



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Συστήματα παλμικής φόρτισης ηλεκτρικών συστοιχιών

Χατζηλεονταρής Ασημάκης

Αρ. Μητρώου: 70147153

Επιβλέπων: Ευάγγελος Χ. Παπακίτσος

ΑΙΓΑΛΕΩ 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL DESIGN AND PRODUCTION
ENGINEERING

Diploma Thesis

Pulsed battery charging systems

Chatzileontaris Asimakis

Registration Number: 70147153

Supervisor: Evangelos C. Papakitsos

Athens, March 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

Συστήματα παλμικής φόρτισης ηλεκτρικών συστοιχιών

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι
Εξεταστική Επιτροπή:

| Α/α | ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ | ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ | ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | Ε.Χ. ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ | ΕΔΙΠ Α΄ | |
| 2 | Θ. ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ | ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Α΄ ΒΑΘΜΙΔΑΣ | |
| 3 | Ν. ΛΑΣΚΑΡΗΣ | ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ | |

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Χατζηλεονταρής Ασημάκης του Παναγιώτη , με αριθμό μητρώου 70147153 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής **Μηχανικών** του Τμήματος **Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής** , δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|----|
| Εισαγωγή | 1 |
| 1. Βασικά Στοιχεία Ηλεκτρονικής | |
| 1.1. Αντιστάτης..... | 4 |
| 1.2. Διαιρέτης Τάσης..... | 7 |
| 1.3. Πυκνωτής..... | 8 |
| 1.4. Κρυσταλλικός Ταλαντωτής..... | 11 |
| 1.5. Δίοδος LED..... | 12 |
| 1.6. Τρανζίστορ..... | 14 |
| 1.7. Δίοδοι..... | 16 |
| 1.8. Μικροελεγκτές..... | 17 |
| 2. Φορτιστές Μπαταριών | |
| 2.1. Η Αγορά των Μπαταριών Σήμερα..... | 19 |
| 2.2. Τεχνικές Φόρτισης Μπαταριών..... | 20 |
| 2.2.1. Αλγόριθμος Τεχνικής Σταθερής Τάσης-Σταθερού Ρεύματος..... | 21 |
| 2.2.2. Φορτιστές Τεχνικής Σταθερής Τάσης-Σταθερού Ρεύματος..... | 22 |
| 2.2.3. Φορτιστές Αλλαγής Ρυθμού..... | 24 |
| 3. Παλμικοί Φορτιστές | |
| 3.1. Βασικά Χαρακτηριστικά Παλμικής Φόρτισης και Μπαταρίες Ιόντων Λιθίου.... | 26 |
| 3.2. Ανασκόπηση Εφαρμογών Παλμικής Φόρτισης σε Μπαταρίες Λιθίου..... | 29 |
| 3.3. Εφαρμογή Παλμικής Φόρτισης σε Φορτιστές για IoT Εφαρμογές..... | 31 |
| 3.4. Συμπεράσματα Πειραματικής Μελέτης..... | 46 |
| 3.5. Ανασκόπηση Συστημάτων Φόρτισης Μπαταριών..... | 49 |
| 4. Αναφορές..... | 53 |
| 5. Κατάλογος Εικόνων..... | 57 |

Εισαγωγή

Η ιστορία του ηλεκτρισμού χάνεται στα βάθη του παρελθόντος και σίγουρα κανένας από τους τεράστιους επιστήμονες που συνεισέφεραν τόσο στην θεωρητική θεμελίωση του όσο και στις πειραματικές εφαρμογές του, δεν είχαν φανταστεί το τεράστιο αντίκτυπο το οποίο θα είχε στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου. Επιγραμματικά, ο Θαλής (600 π.Χ.) ήταν ο πρώτος που παρατήρησε την ύπαρξη στατικού ηλεκτρισμού μέσω της τριβής του ήλεκτρου (κεχριμπάρι) με μεταξωτά υφάσματα, τα οποία με την σειρά τους προσέλκυαν φτερά ή άλλα αντικείμενα. Ο όρος ηλεκτρισμός, όπως τον χρησιμοποιούμε σήμερα, άργησε πολύ να εδραιωθεί. Πιο συγκεκριμένα, ο William Gilbert ήταν αυτός που εισήγαγε τον όρο Ηλεκτρισμός (1600 μ.Χ.) και ο Benjamin Franklin με την σειρά του ανακάλυψε ότι οι αστραπές δεν ήταν τίποτα άλλο από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία, δηλαδή ηλεκτρισμός. Οι ανακαλύψεις στον τομέα του ηλεκτρισμού και των εφαρμογών του συνεχίστηκαν, και συνεχίζονται μέχρι και σήμερα.

Η ανάγκη για την διηλεκτική εξέλιξη στον τομέα του ηλεκτρισμού, και των εφαρμογών που συνδέονται με αυτόν, βρίσκεται στο γεγονός ότι αποτελεί το βασικότερο εργαλείο για την εξέλιξη του ανθρώπινου είδους (αντίστοιχα με την ανακάλυψη της φωτιάς). Σχεδόν οτιδήποτε χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητά μας σχετίζεται με τον ηλεκτρισμό. Από την προετοιμασία του φαγητού μας και τη διενέργεια πολύπλοκων μαθηματικών πράξεων και προσομοιώσεων για πληθώρα εφαρμογών, μέχρι τη δυνατότητα να ακούμε μουσική και την μετακίνησή μας (ηλεκτρικά αυτοκίνητα), ο ηλεκτρισμός έχει σημαίνουσα θέση.

Λόγω της τεράστιας ανάγκης για ηλεκτρισμό, οι επιστήμονες ωθήθηκαν στην ανακάλυψη μιας συσκευής η οποία έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια με χημικό τρόπο. Το όνομα της διάταξης αυτής είναι “μπαταρία” και το πρώτο βήμα πραγματοποιήθηκε το 1836 με την ανακάλυψη του Daniel Cell. Πολλά χρόνια κοπιαστικών ερευνών και ευφάνταστων ανακαλύψεων, εκτόξευσαν τις μπαταρίες σε εξαιρετικά επίπεδα όσον αφορά την φορητότητά της, απόδοσή της, το μέγεθός της καθώς και τη δημιουργία δυνατότητας επαναφόρτισης (Gaston Plante, 1859).

Παρόλη την εξαιρετική βελτίωση των χαρακτηριστικών των σύγχρονων μπαταριών, καινούργιες εφαρμογές απαιτούν καλύτερα χαρακτηριστικά. Οι κυριότερες βελτιώσεις τις οποίες πασχίζουν να εκπληρώσουν οι επιστήμονες είναι η μείωση του μεγέθους τους, η μεγαλύτερη χωρητικότητα συγκριτικά με τον όγκο της, η μεγαλύτερη διατήρηση της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η βελτιστοποίηση της διαδικασίας φόρτισης της μπαταρίας. Τρανταχτά παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η χρήση μπαταριών σε δορυφορικά συστήματα, η χρήση τους σε εμφυτεύσιμες ιατρικές συσκευές (π.χ. εμφυτεύσιμες κεραίες, βηματοδότες κ.ά.) καθώς και σε διάφορες εφαρμογές του λεγόμενου Internet of Things (IoT).

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθεί στη βιβλιογραφική μελέτη της διαδικασίας φόρτισης των μπαταριών και πιο συγκεκριμένα στην παλμική φόρτιση των μπαταριών. Η δομή της εργασίας είναι η εξής:

- Στο 1^ο Κεφάλαιο, θα αναλυθούν επιφανειακά κάποια βασικά στοιχεία ηλεκτρονικής, τα οποία είναι απαραίτητα για την κατανόηση τόσο των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων όσο και της λειτουργίας των μπαταριών.
- Στο 2^ο Κεφάλαιο, θα γίνει μια συνοπτική αναφορά στους φορτιστές μπαταριών καθώς και διαφόρων χαρακτηριστικών λειτουργίας τους.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο, θα γίνει αναφορά σε έναν καινοτόμο παλμικό φορτιστή για εφαρμογές IoT, όπου θα αναλυθεί εκτενώς η λογική της σχεδίασής του καθώς και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας που πετυχαίνει. Τέλος θα γίνει μια αναφορά σε διάφορους παλμικούς φορτιστές και τις τεχνικές τους που έχουν εφαρμοστεί στο παρελθόν.

Abstract

The need for continuous development in the field of electricity, and the applications connected to it, lies in the fact that it is the most basic tool for the evolution of the human species (corresponding to the discovery of fire). Almost everything we use in our daily life is related to electricity. From preparing our food and performing complex mathematical operations and simulations for a multitude of applications, to being able to listen to music and moving around (electric cars), electricity plays a significant role. Because of the huge need for electricity, scientists were pushed to discover a device that has the ability to store electricity in a chemical way. The name of this arrangement is “battery” and the first step was taken in 1836 with the discovery of Daniel Cell. Many years of painstaking research and imaginative discoveries have catapulted batteries to extraordinary levels in terms of portability, performance, size, and recharging (Gaston Plante, 1859).

Despite the great improvement in the characteristics of modern batteries, new applications require better characteristics. The main improvements that the scientists are trying to fulfill are the reduction of their size, the greater capacity compared to its volume, the greater conservation of electrical energy, as well as the optimization of the battery charging process. Typical examples of such applications are the use of batteries in satellite systems, their use in implantable medical devices (e.g., implantable antennas, pacemakers, etc.), as well as in various applications of the so-called Internet of Things (IoT).

This thesis will focus on the bibliographic study of the battery charging process and more specifically on the pulse charging of batteries.

Κεφάλαιο 1^ο : Βασικά Στοιχεία Ηλεκτρονικής

Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για πληθώρα εφαρμογών της καθημερινότητάς μας μάς έχει οδηγήσει στη χρήση διατάξεων οι οποίες είναι ικανές να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια σε ηλεκτροχημική μορφή. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις είναι οι μπαταρίες διαφόρων τεχνολογιών. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη χρήση των μπαταριών, αναπτύχθηκαν τεχνολογίες οι οποίες επιτρέπουν την επαναφόρτιση της μπαταρίας με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή της. Τα οφέλη της διαδικασίας της επαναφόρτισης έχουν πολλές πτυχές. Οι κυριότερες αφορούν την ευελιξία που δίνεται στους ανθρώπους για την επαναφόρτιση της μπαταρίας που έχουν στην διάθεσή τους, απαλείφοντας την ανάγκη για αγορά καινούργιας, την προστασία του περιβάλλοντος μέσω της μείωσης της ανάγκης για μπαταρίες μιας χρήσης κι επομένως την μείωση των ρύπων που παράγουν τα εκάστοτε εργοστάσια ανά τον κόσμο για την κατασκευή τους καθώς και πολλά άλλα. Ένα σημείο που αξίζει να αναφερθεί είναι η δυνατότητα που έδωσαν οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες σε εφαρμογές που άνθισαν στο πέρασμα του χρόνου και δεν θα μπορούσαν να υπάρχουν χωρίς αυτή. Επιγραμματικά και μόνο αναφέρονται τα σημερινά έξυπνα τηλέφωνα (smartphones), τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα ηλεκτρικά συστήματα που χρησιμοποιούν οι δορυφόροι μας κ.ά.

Προτού αναφερθεί η τεχνολογία της παλμικής φόρτισης μπαταριών, που αποτελεί το επόμενο και κύριο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη περιγραφή κάποιων βασικών ηλεκτρονικών στοιχείων, τα οποία έχουν θεμελιώδη σημασία και συναντώνται σχεδόν σε όλα τα ηλεκτρικά κυκλώματα, από τα πολύ απλά έως τα πολύ σύνθετα.

1.1 Αντιστάτης

Ο αντιστάτης, ή απλούστερα αντίσταση, είναι το βασικότερο ηλεκτρονικό στοιχείο, το οποίο χρησιμοποιείται σε διάφορα κυκλώματα για τον έλεγχο της ροής του ρεύματος [1]. Ουσιαστικά ο αντιστάτης δεν είναι τίποτα περισσότερο από ένα υλικό το οποίο αντιστέκεται στην ροή του ρεύματος, εξ ου και η ονομασία του. Από άποψη φυσικών διεργασιών, ο αντιστάτης μετατρέπει την ενέργεια των κινούμενων ηλεκτρονίων, δηλαδή του ρεύματος, σε θερμική ενέργεια μέσω της πρόσκρουσης των ηλεκτρονίων αυτών με τα

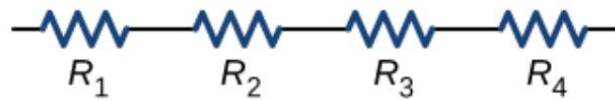
άτομα του υλικού του αντιστάτη. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες συνδεσμολογίες αντιστάσεως που συναντά κανείς στα ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι η σύνδεση των αντιστάσεων παράλληλα (διαιρέτης ρεύματος.) και η σύνδεση αντιστάσεων σε σειρά (διαιρέτης τάσης). Οι αντιστάτες είναι υλικά όπου ο νόμος του Ohm μπορεί να αναλύσει τη συμπεριφορά τους. Η τιμή της αντίστασης στα άκρα ενός αντιστάτη μετράται με ειδικό όργανο, που ονομάζεται Ωμόμετρο, και μας επιδεικνύει μια τιμή, η οποία όσο μεγαλύτερη είναι τόσο περισσότερο δυσκολεύει το ρεύμα να περάσει από μέσα της, ή πιο σωστά, όσο μεγαλύτερη η τιμή της αντίστασης τόσο μεγαλύτερη η απώλεια ενέργειας.



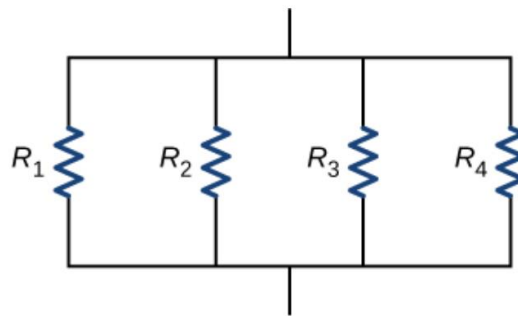
Εικόνα 1.1 Αντιστάτης

Δύο είναι οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης, την ανοχή του αντιστάτη και τον θερμικό του συντελεστή: η χρήση ενός τριψήφιου αριθμού και ο χρωματικός κώδικας.

- Χρωματικός κώδικας: Για τον προσδιορισμό των παραπάνω τιμών χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές ο ίδιος χρωματικός κώδικας που χρησιμοποιείται και σε άλλα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Η πιο συνηθισμένη μορφή αυτού του χρωματικού κώδικα είναι αυτή των τεσσάρων λωρίδων. Σε αυτή τη μέθοδο, οι τρεις πρώτες λωρίδες δείχνουν την τιμή και η τέταρτη την ανοχή. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1) παρουσιάζονται οι τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε χρώμα.
- Τριψήφιος αριθμός: Για τον χαρακτηρισμό της τιμή της αντίστασης χρησιμοποιείται και η αναγραφή στην επιφάνειά της τριών ψηφίων, από τα οποία τα δύο πρώτα είναι ένας αριθμός και το τρίτο είναι ο πολλαπλασιαστής. Ο πολλαπλασιαστής αυτός είναι δύναμη του δέκα.



Εικόνα 1.2 Συνδεσμολογία αντιστάσεων σε σειρά.



Εικόνα 1.3 Συνδεσμολογία αντιστάσεων παράλληλα.

| Χρώμα | 1 ^η Λωρίδα | 2 ^η Λωρίδα | 3 ^η Λωρίδα (πολλαπλασιαστής) | 4 ^η Λωρίδα (ανοχή) |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--|-------------------------------------|
| Μαύρο | 0 | 0 | $\times 10^0$ | |
| καφέ | 1 | 1 | $\times 10^1$ | $\pm 1\%$ (F) |
| Κόκκινο | 2 | 2 | $\times 10^2$ | $\pm 2\%$ (G) |
| Πορτοκαλί | 3 | 3 | $\times 10^3$ | |
| Κίτρινο | 4 | 4 | $\times 10^4$ | |
| Πράσινο | 5 | 5 | $\times 10^5$ | $\pm 0.5\%$ (D) |
| Μπλε | 6 | 6 | $\times 10^6$ | $\pm 0.25\%$ (C) |
| Μοβ | 7 | 7 | $\times 10^7$ | $\pm 0.1\%$ (B) |
| Γκρι | 8 | 8 | $\times 10^8$ | $\pm 0.05\%$ (A) |
| Λευκό | 9 | 9 | $\times 10^9$ | |
| Χρυσασφί | | | $\times 0.1$ | $\pm 5\%$ (J) |
| Ασημί | | | $\times 0.01$ | $\pm 10\%$ (K) |
| Κανένα | | | | $\pm 20\%$ (M) |

Πίνακας 1.1 Απεικόνιση της ερμηνείας των χρωμάτων του κάθε αντιστάτη.

1.2 Διαιρέτης Τάσης

Ο διαιρέτης δυναμικού ή αλλιώς διαιρέτης τάσης είναι μία απλή κυκλωματική διάταξη, η οποία αποτελείται από δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά (Εικόνα 1.2), στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η τάση εισόδου [1]. Ως τάση εξόδου λαμβάνεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της μίας εκ των δύο αντιστάσεων. Το εύρος των τιμών εξόδου κυμαίνεται από το μηδέν, δηλαδή μηδενική τάση, έως την τιμή της τάσης εισόδου, δηλαδή στην περίπτωση της μηδενικής αντίστασης.

Η ανάλυση κυκλώματος ενός κυκλώματος με αντιστάσεις σε σειρά είναι απλούστατη. Σύμφωνα με τη θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων, η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα των δύο αντιστάσεων εν σειρά προκύπτει από τη διαίρεση της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του κυκλώματος προς το άθροισμα των τιμών των εν σειρά αντιστάσεων. Η τάση εξόδου είναι ουσιαστικά η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της δεύτερης αντίστασης. Η τάση αυτή μπορεί να βρεθεί εάν πολλαπλασιάσουμε το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση επί την τιμή της. Με την μορφή μαθηματικών εξισώσεων, η ανάλυση του κυκλώματος φαίνεται παρακάτω:

$$V_{out} = I \cdot R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V$$

$$I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2}$$

Πολύ εύκολα μπορεί κάποιος να διαπιστώσει από τις ανωτέρω εκφράσεις ότι με κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων, μπορούμε να πάρουμε στην έξοδο οποιαδήποτε τιμή τάσης επιθυμούμε (με ελάχιστη τιμή το μηδέν και μέγιστη τιμή αυτή της τάσης εισόδου). Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι για να προκύψει στην έξοδο η τιμή της τάσεως εισόδου πρέπει οι αντιστάσεις να είναι ίσες με το μηδέν, γεγονός το οποίο δεν συναντάτε στη φύση, παρότι γίνονται σημαντικές προσπάθειες για την επίτευξη των λεγόμενων υπεραγωγών.

