



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

**Μοντελοποίηση μπαταριών σε εφαρμογές
ηλεκτροκίνησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΥΡΚΑ ΓΕΩΡΓΙΑ

(Α.Μ.:03102256)

Επιβλέπων : Ν.ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014



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

**Μοντελοποίηση μπαταριών σε εφαρμογές
ηλεκτροκίνησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΥΡΚΑ ΓΕΩΡΓΙΑ

(Α.Μ.:03102256)

Επιβλέπων : Ν.ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22^η Σεπτεμβρίου 2014.

.....

Ν. Χατζηαργυρίου.

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Σ.Παπαθανασίου

Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Π.Γεωργιάκης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

.....
ΜΟΥΡΚΑ ΓΕΩΡΓΙΑ

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

Copyright © ΜΟΥΡΚΑ ΓΕΩΡΓΙΑ

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση της ηλεκτροκίνησης με έμφαση στα σύγχρονα μοντέλα. Ένας τρόπος για να βελτιωθεί η ποιότητα του αέρα στις αστικές περιοχές είναι να αντικατασταθούν τα συμβατικά αυτοκίνητα με κινητήρες HEVs που λειτουργούν με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Οι μπαταρίες είναι ένα ουσιώδες συστατικό των HEVs και χρήζουν ιδιαίτερης εξέτασης. Από τις διαθέσιμες εφαρμογές κυρίαρχο ρολό διαδραματίζουν οι Li-On μπαταρίες, αφού η χρήση τους είναι έντονα διαδεδομένη σε εφαρμογές αυτοκίνησης. Για την καλύτερη θεώρηση της εξέτασης του αντικείμενου προτείνεται η πλήρης μοντελοποίηση της λειτουργίας των μπαταριών τύπου Li-On για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης με την χρήση του προγραμματιστικού εργαλείου Matlab. Η διερεύνηση δύναται να αφορά είτε την χρήση του Simulink εργαλείου είτε την εφαρμογή εμπειρικών μοντέλων διαθέσιμων στην βιβλιογραφία. Σε κάθε περίπτωση, ο βασικός στόχος είναι η μελέτη της επίδρασης διαφορετικών κύκλων κίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων στην λειτουργία των μπαταριών. Για τον λόγο αυτό εξετάζεται αναλυτικά τόσο η διαδικασία της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων όσο και η διαδικασία της εκφόρτισης.

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτρικό Όχημα, Μπαταρία - Αποθηκευτική διάταξη, Δυναμικό μοντέλο, Προσομοίωση, Ηλεκτροκίνηση.

Abstract

The purpose of this thesis is the study of batteries used in the case of electrification with emphasis on contemporary models. One way to improve the air quality in urban areas is to replace conventional cars with ones that powered as HEVs operating with rechargeable batteries. Batteries are an essential component of HEVs and deserve special analysis. From the available applications the Li-on batteries are dominant since their use is highly prevalent in automotive applications. For a better view of the object examination is proposed to completely model the operation of battery type Li-on for electrification applications using the programming tools Matlab. The examination may be conducted using the Simulink tool, or the application of empirical models available in the literature. In any case, the main objective is to study the effect of different motion cycles of electric vehicle batteries to function. For this reason discussed in detail both the process of charging electric vehicles and the burning of the discharge.

Keywords

Electric Vehicle Battery-Storage Entity, dynamic modeling, simulation, Electrification.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ Ν.Χατζηαργυρίου. Θα ήθελα να του εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου τόσο για το ενδιαφέρον που επέδειξε όσο και για τη βοήθεια που παρείχε κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το σύζυγο μου αλλά και την οικογένεια μου για κάθε λογής βοήθεια που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια προς ολοκλήρωση των σπουδών μου!

Μετά τιμής,

Μούρκα Γεωργία

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Ευχαριστίες.....	7
Πίνακας περιεχομένων	9
Κατάλογος Εικόνων	13
Κατάλογος Πινάκων.....	16
1 Εισαγωγή	17
2 Τεχνολογίες και Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων	23
2.2.1 Ηλεκτρικός κινητήρας.....	27
2.2.2 Μετατροπείς Ισχύος	28
2.2.3 Φόρτιση των συσσωρευτών.....	30
2.3 Αρχή λειτουργίας μιας μπαταρίας.....	32
2.4 Μπαταρίες και κυψέλες υδρογόνου	40
2.5 Μελλοντικές Προοπτικές συστημάτων αποθήκευσης	40
3 Μοντελοποίηση μπαταρίας ως μέρος του συστήματος κίνησης.....	43
3.1 Τεχνικές παράμετροι του στοιχείου μπαταρίας.....	43
3.1.1 Ειδική Ενέργεια	44
3.1.2 Ενεργειακή πυκνότητα.....	45
3.1.3 Ειδική Ισχύς.....	45
3.1.4 Τάση ακροδεκτών μπαταρίας	46
3.1.5 Φορτίο χωρητικότητας σε Ah.....	47
3.1.6 Διαγράμματα Ragone	48
3.1.7 Κουλομπική απόδοση.....	50

3.1.8	Ενεργειακή απόδοση.....	50
3.1.9	Θερμοκρασία χρήσης και ανάγκες θέρμανσης / ψύξης	51
3.1.10	Ρυθμός αυτοεκφόρτισης.....	51
3.1.11	Γεωμετρία Μπαταρίας.....	51
3.1.12	Ζωή μπαταρίας και πλήθος κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης	52
3.1.13	Απομείωση χωρητικότητας	52
3.2	Συστοιχία μπαταριών	53
3.3	Σύστημα Διαχείρισης της Μπαταρίας.....	54
4	Μοντελοποίηση της Μπαταρίας.....	61
4.1	Γενικά.....	61
4.2	Τύποι μοντέλων προσομοίωσης μιας μπαταρίας.....	62
4.2.1	Ιδανικά μοντέλα.....	62
4.2.2	Μοντέλα - Μαύρα Κουτιά.....	63
4.2.3	Ηλεκτρικά Μοντέλα Ισοδύναμου Κυκλώματος.....	63
4.2.4	Φυσικοχημικά Μοντέλα με Χωρική Ανάλυση.....	64
4.3	Μοντελοποίηση της μπαταρίας για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης	65
4.3.2	Ισοδύναμα Ηλεκτρικά Μοντέλα	66
4.3.3	Ηλεκτρικά μοντέλα βασισμένα στο ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin	67
4.3.4	Ηλεκτρικά μοντέλα βασισμένα στη σύνθετη αντίσταση	68
4.3.5	Ηλεκτρικά Μοντέλα με βάση στο χρόνο λειτουργίας	68
4.3.6	Μοντέλο Chen-Mora.....	69
4.4	Αναλυτικά μοντέλα	71
4.4.1	Ο νόμος του Peukert.....	72
4.4.2	Μοντέλο KiBaM.....	73
5	Προσομοίωση του μοντέλου μπαταρίας	77
5.1	Περιβάλλον προσομοίωσης.....	77

5.2	Προσομοίωση μοντέλου KiBaM στο περιβάλλον Simulink.....	78
5.2.1	Μοντέλο Χωρητικότητας.....	78
5.2.2	Μοντέλο Τάσης.....	82
5.2.3	Μοντέλο Απωλειών.....	86
5.2.4	Μοντέλο Διάρκειας Ζωής.....	87
5.3	Προσδιορισμός παραμέτρων για το μοντέλο εξέτασης.....	89
6	Αποτελέσματα μοντελοποίησης	91
6.1	Σενάριο με σταθερό ρεύμα εκφόρτισης	91
6.2	Σενάριο με βηματική συνάρτηση ρεύματος	95
6.3	Συγκριτική αξιολόγηση διαδικασίας.....	98
6.4	Ανάλυση παραμέτρων εισόδου.....	102
7	Συμπεράσματα.....	109
7.1	Βασικά τελικά συμπεράσματα.....	109
7.2	Σημεία εξέτασης και ανάλυσης.....	110
7.3	Θέματα για περαιτέρω εξέταση	111
	Βιβλιογραφία	113

Κατάλογος Εικόνων

Σχήμα 1: Αναπαράσταση Battery EVs.....	23
Σχήμα 2: Αναπαράσταση Fuel Cell EVs.....	24
Σχήμα 3: Αναπαράσταση υβριδικά οχήματα - Hybrid EVs	25
Σχήμα 4: Αναπαράσταση Υβριδικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (Plug-in HEVs)	25
Σχήμα 5: Διαθέσιμες τεχνικές στα ηλεκτρικά οχήματα	26
Σχήμα 6: Βασικές αρχές- τμήματα ηλεκτρικού οχήματος	26
Σχήμα 7: Βασικές αρχές- εναλλακτικές ηλεκτρικού κινητήρα	27
Σχήμα 8: Διαφορετικές παραλλαγές του μετατροπέα τύπου chopper	29
Σχήμα 9: Καμπύλη φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος- Αργή φόρτιση	30
Σχήμα 10: Τοπολογία ICT για φόρτιση σε δημόσιο δίκτυο	31
Σχήμα 11: Τοπολογία επαγωγικής φόρτισης.....	32
Σχήμα 12: Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών μπαταρίας καθώς και της M.E.K ως προς την απόσταση (σε km)	39
Σχήμα 13: Τύποι υλικών που χαρακτηρίζουν τις διατάξεις αποθήκευσης σε ηλεκτρικά οχήματα	41
Σχήμα 14: Σύγκριση τεχνολογιών μπαταρίας ως προς την θεωρητική / πραγματική τιμή ειδικής ενέργειας που παρέχουν.....	45
Σχήμα 15: Μεταβολή χωρητικότητας μιας μπαταρίας ανάλογα με το ρυθμό εκφόρτισης.....	48
Σχήμα 16: Σύγκριση χαρακτηριστικών συμπεριφοράς δύο τύπων μπαταριών μέσω του διαγράμματος Ragone	49
Σχήμα 17: Διάγραμμα Ragone για διάφορες χημείες μπαταριών. Πηγή:US Department of Energy	50
Σχήμα 18: Πιθανοί τρόποι συνδεσμολογίας των στοιχείων προς σχηματισμό μιας συστοιχίας	54
Σχήμα 19: Λειτουργικό διάγραμμα BMS για μια μπαταρία.....	56
Σχήμα 20: Περιοδική εξισορρόπηση του φορτίου.....	58
Σχήμα 21: Μοντέλο βασισμένο σε ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin.....	67

Σχήμα 22: Μοντέλο βασισμένο σε ισοδύναμο κύκλωμα σύνθετης αντίστασης	68
Σχήμα 23: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός μοντέλου χρόνου λειτουργίας	69
Σχήμα 24: Προτεινόμενο μοντέλο ηλεκτρικού συσσωρευτή από τους Chen, Mora..	70
Σχήμα 25: Τιμές του k συναρτήσει του πλήθους κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης μιας μπαταρίας.....	73
Σχήμα 26: Ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρίας στο KiBaM.....	74
Σχήμα 27: Το μοντέλο των δύο δεξαμενών του KiBaM. Τα μεγέθη h_1 και h_2 είναι τα ύψη των δεξαμενών.....	75
Σχήμα 28: Αναπαράσταση μοντέλου χωρητικότητας.....	80
Σχήμα 29: Λεπτομερής αναπαράσταση μοντέλου Capacity	81
Σχήμα 30: Λεπτομερής αναπαράσταση μοντέλου q_1	81
Σχήμα 31: Αναπαράσταση Voltage κυκλώματος	84
Σχήμα 32: Λεπτομερής Αναπαράσταση Voltage κυκλώματος	84
Σχήμα 33: Λεπτομερής Αναπαράσταση $q_{max}(I)$ κυκλώματος	85
Σχήμα 34: Λεπτομερής Αναπαράσταση κυκλώματος τάσης ισοδυνάμου	85
Σχήμα 35: Curve fitting πειραματικών δεδομένων για τη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή.....	88
Σχήμα 36: Χωρητικότητα των μπαταριών για διαφορετικές τιμές ρεύματος εκφόρτισης.....	89
Σχήμα 37: Διάγραμμα Τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	91
Σχήμα 38: Διάγραμμα q_1 συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	92
Σχήμα 39: Διάγραμμα q_2 συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	92
Σχήμα 40: Διάγραμμα q συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	93
Σχήμα 41: Διάγραμμα SoC συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	93
Σχήμα 42: Διάγραμμα X συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	94
Σχήμα 43: Διάγραμμα ρεύματος συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	95
Σχήμα 44: Διάγραμμα τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης	96
Σχήμα 45: Διάγραμμα SoC συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	97

Σχήμα 46: Διάγραμμα q φορτίου απόδοσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	97
Σχήμα 47: Διάγραμμα q2 χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης	98
Σχήμα 48: Διάγραμμα SoC χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	99
Σχήμα 49: Διάγραμμα q χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης	99
Σχήμα 50: Διάγραμμα q1 χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης	100
Σχήμα 51: Διάγραμμα q2 χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης	100
Σχήμα 52: Διάγραμμα X συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	101
Σχήμα 53: Διάγραμμα Τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	101
Σχήμα 54: Διάγραμμα SoC συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	102
Σχήμα 55: Διάγραμμα Τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	103
Σχήμα 56: Διάγραμμα X συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	103
Σχήμα 57: Διάγραμμα SoC συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	104
Σχήμα 58: Διάγραμμα q1 συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	105
Σχήμα 59: Διάγραμμα q2 συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	105
Σχήμα 60: Διάγραμμα X συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	106
Σχήμα 61: Διάγραμμα Τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης.....	106

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Παρουσίαση διατάξεων μπαταριών [Bergveld, 2001]	36
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά τύπου μπαταριών	39
Πίνακας 3: Προβλήματα από την άνιση εκφόρτιση των διατάξεων.....	57
Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθενός από τους διαθέσιμους τύπους μοντέλων προσομοίωσης.....	64
Πίνακας 5: Σύγκριση των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών μοντέλων	69
Πίνακας 6: Μετρήσεις πειραματικής διάταξης συσσωρευτή.....	89

1 Εισαγωγή

Η αποθήκευση ενέργειας αποτελεί συχνά ένα ενδιάμεσο σύστημα που επιτρέπει τη μετατροπή της υπό άλλες μορφές όπως ηλεκτρική, φωτεινή ή μηχανική με στόχο την χρήση της υπό άλλες μορφές. Οι μπαταρίες αποτελούν συστήματα που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ένα πλεονέκτημα των μεθόδων ηλεκτροχημικής μετατροπής αποτελεί η ικανότητα τους να μην ακολουθούν τους νομούς της θερμοδυναμικής κα με τον τρόπο αυτό να εξασφαλίζεται υψηλός βαθμός απόδοσης από ότι στην περίπτωση των θερμικών διεργασιών.

Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των ηλεκτροχημικών στοιχείων, ώστε να καταστεί άμεση η χρήση των διατάξεων αυτών σε πλήθος από εφαρμογές. Στο πλαίσιο αυτό, η ηλεκτροκίνηση καθίσταται ένα ζήτημα όλο και πιο σημαντικό αφού αποτελεί ευκαιρία για περιορισμό τόσο των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα όσο και του βαθμού εξάρτησης από το πετρέλαιο και τα αλλά κοινά καύσιμα. Μια λύση αποτελεί το ηλεκτρικό αυτοκίνητο που τροφοδοτείται από μία συστοιχία πολλαπλών μπαταριών. Για να χαρακτηρίζεται βέβαια το αυτοκίνητο από μεγάλη αυτονομία στην κίνηση του απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας που πρέπει να είναι διαθέσιμα. Επομένως, τα μεγέθη της ειδικής ενέργειας και της ειδικής ισχύος αποτελούν τις σημαντικές παραμέτρους που εξετάζονται σε αποθηκευτικές διατάξεις των οχημάτων. Σήμερα παρατηρείται μεγάλη κινητικότητα στον τομέα αυτό και όλο και περισσότερες αυτοκινητοβιομηχανίες στρέφονται στην ανάπτυξη ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Παρά ταύτα, στον τομέα των αποθηκευτικών διατάξεων υπάρχουν σημαντικά ζητήματα, οπότε η ερευνά βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη.

Η συνεισφορά της παρούσας μελέτης έγκειται στην ανάλυση της υπάρχουσας κατάστασης στον τομέα των αποθηκευτικών διατάξεων και ακολούθως την μοντελοποίηση ενδεικτικής διάταξης που βρίσκει χρήση στον τομέα των οχημάτων. Η εργασία αυτή διαρθρώνεται ως ακολούθως:

- Στο 1^ο κεφάλαιο, επισημαίνεται ο σκοπός εκπόνησης της εργασίας, καταγράφεται η συνεισφορά της και παρουσιάζονται συνοπτικά τα περιεχόμενά της ανά κεφάλαιο.

- Στο 2^ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες μπαταριών και τα χαρακτηριστικά τους με έμφαση στον κλάδο της ηλεκτροκίνησης. Για τον λόγο αυτό παρέχεται μια συνολική σκοπιά στον κλάδο.
- Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας και η δομή των μπαταριών που αποτελούν το αντικείμενο εξέτασης. Αναλύονται οι ιδιαιτερότητες της μπαταρίας και αναφέρονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που την καθιστούν σημαντική για την μελέτη εξέτασης. Επιπλέον, γίνεται εισαγωγική αναφορά στην μοντελοποίηση των αποθηκευτικών διατάξεων.
- Στο κεφάλαιο 4 επιλέγεται ένα συγκεκριμένο μοντέλο για τις αποθηκευτικές διατάξεις στην ηλεκτροκίνηση και κάθε τμήμα προσομοιώνεται ξεχωριστά. Καθορίζονται οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου.
- Στο 5^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η υλοποίηση σε Matlab του προτεινόμενου μοντέλου, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και αναλύεται η μέθοδος προσδιορισμού των παραμέτρων του μοντέλου από τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.
- Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές που προκύπτουν από την προσομοίωση και τα βασικά συμπεράσματα από την χρήση του μοντέλου. Επίσης, αναφέρονται οι φάσεις φόρτισης - εκφόρτισης τις παραμέτρους του μοντέλου.
- Το κεφάλαιο 7 συνοψίζει τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, επισημαίνει τη συνεισφορά της και αναδεικνύει θέματα που χρήζουν περαιτέρω μελέτης.

2 Τεχνολογίες και Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικών Οχημάτων

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια διαπιστώνεται παγκόσμια ανησυχία ως προς την αύξηση των αέριων του θερμοκηπίου, συνεπώς ο συνδυασμός τόσο της επιβάρυνσης της ατμόσφαιρας των αστικών πόλεων όσο και με την απότομη αύξηση των τιμών του πετρελαίου αποτέλεσε το έναυσμα προς υιοθέτηση νέων μέσων στον τομέα των μεταφορών φιλικότερων προς το περιβάλλον. Η λύση που φαντάζει ως η κατάλληλη στο ζήτημα των μεταφορών είναι τα ηλεκτρικά οχήματα. Οι πρόσφατες εξελίξεις στο πεδίο των μπαταριών ενίσχυσαν την ανταγωνιστικότητα των ηλεκτροκίνητων, ωθώντας προς το τομέα αυτό τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Μολαταύτα, απαιτούνται σημαντικές ακόμη προσπάθειες προκειμένου τα οχήματα αυτά να καλύψουν ένα μεγάλο μέρος της αγοράς. Η έλλειψη των υποδομών αλλά και το ακριβό κόστος αποτελούν οι σημαντικότερες παράμετροι στην υφιστάμενη κατάσταση (Gover, 2010).

