



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη συστήματος διαχείρισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος και
ανάπτυξη οικιακού συστήματος διαχείρισης ενέργειας με χρήση
μπαταρίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Βασιλείου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη συστήματος διαχείρισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος και
ανάπτυξη οικιακού συστήματος διαχείρισης ενέργειας με χρήση
μπαταρίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Βασιλείου

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 24^η Οκτωβρίου 2017.

.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παπαθανασίου Σταύρος
Αναπ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεωργιλάκης Πάυλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

.....

Νικόλαος Βασιλείου

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

Copyright © Νικόλαος Βασιλείου, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον όσο και σύγχρονο θέμα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον διδάκτωρ κ. Βασίλειο Κλεφτάκη για την αμέριστη προσοχή και υποστήριξή του καθ'όλη την διάρκεια του εγχειρήματος αυτού. Οι πολύτιμες γνώσεις και συμβουλές που μου παρείχε υπήρξαν καθοριστικές στην περάτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τον ευρύτερό μου κύκλο για την οικονομική και ηθική στήριξή τους.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται ένα σύστημα διαχείρισης μπαταρίας (BMS) για μπαταρίες μολύβδου-οξέος σε περιβάλλον MATLAB/Simulink. Η συνεχής προσπάθεια των τελευταίων ετών για περιορισμό των συμβατικών καυσίμων και στροφή στις ανανεώσιμες πηγές καθιστά την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας ιδιαίτερα σημαντική. Οι μπαταρίες ωστόσο, αποτελούν ένα από τα πιο ευάλωτα και αναλώσιμα στοιχεία σε κάθε σύστημα που χρησιμοποιούνται. Βασικός σκοπός λοιπόν του BMS είναι η προστασία της μπαταρίας και η επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της, μέσω ελέγχου που εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία της.

Οι κυριότερες λειτουργίες του BMS που εξετάζεται αφορούν τον έλεγχο φόρτισης και εκφόρτισης, την εξισορρόπηση φόρτισης και τον ακριβή υπολογισμό της στάθμης φόρτισης SoC. Η πρώτη λειτουργία αποτρέπει την υπερφόρτιση ή υπερβολική εκφόρτιση της μπαταρίας, η δεύτερη εξασφαλίζει την ίση κατανομή της φόρτισης ανάμεσα στα στοιχεία της μπαταρίας, ενώ η τρίτη επιτρέπει την ομαλή λειτουργία των δύο παραπάνω και παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες προς τον χρήστη.

Σε δεύτερο στάδιο αναπτύσσεται ένα οικιακό σύστημα διαχείρισης ενέργειας με χρήση μπαταρίας και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η λειτουργία του εν λόγω συστήματος βασίζεται σε τρεις ιεραρχημένες αρχές λειτουργίας: την αξιοποίηση του πλεονάσματος ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για φόρτιση της μπαταρίας, την εξοικονόμηση χρημάτων μέσω φόρτισης της μπαταρίας σε περιόδους χαμηλής τιμής και εκφόρτιση σε περιόδους υψηλής τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος την εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης. Χρησιμοποιώντας προβλέψεις για την καμπύλη ζήτησης και παραγωγής, το σύστημα υπολογίζει την βέλτιστη ισχύ λειτουργίας της μπαταρίας για κάθε ώρα λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω αρχές λειτουργίας. Η υλοποίηση του συγκεκριμένου συστήματος διαχείρισης μπαταρίας και οι αντίστοιχες προσομοιώσεις έγιναν σε MATLAB.

Λέξεις κλειδιά

μπαταρία, σύστημα διαχείρισης μπαταρίας, μολύβδου-οξέος, έλεγχος, φόρτιση, εκφόρτιση, εξισορρόπηση φόρτισης, στάθμη φόρτισης, οικιακό σύστημα διαχείρισης ενέργειας, καμπύλη ζήτησης

Abstract

In the current diploma thesis, a Battery Management System (BMS) for lead-acid batteries is developed using MATLAB/Simulink. Due to the necessity to mitigate conventional sources usage and turn to renewable energy, electrical energy storage has been established as a key factor. Batteries however, are one of the most vulnerable parts in any system they are utilized. Thus, the main purpose of the BMS is to protect the battery and prolong its life, through control that ensures battery's appropriate functioning.

The fundamental tasks of the examined BMS refer to charging and discharging control, charging equalization and accurate State of Charge (SoC) calculation. The first one prevents the battery from over- or under-charging, the second one secures the even distribution of charge among the battery cells while the third one provides the user with reliable information.

In the second section of this thesis, a residential energy management system with battery and renewable energy sources usage is presented. The operation of this BMS is based on three priorities; the utilization of renewable energy surplus for battery charging, money saving by charging at low prices and discharging at high prices and smoothening of the residual demand curve. The system collects prediction data of load demand and renewable production and calculates the suitable rated power of the battery for every hour taking the above priorities into consideration. This BMS is implemented in MATLAB and simulations of its operations are presented.

Key Words

battery, battery management system, BMS, lead-acid, control, charging, discharging, equalization, balancing, state of charge, SoC, residual energy management system, demand curve

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	10
Περιεχόμενα εικόνων	14
Περιεχόμενα πινάκων	16
1. ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ	17
1.1 Εισαγωγή	17
1.2 Ιστορική αναδρομή	17
1.3 Πεδία εφαρμογής	22
1.4 Αρχές λειτουργίας.....	23
1.4.1 Σύσταση στοιχείου.....	23
1.4.2 Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις.....	24
1.4.3 Συνδεσμολογία.....	26
1.5 Χρήσιμα μεγέθη και ορολογία.....	27
1.5.1 Βασικά μεγέθη	27
1.5.2 Κατάσταση λειτουργίας μπαταρίας (μεταβλητά μεγέθη).....	27
1.5.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά	28
1.5.4 Λοιπά μεγέθη	29
1.6 Ταξινόμηση στοιχείων-μπαταριών	29
1.6.1 Πρωτεύουσες μπαταρίες	29
1.6.1.1 Μπαταρίες ψευδάργυρου-άνθρακα (zinc-carbon batteries)	30
1.6.1.2 Αλκαλικές μπαταρίες μαγγανίου (Zn/alkaline/MnO ₂ batteries).....	31
1.6.1.3 Μπαταρίες υδράργυρου (Zn/HgO batteries) (Cd/HgO batteries).....	31
1.6.1.4 Μπαταρίες αργύρου (Zn/Ag ₂ O batteries)	31
1.6.1.5 Μπαταρίες ψευδάργυρου-αέρα (Zn/O ₂ batteries).....	31
1.6.1.6 Μπαταρίες μαγνησίου (Mg/MnO ₂ batteries).....	32
1.6.1.7 Μπαταρίες λιθίου (lithium batteries).....	32
1.6.1.8 Σύνοψη.....	33
1.6.2 Εφεδρικές μπαταρίες.....	33
1.6.3 Δευτερεύουσες μπαταρίες.....	35
1.6.3.1 Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (lead-acid batteries).....	37

1.6.3.2 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium batteries)	38
1.6.3.3 Μπαταρίες νικελίου-σιδήρου (nickel-iron batteries).....	39
1.6.3.4 Μπαταρίες αργύρου-ψευδάργυρου (silver-zinc batteries).....	39
1.6.3.5 Μπαταρίες αργύρου-καδμίου (silver-cadmium batteries)	39
1.6.3.6 Μπαταρίες νικελίου-ψευδάργυρου (nickel-zinc batteries)	39
1.6.3.7 Μπαταρίες νικελίου-υδρογόνου (nickel-hydrogen batteries)	40
1.6.3.8 Αλκαλικές μπαταρίες μαγγανίου (zinc/manganese dioxide batteries)	40
1.6.3.9 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (lithium ion batteries).....	40
1.6.3.10 Σύνοψη.....	41
2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	42
2.1 Ορισμός.....	42
2.2 Δομή.....	42
2.3 Λειτουργίες	44
2.4 Παγκόσμια αγορά συστημάτων διαχείρισης μπαταρίας.....	46
3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB-SIMULINK	48
3.1 Εισαγωγή	48
3.2 Επιλογή μπαταρίας	50
3.2.1 Τύπος μπαταρίας.....	50
3.2.2 Χαρακτηριστικά μπαταρίας.....	52
3.2.3 Αυτοεκφόρτιση μπαταρίας	54
3.3 Υλοποίηση αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC	55
3.3.1 Υπολογισμός παραμέτρων μετατροπέα υποβιβασμού τάσης.....	56
3.3.2 Υπολογισμός παραμέτρων μετατροπέα ανύψωσης τάσης.....	58
3.3.3 Υπολογισμός παραμέτρων αμφίδρομου μετατροπέα	60
3.4 Έλεγχος αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC	60
3.4.1 Ελεγκτές PID	60
3.4.2 Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών.....	63
3.4.3 Υλοποίηση μπλοκ ελέγχου αμφίδρομου μετατροπέα σε Simulink	64
3.5 Προσομοίωση εκφόρτισης-φόρτισης με σταθερή ισχύ	65
4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ-ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	69
4.1 Έλεγχος λειτουργίας εκφόρτισης μπαταρίας.....	70
4.2 Έλεγχος λειτουργίας φόρτισης μπαταρίας.....	71
4.2.1 Πρώτο στάδιο φόρτισης (bulk charge)	72

4.2.2 Δεύτερο στάδιο φόρτισης (absorption charge)	74
4.2.3 Τρίτο στάδιο φόρτισης (float charge)	74
4.2.4 Αναπλήρωση υγρών ηλεκτρολύτη.....	75
4.3 Υλοποίηση ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης σε Simulink	77
4.4 Προσομοιώσεις λειτουργιών εκφόρτισης-φόρτισης.....	81
4.4.1 Προσομοίωση εκφόρτισης μπαταρίας	81
4.4.2 Προσομοίωση φόρτισης μπαταρίας.....	86
5. ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	90
5.1 Γενικά.....	90
5.2 Τροποποίηση μοντέλου Simulink για έλεγχο τεχνικών εξισορρόπησης φόρτισης	91
5.3 Εξισορρόπηση φόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη	94
5.4 Υλοποίηση ελέγχου λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink.....	96
5.5 Προσομοίωση λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink.....	99
6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (SoC)	103
6.1 Μέθοδοι υπολογισμού στάθμης φόρτισης μπαταρίας	103
6.1.1 Ελεγχόμενη εκφόρτιση	104
6.1.2 Μέθοδος μέτρησης αμπερών (μέθοδος Coulomb).....	104
6.1.3 Μέθοδος τάσης ανοιχτού κυκλώματος	105
6.1.4 Μέθοδος τάσης ακροδεκτών μπαταρίας	107
6.1.5 Γραμμική μέθοδος	107
6.1.6 Coup de fouet (λωρίο μάλιστα)	108
6.1.7 Μέθοδος μέτρησης των φυσικών ιδιοτήτων του ηλεκτρολύτη	109
6.1.8 Μέθοδος φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης	109
6.1.9 Μέθοδος εσωτερικής αντίστασης	110
6.1.10 Φίλτρα Kalman	111
6.1.11 Νευρωνικά δίκτυα.....	112
6.1.12 Σύνοψη.....	114
6.2 Έλεγχος μεθόδων υπολογισμού SoC σε Matlab-Simulink.....	115
6.2.1 Coup de fouet.....	115
6.2.2 Μέθοδος τάσης ακροδεκτών μπαταρίας	119
6.2.3 Γραμμική μέθοδος	122
6.3 Μέθοδος Coulomb με σημεία αναπροσαρμογής σφάλματος	129
6.3.1 Υλοποίηση μεθόδου σε Simulink	131

6.3.2 Προσομοιώσεις σε Simulink.....	134
7. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΟΙΚΙΑΚΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑ.....	136
7.1 Γενικά.....	136
7.2 Μεθοδολογία.....	137
7.3 Προσομοιώσεις.....	142
7.3.1 Θερινό ωράριο	142
7.3.2 Χειμερινό ωράριο	146
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	149
Παράρτημα	151
A.Μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων συνάρτησης $y=A+Bx$	151
i.Σχέσεις	151
ii.Κώδικας Matlab.....	151
B.Μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων $f(x,y,z)=Ax+By+Cz+D$	152
i.Σχέσεις	152
ii.Κώδικας Matlab.....	153
Γ.Σύστημα διαχείρισης ενέργειας για οικιακή μπαταρία	154
i.Κώδικας Matlab.....	154
Βιβλιογραφία	160

Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 1.1: Η ηλεκτροστατική γεννήτρια του Otto von Guericke	17
Εικόνα 1.2: Βολταϊκή στήλη ως έκθεμα στο Tempio Voltiano.....	19
Εικόνα 1.3: Ο William Cruickshank και η πρώτη μπαταρία μαζικής παραγωγής	20
Εικόνα 1.4: Η μπαταρία της Βαγδάτης	21
Εικόνα 1.5: Σχηματική αναπαράσταση στοιχείου	24
Εικόνα 1.6: Γαλβανικό στοιχείο	25
Εικόνα 1.7: Ηλεκτρολυτικό στοιχείο	26
Εικόνα 2.1: Διάγραμμα τυπικού συστήματος διαχείρισης μπαταρίας.....	44
Εικόνα 2.2: Αξία-ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης παγκόσμιας αγοράς BMS (πηγή:FMI)	46
Εικόνα 2.3: Μέρη αγοράς BMS (Πηγή:FMI)	47
Εικόνα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου	48
Εικόνα 3.2: Αρχικό μοντέλο σε Matlab-Simulink	49
Εικόνα 3.3: Πλάκες μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης	51
Εικόνα 3.4: Αναπλήρωση υγρού σε μπαταρία υγρού ηλεκτρολύτη	52
Εικόνα 3.5: Παράμετροι μπαταρίας σε Simulink	53
Εικόνα 3.6: Αμφίδρομος μετατροπέας DC/DC σε περιβάλλον Simulink	55
Εικόνα 3.7: Διάγραμμα ελεγκτή PID	61
Εικόνα 3.8: Διάγραμμα συστήματος κλειστού βρόχου με ελεγκτή PID	62
Εικόνα 3.9: Παλμοσειρές οδήγησης ημιαγωγικών στοιχείων	63
Εικόνα 3.10: Μπλοκ ελέγχου αμφίδρομου μετατροπέα	64
Εικόνα 3.11: Προσομοίωση εκφόρτισης με σταθερή ισχύ	66
Εικόνα 3.12: Προσομοίωση φόρτισης με σταθερή ισχύ	67
Εικόνα 4.1: Κύκλοι ζωής μπαταρίας συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης	69
Εικόνα 4.2: Χωρητικότητα μπαταρίας συναρτήσει του ρυθμού εκφόρτισης.....	70
Εικόνα 4.3: Φόρτιση μπαταρίας μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη.....	72
Εικόνα 4.4: Σύστημα αναπλήρωσης απιονισμένου νερού ηλεκτρολύτη	75
Εικόνα 4.5: Σύστημα καταλύτη ανασυνδυασμού νερού.....	76
Εικόνα 4.6: Επίδραση χρήσης καταλύτη στην κατανάλωση νερού	77
Εικόνα 4.7: Μπλοκ ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης σε Simulink 1/3	78
Εικόνα 4.8: Μπλοκ ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης σε Simulink 2/3	79
Εικόνα 4.9: Μπλοκ ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης σε Simulink 3/3	81
Εικόνα 4.10: SoC/Ρεύμα/Τάση εκφόρτισης για $V_{\min}=88.8V$ (1,85V ανά στοιχείο)	82
Εικόνα 4.11: Ισχύς/Ρεύμα/Τάση εκφόρτισης για $V_{\min}=88.8V$ (1,85V ανά στοιχείο)	83
Εικόνα 4.12: SoC/Ρεύμα/Τάση εκφόρτισης για $V_{\min}=93.6V$ (1,95V ανά στοιχείο)	84
Εικόνα 4.13: Ισχύς/Ρεύμα/Τάση εκφόρτισης για $V_{\min}=93.6V$ (1,95V ανά στοιχείο)	85
Εικόνα 4.14: SoC/Ρεύμα/Τάση φόρτισης	88
Εικόνα 4.15: Ισχύς/Ρεύμα/Τάση φόρτισης	89
Εικόνα 5.1: Τροποποιημένο μοντέλο σε Simulink	90
Εικόνα 5.2: Διαχωρισμός μπαταρίας	92
Εικόνα 5.3: Παράμετροι μπαταριών σε Simulink	93

Εικόνα 5.4: Διαδικασία εξισορρόπησης φόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος	94
Εικόνα 5.5: Μπλοκ ελέγχου εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink 1/3.....	96
Εικόνα 5.6: Μπλοκ ελέγχου εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink 2/3.....	97
Εικόνα 5.7: Μπλοκ ελέγχου εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink 3/3.....	99
Εικόνα 5.8: SoC/Ρεύμα/Τάση επιμέρους μπαταριών για εξισορρόπηση φόρτισης.....	100
Εικόνα 5.9: Ισχύς/Ρεύμα/Τάση συστήματος μπαταρίας για εξισορρόπηση φόρτισης	101
Εικόνα 6.1: Ενσωματωμένο μπλοκ υπολογισμού SoC σε Simulink	105
Εικόνα 6.2: Σχέση τάσης ανοιχτοκύκλωσης - SoC για μπαταρία μολύβδου-οξέος 12V	106
Εικόνα 6.3: Περιοχή coup de fouet.....	108
Εικόνα 6.4: Διάγραμμα Nyquist σύνθετης αντίστασης μπαταρίας μολύβδου-οξέος	110
Εικόνα 6.5: Μοντέλο μπαταρίας για δυναμικές εφαρμογές	111
Εικόνα 6.6: Μοντέλο μπαταρίας για EKF	112
Εικόνα 6.7: Αρχιτεκτονική BP νευρωνικού δικτύου για υπολογισμό SoC	113
Εικόνα 6.8: SoC συναρτήσει τάσης trough	116
Εικόνα 6.9: SoC συναρτήσει τάσης plateau	117
Εικόνα 6.10: Περιοχή coup de fouet για ρυθμό εκφόρτισης 0.25C.....	118
Εικόνα 6.11: Υπολογισμός SoC μέσω V_t (εκφόρτιση με σταθερή ισχύ 5kW).....	120
Εικόνα 6.12: Υπολογισμός SoC μέσω V_t (εκφόρτιση με σταθερή ισχύ 10kW).....	121
Εικόνα 6.13: Μπλοκ υπολογισμού SoC μέσω γραμμικής μεθόδου σε Simulink.....	123
Εικόνα 6.14: Υπολογισμός SoC (εκφόρτιση με σταθερή ισχύ 5kW).....	124
Εικόνα 6.15: Υπολογισμός SoC (εκφόρτιση με σταθερή ισχύ 10kW).....	125
Εικόνα 6.16: Παραγωγή τυχαίων τιμών έντασης ρεύματος εκφόρτισης σε Simulink	126
Εικόνα 6.17: Υπολογισμός SoC (εκφόρτιση με $V_{\min}=88.8V$ και τυχαίες τιμές I).....	127
Εικόνα 6.18: Υπολογισμός SoC (ελεγχόμενη φόρτιση σε τρία στάδια).....	128
Εικόνα 6.19: Εξωτερικό μπλοκ υπολογισμού SoC.....	131
Εικόνα 6.20: Εσωτερικό μπλοκ υπολογισμού SoC	132
Εικόνα 6.21: Μπλοκ υπολογισμού συντελεστή k.....	132
Εικόνα 6.22: Μπλοκ ελέγχου σημείων αναπροσαρμογής σφάλματος	133
Εικόνα 6.23: Μπλοκ τελικού υπολογισμού SoC	133
Εικόνα 6.24: Υπολογισμός SoC μέσω μεθόδου σημείων αναπροσαρμογής σφάλματος	135
Εικόνα 7.1: Διάγραμμα ροής 1/2	138
Εικόνα 7.2: Διάγραμμα ροής 2/2	139
Εικόνα 7.3: Καμπύλη ζήτησης-παραγωγής	144
Εικόνα 7.4: Προσομοίωση θερινού ωραρίου.....	145
Εικόνα 7.5: Προσομοίωση χειμερινού ωραρίου	147

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1.1: Πρωτεύουσες μπαταρίες – Χαρακτηριστικά	33
Πίνακας 1.2: Δευτερεύουσες μπαταρίες – Χαρακτηριστικά	41
Πίνακας 6.1: Μέθοδοι υπολογισμού SoC – Χαρακτηριστικά	114
Πίνακας 6.2: Υπολογισμός SoC με βάση την τιμή της τάσης trough	116
Πίνακας 6.3: Υπολογισμός SoC με βάση την τιμή της τάσης plateau	117
Πίνακας 7.1: Αριθμητικά δεδομένα προσομοίωσης θερινού ωραρίου.....	143
Πίνακας 7.2: Αριθμητικά δεδομένα προσομοίωσης χειμερινού ωραρίου.....	146

1.ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Η μπαταρία ή ηλεκτρικός συσσωρευτής είναι μια συσκευή, η οποία μετατρέπει την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική, μέσω μιας οξειδοαναγωγικής χημικής αντίδρασης. Στην περίπτωση επαναφορτιζόμενης μπαταρίας, η μπαταρία επαναφορτίζεται με την αντίστροφη της παραπάνω διαδικασίας.

Δομικό συστατικό μιας μπαταρίας είναι το στοιχείο (cell). Το στοιχείο είναι η βασική ηλεκτροχημική μονάδα, η οποία μετατρέποντας άμεσα την αποθηκευμένη χημική ενέργεια λειτουργεί ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα ή περισσότερα τέτοια στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα, σε συνδυασμό ενδεχομένως με άλλα βοηθητικά μέρη που αφορούν τον έλεγχο (ασφάλειες, δίοδοι κλπ), αποτελούν την μπαταρία. Η σύνδεση γίνεται με τρόπο κατάλληλο ώστε να διασφαλίζονται σε κάθε περίπτωση οι απαιτούμενες προδιαγραφές της τάσης λειτουργίας και της έντασης του ρεύματος.[1]

1.2 Ιστορική αναδρομή



Εικόνα 1.1: Η ηλεκτροστατική γεννήτρια του Otto von Guericke

Το 1660 ο Otto von Guericke (1602-1686) κατασκεύασε την πρώτη ηλεκτρική μηχανή. Επρόκειτο για μια ηλεκτροστατική γεννήτρια, αποτελούμενη από μια σφαίρα από θείο, η οποία μπορούσε να περιστραφεί σε μια ξύλινη βάση και να μεταφερθεί στην άκρη μιας μονωτικής ράβδου (εικόνα 1.1). Όταν η σφαίρα αυτή τριβόταν με το χέρι, προσέλκυε

πούπουλα και μικρά κομμάτια χαρτιού. Ο Guericke απέδειξε ότι οι σπινθήρες που δημιουργούνταν ήταν στην πραγματικότητα ηλεκτρισμός.

Η πρώτη προτεινόμενη χρήση του στατικού ηλεκτρισμού έγινε από τον Alessandro Volta (1745-1827) με το ονομαζόμενο ηλεκτρικό πιστόλι (electric pistol). Αποτελούνταν από ένα ηλεκτρικό καλώδιο τοποθετημένο σε ένα βάζο γεμάτο μεθάνιο. Στέλνοντας έναν ηλεκτρικό σπινθήρα μέσω του καλωδίου το βάζο εκρήγνυτο.

Ο Volta θέλησε να χρησιμοποιήσει την εφεύρεση του αυτήν στον τομέα των επικοινωνιών. Ένα καλώδιο σιδήρου θα εκτεινόταν με τη βοήθεια ξύλινων στύλων από την γενέτειρα του Κόμο ως το Μιλάνο, όπου θα τερμάτιζε σε ένα δοχείο γεμάτο μεθάνιο. Το δίκτυο αυτό ωστόσο δεν κατασκευάστηκε ποτέ.

Το 1771, ο εργαζόμενος στο πανεπιστήμιο της Μπολόνια Luigi Galvani (1737-1798), παρατήρησε κάτι που θα γεννούσε την θεωρία του ζωικού ηλεκτρισμού. Πειραματιζόμενος με έναν νεκρό βάτραχο, του οποίου η σπονδυλική στήλη διαπερνώταν από ένα ορειχάλκινο σύρμα και τα πόδια ακουμπούσαν σε ένα σιδερένιο έλασμα, διαπίστωσε την σύσπαση των ποδιών του βατράχου κάθε φορά που το σύρμα ερχόταν σε επαφή με το έλασμα. Ο Galvani απέδιδε το φαινόμενο αυτό σε κάποιο είδος ζωικού ηλεκτρισμού, θεωρία όμως που αργότερα καταρρίφθηκε. Μεγάλη συμβολή σε αυτό είχε ο Alessandro Volta, ο οποίος υποστηρίζοντας πως το φαινόμενο του βατράχου οφειλόταν στην δημιουργία ηλεκτρισμού από την επαφή δύο μετάλλων, ξεκίνησε μία σειρά πειραμάτων χρησιμοποιώντας ψευδάργυρο, μόλυβδο, κασσίτερο και σίδηρο ως θετικό πόλο, χαλκό, ασήμι, χρυσό και γραφίτη ως αρνητικό.

Αποτέλεσμα των παραπάνω πειραμάτων, ήταν η εφεύρεση του πρώτου στοιχείου, το 1800. Το στοιχείο αυτό ονομάζεται σήμερα βολταϊκό προς τιμήν του δημιουργού του Alessandro Volta αλλά και γαλβανικό λόγω των αρχικών πειραμάτων του Luigi Galvani, όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο Volta οδηγήθηκε στην εφεύρεσή του αυτή, διαπιστώνοντας πως η χρήση συγκεκριμένων υγρών ως αγωγών, που καθιστούν δυνατή την χημική αντίδραση μεταξύ δύο μετάλλων, μπορούσε να δημιουργήσει μια συνεχή πηγή ρεύματος. Για την κατασκευή χρησιμοποίησε διαδοχικά στρώματα χαλκού, χαρτονιού και ψευδάργυρου βυθισμένα σε αλατισμένο νερό (εικόνα 1.2), ανακαλύπτοντας παράλληλα ότι η τάση αυξανόταν όσο τοποθετούσε επιπλέον στρώματα-στοιχεία το ένα πάνω από το άλλο.

Την ίδια χρονιά, ο Volta παρουσίασε την εφεύρεσή του στη Βασιλική Κοινότητα του Λονδίνου (Royal Society of London). Πλέον τα πειράματα δεν περιορίζονταν στην απλή επίδειξη σπινθήρων για κλάσματα του δευτερολέπτου, σημαίνοντας έτσι την μετάβαση από τον στατικό ηλεκτρισμό στις πηγές που παρήγαγαν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα. Η Γαλλία ήταν επίσης μία από τις πρώτες χώρες που αναγνώρισαν την εφεύρεση του Volta, καθώς εκείνη την εποχή κρατούσε ιδιαίτερα θετική στάση απέναντι σε επιστημονικό δυναμικό και καινοτόμες ιδέες με σκοπό την υποστήριξη της πολιτικής της ατζέντας. Κατόπιν πρόσκλησης ο Volta πραγματοποίησε μία σειρά διαλέξεων στο Ινστιτούτο Γαλλίας (Institute of France) με παρόντα τον Napoleon Bonaparte ως μέλος του.



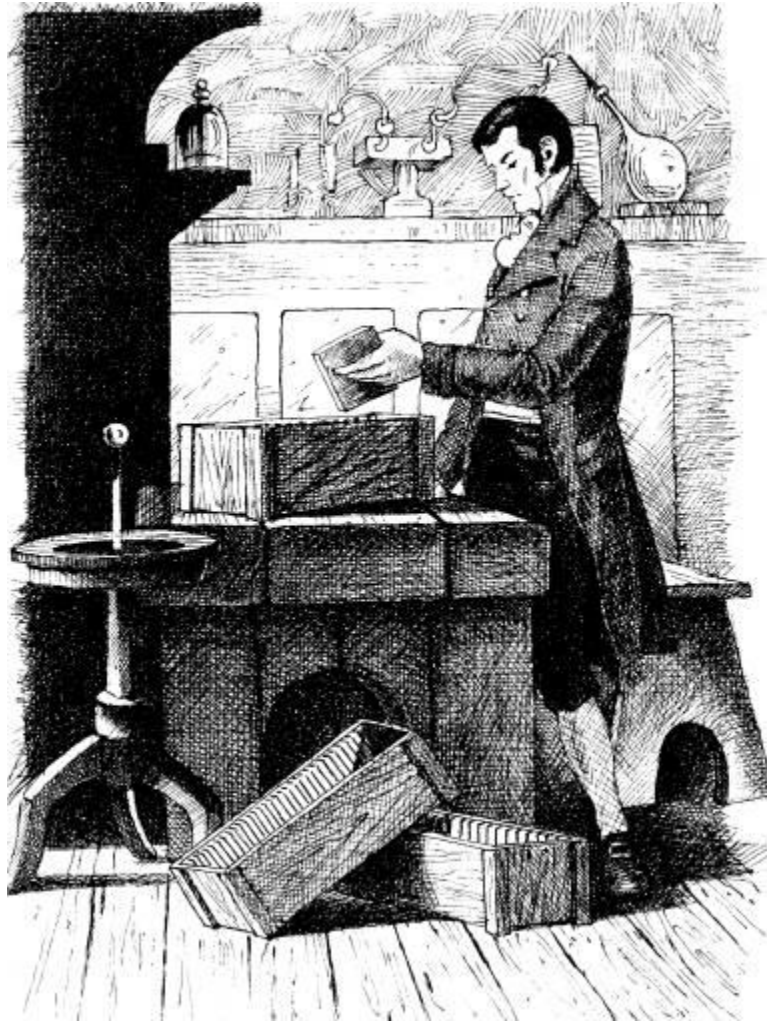
Εικόνα 1.2: Βολταϊκή στήλη ως έκθεμα στο Tempio Voltiano

Το 1800 ήταν επίσης η χρονιά που ο Sir Humphry Davy (1778-1829) ξεκίνησε να μελετά τις χημικές ιδιότητες του ηλεκτρισμού, συνεχίζοντας το έργο των Galvani και Volta, εισάγοντας παράλληλα τον νέο επιστημονικό κλάδο της Ηλεκτροχημείας. Σύντομα ανακάλυψε πως το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλούσε την αποσύνθεση ορισμένων ουσιών όταν τις διαπερνούσε, φαινόμενο που αργότερα ονομάστηκε ηλεκτρόλυση, και πως η παραγόμενη τάση ήταν άμεσα συνδεδεμένη με την αντίδραση του μετάλλου με τον ηλεκτρολύτη. Το 1802, ο Sir Davy τοποθέτησε μία μεγάλη και ισχυρή μπαταρία 2000 στοιχείων στο Βασιλικό Ινστιτούτο του Λονδίνου (Royal Institute of London) και την σύνδεσε με ηλεκτρόδια ξυλάνθρακα παράγοντας έτσι το πρώτο ηλεκτρικό φως. Μάρτυρες ανέφεραν πως ήταν η πιο λαμπερή φωτεινή αψίδα που είχαν δει. Ο ηλεκτρικός λαμπτήρας τόξου (arch lamp και μεταγενέστερα arc lamp), όπως ονομάστηκε για το λόγο αυτό, είναι και η αιτία που αμφισβητείται ο Thomas Edison ως εφευρέτης του πρώτου ηλεκτρικού λαμπτήρα το 1879.

Το 1802, ο William Cruickshank σχεδίασε την πρώτη ηλεκτρική μπαταρία μαζικής παραγωγής. Αποτελούνταν από πλάκες χαλκού, κολλημένες στα άκρα τους με ίδιου μεγέθους πλάκες ψευδάργυρου. Οι πλάκες αυτές τοποθετούνταν σε ένα μεγάλο ορθογώνιο ξύλινο κουτί, το οποίο έφερε ειδικά αυλάκια που εξασφάλιζαν την σταθερότητα των πλακών (εικόνα 1.3). Το κουτί γέμιζε με κάποιον ηλεκτρολύτη και σφραγιζόταν με τσιμέντο.

Το 1820, ο André-Marie Ampère (1775-1836) παρατήρησε πως σύρματα που έφεραν ηλεκτρικό φορτίο, άλλοτε έλκονταν μεταξύ τους και άλλοτε απωθούνταν. Ανακαλύφθηκε έτσι η τρίτη μέθοδος παραγωγής ηλεκτρισμού, μέσω του μαγνητισμού. Το 1831, ο Michael Faraday (1791-1867) απέδειξε πως ένας χάλκινος δίσκος, μπορεί να αποτελέσει μια μόνιμη πηγή ηλεκτρισμού, εφόσον περιστρέφεται σε ένα δυνατό μαγνητικό πεδίο. Έτσι αναπτύχθηκε η ηλεκτρική γεννήτρια, στη συνέχεια η ηλεκτρική μηχανή και λίγο αργότερα ο

μετασχηματιστής, που μπορούσε να μετατρέψει το ηλεκτρικό ρεύμα στα επιθυμητά επίπεδα τάσης. Το 1833, ο Faraday έθεσε τα θεμέλια της ηλεκτροχημείας, διατυπώνοντας τον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (νόμος Faraday), ο οποίος δείχνει πώς ένα μαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα για να παράγει ηλεκτρεγερτική δύναμη.



Εικόνα 1.3: Ο William Cruickshank και η πρώτη μπαταρία μαζικής παραγωγής

Το 1836, ο John Frederic Daniell (1790-1845), Άγγλος χημικός, εφηύρε το στοιχείο που φέρει το όνομά του (Daniell cell). Επρόκειτο για μια βελτιωμένη έκδοση του βολταϊκού στοιχείου, καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα που παρήγαγε ήταν σταθερότερο. Μέχρι τότε ωστόσο, όλες οι μπαταρίες χρησιμοποιούσαν πρωτεύοντα στοιχεία, γεγονός που σημαίνει πως δεν είχαν την δυνατότητα επαναφόρτισης. Αυτό άλλαξε το 1859, με την εφεύρεση της πρώτης επαναφορτιζόμενης μπαταρίας μολύβδου-οξέος (lead-acid battery) από τον Γάλλο φυσικό Gaston Planté (1834-1889). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμα και σήμερα.

Το 1868, ο Γάλλος μηχανικός Georges Leclanché (1839-1882) ανέπτυξε ένα καινούριο στοιχείο χρησιμοποιώντας ψευδάργυρο ως αρνητικό πόλο, χλωριούχο αμμώνιο ως ηλεκτρολύτη και διοξείδιο του μαγγανίου ως θετικό πόλο. Το στοιχείο Leclanché άνοιξε τον δρόμο για την εφεύρεση του πρώτου ξηρού στοιχείου (dry cell) από τον Γερμανό Carl Gassner (1855-1942), το 1888. Ονομάστηκε έτσι γιατί σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μέχρι τότε ανεπτυγμένα στοιχεία, δεν χρησιμοποιούσε υγρό ηλεκτρολύτη, αλλά ηλεκτρολύτη σε μορφή πάστας.

Το 1899, ο Waldemar Jungner (1869-1924), μηχανικός από την Σουηδία, κατασκεύασε την πρώτη μπαταρία νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium battery), χρησιμοποιώντας νικέλιο για θετικό ηλεκτρόδιο και κάδμιο για αρνητικό. Δύο χρόνια αργότερα, ο Thomas Edison (1847-1931) αντικατέστησε το κάδμιο με σίδηρο κατασκευάζοντας την πρώτη μπαταρία νικελίου-σιδήρου (nickel-iron battery). Λόγω υψηλού κατασκευαστικού κόστους σε σχέση με τα ξηρά στοιχεία και τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, η πρακτική χρήση των δύο νέων αυτών τεχνολογιών ήταν περιορισμένη.

Η στεγανή μπαταρία νικελίου-καδμίου (sealed nickel-cadmium battery), στην μορφή που την ξέρουμε σήμερα, έγινε διαθέσιμη το 1947, όταν ο Neumann κατάφερε να σφραγίσει πλήρως το στοιχείο. Λίγα χρόνια νωρίτερα και συγκεκριμένα το 1932, είχε προηγηθεί η εφεύρεση των πορώδων πλακών από τους Γερμανούς επιστήμονες Shlecht και Ackermann.[2]

Στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα ξεχωρίζει η ανάπτυξη των πρωτεύοντων αλκαλικών μπαταριών, ενώ οι προαναφερθείσες τεχνολογίες έγιναν μέσα από πολλές βελτιώσεις και παραλλαγές μαζικά διαθέσιμες. Σύμφωνα με διάφορες εικασίες, μπαταρίες χρησιμοποιήθηκαν ίσως αρκετά παλαιότερα, με επικρατέστερη να είναι αυτήν για την μπαταρία της Βαγδάτης. Πρόκειται για ένα κεραμικό σκεύος, ένα σωλήνα και μία ράβδο από διαφορετικά μέταλλα που βρέθηκαν μαζί (εικόνα 1.4) και χρονολογούνται περί το 250 π.χ.. Η θεωρία αυτήν ωστόσο απορρίπτεται από το σύνολο σχεδόν των επιστημόνων και αρχαιολόγων και η πιθανότερη χρήση του σκεύους ήταν για αποθηκευτικούς σκοπούς.



Εικόνα 1.4: Η μπαταρία της Βαγδάτης

1.3 Πεδία εφαρμογής

Κατά την δεκαετία του 1940, οι οικιακές χρήσεις των μπαταριών περιορίζονταν κυρίως σε φακούς τσέπης, ραδιόφωνα και παιχνίδια. Οι μπαταρίες χρησιμοποιούνταν βεβαίως και για βιομηχανικούς ή εμπορικούς σκοπούς, όπως για φωτισμό έκτακτης ανάγκης ή ως εφεδρική πηγή ενέργειας στα πρωτόγονα συστήματα επικοινωνιών της εποχής. Τα τελευταία 60 χρόνια ωστόσο η δημοτικότητα των μπαταριών έχει αναπτυχθεί ραγδαία, με αποτέλεσμα επαναφορτιζόμενες ή μη μπαταρίες να βρίσκουν εφαρμογή σε πληθώρα συσκευών. Ενδεικτικές οικιακές χρήσεις:

- νοικοκυριό: τηλέφωνα, ραδιόφωνα, ξυπνητήρια, συναγερμοί ασφαλείας, ανιχνευτές καπνού, φορητές λάμπες και φακοί, κουδούνια.
- εργαστήριο-κήπος: φορητά εργαλεία (κατσαβίδια, τρυπάνια, τριβεία), αλυσοπρίονα, κλαδευτήρια, χορτοκοπτικές μηχανές.
- ψυχαγωγία-επικοινωνία: φορητά ραδιόφωνα, cd-player, φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, τηλεχειριστήρια, ηλεκτρονικά παιχνίδια
- υγεία και ατομική υγιεινή: οδοντόβουρτσες, ζυγαριές, κουρευτικές μηχανές και μηχανές αποτρίχωσης, πιεσόμετρα, ακουστικά βαρηκοΐας, βηματοδότες.

Υπολογίζεται ότι μια μέση οικογένεια χρησιμοποιεί ανά πάσα στιγμή 40-60 μπαταρίες για οικιακούς σκοπούς. Οι μπαταρίες αυτές ποικίλουν από μικρές, απλές μπαταρίες μίας χρήσης, που αποτελούν και την πλειοψηφία, μέχρι σύγχρονες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, που παρέχουν υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Ένα άλλο σημαντικό πεδίο εφαρμογής των μπαταριών είναι ο τομέας των μεταφορών. Κάθε μηχανή εσωτερικής καύσης, είτε πρόκειται για αυτοκίνητο είτε για αεροσκάφος ή για οποιοδήποτε στατική μηχανή, χρειάζεται μια μπαταρία εκκίνησης. Για τα οχήματα συγκεκριμένα, οι μπαταρίες αυτές ονομάζονταν παλαιότερα SLI (starting, lighting, ignition), καθώς χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για το σύστημα ανάφλεξης και τον φωτισμό. Με την κατασκευή ωστόσο όλο και πιο πολύπλοκων οχημάτων, με πολλές βοηθητικές λειτουργίες όπως κλιματισμός, ηλεκτρονικές ενδείξεις, συστήματα υποβοήθησης οδηγών και μέσα ψυχαγωγίας παρατηρήθηκε ταυτόχρονη ανάπτυξη και βελτίωση των αντίστοιχων μπαταριών.

Αυξημένη είναι επίσης τα τελευταία χρόνια η ζήτηση για μεγάλες εγκατεστημένες μπαταρίες. Σε κάθε μεγάλο δημόσιο κτήριο (αεροδρόμια, νοσοκομεία, ξενοδοχεία, σιδηροδρομικοί σταθμοί, πολυκαταστήματα) είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός συστήματος αδιάκοπης παροχής ενέργειας UPS (uninterruptible power supply). Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί μεγάλες συστοιχίες μπαταριών, που αναλαμβάνουν την τροφοδοσία σε περίπτωση βλάβης του δικτύου, έως ότου να εκκινήσει κάποια εφεδρική πηγή, συνήθως γεννήτρια.

Μεγάλες επαναφορτιζόμενες ή μη μπαταρίες χρησιμοποιούνται παράλληλα για στρατιωτικούς σκοπούς (πύραυλοι, υποβρύχια, torπίλες), στην εξερεύνηση του διαστήματος (δορυφόροι, μη επανδρωμένα διαστημικά οχήματα), για την κίνηση ηλεκτρικών ή υβριδικών

οχημάτων (ποδήλατα, περνοφόρα ανυψωτικά, αναπηρικά καροτσάκια, αμαξάκια γκολφ, ρυμουλκά, τρακτέρ) και για την αποθήκευση ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία.[3]

1.4 Αρχές λειτουργίας

Αν και μέσα από την ιστορική αναδρομή της μπαταρίας δόθηκαν αρκετά στοιχεία, στην ενότητα αυτή εξηγείται με περισσότερες λεπτομέρειες ο τρόπος λειτουργίας της.

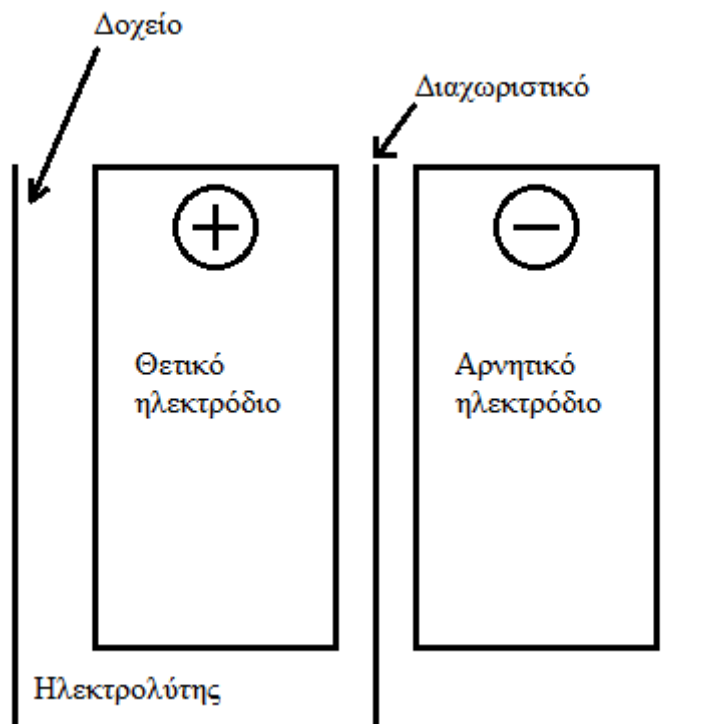
1.4.1 Σύσταση στοιχείου

Όπως είδαμε στην ενότητα 1.1 βασικό συστατικό μιας μπαταρίας είναι το στοιχείο (cell). Το στοιχείο αποτελείται από τα εξής μέρη (εικόνα 1.5):

- **θετικό και αρνητικό ηλεκτρόδιο:** Οι χημικές αντιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος πραγματοποιούνται στα δύο ηλεκτρόδια. Κάθε ηλεκτρόδιο αποτελείται από τα χημικά εκείνα που υπόκεινται στις παραπάνω αντιδράσεις, γνωστά ως ενεργός μάζα του στοιχείου, και από ένα μεταλλικό πλέγμα όπου προσκολλάται η ενεργός μάζα. Η ενεργός μάζα του αρνητικού ηλεκτροδίου αποτελείται συνήθως από ψευδάργυρο (Zn), κάδμιο (Cd), μόλυβδο (Pb), ή λίθιο (Li). Για το θετικό ηλεκτρόδιο χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον οξειδίο του μαγγανίου (MnO_2), του νικελίου ($NiOOH$) ή του μολύβδου (PbO_2) με υψηλό σθένος. Σπανιότερα χρησιμοποιούνται σουλφίδια ή αλογονίδια μετάλλων [4][5], διοξυγόνο (O_2), θείο (S) ή κάποιο αλογόνο όπως το βρώμιο (Br_2).
- **ηλεκτρολύτης:** Ο ηλεκτρολύτης έχει την δυνατότητα να μεταφέρει ιόντα ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια παρόλο που πρόκειται στην πραγματικότητα για μη αγώγιμο υλικό, καθώς σε διαφορετική περίπτωση στο εσωτερικό του στοιχείου θα αναπτύσσονταν βραχυκυκλώματα. Ως ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο συμπυκνωμένα υδατικά διαλύματα οξέων, αλκαλίων ή αλάτων καθώς επίσης και οργανικά διαλύματα αλάτων, πολυμερή, κεραμικά και λιωμένα άλατα.
- **διαχωριστικό:** Το διαχωριστικό είναι ένα λεπτό, συνήθως πορώδες μονωτικό υλικό, σκοπός του οποίου είναι να αποτρέπει την επαφή μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Χωρίς αυτό η επαφή αυτή θα ήταν αναπόφευκτη, τόσο κατά την κατασκευή του στοιχείου, όσο και κατά τη λειτουργία του, γεγονός που επίσης θα οδηγούσε στην ανάπτυξη βραχυκυκλωμάτων στο εσωτερικό του στοιχείου. Οι πόροι του διαχωριστικού γεμίζουν με ηλεκτρολύτη και το ιοντικό ρεύμα μπορεί μέσω αυτών να μεταφερθεί.
- **δοχείο:** Πρόκειται απλά για ένα δοχείο που περιέχει όλα τα παραπάνω και κατασκευάζεται συνήθως από πλαστικό.

Η απόσταση μεταξύ θετικού και αρνητικού ηλεκτροδίου πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η εσωτερική αντίσταση του στοιχείου. Συνήθως η

αντίσταση αυτή είναι της τάξης των $m\Omega$, γεγονός που αποτρέπει την μεγάλη πτώση τάσης στα άκρα του στοιχείου όταν αυτό απορροφά ρεύμα μεγάλης έντασης. Για να επιτευχθεί αυτή η χαμηλή τιμή της εσωτερικής αντίστασης του στοιχείου, το πάχος του διαχωριστικού δεν πρέπει να ξεπερνά το 1mm.[3]



Εικόνα 1.5: Σχηματική αναπαράσταση στοιχείου

1.4.2 Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις

Στην υποενότητα αυτήν παρουσιάζονται οι χημικές διεργασίες που διέπουν την λειτουργία ενός στοιχείου εξετάζοντας ξεχωριστά τις διαδικασίες εκφόρτισης και φόρτισης.

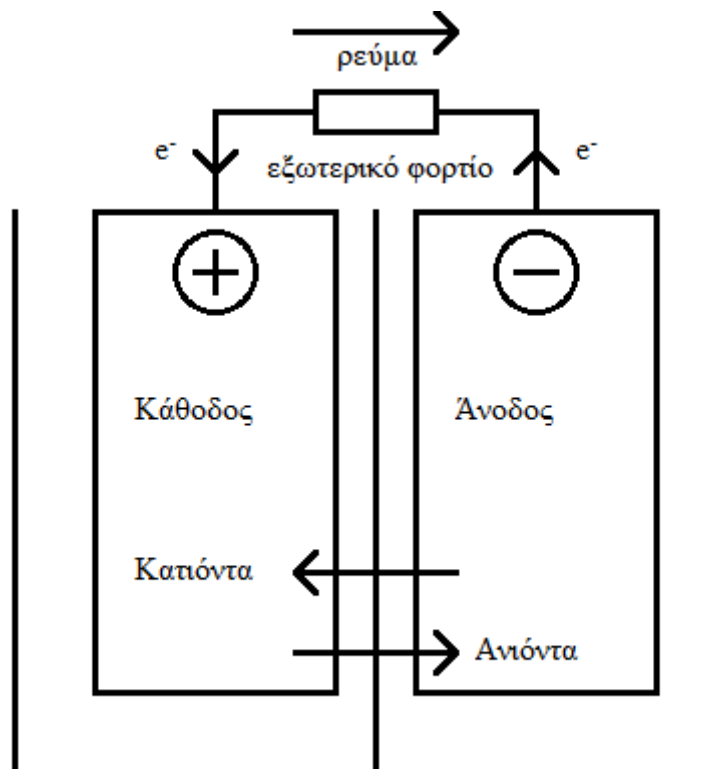
Το στοιχείο που έχει την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος ονομάζεται γαλβανικό. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται οφείλεται στην μετακίνηση φορτίου ανάμεσα σε ένα οξειδωτικό και ένα αναγωγικό σώμα όταν αυτά έρχονται σε επαφή. Για να συμβεί αυτό απαιτείται η σύνδεση των δύο ηλεκτροδίων τόσο εξωτερικά μέσω ενός ηλεκτρικά αγωγικού καλωδίου, όσο και εσωτερικά με τη βοήθεια του ηλεκτρολύτη. Όταν λοιπόν πραγματοποιηθεί μια τέτοια σύνδεση καταναλώνεται χημική ενέργεια, λόγω των αυθόρμητων οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στα ηλεκτρόδια, και παράγεται ηλεκτρική.

Σε καθένα από τα δύο ηλεκτρόδια λαμβάνει χώρα μία οξειδοαναγωγική ημιαντίδραση. Πιο συγκεκριμένα το αρνητικό ηλεκτρόδιο υφίσταται μια ημιαντίδραση οξείδωσης

αποβάλλοντας ηλεκτρόνια μέσω του εξωτερικού αγωγού, τα οποία προσλαμβάνονται από το θετικό ηλεκτρόδιο, προκαλώντας έτσι μια ημιαντίδραση αναγωγής. Παρατηρείται ταυτόχρονα, ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας, ροή ανιόντων από το θετικό προς το αρνητικό ηλεκτρόδιο και κατιόντων από το αρνητικό προς το θετικό ηλεκτρόδιο μέσω του ηλεκτρολύτη (εικόνα 1.6). Για τον λόγο αυτόν το αρνητικό ηλεκτρόδιο ονομάζεται στην περίπτωση αυτή άνοδος ενώ το θετικό κάθοδος. Οι δύο ημιαντιδράσεις που πραγματοποιούνται μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

- αρνητικό ηλεκτρόδιο: $M \rightarrow M^{n+} + ne^{-}$
- θετικό ηλεκτρόδιο: $nX + ne^{-} \rightarrow nX^{-}$

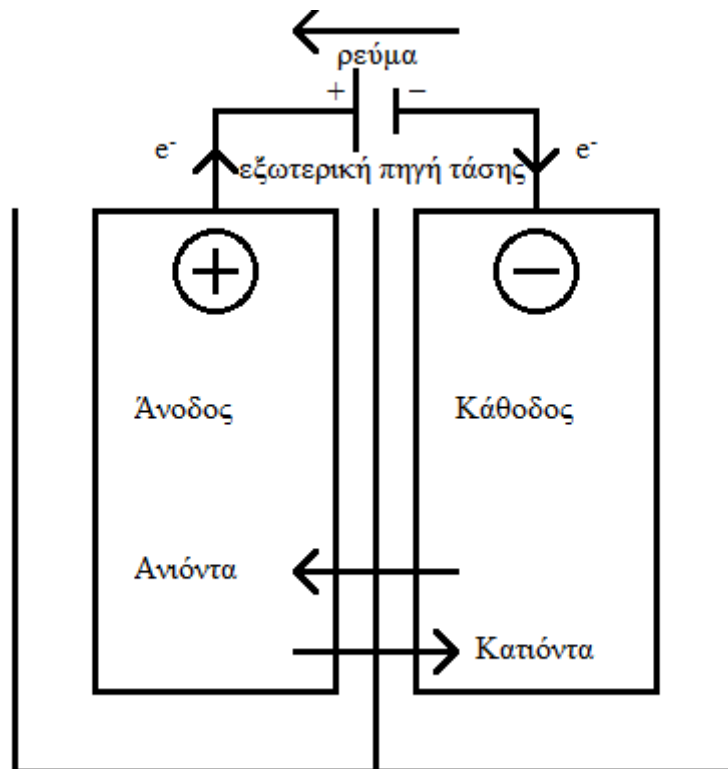
όπου M και X είναι οι ενεργές μάζες του αρνητικού και θετικού αντίστοιχα ηλεκτροδίου, e^{-} ένα ηλεκτρόνιο και n ο αριθμός των ηλεκτρονίων.



Εικόνα 1.6: Γαλβανικό στοιχείο

Η αντίθετη της παραπάνω διαδικασίας ονομάζεται ηλεκτρόλυση ενώ το στοιχείο στο οποίο μπορεί να εφαρμοστεί ονομάζεται ηλεκτρολυτικό. Απαραίτητη προϋπόθεση για να πραγματοποιηθεί το φαινόμενο της ηλεκτρόλυσης είναι η σύνδεση των δύο ηλεκτροδίων με μια εξωτερική πηγή τάσης. Στην περίπτωση αυτή η επιβαλλόμενη από την πηγή διαφορά δυναμικού καθορίζει σε ποιο ηλεκτρόδιο θα πραγματοποιηθεί ημιαντίδραση οξείδωσης και σε ποιο αναγωγής αντίστοιχα.

Αυτό σημαίνει ότι, αντίθετα με την διαδικασία της εκφόρτισης, το αρνητικό ηλεκτρόδιο υφίσταται ημιαντίδραση αναγωγής ενώ το θετικό ηλεκτρόδιο ημιαντίδραση οξειδωσης. Συνεπώς υπάρχει ροή ηλεκτρονίων από το θετικό ηλεκτρόδιο, που ονομάζεται στην περίπτωση αυτήν άνοδος, προς το αρνητικό, που ονομάζεται κάθοδος. Τα ιόντα ακολουθούν επίσης αντίστροφη πορεία όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.7. Η διαδικασία αυτή αποτελεί μια μη αυθόρμητη οξειδοαναγωγική αντίδραση, μέσω της οποίας η ηλεκτρική ενέργεια που αποδίδει η εξωτερική πηγή τάσης μετατρέπεται σε χημική.



Εικόνα 1.7: Ηλεκτρολυτικό στοιχείο

Τα γαλβανικά και τα ηλεκτρολυτικά στοιχεία ανήκουν στην γενικότερη κατηγορία των ηλεκτροχημικών στοιχείων

1.4.3 Συνδεσμολογία

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία κατάλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθεί πως η σύνδεση στοιχείων σε σειρά (αρνητικό-θετικό ηλεκτρόδιο) αυξάνει την διαφορά δυναμικού στα άκρα της μπαταρίας, όπως είχε παρατηρήσει και ο Alessandro Volta κατά την κατασκευή της πρώτης βολταϊκής στήλης. Αντίθετα η παράλληλη σύνδεση ηλεκτροχημικών στοιχείων (αρνητικό-αρνητικό

ηλεκτρόδιο, θετικό-θετικό ηλεκτρόδιο) αυξάνει την συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας, η τάση ωστόσο παραμένει προφανώς ίση με αυτήν του ενός στοιχείου.

1.5 Χρήσιμα μεγέθη και ορολογία

1.5.1 Βασικά μεγέθη

- ρυθμός εκφόρτισης-C (C-rate)
Το ρεύμα εκφόρτισης μιας μπαταρίας εκφράζεται συνήθως ως συνάρτηση της χωρητικότητάς της, η οποία διαφέρει πολύ από μπαταρία σε μπαταρία. Ρυθμός εκφόρτισης 1C δηλώνει ότι η ένταση του ρεύματος εκφόρτισης είναι τόση, ώστε η μπαταρία να εκφορτίζεται πλήρως σε 1 ώρα. Για μία μπαταρία με χωρητικότητα 100Ah π.χ., ρυθμός εκφόρτισης 1C σημαίνει ρεύμα εκφόρτισης έντασης 100A, ρυθμός 4C σημαίνει 400A, ενώ ρυθμός C/4 σημαίνει 25A.
Αντίστοιχα, αν και λιγότερα συχνά, χρησιμοποιείται ο ρυθμός εκφόρτισης-E (E-rate), ο οποίος αναφέρεται σε ισχύ εκφόρτισης.

1.5.2 Κατάσταση λειτουργίας μπαταρίας (μεταβλητά μεγέθη)

- στάθμη φόρτισης SoC (State of Charge) (%)
Αποτελεί μια έκφραση της παρούσας χωρητικότητας της μπαταρίας ως ποσοστό της μέγιστης χωρητικότητας. Από εδώ και στο εξής η συντομογραφία SoC θα χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μέγεθος αυτό.
- βάθος εκφόρτισης DoD (Depth of Discharge) (%)
Πρόκειται για το συμπληρωματικό του παραπάνω μεγέθους και εκφράζει το ποσοστό της χωρητικότητας της μπαταρίας που έχει ήδη εκφορτιστεί σε σχέση με την μέγιστη. Από εδώ και στο εξής η συντομογραφία DoD θα χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μέγεθος αυτό.
- τάση μπαταρίας (V)
Αναφέρεται στην τάση ανάμεσα στους ακροδέκτες της μπαταρίας όταν υπάρχει διασυνδεδεμένο φορτίο. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται από το SoC και από την ένταση του ρεύματος φόρτισης ή εκφόρτισης.
- τάση ανοιχτού κυκλώματος (V)
Αναφέρεται στην τάση ανάμεσα στους ακροδέκτες της μπαταρίας όταν δεν υπάρχει διασυνδεδεμένο φορτίο. Το μέγεθος αυτό εξαρτάται επίσης από το SoC. Πιο συγκεκριμένα όσο υψηλότερο είναι το SoC τόσο αυξάνει και η τιμή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος.

- εσωτερική αντίσταση (Ω)

Το μέγεθος αυτό αναφέρθηκε στην υποενότητα 1.4.1 και δείχνει την αντίσταση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μπαταρίας. Συνήθως διαφέρει για λειτουργία φόρτισης και εκφόρτισης και εξαρτάται από το SoC. Όσο η τιμή της εσωτερικής αντίστασης αυξάνεται, τόσο μειώνεται η θερμική σταθερότητα και η απόδοση της μπαταρίας, αφού μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την φόρτισή της μετατρέπεται σε θερμότητα.

1.5.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

- ονομαστική τάση (V)

Πρόκειται για την τάση αναφοράς της μπαταρίας.

- τάση αποκοπής (V)

Πρόκειται για την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή που μπορεί να πάρει η τάση της μπαταρίας. Η τάση αποκοπής δηλώνει πρακτικά ότι η μπαταρία έχει εκφορτιστεί πλήρως, αφού περαιτέρω εκφόρτιση μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στην μπαταρία, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

- μέγιστη χωρητικότητα (Ah)

Εκφράζει τον συνολικό αριθμό αμπερωριών που είναι διαθέσιμα προς εκφόρτιση από 100% μέχρι 0 SoC.

- ονομαστική χωρητικότητα (Ah)

Εκφράζει τον αριθμό αμπερωριών που είναι διαθέσιμα προς εκφόρτιση από 100% SoC μέχρι την τάση αποκοπής. Το μέγεθος εξαρτάται από τον ρυθμό εκφόρτισης-C και μεταβάλλεται αντίστροφα σε σχέση με αυτόν. Επομένως όταν δηλώνεται η ονομαστική χωρητικότητα, αναφέρεται ταυτόχρονα και ο ρυθμός-C στον οποίο αντιστοιχεί.

- ονομαστική ισχύς (Wh)

Αντίστοιχο μέγεθος της ονομαστικής χωρητικότητας, με μοναδική διαφορά το ότι εκφράζεται σε βατώρες.

- διάρκεια ζωής εκφρασμένη σε κύκλους

Ένας κύκλος εκφόρτισης-φόρτισης μια μπαταρίας ορίζεται ως η χρήση της μπαταρίας ως κάποιο προτεινόμενο επίπεδο DoD, και η επαναφόρτισή της σε 100% SoC. Ο συνολικός αριθμός των κύκλων που μπορεί να υποστεί μια μπαταρία, τηρώντας ταυτόχρονα ορισμένες λειτουργικές σχετιζόμενες με την απόδοσή της προδιαγραφές, εκφράζει το συγκεκριμένο μέγεθος. Η διάρκεια ζωής επηρεάζεται από τον ρυθμό εκφόρτισης, από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως θερμοκρασία και υγρασία και

κυρίως από το βάθος κάθε κύκλου. Πιο συγκεκριμένα, όσο υψηλότερο το DoD, τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

- ενεργειακή πυκνότητα (Wh/kg ή Wh/L)
Εκφράζει την ονομαστική ενέργεια που μπορεί να αποδώσει μια μπαταρία ανά μονάδα μάζας της ή ανά μονάδα όγκου της. Εξαρτάται από τον τύπο της μπαταρίας αλλά και από τον τρόπο κατασκευής και συσκευασίας της.
- πυκνότητα ισχύος (W/kg ή W/L)
Εκφράζει την ονομαστική ισχύ που μπορεί να αποδώσει μια μπαταρία ανά μονάδα μάζας της ή ανά μονάδα όγκου της. Εξαρτάται από τον τύπο της μπαταρίας αλλά και από τον τρόπο κατασκευής και συσκευασίας της.[6]

1.5.4 Λοιπά μεγέθη

- βαθμός απόδοσης μπαταρίας (%)
Το μέγεθος αυτό αποτελεί τον λόγο της χρήσιμης ενέργειας που αποδίδει μια μπαταρία ως προς την συνολική ενέργεια που απαιτείται για την φόρτιση της, εκφρασμένο ως ποσοστό. Η τάση φόρτισης κυμαίνεται γενικά σε υψηλότερες τιμές σε σχέση με την τάση εκφόρτισης. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ύπαρξη της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας, σημαίνει πως ο βαθμός απόδοσης λαμβάνει πάντα τιμές μικρότερες του 100%.
- ρυθμός αυτοεκφόρτισης (%/t)
Η αυτοεκφόρτιση αποτελεί ένα κοινό φαινόμενο που συναντάται στο σύνολο των μπαταριών. Πρόκειται για μια μικρή συνήθως ποσότητα ενέργειας που αποβάλλει η μπαταρία όταν δεν είναι συνδεδεμένη σε κάποιο φορτίο (όταν δηλαδή δεν χρησιμοποιείται) και ισοδυναμεί με την σύνδεση της μπαταρίας σε ένα μικρό φορτίο. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης εκφράζεται ως το ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας που χάνεται ως προς το χρόνο. Ως μονάδα χρόνου χρησιμοποιείται κάποιο μεγάλο μέγεθος (συνήθως μήνας).

