορτιστής πρέπει να έχει αρκετή τιμή για να φορτιστεί η μπαταρία όσο το συντομότερο δυνατό. Μια πλήρως εκφορτισμένη (100% DOD) μπαταρία μολύβδου μπορεί να φορτιστεί πλήρως (100% SOC) με τάση 14.7V έως 15V σε δέκα έξι ώρες. Εάν η μπαταρία δεν είναι πλήρως εκφορτισμένη τότε ο χρόνος φόρτισης θα είναι σχετικά μικρός. Για παράδειγμα, μια μπαταρία εκφορτισμένη κατά 50% (DOD 50%), μπορεί να φορτιστεί σε 8 με 10 ώρες αν ο φορτιστής παρέχει 15V. Κατά την διαδικασία φόρτισης με σταθερή τάση, το ρεύμα πρέπει να ελέγχεται συνεχώς και να αποσυνδεθεί η μπαταρία από τον φορτιστή μόλις η στάθμη φόρτισης φτάσει στο 100%. Εικονίζεται στο πίνακα ενδεικτικά νούμερα μεταβολής ρεύματος κατά την φόρτιση με σταθερή τάση.

Πίνακας 2.2: Οι μετρήσεις κατά την φόρτιση με σταθερή τάση

Τάση φόρτισης (V)	Τάση μπαταρίας(V)	Στάθμη φόρτισης (%)	Ρεύμα (A)
14.7	14.7	20	1.55
14.7	14.7	40	0.97
14.7	14.7	60	0.71
14.7	14.7	80	0.53
14.7	14.7	99	0.47

Με σκοπό να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του ρεύματος κατά τη διαδικασία φόρτισης με σταθερή τάση, έγινε η προσομοίωση μέσω του λογισμικού MATLAB/SIMULINK ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος (DC-DC Converter) ο οποίος λειτουργεί σε κλειστό βρόχο και παρέχει μια σταθερή τάση 14.7V. Το συμπέρασμα που βγαίνει από το πίνακα 2.2 είναι ότι κατά την φόρτιση με σταθερή τάση, δηλαδή όταν η διάταξη φόρτισης παρέχει μια προκαθορισμένη αμετάβλητη τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, το ρεύμα μειώνεται συνεχώς ανάλογα με τη στάθμη.



Σχήμα 2.5: Μεταβολή της τάσης και του ρεύματος κατά την φόρτιση με σταθερή τάση [3]

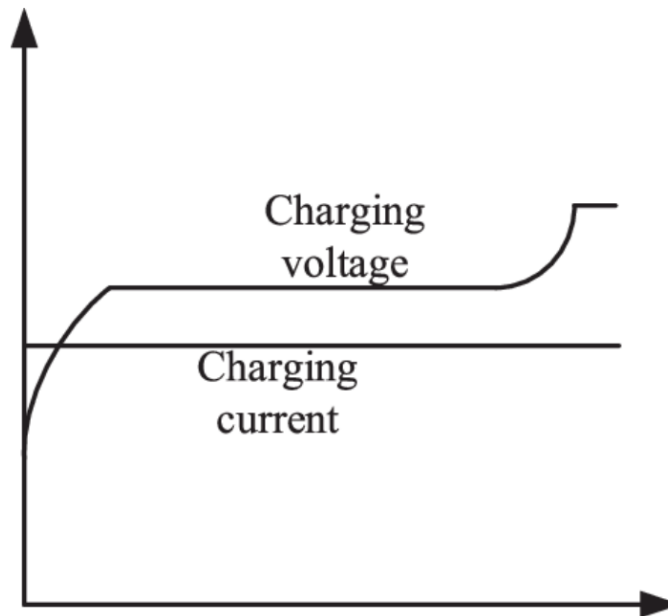
2.4.1.2 Φόρτιση με σταθερό ρεύμα (CC)

Η φόρτιση με σταθερό ρεύμα είναι μια άλλη αποτελεσματική μέθοδο φόρτισης της μπαταρίας μολύβδου. Η φόρτιση με σταθερό ρεύμα είναι η πιο γρήγορη μέθοδος για να δοθεί ξανά φορτίο στην μπαταρία. Παράλληλα, προσφέρει εξισορρόπηση μεταξύ των επιπέδων φόρτισης των κελιών της μπαταρίας (cell-to-cell equalization). Το παραπάνω είναι επιθυμητό όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός κυττάρων σε σειρά καθώς τείνει να περιορίσει την ανισοκατανομή του φορτίου στην μπαταρία. Η φόρτιση με σταθερό ρεύμα σημαίνει απλά ότι ο φορτιστής παρέχει καθ' όλη τη διαδικασία φόρτισης ένα αμετάβλητο ρεύμα στη μπαταρία ενώ η τάση μεταβάλλεται ανάλογα με τη στάθμη φόρτισης. Όταν η τάση της μπαταρίας φτάσει μια συγκεκριμένη τιμή που παρουσιάζει πλήρως φορτισμένη, η διαδικασία της φόρτισης διακόπτεται. Κατά την διαδικασία φόρτισης με σταθερό ρεύμα, η τάση της μπαταρίας πρέπει να ελέγχεται συνεχώς αυστηρά για να μην υπερφορτιστεί η μπαταρία.

Πίνακας 2.3: Οι μετρήσεις κατά την φόρτιση με σταθερό ρεύμα

Ρεύμα (A)	Στάθμη φόρτισης (%)	Τάση ακροδεκτών
2.5	20	11.24
2.5	40	11.82
2.5	60	12.07
2.5	80	12.21
2.5	99	13.12

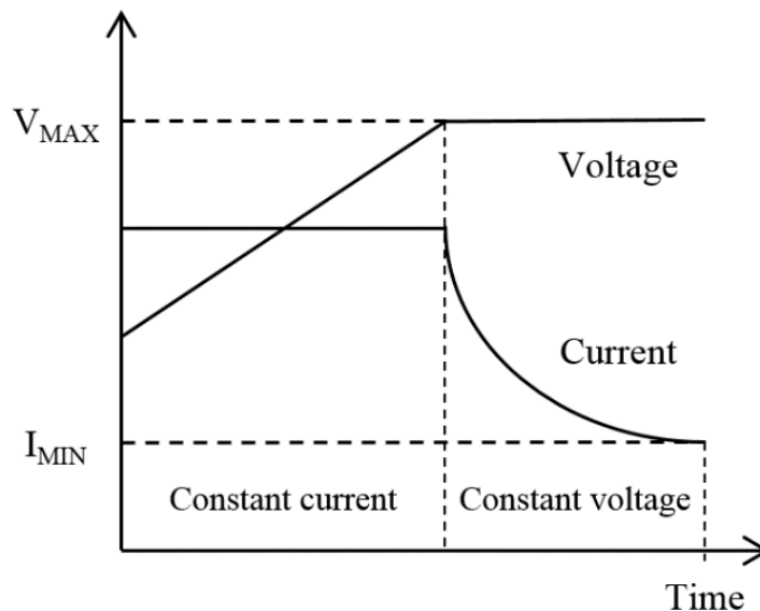
Όπως και με τη διαδικασία φόρτισης με σταθερή τάση, έγινε και εδώ η προσομοίωση μέσω του λογισμικού MATLAB/SIMULINK ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος (DC-DC Converter) ο οποίος λειτουργεί σε κλειστό βρόχο και παρέχει σταθερό ρεύμα 2.5A ενώ η τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας μπαταριών μολύβδου εξαρτάται από τη στάθμη φόρτισης. Ο σκοπός ήταν να παρατηρηθεί η συμπεριφορά της τάσης στους ακροδέκτες της συστοιχίας κατά τη διαδικασία φόρτισης με σταθερή τάση.



Σχήμα 2.6: Μεταβολή της τάσης και του ρεύματος κατά την φόρτιση με σταθερό ρεύμα [3]

2.4.1.3 Φόρτιση με συνδυασμό CCCV

Η φόρτιση μιας μπαταρίας μολύβδου μπορεί να γίνει και με συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδους. Δηλαδή, ο φορτιστής παρέχει αρχικά σταθερό ρεύμα στους πόλους της μπαταρίας ενώ ελέγχεται αυστηρά η τάση της. Όταν η τάση φτάσει μια επιθυμητή τιμή, ο φορτιστής μετάγεται από την κατάσταση φόρτισης σταθερού ρεύματος σε κατάσταση σταθερής τάσης με την καθορισμένη τιμή τάσης. Κατά την διαδικασία φόρτισης με σταθερή τάση, το ρεύμα μειώνεται συνεχώς. Όταν το ρεύμα φτάσει την τιμή $0.01C$, (C εκφράζει την χωρητικότητα της μπαταρίας) η μπαταρία θεωρείται πλήρως φορτισμένη. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να σταματήσει η διαδικασία φόρτισης. Η διαδικασία φόρτισης μπορεί να σταματήσει με δύο τρόπους: Η μια είναι να αποσυνδεθεί η μπαταρία από το φορτιστή και η άλλη είναι η μείωση της τάσης φόρτισης σε μια τάση Float ($2.26-2.31V$ /στοιχείο). Η τάση αυτή ονομάζεται αλλιώς τάσης συντήρησης και εξασφαλίζει τη διατήρηση της μπαταρίας σε κατάσταση πλήρους φόρτισης. Τυπικά, όταν μια μπαταρία μολύβδου φορτίζεται με την τάση συντήρησης, το ρεύμα μειώνεται μέχρι την τιμή $0.001C$ σε θερμοκρασία λειτουργίας $20^{\circ}C$.



Σχήμα 2.7: Μεταβολή της τάσης ακροδεκτών και του ρεύματος κατά τη φόρτιση μιας μπαταρίας μολύβδου κλειστού τύπου, αρχικά με σταθερό ρεύμα και στη συνέχεια με σταθερή τάση [3].

2.5 Επιλογή μεθόδου φόρτισης συσσωρευτών

Αφού παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά της συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου, οι μέθοδοι φόρτισης και οι προφυλάξεις που πρέπει να λαμβάνονται ούτως ώστε η φόρτιση να γίνεται με αποτελεσματικότητα και με ασφάλεια, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου αλλά και του ρυθμού με τον οποίον θα φορτισθεί η συστοιχία μπαταριών. Η μέθοδος φόρτισης που χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία είναι η φόρτιση με σταθερό ρεύμα (Constant current). Η φόρτιση με σταθερό ρεύμα είναι μια πολύ δημοφιλής και αποτελεσματική μέθοδος φόρτισης ειδικά όταν οι μπαταρίες της συστοιχίας είναι συνδεδεμένες σε σειρά. Η μέθοδος αυτή, επιβάλλει την φόρτιση με σταθερό ρεύμα και έλεγχο της τάσης. Η τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας μπαταριών αυξάνεται συνεχώς και όταν φτάσει μια καθορισμένη τιμή, η διαδικασία φόρτισης διακόπτεται. Στα κεφάλαια που ακολουθούν, εξηγούνται αναλυτικά όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση μέσω του μικροεπεξεργαστή ώστε να πετύχει η επιλεγμένη μέθοδος φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών μολύβδου. Η συστοιχία περιέχει τρεις μπαταρίες σε σειρά. Επιλέχτηκε η τιμή $0.25C$ ως ρεύμα φόρτισης

2.6 Ρυθμός φόρτισης

Οι χαρακτηρισμοί φόρτισης ταξινομούνται με βάση το χρόνο που χρειάζεται για να φορτιστεί ένας συσσωρευτής. Διακρίνονται η αργή φόρτιση, η γρήγορη φόρτιση και η ταχεία φόρτιση. Η επιτάχυνση της διάρκειας φόρτισης των συσσωρευτών, περιορίζεται από την προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση των συσσωρευτών. Η μέθοδος φόρτισης ενός συσσωρευτή επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την διάρκεια ζωής του. Ωστόσο η διάρκεια της φόρτισης εξαρτάται κυρίως από τον ρυθμό φόρτισης. Ο ρυθμός αυτός συσχετίζεται με την χωρητικότητα κάθε μπαταρίας. Τυπικά, ο ρυθμός φόρτισης επιλέγεται ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών για τις οποίες προορίζονται. Τυπικοί ρυθμοί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.4: Ενδεικτικοί ρυθμοί φόρτισης συσσωρευτών

Χαρακτηρισμοί φόρτισης	Διάρκεια (ώρες)	Ρυθμός
Αργή φόρτιση	14-16	0.1C
Γρήγορη φόρτιση	3-6	0.3
Ταχεία φόρτιση	<1	1.0C

Όπως φαίνεται στο πίνακα 2.4, μια ταχεία φόρτιση μπορεί να είναι οποιαδήποτε φόρτιση που διαρκεί λίγα λεπτά έως και μια ώρα. Μια γρήγορη φόρτιση διαρκεί από 3 έως 6 ώρες. Η αργή φόρτιση διαρκεί περισσότερο από μια γρήγορη φόρτιση, έως περίπου 16 ώρες. Ο χρόνος που χρειάζεται για να φορτιστεί η μπαταρία εξαρτάται έντονα από τον φορτιστή. Ο φορτιστής πρέπει να είναι ικανός να παράγει ένα συγκεκριμένο ρεύμα. Επιπλέον, εάν η μπαταρία δεν έχει αποφορτιστεί πλήρως, θα χρειαστεί σχετικά λιγότερο χρόνο να φορτίσει.

2.7 Μεγέθη εκτίμησης κατάστασης μπαταρίας

Πολλές φορές κατά την διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισης είναι πολύ σημαντικό να εκτιμήσουμε σε τι κατάσταση βρίσκεται η μπαταρία. Καταγράφονται παρακάτω τα βασικά μεγέθη που μας βοηθάνε να περιγράψουμε την κατάσταση μίας μπαταρίας κατά την διάρκεια χρήσης.

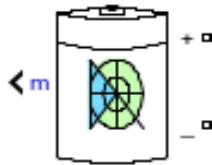
- Κατάσταση φόρτισης (State of Charge – SOC): Εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό και περιγράφει το διαθέσιμο φορτίο μιας μπαταρίας σε κάθε δεδομένη στιγμή. Μια μπαταρία θεωρείται πλήρως φορτισμένη όταν η κατάσταση φόρτισης της είναι θεωρητικά 100% ενώ όταν πλήρως εκφορτισμένη η κατάσταση φόρτισης είναι θεωρητικά 0%. Δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα ένας ακριβής τρόπος για τον υπολογισμό της κατάστασης φόρτισης. Ωστόσο, υπάρχουν διάφορες τεχνικές εκτίμησης της τιμής της. Σημειώνεται ότι δε μπορεί να θεωρηθεί πραγματικού χρόνου η εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης μέσω της τάσης ανοιχτού κυκλώματος καθώς η σταθεροποίηση της τάσης αυτής μετά τη διακοπή του ρεύματος απαιτεί σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα.
- Κατάσταση υγείας (State of Health – SOH): Μετά από μερικά χρόνια λειτουργίας, θα ξεκινήσουν να αλλοιώνονται κάποια από τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Θεωρητικά, μετά την διαδικασία κατασκευής ενός συσσωρευτή, αυτός θα έχει SOH ίσο με 100%. Για να περιγραφεί η κατάσταση υγείας ενός συσσωρευτή, εξετάζεται η συμπεριφορά της, δηλαδή η εσωτερική της αντίσταση, η χωρητικότητά, η τάση, ο ρυθμός αποφόρτισης, η απόδοση και ο αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτιση σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή σε σύγκριση με τις ιδανικές της συνθήκες. Η τιμή (0%- 100%) της κατάσταση υγείας μίας μπαταρίας προκύπτει

από το λόγο της πραγματικής χωρητικότητας, προς την ονομαστική σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

- Το βάθος εκφόρτισης (Depth of discharge – DOD) εκφράζει το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Η τιμή του κυμαίνεται θεωρητικά από 0% έως 100%, όταν η τιμή είναι 30%, σημαίνει ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 70%. Το αντίθετο δηλαδή με την κατάσταση φόρτισης που περιγράφεται παραπάνω.

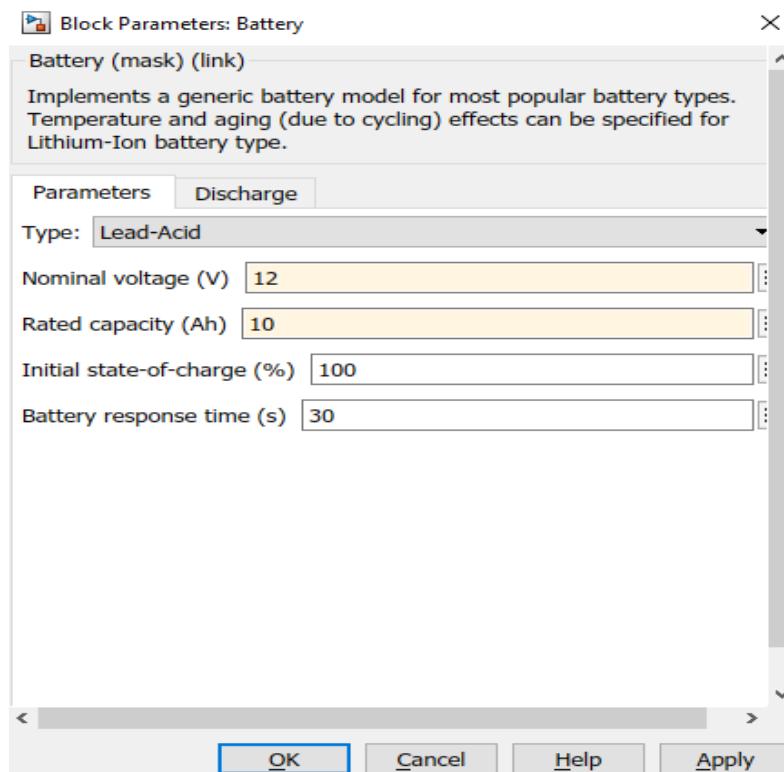
2.8 Προσομοίωση συσσωρευτή μολύβδου

Θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό MATLAB/Simulink για την προσομοίωση των μπαταριών μολύβδου



Σχήμα 2.8: Μοντέλο συσσωρευτών του Simulink

Στο σχήμα 2.9 φαίνονται οι παράμετροι (Parameters) της επιλεγμένης μπαταρίας. Το πρώτο βήμα είναι η επιλογή του είδους συσσωρευτή. Το συγκεκριμένο λογισμικό δίνει την δυνατότητα προσομοίωσης των μπαταριών μολύβδου-οξέος (Lead-acid), ιόντων λιθίου (lithium ion), Νικελίου - Καδμίου (nickel-cadmium) και Νικελίου – υδριδίου μετάλλου (nickel-metal hydride). Μόλις επιλεγθεί ο τύπος του συσσωρευτή, εμφανίζεται ένα παράθυρο για καταχώρηση των χαρακτηριστικών του επιλεγμένου τύπου συσσωρευτή. Πατάμε κλικ στο Apply για να σωθούν οι παράμετροι..



Σχήμα 2.9: Παράμετροι μοντέλου συσσωρευτή

Στο σχήμα 2.8, πατώντας κλικ στο Discharge θα εμφανιστούν άλλα χαρακτηριστικά που αφορούν κυρίως την διαδικασία εκφόρτισης της μπαταρίας. Η περιγραφή των χαρακτηριστικών αυτών θα γίνει στη συνέχεια.

Έστω ότι θέλουμε να κάνουμε προσομοίωση μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος με τα χαρακτηριστικά που δίνονται το κατασκευαστικό φυλλάδιο

Sealed Lead-Acid Battery		537-7305(12V12Ah)
General Purpose		
Specification		
Cells Per Unit	6	Applications
Voltage Per Unit	12	
Capacity	12.0Ah@20hr-rate to 1.80V per cell @25°C	
Weight	Approx 3.50 kg	
Max. Discharge Current	180 A(5 sec)	
Internal Resistance	Approx 14mΩ	
Operating Temp.Range	Discharge : -15~50°C (5~122°F) Charge : 0~40°C (32~104°F) Storage : -15~40°C (5~104°F)	
Nominal Operating Temp. Range	25 ± 3°C (77 ± 5°F)	
Float charging Voltage	13.5 to 13.8 VDC/unit Average at 25°C	
Recommended Maximum Charging Current Limit	3.6A	
Equalization and Cycle Service	14.4 to 15.0 VDC/unit Average at 25°C	
Self Discharge	The batteries can be stored for more than 6 months at 25°C. Self-discharge ratio less than 3% per month at 25°C. Please charge batteries before using.	
Terminal	T1	
Container Material	A.B.S. (UL94-HB) , Flammability resistance of UL94-V0 can be available upon request.	
		<ul style="list-style-type: none"> ◆ All purpose ◆ Uninterruptable Power Supply (UPS) ◆ Electric Power System (EPS) ◆ Emergency backup power supply ◆ Emergency light ◆ Railway signal ◆ Aircraft signal ◆ Alarm and security system ◆ Electronic apparatus and equipment ◆ Communication power supply ◆ DC power supply ◆ Auto control system

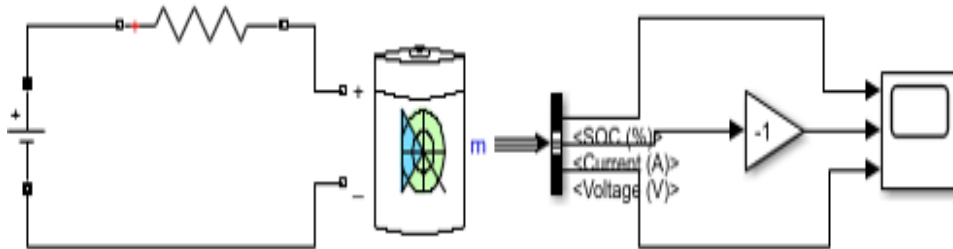
Σχήμα 2.10: Φύλλο δεδομένων – μπαταρία μολύβδου [4]

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνουμε είναι να επιλέξουμε τον τύπο μπαταρίας. Οι παραπάνω προδιαγραφές είναι μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος, άρα επιλέγουμε την Lead-Acid από το παράθυρο και προχωράμε ως εξής :

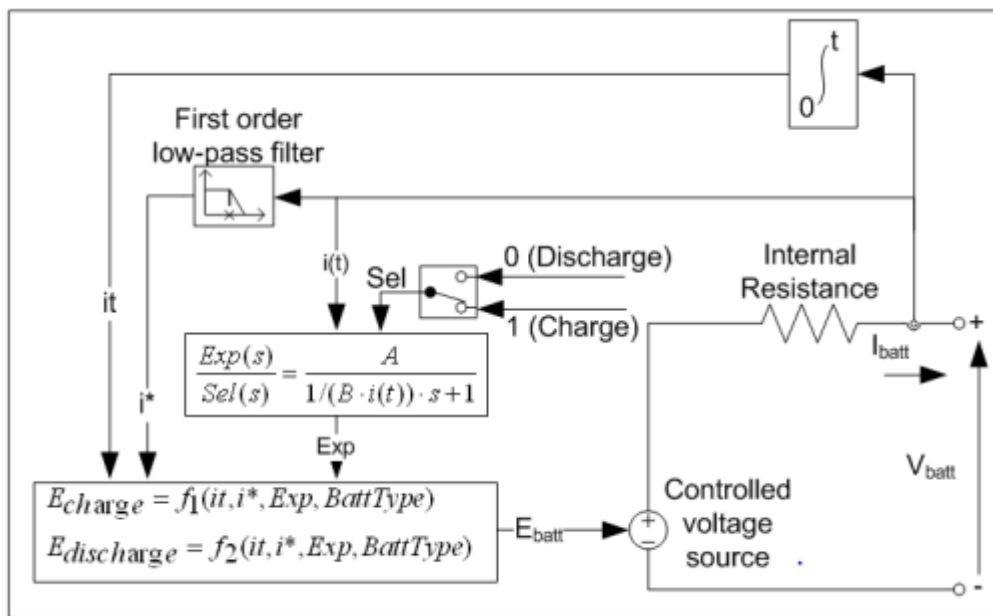
- Πρώτη φάση : Στις παραμέτρους (Parameters), στο πεδίο Nominal Voltage (Ονομαστική τάση) καταχωρούμε την τιμή 12 όπως είναι στο φύλλο δεδομένων. Με την ίδια λογική, καταχωρούμε την Τιμή 12 στο πεδίο Rated Capacity για την χωρητικότητα και το επίπεδο φόρτισης που θα είχε η μπαταρία μας. Συνήθως ο χρόνος απόκρισης της μπαταρίας (battery response time) δεν πειράζεται
- Δεύτερη φάση: Πατάμε κλικ στο Discharge για να εμφανιστούν άλλα χαρακτηριστικά και καταχωρούμε αυτά που είναι στο datasheet. Αλλάζουμε την εσωτερική αντίσταση, καταχωρούμε δηλαδή την τιμή 14mΩ στο πεδίο Internal resistance, την τιμή 180 στο πεδίο Nominal Discharge current (Ονομαστική τιμή του ρεύματος I εκφόρτισης), την τιμή 14.4 στο πεδίο Fully charged voltage (Μέγιστη τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας). Η τάση

κατωφλίου (Cut-off voltage) εξαρτάται από το ρυθμό εκφόρτισης. Τέλος, πατάμε κλικ στο Apply για να σωθούν τα νέα χαρακτηριστικά της μη ιδανικής μπαταρίας.

Τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή είναι τώρα μη ιδανικά και μπορούμε να τον συνδέσουμε με μία πηγή συνεχούς ρεύματος (dc) για να παρατηρήσουμε τις κυματομορφές του ρεύματος, της SOC και της τάσης.



Σχήμα 2.11: Διαδικασία απεικόνισης του ρεύματος, της τάσης και της κατάστασης φόρτισης μιας μπαταρίας με το MATLAB Simulink



Σχήμα 2.12: Ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου των συσσωρευτών του Simulink [11]

Οι εξισώσεις φόρτισης κι εκφόρτισης των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος παρατίθενται στο σχήμα 2.12 και στη συνέχεια αναφέρονται εν συντομία τα μεγέθη που τις αποτελούν.

Lead-Acid Model

Discharge model ($i^* > 0$)

$$f_1(i^*, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - i^*} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i^*} \cdot i + \text{Laplace}^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right).$$

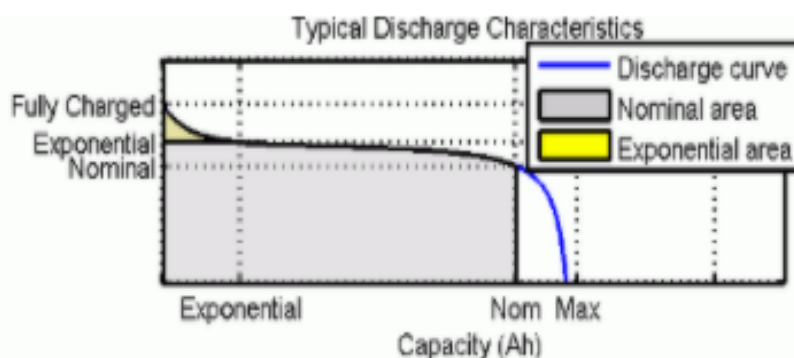
Charge Model ($i^* < 0$)

$$f_2(i^*, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{i^* + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i^*} \cdot i + \text{Laplace}^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right).$$

Σχήμα 2.13: Εξισώσεις φόρτισης κι εκφόρτισης μπαταριών μολύβδου-οξέος [5]

- Ebatt: Μη γραμμική τάση (V)
- Eo: Γραμμική τάση (V)
- Expr(s): Συμπεριφορά της μπαταρίας στην εκθετική ζώνη λειτουργίας.
- Sel(s): Αντιπροσωπεύει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η μπαταρία. Sel(s)= 0 κατά την εκφόρτιση και Sel(s)= 1 κατά τη φόρτιση
- K: Σταθερά πόλωσης (Ah-1) ή αντίσταση πόλωσης (Ohms)
- i*: Δυναμική ρεύματος χαμηλής συχνότητας
- i: Ρεύμα της μπαταρίας (A)
- it: Χωρητικότητα (Ah)
- Q: Μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας (Ah)
- A: Εκθετική τάση (V)
- B: Εκθετική Χωρητικότητα (Ah-1)

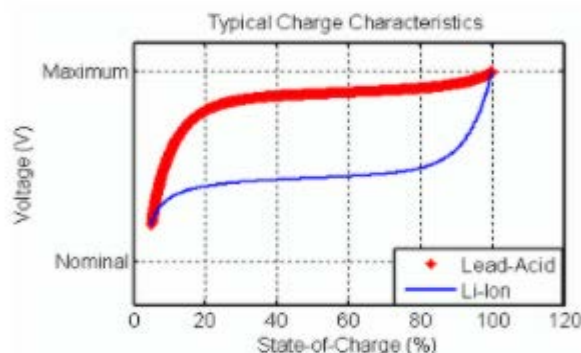
Στο σχήμα 12 εικονίζεται μια τυπική καμπύλη εκφόρτισης μπαταριών η οποία αποτελείται από τρεις περιοχές.