Ενδεχομένως υπάρχουν άνθρωποι που θεωρούν ότι τα ηλεκτροκίνητα οχήματα αποτελούν ένα προϊόν των τελευταίων ετών. Η αλήθεια είναι ότι τα πρώτα οχήματα ήταν ηλεκτροκίνητα, ωστόσο η συμβατική κίνηση αναπτύχθηκε λόγω του χαμηλού κόστους του πετρελαίου στις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Σήμερα όμως, με το κόστος υψηλό και τους πόρους περιορισμένους, παρατηρείται στροφή προς νέες τάσεις στην ηλεκτροκίνηση. Ακολουθεί μια σύντομη ανάδρομη στον τομέα αυτό¹:

- 1831: Ο καθηγητής μαθηματικών Joseph Henry εφευρίσκει τον ηλεκτροκινητήρα κατά την προσπάθεια του κατανόησης των ηλεκτρομαγνητών.
- 1834: Ο Thomas Davenport, εφευρίσκει το πρώτο ηλεκτρικό όχημα κινούμενο σε ράγες, το οποίο όμως δεν είχε δυνατότητα επαναφόρτισης της μπαταρίας του.
- 1859: Ο φυσικός Gaston Plante ανακαλύπτει τις μπαταρίες Μολύβδου-Οξέως (Pb-Acid), οι οποίες έχουν δυνατότητα επαναφόρτισης.

¹ <http://www.pbs.org/now/shows/223/electric-car-timeline.html>, (12/07/2014).

- 1890: Ο William Morrison από την Iowa αναπτύσσει το πρώτο επιτυχημένο ηλεκτρικό αυτοκίνητο στις Η.Π.Α., το οποίο δύναται να κινηθεί με 22km/h για 13 ώρες.

Τα χρόνια που ακολούθησαν συνεχίστηκε η εξέλιξη του κλάδου, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρικά οχήματα να κατέχουν τα ρεκόρ ταχύτητας και μέγιστης απόστασης.

- 1900: Τα ηλεκτρικά οχήματα ακολουθούν πορεία άνθισης, αφού από τα αυτοκίνητα που κατασκευάστηκαν στην Αμερική σχεδόν το ένα τρίτο είναι ηλεκτρικά.
- 1908: Ο Henry Ford αναπτύσσει το πρώτο βενζινοκίνητο όχημα μαζικής παραγωγής (το Model T) που επιδρά σημαντικά στην αγορά αυτοκινήτων των Η.Π.Α.
- 1920: Διακόπτεται η παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως μη βιώσιμη, αφού η τιμή πώλησης τους συνεχώς αυξάνεται. Οι πωλήσεις συνεπώς ελαχιστοποιούνται και ως εκ τούτου επέρχεται η σταδιακή επικράτηση του βενζινοκινητήρα.
- 1920-1970: Τα ηλεκτρικά οχήματα βρίσκονται σε παρακμή, αφού τα βενζινοκίνητα οχήματα πλέον προτιμώνται λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων που μπορούν να διανύσουν, της μεγαλύτερης ιπποδύναμης και της χαμηλής τιμής της βενζίνης σε σχέση με τον ηλεκτρισμό.

Τα ηλεκτρικά οχήματα επαναφέρονται κατά τη δεκαετία του 1970, κατόπιν της ανησυχίας αύξησης των τιμών του πετρελαίου, η οποία κορυφώθηκε με την πετρελαϊκή κρίση του 1973 (Gover, 2010):

- 1974: Το ηλεκτρικό όχημα CitiCar κάνει την εμφάνιση του στο Συμπόσιο Ηλεκτρικών Οχημάτων στην Ουάσινγκτον. Χαρακτηρίζεται από μέγιστη ταχύτητα περίπου 50km/h και δυνατότητα διάνυσης απόστασης περίπου 60km.
- 1976: Το Αμερικανικό Κογκρέσο νομοθετεί την προώθηση της ερευνητικής προσπάθειας ως προς τα ηλεκτρικά οχήματα με σκοπό κυρίως τη βελτίωση των μπαταριών και των κινητήρων.
- 1990: Η California εκδίδει την εντολή ZEV (Zero Emission Vehicle), σύμφωνα με την οποία μέχρι το 1998, 2% των οχημάτων της πολιτείας και

μέχρι το 2003, 10% των οχημάτων πρέπει να έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων.

- 1997-2003: Καταξιωμένες αυτοκινητοβιομηχανίες (GM, TOYOTA) αναπτύσσουν μερικές χιλιάδες ηλεκτρικά οχήματα προς μαζική πώληση με πολύ ενθαρρυντική ανταπόκριση από το αγοραστικό κοινό.
- 2007 - Σήμερα: Κατόπιν του Πρωτοκόλλου του Kyoto και επιδιώκοντας την επίτευξη των στόχων που τίθενται απ' αυτό, αναθερμαίνεται το ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα. Προς τη κατεύθυνση αυτή πολλές χώρες (Ισραήλ, Ιαπωνία, Αυστραλία, Η.Π.Α., Καναδάς, Δανία) υιοθετούν προγράμματα υποστήριξης ηλεκτρικών οχημάτων.

Στον τομέα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων έχει παρατηρηθεί ραγδαία εξέλιξη με πλήθος μοντέλων από τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Αυξημένο κόστος κατασκευής, χαμηλός χρόνος ζωής της μπαταρίας, μικρή διανυόμενη απόσταση και ανάγκη κατασκευής σταθμών φόρτισης και λοιπών απαιτούμενων υποδομών αποτελούν τα βασικά εμπόδια προς τη κατεύθυνση της εξάπλωσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Όμως, το περιβάλλον καθίσταται πλέον καθ' όλα ανταγωνιστικό, συνεπώς η ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων κρίνεται αναγκαία. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα συνοψίζονται ακολούθως (ERPI, 2009):

- Ενεργειακή απόδοση. Μια μηχανή καύσεως δεν είναι αποδοτική και καταναλώνει πολλά καύσιμα, αφού ακολουθεί τους νόμους της θερμοδυναμικής. Βάσει υφιστάμενων δεδομένων, οι ηλεκτροκινήτρες δύναται να αποδώσουν περί το 75% της χημικής ενέργειας που αποθηκεύεται στις μπαταρίες σε κίνηση των τροχών εν αντιθέσει με τις μηχανές εσωτερικής καύσης που μετατρέπουν μόνο το 20% της ενέργειας που είναι διαθέσιμη από το καύσιμο.
- Ενεργειακή ανεξάρτηση. Περιορίζεται η ζήτηση πετρελαίου για τον τομέα των μεταφορών, μειώνοντας την ενεργειακή εξάρτηση. Σε πολιτικό επίπεδο το σημείο αυτό καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικό, δεδομένου του ασταθούς περιβάλλοντος που έχει δημιουργηθεί τα τελευταία χρόνια. Συνδυαστικά με τις ανοδικές τάσεις της τιμής του πετρελαίου, διαφαίνεται ότι το κόστος κίνησης αναμένεται να αυξηθεί.

- Μείωση εκπομπών. Το ηλεκτρικό όχημα χαρακτηρίζεται σαν αυτοκίνητο πόλης. Με την εισαγωγή των οχημάτων αυτών μειώνονται οι εκπομπές και ελαφρύνεται η ήδη επιβαρυμένη ατμόσφαιρα των πόλεων.
- Μέσος χρόνος ζωής του ηλεκτροκινητήρα. Η παράμετρος αυτή υπερτερεί σημαντικά αυτήν του βενζινοκινητήρα, αφού ο τελευταίος καταναλώνει περισσότερη ενέργεια για το ίδιο ποσό έργου.
- Υπηρεσίες στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα ηλεκτρικά οχήματα δύναται να συνδράμουν στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω της V2G (Vehicle-to-Grid) διαδικασίας.

Από την άλλη μεριά, υπάρχουν σημαντικά μειονεκτήματα συνεπώς προς καθιέρωση των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτείται περαιτέρω σε βάθος έρευνα, προκειμένου να επιλυθούν σημαίνουσες προκλήσεις (Quiroga, 2009):

- Μικρή απόσταση ταξιδιού κατόπιν κάθε επαναφόρτισης της μπαταρίας. Ακόμη και αν το πρόβλημα έχει μειωθεί σημαντικά, η μαζική παράγωγή δεν επιτρέπει μεγάλη απόσταση με το ηλεκτροκίνητο όχημα (100km αυτονομία). Η μικρή αποθηκευτική τους ικανότητα περιορίζει την αυτονομία και τις επιδόσεις τους.
- Αυξημένος χρόνος επαναφόρτισης. Μια πλήρης επαναφόρτιση της συστοιχίας μπαταριών δύναται για μια τυπική φόρτιση να διαρκέσει 4-8 ώρες. Υπάρχουν και πιο γρήγορες τεχνικές με υψηλό κόστος αλλά σε καμιά περίπτωση ο χρόνος φόρτισης δεν είναι ελάχιστος.
- Περιορισμένη διάρκεια ζωής μπαταριών. Η διάρκεια ζωής μπαταριών είναι συνήθως 3 - 4 χρόνια (300-400 κύκλοι λειτουργίας ανά έτος).
- Όγκος και βάρος μπαταριών. Οι συστοιχίες μπαταριών έχουν σημαντικό βάρος και καταλαμβάνουν εξίσου σημαντικό χώρο στο όχημα. Στον όγκο των συσσωρευτών πρέπει να προσμετρηθεί και ο όγκος των συστημάτων πυροπροστασίας των μπαταριών λόγω υπερθέρμανσης ή βραχυκυκλώματος.
- Αυξημένες δαπάνες κατασκευής. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται υψηλή τιμή πώλησης. Το κόστος αποτελεί το βασικό μειονέκτημα στο επιχειρηματικό μοντέλο των ηλεκτρικών οχημάτων και το κόστος πρέπει να μειωθεί

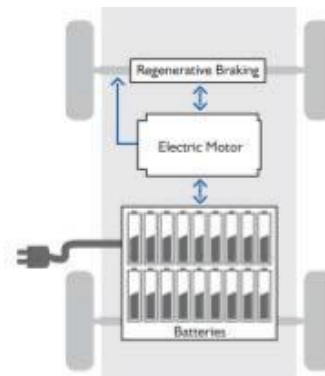
περαιτέρω τα επόμενα χρόνια. Το κόστος της αντικατάστασης των συσσωρευτών αποτελεί έναν άλλο δυσμενή παράγοντα.

2.2 Κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων

Στο σημείο αυτό περιγράφονται οι κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με τις τεχνολογίες κίνησης που υιοθετούν. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι οι οποίοι αναλύονται (ERPI, 2009):

1. Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery EVs) αποθηκεύουν ηλεκτροχημική ενέργεια στις μπαταρίες και εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους κατά την κίνησή τους. Σήμερα οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος αποτελούν τη φθηνότερη επιλογή, ωστόσο νέες τεχνολογίες βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Οι μπαταρίες φορτίζονται με σύνδεση τόσο στο δίκτυο όσο και με «αναπαραγωγικό φρενάρισμα» (regenerative braking). Αποτελεί την βασική περίπτωση του καθαρού ηλεκτρικού οχήματος, όπως εξετάζεται στην παρούσα μελέτη.

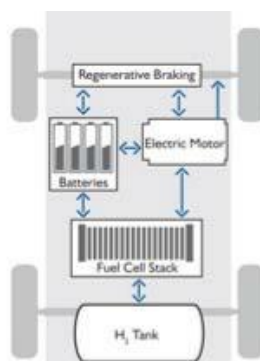


Σχήμα 1: Αναπαράσταση Battery EVs (Μανιάς, 2001)

2. Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell EVs) αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου (H_2), η οποία τροφοδοτεί μια κυψέλη καυσίμου μαζί με ατμοσφαιρικό οξυγόνο (O_2), παράγοντας ηλεκτρισμό με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, όπου τα μόνα παραπροϊόντα είναι θερμότητα και νερό. Στη διεθνή βιβλιογραφία μελετώνται διάφοροι τρόποι για την αποθήκευση ή την παραγωγή υδρογόνου πάνω στο ίδιο το όχημα. Σήμερα κυκλοφορεί στους δρόμους παγκοσμίως ένας αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων κυψελών καυσίμου, συμπεριλαμβανομένων

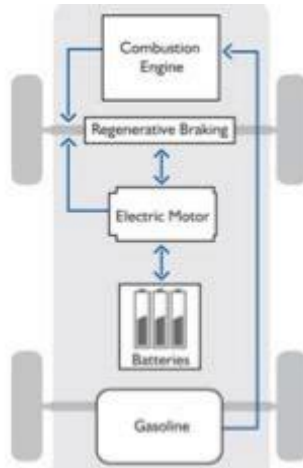
επιβατικών αυτοκινήτων, φορτηγών διανομής, λεωφορείων και στρατιωτικών οχημάτων. Παρά ταύτα, η απαιτούμενη υποδομή για τη διανομή του υδρογόνου (H₂), η επί του οχήματος αποθήκευσή του καθώς και οι απώλειες μετατροπής αποτελούν σημαντικά προβλήματα που χρήζουν επίλυσης σε μια μαζική εξάπλωση της τεχνολογίας.



Σχήμα 2: Αναπαράσταση Fuel Cell EVs (Μανιάς, 2001)

3. Υβριδικά οχήματα

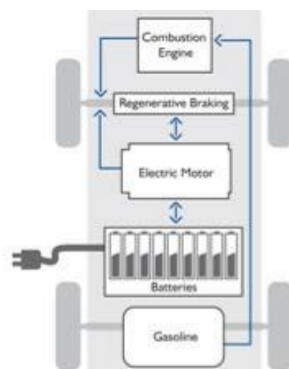
Τα σύγχρονα υβριδικά οχήματα (Hybrid EVs) χρησιμοποιούν για την κίνηση τους συνδυαστικά ηλεκτροκινητήρα και μηχανή εσωτερικής καύσης. Κάθε υβριδικό όχημα έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι σε θέση να φορτίζει τις μπαταρίες του μέσω του «αναπαραγωγικού φρεναρίσματος». Την ενέργεια αυτή τη χρησιμοποιεί ακολούθως για τη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα χωρίς να χρειάζεται να συνδεθεί στο δίκτυο. Ένα υβριδικό όχημα «παράλληλης» λειτουργίας αξιοποιεί τον ηλεκτροκινητήρα ή τη μηχανή εσωτερικής καύσης για την κίνηση του οχήματος. Η αγορά υβριδικών οχημάτων αυξάνεται διαρκώς και περισσότερα μοντέλα διατίθενται πλέον στο καταναλωτικό κοινό. Τα υβριδικά οχήματα που ως τώρα παράγονται μαζικά διαθέτουν μεγαλύτερη μηχανική παρά ηλεκτρική ισχύ κίνησης (περίπου 75-25%), μικρές μπαταρίες (1-2kWh), και δεν έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο.



Σχήμα 3: Αναπαράσταση Hybrid EVs (Μανιάς, 2001)

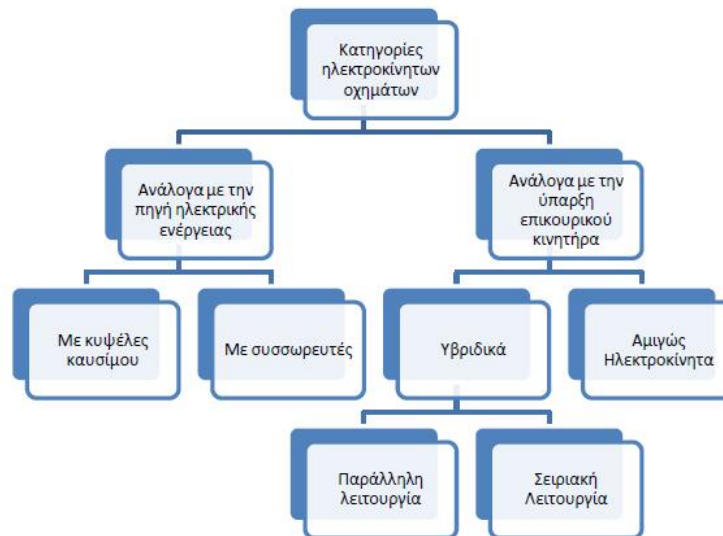
4. Υβριδικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο

Τα υβριδικά οχήματα έχουν την δυνατότητα σύνδεσης σε δίκτυο (Plug-in HEVs) και μπορούν να συνδέονται ώστε να ανταλλάσσουν ηλεκτρική ενέργεια με αυτό. Κάθε ένας από τους τύπους αυτών των οχημάτων που προαναφέρθηκαν δύναται με την προσθήκη του κατάλληλου εξοπλισμού να αποκτήσει αυτή τη δυνατότητα. Τα υβριδικά οχήματα με δυνατότητα διασύνδεσης σε δίκτυο διαθέτουν μεγάλη μπαταρία και χρησιμοποιούν για να κινηθούν ένα συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο ενέργειας, και από το «αναπαραγωγικό φρενάρισμα» καθώς και ενέργεια από μηχανή εσωτερικής καύσης ή κυψέλη καυσίμου. Ουσιαστικά φορτίζουν όσο είναι ακινητοποιημένα, και ως εκ τούτου για σύντομες διαδρομές δεν απαιτούν καθόλου καύσιμο παρά μόνο αποθηκευμένη ενέργεια.



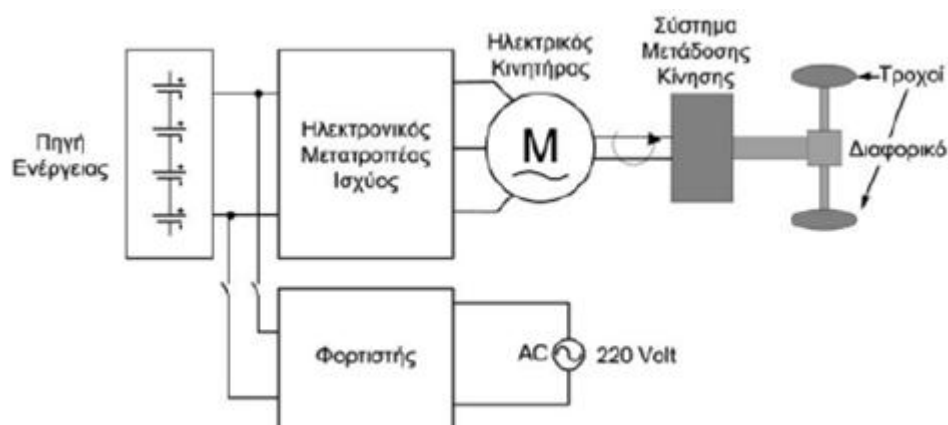
Σχήμα 4: Αναπαράσταση Plug-in HEVs (Μανιάς, 2001)

Συνοπτικά ακολούθως παρουσιάζονται όλες οι διαθέσιμες τεχνικές στα ηλεκτρικά οχήματα (Campbell, 2010).



Σχήμα 5: Διαθέσιμες τεχνικές στα ηλεκτρικά οχήματα (Campbell, 2010).

Βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων αποτελεί η απουσία ενός βενζινοκινητήρα και η εξασφάλιση της απαραίτητης ενέργειας κίνησης του οχήματος από την απόδοση ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Τα βασικά στοιχεία ενός οχήματος απεικονίζονται στο διάγραμμα. Αναλυτικότερα, ένα ηλεκτροκίνητο όχημα περιλαμβάνει τις βασικές συνιστώσες: κινητήρας, μετατροπείς, αποθηκευτικές διατάξεις (πηγή ενέργειας) και τρόπος φόρτισης.



Σχήμα 6: Βασικές αρχές - τμήματα ηλεκτρικού οχήματος (Μανιάς, 2001).