1.6 Ταξινόμηση στοιχείων-μπαταριών

1.6.1 Πρωτεύουσες μπαταρίες

Οι μπαταρίες αυτές χρησιμοποιούνται (εκφορτίζονται) μόνο μία φορά και απορρίπτονται, αφού δεν είναι κατασκευασμένες για επαναφόρτιση. Στην πραγματικότητα ορισμένα πρωτεύοντα στοιχεία μπορούν να επαναφορτιστούν κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες και με χαμηλής έντασης ρεύμα. Παρόλα αυτά πρόκειται για μια επικίνδυνη διαδικασία, που ακόμα

και αν ολοκληρωθεί επιτυχώς, αδυνατεί να επαναφέρει την μπαταρία στις αρχικές της συνθήκες (μειωμένη χωρητικότητα, χαμηλότερη απόδοση).

Οι πρωτεύουσες μπαταρίες αποτελούν μια βολική πηγή ενέργειας για φορητές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Είναι απλές και εύκολες στην χρήση, απαιτούν ελάχιστη φροντίδα συντήρησης και κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη και σχήματα. Στα κυριότερα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται επίσης η ικανοποιητική ενεργειακή πυκνότητα, η υψηλή αξιοπιστία και η προσιτή τιμή.

Αν και είναι γνωστές για πάνω από 100 χρόνια, μέχρι το 1940 μόνο μπαταρίες ψευδάργυρου-άνθρακα χρησιμοποιούνταν ευρέως. Κατά την διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου και κατά την μεταπολεμική περίοδο ωστόσο έγιναν μεγάλα άλματα στον τομέα αυτόν με την βελτίωση της τεχνολογίας ψευδάργυρου-άνθρακα και την ανάπτυξη νέων πιο αποδοτικών συστημάτων. Η ενεργειακή πυκνότητα αυξήθηκε από 50Wh/kg στις αρχικές πρωτεύουσες μπαταρίες ψευδάργυρου-άνθρακα σε 400Wh/kg στις σύγχρονες μπαταρίες λιθίου. Η διάρκεια ζωής κατά την περίοδο του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου περιοριζόταν στον 1 χρόνο ενώ οι συμβατικές σημερινές μπαταρίες μπορούν να λειτουργούν σε συνθήκες από -40°C μέχρι 70°C για 2-5 χρόνια.

Μεγάλα βήματα προόδου έγιναν επίσης κατά την περίοδο 1970-1990 ακολουθώντας την γενικότερη τεχνολογική ανάπτυξη και την ανάγκη υποστήριξης των νέων συσκευών καθώς επίσης και διαστημικών, στρατιωτικών και περιβαλλοντικών προγραμμάτων. Οι αλκαλικές μπαταρίες υπερίσχυσαν ως οι κυρίαρχες πρωτεύουσες μπαταρίες ενώ παράλληλα έγινε προσπάθεια περιορισμού της μη φιλικής προς τα περιβάλλον μπαταρίας υδράργυρου. Παρόλα αυτά το κενό ήρθαν να καλύψουν επιτυχώς οι σύγχρονες μπαταρίες λιθίου.

Η αξία της παγκόσμιας αγοράς ανέρχεται στα 15 δις \$ για τις πρωτεύουσες μπαταρίες, με μειωμένο ωστόσο ρυθμό ανάπτυξης, λόγω της ολοένα και μεγαλύτερης χρήσης επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Η συντριπτική πλειοψηφία αποτελείται από τις γνωστές κυλινδρικές ή επίπεδες μπαταρίες με χωρητικότητα μικρότερη των 20Ah. Πολύ σπάνια χρησιμοποιούνται μεγάλες μπαταρίες με χωρητικότητα χιλιάδων αμπερών σε στρατιωτικές ή άλλες ειδικές εφαρμογές όπου καθίσταται απαραίτητη η πλήρης ανεξαρτησία από το δίκτυο.

1.6.1.1 Μπαταρίες ψευδάργυρου-άνθρακα (zinc-carbon batteries)

Το ξηρού τύπου στοιχείο ψευδάργυρου-άνθρακα ή αλλιώς στοιχείο Leclanché υπήρξε για πάνω από έναν αιώνα η πιο εύχρηστη λύση πρωτεύουσας μπαταρίας λόγω χαμηλού κόστους, σχετικά καλής απόδοσης και άμεσης διαθεσιμότητας σε πολλά μεγέθη. Αν και πρωτοκατασκευάστηκε το 1868, σημείωσε σημαντικές βελτιώσεις κατά την περίοδο 1945-1965 με την χρήση νέων σχεδίων και υλικών όπως ο ηλεκτρολύτης χλωριούχου ψευδάργυρου. Χρησιμοποιείται κυρίως για μικρές φορητές συσκευές όπως φακοί, ραδιόφωνα και παιχνίδια. Η χρήση του στις μέρες μας ωστόσο έχει σε μεγάλο βαθμό αντικατασταθεί από νέες αποδοτικότερες τεχνολογίες.

1.6.1.2 Αλκαλικές μπαταρίες μαγγανίου (Zn/alkaline/MnO₂ batteries)

Παίρνοντας την σκυτάλη από την παραπάνω κατηγορία, οι αλκαλικές μπαταρίες, που χρησιμοποιούν ψευδάργυρο (Zn) ως αρνητικό ηλεκτρόδιο και διοξείδιο του μαγγανίου (MnO₂) ως θετικό, αποτελούν πλέον τον πιο διαδεδομένο τύπο πρωτεύουσας μπαταρίας. Αν και ακριβότερη ανά μονάδα από την μπαταρία ψευδάργυρου-άνθρακα, επικράτησε λόγω της καλύτερης απόδοσης που παρουσιάζει σε απαιτητικές εφαρμογές (ανθεκτικότερη σε ρεύμα υψηλότερης έντασης), της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής και της αντοχής της σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Χρησιμοποιείται σε όλες τις γνωστές, μη επαναφορτιζόμενες φορητές συσκευές.

1.6.1.3 Μπαταρίες υδράργυρου (Zn/HgO batteries) (Cd/HgO batteries)

Αναπτύχθηκαν κατά τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο για στρατιωτικούς σκοπούς, κυρίως λόγω μεγάλης διάρκειας ζωής και υψηλής ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητας. Κατά την μεταπολεμική περίοδο χρησιμοποιήθηκαν σε ρολόγια, κομπιουτεράκια, ακουστικά βαρηκοΐας, φωτογραφικό εξοπλισμό και άλλες εφαρμογές που απαιτούσαν μια μικρή σε όγκο αλλά μεγάλης διάρκειας πηγή ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια η χρήση της έχει μειωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό, καθώς χαρακτηρίζεται μη φιλική προς το περιβάλλον λόγω υδράργυρου. Αντικαθιστώντας τον ψευδάργυρο της ανόδου με κάδμιο (Cd) προκύπτει μια νέα παραλλαγή μπαταρίας υδράργυρου. Η μπαταρία αυτή δουλεύει σε χαμηλότερη τάση και έχει επομένως χαμηλότερη χωρητικότητα (60% σε σχέση με την προηγούμενη). Παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα σε πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ η διάρκεια ζωής της ανέρχεται σε 10 χρόνια.

1.6.1.4 Μπαταρίες αργύρου (Zn/Ag₂O batteries)

Είναι οι γνωστές ασημένιες μπαταρίες στρόγγυλου σχήματος που χρησιμοποιούνται σε ρολόγια χειρός και κομπιουτεράκια. Παρουσιάζουν την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα ανά βάρος ανάμεσα σε όλες τις συμβατικές πρωτεύουσες μπαταρίες ενώ το κύριο μειονέκτημά τους είναι η υψηλή τιμή, που περιορίζει την χρήση τους σε μικρές συσκευές. Χρησιμοποιούνται επίσης σε ακουστικά βαρηκοΐας και φωτογραφικό εξοπλισμό, ενώ μεγαλύτερη μεγέθη χρησιμοποιούνται σε διαστημικές ή υποβρύχιες εφαρμογές λόγω της μεγάλης αντοχής που παρουσιάζουν σε χαμηλές θερμοκρασίες.

1.6.1.5 Μπαταρίες ψευδάργυρου-αέρα (Zn/O₂ batteries)

Η καινοτομία της μπαταρίας αυτής έγκειται στην χρήση του ατμοσφαιρικού οξυγόνου ως θετικό ηλεκτρόδιο. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του τύπου αυτού είναι η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα ανά βάρος, λόγω της απουσίας ουσιαστικά της καθόδου. Χρησιμοποιείται σε μικρές συσκευές, χαμηλής κυρίως ισχύος, όπως συσκευές τηλεϊδιοποίησης και ιατρικά εργαλεία. Αν και η ανάπτυξη της έχει υπάρξει σχετικά αργή λόγω πολλών λειτουργικών περιορισμών (ευαισθησία σε ακραίες θερμοκρασίες, υγρασία και άλλους περιβαλλοντικούς

παράγοντες, χαμηλή διάρκεια ζωής, χαμηλή ισχύς λειτουργίας), η ιδέα χρήσης της μπαταρίας μετάλλου-αέρα σε μεγαλύτερες εφαρμογές δείχνει ιδιαίτερα ελκυστική.

1.6.1.6 Μπαταρίες μαγνησίου (Mg/MnO₂ batteries)

Για την μπαταρία μαγνησίου δεν έχει εκδηλωθεί ιδιαίτερο εμπορικό ενδιαφέρον παρά το γεγονός ότι το μαγνήσιο (Mg) παρουσιάζει ελκυστικές ηλεκτροχημικές ιδιότητες. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αδυναμία αποδοτικής αποθήκευσης μιας εν μέρει εκφορτισμένης μπαταρίας και στην εκπομπή αερίων υδρογόνου κατά την εκφόρτιση. Μπαταρίες μαγνησίου ξηρού τύπου έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε στρατιωτικά συστήματα επικοινωνίας, καθώς είναι ανθεκτικές σε υψηλές θερμοκρασίες και παρουσιάζουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Το μαγνήσιο χρησιμοποιείται επίσης ως αρνητικό ηλεκτρόδιο στην παραπάνω κατηγορία μπαταριών μετάλλου-αέρα.

1.6.1.7 Μπαταρίες λιθίου (lithium batteries)

Πρόκειται για μια σχετικά πρόσφατη τεχνολογία (αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1970), που λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, της δυνατότητας λειτουργίας σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και της μεγάλης διάρκειας ζωής αντικαθιστά σταδιακά τους υπόλοιπους συμβατικούς τύπους μη επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Παρασκευάζεται σε διάφορες χωρητικότητες (5mAh-10000Ah), σε διάφορα σχέδια και με ποικίλες χημικές παραλλαγές έχοντας πάντα ως κοινό χαρακτηριστικό την χρήση λιθίου ως αρνητικό ηλεκτρόδιο.

Οι μπαταρίες λιθίου χωρίζονται σε 3 υποκατηγορίες:

- μπαταρίες λιθίου στερεού ηλεκτρολύτη
Πρόκειται για μπαταρίες χαμηλής ισχύος που χρησιμοποιούνται κυρίως σε βηματοδότες και συστήματα μνήμης ηλεκτρονικών υπολογιστών, όπου η αξιοπιστία και η μεγάλη διάρκεια ζωής είναι ύψιστης σημασίας.
- μπαταρίες λιθίου στερεής καθόδου
Κατασκευάζονται σε μικρό στρογγυλό ή κυλινδρικό σχήμα και αντικαθιστούν τις συμβατικές πρωτεύουσες μπαταρίες σε ρολόγια χειρός, κομπιουτεράκια, φωτογραφικό εξοπλισμό, συστήματα επικοινωνίας και άλλες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής.
- μπαταρίες λιθίου διαλυτής καθόδου
Ο τύπος αυτός χρησιμοποιεί υλικά σε αέρια ή υγρή μορφή ως θετικό ηλεκτρόδιο. Τέτοιες μπαταρίες χωρητικότητας μέχρι 35Ah χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές και βιομηχανικές εφαρμογές καθώς επίσης και σε συσκευές φωτισμού καθώς παρέχουν μια μικρή και χαμηλού βάρους λύση μεγάλης διάρκειας. Μεγαλύτερης χωρητικότητας μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε πιο απαιτητικές στρατιωτικές εφαρμογές και ως εφεδρικές πηγές ενέργειας έκτακτης ανάγκης.

1.6.1.8 Σύνοψη

Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των πιο συνηθισμένων μη επαναφορτιζόμενων μπαταριών βαθμολογημένα σε κλίμακα φθίνουσας αποδοτικότητας από 1 μέχρι 8.[1]

είδος	τάση	ενεργειακή πυκνότητα ανά βάρος	πυκνότητα ισχύος ανά βάρος	λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες	λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες	διάρκεια ζωής	κόστος
ψευδάργυρου-άνθρακα	5	4	4	5	6	8	1
αλκαλικές μαγγανίου	5	3	2	4	4	7	2
ψευδάργυρου-υδράργυρου	5	3	2	5	3	5	5
καδμίου-υδράργυρου	6	5	2	3	2	3	6
αργύρου	4	3	2	4	3	6	6
ψευδάργυρου-αέρα	5	2	3	5	5	-	3
μαγνησίου	3	3	2	4	3	4	3
λιθίου στερεού ηλεκτρολύτη	2	1	5	6	1	1	7
λιθίου στερεής καθόδου	1	1	2	2	3	2	4
λιθίου διαλυτής καθόδου	1	1	1	1	2	2	6

Πίνακας 1.1: Πρωτεύουσες μπαταρίες – Χαρακτηριστικά

1.6.2 Εφεδρικές μπαταρίες

Η αρχή λειτουργίας των συστημάτων αυτών έγκειται στην απόσπαση ενός καθοριστικού συστατικού (συνήθως του ηλεκτρολύτη) από το υπόλοιπο της μπαταρίας μέχρι την ενεργοποίησή της. Με τον τρόπο αυτό αναστέλλεται η αυτοεκφόρτισή της καθιστώντας δυνατή την μακροχρόνια αποθήκευσή της, ακόμα και όταν η επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων είναι δυσμενής. Αν και πρόκειται στην πραγματικότητα για πρωτεύουσες μπαταρίες, δεν μπορούν να συγκριθούν με αυτές ως προς την αποδοτικότητά τους, λόγω του ειδικού σκοπού για τον οποίο είναι κατασκευασμένες. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν παροχή υψηλής ισχύος για περιορισμένο χρονικό διάστημα (ραδιοβολίδες, ασφάλειες, βλήματα, τορπίλες και άλλα οπτικά συστήματα).

Η ενεργοποίηση των εφεδρικών μπαταριών επιτυγχάνεται με την προσθήκη ή την επεξεργασία του συστατικού που λείπει, ακριβώς πριν την χρήση τους. Ανάλογα με τον τρόπο ενεργοποίησης διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες:

- ενεργοποίηση με ηλεκτρολύτη (συμβατικά συστήματα)
 Η ενεργοποίηση των μπαταριών αυτών πραγματοποιείται με την προσθήκη του ηλεκτρολύτη. Η τεχνική αυτή, η διατήρηση δηλαδή του ηλεκτρολύτη ξεχωριστά από το υπόλοιπο σύστημα και η ενσωμάτωσή του ακριβώς πριν την χρήση, χρονολογείται στην περίοδο 1930-1940. Χρησιμοποιούνταν στα στοιχεία Leclanché και σκοπό είχε την επιμήκυνση της μικρής τότε διάρκειας ζωής της μπαταρίας, ενώ εφαρμόστηκε αργότερα και σε αλκαλικές μπαταρίες. Η διαρκής σταδιακή βελτίωση ωστόσο της διάρκειας ζωής των παραπάνω τύπων, σε συνδυασμό με το υψηλότερο κόστος και την μικρότερη χωρητικότητα σε σχέση με τις αντίστοιχες πρωτεύουσες, δεν επέτρεψαν στις εφεδρικές μπαταρίες να γίνουν ιδιαίτερα δημοφιλείς.
- ενεργοποίηση με νερό
 Οι μπαταρίες αυτές, που ενεργοποιούνται με την προσθήκη νερού, αναπτύχθηκαν την δεκαετία του 1940 για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό ρυθμό εκφόρτισης για περιορισμένη χρονική περίοδο όπως μετεωρολογικά μπαλόνια, ραδιοβολίδες και ηλεκτρικές τορπίλες. Μπαταρίες αυτής της κατηγορίας σχεδιάζοντας επίσης έτσι ώστε να ενεργοποιούνται με θαλασσινό νερό. Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται σε ναυτικές εφαρμογές όπως ηχοσημαντήρες, φώτα σωσιβίων και υποβρύχια προώθηση.
- ενεργοποίηση με αέριο
 Στην περίπτωση αυτή, το αέριο που εισάγεται στο σύστημα της μπαταρίας με σκοπό την ενεργοποίησή της, ή αποτελεί συστατικό στοιχείο του ηλεκτρολύτη είτε χρησιμοποιείται ως ενεργός μάζα της καθόδου. Η παραπάνω μέθοδος ενεργοποίησης φάνταζε ιδιαίτερα ελκυστική αρχικά λόγω της ευκολίας στην χρήση και της ασφάλειας που παρείχε. Οι όποιες προσπάθειες υλοποίησης ωστόσο, με την πιο χαρακτηριστική να στηρίζεται στην χρήση ατμού αμμωνίας για τον σχηματισμό του ηλεκτρολύτη, δεν στέφθηκαν από επιτυχία, με αποτέλεσμα να μην παράγονται μπαταρίες τέτοιου τύπου.
- ενεργοποίηση με θερμότητα (θερμικές μπαταρίες)
 Οι θερμικές μπαταρίες έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε ασφάλειες, νάρκες, βλήματα και πυρηνικά όπλα όπου απαιτείται μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας, με δυνατότητα μακροχρόνιας αποθήκευσης, ικανή να ανταπεξέλθει σε δυσμενείς συνθήκες και να αναπτύξει μέγιστη τάση σε ελάχιστο χρονικό διάστημα. Οι μπαταρίες αυτές κατασκευάζονται με στερεό και κατ'επέκταση μη αγώγιμο ηλεκτρολύτη και μπορούν να αποθηκευτούν για περίοδο που ανέρχεται στα 10 χρόνια. Η ενεργοποίησή τους επιτυγχάνεται με την παροχή θερμότητας ικανής να οδηγήσει στην τήξη του ηλεκτρολύτη καθιστώντας έτσι δυνατή την ροή ρεύματος. Η πηγή θερμότητας και ο μηχανισμός ενεργοποίησης είναι συνήθως ενσωματωμένα στο σύστημα της μπαταρίας για άμεση εκκίνηση. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μετά την ενεργοποίηση είναι μικρή και εξαρτάται κυρίως από το χρονικό διάστημα που η θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη μπορεί να διατηρηθεί πάνω από το σημείο πήξης του. Εξάλλου οι περισσότερες εφαρμογές της απαιτούν μόλις 1-10 λεπτά χρήσης.

Αν και οι εφεδρικές μπαταρίες έχουν σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας ποικιλία ηλεκτροχημικών συστημάτων, ελάχιστες μορφές έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως. Αυτό οφείλεται στα υποδεέστερα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν σε σχέση με τις αντίστοιχες πρωτεύουσες, όπως μικρότερη χωρητικότητα, μικρότερη διάρκεια ζωής (μετά την ενεργοποίηση) και υψηλότερο κόστος καθώς επίσης και στην έλλειψη ανάγκης μακροχρόνιας αποθήκευσης σε ειδικές συνθήκες. Πλέον χρησιμοποιούνται κυρίως σε προηγμένα στρατιωτικά οπλικά συστήματα και κατασκευάζονται αποκλειστικά για τον εξειδικευμένο σκοπό που πρόκειται να εξυπηρετήσουν.[1]

1.6.3 Δευτερεύουσες μπαταρίες

Εφαρμόζοντας ρεύμα αντίθετης φοράς από το ρεύμα εκφόρτισης, οι μπαταρίες αυτές μπορούν να επαναφορτιστούν και να επανέλθουν στην αρχική τους κατάσταση μετά την χρήση τους. Για τον λόγο αυτόν είναι γνωστές ως επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ή συσσωρευτές. Οι δευτερεύουσες μπαταρίες χαρακτηρίζονται, εκτός της δυνατότητας επαναφόρτισής τους, από υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, υψηλό ρυθμό εκφόρτισης και αποδοτική λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε γενικές γραμμές ωστόσο η ενεργειακή πυκνότητα είναι χαμηλότερη σε σχέση με τις πρωτεύουσες μπαταρίες.

Οι δευτερεύουσες μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους τομείς. Οι πιο διαδεδομένες είναι οι μπαταρίες αυτοκινήτων, παλαιότερα γνωστές ως SLI (starting, lighting and ignition), καθώς και μπαταρίες που λειτουργούν ως πηγή παροχής ενέργειας σε έκτακτη ανάγκη. Μικρότερες δευτερεύουσες μπαταρίες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε φορητές συσκευές όπως εργαλεία, παιχνίδια, φακοί, ραδιόφωνα, φωτογραφικές μηχανές και βιντεοκάμερες, και κυρίως κινητά τηλέφωνα και φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Η χρήση των συγκεκριμένων μπαταριών χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες.

- Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει εφαρμογές όπου η μπαταρία είναι συνεχώς συνδεδεμένη στο κεντρικό δίκτυο σε κατάσταση φόρτισης και λειτουργεί ως πηγή ενέργειας σε περίπτωση βλάβης της κεντρικής παροχής ή αδυναμίας πλήρους κάλυψης της ζήτησης. Η κατηγορία αυτή αφορά ενδεικτικά αεροπορικά συστήματα, συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας UPS (Uninterruptible Power Supply), συστήματα αναμονής και υβριδικά οχήματα.
- Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν όλες εκείνες οι εφαρμογές κατά τις οποίες η μπαταρία χρησιμοποιείται όπως ακριβώς μία πρωτεύουσα, στη συνέχεια ωστόσο επαναφορτίζεται και χρησιμοποιείται εκ νέου. Η επικράτηση της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας έναντι της συμβατικής για τον συγκεκριμένο τρόπο χρήσης οφείλεται σε οικονομικούς και οικολογικούς κυρίως λόγους, αφού η επαναφόρτιση μιας μπαταρίας είναι πιο φτηνή από την αγορά νέας ενώ παράλληλα μειώνεται ο όγκος επικίνδυνων για το περιβάλλον απορριμμάτων.

Οι δευτερεύουσες μπαταρίες υπάρχουν για περισσότερα από 150 χρόνια. Η αρχή έγινε το 1859 από τον Γάλλο φυσικό Gaston Planté, με την ανάπτυξη της μπαταρίας μολύβδου-οξέος, που αποτελεί μέχρι σήμερα τον πιο διαδεδομένο τύπο επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Συνέχεια είχε η εφεύρεση της αλκαλικής μπαταρίας νικελίου-σιδήρου (nickel-iron battery) το 1908 από τον Thomas Edison, η οποία προοριζόταν για χρήση στα πρώιμα ηλεκτρικά αυτοκίνητα της εποχής, λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής που παρουσίαζε. Τελικά χρησιμοποιήθηκε σε διάφορα μη συμβατικά οχήματα χάνοντας σταδιακά την δημοτικότητά της εξαιτίας του υψηλού της κόστους και της χαμηλής ενεργειακής της πυκνότητας. Η μπαταρία νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium battery) κατασκευάζεται από το 1909 και χρησιμοποιήθηκε κυρίως σε απαιτητικές βιομηχανικές εφαρμογές ενώ ο σχεδιασμός των πορώδων πλακών διέυρνε την αγορά των επαναφορτιζόμενων μπαταριών κατά την δεκαετία του 1950, με πεδία εφαρμογής τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και την εκκίνηση αεροσκαφών. Αργότερα η στεγανή μπαταρία νικελίου-καδμίου (sealed nickel-cadmium battery) χρησιμοποιήθηκε ευρέως σε φορητές συσκευές για να αντικατασταθεί σταδιακά από τις υδριδικές μπαταρίες νικελίου-μετάλλου αρχικά (hydride nickel-metal batteries) και πιο πρόσφατα τις μπαταρίες ιόντων λιθίου (lithium ion batteries), που παρέχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα.

Όπως ακριβώς και με τις μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, έτσι και στην περίπτωση αυτή, έχει επιτευχθεί με το πέρασμα των χρόνων σημαντική βελτίωση των παραπάνω τεχνολογιών καθώς επίσης και ανάπτυξη νέων τύπων μπαταριών. Τα τελευταία χρόνια, με τις ολοένα και σοβαρότερες ανησυχίες για την μόλυνση του περιβάλλοντος, τις αυξανόμενες τιμές των συμβατικών καυσίμων και την παράλληλη ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων που καλούνται να λύσουν ή να ελαφρύνουν τα παραπάνω προβλήματα, τίθεται μια νέα πρόκληση στον τομέα των επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Η μπαταρία, που αποτελεί το ουσιαστικότερο εξάρτημα των ηλεκτρικών οχημάτων, αποτελεί σήμερα αντικείμενο έρευνας και ανάπτυξης μέσω διαφόρων προγραμμάτων και σημαντικά αποτελέσματα αναμένονται μέσα στα επόμενα χρόνια.

Η αξία της παγκόσμιας αγοράς ανέρχεται στα 75 δις \$ ετησίως για τις δευτερεύουσες μπαταρίες και αποτελεί μία από τις πιο δυναμικά αναπτυσσόμενες αγορές. Τα πρωτεία κατέχουν οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, κυρίως λόγω της χρήσης τους σε αυτοκίνητα. Παρόλα αυτά χάνουν συνεχώς έδαφος από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου λόγω της έξαρσης στη χρήση κινητών τηλεφώνων, φορητών ηλεκτρονικών υπολογιστών και tablets τα τελευταία χρόνια.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό μιας δευτερεύουσας μπαταρίας είναι ότι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική και ξανά σε ηλεκτρική πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή ενεργειακή απόδοση σε συνδυασμό με τον περιορισμό χημικών διεργασιών που θέτουν σε κίνδυνο τα δομικά μέρη της μπαταρίας και την διάρκεια ζωής της. Παράλληλα κάθε επαναφορτιζόμενο στοιχείο οφείλει να διαθέτει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας όπως υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, χαμηλή τιμή εσωτερικής αντίστασης και καλή απόδοση σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας. Γίνεται σαφές πως οι παραπάνω απαιτήσεις μειώνουν τον αριθμό των υλικών που θα μπορούσαν επιτυχώς να

χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Παρακάτω παραθέτονται οι σημαντικότεροι τύποι.

1.6.3.1 Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (lead-acid batteries)

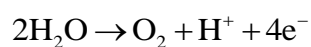
Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος προσφέρουν μια ομαλή και αναστρέψιμη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης με περιορισμένες χημικές αντιδράσεις που θέτουν σε κίνδυνο τα συστατικά μέρη του συστήματος. Παρόλο που παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, έχουν την δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, ενώ οι κύριοι παράγοντες που συντέλεσαν στην κυριαρχία τους στην αγορά είναι η χαμηλή τιμή σε συνδυασμό με την αξιοπιστία και την μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Κατασκευάζονται σε ποικιλία παραλλαγών, από μικρά στοιχεία στεγανού τύπου χωρητικότητας 1Ah μέχρι μεγάλα στοιχεία, η χωρητικότητα των οποίων ανέρχεται σε 12000Ah.

Η πιο διαδεδομένη εφαρμογή του συγκεκριμένου τύπου έγκειται στις μπαταρίες αυτοκινήτων, οι οποίες είναι γνωστές και ως SLI. Οι σημαντικότερες καινοτομίες στις συγκεκριμένες μπαταρίες αφορούν την χρήση ελαφρύτερων πλαστικών δοχείων, την βελτίωση στην διάρκεια αποθήκευσης και την μείωση της αναγκαιότητας συντήρησης. Το τελευταίο επιτυγχάνεται με την χρήση πλεγμάτων ασβεστίου-μολύβδου ή άλλων χαμηλών σε αντιμόνιο κραμάτων, που επιφέρουν σημαντική μείωση στο νερό που χάνεται κατά την διαδικασία της φόρτισης.

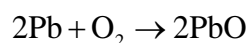
Οι βιομηχανικές μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι γενικά μεγαλύτερες σε μέγεθος από τις μπαταρίες αυτοκινήτου και αποτελούν στιβαρές υψηλής ποιότητας κατασκευές. Κατασκευάζονται με τρεις διαφορετικούς τύπους θετικού ηλεκτροδίου: σωληνοειδείς (tubular) και επικολλημένες (pasted) επίπεδες πλάκες για κινητική ενέργεια, εκκίνηση μηχανών πετρελαίου και στατικές εφαρμογές, και σχεδιασμός Planté για στατικές κυρίως εφαρμογές. Στον τελευταίο τύπο χρησιμοποιείται καθαρός μολύβδος ενώ για τις επικολλημένες επίπεδες πλάκες, πλέγματα από κράμα μολύβδου-αντιμονίου ή μολύβδου-ασβεστίου. Ένας πιο πρόσφατος τύπος, το στρόγγυλο στοιχείο (round cell), χρησιμοποιεί κωνικές πλάκες από πλέγματα καθαρού μολύβδου, οι οποίες στοιβάζονται η μία πάνω στην άλλη σε ένα κυλινδρικό δοχείο. Χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και παρέχει μακροχρόνιες υπηρεσίες χωρίς την ανάγκη ιδιαίτερης συντήρησης.

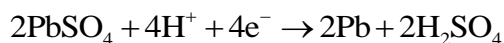
Μια σημαντική ανάπτυξη στην τεχνολογία των μπαταριών μολύβδου-οξέος αποτελούν οι μπαταρίες VRLA (Valve Regulated Lead-Acid batteries). Η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή ανασυνδυασμού του οξυγόνου, ενώ οι σημαντικότερες χημικές αντιδράσεις που την χαρακτηρίζουν είναι οι ακόλουθες:

- θετικό ηλεκτρόδιο

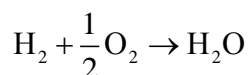


- αρνητικό ηλεκτρόδιο





- ηλεκτρολύτης



Το οξυγόνο που παράγεται στο θετικό ηλεκτρόδιο κατά τη φόρτιση διοχετεύεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, όπου αντιδρά με τον μόλυβδο, και στην συνέχεια με το θειικό οξύ. Οι εκπομπή αερίων μειώνεται κατά περισσότερο από 95% αφού η παραγωγή υδρογόνου περιορίζεται. Στα συστήματα αυτά χρησιμοποιείται επίσης μία βαλβίδα, η οποία παραμένει κλειστή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας, ανοίγει όταν η πίεση αυξηθεί πάνω από κάποιο όριο και ξανακλείνει πριν εξισωθεί με την ατμοσφαιρική. Οι μπαταρίες VRLA χρησιμοποιούνται περίπου στο 70% των τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών και στο 80% των συστημάτων αδιάλειπτης παροχής ενέργειας UPS.

Μικρότερες μπαταρίες μολύβδου-οξέος στεγανού τύπου χρησιμοποιούνται για εφεδρικά συστήματα παροχής ενέργειας σε περίπτωση βλάβης της κεντρικής παροχής, σε φορητά όργανα και εργαλεία και άλλες φορητές συσκευές. Οι μπαταρίες αυτές κατασκευάζονται με δύο τρόπους: πρισματικά στοιχεία αποτελούμενα από παράλληλες πλάκες χωρητικότητας από 1Ah μέχρι 30Ah και κυλινδρικά στοιχεία, παρόμοια σε εμφάνιση με τις μη επαναφορτιζόμενες αλκαλικές μπαταρίες, χωρητικότητας μέχρι και 25Ah. Ο ηλεκτρολύτης στα στοιχεία αυτά απορροφάται στις πλάκες και στα πορώδη διαχωριστικά ή είναι σε μορφή gel ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος διαρροής. Τα πλέγματα αποτελούνται συνήθως από κράματα μολύβδου-ασβεστίου-αλουμινίου ή καθαρό μόλυβδο.

1.6.3.2 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium batteries)

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου αποτελούν τις δημοφιλέστερες δευτερεύουσες αλκαλικές μπαταρίες. Διατίθενται σε μεγάλη ποικιλία μεγεθών ενώ τα στοιχεία τους κατασκευάζονται με διάφορους σχεδιασμούς. Οι πρώτες μπαταρίες νικελίου-καδμίου χρησιμοποιούσαν στοιχεία κομβιόσχημα, παρόμοια σε σχήμα με τις γνωστές μπαταρίες ρολογιών. Το κομβιόσχημο στοιχείο παρουσιάζει υψηλή διάρκεια ζωής, απαιτεί ελάχιστη συντήρηση, μπορεί να υποστεί ηλεκτρική και μηχανική καταπόνηση και χρησιμοποιείται για τους λόγους αυτούς σε απαιτητικές βιομηχανικές εφαρμογές. Ένας πιο πρόσφατος σχεδιασμός είναι το στοιχείο με πορώδεις πλάκες. Παρόλο που είναι πιο ακριβό, παρουσιάζει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και αποδίδει καλύτερα από το κομβιόσχημο στοιχείο σε υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης και χαμηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται σε μπαταρίες εκκίνησης αεροσκαφών, σε τηλεπικοινωνιακές και ηλεκτρονικές εφαρμογές και γενικότερα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μπαταρία με περιορισμένο βάρος και υψηλή απόδοση. Ο τρίτος και τελευταίος σχεδιασμός είναι το στεγανού τύπου στοιχείο, το οποίο στηρίζεται στις ίδιες αρχές λειτουργίας με τον αντίστοιχο τύπο μολύβδου-οξέος. Χρησιμοποιείται σε καταναλωτικές ή μικρές βιομηχανικές εφαρμογές.

1.6.3.3 Μπαταρίες νικελίου-σιδήρου (nickel-iron batteries)

Οι μπαταρίες νικελίου-σιδήρου κατείχαν σημαντικό μερίδιο στην αγορά μπαταριών από το 1908 που κατασκευάστηκαν μέχρι και την δεκαετία του 1970, όταν και αντικαταστάθηκαν σε μεγάλο βαθμό από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Το κυριότερο πλεονέκτημά τους ήταν ότι αποτελούσαν στιβαρές ανθεκτικές κατασκευές με μεγάλη διάρκεια ζωής. Το υψηλό κατασκευαστικό τους κόστος ωστόσο, σε συνδυασμό με την χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα και την κακή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες, οδήγησε στην σταδιακή μείωση της χρήσης τους. Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε οχήματα υπόγειων εργασιών, εξόρυξης, σιδηρόδρομου και διάφορες στατικές εφαρμογές.

1.6.3.4 Μπαταρίες αργύρου-ψευδάργυρου (silver-zinc batteries)

Οι συγκεκριμένες μπαταρίες είναι διακεκριμένες για την υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα και την χαμηλή εσωτερική τους αντίσταση, που επιτρέπει την εκφόρτισή τους με υψηλής έντασης ρεύματα. Λόγω της υψηλής τους τιμής, των περιορισμένων κύκλων ζωής και της κακής απόδοσης σε χαμηλές θερμοκρασίες δεν χρησιμοποιούνται ευρέως ως μέσο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, παρά μόνο σε ειδικές στρατιωτικές, υποβρύχιες και διαστημικές εφαρμογές, όπου τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι ύψιστης σημασίας.

1.6.3.5 Μπαταρίες αργύρου-καδμίου (silver-cadmium batteries)

Οι μπαταρίες αργύρου-καδμίου παρουσιάζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και καλύτερη απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες σε σχέση με τις μπαταρίες αργύρου-ψευδάργυρου, είναι ωστόσο υποδεέστερες στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου. Αντίθετα η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι υψηλότερη σε σχέση με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου και χαμηλότερη σε σχέση με τις μπαταρίες αργύρου-ψευδάργυρου. Η τιμή τους είναι ιδιαίτερα υψηλή αφού χρησιμοποιούν δύο εκ των ακριβότερων υλικών κατασκευής ηλεκτροδίων. Ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται και αυτές σχεδόν αποκλειστικά για ειδικούς σκοπούς, όπως εφαρμογές στο διάστημα ή μη μαγνητικές μπαταρίες.

Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφερθούν και δύο επιπλέον συστήματα μπαταριών που στηρίζονται στον άργυρο: οι μπαταρίες αργύρου-υδρογόνου (silver-hydrogen batteries) και οι υδριδικές μπαταρίες αργύρου-μετάλλου (hydride silver-metal batteries). Οι συγκεκριμένοι τύποι ωστόσο αναπτύχθηκαν σε ερευνητικά στάδιο χωρίς να βγουν στην παραγωγή.

1.6.3.6 Μπαταρίες νικελίου-ψευδάργυρου (nickel-zinc batteries)

Οι μπαταρίες αυτές παρουσιάζουν χαρακτηριστικά, που τις κατατάσσουν ανάμεσα στα συστήματα νικελίου-καδμίου και αργύρου-ψευδάργυρου. Η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι διπλάσια σε σχέση με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου ενώ οι κύκλοι ζωής της υπήρξαν περιορισμένοι, λόγω της τάσης του ηλεκτροδίου ψευδαργύρου να αλλάζει σχήμα με

αποτέλεσμα την δημιουργία βραχυκυκλωμάτων και την μείωση της χωρητικότητας. Το πρόβλημα αυτό έχει σε μεγάλο βαθμό επιλυθεί με την χρήση πρόσθετων υλικών στο αρνητικό ηλεκτρόδιο και την βοήθεια του υδροξειδίου του καλίου (KOH). το οποίο μειώνει την διαλυτότητα του ψευδάργυρου στον ηλεκτρολύτη. Οι νέες μπαταρίες νικελίου-ψευδάργυρου με βελτιωμένη διάρκεια ζωής προορίζονται πλέον για χρήση σε ηλεκτρικά ποδήλατα και scooter.

1.6.3.7 Μπαταρίες νικελίου-υδρογόνου (nickel-hydrogen batteries)

Λόγω του υψηλού τους κόστους, οι συγκεκριμένες μπαταρίες χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε αεροδιαστημικά προγράμματα, όπου απαιτείται αντοχή σε μεγάλο βάθος εκφόρτισης. Οι στεγανού τύπου υδριδικές μπαταρίες νικελίου-μετάλλου (sealed nickel-metal hydride batteries) αποτελούν μια προέκταση του παραπάνω τύπου και χρησιμοποιούνται σε διάφορες φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, ενώ προορίζονται για χρήση σε υβριδικά αυτοκίνητα. Χρησιμοποιούν ένα κράμα μετάλλου ικανό να απορροφά το υδρογόνο κατά την φόρτιση και να το διοχετεύει πίσω στο σύστημα κατά την εκφόρτιση. Το σημαντικότερο προτέρημά τους είναι η ενεργειακή πυκνότητα, η οποία είναι αισθητά υψηλότερη σε σχέση με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου.

1.6.3.8 Αλκαλικές μπαταρίες μαγγανίου (zinc/manganese dioxide batteries)

Κατά καιρούς υπήρξαν προσπάθειες να κατασκευαστούν ως επαναφορτιζόμενες πολλές πρωτεύουσες μπαταρίες. Η μόνη που είχε αξιόλογα αποτελέσματα αφορά τα κυλινδρικά στοιχεία που χρησιμοποιούν ψευδάργυρο (Zn) ως αρνητικό ηλεκτρόδιο και διοξείδιο του μαγγανίου (MnO₂) ως θετικό (υποενότητα 1.6.1.2). Τα κύρια χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων μπαταριών είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα σε συνδυασμό με το μικρότερο κόστος σχετικά με τις υπόλοιπες συμβατικές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Από την άλλη πλευρά παρουσιάζουν μικρότερη διάρκεια ζωής και κακή απόδοση όταν εκφορτίζονται με υψηλής έντασης ρεύμα.

1.6.3.9 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (lithium ion batteries)

Αν και αποτελούν σχετικά πρόσφατο προϊόν, οι μπαταρίες λιθίου έχουν καταφέρει τα τελευταία χρόνια να κατακτήσουν μεγάλο μερίδιο στην αγορά επαναφορτιζόμενων μπαταριών, κυρίως λόγω της χρήσης τους σε κινητά τηλέφωνα, φορητούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές και βιντεοκάμερες-φωτογραφικές μηχανές. Παρέχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής που ανέρχεται ενδεικτικά σε 1000 κύκλους για βάθος εκφόρτισης 80%. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι ότι δεν είναι ανθεκτικές σε υπερφόρτιση και υπερεκφόρτιση, που επιφέρουν δυσάρεστες συνέπειες στην απόδοσή τους.

1.6.3.10 Σύνοψη

Στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των πιο συνηθισμένων επαναφορτιζόμενων μπαταριών βαθμολογημένα σε κλίμακα φθίνουσας αποδοτικότητας από 1 μέχρι 5.[1]

είδος	ενεργειακή πυκνότητα	πυκνότητα ισχύος	λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες	διατήρηση φόρτισης	αποδοχή φόρτισης	απόδοση	διάρκεια ζωής	μηχανικές ιδιότητες	κόστος
μολύβδου-οξέος									
επικολημένες	4	4	3	4	3	2	3	5	1
σωληνοειδείς	4	5	3	3	3	2	2	3	2
Planté	5	5	3	3	3	2	2	4	2
στεγανού τύπου	4	3	2	3	3	2	3	5	2
νικελίου-καδμίου									
κομβίοσχημες	5	3	1	2	1	4	2	1	3
πορώδεις	4	1	1	4	1	3	2	1	3
στεγανού τύπου	4	1	1	4	2	3	3	2	2
νικελίου-σιδήρου	5	5	5	5	2	5	1	1	3
αργύρου-ψευδάργυρου	1	1	3	1	3	2	5	2	4
αργύρου-καδμίου	2	3	4	1	5	1	4	3	4
αργύρου-υδρογόνου	2	3	4	5	3	5	2	3	5
νικελίου-ψευδάργυρου	2	3	3	4	3	3	4	3	3
νικελίου-υδρογόνου	2	3	4	5	3	5	2	3	5
υδριδικές νικελίου-μετάλλου	3	2	2	4	2	3	3	2	3
ψευδάργυρου-διοξειδίου μαγγανίου	2	4	3	1	4	4	5	4	2
ιόντων λιθίου	1	2	2	2	1	1	1	3	2

Πίνακας 1.2: Δευτερεύουσες μπαταρίες – Χαρακτηριστικά

2.ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

2.1 Ορισμός

Τα τελευταία χρόνια, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρατηρείται μια εκθετική αύξηση στην ζήτηση φορητών ηλεκτρικών συσκευών, με κυρίαρχα προϊόντα τα κινητά τηλέφωνα και τους φορητούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Παράλληλα η διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η διαρκής προσπάθεια απεξάρτησης από τις συμβατικές πηγές καθιστά πιο αναγκαία από ποτέ την χρήση μπαταριών για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και σε οικιακό επίπεδο. Τέλος, ολοένα και περισσότερα νέα μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων κάνουν την εμφάνισή τους στην αγορά και η χρήση τους αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στα επόμενα χρόνια. Σε όλα τα παραπάνω συστήματα, η επαναφορτιζόμενη μπαταρία αποτελεί συνήθως το πιο ευάλωτο και αναλώσιμο συστατικό μέρος. Η μη ορθολογική χρήση της μπαταρίας και η καταπόνησή της οδηγούν στην υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της (μικρότερη χωρητικότητα και διάρκεια ζωής), με αποτέλεσμα την αύξηση στο κόστος και την μείωση στην αξιοπιστία του συνολικού συστήματος. Κρίνεται για τον λόγο αυτό απαραίτητη η ύπαρξη ενός συστήματος που θα προστατεύει την μπαταρία και θα διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία της.

Το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας BMS (Battery Management System) επιτελεί ακριβώς αυτό το έργο. Σκοπός του είναι η προστασία της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας, μέσω της ελαχιστοποίησης των κινδύνων που μπορούν να την καταστρέψουν, και η βέλτιστη διαχείριση της αποθηκευμένης σε αυτήν ενέργειας.[7]

2.2 Δομή

Ένα τυπικό σύστημα διαχείρισης μπαταρίας αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά μέρη, καθένα από τα οποία συνοδεύεται και από κάποιες αντίστοιχες λειτουργίες παρακολούθησης των διάφορων μεγεθών και ελέγχου των επιτελούμενων διαδικασιών, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1:

- μονάδα ισχύος
Σκοπός της μονάδας ισχύος είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από το δίκτυο, σε ηλεκτρική ενέργεια κατάλληλη για την φόρτιση της μπαταρίας ή σε πολλές περιπτώσεις για την απευθείας τροφοδότηση του φορτίου. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την χρήση μετατροπέων ισχύος AC/DC και DC/DC. Εναλλακτικά στην θέση του κεντρικού δικτύου μπορεί να βρίσκεται οποιαδήποτε άλλη πηγή ενέργειας (μπαταρία, φωτοβολταϊκά συστήματα κλπ.). Οι λειτουργίες

παρακολούθησης και ελέγχου στην μονάδα ισχύος αφορούν αφενός την διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας, αφετέρου την διαδικασία φόρτισης της μπαταρίας. Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζονται τα επιθυμητά επίπεδα έντασης ρεύματος και τάσης εξόδου. Τα επιθυμητά επίπεδα των μεγεθών αυτών καθορίζονται από τον έλεγχο της διαδικασίας φόρτισης, σύμφωνα με διάφορες μεταβλητές της μπαταρίας (στάθμη φόρτισης, θερμοκρασία, τάση ακροδεκτών).

- μπαταρία

Η μπαταρία αποτελεί το βασικότερο κομμάτι του συστήματος. Αποθηκεύει την ενέργεια που της παρέχεται από την μονάδα ισχύος και την διοχετεύει στο φορτίο όποτε αυτό κρίνεται αναγκαίο. Οι λειτουργίες παρακολούθησης και ελέγχου περιλαμβάνουν την συνεχή καταγραφή των λειτουργικών μεγεθών της μπαταρίας (ένταση ρεύματος φόρτισης-εκφόρτισης, τάση ακροδεκτών, στάθμη φόρτισης, θερμοκρασία), που καθορίζουν με την σειρά τους τον έλεγχο φόρτισης-εκφόρτισης της μπαταρίας.

- μετατροπέας DC/DC

Η τάση ακροδεκτών της μπαταρίας ενδεχομένως να διαφέρει από την τάση που χρειάζεται το φορτίο. Σκοπός του μετατροπέα DC/DC είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχει η μπαταρία (ή σε πολλές περιπτώσεις η μονάδα ισχύος), σε ηλεκτρική ενέργεια κατάλληλη για την τροφοδότηση του φορτίου. Αν η τάση της μπαταρίας είναι χαμηλότερη από την τάση λειτουργίας του φορτίου χρησιμοποιείται μετατροπέας ανύψωσης τάσης ενώ στην αντίθετη περίπτωση μετατροπέας υποβιβασμού τάσης. Ο αμφίδρομος μετατροπέας τάσης έχει την δυνατότητα να καλύψει και τις δύο περιπτώσεις. Προφανώς οι λειτουργίες παρακολούθησης και ελέγχου στο κομμάτι αυτό αφορούν την διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας εξασφαλίζοντας την ομαλή διασύνδεση της μπαταρίας με το φορτίο.

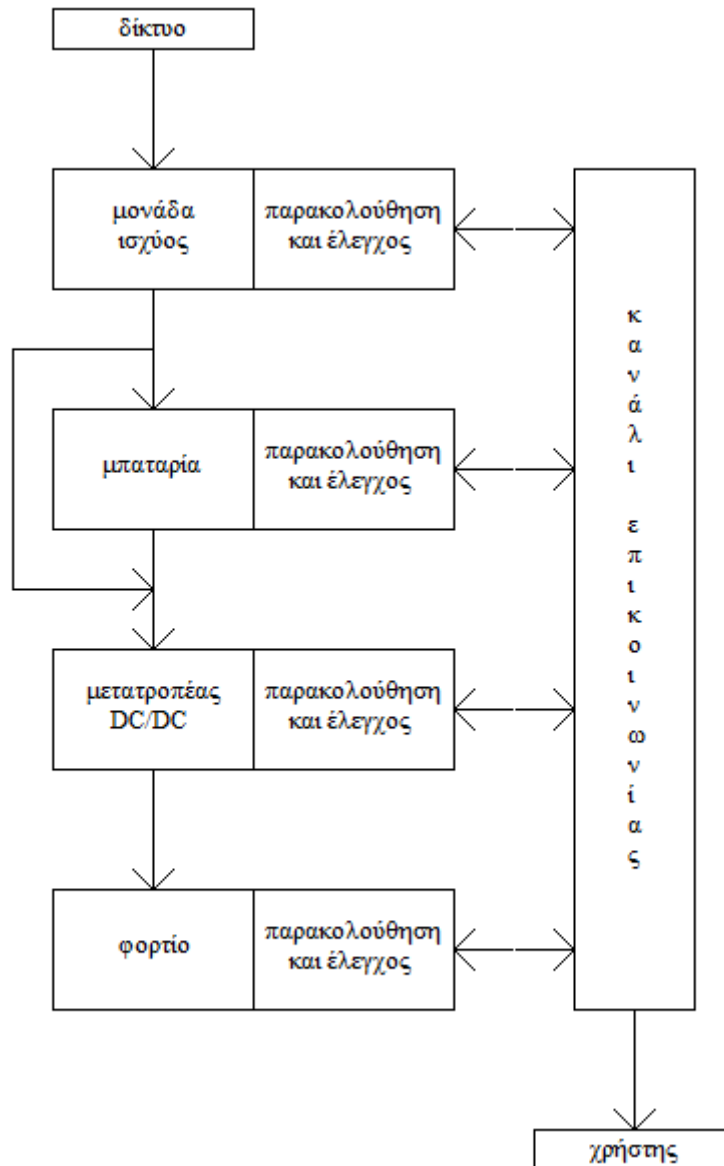
- φορτίο

Η διεργασία που επιτελείται στο κομμάτι αυτό αφορά την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας εξόδου του μετατροπέα DC/DC σε ωφέλιμο έργο, ανάλογα με το είδος του φορτίου.

- κανάλι επικοινωνίας

Όπως είδαμε και παραπάνω τα διάφορα μέρη του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας σχετίζονται μεταξύ τους τόσο σειριακά (τα μεγέθη εξόδου του ενός αποτελούν είσοδο για το άλλο) όσο και με άλλους τρόπους (π.χ. οι λειτουργικές συνθήκες της μπαταρίας καθορίζουν τον έλεγχο φόρτισης στην μονάδα ισχύος). Σκοπός του καναλιού επικοινωνίας λοιπόν είναι η μετάδοση των σημάτων παρακολούθησης και ελέγχου ανάμεσα στα διάφορα μέρη του συστήματος, καθώς επίσης και η εξασφάλιση της

επικοινωνίας του συστήματος με τον χρήστη (ενδείξεις, απεικόνιση μεταβλητών κλπ.).[8]



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα τυπικού συστήματος διαχείρισης μπαταρίας

2.3 Λειτουργίες

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, βασικός σκοπός του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας είναι η προστασία της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Αν και αποτελούν το βασικό σώμα

αυτής της εργασίας, συνοψίζονται στο σημείο αυτό οι κύριες λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης, μέσω των οποίων επιτυγχάνει τον στόχο αυτό:

- διαχείριση ασφάλειας μπαταρίας
Αποτελεί την βασικότερη λειτουργία του BMS και αφορά κυρίως τον έλεγχο φόρτισης-εκφόρτισης. Αυτό γίνεται με σκοπό την προστασία της μπαταρίας από υπερφόρτιση ή υπερεκφόρτιση, που επιφέρουν δυσάρεστες συνέπειες στην διάρκεια ζωής και την αποδοτικότητα της μπαταρίας. Ο τρόπος με τον οποίον ελέγχονται οι διαδικασίες φόρτισης-εκφόρτισης διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το είδος της μπαταρίας και αναλυτικές οδηγίες παρέχονται συνήθως από τον κατασκευαστή. Περισσότερες λεπτομέρειες και παραδείγματα θα παρουσιαστούν στο 4^ο κεφάλαιο. Πιο εξειδικευμένες πτυχές της συγκεκριμένης λειτουργίας περιλαμβάνουν αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας για προστασία από υπερθέρμανση και από περιβαλλοντικούς παράγοντες και για κινητές μπαταρίες αισθητήρες σύγκρουσης για τον εντοπισμό σφαλμάτων από μηχανική καταπόνηση της μπαταρίας.
- εξισορρόπηση φόρτισης μπαταρίας
Κατά την λειτουργία μιας μπαταρίας είναι πολύ πιθανό, τα στοιχεία που την αποτελούν να αποκλίνουν μεταξύ τους ως προς την στάθμη φόρτισης και την τάση ακροδεκτών. Αυτό οδηγεί στην καταπόνηση των αποκλινόντων στοιχείων, λόγω υπερφόρτισης ή υπερεκφόρτισης και εν τέλει στην υποβάθμιση των χαρακτηριστικών του στοιχείου και κατ'επέκταση της μπαταρίας. Αρμοδιότητα του BMS είναι ο εντοπισμός των αποκλίσεων αυτών και η εξάλειψή τους μέσω της διαδικασίας που ονομάζεται εξισορρόπηση φόρτισης. Ο τρόπος που εκτελείται η συγκεκριμένη διαδικασία διαφέρει επίσης αισθητά από μπαταρία σε μπαταρία. Περισσότερες λεπτομέρειες και παραδείγματα θα παρουσιαστούν στο 5^ο κεφάλαιο.
- εκτίμηση κατάστασης μπαταρίας
Αφορά κυρίως τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης SoC της μπαταρίας. Ο ακριβής υπολογισμός του SoC είναι μία δύσκολη διαδικασία και ιδιαίτερα σημαντική αφού επηρεάζει και τις υπόλοιπες λειτουργίες του BMS ενώ ταυτόχρονα αποτελεί την σημαντικότερη πληροφορία προς τον χρήστη. Πολλές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού, στις οποίες θα αναφερθούμε λεπτομερώς στο 6^ο κεφάλαιο.
Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος που μπορεί να υπολογίζει η συγκεκριμένη λειτουργία είναι η κατάσταση υγείας SoH (State of Health) της μπαταρίας. Μετά από κάθε κύκλο φόρτισης εκφόρτισης της μπαταρίας, η χωρητικότητα της μειώνεται σε βαθμό που εξαρτάται κυρίως από το βάθος εκφόρτισης DoD. Παράλληλα οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η μηχανική καταπόνηση ενδεχομένως να επιβαρύνουν περαιτέρω την μπαταρία. Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες, η κατάσταση υγείας SoH της μπαταρίας εκφράζει το ποσοστό της παρούσας μέγιστης χωρητικότητας προς την αρχική μέγιστη χωρητικότητα. Η όσο το δυνατόν ακριβέστερη επίγνωση του

συγκεκριμένου μεγέθους εξασφαλίζει τον αποδοτικότερο έλεγχο των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης.

- επικοινωνία με χρήστη
Τέλος το BMS πρέπει να παρέχει στον χρήστη τις κατάλληλες πληροφορίες που αφορούν τόσο την λειτουργική κατάσταση της μπαταρίας, όπως SoC σε συνδυασμό ενδεχομένως με εναπομείναντα χρόνο λειτουργίας, SoH, τιμές διάφορων λειτουργικών μεταβλητών κ.ά., όσο και πιθανά σφάλματα για τα οποία οι αυτοματισμοί του BMS δεν αρκούν και απαιτούνται χειροκίνητες εργασίες συντήρησης.[9]

Ο τρόπος εκτέλεσης των παραπάνω λειτουργιών εξαρτάται από τον τύπο της μπαταρίας ενώ ο βαθμός εξειδίκευσής τους από το μέγεθος της μπαταρίας, το είδος της εφαρμογής και κυρίως από το συνολικό κόστος του ευρύτερου συστήματος.[8]

2.4 Παγκόσμια αγορά συστημάτων διαχείρισης μπαταρίας



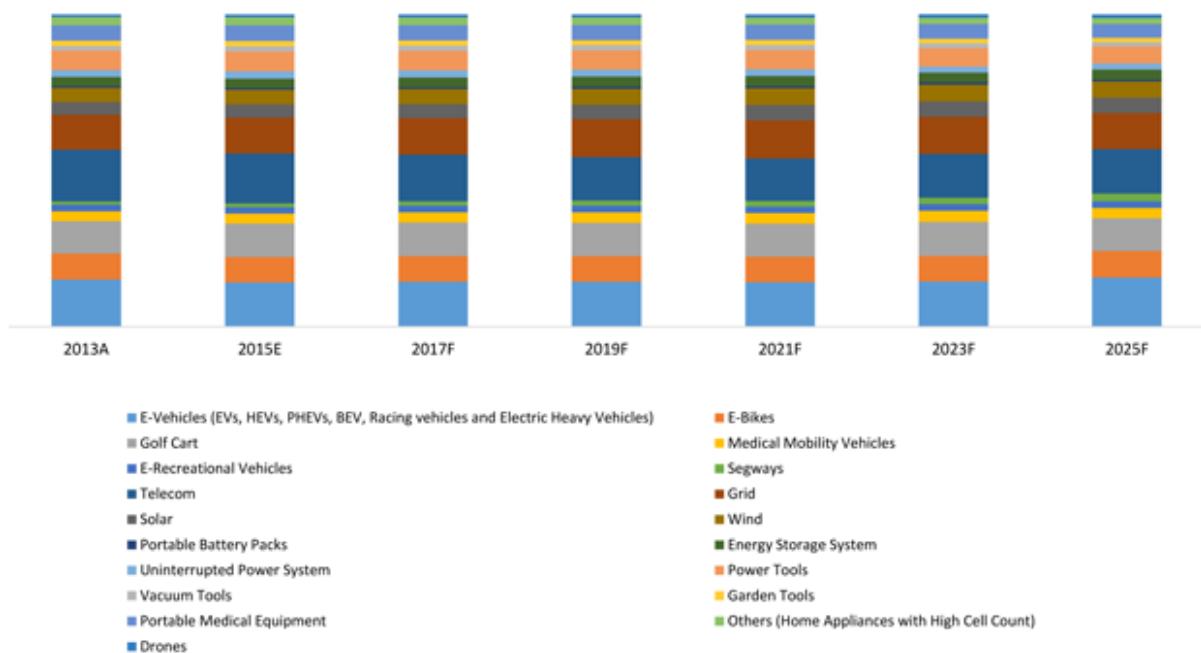
Source: FMI, 2015

Εικόνα 2.2: Αξία-ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης παγκόσμιας αγοράς BMS (πηγή:FMI)

Λαμβάνοντας υπόψη τον καθοριστικό ρόλο που παίζει το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας στην βέλτιστη λειτουργία της μπαταρίας και την προστασία της, γίνεται φανερό πως όσο περισσότερο διεισδύουν οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες στην καθημερινότητά μας, τόσο αυξάνεται η ζήτηση για συστήματα διαχείρισης μπαταριών. Σύμφωνα με εκτιμήσεις η

παγκόσμια αγορά συστημάτων διαχείρισης μπαταριών αναμένεται να φτάσει στην αξία των 11,73 δις \$ μέχρι το 2025 με τον μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης να ανέρχεται στο 19,9% (εικόνα 2.2).

Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζονται αναλυτικά τα μερίδια της παγκόσμιας αγοράς συστημάτων διαχείρισης μπαταρίας που καταλαμβάνουν οι σημαντικότεροι τομείς που στηρίζονται στην τεχνολογία επαναφορτιζόμενων μπαταριών, καθώς και εκτιμήσεις για το πώς τα μερίδια αυτά θα κινηθούν στα επόμενα χρόνια. Το μεγαλύτερο ποσοστό εφαρμογής συστημάτων διαχείρισης μπαταρίας συναντάται σε εφαρμογές αυτοκίνησης και είναι 39,5%, ακολουθούμενο από ενεργειακές εφαρμογές με 26,3% και καταναλωτικές-οικιακές εφαρμογές με 17,4%. Πιο συγκεκριμένα στον τομέα της αυτοκίνησης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ηλεκτρικά οχήματα, καταλαμβάνοντας ήδη το 14,2% της συνολικής ζήτησης με μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης που αναμένεται να φτάσει το 21,1% μέχρι το 2025.[10]



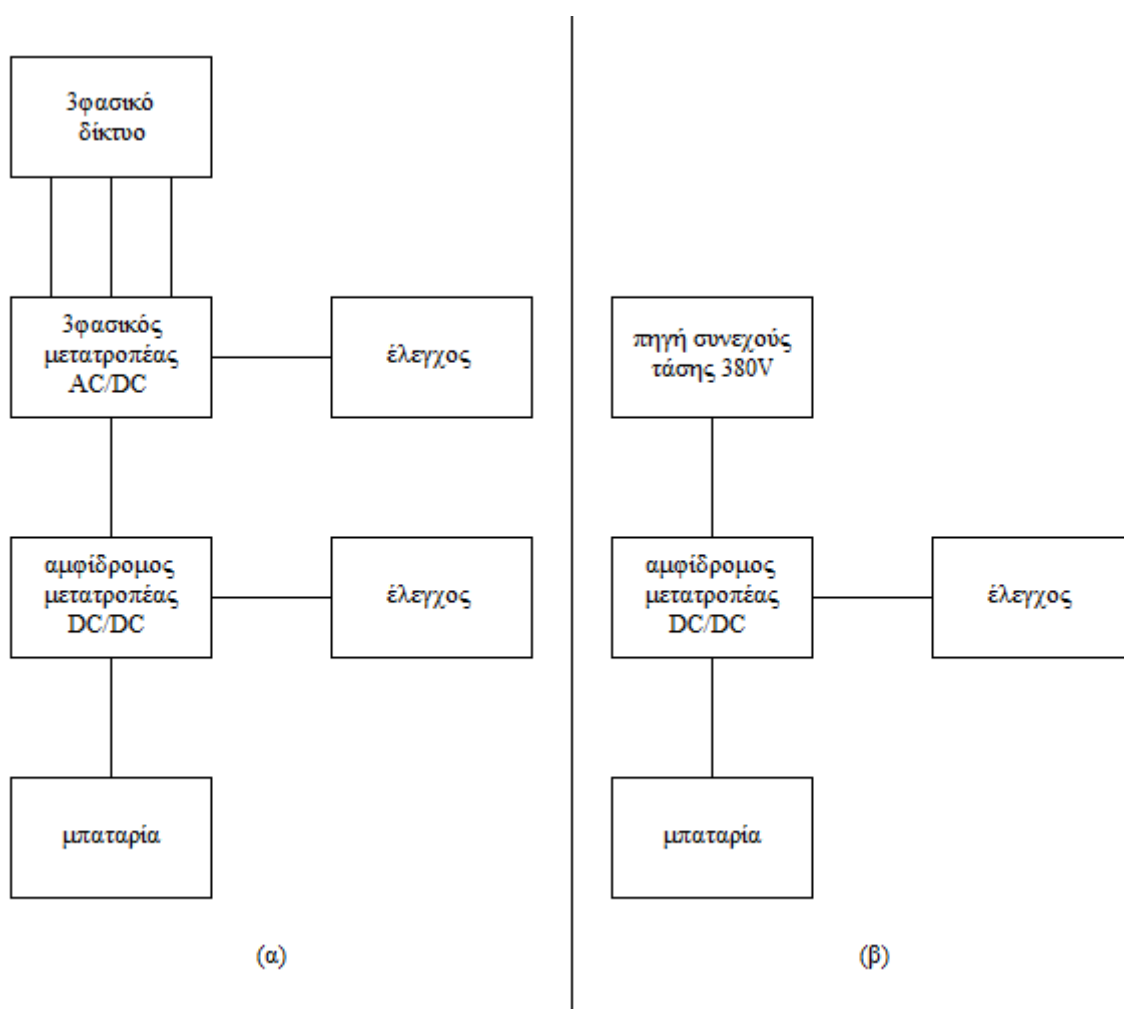
©2015 Future Market Insights, All Rights Reserved

Εικόνα 2.3: Μερίδια αγοράς BMS (Πηγή:FMI)

3.ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB-SIMULINK

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται το βασικό μοντέλο εργασίας σε περιβάλλον Matlab-Simulink. Πάνω στο μοντέλο αυτό θα υλοποιηθούν και θα προσομοιωθούν στα επόμενα κεφάλαια οι διάφορες λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας.

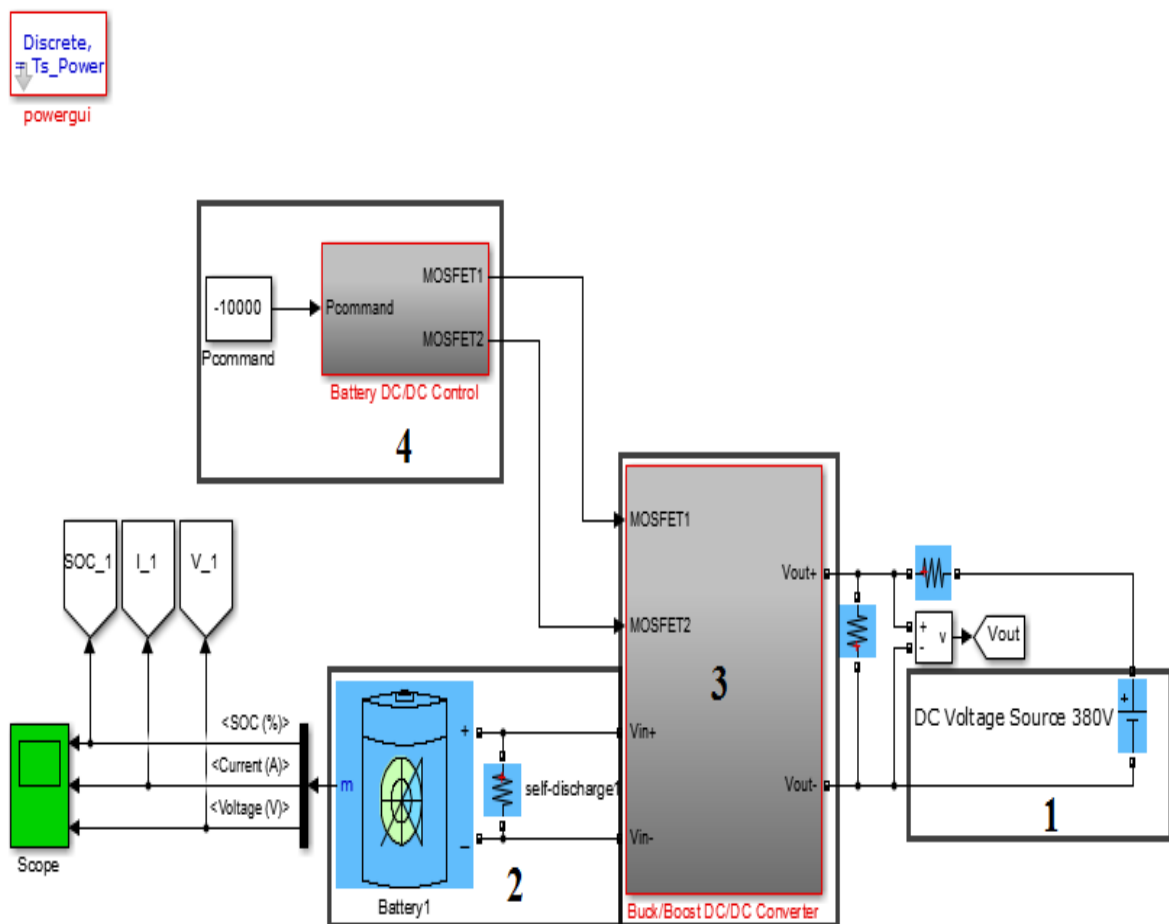


Εικόνα 3.1: Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.1(α), η μπαταρία τροφοδοτείται από το τριφασικό δίκτυο, ενώ η διασύνδεσή της με αυτό πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Αρχικά χρησιμοποιείται

έναν τριφασικό μετατροπέα AC/DC. Για λόγους κατασκευαστικής απλούστευσης και μείωσης της πολυπλοκότητας του μοντέλου, δεν ασχολούμαστε στα πλαίσια της εργασίας αυτής με την υλοποίηση του συγκεκριμένου μετατροπέα και τον έλεγχο λειτουργίας του, αλλά θεωρούμε την έξοδό του ως μια πηγή συνεχούς τάσης 380V (εικόνα 3.1(β)). Ανάμεσα στον παραπάνω μετατροπέα και την μπαταρία τοποθετείται ένας αμφίδρομος μετατροπέας ανύψωσης-υποβιβασμού DC/DC, ο οποίος μας δίνει την δυνατότητα προσομοίωσης των λειτουργιών φόρτισης αλλά και εκφόρτισης της μπαταρίας.

Αναφορικά με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.2 για την δομή του BMS, ο συνδυασμός των δύο μετατροπέων αποτελεί την μονάδα ισχύος του συστήματος, η οποία διασφαλίζει την ομαλή φόρτιση της μπαταρίας. Ο αμφίδρομος μετατροπέας DC/DC χρησιμοποιείται επίσης για την ομαλή διασύνδεση της μπαταρίας με το φορτίο (διαδικασία εκφόρτισης) όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1. Το είδος του φορτίου και τα χαρακτηριστικά του δεν θα μας απασχολήσουν στην συγκεκριμένη εργασία.



Εικόνα 3.2: Αρχικό μοντέλο σε Matlab-Simulink

Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται το αρχικό μοντέλο σε Matlab-Simulink, όπου διακρίνονται τα εξής μέρη:

1. πηγή συνεχούς τάσης 380V
2. μπαταρία
3. αμφίδρομος μετατροπέας DC/DC
4. έλεγχος αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC

Το είδος της μπαταρίας και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της, η υλοποίηση του αμφίδρομου μετατροπέα και ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται ο έλεγχος λειτουργίας του θα αναπτυχθούν αναλυτικά στις επόμενες ενότητες.

3.2 Επιλογή μπαταρίας

Η μπαταρία, όπως είναι φυσικό, αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας. Παρόλο που οι αρχές λειτουργίας του BMS παραμένουν σε γενικές γραμμές σταθερές, το είδος και τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας είναι αυτά που καθορίζουν τις λεπτομέρειες σύμφωνα με τις οποίες επιτελούνται οι διάφορες διεργασίες.

3.2.1 Τύπος μπαταρίας

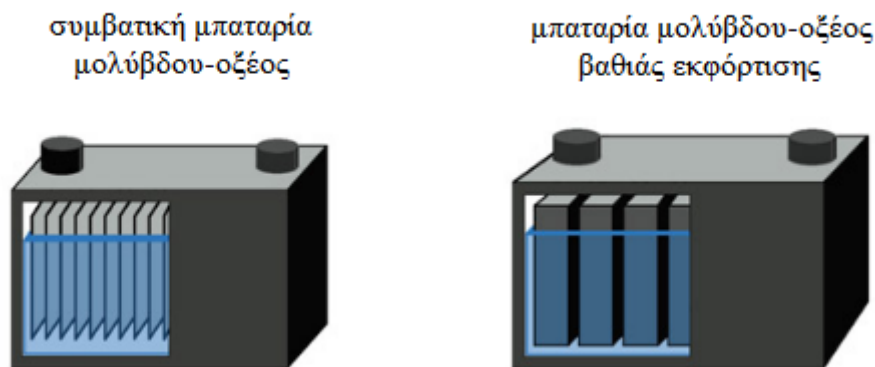
Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος (lead-acid batteries) αποτελούν τον παλαιότερο τύπο επαναφορτιζόμενης μπαταρίας, και από το 1859 που πρωτοκατασκευάστηκαν μέχρι και σήμερα, τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο. Συνοπτικά τα κύρια πλεονεκτήματά τους, που συντέλεσαν στην διαχρονική επικράτησή τους στην αγορά είναι τα εξής:[2]

- χαμηλή τιμή
- απλή και εύκολη κατασκευή
- ευρέως χρησιμοποιημένη, ελεγμένη και κατανοητή τεχνολογία
- ικανοποιητική διάρκεια ζωής όταν χρησιμοποιούνται ορθολογικά
- χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης σε σχέση με άλλους τύπους μπαταριών
- ικανότητα εκφόρτισης με υψηλής έντασης ρεύμα

Στον αντίποδα τα βασικά μειονεκτήματα των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι τα παρακάτω:

- χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (ονομαστική ενέργεια που μπορεί να αποδώσει μια μπαταρία ανά μονάδα μάζας της)
- αδυναμία αποθήκευσης σε κατάσταση χαμηλής φόρτισης
- θερμικές απώλειες σε φόρτιση με μη ενδεδειγμένο τρόπο
- περιορισμένος αριθμός κύκλων

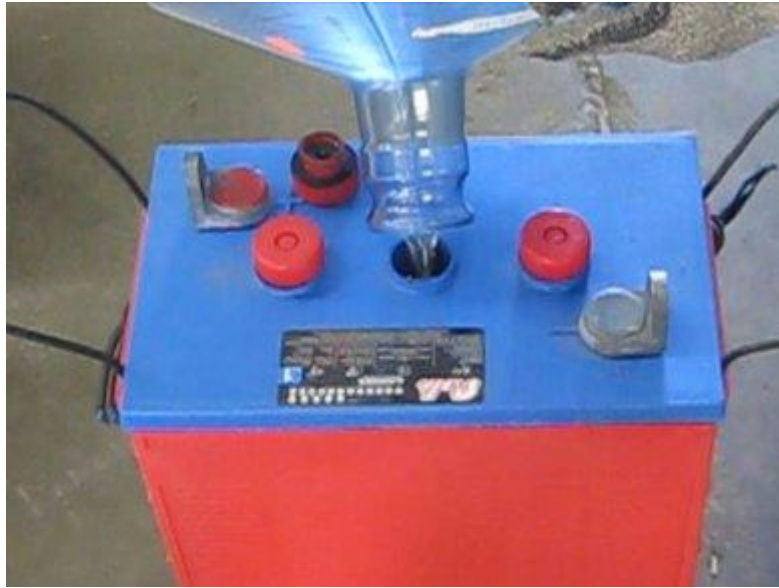
Για στατικές εφαρμογές, εφαρμογές δηλαδή όπου δεν απαιτείται κίνηση της μπαταρίας, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα, πέραν του όγκου που καταλαμβάνει η μπαταρία. Η αδυναμία αποθήκευσης σε κατάσταση χαμηλής φόρτισης και οι θερμικές απώλειες κατά τη φόρτιση είναι δύο προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν από το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας, το οποίο μεριμνά για την φόρτιση της μπαταρίας μετά την χρήση της καθώς και για τον κατάλληλο τρόπο με τον οποίο θα επιτευχθεί η διαδικασία της φόρτισης (κεφάλαιο 4). Τέλος το πρόβλημα των περιορισμένων κύκλων μπορεί εν μέρει να αντιμετωπιστεί με την χρήση μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης (deep cycle batteries).



Εικόνα 3.3: Πλάκες μπαταριών βαθιάς εκφόρτισης

Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης κατασκευάζονται από πιο χοντρές πλάκες μολύβδου σε σχέση με τις συμβατικές, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3[11]. Αυτό εξασφαλίζει μεγαλύτερη αντοχή απέναντι στην διάβρωση των πλακών και δίνει την δυνατότητα εκφόρτισης σε βάθος που φτάνει το 80% χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα. Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: υγρού ηλεκτρολύτη (flooded deep cycle batteries) και στεγανές (sealed deep cycle batteries).

Οι βαθιάς εκφόρτισης μπαταρίες μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη (flooded deep cycle lead-acid batteries) αποτελούν την οικονομικότερη επιλογή μπαταρίας βαθιάς εκφόρτισης ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζουν και την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Στις μπαταρίες αυτές το διάλυμα θεικού οξέος, που χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης, αντιδρά με τις βυθισμένες σε αυτό πλάκες μολύβδου για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Κατά τη διαδικασία της φόρτισης παράγονται αέρια υδρογόνου και οξυγόνου τα οποία προκαλούν δύο προβλήματα. Αρχικά, τα αέρια αυτά πρέπει να διοχετευθούν ομαλά στον χώρο εξωτερικά της μπαταρίας, μέσω ειδικών βαλβίδων εξαερισμού, καθώς είναι άκρως εύφλεκτα και εκρηκτικά. Παρατηρείται επίσης κατά τη διαδικασία αυτήν απώλεια του υγρού ηλεκτρολύτη, η στάθμη του οποίου χαμηλώνει, αφήνοντας έτσι εκτεθειμένες τις πλάκες μολύβδου. Αυτό είναι επικίνδυνο για την μπαταρία και ανά τακτά χρονικά διαστήματα απαιτείται αναπλήρωση απιονισμένου νερού όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Αναπλήρωση υγρού σε μπαταρία υγρού ηλεκτρολύτη

Στις βαθιάς εκφόρτισης μπαταρίες στεγανού τύπου ο ηλεκτρολύτης είναι είτε σε μορφή gel, ή εγκλωβισμένος σε ένα γυάλινο στρώμα ανάμεσα στις πλάκες (absorbed glass mat AGM batteries). Η έλλειψη κινδύνου διαρροής ηλεκτρολύτη επιτρέπει την εγκατάσταση των συγκεκριμένων μπαταριών σε οποιοδήποτε προσανατολισμό (κανονικά, πλάγια ακόμα και ανάποδα). Ακριβότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες υγρού ηλεκτρολύτη, προτιμούνται κυρίως σε απομακρυσμένες εφαρμογές, όπου η μπαταρία μένει χωρίς παρακολούθηση για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Αυτό συμβαίνει διότι αντίθετα με τις μπαταρίες υγρού ηλεκτρολύτη δεν απαιτούν διεργασίες συντήρησης. Η παραγωγή αερίων δεν είναι σύνηθες φαινόμενο (αν και υπάρχουν βαλβίδες εξαερισμού για περιπτώσεις όπου κρίνεται αναγκαίο), ενώ δεν υπάρχει δυνατότητα αναπλήρωσης υγρού αφού οι μπαταρίες είναι κλειστού τύπου. Αυτό σημαίνει επίσης λιγότερους κύκλους ζωής.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την υπόθεση ότι η μπαταρία θα χρησιμοποιηθεί για οικιακούς σκοπούς (όχι σε κάποια απομακρυσμένη τοποθεσία), η βαθιάς εκφόρτισης μπαταρία μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη (flooded deep cycle lead-acid battery) αποτελεί την καταλληλότερη επιλογή, συνδυάζοντας την χαμηλότερη τιμή με την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Το μέγιστο μειονέκτημα είναι ότι για την ομαλή λειτουργία της απαιτούνται διεργασίες συντήρησης πέραν των αυτοματοποιημένων που επιτελεί το BMS. Ακόμα και για αυτές τις χειρωνακτικές διεργασίες ωστόσο παρέχονται αυτοματοποιημένες λύσεις στα επόμενα κεφάλαια όπου θα αναπτυχθούν λεπτομερώς οι λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας.

3.2.2 Χαρακτηριστικά μπαταρίας

Τα δύο βασικότερα χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή μιας μπαταρίας είναι η τάση ακροδεκτών και η χωρητικότητά της.

Η τάση ακροδεκτών ενός στοιχείου μπαταρίας καθορίζεται από τα χημικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αυτό, καθώς οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται παράγουν ένα σταθερό δυναμικό. Συγκεκριμένα στο θετικό ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου το δυναμικό είναι 1,697V, ενώ στο αρνητικό ηλεκτρόδιο μολύβδου -0,358V.[12] Συνεπώς η τάση ακροδεκτών ενός στοιχείου μολύβδου-οξέος είναι της τάξης των:

- $1,697V - (-0,358V) = 2,055V$.

Για την περιγραφή του συγκεκριμένου μεγέθους ωστόσο χρησιμοποιείται πιο συχνά η στρογγυλοποιημένη τιμή των 2V. Ορίζοντας την τιμή της τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας στα 96V, γίνεται εύκολα κατανοητό πως η μπαταρία θα αποτελείται από 48 στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά.

Battery (mask) (link)
 Implements a generic battery that model most popular battery types. Uncheck the "Use parameters based on Battery type and nominal values" parameter to edit the discharge characteristics.

Parameters View Discharge Characteristics Battery Dynamics

Battery type Lead-Acid

Nominal Voltage (V)

Rated Capacity (Ah)

Initial State-Of-Charge (%)

Use parameters based on Battery type and nominal values

Maximum Capacity (Ah)

Fully Charged Voltage (V)

Nominal Discharge Current (A)

Internal Resistance (Ohms)

Capacity (Ah) @ Nominal Voltage

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]

Εικόνα 3.5: Παράμετροι μπαταρίας σε Simulink

Η χωρητικότητα της μπαταρίας εξαρτάται από την ποσότητα ενεργούς μάζας που περιέχει το στοιχείο. Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας της μπαταρίας, θεωρούμε πως αυτήν θα χρησιμοποιηθεί για απλή οικιακή χρήση σύμφωνα με τις παρακάτω προδιαγραφές[13]:

- $E_{\mu}=8\text{kWh}$, μέση ημερήσια κατανάλωση οικίας
- $t=4$ μέρες, επιθυμητή περίοδος αυτονομίας
- $\text{DoD}_{\max}=80\%$, μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης για βαθιάς εκφόρτισης μπαταρίες μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη σύμφωνα με την πλειοψηφία των κατασκευαστών
- $n=95\%$, βαθμός απόδοσης μετατροπέα DC/DC

Η επιθυμητή χωρητικότητα της μπαταρίας είναι:

$$\bullet \quad C = \frac{E}{V} = \frac{t \cdot E_{\mu}}{V \cdot \text{DoD}_{\max} \cdot n} = \frac{4 \cdot 8000\text{Wh}}{96\text{V} \cdot 0.8 \cdot 0.95} \approx 439\text{Ah}$$

Συνοψίζοντας θα χρησιμοποιηθεί το ενσωματωμένο στις βιβλιοθήκες του Simulink μοντέλο μπαταρίας με χαρακτηριστικά που φαίνονται στην εικόνα 3.5.

3.2.3 Αυτοεκφόρτιση μπαταρίας

Όπως είδαμε και στην υποενότητα 1.4.5 η αυτοεκφόρτιση αποτελεί ένα φαινόμενο που συναντάται στο σύνολο των μπαταριών. Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των μπαταριών και όχι για κάποιο κατασκευαστικό σφάλμα, αν και κακές κατασκευές μπορούν να επιδεινώσουν το πρόβλημα. Άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτό είναι η υψηλή θερμοκρασία και η αυξανόμενη ηλικία της μπαταρίας.

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος παρουσιάζουν έναν από τους χαμηλότερους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης ανάμεσα στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, που κυμαίνεται στο 5% της χωρητικότητας ανά μήνα. Ενδεικτικά για το μέγεθος αυτό, οι κατασκευαστές προτείνουν απόσυρση μιας μπαταρίας όταν ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης φτάσει το 30% της χωρητικότητας σε 24 ώρες.

Σε επίπεδο προσομοιώσεων, το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης μπορεί να αναπαρασταθεί με την τοποθέτηση μιας ωμικής αντίστασης παράλληλα στην μπαταρία, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2 με την αντίσταση “self-discharge1”. Για τον υπολογισμό της τιμής της αντίστασης εργαζόμαστε ως εξής:

$$\bullet \quad \frac{5\% \cdot C}{1\text{month}} = \frac{0.05 \cdot 440\text{Ah}}{30 \cdot 24\text{h}} \approx 0.031\text{A}$$

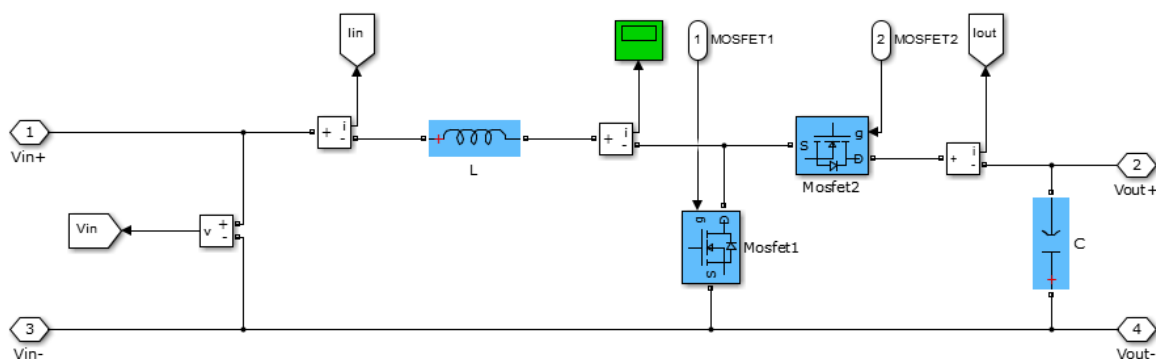
$$\bullet \quad R = \frac{96\text{V}}{0.031\text{A}} \approx 3097\Omega$$

Σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς η τιμή της αντίστασης αυτοεκφόρτισης ορίζεται στα 3000Ω.

3.3 Υλοποίηση αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC/DC converters) αποτελούν ηλεκτρικές διατάξεις, που επιτρέπουν την μετατροπή ενός σήματος συνεχούς τάσης σε κάποιο άλλο σήμα συνεχούς τάσης διαφορετικής τιμής. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, υπάρχουν περισσότερες από 500 τοπολογίες μετατροπέων DC/DC[14][15], που υλοποιούνται με την βοήθεια ημιαγωγικών στοιχείων (MOSFET, IGBT, GTO), πηνίων, πυκνωτών και διόδων. Μια λεπτομερής ανάλυση γύρω από τους μετατροπείς αυτούς έγινε στην εργασία “Κατασκευή DC μικροδικτύου σε περιβάλλον Matlab/Simulink και μελέτη τεχνικών ελέγχου”[13]. Σύμφωνα με την ανάλυση αυτή οι βασικοί τύποι μετατροπέων DC/DC είναι οι εξής:

- μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (buck converter)
Η μέση τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα αυτού είναι μικρότερη από την τιμή της συνεχούς τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετατροπέα.
- μετατροπέας ανύψωσης τάσης (boost converter)
Η μέση τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα αυτού είναι μεγαλύτερη από την τιμή της συνεχούς τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδο του μετατροπέα.
- αμφίδρομος μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης (buck-boost converter)
Ο μετατροπέας αυτός αποτελεί στην ουσία ένωση των δύο παραπάνω τύπων και μπορεί να έχει στην έξοδό του τάση με μέση τιμή είτε μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τιμή της συνεχούς τάσης που εφαρμόζεται στην είσοδό του.



Εικόνα 3.6: Αμφίδρομος μετατροπέας DC/DC σε περιβάλλον Simulink

Όπως προαναφέρθηκε, στο συγκεκριμένο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί αμφίδρομος μετατροπέας υποβιβασμού-ανύψωσης τάσης, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η προσομοίωση τόσο της λειτουργίας εκφόρτισης όσο και της λειτουργίας φόρτισης της μπαταρίας. Η διάταξη του μετατροπέα σε περιβάλλον Simulink φαίνεται στην εικόνα 3.6.

Αποτελείται από δύο τρανζίστορ MOSFET με αντιπαράλληλες διόδους, ένα πηνίο και έναν πυκνωτή. Οι αριστεροί ακροδέκτες του μετατροπέα συνδέονται στα άκρα της μπαταρίας ενώ οι δεξιοί ακροδέκτες στην πηγή συνεχούς τάσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2. Στα σήματα παλμοδότησης των MOSFET (θύρες g των MOSFET) θα αναφερθούμε στην ενότητα 3.4.

Για την τιμές του πυκνωτή και του πηνίου πρέπει να εξετάσουμε ξεχωριστά τους μετατροπείς ανύψωσης και υποβιβασμού. Η συγχώνευση των αποτελεσμάτων θα μας δώσει τις επιθυμητές τιμές, αφού ο αμφίδρομος μετατροπέας αποτελεί ένωση των δύο παραπάνω μετατροπέων. Η διαδικασία παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια και βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές[16]:

- Τα MOSFET και οι αντιπαράλληλες διόδοι αποτελούν ιδανικούς διακόπτες
- Η χωρητικότητα εξόδου των τρανζίστορ MOSFET, η χωρητικότητα των διόδων καθώς και οι ηλεκτρικές επαγωγές είναι μηδέν. Το ίδιο ισχύει επομένως και για τις απώλειες μετάβασης.
- Τα παθητικά στοιχεία είναι γραμμικά, χρονικά αναλλοίωτα και ανεξάρτητα από την συχνότητα.
- Η σύνθετη αντίσταση εξόδου της πηγής τάσης εισόδου είναι μηδέν.

Περισσότερες λεπτομέρειες για την παραμετροποίηση του μετατροπέα μπορούν να αναζητηθούν στα [13][16].

Κατά την διαδικασία υπολογισμού των τιμών του πυκνωτή και του πηνίου θα χρησιμοποιηθούν τα εξής δεδομένα:

- $V_{DC}=380V$, συνεχής τάση ζυγού
- $V_{BAT_nom}=96V$, ονομαστική τάση μπαταρίας
- $V_{BAT_min}=88.8V$, ελάχιστη τάση μπαταρίας
- $V_{BAT_max}=110.4V$, μέγιστη τάση μπαταρίας
- $I_{BAT_min}=13.2A$, ελάχιστο ρεύμα μπαταρίας
- $I_{BAT_max}=88A$, μέγιστο ρεύμα μπαταρίας
- $T_s=0.01s$, περίοδος δειγματοληψίας
- $f_s=100Hz$, συχνότητα δειγματοληψίας
- $\eta=95\%$, βαθμός απόδοσης μετατροπέα

3.3.1 Υπολογισμός παραμέτρων μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

Στην περίπτωση αυτήν ως είσοδος θεωρείται η πλευρά του ζυγού συνεχούς τάσης 380V και ως έξοδος η πλευρά της μπαταρίας, επομένως έχουμε:

- $V_{IN}=380V$
- $V_{OUT_nom}=96V$
- $V_{OUT_min}=88.8V$
- $V_{OUT_max}=110.4V$

- $I_{OUT_min}=13.2A$
- $I_{OUT_max}=88A$

Η μέγιστη και ελάχιστη ισχύς εξόδου είναι αντίστοιχα:

- $P_{OUT_max} = V_{OUT_max} \cdot I_{OUT_max} = 110.4V \cdot 88A = 9715.2W$
- $P_{OUT_min} = V_{OUT_min} \cdot I_{OUT_min} = 88.8V \cdot 13.2A = 1172.16W$

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντίστασης είναι αντίστοιχα:

- $R_{L_max} = \frac{V_{OUT_max}}{I_{OUT_min}} = \frac{110.4V}{13.2A} = 8.36\Omega$
- $R_{L_min} = \frac{V_{OUT_min}}{I_{OUT_max}} = \frac{88.8V}{88A} = 1.01\Omega$

Για την συνάρτηση μεταφοράς της τάσης έχουμε:

- $M_{V_max} = \frac{V_{OUT_max}}{V_{IN}} = \frac{110.4V}{380V} = 0.29$
- $M_{V_nom} = \frac{V_{OUT_nom}}{V_{IN}} = \frac{96V}{380V} = 0.25$
- $M_{V_min} = \frac{V_{OUT_min}}{V_{IN}} = \frac{88.8V}{380V} = 0.23$

Για τον λόγο κατάτμησης έχουμε:

- $D_{_max} = \frac{M_{V_max}}{n} = \frac{0.29}{0.95} = 0.31$
- $D_{_nom} = \frac{M_{V_nom}}{n} = \frac{0.25}{0.95} = 0.27$
- $D_{_min} = \frac{M_{V_min}}{n} = \frac{0.23}{0.95} = 0.25$

Οι παραπάνω τιμές είναι αποδεκτές αφού πρέπει $0 \leq D \leq 1$.

Οι τιμές του λόγου κατάτμησης προέκυψαν μικρότερες του 1/3. Για τον υπολογισμό της τιμής του πηνίου θέτουμε $D_{_max}=1/3$, αφού για συνεχή λειτουργία πρέπει $D \geq 1/3$. Επομένως η ελάχιστη τιμή του πηνίου είναι :

- $L_{BUCK_min} = \frac{R_{L_max} \cdot (1 - D_{_max})}{2 \cdot f_s} = \frac{8.36\Omega \cdot (1 - 1/3)}{2 \cdot 100Hz} = 27.88mH$

Για την τάση κυμάτωσης του πυκνωτή έχουμε:

- $V_r \leq 1\% \cdot V_{OUT}$

Επομένως η μέγιστη τιμή της τάσης κυμάτωσης του πυκνωτή είναι:

- $V_{r_max} = \frac{1}{100} \cdot V_{OUT_min} = \frac{1}{100} \cdot 88.8V = 0.89V$

Η μέγιστη τιμή της έντασης ρεύματος κυμάτωσης του πυκνωτή είναι:

- $\Delta I_{_max} = \frac{V_{OUT_max} \cdot (1 - D_{_max})}{f_s \cdot L_{BUCK_min}} = \frac{110.4V \cdot (1 - 1/3)}{100Hz \cdot 27.88mH} = 26.4A$

Η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή είναι:

- $C_{BUCK_min} = \frac{D_{_max}}{2 \cdot f_s \cdot r_{cm}} = \frac{D_{_max}}{2 \cdot f_s \cdot \frac{V_{r_max}}{\Delta I_{_max}}} = \frac{\frac{1}{3}}{2 \cdot 100Hz \cdot \frac{0.89V}{26.4A}} = 49.55mF$

3.3.2 Υπολογισμός παραμέτρων μετατροπέα ανύψωσης τάσης

Στην περίπτωση αυτήν ως είσοδος θεωρείται η πλευρά της μπαταρίας και ως έξοδος η πλευρά του ζυγού συνεχούς τάσης 380V, επομένως έχουμε:

- $V_{OUT}=380V$
- $V_{IN_nom}=96V$
- $V_{IN_min}=88.8V$
- $V_{IN_max}=110.4V$
- $I_{IN_min}=13.2A$
- $I_{IN_max}=88A$

Η μέγιστη ισχύς εισόδου είναι:

- $P_{IN_max} = V_{IN_max} \cdot I_{IN_max} = 110.4V \cdot 88A = 9715.2W$

Υποθέτοντας ότι ο μετατροπέας δεν παρουσιάζει απώλειες στην μέγιστη ισχύ, η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι:

- $P_{OUT_max} = P_{IN_max} = 9715.2W$

Η μέγιστη τιμή της έντασης του ρεύματος εξόδου είναι:

- $$I_{OUT_max} = \frac{P_{OUT_max}}{V_{OUT}} = \frac{9715.2W}{380V} = 25.57A$$

Η ελάχιστη τιμή της έντασης του ρεύματος εξόδου είναι:

- $$I_{OUT_min} = 5\% \cdot I_{OUT_max} = \frac{5}{100} \cdot 25.57A = 1.28A$$

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αντίστασης είναι αντίστοιχα:

- $$R_{L_max} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT_min}} = \frac{380V}{1.28A} = 297.27\Omega$$

- $$R_{L_min} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT_max}} = \frac{380V}{25.57A} = 14.86\Omega$$

Για τον λόγο κατάτμησης έχουμε:

- $$D_{_max} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{OUT}}{V_{IN_min}}} = 1 - \frac{1}{\frac{380V}{88.8V}} = 0.77$$

- $$D_{_nom} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{OUT}}{V_{IN_nom}}} = 1 - \frac{1}{\frac{380V}{96V}} = 0.75$$

- $$D_{_min} = 1 - \frac{1}{\frac{V_{OUT}}{V_{IN_nom}}} = 1 - \frac{1}{\frac{380V}{110.4V}} = 0.71$$

Οι παραπάνω τιμές είναι αποδεκτές αφού πρέπει $0 \leq D \leq 1$. Επίσης, οι τιμές του λόγου κατάτμησης προέκυψαν μεγαλύτερες του $1/3$, γεγονός που εξασφαλίζει ότι ο μετατροπέας λειτουργεί στην κατάσταση συνεχούς λειτουργίας ($D \geq 1/3$).

Η ελάχιστη τιμή του πηνίου είναι :

- $$L_{BOOST_min} = \frac{R_{L_max} \cdot D_{_min} \cdot (1 - D_{_min})^2}{2 \cdot f_s} = \frac{297.27\Omega \cdot 0.71 \cdot (1 - 0.71)^2}{2 \cdot 100Hz} = 89.01mH$$

Για την τάση κυμάτωσης του πυκνωτή έχουμε:

- $$V_r \leq 1\% \cdot V_{OUT}$$

Επομένως η μέγιστη τιμή της τάσης κυμάτωσης του πυκνωτή είναι:

- $V_{r_max} = \frac{1}{100} \cdot V_{OUT} = \frac{1}{100} \cdot 380V = 3.8V$

Η ελάχιστη τιμή του πυκνωτή είναι:

- $C_{BOOST_min} = \frac{V_{OUT} \cdot D_{max}}{V_{CPP} \cdot R_{L_min} \cdot f_s} = \frac{V_{OUT} \cdot D_{max}}{\frac{V_{r_max}}{2} \cdot R_{L_min} \cdot f_s} = \frac{380V \cdot 0.77}{3.8V \cdot 14.86\Omega \cdot 100Hz} = 103.12mF$

3.3.3 Υπολογισμός παραμέτρων αμφίδρομου μετατροπέα

Συγκωνεύοντας τα παραπάνω αποτελέσματα, οι ελάχιστες τιμές που προκύπτουν για το πηνίο και τον πυκνωτή είναι οι εξής:

- $L_{min} = \max\{L_{BUCK_min}, L_{BOOST_min}\} = \max\{27.88mH, 89.01mH\} = 89.01mH$
- $C_{min} = \max\{C_{BUCK_min}, C_{BOOST_min}\} = \max\{49.55mF, 103.12mF\} = 103.12mF$

Οι παραπάνω τιμές αποτελούν τις ελάχιστες δυνατές, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του αμφίδρομου μετατροπέα. Μετά από δοκιμές και εξαιτίας της μεγάλης περιόδου δειγματοληψίας που θα χρησιμοποιηθεί στις προσομοιώσεις ($T_s=0.01s$), με σκοπό την εξέταση μεγάλων χρονικών περιόδων λειτουργίας της μπαταρίας, οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι αρκετά μεγαλύτερες των ελάχιστων. Συγκεκριμένα:

- $L=20H$
- $C=780F$

3.4 Έλεγχος αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC

3.4.1 Ελεγκτές PID

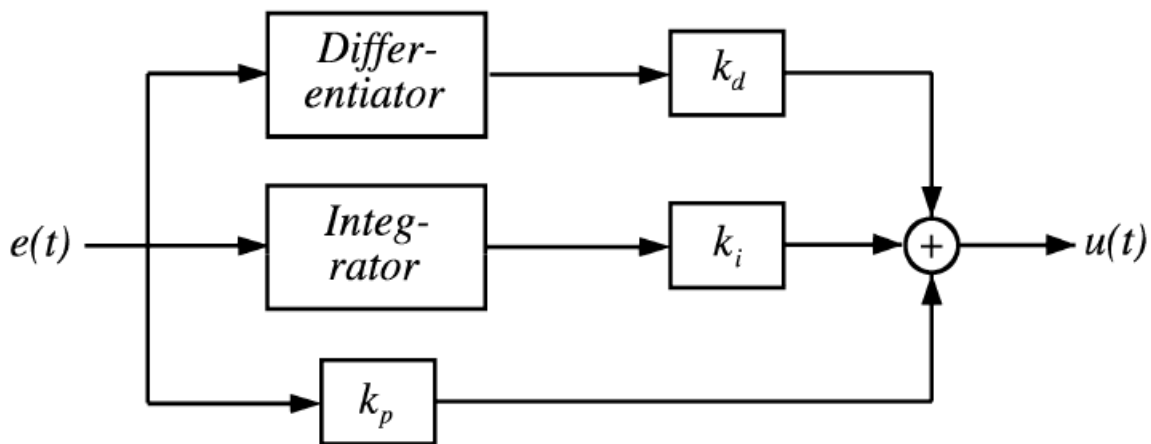
Όταν ένας ολοκληρωτής αποτελεί μέρος ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς συστήματος και σταθερά σήματα εφαρμόζονται στην είσοδο του συστήματος, τότε το σήμα εισόδου του ολοκληρωτή αναγκάζεται να λάβει μηδενική τιμή. Αυτήν η απλή αρχή αποτελεί την βάση σχεδιασμού γραμμικών και μη σερβομηχανισμών μίας εισόδου-εξόδου ή πολλαπλών μεταβλητών.

Η ιδιότητα αυτήν, του μηδενισμού της εισόδου, είναι ανεξάρτητη από το κέρδος του ολοκληρωτή, το οποίο μπορεί ως εκ τούτου να χρησιμοποιηθεί για την σταθεροποίηση του συστήματος κλειστού βρόχου. Ταυτόχρονα, υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης κλάδων παράλληλων στον ολοκληρωτή, που θα μεταχειρίζονται το ίδιο το σφάλμα και την παράγωγό

του σε συνδυασμό με το ολοκλήρωμά του, χωρίς να επηρεάζεται η ιδιότητα μηδενισμού της εισόδου. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη των αναλογικών ολοκληρωτικών παραγωγικών ελεγκτών PID (Proportional Integral Derivative). Ένας τέτοιος ελεγκτής φαίνεται στην εικόνα 3.7[17]. Το σήμα $e(t)$ αντιπροσωπεύει το σφάλμα, το οποίο πρέπει να μηδενιστεί, τα k_d , k_i και k_p αποτελούν τους συντελεστές κέρδους του παραγωγικού, ολοκληρωτικού και αναλογικού κλάδου αντίστοιχα, ενώ τέλος το $u(t)$ αποτελεί το σήμα ελέγχου, που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

- $$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) dt + k_d \frac{de(t)}{dt}$$

Οι ελεγκτές PID αποτελούν το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέσο ελέγχου. Ο έλεγχος της συντριπτικής πλειοψηφίας συστημάτων κλειστού βρόχου βασίζεται στον συγκεκριμένο αλγόριθμο ή μικρές παραλλαγές του.



Εικόνα 3.7: Διάγραμμα ελεγκτή PID

Τα συστήματα κλειστού βρόχου βασίζονται στην αρχή της ανάδρασης, μιας ιδέας τόσο απλής και ταυτόχρονα τόσο σημαντικής, που έχει ασκήσει τεράστια επιρροή στον τομέα της τεχνολογίας. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.8, η αρχή της ανάδρασης αφορά την τροφοδότηση του σήματος εξόδου $y(t)$ στην είσοδο του συστήματος και την σύγκριση του με την επιθυμητή τιμή εξόδου y_{sp} ώστε να προκύψει το σφάλμα $e(t)$. Στην συνέχεια το σφάλμα μετατρέπεται μέσω του PID ελεγκτή στο σήμα ελέγχου $u(t)$ και μέσω των διεργασιών που επιτελούνται στο σύστημα προκύπτει το νέο σήμα εξόδου $y(t)$ [18].

Όσον αφορά την ξεχωριστή δράση του κάθε κλάδου του ελεγκτή PID, ο αναλογικός ελεγκτής σχετίζεται με το ‘παρόν’ του συστήματος. Η σχέση μεταξύ σφάλματος και σήματος ελέγχου είναι:

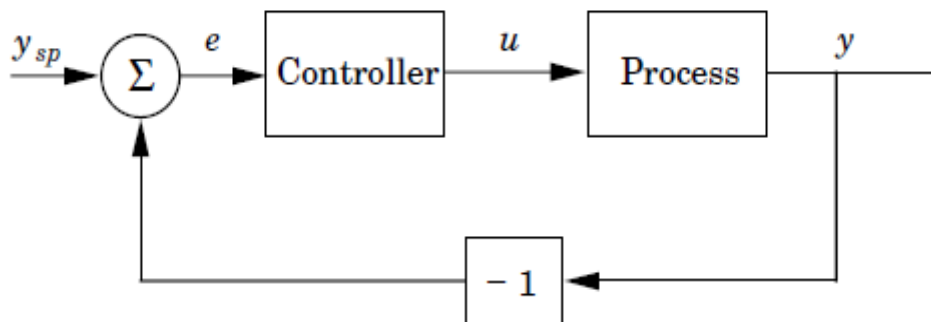
- $u(t) = k_p e(t)$

Όταν ο συντελεστής κέρδους k_p αυξάνεται, τότε ελαττώνεται η ευαισθησία της εξόδου στις διαταραχές, αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και ο βαθμός ευστάθειας του συστήματος. Η δράση του αναλογικού ελεγκτή σταθεροποιεί το σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, αλλά δεν το μηδενίζει.

Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής σχετίζεται με το 'παρελθόν' του συστήματος και η σχέση που συνδέει το σήμα σφάλματος με το σήμα ελέγχου είναι:

- $$u(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Καταφέρνει αυτό που δεν μπορεί ο αναλογικός ελεγκτής, να φέρει δηλαδή το σήμα εξόδου στο επίπεδο της επιθυμητής τιμής που έχει οριστεί, μηδενίζοντας έτσι το σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.



Εικόνα 3.8: Διάγραμμα συστήματος κλειστού βρόχου με ελεγκτή PID

Ο παραγωγικός ελεγκτής σχετίζεται με το 'μέλλον' του συστήματος και η σχέση μεταξύ σφάλματος και σήματος ελέγχου είναι:

- $$u(t) = k_d \frac{de(t)}{dt}$$

Στην πράξη ωστόσο, ο διαφορικός όρος συνήθως παραλείπεται. Χρησιμοποιούνται με άλλα λόγια αναλογικοί ολοκληρωτικοί ελεγκτές PI και η λειτουργία τους διέπεται από την σχέση:

- $$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

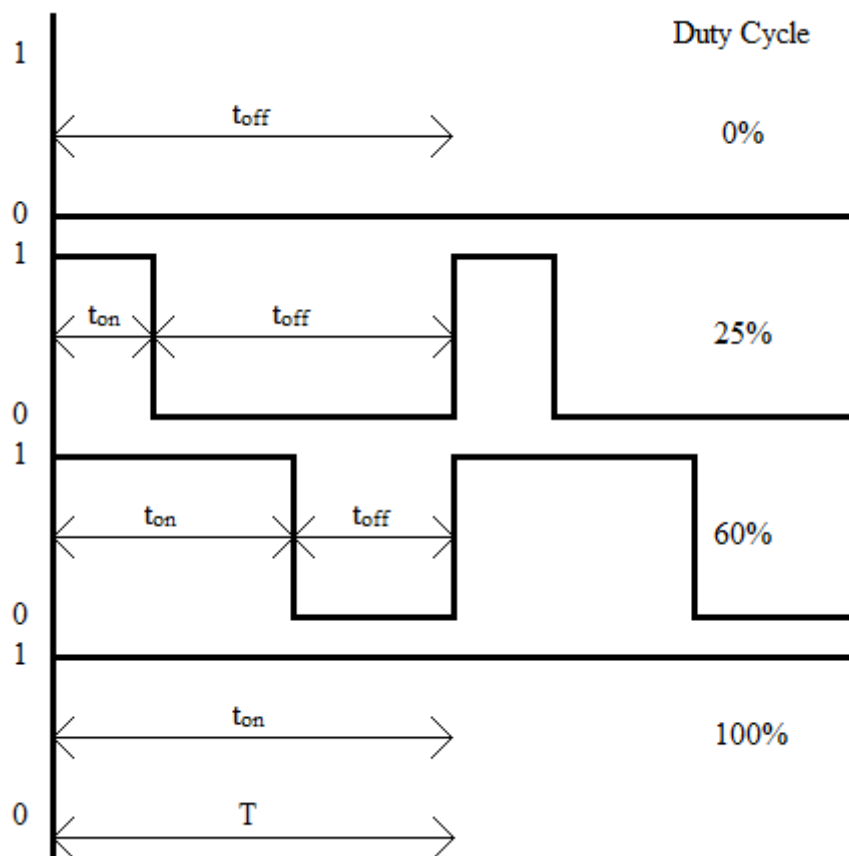
Τέτοιου είδους ελεγκτές PI θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια για τον έλεγχο των διάφορων διεργασιών του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας.

3.4.2 Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών

Ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις στην τιμή της τάση εισόδου ενός μετατροπέα, η μέση τιμή της τάσης εξόδου πρέπει να διατηρείται σε ένα σταθερό προκαθορισμένο επίπεδο. Αυτό επιτυγχάνεται με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM (Pulse Width Modulation), η οποία σκοπό έχει την σταθεροποίηση της μέσης τιμής ενός σήματος εξόδου σε μια προκαθορισμένη τιμή, ελέγχοντας την παράδοση ισχύος στο φορτίο.

Βασική εργασία της τεχνικής PWM είναι η παραγωγή μιας παλμικής κυματομορφής, η οποία καθορίζει την λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα. Πιο συγκεκριμένα, όσο η κυματομορφή παραμένει στο υψηλό επίπεδο για χρονικό διάστημα t_{on} τα διακοπτικά στοιχεία λειτουργούν ως κλειστοί διακόπτες, ενώ όταν η κυματομορφή πέσει στο χαμηλό επίπεδο για χρονικό διάστημα t_{off} τα διακοπτικά στοιχεία λειτουργούν ως ανοιχτοί διακόπτες (εικόνα 3.9). Ο λόγος του χρονικού διαστήματος t_{on} προς την περίοδο T ονομάζεται κύκλος λειτουργίας (duty cycle) και μετριέται συνήθως σε επί τοις εκατό ποσοστό[19]:

- $$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T}$$

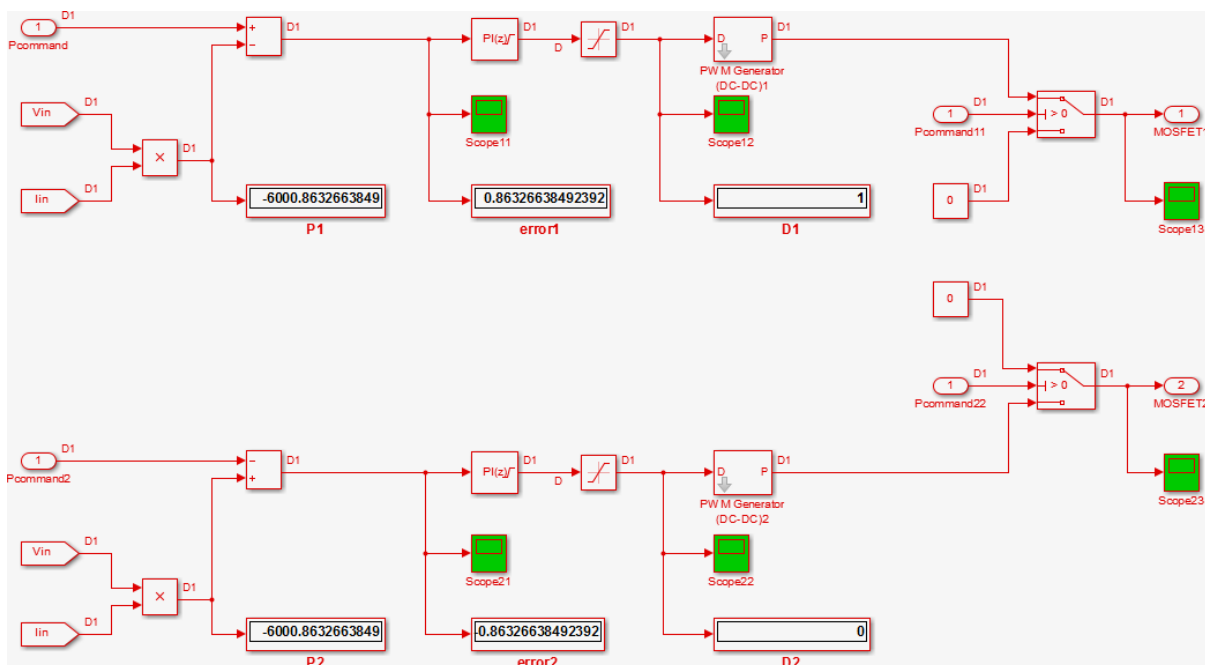


Εικόνα 3.9: Παλμοσειρές οδήγησης ημιαγωγικών στοιχείων

Ο έλεγχος λοιπόν του σχετικού χρόνου αγωγής D , καθορίζει εν τέλει την επιθυμητή μέση τιμή του σήματος εξόδου. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συχνότητα μετάβασης των διακοπτικών στοιχείων είναι πολύ μεγαλύτερη από την συχνότητα του συστήματος, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία του.

3.4.3 Υλοποίηση μπλοκ ελέγχου αμφίδρομου μετατροπέα σε Simulink

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2, το μπλοκ ελέγχου του αμφίδρομου μετατροπέα δέχεται ως είσοδο την επιθυμητή ισχύ λειτουργίας της μπαταρίας. Η ισχύς αυτήν λαμβάνει αρνητικές τιμές για λειτουργία φόρτισης και θετικές τιμές για λειτουργία εκφόρτισης. Ως έξοδος προκύπτουν οι δύο παλμοσειρές οδήγησης των MOSFET (εικόνα 3.6) με την μορφή λογικού 1 για κλειστό διακόπτη και λογικού 0 για κλειστό διακόπτη.



Εικόνα 3.10: Μπλοκ ελέγχου αμφίδρομου μετατροπέα

Στην εικόνα 3.10 φαίνεται το εσωτερικό του μπλοκ ελέγχου του αμφίδρομου μετατροπέα. Αποτελείται από δύο ξεχωριστούς κλάδους, με τον πάνω κλάδο να αφορά τον έλεγχο του MOSFET1 και τον κάτω κλάδο τον έλεγχο του MOSFET2.

Για τον έλεγχο του MOSFET1, αρχικά υπολογίζεται η πραγματική ισχύς της μπαταρίας και συγκρίνεται με την προκαθορισμένη τιμή ώστε να προκύψει το σφάλμα. Το σφάλμα αποτελεί την είσοδο στον ελεγκτή PI, τα κέρδη του οποίου ορίστηκαν μετά από δοκιμές ως εξής:

- $P=0.8$, αναλογικό κέρδος
- $I=0.02$, ολοκληρωτικό κέρδος

Η έξοδος του ελεγκτή PI (σήμα ελέγχου) είναι στην πραγματικότητα ο κύκλος λειτουργίας D (duty cycle) του MOSFET1. Το σήμα D, αφού περάσει από ένα μπλοκ κορεσμού με ανώτερο όριο 1 και κατώτερο 0 (πρέπει $0 \leq D \leq 1$), τροφοδοτεί με τη σειρά του το μπλοκ PWM Generator. Το τελευταίο μπλοκ είναι υπεύθυνο για την δημιουργία της παλμοσειράς οδήγησης του MOSFET1, σύμφωνα με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών, για την οποία έγινε αναφορά στην προηγούμενη υποενότητα. Η παλμοσειρά αυτή θα είναι η τελική μόνο στην περίπτωση εκφόρτισης της μπαταρίας. Σε διαφορετική περίπτωση (φόρτιση) το MOSFET1 δέχεται μόνιμα ως είσοδο λογικό 0 καθώς πρέπει να λειτουργεί σαν ανοιχτός διακόπτης.

Τα ίδια ακριβώς βήματα ακολουθούνται για τον έλεγχο του MOSFET2 στον κάτω κλάδο, με μόνη εξαίρεση το τελευταίο. Στην περίπτωση αυτή, η έξοδος του μπλοκ PWM Generator θα εφαρμοστεί μόνο σε περίπτωση φόρτισης. Διαφορετικά το MOSFET2 λειτουργεί μόνιμα ως ανοιχτός διακόπτης.

3.5 Προσομοίωση εκφόρτισης-φόρτισης με σταθερή ισχύ

Στην ενότητα αυτή θα ελεγχθεί η λειτουργικότητα του αρχικού μοντέλου που αναπτύχθηκε, μέσω προσομοιώσεων. Οι προσομοιώσεις αυτές αφορούν τις λειτουργίες εκφόρτισης και φόρτισης της μπαταρίας με σταθερή ισχύ. Δεν αποτελούν ουσιαστικά μέρος του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας, αλλά περισσότερο ένα μέσο βαθύτερης κατανόησης της λειτουργίας του αμφίδρομου μετατροπέα και του ελέγχου ισχύος.

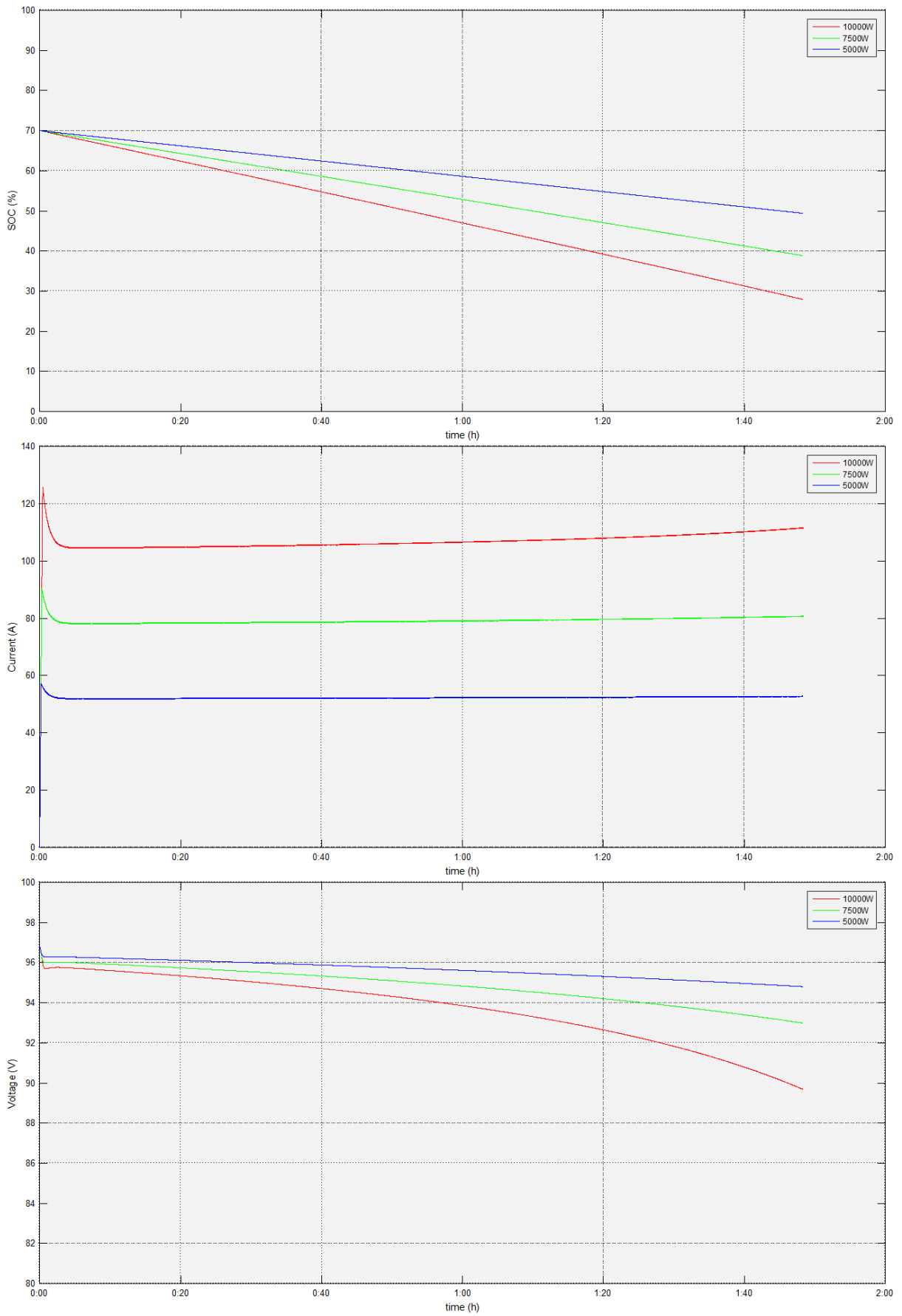
Η περίοδος δειγματοληψίας που θα χρησιμοποιηθεί για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις αλλά και για όλες τις υπόλοιπες στα πλαίσια της εργασίας αυτής είναι:

- $T_s_Power=0.01s$

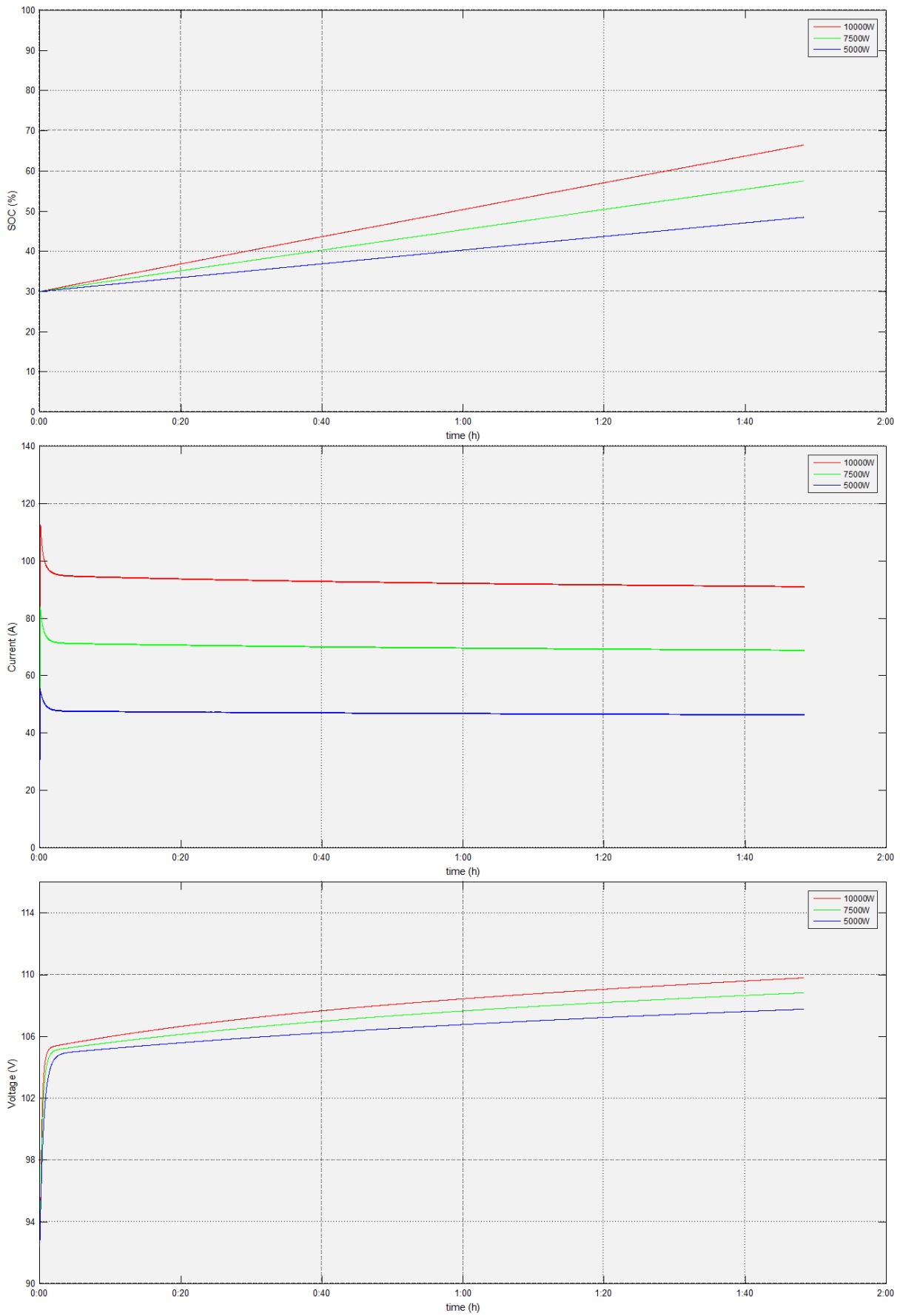
Η μεγάλη περίοδος δειγματοληψίας δίνει την δυνατότητα εξέτασης μεγάλων χρονικών περιόδων λειτουργίας της μπαταρίας, γεγονός που θα φανεί χρήσιμο στις προσομοιώσεις των λειτουργιών του BMS.