Σχήμα 2.14: Καμπύλη εκφόρτισης μπαταρίας [11]

Η πρώτη περιοχή (Exponential area) αντιπροσωπεύει την εκθετική πτώση τάσης, όταν η μπαταρία είναι φορτισμένη και είναι διαφορετική για κάθε είδος της μπαταρίας. Η δεύτερη περιοχή (Nominal area) αντιπροσωπεύει το φορτίο που μπορεί να εξαχθεί από την μπαταρία μέχρι η τάση να φτάσει την ονομαστική τάση της μπαταρίας. Τέλος, η τρίτη περιοχή αντιπροσωπεύει την ολική εκφόρτιση της μπαταρίας, η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας μειώνεται με μεγάλη ταχύτητα στην περιοχή αυτή.

Όταν το ρεύμα που ρέει μέσα από την μπαταρία είναι αρνητικό, η καμπύλη φόρτισης είναι όμοια με αυτή που ακολουθεί:



Σχήμα 2.15: Χαρακτηριστική καμπύλη φόρτισης ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου-οξέος(Κόκκινη καμπύλη) και λιθίου-ιόντων(Μπλε καμπύλη) [11]

2.9 Επίλογος

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούν τον παλιότερο τύπο επαναφορτιζόμενης μπαταρίας και παραμένουν το ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Διακρίνονται δύο τύποι μπαταριών μολύβδου: μπαταρίες μολύβδου ανοιχτού τύπου και μπαταρίες μολύβδου κλειστού τύπου. Η εφεύρεση της πρώτης μπαταρίας μολύβδου-οξέος, ανοιχτού τύπου, από το Γάλλο φυσικό Gaston Planet χρονολογείται από το 1859, περίπου 40 χρόνια πριν ξεκινήσουν οι μπαταρίες νικελίου να τις ανταγωνίζονται.

Η τάση ακροδεκτών και η χωρητικότητα είναι τα δύο σημαντικά χαρακτηριστικά μίας μπαταρίας. Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου μιας μπαταρίας μολύβδου είναι 2 Volt. Οι συγκεκριμένες μπαταρίες κατασκευάζονται συνήθως σε 6V και 12V. Η πηγή τροφοδοσίας πρέπει να παρέχει τάση μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση της μπαταρίας για να φορτιστεί η μπαταρία. Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας μπαταρίας είναι τα αμπερώρια (Ah). Η τιμή της, η οποία ορίζεται από τον κατασκευαστή αποτελεί την ονομαστική χωρητικότητα, αναφέρεται σε συγκεκριμένες τιμές του ρεύματος εκφόρτισης και της θερμοκρασίας. Η χωρητικότητα επηρεάζεται από τον ρυθμό εκφόρτισης, τη θερμοκρασία, την γήρανση, τη θειίκωση, τον ρυθμό αυτοεκφόρτισης, τον ρυθμό φόρτισης και από πολλούς άλλους παράγοντες κατά την λειτουργία της μπαταρίας.

Οι χαρακτηρισμοί φόρτισης ταξινομούνται με βάση το χρόνο που χρειάζεται για να φορτιστεί ένας συσσωρευτής. Διακρίνονται η αργή φόρτιση, η γρήγορη φόρτιση και η ταχεία φόρτιση. Μια ταχεία φόρτιση μπορεί να είναι οποιαδήποτε φόρτιση που διαρκεί λίγα λεπτά έως και μια ώρα. Μια γρήγορη φόρτιση διαρκεί από 3 έως 6 ώρες. Η αργή φόρτιση διαρκεί περισσότερο από μια γρήγορη φόρτιση, έως περίπου 16 ώρες. Ο χρόνος που χρειάζεται για να φορτιστεί η μπαταρία εξαρτάται έντονα από τον φορτιστή. Ο φορτιστής πρέπει να είναι ικανός να παράγει ένα συγκεκριμένο ρεύμα. Επιπλέον, εάν η μπαταρία δεν έχει αποφορτιστεί πλήρως, θα χρειαστεί σχετικά λιγότερο χρόνο να φορτίσει.

Μπορούμε να συνδέσουμε μπαταρίες είτε σε σειρά είτε παράλληλα και να τις φορτίσουμε ως μια συστοιχία. Ωστόσο, οι μπαταρίες δεν έχουν πάντα τις ίδιους παραμέτρους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην γήρανση, στην χημική σύσταση και σε πολλές άλλες ασυνέπειες κατασκευής. Κατά την φόρτιση, για να μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε τις αρνητικές επιπτώσεις λόγω των διαφορετικών παραμέτρων των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών που αποτελούν την συστοιχία, πρέπει όλοι οι συσσωρευτές να έχουν κοινά χαρακτηριστικά.

Κατά την φόρτιση, η συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών συνδέεται με πηγή συνεχούς ρεύματος (dc) για να αποθηκεύσει την ηλεκτρική ενέργεια αφού την μετατρέψει σε χημική και όταν χρειαστεί την μεταφέρει στο εξωτερικό κύκλωμα με το οποίο είναι συνδεδεμένες. Μια συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μπορεί να φορτιστεί εφαρμόζοντας στους ακροδέκτες της είτε μια σταθερή τάση, είτε ένα σταθερό ρεύμα ή και ένα συνδυασμό αυτών των δύο μεθόδων για την μείωση της διάρκειας φόρτισης. Φόρτιση με σταθερή τάση (CV) σημαίνει απλά ότι ο φορτιστής παρέχει καθ' όλη τη διαδικασία φόρτισης μια αμετάβλητη τάση στη μπαταρία ενώ το ρεύμα μεταβάλλεται ανάλογα με τη στάθμη φόρτισης. Με σταθερό ρεύμα (CC) σημαίνει ότι ο φορτιστής παρέχει καθ' όλη τη διαδικασία φόρτισης ένα αμετάβλητο ρεύμα στη μπαταρία ενώ η τάση μεταβάλλεται ανάλογα με τη στάθμη φόρτισης. Η φόρτιση μιας μπαταρίας μολύβδου μπορεί να γίνει και με συνδυασμό των δύο παραπάνω μεθόδους. Δηλαδή, ο φορτιστής παρέχει αρχικά σταθερό ρεύμα στους πόλους της μπαταρίας ενώ ελέγχεται αυστηρά η τάση της. Όταν η τάση φτάσει μια επιθυμητή τιμή, ο φορτιστής μετάγεται από την κατάσταση φόρτισης σταθερού ρεύματος σε κατάσταση σταθερής τάσης με την καθορισμένη τιμή τάσης.

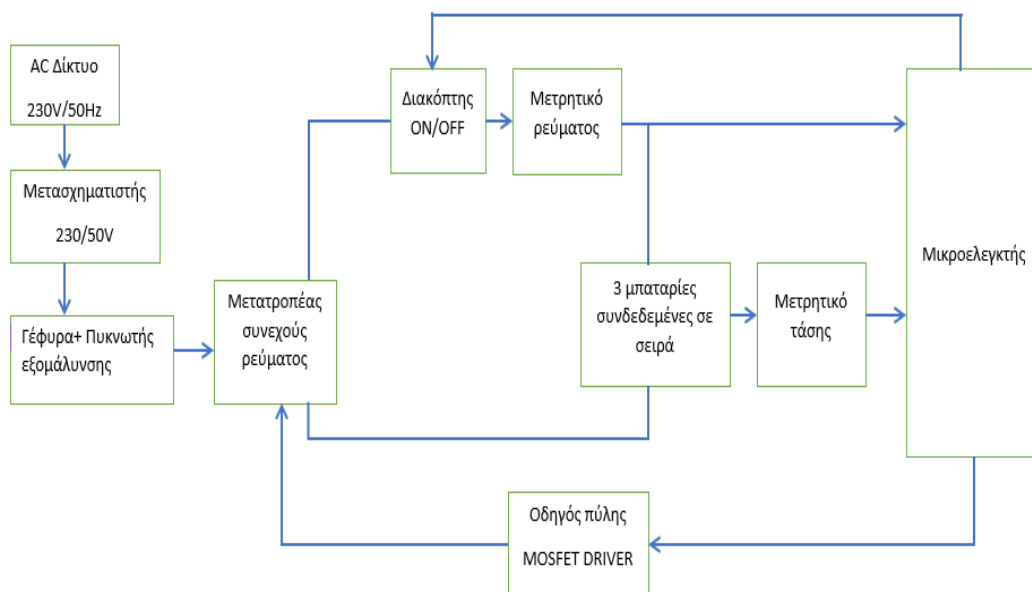
Κεφάλαιο 3ο: Αναλυτική προσέγγιση του συστήματος διαχείρισης συστοιχίας μπαταριών

3.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί μια εισαγωγή στο σύστημα διαχείρισης συστοιχία μπαταριών που σχεδιάστηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας και στα κυκλώματα από τα οποία αυτό αποτελείται. Για την βελτιστοποίηση μιας συστοιχίας επαναφορτιζόμενων μπαταριών πρέπει να παρακολουθούνται συνεχώς κάποια μεγέθη, όπως το ρεύμα, η τάση και η θερμοκρασία κατά τη φόρτιση. Το γεγονός αυτό, απαιτεί τη δημιουργία και τη χρήση ενός αποτελεσματικού συστήματος διαχείρισης μπαταριών (BMS-Battery Management System) ώστε να διασφαλιστεί η μέγιστη διάρκεια ζωής της συστοιχίας μπαταριών.

Σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS) θεωρείται οποιοδήποτε ηλεκτρονικό σύστημα που παρακολουθεί και ελέγχει τη συμπεριφορά επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών κατά τη λειτουργία τους. Ένα καλά σχεδιασμένο BMS πρέπει να είναι σε θέση, παίρνοντας ορισμένα δεδομένα κατά την λειτουργία των συσσωρευτών, να διαχειρίζεται συνεχώς είτε ξεχωριστά τις μπαταρίες είτε συστοιχία μπαταριών. Το BMS αποτελείται κυρίως από το κύκλωμα ελέγχου και από το κύκλωμα ισχύος. Το κύκλωμα ισχύος παρέχει την απαιτούμενη στάθμη τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας, ενώ το κύκλωμα ελέγχου αναλαμβάνει τον έλεγχο και την επίβλεψη του συνολικού συστήματος.

Η αποτελεσματικότητα ενός Συστήματος Διαχείρισης Μπαταριών είναι κρίσιμη για την ασφάλεια του συνολικού συστήματος, γι' αυτό πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη σωστή καταμέτρηση των δεδομένων κατά την λειτουργία των συσσωρευτών. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υλοποίησης ενός BMS. Η Επιλογή της βέλτιστης μεθόδου εξαρτάται κάθε φορά από τα δεδομένα του προβλήματος ή από τις ανάγκες του συστήματος. Το παρακάτω σχηματικό διάγραμμα αναπαριστά το BMS που σχεδιάστηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής και στη συνέχεια εξηγούνται αναλυτικά όλα τα στοιχεία που το αποτελούν



Σχήμα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος διαχείρισης και βελτιστοποίησης συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου της παρούσας πτυχιακής εργασίας

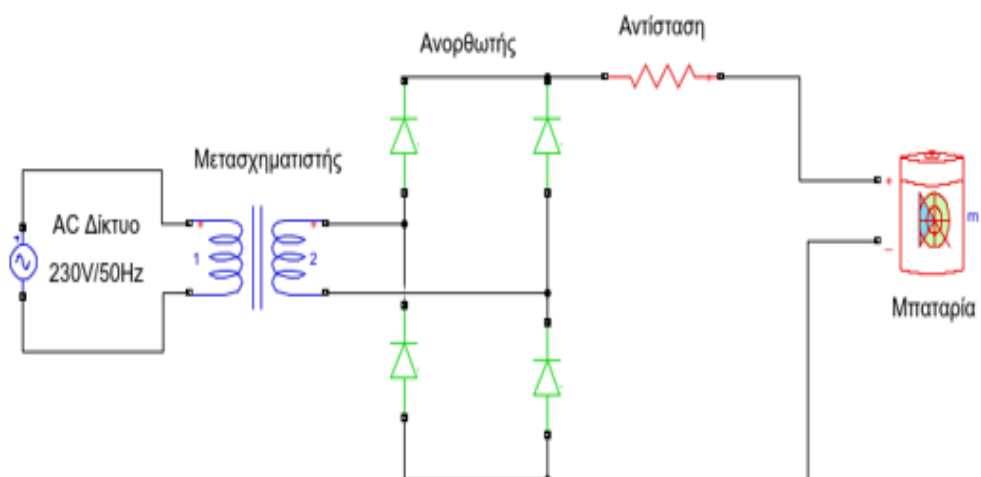
3.2 Προσέγγιση και προϋποθέσεις

Στην υλοποίηση ενός συστήματος διαχείρισης και βελτιστοποίησης συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου, χρησιμοποιείται μόνο μία διάταξη τροφοδοσίας για την φόρτιση όλων των μπαταριών που αποτελούν την συστοιχία. Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος είναι σχετικά απλή και οικονομική καθώς δεν απαιτεί πολλά κυκλώματα. Ωστόσο, από τη στιγμή που χρησιμοποιείται μόνο ένας φορτιστής, το BMS δεν έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί ξεχωριστά τη φόρτιση των μπαταριών που αποτελούν της συστοιχίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υπερφόρτιση κάποιων συσσωρευτών της συστοιχίας. Σημειώνεται ότι πρέπει η συστοιχία να αποτελείται από μπαταρίες ίδιας οικογένειας. Όμως, λόγω των ασυνεπειών κατασκευής και πολλών άλλων παραγόντων όπως η εσωτερική αντίσταση και η γήρανση, τίποτα δεν εγγυάται ότι οι μπαταρίες της συστοιχίας θα απαιτούν τον ίδιο χρόνο φόρτισης. Έτσι, η μπαταρία με το μεγαλύτερο φορτίο θα φθάσει πρώτη στην πλήρη φόρτιση, ενώ η μπαταρία με το μικρότερο φορτίο θα απέχει αρκετά από την πλήρη. Καθώς συνεχίζει ο φορτιστής να παρέχει τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας μπαταριών για να φορτιστούν οι υπολειπόμενες μπαταρίες, θα υπερφορτιστούν οι ήδη φορτισμένες. Για να μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η δυνατότητα υπερφόρτισης, πρέπει το συγκεκριμένο σύστημα διαχείρισης να περιέχει ένα διακόπτη κυκλώματος. Ο βασικός ρόλος του διακόπτη θα είναι να σταματάει τη φόρτιση όταν κάποια από τις 3 μπαταρίες φθάσει σε πλήρη φόρτιση για αποφυγή της υπερφόρτισης.

Το σύστημα διαχείρισης συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου που αποφασίστηκε να υλοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, περιλαμβάνει διάταξης τροφοδοσίας (φορτιστής), μετρητικό τάσης και ρεύματος κατά τη φόρτιση της συστοιχίας και αυστηρή παρακολούθηση των παραπάνω μεγεθών μέσω του μικροεπεξεργαστή.

3.2.1 Φορτιστής

Ένας κλασικός φορτιστής της μπαταρίας μολύβδου εικονίζεται στο σχήμα 3.2. Το κύκλωμα αυτό παρέχει μια απλή-άμεση (direct) μετατροπή ρεύματος από AC σε DC. Δηλαδή, αποτελείται από ένα μετασχηματιστή, μια γέφυρα ανόρθωσης και μια ωμική αντίσταση για τη μέτρηση του ρεύματος που ρέει μέσα από την μπαταρία.

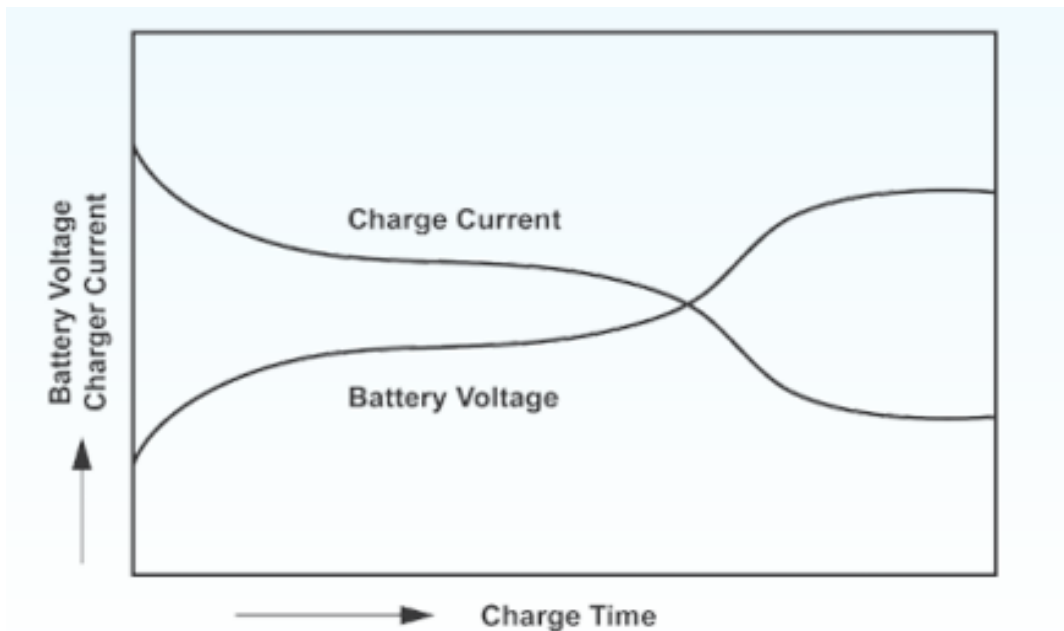


Σχήμα 3.2: Φορτιστής taper-Current

Ο φορτιστής taper-Current που εικονίζεται στο σχήμα 3.2 είναι το απλούστερο κύκλωμα φόρτισης μιας μπαταρίας μολύβδου. Ο φορτιστής αυτός είναι ο πιο οικονομικός. Το βασικό πρόβλημα του είναι ότι δεν διαθέτει κύκλωμα αποφυγής της υπερφόρτισης. Η μόνο λύση για αποφυγή της υπερφόρτισης

στην περίπτωση αυτή, είναι να αποσυνδέεται η μπαταρία από τη διάταξη τροφοδοσίας μετά από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, ο φορτιστής taper-Current δεν παρέχει σταθεροποιημένη ούτε την τάση αλλά ούτε και την ένταση του ρεύματος.

Δεν χρησιμοποιείται αυτός ο φορτιστής στη παρούσα εργασία για την φόρτιση των μπαταριών, αλλά ένας σύγχρονος φορτιστής ελεγχόμενος από μικροεπεξεργαστή. Παρέχει κάποια μορφή ρύθμισης τάσης ούτως ώστε ο διαχειριστής να μπορεί να ελέγχει την τάση που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες των μπαταριών. Τέλος, στα κεφάλαια που ακολουθούν, θα φανούν τα στάδια που ακολουθήθηκαν μέχρι την υλοποίηση της διάταξης τροφοδοσίας της συστοιχίας μπαταριών.

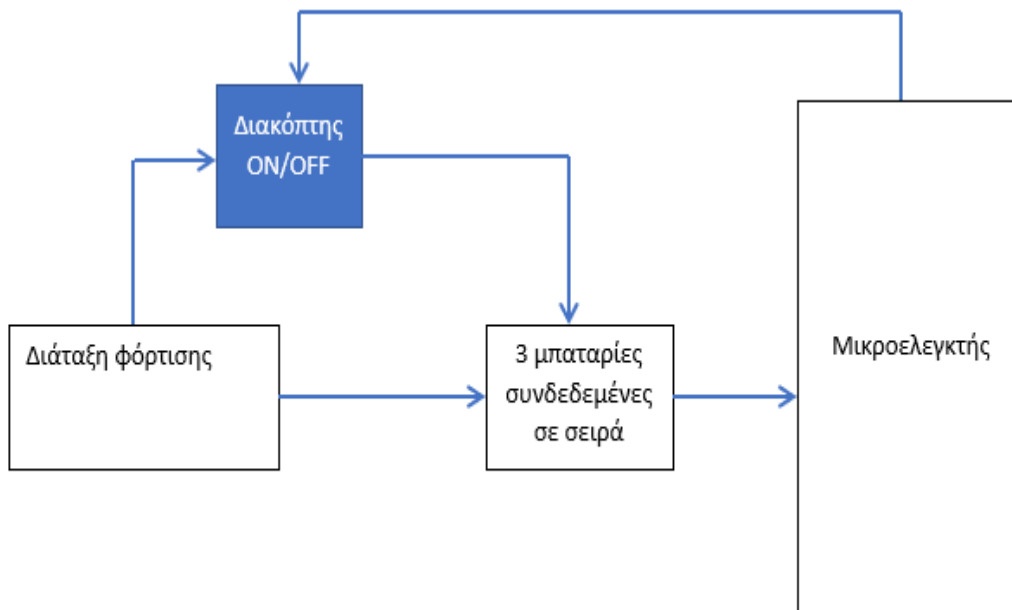


Σχήμα 3.3: Μεταβολή της τάσης ακροδεκτών και του ρεύματος, κατά τη φόρτιση μίας μπαταρίας μολύβδου κλειστού τύπου με το φορτιστή taper-Current [6]

3.2.2 Διακόπτης κυκλώματος

Κατά τη φόρτιση της συστοιχίας μπαταριών, πρέπει να ελέγχονται συνεχώς η τάση και τα επίπεδα ρεύματος που εφαρμόζονται στους ακροδέκτες της, το συνολικό ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που επιτρέπεται να περάσει μέσα από αυτήν, το πόσο γρήγορα, και το πότε. Το γεγονός αυτό, απαιτεί την σχεδίαση και την κατασκευή ενός διακόπτη κυκλώματος. Ο διακόπτης παρεμβάλλεται μεταξύ της συστοιχίας μπαταριών, της εξόδου παλμών του μικροελεγκτή και της διάταξης φόρτισης. Η δουλειά του είναι να σταματάει τη φόρτιση όταν οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες για αποφυγή της υπερφόρτισης. Όταν φορτίζονται οι μπαταρίες, ο μικροελεγκτής πρέπει να είναι σε θέση να στείλει ένα κατάλληλο σήμα ελέγχου στο διακόπτη για την ενεργοποίηση του, δηλαδή ο διακόπτης διατηρείται σε κατάσταση αγωγής. Όταν φορτιστεί πλήρως η συστοιχία των μπαταριών, πρέπει να σταλεί ένα άλλο κατάλληλο σήμα ελέγχου από το μικροελεγκτή για την απενεργοποίηση του διακόπτη κυκλώματος. Διατηρώντας έτσι το διακόπτη σε κατάσταση αποκοπής.

Ο αυτόματος τερματισμός φόρτισης είναι ένας χρήσιμος παράγοντας για κάθε σύστημα διαχείρισης συστοιχίας μπαταριών, καθώς η υπερφόρτιση, η συνέχιση της φόρτισης της συστοιχίας πέρα από μια προκαθορισμένη στάθμη, μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες αντιδράσεις που συμβαίνουν ανεξάρτητα από το ρυθμό φόρτισης.



Σχήμα 3.4: Σύνδεση διακόπτη κυκλώματος με άλλες μονάδες του συστήματος

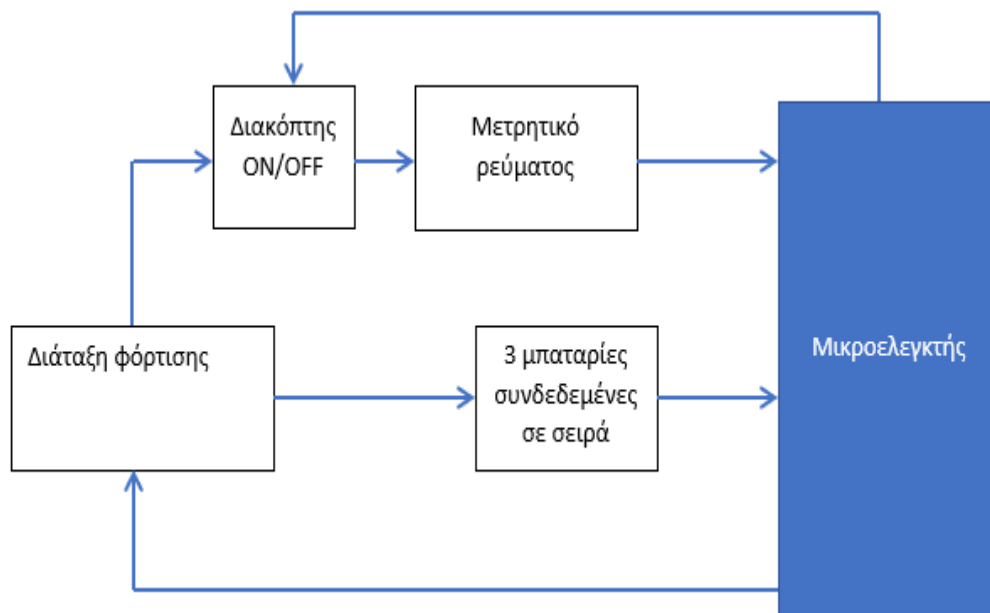
3.2.3 Μικροελεγκτής

Ο μικροελεγκτής είναι ο πυρήνας όχι μόνο του συστήματος ελέγχου της φόρτισης συστοιχίας συσσωρευτών αλλά του όλου συστήματος διαχείρισης μπαταριών. Όταν φορτίζεται η συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, μετριούνται συνεχώς η τάση στους ακροδέκτες της και η ένταση του ρεύματος που ρέει μέσα από αυτήν. Στη συνέχεια οι μετρούμενες ποσότητες στέλνονται στις εισόδους του μικροελεγκτή αφού έχουν υποβιβαστεί σε κατάλληλα επίπεδα. Το πρόγραμμα ελέγχου που τρέχει στο μικροελεγκτή “διαβάζει” συνεχώς τις τιμές των μετρούμενων τιμών. Όλα τα μεγέθη αναλύονται, ελέγχονται, επεξεργάζονται και στη συνέχεια παράγονται οι κατάλληλοι παλμοί ελέγχου.

Στη διάταξη φόρτιση όπως θα δούμε στα κεφάλαια που ακολουθούν, ο μικροελεγκτής είναι υπεύθυνος για την παλμοδότηση του ηλεκτροδίου gate του ημιαγωγού στοιχείου MOSFET με την τεχνική PWM. Οι παλμοί ελέγχου παράγονται μέσω του μικροελεγκτή από την σύγκριση του σήματος εξόδου του ελεγκτή PI μ’ένα τριγωνικό σήμα. Το τριγωνικό σήμα έχει πλάτος 10 και συχνότητα 35kHz. Όταν το σήμα εξόδου που ελεγκτή PI είναι μεγαλύτερο από το τριγωνικό σήμα, ο παλμός ελέγχου είναι σε υψηλό δυναμικό και άγει το MOSFET. Επιπλέον, μικροελεγκτής είναι υπεύθυνος για την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου της φόρτισης. Κατά τη φόρτιση με σταθερή τάση, ο μικροελεγκτής παράγει κατάλληλο σήμα στην πύλη του Mosfet για μια επιθυμητή τιμή της τάσης εξόδου ενώ ελέγχεται συνεχώς το ρεύμα που ρέει μέσα από τη συστοιχία μπαταριών. Το ίδιο πράγμα γίνεται και κατά την φόρτιση με σταθερό ρεύμα, στέλνεται ένα κατάλληλο σήμα από τις εξόδους του μικροελεγκτή στην πύλη του Mosfet για επιθυμητή τιμή της έντασης του ρεύματος εξόδου ενώ ελέγχεται συνεχώς η τιμή της τάσης στους ακροδέκτες της συστοιχίας μπαταριών.