2.2.1 Ηλεκτρικός κινητήρας

Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι το κύριο τμήμα του μηχανισμού, αφού εξασφαλίζει τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Τα βασικά στοιχεία / συστατικά για κάθε ηλεκτροκινητήρα είναι (Μανιάς, 2001):

- η τάση για την τροφοδοσία του σε (Volts),
- η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον κινητήρα (σε A)
- το είδος του ρεύματος (συνεχές ή εναλλασσόμενο και μονοφασικό ή τριφασικό),
- η συχνότητα του ρεύματος για εναλλασσόμενο (Hertz),
- η ισχύς του κινητήρα σε Watt ή ίππους (W ή HP),
- η αποκτώμενη ταχύτητα περιστροφής του άξονα του κινητήρα σε στροφές ανά λεπτό (rpm).

Οι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα διακρίνονται σε κινητήρες Συνεχούς και Εναλλασσόμενου Ρεύματος. Η κατηγοριοποίηση αυτή αναφέρεται στο Σχήμα 7. Η λεπτομερής εξέταση των κινητήρων δεν είναι ο στόχος της παρούσας εργασίας αλλά αξίζει να τονιστεί ότι η όλη θεώρηση για την επιλογή του κίνητρα λαμβάνει υπόψη την χρήση και τα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά του οχήματος.



Σχήμα 7: Βασικές αρχές- εναλλακτικές ηλεκτρικού κινητήρα

2.2.2 Μετατροπείς Ισχύος

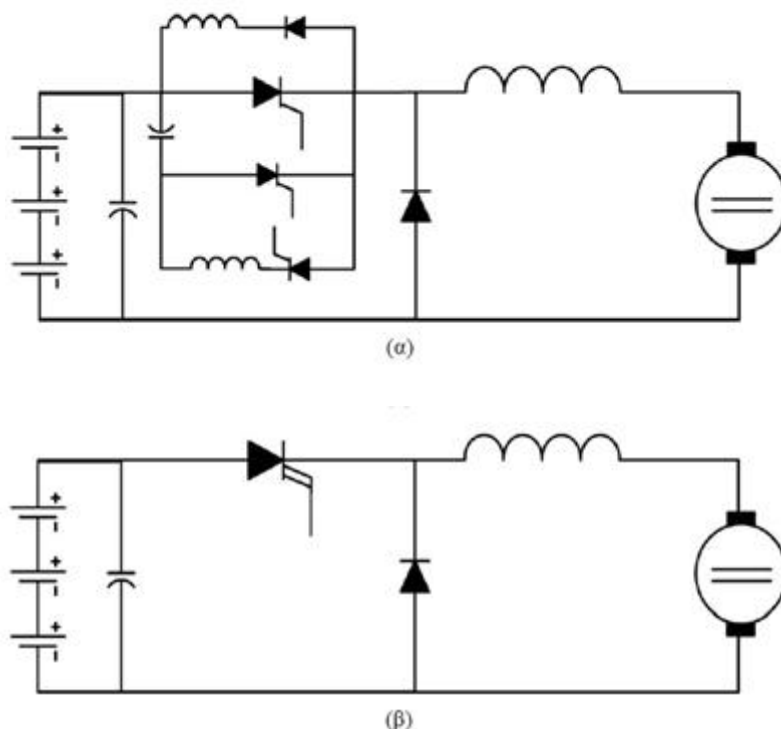
Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας είναι το τμήμα που λαμβάνει τη συνεχή τάση των αποθηκευτικών διατάξεων και τη μετατρέπει σε κατάλληλη μορφή για την τροφοδότηση του κινητήρα. Επιπλέον, μια πολύ σημαντική διαδικασία είναι ο έλεγχος της ροπής και των στροφών του κινητήρα. Η επιλογή του μετατροπέα που θα οριστεί σε ένα ηλεκτρικό όχημα εξαρτάται κυρίως από το είδος του κινητήρα που χρησιμοποιείται (Μανιάς, 2001).

Έτσι, με βάση τους διαθέσιμους κινητήρες υπάρχουν μετατροπείς «τύπου chopper» και μετατροπείς «τύπου αντιστροφέα (inverter)». Οι διατάξεις του αντιστροφέα δύνανται να οδηγούν κινητήρες ρεύματος που απαιτούν ημιτονοειδή τάση (ασύγχρονος και σύγχρονος κινητήρας) αλλά και τετραγωνικούς παλμούς (κινητήρας τύπου Brushless, κινητήρας τύπου switched reluctance). Ακολούθως αναλύεται η κατηγορία μετατροπέων.

2.2.2.1 Μετατροπείς τύπου chopper

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μετατροπέων chopper. Ο ένας χρησιμοποιεί το θυρίστορ ως διακοπτικό στοιχείο και ακόμη ένα βοηθητικό κύκλωμα για τη σβέση του. Βασικό πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα για έλεγχο μεγάλης ισχύος. Όμως, η συχνότητα λειτουργίας των θυρίστορ είναι σχετικά χαμηλή με αποτέλεσμα η εξομάλυνση του ρεύματος να απαιτεί μια επαγωγική διάταξη.

Τα μειονεκτήματα αυτής της τοπολογίας αντισταθμίζονται από την δεύτερη κατηγορία που χρησιμοποιεί διακοπτικά στοιχεία με έλεγχο σβέση, όπως για παράδειγμα είναι τα MOSFET, IGBT, GTO. Με τη χρήση των διατάξεων αυτών επιτυγχάνεται μικρός αριθμός παθητικών στοιχείων και κατά συνέπεια χαμηλό μέγεθος και κόστος. Ένα πλεονέκτημα άπτεται επιπρόσθετα το μεγαλύτερο εύρος ρύθμισης της διάταξης, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερο εύρος τάσης εξόδου. Στο Σχήμα 8 απεικονίζονται οι παραλλαγές του chopper.



Σχήμα 8: Διαφορετικές παραλλαγές του μετατροπέα τύπου chopper (Παπαθανασίου, 2002).

2.2.2.2 Μετατροπείς $\Sigma.T/E.T$ τύπου αντιστροφεία

Οι μετατροπείς αυτοί χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η μια περιλαμβάνει τους κλασικούς μετατροπείς με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM) και η άλλη τους λεγόμενους συντονισμού. Οι αντιστροφείς PWM χωρίζονται επιπρόσθετα σε αντιστροφείς τάσης και ρεύματος, ανάλογα με το αν τροφοδοτούνται από πηγή τάσης ή ρεύματος.

Από τις διαθέσιμες τεχνικές επιλέγεται η καταλληλότερη με βάση ορισμένα κριτήρια που σχετίζονται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης κινητήρα. Η πολυπλοκότητα του συστήματος απαιτεί τη χρήση ενός υπολογιστικού συστήματος, ώστε να επιτευχθούν τεχνικές παλμοδότησης και ελέγχου.

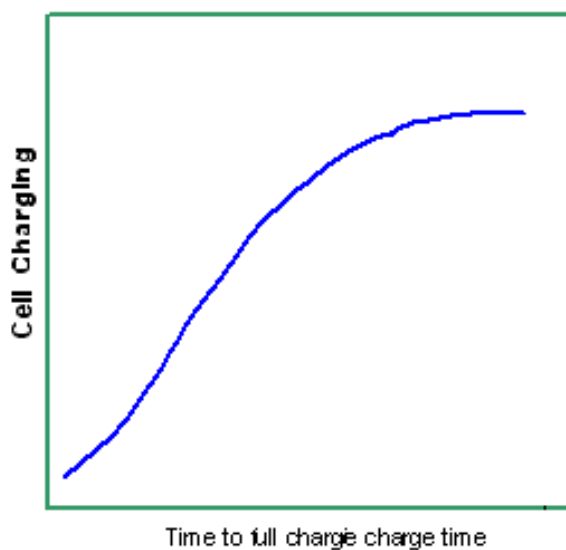
Υπάρχουν και πιο πολύπλοκα συστήματα έλεγχου των κινητήρων που έχουν σαν στόχο την επίλυση των παραπάνω μειονεκτημάτων. Όμως, οι ανωτέρω κατηγορίες καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό και σε υψηλό πεδίο εξέτασης όλες της περιπτώσεις θεώρησης και για τον λόγο αυτό δεν γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε τεχνικές λεπτομέρειες των άλλων τεχνικών.

2.2.3 Φόρτιση των συσσωρευτών

Η φόρτιση των μπαταριών αποτελεί τη βασική παράμετρο για να καταστεί η λειτουργία ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος απολύτως λειτουργική. Στη συγκεκριμένη ενότητα θα αναφερθούν οι τεχνολογικές παράμετροι για την φόρτιση των οχημάτων.

2.2.3.1 Φόρτιση μέσω του οικιακού δικτύου

Οι δυνατότητες του οικιακού δικτύου δύναται να προσδιοριστούν αν ληφθεί υπόψη ως τάση δικτύου τα 220V, ενώ οι γραμμές παροχών έχουν μέγιστη ένταση 16A ή 32A, ανάλογα με τις ασφάλειες εγκατάστασης. Συνεπώς, η δυνατότητα ισχύος κυμαίνεται από 3,5 έως 7kW. Από το ακόλουθο διάγραμμα που περιγράφει σχετικές μετρήσεις σε συσσωρευτή ονομαστικής χωρητικότητας 20kWh μέσω του τυπικού δικτύου, δύναται να παρατηρηθεί πως ενώ αρχικά η φόρτιση γίνεται με σταθερό ρυθμό, αυτός μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και ειδικότερα προς το τέλος της φόρτισης, γεγονός που κάνει τους προαναφερόμενους χρόνους ακόμα μεγαλύτερους (MERGE, D1.1).

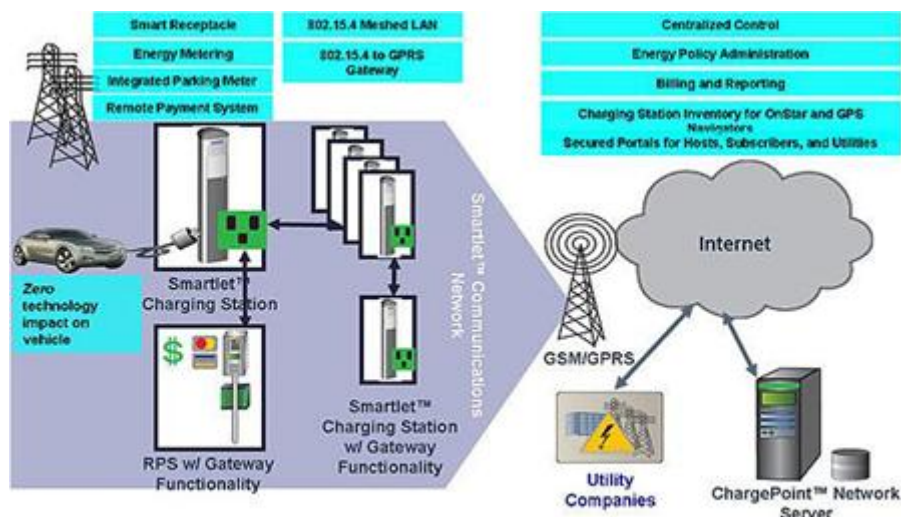


Σχήμα 9: Καμπύλη φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος - Αργή φόρτιση (MERGE, D1.1)

2.2.3.2 Φόρτιση σε δημόσιο χώρο

Μια εναλλακτική τεχνική φόρτισης εφαρμόζεται σε σταθμούς parking όταν το όχημα, όντας παρκαρισμένο, θα φορτίζεται. Οι προδιαγραφές των συσκευών φόρτισης για την περίπτωση αυτή ορίζουν τριφασική τροφοδοσία ενώ ο φορτιστής

βρίσκεται εκτός οχήματος. Βέβαια, πρέπει να εξεταστούν όλες οι παράμετροι που να εξασφαλίζουν την τιμολόγηση αλλά και τον αντικειμενικό έλεγχο της φόρτισης. Ένα τέτοιο σύστημα που απαιτεί υψηλό ICT παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί (MERGE, D1.1).



Σχήμα 10: Τοπολογία ICT για φόρτιση σε δημόσιο δίκτυο (ICT Network, 2010)

2.2.3.3 Χρήση κοινόχρηστων φορτιστών συνεχούς ρεύματος

Μέσα στις δυνατότητες της φόρτισης κατά τη διάρκεια του παρκαρίσματος περιέχεται και η λειτουργία της «ταχυφόρτισης», που ουσιαστικά αφορά την περίπτωση που η φόρτιση των συσσωρευτών υλοποιείται με μεγάλο ρεύμα (>100^A) και μικρή διάρκεια (περί τα 20min). Ο τρόπος αυτός ορίζεται κυρίως σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης. Επιπρόσθετα, σημαντικό χαρακτηριστικό των διατάξεων αυτών είναι η δυνατότητα «εξισωτικής φόρτισης», η οποία ορίζεται στο συνεχή έλεγχο της τάσης των εν σειρά στοιχείων. Θα πρέπει όμως κάθε φορά να χρησιμοποιείται ο κατάλληλος εξοπλισμός όπως είναι το ξεχωριστό βύσμα CHAdeMO (Charge and Move) [MERGE, D1.1].

2.2.3.4 Επαγωγική φόρτιση

Η επαγωγική φόρτιση αποτελεί μια εναλλακτική μέθοδο φόρτισης, η οποία στηρίζεται στην ιδιότητα της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η συμβατική σύνδεση πηγής και συσσωρευτή αντικαθίσταται από μια ειδική διάταξη, όπως αυτή που φαίνεται στην εικόνα, η οποία μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια επαγωγικά.



Σχήμα 11: Τοπολογία επαγωγικής φόρτισης (www.sgte-power.com)

Η διάταξη αυτή είναι ουσιαστικά το πρωτεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή, το οποίο περιβάλλεται από ειδικό κάλυμμα. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει το πλεονέκτημα της αυξημένης ασφάλειας λόγω της απουσίας μεταλλικού υλικού κατά τη σύνδεση. Από την άλλη μεριά όμως το βασικό μειονέκτημα αποτελεί το αυξημένο κόστος, τουλάχιστον συγκρινόμενο με τη συμβατική σύνδεση.

2.3 Αρχή λειτουργίας μιας μπαταρίας

Το βασικό σημείο εξέτασης της παρούσας μελέτης είναι οι αποθηκευτικές διατάξεις σε ηλεκτρικά οχήματα και για το λόγο αυτό παρουσιάζεται μια ιδιαίτερη αναφορά. Η μπαταρία αποτελείται από δύο ή περισσότερα χημικά στοιχεία ενωμένα μεταξύ τους. Κάθε στοιχείο μετατρέπει τη χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα στοιχεία αποτελούνται από το θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται ο ηλεκτρολύτης. Η χημική αντίδραση μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων και του κεντρικού ηλεκτρολύτη παράγει τον ηλεκτρισμό. Στην περίπτωση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών, η χημική αντίδραση δύναται να αντιστραφεί αν αντιστραφεί το ρεύμα που ρέει διαμέσου του εξωτερικού κυκλώματος, οπότε και η μπαταρία επανέρχεται στη φορτισμένη της κατάσταση (MERGE, D1.4).

Διατίθενται πληθώρα υλικών και ηλεκτρολυτών που δύναται να συνδυαστούν για το σχηματισμό μιας μπαταρίας. Παρά ταύτα, μόνον ένας μικρός αριθμός έχουν εξελιχθεί σε εμπορικά διαθέσιμες μπαταρίες. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται:

- μολύβδου οξέος (Lead Acid)
- νικελίου σιδήρου, νικελίου καδμίου (NiCd)

- νικελίου υδριδίου μετάλλου (NiMH)
- λιθίου πολυμερούς (LiPo) και λιθίου σιδήρου (LiFePO₄)
- νατρίου θείου (NaS)
- νατρίου μεταλλικού χλωριδίου.

Υπάρχουν επίσης πιο πρόσφατες εξελίξεις με μπαταρίες που ανήκουν οι αλουμινίου-αέρα (Al-air) και οι ψευδαργύρου-αέρα (Zn-air) [MERGE, D1.4].

Το Ινστιτούτο Rocky Mountain έχει κάνει μια μελέτη με τις πιο πολλές διαθέσιμες τεχνολογίες. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον Πίνακα 1, και περιλαμβάνουν διάφορες παραμέτρους εξέτασης. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα σύγκρισης όπως αναφέρεται (Bergveld, 2001).

Τύπος	Ενέργεια	Ισχύς	Κόστος	Χρόνος ζωής	Ασφάλεια	Στάδιο εξέλιξης	Σχόλια
Μολύβδου οξέως	Εξαιρετικά περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα	Πολύ περιορισμένη πυκνότητα ισχύος	Πολύ χαμηλό κόστος	Επαρκής για χρήση σε συμβατικά αυτοκίνητα, αλλά όχι κατάλληλη για ηλεκτροκίνηση	Δοκιμασμένη ασφάλεια. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του μολύβδου μετριάζονται λόγω ύπαρξης εκτεταμένης υποδομής ανακύκλωσης του.	Πολύ ώριμη τεχνολογία, ευρεία εμπορική χρήση	Γνώριμη τεχνολογία με δοκιμασμένη αξιοπιστία και ασφάλεια και χαμηλό κόστος.
Νικελίου Καδμίου	Πολύ περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα	Περιορισμένη πυκνότητα ισχύος	Σχετικά υψηλό κόστος με μικρό περιθώριο περαιτέρω μείωσης	Ικανοποιητική διάρκεια ζωής	Εγνωσμένης αξιοπιστίας και ασφάλειας (χρήση σε ηλεκτρονικές συσκευές). Το κάδμιο είναι τοξικό	Πολύ ώριμη τεχνολογία, Ευρεία εμπορική χρήση	Φαινόμενο μνήμης. Έχουν εγκαταλειφθεί, αφού υστερούν έναντι των NiMH και των Li-Ion
NiMH	Περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα	Περιορισμένη πυκνότητα ισχύος	Περιορισμένες προοπτικές για μείωση κόστους	Αποδεδειγμένη αντοχή και ικανοποιητικός χρόνος ζωής	Καλό ιστορικό ασφάλειας	Ευρεία εμπορική χρήση	Ωριμη τεχνολογία με πολύ μικρά περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης σε θέματα ενέργειας, ισχύος και κόστους
LiCoO ₂ /γραφίτης (LCO)	Καλή ενεργειακή πυκνότητα	Καλή πυκνότητα ισχύος	Υψηλό: το κόστος του κοβαλτίου δυσχεραίνει την περαιτέρω μείωση του κόστους	Ο αριθμός διαθέσιμων κύκλων φόρτισης / εκφόρτισης είναι ικανοποιητικός για εφαρμογές ηλεκτρονικών συσκευών, αλλά ανεπαρκής για ηλεκτροκίνητα οχήματα	Προσφέρει χαμηλή προς μέτρια ασφάλεια. Τα προβλήματα ανεξέλεγκτων θερμικών αντιδράσεων καθιστούν απαγορευτική τη χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα	Ευρεία εμπορική χρήση	Η πιο δημοφιλής χημεία για εφαρμογές φορητών ηλεκτρονικών συσκευών. Όχι κατάλληλη για ηλεκτρικά οχήματα
Li(Ni _{0.85} Co _{0.1} Al _{0.05})O ₂ /γραφίτης (LCO)	Καλή ενεργειακή πυκνότητα	Καλή πυκνότητα ισχύος	Μέτριο κόστος. Δύσκολη η περαιτέρω μείωση λόγω παρουσίας κοβαλτίου και νικελίου	Ικανοποιητική διάρκεια ζωής	Μέτρια ασφάλεια: τα βασισμένα σε νικέλιο ηλεκτρόδια είναι θερμικά ασταθή και η για υψηλές στάθμες φόρτισης	Πιλοτική	Παρόμοιες χημείες αναπτύσσονται προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα ασφάλειας κόστους