Οι πρώτες τρεις προσομοιώσεις αφορούν την λειτουργία εκφόρτισης. Ως αρχική στάθμη φόρτισης SoC ορίστηκε η τιμή 70%, ενώ όσον αφορά την ισχύ, θα εξεταστούν οι τιμές 10000W, 7500W και 5000W.

Οι κυματομορφές της στάθμης φόρτισης, της έντασης ρεύματος και της τάσης της μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο παρουσιάζονται στην εικόνα 3.11, η μία κάτω από την άλλη. Παρατηρούμε ότι η τάση της μπαταρίας μειώνεται όσο ελαττώνεται η στάθμη φόρτισης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σταδιακή αύξηση της έντασης ρεύματος, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η τιμή της ισχύος. Όπως είναι λογικό, ο ρυθμός μεταβολής της στάθμης φόρτισης της μπαταρίας και επομένως και της τάσης αυξάνεται για μεγαλύτερες τιμές της ισχύος.



Εικόνα 3.11: Προσομοίωση εκφόρτισης με σταθερή ισχύ



Εικόνα 3.12: Προσομοίωση φόρτισης με σταθερή ισχύ

Στην εικόνα 3.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αντίστοιχες προσομοιώσεις φόρτισης για τιμές ισχύος -10000W, -7500W και -5000W και αρχικό SoC 30%. Στην περίπτωση αυτήν παρατηρούμε αύξηση της τάσης της μπαταρίας μαζί με το SoC και ταυτόχρονα μείωση της έντασης ρεύματος για να διατηρηθεί σταθερή η ισχύς.

Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι για λειτουργία εκφόρτισης, η ισχύς της μπαταρίας και επομένως η ένταση ρεύματος λαμβάνουν αρνητικές τιμές σύμφωνα με τον τρόπο κατασκευής του μοντέλου στο Simulink. Για οπτικούς λόγους, οι κυματομορφές της έντασης ρεύματος αντιστρέφονται κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

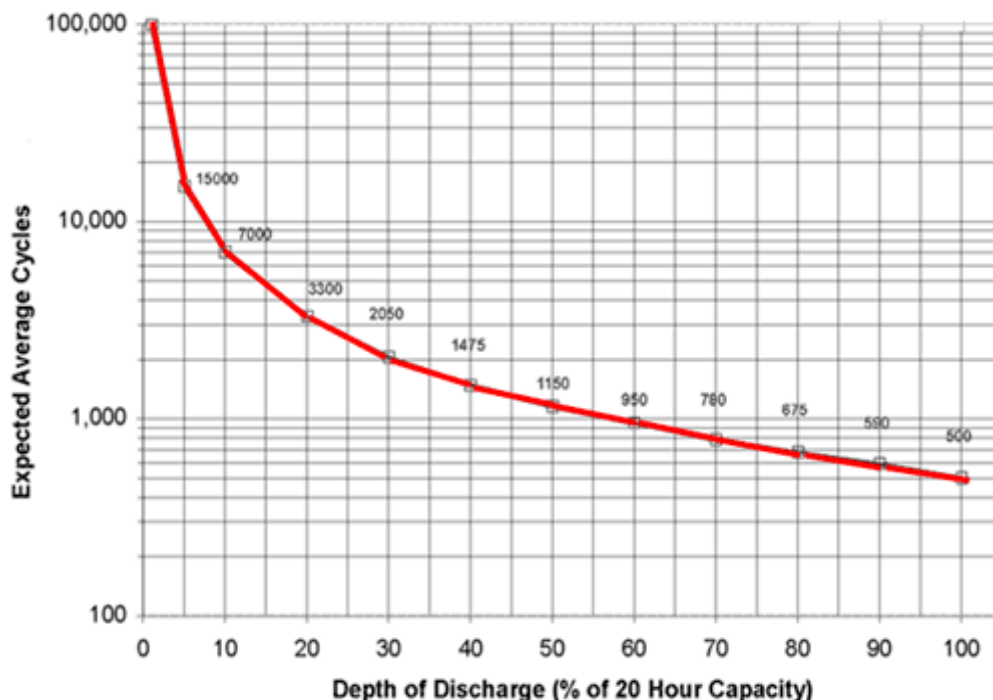
4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ-ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί ουσιαστικά την εισαγωγή στις κύριες λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας. Η πρώτη λειτουργία που θα αναπτυχθεί αφορά τον έλεγχο των λειτουργιών εκφόρτισης και φόρτισης της μπαταρίας.

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που καταπονούν την μπαταρία, μειώνοντας την απόδοσή της και επιταχύνοντας την διαδικασία γήρανσής της είναι οι ακόλουθοι:

- μεγάλα χρονικά διαστήματα σε χαμηλή στάθμη φόρτισης
- μη πλήρεις κύκλοι σε χαμηλή στάθμη φόρτισης
- σπάνιες πλήρεις φορτίσεις
- ακραίες θερμοκρασίες

Εξαιρώντας τις περιβαλλοντικές συνθήκες, ένα κατάλληλα αναπτυγμένο σύστημα διαχείρισης μπαταρίας έχει την δυνατότητα να περιορίσει τους παραπάνω παράγοντες, μειώνοντας τις δυσάρεστες συνέπειες που επιφέρουν στην μπαταρία.[20]



Εικόνα 4.1: Κύκλοι ζωής μπαταρίας συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης

4.1 Έλεγχος λειτουργίας εκφόρτισης μπαταρίας

Κατά την εκφόρτιση των μπαταριών μολύβδου-οξέος η τάση μειώνεται, φτάνοντας τα 1.75V ανά στοιχείο. Στο επίπεδο αυτό η μπαταρία βρίσκεται σε βάθος εκφόρτισης περίπου 95%, ενώ περαιτέρω εκφόρτιση οδηγεί σε πολύ απότομη πτώση της τάσης. Αφαιρώντας το φορτίο μετά την εκφόρτιση, η τάση μιας υγιούς μπαταρίας ανακάμπτει και αυξάνεται στα επίπεδα της ονομαστικής (2V ανά στοιχείο).

Οι περισσότεροι κατασκευαστές μπαταριών μολύβδου-οξέος ωστόσο, προτείνουν εκφόρτιση της μπαταρίας σε βάθος 15%-50%, ενώ για τις μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης, το ανώτατο βάθος ασφαλείας ορίζεται στο 80%. Στην εικόνα 4.1 φαίνεται σε λογαριθμική κλίμακα η σχέση μεταξύ βάθους εκφόρτισης και κύκλων ζωής της μπαταρίας. Εκφόρτιση σε βάθος μεγαλύτερο του 80% επιφέρει δυσάρεστες μη αντιστρέψιμες συνέπειες στα χημικά στοιχεία της μπαταρίας και για τον λόγο αυτόν πρέπει να αποφεύγεται.

Ο έλεγχος της διαδικασίας εκφόρτισης από το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας έγκειται στον ορισμό ενός κατώτατου επιπέδου τάσης, που ονομάζεται τάση αποκοπής. Κατά την εκφόρτιση λοιπόν της μπαταρίας, όταν η τάση μειωθεί στα επίπεδα της τάσης αποκοπής, εμποδίζεται περαιτέρω μείωσή της, διακόπτοντας στην ουσία την λειτουργία της μπαταρίας. Ένα τυπικό διάστημα τιμών για την τάση αποκοπής είναι 1.85V-1.95V ανά στοιχείο. Σύμφωνα λοιπόν με το επιθυμητό βάθος εκφόρτισης, επιλέγεται από τον χρήστη η αντίστοιχη τιμή της τάσης αποκοπής, με την βοήθεια της χαρακτηριστικής τάσης-στάθμης φόρτισης της μπαταρίας.

TYPE	CAPACITY ^A Amp-Hours (AH)						
	5-Hr Rate	10-Hr Rate	20-Hr Rate	48-Hr Rate	72-Hr Rate	100-Hr Rate	240-Hr Rate
INDUSTRIAL LINE - DEEP-CYCLE FLOODED BATTERIES							
IND9-6V	365	414	464	545	580	601	604
IND13-6V	545	616	695	816	868	902	904
IND17-6V	727	820	925	1085	1156	1202	1205
IND23-4V	1000	1129	1270	1490	1587	1654	1659
IND27-2V	1215	1368	1520	1784	1899	1954	1960
IND29-4V	1274	1448	1618	1899	2022	2105	2111
IND33-2V	1455	1682	1849	2170	2311	2405	2411

Εικόνα 4.2: Χωρητικότητα μπαταρίας συναρτήσει του ρυθμού εκφόρτισης

Μεγάλη σημασία πρέπει επίσης να δοθεί στην ένταση του ρεύματος εκφόρτισης, καθώς όπως αναφέρθηκε, η χωρητικότητα της μπαταρίας εξαρτάται από τον ρυθμό εκφόρτισης. Κατά σύμβαση, η χωρητικότητα των μπαταριών μολύβδου-οξέος μετράται σύμφωνα με τον κανόνα εκφόρτισης 20 ωρών, δηλαδή ρυθμό εκφόρτισης 0.05C. Για μεγαλύτερες μπαταρίες χρησιμοποιείται πολλές φορές ρυθμός εκφόρτισης 0.1C ή 0.2C. Όσο αυξάνεται ο ρυθμός αυτός, τόσο μειώνεται ο αριθμός των αμπερωρών που μπορεί στην πράξη να αποδώσει η μπαταρία. Στην εικόνα 4.2 φαίνονται οι τιμές της χωρητικότητας, ανάλογα με τις ώρες εκφόρτισης κατά τον έλεγχο, για διάφορους τύπους βαθιάς εκφόρτισης μπαταριών μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη, από την κατασκευάστρια εταιρεία Trojan.[21]

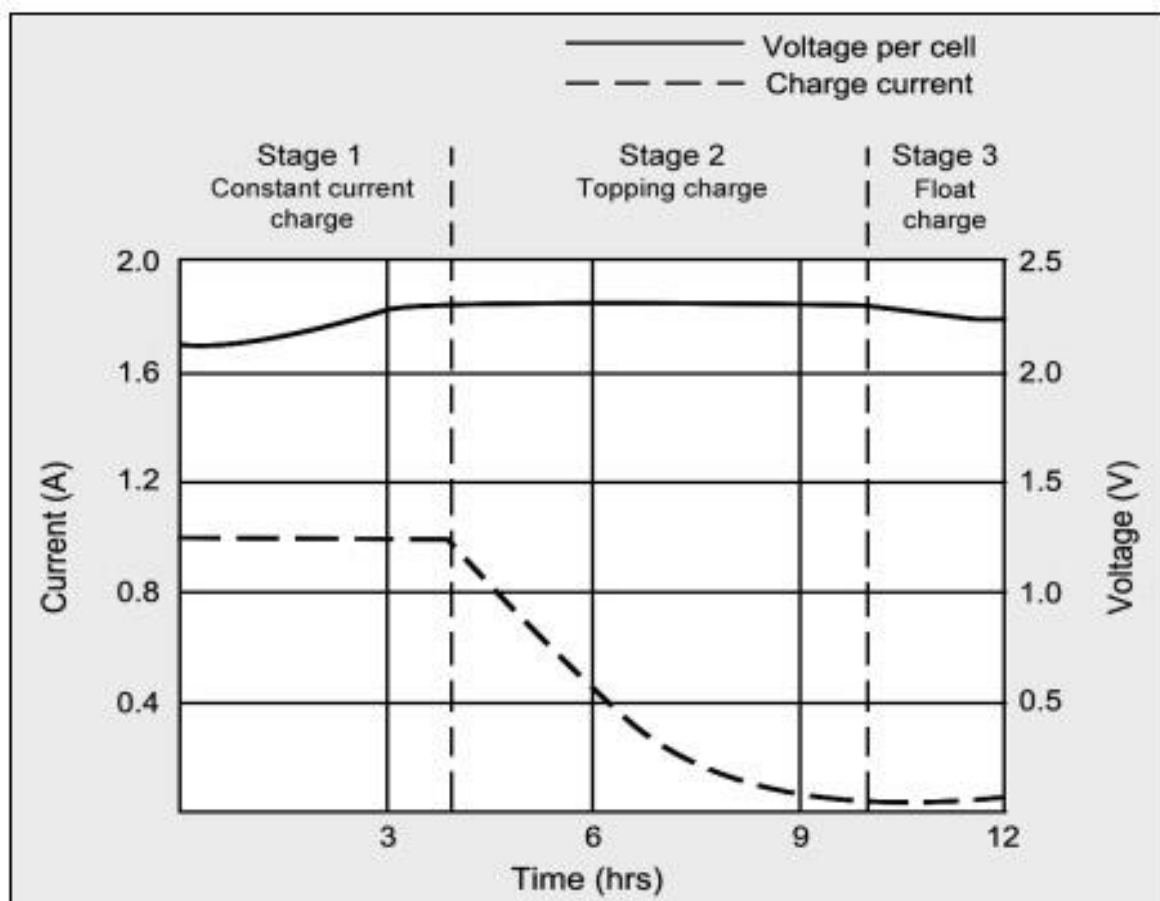
4.2 Έλεγχος λειτουργίας φόρτισης μπαταρίας

Σε αντίθεση με τον έλεγχο εκφόρτισης, ο έλεγχος της λειτουργίας φόρτισης μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη αποτελεί μια πιο σύνθετη διαδικασία, που πραγματοποιείται σε αρκετά στάδια και λαμβάνει υπόψη πολλές παραμέτρους. Πριν περάσουμε ωστόσο στις λεπτομέρειες αυτής της διαδικασίας, πρέπει να σημειωθεί ότι η λειτουργία φόρτισης είναι σημαντικό να ενεργοποιείται όσο το δυνατόν πιο γρήγορα μετά την χρήση της μπαταρίας. Η αποθήκευση της μπαταρίας σε κατάσταση χαμηλής στάθμης φόρτισης, για μεγάλο χρονικό διάστημα, έχει αρνητικές συνέπειες για την υγεία της, λόγω ενός φαινομένου, το οποίο ονομάζεται σούλφωση ή θειίκωση (sulfation).

Η σούλφωση είναι ένα φαινόμενο που προκαλείται όταν η μπαταρία μένει αφόρτιστη για παρατεταμένες χρονικές περιόδους. Κατά την διαδικασία εκφόρτισης, ο μολύβδος των ηλεκτροδίων της μπαταρίας μετατρέπεται σε κρυστάλλους θειικού μολύβδου. Η παραπάνω διαδικασία αντιστρέφεται κατά την διαδικασία της φόρτισης. Όταν ωστόσο η μπαταρία μένει για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση χαμηλής φόρτισης ή στην περίπτωση που δεν φορτίζεται πλήρως, οι κρύσταλλοι θειικού μολύβδου παραμένουν στις πλάκες και σταδιακά σκληραίνουν. Στην κατάσταση αυτήν, λειτουργούν ως ένα μονωτικό στρώμα, εμποδίζοντας την αποδοχή φόρτισης από την μπαταρία και οδηγώντας στην μείωση της χωρητικότητάς της.[22]

Σε πρώτη φάση λοιπόν, το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας πρέπει να μεριμνά για την έγκαιρη φόρτιση της μπαταρίας μετά από κάθε χρήση.

Η φόρτιση μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος πραγματοποιείται σε τρία στάδια, σύμφωνα με την μέθοδο σταθερού ρεύματος - σταθερής τάσης CC-CV (Constant Current - Constant Voltage). Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3[11], ρεύμα σταθερής έντασης ανεβάζει την τάση ακροδεκτών της μπαταρίας μέχρι αυτήν να φτάσει την μέγιστη τιμή της. Τότε η ένταση του ρεύματος αρχίζει να μειώνεται λόγω κορεσμού. Αφού η μπαταρία φορτιστεί πλήρως, το επίπεδο της σταθερής τάσης μειώνεται και ρεύμα πολύ μικρής έντασης φορτίζει την μπαταρία αντισταθμίζοντας τις απώλειες αυτοεκφόρτισης.



Stage 1: Voltage rises at constant current to V-peak.

Stage 2: Current drops; full charge is reached when current levels off

Stage 3: Voltage is lowered to float charge level

Εικόνα 4.3: Φόρτιση μπαταρίας μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη

4.2.1 Πρώτο στάδιο φόρτισης (bulk charge)

Το πρώτο στάδιο φόρτισης ονομάζεται bulk charge ή constant current charge (κύρια φόρτιση ή φόρτιση με σταθερό ρεύμα). Η διάρκειά του είναι 5-8 ώρες και στο διάστημα αυτό η μπαταρία φορτίζεται κατά 70% περίπου.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3, στο στάδιο αυτό η μπαταρία φορτίζεται με ένα σταθερό ρεύμα προκαθορισμένης έντασης. Ο ρυθμός φόρτισης κυμαίνεται από 0.1C μέχρι 0.2C. Αν θεωρήσουμε για παράδειγμα μια μπαταρία χωρητικότητας 100Ah, τότε η ένταση του ρεύματος φόρτισης κυμαίνεται από 10A μέχρι 20A. Καθώς η μπαταρία φορτίζεται, η τάση ακροδεκτών της αυξάνεται, μέχρις ότου φτάσει στην μέγιστη τιμή της V_{max} . Το γεγονός αυτό πυροδοτεί και την μετάβαση από το πρώτο στο δεύτερο στάδιο φόρτισης.

Η επιλογή της μέγιστης τάσης V_{max} αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία ύψιστης σημασίας, την οποία οι ειδικοί συχνά αποκαλούν “χορό στην κεφαλή μια βελόνας”. Αυτό συμβαίνει διότι

αυξομείωση του συγκεκριμένου μεγέθους σημαίνει και ταυτόχρονη αυξομείωση των επιδράσεων δύο διαμετρικά αντίθετων προβλημάτων: της υπερφόρτισης και της μη επαρκούς φόρτισης της μπαταρίας.

Πιο συγκεκριμένα, θέτοντας τιμές μέγιστης τάσης 2.30V-2.35V ανά στοιχείο, εξασφαλίζεται η μέγιστη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, καθώς αυτήν δεν καταπονείται και δεν υπερθεμαίνεται. Από την άλλη πλευρά, η διαδικασία της φόρτισης καθίσταται αργή, ενώ η μπαταρία υπόκειται σε σούλφωση και στρωματοποίηση οξέος (stratification), με αποτέλεσμα την μείωση της χωρητικότητάς της.

Η στρωματοποίηση είναι ένα φαινόμενο που αφορά τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη και οφείλεται στην μη επαρκή φόρτιση. Το βαρύτερο θεικό οξύ βυθίζεται στον πάτο της θήκης της μπαταρίας, αφήνοντας σχεδόν καθαρό νερό στα ανώτερα επίπεδα. Συνεπώς, μόνο το κάτω μέρος των πλακών μολύβδου είναι διαθέσιμο προς φόρτιση γεγονός που σημαίνει μείωση της χωρητικότητας.[22]

Τιμές μέγιστης τάσης 2.40V-2.45V ανά στοιχείο διασφαλίζουν την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας, αναστέλλοντας την μείωση της χωρητικότητας λόγω σούλφωσης και στρωματοποίησης. Στον αντίποδα όμως η υπερφόρτιση προκαλεί διάβρωση των πλακών και αυξημένη παραγωγή αερίων.

Η διάβρωση των πλακών προκαλεί μόνιμες βλάβες στην μπαταρία, μειώνοντας την απόδοσή της και την διάρκεια ζωής της. Η παραγωγή αερίων (gassing) οφείλεται στην διάσπαση του νερού του ηλεκτρολύτη σε υδρογόνο και οξυγόνο. Η διαδικασία αυτήν είναι φυσιολογική και εμποδίζει την στρωματοποίηση οξέος. Υπερβολική παραγωγή αερίων ωστόσο είναι επικίνδυνη καθώς τα αέρια αυτά είναι εύφλεκτα. Παράλληλα η απομάκρυνσή τους από το εσωτερικό της μπαταρίας μέσω των βαλβίδων εξαερισμού, σημαίνει μείωση της ποσότητας του ηλεκτρολύτη που παραμένει στην μπαταρία.

Η παραπάνω διαδικασία γίνεται ακόμα πιο πολύπλοκη αν συνυπολογίσουμε το γεγονός ότι η τιμή της μέγιστης τάσης επηρεάζεται από την θερμοκρασία. Σε υψηλές θερμοκρασίες απαιτείται χαμηλότερη τιμή τάσης, ενώ σε χαμηλές θερμοκρασίες υψηλότερη τιμή τάσης. Σύμφωνα με τα παραπάνω ο συντελεστής διόρθωσης της τάσης ανάλογα με την θερμοκρασία είναι $-3\text{mV}/^\circ\text{C}$ για μπαταρίες μολύβδου-οξέος, με θερμοκρασία αναφοράς 25°C .

Σε γενικές γραμμές λοιπόν, η τιμή της μέγιστης τάσης κυμαίνεται από 2.30V μέχρι 2.45V, ενώ λεπτομερείς τιμές παρέχονται από τους κατασκευαστές.

Συνοψίζοντας, κατά το πρώτο στάδιο η μπαταρία φορτίζεται με:

- σταθερής έντασης ρεύμα (0.1C-0.2C)
- αυξανόμενη τάση ακροδεκτών μέχρι την μέγιστη τιμή V_{max} (2.30V-2.45V ανά στοιχείο)

4.2.2 Δεύτερο στάδιο φόρτισης (absorption charge)

Το δεύτερο στάδιο φόρτισης ονομάζεται absorption charge ή topping charge ή constant voltage charge (φόρτιση απορρόφησης ή φόρτιση με σταθερή τάση). Διαρκεί 7-10 ώρες και η μπαταρία δέχεται κατά το διάστημα αυτό το υπολειπόμενο 30% της φόρτισης.

Στο στάδιο αυτό η τάση της μπαταρίας διατηρείται σταθερή, στο επίπεδο της μέγιστης τάσης V_{max} , ενώ η ένταση του ρεύματος μειώνεται λόγω κορεσμού. Όταν η τιμή της έντασης ρεύματος μειωθεί στο 3-5% των αμπερών της μπαταρίας, τότε αυτήν θεωρείται πλήρως φορτισμένη και ενεργοποιείται το τρίτο στάδιο φόρτισης. Με την πάροδο του χρόνου ωστόσο η μπαταρία ενδεχομένως να χάσει την δυνατότητα επίτευξης τόσο χαμηλής έντασης ρεύματος. Εναλλακτικοί τρόποι μετάβασης από το δεύτερο στο τρίτο στάδιο φόρτισης παρέχονται από μια αξιόπιστη μέτρηση της στάθμης φόρτισης SoC ή από χρονομέτρηση της διαδικασίας μετά από δοκιμές. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει η φορτισμένη μπαταρία να παραμείνει στο στάδιο σταθερής τάσης για πάνω από 48 ώρες, καθώς φόρτιση πέρα από τα προκαθορισμένα όρια μετατρέπει την πλεονάζουσα ενέργεια σε θερμότητα (gassing).

Το στάδιο της φόρτισης απορρόφησης είναι ιδιαίτερα σημαντικό ώστε να διατηρηθεί η απόδοση της μπαταρίας σε υψηλά επίπεδα και θεωρείται από τους ειδικούς “σαν ξεκούραση μετά από ένα καλό γεύμα”. Αν αγνοείται συνεχώς, η μπαταρία εν τέλει χάνει την δυνατότητα αποδοχής πλήρους φόρτισης, λόγω του φαινομένου της σούλφωσης.

Συνοψίζοντας, κατά το δεύτερο στάδιο η μπαταρία φορτίζεται με:

- σταθερή τάση V_{max}
- ρεύμα φθίνουσας έντασης, από το προκαθορισμένο επίπεδο που είχε επιλεγεί στο στάδιο σταθερού ρεύματος, μέχρι το 3-5% των αμπερών της μπαταρίας

4.2.3 Τρίτο στάδιο φόρτισης (float charge)

Το τρίτο στάδιο φόρτισης ονομάζεται (float charge) και αρχικοποιείται μόλις η μπαταρία φορτιστεί πλήρως. Ουσιαστικά δεν αποτελεί στάδιο φόρτισης, αλλά διατήρησης της μπαταρίας σε κατάσταση πλήρους φόρτισης.

Στο στάδιο αυτό, το επίπεδο της τάσης μειώνεται από V_{max} σε V_{float} , όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3. Το επίπεδο τιμών για την τάση V_{float} κυμαίνεται από 2.20V μέχρι 2.27V ανά στοιχείο. Λεπτομερείς τιμές παρέχονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή, με τις απαραίτητες διορθώσεις ανάλογα με τις διακυμάνσεις τις θερμοκρασίας. Η τιμή της έντασης ρεύματος φόρτισης στο στάδιο αυτό είναι πολύ μικρή αντισταθμίζοντας τις απώλειες της μπαταρίας λόγω αυτοεκφόρτισης. Η μπαταρία μπορεί να παραμείνει στο στάδιο float charge για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς κινδύνους[2].

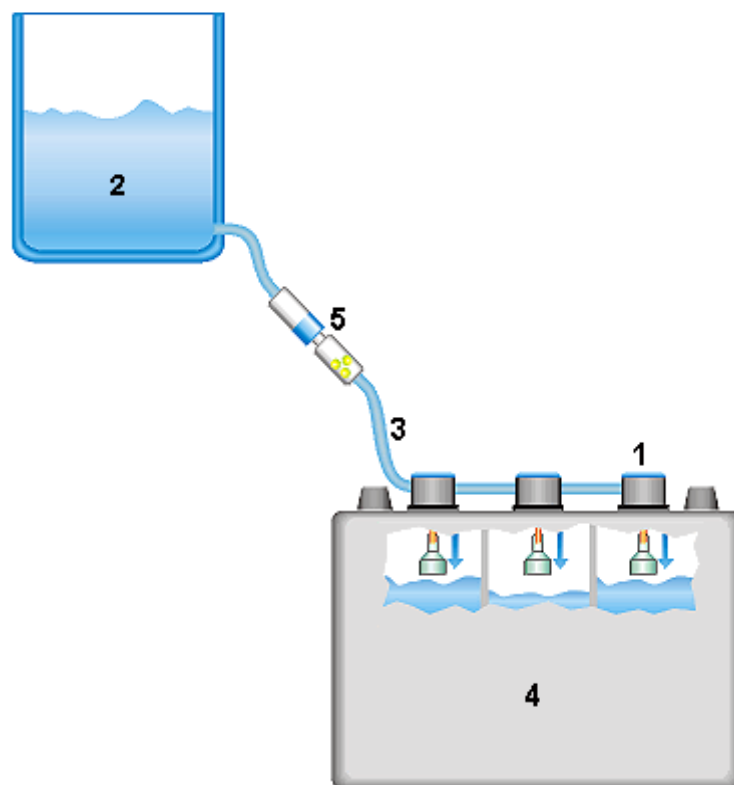
Συνοψίζοντας, κατά το τρίτο στάδιο η μπαταρία φορτίζεται με:

- σταθερή τάση V_{float} (2.20V-2.27V ανά στοιχείο)
- ρεύμα πολύ μικρής έντασης, που αντισταθμίζει τις απώλειες αυτοεκφόρτισης

4.2.4 Αναπλήρωση υγρών ηλεκτρολύτη

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κατά την διαδικασία της φόρτισης, το νερό του ηλεκτρολύτη διασπάται σε αέριο υδρογόνο και οξυγόνο. Μειώνεται με αυτόν τον τρόπο η ποσότητα ηλεκτρολύτη στο εσωτερικό της μπαταρίας, με αποτέλεσμα το πάνω μέρος των πλακών να εκτίθεται. Οι εκτεθειμένες πλάκες υπόκεινται σε μη αντιστρέψιμη οξείδωση, γεγονός που μειώνει την χωρητικότητα και την απόδοση της μπαταρίας.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα λύνεται με την αναπλήρωση απιονισμένου νερού στον ηλεκτρολύτη, διασφαλίζοντας το απαραίτητο ύψος στάθμης, ώστε οι πλάκες να καλύπτονται πλήρως. Η προσθήκη ηλεκτρολύτη αντί σκέτου νερού δεν αποτελεί ενδεικτική λύση, καθώς οδηγεί σε διαταραχές της σχετικής βαρύτητας αυξάνοντας την διάβρωση των πλακών. Η συχνότητα αναπλήρωσης εξαρτάται από την χρήση της μπαταρίας, την μέθοδο φόρτισης και τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Ένα ενδεικτικό διάστημα ελέγχου για μια καινούρια μπαταρία είναι κάθε δύο εβδομάδες. Η αναπλήρωση απιονισμένου νερού γίνεται μόνο μετά το τέλος της διαδικασίας φόρτισης. Αναπλήρωση πριν την φόρτιση ενδεχομένως να οδηγήσει σε υπερχειλίση του ηλεκτρολύτη.



Εικόνα 4.4: Σύστημα αναπλήρωσης απιονισμένου νερού ηλεκτρολύτη

Η διαδικασία αναπλήρωσης υγρών αποτελεί μια πολύ σημαντική εργασία για την υγεία της μπαταρίας. Παράλληλα αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου μπαταρίας, καθώς ως χειρονακτική εργασία, αυξάνει την αναγκαιότητα συντήρησης από τον χρήστη.

Το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας θα μπορούσε να αυτοματοποιήσει την παραπάνω διαδικασία, με την χρήση ενός συστήματος αναπλήρωσης. Ένα τυπικό σύστημα αναπλήρωσης φαίνεται στην εικόνα 4.4[23], όπου διακρίνονται τα εξής μέρη:

1. βαλβίδες αναπλήρωσης
2. παροχή απιονισμένου νερού
3. σωλήνας παροχής
4. μπαταρία
5. έλεγχος ροής

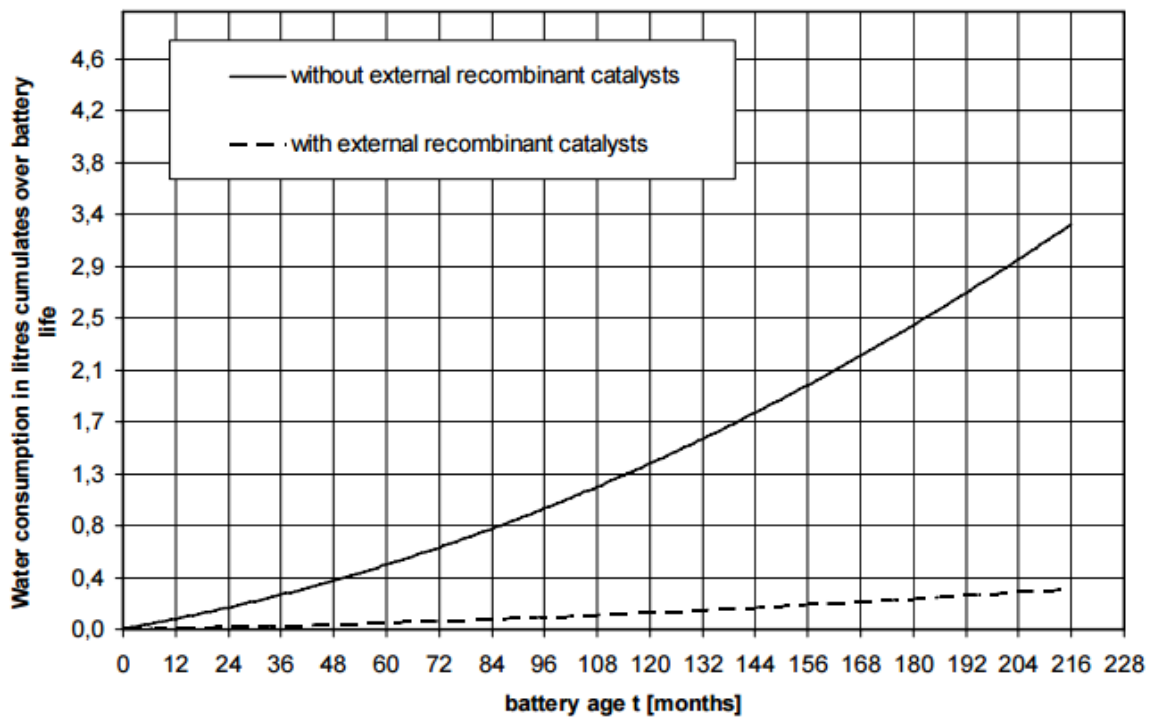
Ελέγχοντας λοιπόν την στάθμη του ηλεκτρολύτη μετά την φόρτιση, το αυτοματοποιημένο αυτό σύστημα έχει την δυνατότητα να αναπληρώνει την απαραίτητη κάθε φορά ποσότητα απιονισμένου νερού, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη διευθέτησης του συγκεκριμένου προβλήματος από τον χρήστη[2].

Ένας άλλος τρόπος μείωσης των απωλειών νερού από τον ηλεκτρολύτη και ταυτόχρονα μείωσης των εκπομπών υδρογόνου, είναι η χρήση εξωτερικών καταλυτών ανασύστασης του νερού. Συνοπτικά, ο καταλύτης αυτός έχει την δυνατότητα συλλογής του κύριου όγκου εκπομπών υδρογόνου και οξυγόνου μέσω της βαλβίδας εξαερισμού, και τον ανασυνδυασμό τους σε νερό που επιστρέφει στην μπαταρία.



Εικόνα 4.5: Σύστημα καταλύτη ανασυνδυασμού νερού

Ένα τέτοιο σύστημα, που θα μπορούσε να αποτελέσει ένα επιπλέον συστατικό κομμάτι του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας φαίνεται στην εικόνα 4.5. Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται η απαιτούμενη κατανάλωση νερού για αναπλήρωση του ηλεκτρολύτη χωρίς την χρήση εξωτερικού καταλύτη με συνεχόμενη γραμμή και με την χρήση καταλύτη με διακεκομμένη γραμμή.[24]



Εικόνα 4.6: Επίδραση χρήσης καταλύτη στην κατανάλωση νερού

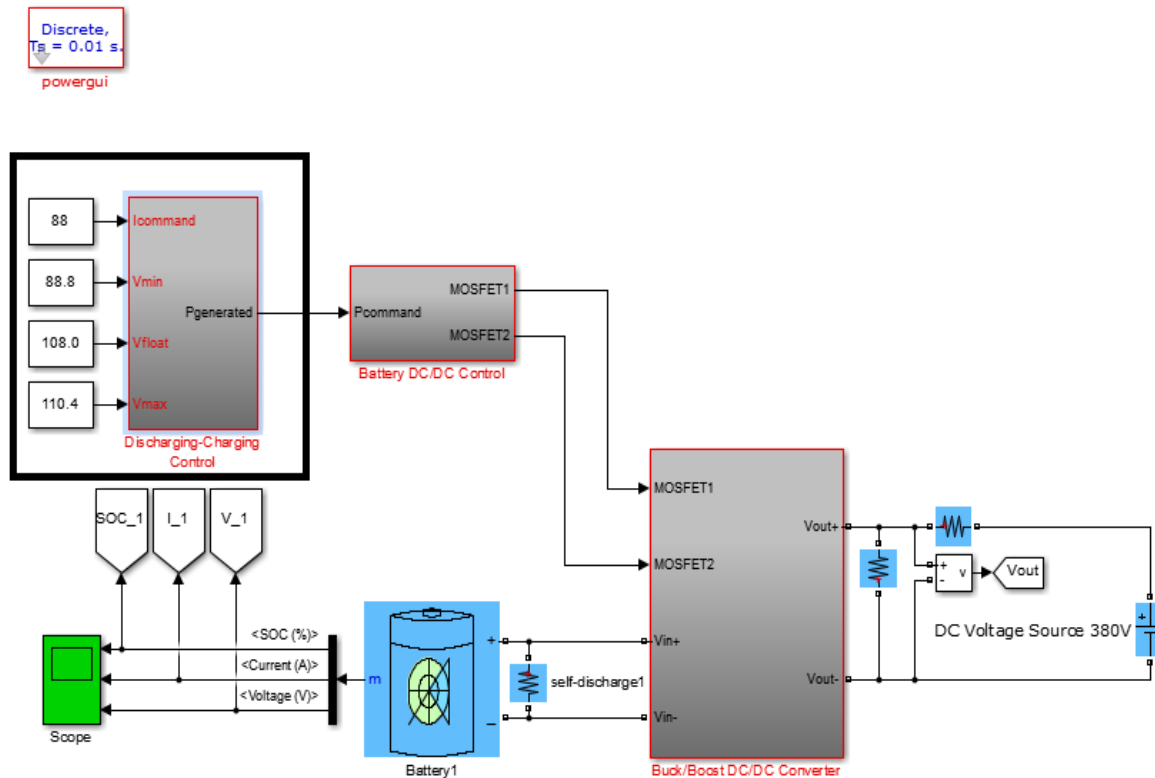
4.3 Υλοποίηση ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης σε Simulink

Στην ενότητα αυτήν αναπτύσσεται το μπλοκ ελέγχου των λειτουργιών εκφόρτισης και φόρτισης της μπαταρίας, σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε προηγουμένως.

Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζεται το ανανεωμένο μοντέλο εργασίας σε Simulink με την προσθήκη του τμήματος ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης της μπαταρίας. Όπως φαίνεται, το μπλοκ ελέγχου δέχεται τέσσερεις εισόδους:

- σταθερό ρεύμα I_{command} (θετικό για εκφόρτιση και αρνητικό για φόρτιση)
- ελάχιστη τάση μπαταρίας V_{min}
- τάση μπαταρίας V_{float} (για το τρίτο στάδιο φόρτισης float charge)
- μέγιστη τάση μπαταρίας V_{max}

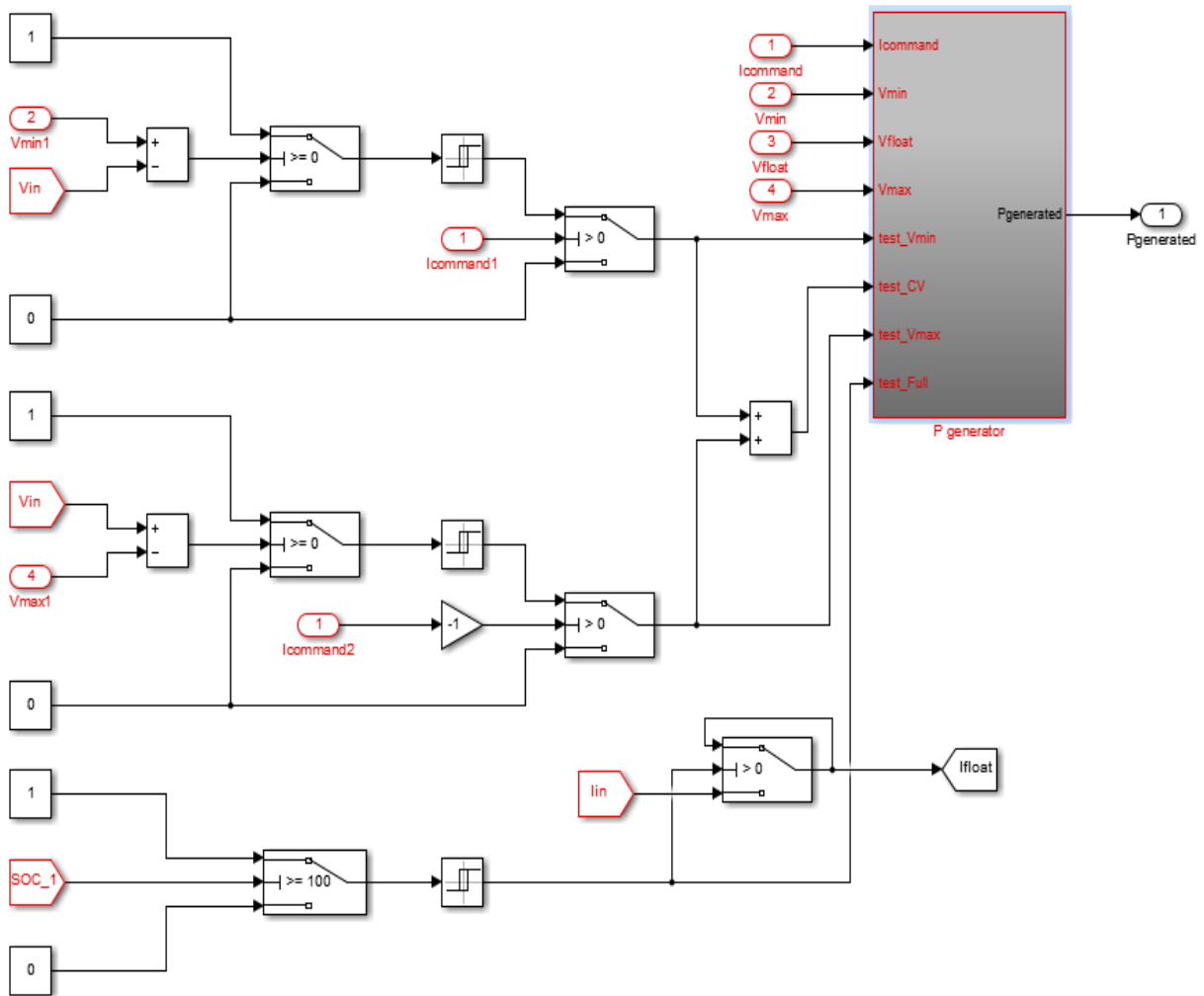
Αποτέλεσμα του ελέγχου αποτελεί ο υπολογισμός της επιθυμητής τιμής ισχύος της μπαταρίας $P_{generated}$. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον έλεγχο του αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC, όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3.



Εικόνα 4.7: Μπλοκ ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης σε Simulink 1/3

Στην εικόνα 4.8 παρουσιάζεται το εσωτερικό του μπλοκ ελέγχου των λειτουργιών εκφόρτισης και φόρτισης της μπαταρίας. Στο κομμάτι αυτό προσθέτονται απλώς ορισμένες βοηθητικές δυαδικές μεταβλητές, οι οποίες χρησιμεύουν στον προσδιορισμό του εκάστοτε σταδίου εκφόρτισης ή φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα:

- η μεταβλητή $test_V_{min}$ λαμβάνει την τιμή 1, μόνο σε λειτουργία εκφόρτισης και όταν η τάση της μπαταρίας φτάσει στο ελάχιστο επίπεδο V_{min} .
- η μεταβλητή $test_V_{max}$ λαμβάνει την τιμή 1, μόνο σε λειτουργία φόρτισης και όταν η τάση της μπαταρίας φτάσει στο μέγιστο επίπεδο V_{max} .
- η μεταβλητή $test_CV$ λαμβάνει την τιμή 1 εφόσον ικανοποιείται μία από τις παραπάνω συνθήκες και σηματοδοτεί την μετάβαση από λειτουργία σταθερού ρεύματος σε λειτουργία σταθερής τάσης.
- η μεταβλητή $test_Full$ λαμβάνει την τιμή 1 όταν η μπαταρία φορτιστεί πλήρως. Η συνθήκη αυτήν ελέγχεται σύμφωνα με τον ενσωματωμένο αλγόριθμο υπολογισμού SoC που παρέχει το μοντέλο μπαταρίας και όχι με την πτώση της έντασης ρεύματος στο 3-5% των αμπερών, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα.



Εικόνα 4.8: Μπλοκ ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης σε Simulink 2/3

Τέλος στην εικόνα 4.9 παρουσιάζεται το μπλοκ ‘P generator’, το οποίο αποτελεί το βασικό τμήμα ελέγχου και δίνει σαν αποτέλεσμα την επιθυμητή ισχύ λειτουργίας της μπαταρίας. Ο έλεγχος αφορά την λειτουργία σταθερής τάσης και υλοποιείται με την χρήση αναλογικών-ολοκληρωτικών ελεγκτών, οι οποίοι παράγουν ως σήμα ελέγχου το επιθυμητό ρεύμα λειτουργίας της μπαταρίας.

Ο πρώτος ελεγκτής (κίτρινο φόντο) αφορά την λειτουργία εκφόρτισης. Το σφάλμα εισόδου διατηρείται μηδενικό μέχρις ότου η τάση της μπαταρίας να πέσει στην ελάχιστη τιμή V_{min} ($test_V_{min}=1$). Από εκείνη την χρονική στιγμή και μετά ο ελεγκτής διατηρεί την τάση σταθερή στην ελάχιστη τιμή μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος. Μετά από δοκιμές τα κέρδη του ελεγκτή επιλέχθηκαν ως εξής:

- $P=10$ αναλογικό κέρδος
- $I=19.999$ ολοκληρωτικό κέρδος
- $I_o=I_{command}$, αρχικοποίηση ολοκληρωτή (σταθερό ρεύμα εκφόρτισης που έχει επιλεχθεί)

Ο δεύτερος ελεγκτής (πράσινο φόντο) αφορά την λειτουργία float charge. Το σφάλμα εισόδου διατηρείται μηδενικό μέχρις ότου η μπαταρία να φορτιστεί πλήρως ($test_Full=1$). Από εκείνη την χρονική στιγμή και μετά ο ελεγκτής διατηρεί την τάση σταθερή στην τιμή V_{float} μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος. Μετά από δοκιμές τα κέρδη του ελεγκτή επιλέχθηκαν ως εξής:

- $P=10$ αναλογικό κέρδος
- $I=0.1$ ολοκληρωτικό κέρδος
- $I_0=I_{float}$, αρχικοποίηση ολοκληρωτή (ένταση ρεύματος κατά την στιγμή που επιτυγχάνεται πλήρης φόρτιση $SoC=100\%$)

Ο τρίτος και τελευταίος ελεγκτής (γαλάζιο φόντο) αφορά την λειτουργία φόρτισης απορρόφησης (absorption charge). Το σφάλμα εισόδου διατηρείται μηδενικό μέχρις ότου η τάση της μπαταρίας να ανέλθει στην μέγιστη τιμή V_{max} ($test_V_{max}=1$). Από εκείνη την χρονική στιγμή και μετά ο ελεγκτής διατηρεί την τάση σταθερή στην μέγιστη τιμή μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος. Μετά από δοκιμές τα κέρδη του ελεγκτή επιλέχθηκαν ως εξής:

- $P=10$ αναλογικό κέρδος
- $I=5.825$ ολοκληρωτικό κέρδος
- $I_0=I_{command}$, αρχικοποίηση ολοκληρωτή (σταθερό ρεύμα φόρτισης που έχει επιλεγθεί)

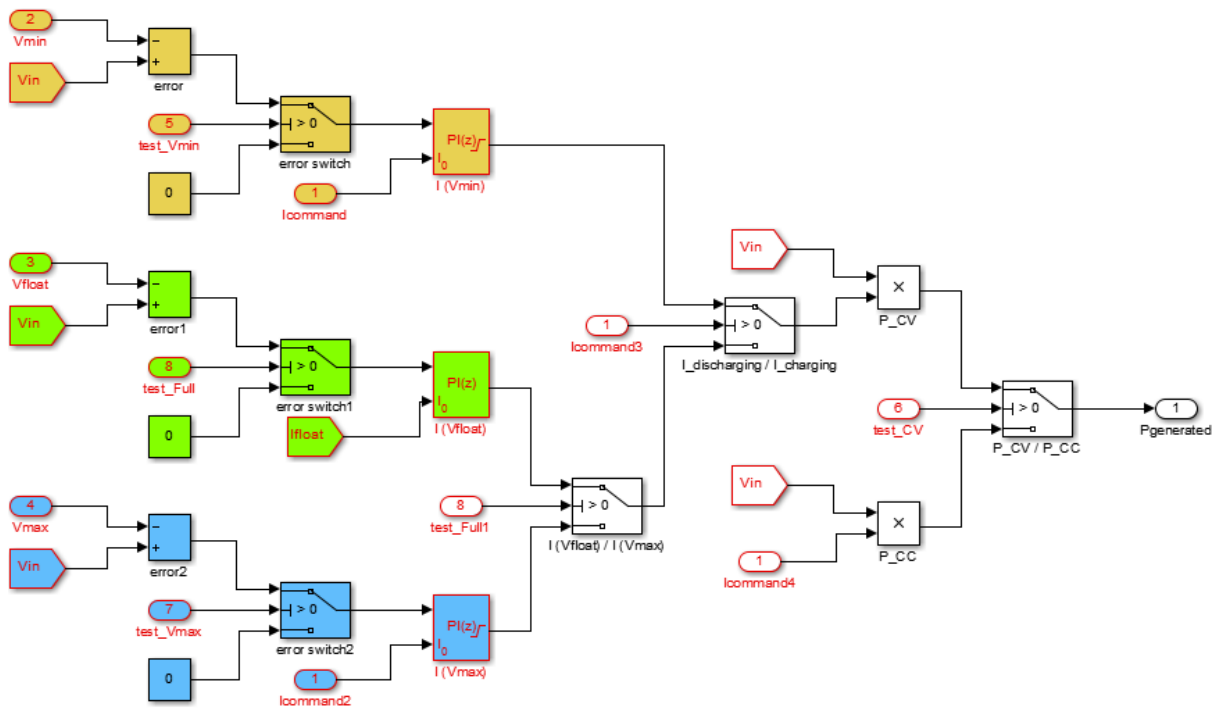
Το τελικό σήμα ελέγχου επιλέγεται σύμφωνα με τα παρακάτω:

- αν βρισκόμαστε σε λειτουργία εκφόρτισης ($I_{command}<0$) επιλέγεται το σήμα ελέγχου του πρώτου PI ελεγκτή ενώ αν βρισκόμαστε σε λειτουργία εκφόρτισης ($I_{command}>0$) επιλέγεται το σήμα ελέγχου του δεύτερου ή του τρίτου PI ελεγκτή
- για λειτουργία φόρτισης αν έχει σηματοδοτηθεί η πλήρης φόρτιση της μπαταρίας ($test_Full=1$) επιλέγεται το σήμα ελέγχου του δεύτερου PI ελεγκτή ενώ αν όχι ($test_Full=0$) επιλέγεται το σήμα ελέγχου του τρίτου PI ελεγκτή

Τέλος η επιθυμητή ισχύς λειτουργίας $P_{generated}$ της μπαταρίας επιλέγεται ως εξής:

- αν βρισκόμαστε σε λειτουργία σταθερής τάσης ($test_CV=1$), η τάση δηλαδή της μπαταρίας έχει φτάσει την ελάχιστη τιμή για εκφόρτιση ή την μέγιστη για φόρτιση, η ισχύς υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την τάση της μπαταρίας V_{in} με την ένταση του ρεύματος, που προκύπτει ως σήμα ελέγχου κάποιου ελεγκτή PI, σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση
- αν βρισκόμαστε σε λειτουργία σταθερού ρεύματος ($test_CV=0$), στο πρώτο δηλαδή στάδιο φόρτισης (bulk charge) ή πριν η τάση φτάσει την ελάχιστη τιμή σε λειτουργία εκφόρτισης, η ισχύς υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την τάση της μπαταρίας V_{in} με την προκαθορισμένη σταθερή ένταση ρεύματος $I_{command}$

Η τιμή αυτή της ισχύος λειτουργεί σαν είσοδος $P_{command}$ στο μπλοκ ελέγχου του αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC.



Εικόνα 4.9: Μπλοκ ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης σε Simulink 3/3

4.4 Προσομοιώσεις λειτουργιών εκφόρτισης-φόρτισης

Στην ενότητα αυτήν προσομοιώνονται οι λειτουργίες εκφόρτισης-φόρτισης της μπαταρίας σε περιβάλλον Simulink. Σκοπός των προσομοιώσεων αυτών είναι η βαθύτερη κατανόηση και η δοκιμή στην πράξη του τμήματος ελέγχου που υλοποιήθηκε στην ενότητα 4.3.

4.4.1 Προσομοίωση εκφόρτισης μπαταρίας

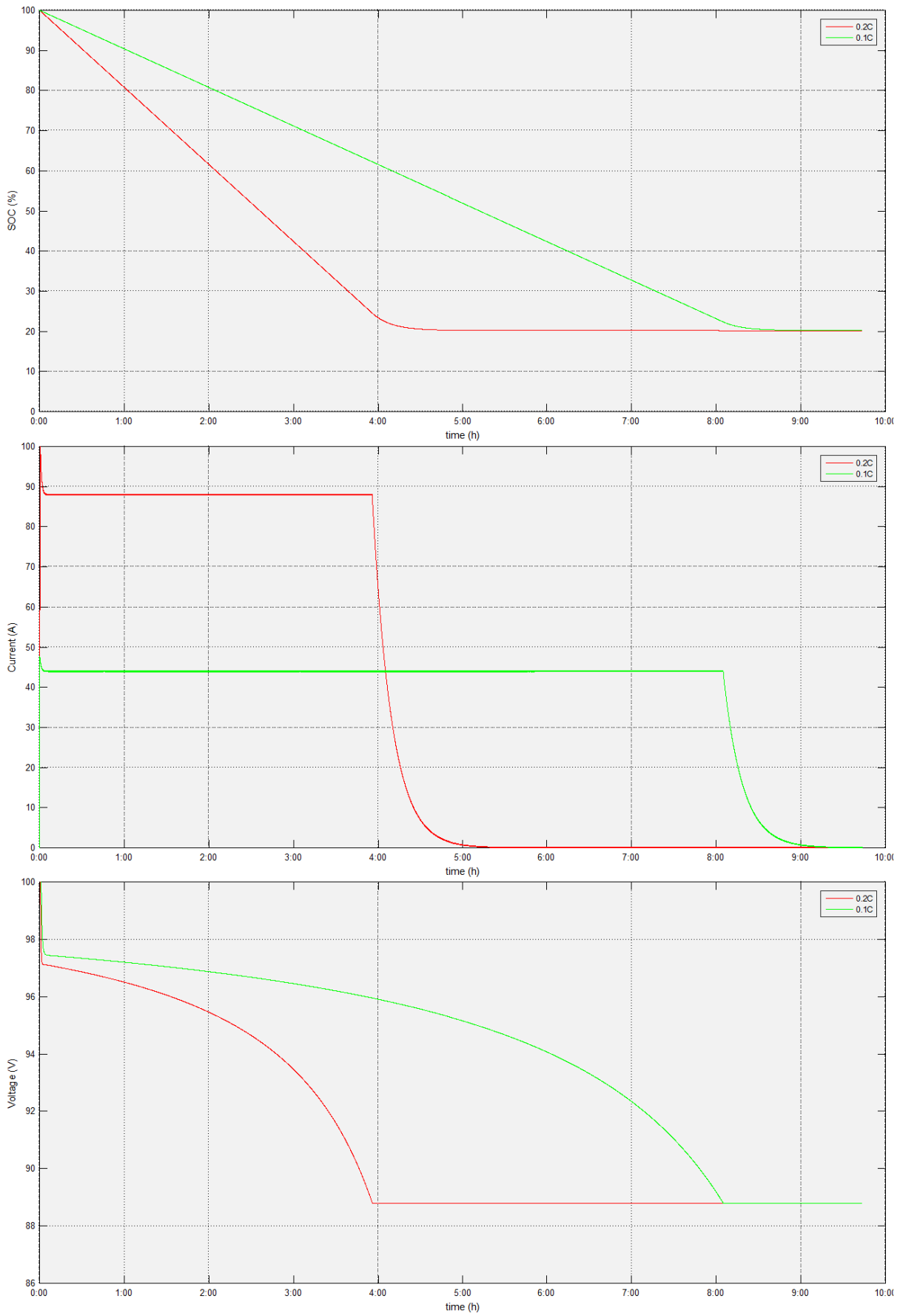
Για την λειτουργία εκφόρτισης πραγματοποιούνται δύο προσομοιώσεις.