Στο διακόπτη κυκλώματος, ο μικροελεγκτής είναι υπεύθυνος για την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση του. Διαβάζει τις τιμές της τάσης στις εισόδους του, στη συνέχεια συγκρίνει τις τιμές αυτές με μία προκαθορισμένη στάθμη. Όταν η τιμή της τάσης στους ακροδέκτες της συστοιχίας μπαταριών είναι μικρότερη από την προκαθορισμένη, η φόρτιση συνεχίζεται κανονικά. Όταν γίνει μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη τιμή ο μικροελεγκτής στέλνει ένα άλλο σήμα ελέγχου στο διακόπτη κυκλώματος για να σταματήσει η φόρτιση. Μ’αυτό τον τρόπο, υλοποιείται ο αυτόματος τερματισμός φόρτισης που είναι πολύ χρήσιμος για ένα σύστημα διαχείρισης συστοιχίας

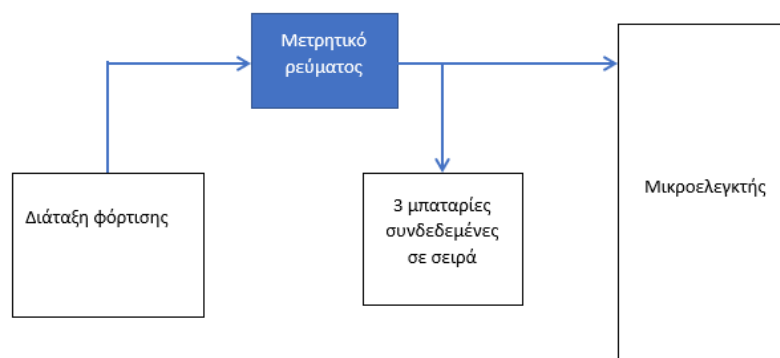
ηλεκτροχημικών συσσωρευτών (BMS). Ο μικροελεγκτής στέλνει παλμούς στο διακόπτη του κυκλώματος ισχύος(MOSFET) για τερματισμό της φόρτισης



Σχήμα 3.5: Σύνδεση μικροελεγκτή με άλλες μονάδες του συστήματος

3.2.4 Μετρητικό ρεύματος

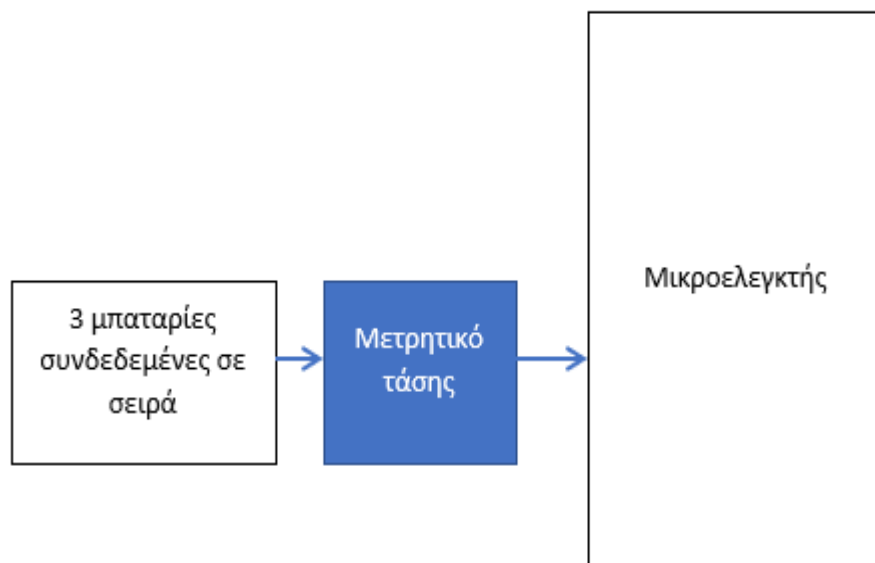
Η τιμή του ρεύματος που διαρρέεται από τη διάταξη φόρτισης στη συστοιχία συσσωρευτών πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς για λόγους ασφαλείας του συστήματος. Η γνώση κάθε στιγμή της τιμής του ρεύματος που ρέει μέσα από τη συστοιχία μπαταριών γίνεται με μετρητικό ρεύματος. Η μετρούμενη τιμή του ρεύματος πρέπει να σταλεί στο μικροελεγκτή. Κατά την φόρτιση με σταθερή τάση, το ρεύμα στους ακροδέκτες της μπαταρίας μειώνεται συνεχώς. Όταν το ρεύμα μειωθεί στην τιμή $0.01C$ (C εκφράζει τη χωρητικότητα της μπαταρίας), ο μικροελεγκτής πρέπει να είναι σε θέση να στείλει ένα παλμικό σήμα (PWM) στον διακόπτη κυκλώματος για τον τερματισμό της φόρτισης. Όλοι οι συσσωρευτές της συστοιχίας φορτίζονται με την ίδια τιμή ρεύματος όταν είναι συνδεδεμένοι σε σειρά αλλά λόγω των κατασκευαστικών ασυνεπειών και άλλων παραγόντων, δεν φορτίζονται οι μπαταρίες πλήρως στην ίδια χρονική στιγμή. Για τον λόγο αυτό, το σήμα ελέγχου από το μικροελεγκτή στέλνεται στο διακόπτη κυκλώματος μόνο όταν κάποια από τις 3 μπαταρίες που αποτελούν τη συστοιχία φθάσει σε πλήρη φόρτιση. Το μετρητικό ρεύμα που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναλύεται στο κεφάλαιο 6.



Σχήμα 3.6: Σύνδεση μετρητικού ρεύματος με άλλες μονάδες του συστήματος

3.2.5 Μετρητικό τάσης

Η τάση της συστοιχίας μπαταριών όταν είναι πλήρως φορτισμένη ξεπερνά την επιτρεπόμενη διαφορά δυναμικού στην είσοδο του μικροελεγκτή. Για να μπορεί να επεξεργαστεί η συγκεκριμένη ποσότητα της τάσης, πρέπει να υποβιβαστεί σε ένα κατάλληλο επίπεδο ώστε να μπορεί να αποτελεί είσοδο για το μικροελεγκτή. Η τιμή της τάσης αυτής εξαρτάται από τις στάθμες φόρτισης των μπαταριών που αποτελούν την συστοιχία και πρέπει να διαβάζεται συνεχώς από το μικροελεγκτή. Κατά την φόρτιση με σταθερό ρεύμα, η τάση ακροδεκτών της συστοιχίας μπαταριών αυξάνεται συνεχώς. Όταν αυτή η τάση φτάσει μια τιμή μεταξύ 2.43 και 2.53/στοιχείο, ο μικροελεγκτής πρέπει να είναι σε θέση να στείλει ένα παλμικό σήμα (PWM) στον διακόπτη κυκλώματος για τον τερματισμό της φόρτισης. Όλοι οι συσσωρευτές της συστοιχίας φορτίζονται με την ίδια σταθερή στάθμη τάσης αλλά λόγω των κατασκευαστικών ασυνεπειών και άλλων παραγόντων, δεν φορτίζονται όλες οι μπαταρίες πλήρως στην ίδια χρονική στιγμή. Για τον λόγο αυτό, το σήμα ελέγχου από το μικροελεγκτή στέλνεται στο διακόπτη κυκλώματος MOSFET μόνο όταν κάποια από τις 3 μπαταρίες που αποτελούν τη συστοιχία φθάσει σε πλήρη φόρτιση. Ο υποβιβασμός της τάσης των συσσωρευτών σε μια στάθμη κατάλληλη για την είσοδο του μικροελεγκτή γίνεται με ένα κύκλωμα το οποίο αναλύεται στο κεφάλαιο 6 τοποθετείται ανάμεσα στους ακροδέκτες της συστοιχία μπαταριών και στους ακροδέκτες εισόδου του μικροελεγκτή, όπως εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.7: Σύνδεση μετρητικού τάσης με άλλες μονάδες

3.3 Επίλογος

Σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS) θεωρείται οποιοδήποτε ηλεκτρονικό σύστημα που παρακολουθεί και ελέγχει τη συμπεριφορά επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών κατά τη λειτουργία τους. Ένα καλά σχεδιασμένο BMS πρέπει να είναι σε θέση, παίρνοντας ορισμένα δεδομένα κατά την λειτουργία των συσσωρευτών, να διαχειρίζεται συνεχώς είτε ξεχωριστά τις μπαταρίες είτε συστοιχία μπαταριών.

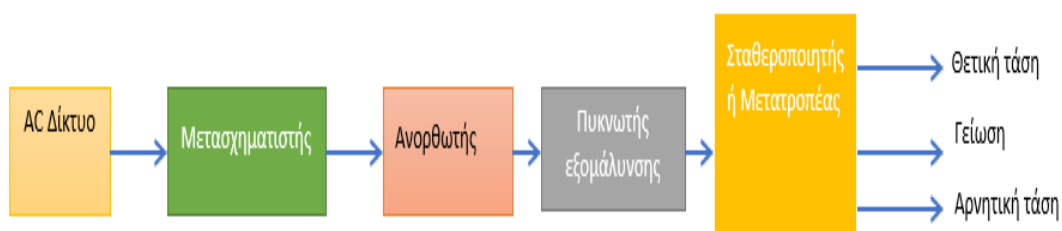
Το BMS αποτελείται κυρίως από το κύκλωμα ελέγχου και από το κύκλωμα ισχύος. Το κύκλωμα ισχύος παρέχει την απαιτούμενη στάθμη τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας ενώ το κύκλωμα ελέγχου αναλαμβάνει τον έλεγχο και την επίβλεψη του συνολικού συστήματος.

Κεφάλαιο 4ο: Θεωρητική ανάλυση της διάταξης φόρτισης της συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου

4.1 Εισαγωγή

Το σύστημα διαχείρισης συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αποτελείται από μια διάταξη τροφοδοσίας και ένα σύστημα ελέγχου. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μια ανάλυση στο θεωρητικό επίπεδο της διάταξης τροφοδοσίας που χρησιμοποιήθηκε.

Όλες οι δευτερογενείς μπαταρίες φορτίζονται από μια πηγή τάσης συνεχούς μορφής (dc), η οποία χαρακτηρίζεται από το μέγεθος της ηλεκτρικής τάσης και του ρεύματος. Η τάση αυτή παράγεται από το δίκτυο ηλεκτρισμού, σε εναλλασσόμενη τάση (ac). Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν αυτήν την εναλλασσόμενη τάση (ac) σε συνεχή τάση (dc) ονομάζονται διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος είτε μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τροφοδοτικές διατάξεις ή απλώς τροφοδοτικά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα γραμμικά και τα διακοπτικά. Η βασική απαίτηση από κάθε διάταξη τροφοδοσίας είναι η απομόνωση της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου από τη συνεχή τάση που βγάζει το τροφοδοτικό στην έξοδο του. Σ' όλες σχεδόν τροφοδοτικές διατάξεις, η απομόνωση επιτυγχάνεται με χρήση μετασχηματιστή ισχύος (M/Σ). Ένα τροφοδοτικό θεωρείται καλά σχεδιασμένο όταν προσφέρει σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης, η τάση στην έξοδο εμφανίζει ελάχιστες μεταβολές, μικρή τάση κυμάτωσης (Ripple). Επίσης, δεν πρέπει να μεταβάλλεται η τάση εξόδου εξαιτίας της μεταβολής του ρεύματος στο φορτίο. Τα γραμμικά τροφοδοτικά ή γραμμικές διατάξεις, προσφέρουν κάποια πλεονέκτημα όπως η μικρή κυμάτωση της τάσης εξόδου, πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά αλλά ο μεγάλος όγκος, ο μικρός βαθμός απόδοσης περιορίζουν τη χρήση τους στις εμπορικές συσκευές. Οι διακοπτικές διατάξεις ή τα παλμοτροφοδοτικά πάρα το θόρυβο που παρέχουν στην είσοδο και στην έξοδο τους, εμφανίζουν μικρό όγκο, πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης και μικρό κόστος σε σχέση με τις γραμμικές διατάξεις.



Σχήμα 4.1: Δομικό διάγραμμα μετατροπής εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή

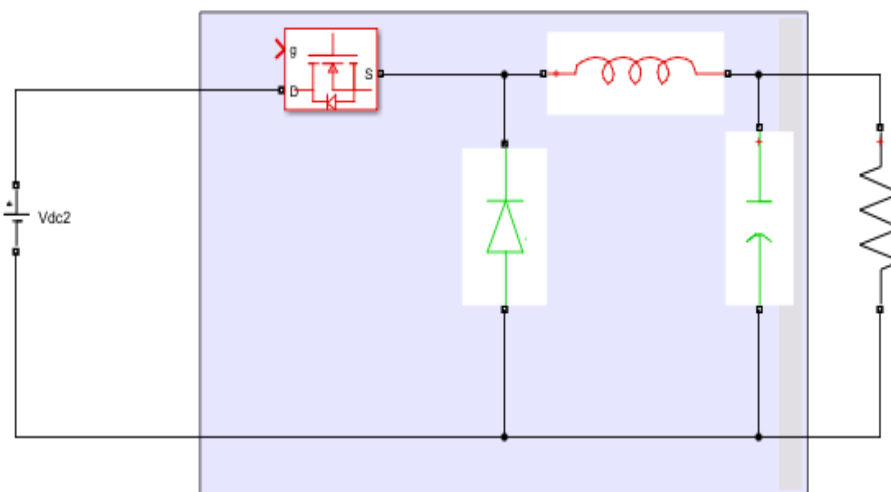
Η πρώτη βαθμίδα αποτελεί το δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης. Η δεύτερη είναι ένας μετασχηματιστής ισχύος (M/Σ) που μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση δικτύου σε μια επιθυμητή στάθμη. Σημειώνεται ότι τα ηλεκτρικά δίκτυα πολλών ευρωπαϊκών χωρών παρέχουν φασική τάση με ενεργό τιμή 230V και συχνότητα 50Hz. Η δεύτερη βαθμίδα είναι ένας ανορθωτής ο οποίος μετατρέπει την τάση ac της εξόδου σε μια dc τάση. Στη συνέχεια, η έξοδος του ανορθωτή περνάει μέσα από ένα φίλτρο εξομάλυνσης. Η επόμενη βαθμίδα μπορεί να είναι ένας σταθεροποιητής είτε μια διάταξη ισχύος. Η βαθμίδα αυτή χρησιμοποιείται για υποβιβασμό είτε ανύψωση της τάσης. Επιπλέον, η τελευταία βαθμίδα παρέχει μια σχετικά καθαρή συνεχή τάση. Για τη φόρτιση της συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, υλοποιήθηκε μια διάταξη τροφοδοσία που ανήκει στην κατηγορία των διακοπτικών τροφοδοτικών.

4.2 Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος υποβιβασμού της τάσης (Buck Converter)

Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος είναι κυκλώματα ισχύος που μετατρέπει μια συνεχή τάση (dc) σε μια άλλη τάση συνεχούς μορφής με διαφορετικό πλάτος ή και πολικότητα. Ανήκουν στην κατηγορία των διακοπτικών τροφοδοτικών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των διακοπτικών τροφοδοτικών με αυτό των γραμμικών τροφοδοτικών είναι ότι οι απώλειες ισχύος είναι εξαιρετικά μικρές και συχνά δεν απαιτείται η χρήση απαγωγέα θερμότητας. Η μετατροπή της τάσης στον μετατροπέα buck επιτελείται από διακόπτες οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλή συχνότητα.

Στις διατάξεις τροφοδοσίας, η διακύμανση της τάσης εξόδου πρέπει να είναι πολύ περιορισμένη. Στον μετατροπέα συνεχούς ρεύματος υποβιβασμού της τάσης όπως και σε πολλά κυκλώματα ισχύος, το πρόβλημα της διακύμανσης της τάσης εξόδου αντιμετωπίζεται με χρήση ενός βαθυπερατού φίλτρο (LC Filter). Για την ορθή λειτουργία του μετατροπέα, η διακοπτική συχνότητα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρο. Όταν η συχνότητα αποκοπής είναι πολύ μικρή, οι αρμονικές και η διακοπτική συχνότητα αποκόπτονται από το φίλτρο. Έτσι, μόνο η μέση τιμή της παλμικής τάσης περνάει στην εξόδο.

Η κυκλωματική δομή του μετατροπέα συνεχούς ρεύματος υποβιβασμού της τάσης εικονίζεται στο σχήμα 4.2 και στη συνέχεια εξηγείται η λειτουργία του



Σχήμα 4.2: Κυκλωματική δομή του μετατροπέα buck

Το κύκλωμα ισχύος μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης αποτελείται από τρία στοιχεία, ένας διακόπτης, μια δίοδος ελεύθερης ροής και ένα βαθυπερατό φίλτρο (LC Filter). Ο πλέον διαδεδομένος διακόπτης είναι το MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET) εξαιτίας των χαρακτηριστικών που παρουσιάζει. Επειδή το MOSFET έχει καθοριστικό ρολό στο κύκλωμα αυτό, αναλύεται η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά του στη συνέχεια αυτής της εργασίας. Στις πραγματικές εφαρμογές, το φορτίο που συνδέεται στην έξοδο του μετατροπέα, παρουσιάζει μια επαγωγική συμπεριφορά, η οποία προκαλεί υπερτάσεις στα άκρα του διακόπτη κατά την σβέση του. Με σκοπό την επίλυση του προβλήματος αυτού, τοποθετείται η δίοδος ελεύθερης ροής αντιπαράλληλα με το φορτίο. Το φίλτρο αποτελείται από μια επαγωγή και έναν πυκνωτή για επίλυση του προβλήματος της διακύμανσης της τάσης εξόδου. Ο πυκνωτής θα πρέπει να είναι ηλεκτρολυτικός, ώστε να διατηρείται η τάση σε ένα σταθερό επιθυμητό επίπεδο. Η λειτουργία του Buck είναι σχετικά απλή σε σχέση με τους άλλους μετατροπείς ισχύος, όταν ο διακόπτης (MOSFET) είναι σε κατάσταση αγωγής, η ενέργεια στην επαγωγή και στο φορτίο παρέχεται από την πηγή τροφοδοσία, ενώ η δίοδος ελεύθερης διέλευσης είναι πολωμένη ανάστροφα

και δεν άγει. Κατά την μετάβαση από την κατάσταση αγωγής σε κατάσταση αποκοπής, το ρεύμα της επαγωγής ρέει μέσα από τη δίοδο. Σημειώνεται ότι η τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα buck είναι δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την τιμή της τάσης εισόδου.

4.2.1 Τρόποι λειτουργίας

Ο μετατροπέας έχει δύο τρόπους λειτουργίας και ταξινομούνται ανάλογα με το ρεύμα που ρέει μέσα από την επαγωγή στη μόνιμη κατάσταση. Όταν το ρεύμα ρέει μέσα από την επαγωγή σ' όλο το χρονικό διάστημα που ο διακόπτης είναι σε κατάσταση αποκοπής, τότε ο διακόπτης λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος (Continuous conduction mode-CCM). Όμως, αυτό δεν γίνεται πάντα στις πραγματικές εφαρμογές. Κατά την λειτουργία του μετατροπέα, όταν η αντίσταση φορτίου αυξάνει πέρα από ένα όριο, θα μειωθεί η ισχύς εξόδου. Το γεγονός αυτό, οδηγεί τον μετατροπέα σε λειτουργία με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος (Discontinuous conduction mode). Δηλαδή, μηδενίζεται για κάποιο χρονικό διάστημα το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγή όταν ο διακόπτης είναι σε κατάσταση αποκοπής. Στις διατάξεις φόρτισης, θέλουμε ο μετατροπέας να λειτουργεί συνεχώς με συνεχή αγωγή του ρεύματος ώστε να αποφεύγονται τα σημεία μηδενισμού. Εξηγούνται αναλυτικά οι δύο τρόποι λειτουργίας παρακάτω.

4.2.1.1 Συνεχής τρόπος λειτουργίας

Όταν η επαγωγή διαρρέεται από ένα ρεύμα σ' όλη την περίοδο που ο διακόπτης είναι σε κατάσταση αποκοπής όπως εικονίζεται στο σχήμα 4.3, αναφέρεται ότι ο μετατροπέας λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος και η τάση στα άκρα της επαγωγής ισούται με $V_{dc} - V_o$. Ο διακόπτης είναι σε κατάσταση αγωγής για χρόνο ίσο με $t_{on} = D \cdot T_s$ και είναι σε κατάσταση αποκοπής στο χρονικό διάστημα $t_{off} = (1-D) \cdot T_s$. Στο διάστημα που είναι ο διακόπτης σε κατάσταση αποκοπής, το ρεύμα της επαγωγής διαρρέει τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης. Το ρεύμα που ρέει μέσα από την επαγωγή μειώνεται γραμμικά και η τάση στα άκρα της επαγωγής ισούται με την τάση εξόδου $-V_o$.

Οι τύποι που ισχύουν στο μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης (Buck Converter) όταν αυτός λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος είναι οι εξής :

$$V_{dc} - V_o = V_o(1 - D)T_s \quad (4.1)$$

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = D \quad (4.2)$$

$$V_{dc} \cdot I_{dc} = V_o \cdot I_o \quad (4.3)$$

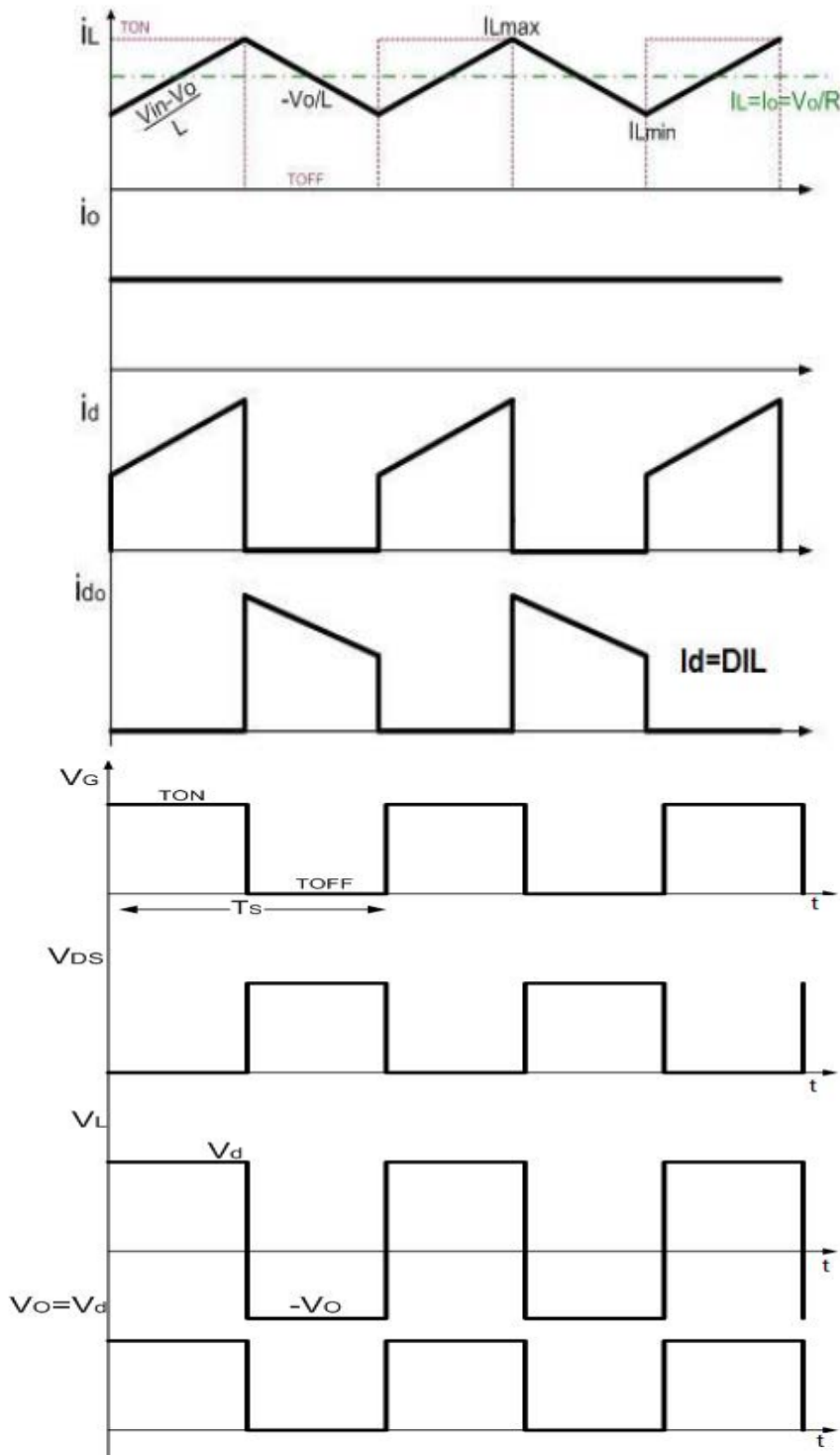
$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{I_o} = D \quad (4.4)$$

Όπου οι μεταβλητές στους τύπους είναι:

- V_{dc} = Τάση εισόδου του μετατροπέα
- V_o = Τάση εξόδου
- D = Ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου
- I_o = Ρεύμα εξόδου
- I_{dc} = Ρεύμα εισόδου
- T_s = Διακοπτική Περίοδος λειτουργίας

Οι εξ. (4.3) και (4.4) ισχύουν μόνο όταν τα στοιχεία του μετατροπέα θεωρούνται ιδανικά.

Όταν ο μετατροπέας Buck λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος (Continuous conduction mode), η τάση εξόδου εξαρτάται αποκλειστικά τον κύκλο εργασίας και δεν εξαρτάται από τις μεταβολές του φορτίου. Το συμπέρασμα που βγαίνει από την εξίσωση (4.4) είναι ότι κατά την λειτουργία με συνεχή αγωγής του ρεύματος, ο Buck συμπεριφέρεται ως μετασχηματιστής συνεχούς ρεύματος με ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενο λόγο μετασχηματισμού D . Επιπλέον, η ένταση του ρεύματος που ρέει μέσα από την επαγωγή, εξαρτάται από τις μεταβολές του ρεύματος στην εξόδου του μετατροπέα.



Σχήμα 4.3: Κυματομορφές στο μετατροπέα όταν λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος [7]

4.2.1.2 Ασυνεχής τρόπος λειτουργίας

Αν η αντίσταση φορτίου αυξηθεί (δηλαδή αν μειωθεί το ρεύμα) πέρα από ένα όριο, το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγή γίνεται ασυνεχές. Κατά το χρονικό διάστημα που μηδενίζεται η ένταση του ρεύματος στην επαγωγή, το ρεύμα στο φορτίο παρέχεται αποκλειστικά από τον πυκνωτή του φίλτρου.

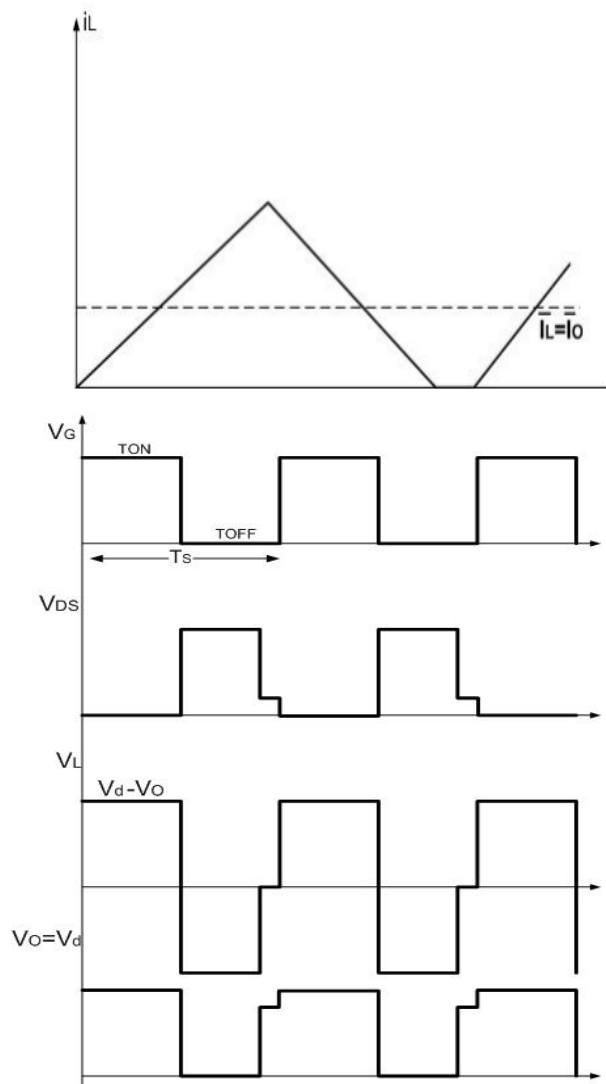
Οι τύποι που ισχύουν στο μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης (Buck Converter) όταν αυτός λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος είναι οι εξής :

$$(V_{dc} - V_o)DT_s - \delta_1 \cdot V_o \cdot T_s = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{D}{D + \delta_1} \quad (4.6)$$

$$I_L = I_{L(\max)} \frac{(D + \delta_1)}{2T_s} = \frac{V_o \cdot \delta_1 \cdot T_s}{L} \frac{D + \delta_1}{2} = \frac{\delta_1 \cdot T_s}{2L} V_o (D + \delta_1) = \frac{\delta_1 T_s}{2L} \cdot D \cdot V_{dc} \quad (4.7)$$

Η Εξίσωση (4.5) αναπαριστά τη μέση τιμή της τάσης στην επαγωγή. Από την εξ. (4.5) προκύπτει ο λόγος της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου εξ. (4.6). Η εξ. (4.7) αναπαριστά τη μέση τιμή του ρεύματος στην επαγωγή η οποία είναι ίση με την ένταση του ρεύματος του φορτίου.