1.3 Πυκνωτής

Ως πυκνωτής (Capacitor) ονομάζεται ένα σύστημα δύο παράλληλων αγωγίμων πλακών ανάμεσα στις οποίες παρεμβάλλεται κάποιο διηλεκτρικό υλικό [1]. Πληθώρα διηλεκτρικών υλικών μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως για παράδειγμα ο αέρας, το πλαστικό κ.ά., ανάλογα με την ηλεκτρική ενέργεια που θέλουμε να αποθηκεύει ο εκάστοτε πυκνωτής. Η διηλεκτρική σταθερά του υλικού που περιέχεται ανάμεσα στις παράλληλες πλάκες καθορίζει και την αποθηκευόμενη ενέργεια. Οι δύο αγωγοί ονομάζονται οπλισμοί του πυκνωτή, ενώ το υλικό που περιέχεται μεταξύ των οπλισμών ονομάζεται διηλεκτρικό του πυκνωτή. Βασικό χαρακτηριστικό κάθε πυκνωτή, καθώς και η χρησιμότητά του, είναι η ιδιότητά του να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια. Όταν ένας πυκνωτής είναι φορτισμένος, οι οπλισμοί του έχουν ηλεκτρικά φορτία κατά μέτρο ίσα και αντίθετα. Το φαινόμενο αυτό του αντίθετου φορτίου στον κάθε οπλισμό προκύπτει λόγω της κίνησης αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου από τον έναν αγωγό στον άλλον, μέσω της εφαρμογής εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, μέσω της πηγής. Αυτή η κίνηση έχει ως αποτέλεσμα να παραμένει περισσότερο θετικό φορτίο στον έναν από τους δύο οπλισμούς. Ως φορτίο του πυκνωτή (Q_c) λογίζεται το φορτίο του θετικά φορτισμένου οπλισμού του, που είναι ίσο και αντίθετο του φορτίου στον αρνητικό του οπλισμό.

Διαφορά δυναμικού αναπτύσσεται μεταξύ των οπλισμών ενός φορτισμένου πυκνωτή, η οποία ονομάζεται τάση του πυκνωτή (V_c). Το πηλίκο του φορτίου ενός πυκνωτή προς την τάση του ονομάζεται χωρητικότητα του πυκνωτή και συμβολίζεται με το αγγλικό γράμμα C (Capacity):

$$C = \frac{Q}{V}$$

Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας ενός πυκνωτή είναι το Φαράντ (F). Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για εξαιρετικά μεγάλη μονάδα μέτρησης, η οποία σπάνια χρησιμοποιείται στην πράξη, ως αποτέλεσμα αυτού χρησιμοποιούνται τα υποπολλαπλάσιά του: μικροφαράντ (μF), νανοφαράντ (nF), πικοφαράντ (pF) κ.ά.



Εικόνα 1.4 Τυπικές μορφές εμπορικών πυκνωτών.

Ένα αξιοσημείωτο γεγονός το οποίο αφορά τη χωρητικότητα του πυκνωτή είναι ότι δεν εξαρτάται από το φορτίο (Q_c), ούτε από την τάση του (V_c), αλλά είναι σταθερή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι εξαρτάται αποκλειστικά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του και από τη φύση του διηλεκτρικού που περιέχεται σε αυτόν, όπως προαναφέρθηκε, και είναι ανεξάρτητη από το υλικό των οπλισμών του. Η εξίσωση η οποία δίνει την χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι η εξής:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{Q}{V}$$

Όπου:

- C η χωρητικότητα του πυκνωτή
- ε η σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού
- ε_0 η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού
- A το εμβαδόν του κάθε οπλισμού
- D η απόσταση μεταξύ των οπλισμών

Η φόρτιση ενός πυκνωτή επιτυγχάνεται με τη χορήγησή του με ηλεκτρική ενέργεια, όπου ένα μέρος της αποθηκεύεται σε αυτόν με τη μορφή διαφοράς δυναμικού μεταξύ των

οπλισμών. Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε αυτόν είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο φόρτισης του πυκνωτή. Η τιμή της αποθηκευόμενης ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$U_e = \frac{1}{2} CV_c^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QV_c$$

Η δυνατότητά τους να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια και στη συνέχεια να την παρέχουν, μέσω της αποφόρτισής τους, σε ένα κύκλωμα (δρώντας ως πηγές ρεύματος), τούς καθιστούν βασικά στοιχεία κάθε σύγχρονου ηλεκτρονικού κυκλώματος. Κάποιες από τις πολυάριθμες χρήσεις τους είναι σε κυκλώματα εξομάλυνσης τάσης, στις εισόδους και εξόδους των τρανζίστορς κ.ά.

Δύο είναι οι βασικοί τύποι πυκνωτών, ο σταθερός και ο μεταβλητός, αλλά μπορούν να υποδιαιρεθούν σε ηλεκτρολυτικούς και μη ηλεκτρολυτικούς. Η φύση της κατασκευής των πυκνωτών έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση κάποιας αντίστασης και κάποιας επαγωγής. Αυτές ακριβώς οι ανεπιθύμητες ιδιότητές τους, οι οποίες θέτουν περιορισμούς, συχνά καθορίζουν το πεδίο εφαρμογής τους. Εν συντομία αναφέρονται κάποιες λεπτομέρειες των ηλεκτρολυτικών και των μη-ηλεκτρολυτικών πυκνωτών:

- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές: αποτελούνται από μεταλλικές λωρίδες τυλιγμένες εναλλάξ, μια από αλουμίνιο για την άνοδο και μια από χαλκό για την κάθοδο. Οι λωρίδες εμβαπτίζονται σ' έναν ηλεκτρολύτη και τυλίγονται γύρω από ένα κυλινδρικό πηνίο. Στη συνέχεια, το αρχικό φύλλο αλουμινίου χαράσσεται με οξύ, με σκοπό τη δημιουργία πόρων στην επιφάνειά του. Το αποτέλεσμα της κατεργασίας αυτής είναι η αύξηση της ωφέλιμης επιφάνειας. Οι λωρίδες αλουμινίου συγκολλώνται επάνω στα φύλλα που αποτελούν την ηλεκτρική επαφή. Το χάλκινο φύλλο της καθόδου χαράσσεται κατά τον ίδιο τρόπο και επικαλύπτεται προσθέτοντας ένα πολύ λεπτό στρώμα οξειδίου.
- Μη-Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές: οι πυκνωτές αυτοί είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων και υψηλών τάσεων. Μια μεγάλη ποικιλία χρήσιμων ιδιοτήτων για τους πυκνωτές προκύπτει από τον μεγάλο βαθμό ελέγχου που μπορούμε να ασκήσουμε στη χημική σύνθεση των κεραμικών διηλεκτρικών. Οι υψηλές διηλεκτρικές σταθερές που επιτυγχάνονται έχουν ως αποτέλεσμα πολύ υψηλή χωρητικότητα ανά μονάδα όγκου.

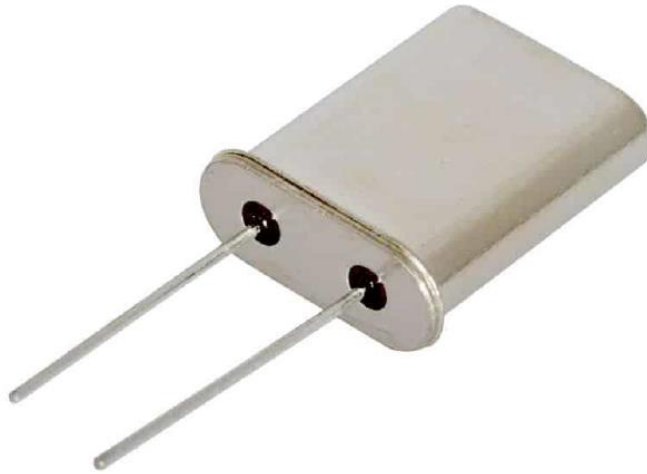
1.4 Κρυσταλλικός Ταλαντωτής

Άλλο ένα πολύ χρήσιμο ηλεκτρικό στοιχείο είναι οι κρυσταλλικοί ταλαντωτές. Μπορούν να παρομοιαστούν και με ηλεκτρονικό κύκλωμα ταλάντωσης με πολύ συγκεκριμένη συχνότητα η οποία παράγεται από τον μηχανικό συντονισμό ενός δονούμενου πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου για τη δημιουργία ηλεκτρικού σήματος [2]. Η συχνότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή σταθερού σήματος ρολογιού για ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα καθώς και για τη σταθεροποίηση συχνοτήτων για πομπούς και δέκτες.

Ο πιο κοινός τύπος πιεζοηλεκτρικού υλικού που χρησιμοποιείται είναι ο κρύσταλλος χαλαζία, οπότε τα κυκλώματα ταλαντωτών που τα ενσωματώνουν έγιναν γνωστά ως ταλαντωτές κρυστάλλου. Πέραν του χαλαζία, και άλλα πιεζοηλεκτρικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως για παράδειγμα τα πολυκρυσταλλικά κεραμικά, που χρησιμοποιούνται σε παρόμοια κυκλώματα.

Ένας κρυσταλλικός ταλαντωτής, και ειδικότερα ένας που χρησιμοποιεί έναν κρύσταλλο χαλαζία, λειτουργεί με παραμόρφωση του κρυστάλλου με ένα ηλεκτρικό πεδίο, όταν εφαρμόζεται τάση σε ένα ηλεκτρόδιο κοντά ή πάνω στον κρύσταλλο. Η ιδιότητα αυτή είναι γνωστή ως ηλεκτροσυστολή ή αλλιώς αντίστροφη πιεζοηλεκτρική ενέργεια. Όταν αφαιρείται το ηλεκτρικό πεδίο, ο χαλαζίας - που ταλαντεύεται με ακριβή συχνότητα - δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο καθώς επιστρέφει στο προηγούμενο σχήμα του, και αυτό μπορεί να δημιουργήσει τάση. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο κρύσταλλος χαλαζία συμπεριφέρεται σαν κύκλωμα RLC, αλλά με πολύ υψηλότερο φορτίο.

Οι κρύσταλλοι χαλαζία κατασκευάζονται για συχνότητες από μερικές δεκάδες ΚHz έως εκατοντάδες MHz. Πάνω από δύο δισεκατομμύρια κρύσταλλοι παράγονται ετησίως, από τους οποίους οι περισσότεροι χρησιμοποιούνται για καταναλωτικές συσκευές όπως ρολόγια χειρός, ρολόγια, ραδιόφωνα, υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα. Επιπλέον, οι κρύσταλλοι χαλαζία χρησιμοποιούνται επίσης στον εξοπλισμό δοκιμών και μετρήσεων, παραδείγματος χάριν σε μετρητές, γεννήτριες σημάτων και παλμογράφους.



Εικόνα 1.5 Κρυσταλλικός Ταλαντωτής

1.5 Δίοδος Εκπομπής Φωτός (LED)

Ως δίοδος εκπομπής φωτός αποκαλείται ένας ημιαγωγός, ο οποίος εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία στενού φάσματος, δηλαδή συγκεκριμένου χρώματος, όταν πολώνεται ορθά από μια τάση [2]. Η χημική σύσταση του ημιαγωγού είναι αυτή που θα καθορίσει το εκπεμπόμενο χρώμα, και μπορεί να είναι υπεριώδες, ορατό ή υπέρυθρο. Το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται, και κατά συνέπεια το χρώμα του, εξαρτάται από το χάσμα ενέργειας των υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του περάσματος p-n, όπου p είναι το υλικό εμπλουτισμένο με οπές ενώ n είναι το υλικό εμπλουτισμένο με ηλεκτρόνια.

Η βασική αρχή των LED είναι μια επαφή p-n η οποία πολώνεται ορθά για να εγχείει ηλεκτρόνια και οπές μέσα στις p- και n- πλευρές αντίστοιχα. Το εγχεόμενο φορτίο μειονότητας επανασυνδέεται με το φορτίο πλειονότητας στην περιοχή απογύμνωσης ή στην ουδέτερη περιοχή. Σε ημιαγωγούς αμέσου διακένου η επανασύνδεση οδηγεί σε εκπομπή φωτός αφού η ακτινοβόλα επανασύνδεση κυριαρχεί σε υλικά υψηλής ποιότητας. Σε υλικά έμμεσου χάσματος, η απόδοση εκπομπής φωτός είναι αρκετά φτωγή και οι περισσότερες από τις διαδρομές επανασύνδεσης είναι μη ακτινοβόλες με παραγωγή θερμότητας μάλλον παρά φωτός.



Εικόνα 1.6 Δίοδοι Φωτοεκπομπής (LED)

Κάποιες από τις βασικές κατηγορίες των διόδων αυτών είναι οι εξής:

- LED ετεροεπαφής υψηλής τάσεως. Ως ομοεπαφή ορίζεται μια ένωση p-n ανάμεσα σε δύο ημιαγωγούς με διαφορετικό εμπλουτισμό φορτίων. Οι ημιαγωγοί αυτοί αποτελούνται από το ίδιο υλικό, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν το ίδιο ενεργειακό διάκενο. Αντιστοίχως, ως ετεροεπαφή ονομάζεται μια ένωση ανάμεσα σε δύο ημιαγωγούς με διαφορετικό ενεργειακό διάκενο. Επιπλέον, ως ετεροδομή χαρακτηρίζεται μια διάταξη ημιαγωγών, η οποία αποτελείται από την ένωση υλικών με διαφορετικό ενεργειακό διάκενο. Οι δίοδοι LED, οι οποίοι κατασκευάζεται από έναν απλό ημιαγωγό, παρουσιάζουν έναν αριθμό προβλημάτων, ο οποίος επιδρά αρνητικά στην απόδοση της συσκευής. Το σημαντικότερο πρόβλημα είναι ότι οι δίοδοι LED οι οποίοι κατασκευάζονται από ένα υλικό (ομοιοδομή) πρέπει να εκπέμπουν κοντά στην επιφάνεια, ώστε τα εκπεμπόμενα φωτόνια να μην απορροφώνται ξανά. Όμως, κοντά στην επιφάνεια η ποιότητα του ημιαγωγού παρουσιάζει πολλές ατέλειες και προκαλείται μεγάλος αριθμός μη ακτινοβόλων επανασυνδέσεων. Επιπλέον, τα ηλεκτρόνια που εγχέονται από την αρνητική πλευρά στη θετική πλευρά της ημιαγωγικής δομής μπορούν να διαχυθούν σε μεγάλες αποστάσεις πριν επανασυνδεθούν με οπές, με αποτέλεσμα ο ενεργός όγκος από τον οποίο εξέρχονται τα φωτόνια να είναι πολύ

μεγάλος. Για τους λόγους αυτούς, καθώς και για αρκετούς ακόμα, οι επιστήμονες έχουν στραφεί στις διόδους LED ετεροδομής.

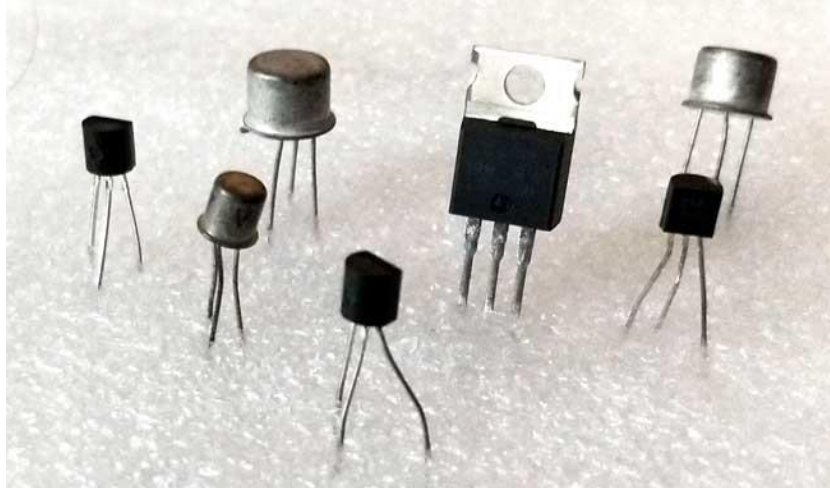
- LED εκπομπής άκρου. Σημαίνοντα ρόλο στην οπτική επικοινωνία αποτελεί η απόδοση σύζευξης του φωτός που εκπέμπει μια δίοδος LED με μια οπτική ίνα. Απαραίτητη προϋπόθεση για να πραγματοποιηθεί μια ικανοποιητική σύζευξη είναι η ύπαρξη μιας ευθυγραμμισμένης δέσμης. Η λυχνία εκπομπής άκρου (edge emitting LED) κατασκευάζεται με τη χρήση ετεροδομών. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της είναι ότι τα στρώματα μεγάλου ενεργειακού χάσματος αναγκάζουν τα εκπεμπόμενα φωτόνια να κινηθούν κατά μήκος του άξονα της λυχνίας και να εξέρχονται από το άκρο της συσκευής.
- LED Εκπομπής Επιφάνειας. Σημαντική κατηγορία των διόδων LED είναι η εκπομπής επιφάνειας (surface emitting LED). Η λυχνία είναι μια LED ετεροδομή με περιοχή χαμηλού ενεργειακού χάσματος, η οποία περιβάλλεται από περιοχές μεγάλου ενεργειακού χάσματος. Τα φωτόνια που εκπέμπονται συζευγνύονται απ' ευθείας στην οπτική ίνα.

1.6 Τρανζίστορ

Το τρανζίστορ (αγγλικά: transistor) είναι διάταξη ημιαγωγών στερεάς κατάστασης, η οποία βρίσκει διάφορες εφαρμογές στην ηλεκτρονική [2]. Οι συνηθέστερες εξ αυτών είναι:

- η ενίσχυση, η σταθεροποίηση τάσης
- η διαμόρφωση συχνότητας
- η λειτουργία ως διακόπτης
- η λειτουργία ως μεταβλητή ωμική αντίσταση.

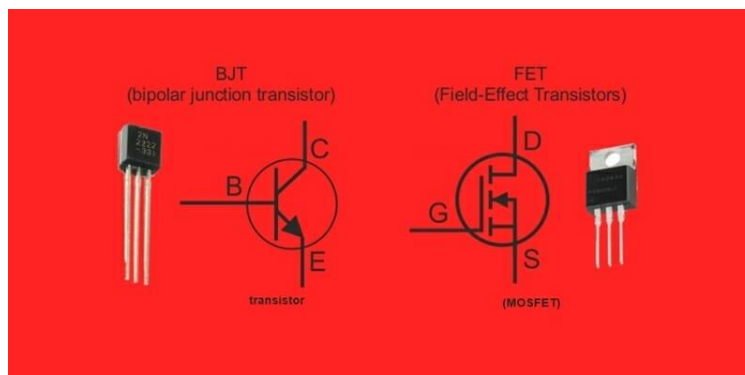
Η τάση με την οποία πολώνεται το τρανζίστορ μπορεί να ρυθμίζει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που απορροφά από την πηγή τάσης με την οποία είναι συνδεδεμένο. Τα τρανζίστορ εντοπίζονται στην αγορά είτε ως ξεχωριστά ηλεκτρονικά εξαρτήματα είτε ως τμήματα κάποιου ολοκληρωμένου κυκλώματος.



Εικόνα 1.7 Τρανζίστορ

Το τρανζίστορ θεωρείται μία από τις μεγαλύτερες εφευρέσεις του 20ου αιώνα, γεγονός που οδήγησε τους εφευρέτες του στην κατάκτηση του βραβείου Νόμπελ, και αποτελεί το κυριότερο συστατικό όλων των σύγχρονων ηλεκτρονικών διατάξεων. Παρότι αρκετοί παραγωγοί κατασκευάζουν μεμονωμένα τρανζίστορ, η μεγαλύτερη ποσότητα παράγεται μέσα σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, τα λεγόμενα και τσιπς. Τα βασικά είδη των τρανζίστορ είναι τα εξής:

- Διπολικό τρανζίστορ επαφής – BJT. Τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor) ήταν τα ευρύτερα διαδεδομένα τρανζίστορ στις δεκαετίες του 1960 και 1970. Ούτε η ανακάλυψη και η χρήση των MOSFET δεν κατάφερε να εξαλείψει τη χρήση τους, μιας και χρησιμοποιούνται κυρίως σε αναλογικά κυκλώματα, όπως οι απλοί ενισχυτές, λόγω της γραμμικότητας που παρουσιάζει το σήμα τους και της απλότητας κατασκευής τους.