Για την πρώτη προσομοίωση τα δεδομένα αρχικοποίησης είναι:

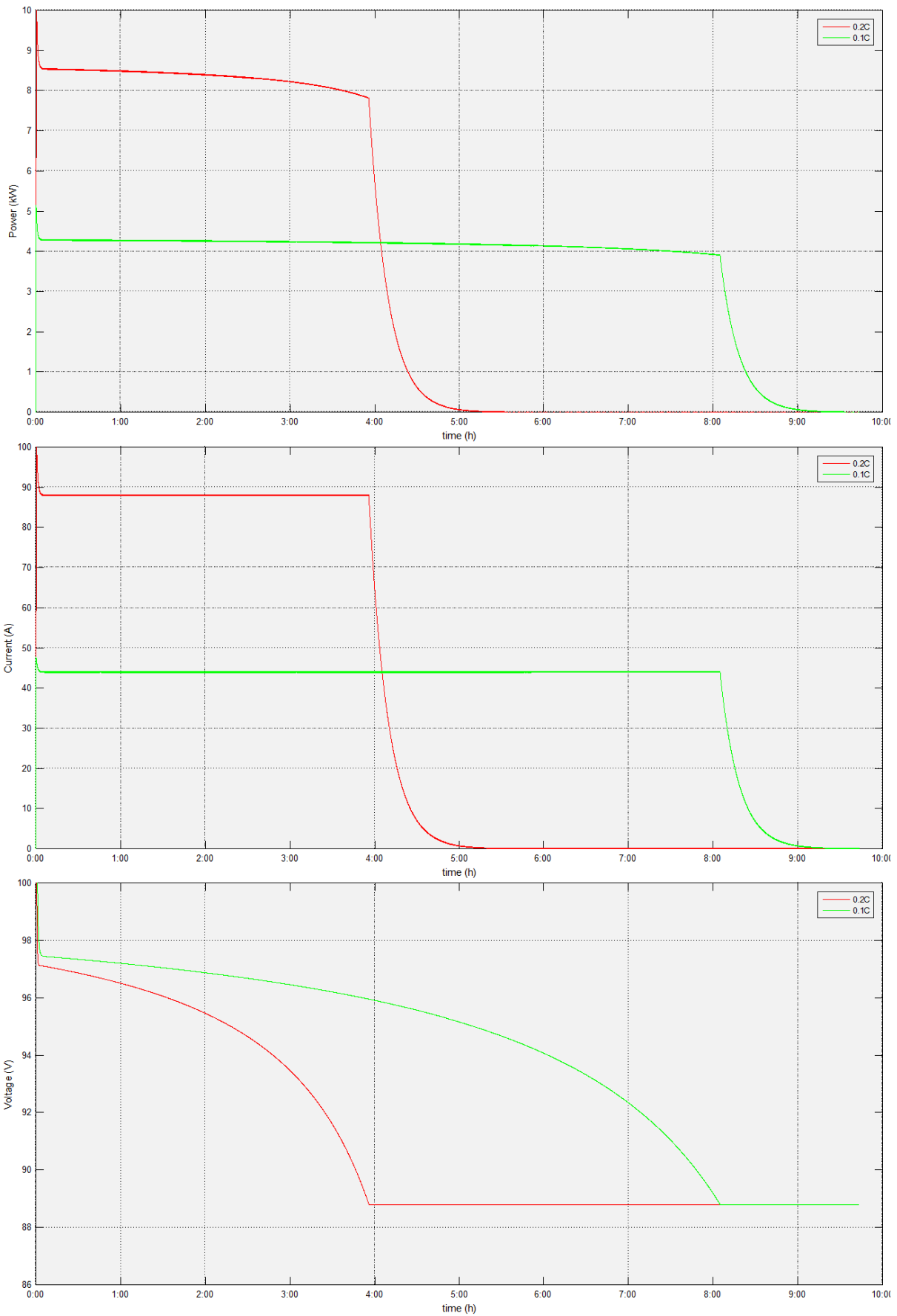
- αρχική στάθμη φόρτισης 100%
- ελάχιστη τιμή τάσης $V_{\min}=88.8\text{V}$ (1,85V ανά στοιχείο)
- ένταση ρεύματος $I_{\text{command}}=88\text{A}/44\text{A}$ (ρυθμός εκφόρτισης 0.2C/0.1C)

Για την δεύτερη προσομοίωση τα δεδομένα αρχικοποίησης είναι:

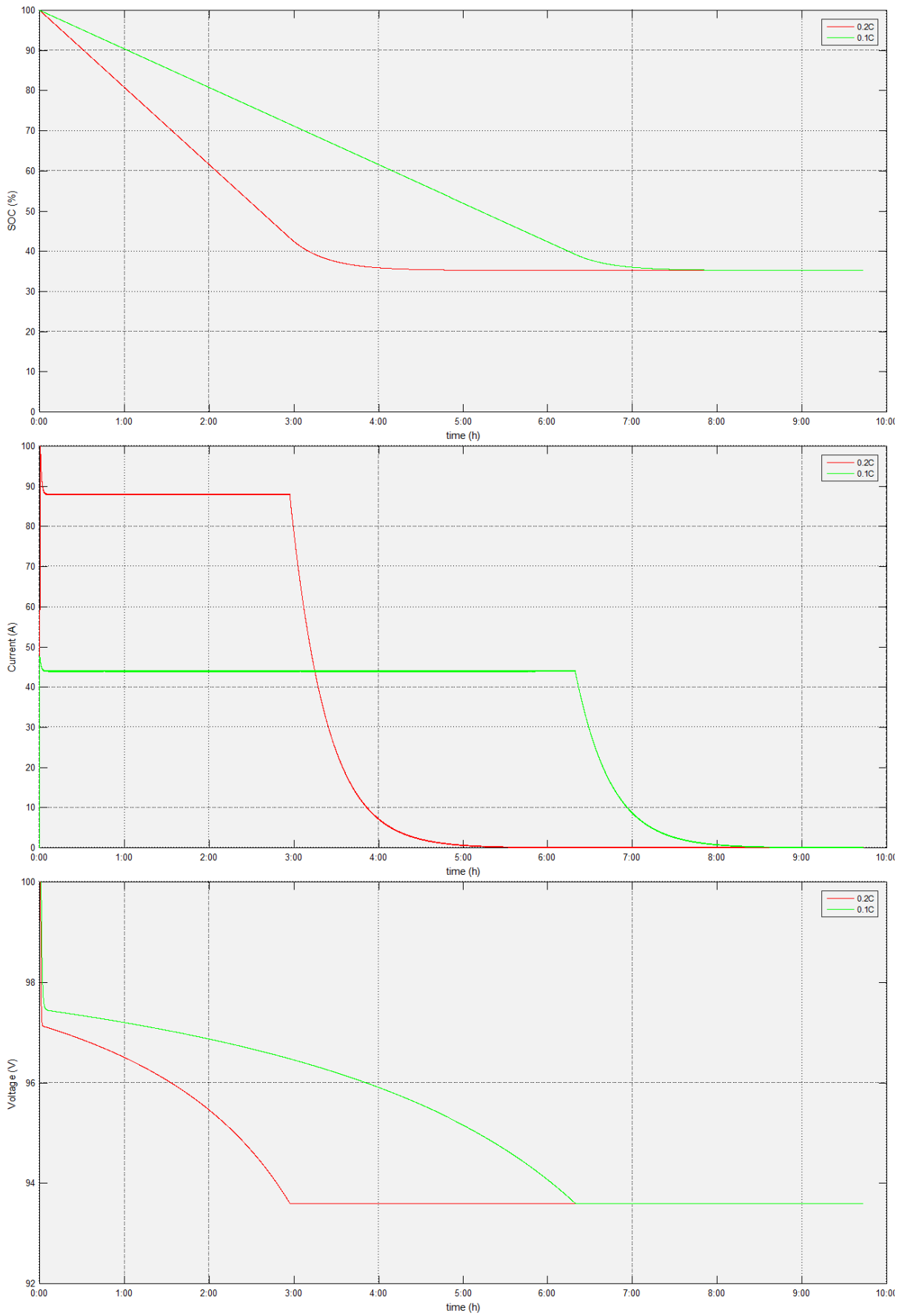
- αρχική στάθμη φόρτισης 100%
- ελάχιστη τιμή τάσης $V_{\min}=93.6\text{V}$ (1,95V ανά στοιχείο)
- ένταση ρεύματος $I_{\text{command}}=88\text{A}/44\text{A}$ (ρυθμός εκφόρτισης 0.2C/0.1C)



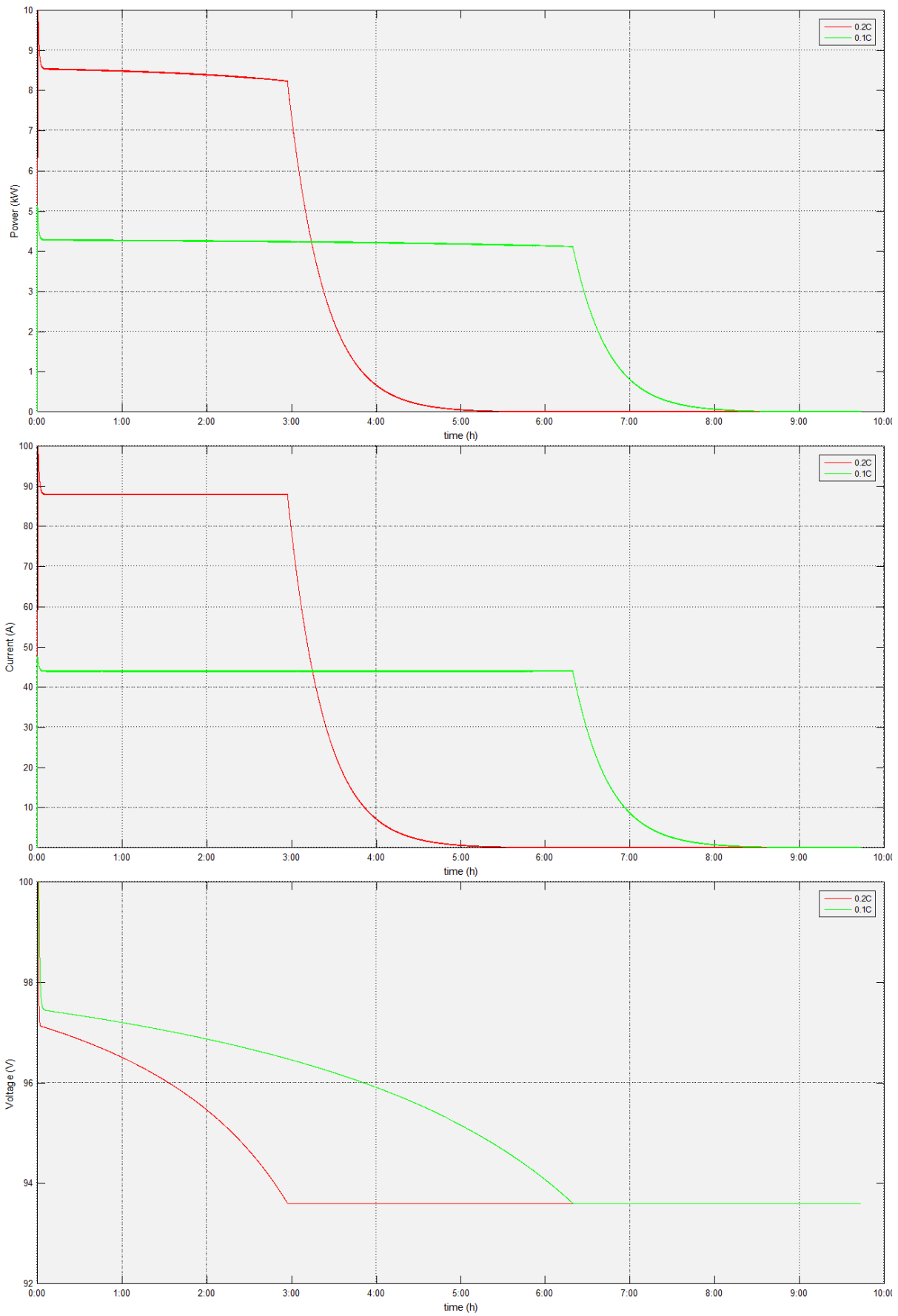
Εικόνα 4.10: SoC/Ρεύμα/Τάση εκφόρτισης για $V_{min}=88.8V$ (1,85V ανά στοιχείο)



Εικόνα 4.11: Ισχύς/Ρεύμα/Τάση εκφόρτισης για $V_{min}=88.8V$ (1,85V ανά στοιχείο)



Εικόνα 4.12: SoC/Ρεύμα/Τάση εκφόρτισης για $V_{min}=93.6V$ (1,95V ανά στοιχείο)



Εικόνα 4.13: Ισχύς/Ρεύμα/Τάση εκφόρτισης για $V_{min}=93.6V$ (1,95V ανά στοιχείο)

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.10, η τάση ακροδεκτών της μπαταρίας μειώνεται κατά την εκφόρτιση μέχρις ότου φτάσει την ελάχιστη της τιμή $V_{\min}=88.8V$ (1,85V ανά στοιχείο). Από αυτό το σημείο και μετά η τάση παραμένει σταθερή στο επίπεδο αυτό, ενώ το σταθερό ρεύμα I_{command} αρχίζει να μειώνεται και εν τέλει να μηδενίζεται, τερματίζοντας ουσιαστικά την λειτουργία της μπαταρίας. Όπως είναι φυσικό η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται πιο γρήγορα για ρυθμό εκφόρτισης 0.2C σε σύγκριση με ρυθμό εκφόρτισης 0.1C. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας δεν πέφτει χαμηλότερα από 20%, τιμή που αποτελεί και το κατώτατο όριο ασφαλούς λειτουργίας μιας βαθιάς εκφόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη.

Στην εικόνα 4.11 παρουσιάζεται επίσης η κυματομορφή της ισχύος εκφόρτισης της μπαταρίας. Στο πρώτο στάδιο εκφόρτισης η τιμή της ισχύος μειώνεται με χαμηλό ρυθμό ακολουθώντας την μείωση της τάσης (σταθερή ένταση ρεύματος εκφόρτισης). Στο δεύτερο στάδιο η τιμή της ισχύος ελαττώνεται πιο απότομα, ακολουθώντας την μείωση του ρεύματος (σταθερή τάση), μέχρι να λάβει μηδενική τιμή.

Στις εικόνες 4.12 και 4.13 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κυματομορφές για ελάχιστη τιμή τάσης $V_{\min}=93.6V$ (1,95V ανά στοιχείο). Ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα με παραπάνω, με μόνη διαφορά την ελάχιστη τιμή του SoC, το οποίο και δεν πέφτει κάτω από 35%. Γίνεται λοιπόν φανερό, πως αυξάνοντας και άλλο την τιμή της ελάχιστης τάσης εκφόρτισης V_{\min} , το επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας μειώνεται.

4.4.2 Προσομοίωση φόρτισης μπαταρίας

Για την προσομοίωση φόρτισης τα δεδομένα αρχικοποίησης είναι:

- αρχική στάθμη φόρτισης 20%
- μέγιστη τιμή τάσης $V_{\max}=110.4V$ (2,30V ανά στοιχείο)
- τιμή τάσης για float charge $V_{\text{float}}=108V$ (2,25V ανά στοιχείο)
- ένταση ρεύματος $I_{\text{command}}=88A$ (ρυθμός φόρτισης 0.2C)

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις εικόνες 4.14 και 4.15. Πιο συγκεκριμένα στην εικόνα 4.14 αποτυπώνονται οι κυματομορφές της στάθμης φόρτισης, της τάσης και της έντασης ρεύματος φόρτισης της μπαταρίας συναρτήσει του χρόνου, ενώ στην εικόνα 4.15 οι κυματομορφές της ισχύος φόρτισης, της τάσης και της έντασης ρεύματος.

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων εξετάζεται ξεχωριστά το κάθε μέγεθος για καθένα από τα τρία στάδια φόρτισης.

Για το πρώτο στάδιο (bulk charge):

- η τάση της μπαταρίας αυξάνεται κατά την φόρτιση μέχρι να φτάσει την μέγιστη τιμή $V_{\max}=110.4V$ (2,30V ανά στοιχείο)

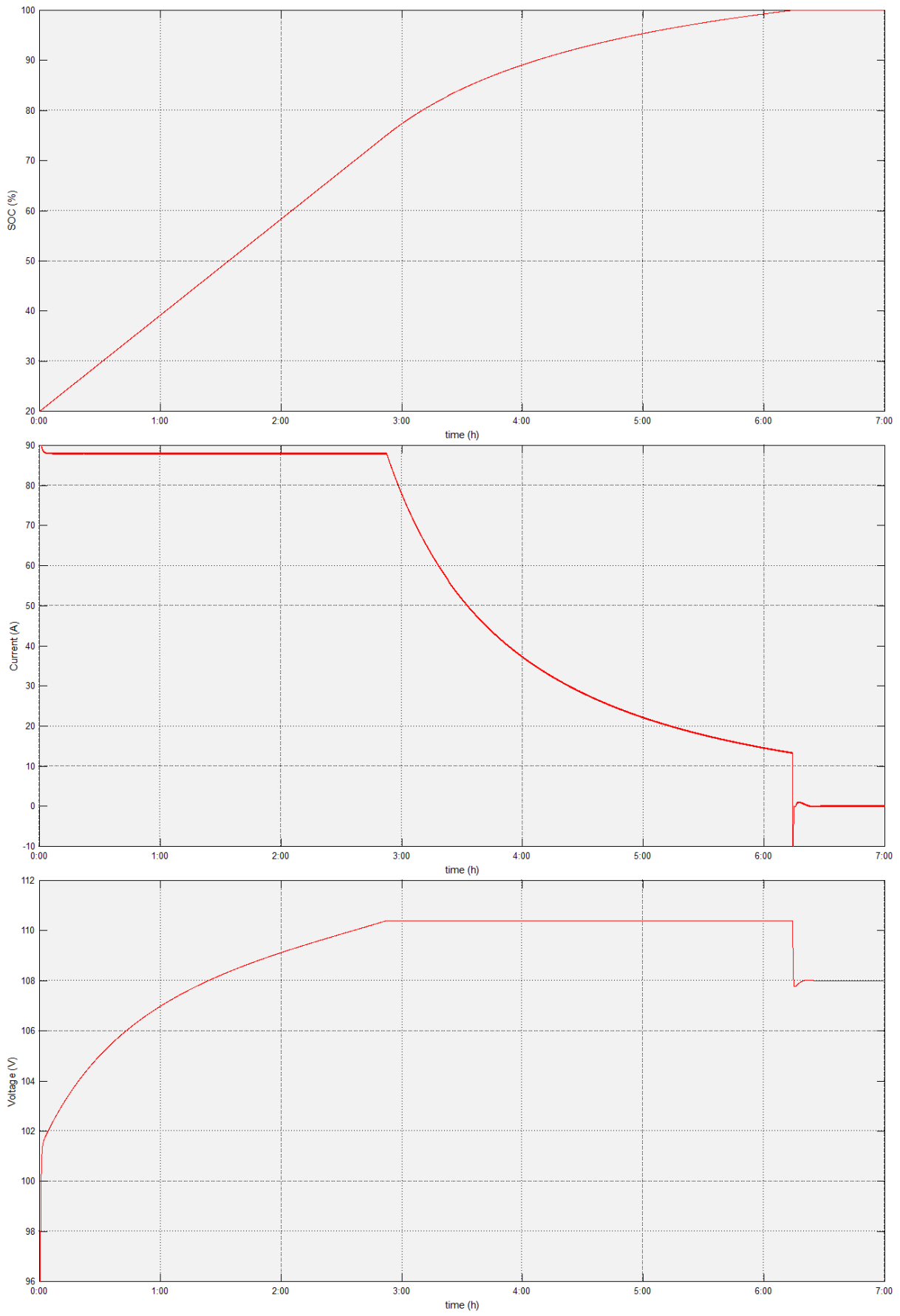
- η ένταση του ρεύματος φόρτισης παραμένει σταθερή στην προκαθορισμένη τιμή $I_{command}=88A$
- η ισχύς ελέγχου στο στάδιο αυτό υπολογίζεται από την τάση ακροδεκτών μπαταρίας V_{in} και την προκαθορισμένη σταθερή ένταση ρεύματος $I_{command}$. Αυξάνεται λοιπόν με χαμηλό ρυθμό ακολουθώντας την αύξηση της τάσης.
- η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τιμή 75% περίπου
- το στάδιο αυτό διαρκεί κάτι λιγότερο από 3 ώρες λόγω του υψηλού ρυθμού φόρτισης

Για το δεύτερο στάδιο (absorption charge):

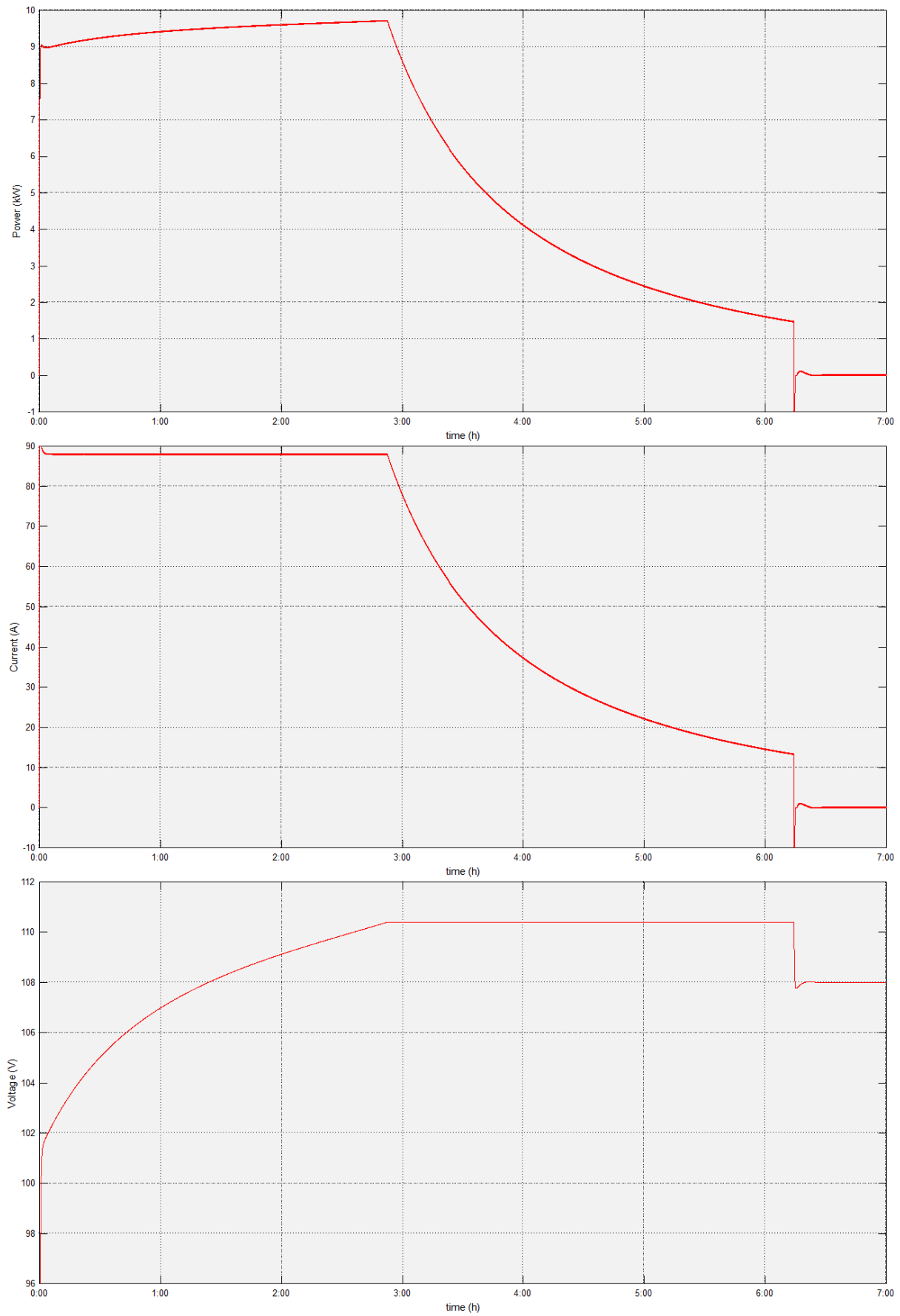
- η τάση της μπαταρίας παραμένει σταθερή στο επίπεδο της μέγιστης τιμής $V_{max}=110.4V$ (2,30V ανά στοιχείο)
- η ένταση του ρεύματος μειώνεται λόγω κορεσμού περίπου μέχρι την τιμή 13A ή 3% των αμπερών της μπαταρίας (συνθήκη πλήρους φόρτισης της μπαταρίας είναι η μείωση της έντασης ρεύματος στο 3-5% των αμπερών της μπαταρίας)
- η ισχύς ελέγχου στο στάδιο αυτό υπολογίζεται από την τάση ακροδεκτών μπαταρίας V_{in} και την ένταση του ρεύματος που αποτελεί έξοδο του ελεγκτή PI για το συγκεκριμένο στάδιο. Μειώνεται λοιπόν ακολουθώντας την μείωση της έντασης ρεύματος
- η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας αυξάνεται από το 75% μέχρι το 100% με φθίνοντα ρυθμό, λόγω της σταδιακής μείωσης της έντασης ρεύματος φόρτισης
- το στάδιο αυτό διαρκεί λίγο παραπάνω από το πρώτο όπως αναμενόταν και συγκεκριμένα 3μιση περίπου ώρες

Για το τρίτο στάδιο (float charge)

- η τάση της μπαταρίας μειώνεται φτάνοντας την τιμή $V_{float}=108V$ (2,25V ανά στοιχείο) και παραμένει σταθερή στο επίπεδο αυτό
- η ένταση ρεύματος μειώνεται ραγδαία στην προσπάθεια να ακολουθήσει την πτώση τάσης, παίρνοντας στιγμιαία αρνητική τιμή (εκφόρτιση μπαταρίας), ενώ αμέσως επανέρχεται σε θετικές τιμές πολύ κοντά στο 0. Στο στάδιο αυτό όπως προαναφέρθηκε το ρεύμα έχει πολύ χαμηλή ένταση και δρα ως παράγοντας αντιστάθμισης στις απώλειες αυτοεκφόρτισης της μπαταρίας.
- η ισχύς ελέγχου στο στάδιο αυτό υπολογίζεται από την τάση ακροδεκτών μπαταρίας V_{in} και την ένταση του ρεύματος που αποτελεί έξοδο του ελεγκτή PI για το συγκεκριμένο στάδιο. Παρουσιάζει δηλαδή ακριβώς την ίδια συμπεριφορά με το ρεύμα (σταθερή τάση)
- η στάθμη φόρτισης παραμένει σταθερή στο 100%. Η στιγμιαία εκφόρτιση της μπαταρίας δεν έχει κάποια υπολογίσιμη επίδραση στο SoC
- όσον αφορά τον χρόνο του συγκεκριμένου σταδίου, η μπαταρία μπορεί να μείνει σε κατάσταση float charge για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς κίνδυνο.



Εικόνα 4.14: SoC/Ρεύμα/Τάση φόρτισης

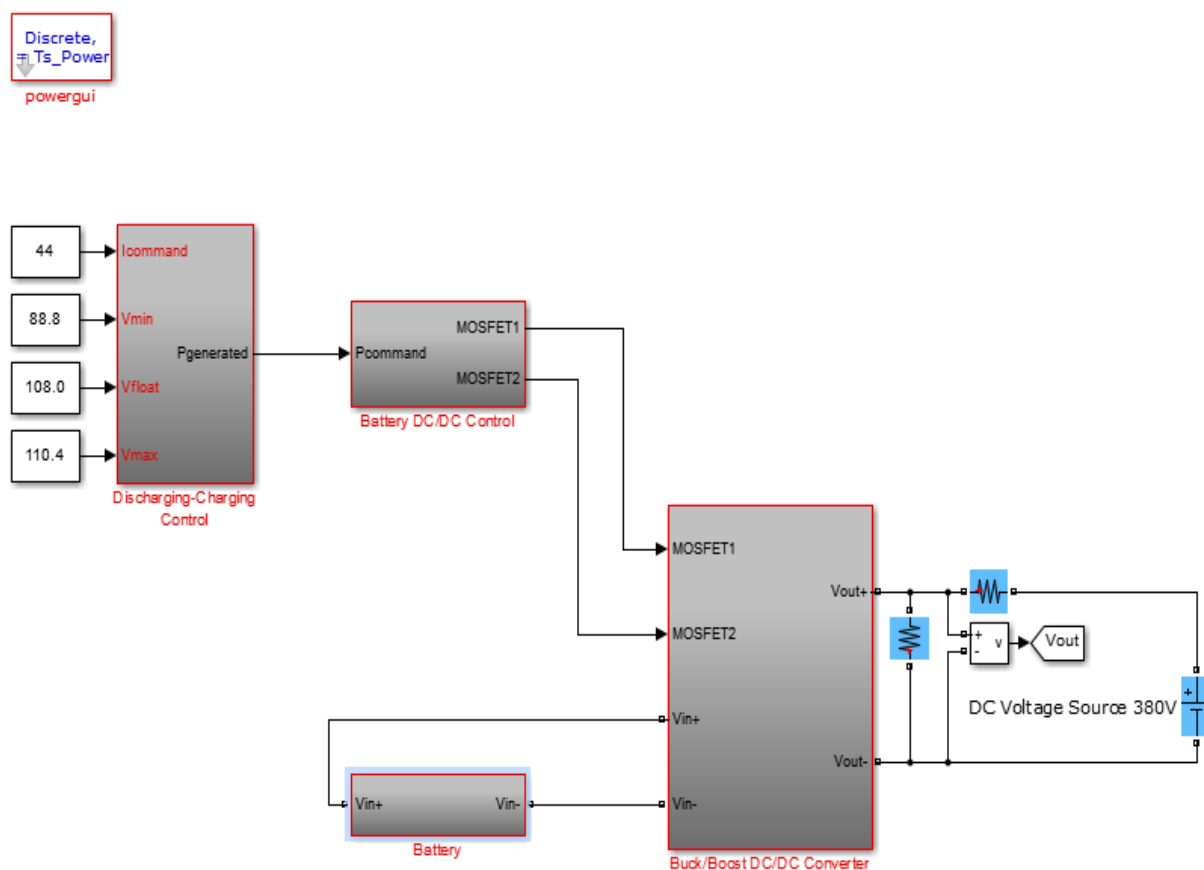


Εικόνα 4.15: Ισχύς/Ρεύμα/Τάση φόρτισης

5. ΕΙΣΩΡΡΟΠΗΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

5.1 Γενικά

Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, δομικό συστατικό μιας μπαταρίας είναι το στοιχείο. Κάθε μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα στοιχεία διασυνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα. Κατά την λειτουργία μιας μπαταρίας, τα στοιχεία που την απαρτίζουν ενδεχομένως να παρουσιάζουν αποκλίσεις ως προς την μεταξύ τους στάθμη φόρτισης και την τάση ακροδεκτών. Με άλλα λόγια κάποια στοιχεία παρουσιάζουν μεγαλύτερο SoC και κάποια άλλα μικρότερο.



Εικόνα 5.1: Τροποποιημένο μοντέλο σε Simulink

Το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι εντονότερο όταν τα στοιχεία της μπαταρίας συνδέονται σε σειρά και προκαλείται από ενδογενείς και εξωγενείς παράγοντες. Οι ενδογενείς παράγοντες αφορούν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μπαταριών και περιλαμβάνουν τις

αποκλίσεις που υπάρχουν στην αποθηκευτική ικανότητα, την εσωτερική αντίσταση και τον ρυθμό αυτοεκφόρτισης μεταξύ των στοιχείων. Οι εξωγενείς παράγοντες αναφέρονται κυρίως σε ολοκληρωμένα κυκλώματα προστασίας, που αντλούνε ενέργεια ανομοιομορφα από τα στοιχεία της μπαταρίας, καθώς και στις αποκλίσεις θερμοκρασίας στα διάφορα τμήματα της μπαταρίας, που έχουν ως αποτέλεσμα διαφορετικό ρυθμό αυτοεκφόρτισης από στοιχείο σε στοιχείο.[25]

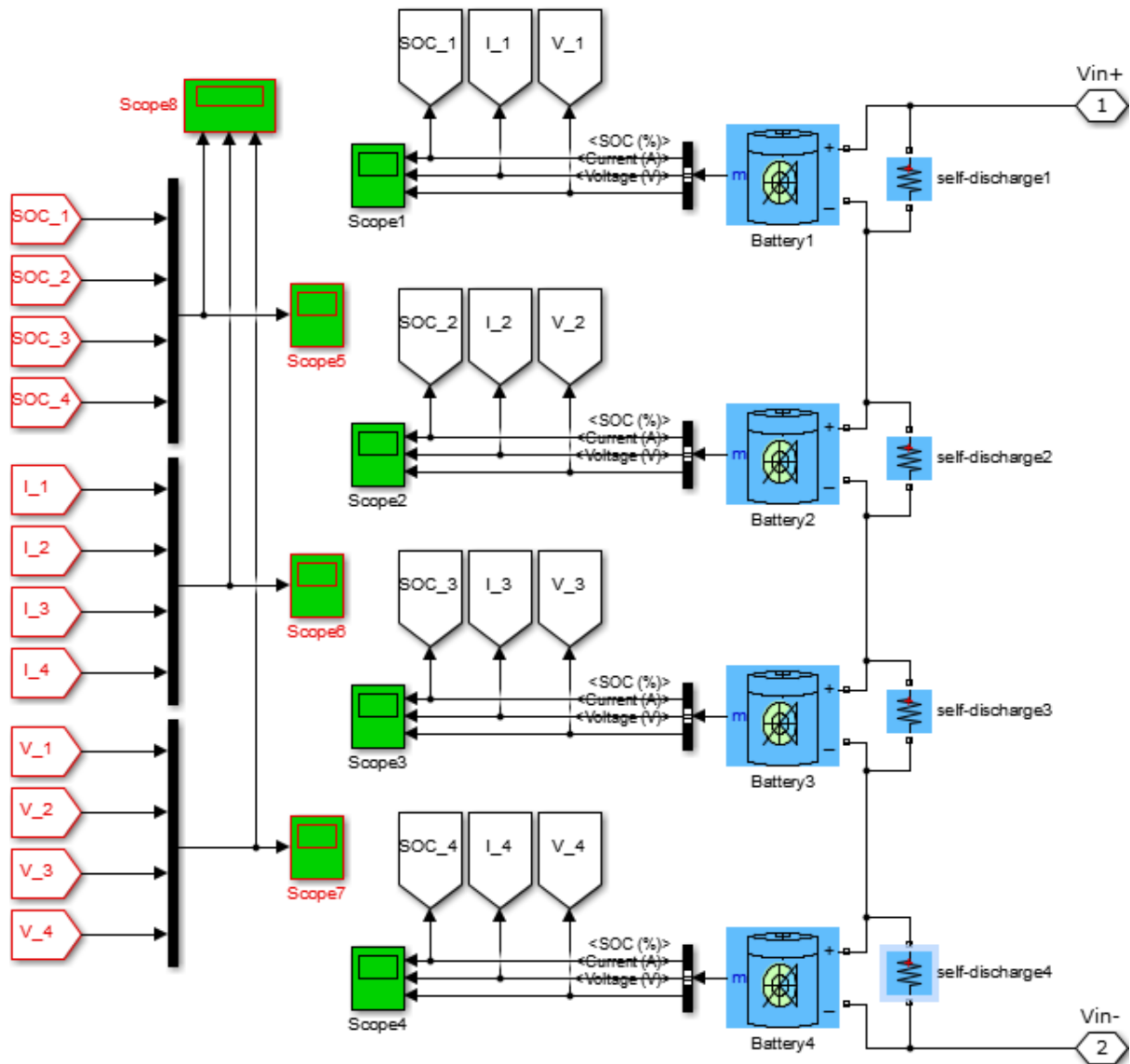
Όπως γίνεται φανερό, η ανομοιομορφία στην στάθμη φόρτισης μεταξύ των στοιχείων οδηγεί στην υπερφόρτιση ορισμένων στοιχείων και την υπερβολική εκφόρτιση κάποιων άλλων. Έτσι τα στοιχεία που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις καταπονούνται περισσότερο, ενώ τα χαρακτηριστικά τους υποβαθμίζονται. Αυτό σημαίνει κατ'επέκταση και γενικότερη υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται, όπως και η διάρκεια ζωής της.

Για τους παραπάνω λόγους, η εξισορρόπηση φόρτισης είναι μια διαδικασία ζωτικής σημασίας για την συντήρηση της μπαταρίας καθώς επίσης και μία από τις κυριότερες λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας. Αν και στην ουσία αποτελεί κομμάτι του ελέγχου φόρτισης, εξετάζεται ξεχωριστά εξαιτίας του μεγάλου ρόλου που διαδραματίζει στην προστασία της μπαταρίας.

5.2 Τροποποίηση μοντέλου Simulink για έλεγχο τεχνικών εξισορρόπησης φόρτισης

Για τον έλεγχο της λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης απαιτείται ο διαχωρισμός της μπαταρίας σε μικρότερα κομμάτια. Η πολυπλοκότητα του ελέγχου εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της μπαταρίας, τις συνθήκες λειτουργίας της και κυρίως από το ευρύτερο σύστημα που εξυπηρετεί. Ο πιο αποτελεσματικός αλλά ταυτόχρονα και πιο πολύπλοκος τρόπος ελέγχου αφορά την εξέταση του κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Σε διαφορετική περίπτωση τα στοιχεία της μπαταρίας ομαδοποιούνται σε τμήματα (battery strings), που εξετάζονται σαν μικρότερες ξεχωριστές μπαταρίες. Είναι φανερό πως όσο περισσότερες είναι οι ομάδες αυτές τόσο πιο αποτελεσματικός αλλά και πιο πολύπλοκος είναι ο έλεγχος της λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης.

Στην περίπτωσή μας, χρησιμοποιείται μια βαθιά εκφόρτισης μπαταρία μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη, με χωρητικότητα 440Ah και ονομαστική τάση 96V. Η μπαταρία αποτελείται από 48 διασυνδεδεμένα σε σειρά στοιχεία, ονομαστικής τάσης 2V. Για τον έλεγχο της λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης η συγκεκριμένη μπαταρία χωρίζεται σε 4 τμήματα διασυνδεδεμένα σε σειρά, το καθένα από τα οποία αποτελείται από 12 στοιχεία διασυνδεδεμένα σε σειρά. Το νέο μοντέλο φαίνεται στην εικόνα 5.1 και ο διαχωρισμός της μπαταρίας στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Διαχωρισμός μπαταρίας

Η χωρητικότητα των νέων μικρότερων μπαταριών παραμένει ίση με 440 Ah, αφού συνδέονται σε σειρά.

Για την ονομαστική τάση ακροδεκτών έχουμε:

- $V = 12 \cdot 2V = 24V$

Για την αντίσταση αυτοεκφόρτισης έχουμε:

- $\frac{5\% \cdot C}{1\text{month}} = \frac{0.05 \cdot 440\text{Ah}}{30 \cdot 24\text{h}} \approx 0.031\text{A}$
- $R = \frac{V}{I} = \frac{24V}{0.031\text{A}} \approx 774\Omega$

Σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς η τιμή της αντίστασης αυτοεκφόρτισης ορίζεται στα 750Ω.

Η παραμετροποίηση των νέων μικρότερων μπαταριών φαίνεται στην εικόνα 5.3.

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery that model most popular battery types. Uncheck the "Use parameters based on Battery type and nominal values" parameter to edit the discharge characteristics.

Parameters View Discharge Characteristics Battery Dynamics

Battery type Lead-Acid

Nominal Voltage (V)
24

Rated Capacity (Ah)
440

Initial State-Of-Charge (%)
20

Use parameters based on Battery type and nominal values

Maximum Capacity (Ah)
458.3333

Fully Charged Voltage (V)
27.37975

Nominal Discharge Current (A)
88

Internal Resistance (Ohms)
0.00054545

Capacity (Ah) @ Nominal Voltage
136.5222

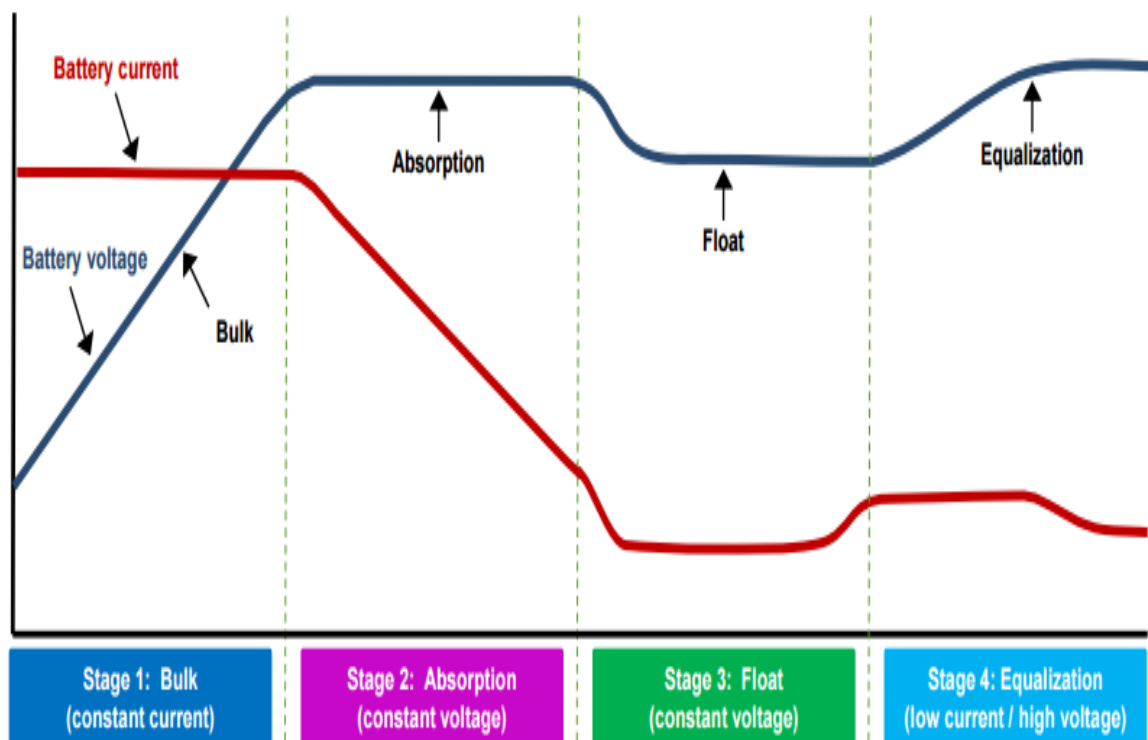
Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]
[24.4342 1.46667]

Εικόνα 5.3: Παράμετροι μπαταριών σε Simulink

5.3 Εξισορρόπηση φόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη

Η ανισορροπία επιπέδου φόρτισης μεταξύ των στοιχείων μια μπαταρίας μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη καταπολεμάται με μια ελεγχόμενη υπερφόρτιση. Η μπαταρία μολύβδου-οξέος μπορεί να έρθει σε κατάσταση υπερφόρτισης χωρίς να προκαλείται μόνιμη βλάβη στα στοιχεία που την απαρτίζουν, καθώς η περίσσια ενέργεια αναλώνεται στην παραγωγή αερίων υδρογόνου και οξυγόνου από το νερό του ηλεκτρολύτη (gassing). Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί την φυσική μέθοδο εξισορρόπησης φόρτισης μεταξύ διασυνδεδεμένων σε σειρά στοιχείων μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη.[26]

Μία πλήρης διαδικασία εξισορρόπησης φόρτισης πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια. Τα τρία πρώτα στάδια (bulk charge, absorption charge, float charge) αφορούν την κλασική μέθοδο φόρτισης, όπως αυτήν αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο τέταρτο στάδιο (equalization charge) πραγματοποιείται η εξισορρόπηση της στάθμης φόρτισης μεταξύ των στοιχείων. Οι κυματομορφές της έντασης ρεύματος και της τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας για την διαδικασία αυτήν παρουσιάζονται στην εικόνα 5.4.[27]



Εικόνα 5.4: Διαδικασία εξισορρόπησης φόρτισης μπαταρίας μολύβδου-οξέος

Το στάδιο εξισορρόπησης φόρτισης ακολουθεί το στάδιο float charge και μπορεί να χωριστεί σε δύο μικρότερα υπο-στάδια. Κατά το πρώτο από αυτά, η μπαταρία συνεχίζει να φορτίζεται με ρεύμα πολύ μικρής έντασης, με ενδεικτικές τιμές 0.01C-0.03C. Η τάση ακροδεκτών της μπαταρίας αυξάνεται από την σταθερή τιμή V_{float} του τρίτου σταδίου, μέχρι την τιμή V_{equal} . Ενδεικτικό διάστημα τιμών για την τιμή V_{equal} είναι 2.50V-2.65V ή 10% μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με την μέγιστη τάση V_{max} της μπαταρίας (δεύτερο στάδιο φόρτισης). Όταν λοιπόν η τάση ακροδεκτών φτάσει την τιμή V_{equal} σηματοδοτείται η έναρξη του δεύτερου υπο-σταδίου εξισορρόπησης φόρτισης, κατά το οποίο η τάση παραμένει σταθερή στην τιμή αυτήν και η ένταση του ρεύματος μειώνεται λόγω κορεσμού (εικόνα 5.4). Πρόκειται ουσιαστικά για μια διαδικασία φόρτισης σταθερού ρεύματος – σταθερής τάσης (CC-CV).

Το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας επομένως μπορεί να μεριμνά για την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Οι κατασκευαστές συστήνουν εξισορρόπηση φόρτισης ανά 1-6 μήνες.

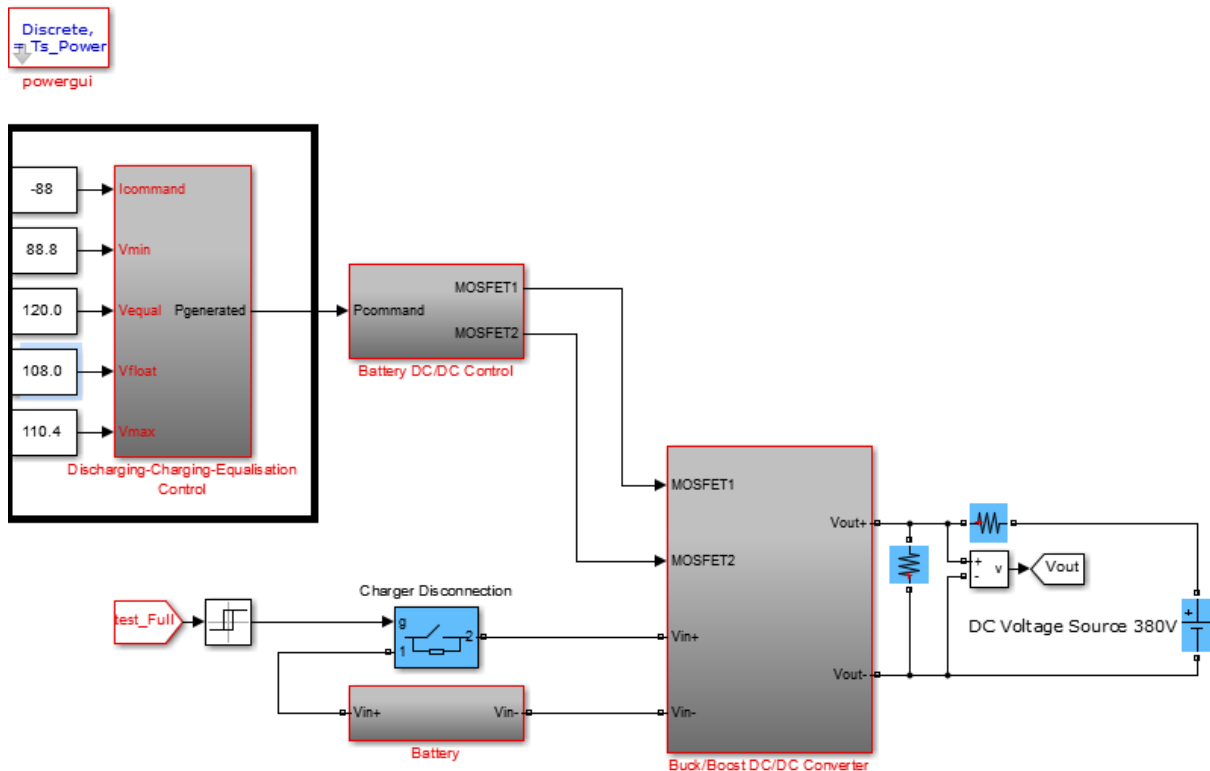
Ένας άλλος τρόπος προσδιορισμού της αναγκαιότητας εξισορρόπησης φόρτισης είναι η μέτρηση με την βοήθεια υδρόμετρου του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη κάθε στοιχείου (ή κάθε ομάδας στοιχείων) μετά από μια πλήρη φόρτιση. Αν οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων μεγεθών είναι μεγαλύτερες από 0.030, τότε μόνο μπορεί να εφαρμοσθεί η διαδικασία της εξισορρόπησης φόρτισης. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται ανά μία περίπου ώρα. Όταν τα μετρούμενα ειδικά βάρη σταματήσουν να αυξάνονται, η μπαταρία πρέπει να αποσυνδεθεί από τον φορτιστή, καθώς δεν επιδέχεται επιπλέον βελτίωση και συνέχιση της φόρτισης θα επέφερε μόνο αρνητικές συνέπειες. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι ότι απαιτεί την εκτεταμένη προσοχή του χρήστη, γεγονός που αυξάνει τις απαιτήσεις συντήρησης, όπως αναφέρθηκε και κατά την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου μπαταρίας. Παρόλα αυτά ο έλεγχος των μετρήσεων θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί με την χρήση ενσωματωμένων ψηφιακών υδρόμετρων ως μέρος του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας.

Παράλληλα ο χρήστης πρέπει εκ των προτέρων να έχει μεριμνήσει για τον επαρκή εξαερισμό του χώρου στο οποίο βρίσκεται η μπαταρία. Όπως είπαμε η περίσσια ενέργεια καταναλώνεται στην παραγωγή αερίου υδρογόνου και οξυγόνου. Το αέριο υδρογόνο πρέπει να διαχέεται ομαλά καθώς σε συγκέντρωση άνω του 4% είναι άκρως εύφλεκτο.

Συνοψίζοντας, η λειτουργία εξισορρόπησης φόρτισης αποτελεί στην πραγματικότητα μια εσκεμμένη ελεγχόμενη υπερφόρτιση, που στόχο έχει να αποκαταστήσει την ισορροπία στάθμης φόρτισης μεταξύ των στοιχείων της μπαταρίας. Όταν δεν εφαρμόζεται τα στοιχεία με χαμηλότερο επίπεδο φόρτισης υπόκεινται σε υπερβολική εκφόρτιση και είναι ευάλωτα έναντι των φαινομένων σούλφωσης και στρωματοποίησης οξέος, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται σταδιακά η χωρητικότητα του συνολικού συστήματος της μπαταρίας καθώς και η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της.

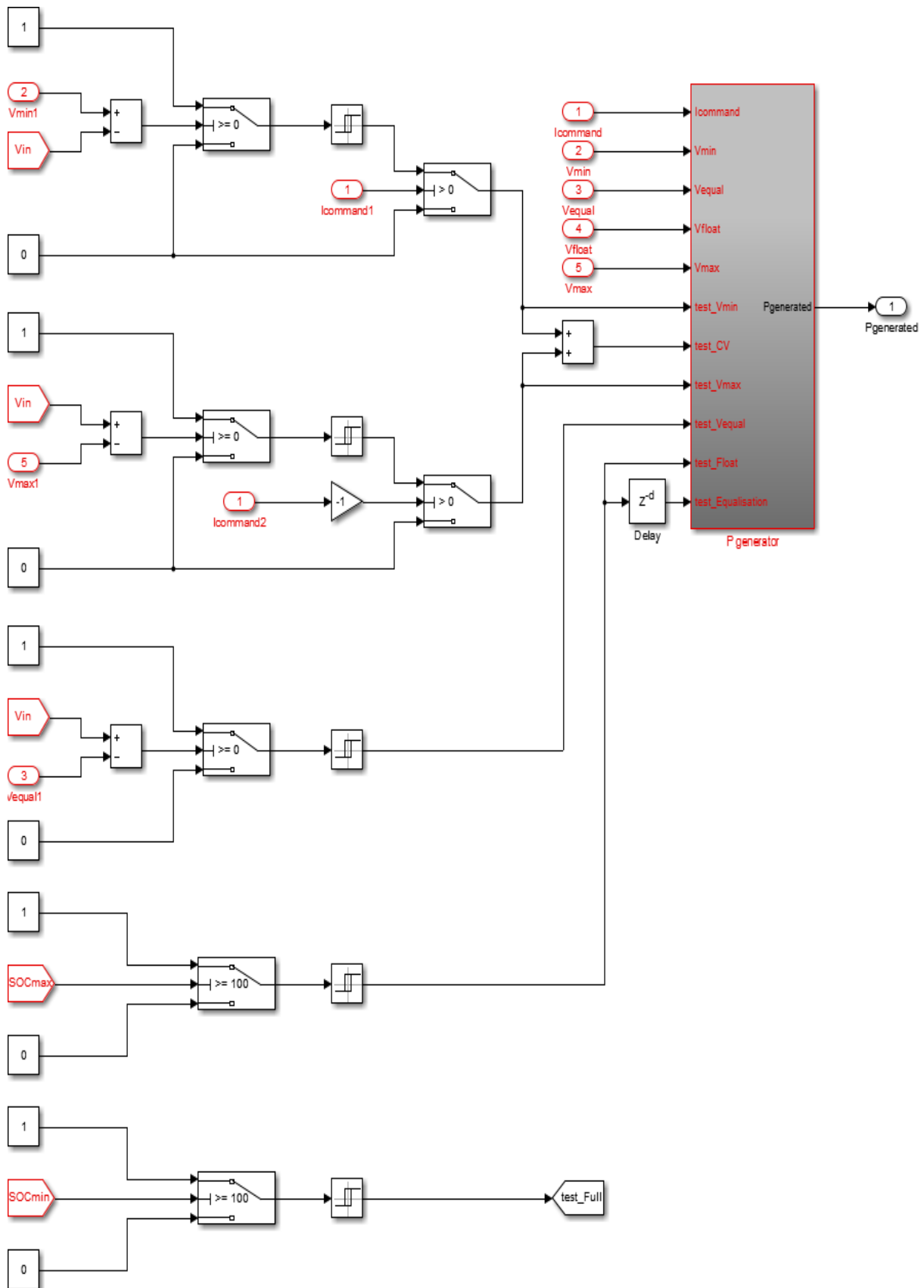
5.4 Υλοποίηση ελέγχου λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink

Στην ενότητα αυτήν υλοποιείται το μπλοκ ελέγχου της λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως. Η αρχή έγινε με τον διαχωρισμό της μπαταρίας σε ένα ισοδύναμο σύστημα τεσσάρων μικρότερων μπαταριών όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.2. Στην εικόνα 5.4 προστίθεται ένας διακόπτης, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανοιχτοκύκλωση της μπαταρίας όταν η λειτουργία εξισορρόπησης φόρτισης φτάσει στο τέλος της. Το μπλοκ ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης αναβαθμίζεται ώστε να χειρίζεται πλέον και την συγκεκριμένη διαδικασία, που όπως αναφέρθηκε αποτελεί κομμάτι του ελέγχου φόρτισης. Επιπλέον είσοδο στο μπλοκ αυτό αποτελεί η τάση εξισορρόπησης, η οποία ορίζεται στα 120V ή 2.50V ανά στοιχείο.



Εικόνα 5.5: Μπλοκ ελέγχου εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink 1/3

Στην εικόνα 5.6 παρουσιάζεται το εσωτερικό του μπλοκ ελέγχου εκφόρτισης-φόρτισης-εξισορρόπησης. Στο κομμάτι αυτό εισάγονται ορισμένες βοηθητικές δυαδικές μεταβλητές, που ορίζουν την μετάβαση ανάμεσα στα διαφορετικά στάδια φόρτισης.



Εικόνα 5.6: Μπλοκ ελέγχου εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink 2/3

Πιο συγκεκριμένα:

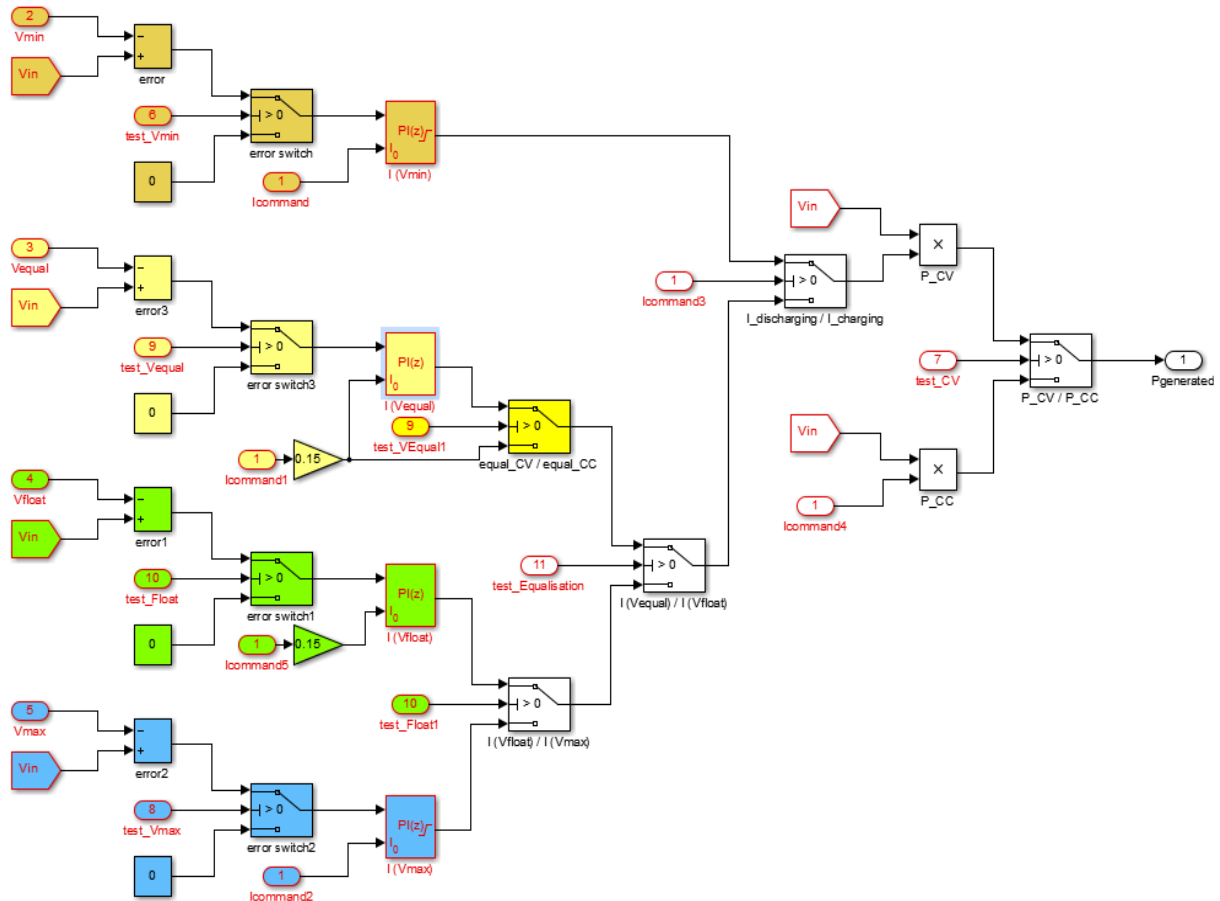
- οι μεταβλητές $test_V_{min}$, $test_V_{max}$ και $test_CV$ αναλύθηκαν στην ενότητα 4.3 (εικόνα 4.8).
- η μεταβλητή $test_Float$ λαμβάνει την τιμή 1 όταν η μπαταρία με την μέγιστη στάθμη φόρτισης φορτιστεί πλήρως ($SoC_{max}=100\%$) και σηματοδοτεί την μετάβαση από το δεύτερο στάδιο (absorption charge) στο τρίτο στάδιο φόρτισης (float charge).
- η μεταβλητή $test_Equalisation$ λαμβάνει την τιμή 1 πυροδοτώντας την μετάβαση από το τρίτο στάδιο φόρτισης (float charge) στο στάδιο εξισορρόπησης φόρτισης (equalisation charge). Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η μπαταρία μπορεί να παραμείνει για μεγάλα χρονικά διαστήματα στο στάδιο float charge χωρίς προβλήματα, ενώ δεν υπάρχει κάποιο φυσικό μέγεθος που να σηματοδοτεί το τέλος του συγκεκριμένου σταδίου. Έτσι η μετάβαση αυτήν θα πραγματοποιηθεί χρονικά χρησιμοποιώντας το στοιχείο delay. Η μεταβλητή $test_Equalisation$ λαμβάνει την τιμή 1, με την πάροδο συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος αφότου η μεταβλητή $test_Float$ λάβει την τιμή 1. Με άλλα λόγια το στάδιο float charge διαρκεί κάποια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (κατά την διάρκεια της οποίας μπορεί να πραγματοποιείται ο έλεγχος των μετρήσεων ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη) και στην συνέχεια μεταβαίνουμε στο στάδιο εξισορρόπησης φόρτισης.
- η μεταβλητή $test_V_{equal}$ λαμβάνει την τιμή 1 όταν η τάση της μπαταρίας φτάσει την τιμή της τάσης εξισορρόπησης V_{equal} και σηματοδοτεί την μετάβαση από λειτουργία σταθερού ρεύματος σε λειτουργία σταθερής τάσης κατά την διαδικασία εξισορρόπησης φόρτισης.
- η μεταβλητή $test_Full$ λαμβάνει την τιμή 1 όταν όλες οι μπαταρίες έχουν φορτιστεί πλήρως ($SoC_{min}=100\%$) και σηματοδοτεί το τέλος της λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης και την ανάγκη αποσύνδεσης της μπαταρίας.

Στην εικόνα 5.7 φαίνεται το μπλοκ $P_{generated}$, το οποίο αποτελεί το κύριο τμήμα ελέγχου και έχει ως έξοδο ένα μεταβλητό σήμα ισχύος λειτουργίας της μπαταρίας. Εκτός από τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία που σχετίζονται με τον έλεγχο φόρτισης-εκφόρτισης προστίθεται ένας ακόμα PI ελεγκτής ο οποίος αφορά την λειτουργία εξισορρόπησης φόρτισης. Το σφάλμα εισόδου του ελεγκτή αυτού διατηρείται μηδενικό μέχρις ότου η τάση της μπαταρίας να φτάσει την τιμή της τάσης εξισορρόπησης V_{equal} . Από εκείνη την χρονική στιγμή και μετά ο ελεγκτής διατηρεί την τάση σταθερή στο επίπεδο αυτό μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος. Μετά από δοκιμές τα κέρδη του ελεγκτή επιλέχθηκαν ως εξής:

- $P=10$ αναλογικό κέρδος
- $I=1$ ολοκληρωτικό κέρδος
- $I_0=0.15I_{command}$ ή $0.03C$, αρχικοποίηση ολοκληρωτή (σταθερό ρεύμα εξισορρόπησης που έχει επιλεγθεί)

Αφότου αρχίσει η διαδικασία εξισορρόπησης φόρτισης ($test_Equalisation=1$) και πριν η τιμή της τάσης ανέλθει στο επίπεδο της V_{equal} ($test_V_{equal}=0$), η ένταση του ρεύματος δεν

προκύπτει ως έξοδος του PI ελεγκτή, αλλά διατηρείται σταθερή και ίση με $0.15I_{\text{command}}$ ή $0.03C$.