LiFePO ₄ / Γραφίτης (LFP)	Μέτρια ενεργειακή πυκνότητα	Καλή πυκνότητα ισχύος	Χαμηλό κόστος: μια από τις πιο οικονομικές χημείες των Li-Ion μπαταριών λόγω χαμηλού κόστους του σιδήρου	Ικανοποιητική αντοχή κα διάρκεια ζωής. Δυνατότητα λειτουργίας και σε ακραίες τιμές της στάθμης φόρτισης, χωρίς να φθίνει η ικανότητα της	Μέτρια προς καλή: το LiFePO ₄ στην κάθοδο εμφανίζει σταθερότητα και δεν απελευθερώνει οξυγόνο, αλλά ο γραφίτης στην άνοδο αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη	Σε πρώιμο στάδιο η εμπορική του χρήση	Θεωρείται μια από τις πιο πολλά υποσχόμενες χημείες, εξαιτίας εξελίξεων σε θέματα κόστους ασφάλειας και διάρκειας ζωής
Li(Ni _{1/3} Co _{1/3} Mn _{1/3})O ₂ / Γραφίτης (NCM)	Μέτρια προς καλή ενεργειακή πυκνότητα	Μέτρια πυκνότητα ισχύος	Μέτριο κόστος: περιορισμένες δυνατότητες περαιτέρω μείωσης λόγω χρήσης κοβαλτίου και νικελίου	Μικρή διάρκεια ζωής	Μέτρια ασφάλεια: τα βασισμένα σε νικέλιο ηλεκτρόδια είναι θερμικά ασταθή και η απόδοσή τους φθίνει για υψηλές στάθμες φόρτισης	Πιλοτική εφαρμογή	Παρόμοια χαρακτηριστικά με τις NCA μπαταρίες, αλλά πιο οικονομικές. Χαρακτηρίζονται από υψηλή τιμή τάσης
LiMn ₂ O ₄ / γραφίτης (LMS)	Μέτρια ενεργειακή πυκνότητα	Μέτρια πυκνότητα ισχύος	Μέτριο	Μέτριο με προοπτικές βελτίωσης. Πολύ καλή αντοχή στη χρήση, όχι τόσο καλή διάρκεια ζωής	Καλή. Το ηλεκτρόδιο από μαγγάνιο είναι πιθανόν ασφαλές	Σε στάδιο ανάπτυξης	Το μαγγάνιο διαλύεται στον ηλεκτρολύτη, υφίσταται αναγωγή στην άνοδο μειώνοντας την επίδοση της μπαταρίας
LiMn 1.5 Ni 0.5 O ₄ / Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ (MNS)	Μέτρια ενεργειακή πυκνότητα	Καλή πυκνότητα ισχύος	Μέτριο κόστος	Άγνωστο	Εξαιρετική ασφάλεια	Ερευνητικό στάδιο	Ελπιδοφόρα τεχνολογία που αντιμετωπίζει τις παθογένειες των LMS μπαταριών
Li _{1,2} Mn _{0,6} Ni _{0,2} O ₂ / Γραφίτης (MN)	Εξαιρετική ενεργειακή πυκνότητα	Εξαιρετική πυκνότητα ισχύος	Μέτριο κόστος	Άγνωστο	Εξαιρετική	Σε ερευνητικό στάδιο	Αποτελεί τη χημεία με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα (αναπτύχθηκε στο εργ. Argonne)
Ψευδαργύρου- αέρα (Zn-Air)	Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα	Περιορισμένη πυκνότητα ισχύος	Χαμηλό κόστος (λόγω του περιορισμένου κόστους του ψευδαργύρου)		Προσφέρει μεγάλη ασφάλεια κατά τη χρήση, αποθήκευση και	Σε στάδιο εμπορευματοποίησης	Επαναφορτίζονται μηχανικά με αντικατάσταση του Zn στην άνοδο. Η ηλεκτρική

							επαναφόρτιση βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο
NaNiCl (Zebra)	Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα	Περιορισμένη πυκνότητα ισχύος	Μέτριο κόστος,	Μικρός χρόνος ζωής (low cycle life)	Χαρακτηρίζεται από ασφάλεια κατά τη χρήση	Στάδιο πιλοτικής εφαρμογής	Απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες (270°C) για την ορθή λειτουργία τους

Πίνακας 1: Παρουσίαση διατάξεων μπαταριών (Bergveld, 2001)

Από την ανωτέρω εξέταση διαφαίνονται ήδη οι τύποι που είναι πιο διαδεδομένοι για τις εφαρμογές σε ηλεκτροκίνηση. Μια σύντομη περιγραφή αυτών ακολουθεί.

2.3.1.1 Μπαταρίες μολύβδου-οξέος

Οι «*συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (lead-acid)*» με ηλεκτρολύτη σε στερεά μορφή ήταν, μέχρι και τις αρχές του '90, η πρώτη επιλογή των διάφορων προσπαθειών, λόγω χαμηλού κόστους. Στα πλεονεκτήματά τους πρέπει να σημειωθεί η αξιοπιστία και η χαμηλή αυτό-εκφόρτιση. Από την άλλη πλευρά, έχουν μεγάλο βάρος (και μικρή ενεργειακή πυκνότητα). Επίσης, μειώνεται σημαντικά η διάρκεια ζωής τους σε περιπτώσεις ταχείας φόρτισης που απαιτείται στη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων. Για τους λόγους αυτούς είναι ελάχιστα χρησιμοποιούμενες διατάξεις στην ηλεκτροκίνηση.

2.3.1.2 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου

Οι μπαταρίες «νικελίου-καδμίου (*Ni-Cd*)» έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από αυτές μολύβδου-οξέος, δεν επηρεάζονται τόσο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, μπορούν να φορτιστούν σε μικρό χρονικό διάστημα ενώ μπορούν επίσης να ανακτήσουν τη χωρητικότητά τους. Στα μειονεκτήματα των συσσωρευτών αυτού του τύπου περιλαμβάνεται το αυξημένο κόστος, αλλά και το πρόβλημα μη διαδεδομένης χρήσης του καδμίου, αφού είναι υλικό που μολύνει το περιβάλλον (Kopera, 2004).

2.3.1.3 Μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου

Οι μπαταρίες «νικελίου-υδριδίου μετάλλου (*Ni-MH*)» έχουν ακόμα μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από τις δυο προηγούμενες. Μια μπαταρία Ni-MH χρησιμοποιεί ως αρνητικό ηλεκτρόδιο ένα κράμα μετάλλου που έχει την ικανότητα να απορροφά το υδρογόνο. Το μέταλλο (M) στο αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι μια ένωση που περιέχει νικέλιο, ενώ ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υδροξείδιο του καλίου. Η τάση κατά τη φόρτιση είναι 1,4-1,6V ανά στοιχείο, ενώ κατά την εκφόρτιση η τάση του ρεύματος είναι 1,25V. Οι μπαταρίες Ni-MH έχουν το μειονέκτημα ότι η απόδοσή τους επηρεάζεται αρνητικά στις υψηλές θερμοκρασίες, από την άλλη όμως χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ το κόστος τους είναι μεν υψηλό, σημαντικά όμως χαμηλότερο από εκείνο των μπαταριών λιθίου. Επιπλέον, η εσωτερική αντίσταση είναι χαμηλή, ενώ έχουν επιδείξει αξιοπιστία και αντοχή στα υβριδικά αυτοκίνητα (Kopera, 2004).

2.3.1.4 Μπαταρίες λιθίου

Οι μπαταρίες «*ιόντων λιθίου*» είναι σήμερα πλέον υποσχόμενες για το μέλλον μπαταρίες, γνωστές από πολλές εφαρμογές εκτός αυτοκίνησης. Η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι 3 φορές μεγαλύτερη, σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και η αυτοεκφόρτιση διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Με βάση το υλικό κατασκευής, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες ομάδες:

- λιθίου-οξειδίου κοβαλτίου
- λιθίου-οξειδίου μαγνησίου
- τριών στοιχείων

- λιθίου-φωσφορικού σιδήρου (LiFe-PO₄)

Οι μπαταρίες λιθίου-οξειδίου μαγνησίου επιδεικνύουν μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα, αλλά η απόδοσή τους φθίνει με την άνοδο της θερμοκρασίας και δεν θεωρούνται οι καλύτερες για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Οι μπαταρίες τριών στοιχείων έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, αλλά η απόδοσή τους φθίνει στις πολύ υψηλές και στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι μπαταρίες λιθίου-φωσφορικού σιδήρου έχουν σχετικά μικρή ενεργειακή πυκνότητα, αλλά υπερέχουν στον τομέα της ασφάλειας, κοστίζουν λιγότερο, ενώ διαθέτουν και ιδιαίτερα μεγάλο κύκλο ζωής (Kopera, 2004).

Η χημική σταθερότητα των μπαταριών λιθίου εγγυάται μεγαλύτερη ασφάλεια, καθώς και αυξημένο κύκλο ζωής. Λόγω των παραπάνω χαρακτηριστικών, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου προτιμώνται για χρήση σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα, παρά την ελαφρώς χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα που εμφανίζουν σε σχέση με τις μεταλλικού λιθίου μπαταρίες. Παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα έναντι των άλλων τύπων μπαταριών:

- Μεγάλη ειδική ενέργεια και ενεργειακή πυκνότητα.
- Χαμηλή αυτοεκφόρτιση.
- Μεγάλος χρόνος ζωής.
- Δε χρειάζονται συντήρηση.
- Αρκετά μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας.
- Ικανές να δώσουν αρκετά μεγάλα ρεύματα (high rate capability).
- Δυνατότητα να κατασκευαστούν σε μεγέθη πολύ μικρά και μορφές πολύ λεπτές.

Βεβαίως έχουν και αδύναμα σημεία, όπως:

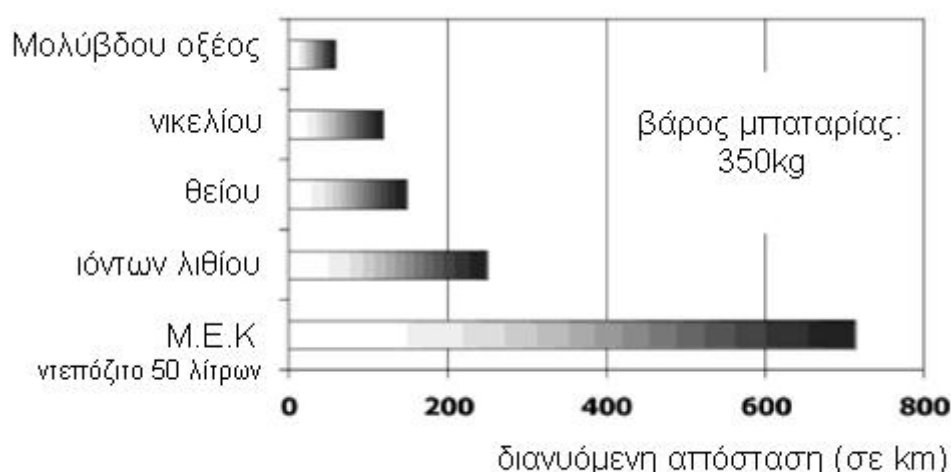
- Σχετικά υψηλό κόστος.
- Ανάγκη ύπαρξης κυκλώματος προστασίας προκειμένου να αποφευχθεί η υπερφόρτιση ή η υπέρ-εκφόρτιση.
- Η ισχύς που παρέχει είναι μικρότερη σε σχέση με τις Ni-Cd ή τις Ni-MH, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Κάποια από τα μειονεκτήματα αντιμετωπίζονται με όλο και μεγαλύτερη επιτυχία. Κάποιες μπαταρίες ιόντων λιθίου, ειδικά αυτές με πολυμερή, μπορούν να λειτουργούν με απλοποιημένα κυκλώματα προστασίας. Επίσης, η ισχύς εξόδου τους έχει αυξηθεί σημαντικά, χάρη και στη χρήση νέων υλικών καθόδου (Jaycar Electronics, 2001).

Χημεία	Τάση (V)	Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	Ενεργειακή πυκνότητα (Wh/L)	Πλήθος κύκλων λειτουργίας	Ισχύς
LiCoO ₂	3,6	-20 -60	140-190	360-500	800-1200	Μικρή προς μέτρια
NCA	3,5	-20 -60	220-240	500-630	800-1200	Μικρή προς μέτρια
NCM	3,7	-20 -60	100-150	230-400	500-700	Μικρή προς μέτρια
LiMn ₂ O ₄	3,7	-20 -60	130-150	300-320	500-700	Μεγάλη
LiFePO ₄	3,3	-30 -70	100-140	250-380	>1000	Πολύ μεγάλη

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά τύπου μπαταριών

Στο Σχήμα 12 συγκρίνονται οι διαφορές τεχνολογίες μπαταριών καθώς και η Μ.Ε.Κ ως προς την απόσταση (σε km) που θα μπορούσε να διανύσει ένα υποθετικό όχημα εφοδιασμένο με 350kg μπαταριών (ή 50 λίτρα καυσίμου για τη Μ.Ε.Κ). Αποτυπώνεται η υπεροχή των Li-Ion έναντι των υπόλοιπων τύπων μπαταρίας (αλλά και η υστέρηση όλων αυτών έναντι της Μ.Ε.Κ) [ΕΛΙΝΗΟ, 2012].



Σχήμα 12: Σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών μπαταρίας καθώς και της Μ.Ε.Κ ως προς την απόσταση (σε km) (ΕΛΙΝΗΟ, 2012)

2.4 Μπαταρίες και κυψέλες υδρογόνου

Εκτός από την υβριδική θεώρηση μπαταρίας - μηχανής εσωτερικής καύσης, πραγματοποιούνται ερευνητικές προσπάθειες που στοχεύουν στη αξιοποίηση κυψελών υδρογόνου για την παροχή της ιπποδύναμης στα αυτοκίνητα. Οι κυψέλες υδρογόνου παρέχουν υψηλές τιμές ειδικής ενέργειας, όμως από μικρές τιμές ειδικής ισχύος. Επειδή οι απαιτήσεις ισχύος σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης χαρακτηρίζονται από δυναμικότητα στην συμπεριφορά και μεγάλες διακυμάνσεις, θα πρέπει το σύστημα τροφοδότησης να έχει τη δυνατότητα:

- να αποθηκεύει επαρκώς μεγάλες ποσότητες ενέργειας.
- να είναι σε θέση να αποδίδει την ενέργεια με υψηλούς ρυθμούς οπότε μεγάλες τιμές ειδικής ισχύος.

Για το λόγο αυτό, καθίσταται απαραίτητη σε τέτοιες εφαρμογές η παρουσία ενός συστήματος αποθήκευσης που θα χαρακτηρίζεται από τιμές **ειδικής ισχύος**. Στο πλαίσιο αυτής της λογικής λοιπόν, εξετάζονται υβριδικές διατάξεις κυψελών καυσίμου και μπαταριών, όπου η μπαταρία αποδίδει την υψηλή ισχύ και η κυψέλη καυσίμου την απαραίτητη ενέργεια που απαιτείται.

2.5 Μελλοντικές Προοπτικές συστημάτων αποθήκευσης

Προς το παρόν η πλειονότητα των ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιούν μπαταρίες τεχνολογίας NiMH (Nickel Metal Hydride). Παρά ταύτα, υπάρχει στροφή προς μπαταρίες τεχνολογίας ιόντων λιθίου. Ο όρος ιόντων λιθίου δεν αναφέρεται σε μια μόνο τεχνολογία αλλά σε μια οικογένεια, καθεμία από τις οποίες έχει ξεχωριστά χαρακτηριστικά ενέργειας, ισχύος, κόστους, χρόνου ζωής και ασφάλειας (Sandy, 2002).

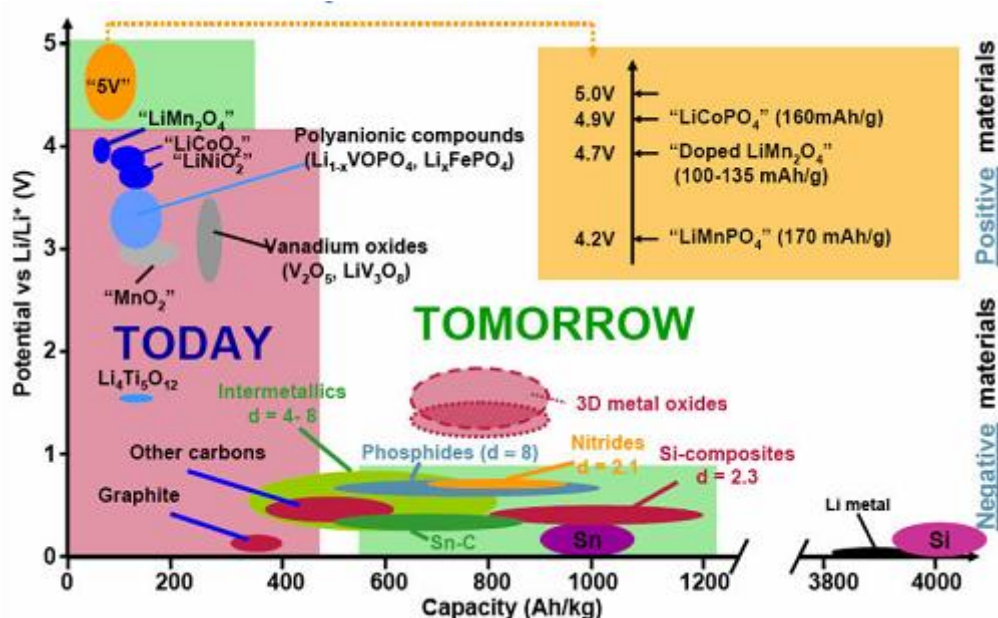
Η ηλεκτροκίνηση είναι ένα ζήτημα ολοένα και πιο σημαντικό για την Ευρώπη, αφού αποτελεί ευκαιρία για περιορισμό των εκπομπών CO₂ και της εξάρτησής της από το πετρέλαιο. Οι μεταφορές ευθύνονται για το 23-26% των συνολικών εκπομπών CO₂ και για το 70-75% της συνολικής κατανάλωσης πετρελαίου στην Ευρώπη. Μια μείωση του πετρελαίου θα είχε συνέπειες για το περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Πλέον η τεχνολογία ιόντων λιθίου κατείχε κυρίαρχη θέση στις επιχορηγήσεις για έρευνα, λαμβάνοντας περί τα 940 εκατομμύρια δολάρια. Τα χαρακτηριστικά

επίδοσης των ιόντων λιθίου είναι εκείνο που τις καθιστά πρώτη επιλογή για πολλές εφαρμογές και συνεπώς θα οδηγήσει στην αύξηση της ζήτησης, καθώς οι μπαταρίες αυτές έχουν ειδική ενέργεια 120-160Wh/Kg, σε σχέση με τις NiMH μπαταρίες (30-80 Wh/Kg) [Sandy, 2002]. Οι ιόντων λιθίου τείνουν να γίνονται ασταθείς σε θερμοκρασίες άνω των 140°C. Αυτό το πρόβλημα πρέπει να αντιμετωπιστεί προκειμένου να ενισχυθεί η εμπιστοσύνη των καταναλωτών προς αυτές και να προωθηθεί έτσι η χρήση τους σε εφαρμογές της βιομηχανίας και της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Σήμερα είναι ανάγκη να γίνουν επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη, ώστε να βρεθούν νέα υλικά που να προσδίδουν μεγαλύτερη ασφάλεια αλλά και μικρότερο κόστος. Νέες χημείες καθόδου όπως η LiFePO_4 και το LiMnO_2 υπόσχονται ήδη βελτιωμένη επίδοση.