Σχήμα 4.4: Κυματομορφές στο μετατροπέα όταν λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος [7]

4.2.2 Κύκλωμα ισχύος

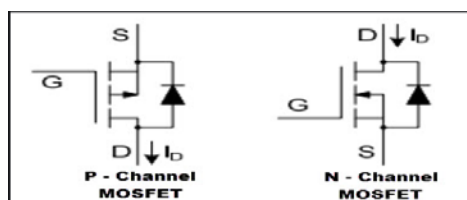
Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ότι ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης (Buck converter) χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ως διάταξη τροφοδοσίας. Το κύκλωμα ισχύος της διάταξης αυτής αποτελείται από τη δίοδο ελεύθερη ροής, το ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο που είναι τρανζίστορ MOSFET καναλιού τύπου n, ένα βαθυπερατό φίλτρο (LC filter) που αποτελείται από έναν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή και ένα πηνίο. Αναλύονται στο θεωρητικό επίπεδο όλα τα στοιχεία παρακάτω

4.2.2.1 Το MOSFET ισχύος

Τα MOSFET χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στα κυκλώματα ισχύος καθώς εμφανίζει μικρότερους χρόνους μετάβασης (καναλιού τύπου n). Τα σημαντικά χαρακτηριστικά του MOSFET ισχύος είναι η τάση διάσπασης, η τάση πύλης-πηγής V_{GS} , δίνεται συνήθως η μέγιστη τιμή από τους κατασκευαστές, η αντίσταση αγωγιμότητα και το μεταβατικό ρεύμα της πύλης. Η Τάση διάσπασης είναι η μέγιστη τάση που υποστηρίζει το MOSFET στην κατάσταση αποκοπής, χωρίς να εκδηλωθεί διάσπαση χιονοστιβάδας στην επαφή σώματος-εκροής. Η τάση πύλης-πηγής V_{GS} είναι η μέγιστη τάση πύλης-πηγής. Το στρώμα του οξειδίου στα MOSFET ανθίσταται σε τάσεις από $\pm 50V$ ως $\pm 100V$ η λειτουργία του στοιχείου πάνω από αυτές τις τάσεις μπορεί να οδηγήσει στη καταστροφή του. Οι τιμές που δίνονται από τους κατασκευαστές για την τάση V_{GS} κυμαίνονται από $\pm 20V$ έως $\pm 30V$, θέτοντας ένα περιθώριο ασφαλείας, καθώς η διάσπαση του οξειδίου επιφέρει καταστροφή του στοιχείο. Όταν η παρουσία μεταβατικών τάσεων είναι πιθανή, η πύλη προστατεύεται με την αντίθετη σύνδεση δύο διοδίων Zener(back to back), μεταξύ της τάσης πύλης και της πηγής. Η αντίσταση αγωγιμότητα είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος των MOSFET ισχύος. Το στοιχείο αυτό όταν είναι σε κατάσταση αγωγιμότητας, παρουσιάζει μία αντίσταση στη ροή του ρεύματος. Αυτή η αντίσταση $R_{DS(on)}$ καθορίζει τις απώλειες ισχύος του MOSFET σε κατάσταση αγωγής σύμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$P_{on} = I^2 \cdot R_{DS(on)} \quad (4.8)$$

Το συμπέρασμα που βγαίνει από την εξίσωση (4.8) είναι ότι τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση $R_{DS(on)}$, τόσο μεγαλύτερη απώλεια θα έχει το στοιχείο. Στη μεγιστοποίηση της απόδοσης του κυκλώματος ισχύος, η $R_{DS(on)}$ πρέπει να είναι μικρή. Η $R_{DS(on)}$ είναι πολύ μικρή στα MOSFET με τάση διάσπασης μικρότερη από $300V$. Το MOSFET παρουσιάζει πολύ μεγάλη (περίπου $10^9 \Omega$) αντίσταση πύλης. Ως εκ τούτου, το ρεύμα της πύλης θεωρείται αμελητέο όταν είναι σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ωστόσο, κατά το χρονικό διάστημα μετάβασης από την κατάσταση αγωγής σε κατάσταση αποκοπής το ρεύμα της πύλης I_G αποκτά σχετικά μεγάλες τιμές. Στις πρακτικές εφαρμογές το ρεύμα πύλης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για την γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση των παρασιτικών χωρητικότητων του MOSFET. Όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα μετάβασης από την κατάσταση αποκοπής σε κατάσταση αγωγής, τόσο μικρότεροι είναι οι χρόνοι έναυσης και σβέσης.



Σχήμα 4.5: Κυκλωματικό σύμβολο του MOSFET ισχύος

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5, τα MOSFET ισχύος πάντα έχουν μια αντιπαράλληλη δίοδο στο εσωτερικό τους μεταξύ των ακροδεκτών της πηγής και της εκροής. η εσωτερική δίοδος του MOSFET καναλιού τύπου n έχει καθοριστικό ρόλο σε κάποιες διατάξεις ισχύος και άγει μόνο όταν εφαρμοστεί αρνητική τάση στην εκροή ως προς την πηγή. Και αντίστοιχα άγει όταν εφαρμοστεί θετική τάση στην εκροή του MOSFET καναλιού τύπου p. Όταν η τάση πύλης είναι μηδενική, η εσωτερική δίοδος φέρει το πλήρες ρεύμα του φορτίου.

Τα MOSFET, όπως όλα τα τρανζίστορς, μπορούν να λειτουργούν σε τρεις διαφορετικές περιοχές. Αυτές οι περιοχές είναι : η περιοχή αποκοπής, περιοχή αγωγής ή κόρου και η ενεργός περιοχή. Στα κυκλώματα ισχύος, Το MOSFET λειτουργεί ως διακόπτης. Για να γίνει αυτό πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση

$$V_{DS} < V_{GS} < V_{GS(th)} \quad (4.9)$$

Το συμπέρασμα που βγαίνει από την εξ. (4.8) είναι ότι πρέπει να εφαρμοστεί στην πύλη μια τάση σχετικά μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου $V_{GS(th)}$ προκειμένου το MOSFET να λειτουργήσει ως διακόπτης. Σημειώνεται ότι σε κατάσταση αγωγιμότητας και αποκοπής, η λειτουργία του στοιχείου ελέγχεται από την τάση μεταξύ πύλης και πηγής. Όταν η τάση V_{GS} είναι μικρότερη από την $V_{GS(th)}$ και η τάση V_{DS} μικρότερη από την V_{DSS} , τότε το MOSFET είναι σε κατάσταση αποκοπής.

4.2.2.2 Δίοδος ελεύθερης ροής

Η δίοδος του Σχ. 4.2 ονομάζεται δίοδος ελεύθερης ροής (freewheeling diode) και έχει καθοριστικό ρόλο στην λειτουργία του μετατροπέα. Όταν η τάση στο φορτίο τείνει να γίνει αρνητική, άγει η δίοδος ελεύθερης ροής εμποδίζοντας την ανάπτυξη αρνητικών τάσεων στο φορτίο. Έτσι, η ισχύς στη dc πλευρά του μετατροπέα δε γίνεται αρνητική και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην ανατρέφεται η ισχύς.

4.2.2.3 Φίλτρο εξόδου LC

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.2, Το φίλτρο εξόδου αποτελείται από μια επαγωγή και έναν πυκνωτή. Η απαίτηση ενός καλοσχεδιασμένου φίλτρο LC είναι η συχνότητα αποκοπής να είναι μικρότερη από την διακοπτική συχνότητα. Όταν ισχύει αυτό, η κυμάτωση από κορυφή σε κορυφή είναι μικρή. Η δεύτερη απαίτηση είναι να επιλέγει η τιμή της αυτεπαγωγής L έτσι ώστε το ρεύμα να ρέει συνεχώς στη διάρκεια της διακοπτικής ημιπεριόδου. Με άλλα λόγια, η τιμή του πηνίου του φίλτρο πρέπει εξασφαλίσει την λειτουργία με συνεχή αγωγή του ρεύματος.

Η συχνότητα αποκοπής του φίλτρο LC ορίζεται από τη σχέση

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.10)$$

Η συχνότητα αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρο(LC filter) που εξασφαλίζει την επιθυμητή κυμάτωση στην τάση εξόδου του μετατροπέα ορίζεται από τη σχέση:

$$f_c = \sqrt{2V_{ripple(p-p)}f_s^2 / \pi^2V_0(1-D)} \quad (4.11)$$

Η ελάχιστη τιμή της απαγωγής που εξασφαλίζει την λειτουργία με συνεχή αγωγή του ρεύματος ορίζεται από για το ελάχιστο ρεύμα εξόδου και με βάση τον κύκλο εργασίας, σύμφωνα με τη σχέση

$$I_L^{\min} = I_o^{\min} = \frac{V_{dc}T_s}{2L_{\min}}D(1-D) \quad (4.12)$$

Όπου είναι μεταβλητές στους τύπους είναι :

- f_c = Συχνότητα αποκοπής
- $V_{ripple(p-p)}$ = Κυμάτωση από κορυφή σε κορυφή της τάσης εξόδου
- f_s = Διακοπτική συχνότητα
- π = Μαθηματική σταθερά $\pi = 3,14$
- I_L^{\min} = Ελάχιστο ρεύμα στην επαγωγή
- I_o^{\min} = Ελάχιστο ρεύμα εξόδου
- L_{\min} = Ελάχιστη τιμή του πηνίου
- V_{dc} = Τάση εισόδου του μετατροπέα
- T_s = Διακοπτική συχνότητα
- D = Ο κύκλος λειτουργίας
- ΔI_L = Διακύμανση του ρεύματος στην επαγωγή
- R_{esr} = Ισοδύναμη αντίσταση σειράς του πυκνωτή
- C = Πυκνωτής
- L = Πηνίο
- $V_{or(p-p)}$ = Η κυμάτωση από κορυφή σε κορυφή $V_{ripple(p-p)}$ ενός μη ιδανικού πυκνωτή

Η Τιμή του πυκνωτή του φίλτρου επιλέγεται με αναφορά την επιθυμητή κυμάτωση στην τάση εξόδου. Στις πραγματικές εφαρμογές, το μέγεθος εξαρτάται κυρίως από την ισοδύναμη αντίσταση σειράς R_{esr} του πυκνωτή ενώ η επίδραση της χωρητικότητας είναι ελάχιστη. Η κυμάτωση από κορυφή σε κορυφή $V_{ripple(p-p)}$ ενός μη ιδανικού πυκνωτή συνδέεται με την ισοδύναμη αντίσταση σειράς R_{esr} με τη σχέση

$$V_{or(p-p)} = R_{esr} \cdot \Delta I_L \quad (4.13)$$

Οι κατασκευαστές δεν δίνουν συχνά τις τιμές της R_{esr} . Ένας πρακτικός τύπος (πρόκειται για μια προσέγγιση και όχι ακριβής τύπος) που έχει βρεθεί υποστηρίζει ότι το γινόμενο $R_{esr} \cdot C$ είναι περίπου σταθερό στην περιοχή $50 \cdot 10^{-6} - 80 \cdot 10^{-6}$. Αν θεωρήσουμε μια ενδιάμεση τιμή του γινόμενου $R_{esr} \cdot C$ ίση με $65 \cdot 10^{-6}$ και αντικαθιστώντας την στην Εξ. (4.13), τότε η τιμή της χωρητικότητας που πυκνωτή σε farad ορίζεται από τη σχέση

$$C = \frac{65 \cdot 10^{-6}}{R_{esr}} \quad (4.14)$$

Η εξίσωση (4.14) είναι αποτελεσματική σε συχνότητες μικρότερες από 500kHz. Σε συχνότητες μεγαλύτερες από 500kHz, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η ισοδύναμη αυτεπαγωγή σειράς R_{esl} του πυκνωτή στον υπολογισμό του μεγέθους της κυμάτωσης. Η τάση εξόδου του μετατροπέα buck όπως θα δούμε σε κάποιο από τα κεφάλαια που ακολουθούν δεν είναι απόλυτα σταθερή. Παρατηρείται μια μεταβολή της τάσης εξόδου γύρω από την μέση τιμή της. Αυτή η μεταβολή της τάσης εξόδου από κορυφή σε κορυφή αναφέρεται σαν τάση κυμάτωσης και είναι μικρότερη, όσο είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου εξόδου σε σχέση με τη διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα.

4.2.3 Πηγή τροφοδοσίας του μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης

Οι εταιρείες ηλεκτρισμού στην Ελλάδα παρέχουν ονομαστική τιμή της φασικής τάσης $V_{ph} = 230V_{rms}$ σε μια συχνότητα $50Hz$. Η τάση αυτή κυμαίνεται από $220V_{rms}$ έως $230V_{rms}$ ανάλογα με την ώρα, τον τύπο και άλλους παράγοντες. Συνεπώς, η πολιτική τάση V_{LL} είναι ίση με 400 , Καθώς $V_{LL} = \sqrt{3}V_{ph}$. Η φασική τάση που αναφέρεται παραπάνω είναι πολύ υψηλή για το τμήμα τροφοδοσίας του μετατροπέα Buck. Προκειμένου να αποτελέσει η τάση γραμμής είσοδο στο μετατροπέα, πρέπει πρώτα να υποβιβαστεί σε μια χαμηλότερη στάθμη με χρήση μετασχηματιστή ισχύος. Αφού υποβιβαστεί η V_{ph} σε μια επιθυμητή στάθμη, το επόμενο βήμα είναι να μετατραπεί σε μία συνεχή τιμή με χρήση γέφυρας ανόρθωσης και ενός φίλτρου. Η στάθμη της τάσης που εφαρμόστηκε στην είσοδο του συγκεκριμένου μετατροπέα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα σχολιαστεί σε κάποιο από τα κεφάλαιο που ακολουθούν.

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (4.15)$$

Το συμπέρασμα που βγαίνει από την Εξ. (4.15) είναι ότι η τάση του δευτερεύοντος του Μ/Σ ισούται με τον ανάστροφο λόγο των τυλιγμάτων επί την τάση πρωτεύοντος.

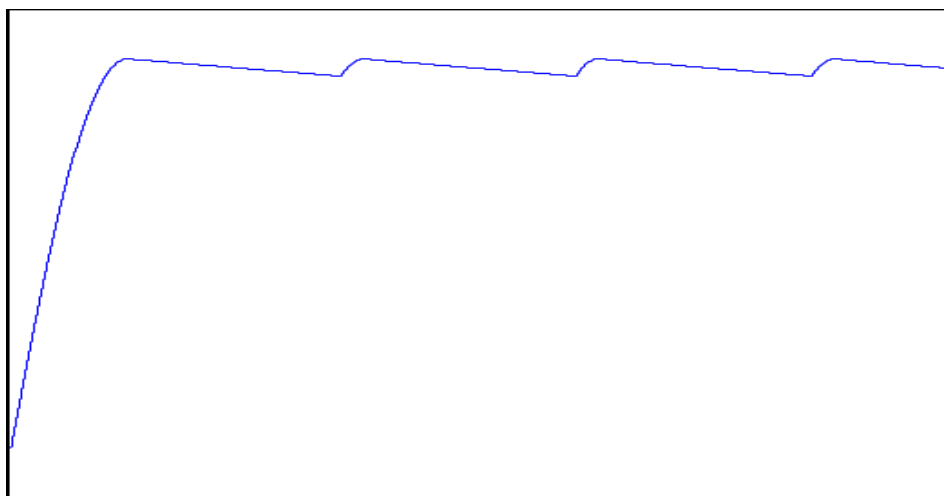
Η μέση τιμή της τάσης εξόδου του ανορθωτή γέφυρας δίνεται από τη σχέση

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{sm} \sin(\omega_s t) d(\omega_s t) = \frac{2V_{sm}}{\pi} \quad (4.16)$$

Το φίλτρο που χρησιμοποιείται συχνά για την εξομάλυνση της τάσης εξόδου του ανορθωτή γέφυρας αποτελείται από ένα πυκνωτή, ο οποίος επείγεται με αναφορά την επιθυμητική στάθμη της κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Στην περίπτωση αυτή, ο τύπος που χρησιμοποιείται για τη κυμάτωση είναι :

$$V_R = \frac{I}{2f_{in} \cdot C} \quad (4.17)$$

Στο Σχ. 4.6 φαίνεται η κυματομορφή της τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετατροπέα μετά τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω



Σχήμα 4.6: Η κυματομορφή της τάσης εισόδου στο μετατροπέα

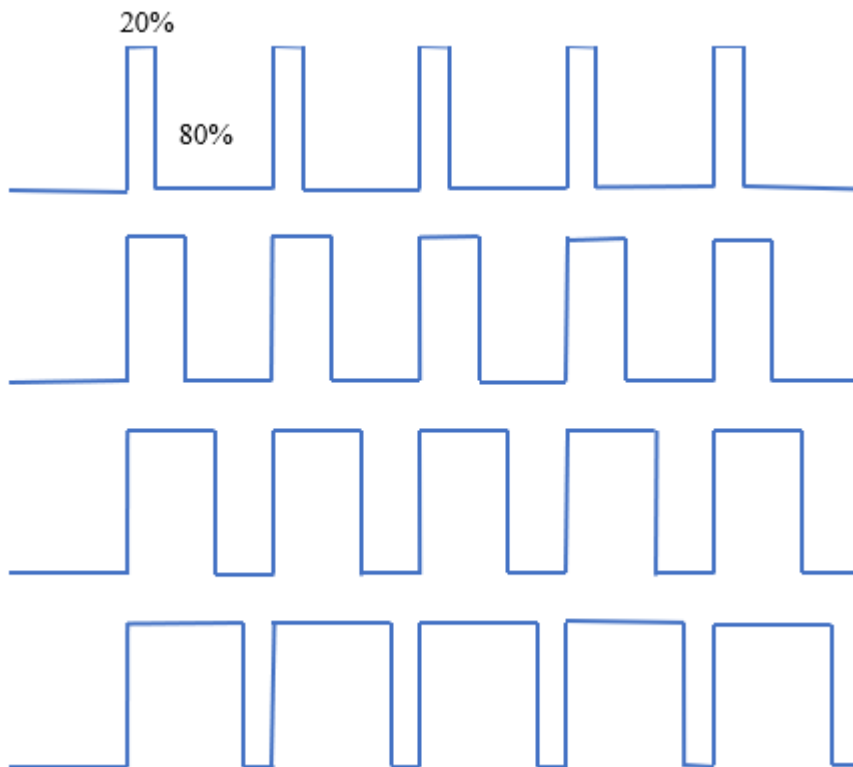
4.3 Έλεγχος της διάταξης

Μια διάταξη τροφοδοσίας όπως αυτή που θα χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση της συστοιχίας μπαταριών μολύβδου, πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει μια χρονοαμετάβλητη τάση εξόδου. Σ' αυτή την εργασία, θα μελετηθεί πρώτα ο έλεγχος της τάσης εξόδου σε ανοιχτό κύκλωμα με την τεχνική PWM και εν συνεχεία σε κλειστό βρόχο με χρήση PI ελεγκτή.

4.3.1 Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)

Με την τεχνική PWM, έχουμε την δυνατότητα να ρυθμίζουμε σε πραγματικό χρόνο την ισχύ που χρειάζεται ένα φορτίο. Με την τεχνική αυτή, διατηρείται η συχνότητα έναυσης και σβέσης του MOSFET και μεταβάλλεται χρονικά ο χρόνος αγωγής του. Για την προσομοίωση της διάταξης τροφοδοσίας σε ανοιχτό βρόχο, ο έλεγχος της τάσης εξόδου πραγματοποιείται με σταθερή διακοπτική και ρύθμιση του κύκλου λειτουργίας. Ο κύκλος λειτουργίας (Duty Cycle) ορίζεται από τη παρακάτω σχέση και εκφράζεται σε επι τοις εκατό

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (4.18)$$

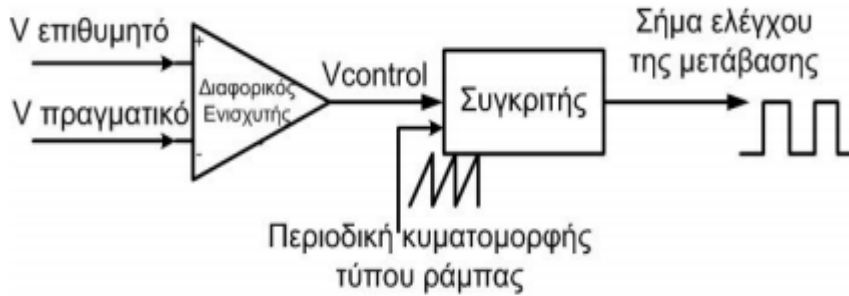


Σχήμα 4.7: Παραδείγματα PWM παλμών με εύρος παλμού 20%, 40%, 60%, 80%

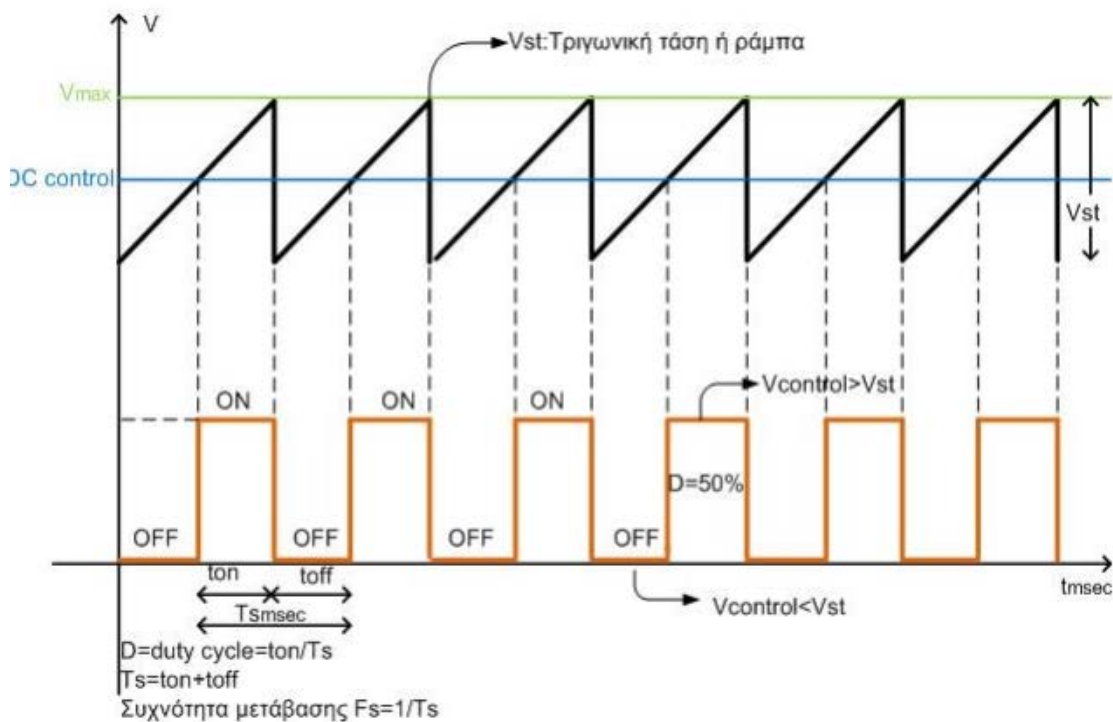
Για να παραχθεί το σήμα PWM, ένας συγκριτής συγκρίνει ένα σήμα μίας πριονωτής ή τριγωνικής κυματομορφής με μία μεταβλητή DC τάση αναφοράς V_{tr} . Η μεταβλητή DC τάση αναφοράς πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης στάθμης της τριγωνικής κυματομορφής. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.9, το σήμα PWM είναι ένα ψηφιακό σήμα το οποίο αποτελείται από λογικά υψηλά και από λογικά χαμηλά.

Όταν η τιμή της τάσης αναφοράς V_{tr} είναι μικρότερη από αυτή του τριγωνικού σήματος, το σήμα ελέγχου V_c στην πόλη του MOSFET θα είναι σε χαμηλή στάθμη και το στοιχείο θα είναι σε κατάσταση

αποκοπής. Αντίθετα, όταν η τιμή της τάσης αναφοράς γίνει μεγαλύτερη από αυτή του τριγωνικού σήματος, το σήμα ελέγχου στην πύλη του MOSFET θα είναι σε χαμηλή στάθμη και το στοιχείο θα είναι σε κατάσταση αγωγής.



Σχήμα 4.8: Λειτουργικό διάγραμμα του διαμορφωτή εύρους παλμών [7]



Σχήμα 4.9: Τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμών. Σήματα συγκριτή, τάση εξόδου [7]

4.3.2 PID ελεγκτές

Πολλές φορές, οι διατάξεις τροφοδοσίας λειτουργούν σε κλειστό βρόχο για να παρέχουν επιθυμητή τάση εξόδου σε πραγματικό χρόνο. Έτσι και στο μετατροπέα buck, ο έλεγχος της τάσης εξόδου βασίζεται στην θεωρία του PID ελεγκτή. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής χρησιμοποιείται ένα τροποποιημένο μοντέλο PID για τον έλεγχο της τάσης εξόδου.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.19)$$

Στην Εξ. (4.19) φαίνεται η έξοδος του PID ελεγκτή. Όπου K_p αντιστοιχεί στον αναλογικό συντελεστή, K_I αντιστοιχεί στο συντελεστή ολοκλήρωσης και K_D στο συντελεστή παραγώγισης.

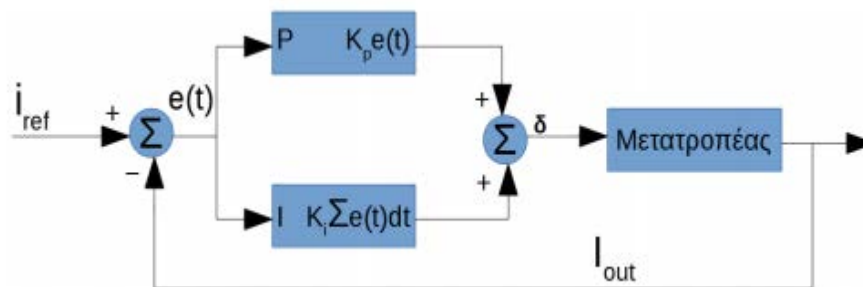
Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται ο ελεγκτής PI για τον έλεγχο της τάσης εξόδου που είναι μια τυποποιημένη μορφή του PID ελεγκτή.

Στο Σχ. 4.10 φαίνεται ένα λειτουργικό διάγραμμα ενός PI ελεγκτή που λειτουργεί σε κλειστό βρόχο. Το σήμα $e(t)$ αντιπροσωπεύει την διαφορά μεταξύ του σήματος αναφοράς και της πραγματικής έξοδος του μετατροπέα Buck. Η διαφορά των δύο σημάτων στέλνεται στο PI ελεγκτή όπου και υπολογίζεται η έξοδος. Αφού υπολογιστεί, το επόμενο και τελικό βήμα είναι να οδηγηθεί αυτή η έξοδος στο διακόπτη του μετατροπέα. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για ρύθμιση των συντελεστών θα σχολιαστεί στη συνέχεια. Η έξοδος του PI ελεγκτή δίνεται από τη σχέση

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (4.20)$$

$$e(t) = I_{ref} - I_{out} \quad (4.21)$$

Η έξοδος του PI ελεγκτή δίνεται από την Εξ. (4.20) ενώ το σφάλμα στη είσοδο του από την εξ. (4.21)



Σχήμα 4.10: Block διάγραμμα ενός PI ελεγκτή σε κλειστό βρόχο [8]

4.4 Επίλογος

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των διακοπτικών τροφοδοτικών με αυτό των γραμμικών τροφοδοτικών είναι ότι οι απώλειες ισχύος είναι εξαιρετικά μικρές και συχνά δεν απαιτείται η χρήση απαγωγέα θερμότητας. Η μετατροπή της τάσης στον μετατροπέα buck επιτελείται από διακόπτες οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλή συχνότητα.