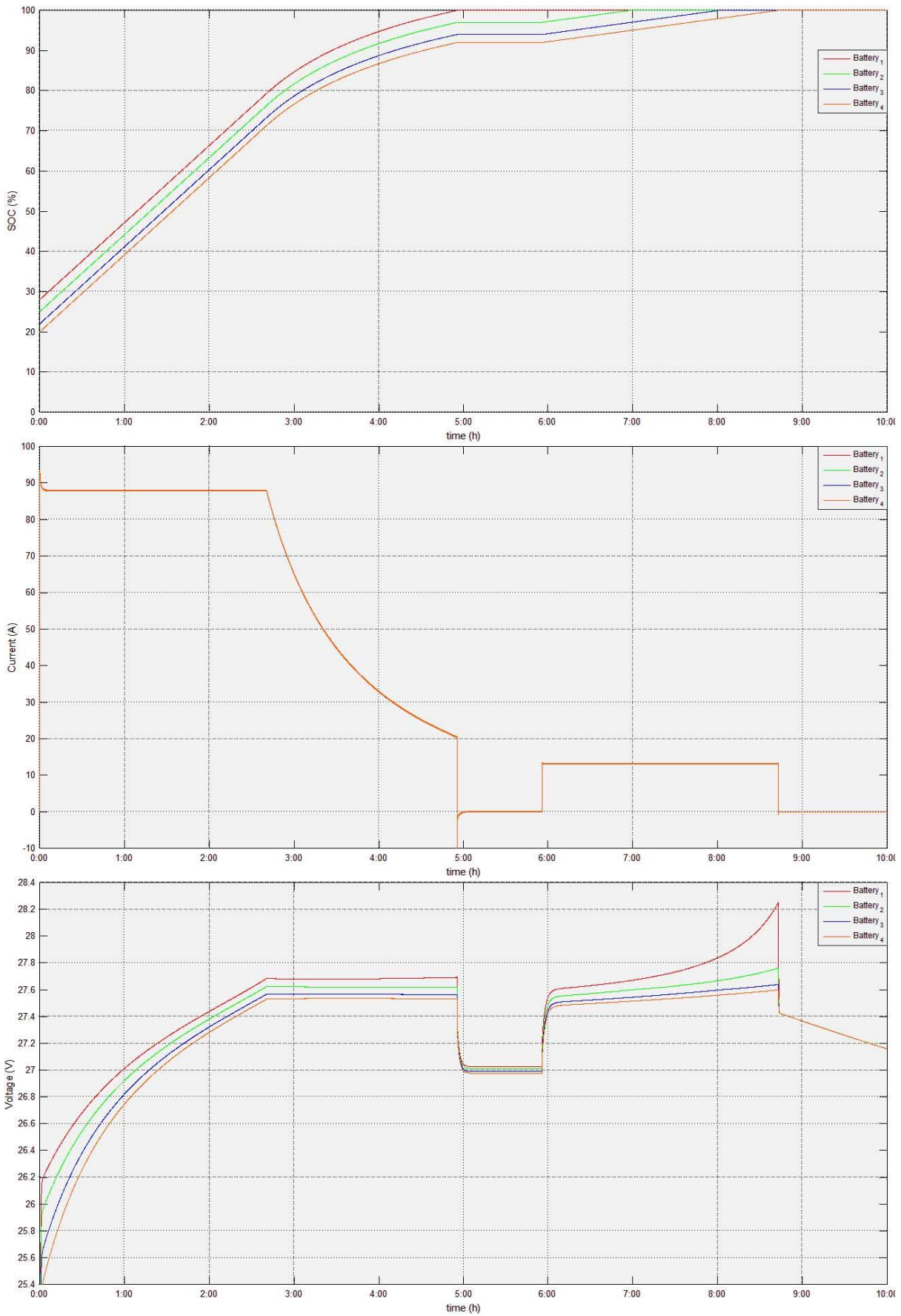


Εικόνα 5.7: Μπλοκ ελέγχου εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink 3/3

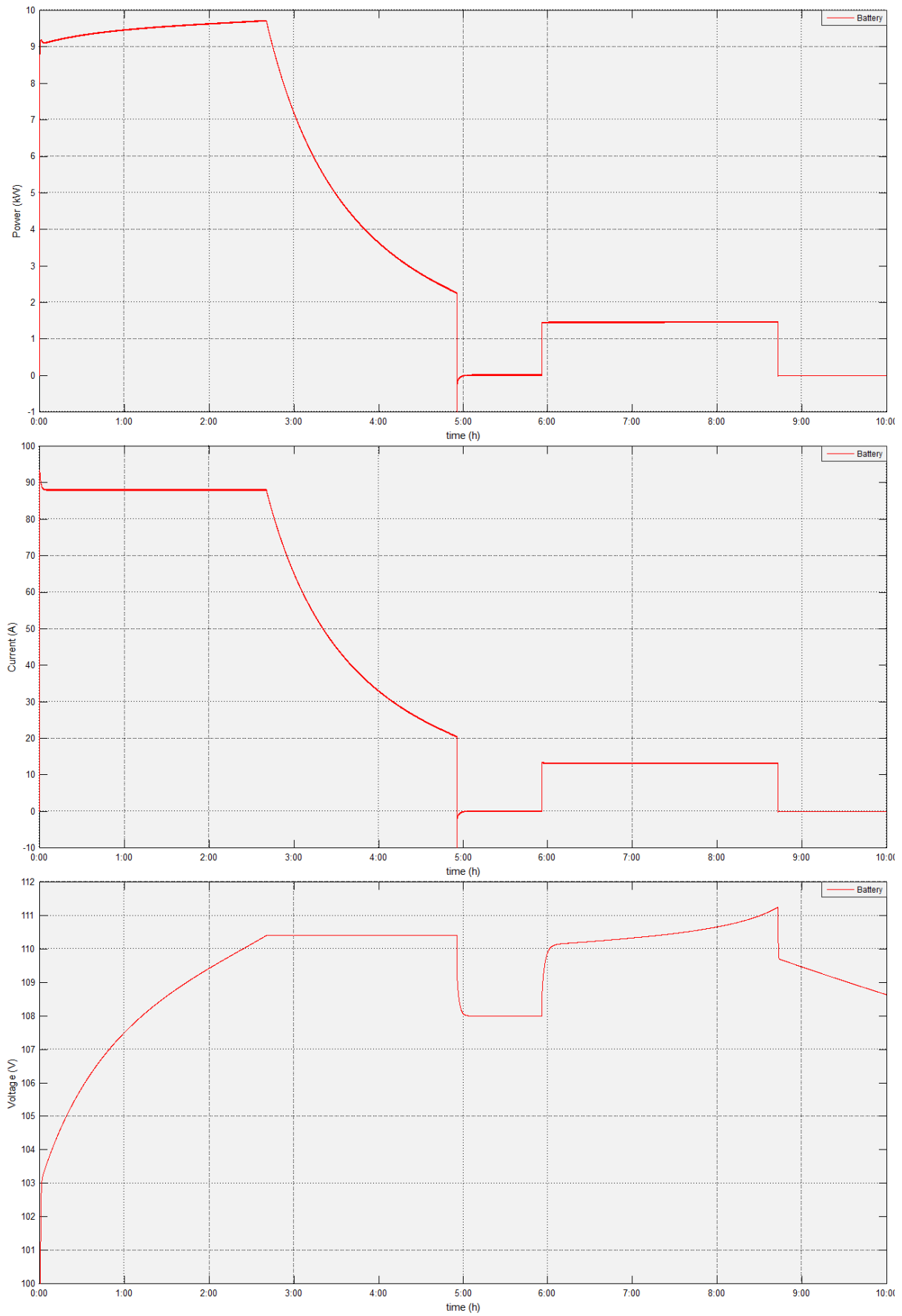
5.5 Προσομοίωση λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης σε Simulink

Για την προσομοίωση της λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης χρησιμοποιούμε τα ακόλουθα δεδομένα αρχικοποίησης:

- αρχική στάθμη φόρτισης 28%, 25%, 22% και 20% για τις τέσσερις μπαταρίες
- $V_{\text{equal}}=120\text{V}$ ή 2.50V ανά στοιχείο, τάση εξισορρόπησης
- η διάρκεια του τρίτου σταδίου φόρτισης επιλέγεται στα 3600s ή 1h



Εικόνα 5.8: SoC/Ρεύμα/Τάση επιμέρους μπαταριών για εξισορρόπηση φόρτισης



Εικόνα 5.9: Ισχύς/Ρεύμα/Τάση συστήματος μπαταρίας για εξισορρόπηση φόρτισης

Στην εικόνα 5.8 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της στάθμης φόρτισης, της έντασης ρεύματος και της τάσης ακροδεκτών των τεσσάρων επιμέρους μπαταριών συναρτήσει του χρόνου. Στην εικόνα 5.9 παρουσιάζονται οι κυματομορφές ισχύος, έντασης ρεύματος και τάσης ακροδεκτών του συνολικού συστήματος της μπαταρίας συναρτήσει του χρόνου.

Για τα πρώτα τρία στάδια φόρτισης (bulk charge, absorption charge και float charge) ισχύει ότι αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι μόνες διαφορές είναι ότι, στην περίπτωση αυτήν, η μετάβαση από το δεύτερο στο τρίτο στάδιο γίνεται μόλις η μπαταρία με την μεγαλύτερη στάθμη φόρτισης φορτιστεί πλήρως και ότι το τρίτο στάδιο (float charge) διαρκεί περιορισμένο χρονικό διάστημα, το οποίο έχει οριστεί στην 1 ώρα.

Στην συνέχεια περνάμε στο στάδιο εξισορρόπησης φόρτισης. Στο στάδιο αυτό η μπαταρία συνεχίζει να φορτίζεται με ρεύμα σταθερής έντασης 13.2A ή 0.03C, ενώ η τάση ακροδεκτών των επιμέρους μπαταριών αυξάνεται. Η λειτουργία εξισορρόπησης τερματίζεται μόλις η μπαταρία με το χαμηλότερο SoC φορτιστεί πλήρως.

Παρατηρούμε ότι η τάση ακροδεκτών του συνολικού συστήματος μπαταρίας δεν φτάνει την τιμή της τάσης εξισορρόπησης V_{equal} η οποία έχει οριστεί στα 120V, επομένως δεν εμφανίζεται το υπο-στάδιο σταθερής τάσης για την λειτουργία εξισορρόπησης φόρτισης. Αξίζει στο σημείο αυτό να υπογραμμιστεί ότι σκοπός της συγκεκριμένης λειτουργίας δεν είναι η τάση ακροδεκτών της μπαταρίας να φτάσει οπωσδήποτε την τιμή αυτήν, αλλά να βεβαιωθούμε ότι η τάση των στοιχείων με την χαμηλότερη στάθμη φόρτισης θα φτάσει στα επίπεδα της V_{max} , 2.30V δηλαδή ανά στοιχείο ή στην περίπτωσή μας 27.60V ανά επιμέρους μπαταρία.

Κλείνοντας παρατηρούμε ότι μετά το πέρας της λειτουργίας εξισορρόπησης φόρτισης και την ανοιχτοκύκλωση της μπαταρίας, η τάση ακροδεκτών κάθε επιμέρους μπαταρίας μειώνεται ενώ οι τιμές τους εξισώνονται. Σταδιακά οι τιμές αυτές θα μειώνονται μέχρι κάθε στοιχείο να φτάσει την τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, η οποία για πλήρως φορτισμένη μπαταρία είναι 2.10V περίπου ανά στοιχείο. Μία άλλη δυνατή επιλογή είναι η επανασύνδεση της μπαταρίας στο σύστημα μόλις η τάση ακροδεκτών της φτάσει στα επίπεδα της V_{float} και η διατήρησή της στο στάδιο float charge μέχρις ότου χρησιμοποιηθεί.

6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (SoC)

Ο υπολογισμός της στάθμης φόρτισης αποτελεί ένα ζήτημα με αυξανόμενη σημασία σε όλα τα συστήματα που περιλαμβάνουν μια μπαταρία. Παλαιότερα ο έλεγχος λειτουργίας της μπαταρίας περιοριζόταν στην χρήση του ανώτατου και κατώτατου ορίου τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας, για την προστασία της απέναντι σε υπερφόρτιση ή υπερβολική εκφόρτιση. Στις μέρες μας ο έλεγχος αυτός έχει αναβαθμιστεί και περιλαμβάνει την γενικότερη διαχείριση του συστήματος και όχι μόνο την προστασία της μπαταρίας. Έτσι ο σωστός υπολογισμός της στάθμης φόρτισης δεν χρησιμεύει μόνο στην προστασία της μπαταρίας και την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της, αλλά επιτρέπει παράλληλα την ανάπτυξη στρατηγικών ελέγχου που στόχο έχουν την εξοικονόμηση ενέργειας.

Ο ορθός υπολογισμός του SoC αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία, καθώς η μεταβολή της στάθμης φόρτισης επηρεάζεται τόσο από τον τύπο της μπαταρίας όσο και από εξωγενείς παράγοντες όπως η θερμοκρασία. Πολλές μέθοδοι που επιτελούν το συγκεκριμένο έργο έχουν κατά καιρούς αναπτυχθεί, ενώ η καταλληλότητα της κάθε μεθόδου εξαρτάται και από το σύστημα όπου χρησιμοποιείται η μπαταρία (στατική μπαταρία για αποθήκευση ενέργεια, ηλεκτρικά οχήματα, υβριδικά οχήματα κλπ.).

6.1 Μέθοδοι υπολογισμού στάθμης φόρτισης μπαταρίας

Στην ενότητα αυτήν γίνεται αναφορά στις πιο γνωστές μεθόδους υπολογισμού της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας που έχουν αναπτυχθεί. Μια γενική κατηγοριοποίηση των μεθόδων αυτών είναι η εξής[28]:

- άμεση μέτρηση (direct measurement)
Στην περίπτωση αυτήν, για τον υπολογισμό του SoC χρησιμοποιούνται φυσικά μεγέθη της μπαταρίας, όπως είναι η τάση ακροδεκτών, η ένταση ρεύματος και η τιμή της εσωτερικής αντίστασης.
- συστήματα με μνήμη (book-keeping systems)
Η κατηγορία αυτήν αναφέρεται κυρίως στην μέθοδο Coulomb, που χρησιμοποιεί το ολοκλήρωμα της έντασης του ρεύματος της μπαταρίας ως προς τον χρόνο για τον υπολογισμό του SoC, όπως θα δούμε και στην συνέχεια.
- προσαρμόσιμα συστήματα (adaptive systems)
Τα αυτοπροσαρμόσιμα συστήματα αποτελούν μια πιο πολύπλοκη κατηγορία μεθόδων, που αυτόματα προσαρμόζουν την τιμή του SoC για διαφορετικές συνθήκες εκφόρτισης-φόρτισης.

- συνδυασμός μεθόδων (hybrid methods)
Εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα των διάφορων μεθόδων και παρέχουν έναν ορθότερο τρόπο υπολογισμού του SoC

6.1.1 Ελεγχόμενη εκφόρτιση

Η πιο αξιόπιστη μέθοδος υπολογισμού της στάθμης φόρτισης ή αλλιώς της εναπομένουσας χωρητικότητας μιας μπαταρίας είναι μια ελεγχόμενη εκφόρτιση κάτω από προκαθορισμένες συνθήκες. Η συγκεκριμένη διαδικασία ωστόσο είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτεί την διακοπή της λειτουργίας του συστήματος.[29]

6.1.2 Μέθοδος μέτρησης αμπερών (μέθοδος Coulomb)

Η μέθοδος Coulomb αποτελεί την πιο απλή και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική υπολογισμού της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας. Βασίζεται στην μέτρηση των αμπερών που εξέρχονται ή εισέρχονται στην μπαταρία μέσω της ολοκλήρωσης της έντασης ρεύματος εκφόρτισης ή φόρτισης αντίστοιχα ως προς τον χρόνο.

Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή t η στάθμη φόρτισης δίνεται από τον τύπο:

$$\bullet \quad SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{C_N} \cdot \int_{t_0}^t [I_{BATT}(\tau) - I_{LOSS}(\tau)] d\tau$$

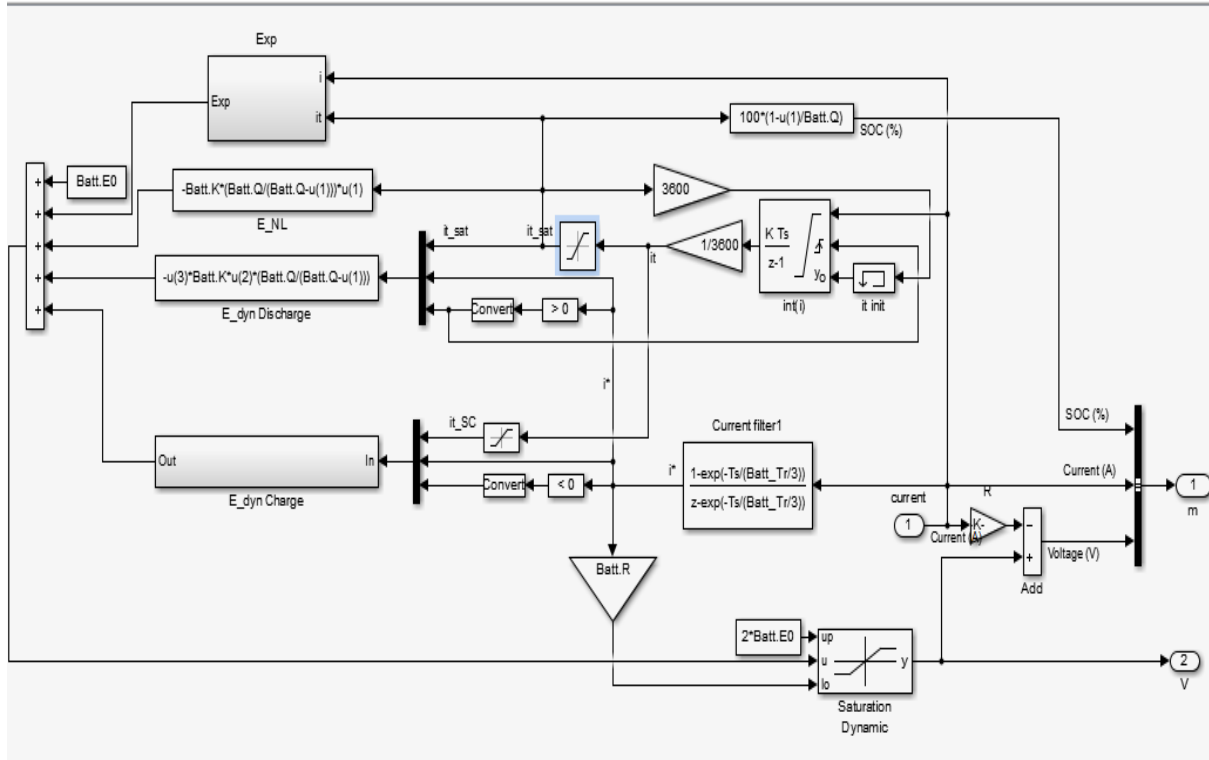
όπου:

- SOC_0 είναι η αρχική στάθμη φόρτισης την χρονική στιγμή t_0
- C_N είναι η μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας
- I_{BATT} είναι η ένταση ρεύματος της μπαταρίας
- I_{LOSS} είναι η ένταση ρεύματος απωλειών

Η μέθοδος αυτήν είναι ικανή να παρακολουθεί απότομες αλλαγές στην στάθμη φόρτισης και η ακρίβεια υπολογισμού της είναι αρκετά ικανοποιητική όταν οι μετρήσεις της έντασης ρεύματος είναι ακριβείς. Στον αντίποδα, και λόγω της χρήσης του ολοκληρώματος, σφάλματα στις μετρήσεις έντασης ρεύματος μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλα συσσωρευμένα σφάλματα κατά τον υπολογισμό του SoC. Ο κίνδυνος αυτός ενισχύεται ακόμα περισσότερο και λόγω της δυσκολίας προσδιορισμού της έντασης ρεύματος απωλειών. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να λυθούν αφενός με την χρήση αξιόπιστου μετρητικού εξοπλισμού, αφετέρου με την εφαρμογή τροποποιημένων μεθόδων Coulomb, που χρησιμοποιούν σημεία αναπροσαρμογής του σφάλματος με σκοπό την διατήρησή του σε χαμηλά επίπεδα.

Παρά την μειονεκτήματά της, η μέθοδος Coulomb αποτελεί την πιο λογική λύση υπολογισμού της στάθμης φόρτισης και είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην πράξη. Το πεδίο εφαρμογή της αφορά κυρίως φορητές ηλεκτρονικές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, tablet και φωτογραφικές μηχανές.[29][30]

Η μέθοδος Coulomb είναι αυτήν που χρησιμοποιείται και από το ενσωματωμένο στο Simulink μοντέλο μπαταρίας για τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισής της. Το μπλοκ υπολογισμού του SoC φαίνεται στην εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Ενσωματωμένο μπλοκ υπολογισμού SoC σε Simulink

Ο υπολογισμός της στάθμης φόρτισης γίνεται σύμφωνα με τον τύπο που παρουσιάστηκε παραπάνω, χωρίς ωστόσο να υπολογίζεται η ένταση ρεύματος απωλειών I_{LOSS} .

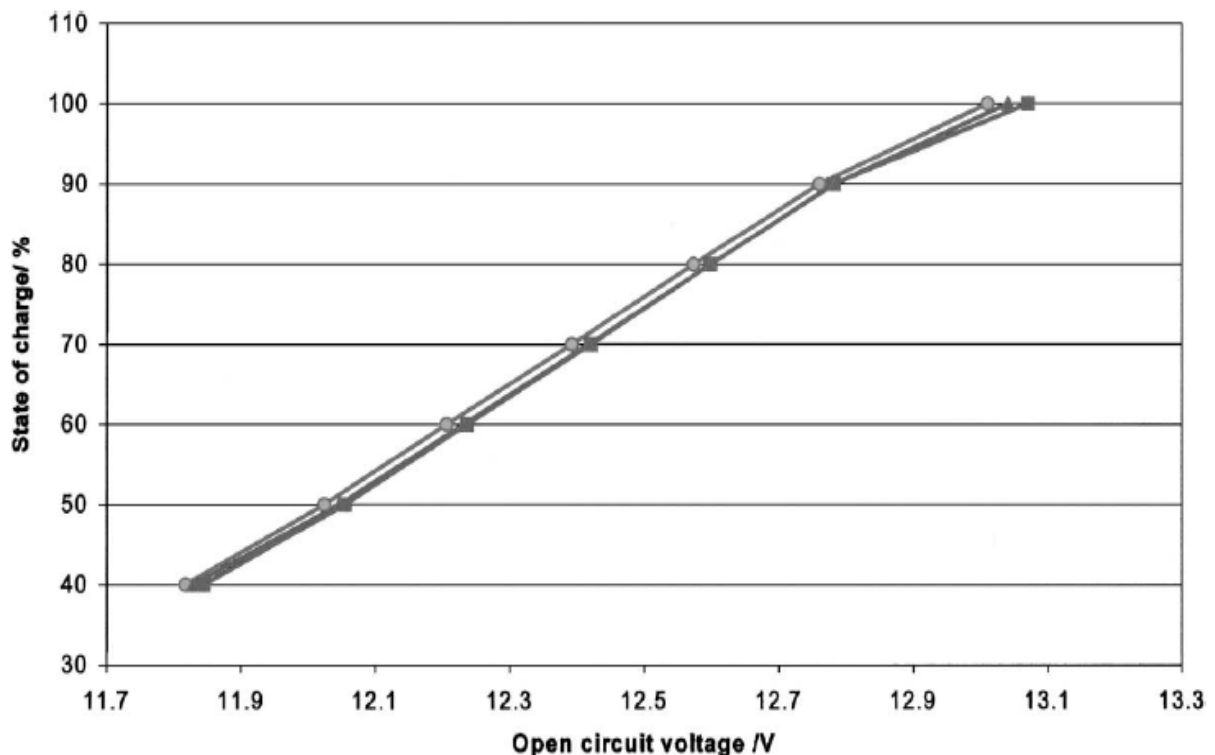
6.1.3 Μέθοδος τάσης ανοιχτού κυκλώματος

Η μέθοδος αυτήν είναι αρκετά απλή και εκμεταλλεύεται την γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.2.[29] Η τάση ανοιχτού κυκλώματος μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του SoC σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

- $V_{OC} = a_1 \cdot SOC + a_0$

Από τον παραπάνω τύπο και γνωρίζοντας την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{OC} είναι εύκολο να υπολογιστεί η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας. Οι δύο σταθερές μπορούν να υπολογιστούν γνωρίζοντας την σχέση μεταξύ V_{OC} και SoC για δύο σημεία.

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος ενός στοιχείου εξαρτάται από την θερμοκρασία του. Τα στοιχεία παρουσιάζουν μικρότερη ή μεγαλύτερη τάση ανοιχτού κυκλώματος σε χαμηλότερη ή υψηλότερη θερμοκρασία αντίστοιχα. Παράλληλα κάθε στοιχείο έχει τα δικά του κατασκευαστικά χαρακτηριστικά γεγονός που προκαλεί διακυμάνσεις στην τάση ακροδεκτών μεταξύ των διάφορων στοιχείων. Για τον λόγο αυτό η συγκεκριμένη μέθοδος εμφανίζει συνήθως σφάλματα κατά τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης της μπαταρίας. Για πιο ακριβείς υπολογισμούς η μπαταρία πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας (ανοιχτοκυκλωμένη) για μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρις ότου η τάση ανοιχτοκύκλωσης σταθεροποιηθεί. Το γεγονός αυτό έχει αρνητικές συνέπειες στον χρόνο που απαιτείται για τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης και ως αποτέλεσμα, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν ενδείκνυται για όλες τις εφαρμογές.



Εικόνα 6.2: Σχέση τάσης ανοιχτοκύκλωσης - SoC για μπαταρία μολύβδου-οξέος 12V

Σε εφαρμογές ωστόσο που παρουσιάζουν συχνές και μεγάλης διάρκειας περιόδους αδράνειας, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα, η μέθοδος της τάσης ανοιχτού κυκλώματος είναι ιδιαίτερα βολική. Ακόμα και στις περιπτώσεις αυτές ωστόσο πρέπει να συνδυαστεί με κάποια άλλη μέθοδο υπολογισμού ώστε να διασφαλίζεται η συνεχής ένδειξη της στάθμης φόρτισης ακόμα και όταν η μπαταρία είναι υπό φορτίο.

Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και της στάθμης φόρτισης δεν είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα όλων των τύπων μπαταριών.[29][30]

6.1.4 Μέθοδος τάσης ακροδεκτών μπαταρίας

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί την τάση ακροδεκτών της μπαταρίας με σκοπό τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης. Η τάση ακροδεκτών της μπαταρίας παρουσιάζει γραμμική σχέση με την ηλεκτρεγερτική της δύναμη (EMF), η οποία με την σειρά της είναι κατά προσέγγιση γραμμική σε σχέση με την στάθμη φόρτισης της μπαταρίας. Αυτό συνεπάγεται επομένως την σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας και της στάθμης φόρτισής της, όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση:

- $V_{BATT} = a_1 \cdot SOC + a_0$

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαίτερα απλή και βολική λόγω της ευκολίας μέτρησης της τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας V_{BATT} . Παρόλα αυτά παρουσιάζει πολύ μεγάλα σφάλματα ιδιαίτερα προς το τέλος της διαδικασίας εκφόρτισης, όπου η τάση της μπαταρίας σημειώνει απότομη πτώση. Ταυτόχρονα γίνεται εύκολα κατανοητό πως η εφαρμογή της δεν έχει κανένα νόημα σε περίπτωση που η τάση φτάσει το ανώτατο ή κατώτατο όριο της σε περίπτωση φόρτισης ή εκφόρτισης αντίστοιχα και οι διαδικασίες συνεχίζονται υπό σταθερή τάση ακροδεκτών.[28]

6.1.5 Γραμμική μέθοδος

Σύμφωνα με την γραμμική μέθοδο, η μεταβολή της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει της έντασης ρεύματος, της τάσης ακροδεκτών και της προηγούμενης τιμής της στάθμης φόρτισης σύμφωνα με των παρακάτω τύπο:

- $\Delta SOC(i) = a_0 + a_1 \cdot V_{BATT}(i) + a_2 \cdot I_{BATT}(i) + a_3 \cdot SOC(i-1)$

Επομένως η τιμή της στάθμης φόρτισης υπολογίζεται ως εξής:

- $SOC(i) = SOC(i-1) + \Delta SOC(i)$

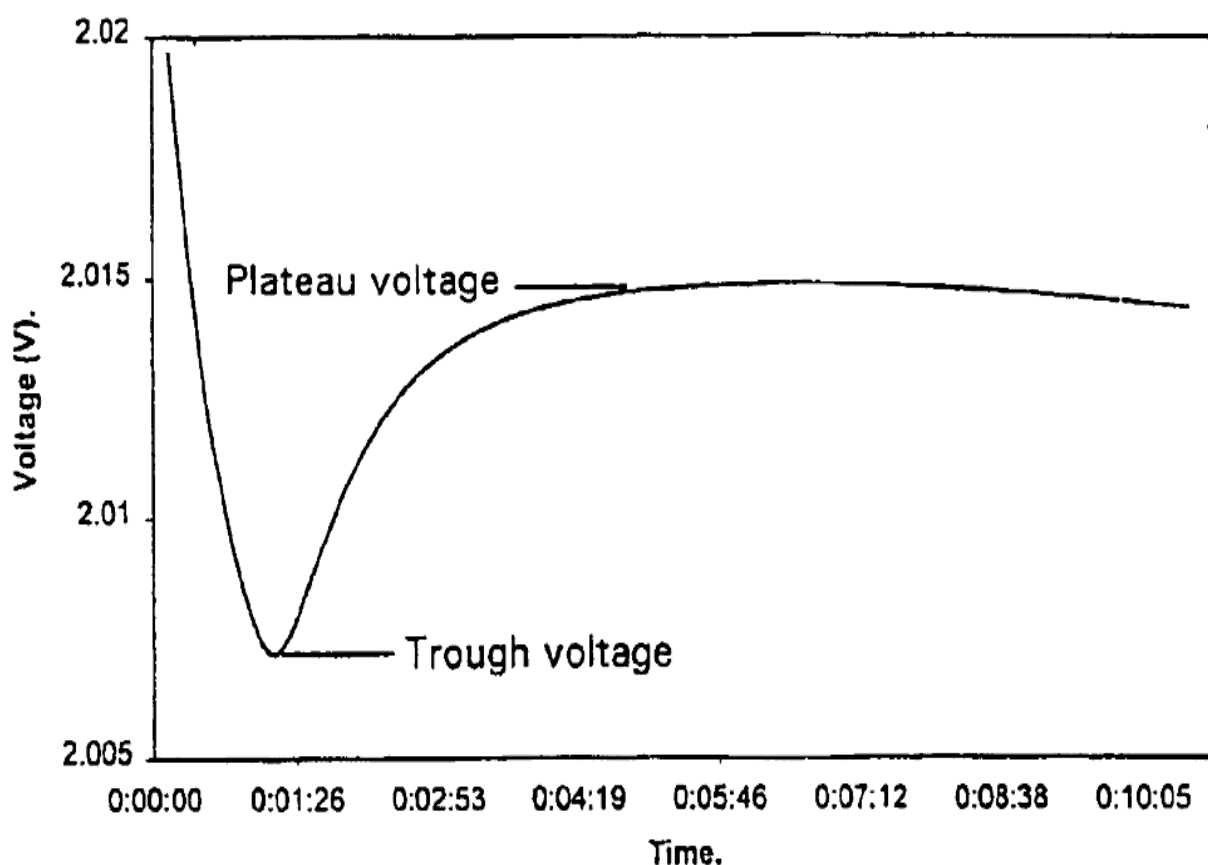
Οι τέσσερις σταθερές υπολογίζονται με την μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας δεδομένα αναφοράς.

Το συγκεκριμένο μοντέλο αναπτύχθηκε για εφαρμογές φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπου η μπαταρία διαρρέεται από χαμηλής έντασης ρεύμα και δεν παρατηρούνται απότομες μεταβολές στην στάθμη φόρτισης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους τύπους μπαταριών και ανεξάρτητα από το στάδιο ζωής τους.[29]

6.1.6 Coup de fouet (λωρίο μάστιγος)

Το φαινόμενο coup de fouet είναι η μικρή πτώση τάσης που παρατηρείται κατά την έναρξη της διαδικασίας εκφόρτισης μιας πλήρους φορτισμένης μπαταρίας μολύβδου-οξέος. Ονομάζεται έτσι (λωρίο μάστιγος) λόγω του χαρακτηριστικού σχήματος της κυματομορφής της τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.3. Εξετάζοντας την περιοχή coup de fouet μπορούμε να εξάγουμε τις δύο ακόλουθες τιμές:

- trough voltage, η ελάχιστη τιμή της τάσης
- plateau voltage, η μέγιστη τιμή της τάσης στο τέλος της περιοχής coup de fouet



Εικόνα 6.3: Περιοχή coup de fouet

Οι δύο αυτές μεταβλητές παρουσιάζουν γραμμική σχέση με την εναπομένουσα χωρητικότητα της μπαταρίας, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη σχέση[31]:

- $Capacity = m_x \cdot V_x + c_x$

Στην θέση της μεταβλητής V_x μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από τις δύο τιμές που εξάγονται από την περιοχή coup de fouet (trough voltage ή plateau voltage), ενώ οι σταθερές m_x και c_x προκύπτουν μετά από ελεγχόμενες εκφορτίσεις.

Εφόσον η περιοχή coup de fouet εμφανίζεται μόνο μετά από πλήρη φόρτιση της μπαταρίας, η μέθοδος ενδείκνυται μόνο για εφαρμογές όπου οι πλήρεις φορτίσεις είναι συχνές. Οι εφευρέτες της τεχνικής αυτής προτείνουν την χρήση της σε εφαρμογές συστημάτων τηλεπικοινωνιών.[29][31]

6.1.7 Μέθοδος μέτρησης των φυσικών ιδιοτήτων του ηλεκτρολύτη

Στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος ο ηλεκτρολύτης συμμετέχει στις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά τις διαδικασίες εκφόρτισης και φόρτισης. Η γραμμική σχέση μεταξύ της μεταβολής της πυκνότητας οξέος στον ηλεκτρολύτη και της στάθμης φόρτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του SoC. Η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου είναι εφικτή σε μπαταρίες μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη. Η μέτρηση της πυκνότητας οξέος μπορεί να γίνεται άμεσα ή έμμεσα με την βοήθεια της συγκέντρωσης ιόντων, της αγωγιμότητας, του δείκτη διάθλασης, του ιξώδους και υπερήχων.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής σχετίζονται με την εμφάνιση του φαινομένου στρωματοποίησης οξέος, την απώλεια νερού από τον ηλεκτρολύτη και την μακροπρόθεσμη ευστάθεια των αισθητήρων. Τα πρώτα δύο μπορούν να αποφευχθούν μέσω της ανακύκλωσης του ηλεκτρολύτη με αυτόματα συστήματα αναπλήρωσης νερού. Επιπλέον, οι μετρήσεις των φυσικών χαρακτηριστικών του ηλεκτρολύτη δεν πρέπει να γίνονται στους πόρους των ηλεκτροδίων, όπου το οξύ ή καταναλώνεται είτε παράγεται.[29]

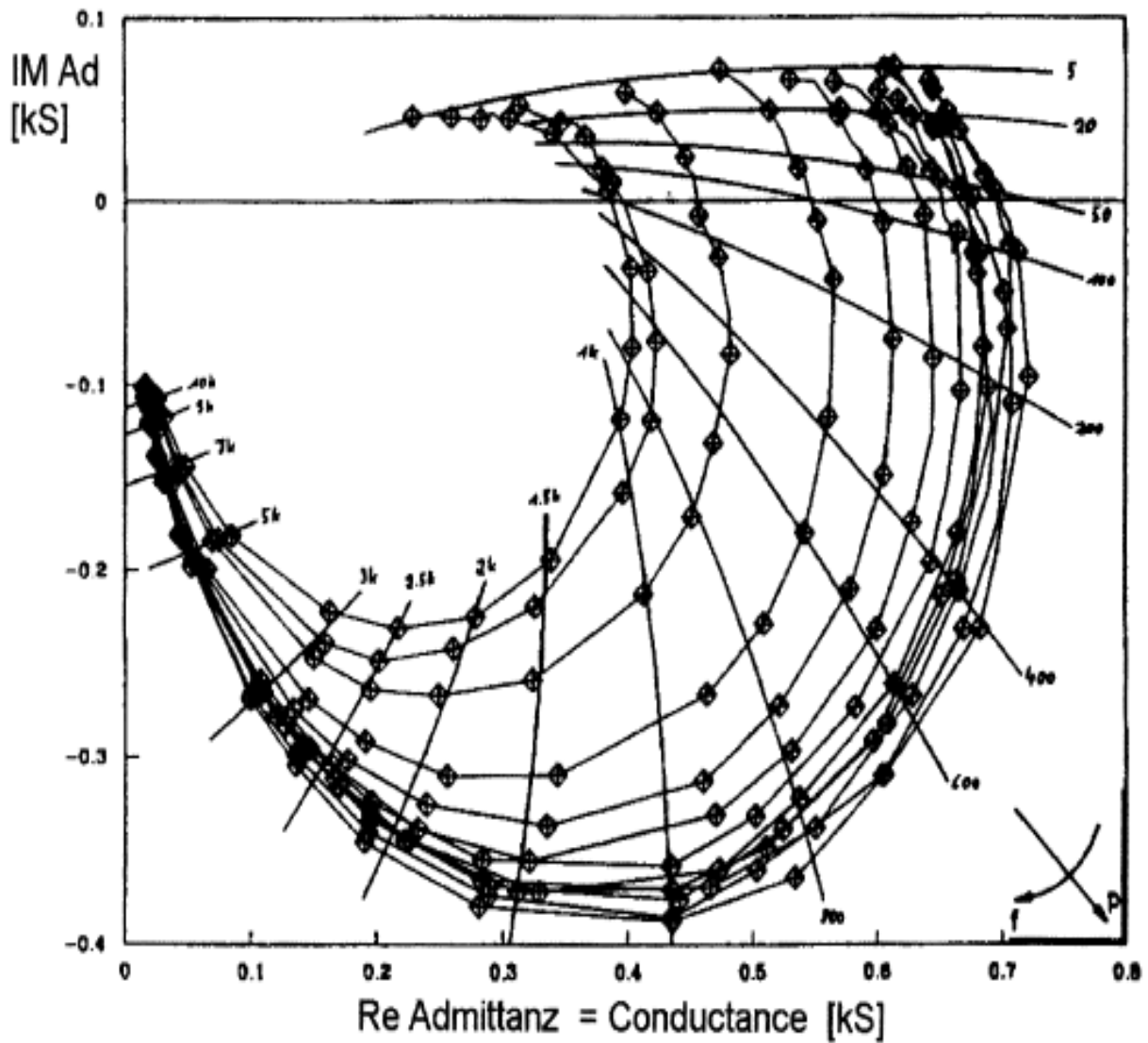
6.1.8 Μέθοδος φασματοσκοπίας σύνθετης αντίστασης

Η μέθοδος της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας της σύνθετης αντίστασης EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) της μπαταρίας χρησιμοποιεί το φάσμα της σύνθετης αντίστασης για τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας για τον υπολογισμό της κατάστασης υγείας SoH και της στάθμης φόρτισης SoC της μπαταρίας, καθώς τα δύο αυτά μεγέθη επηρεάζονται από την σύνθετη της αντίσταση. Στην εικόνα 6.4[29] φαίνεται το διάγραμμα Nyquist της σύνθετης αντίστασης μιας μπαταρίας μολύβδου-οξέος κατά την εκφόρτισή της.

Παρά τον μεγάλο αριθμό επιστημονικών άρθρων και την εκτενή θεωρητική προσέγγιση της μεθόδου ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας της σύνθετης αντίστασης, σπάνια αυτήν χρησιμοποιείται στην πράξη για τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας. Οι καμπύλες της σύνθετης αντίστασης επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Έτσι η καταλληλότερη χρήση της μεθόδου αφορά μπαταρίες που βρίσκονται σε ελεγχόμενο θερμοκρασιακό περιβάλλον. Η επίδραση της θερμοκρασίας γίνεται ακόμα πιο έντονη σε χαμηλές συχνότητες. Επομένως για ακριβέστερους υπολογισμούς της στάθμης φόρτισης της μπαταρίας με την συγκεκριμένη μέθοδο απαιτούνται υψηλές συχνότητες λειτουργίας.

Η μέθοδος της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας της σύνθετης αντίστασης είναι καταλληλότερη για εφαρμογή σε μπαταρίες μολύβδου-οξέος σε σχέση με μπαταρίες ιόντων

λιθίου, νικελίου και καδμίου. Επιπλέον η πληροφορία που παρέχει για την κατάσταση υγείας SoH της μπαταρίας είναι πιο ακριβής σε σχέση με την πληροφορία για την στάθμη φόρτισης SoC.[29][30]



Εικόνα 6.4: Διάγραμμα Nyquist σύνθετης αντίστασης μπαταρίας μολύβδου-οξέος

6.1.9 Μέθοδος εσωτερικής αντίστασης

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό της τιμής της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας, την αναλογία δηλαδή της πτώσης της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (EMF) ως προς την μεταβολή της έντασης του ρεύματος εκφόρτισης.

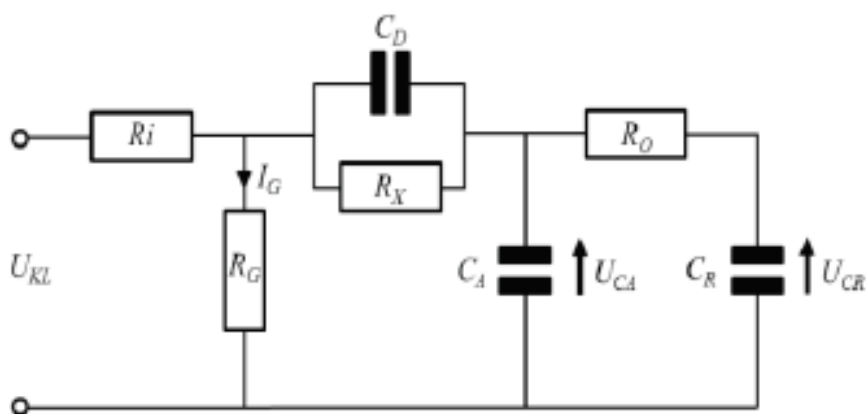
Η υπολογιζόμενη τιμή της εσωτερικής αντίστασης εξαρτάται άμεσα από το χρονικό διάστημα υπολογισμού. Για χρονικό διάστημα μικρότερο των 10ms λαμβάνονται υπόψη μόνο οι ωμικές επιδράσεις. Αν ωστόσο το χρονικά διάστημα υπολογισμού αυξηθεί, η τιμή της εσωτερικής αντίστασης γίνεται σύνθετη, καθώς λαμβάνονται υπόψη και άλλα φαινόμενα, όπως αντιδράσεις μεταφοράς και διάχυση του οξέος. Στην περίπτωση αυτή καθίσταται προτιμότερη η χρήση της μεθόδου ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας της σύνθετης αντίστασης που αναλύθηκε προηγουμένως.

Σε μια μπαταρία μολύβδου-οξέος η μεταβολή στην τιμή της εσωτερικής αντίστασης μεταξύ πλήρους και μηδενικής φόρτισης είναι της τάξης των μερικών mΩ ανά στοιχείο. Η συγκεκριμένη μέθοδος, όπως και η προηγούμενη παρέχει πιο ακριβείς πληροφορίες για την κατάσταση υγείας SoH της μπαταρίας σε σχέση με την στάθμη φόρτισης SoC.[29]

6.1.10 Φίλτρα Kalman

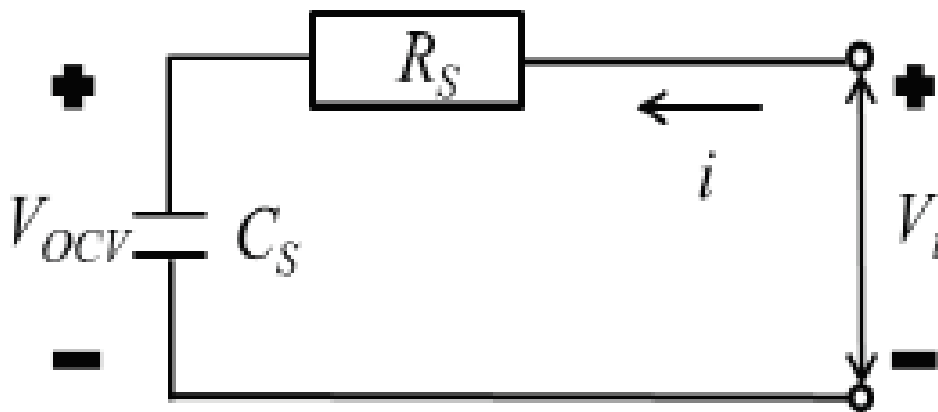
Ένα φίλτρο Kalman είναι ένας αλγόριθμος που υπολογίζει τις εσωτερικές μεταβλητές κατάστασης οποιουδήποτε δυναμικού συστήματος. Στην περίπτωσή μας το δυναμικό σύστημα είναι η μπαταρία και μία από τις μεταβλητές κατάστασης είναι η στάθμη φόρτισης. Έτσι λοιπόν για τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης απαιτείται η μοντελοποίηση του συστήματος της μπαταρίας.

Ένα βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι μπορεί να παρέχει εκτιμήσεις για την στάθμη φόρτισης της μπαταρίας στην μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Το γεγονός αυτό την καθιστά ιδανική για εφαρμογή σε ηλεκτρικά ή υβριδικά οχήματα. Το δυναμικό μοντέλο της μπαταρίας για τις περιπτώσεις αυτές φαίνεται στην εικόνα 6.5.



Εικόνα 6.5: Μοντέλο μπαταρίας για δυναμικές εφαρμογές

Στην πράξη ωστόσο χρησιμοποιείται πιο συχνά η μέθοδος διευρυμένων φίλτρων Kalman EKF (Extended Kalman Filters) εξαιτίας των μη γραμμικών χαρακτηριστικών της μπαταρίας. Η βελτιωμένη αυτή μέθοδος υπολογισμού της στάθμης φόρτισης απαιτεί ένα μοντέλο μπαταρίας που μπορεί να αναπαραστήσει την μεταβατική κατάσταση λειτουργίας με μεγαλύτερη ακρίβεια και παρέχει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τα απλά φίλτρα Kalman. Ένα τέτοιο μοντέλο που χρησιμοποιεί την τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OCV}), την ένταση ρεύματος (i), την εσωτερική αντίσταση (R_S) και την τάση ακροδεκτών (V_t) φαίνεται στην εικόνα 6.6. Αν και η μέθοδος αυτήν έχει την δυνατότητα να υπολογίζει την στάθμη φόρτισης της μπαταρίας κατά την μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, έχει το μειονέκτημα ότι ο χρόνος υπολογισμού αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών κατάστασης.[30]

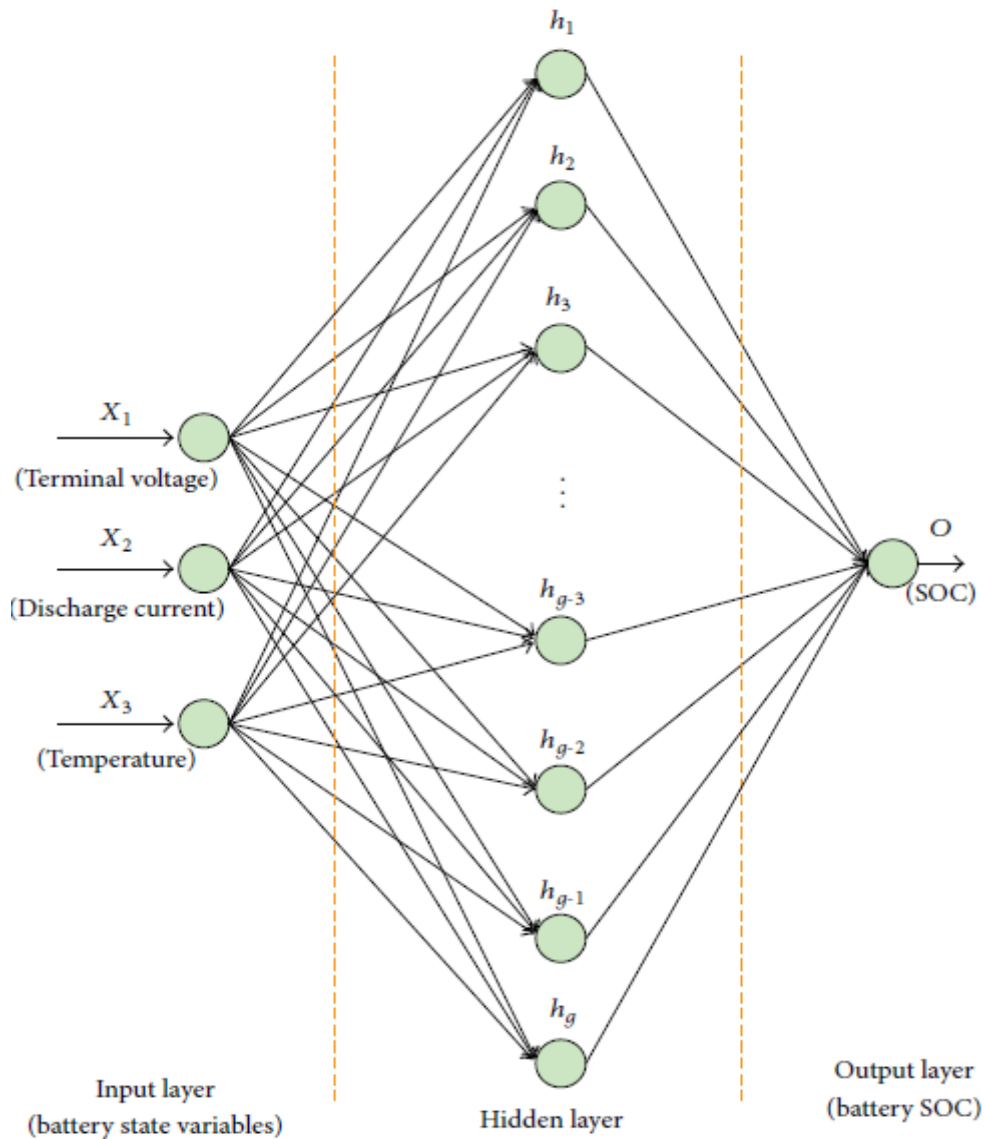


Εικόνα 6.6: Μοντέλο μπαταρίας για EKF

6.1.11 Νευρωνικά δίκτυα

Εφόσον τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν την δυνατότητα να εξάγουν μια σχέση που συνδέει δεδομένα εισόδου και εξόδου οποιουδήποτε τύπου, η μέθοδος αυτήν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού είναι απαραίτητη η χρήση δεδομένων εκπαίδευσης, που προκύπτουν από άλλες έγκυρες μεθόδους υπολογισμού της στάθμης φόρτισης. Τα δεδομένα αυτά καθώς και η μέθοδος εκπαίδευσης διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στο σφάλμα υπολογισμού της στάθμης φόρτισης.[29]

Τα νευρωνικά δίκτυα BP αποτελούν τον δημοφιλέστερο τύπο τεχνητών νευρωνικών δικτύων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές υπολογισμού της στάθμης φόρτισης λόγω της εξαιρετικής τους ικανότητας σε μη γραμμική απεικόνιση, αυτοοργάνωση και αυτοεκμάθηση. Ένα νευρωνικό δίκτυο υπολογίζει την τιμή της στάθμης φόρτισης χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου διάφορα χαρακτηριστικά της μπαταρίας, όπως τάση ακροδεκτών, ένταση ρεύματος, τιμή εσωτερικής αντίστασης και θερμοκρασία.



Εικόνα 6.7: Αρχιτεκτονική BP νευρωνικού δικτύου για υπολογισμό SoC

Η αρχιτεκτονική ενός νευρωνικού δικτύου BP για τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης φαίνεται στην εικόνα 6.7. Το συγκεκριμένο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από τρία στρώματα[28]:

- στρώμα εισόδου (input layer)
Έχει 3 νευρώνες για την τάση ακροδεκτών, την ένταση ρεύματος εκφόρτισης και την θερμοκρασία της μπαταρίας
- κρυφό στρώμα (hidden layer)
Περιέχει g νευρώνες.
- στρώμα εξόδου (output layer)
Περιέχει 1 νευρόνα για την στάθμη φόρτισης.

6.1.12 Σύνοψη

Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τεχνικές υπολογισμού στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας, με τους τύπους εφαρμογής, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.[29]

Τεχνική	Τύπος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
ελεγχόμενη εκφόρτιση	όλοι οι τύποι	ευκολία	έλλειψη αμεσότητας
		ακρίβεια	χρονική καθυστέρηση
		ανεξαρτησία από SoH	μεταβολή κατάστασης μπαταρίας απώλειες ενέργειας
μέθοδος Coulomb	όλοι οι τύποι	αμεσότητα	ανάγκη μοντέλου υπολογισμού απωλειών
		ευκολία	ευαισθησία σε παρασιτικές αντιδράσεις
		ακρίβεια *	υψηλό κόστος μετρητικού εξοπλισμού * ανάγκη σημείων αναπροσαρμογής *
τάση ανοιχτού κυκλώματος	μολύβδου	αμεσότητα	χρονική καθυστέρηση
	λιθίου		ανάγκη μεγάλων περιόδων αδράνειας
	ψευδάργυρου	χαμηλό κόστος	σφάλμα λόγω στρωματοποίησης οξέος
	άλλοι τύποι		ευαισθησία σε παρασιτικές αντιδράσεις
τάση ακροδεκτών	όλοι οι τύποι	αμεσότητα	μεγάλα σφάλματα προς το τέλος εκφόρτισης
		χαμηλό κόστος	
γραμμική μέθοδος	μολύβδου	αμεσότητα	ανάγκη δεδομένων αναφοράς
		ευκολία	
coup de fouet	μολύβδου	χαμηλό κόστος	ανάγκη κατάστασης πλήρους φόρτισης
			υπολογισμός εναπομένουσας χωρητικότητας σε αρχικό στάδιο εκφόρτισης
			ανάγκη δεδομένων αναφοράς
μετρήσεις ηλεκτρολύτη	μολύβδου	αμεσότητα	σφάλμα λόγω στρωματοποίησης οξέος
	ψευδάργυρου	SoH	αστάθεια αισθητήρων
	άλλοι τύποι		ευαισθησία σε μεταβολές θερμοκρασίας
σύνθετη αντίσταση	όλοι οι τύποι	αμεσότητα	ευαισθησία σε μεταβολές θερμοκρασίας
		SoH	υψηλό κόστος
εσωτερική αντίσταση	μολύβδου	αμεσότητα	ακρίβεια μόνο για χαμηλό SoC
		ευκολία	
	νικελίου-καδμίου	χαμηλό κόστος	
	SoH		
φίλτρα Kalman	όλοι οι τύποι	αμεσότητα	ανάγκη κατάλληλου μοντέλου μπαταρίας
			αυξημένη χρήση υπολογιστικών πόρων
νευρωνικά δίκτυα	όλοι οι τύποι	αμεσότητα	ανάγκη δεδομένων εκπαίδευσης

Πίνακας 6.1: Μέθοδοι υπολογισμού SoC – Χαρακτηριστικά

6.2 Έλεγχος μεθόδων υπολογισμού SoC σε Matlab-Simulink

Στην ενότητα αυτήν δοκιμάζονται μέσω προσομοιώσεων ορισμένες από τις μεθόδους υπολογισμού της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας που αναλύθηκαν προηγουμένως. Λόγω περιορισμών του μοντέλου μπαταρίας στο Simulink είναι αδύνατος ο έλεγχος των μεθόδων σύνθετης και εσωτερικής αντίστασης, καθώς η τιμή της θεωρείται σταθερή. Τα νευρωνικά δίκτυα και τα φίλτρα Kalman ξεφεύγουν από τα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, ενώ τέλος ο υπολογισμός του SoC μέσω μετρήσεων του οξέος του ηλεκτρολύτη μπορεί να γίνει μόνο στην πράξη.

6.2.1 Coup de fouet

Όπως είδαμε και στην ενότητα 6.1.6, η εναπομένουσα χωρητικότητα μιας μπαταρίας παρουσιάζει γραμμική σχέση με τις τιμές τάσης trough ή plateau που εξάγονται από την περιοχή coup de fouet (εικόνα 6.3). Η συγκεκριμένη σχέση μπορεί να εκφραστεί με τις ακόλουθες εξισώσεις:

- $Capacity_t = m_t \cdot V_t + c_t$
- $Capacity_p = m_p \cdot V_p + c_p$

Οι δείκτες t και p αναφέρονται στην τάση trough και plateau αντίστοιχα. Αν στις παραπάνω σχέσεις αντικαταστήσουμε την χωρητικότητα που απομένει με την στάθμη φόρτισης της μπαταρίας έχουμε:

- $SOC_t = m_t \cdot V_t + c_t$
- $SOC_p = m_p \cdot V_p + c_p$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών m και c είναι απαραίτητη η χρήση δεδομένων αναφοράς, που προκύπτουν μέσω δοκιμών εκφόρτισης. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιούνται κάτω από διαφορετικές θερμοκρασίες και για διάφορες τιμές ρυθμού εκφόρτισης.

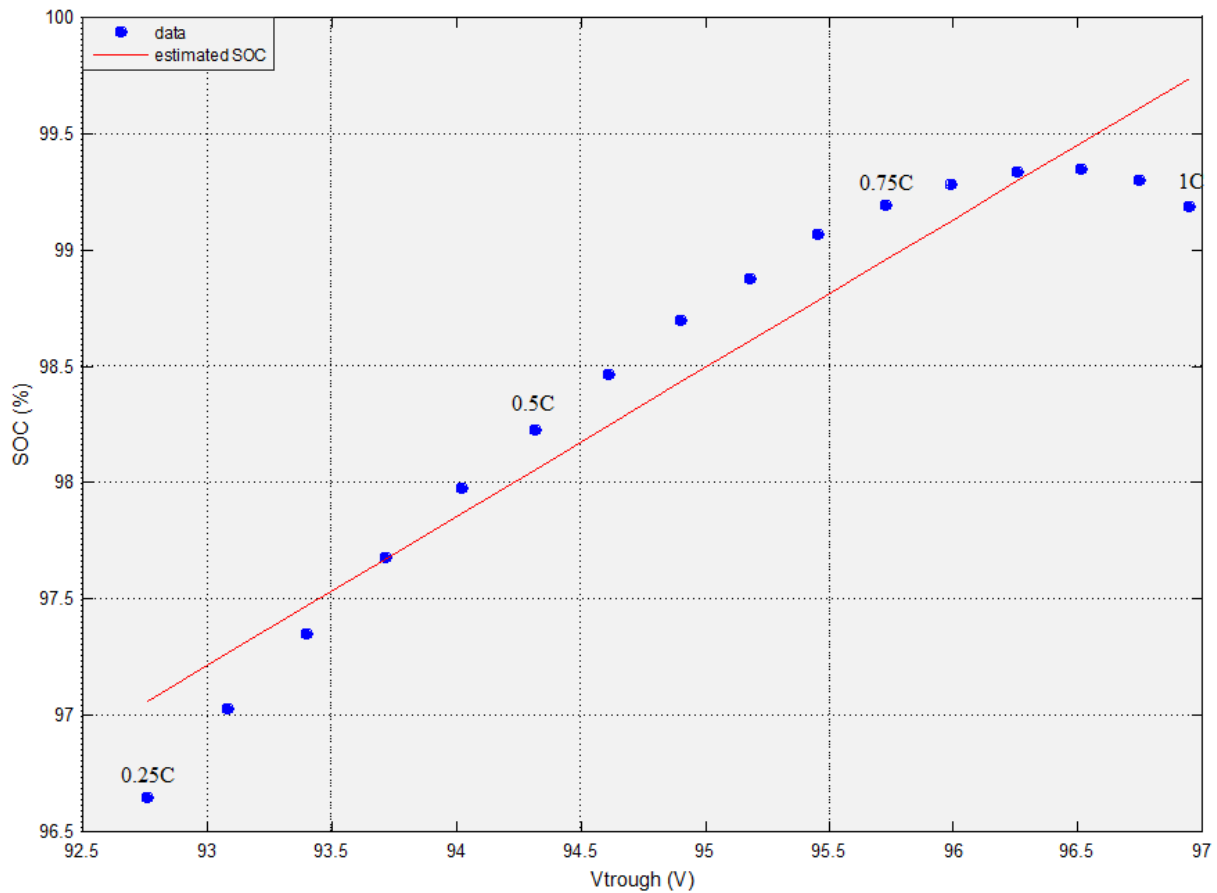
Δεδομένου ότι το μοντέλο της μπαταρίας είναι ανεξάρτητο της θερμοκρασίας, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για ένα μεγάλο εύρος τιμών ρυθμού εκφόρτισης και συγκεκριμένα για 1C-0.25C (440A-110A) με βήμα 0.05C (22A). Για κάθε μια από τις τιμές αυτές εξήχθησαν από την περιοχή coup de fouet τα ζευγάρια V_t -SoC_t καθώς και V_p -SoC_p. Οι τιμές τις στάθμης φόρτισης προέκυψαν από την ενσωματωμένη μέθοδο μέτρησης αμπερών.