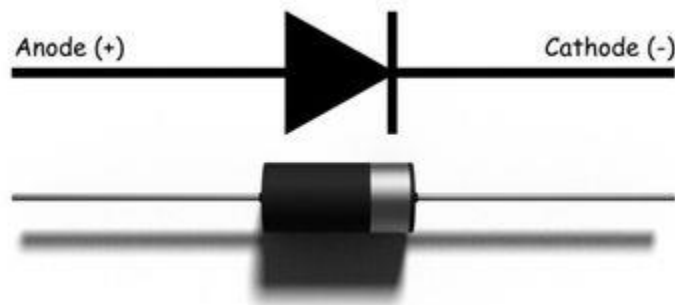


Εικόνα 1.8 Τρανζίστορ BJT και FET.

- Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου – FET. Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου ή FET (Field Effect Transistor) αποτελούνται από τρεις ακροδέκτες. Η λειτουργία του βασίζεται στην εφαρμογή ενός εξωτερικού ηλεκτρικού δυναμικού, το οποίο ελέγχει το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Το δυναμικό αυτό εφαρμόζεται σε μια από τις τρεις εισόδους του τρανζίστορ, τη λεγόμενη πύλη (gate). Το πεδίο αυτό, με τη σειρά του, ελέγχει την αγωγιμότητα μεταξύ των άλλων δυο ακροδεκτών, που ονομάζονται απαγωγός (drain) και πηγή (source). Στα FET, ο έλεγχος γίνεται με το δυναμικό της πύλης, το οποίο καθορίζει το ρεύμα που διέρχεται από αυτούς τους δύο ακροδέκτες μέσω του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Αντιθέτως, στα διπολικά τρανζίστορ, το ρεύμα βάσης είναι αυτό που θα ελέγξει το ρεύμα στην έξοδό του. Τέλος, η αγωγιμότητα γίνεται με έναν τύπο φορέων (οπές ή ηλεκτρόνια) ανάλογα με την πολικότητά τους, οπότε τα τρανζίστορ αυτά χαρακτηρίζονται ως μονοπολικά.

1.7 Δίοδοι

Η δίοδος είναι ένα ηλεκτρονικό στοιχείο το οποίο επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος σε μια κατεύθυνση και απαγορεύει τη διέλευση στην αντίθετη [2]. Συνεπώς, δίοδοι χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα που απαιτούν ροή ρεύματος προς μία μόνο κατεύθυνση. Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των διόδων είναι το πυρίτιο και το γερμάνιο, λόγω των καλών ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων.



Εικόνα 1.9 Δίοδοι

1.8 Μικροελεγκτές

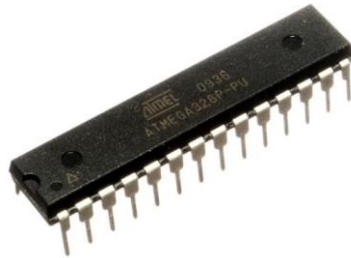
Ως μικροελεγκτής (microcontroller) ορίζεται ένας τύπος επεξεργαστή, ο οποίος βασίζεται, σε τεράστιο βαθμό, στα ενσωματωμένα υποσυστήματα που διαθέτει [2]. Οι μικροελεγκτές, λόγω της χρησιμότητάς τους, απαντώνται σε όλα τα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems) ελέγχου χαμηλού και μεσαίου κόστους. Μερικά παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι τα εξής:

- αυτοματισμοί
- ηλεκτρικές συσκευές
- αυτοκινούμενα τροχοφόρα οχήματα.

Η υπολογιστική ισχύς αποτελεί σημαντική παράμετρο στους σύγχρονους μικροεπεξεργαστές για μη ενσωματωμένα συστήματα. Η ευελιξία με την οποία αναπτύσσονται διαφορετικές εφαρμογές είναι μεγάλη. Αυτό συμβαίνει διότι η λειτουργικότητα του τελικού συστήματος καθορίζεται από τα εξωτερικά περιφερειακά τα οποία διασυνδέονται με την κεντρική μονάδα, η οποία δεν είναι εξειδικευμένη. Αντιθέτως, οι μικροεπεξεργαστές για ενσωματωμένα συστήματα παρουσιάζουν περιορισμένη ευελιξία, καθώς και η υπολογιστική ισχύς. Οι μικροελεγκτές δίνουν έμφαση στον μικρό αριθμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που απαιτείται για τη λειτουργία μιας συσκευής, το χαμηλό κόστος και την εξειδίκευση. Κάποια από τα πλεονεκτήματα των μικροελεγκτών έναντι των μικροεπεξεργαστών είναι τα εξής:

- Δυνατότητα ενσωμάτωσης σύνθετων περιφερειακών υποσυστημάτων (μνήμες, θύρες επικοινωνίας) οι οποίες παρέχουν αυτονομία. Η αυτονομία αυτή που παρουσιάζουν οι μικροελεγκτές τους επιτρέπει να λειτουργούν χωρίς κανένα άλλο ολοκληρωμένο κύκλωμα.
- Ευκολότερη υλοποίηση εφαρμογών λόγω των απλούστερων διασυνδέσεων.
- Χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος.
- Φορητότητα.
- Χαμηλό κόστος.
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία.
- Μειωμένες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές

- Μειωμένη ευαισθησία από άλλες ηλεκτρικές συσκευές.
- Πληθώρα διαθέσιμων ακροδεκτών για χρήση τους ως εισόδους-εξόδους.
- Μικρό μέγεθος συνολικού υπολογιστικού συστήματος.



Εικόνα 1.10 Atmega 328p-pu

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που αποτελεί τον μικροεπεξεργαστή περιέχει μόνο:

- τη Λογική και Αριθμητική Μονάδα (ALU)
- στοιχειώδεις καταχωρητές (registers)
- προσωρινή μνήμη RAM
- τον ελεγκτή μνήμης (memory controller).

Παρόλες τις τεράστιες δυνατότητες των μικροεπεξεργαστών, απαιτούνται πολλά εξωτερικά υποσυστήματα και περιφερειακά με κυριότερα τα εξής:

- Κύκλωμα σύνδεσης των εξωτερικών μνημών και άλλων περιφερειακών με την αρτηρία δεδομένων (data bus) του επεξεργαστή.
- Μνήμη ROM, η οποία περιέχει το λογισμικό του συστήματος.
- Μνήμη RAM.
- Μόνιμη μνήμη αποθήκευσης.
- Κύκλωμα αρχικοποίησης (reset).
- Διαχειριστή αιτήσεων διακοπής (interrupt request controller) από τα περιφερειακά.
- Κύκλωμα επιτήρησης τροφοδοσίας (brown-out detection).
- Κύκλωμα επιτήρησης λειτουργίας (watchdog timer).
- Ρολόι πραγματικού χρόνου (Real Time Clock, RTC).
- Ανεξάρτητες ψηφιακές εισόδους/εξόδους (Parallel Input-Output, PIO).

Κεφάλαιο 2^ο : Φορτιστές Μπαταριών

2.1 Η αγορά των μπαταριών σήμερα

Οικονομικές μελέτες έχουν δείξει ότι η αγορά φορτιστών μπαταριών προβλέπεται ότι έχει ξεπεράσει τα 18,8 δισεκατομμύρια δολάρια εντός του 2022 [3]. Αυτή η αύξηση καθοδηγείται από τις βιομηχανίες τηλεπικοινωνιών, φορητών ηλεκτρονικών, ηλεκτρικών αυτοκινήτων και από την εφαρμογή του λεγόμενου Internet of Things στην καθημερινότητά μας, μέσω των έξυπνων συσκευών. Λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες και τις συνήθειες του σύγχρονου ανθρώπου, απαιτούνται φορτιστές μπαταριών για την αναπλήρωση της φόρτισης σε μια πλήρως αποφορτισμένη μπαταρία.

Ανάλογα με τη μπαταρία, ο αλγόριθμος φόρτισης μπορεί να είναι διαφορετικός. Οι φορτιστές μπαταριών εκτελούν κρίσιμες λειτουργίες, όπως:

- η εξαγωγή ρεύματος από τη διαθέσιμη πηγή ενέργειας
- η ρύθμιση αυτής της ισχύος
- η χρήση της ισχύος για την αναπλήρωση της μπαταρίας με ασφαλή και βελτιστοποιημένο τρόπο
- ο τερματισμός της διαδικασίας φόρτισης για την αποφυγή υπέρτασης και άλλα πιθανά ζητήματα ασφάλειας.

Ο φορτιστής που θα χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση της μπαταρίας παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Κάποια από τα πιθανά σφάλματα που μπορούν να προκύψουν από την εσφαλμένη φόρτιση μπορεί να είναι η υπέρταση, η υπερφόρτιση, η υπερθέρμανση, τα αυξημένα φαινόμενα πόλωσης και ο σχηματισμός δενδρίτη [4]. Οι εναποθέσεις λιθίου στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων έχουν ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό δενδρίτη [5]. Η συνεχής ανάπτυξη των δενδριτών μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη διείσδυση του διαχωριστή, οδηγώντας σε βραχυκύκλωμα τη μπαταρία, με αποτέλεσμα την πρόκληση θερμικής διαφυγής που μπορεί να οδηγήσει σε πυρκαγιά ή ακόμα κι έκρηξη. Επίσης, η υπερφόρτιση μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία και υπερθέρμανση της μπαταρίας [6]. Στον Πίνακα 2.1 απεικονίζονται διαφορετικοί τύποι μπαταριών ιόντων λιθίου, οι οποίοι έχουν διαφορετικές ανώτερες τάσεις ή τάσεις αποκοπής. Η υπέρβαση αυτής της συνιστώμενης τάσης οδηγεί

σε κατάσταση υπέρτασης που τείνει να μειώσει τον κύκλο ζωής της μπαταρίας [7]. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να επιλέξετε τον σωστό αλγόριθμο φόρτισης για να αποτρέψετε αυτές τις ανεπιθύμητες συνθήκες κι επίσης να διασφαλίσετε την ασφάλεια.

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά Διαφορετικών Μπαταριών Ιόντων Λιθίου

| Παράμετροι Μπαταριών | $LiCoO_2$ | $LiFePO_4$ | $LiMn_2O_4$ | NMC | NCA |
|----------------------|-----------|------------|-------------|--------|------------|
| Κύκλος Ζωής | Μέτριος | Καλός | Καλός | Καλός | Καλός |
| Δυνατότητες Ισχύος | Καλές | Καλές | Πολύ Καλές | Καλές | Πολύ Καλές |
| Τάση Μπαταρίας | 4.2V | 3.6V | 4.2V | 4.2V | 4.0V |
| Ασφάλεια | Μέτρια | Πολύ Καλή | Καλή | Μέτρια | Μέτρια |
| Κόστος | x | 2x | 3x | 3x | 2x |
| Πυκνότητα Ενέργειας | Υψηλή | Χαμηλή | Πολύ Υψηλή | Υψηλή | Υψηλή |

2.2 Τεχνικές φόρτισης μπαταριών

Η ανάγκη για τη γρήγορη και αποδοτική φόρτιση των μπαταριών που έχει προκύψει στη σημερινή εποχή έχει οδηγήσει μεγάλο μέρος της επιστημονικής έρευνας να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη τεχνικών για τη φόρτιση των μπαταριών [8]-[13]. Μερικές από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι οι εξής:

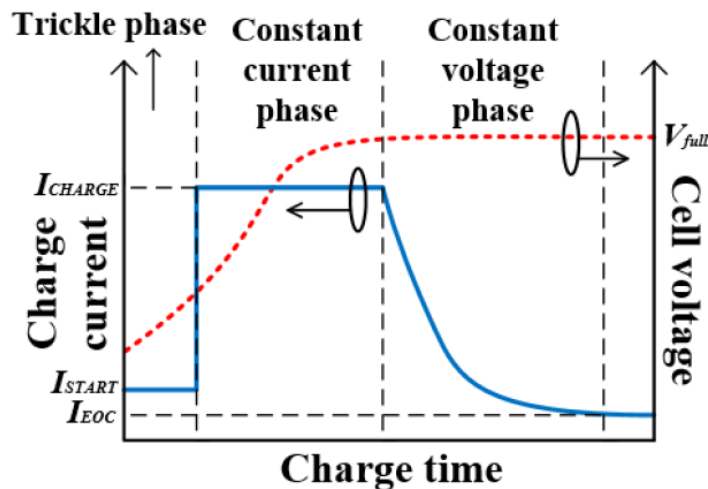
- *Trickle charge*, χρησιμοποιείται όταν εφαρμόζονται μικρά ρεύματα για τη φόρτιση της μπαταρίας.
- *Constant voltage (σταθερής τάσης)*, πρόκειται για την εφαρμογή σταθερή τάσης κατά τη διάρκεια της φόρτισης της μπαταρίας.
- *Constant current (σταθερού ρεύματος)*, πρόκειται για την εφαρμογή σταθερού ρεύματος κατά τη διάρκεια της φόρτισης της μπαταρίας.
- *Pulse charging (παλμική φόρτιση)*, πρόκειται για την εφαρμογή παλμών, πλήρως ελεγχόμενων κατά τη διάρκεια της φόρτισης της μπαταρίας.
- *Burp charging*, είναι παρόμοια με την παλμική φόρτιση, αλλά ένας παλμός αποφόρτισης εφαρμόζεται στις περιόδους “ξεκούρασης”.

- *Constant voltage-constant current* (σταθερής τάσης- σταθερού ρεύματος), πρόκειται για συνδυασμό των τεχνικών σταθερής τάσης και σταθερού ρεύματος.

Οι τεχνικές αυτές θα αναλυθούν εν συνεχεία για την περίπτωση των μπαταριών ιόντων λιθίου, οι οποίες είναι και οι ευρύτερα διαδεδομένες στην αγορά.

2.2.1 Αλγόριθμος Τεχνικής Σταθερής Τάσης – Σταθερού Ρεύματος

Μια από τις βασικές τεχνικές φόρτισης μπαταριών ιόντων λιθίου βασίζεται στον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV και χρησιμοποιείται στους περισσότερους σημερινούς φορτιστές μπαταριών ιόντων λιθίου. Ο αλγόριθμος φόρτισης CC-CV αποτελείται από τρεις φάσεις φόρτισης που φαίνονται στο Εικ. 2.1.



Εικόνα 2.1 Αλγόριθμος Φόρτισης CC-CV

Οι φάσεις φόρτισης της μπαταρίας είναι οι εξής:

- *Trickle charge phase*, όπου σε αυτή τη φάση, ένα πολύ μικρό ρεύμα φόρτισης (I_{START}) χρησιμοποιείται για την προετοιμασία μιας βαθιάς αποφορτισμένης μπαταρίας ιόντων λιθίου. Συνήθως, σε αυτή τη φάση χρησιμοποιείται ρεύμα φόρτισης μικρότερο από 0,1 C. Ως C ορίζεται ο ρυθμός φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας. Δηλαδή εάν η μπαταρία είναι 100mAh και αποφορτίζεται με 50mAh σταθερού ρεύματος, ο ρυθμός αποφόρτισης της θα είναι 0.5C.
- *Constant current phase*, όπου μόλις τελειώσει η trickle phase ή εάν δεν απαιτείται προετοιμασία της μπαταρίας ιόντων λιθίου, ξεκινά η φάση φόρτισης σταθερού

ρεύματος. Ένα σταθερό ρεύμα φόρτισης (*ICHARGE*) χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας. Αυτό το ρεύμα φόρτισης μπορεί να κυμαίνεται από 0,5 C έως 3,2 C, ανάλογα με την εφαρμογή και τα όρια ασφαλείας [14], [15].

Η μπαταρία φορτίζεται πολύ γρήγορα σε αυτήν την περιοχή, λόγω του υψηλού ρεύματος φόρτισης. Πλησιάζει την πλήρη τάση του (*Vfull*) πολύ γρήγορα.

- *Constant voltage charge phase.* Στα τελευταία στάδια φόρτισης, μόλις η τάση της μπαταρίας πλησιάζει την *Vfull*, η φάση φόρτισης μεταβαίνει στη φάση σταθερής τάσης. Σε αυτή τη φάση, εφαρμόζεται σταθερή τάση και μειώνεται το ρεύμα φόρτισης. Αυτό το μειούμενο ρεύμα φόρτισης απαιτείται για την αποφυγή συνθηκών υπερφόρτισης και υπέρτασης. Η φόρτιση τερματίζεται όταν το ρεύμα φόρτισης φτάσει στο *IEOC*. Παρόλο που αυτό το μειούμενο ρεύμα φόρτισης είναι απαραίτητο, λόγω των ιδιοτήτων της μπαταρίας, δηλαδή της περιορισμένης διάχυσης του Li^+ σε αυτό το στάδιο φόρτισης, έχει ως αποτέλεσμα παρατεταμένο χρόνο φόρτισης.

2.2.2 Φορτιστές Τεχνικής Σταθερής Τάσης – Σταθερού Ρεύματος

Ο αλγόριθμος φόρτισης CC-CV συνήθως υλοποιείται χρησιμοποιώντας μετατροπείς μεταγωγής (switching converters) και γραμμικούς ρυθμιστές [16], επομένως, οι φορτιστές μπαταριών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως φορτιστές λειτουργίας διακόπτη ή γραμμικοί φορτιστές, αντίστοιχα. Και οι δύο τύποι φορτιστών ενσωματώνουν πολύπλοκα κυκλώματα (που υποδεικνύεται ως σύστημα διαχείρισης μπαταριών) για να αποκτήσουν τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV και να διασφαλίσουν την ασφάλεια κατά τη φόρτιση.

Οι γραμμικοί φορτιστές συνήθως υλοποιούνται με ρυθμιστές χαμηλής πτώσης (Low Drop Out, LDO). Οι ρυθμιστές LDO αποτελούνται συνήθως από ένα τρανζίστορ διέλευσης T_p και έναν βρόχο ανάδρασης που αποτελείται από έναν λειτουργικό ενισχυτή και δύο αντιστάσεις ανάδρασης, R_1 και R_2 . Ένας γραμμικός φορτιστής είναι επομένως ένας ρυθμιστής LDO που διαθέτει επιπλέον κύκλωμα για την επίτευξη του αλγόριθμου φόρτισης CC-CV. Ένας τυπικός γραμμικός φορτιστής φαίνεται στο Εικ. 2.2. Για να

επιτευχθεί ο αλγόριθμος φόρτισης CC-CV, κι επίσης να διασφαλιστεί η ασφαλής φόρτιση, χρειάζονται αρκετοί βρόχοι ελέγχου.