Η συνεχιζόμενη έρευνα που στοχεύει προς νέες και καλύτερες χημείες, προς πιο αποδοτικές διεργασίες και περιορισμό του κόστους παραγωγής αναμένεται να διασφαλίσει σταθερή ροή εσόδων. Αυτό σε συνδυασμό με την αναμενόμενη αυξανόμενη ζήτηση από το χώρο των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αναμένεται να αυξήσει το παρόν μερίδιο αγοράς της συγκεκριμένης τεχνολογίας.



Σχήμα 13: Τύποι υλικών που χαρακτηρίζουν τις διατάξεις αποθήκευσης σε ηλεκτρικά οχήματα (<http://chemsud.enscm.fr>, 2012)

3 Μοντελοποίηση μπαταρίας ως μέρος του συστήματος κίνησης

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν οι λεπτομέρειες λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων και δόθηκε έμφαση στην περιγραφή των διατάξεων αποθήκευσης. Στην ενότητα αυτή ακολουθεί μια τεχνική εξέταση των αποθηκευτικών διατάξεων με στόχο την τελική επιλογή του μοντέλου και την μοντελοποίηση αυτού σε ένα πρόγραμμα προσομοίωσης. Για τον λόγο αυτό αναφέρονται οι βασικές τεχνικές παράμετροι που θα συνθέσουν το τελικό μοντέλο (Meyer, 2009).

3.1 Τεχνικές παράμετροι του στοιχείου μπαταρίας

Από τη σκοπιά του σχεδιαστή του οχήματος, η μπαταρία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα «μαύρο κουτί» το οποίο έχει μια σειρά από κριτήρια επίδοσης. Αυτά είναι (N.Σπεντζας, 2010):

- Ειδική ενέργεια (specific energy)
- Ενεργειακή πυκνότητα (energy density)
- Ειδική ισχύς (specific power)
- Τάσεις
- Ικανότητα σε Ah (amp hour efficiency)
- Ενεργειακή αποδοτικότητα (energy efficiency)
- Εμπορική διαθεσιμότητα (commercial availability)
- Κόστος
- Γεωμετρία Διάταξης
- Θερμοκρασίες λειτουργίας
- Ρυθμοί αυτό-εκφόρτισης
- Κύκλος ζωής μπαταρίας

Ο κατασκευαστής πρέπει να κατανοήσει πώς μεταβάλλεται η διαθεσιμότητα ενέργειας συναρτήσει παραμέτρων όπως είναι η θερμοκρασία, του, η γεωμετρία της μπαταρίας, οι ανάγκες ψύξης κ.α. Επίσης, απαιτείται να έχει ο κατασκευαστής μια

κατανόηση της χημείας της διάταξης, ώστε να μπορεί να εξετάσει την επίδραση που έχουν τα χημικά στοιχεία στην τελική απόδοση της διάταξης. Μια αναλυτική περιγραφή των ανωτέρω παραμέτρων παρουσιάζεται στην συνέχεια. Αρχικά, ορίζεται η χωρητικότητα της μπαταρίας σαν μέγεθος δομικό για την εξέταση και στην συνέχεια αναλύονται οι επιμέρους παράμετροι. Ο βασικός σκοπός της μπαταρίας είναι η αποθήκευση ενέργειας. Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε μια μπαταρία εξαρτάται από την τάση ακροδεκτών και το αποθηκευμένο φορτίο. Μονάδα ενέργειας είναι το Joule, όμως για τις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης χρησιμοποιείται η μονάδα της Wh (Watt-hour). 1 Wh είναι η ενέργεια που παράγει σε διάστημα 1h μια πηγή ισχύος 1W. Επιπλέον, ορίζεται η ακόλουθη σχέση:

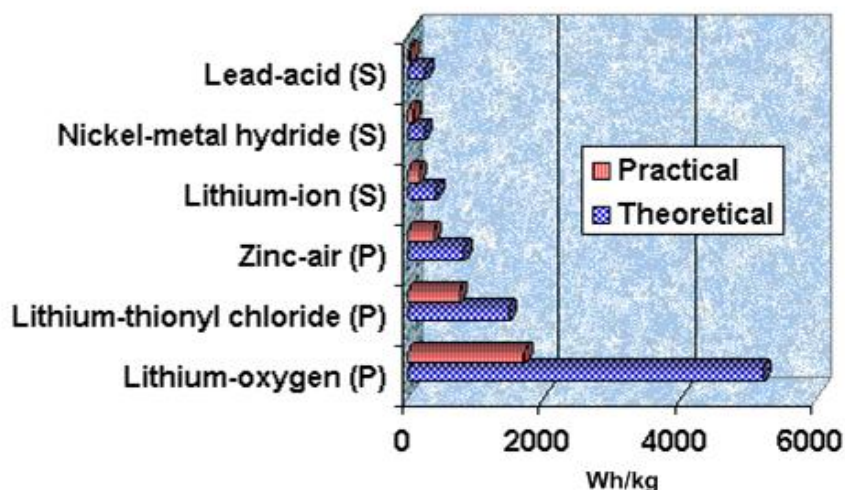
$$\text{Ενεργεια(Wh)} = \text{Τάση(V)} * \text{Φορτιο(Ah)} \quad (3.1)$$

Η τάση (V) όσο και η χωρητικότητα (Ah) μεταβάλλονται σημαντικά ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας της μπαταρίας, οπότε η εξάρτηση είναι εντελώς δυναμική. Αμφότερα τα δύο μεγέθη μειώνονται όταν το ρεύμα αυξάνεται, δηλαδή όταν η μπαταρία εκφορτίζεται. Κατά συνέπεια, η αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία είναι μια μεταβλητή ποσότητα, η οποία μειώνεται όταν η ενέργεια καταναλώνεται γρήγορα. Τέλος, η τιμή της ενέργειας που παρέχεται από τον κατασκευαστή της μπαταρίας έχει υπολογιστεί για χρονικό διάστημα εκφόρτισης που ισούται με αυτό της χωρητικότητας σε Ah (Meyer, 2009).

3.1.1 Ειδική Ενέργεια

Η ειδική ενέργεια ορίζεται ως το ποσό αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας ανά kg μάζας μπαταρίας και κατ' επέκταση μετράται σε μονάδες Wh/kg. Όταν είναι γνωστή η συνολική ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για μια εφαρμογή ηλεκτροκίνησης, τότε αυτή μπορεί να διαιρεθεί με την παράμετρο της ειδικής ενέργειας (που χαρακτηρίζει τον τύπο μπαταρίας), ώστε να ληφθεί μια προσέγγιση της μάζας που πρέπει να έχει η μπαταρία. Στο σημείο αυτό θα πρέπει επίσης να αναφερθεί η ισχυρή εξάρτηση της ενέργειας από παράγοντες όπως η θερμοκρασία και ο ρυθμός εκφόρτισης που αναλύονται παρακάτω (Ποταμιάς, 2010).

Σύγκριση διαφόρων τεχνολογιών μπαταρίας ως προς την ειδική ενέργεια



Σχήμα 14: Σύγκριση τεχνολογιών μπαταρίας ως προς την θεωρητική / πραγματική τιμή ειδικής ενέργειας που παρέχουν (Ποταμιάς, 2010).

3.1.2 Ενεργειακή πυκνότητα

Κατά αντιστοιχία, με τον όρο ενεργειακή πυκνότητα ορίζεται η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη ανά κυβικό μέτρο της μπαταρίας. Έχει μονάδες Wh/m^3 ή Wh/L . Όταν η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για μια διαδικασία κίνησης είναι γνωστή, τότε η τιμή της ενεργειακής πυκνότητας ορίζει τον προσεγγιστικό υπολογισμό του όγκου του χώρου που καταλαμβάνει η μπαταρία. Η παράμετρος αυτή συνδέει μηχανικά και ηλεκτρικά μέρη θεώρησης της μπαταρίας και για τον λόγο αυτό λαμβάνεται ως σημαντική (Ποταμιάς, 2010).

3.1.3 Ειδική Ισχύς

Η ειδική ισχύς είναι η ποσότητα ισχύος που αποδίδει η μπαταρία ανά κιλό μάζας και έχει ως μονάδα μέτρησης το W/kg . Πρόκειται για μια ποσότητα δυναμική αφού η ισχύς που παρέχεται από την μπαταρία εξαρτάται πρωτίστως από το φορτίο στο οποίο είναι συνδεδεμένη. Οπότε, κάθε μπαταρία χαρακτηρίζεται από μια μέγιστη τιμή ειδικής ισχύος. Δεν είναι δόκιμο η μπαταρία να βρίσκεται κοντά σε αυτήν την τιμή για μεγάλο χρονικό διάστημα (περισσότερο από κάποια δευτερόλεπτα), διότι η διάρκεια και η αποδοτικότητά μειώνεται (Ποταμιάς, 2010).

Οι περισσότερες μπαταρίες σε εμπορικές εφαρμογές έχουν μεγάλη τιμή ειδικής ενέργειας αλλά μικρή τιμή ειδικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι είναι σε ικανότητα να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας αλλά να δώσουν αυτή την

ενέργεια με αργούς ρυθμούς. Με άλλα λόγια σημαίνει ότι έχουν μεγάλη δυνατότητα κάλυψης αποστάσεων αλλά οι επιδόσεις τους όμως παρουσιάζονται από έλλειψη εκρηκτικότητας. Συνήθως υψηλή τιμή ειδικής ισχύος συνοδεύεται από περιορισμένη τιμή ειδικής ενέργειας, για οποιονδήποτε τύπο μπαταρία κάτι που αποτελεί και ένα από τα σημαντικά προβλήματα στον τομέα προς την εξάπλωση της ηλεκτροκίνησης.

3.1.4 Τάση ακροδεκτών μπαταρίας

Όλα τα στοιχεία της μπαταρίας έχουν μια τάση που δίνει την τιμή της τάσης όταν το στοιχείο της μπαταρίας αποδίδει την ηλεκτρική ισχύ. Η τάση αυτή είναι σε εξάρτηση ανάλογα με την τιμή του ρεύματος. Όταν μεταφέρεται ισχύς στο φορτίο η τάση αυτή μειώνεται, ενώ όταν η μπαταρία φορτίζεται η τάση αυξάνεται. Αυτή η συμπεριφορά εξηγείται κάνοντας χρήση του όρου της εσωτερικής αντίστασης. Η μπαταρία θεωρείται ότι χαρακτηρίζεται από μια σταθερή τάση E , ενώ η τάση V στους ακροδέκτες μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο, λόγω της διαφορετικής πτώσης τάσης που παρατηρείται κάθε φορά κατά μήκος της εσωτερικής αντίστασης. Θεωρώντας το ρεύμα I που ρέει από τη μπαταρία προς το φορτίο, ισχύει η εξίσωση:

$$V = E - IR \quad (3.2)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι, όταν $I = 0$ η τάση ακροδεκτών ισούται με την τάση E . Για το λόγο αυτό η E ονομάζεται τάση ανοιχτοκύκλωσης. Επίσης, όταν η μπαταρία φορτίζεται, η τάση ακροδεκτών αυξάνεται κατά IR . Σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές τιμές ρευμάτων, όπως είναι οι εφαρμογές της ηλεκτροκίνησης, η τιμή της εσωτερικής αντίστασης θα πρέπει προφανώς να επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης E δεν είναι σταθερή αλλά είναι συνάρτηση του SOC αλλά και άλλων παραγόντων (θερμοκρασία, στοιχεία διάταξης κ.α.).

3.1.4.1 Εσωτερική Αντίσταση της μπαταρίας

Η εσωτερική αντίσταση χαρακτηρίζει την ικανότητα μιας μπαταρίας να ανταποκριθεί σε συγκεκριμένο φορτίο και καθορίζει την ισχύ εξόδου της μπαταρίας. Γενικά, απαιτείται η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας να είναι χαμηλότερη από την αντίσταση φορτίου. Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας δεν είναι απλά μια ωμική αντίσταση, αφού η τιμή της εξαρτάται τόσο από τον τρόπο χρήσης όσο και από τη στάθμη φόρτισης. Συνήθως, σημειώνεται αύξηση στην τιμή όταν η εκφόρτιση φτάνει στο τέλος.

Για τον προσδιορισμό της για συγκεκριμένη στάθμη φόρτισης εφαρμόζεται συνήθως η μέθοδος DC ρεύματος, όπου η τάση ακροδεκτών συγκρίνεται σε δύο διαφορετικές τιμές φορτίου, οπότε η εσωτερική αντίσταση για τη συγκεκριμένη στάθμη φόρτισης υπολογίζεται ως:

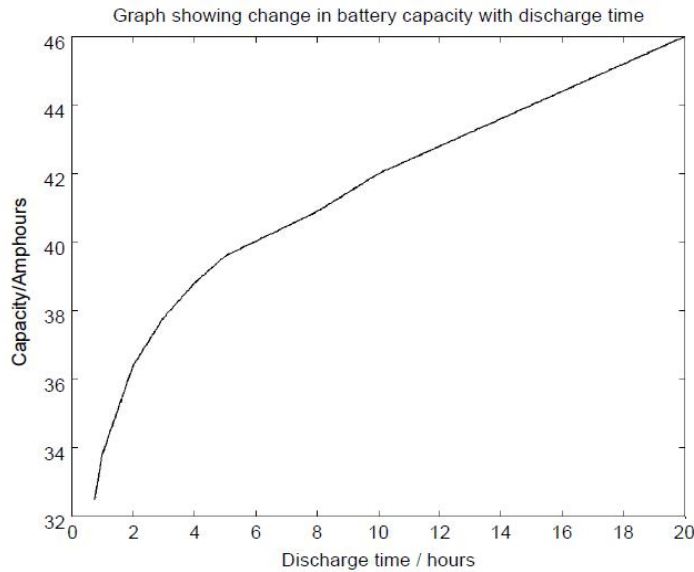
$$R_{in} = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (3.3)$$

Η υπολογισθείσα τιμή της R_{in} εμπεριέχει την ωμική συνιστώσα εντός των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη όπως και την υπέρταση που δημιουργείται στα σύνορα μεταξύ ηλεκτροδίων και ηλεκτρολύτη. Η εκτίμηση της παραμέτρου ανά στάθμη φόρτισης είναι σημαντική παράμετρος στην θεώρηση του ηλεκτροχημικού φαινομένου που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό της όλης διάταξης.

3.1.5 Φορτίο χωρητικότητας σε Ah

Η παράμετρος της αποθήκευσης, όπως αναφέρθηκε αρχικά, αποτελεί την βάση και για το φορτίο χωρητικότητας σε Ah (Amp*hour capacity). Το ηλεκτρικό φορτίο θα τροφοδοτήσει μια μπαταρία. Η μονάδα για το φορτίο είναι το Coulomb, το οποίο είναι το φορτίο που προκύπτει όταν ρέει ρεύμα 1Amp για χρόνο 1s. Για τα ηλεκτρικά οχήματα το μέγεθος αυτό είναι πολύ μικρό, οπότε γίνεται χρήση της μονάδας αμπερωρίων (Ah). «Ένα αμπερώριο ισούται με το φορτίο που διακινείται όταν ρεύμα 1Ampere ρέει για ένα χρονικό διάστημα 1h». Συνήθως, η έκφραση είναι η ακόλουθη: **Αν μια μπαταρία είναι σε θέση να εκφορτίζεται με ρυθμό 1Ampere για 10h, τότε η εκφόρτιση της μπαταρίας με ρυθμό 10Amperes θα διαρκέσει 1h.**

Η χωρητικότητα των μεγάλων μπαταριών που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροκίνηση αναφέρεται συνήθως με διάρκεια αποφόρτισης τις 5h. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη χωρητικότητα ανάλογα με την ταχύτητα εκφόρτισης.



Σχήμα 15: Μεταβολή χωρητικότητας μιας μπαταρίας ανάλογα με το ρυθμό εκφόρτισης (Ποταμιάς, 2010)

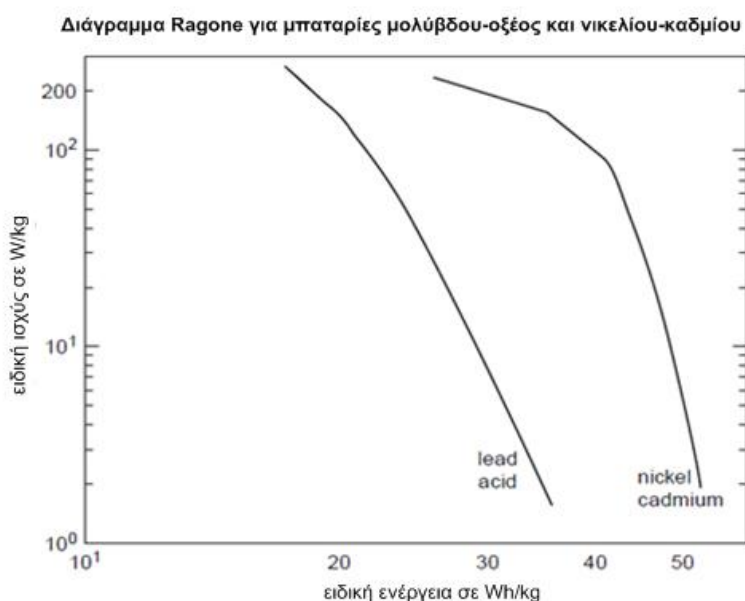
Το διάγραμμα αναφέρεται σε μια μπαταρία χωρητικότητας 100Ah. Είναι σημαντικό να παρατηρηθεί ότι αν το φορτίο αφαιρεθεί σε χρονικό διάστημα 1h τότε η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται σημαντικά σε περίπου 80Ah (αντί της ονομαστική τιμή των 100Ah). Στην αντίθετη κατεύθυνση, αν η εκφόρτιση πραγματοποιείται με ρυθμό μικρότερο από αυτόν που αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή, τότε η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί και να ισούται με 120Ah.

Η εξάρτηση της χωρητικότητας από το ρυθμό εκφόρτισης οφείλεται στις επιμέρους αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του στοιχείου της μπαταρίας. Το φαινόμενο γίνεται εμφανές στις μπαταρίες «μολύβδου οξέος», ωστόσο παρατηρείται σε όλα τα εμπορικά είδη μπαταριών. Η όλη θεώρηση έχει ιδιαίτερη σημασία, ώστε να μοντελοποιηθούν και να προβλεφθούν οι συνέπειες του φαινομένου της μεταβλητής αποθηκευτικής ενέργειας.