Οι σχέσεις μεταξύ στάθμης φόρτισης και τιμών τάσης trough και plateau, που προέκυψαν με την εφαρμογή της μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων (παράρτημα Α) είναι:

- $SOC_t = 0.6391 \cdot V_t + 37.7769$
- $SOC_p = 2.6572 \cdot V_p - 158.5$

ρυθμός εκφόρτισης	V_t (V)	SOC_t (%)	m_t	c_t	SOC (%)	απόλυτο σφάλμα (%)	σχετικό σφάλμα (%)
1.00C	92.7586	96.6455	0.6391	37.7769	97.0589	0.4134	0.4278
0.95C	93.0824	97.0285			97.2659	0.2374	0.2446
0.90C	93.4004	97.3522			97.4691	0.1169	0.1201
0.85C	93.7128	97.6748			97.6688	0.0060	0.0062
0.80C	94.0190	97.9768			97.8644	0.1124	0.1147
0.75C	94.3188	98.2288			98.0560	0.1728	0.1759
0.70C	94.6128	98.4649			98.2439	0.2210	0.2244
0.65C	94.8997	98.6967			98.4273	0.2694	0.2730
0.60C	95.1801	98.8767			98.6065	0.2702	0.2733
0.55C	95.4536	99.0641			98.7813	0.2828	0.2855
0.50C	95.7226	99.1910			98.9532	0.2378	0.2397
0.45C	95.9903	99.2814			99.1243	0.1571	0.1582
0.40C	96.2562	99.3344			99.2942	0.0402	0.0404
0.35C	96.5123	99.3454			99.4579	0.1125	0.1133
0.30C	96.7455	99.3010			99.6069	0.3059	0.3081
0.25C	96.9479	99.1863			99.7363	0.5500	0.5545

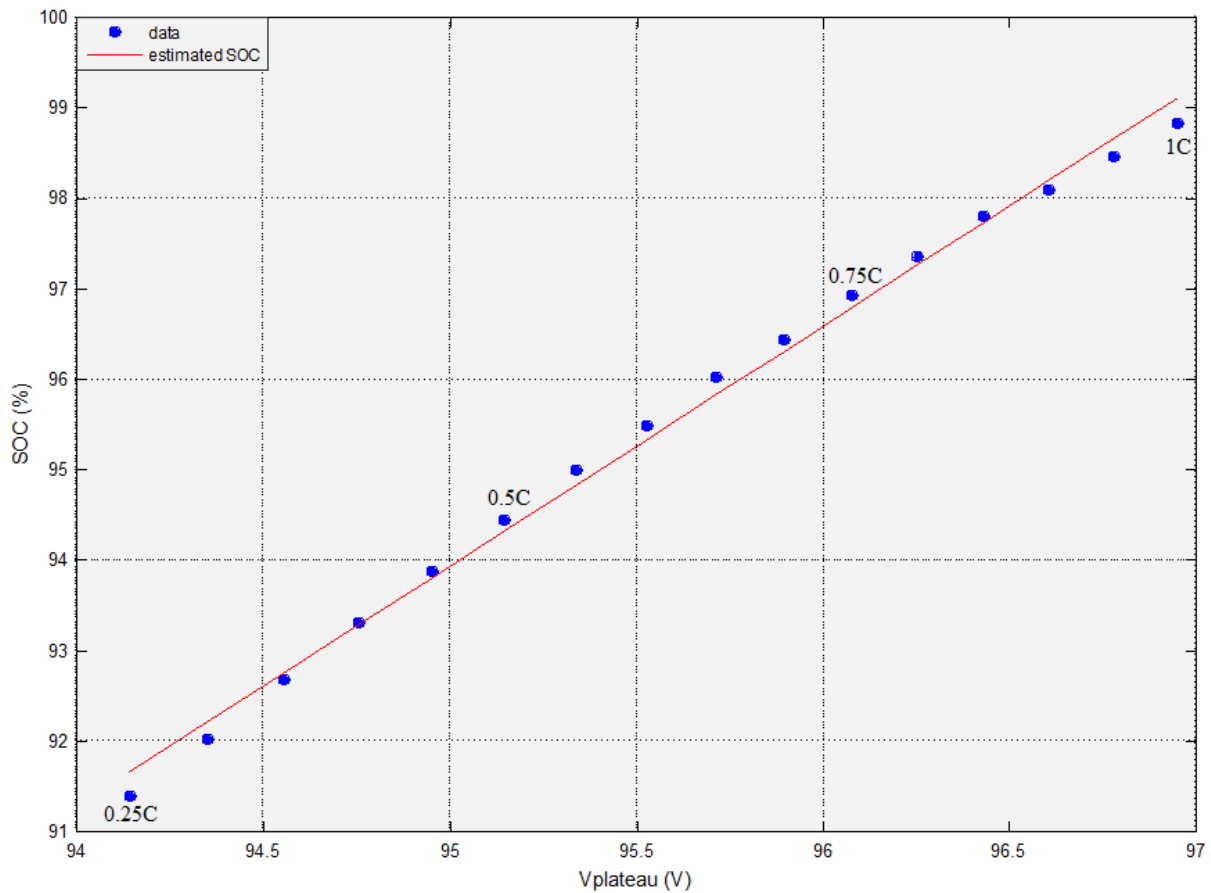
Πίνακας 6.2: Υπολογισμός SoC με βάση την τιμή της τάσης trough



Εικόνα 6.8: SoC συναρτήσει τάσης trough

ρυθμός εκφόρτισης	V_p (V)	SOC_p (%)	m_p	c_p	SOC (%)	απόλυτο σφάλμα (%)	σχετικό σφάλμα (%)
1.00C	94.1419	91.3971	2.6572	-158.5	91.6539	0.2568	0.2809
0.95C	94.3495	92.0215			92.2055	0.1840	0.1999
0.90C	94.5536	92.6740			92.7478	0.0738	0.0797
0.85C	94.7540	93.3005			93.2803	0.0202	0.0216
0.80C	94.9512	93.8684			93.8043	0.0641	0.0683
0.75C	95.1453	94.4347			94.3201	0.1146	0.1214
0.70C	95.3368	94.9955			94.8289	0.1666	0.1753
0.65C	95.5252	95.4851			95.3296	0.1555	0.1629
0.60C	95.7111	96.0192			95.8235	0.1957	0.2038
0.55C	95.8944	96.4404			96.3106	0.1298	0.1346
0.50C	96.0756	96.9264			96.7921	0.1343	0.1386
0.45C	96.2546	97.3617			97.2677	0.0940	0.0965
0.40C	96.4313	97.7957			97.7373	0.0584	0.0598
0.35C	96.6065	98.0907			98.2028	0.1121	0.1143
0.30C	96.7795	98.4531			98.6625	0.2094	0.2127
0.25C	96.9509	98.8295			99.1179	0.2884	0.2918

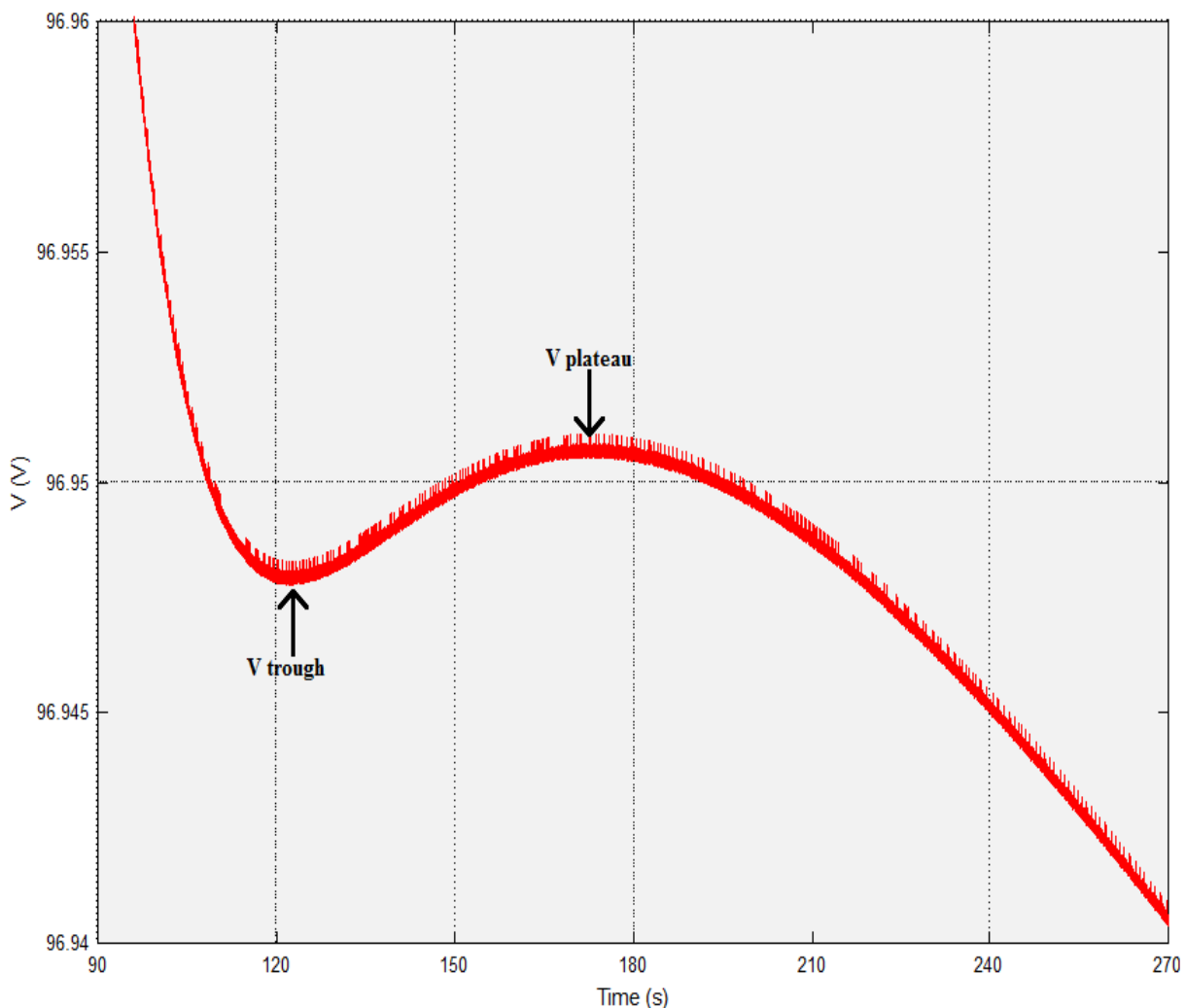
Πίνακας 6.3: Υπολογισμός SoC με βάση την τιμή της τάσης plateau



Εικόνα 6.9: SoC συναρτήσεϊ τάσης plateau

Στον πίνακα 6.2 και στην εικόνα 6.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την τιμή τάσης trough, ενώ στον πίνακα 6.3 και στην εικόνα 6.9 αυτά που αφορούν την τιμή τάσης plateau. Τα αποτελέσματα επαληθεύουν σε μεγάλο βαθμό την θεωρία της γραμμικότητας της στάθμης φόρτισης ως προς τις τιμές τάσης trough και plateau, με την δεύτερη να παρουσιάζει μικρότερα σφάλματα.

Στην εικόνα 6.10 φαίνεται η περιοχή coup de fouet για ρυθμό εκφόρτισης 0.25C. Η έλλειψη δεδομένων για μικρότερες τιμές ρυθμού εκφόρτισης οφείλεται στο γεγονός ότι η περιοχή coup de fouet δεν ήταν εμφανής στις περιπτώσεις αυτές.



Εικόνα 6.10: Περιοχή coup de fouet για ρυθμό εκφόρτισης 0.25C

Αξίζει στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος δεν παρέχει συνεχή υπολογισμό της στάθμης φόρτισης, παρά μόνο μια στιγμιαία εκτίμηση της εναπομένουσας χωρητικότητας σε πολύ αρχικό στάδιο εκφόρτισης.

6.2.2 Μέθοδος τάσης ακροδεκτών μπαταρίας

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 6.1.4, η σχέση μεταξύ της τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας και της στάθμης φόρτισης μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά γραμμική. Η σχέση αυτήν αποτυπώνεται με την μορφή της παρακάτω εξίσωσης:

- $SOC = a + b \cdot V$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών a και b είναι απαραίτητη η ύπαρξη δεδομένων αναφοράς. Τα δεδομένα αυτά εξήχθησαν μέσω προσομοίωσης εκφόρτισης με σταθερή ισχύ $P_{\text{command}}=5\text{kW}$. Οι τιμές της στάθμης φόρτισης προέκυψαν μέσω της ενσωματωμένης μεθόδου μέτρησης Coulomb.

Εφαρμόζοντας την μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων (παράρτημα Α) έχουμε:

- $a = -734.3736$
- $b = 8.3755$

Η σχέση λοιπόν μεταξύ της τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας και της στάθμης φόρτισης έχει την παρακάτω μορφή:

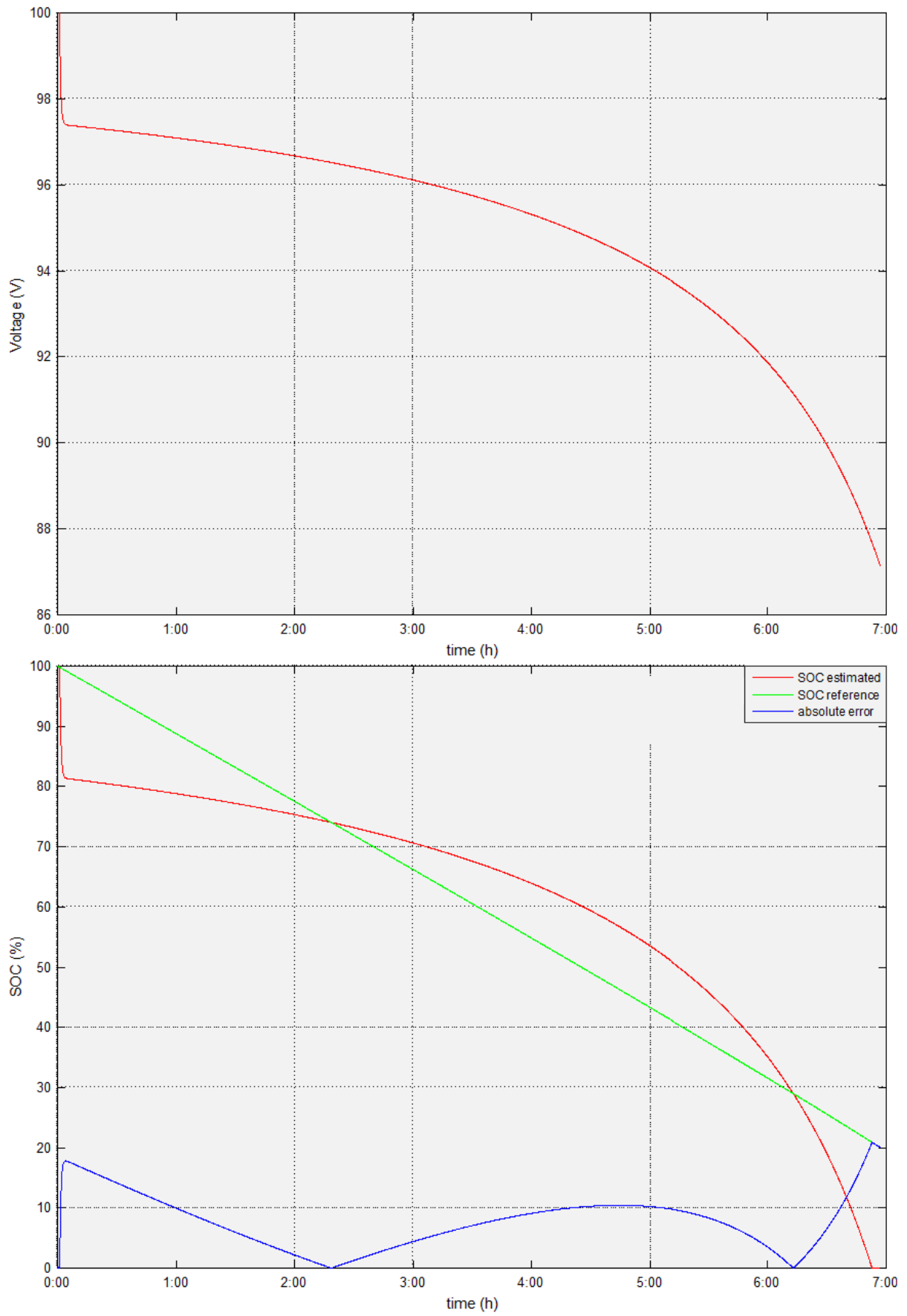
- $SOC = -734.3736 + 8.3755 \cdot V$

Στην εικόνα 6.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για εκφόρτιση με σταθερή ισχύ $P_{\text{command}}=5\text{kW}$. Το μέσο απόλυτο σφάλμα και η τυπική απόκλιση για την περίπτωση αυτήν είναι:

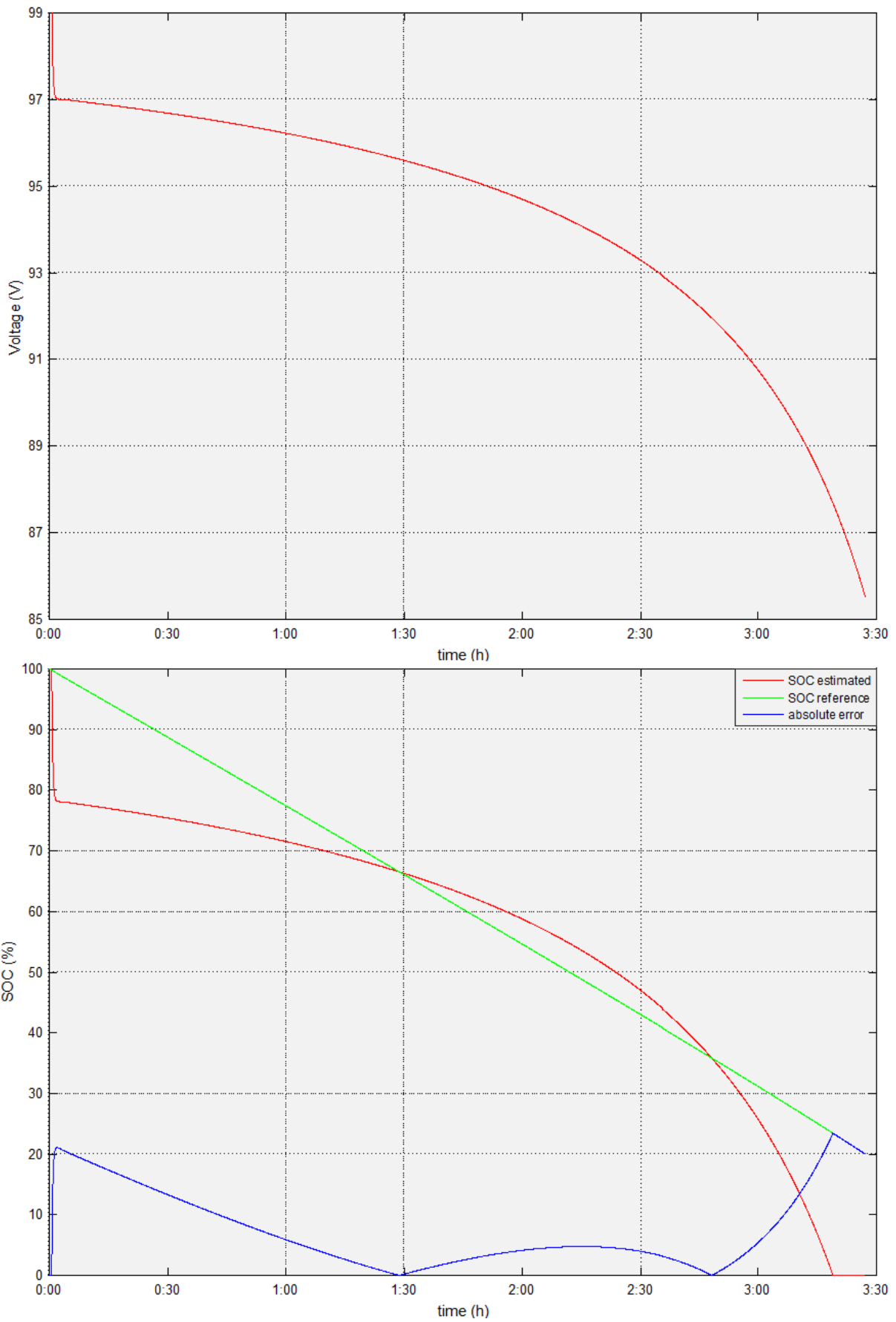
- $\bar{e} = \sum_{i=1}^n |e_i| = 7.7978\%$
- $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} = 4.5476$

Στην εικόνα 6.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για εκφόρτιση με σταθερή ισχύ $P_{\text{command}}=10\text{kW}$. Το μέσο απόλυτο σφάλμα και η τυπική απόκλιση για την περίπτωση αυτήν είναι:

- $\bar{e} = \sum_{i=1}^n |e_i| = 7.6245\%$
- $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} = 6.4734$



Εικόνα 6.11: Υπολογισμός SoC μέσω V_i (εκφόρτιση με σταθερή ισχύ 5kW)



Εικόνα 6.12: Υπολογισμός Soc μέσω V_t (εκφόρτιση με σταθερή ισχύ 10kW)

Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει έναν εναλλακτικό και απλό τρόπο υπολογισμού της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας. Όπως φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις ωστόσο, το σφάλμα υπολογισμού είναι αρκετά υψηλό κατά την έναρξη και το τέλος της διαδικασίας εκφόρτισης.

6.2.3 Γραμμική μέθοδος

Η γραμμική μέθοδος αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή της προηγούμενης μεθόδου, καθώς εκτός από την τάση ακροδεκτών της μπαταρίας λαμβάνει επίσης υπόψη την ένταση του ρεύματος και την προηγούμενη τιμή της στάθμης φόρτισης. Επομένως, ο τύπος υπολογισμού της στάθμης φόρτισης της μπαταρίας έχει την παρακάτω μορφή:

- $SOC_i = a \cdot V_i + b \cdot I_i + c \cdot SOC_{i-1} + d$

Για τον υπολογισμό των συντελεστών a, b, c και d είναι απαραίτητη η ύπαρξη δεδομένων αναφοράς. Τα δεδομένα αυτά εξήχθησαν μέσω προσομοίωσης εκφόρτισης με σταθερή ισχύ $P_{command}=5kW$. Οι τιμές της στάθμης φόρτισης προέκυψαν μέσω της ενσωματωμένης μεθόδου μέτρησης Coulomb.

Εφαρμόζοντας την μέθοδο ελάχιστων τετραγώνων (παράρτημα Β) έχουμε:

- $a = 1.4115 \cdot 10^{-9}$
- $b = -5.8820 \cdot 10^{-7}$
- $c = 1$
- $d = -2.4913 \cdot 10^{-7}$

Η σχέση λοιπόν μεταξύ της τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας, της έντασης ρεύματος και της στάθμης φόρτισης έχει την παρακάτω μορφή:

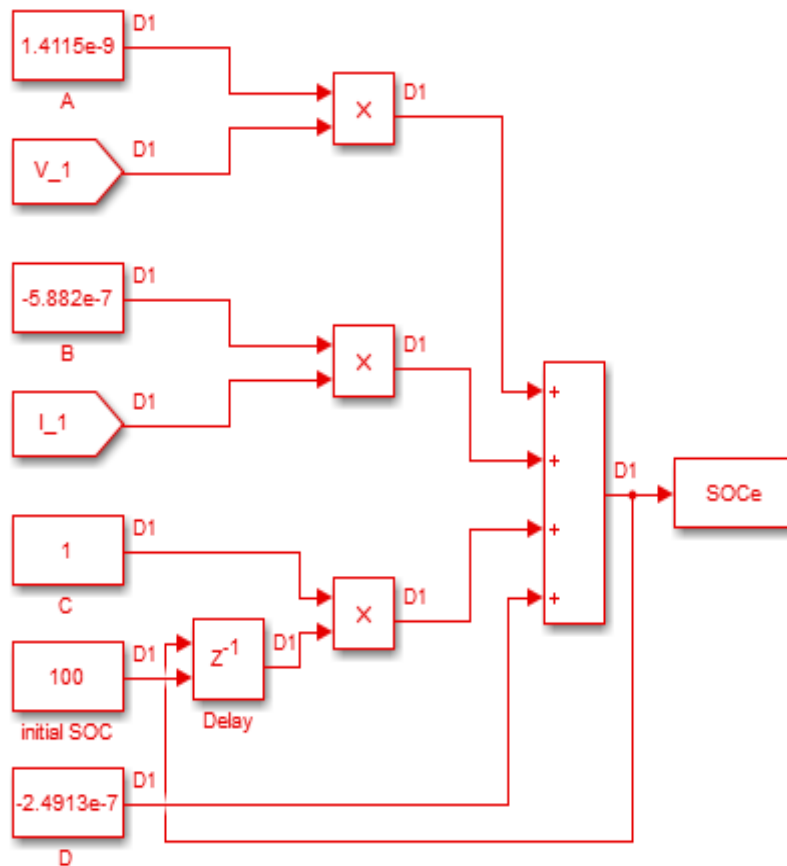
- $SOC_i = 1.4115 \cdot 10^{-9} \cdot V_i - 5.8820 \cdot 10^{-7} \cdot I_i + SOC_{i-1} - 2.4913 \cdot 10^{-7}$

Στην εικόνα 6.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για εκφόρτιση με σταθερή ισχύ $P_{command}=5kW$. Το μέσο απόλυτο σφάλμα και η τυπική απόκλιση για την περίπτωση αυτήν είναι:

- $\bar{e} = \sum_{i=1}^n |e_i| = 1.0203\%$
- $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} = 0.5948$

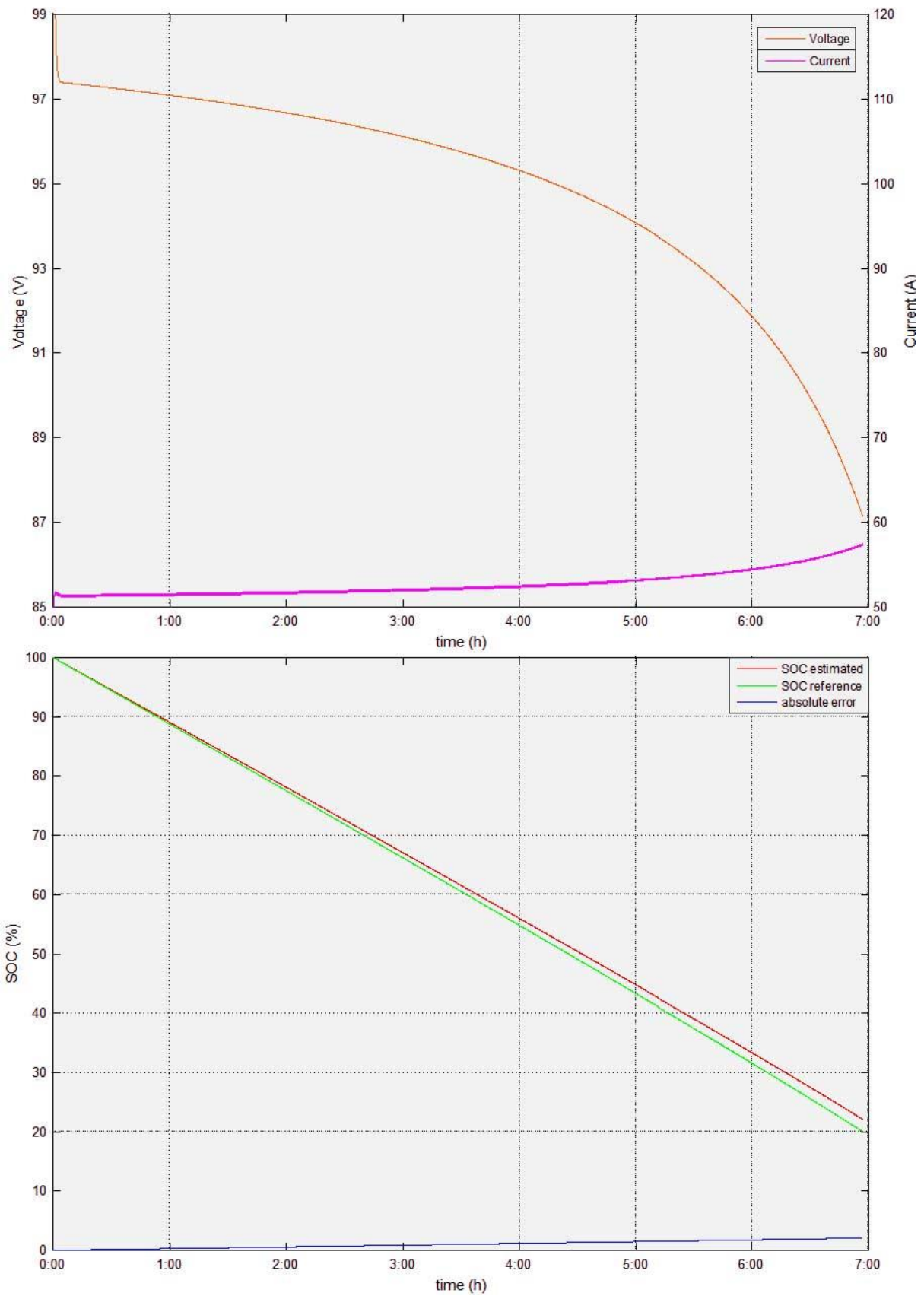
Στην εικόνα 6.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για εκφόρτιση με σταθερή ισχύ $P_{\text{command}}=10\text{kW}$. Το μέσο απόλυτο σφάλμα και η τυπική απόκλιση για την περίπτωση αυτήν είναι:

- $\bar{e} = \sum_{i=1}^n |e_i| = 1.0892\%$
- $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} = 0.6357$

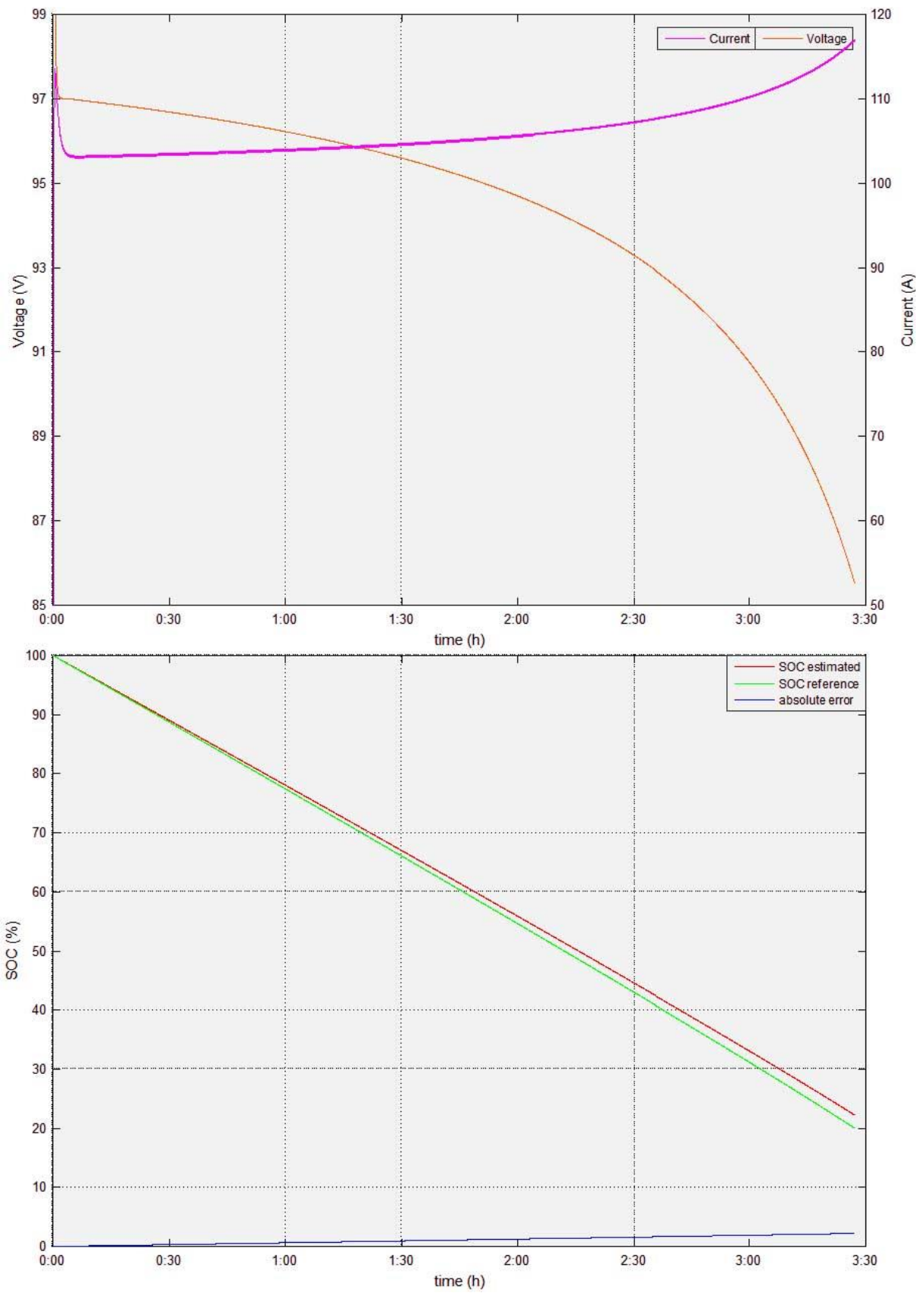


Εικόνα 6.13: Μπλοκ υπολογισμού SoC μέσω γραμμικής μεθόδου σε Simulink

Όπως φαίνεται από τις δύο πρώτες προσομοιώσεις, που αφορούν εκφόρτιση της μπαταρίας με σταθερή ισχύ, η γραμμική μέθοδος παρέχει μία αρκετά αξιόπιστη τεχνική υπολογισμού της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας. Οι τιμές του SoC που προκύπτουν με την μέθοδο αυτήν ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στα δεδομένα αναφοράς, γεγονός που επαληθεύεται και από τις χαμηλές τιμές του μέσου απόλυτου σφάλματος και της τυπικής απόκλισης.



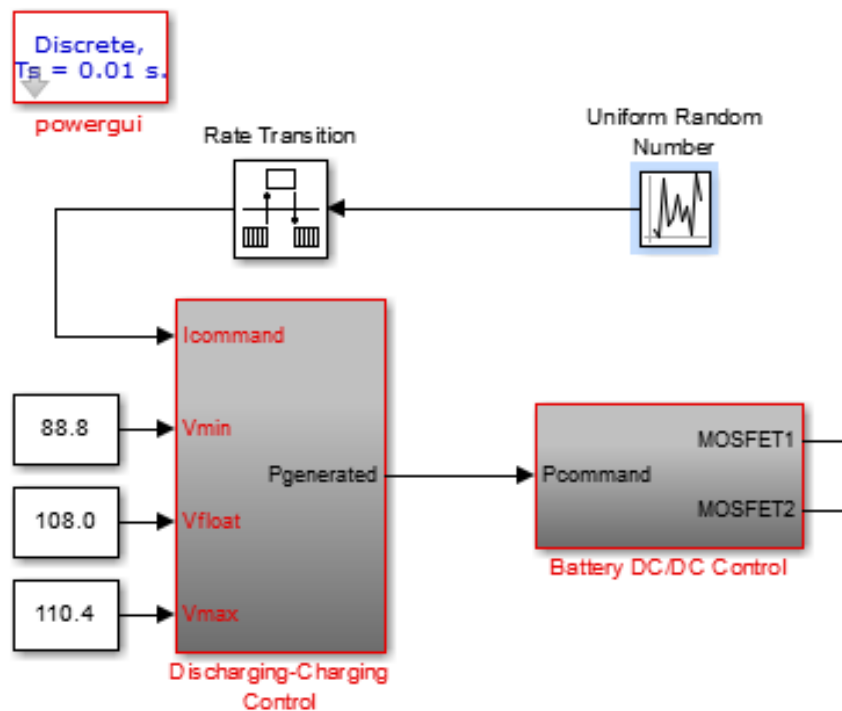
Εικόνα 6.14: Υπολογισμός SoC (εκφόρτιση με σταθερή ισχύ 5kW)



Εικόνα 6.15: Υπολογισμός SoC (εκφόρτιση με σταθερή ισχύ 10kW)

Η επόμενη προσομοίωση αφορά ελεγχόμενη εκφόρτιση με ελάχιστη τάση $V_{\min}=88.8\text{V}$ ή 1.85V ανά στοιχείο, όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 4. Στην περίπτωση αυτήν ωστόσο, αντί για σταθερό ρυθμό εκφόρτισης, χρησιμοποιούνται τυχαίες τιμές έντασης ρεύματος με πεδίο τιμών $4.4\text{A}-88\text{A}$ ($0.01\text{C}-0.2\text{C}$). Το μπλοκ παραγωγής των τυχαίων αυτών τιμών φαίνεται στην εικόνα 6.16 και έχει περίοδο δειγματοληψίας $T_s=1800\text{s}$.

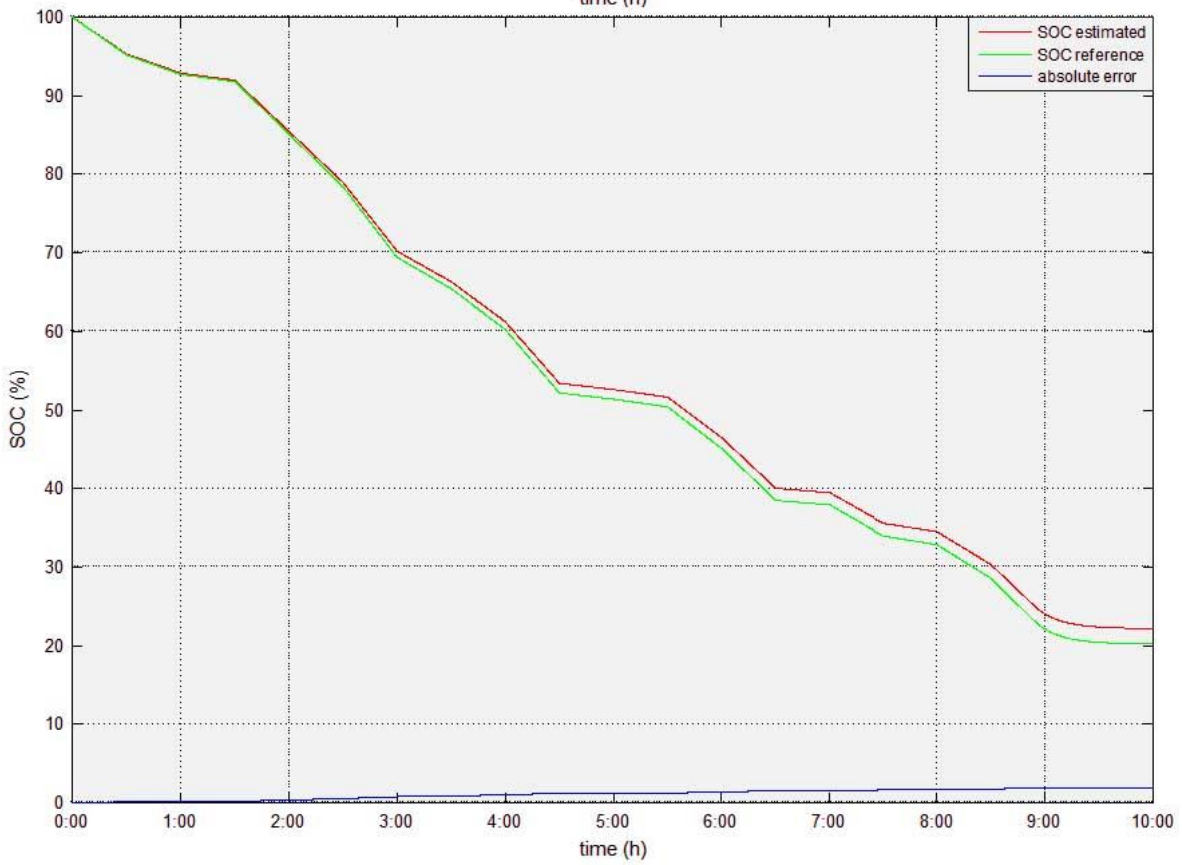
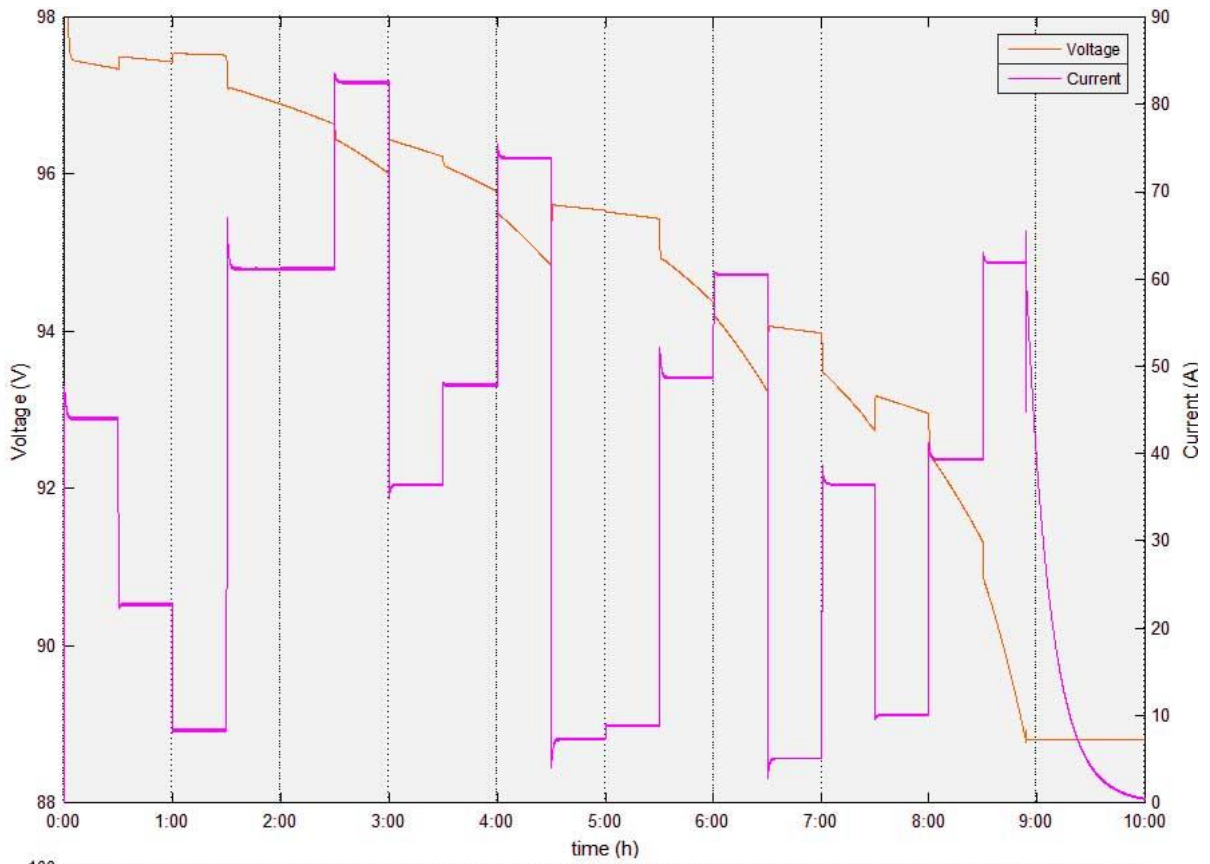
Σκοπός της προσομοίωσης αυτής είναι τόσο ο έλεγχος ανταπόκρισης της γραμμικής μεθόδου υπολογισμού στάθμης φόρτισης σε ελεγχόμενη εκφόρτιση, όσο και ο έλεγχος προσαρμογής της μεθόδου σε ραγδαίες μεταβολές του ρυθμού εκφόρτισης.



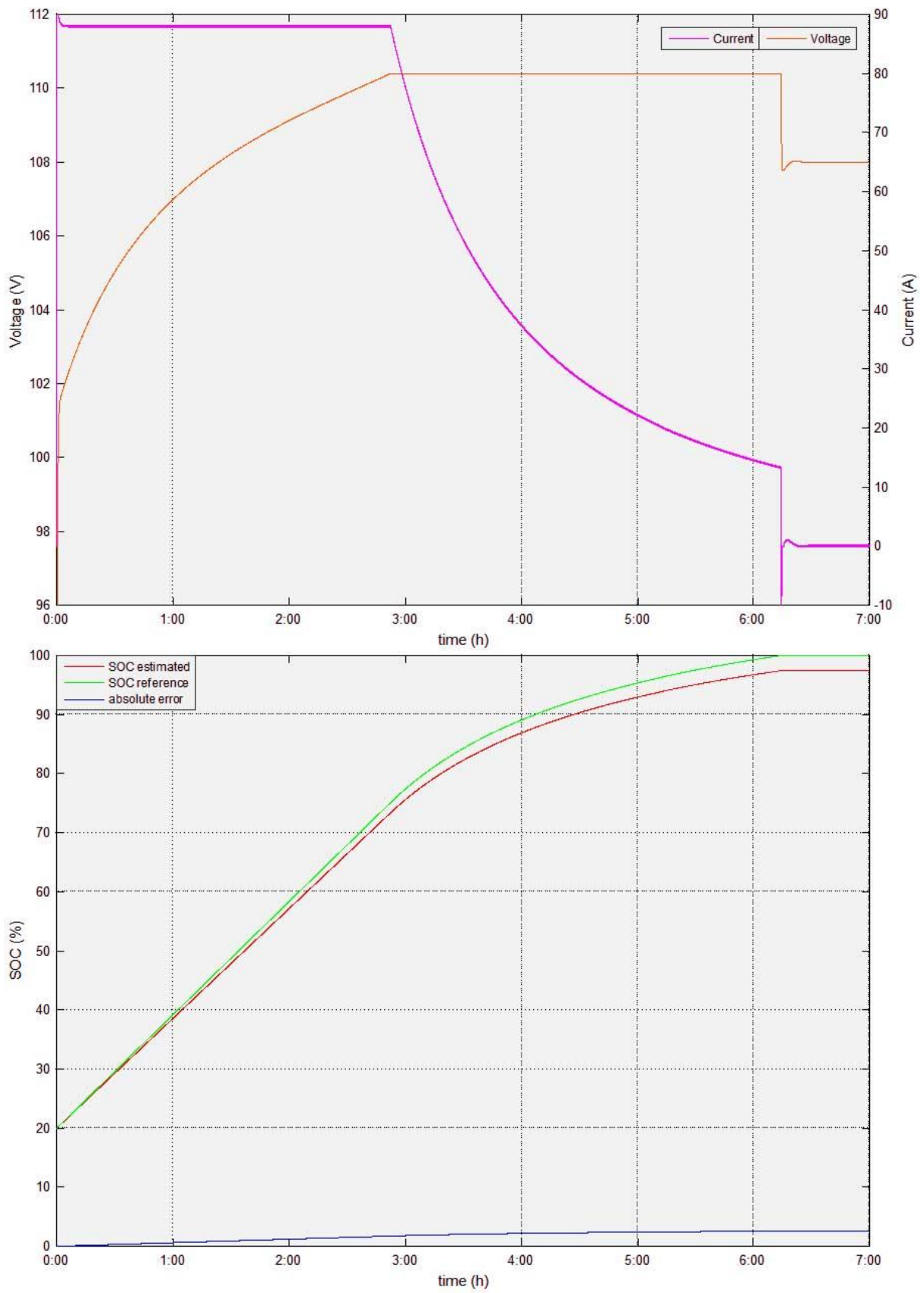
Εικόνα 6.16: Παραγωγή τυχαίων τιμών έντασης ρεύματος εκφόρτισης σε Simulink

Στην εικόνα 6.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ελεγχόμενη εκφόρτιση με ελάχιστη τάση $V_{\min}=88.8\text{V}$ και τυχαίες τιμές ρυθμού εκφόρτισης. Το μέσο απόλυτο σφάλμα και η τυπική απόκλιση για την περίπτωση αυτήν είναι:

- $\bar{e} = \sum_{i=1}^n |e_i| = 1.1045\%$
- $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} = 0.6146$



Εικόνα 6.17: Υπολογισμός SoC (εκφόρτιση με $V_{min}=88.8V$ και τυχαίες τιμές I)



Εικόνα 6.18: Υπολογισμός SoC (ελεγχόμενη φόρτιση σε τρία στάδια)

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.17, η γραμμική μέθοδος παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ελεγχόμενη εκφόρτιση και μπορεί να ανταποκριθεί άμεσα σε πολύ απότομες μεταβολές της έντασης ρεύματος.

Η τελευταία προσομοίωση υπολογισμού στάθμης φόρτισης μέσω της γραμμικής μεθόδου αφορά την λειτουργία ελεγχόμενης φόρτισης τριών σταδίων (bulk charge, absorption charge και float charge), όπως αυτήν αναλύθηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 4. Μέσω της συγκεκριμένης προσομοίωσης, ελέγχεται αν ο τύπος υπολογισμού του SoC, με τους ίδιους συντελεστές που προέκυψαν από δεδομένα εκφόρτισης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για λειτουργία φόρτισης.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 6.18. Το μέσο απόλυτο σφάλμα και η τυπική απόκλιση για την περίπτωση αυτήν είναι:

- $\bar{e} = \sum_{i=1}^n |e_i| = 1.7221\%$
- $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} = 0.8061$

Από τις κυματομορφές της εικόνας 6.18 και τις τιμές του μέσου απόλυτου σφάλματος συμπεραίνουμε ότι η γραμμική μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου αποδοτικά και για διαδικασία φόρτισης, χωρίς να απαιτούνται εκ νέου δεδομένα αναφοράς και κατ'επέκταση διαφορετικοί συντελεστές στον τύπο υπολογισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι για λειτουργία εκφόρτισης η ένταση του ρεύματος λαμβάνει αρνητικές τιμές, ενώ στην γραφική παράσταση απεικονίζεται με αντίθετο πρόσημο για οπτικούς λόγους.

Συνοψίζοντας, η γραμμική μέθοδος υπολογισμού της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας αποτελεί μια ιδιαίτερα αξιόπιστη λύση, όπως προέκυψε από τις παραπάνω προσομοιώσεις που καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος λειτουργιών της μπαταρίας. Το μοναδικό ελάττωμα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι το γεγονός ότι η άμεση εξάρτηση από την προηγούμενη τιμή του SoC, δημιουργεί σταδιακά ένα συσσωρευόμενο σφάλμα που αυξάνει προς το τέλος της εκάστοτε λειτουργίας. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εισαγωγή σημείων αναπροσαρμογής του σφάλματος.

6.3 Μέθοδος Coulomb με σημεία αναπροσαρμογής σφάλματος

Όπως είδαμε και στην υποενότητα 6.1.2, η μέθοδος μέτρησης Coulomb αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνική υπολογισμού της στάθμης φόρτισης μιας μπαταρίας. Η ύπαρξη του ολοκληρώματος ωστόσο στον τύπο υπολογισμού δημιουργεί τον κίνδυνο λανθασμένων ενδείξεων, λόγω συσσώρευσης του σφάλματος. Δύο ενδεικτικοί τρόποι επίλυσης του

συγκεκριμένου προβλήματος είναι η χρήση ενός μοντέλου υπολογισμού των απωλειών καθώς και η χρήση σημείων αναπροσαρμογής του σφάλματος.

Η τροποποιημένη μέθοδος Coulomb αποτελεί μια βελτιωμένη εκδοχή της τεχνικής αυτής, που παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς της στάθμης φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αντικατάστασης της έντασης ρεύματος εκφόρτισης της μπαταρίας με την παρακάτω συνάρτηση:

- $$I_c(t) = k_2 \cdot I_{BAT}(t)^2 + k_1 \cdot I_{BAT}(t) + k_0$$

Οι συντελεστές k_2 , k_1 και k_0 υπολογίζονται πειραματικά. Όπως φαίνεται και από τον τύπο ο σταθερός όρος παρέχει μια εκτίμηση των σταθερών απωλειών ενώ ο δευτεροβάθμιος όρος αναφέρεται στις απώλειες που εξαρτώνται από τον ρυθμό εκφόρτισης.[32]

Στην ενότητα αυτήν αναπτύσσεται ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της στάθμης φόρτισης μια μπαταρίας. Ο τρόπος αυτός βασίζεται στην μέθοδο μέτρησης Coulomb με την χρήση σημείων αναπροσαρμογής του σφάλματος.

Σύμφωνα με την απλή μέθοδο μέτρησης Coulomb η στάθμη φόρτισης μιας μπαταρίας υπολογίζεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

- $$SOC(t) = SOC(0) + \frac{1}{C_{max}} \cdot \int_0^t I_{BAT}(\tau) d\tau$$

Με την χρήση σημείων αναπροσαρμογής ωστόσο ο παραπάνω τύπος παίρνει την ακόλουθη μορφή:

- $$SOC(t) = SOC(t_c) + \frac{1}{C_{max}} \cdot \int_{t_c}^t I_{BAT}(\tau) d\tau$$

Ο δείκτης c αναφέρεται σε κάποιο σημείο αναπροσαρμογής. Παράλληλα με την στάθμη φόρτισης το συγκεκριμένο μοντέλο υπολογίζει και την παρακάτω ποσότητα, που αποτελεί μια συνάρτηση διόρθωσης του σφάλματος και εξαρτάται από τις μεταβολές στον ρυθμό εκφόρτισης:

- $$correction(t) = (k - 1) \cdot \int_{t_c}^t SOC(\tau) d\tau,$$

όπου:

- $$k = 1 - a \cdot \Delta\bar{I} \cdot \left[1 - \frac{SOC(t)}{SOC(0)} \right], \Delta\bar{I} > 0$$

- $$k = \frac{1}{1 + a \cdot \Delta\bar{I} \cdot \left[1 - \frac{SOC(t)}{SOC(0)} \right]}, \Delta\bar{I} < 0$$

- $$\Delta\bar{I} = \left[\overline{I_{BAT}(t)} - \overline{I_{BAT}(t-1)} \right]$$

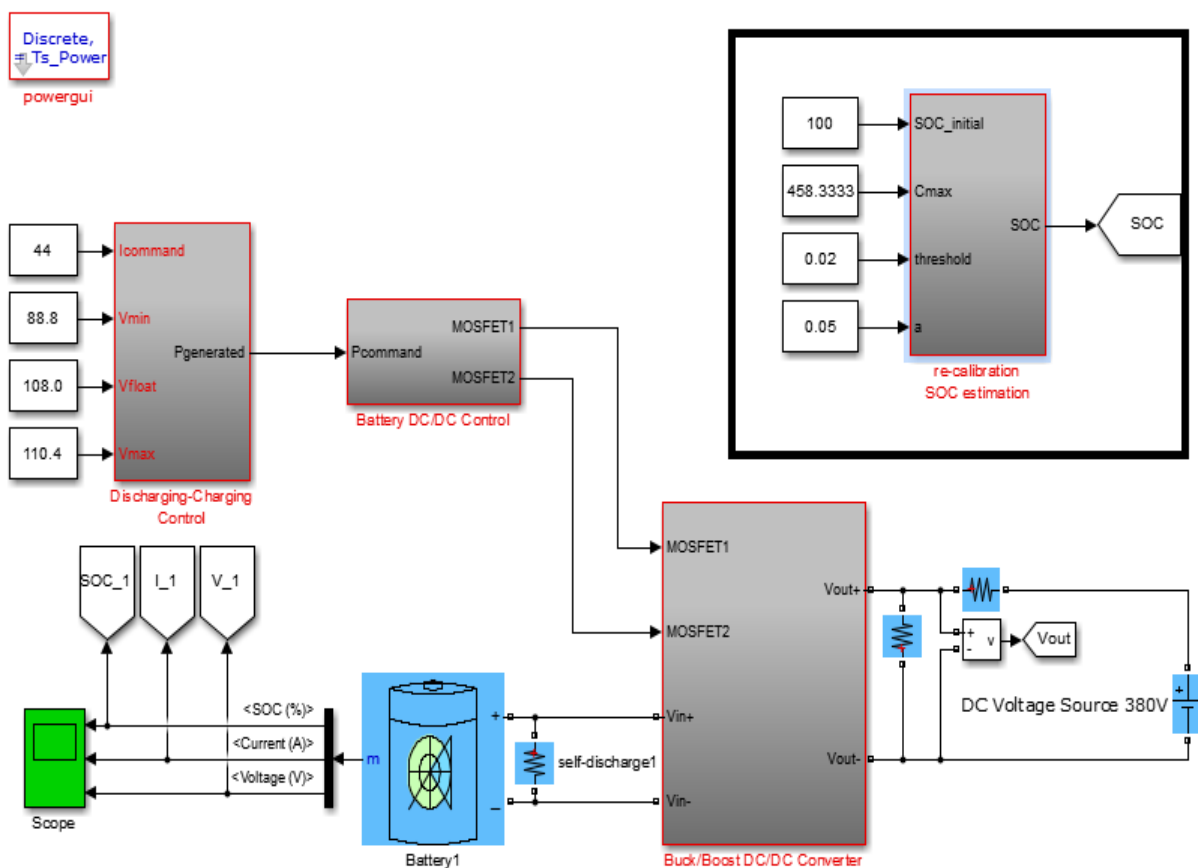
Η σταθερά α εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας και η τιμή της προκύπτει μετά από δοκιμές.

Κάποιο σημείο αναπροσαρμογής ενεργοποιείται όταν ικανοποιείται η παρακάτω συνθήκη:

- $\left| \frac{correction(t)}{SOC(t)} \right| \geq threshold$

Αυτήν την χρονική στιγμή t_c η συνάρτηση *correction* μηδενίζεται, ενώ ο τύπος υπολογισμού της στάθμης φόρτισης αλλάζει μορφή. Με άλλα λόγια κάθε φορά που ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη, ο τύπος υπολογισμού της στάθμης φόρτισης αρχικοποιείται εκ νέου, με τις νέες αρχικές συνθήκες να αφορούν την στιγμή ικανοποίησης της συνθήκης. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η συσσώρευση του σφάλματος και τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ακρίβεια.[33]

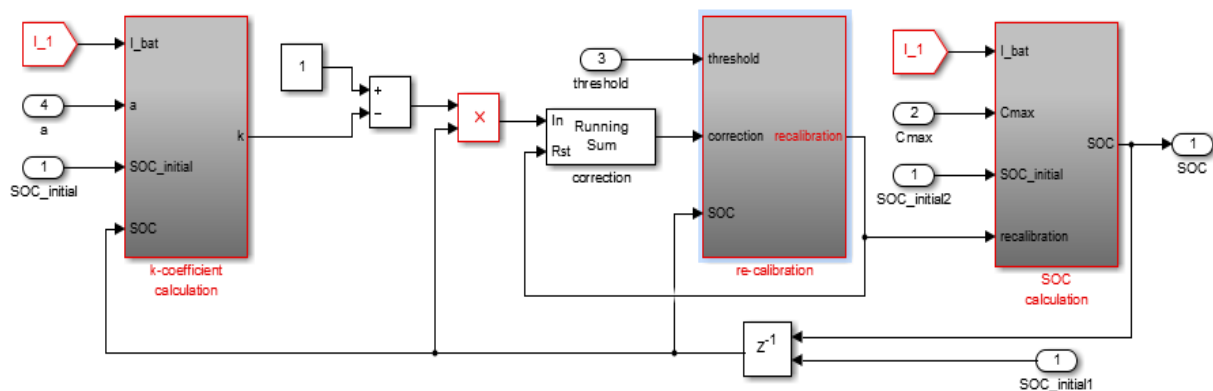
6.3.1 Υλοποίηση μεθόδου σε Simulink



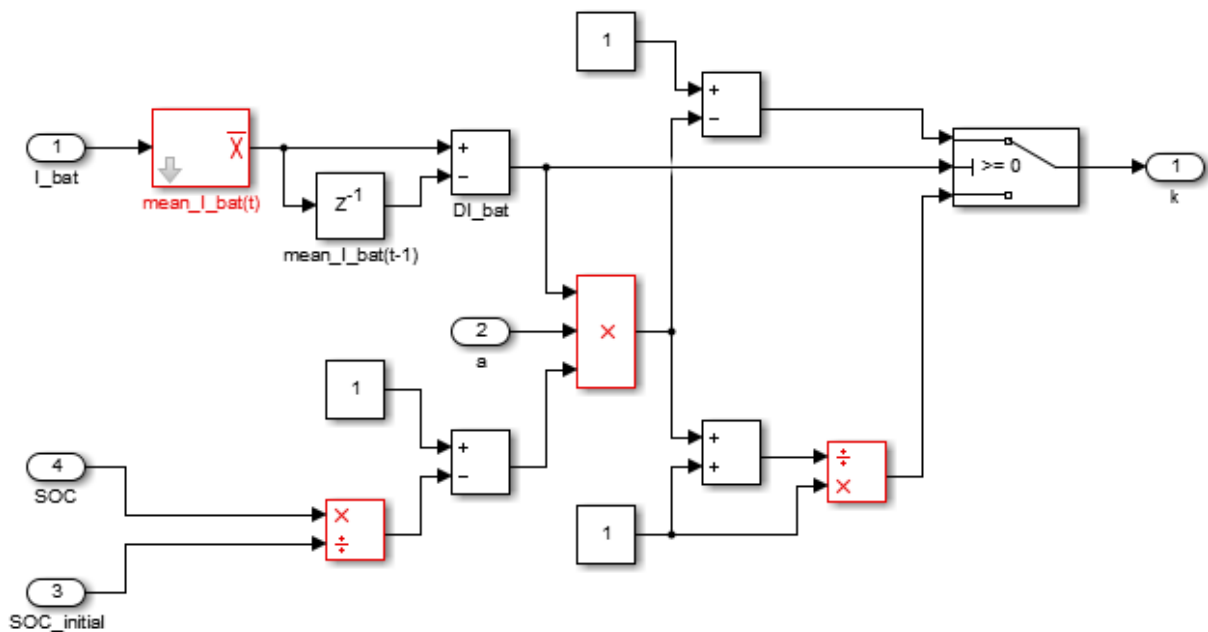
Εικόνα 6.19: Εξωτερικό μπλοκ υπολογισμού SoC

Στην εικόνα 6.19 φαίνεται το μπλοκ υπολογισμού στάθμης φόρτισης σύμφωνα με την μέθοδο που αναλύθηκε προηγουμένως. Το συγκεκριμένο μπλοκ δέχεται σαν είσοδο τα ακόλουθα μεγέθη:

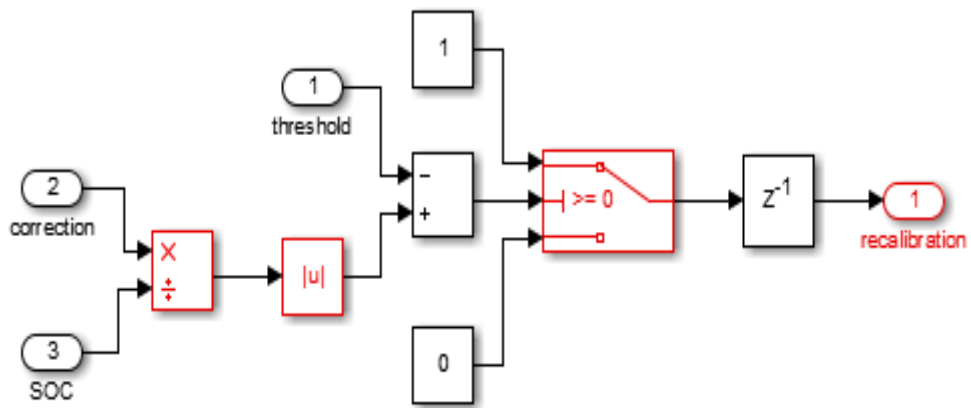
- SOC_initial, αρχική στάθμη φόρτισης
- $C_{max}=458.3333Ah$, μέγιστη χωρητικότητα μπαταρίας
- $threshold=2\%$, όριο ενεργοποίησης σημείου αναπροσαρμογής
- α , σταθερά



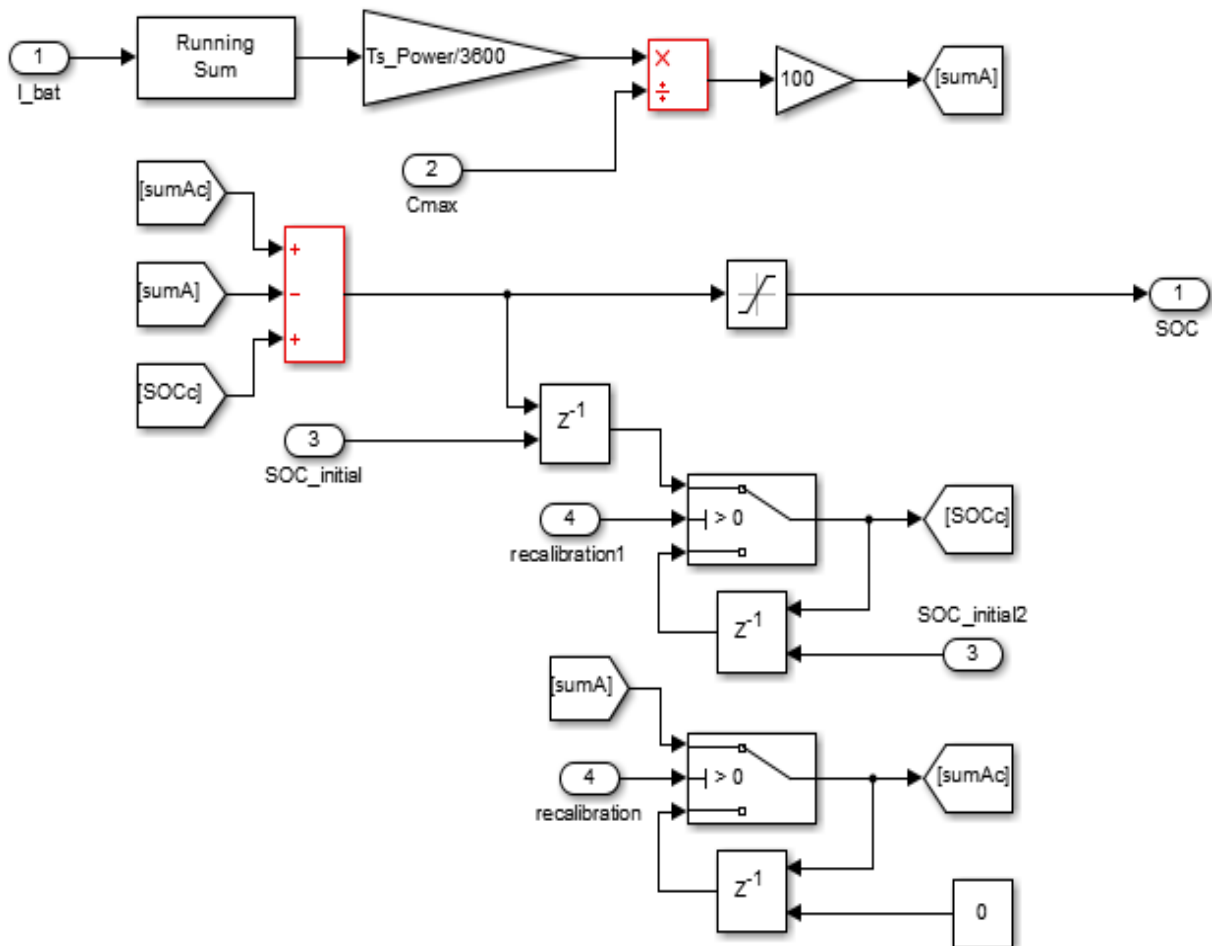
Εικόνα 6.20: Εσωτερικό μπλοκ υπολογισμού SoC



Εικόνα 6.21: Μπλοκ υπολογισμού συντελεστή k



Εικόνα 6.22: Μπλοκ ελέγχου σημείων αναπροσαρμογής σφάλματος



Εικόνα 6.23: Μπλοκ τελικού υπολογισμού SoC

Στην εικόνα 6.20 φαίνεται το εσωτερικό του μπλοκ υπολογισμού στάθμης φόρτισης. Στο μπλοκ “k-coefficient calculation” (εικόνα 6.21) υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή k , ενώ στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης $correction(t)$. Με βάση την τιμή αυτήν ελέγχεται στο μπλοκ “re-calibration” (εικόνα 6.22) η συνθήκη για τα σημεία αναπροσαρμογής. Τέλος, στο μπλοκ “SoC calculation” (εικόνα 6.23) υπολογίζεται η τιμή της στάθμης φόρτισης.