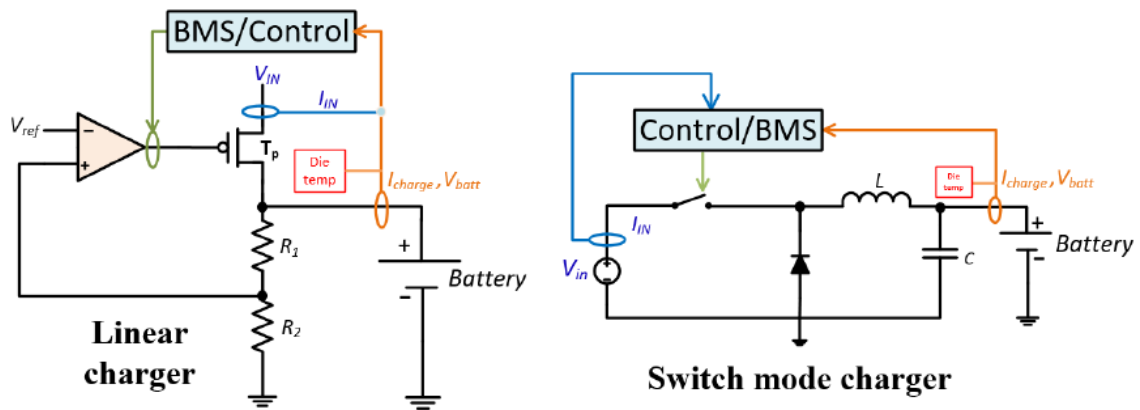
Οι βρόχοι ελέγχου παρακολουθούν την τάση της μπαταρίας V_{batt} και τη φόρτιση τρέχοντος I_{charge} για να διασφαλιστεί ότι επιτυγχάνεται ο σωστός αλγόριθμος φόρτισης και ότι οι προδιαγραφές V_{batt} και I_{charge} είναι εντός των προδιαγραφών του συνόλου. Για τον χειρισμό πολλαπλών πηγών εισόδου, απαιτούνται επίσης βρόχοι ελέγχου για την παρακολούθηση της τάσης εισόδου V_{IN} και του ρεύματος εισόδου I_{IN} . Απαιτείται παρακολούθηση θερμοκρασίας καλουπιού για να αποτραπεί η υπερθέρμανση του γραμμικού κυκλώματος φορτιστή. Σε υψηλά ρεύματα φόρτισης, η θερμοκρασία του καλουπιού αυξάνεται γρήγορα κι επομένως για να αποφευχθεί η ζημιά στο IC, ο έλεγχος θερμοκρασίας της μήτρας μπορεί να μειώσει με ασφάλεια το ρεύμα φόρτισης, για να αποτρέψει οποιαδήποτε περαιτέρω θέρμανση και να διασφαλίσει ότι το IC λειτουργεί εντός της ασφαλούς περιοχής θερμοκρασίας λειτουργίας.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διαφορετικές παραλλαγές γραμμικών φορτιστών. Ορισμένοι επικεντρώνονται στο σημείο μετάβασης μεταξύ των βρόχων CC και CV. Αυτό είναι σημαντικό γιατί η έγκαιρη μετάβαση από CC σε CV θα παρατείνει το χρόνο φόρτισης και η καθυστερημένη μετάβαση μπορεί να οδηγήσει σε συνθήκες υπερφόρτισης. Για να διασφαλιστεί ότι η μετάβαση πραγματοποιείται στο βέλτιστο σημείο, ορισμένες εργασίες έχουν προτείνει την αντιστάθμιση της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας, η οποία προκαλεί την τάση φόρτισης της μπαταρίας να είναι υψηλότερη από την ιδανική τάση μπαταρίας [17]. Άλλοι έχουν επίσης προτείνει τη χρήση κυκλωμάτων ομαλής μετάβασης. Για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας φόρτισης, ορισμένες εργασίες στη βιβλιογραφία έχουν προτείνει τη χρήση προσαρμοστικών πηγών τάσης και ρεύματος [18]. Υπάρχουν επίσης πολλοί εμπορικοί γραμμικοί φορτιστές στην αγορά, από εταιρείες όπως η Maxim Integrated, η Texas Instruments, η Analog Devices και η Richtek Technology, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εφαρμογές.

2.2.3 Φορτιστές Αλλαγής Ρυθμού (Switch Mode)

Οι φορτιστές λειτουργίας μεταγωγής μπορούν να υλοποιηθούν με μετατροπείς buck, boost ή buck-boost. Η Εικ. 2.2 δείχνει μια γενικευμένη υλοποίηση ενός μετατροπέα buck με πολλαπλούς βρόχους ελέγχου για ασφαλή φόρτιση κι επίτευξη του αλγόριθμου φόρτισης CC-CV. Παρόμοια με τον γραμμικό φορτιστή, αυτοί οι πολλαπλοί βρόχοι ελέγχου χρειάζονται για να διασφαλιστεί ότι η θερμοκρασία βρίσκεται μεταξύ προδιαγεγραμμένων προδιαγραφών.

Οι φορτιστές που βασίζονται σε μετατροπέα Buck χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές όπου η τάση εισόδου δεν θα υπερβαίνει ποτέ την τάση εξόδου, π.χ. εφαρμογές για κινητά τηλέφωνα. Οι φορτιστές που βασίζονται σε μετατροπέα ενίσχυσης χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως η συλλογή ενέργειας, όπου η τάση εισόδου δεν είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει το ηλεκτρικό φορτίο, ενώ οι φορτιστές που βασίζονται σε μετατροπέα buck-boost μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε σενάριο. Υπάρχουν άλλοι τύποι φορτιστών διακόπτη λειτουργίας που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία. Αυτά περιλαμβάνουν φορτιστές βασισμένους σε μετατροπείς συντονισμού [19], φορτιστές μετατροπέα πλήρους γέφυρας [20] και φορτιστές μετατροπέα flyback [21]. Όλοι αυτοί οι φορτιστές εφαρμόζουν τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV.



Εικόνα 2.2 Κυκλωματικό ισοδύναμο γραμμικού φορτιστή και φορτιστή αλλαγής ρυθμού που εφαρμόζονται στον αλγόριθμο CC-CV

Παρόμοια με τους γραμμικούς φορτιστές, προηγούμενες εργασίες στη βιβλιογραφία αναζητούν τρόπους για να εξασφαλίσουν μια ομαλή μετάβαση μεταξύ των περιοχών CC και CV [22]. Άλλοι στοχεύουν συγκεκριμένες εφαρμογές και μετρήσεις υψηλής απόδοσης κι ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας. Εμπορικοί φορτιστές μεταγωγής διατίθενται επίσης στην αγορά από εταιρείες όπως η Richtek Technology, η Texas Instruments, η Maxim Integrated και η STMicroelectronics.

Τόσο ο γραμμικός φορτιστής μπαταρίας όσο και ο φορτιστής λειτουργίας μεταγωγής απαιτούν πολύπλοκα κυκλώματα για την εφαρμογή του αλγόριθμου φόρτισης CC-CV. Συνολικά, οι φορτιστές μπαταριών ιόντων λιθίου πρέπει να μπορούν να παρέχουν ασφαλή φόρτιση χωρίς συμβιβασμούς στον χρόνο φόρτισης, να αποτρέπουν τη φθορά της μπαταρίας, να αυξάνουν τη φόρτιση της μπαταρίας και την ενεργειακή απόδοση και να τερματίζουν τη φόρτιση όταν χρειάζεται. Το κύριο μειονέκτημα του αλγόριθμου φόρτισης CC-CV, εκτός από το πολύπλοκο κύκλωμα, είναι ο εκτεταμένος χρόνος φόρτισης λόγω της φάσης φόρτισης σταθερής τάσης. Προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος φόρτισης, χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια της μπαταρίας και του χρήστη, αυξάνοντας παράλληλα την ενέργεια της μπαταρίας και την απόδοση φόρτισης και ταυτόχρονα τη χρήση απλών κυκλωμάτων, ο αλγόριθμος φόρτισης παλμών χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία και θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3^ο : Παλμικοί Φορτιστές

Η παλμική φόρτιση είναι η εφαρμογή προσεκτικά ελεγχόμενων παλμών ρεύματος φόρτισης με σκοπό τη φόρτιση μιας μπαταρίας. Είναι μια άλλη τεχνική για την επίτευξη γρήγορης φόρτισης και καλύτερης απόδοσης φόρτισης μπαταρίας χωρίς αυξημένο κόστος και περίπλοκους αλγόριθμους φόρτισης. Η τέχνη της παλμικής φόρτισης μπορεί να εντοπιστεί στη δεκαετία του 1900, όταν ο David H. Wilson πρότεινε μια μέθοδο για τη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την αποθήκευση ενέργειας σε μια μπαταρία [23].

Η παλμική φόρτιση έχει τραβήξει σιγά σιγά την προσοχή των OEM (Original Equipment Manufacturers), μέσω κάποιων προϊόντων που διατίθενται στην αγορά σήμερα. Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για μπαταρίες μολύβδου οξέος, και χρησιμοποιήθηκε επίσης για την εξάλειψη της θείωσης. Πρόσφατα, η παλμική φόρτιση έχει εφαρμοστεί σε μπαταρίες ιόντων λιθίου. Αυτοί οι παλμοί ρεύματος παλμικής φόρτισης έχουν τις ακόλουθες παραμέτρους:

- συχνότητα
- κύκλο λειτουργίας και πλάτος

που πρέπει να επιλεγούν προσεκτικά για να διασφαλιστεί η ασφαλής και γρήγορη φόρτιση με βελτιωμένη φόρτιση και ενεργειακή απόδοση.

3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά της Παλμικής Φόρτισης και Επικέντρωση σε Μπαταρίες Λιθίου

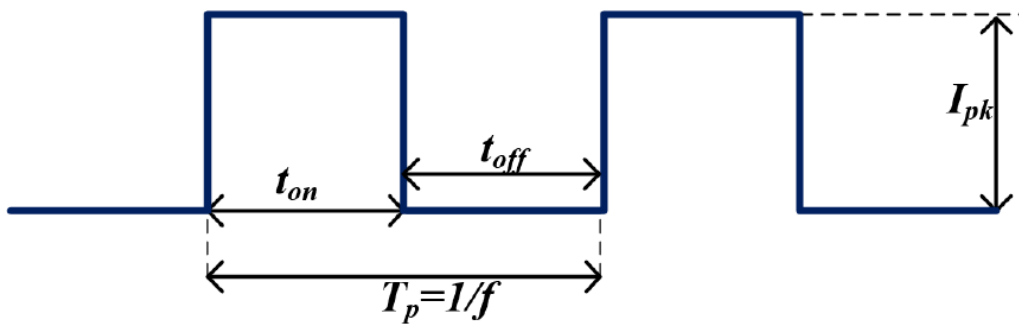
Η χρήση παλμών ρεύματος για τη φόρτιση μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι αποτελεσματική για την αύξηση της φόρτισης της μπαταρίας και της ενεργειακής απόδοσης κι επίσης για τη μείωση του χρόνου φόρτισης. Κατά τη φόρτιση, εάν ο ρυθμός με τον οποίο το Li^+ μειώνεται ηλεκτροχημικά στο ηλεκτρόδιο γραφίτη είναι υψηλότερος από τον ρυθμό με τον οποίο το Li^+ παρεμβάλλεται στον γραφίτη (στην περίπτωση υψηλού ρυθμού φόρτισης ή πλησιάζει το τέλος φόρτισης), τότε η συσσώρευση θα συμβεί στη διεπιφάνεια γραφίτη-ηλεκτροδίου, αυξάνοντας την πόλωση της συγκέντρωσης και τη δυνατότητα για ανάπτυξη δενδριτών [24].

Λόγω της μειωμένης συγκέντρωσης και, ως εκ τούτου, της περιορισμένης διάχυσης του Li^+ κατά το μεταγενέστερο στάδιο της φόρτισης, η φάση σταθερής τάσης μιας CC-CV τεχνικής φόρτισης χρησιμοποιεί μειούμενο ρεύμα φόρτισης, αυξάνοντας έτσι τον χρόνο φόρτισης. Ωστόσο, αυτό το πρόβλημα του παρατεταμένου χρόνου φόρτισης αποφεύγεται στην παλμική φόρτιση λόγω των περιόδων χαλάρωσης μεταξύ των παλμών. Αυτό εξαλείφει την πόλωση της συγκέντρωσης, η οποία παρεμβαίνει στην κίνηση των ιόντων και διασφαλίζει την ισορροπία μεταξύ των ηλεκτροδίων, δηλαδή οι αντιδράσεις φορτίου μπορούν να σταθεροποιηθούν [25]. Από αυτή την άποψη, ο επόμενος παλμός φόρτισης απορροφάται αποτελεσματικά, αυξάνοντας έτσι τη μεταφορά του ρυθμού ισχύος και ως εκ τούτου μειώνοντας τον χρόνο φόρτισης. Επιτρέπει επίσης τη φόρτιση της μπαταρίας με υψηλούς ρυθμούς φόρτισης, καθώς οι περίοδοι χαλάρωσης μεταξύ των παλμών επιτρέπουν στα ιόντα να παρεμβάλλονται στο ηλεκτρόδιο.

Η παλμική φόρτιση είναι επίσης μια αποτελεσματική μέθοδος για την αύξηση του κύκλου ζωής μιας μπαταρίας, δηλαδή, εξαλείφονται οι ατελείς χημικές αντιδράσεις που αυξάνουν την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, βελτιώνοντας έτσι την υγεία της μπαταρίας. Ο αλγόριθμος παλμικής φόρτισης είναι επομένως μια καλή τεχνική φόρτισης για ασφαλή, γρήγορη και αποτελεσματική φόρτιση της μπαταρίας.

Κάθε παλμός ρεύματος φόρτισης έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Duty Cycle (κύκλος λειτουργίας) (D), αναφέρεται στο πλάτος του παλμού φόρτισης, t_{on} συγκριτικά με την περίοδο του παλμού $T_p = t_{on} + t_{off}$, $D = t_{on}/T_p$.
- Frequency (συχνότητα) (f), είναι το αντίστροφο μέγεθος της περιόδου T_p .
- Amplitude (πλάτος) (I_{pk}), είναι η μέγιστη τιμή του παλμού ρεύματος.



Εικόνα 3.1 Χαρακτηριστικά ρευματικού παλμού φόρτισης.

Οι διαφορετικοί συνδυασμοί κύκλου λειτουργίας, πλάτους και συχνότητας ενός ρεύματος παλμικής φόρτισης θα οδηγήσουν σε διαφορετικές μετρήσεις απόδοσης εξόδου μπαταρίας, δηλαδή χρόνο φόρτισης, φόρτιση μπαταρίας κι ενεργειακή απόδοση και κύκλο ζωής. Επομένως, είναι σημαντικό να επιλέξετε τις σωστές τιμές για να διασφαλίσετε τη βέλτιστη απόδοση του κυκλώματος παλμικής φόρτισης και της μπαταρίας.

Η επιλογή συχνότητας των παλμών είναι σημαντική, αφού η απόκριση της μπαταρίας θα ποικίλλει ανάλογα με την επιλεγμένη συχνότητα. Σε χαμηλές συχνότητες, τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας είναι κυρίαρχα [26]. Επιπλέον, σε αυτή την περιοχή λειτουργίας, το Z_w κυριαρχεί και γίνεται μεγαλύτερο καθώς μειώνεται η συχνότητα. Αυτό συμβαίνει επειδή, σε αυτή την περιοχή, οι διαχύσεις ιόντων στο ηλεκτρόδιο είναι περιορισμένες. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, ο παράλληλος συνδυασμός του πυκνωτή διπλής στρώσης και της αντίστασης μεταφοράς φορτίου αρχίζει να έχει επίδραση. Η μεταφορά ενέργειας οφείλεται κυρίως στα επιφανειακά φορτία που βρίσκονται στα ηλεκτρόδια. Σε αυτό το εύρος μεσαίας συχνότητας, όταν εφαρμόζεται ρεύμα φόρτισης παλμού, η συμπεριφορά της θερμοκρασίας της επιφάνειας της μπαταρίας είναι αντίστοιχη με αυτή που εμφανίζεται στην τεχνική φόρτισης CC-CV [26].

Θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη ο κύκλος λειτουργίας των παλμών. Ένας υψηλότερος κύκλος λειτουργίας θα έχει ως αποτέλεσμα ταχύτερη φόρτιση, αλλά θα κάνει την μπαταρία να είναι επιρρεπής σε συνθήκες υπερφόρτισης και υπέρτασης λόγω αύξησης της πόλωσης συγκέντρωσης, η οποία περιορίζει την κίνηση του ιόντων. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν μπορούν να απορροφήσουν την υπερφόρτιση, επομένως μια κατάσταση υπερφόρτισης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας και σε ενδεχόμενη θερμική διαφυγή [27]. Ένας χαμηλότερος κύκλος λειτουργίας θα έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο χρόνο φόρτισης, αλλά παρέχει επίσης καλύτερη απόδοση φόρτισης της μπαταρίας, καθώς οι επιμήκεις περιόδους ανάπαυσης δίνουν χρόνο στα ιόντα να παρεμβληθούν στο ηλεκτρόδιο.

Το πλάτος του ρεύματος αιχμής μπορεί να επηρεάσει την ασφάλεια της φόρτισης, καθώς τα υψηλά ρεύματα αιχμής μπορούν να οδηγήσουν σε γρήγορη φόρτιση, αλλά ο κίνδυνος υπέρτασης και αύξησης της θερμοκρασίας είναι υψηλός. Η χρήση υψηλού πλάτους ρεύματος απαιτεί την ενσωμάτωση μεγαλύτερων περιόδων ανάπαυσης για να

αποτραπεί η συσσώρευση ιόντων στη διεπιφάνεια του ηλεκτροδίου. Οι μεγαλύτερες περίοδοι ανάπαυσης θα επιτρέψουν στα ιόντα να παρεμβάλλονται στο ηλεκτρόδιο, αλλά αυτό επεκτείνει τον χρόνο φόρτισης. Τα μικρότερα πλάτη ρεύματος απαιτούν μικρότερες περιόδους ανάπαυσης, αλλά μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε παρατεταμένο χρόνο φόρτισης.

Επομένως, είναι απαραίτητο να επιλέξετε τις παραμέτρους παλμικής φόρτισης που θα βελτιώσουν την ασφάλεια, θα μειώσουν το δυναμικό συγκέντρωσης, θα αυξήσουν τη φόρτιση της μπαταρίας και την ενεργειακή απόδοση κι επίσης θα μειώσουν τον χρόνο φόρτισης.

3.2 Ανασκόπηση Εφαρμογών Παλμικής Φόρτισης σε Μπαταρίες Λιθίου

Έχουν προταθεί αρκετοί φορτιστές που χρησιμοποιούν αλγόριθμους παλμικής φόρτισης. Άλλες μελέτες έχουν επίσης διεξαχθεί σχετικά με τη χρήση παλμικής φόρτισης με μπαταρίες ιόντων λιθίου. Έχουν προταθεί διαφορετικοί τρόποι υλοποίησης του αλγόριθμου ρύθμισης του παλμού και αυτό είχε ως αποτέλεσμα διαφορετικούς χρόνους φόρτισης, απόδοση φόρτισης και αποτελέσματα κύκλου ζωής. Προσφάτως προτάθηκε μια τεχνική παλμικής φόρτισης που βασίζεται στη βέλτιστη λειτουργία αναζήτησης για τον κύκλο λειτουργίας και τη συχνότητα για κατανεμημένα πολλαπλά κελιά [28]. Η αναζήτηση της συχνότητας έγινε θέτοντας μια αρχική συχνότητα σε κύκλο λειτουργίας 50% και χρησιμοποιώντας μια βηματική διαδικασία. Το ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε βήμα από έναν αλγόριθμο και να αντικατασταθεί αντιστοίχως. Μετά την απόκτηση αυτής της βέλτιστης συχνότητας, όπου η αναζήτηση για τον κύκλο λειτουργίας ξεκίνησε από μια αρχικοποιημένη τιμή, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε φόρτιση για πέντε δευτερόλεπτα, και ύστερα προσδιορίστηκε το μέσο ρεύμα. Σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο, εάν το μέσο ρεύμα ήταν κάτω από ένα συγκεκριμένο προκαθορισμένο όριο, ο κύκλος λειτουργίας θα αυξανόταν κατά 10%. Η διαδικασία της ανάδρασης συνεχίστηκε έως ότου ο κύκλος λειτουργίας έφτασε στο 90% ή το SoC (State of Charge) έφτασε στο 80%. Οι αλγόριθμοι υλοποιήθηκαν σε λογισμικό και οι παλμοί δημιουργήθηκαν από έναν μικροελεγκτή. Η προτεινόμενη μέθοδος, κατά τη φόρτιση από 0% σε 80% SoC, είχε ως

αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου φόρτισης κατά 18,6% σε σύγκριση με τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV.