3.1.6 Διαγράμματα Ragone

Μετά την ανάλυση των βασικών παραμέτρων, μελετάται η επιμέρους χρήση παραμέτρων που εξετάζονται στην μοντελοποίηση των αποθηκευτικών διατάξεων. Τα διαγράμματα Ragone αποτυπώνουν το πώς η αύξηση της ειδικής ισχύος συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση της ειδικής ενέργειας για συγκεκριμένο τύπο μπαταρίας. Στα διαγράμματα γίνεται χρήση λογαριθμικής κλίμακας. Στο παρακάτω

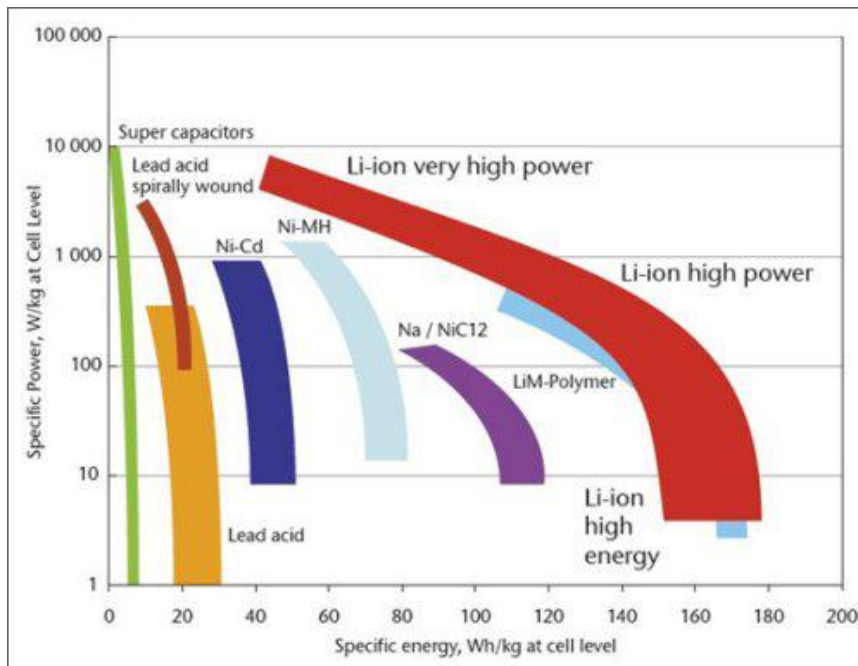
διάγραμμα παρατίθεται το Ragone για δύο τύπους μπαταριών (μόλυβδου οξέος και νικελίου καδμίου) που χρησιμοποιούνται σε οχήματα.



Σχήμα 16: Σύγκριση χαρακτηριστικών συμπεριφοράς δύο τύπων μπαταριών μέσω του διαγράμματος Ragone (www.candlepowerforums.com , 2012)

Από το σχήμα διαφαίνεται ότι αμφότερα τα δύο είδη υπακούουν στον κανόνα που απαιτεί η ειδική ενέργεια να μειώνεται με την αύξηση της ειδικής ισχύος. Για μεγέθη ισχύος από 1 έως 100W/kg η μπαταρία νικελίου καδμίου εμφανίζει μικρότερη μεταβολή στην τιμή της ειδικής ενέργειας. Όμως, για τιμές ειδικής ισχύος από 100W/kg και πάνω η ειδική ενέργεια της νικελίου καδμίου φαίνεται να μειώνεται με ταχύτερους ρυθμούς απ' ότι η μολύβδου οξέος. Τέτοια διαγράμματα χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση διαφόρων πηγών ενέργειας και όχι μόνον μπαταριών (Κατσαπρακάκης, 2011).

Στην περίπτωση του διαγράμματος Ragone που παρουσιάζεται, και αν δεν ληφθεί υπόψη ο παράγοντας του κόστους, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι νικελίου καδμίου αποδίδουν καλύτερα όταν οι απαιτήσεις ειδικής ισχύος δεν υπερβαίνουν τις 100W/kg. Όμως, για υψηλές τιμές ειδικής ισχύος, της τάξεως των 300W/kg η επιλογή της μολύβδου οξέος αρχίζει να γίνεται πιο ελκυστική (Κατσαπρακάκης, 2011). Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται συνοπτικά οι αντίστοιχες καμπύλες Ragone για διαφορετικούς τύπους μπαταριών.



Σχήμα 17: Διάγραμμα Ragone για διάφορες χημείες μπαταριών

Πηγή: US Department of Energy

3.1.7 Κουλομπική απόδοση

Μια μπαταρία ιδανικά θα ήταν σε θέση να αποδώσει το 100% του φορτίου που είναι διαθέσιμο κατά τη φόρτιση. Στην πραγματικότητα όμως, κάτι τέτοιο δε συμβαίνει λόγω της ύπαρξης απωλειών. Η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να εξαχθεί κατά την εκφόρτιση από την μπαταρία ως ποσοστό επί της ποσότητας ηλεκτρικού φορτίου που αποθηκεύτηκε σε αυτήν κατά τη φόρτιση ορίζει την κουλομπική απόδοση (Ah efficiency). Η σχέση της κουλομπικής απόδοσης με την ολική ενεργειακή απόδοση, όπως ορίζεται στην επόμενη ενότητα, περιγράφεται ακολούθως.

3.1.8 Ενεργειακή απόδοση

Με τον όρο ενεργειακή απόδοση (Energy efficiency) ορίζεται ο λόγος της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από την μπαταρία προς την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται προκειμένου να επανέλθει η μπαταρία στην κατάσταση πριν την εκφόρτιση και αποτελεί δείκτη για τον καλό συντελεστή απόδοσης που την χαρακτηρίζει. Ο δείκτης αποτυπώνεται:

$$EnergyEfficiency = \frac{\text{ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από την μπαταρία}}{\text{ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται}} \quad (3.4)$$

Η ενεργειακή απόδοση χρησιμοποιείται ως κριτήριο σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα με τον ίδιο τρόπο που για σύγκριση μεταξύ διαφορετικών αυτοκινήτων χρησιμοποιείται η κατανάλωση καυσίμου.

3.1.9 Θερμοκρασία χρήσης και ανάγκες θέρμανσης / ψύξης

Οι περισσότερες μπαταρίες λειτουργούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος όμως κάποιες από αυτές λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και ως εκ τούτου απαιτούν θέρμανση για να ξεκινήσουν τη λειτουργία τους και ψύξη στη διάρκεια της λειτουργίας τους. Κάποιοι τύποι μπαταριών παρουσιάζουν μείωση της απόδοσής τους όταν λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως συμβαίνει με τις μπαταρίες LiFePO₄. Κάτι τέτοιο είναι μη επιθυμητό, αλλά δύναται να ξεπεραστεί αν ληφθεί ένα σύστημα θέρμανσης της διάταξης. Η βέλτιστη θερμοκρασία χρήσης και η ανάγκη για ψύξη και θέρμανση μιας διάταξης μπαταριών είναι παράμετροι τις οποίες ο κατασκευαστής πρέπει να λάβει υπόψη στη φάση σχεδιασμού.

3.1.10 Ρυθμός αυτοεκφόρτισης

Οι περισσότερες μπαταρίες εκφορτίζονται όταν δε χρησιμοποιούνται για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό αυτόματα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κάποιοι τύποι μπαταριών δεν είναι κατάλληλοι να αφήνονται για μεγάλες χρονικές περιόδους χωρίς φόρτιση. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης (self discharge rate) μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας άλλα και παράγοντες όπως η θερμοκρασία οπότε είναι μια δυναμική παράμετρος που πρέπει να εξετάζεται κατά την μοντελοποίηση της διάταξης.

3.1.11 Γεωμετρία Μπαταρίας

Τα ηλεκτροχημικά στοιχεία κατασκευάζονται σε πολλά σχήματα όπως στρογγυλά, πρισματικά ή εξαγωνικά και διατίθενται με μεγάλη ποικιλία γεωμετρικών παραμέτρων. Ειδικά στην περίπτωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, είναι πολύ επιθυμητή η ποικιλία καθώς παρέχεται η ελευθερία να κατανείμει τις μπαταρίες κατά τρόπο που εξασφαλίζει χαμηλότερο κέντρο βάρους (όπως για παράδειγμα κατανεμημένες μπαταρίες σε όλη την επιφάνεια) άλλα και μέγιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου του οχήματος (αύξηση της λειτουργικότητας).

3.1.12 Ζωή μπαταρίας και πλήθος κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης

Οι περισσότερες μπαταρίες αντέχουν μόνο μερικές εκατοντάδες κύκλους βαθιών εκφορτίσεων (δηλαδή μέχρι το 20% της στάθμης φορτίου). Στην πράξη όμως, ο ακριβής αριθμός των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης που έχει μια διάταξη μπαταρίας πριν χάσει την ικανότητα ικανοποιητικής λειτουργίας, εξαρτάται από τον τύπο της, το σχεδιασμό του συστήματος επιχείρησης κ.α.

Το πλήθος των κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για την κατασκευή του ηλεκτρικού οχήματος, καθώς ορίζει το χρόνο ζωής της μπαταρίας και κατ' επέκταση επηρεάζει το κόστος λειτουργίας του οχήματος.

3.1.13 Απομείωση χωρητικότητας

Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας στα ηλεκτρικά οχήματα μειώνεται συνεχώς. Η μείωση αυτή οφείλεται σε παράπλευρες αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του στοιχείου, ιδιαίτερα σε συνθήκες υπό-φόρτισης και υπερ-εκφόρτισης. Οι αντιδράσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την αποσύνθεση του ηλεκτρολύτη και τον σχηματισμό επιστρώσεων στο ηλεκτρόδιο, οι οποίες παρεμποδίζουν τις χημικές αντιδράσεις την διάλυση του ενεργού υλικού. Το capacity fade, όπως αλλιώς ονομάζεται η απομείωση χωρητικότητας, έχει δύο συνιστώσες:

- Το calendar fade, δηλαδή την μείωση χωρητικότητας με την πάροδο του χρόνου. Αυτό συμβαίνει είτε λόγω της επέκτασης του στρώματος διεπαφής ηλεκτροδίου ηλεκτρολύτη (SEI) είτε λόγω απώλειας ποσοτήτων ενεργού υλικού.
- Cycling fade που είναι η μείωση χωρητικότητας μέσα από τους αλληπάλληλους κύκλους φόρτισης / εκφόρτισης, οι οποίοι φέρουν μεταβολή της δομής των ηλεκτροδίων και την αντίστοιχη μηχανική επιβάρυνση.

Οι δύο ανωτέρω παράγοντες επιδρούν στην αύξηση της εσωτερικής αντίστασης:

$$R = a_1 t^{1/2} + a_2 N \quad (3.5)$$

όπου:

- το $a_1 = f(\text{DOD}, T, V)$ μοντελοποιεί το φαινόμενο του calendar fade στην αύξηση της εσωτερικής αντίστασης

- το $\alpha_2=f(\text{DOD},T,V)$ μοντελοποιεί το φαινόμενο του cycling fade στην αύξηση της εσωτερικής αντίστασης
- t : χρόνος (ημερολογιακό έτος)
- N : πλήθος κύκλων φόρτισης εκφόρτισης (cycling rate)

και στη μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας.

$$Capacity = \min(C_{li}, C_{active}) \quad (3.6)$$

όπου:

$$C_{Li} = d_0 + d_1 * (a_1 t^{1/2})$$

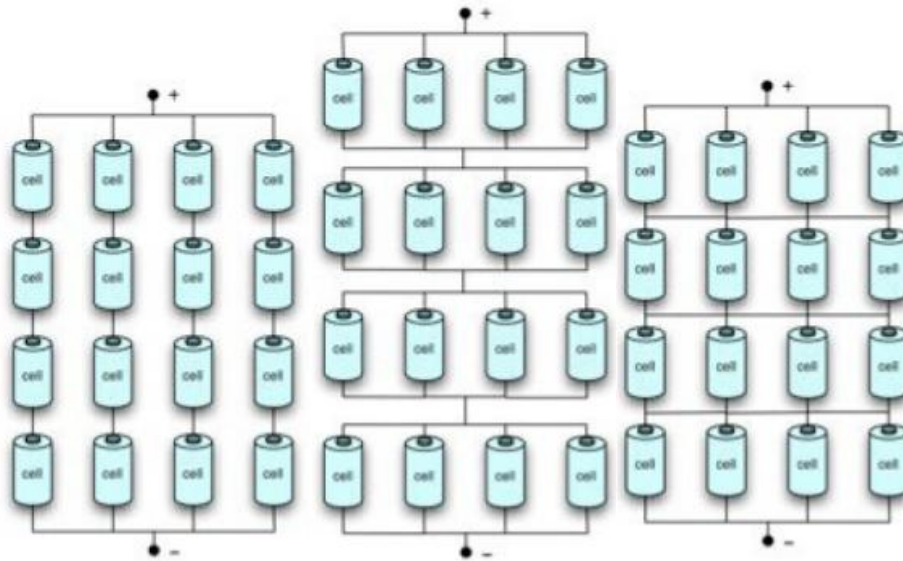
και

$$C_{active} = e_0 + e_1 * (a_2 N)$$

3.2 Συστοιχία μπαταριών

Τα στοιχεία των διατάξεων από μόνα τους δεν συνθέτουν πλήρεις διατάξεις. Για το λόγο αυτό συνδυάζονται σε συστοιχίες. Οι συστοιχίες μπαταριών (battery pack) μαζί με τις μονάδες των ηλεκτρονικών ισχύος και του συστήματος ελέγχου αποτελούν το σύστημα μετάδοσης κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος. Με την εν σειρά σύνδεση του κατάλληλου πλήθους στοιχείων επιτυγχάνεται το επιθυμητό επίπεδο τάσης εξόδου. Με την παράλληλη σύνδεση επιτυγχάνεται η παροχή της επιθυμητής τιμής ρεύματος (Λάσκαρης, 2011).

Οι προδιαγραφές ισχύος και ενέργειας θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του οχήματος. Συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις που τίθενται για την χρήση του οχήματος προδιαγράφουν και την τιμή της ισχύος που πρέπει να είναι σε θέση να αποδώσει η συστοιχία μπαταριών. Αντίστοιχα, οι απαιτήσεις σε αυτονομία του οχήματος προδιαγράφουν και την ενέργεια που απαιτείται να εμπεριέχει η συστοιχία. Ακολούθως παρατίθενται ενδεικτικά διάφοροι τρόποι συνδεσμολογίας των στοιχείων της μπαταρίας:



Σχήμα 18: Πιθανοί τρόποι συνδεσμολογίας των στοιχείων προς σχηματισμό μιας συστοιχίας (Λάσκαρης, 2011)

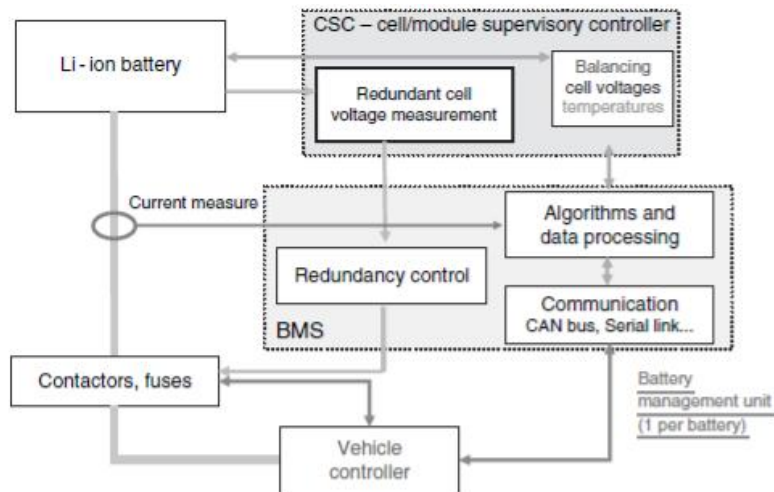
3.3 Σύστημα Διαχείρισης της Μπαταρίας

Η κίνηση των ηλεκτρικών οχημάτων χαρακτηρίζεται από αλλεπάλληλες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις. Απαιτείται λοιπόν να μπορεί η συστοιχία μπαταριών (battery pack) να ανταπεξέλθει στις πολύ γρήγορες φορτίσεις και εκφορτίσεις, οι οποίες συνοδεύουν αυτό το προφίλ κίνησης. Αυτό καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη ενός προηγμένου και με αυξημένες δυνατότητες συστήματος διαχείρισης της μπαταρίας (Battery Management System - BMS). Το BMS προσδίδει κατά κάποιο τρόπο «νοημοσύνη» στη συστοιχία μπαταριών, επιτρέποντας τη βέλτιστη και σε ασφαλή πλαίσια λειτουργία του. Συγκεκριμένα, επιτελεί τις παρακάτω λειτουργίες (Λάσκαρης, 2011):

- Συλλέγει πληροφορίες από αισθητήρες για τα μεγέθη της τάσης, του ρεύματος, της θερμοκρασίας κ.α.
- Μέσα από επεξεργασία των μετρούμενων αυτών μεγεθών, προσδιορίζει χρήσιμα μεγέθη όπως το SOC, το SOH (State of Health), τη διαθέσιμη ενέργεια, τα χιλιόμετρα για τα οποία η ενέργεια αυτή επαρκεί.
- Καθιστά διαθέσιμες τις πληροφορίες αυτές στο χρήστη (π.χ μέσω fuel gauges) αλλά και πιθανόν σε άλλα συστήματα του οχήματος. Η χρήσιμη πληροφορία μεταφέρεται μέσω διαύλου επικοινωνίας (communication bus) από το BMS προς τα υπόλοιπα τμήματα.

- Ελέγχει το φορτιστή προκειμένου να διασφαλιστεί βέλτιστη φόρτιση της μπαταρίας.
- Φροντίζει για την εξισορροπημένη φόρτιση όλων των στοιχείων που απαρτίζουν τη συστοιχία (cell balancing). Κατά αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η βέλτιστη επίδοση της μπαταρίας.
- Εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία της μπαταρίας. Αποτρέπει την υπερφόρτιση και υπερ-εκφόρτιση της μπαταρίας και άλλες καταστάσεις που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τον εξοπλισμό ή το χρήστη.
- Επιτελεί θερμική διαχείριση. Το BMS παρακολουθεί τη θερμοκρασία κάθε στοιχείου της μπαταρίας τόσο κατά τη φόρτιση όσο και κατά την εκφόρτιση και αναλόγως προσαρμόζει τη ψύξη / θέρμανση.
- Βοηθά στη διάγνωση και συντήρηση της μπαταρίας. Ο εξοπλισμός διάγνωσης και συντήρησης συνδέεται με το BMS προκειμένου να επιτελέσει το έργο του.
- Εξασφαλίζει τη διεπαφή της μπαταρίας με τον κεντρικό ελεγκτή του οχήματος. Η επικοινωνία γίνεται μέσω του διαύλου CAN (CAN bus - Controller Area Network bus). Κατά αυτόν τον τρόπο το BMS μπορεί να επικοινωνεί με τα υπόλοιπα συστήματα του οχήματος (π.χ με το αντικλεπτικό σύστημα το οποίο θα αποσυνδέει την μπαταρία σε περίπτωση απόπειρας κλοπής)

Το Block διάγραμμα ενός BMS για μια χαρακτηριστική μπαταρία φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η διάταξη είναι ενδεικτική και αναπτύχθηκε από την εταιρία Johnson Controls (Jaycar Electronics, 2001).



Σχήμα 19: Λειτουργικό διάγραμμα BMS για μια μπαταρία.

Στην περίπτωση εφαρμογών ηλεκτροκίνησης, απαιτείται η χρήση προηγμένων τεχνικών και αλγορίθμων που θα τρέχουν στο BMS. Ένας αλγόριθμος λειτουργίας για το BMS παρατίθεται ακολούθως:

- Αρχικοποίηση του αλγορίθμου (όταν το όχημα τίθεται σε λειτουργία).
- Ενημέρωση του SOC (βάσει μετρήσεων τάσης, ρεύματος και θερμοκρασίας).
- Ενημέρωση του SOH.
- Εισαγωγή της ενημερωμένης τιμής του SOC στο δυναμικό μοντέλο της μπαταρίας.
- Εξισορροπημένη φόρτιση. Εντοπίζει τα στοιχεία που χρειάζονται επιπλέον φόρτιση και τα φορτίζει προκειμένου όλα τα στοιχεία της μπαταρίας να είναι εξίσου φορτισμένα.

Μια από τις σημαντικές λειτουργίες που επιτελεί το BMS είναι και η εξισορροπημένη φόρτιση των στοιχείων, έτσι ώστε όλα τα στοιχεία να βρίσκονται, στο τέλος μιας πλήρους φόρτισης, στην ίδια στάθμη φόρτισης (Λάσκαρης, 2011).