Στο παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιείται συχνά το στοιχείο “delay” για την αποφυγή αλγεβρικών σφαλμάτων, καθώς πολλά από τα υπολογιζόμενα μεγέθη και κυρίως το SoC ανατροφοδοτούνται στο σύστημα.

6.3.2 Προσομοιώσεις σε Simulink

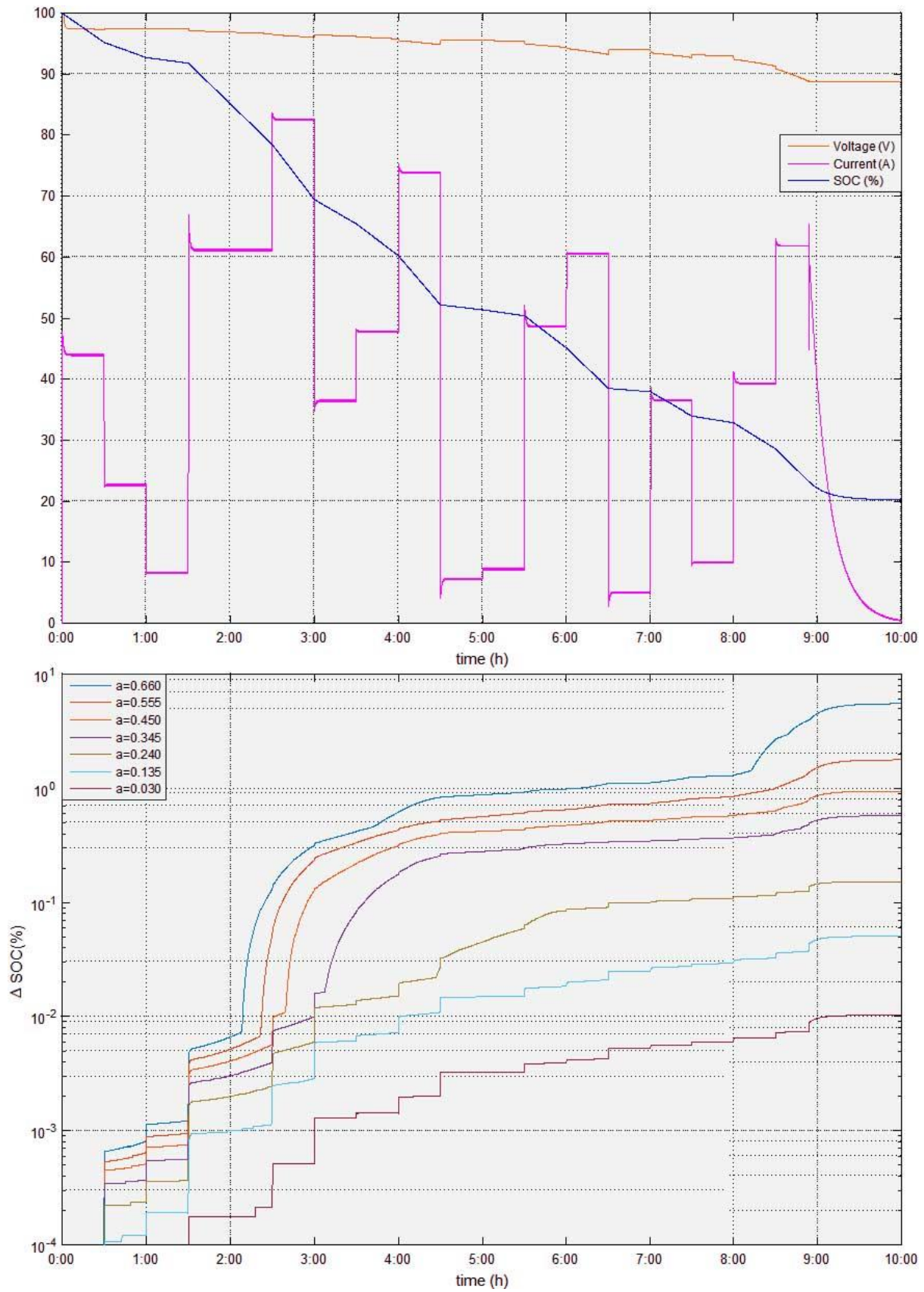
Στην ενότητα αυτήν ελέγχεται η τεχνική που αναπτύχθηκε προηγουμένως, μέσω μιας προσομοίωσης εκφόρτισης με μεταβαλλόμενη ένταση ρεύματος. Για την προσομοίωση αυτήν η μπαταρία θεωρείται αρχικά πλήρως φορτισμένη ($SOC_{initial}=100\%$), ενώ δοκιμάζονται διάφορες τιμές της σταθεράς α .

Στην εικόνα 6.24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης. Στο πάνω διάγραμμα αποτυπώνονται οι κυματομορφές της τάσης ακροδεκτών της μπαταρίας, της έντασης ρεύματος εκφόρτισης και της στάθμης φόρτισης, που προκύπτει μέσω της ενσωματωμένης απλής μεθόδου μέτρησης Coulomb, συναρτήσει του χρόνου. Στο κάτω διάγραμμα απεικονίζεται η απόκλιση στάθμης φόρτισης μεταξύ των τιμών που προέκυψαν με την μέθοδο σημείων αναπροσαρμογής σφάλματος, για διάφορες τιμές του α , και της ενσωματωμένης μεθόδου. Στο διάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται λογαριθμική κλίμακα για μεγαλύτερη ευκρίνεια των αποτελεσμάτων.

Η σταθερά α αποτελεί στην ουσία ένα μέτρο συχνότητας για τα σημεία αναπροσαρμογής σφάλματος. Συνεπώς, χαμηλές τιμές του α σημαίνουν λιγότερα σημεία αναπροσαρμογής και μικρότερες διαφορές σε σχέση με την απλή μέθοδο μέτρησης Coulomb, ενώ υψηλότερες τιμές οδηγούν σε περισσότερα σημεία αναπροσαρμογής και μεγαλύτερες αποκλίσεις. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.24 η τελική απόκλιση είναι 0.01% για $\alpha=0.03$ και 5% για $\alpha=0.66$. Οι μεγάλες αποκλίσεις προς το τέλος της διαδικασίας εκφόρτισης χαρακτηρίζονται λογικές, αφού τότε η απλή μέθοδος Coulomb παρουσιάζει τα μεγαλύτερα σφάλματα.

Στην προσομοίωση αυτήν χρησιμοποιήθηκε ένα μεγάλο εύρος τιμών της σταθεράς α με σκοπό της απόκτησης μιας γενικής εικόνας των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με την χρήση της τεχνικής μέτρησης Coulomb με σημεία αναπροσαρμογής σφάλματος. Στην πράξη ωστόσο, η τιμή της σταθεράς α πρέπει να εξαχθεί πειραματικά και πιο συγκεκριμένα μέσω ελεγχόμενης εκφόρτισης.

Παράλληλα η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί στην πράξη να ελέγχει και τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας παράλληλα με τις μεταβολές στον ρυθμό εκφόρτισης.



Εικόνα 6.24: Υπολογισμός SoC μέσω μεθόδου σημείων αναπροσαρμογής σφάλματος

7.ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΟΙΚΙΑΚΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια διαφορετική προσέγγιση για την λειτουργία ενός συστήματος διαχείρισης μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύσσεται ένα μοντέλο διαχείρισης ενέργειας για μια οικεία με εγκαταστημένη μπαταρία και παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

7.1 Γενικά

Το μοντέλο διαχείρισης ενέργειας που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια προορίζεται για χρήση σε οικεία με εγκαταστημένη μπαταρία και χρήση ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Στην περίπτωσή μας το σύστημα αυτό αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, χωρίς να αποκλείεται ωστόσο η χρήση κάποιου άλλου μέσου, όπως για παράδειγμα οι ανεμογεννήτριες.

Η λειτουργία του μοντέλου βασίζεται στις τρεις παρακάτω αρχές, που παρουσιάζονται με σειρά προτεραιότητας:

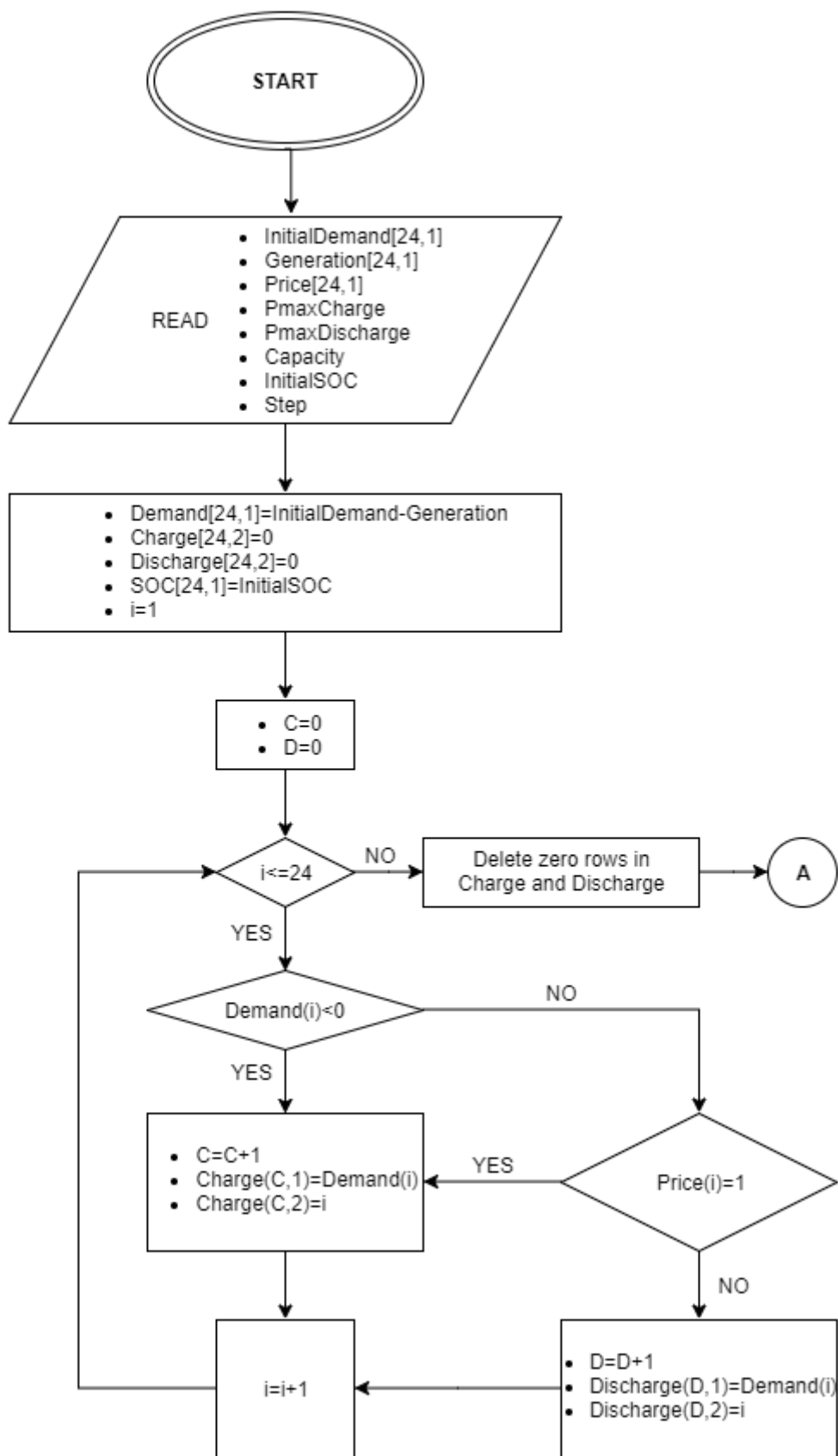
- μέγιστη αξιοποίηση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές
Κατά κύριο λόγο, η μπαταρία χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αποτρέποντας με τον τρόπο αυτόν την αντίστροφη ροή ενέργειας προς το δίκτυο.
- αποδοτική χρήση μπαταρίας
Η δεύτερη αυτήν αρχή λειτουργίας παρέχει ένα σημαντικό οικονομικό κίνητρο προς τον καταναλωτή, καθώς μειώνει το κόστος απόσβεσης της μπαταρίας και γενικότερα του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με την φόρτιση της μπαταρίας σε ώρες χαμηλής τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας και την εκφόρτιση σε ώρες υψηλής τιμής.
- εξομάλυνση της καμπύλης τελικής ζήτησης (κατανάλωσης-παραγωγής)
Η τρίτη και τελευταία αρχή λειτουργίας συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την προηγούμενη. Συνήθως οι υψηλότερες τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας αφορούν τις ώρες αιχμής, όταν δηλαδή υπάρχει μέγιστη ζήτηση. Αντίθετα η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται κατά τις ώρες που η ζήτηση λαμβάνει ελάχιστη τιμή. Φορτίζοντας λοιπόν την μπαταρία στις περιόδους χαμηλής ζήτησης και εκφορτίζοντάς την κατά τις περιόδους αιχμής, εκτός από τα οικονομικά οφέλη που

αναφέρθηκαν προηγουμένως, επιτυγχάνεται ταυτόχρονα και εξομάλυνση της καμπύλης τελικής ζήτησης.[34][35]

7.2 Μεθοδολογία

Ο αλγόριθμος βάσει του οποίου λειτουργεί το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια δέχεται σαν είσοδο τα παρακάτω μεγέθη:

- $InitialDemand_{[24,1]}$ (kW)
Ο πίνακας αυτός περιέχει την προβλεπόμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της οικείας για τις επόμενες 24 ώρες.
- $Generation_{[24,1]}$ (kW)
Ο πίνακας αυτός περιέχει την προβλεπόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ για τις επόμενες 24 ώρες.
- $Price_{[24,1]}$
Ο πίνακας αυτός περιέχει την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για τις επόμενες 24 ώρες. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται σταθερή, ενώ γίνεται παράλληλα χρήση του νυχτερινού τιμολογίου. Έτσι λοιπόν η τιμή λαμβάνει την τιμή 2 καθ'όλη την διάρκεια της μέρας εκτός από τις ώρες μειωμένης χρέωσης οπότε και λαμβάνει την τιμή 1 (οι αριθμοί δεν αναφέρονται σε κάποιο μέγεθος). Σε άλλα συστήματα τιμολόγησης η χρονοσειρά της τιμής μπορεί να προκύπτει από κάποιον αλγόριθμο πρόβλεψης.
- $P_{maxCharge}$ (kW)
Μέγιστη ισχύς φόρτισης της μπαταρίας.
- $P_{maxDischarge}$ (kW)
Μέγιστη ισχύς εκφόρτισης της μπαταρίας.
- $Capacity$ (kWh)
Η χωρητικότητα της μπαταρίας.
- $InitialSOC$ (kWh)
Η αρχική στάθμη φόρτισης της μπαταρίας.
- $Step$ (kW)
Βήμα υπολογισμού.



Εικόνα 7.1: Διάγραμμα ροής 1/2

Για την λειτουργία λοιπόν του συγκεκριμένου συστήματος διαχείρισης μπαταρίας απαιτείται η χρήση ορισμένων τεχνικών προβλέψεων, μέσω των οποίων εξάγονται οι χρονοσειρές ζήτησης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ενδεχομένως και τιμής) για τις επόμενες 24 ώρες. Με βάση τις προβλέψεις αυτές, το σύστημα καταστρώνει ένα 24ωρο πλάνο διαχείρισης της μπαταρίας, που μεταφράζεται στον υπολογισμό της ισχύος λειτουργίας της για κάθε ώρα. Το πλάνο αυτό θα εφαρμοστεί ωστόσο μόνο για την τρέχουσα ώρα. Για την επόμενη ώρα τα προβλεπόμενα δεδομένα, όπως και η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας ανανεώνονται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Αρχικά, υπολογίζεται η προβλεπόμενη καθαρή ζήτηση, η διαφορά δηλαδή της αρχικής ζήτησης από την παραγωγή:

- Demand=InitialDemand-Generation

Στην συνέχεια, και σύμφωνα με την πρώτη και την δεύτερη αρχή λειτουργίας του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας, καθορίζεται για κάθε ώρα αν η μπαταρία υπόκειται σε διαδικασία φόρτισης ή εκφόρτισης. Για την διαδικασία φόρτισης τα δεδομένα του πίνακα Demand μαζί με την αντίστοιχη ώρα καταχωρούνται στον πίνακα Charge_[24,2], ενώ για την διαδικασία εκφόρτισης στον πίνακα Discharge_[24,2]. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται ως εξής (εικόνα 7.1):

- 1^η αρχή λειτουργίας
Αν υπάρχει πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή δηλαδή είναι μεγαλύτερη της αρχικής ζήτησης (Demand<0), τότε η μπαταρία φορτίζεται.
- 2^η αρχή λειτουργίας
Σε διαφορετική περίπτωση ελέγχεται η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, αν βρισκόμαστε σε ζώνη χαμηλής χρέωσης (Price=1) η μπαταρία φορτίζεται, ενώ κατά τις υπόλοιπες ώρες (Price=2) η μπαταρία εκφορτίζεται.

Με την εφαρμογή των δύο πρώτων αρχών λειτουργίας του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας προκαθορίζεται ο τρόπος λειτουργίας της μπαταρίας για κάθε μία από τις επόμενες 24 ώρες (φόρτιση ή εκφόρτιση). Η τρίτη αρχή λειτουργίας έχει ως σκοπό την εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης, υπολογίζοντας την βέλτιστη ισχύ φόρτισης ή εκφόρτισης της μπαταρίας για κάθε ώρα. Τα δεδομένα αυτά θα περιέχονται μετά το πέρας των υπολογισμών στους πίνακες Charge και Discharge.

Η λειτουργία της εξομάλυνσης βασίζεται σε μία επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά οι πίνακες Charge και Discharge ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά. Ο πίνακας Charge προσπελάζεται από κάτω προς τα πάνω (ελάχιστη προς μέγιστη ζήτηση), ενώ ο πίνακας Discharge από πάνω προς τα κάτω (μέγιστη προς ελάχιστη ζήτηση). Έτσι λοιπόν η τελευταία γραμμή του πίνακα Charge αυξάνεται κατά τα βήμα υπολογισμού Step (φόρτιση), ενώ η πρώτη γραμμή του πίνακα Discharge μειώνεται κατά Step (εκφόρτιση). Παράλληλα πραγματοποιούνται οι απαραίτητες αλλαγές στην στάθμη φόρτισης της μπαταρίας μέχρι το τέλος του 24ώρου. Είναι φανερό πως όσο πιο μικρό είναι το βήμα υπολογισμού Step τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αλλά και η χρονική διάρκεια υπολογισμού.

Κατόπιν ελέγχονται οι παρακάτω συνθήκες:

- φόρτιση:
 - Δεν παραβιάζεται η μέγιστη ισχύς φόρτισης της μπαταρίας:
 $Charge - Demand \leq P_{\max} Charge$
 - Δεν φορτίζεται η μπαταρία πέραν της παραγόμενης ποσότητας σε ώρα υψηλής τιμής:
 $Charge \leq 0 @ Price = 2$
 - Η στάθμη φόρτισης δεν υπερβαίνει το 100%:
 $[SOC] \leq Capacity$
- εκφόρτιση:
 - Δεν παραβιάζεται η μέγιστη ισχύς εκφόρτισης της μπαταρίας:
 $Demand - Discharge \leq P_{\max} Discharge$
 - Δεν φορτίζεται η μπαταρία:
 $Discharge \geq 0$
 - Η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας δεν πέφτει κάτω από το 20%:
 $[SOC] \geq 0.2 \cdot Capacity$

Αν όλες οι παραπάνω συνθήκες ικανοποιούνται, τότε η επαναληπτική διαδικασία της εξομάλυνσης συνεχίζεται για τις ίδιες γραμμές των πινάκων Charge και Discharge.

Στην περίπτωση ωστόσο που κάποια ή κάποιες από τις παραπάνω συνθήκες δεν ικανοποιούνται τότε ακυρώνονται οι αλλαγές φόρτισης ή/και εκφόρτισης που πραγματοποιήθηκαν. Ανάλογα με τα ποια συνθήκη είναι ψευδής, καθορίζεται στην συνέχεια αν και κατά πως θα αλλάξουν οι δείκτες προσπέλασης των πινάκων Charge και Discharge. Περισσότερες λεπτομέρειες φαίνονται στο διάγραμμα ροής (εικόνα 7.2).

Η επαναληπτική διαδικασία της εξομάλυνσης τερματίζεται όταν είναι αδύνατη οποιαδήποτε περαιτέρω βελτίωση στην καμπύλη ζήτησης. Στο σημείο αυτό, συγχωνεύοντας τους πίνακες Charge και Discharge προκύπτει η τελική καμπύλη ζήτησης FinalDemand. Πληροφορίες για την ισχύ λειτουργίας της μπαταρίας μπορούν να εξαχθούν από την διαφορά των πινάκων FinalDemand και Demand. Τέλος ο πίνακας SOC περιέχει την εξέλιξη της στάθμης φόρτισης της μπαταρίας για το υπολογισμένο 24ωρο πλάνο.

Ο κώδικας σε Matlab που υλοποιεί τον παραπάνω αλγόριθμο για το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας παρουσιάζεται στο παράρτημα, ενώ ο τρόπος λειτουργίας του θα γίνει πιο κατανοητός στις προσομοιώσεις που ακολουθούν στην επόμενη ενότητα.

7.3 Προσομοιώσεις

Στην ενότητα αυτήν παρουσιάζονται δύο προσομοιώσεις με σκοπό τον έλεγχο και την βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας που αναπτύχθηκε παραπάνω. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για την τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται δεδομένα από την ελληνική αγορά με χρήση του μειωμένου νυχτερινού τιμολογίου. Το ωράριο νυχτερινού τιμολογίου διακρίνεται σε θερινό και χειμερινό, με περίοδο ισχύος 1 Μαΐου - 31 Οκτωβρίου και 1 Νοεμβρίου – 30 Απριλίου αντίστοιχα.

7.3.1 Θερινό ωράριο

Κατά τα θερινό ωράριο νυχτερινού τιμολογίου, η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερη κατά την περίοδο 23:00-07:00.

Για την συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιείται μπαταρία 10kWh και φωτοβολταϊκά πάνελ εγκατεστημένης ισχύος 4kW. Η καμπύλη αρχικής ζήτησης (InitialDemand), η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά ισχύς (Generation) καθώς και η διαφορά τους (Demand) παρουσιάζονται στην εικόνα 7.3.

Για τα υπόλοιπα δεδομένα αρχικοποίησης έχουμε:

- $P_{maxCharge}=2kW$, μέγιστη ισχύς φόρτισης 0.2C
- $P_{maxDischarge}=2kW$, μέγιστη ισχύς εκφόρτισης 0.2C
- $InitialSOC=2kWh$, αρχική στάθμη φόρτισης 20%
- $Step=0.1kW$, βήμα υπολογισμού

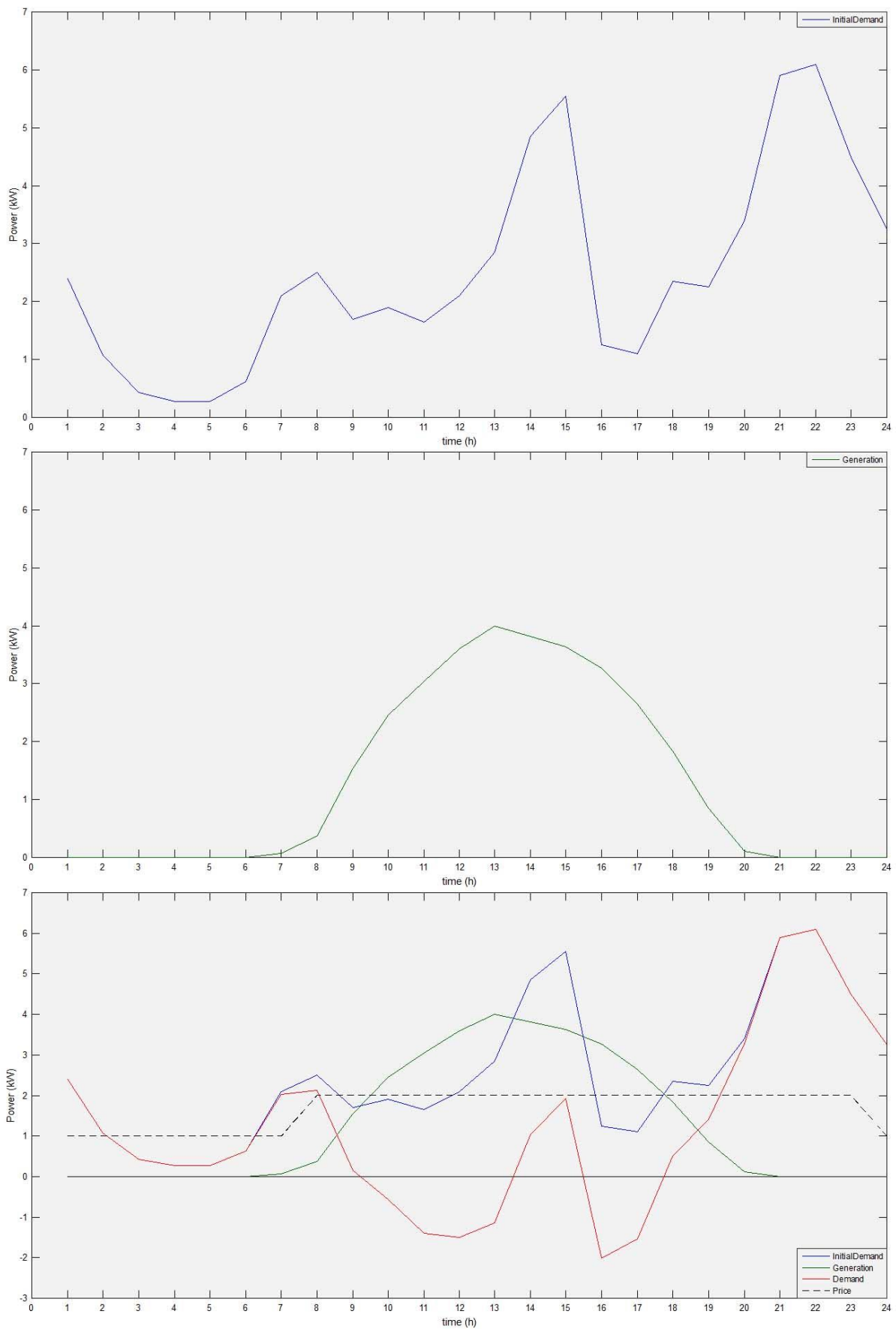
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται αριθμητικά στον πίνακα 7.1 και γραφικά στην εικόνα 7.4.

Ερμηνεύοντας λοιπόν την καμπύλη της τελικής ζήτησης, παρατηρούμε πως η μπαταρία φορτίζεται από το 20% στο 60% κατά τις ώρες μειωμένης χρέωσης 23:00-07:00, ενώ στη συνέχεια καλύπτει την πρωινή κατανάλωση 07:00-09:00, με την στάθμη φόρτισης να πέφτει στο 40%. Κατά τις περιόδους 09:00-13:00 και 15:00-17:00 η μπαταρία φορτίζεται λόγω της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, με την στάθμη φόρτισης να ανέρχεται από το 40% στο 90% και από το 60% σε κατάσταση πλήρους φόρτισης. Στο μεσοδιάστημα 13:00-15:00, η περίοδος της μεσημεριανής αιχμής καλύπτεται πλήρως από την μπαταρία σε συνδυασμό με την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά (90%-60% SOC). Συνεπώς, κατά το διάστημα 09:00-17:00 η τελική ζήτηση λαμβάνει μηδενική τιμή, ενώ για κάποια ενδιάμεσα χρονικά διαστήματα, η μπαταρία αδυνατεί να απορροφήσει εξ ολοκλήρου την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια. Στο διάστημα 17:00-19:00 η μπαταρία παραμένει αδρανής σε κατάσταση πλήρους φόρτισης και τέλος, καλύπτει μέρος της απογευματινής-βραδινής αιχμής 19:00-23:00 εκφορτιζόμενη από 100% μέχρι το

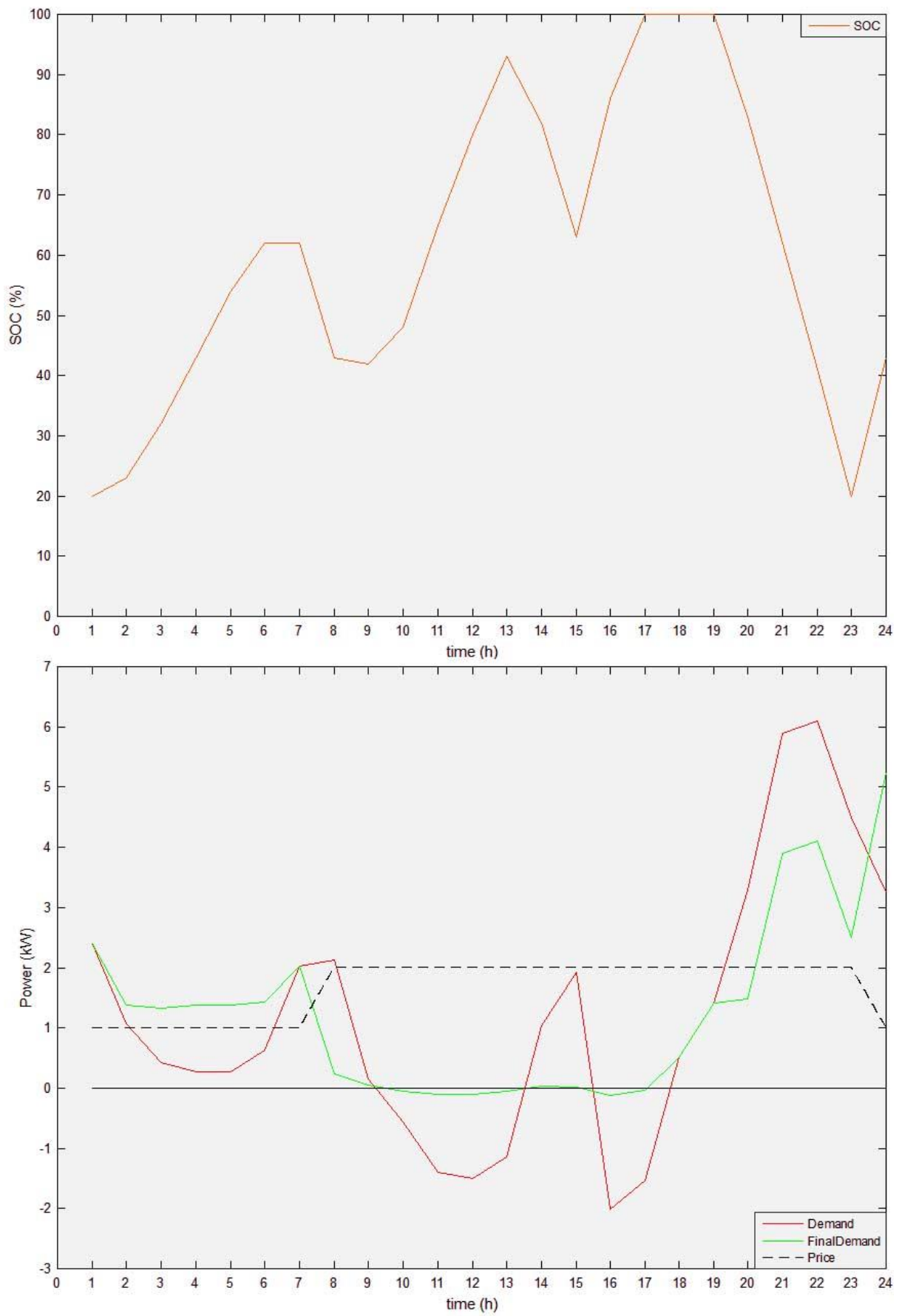
κατώτατο επιτρεπτό όριο 20%, ακριβώς πριν την έναρξη του νυχτερινού ωραρίου τιμολόγησης.

Time	InitialDemand	Generation	Price	Demand	SOC	FinalDemand
1	2.4	0.0	1	2.4	20.0	2.4
2	1.1	0.0	1	1.1	23.0	1.4
3	0.4	0.0	1	0.4	32.0	1.3
4	0.3	0.0	1	0.3	43.0	1.4
5	0.3	0.0	1	0.3	54.0	1.4
6	0.6	0.0	1	0.6	62.0	1.4
7	2.1	0.1	1	2.0	62.0	2.0
8	2.5	0.4	2	2.1	43.0	0.2
9	1.7	1.5	2	0.2	42.0	0.1
10	1.9	2.5	2	-0.6	48.0	-0.1
11	1.7	3.0	2	-1.4	65.0	-0.1
12	2.1	3.6	2	-1.5	80.0	-0.1
13	2.9	4.0	2	-1.2	93.0	-0.1
14	4.9	3.8	2	1.0	82.0	0.0
15	5.6	3.6	2	1.9	63.0	0.0
16	1.3	3.3	2	-2.0	86.0	-0.1
17	1.1	2.6	2	-1.5	100.0	0.0
18	2.4	1.8	2	0.5	100.0	0.5
19	2.3	0.8	2	1.4	100.0	1.4
20	3.4	0.1	2	3.3	83.0	1.5
21	5.9	0.0	2	5.9	62.0	3.9
22	6.1	0.0	2	6.1	41.0	4.1
23	4.5	0.0	2	4.5	20.0	2.5
24	3.3	0.0	1	3.3	43.0	5.3

Πίνακας 7.1: Αριθμητικά δεδομένα προσομοίωσης θερινού ωραρίου



Εικόνα 7.3: Καμπύλη ζήτησης-παραγωγής



Εικόνα 7.4: Προσομοίωση θερινού ωραρίου

7.3.2 Χειμερινό ωράριο

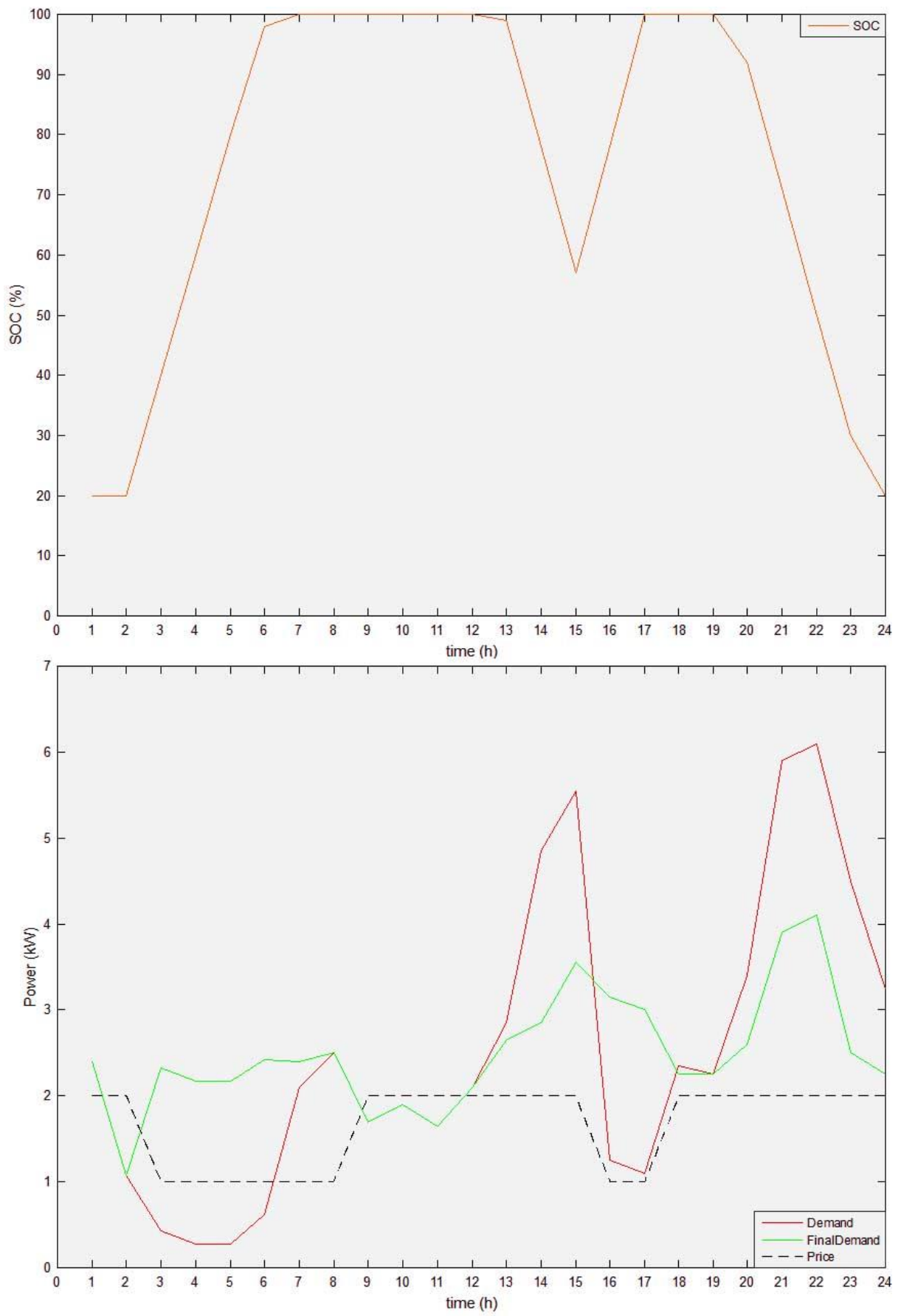
Κατά τα χειμερινό ωράριο νυχτερινού τιμολογίου, η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλότερη κατά τις περιόδους 02:00-08:00 και 15:00-17:00.

Τα δεδομένα εισόδου για την συγκεκριμένη προσομοίωση παραμένουν ίδια με αυτά της προηγούμενης. Η μόνη διαφορά έγκειται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, η οποία θεωρείται μηδενική καθ'όλη την διάρκεια της μέρας. Σκοπός της προσομοίωσης αυτής είναι ο έλεγχος της ανταπόκρισης του συστήματος διαχείρισης μπαταρίας σε μέρες με περιορισμένη ηλιοφάνεια ή κατ επέκταση σε παντελή έλλειψη των φωτοβολταϊκών.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται αριθμητικά στον πίνακα 7.2 και γραφικά στην εικόνα 7.5.

Time	InitialDemand	Generation	Price	Demand	SOC	FinalDemand
1	-	-	2	2.4	20.0	2.4
2	-	-	2	1.1	20.0	1.1
3	-	-	1	0.4	40.0	2.3
4	-	-	1	0.3	60.0	2.2
5	-	-	1	0.3	80.0	2.2
6	-	-	1	0.6	98.0	2.4
7	-	-	1	2.1	100.0	2.4
8	-	-	1	2.5	100.0	2.5
9	-	-	2	1.7	100.0	1.7
10	-	-	2	1.9	100.0	1.9
11	-	-	2	1.7	100.0	1.7
12	-	-	2	2.1	100.0	2.1
13	-	-	2	2.9	99.0	2.7
14	-	-	2	4.9	78.0	2.9
15	-	-	2	5.6	57.0	3.6
16	-	-	1	1.3	78.0	3.2
17	-	-	1	1.1	100.0	3.0
18	-	-	2	2.4	100.0	2.3
19	-	-	2	2.3	100.0	2.3
20	-	-	2	3.4	92.0	2.6
21	-	-	2	5.9	71.0	3.9
22	-	-	2	6.1	50.0	4.1
23	-	-	2	4.5	30.0	2.5
24	-	-	2	3.3	20.0	2.3

Πίνακας 7.2: Αριθμητικά δεδομένα προσομοίωσης χειμερινού ωραρίου



Εικόνα 7.5: Προσομοίωση χειμερινού ωραρίου

Ελλείπει λοιπόν των φωτοβολταϊκών, το σύστημα περιορίζεται στην φόρτιση της μπαταρίας κατά τις ώρες χαμηλής χρέωσης, και την κάλυψη από την μπαταρία μέρους της κατανάλωσης σε ώρες αιχμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα και την ταυτόχρονη εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης.

Όπως φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας ικανοποιεί σε μεγάλο βαθμό τις αρχές λειτουργίας του, την απορρόφηση δηλαδή της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας, την εξοικονόμηση χρημάτων μέσω της φόρτισης σε περιόδους χαμηλής χρέωσης και της εκφόρτισης σε περιόδους υψηλής χρέωσης και της εξομάλυνσης της καμπύλης ζήτησης.

Η λειτουργία ωστόσο του συγκεκριμένου συστήματος διαχείρισης μπαταρίας βασίζεται σε δεδομένα που εξάγονται μέσω κάποιας τεχνικής προβλέψεων. Για την ομαλή χρήση του στην πράξη επομένως, απαιτείται η επιλογή ενός αλγόριθμου προβλέψεων, ικανού να παρέχει εκτιμήσεις για την καμπύλη ζήτησης με όσο το δυνατόν μικρότερο σφάλμα. Παράλληλα, απαιτούνται έγκαιρες και έγκυρες μετεωρολογικές προβλέψεις για την εκτίμηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στα κεφάλαια 3-6 αναπτύχθηκε ένα σύστημα διαχείρισης για μια βαθιάς εκφόρτισης μπαταρία μολύβδου-οξέος υγρού ηλεκτρολύτη. Το συγκεκριμένο σύστημα διαχείρισης μπαταρίας καλύπτει τις βασικότερες λειτουργίες για την προστασία και την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, που είναι οι εξής:

- έλεγχος φόρτισης-εκφόρτισης
- εξισορρόπηση φόρτισης
- έγκυρη ένδειξη στάθμης φόρτισης

Αν και το BMS αφορά έναν συγκεκριμένο τύπο μπαταρίας, η γενική προσέγγιση και για τους υπόλοιπους τύπους είναι παρόμοια. Για τις μπαταρίες ιόντων λιθίου για παράδειγμα, που αποτελούν τον πιο γοργά ανερχόμενο τύπο, χρησιμοποιείται η ίδια διαδικασία φόρτισης σταθερού ρεύματος – σταθερής τάσης (CC-CV), με διαφορετικά ωστόσο όρια τάσης ανά στοιχείο. Για την διαδικασία εξισορρόπησης φόρτισης ωστόσο, απαιτείται διαφορετική διαχείριση, αφού οι συγκεκριμένες μπαταρίες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην υπερφόρτιση. Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες· τις παθητικές και τις ενεργητικές. Οι παθητικές μέθοδοι παρακάμπτουν την φόρτιση των στοιχείων με υψηλότερο SoC, με χρήση αντιστάσεων παράλληλα σε αυτά. Οι ενεργητικές από την άλλη πλευρά χρησιμοποιούν πολυπλοκότερες διατάξεις υψηλότερου κόστους, που επιτρέπουν την άμεση ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των στοιχείων.[36]

Πέρα ωστόσο από την φορητότητα, το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας θα μπορούσε να λαμβάνει υπόψη του και επιπλέον χαρακτηριστικά κατά τον έλεγχο των διαδικασιών που επιτελεί. Το βασικότερο από αυτά είναι η περιβαλλοντική θερμοκρασία, η οποία έχει άμεση επίδραση στα όρια τάσης που θα επιλεχθούν, όπως αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 4. Παράλληλα, και για μακροχρόνιο έλεγχο της λειτουργίας της μπαταρίας, πρέπει να υπολογίζεται και να λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση υγείας SoH της μπαταρίας.

Το ίδιο ισχύει και για το BMS που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 7. Το συγκεκριμένο σύστημα διαχείρισης μπαταρίας εξετάζει την μπαταρία από μια πιο μακροσκοπική πλευρά, μην λαμβάνοντας υπόψη τεχνικές λεπτομέρειες κατά τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης, πέραν ενός ανώτατου ορίου ισχύος λειτουργίας για κάθε ώρα (ρυθμός φόρτισης-εκφόρτισης). Δεδομένου όμως ότι το συγκεκριμένο σύστημα αποσκοπεί σε μια μακροχρόνια υποστηρικτική δράση μιας γενικότερης επένδυσης, οφείλει να λαμβάνει υπόψη την διαδικασία γήρανσης της μπαταρίας και την υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της με την πάροδο του χρόνου.[35]

Ταυτόχρονα το συγκεκριμένο BMS έχει την δυνατότητα να απεξαρτηθεί από την καμπύλη ζήτησης, στα πλαίσια που αυτό είναι δυνατό. Το υπολογιζόμενο 24ωρο ενεργειακό πλάνο που παρέχει εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις προβλέψεις για την διακύμανση της ζήτησης. Με την ανάπτυξη ωστόσο και την διείσδυση ολοένα και περισσότερων έξυπνων συσκευών

στις οικείες, η διαδικασία αυτήν μπορεί εν μέρει και να αντιστραφεί. Πιο συγκεκριμένα, στο σύστημα διαχείρισης μπαταρίας, υπάρχει η δυνατότητα να ενσωματωθεί και ένα γενικότερο σύστημα διαχείρισης των κυριότερων συσκευών. Με βάση το γενικότερο αυτό σύστημα και όπου υπάρχει δυνατότητα χρονικής ολίσθησης του φορτίου, ενεργοβόρες συσκευές όπως θερμοσίφωνα, πλυντήριο, πλυντήριο πιάτων, κουζίνα και κλιματιστικό θα λειτουργούν σε χρονικό διάστημα, που θα καθορίζεται από ένα σύνολο λειτουργικών μεταβλητών (παραγωγή ΑΠΕ, τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, SoC μπαταρίας) καθώς επίσης και από το χρονικό περιθώριο που έχει θέσει ο χρήστης.[37][38]

Παράρτημα

Α.Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων συνάρτησης $y=A+Bx$

i.Σχέσεις

- $D = n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2$
- $A = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{D}$
- $B = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{D}$

ii.Κώδικας Matlab

```
%-----y=A+Bx-----  
%input  
n=; %plithos timwn  
x=; %times gia x  
y=; %times gia y  
%ypologismos athroismatwn  
Sx=sum(x(:));  
Sx2=sum(x(:).*x(:));  
Sy=sum(y(:));  
Sxy=sum(x(:).*y(:));  
%ypologismos syntelestwn  
D=n*Sx2-Sx^2;  
A=(Sx2*Sy-Sx*Sxy)/D  
B=(n*Sxy-Sx*Sy)/D
```

Β. Μέθοδος ελάχιστων τετραγώνων $f(x,y,z)=Ax+By+Cz+D$

ι. Σχέσεις

$$\bullet \quad K_1 \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = K_2$$

$$\bullet \quad K_1 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i z_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n y_i z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 & \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n z_i & \sum_{i=1}^n 1 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad K_2 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i f_i \\ \sum_{i=1}^n y_i f_i \\ \sum_{i=1}^n z_i f_i \\ \sum_{i=1}^n f_i \end{bmatrix}$$

$$\bullet \quad \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i z_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i & \sum_{i=1}^n y_i z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 & \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n z_i & \sum_{i=1}^n 1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i f_i \\ \sum_{i=1}^n y_i f_i \\ \sum_{i=1}^n z_i f_i \\ \sum_{i=1}^n f_i \end{bmatrix}$$

ii.Κώδικας Matlab

```
%-----f(x,y,z)=Ax+By+Cz+D-----
%input
n=; %plithos timwn
x=; %times gia x
y=; %times gia y
z=; %times gia z
f=; %times gia f
%ypologismos athroismatwn
Sx2=sum(x(:).*x(:));
Sy2=sum(y(:).*y(:));
Sz2=sum(z(:).*z(:));
Sxy=sum(x(:).*y(:));
Sxz=sum(x(:).*z(:));
Syz=sum(y(:).*z(:));
Sx=sum(x(:));
Sy=sum(y(:));
Sz=sum(z(:));
Sxf=sum(x(:).*f(:));
Syf=sum(y(:).*f(:));
Szf=sum(z(:).*f(:));
Sf=sum(f(:));
%ypologismos syntelestwv
K1=[Sx2 Sxy Sxz Sx; Sxy Sy2 Syz Sy; Sxz Syz Sz2 Sz; Sx Sy Sz n];
K2=[Sxf; Syf; Szf; Sf];
K=inv(K1)*K2;
A=K(1,1)
B=K(2,1)
C=K(3,1)
D=K(4,1)
```

Γ.Σύστημα διαχείρισης ενέργειας για οικιακή μπαταρία

i.Κώδικας Matlab

```
% EISODOS DEDOMENWN
InitialDemand=xlswread('data.xlsx','A2:A25');% arxiki_zitisi(kW)
Generation=xlswread('data.xlsx','B2:B25');% paragwgi(kW)
Price=xlswread('data.xlsx','C2:C25');% timi
PmaxCharge=xlswread('data.xlsx','D2:D2');% megisti_isxys_fortisis(kW)
PmaxDischarge=xlswread('data.xlsx','D4:D4');% megisti_isxys_ekfortisis(kW)
Capacity=xlswread('data.xlsx','D6:D6');% megisti_xwritikotita_mpatarias(kWh)
InitialSOC=xlswread('data.xlsx','D8:D8');% arxiki_xwritikotita_mpatarias(kWh)
Step=xlswread('data.xlsx','D10:D10');% vima_ypologismou

% ARXIKOPOIISI
Demand=InitialDemand-Generation;% zitisi(arxiki-paragwgi)(kW)
Charge=zeros(24,2);
Discharge=zeros(24,2);
SOC(1:24,1)=InitialSOC;
i=1;

% 1i&2i ARXI LEITOURGIAS (EPILOGI FORTISIS/EKFORTISIS)
C=0;% metritis_wrwn_fortisis
D=0;% metritis_wrwn_ekfortisis
for i=1:24
    if Demand(i)<0
        C=C+1;
        Charge(C,1)=Demand(i);
        Charge(C,2)=i;
    else
        if Price(i)==1
            C=C+1;
            Charge(C,1)=Demand(i);
            Charge(C,2)=i;
        elseif Price(i)==2
            D=D+1;
            Discharge(D,1)=Demand(i);
            Discharge(D,2)=i;
        end
    end
end
Charge=Charge(1:C,:);
Discharge=Discharge(1:D,:);

% 3i ARXI LEITOURGIAS (EKSOMALYNSI)

% arxikopoiisi
m=C;
```

```

u=1;
Loop_end=false;%metavliti_terminismou_epanalipsis
Loop_count=0;%metritis_epanalipsewn

%epanaliptiki_diadikasia
while Loop_end==false
    Loop_count=Loop_count+1;

    %fthinousa_taksinomisi_pinakwn
    [Y,Z]=sort(Charge(1:C,1),'descend');
    Charge(1:C,:)= [Y,Charge(Z,2)];
    [Y,Z]=sort(Discharge(1:D,1),'descend');
    Discharge(1:D,:)= [Y,Discharge(Z,2)];

    %voithitikes_metavlitēs_fortisis/ekfortisis
    Mod_Charge=zeros(C,2);
    Mod_SOC_Charge=zeros(24,1);
    Temp_Charge=Charge;
    r=0;
    Mod_Discharge=zeros(D,2);
    Mod_SOC_Discharge=zeros(24,1);
    Temp_Discharge=Discharge;
    s=0;
    Temp_SOC=SOC;
    advance=false;

    %charge_submodule
    Mod_Charge(m,1)=Step;
    r=Charge(m,2);
    for i=r:24
        Mod_SOC_Charge(i)=Step;
    end
    Temp_Charge=Charge+Mod_Charge;%charge_modifications
    if TestCharge(Temp_Charge,Demand,Price,PmaxCharge,m,r)==true
        advance=true;
    else
        Temp_Charge=Charge;%cancel_charge_modifications
        m=m-1;
        if u>D
            if m<1
                Loop_end=true;
            end
        else
            if m<1
                m=C;
                u=u+1;
                if u>D
                    m=C;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

    end
end

%discharge_submodule
if u<=D
    Mod_Discharge(u,1)=-Step;
    s=Discharge(u,2);
    for i=s:24
        Mod_SOC_Discharge(i)=-Step;
    end
    Temp_Discharge=Discharge+Mod_Discharge;%discharge_modifications
    if TestDischarge(Temp_Discharge,Demand,PmaxDischarge,u,s)==true
        advance=true;
    else
        Temp_Discharge=Discharge;%cancel_discharge_modifications
        u=u+1;
        if u>D
            m=C;
        end
    end
end
end

%elegxos_SOC
if advance==true
    Temp_SOC=SOC+Mod_SOC_Charge+Mod_SOC_Discharge;
    if
        (all(Temp_SOC<=Capacity))||((all(Temp_SOC>=0.2*Capacity))%den_paraviazetai_Cmax_or_Cmin
        if all(Temp_SOC<=Capacity)%den_paraviazetai_Cmax
            if all(Temp_SOC>=0.2*Capacity)%den_paraviazetai_Cmin
                Charge=Temp_Charge;%confirm_charge_modifications
                Discharge=Temp_Discharge;%confirm_discharge_modifications
                SOC=Temp_SOC;%confirm_SOC_modifications
            else
                Temp_Discharge=Discharge;%cancel_discharge_modifications
                Temp_SOC=SOC+Mod_SOC_Charge;%cancel_discharge_modifications
                Charge=Temp_Charge;%confirm_charge_modifications
                SOC=Temp_SOC;%confirm_SOC_modifications
            end
        else
            Temp_Charge=Charge;%cancel_charge_modifications
            Temp_SOC=SOC+Mod_SOC_Discharge;%cancel_charge_modifications
            Discharge=Temp_Discharge;%confirm_discharge_modifications
            SOC=Temp_SOC;%confirm_SOC_modifications
            if u>D
                m=m-1;
                if m<1
                    Loop_end=true;
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

    end
else
    Temp_Charge=Charge;%cancel_charge_modifications
    Temp_Discharge=Discharge;%cancel_discharge_modifications
    Temp_SOC=SOC;%cancel_SOC_modifications
    m=m-1;
    if u>D
        if m<1
            Loop_end=true;
        end
    else
        if m<1
            m=C;
            u=u+1;
            if u>D
                m=C;
            end
        end
    end
end
end
end
end
m
u
Loop_count
end

```

```

FinalDemand=[Charge;Discharge];
[Y,Z]=sort(FinalDemand(:,2));
FinalDemand=[FinalDemand(Z,1),Y];
SOC=SOC*100/Capacity;

```

```

function output=TestCharge(Temp_Charge,Demand,Price,PmaxCharge,m,r)
%den_paraviazetai_i_megisti_isxys_fortisis_tis_mpatarias
if (Temp_Charge(m,1)-Demand(r))<=PmaxCharge
    a=true;
else
    a=false;
end
%den_fortizetai_i_mpataria_se_wra_ypsilis_timis
if Price(r)==1
    b=true;
elseif Price(r)==2
    if Temp_Charge(m,1)<=0
        b=true;
    else
        b=false;
    end
end
%telikos_elegxos_ikanopoiisis_olwn_twn_parapanw
if (a==true)&&(b==true)
    output=true;
else
    output=false;
end
end

```

```

function output=TestDischarge(Temp_Discharge,Demand,PmaxDischarge,u,s)
%den_paraviazetai_i_megisti_isxys_ekfortisis_tis_mpatarias
if (Demand(s)-Temp_Discharge(u,1))<=PmaxDischarge
    a=true;
else
    a=false;
end
%i_mpataria_ekfortizetai
if Temp_Discharge(u,1)>=0
    b=true;
else
    b=false;
end
%telikos_elegxos_ikanopoiisis_olwn_twn_parapanw
if (a==true)&&(b==true)
    output=true;
else
    output=false;
end
end

```

Βιβλιογραφία

- [1] D. Linden, T.B. Reddy, *Handbook of Batteries. Third edition* (2001)
- [2] I. Buchmann, *Batteries in a Portable World. A handbook on rechargeable batteries for non-engineers. Second edition* (2001)
- [3] R.M. Dell, D.A.J. Rand, *Understanding Batteries* (2001)
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfide_minerals
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Metal_halides
- [6] MIT Electric Vehicle Team, *A Guide to Understanding Battery Specifications* (2008)
- [7] V. Pop, H.J. Bergveld, D. Danilov, P.P.L. Regtien, P.H.L. Notten, *Battery Management Systems. Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications* (2008)
- [8] H.J. Bergveld, W.S. Kruijt, P.H.L. Notten, *Battery Management Systems. Design by Modelling* (2002)
- [9] J. Jiang, C. Zhang, *Fundamentals and Applications of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles* (2015)
- [10] <http://www.futuremarketinsights.com/reports/battery-management-system-market>
- [11] <http://www.batteryuniversity.com/>
- [12] D. Pavlov, *Lead-Acid Batteries: Science and Technology. A Handbook of Lead-Acid Battery Technology and its Influence on the Product* (2011)
- [13] Α. Πετράκη, *Κατασκευή DC μικροδικτύου σε περιβάλλον Matlab/Simulink και μελέτη τεχνικών ελέγχου* (2015)
- [14] F.L. Luo, H. Ye, *Essential DC/DC Converters* (2006)
- [15] F.L. Luo, H. Ye, *Advanced DC/DC Converters. Second Edition* (2017)
- [16] M.K. Kazimierczuk, *Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters. Second Edition* (2016)
- [17] G.J. Silva, A. Datta, S.P. Bhattacharyya, *PID Controllers for Time-Delay Systems* (2005)
- [18] K.J. Åström, T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Second Edition* (1995)
- [19] D.G. Holmes, T.A. Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters. Principles and Practice* (2003)
- [20] R. Kaiser, *Optimized battery-management system to improve storage lifetime in renewable energy systems* (2006)
- [21] <http://www.trojanbattery.com/literature/#datasheets>
- [22] M. Glavin, W.G. Hurley, *Battery management system for solar energy applications* (2006)
- [23] http://www.aquapro.net/overview_what.html
- [24] C. O'Donnell, M. Schiemann, *Hydrogen gas management for flooded lead acid batteries* (2008)
- [25] J. Cao, N. Schofield, A. Emadi, *Battery Balancing Methods: A Comprehensive Review* (2008)

- [26] S.W. Moore, P.J. Schneider, *A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems* (2001)
- [27] <http://www.chargetek.com/images/pdfs/equal.pdf>
- [28] W.Y. Chang, *The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review* (2013)
- [29] S. Piller, M. Perrin, A. Jossen, *Methods for state-of-charge determination and their applications* (2001)
- [30] S. Jeon, J.J. Yun, S. Bae, *Comparative Study on the Battery State-of-Charge Estimation Method* (2015)
- [31] P.E. Pascoe, A.H. Anbuky, *Estimation of VRLA Battery Capacity Using The Analysis of The Coup De Fouet Region* (1999)
- [32] S. Sindhuja, K. Vasanth, *Modified Coulomb counting method of SOC estimation for uninterruptible power supply system's battery management system* (2015)
- [33] J. Alzieu, H. Smimite, C. Glaize, *Improvement of intelligent battery controller: state-of-charge indicator and associated functions* (1996)
- [34] A. Purvins, I.T. Papaioannou, L. Debarberis, *Application of battery-based storage systems in household-demand smoothening in electricity-distribution grids* (2013)
- [35] A. Purvins, M. Sumner, *Optimal management of stationary lithium-ion battery system in electricity distribution grids* (2013)
- [36] M. Daowd, N. Omar, P.V.D. Bossche, J.V. Mierlo, *A Review of Passive and Active Battery Balancing based on MATLAB/Simulink* (2011)
- [37] K.C. Sou, J. Weimer, H. Sandberg, K.H. Johansson, *Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming* (2011)
- [38] H. İzmitligil, H.A. Özkan, *A home power management system using mixed integer linear programming for scheduling appliances and power resources*, (2016)