Επιπλέον έχει προταθεί ένας αλγόριθμος φόρτισης παλμών μεταβλητής συχνότητας, μετρώντας το μέσο ρεύμα σε παλμούς σταθερού πλάτους σε διαφορετικές συχνότητες [29]. Η συχνότητα στην οποία εμφανίστηκε το μέγιστο ρεύμα θεωρήθηκε η βέλτιστη συχνότητα. Αυτός ο προτεινόμενος αλγόριθμος υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας έναν μικροεπεξεργαστή, έναν ρυθμιστή τάσης και ένα ζεύγος τρανζίστορ. Μέσω λογισμικού, εφαρμόστηκαν οι λειτουργίες αναζήτησης και φόρτισης για να βρεθεί η βέλτιστη συχνότητα φόρτισης της μπαταρίας ιόντων λιθίου. Καταγράφηκε βελτίωση του χρόνου φόρτισης κατά 24% σε σύγκριση με τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV.

Σαν προέκταση της προηγούμενης προσπάθειας, προτάθηκε ένα σύστημα φόρτισης με έναν βέλτιστο αλγόριθμο αναζήτησης κύκλου εργασίας [30]. Εφαρμόζοντας την αναζήτηση για βέλτιστο κύκλο λειτουργίας, η οποία βασίζεται στη διαδοχική φόρτιση της μπαταρίας χρησιμοποιώντας παλμούς με διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας και μετρώντας το μέσο ρεύμα για να προσδιοριστεί εάν ο εφαρμοζόμενος κύκλος λειτουργίας είχε ως αποτέλεσμα καλύτερες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, θα μπορούσε να βρεθεί ο βέλτιστος κύκλος λειτουργίας. Αυτός ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε έναν μικροεπεξεργαστή και χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με έναν ρυθμιστή τάσης, μια αντίσταση ανίχνευσης ρεύματος, έναν λειτουργικό ενισχυτή και ένα τρανζίστορ για τη φόρτιση μιας μπαταρίας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης του χρόνου φόρτισης και της φόρτισης της μπαταρίας κατά 14% και 3,4%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV.

Οι Purushothaman et al. [30] εξέτασαν διάφορους αλγόριθμους φόρτισης παλμών μέσω μιας διαδικασίας μοντελοποίησης. Ένα μοντέλο μπαταρίας ιόντων λιθίου που βασίζεται στη μακρο-ομογενή ανάλυση του τρόπου διάχυσης των ιόντων λιθίου χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των αλγορίθμων CC-CV και παλμικής φόρτισης. Με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε, δοκιμάστηκαν διαφορετικές κυματομορφές με ποικίλα πλάτη παλμών, περίοδοι ανάπαυσης και πλάτη και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η γρήγορη φόρτιση μπορούσε να

επιτευχθεί χωρίς επιβλαβείς επιπτώσεις χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο παλμικής φόρτισης.

Από τις προηγούμενες εργασίες που συζητήθηκαν, οι αλγόριθμοι φόρτισης παλμών παρέχουν καλά οφέλη εάν οι παράμετροι ρεύματος παλμικής φόρτισης επιλεγούν σωστά. Ένα από τα μειονεκτήματα αυτών των εργασιών που αναφέρθηκαν είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα όταν πρόκειται για την υλοποίηση των αλγορίθμων με αποτέλεσμα να χρειάζονται μικροελεγκτές ή μικροεπεξεργαστές που καταναλώνουν επιπλέον ισχύ και χώρο στην πλακέτα. Είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί ένα σύστημα φόρτισης μπαταρίας που να αντιμετωπίζει αυτά τα μειονεκτήματα, λαμβάνοντας υπόψη τον μειωμένο χρόνο φόρτισης, την αυξημένη φόρτιση της μπαταρίας και την ενεργειακή απόδοση, την ασφάλεια και τον σχεδιασμό μικρού μεγέθους.

3.3 Εφαρμογή Παλμικής Φόρτισης σε Φορτιστές για IoT Εφαρμογές

Τη σημερινή εποχή, όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές έχουν αποκτήσει τη δυνατότητα να μεταφέρουν δεδομένα μέσω του διαδικτύου. Οι συσκευές αυτές δεν είναι εξειδικευμένες, τουναντίον άπτονται των καθημερινών αναγκών του κάθε ανθρώπου. Μερικά παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι τα λεγόμενα έξυπνα ρολόγια, τα έξυπνα τηλέφωνα, εμφυτεύσιμες συσκευές που αποσκοπούν στη βελτίωση των παροχών υγείας στους ασθενείς, ηλεκτρικά ψυγεία κ.ά.

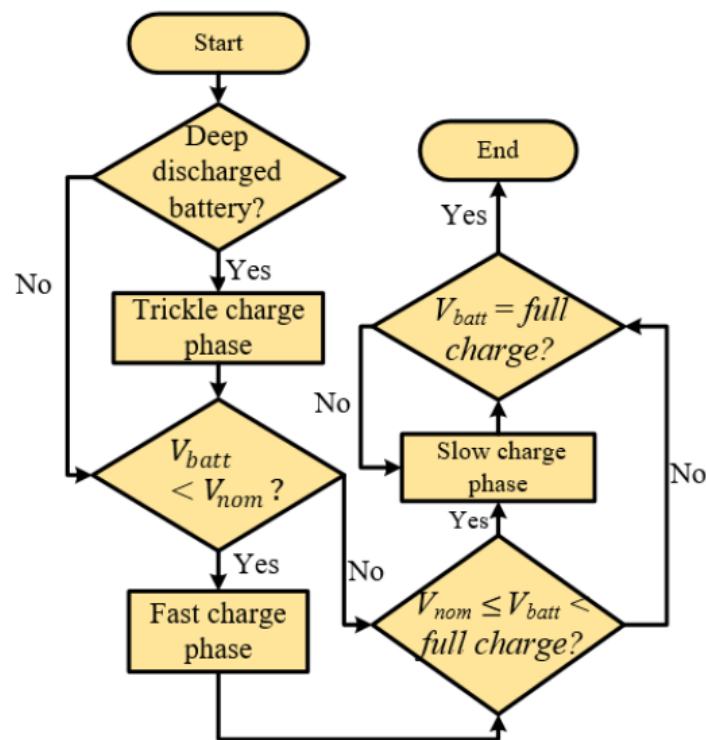
Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί ο σχεδιασμός ενός φορτιστή, ο οποίος προτάθηκε προσφάτως και ενσωματώνει έναν αλγόριθμο παλμικής φόρτισης που αντιμετωπίζει τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα και λαμβάνει επίσης υπόψη την πόλωση της μπαταρίας σε ολόκληρο τον κύκλο φόρτισης [31]. Αυτός ο φορτιστής στοχεύει σε εφαρμογές από το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT), όπως έξυπνους θερμοστάτες, σκίαστρα παραθύρων και αισθητήρες θυρών, έως φορητές συσκευές, όπως έξυπνα γυαλιά, ζώνες γυμναστικής και ψηφιακά στυλό. Με το IoT να αναμένεται να φτάσει τα 561,04 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2022, υπάρχει ανάγκη για γρήγορη φόρτιση αυτών των συσκευών που είναι πάντα συνδεδεμένες στο διαδίκτυο και καταναλώνουν συνεχώς ρεύμα [32]. Μια αστοχία της μπαταρίας ή του συστήματος φόρτισης μιας συσκευής IoT μπορεί

να είναι καταστροφική, επομένως υπάρχει ανάγκη να υπάρχουν κυκλώματα φορτιστή μικρής μορφής που να είναι απλά, οικονομικά, να ενσωματώνονται εύκολα και να μπορούν να φορτίζουν τις μπαταρίες γρήγορα, με ασφάλεια, και αξιόπιστα. Αυτές οι μικρές συσκευές μερικές φορές χρησιμοποιούν μπαταρίες σε μορφές νομισμάτων ή κουμπιών για λόγους εξοικονόμησης χώρου. Ο παλμικός φορτιστής που θα αναλυθεί σε αυτή την ενότητα επιτυγχάνει πολύ μικρό μέγεθος.

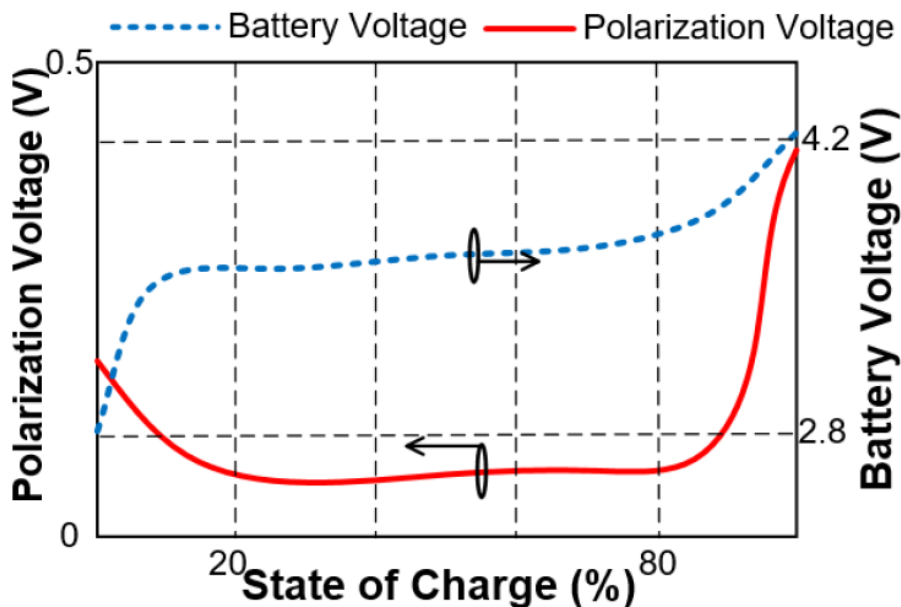
Ο αναφερόμενος παλμικός φορτιστής μπορεί να λάβει την είσοδό του *V_{in}*, *PS* από μια πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος και να διοχετεύει το ρεύμα φόρτισης σε διαφορετικούς κύκλους λειτουργίας στην μπαταρία για να βελτιώσει την απόδοση φόρτισης και ταυτόχρονα να μειώσει τον χρόνο φόρτισης [33]. Προηγούμενες προσπάθειες που ενσωματώνουν αλγόριθμους παλμικής φόρτισης δεν περιλαμβάνουν φάση προφόρτισης στον σχεδιασμό, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη και οι βαθιές αποφορτισμένες μπαταρίες. Αυτός ο παλμικός φορτιστής ενσωματώνει φάση προφόρτισης για βαθιά αποφορτιζόμενα κύτταρα και σκοπούς προετοιμασίας, φάση γρήγορης/αργής φόρτισης για βελτίωση της απόδοσης φόρτισης της μπαταρίας και μείωση του χρόνου φόρτισης και φάση τερματισμού για την αποφυγή συνθηκών υπερφόρτισης και υπέρτασης. Όλες αυτές οι φάσεις μπορούν να προγραμματιστούν από τον χρήστη. Επιπλέον, ενσωματώνει μηχανισμούς ασφαλείας, όπως εξωτερική ανίχνευση θερμοκρασίας μπαταρίας και κύκλωμα υπέρτασης, για την προστασία τόσο του χρήστη όσο και της μπαταρίας κατά τη φόρτιση.

Ένα διάγραμμα ροής που περιγράφει τη λειτουργία του προτεινόμενου παλμικού φορτιστή φαίνεται στην Εικ. 3.2. Αυτός ο παλμικός φορτιστής λειτουργεί σε τρεις φάσεις φόρτισης: trickle φόρτιση (προφόρτιση), γρήγορη φόρτιση και αργή φόρτιση. Μια φάση φόρτισης επιλέγεται με βάση την κατάσταση της μπαταρίας κατά τη φόρτιση. Εάν διαπιστωθεί ότι η μπαταρία είναι βαθιά αποφορτισμένη, ξεκινά η φάση φόρτισης “σταγόνων”. Η φάση γρήγορης φόρτισης ξεκινά όταν η μπαταρία είναι εκτός κατάστασης βαθιάς εκφόρτισης αλλά μικρότερη από την ονομαστική τάση *V_{nom}*. Καθώς η μπαταρία πλησιάζει την τάση πλήρους φόρτισης, όπου η πλήρης φόρτιση υποδηλώνει SoC 100%, ξεκινά η φάση αργής φόρτισης. Καθώς η μπαταρία πλησιάζει στην πλήρη φόρτισή της, είναι απαραίτητο η μπαταρία να απορροφήσει αποτελεσματικά το φορτίο για να αποτρέψει

την υπερφόρτισή της λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης ιόντων λιθίου Li^+ στα ηλεκτρόδια κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Η πόλωση είναι αρχικά υψηλή σε χαμηλό SoC λόγω πυρήνωσης και καθώς αυξάνεται το SoC, η πόλωση μειώνεται όπως φαίνεται στην Εικ. 3.3. Καθώς το SoC υπερβαίνει το 80%, λόγω της δυσκολίας παρεμβολής του Li^+ , η πόλωση αυξάνεται ξανά. Επομένως, μεταβάλλοντας τους κύκλους λειτουργίας κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης, η πόλωση συγκέντρωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί για να διασφαλιστεί η σωστή παρεμβολή.



Εικόνα 3.2 Διάγραμμα ροής προτεινόμενου αλγορίθμου παλμικής φόρτισης [32]

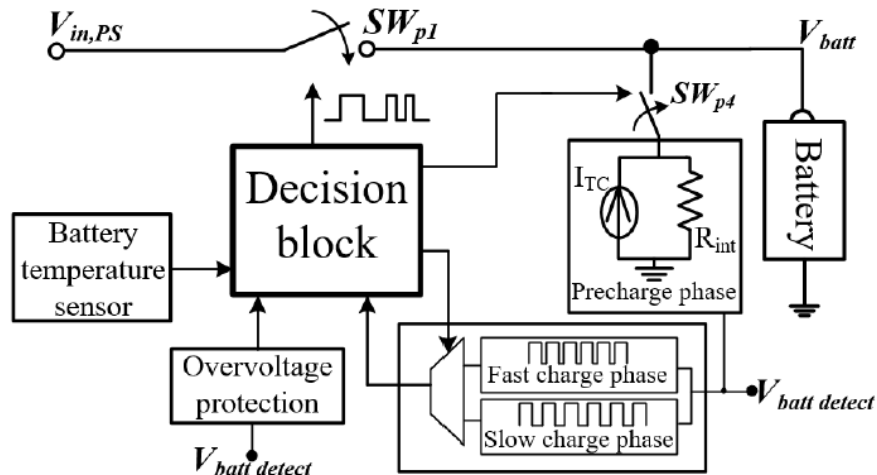


Εικόνα 3.3 Μεταβολή της πόλωσης της μπαταρίας συγκριτικά με το SoC [32].

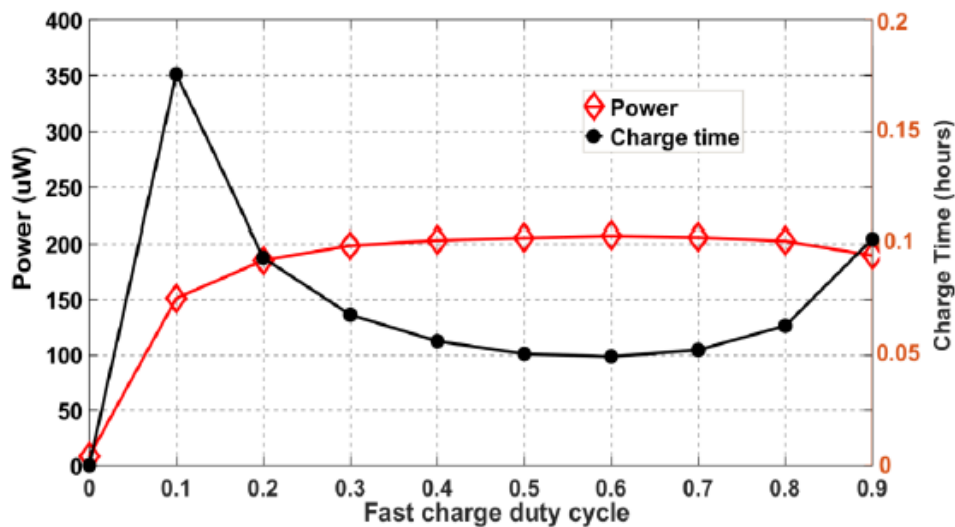
Οι φάσεις γρήγορης και αργής φόρτισης επιδιώκουν να συνδυάσουν τη γρήγορη φόρτιση με την αυξημένη απόδοση φόρτισης της μπαταρίας κι επίσης λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά πόλωσης της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Ο φορτιστής θα πρέπει να λειτουργεί σε μια συχνότητα στην οποία η αντίσταση της μπαταρίας ιόντων λιθίου είναι ελάχιστη για τη μείωση των απωλειών ενέργειας της μπαταρίας, να βελτιώσει τη φόρτιση της μπαταρίας και την ενεργειακή της απόδοση. Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η επιλογή του κύκλου λειτουργίας του ρεύματος φόρτισης του παλμού. Στα αρχικά στάδια της φόρτισης, τα Li^+ παρεμβάλλονται εύκολα στα ηλεκτρόδια, αλλά καθώς η μπαταρία αρχίζει να πλησιάζει σε πλήρη χωρητικότητα, όπως φαίνεται στην Εικ. 3.3, η πόλωση είναι πολύ μεγαλύτερη αφού χρειάζεται περισσότερος χρόνος για να παρεμβληθεί το Li^+ στην άνοδο. Εάν χρησιμοποιούνται υψηλότεροι κύκλοι λειτουργίας σε αυτό το στάδιο, το Li^+ πρόκειται να συγκεντρωθεί στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου που μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη δενδριτών. Έτσι, προτείνεται μια μέθοδος, όπου η ταχύτερη φόρτιση, η βελτιωμένη φόρτιση της μπαταρίας και η ενεργειακή απόδοση μπορούν να επιτευχθούν χωρίς να εισάγονται συνθήκες υπέρτασης ή υπερφόρτισης. Η υγεία της μπαταρίας και ο κύκλος ζωής της μπαταρίας κατά συνέπεια βελτιώνονται. Η φάση φόρτισης χωρίζεται σε δύο μέρη: ένα μέρος παρέχει γρήγορο χρόνο

φόρτισης χρησιμοποιώντας υψηλότερο κύκλο λειτουργίας, όταν η πόλωση της μπαταρίας είναι χαμηλή, και το άλλο μέρος χρησιμοποιεί χαμηλότερο κύκλο λειτουργίας για να επιτρέψει την καλύτερη απόδοση φόρτισης της μπαταρίας και να λογοδοτήσει για την υψηλή πόλωση της μπαταρίας. Λόγω των αυστηρών απαιτήσεων φόρτισης μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου, ένας κύκλος λειτουργίας 70% ή μεγαλύτερος είναι κατάλληλος για το αρχικό στάδιο φόρτισης. Στη συνέχεια, ο κύκλος λειτουργίας μειώνεται καθώς η μπαταρία πλησιάζει στην πλήρη φόρτιση.