Ένα σημαντικό σημείο που βρίσκει εφαρμογή σε όλους τους τύπους μπαταριών είναι η διαδικασία εξισορρόπησης του φορτίου μεταξύ των στοιχείων της συστοιχίας. Το πρόβλημα είναι ότι όταν εκφορτίζεται η μπαταρία δεν χάνουν όλα τα στοιχεία της μπαταρίας το ίδιο ποσό φορτίου (δηλαδή δεν εκφορτίζονται εξίσου). Στην περίπτωση μιας συστοιχίας από εν σειρά συνδεδεμένα στοιχεία, το γεγονός αυτό φαίνεται εκ πρώτης όψης περίεργο, αφού το ίδιο ρεύμα ρέει από όλα τα εν σειρά

στοιχεία. Όμως, ο διαφορετικός βαθμός εκφόρτισης οφείλεται στο ότι ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης (με την πάροδο του χρόνου) μεταξύ των διαφόρων στοιχείων της ίδιας συστοιχίας είναι διαφορετικός. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται (Λάσκαρης, 2011):

- αφενός σε κατασκευαστικές διαφορές
- αφετέρου σε θερμοκρασιακές διαφορές που εξαρτώνται από τη χωρική κατανομή της συστοιχίας..

Για παράδειγμα, λόγω των προαναφερθέντων παραγόντων, αν αφαιρεθεί το 50% του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου που είναι αποθηκευμένο εντός ενός battery pack, τότε στο τέλος της εκφόρτισης κάποια από τα στοιχεία θα έχουν απομείνει με το 52% SOC, ενώ κάποια άλλα μπορεί να βρίσκονται στο 40% SOC. Αν η μπαταρία επαναφορτιστεί παρέχοντας φορτίο αρκετό για τη φόρτιση των «ευνοημένων» στοιχείων, τότε τα στοιχεία που επέδειξαν πιο έντονη αυτοεκφόρτιση δε θα επαναφορτιστούν πλήρως. Αν επαναληφθούν με τους ίδιους όρους κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης στο ίδιο battery pack, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

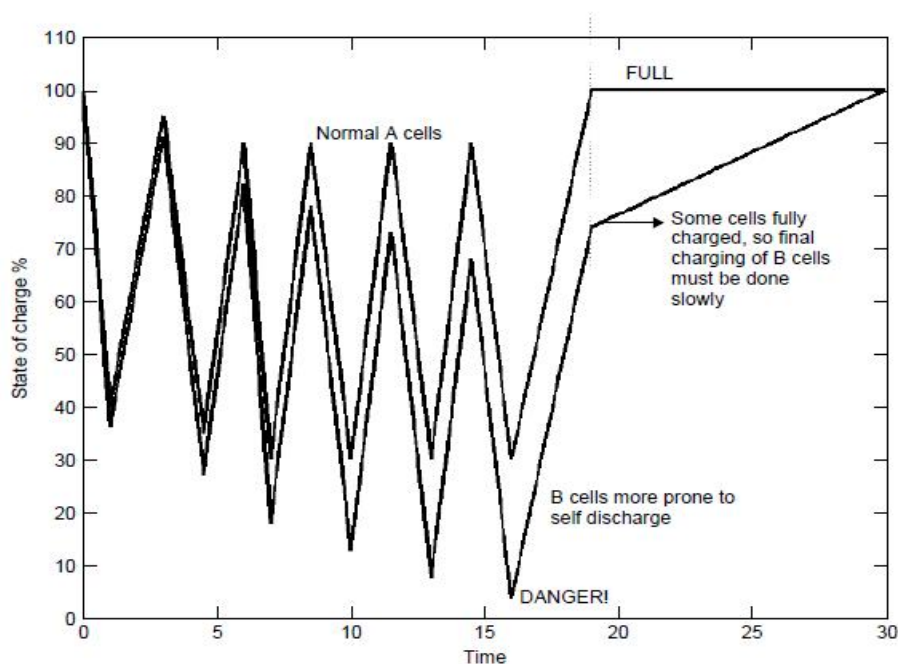
συμβάν	SOC στοιχείου A	SOC στοιχείου B
πλήρης φόρτιση	100%	100%
μετά από 50% εκφόρτιση	48%	40%
μετά από 50% επαναφόρτιση	98%	90%
μετά από 60% εκφόρτιση	35%	19%
μετά από 50% μερική επαναφόρτιση	85%	69%
μετά από 50% εκφόρτιση	33%	9%
μετά από 50% μερική επαναφόρτιση	83%	59%
απαιτείται 60% εκφόρτιση για τον προορισμό	18%	πρόωρο άδειασμα!

Πίνακας 3: Προβλήματα από την άνιση εκφόρτιση των διατάξεων

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η στάθμη φόρτισης του στοιχείου A εναλλάσσεται μεταξύ 20% και 80%. Όμως, με κάθε νέο κύκλο φόρτισης και εκφόρτισης το SOC του στοιχείου B βυθίζεται όλο και περισσότερο (λόγω αυξημένου ρυθμού αυτοεκφόρτισης) και τελικά αποτυγχάνει μετά από ένα περιορισμένο πλήθος κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης. Αν ένα από τα εν σειρά στοιχεία της συστοιχίας αδειάσει εντελώς, η τάση της συστοιχίας θα μειωθεί σημαντικά καθώς το άδειο στοιχείο δεν αποτελεί πλέον παρά μια αντίσταση που ελαττώνει την τάση. Επίσης, αν συνεχιστεί η άντληση του ρεύματος από την μπαταρία, είναι σχεδόν βέβαιο ότι το

συγκεκριμένο στοιχείο θα υποστεί ανεπανόρθωτη βλάβη. Και επειδή η συστοιχία είναι κύκλωμα εν σειρά στοιχείων, ένα χαλασμένο στοιχείο καταστρέφει όλη τη συστοιχία. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί την κυρίαρχη αιτία πρόωμης βλάβης της μπαταρίας.

Για να αποφευχθεί τέτοια βλάβη θα πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να φορτίζεται η συστοιχία έως ότου επέλθει η φόρτιση και του τελευταίου η/χ στοιχείου (εξισορροπημένη φόρτιση μεταξύ των στοιχείων). Αυτό συνεπάγεται ότι κάποια από τα στοιχεία αυτά θα υπερφορτίζονται για αρκετές ώρες. Άπαξ η πλειονότητα των στοιχείων φορτιστεί, θα πρέπει να εξακολουθήσει να ρέει ρεύμα από το κύκλωμα φόρτισης προς τη μπαταρία, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα πλήρους φόρτισης και στα στοιχεία εκείνα που είναι πιο επιρρεπή σε αυτοεκφόρτιση και ως εκ τούτου πιο αφόρτιστα.



Σχήμα 20: Περιοδική εξισορρόπηση του φορτίου (Tremblay, 2012)

Μέχρι στιγμής έχει θεωρηθεί ότι η εξισορρόπηση φορτίου πραγματοποιείται υπό στάθμη φόρτισης ίση με 100%. Θεωρητικά είναι δυνατό να εξισορροπηθεί το φορτίο των στοιχείων σε οποιαδήποτε στάθμη φόρτισης, μεταφέροντας φορτίο από τα περισσότερα φορτισμένα στοιχεία στα λιγότερο φορτισμένα. Η δυσκολία εδώ έγκειται στην δυσκολία ακριβούς προσδιορισμού της στάθμης φόρτισης των στοιχείων. Μια τέτοια εξισορρόπηση είναι πιο πρόσφορη στην περίπτωση των υπερ-

πυκνωτών, όπου η τάση στα άκρα τους είναι ευθέως ανάλογη του φορτίου που έχουν αποθηκευμένο. Ωστόσο, στην περίπτωση μπαταριών λιθίου η εξισορρόπηση φορτίου μπορεί να διευκολυνθεί μέσα από την προσθήκη κυκλωμάτων στο όλο σύστημα της μπαταρίας (Tremblay, 2012).

Το παράδειγμα της εξισορρόπησης φόρτισης είναι ένα μονό ενδεικτικό της ανάγκης ύπαρξης BMS συστημάτων σε ηλεκτρικά οχήματα. Όμως υπάρχουν και άλλες ανάγκες έλεγχου της λειτουργίας που καθιστούν αναγκαία την εγκατάσταση τέτοιων διατάξεων σε ηλεκτρικά οχήματα.

4 Μοντελοποίηση της Μπαταρίας

4.1 Γενικά

Οι μπαταρίες ως ηλεκτροχημικά συστήματα παρουσιάζουν τις ιδιότητες που δεν επιτρέπουν την ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς τους. Πιο συγκεκριμένα:

- Η δομή στο εσωτερικό των μπαταριών μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια φόρτισης .
- Η συμπεριφορά τους χαρακτηρίζεται από μη γραμμικότητα.
- Οι διατάξεις στην πράξη δεν είναι ιδανικές. Η επίδοσή τους παρουσιάζει εξάρτηση από πλήθος παραμέτρων (ρεύμα, θερμοκρασία, στάθμη φόρτισης κ.α.).

Η ακριβής συμπεριφορά μιας μπαταρίας εξαρτάται τόσο από παραμέτρους που είναι άμεσα ελέγξιμες (Θερμοκρασία, Τάση ακροδεκτών, Ρεύμα) όσο και από παραμέτρους που είναι δύσκολο να αποτιμηθούν όπως είναι η ηλικία, το ιστορικό χρήσης και οι ατέλειες κατά την διαδικασία. Συνεπώς, κάθε προσπάθεια μοντελοποίησης ενέχει δυσκολίες και μπορεί να χαρακτηρίζεται από ανακρίβεια (D. Szente-Varga, 2010).

Για το λόγο αυτό υπάρχουν αρκετά μοντέλα προσομοίωσης μπαταρίας. Ηλεκτροχημικά μοντέλα και εξισώσεις, μαθηματικά μοντέλα και κυκλωματικά μοντέλα, θερμικά μοντέλα για την ανάλυση της θερμικής διαχείρισης και στον προσδιορισμό των περιορισμών ισχύος κ.α. Μάλιστα, η σύνθεση των μοντέλων που είναι διαθέσιμα στην βιβλιογραφία είναι ετερογενής (D. Szente-Varga, 2010; EU Report, 2010).

Κάποια μοντέλα στοχεύουν στην κατανόηση θεμελιωδών χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τη μπαταρία. Τέτοιου είδους μοντέλα κάνουν χρήση θεμελιώδους φυσικής και χημείας και χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα. Άλλα είδη μοντέλων είναι σε θέση να παρέχουν ακριβή πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός συγκεκριμένου τύπου μπαταρίας κάτω από διάφορα σενάρια χρήσης. Τέτοια μοντέλα χρησιμοποιούνται για την ικανοποιητική πρόβλεψη των επιδόσεων του οχήματος με τις αντίστοιχες αποθηκευτικές διατάξεις. Τα μοντέλα αυτά προκύπτουν από την

προσεκτική ανάλυση της συμπεριφοράς της μπαταρίας και καταγραφή των επιδόσεών της. Τέλος, αλλά μοντέλα χαρακτηρίζονται από μεγάλη απλότητα και στόχο έχουν να καταδείξουν τις βασικές αρχές λειτουργίας των διατάξεων χωρίς να ενδιαφέρονται ιδιαίτερα για την ακρίβεια των μοντέλων (EU Report, 2010).

Η παρούσα ενότητα έχει σαν στόχο να περιγράψει κάποια βασικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση, ώστε στην συνέχεια να καταλήξει στο τελικό μοντέλο που επιλέγεται για την παρούσα μελέτη.

4.2 Τύποι μοντέλων προσομοίωσης μιας μπαταρίας

Ανάλογα με το σκοπό της πραγματοποιούμενης προσομοίωσης, ενδείκνυται η χρήση μοντέλων με διαφορετικούς βαθμούς ευελιξίας. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου αποτελεί προϊόν συμβιβασμού μεταξύ παραμέτρων όπως ο χρόνος που απαιτείται για να τρέξει το μοντέλο, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων και η προσπάθεια που απαιτείται για παραμετροποίηση του μοντέλου. Στην περίπτωση των συσκευών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, τα μοντέλα θα μπορούσαν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες, ξεκινώντας από τα πιο γενικά και αόριστα και καταλήγοντας στα πιο λεπτομερή (Hawkins, 2010).

4.2.1 Ιδανικά μοντέλα

Αποτελούνται από μια ιδανική πηγή τάσης, η οποία προσφέρει απεριόριστη ισχύ. Η πηγή αυτή μοντελοποιεί την τάση ανοιχτοκύκλωσης. Τα απλοϊκά αυτά μοντέλα βρίσκουν εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου η συμπεριφορά της μπαταρίας δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης ή έχει αμελητέα επίδραση στο σύστημα που προσομοιώνεται. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητό να ληφθεί υπόψη η πτώση τάσης που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της αγωγής, στην ιδανική πηγή τάσης προστίθεται εν σειρά και μια ωμική αντίσταση, η οποία μοντελοποιεί την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας (Hawkins, 2010).

Μία σημαντική αδυναμία του μοντέλου αυτού είναι ότι αδυνατεί να εξετάσει τη δυναμική συμπεριφορά της μπαταρίας. Για παράδειγμα, αν ένα φορτίο συνδεθεί στη μπαταρία τότε η τάση της σύμφωνα με το μοντέλο θα αλλάξει. Στην πραγματικότητα κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Επιπλέον, η τάση ανοιχτοκύκλωσης της μπαταρίας κάθε άλλο παρά σταθερή και ανεξάντλητη είναι (Hawkins, 2010).

4.2.2 Μοντέλα - Μαύρα Κουτιά

Είναι μαθηματικά μοντέλα που στερούνται φυσικού νοήματος. Προσομοιώνουν την εξωτερική συμπεριφορά της μπαταρίας χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τα φυσικά και χημικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό της διάταξης. Ωστόσο, είναι χρήσιμα για τους σχεδιαστές συστημάτων. Βασίζονται σε εξισώσεις ή μαθηματικές μεθόδους (στοχαστικές κατά κανόνα) ή σε μετρούμενες ποσότητες οι οποίες τροφοδοτούν tables εξέτασης. Κατ' αυτόν τον τρόπο διαμορφώνουν συναρτήσεις, οι οποίες προβλέπουν χαρακτηριστικά επίδοσης της μπαταρίας σε επίπεδο συστήματος, όπως τον χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας, την απόδοση ή τη χωρητικότητα. Το πιο γνωστό μαθηματικό μοντέλο για μπαταρίες περιγράφεται από το νόμο του Peukert και μοντελοποιεί την εξάρτηση της χωρητικότητας μιας μπαταρίας από την τιμή του ρεύματος εκφόρτισης. Επίσης άλλα μοντέλα, προβλέπουν την τιμή της τάσης ακροδεκτών υπό ημι-στάσιμες συνθήκες (quasi-stationary) φόρτισης και εκφόρτισης. Όμως, τέτοιου είδους μοντέλα αδυνατούν να προσφέρουν πληροφορίες για ρεύματα και τάσεις. Για το λόγο αυτό αποδεικνύονται κατάλληλα μόνον όταν η φόρτιση και η εκφόρτιση των μπαταριών περιορίζονται σε ημι-στάσιμες καταστάσεις (quasi-stationary). Ενδεικτικό της αδυναμίας τους να προβλέψουν έντονα δυναμικές καταστάσεις είναι και το γεγονός ότι, ενώ το σύνηθες σφάλμα της πρόβλεψης είναι της τάξεως του 5%-20%, στην περίπτωση έντονα δυναμικών καταστάσεων η ανακρίβειά τους γίνεται πολύ μεγαλύτερη, φτάνοντας και το 100%. Για παράδειγμα, το μέγιστο σφάλμα στην περίπτωση πρόβλεψης του χρόνου λειτουργίας με βάση το μαθηματικό μοντέλο του νόμου του Peukert μπορεί να είναι πάνω από 100% για φορτία των οποίων η χρονική μεταβολή παρουσιάζει έντονη δυναμικότητα (Young, 2010).

4.2.3 Ηλεκτρικά Μοντέλα Ισοδύναμου Κυκλώματος

Αυτά αναπαριστούν, συχνά με χρήση στοιχείων, τις πιο σημαντικές φυσικές και χημικές διεργασίες που καθορίζουν τη συμπεριφορά της μπαταρίας. Τα μοντέλα αυτά δεν μοντελοποιούν την κατανομή των εσωτερικών διεργασιών. Επομένως, τα μοντέλα αυτά δεν είναι απαιτητικά από πλευράς υπολογιστικών πόρων. Συγκεκριμένα, είναι πιο απαιτητικά σε σύγκριση με τα μοντέλα – μαύρα κουτιά και λιγότερο απαιτητικά σε σχέση με τα φυσικό-χημικά μοντέλα που μοντελοποιούν και τη κατανομή στο εσωτερικό της διάταξης. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα των ισοδύναμου κυκλώματος είναι η προσαρμοστικότητα. Χωρίς να μεταβληθεί η βασική

διάταξη, θα μπορούσαν εύκολα να εξεταστούν ώστε να προσομοιώνουν οποιαδήποτε τεχνολογία μπαταρίας και για τον λόγο αυτό έχουν μεγάλη εφαρμογή (Young, 2010).

4.2.4 Φυσικοχημικά Μοντέλα με Χωρική Ανάλυση

Τα φυσικοχημικά μοντέλα με χωρική ανάλυση (physicochemical models with spatial resolution) αναπαριστούν πλήρως τις διεργασίες εντός του στοιχείου. Αυτό γίνεται συνήθως με χρήση Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων (ΜΔΕ). Προκειμένου να μειωθεί η απαίτηση σε υπολογιστικούς πόρους, μπορεί να θεωρηθεί ομογενής κατανομή ρεύματος σε όλη την επιφάνεια του στοιχείου. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει μία μόνον χωρική μεταβλητή για το σύστημα των ΜΔΕ. Ωστόσο, παρουσιάζουν τα παρακάτω μειονεκτήματα (Picciano, 2008):

- Η προσομοίωσή τους είναι ιδιαίτερα απαιτητική από πλευράς υπολογιστικών πόρων.
- Ένα άλλο πρόβλημα είναι η μεγάλη προσπάθεια παραμετροποίησης που απαιτείται. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με χρήση «έτοιμων» δεδομένων που ελήφθησαν από σχετική βιβλιογραφία καθώς και με κατάλληλες υποθέσεις και απλοποιήσεις. Ωστόσο, κάτι τέτοιο οδηγεί αναπόφευκτα σε μειωμένη ακρίβεια προσομοίωση.
- Τέλος, η μεγάλη λεπτομέρεια των μοντέλων αυτών, παρέχει μεν εξειδίκευση σε μια συγκεκριμένη τεχνολογία μπαταρίας, καθιστά όμως δυσκολότερη την προσαρμογή τους σε άλλες τεχνολογίες μπαταρίας.

Εν ολίγοις, τα φυσικοχημικά μοντέλα δείχνουν επίδοση μόνο στην περίπτωση που όλες οι φυσικές παράμετροι της συσκευής που μοντελοποιείται είναι επακριβώς προσδιορισμένες.

Στο Πίνακα 4 παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθενός από τους προαναφερθέντες τύπους μοντέλων.

Τύπος μοντέλου	Ταχύτητα προσομοίωσης	Ακρίβεια	Προσαρμοστικότητα	Παραμετροποίηση
Ιδανική πηγή τάσης	++	--	++	Δε χρειάζεται
Φαινομενολογικό	+	O	-	+
Ισοδ. κυκλώματος	+	+	+	O
Φυσικο-χημικό	-	+	O	-

Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθενός από τους διαθέσιμους τύπους μοντέλων προσομοίωσης.