Ο μετατροπέας buck έχει δύο τρόπους λειτουργίας και ταξινομούνται ανάλογα με το ρεύμα που ρέει μέσα από την επαγωγή στη μόνιμη κατάσταση. Όταν το ρεύμα ρέει μέσα από την επαγωγή σ' όλο το χρονικό διάστημα που ο διακόπτης είναι σε κατάσταση αποκοπής, τότε ο διακόπτης λειτουργεί με συνεχή αγωγή του ρεύματος (Continuous conduction mode-CCM). Αν η αντίσταση φορτίου αυξηθεί (δηλαδή αν μειωθεί το ρεύμα) πέρα από ένα όριο, το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγή γίνεται ασυνεχές. Στην περίπτωση αυτή ο μετατροπέας buck λειτουργεί με ασυνεχή αγωγή του ρεύματος. Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος είναι κυκλώματα ισχύος που μετατρέπει μια συνεχή τάση (dc) σε μια άλλη τάση συνεχούς μορφής με διαφορετικό πλάτος ή και πολικότητα. Το κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης αποτελείται από τρία στοιχεία, ένα διακόπτη, μια δίοδο ελεύθερης ροής και ένα βαθυπερατό φίλτρο (LC Filter).

Με την τεχνική PWM (Διαμόρφωση εύρους παλμών), έχουμε την δυνατότητα να ρυθμίζουμε σε πραγματικό χρόνο την ισχύ που χρειάζεται ένα φορτίο. Για να παραχθεί το σήμα PWM, ένας συγκριτής συγκρίνει ένα σήμα μίας πριονωτής ή τριγωνικής κυματομορφής V_{tr} , με μία μεταβλητή DC τάση αναφοράς. Η μεταβλητή DC τάση αναφοράς πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης στάθμης της τριγωνικής κυματομορφής.

Κεφάλαιο 5ο: Προσομοίωση και υλοποίηση της διάταξης φόρτισης

5.1 Εισαγωγή

Έχοντας μελετήσει σε θεωρητικό επίπεδο την διάταξη φόρτισης η οποία αποτελείται από τον μετατροπέα υποβιβασμό της τάσης, στο κεφάλαιο αυτό επιβεβαιώνεται αυτή η θεωρητική ανάλυση καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν. Αρχικά προσομοιώνεται η διάταξη με τα ιδανικά εξαρτήματα και σε συνέχεια με τα πραγματικά. Η πηγή τροφοδοσίας για την πρώτη περίπτωση αποτελείται μια σταθερή τάση ενώ για την δεύτερη περίπτωση από τον ανορθωτή γέφυρας Επιπλέον, υλοποιείται η διάταξη ελέγχου του μετατροπέα σε κλειστό βρόχο. Σε ό,τι αφορά όλες αυτές τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB/Simulink. Το τελικό βήμα του κεφαλαίου θα είναι ο σχεδιασμός της πλακέτας.

5.2 Προδιαγραφές της διάταξης

Πριν προχωρήσουμε στις προσομοιώσεις, θα αναφερθούμε στις προδιαγραφές της διάταξης φόρτισης που θα υλοποιηθεί. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης για συνεχή αγωγή του ρεύματος είναι τα εξής:

- Φασική τάση δίκτυο $V_{ph} = 230 / 50Hz$
- Τάση εισόδου του μετατροπέα $V_{dc} = 65V$
- Συχνότητα λειτουργίας f_s του MOSFET στο μετατροπέα $35kHz$
- Τάση εξόδου του μετατροπέα $V_o = 50V$
- Ρεύμα εξόδου $I_o = 3A$
- Διακύμανση του ρεύματος στην επαγωγή $\Delta I_L = 20\% \cdot I_o$
- Κυμάτωση της τάσης εξόδου περίπου ίση με $80mVp-p$.

Η σχεδίαση του μετατροπέα υποβιβασμού της τάσης (Buck converter) θα γίνει με αναφορά τα παραπάνω χαρακτηριστικά λειτουργίας.

5.3 Σχεδίαση και προσομοίωση ιδανικής διάταξης φόρτισης

Η τάση στην είσοδο του μετατροπέα είναι ίση με $V_{dc} = 65V$ ενώ η επιθυμητή τάση στην έξοδο είναι ίση με $V_o = 50V$. Από την Εξ. (4.2) για την λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος, στην τάση εξόδου $V_o = 50V$, ο κύκλος εργασίας του διακόπτη είναι

$$D = \frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{50}{65} = 0.76 \text{ ή } D = 76\%$$

Το διάστημα αγωγής t_{on} ορίζεται από τη σχέση

$$t_{on} = D \cdot T_s \quad (5.1)$$

Η διακοπτική συχνότητα του ημιαγωγικού στοιχείου είναι ίση με $35kHz$ και η περίοδος είναι ίση με $28.57\mu s$. Σύμφωνα με την Εξ. (5.1) ο διακόπτης είναι σε κατάσταση αγωγής για χρονικό διάστημα ίσο με $t_{on} = D \cdot T_s = 76 \cdot 10^{-2} \cdot 2857 \cdot 10^{-8} = 21.71\mu s$

Το διάστημα αποκοπής t_{off} του διακόπτη ορίζεται από τη σχέση

$$t_{off} = T_s - t_{on} \quad (5.2)$$

Επομένως, το ημιαγωγικό στοιχείο MOSFET είναι σε κατάσταση αποκοπής για χρονικό διάστημα ίσο με $t_{off} = T_s - t_{on} = 2857 \cdot 10^{-8} - 2171 \cdot 10^{-8} = 6.86 \mu s$. Η ελάχιστη τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου που εξασφαλίζει τη συνεχή αγωγή του ρεύματος (Continuous conduction mode) με βάση την διακύμανση του ρεύματος στην επαγωγή ορίζεται από τη σχέση

$$L_{min} = \frac{V_o}{\Delta I_L} (1-D) \cdot T_s \quad (5.3)$$

Η διακύμανση του ρεύματος ΔI_L στην επαγωγή επιλέγεται 20% του ρεύματος εξόδου. Δηλαδή, $\Delta I_L = 20\% \cdot 3 = 0.6 A$. Η ελάχιστη τιμή του πηνίου που εξασφαλίζει τη συνεχή αγωγή του ρεύματος

σύμφωνα με την Εξ. (5.3) είναι $L_{min} = \frac{V_o}{\Delta I_L} (1-D) \cdot T_s = \frac{50}{0.6} \cdot (1-0.76) \cdot 2857 \cdot 10^{-8} = 0.57 mH$.

Επομένως, για τη λειτουργία της τοπολογίας buck με συνεχή αγωγή του ρεύματος πρέπει η τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη L_{min} .

Η κυμάτωση της τάσης εξόδου ορίζεται από τη σχέση

$$V_{ripple(p-p)} = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} T_s \frac{\Delta I_L}{2} \quad (5.4)$$

Η διακύμανση του ρεύματος στην επαγωγή ορίζεται από τη σχέση

$$\Delta I_L = \frac{V_o(1-D)T_s}{L} \quad (5.5)$$

Αντικαθιστώντας τις Εξ. (4.10) και (5.6) στην (5.5) προκύπτει

$$V_{ripple} = \frac{\pi^2}{2} V_o (1-D) \left(\frac{f_c}{f_s} \right) \quad (5.6)$$

Το συμπέρασμα που βγαίνει από την Εξ. (5.6) είναι ότι η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι τόσο μικρότερη, όσο μικρότερη είναι η συχνότητα αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου LC. Στις εφαρμογές όπου οι διαστάσεις των στοιχείων (πυκνωτής και αυτεπαγωγή του πηνίου) έχουν καθοριστικό ρόλο, η συχνότητα αποκοπής πρέπει να είναι σχετικά υψηλή. Έτσι, οι διαστάσεις θα είναι περιορισμένες. Σε κάθε περίπτωση όμως, η f_c πρέπει να είναι μικρότερη από την διακοπτική συχνότητα f_s . Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θέλουμε την κυμάτωση από κορυφή σε κορυφή της τάσης εξόδου του μετατροπέα να είναι $80 mV_{pp}$. Λύνοντας ως προς την συχνότητα αποκοπής προκύπτει η συχνότητα του φίλτρου η οποία εξασφαλίζει την επιθυμητή κυμάτωση της τάσης στην εξόδου του μετατροπέα

$$V_{ripple} = \frac{\pi^2}{2} V_o (1-D) \left(\frac{f_c}{f_s} \right) \Rightarrow \left(\frac{f_c}{35 \cdot 10^3} \right)^2 = \frac{2 \cdot 80 \cdot 10^{-3}}{\pi^2 \cdot 50 \cdot (1-0.76)} \Rightarrow f_c = 1286.46 Hz. \text{ Από τη σχέση}$$

(4.10) προκύπτει ότι η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή που εξασφαλίζει τη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος με βάση την συχνότητα αποκοπής του φίλτρου είναι

$$C_{min} = \frac{1}{L(2\pi f_c)^2} = \frac{1}{0.57 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 1286.46)^2} = 28.85 \mu F. \text{ Επομένως, για την λειτουργία του}$$

μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος πρέπει $C \geq C_{\min}$. Η μέγιστη τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της διόδου και του ημιαγωγικού στοιχείου MOSFET είναι ίση με την μέγιστη τάση εισόδου. Επομένως, η ελάχιστη τάση αντοχής των δύο ημιαγωγικών στοιχείων είναι $V_{dc} = 65V$

Η μέση τιμή του ρεύματος I_{dc} του τρανζίστορ ορίζεται από τη σχέση

$$I_{dc}^{\max} = \frac{D \cdot T_s}{T_s} \cdot I_o \quad (5.7)$$

Το μέσο ρεύμα της διόδου I_D ορίζεται από τη σχέση

$$I_D^{\max} = \frac{(1-D) \cdot T_s}{T_s} \cdot I_o \quad (5.8)$$

Από την Εξ. (5.7) και (5.8) προκύπτει ότι η μέση τιμή του ρεύματος I_{dc} είναι

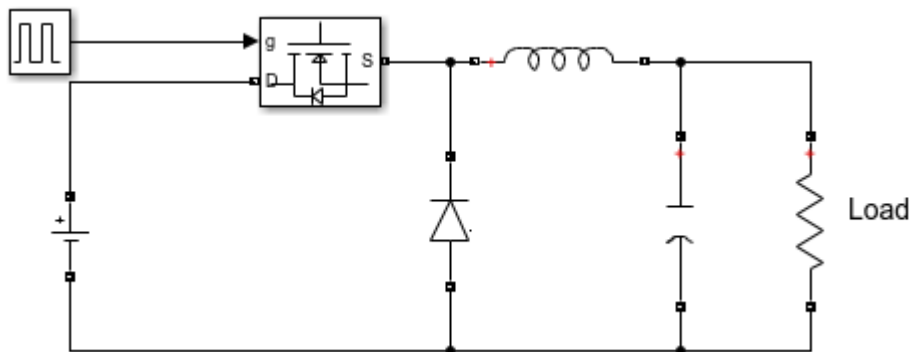
$$I_{dc}^{\max} = \frac{D \cdot T_s}{T_s} \cdot I_o = \frac{0.76 \cdot 28.57 \cdot 10^{-6}}{28.57 \cdot 10^{-6}} \cdot 3 = 2.28 \text{ A για το τρανζίστορ}$$

και

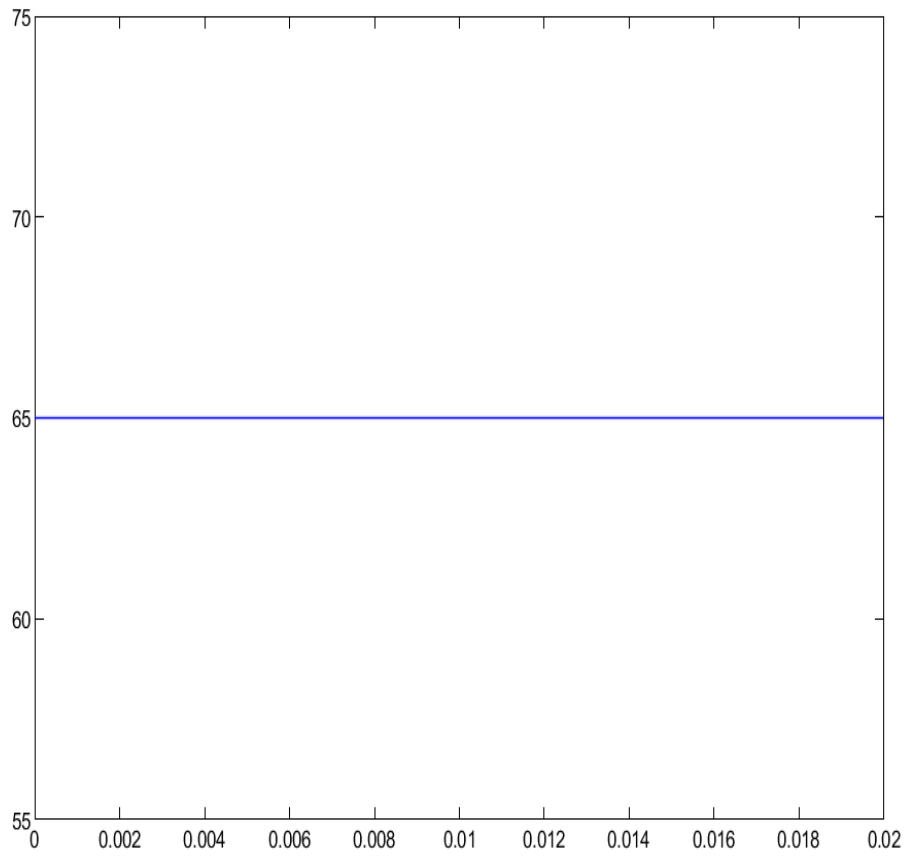
$$I_D^{\max} = \frac{(1-D) \cdot T_s}{T_s} \cdot I_o = \frac{(1-0.76) \cdot 28.57 \cdot 10^{-6}}{28.57 \cdot 10^{-6}} \cdot 3 = 0.72 \text{ A για τη δίοδο}$$

Αφού έχουν βρεθεί οι τιμές των στοιχείων του φίλτρου, δηλαδή η τιμή της αυτεπαγωγής του πηνίου και η τιμή του πυκνωτή και έχουν οριστεί η μέγιστη τιμή των τάσεων και η μέση τιμή των ρευμάτων στη δίοδο και στο τρανζίστορ, το επόμενο βήμα είναι η προσομοίωση του μετατροπέα. Όπως έχει καταστεί σαφές στην [5.1], προσομοιώνεται πρώτα με τα ιδανικά εξαρτήματα και στην συνέχεια με τα πραγματικά. Για την πηγή τροφοδοσίας, έχει γίνει η θεώρηση ότι η τάση στην είσοδο είναι σταθερή επειδή σκοπός είναι η επιβεβαίωση των βασικών αρχών λειτουργίας του μετατροπέα.

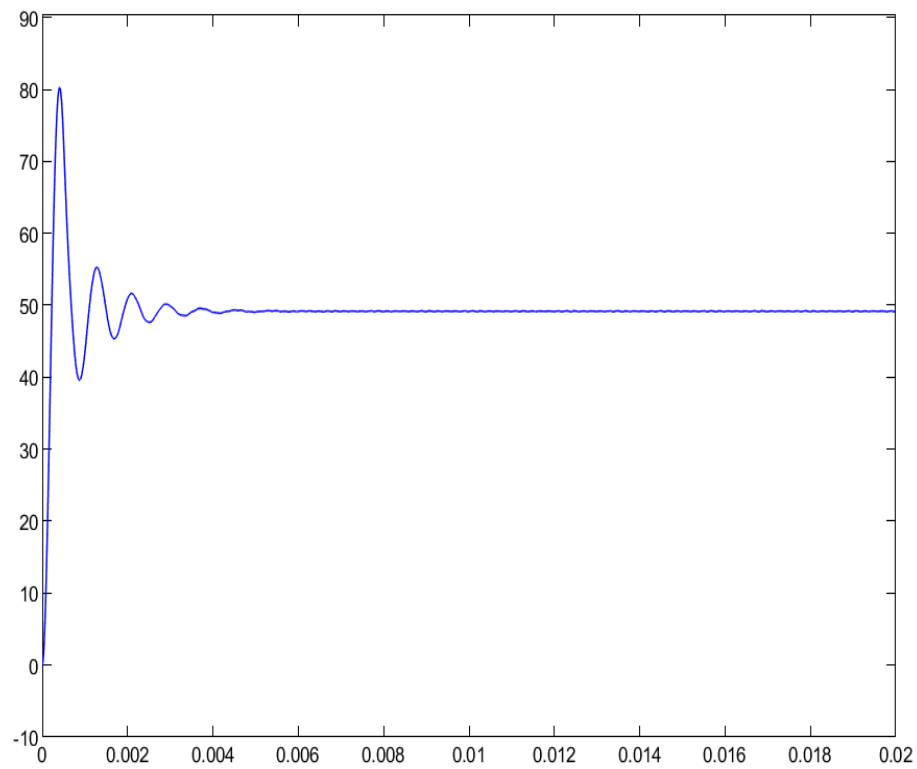
Πιο συγκεκριμένα, η πηγή τάσης στην είσοδο του μετατροπέα buck θεωρείται ιδανική με σταθερή τιμή ίση με $V_{dc} = 65V$. Η σταθερή συχνότητα λειτουργίας του διακόπτη είναι ίση με $35kHz$. Η τιμή αυτεπαγωγής του πηνίου είναι ίση με $0.57mH$ και ο πυκνωτής έχει την τιμή $28.85\mu F$. Τέλος, στην εξόδο έχει τοποθετηθεί μια ωμική αντίσταση που εξασφαλίζει την λειτουργία με συνεχή αγωγή του ρεύματος (Continuous conduction mode).



Σχήμα 5.1: Ιδανικός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος υποβιβασμού της τάσης με σταθερή τάση εισόδου προς προσομοίωση μέσω του λογισμικού Simulink του Matlab

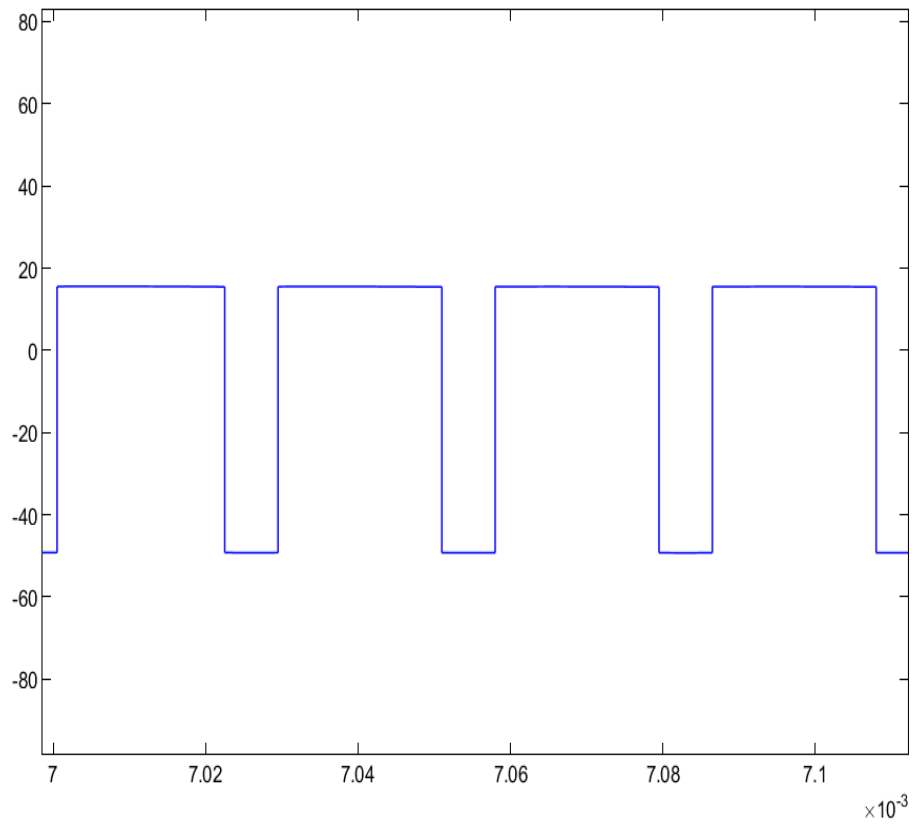


Σχήμα 5.2: Κυματομορφή της τάσης εισόδου στο μετατροπέα

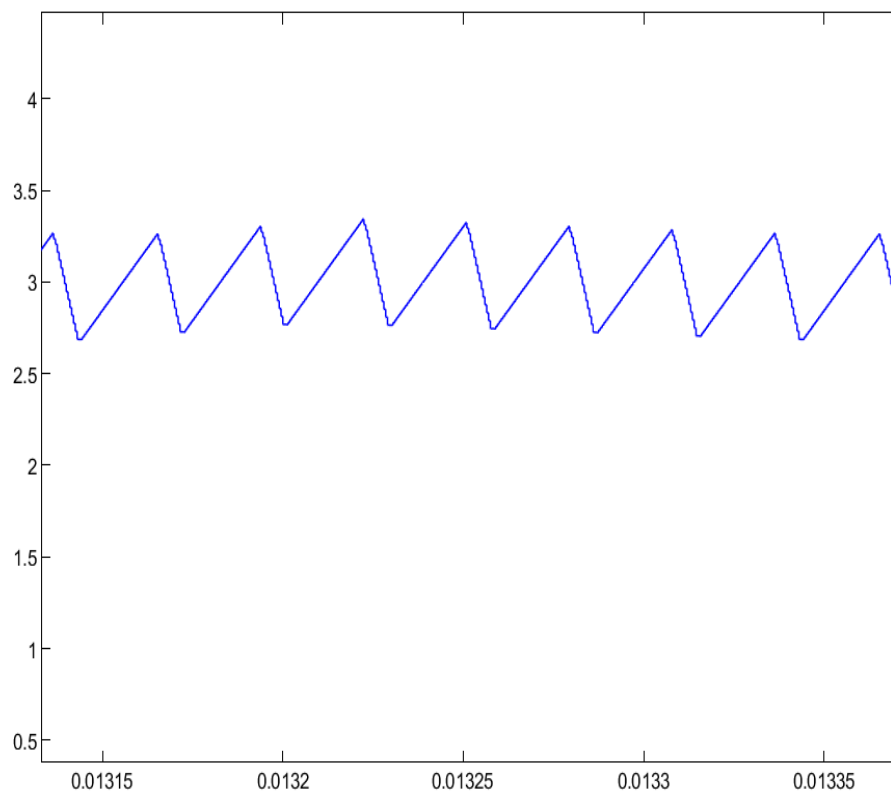


Σχήμα 5.3: Κυματομορφή της τάσης εξόδου

Ο κύκλος λειτουργίας για την τάση εξόδου είναι 76% όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς

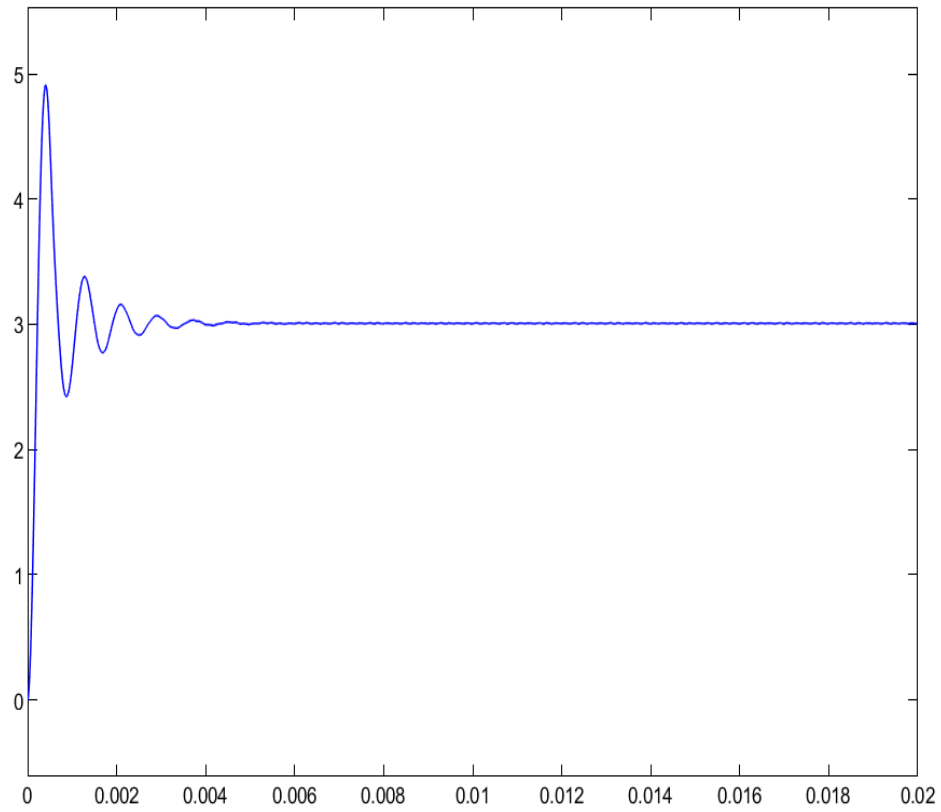


Σχήμα 5.4: Κυματομορφή της τάσης πηνίου

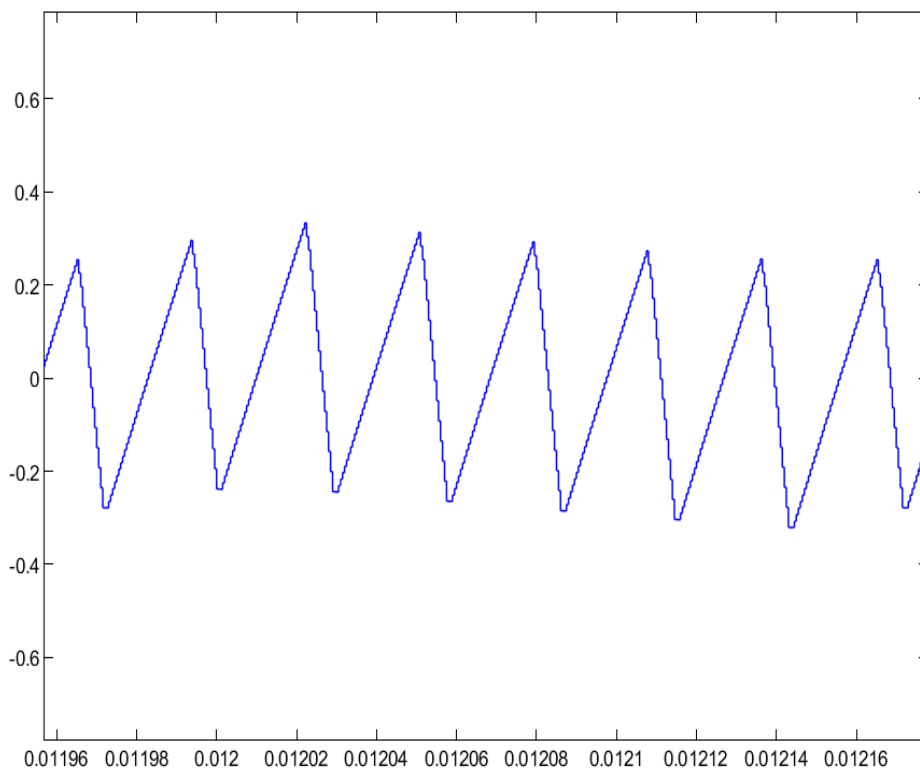


Σχήμα 5.5: Κυματομορφή του ρεύματος πηνίου

Επιλέχθηκε ένα ωμικό φορτίο έτσι ώστε το μέγιστο ρεύμα εξόδου να είναι ίσο με 3 A για CCM



Σχήμα 5.6: Κυματομορφή του ρεύματος εξόδου



Σχήμα 5.7: Κυματομορφή του ρεύματος που διαρρέει τον πυκνωτή

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπό ιδανικές συνθήκες είναι πολύ ικανοποιητικά καθώς διαπιστώθηκε η ορθότητα των υπολογισμών που προηγήθηκαν. Και επιπλέον, επιβεβαιώνουν την θεωρητική ανάλυση του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος που έγινε στο κεφάλαιο 5.

5.4 Σχεδίαση και προσομοίωση πραγματικής διάταξης φόρτισης - Επιλογή στοιχείων για κατασκευή

Στην πράξη, τα στοιχεία του κυκλώματος δεν είναι ιδανικά. Δηλαδή, παρουσιάζουν ωμικές αντιστάσεις και η λειτουργία τους περιορίζεται από πολλούς παράγοντες όπως το ρεύμα και τάση αντοχής. Έτσι, με σκοπό την παρατήρηση της συμπεριφοράς της διάταξης υπό μη ιδανικές συνθήκες, η προσομοίωση θα γίνει με τα μη ιδανικά εξαρτήματα. Με αναφορά τους υπολογισμούς του [5.3], θα επιλεχθούν τα υλικά. Επιπλέον, η τάση εισόδου στο μετατροπέα δεν αποτελείται από μία σταθερή πηγή όπως στη προηγούμενη περίπτωση αλλά από ανορθωτή γέφυρας.