Ένα μπλοκ διάγραμμα στάθμης συστήματος του προτεινόμενου φορτιστή παλμών, που περιγράφει λεπτομερώς τα κύρια μπλοκ που ελέγχουν τις φάσεις φόρτισης, φαίνεται στην Εικ. 3.4. Ένα μπλοκ απόφασης θα παράγει τις απαραίτητες τάσεις παλμών για τη λειτουργία του διακόπτη, *SWp1*, στον σωστό κύκλο λειτουργίας και με βάση τη σωστή συχνότητα στην τρέχουσα κατάσταση της μπαταρίας που ανιχνεύεται μέσω του *Vbatt detect*. Το *SWp1* θα δώσει στη συνέχεια το ρεύμα φόρτισης από το *Vin,PS* στη μπαταρία για να τη φορτίσει. Ανάλογα με την τιμή του *Vbatt*, η οποία ανιχνεύεται από ένα κύκλωμα ανιχνευτή τάσης, *Vbatt detect*, η φάση φόρτισης αναλύεται σε φάση φόρτισης ή γρήγορης φόρτισης. Τα κυκλώματα ασφαλείας, όπως η αίσθηση θερμοκρασίας της μπαταρίας και η προστασία από υπέρταση, απαιτούνται για τη διασφάλιση της φόρτισης της μπαταρίας εντός των ορίων ασφαλείας της. Ο κύκλος λειτουργίας για τη φάση γρήγορης φόρτισης στην Εικ. 3.3 κυμαινόταν από 10% έως 90% και μετρήθηκαν η κατανάλωση ισχύος και ο χρόνος φόρτισης. Σε αυτή την προσομοίωση, η μπαταρία μοντελοποιήθηκε ως πυκνωτής 100F σε σειρά με αντίσταση 100mΩ. Η κατανάλωση ενέργειας και ο χρόνος φόρτισης σε σχέση με τον κύκλο λειτουργίας ταχείας φόρτισης λήφθηκαν και παρουσιάζονται στην Εικ. 3.5. Για να επιτευχθεί γρήγορη φόρτιση σε σχετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος, ο κύκλος λειτουργίας για γρήγορη φόρτιση πρέπει να ρυθμιστεί κάτω από 75%. Οι Purushothaman et al. [30] πρότειναν ότι η χρήση ενός κύκλου λειτουργίας 75% ήταν επαρκής για γρήγορη φόρτιση, αποτρέποντας παράλληλα τον κορεσμό λιθίου στα ηλεκτρόδια. Για να ληφθεί υπόψη η υψηλή πόλωση της μπαταρίας προς το τέλος της φόρτισης, ο κύκλος λειτουργίας μειώθηκε στο 25% για να επιτευχθεί βελτιωμένη απόδοση φόρτισης.



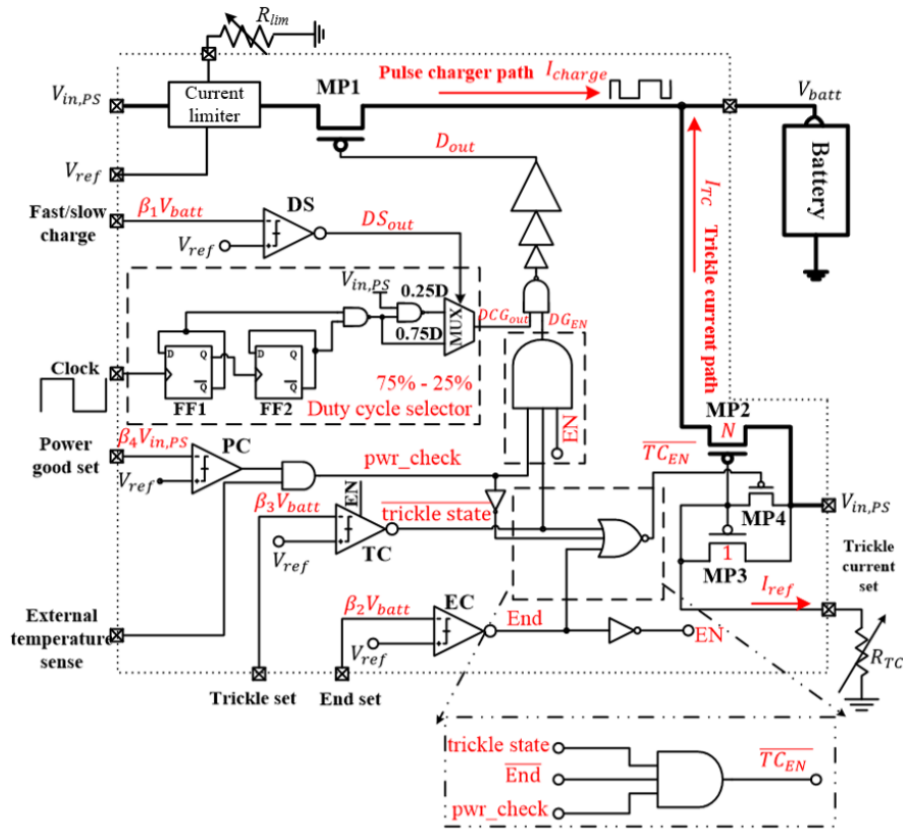
Εικόνα 3.4 Μπλόκ διάγραμμα παλμικού φορτιστή [32].



Εικόνα 3.5 Σύγκριση κατανάλωσης ισχύος και χρόνου φόρτισης [33].

Το στάδιο το οποίο διαδέχεται τη θεωρητική μελέτη και σχεδίαση του παλμικού φορτιστή που αναλύθηκε ανωτέρω είναι η μελέτη του τρόπου κατασκευής του καθώς και των χαρακτηριστικών λειτουργίας που επιτυγχάνει στην πράξη.

Το κυκλωματικό διάγραμμα του εν λόγω παλμικού φορτιστή είναι το εξής:



Εικόνα 3.6 Κυκλωματικό ισοδύναμο του παλμικού φορτιστή [33].

Κάποιες από τις βασικές λειτουργίες αυτού του παλμικού φορτιστή [33] είναι οι εξής:

- *Επαλήθευση:* Ο φορτιστής πρέπει πάντα να διασφαλίζει ότι η πηγή συνεχούς ρεύματος βρίσκεται στο σωστό επίπεδο ισχύος και εντός των ορίων ασφαλείας. Η λειτουργία εκτός του σχεδιασμένου ορίου αποφεύγεται για την προστασία του χρήστη, της συσκευής και της μπαταρίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του συγκριτή. Η συσκευή σύγκρισης διασφαλίζει ότι το $V_{in,PS}$ είναι ιδανικό για φόρτιση ανά πάσα στιγμή. Στέλνει λογικά σήματα σε όλες τις φάσεις φόρτισης, είτε να προχωρήσουν στη φόρτιση είτε όχι, ανάλογα με το αν η τάση εισόδου πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Η προδιαγραφή επιπέδου τάσης εισόδου συνεχούς ρεύματος ορίζεται από το V_{ref}/β_4 , όπου β_4 είναι το κέρδος ανάδρασης αντίστασης από το $V_{in,PS}$ και το V_{et} . Ορισμένες μπαταρίες διαθέτουν αισθητήρες

θερμοκρασίας για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας τους κατά τη φόρτιση. Το σήμα από αυτόν τον αισθητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος (αίσθηση εξωτερικής θερμοκρασίας) για να απενεργοποιήσετε τη φόρτιση όταν η θερμοκρασία της μπαταρίας δεν είναι κατάλληλη για φόρτιση.

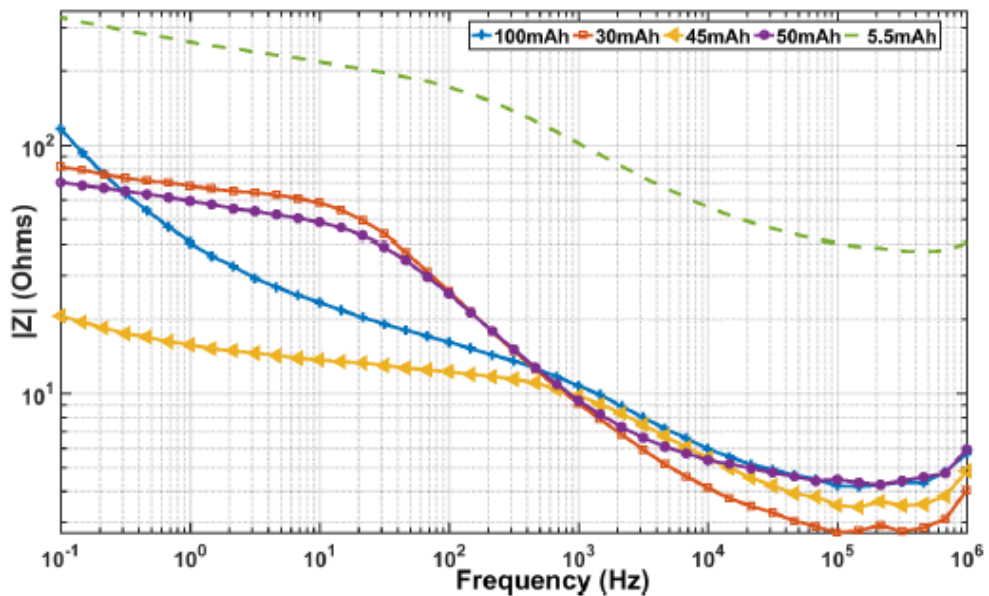
- *Φάση φόρτισης Trickle:* Αυτή η φάση φόρτισης υλοποιείται από τον συγκριτή *TC* για να συγκρίνει την τάση της μπαταρίας με το κατώφλι τάσης βαθιάς εκφόρτισης $V_{ref}/\beta 3$, όπου το $\beta 3$ είναι το κέρδος αντίστασης ανάδρασης από το V . Εάν διαπιστωθεί ότι η μπαταρία είναι βαθιά αποφορτισμένη, ενεργοποιείται μια εσωτερική πηγή ρεύματος υψηλής σύνθετης αντίστασης, που υλοποιείται από τα *MP2*, *MP3* και *MP4*, που ελέγχεται από μια μεταβλητή αντίσταση *RTC* για να ξεκινήσει η στάγδην φόρτιση. Η τρέχουσα πηγή ενεργοποιείται όταν η πύλη του *MP4 TCEN* φτάσει σε ένα λογικό υψηλό, που επιτυγχάνεται από την πύλη *NOR*.
- *Φάσεις γρήγορης και αργής φόρτισης:* Μόλις η τάση της μπαταρίας ξεπεράσει το $V_{ref}/\beta 3$, η φόρτιση μπορεί να μεταβεί στη φάση γρήγορης φόρτισης. Σε αυτό το σημείο, το *TCEN* βρίσκεται σε λογικό χαμηλό. Τα δύο flip flops θετικής ακμής αποτελούν μέρος του επιλογέα κύκλου λειτουργίας (*DCS*). Το πρώτο flip flop *FF1* διαιρεί τη συχνότητα του ρολογιού με δύο, το οποίο στη συνέχεια διαιρείται ξανά με το modulo δύο χρησιμοποιώντας το δεύτερο flip flop *FF2*. Οι πύλες *NAND* θα παράγουν στη συνέχεια παλμούς με κύκλους λειτουργίας 25% και 75%. Μόλις τελειώσει η φάση φόρτισης trickle, το τρανζίστορ κύριας διέλευσης *MP1* παλμοποιείται σε κύκλο λειτουργίας 75% για να επιτευχθεί ταχύτερη φόρτιση όταν η πόλωση της μπαταρίας είναι χαμηλή. Μόλις η τάση της μπαταρίας αρχίσει να πλησιάζει ένα *SoC* 100% και η πόλωση της μπαταρίας αρχίσει να αυξάνεται, το *MP1* αρχίζει ένα παλμικό ρεύμα φόρτισης στη μπαταρία σε κύκλο λειτουργίας 25% επιτυγχάνοντας καλύτερη απόδοση φόρτισης μπαταρίας. Αυτό εξασφαλίζει επίσης τη μέγιστη απορρόφηση φορτίου, με τον αυξημένο χρόνο ανάπαυσης μεταξύ των παλμών που επιτρέπει στα ιόντα να παρεμβάλλονται σωστά στην άνοδο. Η μετάβαση επιτυγχάνεται από τον συγκριτή *DS*, ο οποίος συγκρίνει την τάση της μπαταρίας με ένα κατώφλι τάσης μετάβασης. Αυτό το όριο τάσης, με βάση το *SoC*,

ορίζεται από το V_{ref}/β_1 , όπου β_1 είναι το κέρδος αντίστασης ανάδρασης από το V_{batt} . Η έξοδος αυτού του συγκριτή DS_{out} χρησιμεύει ως σήμα επιλογής στον πολυπλέκτη που εξάγει είτε 75% είτε 25% του κύκλου λειτουργίας, ανάλογα με την τάση της μπαταρίας. Ο ρυθμός φόρτισης τόσο για τη γρήγορη όσο και για την αργή φάση φόρτισης εξαρτάται από τις προδιαγραφές της μπαταρίας. Αυτό μπορεί να ρυθμιστεί ρυθμίζοντας αποτελεσματικά το ρεύμα φόρτισης που ελέγχεται από το R_{lim} . Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ο ρυθμός φόρτισης θα διαφέρει μεταξύ των δύο φάσεων, καθώς η τάση πόλωσης της μπαταρίας αλλάζει δραστικά προς το τέλος της φόρτισης. Η αλλαγή στο ποσοστό φόρτισης οφείλεται στη διαφορά των κύκλων λειτουργίας και σε μια σταθερή I_p . Ο ρυθμός φόρτισης της φάσης αργής φόρτισης θα είναι περίπου το 58% της φάσης γρήγορης φόρτισης. Αυτός ο μειωμένος σταθερός ρυθμός φόρτισης, εκτός από τις περιόδους χαλάρωσης στους παλμούς, επιτρέπει αυξημένη απόδοση φόρτισης και μείωση της συσσώρευσης ιόντων λιθίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Η συχνότητα στην οποία λειτουργεί το $MP1$ πρέπει να είναι ίση με f_{Zmin} . Αυτή η συχνότητα μπορεί να δημιουργηθεί από τη συχνότητα του συστήματος IoT χρησιμοποιώντας διαχωριστές ρολογιού. Υπάρχει μεγάλη απώλεια αγωγιμότητας κατά τη φάση ταχείας φόρτισης σε σύγκριση με τη φάση αργής φόρτισης. Με αυτή τη μεταβαλλόμενη απώλεια ισχύος σε όλη τη διαδικασία φόρτισης μπορεί να επιτευχθεί χαμηλότερη μέση απώλεια ισχύος στη συνολική διαδικασία φόρτισης.

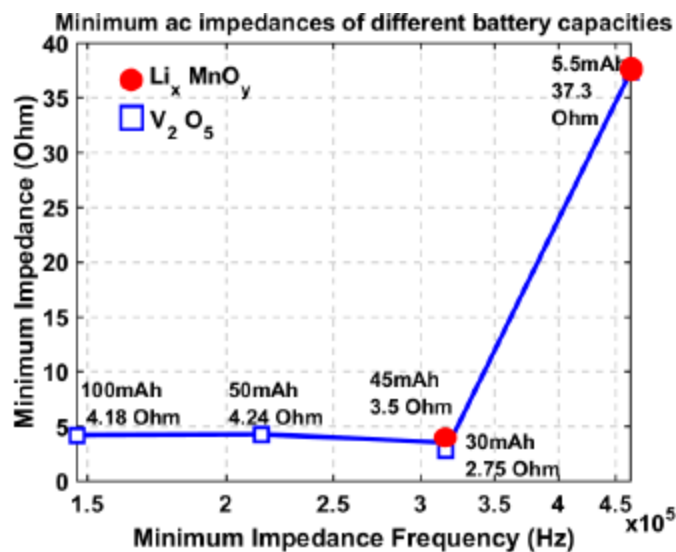
- **Τερματισμός:** Η διαδικασία φόρτισης τερματίζεται μόλις η μπαταρία φτάσει σε πλήρη τάση. Ένας συγκριτής EC (εμφανίζεται στην Εικ. 3.4) διασφαλίζει ότι η μπαταρία δεν περνά σε κατάσταση υπέρτασης, στέλνοντας λογικά σήματα στα κατάλληλα μπλοκ για διακοπή της φόρτισης. Οι συγκριτές TC και DS απενεργοποιούνται και οι δύο, χρησιμοποιώντας το σήμα EN από την έξοδο του συγκριτή EC για εξοικονόμηση ενέργειας ηρεμίας. Το όριο τάσης τελικής φόρτισης ορίζεται από το V_{ref}/β_2 , όπου β_2 είναι το κέρδος ανάδρασης αντίστασης από το V_{batt} . Κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας φόρτισης, παρακολουθείται η τάση της μπαταρίας, η ισχύς εισόδου και η θερμοκρασία της μπαταρίας (αίσθηση

εξωτερικής θερμοκρασίας). Εάν οποιαδήποτε στιγμή κάποια από αυτές τις παραμέτρους είναι εκτός των προδιαγραφών τους, τότε η φόρτιση τερματίζεται.

Ο χαρακτηρισμός των μπαταριών πριν την αξιολόγηση των ιδιοτήτων των παλμικών φορτιστών είναι απαραίτητος. Διαφορετικές χωρητικότητες μπαταριών ιόντων λιθίου με διαφορετική χημική σύνθεση καθόδου σε μορφή νομίματος χαρακτηρίστηκαν με τη χρήση ενός αναλυτή σύνθετης αντίστασης. Οι διαφορετικές χημείες καθόδου ήταν το σύνθετο οξειδίο του μαγγανίου λιθίου (Li_xMnO_y) και το πεντοξειδίο του βαναδίου (V_2O_5) $fZmin$ των μπαταριών που θα μπορούσε να ληφθεί εκτελώντας μια ανάλυση εναλλασσόμενης αντίστασης. Η Εικ. 3.7 δείχνει το μετρημένο φάσμα εναλλασσόμενης αντίστασης των διαφορετικών χωρητικότητων των μπαταριών. Από την Εικ. 3.7 υπάρχει ένα σημείο στο φάσμα της σύνθετης αντίστασης στο οποίο η σύνθετη αντίσταση είναι ελάχιστη. Αυτή η σύνθετη αντίσταση απεικονίζεται σε γραφική παράσταση με τη συχνότητα στην οποία εμφανίζεται στην Εικ. 3.8.



Εικόνα 3.7 Μεταβολή του μέτρου της αντίστασης ως προς την συχνότητα [32].



Σχήμα 3.8 Πειραματική ελάχιστη αντίσταση με την συχνότητα για διαφορετικές χωρητικότητες μπαταριών [33].

Από την Εικ. 3.8 είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι καθώς αυξάνονταν οι χωρητικότητες της μπαταρίας, η συχνότητα στην οποία εμφανίστηκε η ελάχιστη σύνθετη αντίσταση μειώθηκε στο ίδιο υλικό καθόδου. Η ογκομετρική χωρητικότητα της μπαταρίας, η οποία εξαρτάται από την κρυσταλλική δομή των υλικών που χρησιμοποιούνται και το μέγεθος της μπαταρίας, επομένως, έχει αντίκτυπο στην σύνθετη αντίσταση και τη συχνότητα στην οποία εμφανίζεται η ελάχιστη σύνθετη αντίσταση.

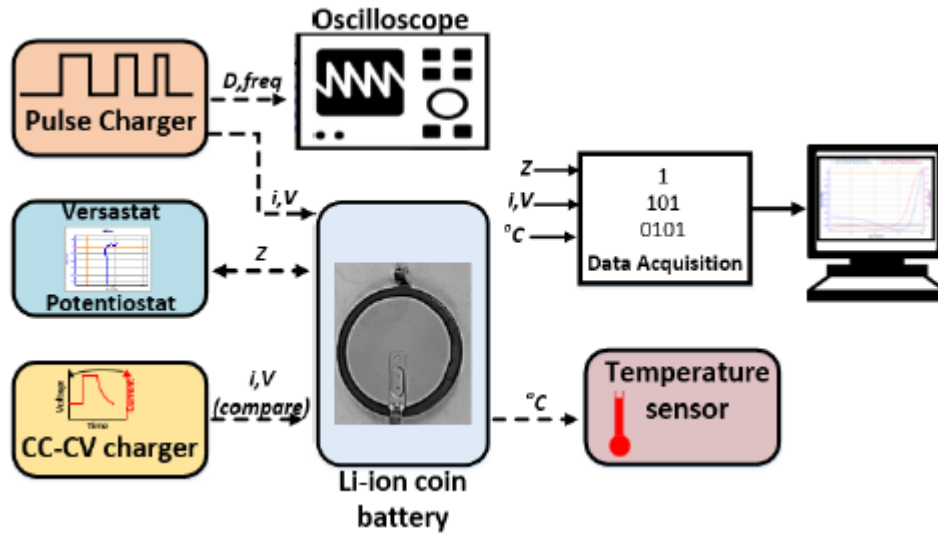
Πίνακα 3.1 Χαρακτηριστικά Μπαταριών Ιόντων Λιθίου

| Χωρητικότητα Μπαταρίας (mAh) | L(nH) | R _S (Ω) | C _{dl} (μF) | R _{CT} (Ω) | f _Z (Hz) | Z _{int-min} (Ω) | Χημικά Στοιχεία Καθόδου |
|------------------------------|-------|--------------------|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 100 | 93.9 | 4.64 | 17.7 | 6.53 | 146.78 | 4.18 | V ₂ O ₅ |
| 50 | 78.0 | 4.69 | 13.7 | 5.12 | 215.44 | 4.24 | V ₂ O ₅ |
| 45 | 56.7 | 4.01 | 6.35 | 7.29 | 316.23 | 3.50 | Li _x MnO _y |
| 30 | 73.1 | 3.49 | 4.71 | 5.95 | 316.23 | 2.75 | V ₂ O ₅ |
| 5.5 | 74.9 | 47.22 | 1.79 | 176.20 | 464.16 | 37.32 | Li _x MnO _y |

Από τον Πίνακα 3.1 φαίνεται ότι η μπαταρία με τη μικρότερη χωρητικότητα είχε τις μεγαλύτερες ωμικές αντιστάσεις και αντιστάσεις μεταφοράς φορτίου. Όπως αναμενόταν,

το *Cdl* είναι επίσης μικρό λόγω της μικρότερης περιοχής ηλεκτροδίων και αυξάνεται με την αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της λειτουργίας και των επιδόσεων του παλμικού φορτιστή απεικονίζεται στην Εικ. 3.9.

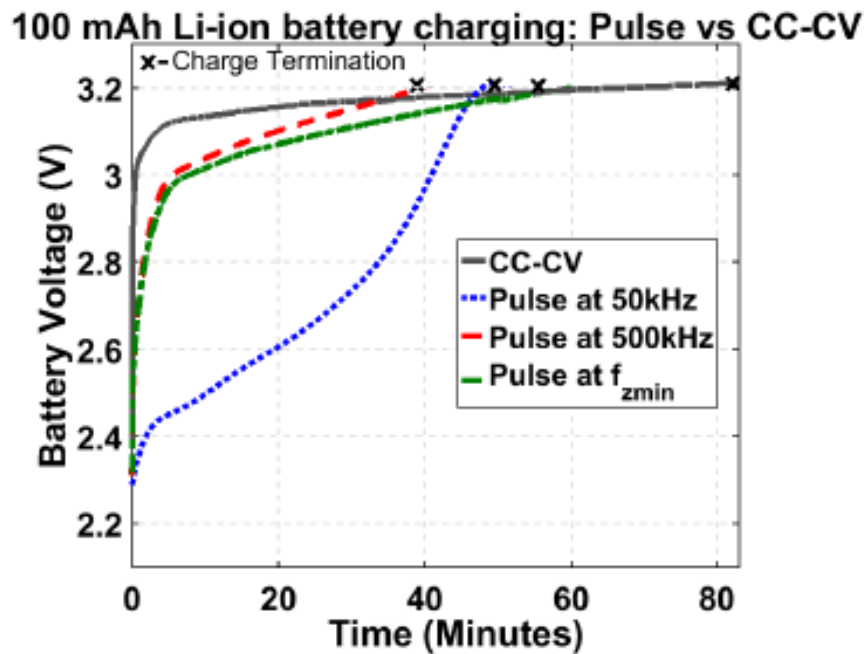


Σχήμα 3.9 Πειραματική διάταξη ελέγχου παλμικού φορτιστή [32].

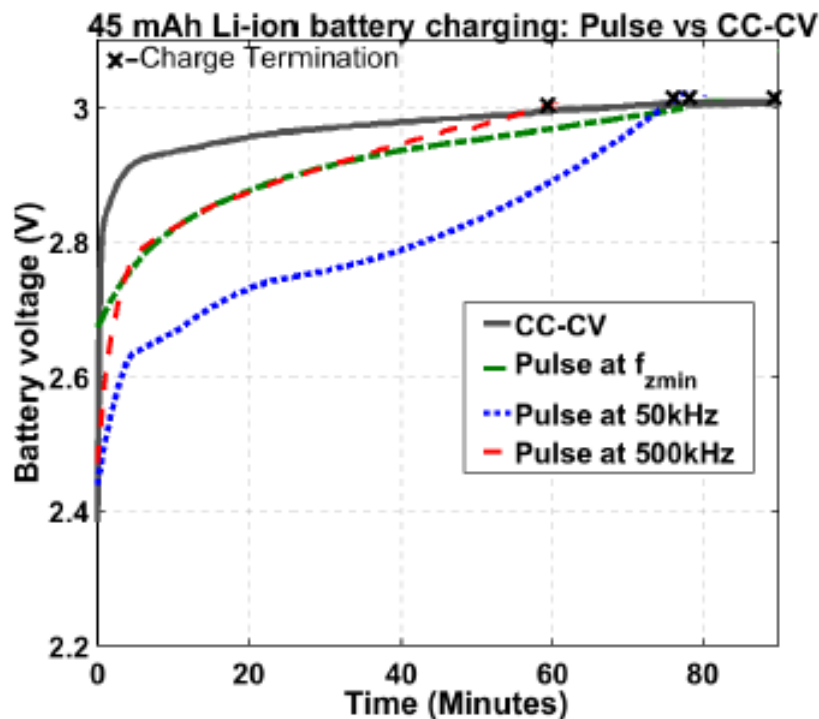
Και οι δύο μπαταρίες φορτίστηκαν με ρυθμό φόρτισης 0,1 C με βάση τις προδιαγραφές τους. Για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου 100 mAh και 45 mAh, το ρεύμα φόρτισης για το στάδιο σταθερού ρεύματος στην τεχνική φόρτισης CC-CV και το πραγματικό ρεύμα παλμικής φόρτισης ήταν 10 mA και 4,5 mA αντίστοιχα. Στη συνέχεια, οι μπαταρίες υποβλήθηκαν σε βάθος εκφόρτισης (DoD) 100% με ρυθμό εκφόρτισης 0,1 C, δηλαδή 10 mA για τη μπαταρία ιόντων λιθίου των 100 mAh και 4,5 mA για τη μπαταρία ιόντων λιθίου των 45 mAh, μετά από ανάπαυση για μία ώρα. Η περίοδος ανάπαυσης απαιτείται για να διασφαλιστεί ότι οι χημικές αντιδράσεις στη μπαταρία φθάνουν σε ισορροπία. Για μια δίκαιη σύγκριση, αυτά τα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα πειράματα.

Η φόρτιση στο f_{Zmin} θα μειώσει τις απώλειες ενέργειας στη μπαταρία και θα βελτιώσει την απόδοση φόρτισης της μπαταρίας. Από τον Πίνακα 3.1 και την Εικ. 3.5, το f_{Zmin} των μπαταριών ιόντων λιθίου των 100 mAh και 45 mAh προσδιορίστηκε ότι είναι 146,8 kHz

και 316,2 kHz, αντίστοιχα. Η ελάχιστη αντίσταση Z_{int_min} σε αυτές τις συχνότητες ήταν 4,18 Ω και 3,50 Ω , αντίστοιχα. Με αυτές τις συχνότητες που λαμβάνονται, η μπαταρία θα μπορούσε στη συνέχεια να υποβληθεί στον προτεινόμενο αλγόριθμο παλμικής φόρτισης, δηλαδή φάσεις φόρτισης που αλλάζουν από γρήγορο σε αργό κύκλο λειτουργίας φόρτισης 75% και 25%, αντίστοιχα. Η Εικ. 3.10 δείχνει την τάση φόρτισης της μπαταρίας ιόντων λιθίου 100 mAh έναντι του χρόνου φόρτισης για διαφορετικές συχνότητες παλμών, συμπεριλαμβανομένων των f_{zmin} . Αυτό συγκρίθηκε με τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV. Η Εικ. 3.11 δείχνει την τάση φόρτισης της μπαταρίας ιόντων λιθίου 45 mAh έναντι του χρόνου φόρτισης για διαφορετικές συχνότητες παλμών, συμπεριλαμβανομένων των f_{zmin} . Αυτό συγκρίθηκε επίσης με τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV.



Σχήμα 3.10 Σύγκριση προτεινόμενου αλγορίθμου παλμικής φόρτισης με τον αλγόριθμο CC-CV για μπαταρία ιόντων λιθίου 100 mAh [32].



Σχήμα 3.11 Σύγκριση προτεινόμενου αλγορίθμου παλμικής φόρτισης με τον αλγόριθμο CC-CV για μπαταρία ιόντων λιθίου 45 mAh [32].

Όσον αφορά τον χρόνο φόρτισης, ο προτεινόμενος αλγόριθμος παλμικής φόρτισης μείωσε τον χρόνο φόρτισης κατά 37% και 16% για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου των 100 mAh και 45 mAh, αντίστοιχα. Η απόδοση φόρτισης βελτιώθηκε κατά 3,2% σε κάθε περίπτωση, όταν χρησιμοποιήθηκε ο προτεινόμενος αλγόριθμος παλμών. Ο αλγόριθμος παλμικής φόρτισης δοκιμάστηκε σε άλλες συχνότητες, 50 kHz και 500 kHz, εκτός από το f_{zmin} , για να προσδιοριστεί η επίδραση των συχνοτήτων φόρτισης στον χρόνο φόρτισης της μπαταρίας και στην απόδοση. Η εναλλασσόμενη αντίσταση της μπαταρίας στα 50 kHz και 500 kHz ήταν 3,8 Ω και 3,6 Ω και 4,5 Ω και 4,4 Ω για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου των 45 mAh και 100 mAh, αντίστοιχα και τα αποτελέσματα καταγράφονται στους Πίνακες 6 και 7. Είναι σαφές ότι αυτοί οι πίνακες που χρησιμοποιούν τον προτεινόμενο αλγόριθμο παλμικής φόρτισης που λειτουργεί στη συχνότητα στην οποία είναι ελάχιστη η εναλλασσόμενη αντίσταση της μπαταρίας παρήγαγαν την καλύτερη απόδοση φόρτισης της μπαταρίας.

Πίνακας 3.2 Σύνοψη Πειραματικών Αποτελεσμάτων για την Περίπτωση της Μπαταρίας Ιόντων Λιθίου 100 mAh

| Παράμετροι | 100mAh | | | |
|--|--------|--------|-------|-------|
| Προφίλ Φόρτισης | CC-CV | Παλμός | | |
| Συχνότητα Φόρτισης (kHz) | n/a | 50 | fZmin | 500 |
| Χρόνος Φόρτισης (min) | 83 | 47 | 52 | 38 |
| Απόδοση Φόρτισης | 89.24 | 89.15 | 92.39 | 89.98 |
| Μεταβολή Επιφανειακής Θερμοκρασίας (C) | +0.31 | -0.81 | -0.37 | +0.44 |

Πίνακας 3.3 Σύνοψη Πειραματικών Αποτελεσμάτων για την Περίπτωση της Μπαταρίας Ιόντων Λιθίου 45 mAh

| Παράμετροι | 100mAh | | | |
|--|--------|--------|-------|-------|
| Προφίλ Φόρτισης | CC-CV | Παλμός | | |
| Συχνότητα Φόρτισης (kHz) | n/a | 50 | fZmin | 500 |
| Χρόνος Φόρτισης (min) | 90 | 74 | 76 | 56 |
| Απόδοση Φόρτισης | 94.59 | 83.91 | 97.86 | 85.88 |
| Μεταβολή Επιφανειακής Θερμοκρασίας (C) | +0.5 | -0.38 | -0.5 | +0.38 |

3.4 Συμπεράσματα Πειραματικής Μελέτης

Οι πίνακες 3.2 και 3.3 συνοψίζουν τα πειραματικά αποτελέσματα, συγκρίνοντας τόσο τον προτεινόμενο αλγόριθμο φόρτισης παλμών όσο και τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV αναφοράς. Από αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα έχει αποδειχθεί ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος φόρτισης παλμών, ο οποίος αλλάζει από έναν κύκλο υψηλής λειτουργίας (φάση γρήγορης φόρτισης), σε έναν κύκλο χαμηλής λειτουργίας (φάση αργής φόρτισης) για να ληφθεί υπόψη η αυξημένη τάση πόλωσης της μπαταρίας, αποδίδει πολύ καλύτερα από τη φόρτιση CC-CV, κατά τη φόρτιση στο f_{Zmin} . Όσον αφορά τον χρόνο φόρτισης, ο προτεινόμενος αλγόριθμος παλμικής φόρτισης φόρτιζε μπαταρίες ιόντων λιθίου 100 mAh και 45 mAh σε 52 και 76 λεπτά, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV, ο οποίος φόρτιζε τις μπαταρίες σε 83 λεπτά και 90 λεπτά, αντίστοιχα. Αυτό αντιπροσώπευε μείωση του χρόνου φόρτισης κατά 37,35% και 15,56% για τις μπαταρίες 100 mAh και 45 mAh, αντίστοιχα. Η απόδοση φόρτισης της μπαταρίας βελτιώθηκε επίσης κατά 3,15% και 3,27%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τον προτεινόμενο αλγόριθμο φόρτισης.

Η φόρτιση σε συχνότητες διαφορετικές από f_{Zmin} , είχε ως αποτέλεσμα κακή απόδοση φόρτισης, ειδικά για τη μπαταρία 45 mAh. Εφόσον η σύνθετη αντίσταση είναι ελάχιστη στο f_{Zmin} και αυξάνεται σε όλες τις άλλες συχνότητες, μπορεί δε να συναχθεί ότι υπάρχουν πολύ μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας στη μπαταρία σε άλλες συχνότητες εκτός από τις f_{Zmin} . Στα 50 kHz και 500 kHz, η μείωση της απόδοσης φόρτισης της μπαταρίας ήταν 13,95% και 11,98%, αντίστοιχα για τη μπαταρία ιόντων λιθίου των 45 mAh. Επομένως, η συχνότητα με την οποία εκτελείται η παλμική φόρτιση είναι σημαντική και πρέπει να επιλέγεται προσεκτικά.

Όσον αφορά το χρόνο φόρτισης, ο προτεινόμενος αλγόριθμος φόρτισης παλμών παρήγαγε ταχύτερους χρόνους φόρτισης σε σύγκριση με τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV σε όλες τις μετρούμενες συχνότητες. Αυτό υποδηλώνει ότι για να πραγματοποιηθεί γρήγορη φόρτιση, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τον αλγόριθμο παλμικής φόρτισης, καθώς οι περίοδοι ανάπαυσης μεταξύ των παλμών επιτρέπει την αποτελεσματική κίνηση ιόντων και την πρόληψη του σχηματισμού δενδρίτη. Ωστόσο, για καλύτερη απόδοση

φόρτισης της μπαταρίας, ο αλγόριθμος παλμικής φόρτισης πρέπει να λειτουργεί στο $fZmin$.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος φόρτισης παλμών που εφαρμόζεται σε ένα IC έχει επαληθευτεί μέσω πειραμάτων και συγκρίθηκε με τον αλγόριθμο φόρτισης CC-CV αναφοράς. Το προτεινόμενο σύστημα φόρτισης παρήγαγε καλύτερες αποδόσεις φόρτισης μπαταρίας και χρόνους φόρτισης, και ως εκ τούτου η εφαρμογή του σε μια συσκευή IoT θα εξασφαλίσει την ταχύτερη φόρτιση των μπαταριών ιόντων λιθίου της συσκευής και πολύ καλύτερη απόδοση φόρτισης της μπαταρίας.

Πολλοί προηγούμενοι φορτιστές παλμών, συμπεριλαμβανομένου του προτεινόμενου παλμικού φορτιστή που συζητήθηκε στις προηγούμενες ενότητες, έχουν χρησιμοποιήσει ποικίλες παραμέτρους ρεύματος παλμικής φόρτισης, δηλαδή κύκλο λειτουργίας, συχνότητα και πλάτος. Ανάλογα με τα Ipk , D και f που χρησιμοποιούνται, καθώς και τη θερμοκρασία στην οποία φορτίζεται η μπαταρία, οι μετρήσεις απόδοσης εξόδου, η ενέργεια της μπαταρίας και η απόδοση φόρτισης, και ο χρόνος φόρτισης θα ποικίλλουν. Οι παράμετροι σύνθετης αντίστασης της μπαταρίας μπορεί ακόμη και να διαφέρουν ανάλογα με το επίπεδο των παραμέτρων του ρεύματος παλμικής φόρτισης, και αυτό επηρεάζει τον κύκλο ζωής της μπαταρίας. Επομένως, είναι σημαντικό να βρείτε τις παραμέτρους του ρεύματος παλμικής φόρτισης και τα επίπεδα παραμέτρων που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στις προαναφερθείσες μετρήσεις απόδοσης εξόδου. Όταν προσδιοριστεί αυτό, θα παρέχει στους σχεδιαστές κυκλωμάτων τις επιλογές να μεγιστοποιήσουν ή να ελαχιστοποιήσουν τη μέτρηση απόδοσης εξόδου σε σχέση με την άλλη ή να αναζητήσουν έναν τρόπο βελτιστοποίησης όλων των μετρήσεων απόδοσης εξόδου εντός ενός εύλογου εύρους απόδοσης, ανάλογα με την εφαρμογή. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές όπου η γρήγορη φόρτιση είναι υψίστης σημασίας και η αποδοτικότητα φόρτισης δεν είναι μια μέτρηση απόδοσης που χρειάζεται πραγματικά, οι σχεδιαστές κυκλωμάτων μπορούν να επιλέξουν τα Ipk , D και f που θα έχουν ως αποτέλεσμα τον ταχύτερο χρόνο φόρτισης. Ως εκ τούτου, γνωρίζοντας αυτές τις παραμέτρους του ρεύματος παλμικής φόρτισης και τον αντίκτυπό τους στις μετρήσεις απόδοσης εξόδου, μπορούν να επιτευχθούν οι βέλτιστες επιδόσεις της μπαταρίας.

Προκειμένου να ληφθούν αυτές οι βέλτιστες παραμέτροι ρεύματος παλμικής φόρτισης κι επίσης να προσδιοριστεί ο αντίκτυπός τους στην απόδοση της μπαταρίας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τεχνικές βελτιστοποίησης. Ένας τρόπος για να προσδιορίσετε αυτές τις βέλτιστες παραμέτρους είναι να δοκιμάσετε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς, αλλά αυτό θα αυξήσει το κόστος κατασκευής και θα καταναλώσει χρόνο. Επομένως, είναι σημαντικό να χρησιμοποιήσετε αυτές τις τεχνικές βελτιστοποίησης για να καθορίσετε ποιες παράμετροι και επίπεδα ρεύματος φόρτισης παλμών έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στις μετρήσεις απόδοσης εξόδου, όπως η_{BE} , η_{BC} και t_c και ταυτόχρονα να προβλέψετε την απόδοση του παλμού όταν πρόκειται για μεταβλητότητα ποιότητας κατασκευής μεταξύ των μπαταριών.