Πριν προχωρήσουμε στην επιλογή των πραγμάτων εξαρτημάτων, αν και δεν υπάρχει κάποια τυποποιημένη διαδικασία επιλογής των εξαρτημάτων, θα αναφερθώ σε κάποιους κανόνες που θα ακολουθήσω κατά τη διαδικασία επιλογής των στοιχείων της διάταξης.

- Θα επιλεχθούν τα ημιαγωγικά στοιχεία με τάση αντοχής (τάση διάσπασης) περίπου διπλάσια από τη μέγιστη τάση κυκλώματος
- Θα επιλεχθούν τα στοιχεία με ρεύμα αντοχής (ρεύμα αγωγής) τουλάχιστον 50% μεγαλύτερο, από το μέγιστο ρεύμα της διάταξης
- Όσον αφορά τα ενεργά στοιχεία του κυκλώματος, (MOSFET, ανορθωτής γέφυρας και δίοδος ελεύθερης ροής), θα επιλεχθούν αυτά με σχετικά μικρότερη τάση αγωγής.
- Οι χρόνοι μετάβασης του MOSFET θα είναι μικρότεροι από το 1% της διακοπτικής συχνότητα

5.4.1 Πηγή τροφοδοσίας της διάταξης

5.4.1.1 Επιλογή του μετασχηματιστή

Με δεδομένη την τάση αγωγής κάθε διόδου $V_F = 1.2V$ του ανορθωτή, η ισχύς στο δευτερεύον του μετασχηματιστή υπολογίζεται από τη σχέση

$$P_2 = 2V_F \cdot I_{o(max)} + V_{dc} \cdot I_{o(max)} \quad (5.9)$$

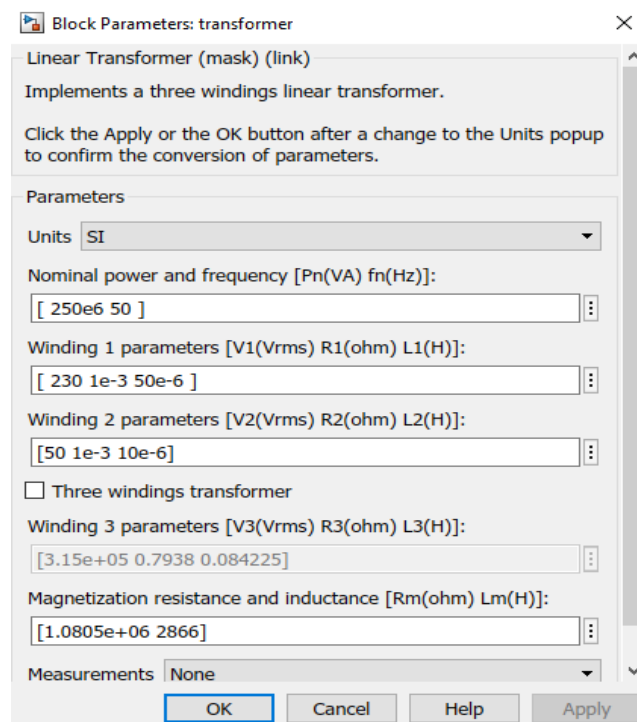
Επομένως, από τη Εξ. (5.9) η ισχύς στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή για το ρεύμα εξόδου $I_0 = 3A$ και για τη μέση τιμή της τάσης εισόδου στο μετατροπέα $V_{dc} = 65V$ είναι ίση με $P_2 = 2V_F \cdot I_{o(max)} + V_{dc} \cdot I_{o(max)} = 2 \cdot 1.2 \cdot 3 + 65 \cdot 3 = 202.2W$. Η κυμάτωση της τάσης εισόδου του μετατροπέα επιλέγεται 5% της μέσης τιμής της $V_{dc} = 65V$. Άρα, η μέγιστη τιμή της τάσης εισόδου στο μετατροπέα είναι ίση με $V_{dc(max)} = V_{dc(mean)} + V_{ripple(p-p)} = 65 + 3.25 = 68.25$. Η ενεργός τιμή της τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή V_2 , η οποία εξασφαλίζει την μέση τιμή $V_{dc(max)} = 68.25$ ορίζεται από τη σχέση (5.10)

$$V_2 = \frac{V_{dc(max)} + 2 \cdot V_F}{\sqrt{2}} \quad (5.10)$$

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} \quad (5.11)$$

Από την Εξ. (5.10), η V_2 είναι ίση με. Το μέγιστο ρεύμα στο δεύτερο τύλιγμα του μετασχηματιστή $I_{2(max)}$ υπολογίζεται από την σχέση (5.11) και είναι ίσο με

$I_2 = \frac{P_2}{V_2} = \frac{202.2}{68.25} = 2.96A$. Επομένως, επιλέγεται ένας μετασχηματιστής ισχύος με τάση $50V_{rms}$ και ρεύμα $2.96A$.



Σχήμα 5.8: Παράμετροι βοηθητικού μετασχηματιστή

5.4.1.2 Επιλογή Ανορθωτή γέφυρας


Κάθε δίοδος του ανορθωτή διαρρέεται από ρεύμα με μέση τιμή $I_{o(max)} / 2 = 3 / 2 = 1.5A$. Η μέγιστη ανάστροφη τάση στις διόδους είναι ίση με $V_{dc(max)} = V_{dc(mean)} + V_{ripple(p-p)} = 65 + 3.25 = 68.25$. Επομένως, με τους κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας που αναφέρονται στο [5.4], απαιτείται μια γέφυρα ανόρθωσης που να αντέχει τουλάχιστον $2 \times 68.25 = 136.5V$ και $1.5 \times 1.5 = 3A$. Και έτσι επιλέγεται το SCAJ15FF με αντοχή $150V / 5A$.

Specifications		
Product Attribute	Attribute Value	Search Similar
Manufacturer:	Semtech	<input type="checkbox"/>
Product Category:	Bridge Rectifiers	<input checked="" type="checkbox"/>
RoHS:	N	
Type:	Single Phase Bridge	<input type="checkbox"/>
Mounting Style:	SMD/SMT	<input type="checkbox"/>
Termination Style:	SMD/SMT	<input type="checkbox"/>
If - Forward Current:	5 A	<input type="checkbox"/>
Peak Reverse Voltage:	150 V	<input type="checkbox"/>
Vf - Forward Voltage:	1.2 V	<input type="checkbox"/>

Σχήμα 5.9: Ανορθωτής γέφυρας SCAJ15FF [9]

5.4.1.3 Επιλογή πυκνωτή εισόδου

Από την Εξ. (4.17), υπολογίζεται η χωρητικότητα του ηλεκτρολυτικού πυκνωτή εξομάλυνσης και είναι ίση με $C = \frac{I_o}{2 \cdot f_{in} \cdot V_{ripple(p-p)}} \frac{3}{100 \cdot 3.25} = 9mF$. Η τάση αντοχής του πυκνωτή, πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την $V_{dc(max)}$. Και έτσι, επιλέγεται ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 10000μF και 100V (αφού η μέγιστη τάση εισόδου 68.25V).


Specifications		
Product Attribute	Attribute Value	Search Similar
Manufacturer:	United Chemi-Con (UCC)	<input type="checkbox"/>
Product Category:	Aluminium Electrolytic Capacitors - Snap In	<input checked="" type="checkbox"/>
RoHS:	 Details	
Product:	Aluminum Electrolytic Capacitors	<input type="checkbox"/>
Termination Style:	Snap In	<input type="checkbox"/>
Capacitance:	10000 uF	<input type="checkbox"/>
Voltage Rating DC:	100 VDC	<input type="checkbox"/>
Tolerance:	20 %	<input type="checkbox"/>
ESR:	25 mOhms	<input type="checkbox"/>

Σχήμα 5.10: Πυκνωτής EKMH101VRT103MB80T[9]

5.4.2 Κύκλωμα ισχύος

5.4.2.1 Επιλογή MOSFET


Η μέγιστη τάση που δέχεται ο διακόπτης είναι 68.25V και το ρεύμα που το διαρρέει 3 A. Με τους κατάλληλους συντελεστές ασφάλειας που αναφέρονται στο [5.4], απαιτείται MOSFET που να αντέχει τουλάχιστον $2 \times 68.25 = 136.5V$ και $1.5 \times 1.5 = 3A$. Και έτσι επιλέγεται το IRF6643TRPBF με αντοχή 150V / 6.2A.

Specifications		
Product Attribute	Attribute Value	Search Similar
Manufacturer:	Infineon	<input type="checkbox"/>
Product Category:	MOSFET	<input checked="" type="checkbox"/>
RoHS:	 Details	
Technology:	Si	<input type="checkbox"/>
Mounting Style:	SMD/SMT	<input type="checkbox"/>
Package/Case:	DirectFET-MZ	<input type="checkbox"/>
Transistor Polarity:	N-Channel	<input type="checkbox"/>
Number of Channels:	1 Channel	<input type="checkbox"/>
Vds - Drain-Source Breakdown Voltage:	150 V	<input type="checkbox"/>
Id - Continuous Drain Current:	6.2 A	<input type="checkbox"/>

Σχήμα 5.11: MOSFET IRF6643TRPBF[9]

5.4.2.2 Επιλογή πηνίου


Από την ανάλυση που προηγήθηκε στο [5.3], η ελάχιστη τιμή του πηνίου που εξασφαλίζει τη συνεχή αγωγή του ρεύματος σύμφωνα είναι $L_{\min} = \frac{V_o}{\Delta I_L} (1-D) \cdot T_s = \frac{50}{0.6} \cdot (1-0.76) \cdot 2857 \cdot 10^{-8} = 0.57 \text{mH}$ έτσι, επιλέγεται η τιμή 750μH με μέγιστο ρεύμα 5.5 A

Specifications		
Product Attribute	Attribute Value	Search Similar
Manufacturer:	Bourns	<input type="checkbox"/>
Product Category:	Common Mode Chokes / Filters	<input checked="" type="checkbox"/>
RoHS:	 Details	
Series:	PM3700	<input type="checkbox"/>
Termination Style:	SMD/SMT	<input type="checkbox"/>
Inductance:	750 uH	<input type="checkbox"/>
Maximum DC Current:	5.5 A	<input type="checkbox"/>
Maximum DC Resistance:	12 mOhms	<input type="checkbox"/>

Σχήμα 5.12: Πηνίο PM3700-30-RC[9]

5.4.2.3 Επιλογή διόδου


Η μέγιστη τάση που δέχεται η διόδος είναι 68.25V και το ρεύμα που το διαρρέει 0.72A. Με τους κατάλληλους συντελεστές ασφάλειας που αναφέρονται στο [5.4], απαιτείται διόδος που να αντέχει τουλάχιστον $2 \times 68.25 = 136.5V$ και $1.5 \times 0.72 = 1.08A$. Και έτσι επιλέγεται το 1N5405 με αντοχή 500V / 3A.

Specifications		
Product Attribute	Attribute Value	Search Similar
Manufacturer:	ON Semiconductor	<input type="checkbox"/>
Product Category:	Rectifiers	<input checked="" type="checkbox"/>
RoHS:	 Details	
Mounting Style:	Through Hole	<input type="checkbox"/>
Package/Case:	DO-201AD	<input type="checkbox"/>
Vr - Reverse Voltage:	500 V	<input type="checkbox"/>
If - Forward Current:	3 A	<input type="checkbox"/>
Type:	Standard Recovery Rectifiers	<input type="checkbox"/>
Configuration:	Single	<input type="checkbox"/>
Vf - Forward Voltage:	1.2 V	<input type="checkbox"/>

Σχήμα 5.13: Δίοδος 1N5405 [9]

5.4.2.4 Επιλογή πυκνωτή εξόδου

Από την ανάλυση που προηγήθηκε στο [5.3], η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή που εξασφαλίζει τη λειτουργία του μετατροπέα με συνεχή αγωγή του ρεύματος με βάση την συχνότητα αποκοπής του φίλτρου είναι $C_{\min} = \frac{1}{L(2\pi f_c)^2} = \frac{1}{0.57 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 1286.46)^2} = 28.85 \mu F$. Η τάση αντοχής του πυκνωτή, πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την $V_{dc(max)}$. Και έτσι, επιλέγεται ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής 33μF και 150V (αφού η μέγιστη τάση εξόδου 68.25V).

Specifications		
Product Attribute	Attribute Value	Search Similar
Manufacturer:	Panasonic	<input type="checkbox"/>
Product Category:	Aluminium Electrolytic Capacitors - SMD	<input checked="" type="checkbox"/>
RoHS:	 Details	
Packaging:	Cut Tape	<input type="checkbox"/>
Packaging:	MouseReel	<input type="checkbox"/>
Packaging:	Reel	<input type="checkbox"/>
Series:	EB	<input type="checkbox"/>
Product:	Aluminum Electrolytic Capacitors	<input type="checkbox"/>
Capacitance:	33 uF	<input type="checkbox"/>
Voltage Rating DC:	160 VDC	<input type="checkbox"/>

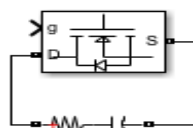
Σχήμα 5.14: Πυκνωτής εξόδου EEV-EB2C330SQ [9]

5.4.2.5 Επιλογή snubber

Οι υπερτάσεις στα άκρα του διακόπτη κατά την μεταβατική περίοδο της σβέσης περιορίζονται από τα snubber υπέρτασης. Ως snubber ονομάζονται τα κυκλώματα που περιορίζουν τις καταπονήσεις που δέχονται τα ημιαγωγικά στοιχεία κατά τη μετάβαση από κατάσταση αγωγής σε κατάσταση αποκοπής. Τα κυκλώματα snubber διακρίνονται σε:

- Μη πολωμένα RC snubber σειράς
- Πολωμένα RC snubber
- Πολωμένα RL snubber
- Snubber υπέρταση για τρανζίστορ.

Σημειώνεται ότι η υπέρταση και οι ταλαντώσεις της τάσης εξόδου στο ημιαγωγικό στοιχείο του κυκλώματος μας προκαλούνται από τη παράσιτη επαγωγή. Το snubber επιλέχθηκε κατά κύριο λόγο πειραματικά να είναι RC (10KΩ, 1nF) και θα συνδέεται παράλληλα με το MOSFET όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.15: Κύκλωμα προστασίας του MOSFET

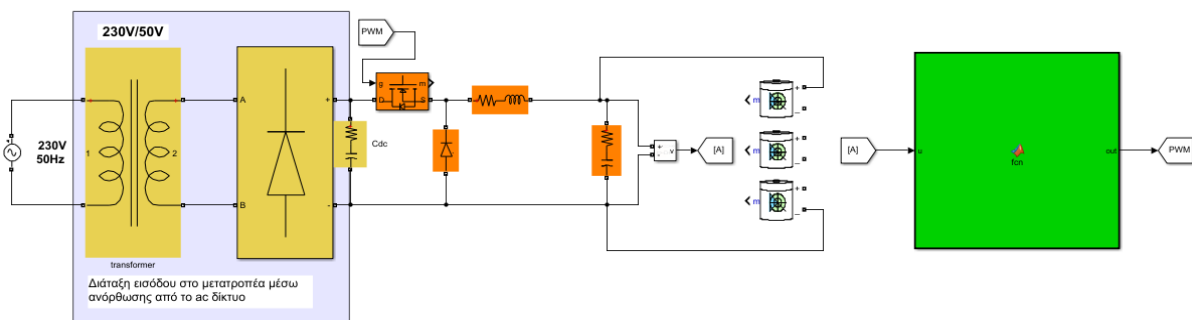
5.5 Παραγωγή των παλμών ελέγχου από το βοηθητικό μικροεπεξεργαστή της Simulink

Στη σταθεροποίηση της τάσης εξόδου σε μεταβολές της τάσης εισόδου και του φορτίου, τα τροφοδοτικά λειτουργούν σε κλειστό βρόχο. Και στην περίπτωση μας, η διάταξη φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών μολύβδου λειτουργεί σε κλειστό βρόχο. Η λειτουργία σε κλειστό βρόχο επιβάλλει τη χρήση ενός ελεγκτή αντιστάθμισης και την εύρεση των συντελεστών του. Χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία ο ελεγκτής PI που στην ουσία είναι μια τροποποιημένη μορφή του PID. Όσον αφορά την εύρεση των συντελεστών του ελεγκτή, οφείλω να πω ότι είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Αρκετοί ερευνητές όπως ο Ziegler-Nichols έχουν αναπτύξει θεωρίες πάνω στην επιλογή των συντελεστών. Ωστόσο, οι θεωρίες αυτές, δεν αποτελούν πάντα τη βέλτιστη λύση, παρά μια ικανοποιητική προσέγγιση. Στα πλαίσια της εργασίας αυτή, βρήκα κατάλληλους συντελεστές του ελεγκτή PI μέσω επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων.

	Rise time	Maximum overshoot	Settling time	Steady-state error
P	Decrease	Increase	Small change	Decrease
I	Decrease	Increase	Increase	Eliminate
D	Small change	Decrease	Decrease	Small change

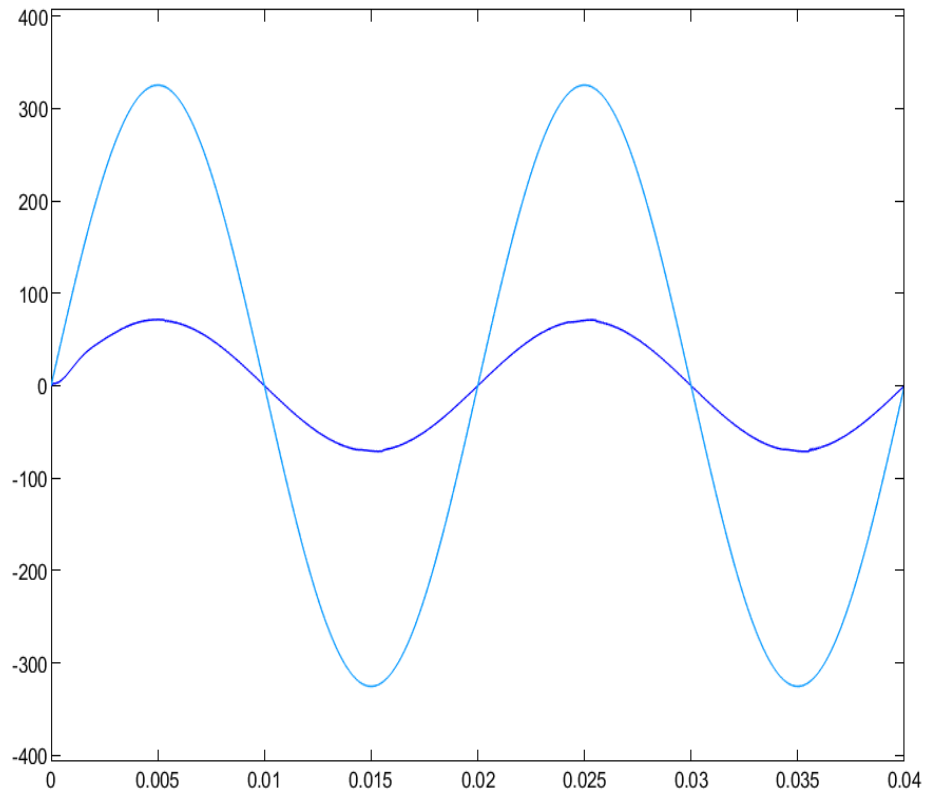
Σχήμα 5.16: Επιδράσεις των μεταβολών των κερδών ενός ελεγκτή PID [5]

Οι παλμοί PWM οδήγησης του MOSFET παράγονται από το βοηθητικό μικροεπεξεργαστή (MATLAB function) που προσφέρει το λογισμικό Simulink του MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, η τάση εξόδου συγκρίνεται με την επιθυμητή στάθμη της τάσης, (50V στην περίπτωση μας). Το σφάλμα (διαφορά μεταξύ των 50V και της πραγματικής εξόδου) επεξεργάζεται από τον ελεγκτή PI. Ο ελεγκτής παράγει το σήμα ελέγχου, το οποίο συγκρίνεται με ένα τριγωνικό σήμα με πλάτος 10V και συχνότητα 35kHz. Από την σύγκριση των δύο σημάτων, παράγονται οι παλμοί οδήγησης. Η διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα καθορίζεται από τη συχνότητα του τριγωνικού σήματος. Σημειώνεται ότι όλη αυτή η διαδικασία υλοποιήθηκε με κώδικα από το βοηθητικό μικροεπεξεργαστή της Simulink.

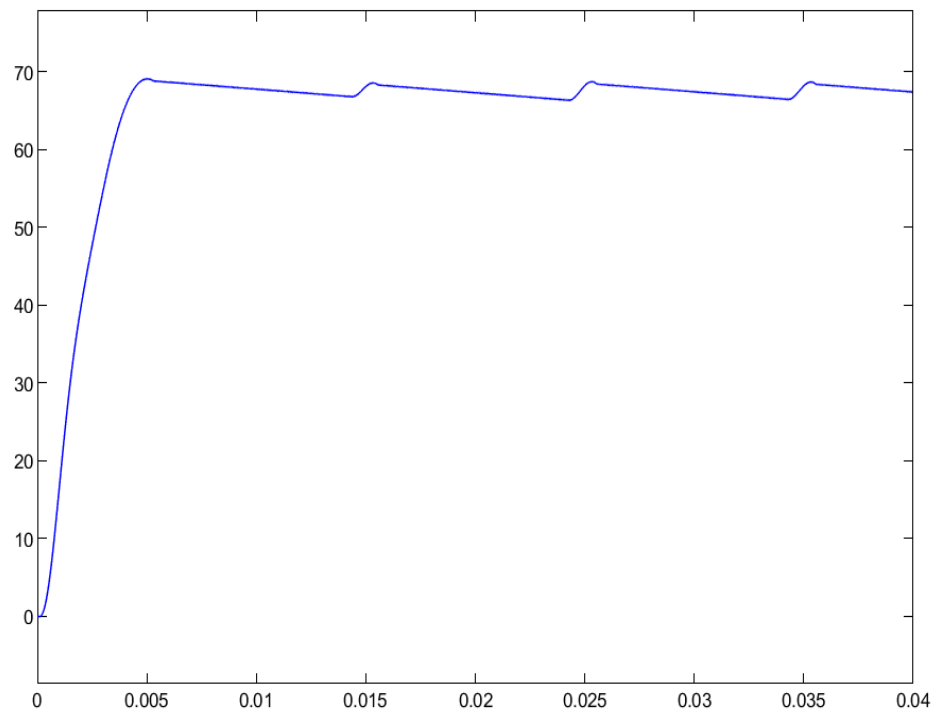


Σχήμα 5.17: Μοντέλο προσομοίωσης διάταξης φόρτισης με παρασιτικές αντιστάσεις υλικών όπως δίνονται από τους κατασκευαστές και ο έλεγχος της τάσης εξόδου σε κλειστό βρόχο.

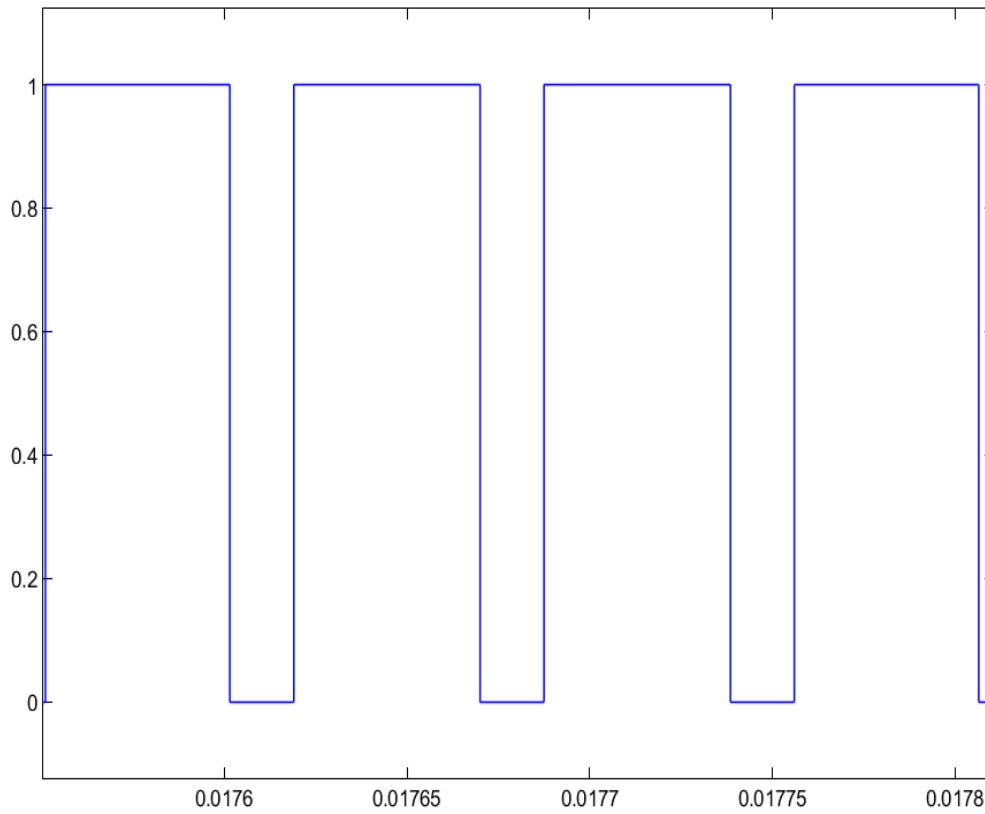
5.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης της διάταξης τροφοδοσίας μέσω του λογισμικού Simulink του Matlab



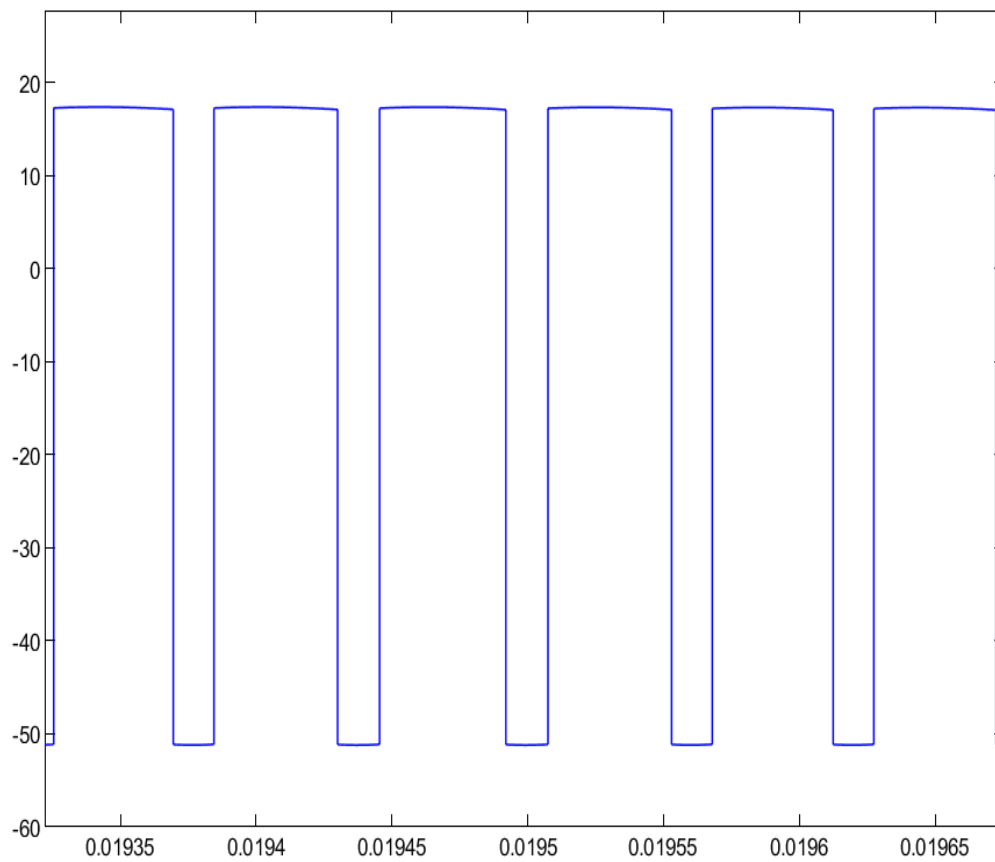
Σχήμα 5.18: Κυματομορφές των τάσεων στο πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή υποβιβασμού της τάσης.



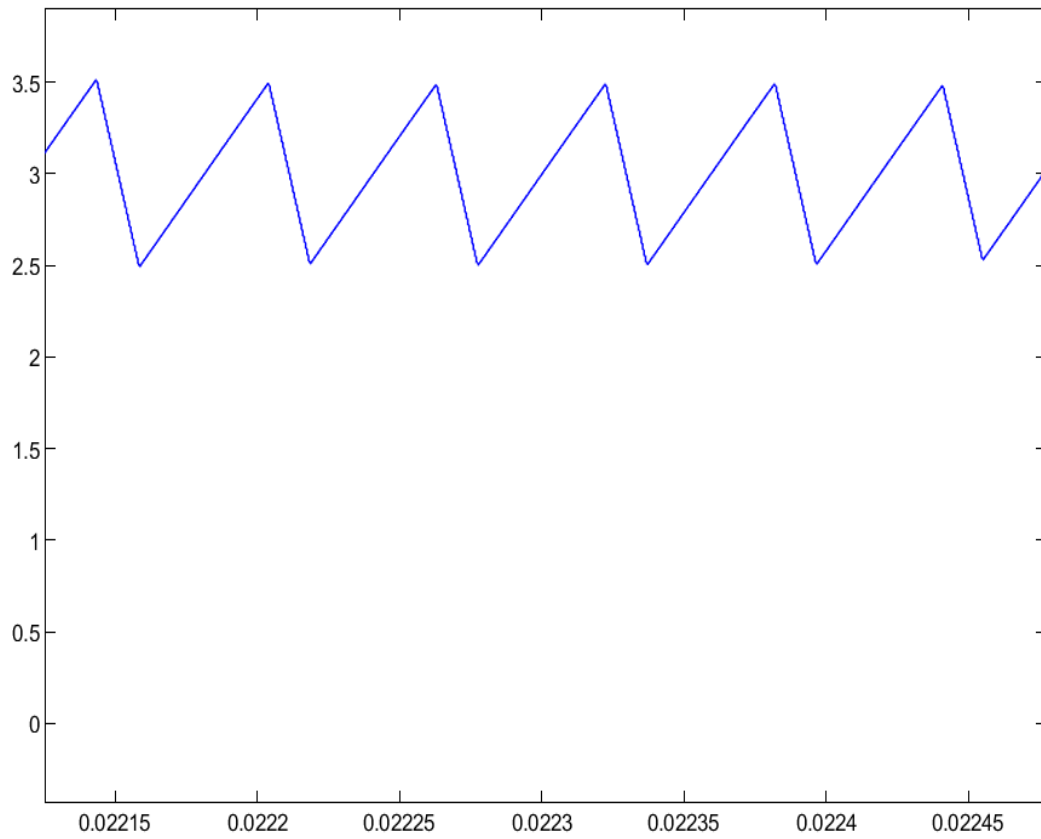
Σχήμα 5.19: Κυματομορφή της τάσης εισόδου στο μετατροπέα από την γέφυρα ανόρθωσης



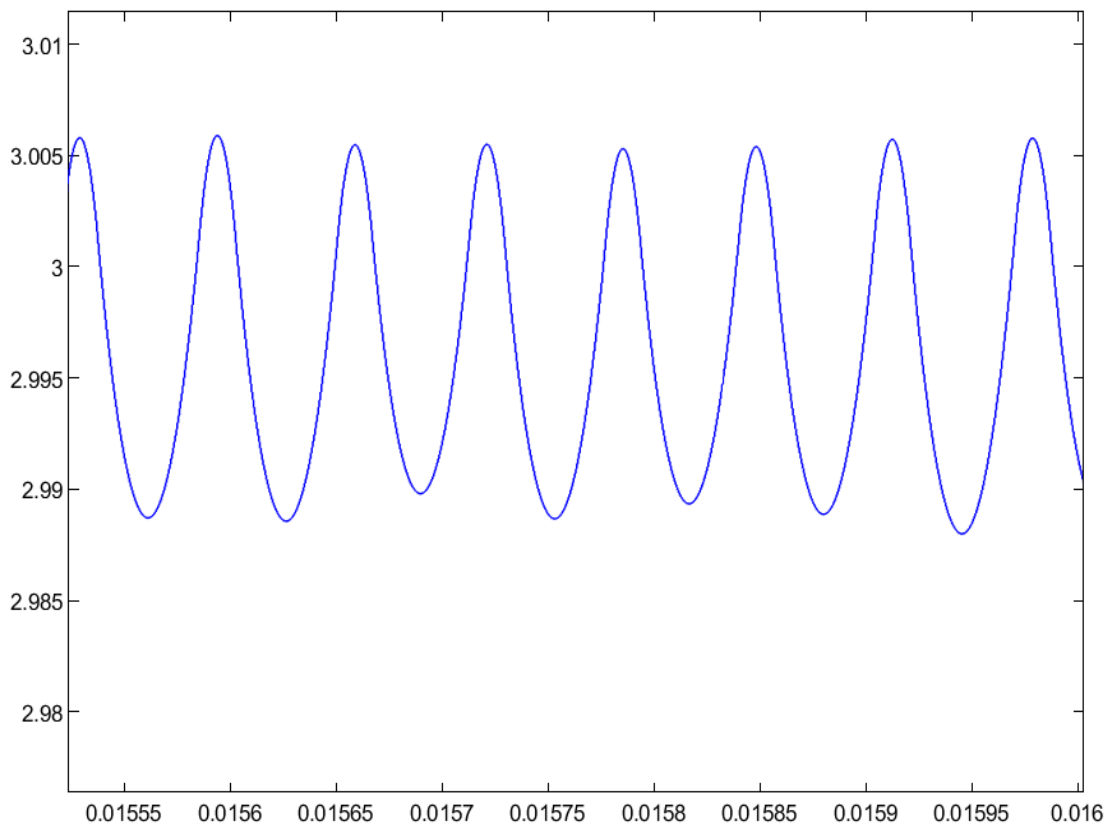
Σχήμα 5.20: Παλμοί οδήγησης του MOSFET από βοηθητικό μικροεπεξεργαστή της Simulink



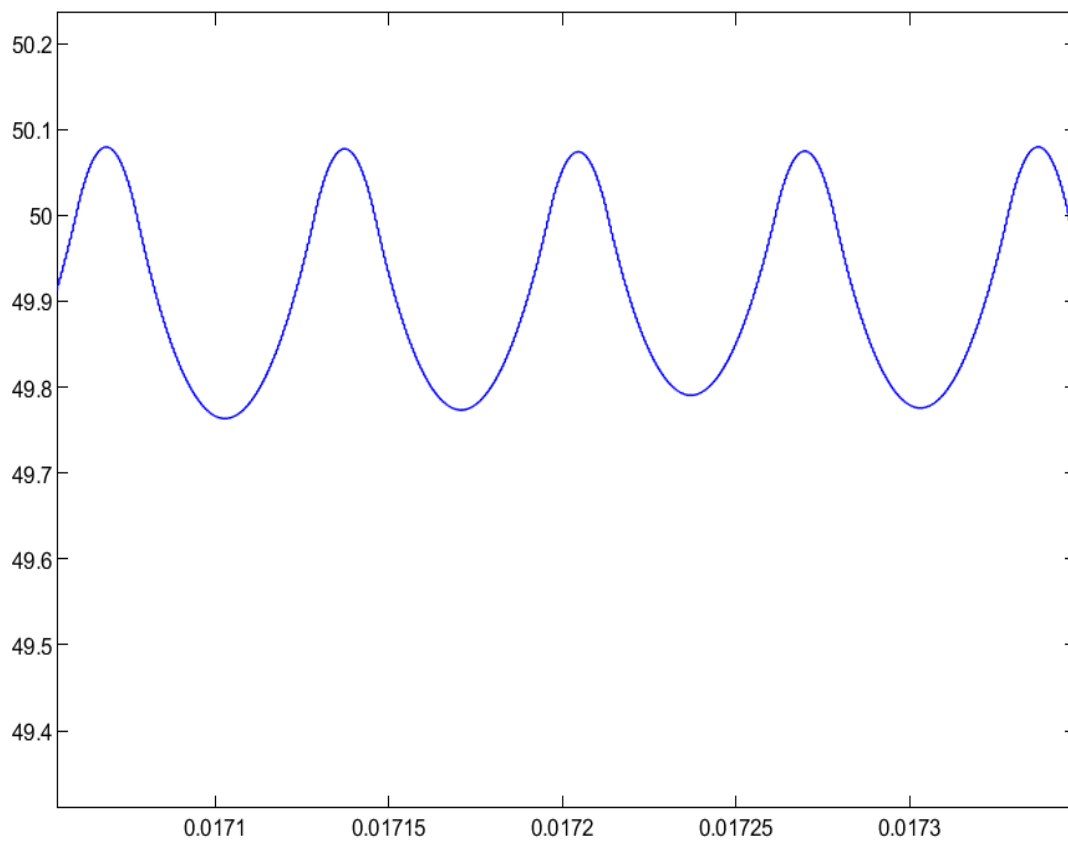
Σχήμα 5.21: Κυματομορφή της τάσης στο πηνίο σε κατάσταση ισορροπίας



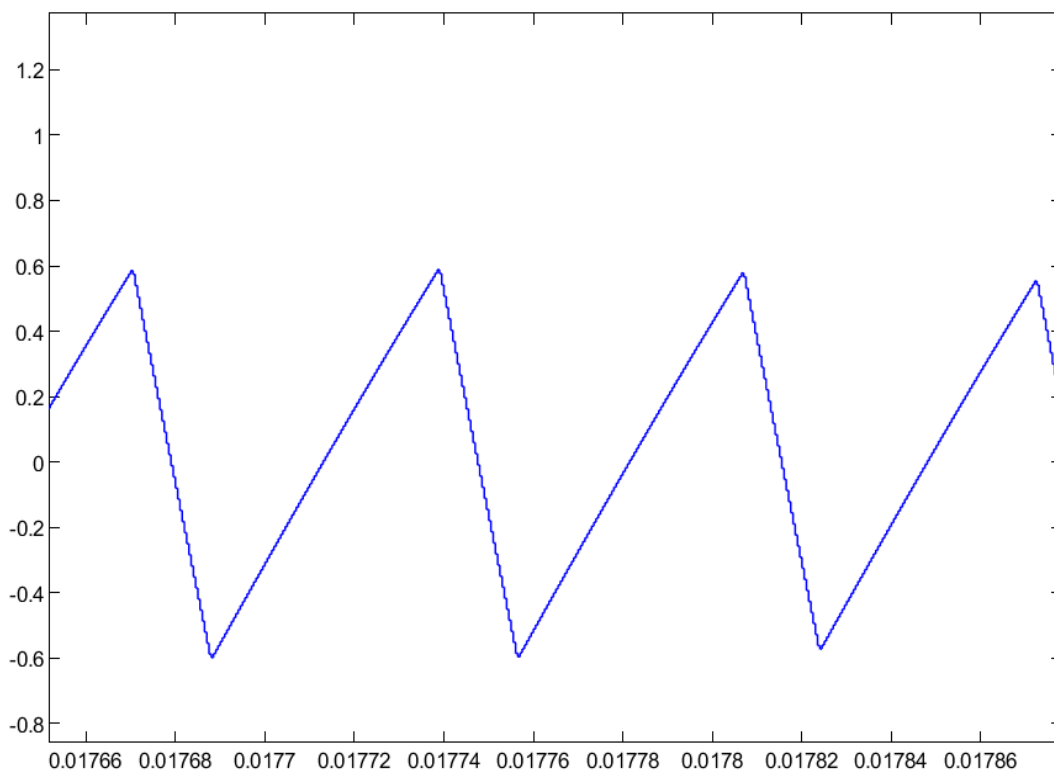
Σχήμα 5.22: Κυματομορφή του ρεύματος στο πηνίο σε κατάσταση ισορροπίας σε λειτουργία με συνεχή αγωγή του ρεύματος



Σχήμα 5.23: Κυμάτωση του ρεύματος εξόδου σε κατάσταση ισορροπίας



Σχήμα 5.24: Κυμάτωση της τάσης εξόδου σε κατάσταση ισορροπίας



Σχήμα 5.25: Κυματομορφή του ρεύματος που διαρρέει τον πυκνωτή

Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων υπό ιδανικές συνθήκες και μη της διάταξης θα σχολιαστούν στον επίλογο (5.7)

5.7 Επίλογος

Το κεφάλαιο 5 αποτελείται κυρίως από τις προσομοιώσεις της διάταξης που θα φορτίσει τη συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών. Για να επιβεβαιώσω το θεωρητικό μέρος του μετατροπέα, αρχικά προσομοιώθηκε η διάταξη με τα ιδανικά εξαρτήματα και τα αποτελέσματα ήταν τα αναμενόμενα. Με τον τρόπο αυτό επαλήθευσα τη θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα που προηγήθηκε στο κεφάλαιο 4 στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε ανοικτό βρόχο και με συνεχή αγωγή του ρεύματος (Continuous conduction mode-CCM)

Η δεύτερη φάση, είναι η επιλογή των πραγμάτων εξαρτημάτων για την υλοποίηση της διάταξης. Με σκοπό την ασφαλή λειτουργία της διάταξης, ακολούθησα κάποιους κανόνες κατά την επιλογή των στοιχείων. Όπως, η τάση αντοχής (τάση διάσπασης) των ημιαγωγικών στοιχείων έπρεπε να είναι περίπου διπλάσια από τη μέγιστη τάση κυκλώματος ενώ το ρεύμα αντοχής τουλάχιστον 50% μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα της διάταξης.

Το επόμενο βήμα ήταν η προσομοίωση της διάταξης μέσω του λογισμικού Simulink του MATLAB. Κατά τη προσομοίωση, έλαβα υπόψη τις παρασιτικές αντιστάσεις των στοιχείων όπως δίνονται από τους κατασκευαστές στα φύλλα δεδομένων. Στη περίπτωση αυτή, ο έλεγχος της τάσης πραγματοποιήθηκε σε κλειστό βρόχο με την τεχνική διαμόρφωση εύρους παλμών. Όσον αφορά την εύρεση των συντελεστών του ελεγκτή αντιστάθμισης, οφείλω να πω ότι είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Αρκετοί ερευνητές όπως ο Zieger-Nichols έχουν αναπτύξει θεωρίες πάνω στην επιλογή των συντελεστών. Ωστόσο, οι θεωρίες αυτές, δεν αποτελούν πάντα τη βέλτιστη λύση, παρά μια ικανοποιητική προσέγγιση. Στα πλαίσια της εργασίας αυτή, βρήκα κατάλληλους συντελεστές του ελεγκτή PI μέσω επαναλαμβανόμενων προσομοιώσεων. Με τη λειτουργία του μετατροπέα σε κλειστό βρόχο, η τάση εξόδου ρυθμίζεται σε πραγματικό χρόνο και είναι σχετικά σταθερή.

Κατά τη προσομοίωση με τα μη ιδανικά στοιχεία, είδα πως το μέγεθος της κυμάτωσης της τάσης εξόδου εξαρτάται κυρίως από την ισοδύναμη αντίσταση σειράς R_{esr} του πυκνωτή ενώ η επίδραση της χωρητικότητα είναι ελάχιστη. Επιπλέον, επειδή η τάση εισόδου στο μετατροπέα δεν είναι μια τέλεια γραμμή, αυτό έχει και αρνητικές επιπτώσεις σ' όλες τις κυματομορφές του κυκλώματος. Υπήρχε ανάγκη του snubber για τη μείωση των ταλαντώσεων της τάσης εξόδου του μετατροπέα.

Κεφάλαιο 6ο: Υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης και βελτιστοποίησης συστοιχίας μπαταριών μολύβδου

6.1 Εισαγωγή

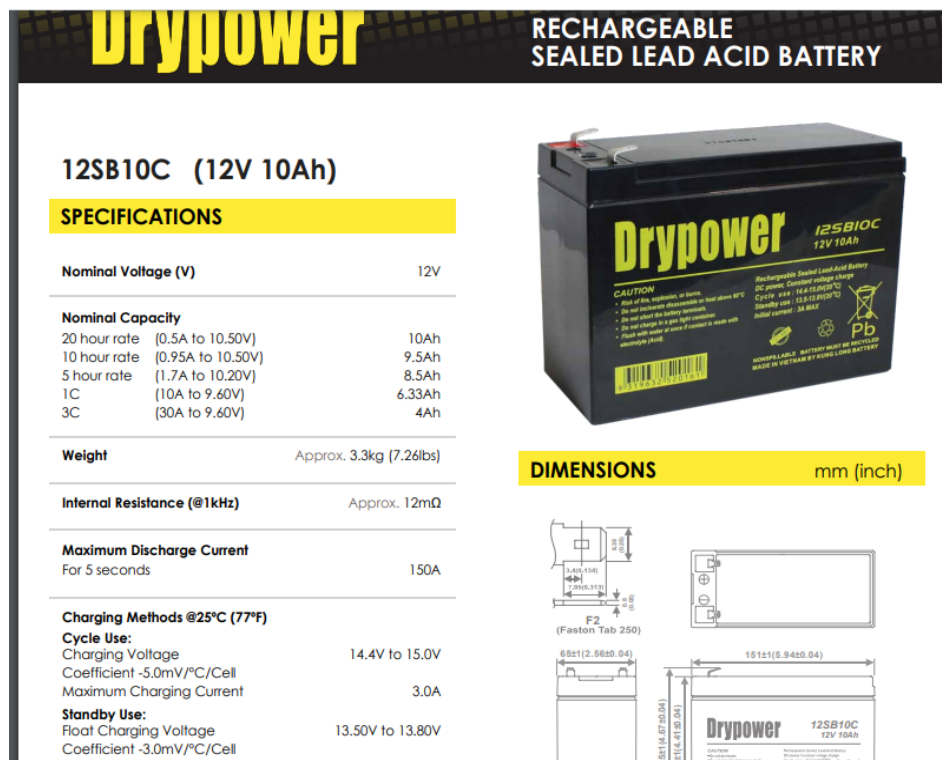
Στα προηγούμενα κεφάλαια, προηγήθηκε η απαραίτητη ανάλυση και η σχεδίαση των στοιχείων που αποτελούν το σύστημα διαχείρισης και βελτιστοποίηση συστοιχίας μπαταριών της παρούσας εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό, υλοποιείται το σύστημα.

6.2 Προδιαγραφές του συστήματος

Το BMS (Battery Management System) που υλοποιείται στα πλαίσια της πτυχιακής μου εργασίας αποτελείται από τη διάταξη φόρτισης και την διάταξη ελέγχου. Η διάταξη φόρτισης παρέχει σταθερό ρεύμα, με ρυθμό $0.25C$ (C εκφράζει την χωρητικότητα της μπαταρίας). Όταν η τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου φτάσει την προκαθορισμένη στάθμη τάσης $44V$. Η διάταξη ελέγχου φόρτισης τερματίζει την φόρτιση για αποφυγή της υπερφόρτισης.

6.3 Συστοιχία μπαταριών

Η συστοιχία αποτελείται από τρεις μπαταρίες μολύβδου 12SB10C (12V 10Ah) συνδεδεμένες σε σειρά. Όπως επιβάλλεται από τους κατασκευαστές της συγκεκριμένης μπαταρίας, το ρεύμα φόρτισης δεν πρέπει να ξεπεράσει τα 3 A. Επειδή οι τρεις μπαταρίες διαρρέονται από ίδιο ρεύμα (είναι συνδεδεμένες εν σειρά), η συστοιχία φορτίζεται με ρυθμό $0.25C$. Άρα $0.25C = 0.25 \cdot 10 = 2.5A$. Όσον αφορά την τάση, σύμφωνα με το Datasheet της μπαταρίας αυτής, η τάση φόρτισης πρέπει να κυμαίνεται από 14.4 έως 15V. Επειδή συνδέονται σε σειρά τρεις τέτοιες μπαταρίες, όταν η τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας φτάσει την τιμή $44V$, θεωρείται πλήρως φορτισμένη η συστοιχία. Ακολουθεί στο σχήμα 6.1 το φύλλο δεδομένων της μπαταρίας.

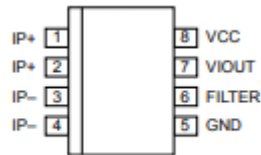


Σχήμα 6.1: τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας [10].

6.4 Διάταξη ελέγχου

6.4.1 Μετρητικό ρεύματος

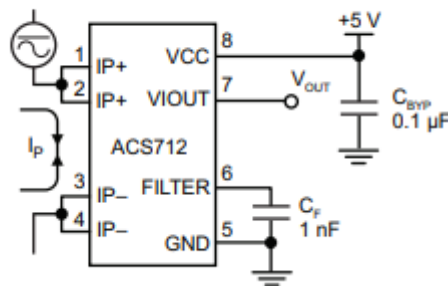
Για ασφαλή φόρτιση, επιβάλλεται η γνώση κάθε στιγμή της τιμής του ρεύματος που ρέει μέσα από τη συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών. Επιλέχθηκε το μετρητικό ρεύματος ACS712ELCTR-05B-T της εταιρείας ALLIGRO microsystem. Από το φύλλο δεδομένων, το στοιχείο αυτό μπορεί να μετρήσει μέγιστο ρεύμα 5A.



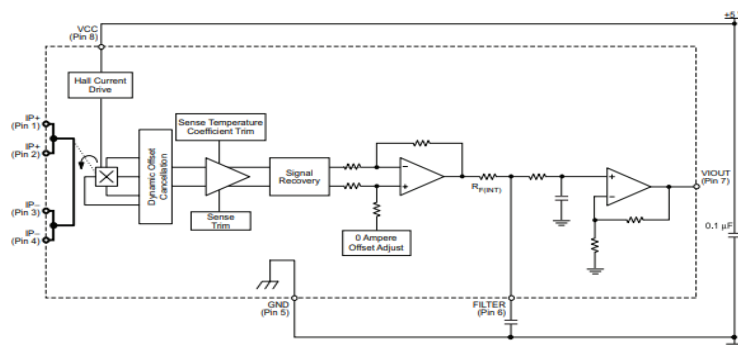
Σχήμα 6.2: Μετρητικό ρεύματος ACS712ELCTR-05B-T της εταιρείας ALLIGRO microsystem.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, το ACS712ELCTR-05B-T έχει οκτώ ακίδες. Από το φύλλο δεδομένων, προκειμένου να μετρηθεί μέγιστο ρεύμα πρέπει 5A, πρέπει να βραχυκυκλωθούν οι ακίδες 1 και 2. Η ακίδα 3 βραχυκυκλώνεται με την ακίδα 4. Τέλος, πρέπει να τοποθετηθεί ένας πυκνωτής φίλτρου με τιμή $1nF$ μεταξύ της ακίδας 5 και 6. Το συγκεκριμένο στοιχείο απαιτεί την τροφοδοσία για τη λειτουργία του. Η ακίδα 5 και 8 αποτελούν την τροφοδοσία και η 7 την έξοδο.

Η τροφοδοσία του μετρητικού γίνεται με 5V. Και έτσι, θα χρησιμοποιηθεί το τροφοδοτικό των 5V που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή καθώς απαιτείται κοινή γείωση με το κύκλωμα του μικροελεγκτή.



Σχήμα 6.3: Συνδεσμολογία μετρητικού ρεύματος ACS712ELCTR-05B-T της εταιρείας ALLIGRO microsystem

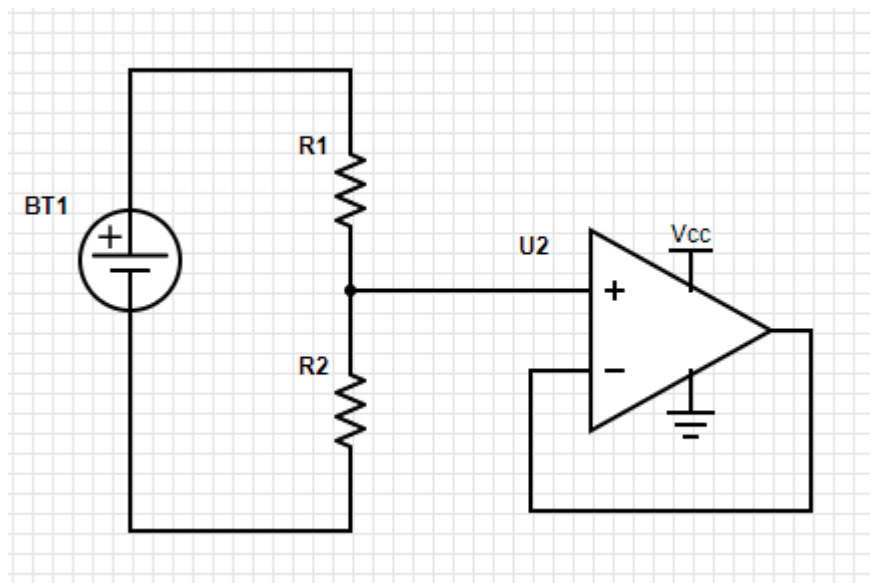


Σχήμα 6.4: Λειτουργικό διάγραμμα του μετρητικού ρεύματος ACS712ELCTR-05B-T

6.4.2 Μετρητικό τάσης

Η τάση της συστοιχίας μπαταριών όταν είναι πλήρως φορτισμένη ξεπερνά την επιτρεπόμενη διαφορά δυναμικού στην είσοδο του μικροελεγκτή. Για να μπορεί να επεξεργαστεί η συγκεκριμένη ποσότητα της τάσης, πρέπει να υποβιβαστεί σε ένα κατάλληλο επίπεδο ώστε να μπορεί να αποτελεί είσοδο για το μικροελεγκτή. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ο διαιρέτης τάσης για τροποποίηση της τάσης της συστοιχίας. Η τροποποιημένη τιμή της τάσης ενισχύεται μέσω του buffer LM358. Από το κατασκευαστικό φυλλάδιο, το buffer LM358 μπορεί να τροφοδοτείται με $5V$ και η μέγιστη τάση εξόδου του είναι ίση με $V_{cc} - 1.5V$ όπου V_{cc} εκφράζει το επίπεδο της τροφοδοσίας. Και έτσι γίνεται ο υποβιβασμός της τάσης ακροδεκτών της συστοιχίας σε μια χαμηλή στάθμη ώστε να μπορεί να αποτελεί είσοδο για το μικροελεγκτή.

Για την λειτουργία του, το buffer LM358 απαιτεί μια τροφοδοσία. Και έτσι, θα χρησιμοποιηθεί το τροφοδοτικό των $5V$ που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή καθώς απαιτείται κοινή γείωση με το κύκλωμα του μικροελεγκτή.



Σχήμα 6.5: Κύκλωμα μέτρησης και υποβιβασμού της τάσης στους ακροδέκτες της συστοιχίας

Στο κύκλωμα του Σχ. 6.5 η τάση εξόδου υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{BT2} \quad (6.1)$$

Στην περίπτωση μάς, θέλουμε η μέγιστη τιμή της τάσης στην είσοδο του μ/ε να είναι $3V$. Για να γίνει αυτό, πρέπει η R_1 να είναι ίση με $136,66K$ και η R_2 ίση με $10K$. Από την Εξ. (6.1) προκύπτει ότι

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{BT2} = \frac{10}{136,66 + 10} \cdot 44 = 3V. \text{ Αν υποθέσουμε ότι η τιμή της τάσης στους ακροδέκτες}$$

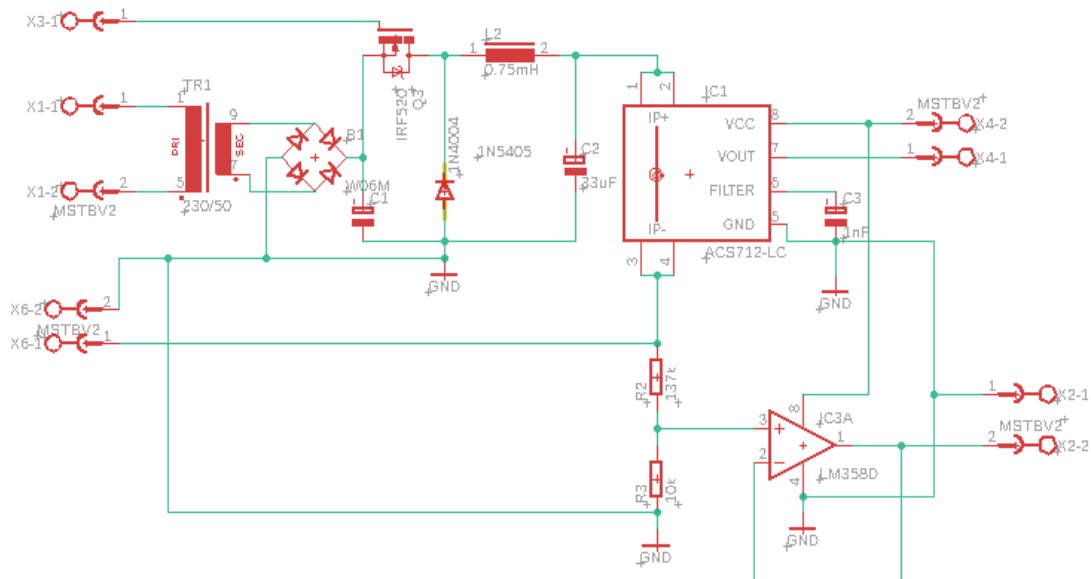
της συστοιχίας σε πλήρη φόρτιση είναι ίση με $44V$, τότε με τις επιλεγμένες αντιστάσεις, τα $3V$ στην είσοδο του μικροελεγκτή αντιστοιχούν στην τάση της συστοιχίας σε πλήρη φόρτιση. Με βάση τις τυποποιημένες τιμές των αντιστάσεων στο εμπόριο επιλέχθηκαν αντιστάσεις τιμής $R_1 = 137k\Omega$ και $R_2 = 10k\Omega$. Σημειώνεται ότι στο Σχ. 6.5 το κέρδος A_{CL} του ενισχυτή LM358 είναι ίσο με τη μονάδα.