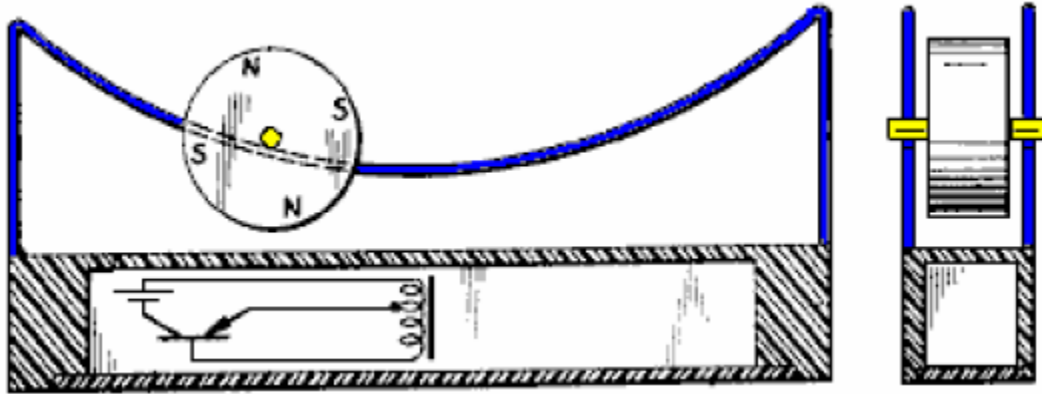
3.5 Ανασκόπηση Συστημάτων Φόρτισης Μπαταριών

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούν επιγραμματικά δύο συστήματα φόρτισης μπαταριών τα οποία προσπάθησαν, αρκετά χρόνια πριν, να επιτύχουν παλμική φόρτιση μπαταριών.

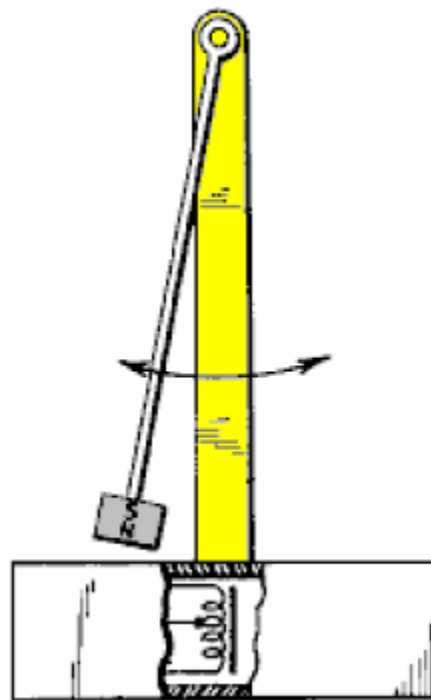
Το πρώτο αφορά το λεγόμενο “Σύστημα Μεταβολής του Rogers” (Roger’s Switching System) [34]. Η λογική πίσω από τα συστήματα αυτού του τύπου είναι η δημιουργία ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου σε ένα πηνίο. Αυτό το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο στηρίζεται στον νόμο του Faraday, βάση του οποίου ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα στο κύκλωμα. Η λογική αυτή κρύβεται πίσω από τις ηλεκτρικές μηχανές της εποχής μας. Ένας ρότορας έχει ενσωματωμένους πάνω του κάποιους μαγνήτες. Η περιστροφή του ρότορα, άρα η περιστροφή των μαγνητών, δημιουργεί αυτό το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που επιθυμούμε.

Στην Εικ. 3.12(α) απεικονίζεται ένα σύστημα το οποίο στοχεύει στη δημιουργία επαγόμενου ρεύματος στο πηνίο του κυκλώματος, το οποίο επαγόμενο ρεύμα θα φορτίσει τη μπαταρία. Ο τροχός, ο οποίος έχει ενσωματωμένους πάνω του μαγνήτες, πραγματοποιεί μια καμπυλόγραμμη μεταβαλλόμενη κίνηση (επιταχυνόμενη/επιβραδυνόμενη). Καθώς διέρχεται πάνω από το κύκλωμα, δημιουργεί μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο επάγει κάποιο ρεύμα φόρτισης. Επειδή η κίνηση του τροχού είναι επαναλαμβανόμενη, δηλαδή έχει μια περιοδικότητα, μπορούμε να πούμε ότι παράγονται παλμοί κάποιας συγκεκριμένης συχνότητας και διάρκειας. Με τον τρόπο αυτό έχει παραχθεί ένα απλοϊκό σύστημα παλμικής φόρτισης.

Άλλο ένα σύστημα το οποίο βασίζεται στην ίδια λογική, αλλά υλοποιείται με τελείως διαφορετικό τρόπο, απεικονίζεται στην Εικ. 3.12(β) [34]. Σε αυτή τη διάταξη υιοθετείται η λογική του εκκρεμούς το οποίο έχει προσδεμένο στην άκρη του έναν μαγνήτη. Με την ίδια ακριβώς λογική με αυτή που περιεγράφηκε γεννάται το επαγόμενο ρεύμα, σε μορφή παλμών, το οποίο φορτίζει τη μπαταρία. Και στην περίπτωση αυτή η συχνότητα, η περίοδος και η διάρκεια του παλμού φόρτισης εξαρτώνται από την σχετική κίνηση του εκκρεμούς, και επομένως του μαγνήτη, με το πηνίο.



(α)

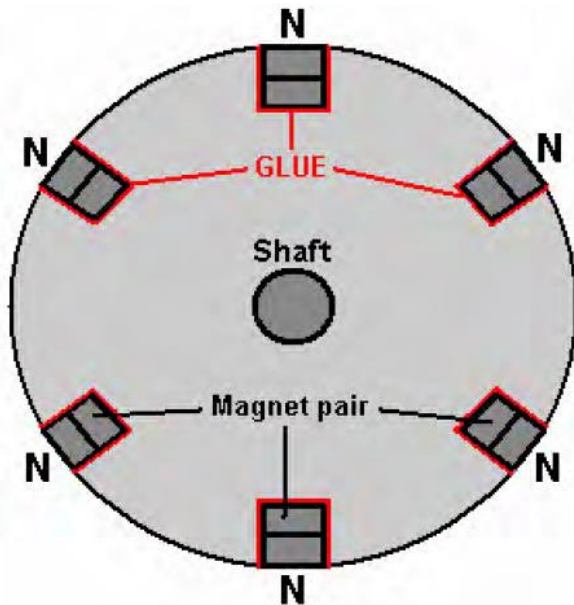


(β)

Εικόνα 3.12 Συστήματα Τύπου Rogers [34].

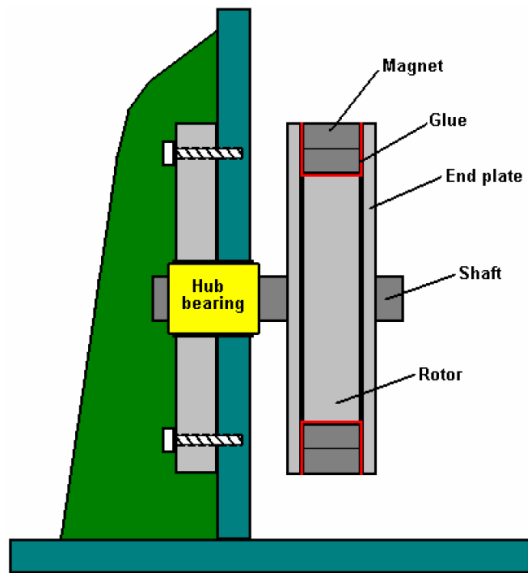
Το δεύτερο σύστημα στο οποίο θα αναφερθούμε στην παρούσα ενότητα αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως “Ron Pugh’s Battery Charger”. Η συσκευή αυτή είναι πολύ ισχυρότερη από τα μέσα συστήματα. Αξίζει να αναφερθεί ότι όταν η συσκευή βρίσκεται σε λειτουργία, διαρρέεται από πολύ υψηλά ρεύματα και δημιουργούν πολύ υψηλές τάσεις.

Ο ρότορας είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο και πάνω του είναι τοποθετημένοι 6 μαγνήτες, οι οποίοι βρίσκονται 60 μοίρες μετατοπισμένοι μεταξύ τους, λαμβάνοντας ως άξονα μέτρησης το κέντρο του ρότορα. Οι μαγνήτες είναι φτιαγμένοι από κεραμικά υλικά με διαστάσεις 22mm X 47mm X 10mm. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στην Εικ. 3.13.

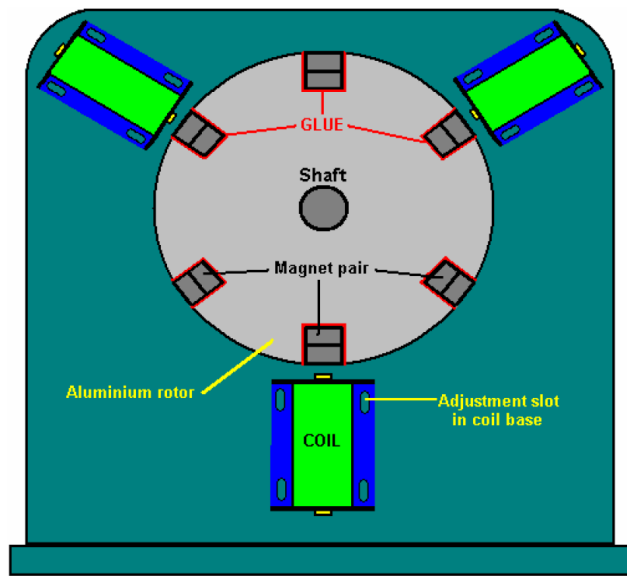


Εικόνα 3.13 Σύστημα φόρτισης μπαταριών του Ron Pugh [34].

Έχοντας κατά νου την διαδικασία παραγωγής επαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος που περιεγράφηκε προηγουμένως, η τελική διάταξη για την φόρτιση των μπαταριών απεικονίζεται στην Εικ. 3.14.



(α)



(β)

Εικόνα 3.14 Σύστημα φόρτισης μπαταριών του Ron Pugh [34].

Αναφορές

1. Νικόλαος Ι. Κολλιόπουλος, “Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Κυκλώματα”, 2012
2. A. Malvino, D.J. Bates, “Ηλεκτρονική, Αρχές και Εφαρμογές”, 2012
3. Global Industry Analysts, "Battery Chargers – Global Strategic Business Report," Electronics.ca Publications., Report ID: 344098, March 2017.
4. D.R. Ely and R.E. García, "Heterogeneous Nucleation and Growth of Lithium Electrodeposits on Negative Electrodes," Journal of the Electrochemical Society, vol. 160, pp. A668, January 01. 2013.
5. J.Y. Song, Y.Y. Wang, and C.C. Wan, "Review of gel-type polymer electrolytes for lithium-ion batteries," Journal of Power Sources, vol. 77, pp. 183-197, 1999.
6. D. Belov and M. Yang, "Investigation of the kinetic mechanism in overcharge process for Li-ion battery," Solid State Ionics, vol. 179, pp. 1816-1821, 2008.
7. S.S. Choi and H.S. Lim, "Factors that affect cycle-life and possible degradation mechanisms of a Li-ion cell based on LiCoO₂," Journal of Power Sources, vol. 111, pp. 130-136, 2002.
8. Weixiang Shen, Thanh Tu Vo and A. Kapoor, "Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview," 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Singapore, pp. 1567-1572, 2012.
9. P. H. Cheng and C. L. Chen, "High efficiency and nondissipative fast charging strategy," IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 150, pp. 539-545, 2003.
10. A.A. Hussein and I. Batarseh, "A Review of Charging Algorithms for Nickel and Lithium Battery Chargers," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 3, pp. 830-838, 2011.
11. V.L. Teofilo, L.V. Merritt, and R.P. Hollandsworth, "Advanced lithium ion battery charger," The Twelfth Annual Battery Conference on Applications and Advances, Long Beach, CA., pp. 227-231, 1997.
12. M.J. Isaacson, R.P. Hollandsworth, P.J. Giampaoli, F.A. Linkowsky, A. Salim, and V.L. Teofilo, "Advanced lithium ion battery charger," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 12, no. 11, pp. 193-198, 2000.

13. Chih-Chiang Hua and Meng-Yu Lin, "A study of charging control of lead-acid battery for electric vehicles," in Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2000. ISIE 2000, pp. 140 vol.1, 2000.
14. J.-J. Chen, F.-C. Yang, C.-C. Lai, Y.-S. Hwang, and R.-G. Lee, "A High-Efficiency Multimode Li-Ion Battery Charger With Variable Current Source and Controlling Previous-Stage Supply Voltage," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, pp. 2469-2478, 2009.
15. B.G. Kim, F.P. Tredeau, and Z.M. Salameh, "Fast chargeability lithium polymer batteries," 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, pp. 1-5, 2008.
16. Maxim Integrated (2018 March 26), "Switch-Mode, Linear, and Pulse Charging Techniques for Li+ Battery in Mobile Phones and PDAs," August. 2002. [Online] Available: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/913>
17. C.-H. Lin, H.-W. Huang, and K.-H. Chen, "Built-in resistance compensation (BRC) technique for fast charging Li-Ion battery charger," 2008 IEEE Custom Integrated Circuits Conference, San Jose, CA, pp. 33-36, 2008.
18. J.-J. Chen, F.-C. Yang, C.-C. Lai, Y.-S. Hwang, and R.-G. Lee, "A High-Efficiency Multimode Li-Ion Battery Charger with Variable Current Source and Controlling Previous-Stage Supply Voltage," IEEE Transactions of Industrial Electronics, vol. 56, pp. 2469-2478, 2009.
19. H. Han, Y. Choi, S. Choi and R. Kim, "A High Efficiency LLC Resonant Converter with Wide Ranged Output Voltage Using Adaptive Turn Ratio Scheme for a Li-Ion Battery Charger," pp. 1-6, 2016.
20. Y-C Hsieh and C-S Huang, "Li-ion battery charger based on digitally controlled phase-shifted full-bridge converter," IET Power Electronics, vol. 4, pp. 242, Feb 1., 2011.
21. J. Graw and H. Zimmermann, "Charging multiple batteries using the boost-flyback converter," 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), Florence, pp. 963-967, 2012.

22. R.-H. Peng, T.-W. Tsai, K.-H. Chen, Z. H. Tai, Y. H. Cheng, C. C. Tsai, and et al, "Switching-based charger with continuously built-in resistor detector (CBIRD) and analog multiplication-division unit (AMDU) for fast charging in Li-Ion battery," 2013 Proceedings of the ESSCIRC (ESSCIRC), Bucharest, pp. 157-160, 2013.
23. David H Wilson, "Method of charging storage batteries," US Patent US1126667A, June 27. 1914.
24. J.M. Amanor BOADU, A. Guiseppi-Elie and E. Sanchez-Sinencio, "Search for Optimal Pulse Charging Parameters for Li-ion Polymer Batteries Using Taguchi Orthogonal Arrays," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. PP, pp. 1, 2018.
25. J. Li, E. Murphy, J. Winnick, and P.A. Kohl, "The effects of pulse charging on cycling characteristics of commercial lithium-ion batteries," Journal of Power Sources, vol. 102, pp. 302-309, 2001.
26. A. Jossen, "Fundamentals of battery dynamics," Journal of Power Sources, vol. 154, pp. 530-538, 2006.
27. S. Tobishima and J. Yamaki, "A consideration of lithium cell safety," Journal of Power Sources, vol. 81-82, pp. 882-886, 1999.
28. M. Di Yin, J. Cho, and D. Park, "Pulse-Based Fast Battery IoT Charger Using Dynamic Frequency and Duty Control Techniques Based on Multi-Sensing of Polarization Curve," Journal of Energies, vol. 9, pp. 209, Mar 1, 2016.
29. L.R. Chen, "A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-Variied Technique," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, pp. 398-405, 2007.
30. B.K. Purushothaman and U. Landau, "Rapid Charging of Lithium-Ion Batteries using Pulsed Currents," Journal of the Electrochemical Society, vol. 153, pp. A533, 2006.
31. J.M Amanor-Boadu, "The Search for Optimal Pulse Charging Parameters and the Impact of these Parameters on Lithium Ion Batteries", 2018.
32. Markets and Markets, "Internet of Things (IoT) Market by Software Solution - Global Forecast to 2022" Research and Markets, Report ID: 4308780, Jun 15, 2017.

33. J. M. Amanor Boadu, M. Abouzied and E. Sanchez-Sinencio, "An Efficient and Fast Li-ion Battery Charging System Using Energy Harvesting or Conventional Sources," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. PP, pp. 1, 2018.
34. P. Kelly, W. N. Barbat, "A Practical Guide to 'Free Energy' Devices", 2006.

Κατάλογος Εικόνων

| | | |
|-------------|---|----|
| Εικόνα 1.1 | Αντιστάτης..... | 5 |
| Εικόνα 1.2 | Συνδεσμολογία αντιστάσεων σε σειρά..... | 6 |
| Εικόνα 1.3 | Συνδεσμολογία αντιστάσεων παράλληλα..... | 6 |
| Εικόνα 1.4 | Τυπικές μορφές εμπορικών πυκνωτών..... | 9 |
| Εικόνα 1.5 | Κρυσταλλικός ταλαντωτής..... | 12 |
| Εικόνα 1.6 | Δίοδοι φωτοεκπομπής (LED)..... | 13 |
| Εικόνα 1.7 | Τρανζίστορ..... | 15 |
| Εικόνα 1.8 | Τρανζίστορ BJT και FET..... | 15 |
| Εικόνα 1.9 | Δίοδοι..... | 16 |
| Εικόνα 1.10 | Atmega 328p-ru..... | 18 |
| Εικόνα 2.1 | Αλγόριθμος φόρτισης CC-CV..... | 21 |
| Εικόνα 2.2 | Κυκλωματικό ισοδύναμο γραμμικού φορτιστή και φορτιστή αλλαγής ρυθμού που εφαρμόζονται στον αλγόριθμο CC-CV..... | 24 |
| Εικόνα 3.1 | Χαρακτηριστικά ρευματικού παλμού φόρτισης..... | 27 |
| Εικόνα 3.2 | Διάγραμμα ροής προτεινόμενου αλγορίθμου παλμικής φόρτισης..... | 33 |
| Εικόνα 3.3 | Μεταβολή της πόλωσης της μπαταρίας συγκριτικά με το SoC..... | 34 |
| Εικόνα 3.4 | Μπλοκ διάγραμμα παλμικού φορτιστή..... | 36 |
| Εικόνα 3.5 | Σύγκριση κατανάλωσης ισχύος και χρόνο φόρτισης..... | 36 |
| Εικόνα 3.6 | Κυκλωματικό ισοδύναμο του παλμικού φορτιστή..... | 37 |
| Εικόνα 3.7 | Μεταβολή του μέτρου της αντίστασης ως προς την συχνότητα..... | 40 |
| Εικόνα 3.8 | Πειραματική ελάχιστη αντίσταση με την συχνότητα για διαφορετικές συχνότητες μπαταριών..... | 41 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Εικόνα 3.9 | Πειραματική διάταξη ελέγχου παλμικού φορτιστή..... | 42 |
| Εικόνα 3.10 | Σύγκριση προτεινόμενου αλγορίθμου παλμικής φόρτισης με τον αλγόριθμο CC-CV για μπαταρία ιόντων λιθίου 100mAh..... | 43 |
| Εικόνα 3.11 | Σύγκριση προτεινόμενου αλγορίθμου παλμικής φόρτισης με τον αλγόριθμο CC-CV για μπαταρία ιόντων λιθίου 45mAh..... | 44 |
| Εικόνα 3.12 | Συστήματα τύπου Rogers..... | 50 |
| Εικόνα 3.13 | Σύστημα φόρτισης Μπαταριών Ron Pugh..... | 51 |
| Εικόνα 3.14 | Σύστημα φόρτισης μπαταριών του Ron Pugh..... | 52 |