6.5 Φορτιστής

Για την φόρτιση της συστοιχίας, χρησιμοποιείται ο μετατροπέας υποβιβασμού της τάσης που αναλύεται στα κεφάλαια 4 και 5. Αυτός ο μετατροπέας λειτουργεί σε κλειστό βρόχο και έτσι, η τάση εξόδου ρυθμίζεται σε πραγματικό χρόνο σε επιθυμητή στάθμη.

6.6 Σχεδιασμός της πλακέτας διάταξης φόρτισης

Για το σχεδιασμό της πλακέτας χρησιμοποιήθηκε το λογισμό EAGLE. Η χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού είναι σχετικά εύκολη. Επιπλέον, έχει δωρεάν έκδοση για εκπαιδευτική χρήση.



Σχήμα 6.6: Σχεδίαση της πλακέτας διάταξης φόρτισης

6.7 Μικροελεγκτής

Όταν φορτίζεται η συστοιχία ηλεκτροχημικών συσσωρευτών, μετριούνται συνεχώς η τάση στους ακροδέκτες της και η ένταση του ρεύματος που ρέει μέσα από αυτήν. Στη συνέχεια οι μετρούμενες ποσότητες στέλλονται στις εισόδους του μικροελεγκτή αφού έχουν υποβιβαστεί σε κατάλληλα επίπεδα. Το πρόγραμμα ελέγχου που τρέχει στο μικροελεγκτή “διαβάζει” συνεχώς τις τιμές των μετρούμενων τιμών. Όλα τα μεγέθη αναλύονται, ελέγχονται, επεξεργάζονται και στη συνέχεια παράγονται οι κατάλληλοι παλμοί ελέγχου.



Σχήμα 6.7: Η αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO UNO

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται το αναπτυξιακό σύστημα ARDUINO UNO το οποίο φέρει το μικροελεγκτή ATmega328P. Το συγκεκριμένο αναπτυξιακό επιλέχθηκε, καθώς εκτός από το σχετικά πολύ χαμηλό κόστος, προσφέρει την ευκολία προγραμματισμού.

Specification

- Adopts Atmel Atmega328 microcontroller
- Digital I/O port: 0~13
- Analog I/O port: 0~5
- Supports ISP download function
- Input voltage: When connected with PC USB, there is no need for external power source; for external power source: 5V~9V DC voltage input.
- Output voltage: 5V DC voltage output and 3.3V DC voltage output.

Σχήμα 6.8: Προδιάγραφες της αναπτυξιακής πλακέτας ARDUINO UNO

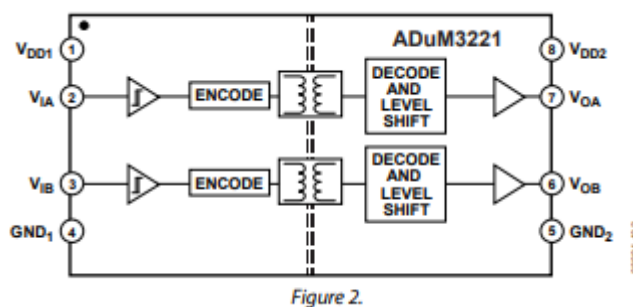
6.8 Διακόπτης κυκλώματος

Ο διακόπτης παρεμβάλλεται μεταξύ της συστοιχίας μπαταριών, της εξόδου παλμών του μικροελεγκτή και της διάταξης φόρτισης. Η δουλειά του είναι να σταματάει τη φόρτιση όταν οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες για αποφυγή της υπερφόρτισης. Όταν φορτίζονται οι μπαταρίες, ο μικροελεγκτής πρέπει να είναι σε θέση να στείλει ένα κατάλληλο σήμα ελέγχου στο διακόπτη για την ενεργοποίησή του, δηλαδή ο διακόπτης διατηρείται σε κατάσταση αγωγής. Όταν φορτιστεί πλήρως η συστοιχία των μπαταριών, πρέπει να σταλεί ένα άλλο κατάλληλο σήμα ελέγχου από το μικροελεγκτή για την απενεργοποίηση του διακόπτη κυκλώματος. Διατηρώντας έτσι το διακόπτη σε κατάσταση αποκοπής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται το MOSFET ισχύος του σχήματος 4.5

6.9 Οδηγός πύλης

Οι παλμοί ελέγχου των διακοπών που παράγονται από την αναπτυξιακή πλακέτα ARDUINO UNO, έχουν μέγιστο πλάτος 5V και μικρή ικανότητα παροχής ρεύματος. Επομένως, δεν είναι κατάλληλοι στην απευθείας οδήγηση των διακοπών ισχύος. Και έτσι προκύπτει η ανάγκη χρήσης του κυκλώματος το οποίο ενισχύει τους παλμούς σε επιθυμητή στάθμη της ισχύος ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή οδήγηση των διακοπών.

Το στοιχείο που επιλέχθηκε για το στάδιο αυτό είναι το ADuM3221 το οποίο είναι ένα ολοκληρωμένο με 8 ακίδες και επιτελεί δύο λειτουργίες. Την ενίσχυση των παλμών από το μικροελεγκτή σε τάση έως 18V και ρεύμα έως 4 A και την γαλβανική απομόνωση των παλμών ελέγχου από το κύκλωμα ισχύος



Σχήμα 6.9: Λειτουργικό διάγραμμα ADuM3221

Οι ακροδέκτες 1 έως 4 αποτελούν την είσοδο και 5 έως 8 την έξοδο. Οι παλμοί ελέγχου από το μικροελεγκτή εφαρμόζονται στις ακίδες 2 και 3 ενώ οι 1 και 4 είναι η τροφοδοσία. Από τις ακίδες 6 και 7 παράγονται οι παλμοί οδήγησης των διακοπών ενώ οι 5 και 8 είναι η τροφοδοσία. Η πλευρά ελέγχου τροφοδοτείται με τάση 3,3V από το κύκλωμα τροφοδοσίας του μ/ϵ V_{DD1} και η πλευρά ισχύος με τάση 12V από το τροφοδοτικό. Επομένως, οι παλμοί οδήγησης των διακοπών θα έχουν πλάτος 12V. Η ρύθμιση του επιπέδου του ρεύματος στο διακόπτη γίνεται με μια αντίσταση ώστε να μη ξεπερνά τα 4A.

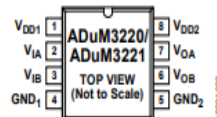


Figure 4. Pin Configuration

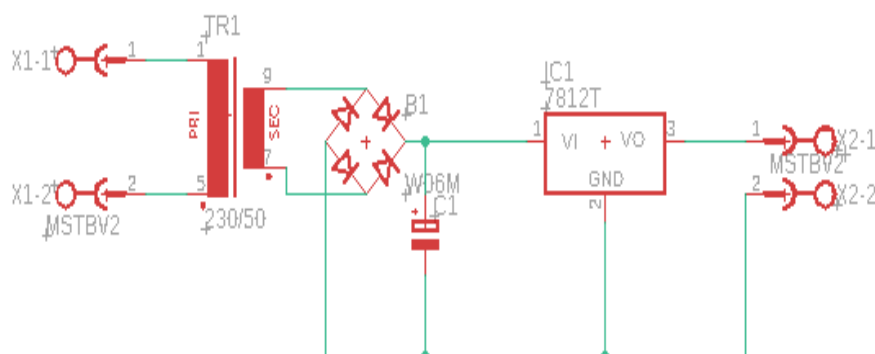
Table 10. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	V_{DD1}	Supply Voltage for Isolator Side 1, 3.0V to 5.5V.
2	V_{IA}	Logic Input A.
3	V_{IB}	Logic Input B.
4	GND_1	Ground 1. Ground reference for Isolator Side 1.
5	GND_2	Ground 2. Ground reference for Isolator Side 2.
6	V_{OB}	Logic Output B.
7	V_{OA}	Logic Output A.
8	V_{DD2}	Supply Voltage for Isolator Side 2, 4.5V to 18V.

Σχήμα 6.10: Περιγραφή ακροδεκτών του ADuM3221

6.10 Τροφοδοτικό συνεχούς τάσης

Για να επιτευχθεί η γαλβανική απομόνωση των παλμών ελέγχου από το κύκλωμα ισχύος, είναι αναγκαία η χρήση δεύτερης τροφοδοσίας, η οποία για να μπορέσει να τροφοδοτήσει τον οδηγό πύλης επιλέγεται να είναι 12V. Και έτσι, χρησιμοποιείται το κύκλωμα του σχήματος 6.11



Σχήμα 6.11: Γραμμικό τροφοδοτικό 12V

Ως σταθεροποιητής επιλέγεται ο 7812 της εταιρείας Texas Instruments. Από το φύλλο δεδομένων, προκειμένου να είναι 12V η τάση εξόδου, η τάση εισόδου πρέπει να είναι 19V. Το συγκεκριμένο

στοιχείο έχει τρεις ακροδέκτες. Στο ακροδέκτη 1 συνδέεται η πηγή εισόδου, στο 2 είναι η γείωση και στο 3 είναι η έξοδος η οποία συνδέεται στην ακίδα 8 V_{DD2} του οδηγού πύλης ADuM3221. Η γείωση του γραμμικού τροφοδοτικού 7812 συνδέεται στην άκίδα 5 του ADuM3221. Προκειμένου να είναι η τάση στον ακροδέκτη 1 ίση με 19V, με αναφορά την ενότητα 5.4.1.1, επιλέχθηκε ο μετασχηματιστής ισχύος $230V_{rms} / 16V_{rms}$.

6.7 LM340 / LM7812 Electrical Characteristics, $V_O = 12\text{ V}$, $V_I = 19\text{ V}$

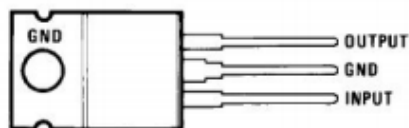
$0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 125^\circ\text{C}$ unless otherwise specified⁽¹⁾

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
V_O Output voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}$	11.5	12	12.5	V
	$P_D \leq 15\text{ W}$, $5\text{ mA} \leq I_O \leq 1\text{ A}$ $14.5\text{ V} \leq V_{IN} \leq 27\text{ V}$	11.4		12.6	V

Pin Functions

PIN		I/O	DESCRIPTION
NAME	NO.		
INPUT	1	I	Input voltage pin
GND	2	I/O	Ground pin
OUTPUT	3	O	Output voltage pin

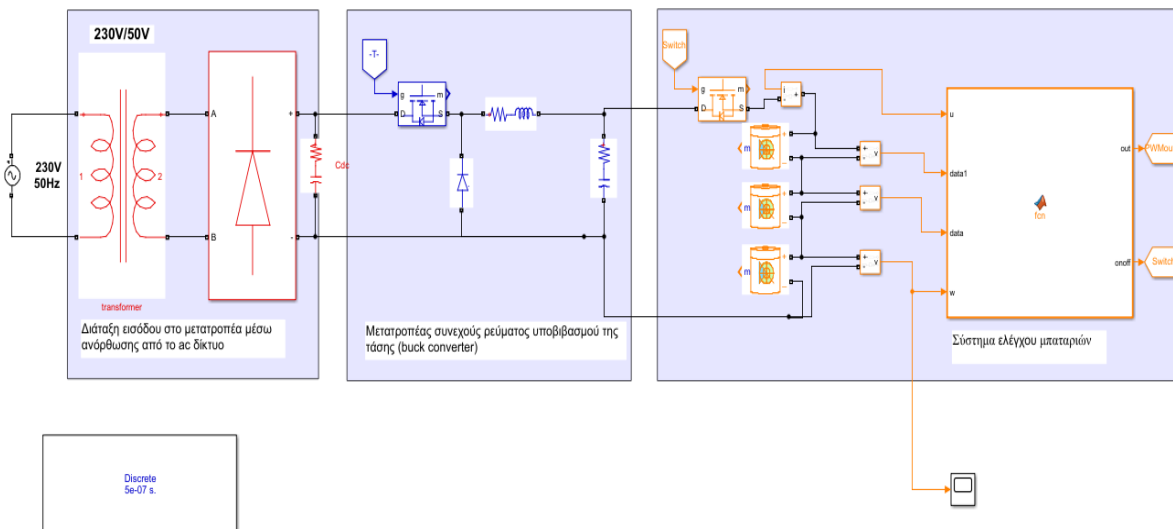
LM7805, LM7812, and LM7815 NDE Package
3-Pin TO-220
Top View



Σχήμα 6.12: Σταθεροποιητής 7812 της εταιρείας Texas Instruments

6.11 Αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος

Με το λογισμικό Simulink του Matlab μπορούμε να υλοποιήσουμε το σύστημα που σχεδιάστηκε ώστε να παρατηρήσουμε την λειτουργία του.



Σχήμα 6.13: Μοντέλο επίβλεψης ηλεκτροχημικών συσσωρευτών στη Simulink/Matlab

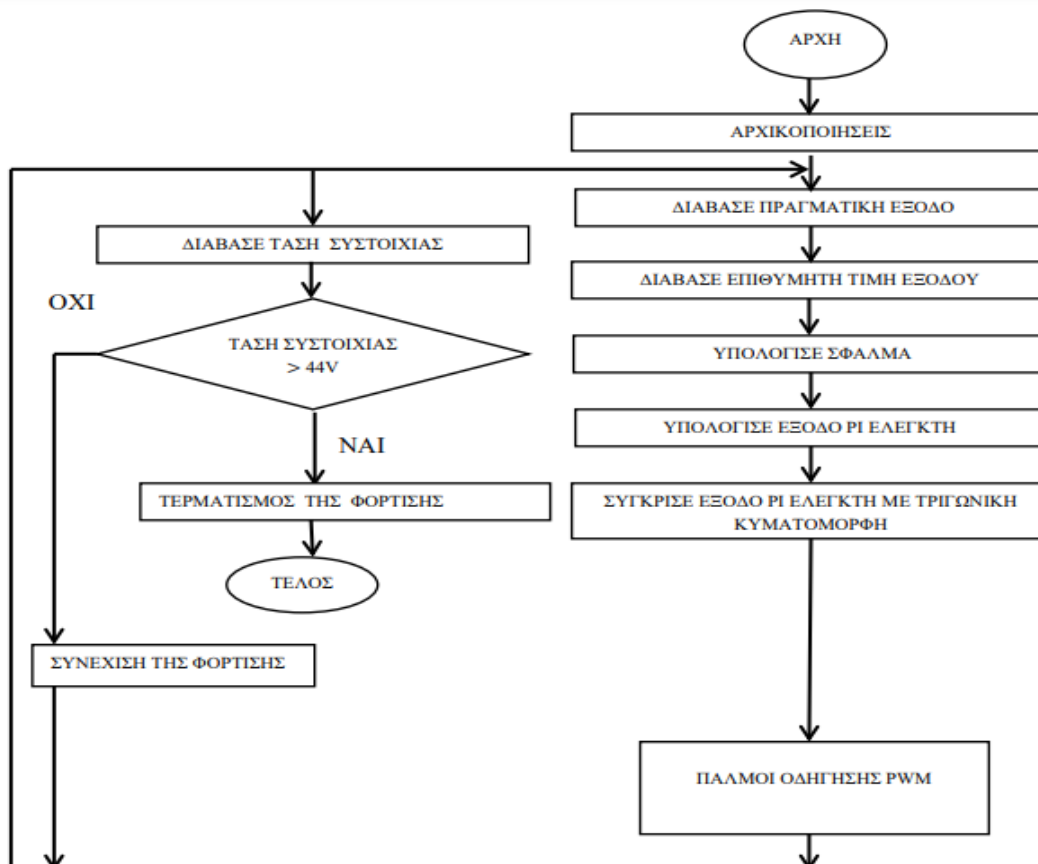
Το μοντέλο του Σχ. 6.13 αποτελείται από 3 τμήματα. Το πρώτο τμήμα (σε κόκκινο) αντιπροσωπεύει την πηγή τροφοδοσίας του κυκλώματος ισχύος. Ο μετασχηματιστής ισχύος μετασχηματίζει την εναλλασσόμενη τάση δικτύου $230V_{rms} / 50V_{rms}$. Η μετασχηματισμένη εναλλασσόμενη (ac) στάθμη της τάσης μετατρέπεται σε τάση συνεχούς μορφής (dc) μέσω της γέφυρας ανόρθωσης και του πυκνωτή εξομάλυνσης τιμής $10000\mu F$.

Το δεύτερο τμήμα (σε μπλε) είναι ο διακοπτικός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος υποβιβασμού της τάσης με τάση εισόδου $V_{dc} = 65V$ και με συχνότητα λειτουργίας $35kHz$. Σημειώνεται ότι στο μετατροπέα αυτό η τάση εξόδου εξαρτάται αποκλειστικά από το κύκλο λειτουργία και δεν μπορεί σε καμιά περίπτωση να ξεπερνά την τάση εισόδου.

Το τρίτο τμήμα (σε πορτοκαλί) αποτελείται από τη συστοιχία μπαταριών 12SB10C (12V/10Ah), τα μετρητικά τάσης και ρεύματος, ένα διακόπτη κυκλώματος και ένα μικροελεγκτή.

Κατά τη φόρτιση, ο μικροελεγκτής διαβάζει συνεχώς από τα μετρητικά τη τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας και την ένταση του ρεύματος που την διαρρέει. Η φόρτιση γίνεται με σταθερό ρεύμα (Constant current-CC). Πιο συγκεκριμένα, ο μετατροπέας λειτουργεί σε κλειστό βρόχο και παρέχει στη συστοιχία σταθερό ρεύμα 2.5 A καθ' όλη τη διάρκεια φόρτισης ενώ η τάση μεταβάλλεται ανάλογα με τη στάθμη φόρτισης SOC. Όταν η τάση φτάσει την τιμή 44V, ο μ/ε στέλνει έναν παλμό στο διακόπτη κυκλώματος για τερματισμό της φόρτισης.

Ο έλεγχος των διακοπών γίνεται μέσω του μικροελεγκτή. Η διάγραμμα ροής του κώδικα ακολουθεί



Σχήμα 6.14: Διάγραμμα ροής κλειστού βρόχου MATLAB

Το συμπέρασμα που βγαίνει από το διάγραμμα ροής είναι ότι τα μετρητικά μετράνε συνεχώς το ρεύμα εξόδου και την τάση ακροδεκτών της συστοιχίας. Οι μετρούμενες ποσότητες στέλνονται στους ακροδέκτες του μικροελεγκτή και από εκεί το σήμα εξόδου συγκρίνεται με την επιθυμητή στάθμη της τάσης, (50V στην περίπτωση μας). Το σφάλμα (διαφορά μεταξύ των 50V και της πραγματικής εξόδου) επεξεργάζεται από τον ελεγκτή PI. Ο ελεγκτής παράγει το σήμα ελέγχου, το οποίο συγκρίνεται με ένα τριγωνικό σήμα με πλάτος 10V και συχνότητα 35kHz. Από την σύγκριση των δύο σημάτων, παράγονται οι παλμοί οδήγησης. Και όταν η τάση της συστοιχίας φτάσει την τιμή 44V διακόπτεται η φόρτιση.

6.11.1 Φόρτιση της συστοιχίας με σταθερό ρεύμα

Το μοντέλο του σχήματος 6.13, αντιπροσωπεύει τη φόρτιση της συστοιχίας μπαταριών, η οποία συστοιχία αποτελείται από τρεις μπαταρίες μολύβδου 12SB10C (12V 10Ah) συνδεδεμένες σε σειρά. Η διάταξη φόρτισης παρέχει σταθερό ρεύμα, με ρυθμό $0.25C$. Άρα $0.25C = 0.25 \cdot 10 = 2.5A$ (C εκφράζει την χωρητικότητα της μπαταρίας). Όταν η τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας ηλεκτροχημικών συσσωρευτών μολύβδου φτάσει την προκαθορισμένη στάθμη τάσης 14.4V η διάταξη ελέγχου φόρτισης τερματίζει την φόρτιση για αποφυγή της υπερφόρτισης.

SOC%(Vb1)	SOC%(Vb3)	SOC%(Vb3)	Io(A)	Vtotal(V)	SW(ON-OFF)
10	20	30	2.5	34.59	1
15	25	35	2.48	34.4	1
20	30	40	2.46	35.35	1
30	40	50	2.49	35.75	1
35	45	55	2.45	35.89	1
40	50	60	2.5	36.01	1
50	60	70	2.5	36.18	1
55	65	75	2.47	36.25	1
60	70	80	2.47	36.31	1
65	75	85	2.5	36.36	1
70	80	90	2.49	36.4	1
75	85	95	2.45	36.44	1
80	90	100	2.5	39.05	1
85	95	100	2.5	39.08	1
90	100	100	2.44	41.67	1
95	100	100	2.5	41.68	1
100	100	100	0	44.17	0

Σχήμα 6.15: Φόρτιση της συστοιχίας με σταθερό ρεύμα

Στο σχήμα 6.15 φαίνονται τα αποτελέσματα φόρτισης της συστοιχίας μπαταριών που εικονίζεται στο Σχ.6.13. Η συστοιχία φορτίζεται με σταθερό ρεύμα 2.5 A και οι τρεις μπαταρίες μολύβδου που αποτελούν τη συστοιχία δεν έχουν κατά την φόρτιση το ίδιο διαθέσιμο φορτίο. Δοκιμάστηκαν διάφορες τιμές των SOC.

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να σημειωθεί από τα αποτελέσματα αυτά είναι ότι το ρεύμα διατηρείται σχεδόν σταθερό, ενώ μεταβάλλεται συνεχώς η τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας. Δεύτερον, η φόρτιση διακόπτεται όταν κάποια από τις 3 μπαταρίες που αποτελούν τη συστοιχία φθάσει σε πλήρη φόρτιση. Όταν η τάση της μπαταρίας είναι χαμηλότερη από τα 44 ο διακόπτης(SW) είναι σε κατάσταση αγωγής και η φόρτιση συνεχίζεται κανονικά. Στο Σχ. 6.15, το 1 αντιπροσωπεύει την κατάσταση αγωγής και το 0 κατάσταση αποκοπής. Τρίτον, το σύστημα που σχεδιάστηκε είναι αποτελεσματικό καθώς ανταποκρίνεται σωστά.

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας ήταν η διαχείριση και η βελτιστοποίηση της συστοιχίας μπαταριών μολύβδου. Έτσι, εκτός από τις πρακτικές συμβουλές για την ασφαλή εκφόρτιση των μπαταριών μολύβδου που περιέχει η εργασία αυτή, υλοποιήθηκε και το σύστημα διαχείρισης συστοιχίας μπαταριών μολύβδου όταν αυτή φορτίζεται. Επειδή η φόρτιση μίας συστοιχίας μπαταριών απαιτεί κάποιες προϋποθέσεις, έτσι και εδώ αναλύθηκαν σε μεγάλο βαθμό τα προβλήματα που συναντάμε όταν τη φορτίζουμε και πως αυτά τα προβλήματα μπορούν να επιλυθούν. Μεγάλη ήταν και η προσπάθεια μου να υλοποιηθεί ένα σύστημα με σχετικά χαμηλό κόστος αλλά ταυτόχρονα να εξασφαλίζει την εύρυθμη-αποτελεσματική διαχείριση της συστοιχίας μπαταριών. Με σκοπό τον υψηλό βαθμό απόδοσης, σχεδιάστηκε ένας διακοπτικός μετατροπέας συνεχούς ρεύματος υποβιβασμού της τάσης ο οποίος αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως buck converter ως διάταξη ρύθμισης της ισχύος φόρτισης της συστοιχίας. Στη συνέχεια ακολούθησε η προσομοίωση του στο λογισμικό Simulink του Matlab, μέσω της οποίας προέκυψε πλήθος συμπερασμάτων. Αναλυτικότερα, επιβεβαιώθηκε η θεωρητική ανάλυση του μετατροπέα κατά την προσομοίωση του υπό ιδανικές συνθήκες. Για αποφυγή της υπερφόρτισης, το σύστημα είναι σε θέση να τερματίζει τη φόρτιση μόλις η τάση στους ακροδέκτες της συστοιχίας φτάσει μια προκαθορισμένη τιμή της τάσης. Αυτό είναι δυνατόν, διότι χρησιμοποιείται ένας μικροελεγκτής, ο οποίος λαμβάνει ως εισόδους την τάση ακροδεκτών της συστοιχίας και το ρεύμα φόρτισης. Έτσι, παρακολουθείται συνεχώς η τάση και όταν χρειαστεί, παράγεται ένα σήμα από το μικροελεγκτή στο διακόπτη του κυκλώματος και γίνεται αυτόματος τερματισμός της φόρτισης αμέσως μετά την ολοκλήρωσή της. Επιπλέον, η διάταξη φόρτισης που υλοποιήθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές όπου η σταθεροποίηση της τάσης εξόδου σε μεταβολές της τάσης εισόδου και του φορτίου είναι απόλυτα απαραίτητη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιαγκίδης Αντώνιος, “Εναλλακτική διαχείριση συσσωρευτών μολύβδου οξέος σε Ελλάδα, Κύπρο, Γερμανία και Αυστρία” Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο 2018.
- [2] Manoj Maskey, “Battery management system for HEV”, December, 1999.
- [3] Witold Maranda, “Capacity Degradation of Lead-acid Batteries Under Variable-depth Cycling Operation in Photovoltaic System” Jun, 2015.
- [4] RS Components, “Sealed Lead-Acid Battery General Purpose 537-7305(12V12Ah)” [Online]. Available : <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/0b5b/0900766b80b5b643.pdf>
- [5] Λαλάκου Μαρία, “Ανάλυση και προσομοίωση τμήματος μικροδικτύου” Πανεπιστήμιο Πατρών, Οκτώβριος 2016.
- [6] Power-sonic, “Technical manual sealed lead-acid batteries” [Online]. Available: <https://www.power-sonic.com/wp-content/uploads/2018/12/Technical-Manual.pdf>
- [7] Πιτου Ιωάννης, “Έλεγχος στροφών ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα ισχύος 1kW μέσω μικροελεγκτή” Φεβρουάριος, 2010.
- [8] Δ. Βαχτσιάβανου “Μελέτη και κατασκευή διάταξης διαχείρισης συσσωρευτών ηλεκτροκίνητου οχήματος” Πανεπιστήμιο Πατρών, Φεβρουάριος 2019.
- [9] Mouser electronic Greece: electronic component distributor [Online]. Available: gr.mouser.com
- [10] Dry power, “Rechargeable sealed lead acid battery 12SB10C (12V 10Ah)” [Online]. Available: <https://www.wagneronline.com.au/attachments/batteries/12SB10C.pdf>
- [11] MathWorks, “Generic battery model” [Online]. Available: <https://fr.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>
- [12] I. N. Κιοσκερίδης, “Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος”, Ελλάδα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.
- [13] I. N. Κιοσκερίδης, “Ηλεκτρονικά ισχύος”, Ελλάδα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2016.
- [14] A. Malvino, και D. J. Bates, “Ηλεκτρονική: Αρχές και εφαρμογές”, Ελλάδα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.
- [15] E. Β. Χατζίκος, “Matlab για επιστήμονες και μηχανικούς”, Ελλάδα: Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.
- [16] M. N. Σπάσος και Κ. Θ. Αμοιρίδης, “Σύγχρονες εφαρμογές αναλογικών ηλεκτρονικών”, Ελλάδα: Εκδόσεις ΑΙΒΑΖΗ, 2015.