4.3 Μοντελοποίηση της μπαταρίας για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης

Στα ηλεκτροκίνητα οχήματα, η μπαταρία αποτελεί τη πηγή τροφοδότησης του κινητήρα και συνεπώς η συμπεριφορά της είναι καθοριστικά στη συνολική λειτουργία του οχήματος. Για το λόγο αυτό απαιτείται ακριβής αποτύπωση του μοντέλου λειτουργίας. Επιπλέον, το προφίλ της ισχύος χαρακτηρίζεται από έντονα δυναμική συμπεριφορά με μεγάλες διακυμάνσεις όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση των επιμέρους παραμέτρων. Τα φυσικοχημικά μοντέλα, παρά την εξαιρετική ακρίβεια προσομοίωσης που προσφέρουν, απαιτούν χρόνο και προσπάθεια για την παραμετροποίηση τους. Συνεπώς, για την προσομοίωση μπαταριών ηλεκτροκίνητων οχημάτων, η τομή μεταξύ ακρίβειας και πολυπλοκότητας επιτυγχάνεται με την χρήση των μοντέλων ισοδύναμου κυκλώματος (Advisor 2.0).

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό το μοντέλο της μπαταρίας να προσομοιώνει με ακρίβεια τη συμπεριφορά, ώστε να παράγονται αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα ακριβή αποτελέσματα είναι χρήσιμα σε διαφορετικές θεωρήσεις και στάδια λειτουργίας που αναφέρονται:

- Στη φάση του σχεδιασμού προκειμένου να διαστασιολογηθεί το σύστημα μπαταριών που θα συνθέσει το όχημα.
- Κατά τη λειτουργία του οχήματος ώστε να παρέχεται, μέσω ενός αξιόπιστου και ακριβούς δείκτη καυσίμου η αξιόπιστη πληροφόρηση τόσο για την εναπομείνασα ενέργεια όσο και για την απόσταση που του απομένει να διανύσει (total range).

Μερικά από τα πολύ απλοϊκά μοντέλα που αποτελούν την βάση για πιο σύνθετα αναφέρονται στη συνέχεια:

4.3.1.1 Προσδιορισμός της τάσης ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} (Open Circuit Voltage)

Η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} εξαρτάται από τη στάθμη φόρτισης και θεωρείται συνάρτηση της $V_{oc}(SOC)$. Ειδικά στην περίπτωση μπαταριών νικελίου καδμίου και ιόντων λιθίου, η συνάρτηση $V_{oc}(SOC)$ δεν είναι γραμμική όμως δύναται να προσεγγιστεί από πολυωνυμικές συναρτήσεις .

4.3.1.2 Προσδιορισμός της εσωτερικής αντίστασης R_{in}

Η τιμή της εσωτερικής αντίστασης παραμένει σχεδόν σταθερή για ένα μεγάλο εύρος τιμών της στάθμης φόρτισης αλλά λαμβάνεται ως συνάρτηση διαφορετικών παραμέτρων όπως της θερμοκρασίας και του SOC. Όπως έχει αναφερθεί, η συνολική χωρητικότητα μειώνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός εκφόρτισης. Το φαινόμενο αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία για τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς τα ρεύματα είναι υψηλά και παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Αυτό σημαίνει ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα (usable capacity) τελικά μπορεί να προκύψει μικρότερη της ονομαστικής (rated capacity) κατά την εξέλιξη της ζωής του οχήματος. Για το λόγο αυτό και λαμβάνοντας υπόψη την σπουδαιότητα της μοντελοποίησης, ακολουθεί η ανάλυση των διαφορετικών μοντέλων που εμφανίζεται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης (Advisor 2.0).

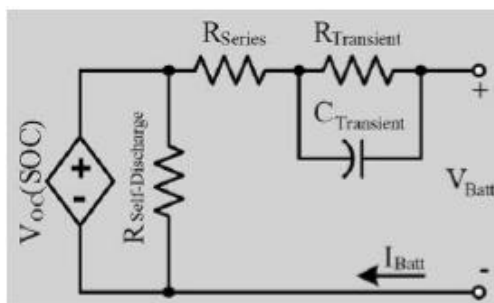
4.3.2 Ισοδύναμα Ηλεκτρικά Μοντέλα

Τα ηλεκτρικά μοντέλα για την μοντελοποίηση των οχημάτων, η ακρίβεια των οποίων κυμαίνεται μεταξύ των φυσικοχημικών και των μαθηματικών μοντέλων (περίπου 1%-5%) είναι ισοδύναμα ηλεκτρικά μοντέλα που χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό από διάφορες πηγές τάσης, πυκνωτές και αντιστάτες για να ορίσουν τη συμπεριφορά της μπαταρίας. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα στο κατασκευαστή της σχεδίασης και προσομοίωσης με άλλα κυκλώματα και συστήματα. Έχουν υπάρξει πολλά ηλεκτρικά μοντέλα μπαταριών, από μολύβδου-οξέος έως ιόντων λιθίου με πολυμερή ή ακόμη και μοντέλα που είναι ανεξάρτητα της χημικής σύστασης των μπαταριών. Τα περισσότερα από τα ηλεκτρικά μοντέλα κατατάσσονται σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες (Advisor 2.0):

- Μοντέλα με βάση το ισοδύναμο Thevenin,
- Μοντέλα σύνθετης αντίστασης λειτουργίας,
- Μοντέλα με βάση το χρόνο λειτουργίας,
- Μοντέλα Chen Mora.

Μια αναλυτική περιγραφή των επιμέρους μοντέλων ακολουθεί, ώστε να συνοψίσει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα από την όλη διαδικασία.

4.3.3 Ηλεκτρικά μοντέλα βασισμένα στο ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin



Σχήμα 21: Μοντέλο βασισμένο σε ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin (Advisor 2.0)

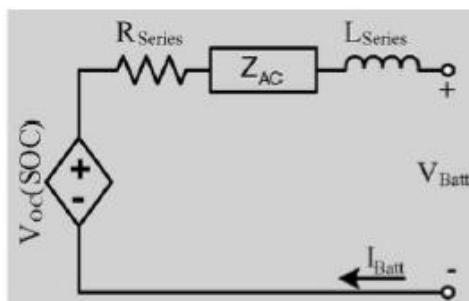
Στην πιο βασική του μορφή, ένα μοντέλο Thevenin, χρησιμοποιεί μια εν σειρά αντίσταση σε σειρά με ένα RC παράλληλο κύκλωμα προκειμένου να προβλέψει την απόκριση της μπαταρίας σε μεταβατικά φορτία για σταθερό επίπεδο φόρτισης (SOC), λαμβάνοντας την υπόθεση ότι η τάση ανοιχτοκύκλωσης παραμένει σταθερή. Η υπόθεση της σταθερής τάσης ανοιχτοκύκλωσης δεν είναι ορθή και έτσι δεν λαμβάνει τη δυνατότητα απόδοσης των διακυμάνσεων τάσης που συμβαίνουν σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης (Advisor 2.0).

Τα μοντέλα που έχουν αναφερθεί ως βελτιστοποιήσεις του μοντέλου παρουσιάζουν βελτιώσεις, εξαιτίας της προσθήκης εξοπλισμού που επιτρέπει την πρόγνωση του χρόνου λειτουργίας και της DC απόκρισης, όμως έχουν και σημαντικά μειονεκτήματα. Για παράδειγμα, χρησιμοποιείται ένας μεταβλητός πυκνωτής για να παρασταθεί η μη γραμμική σχέση μεταξύ τάσης ανοιχτοκύκλωσης και στάθμης φόρτισης. Το μοντέλο αυτό περιπλέκει την παράμετρο του πυκνωτή, απαιτεί το ολοκλήρωμα της τάσης για τον υπολογισμό της στάθμης φόρτισης (SOC) και δίνει 5% σφάλμα στο χρόνο λειτουργίας και σφάλμα στην τάση για σταθερά φορτία και ρεύματα. Το μοντέλο αυτό μοντελοποιεί τη μη γραμμική εξάρτηση μεταξύ της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του State of Charge, αλλά αγνοεί τη μεταβατική συμπεριφορά (Advisor 2.0).

Κάποια από τα σύνθετα μοντέλα απαιτούν μαθηματικές εξισώσεις για τον προσδιορισμό του State of Charge και του χρόνου λειτουργίας, και δεν μπορούν να υλοποιηθούν σε προσομοιωτές κυκλωμάτων. Με άλλα λόγια, κανένα από τα Thevenin μοντέλα δεν μπορεί να προβλέψει το χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας

(battery runtime) κατά ένα τρόπο απλοϊκό αλλά συνάμα ακριβή σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης (Advisor 2.0).

4.3.4 Ηλεκτρικά μοντέλα βασισμένα στη σύνθετη αντίσταση

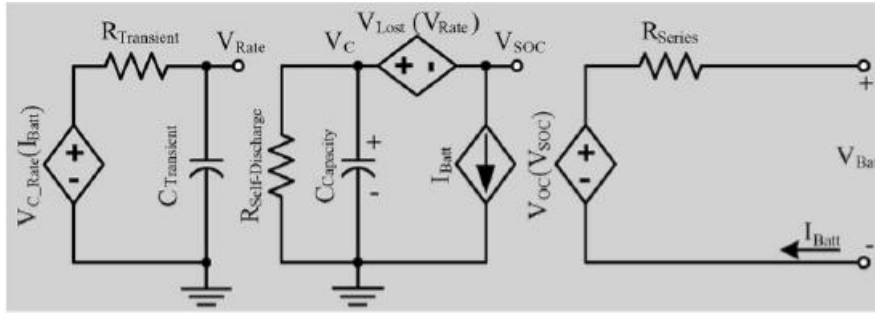


Σχήμα 22: Μοντέλο βασισμένο σε ισοδύναμο κύκλωμα σύνθετης αντίστασης (Advisor 2.0)

Τα μοντέλα αυτά αξιοποιούν τη μέθοδο της «ηλεκτροχημικής φασματοσκόπησης εμπέδησης (electrochemical impedance spectroscopy)» προκειμένου να ορίσουν ένα ισοδύναμο AC μοντέλο αντίστασης στο πεδίο της συχνότητας και εν συνέχεια χρησιμοποιούν ένα ισοδύναμο δίκτυο που ταιριάζει με το φάσμα της σύνθετης αντίστασης. Η διαδικασία προσαρμογής είναι δύσκολη αφού απαιτεί την προσομοίωση πολλαπλών παραμέτρων. Επιπλέον, τα μοντέλα αυτά δουλεύουν για συγκεκριμένες τιμές του State of Charge και της θερμοκρασίας, και κατ' επέκταση δεν μπορούν να προβλέψουν την DC απόκριση ή το χρόνο λειτουργίας της διάταξης (Advisor 2.0).

4.3.5 Ηλεκτρικά Μοντέλα με βάση στο χρόνο λειτουργίας

Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν ένα περίπλοκο δίκτυο για να ορίσουν το χρόνο λειτουργίας και την DC απόκριση για σταθερό ρεύμα εκφόρτισης. Από την άλλη μεριά, δεν μπορούν να προβλέψουν το χρόνο λειτουργίας και την απόκριση τάσης για μεταβαλλόμενα ρεύματα. Η διαγραμματική απεικόνιση ενός τέτοιου μοντέλου ορίζεται (Advisor 2.0):



Σχήμα 23: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός μοντέλου χρόνου λειτουργίας (Advisor 2.0)

Με μια επισκόπηση στον παρακάτω πίνακα, παρατηρείται ότι κανένα από τα μέχρι στιγμής μοντέλα δεν παρέχει τη δυνατότητα πρόβλεψης του χρόνου λειτουργίας και της χαρακτηριστικής I-V της διάταξης με μεγάλη ακρίβεια.

Ικανότητα πρόβλεψης	Μοντέλα Thevenin	Μοντέλα Σύνθετης αντίστασης	Μοντέλα χρόνου λειτουργίας	Μοντέλο Chen-Mora
DC	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
AC	Περιορισμένη	Ναι	Όχι	Ναι
Μεταβατικής απόκρισης	Ναι	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Ναι
Χρόνου εκφόρτισης	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι

Πίνακας 5: Σύγκριση των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών μοντέλων

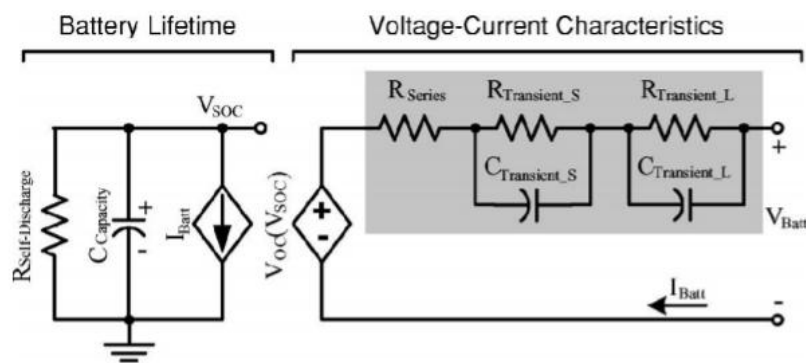
Ένα μοντέλο που συνδυάζει την καλή μεταβατική συμπεριφορά των Thevenin μοντέλων, τα AC χαρακτηριστικά των μοντέλων σύνθετης αντίστασης και την ακριβή πληροφορία σχετικά με το χρόνο λειτουργίας που προσφέρουν τα μοντέλα είναι το βασικό ζητούμενο, ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η σχεδίαση, ενσωμάτωση - ολοκλήρωση και βέλτιστη χρήση του συστήματος της ηλεκτροκίνησης. Ένα τέτοιο μοντέλο έχει οριστεί από τους Chen και Mora και αναλύεται στην συνέχεια.

4.3.6 Μοντέλο Chen-Mora

Οι Chen και Mora δημοσίευσαν τον Ιούνιο του 2006 τα αποτελέσματα μιας έρευνάς τους για τη μοντελοποίηση των συσσωρευτών. Κατάφεραν να προτείνουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο προσομοιώνει όλα τα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός συσσωρευτή. Το μοντέλο αυτό αποτέλεσε τη βάση για πολλές προσομοιώσεις σε διάφορες έρευνες και για αυτό αξίζει να παρουσιαστεί. Το συγκεκριμένο μοντέλο προκύπτει από τον συνδυασμό των παραμέτρων των προηγούμενων μοντέλων. Κατ' αυτόν τον τρόπο συνδυάζει τις δυνατότητες των ηλεκτρικών μοντέλων. Συγκεκριμένα, προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα (Βασιλάκης, 2013):

- Το μοντέλο προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια όλα τα σημαντικά δυναμικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μπαταριών όπως είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc}) και ακροδεκτών (V_{term}), η διαθέσιμη ενέργεια - αξιοποιήσιμη χωρητικότητα (usable capacity), ο χρόνος λειτουργίας της μπαταρίας και οι αποκρίσεις μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης.
- Η διαδικασία παραμετροποίησης του μοντέλου βασίζεται σε μετρούμενα μεγέθη όπως είναι η τάση ακροδεκτών, η ένταση ρεύματος και η θερμοκρασία του στοιχείου.

Το προτεινόμενο ισοδύναμο κύκλωμα του συσσωρευτή απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 24: Προτεινόμενο μοντέλο ηλεκτρικού συσσωρευτή από τους Chen, Mora (Advisor 2.0)

Όπως διαφαίνεται από την παρούσα θεώρηση, το μοντέλο που προτείνεται είναι πλήρως δυναμικό, αφού συνδυάζει τόσο τα θερμικά όσο και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Στο αριστερό μέρος του κυκλώματος, η χωρητικότητα και η εξαρτημένη από το ρεύμα πηγή προσομοιώνουν τη χωρητικότητα, δηλαδή την κατάσταση φόρτισης (State of Charge), και το χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας. Το κύκλωμα στα δεξιά προσομοιώνει τη μεταβατική απόκριση. Η εξαρτημένη από τάση πηγή χρησιμοποιείται για να εκφραστεί η μη γραμμική σχέση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης και του State of Charge. Η αντίσταση σειράς και τα δύο παράλληλα κυκλώματα χρησιμοποιούνται για την απόκριση της μπαταρίας στα μεταβατικά φορτία σε μια συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης και δίνονται συναρτήσει του State of Charge. Η R-Series ευθύνεται για τη πτώση τάσης του συσσωρευτή, ενώ οι R Transient_S, C Transient_S και R Transient_L, C Transient_L αποτελούν τις σταθερές της βηματικής απόκρισης (Βασιλάκης, 2013).

Για την αξιολόγηση της προσομοίωσης του παραπάνω μοντέλου απαιτείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα συσσωρευτών NiMH και Li-ion. Η σύγκριση έχει δείξει ότι το ηλεκτρικό μοντέλο δίνει με ακρίβεια το χρόνο λειτουργίας του συσσωρευτή και την αντίδραση της τάσης για κάθε φορτίο. Επομένως, το μοντέλο προσομοίωσης με την μέθοδο αυτή προσφέρει σε κατασκευαστές συστημάτων, τη δυνατότητα να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος και να παρατείνουν το χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας σε ηλεκτρονικές συσκευές (Βασιλάκης, 2013).

Βεβαία ακόμη και αν το μοντέλο Chen φαντάζει πλήρες, δεν καλύπτει όλες τις περιπτώσεις και για τον λόγο αυτό νέες τροποποιήσεις αυτού είναι διαθέσιμες στην βιβλιογραφία.

4.4 Αναλυτικά μοντέλα

Κατά τη διάρκεια των χρόνων, έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά μοντέλα συσσωρευτών για την ανάλυση των χαρακτηριστικών τους και του τρόπου χρήσης τους. Τα τελευταία χρόνια γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα αναλυτικά μοντέλα που είναι απόρροια της φύσης των συσσωρευτών. Τα αναλυτικά μοντέλα αποτελούν απλοποιημένα ηλεκτροχημικά μοντέλα που μπορούν να καταγράψουν τη μη γραμμική επίδραση της χωρητικότητας του συσσωρευτή και να προβλέψουν το χρόνο λειτουργίας του. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι το κινητικό μοντέλο (Kinetic Battery Model, KiBaM), το οποίο αναπτύχθηκε για τη μοντελοποίηση χημικών διεργασιών μεγάλων συσσωρευτών μολύβδου-οξέος (Βασιλάκης, 2013. Βρεττός, 2010).

Στη συγκεκριμένη μελέτη, προτείνεται ένα υβριδικό μοντέλο συσσωρευτή, το οποίο στηρίζεται σε ένα ηλεκτρικό μοντέλο και στο KiBaM. Το KiBaM έχει τη δυνατότητα να καταγράφει τις μη γραμμικές επιδράσεις της χωρητικότητας όπως το φαινόμενο της ανάκτησης, για την ακριβή παρακολούθηση της SOC και την πρόβλεψη του χρόνου λειτουργίας. Επομένως, το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να καταγράφει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κυκλώματος του συσσωρευτή και τη μη γραμμική συμπεριφορά του σε οποιαδήποτε κατάσταση λειτουργίας. Εφαρμόζεται σε οποιαδήποτε ηλεκτροχημική μπαταρία, όπως στις μολύβδου-οξέος, νικελίου-καδμίου, νικελίου-μετάλλου υδριδίου (Ni-MH) και ιόντων λιθίου (Li-ion), οπότε λαμβάνεται ως ανεξάρτητο της φύσης του υλικού. Πριν την αναλυτική περιγραφή του μοντέλου KiBaM που αποτέλεσε την βάση της παρούσας

μελέτης, γίνεται αναφορά στο μοντέλο Peukert ως το πιο διαδεδομένο αναλυτικό μοντέλο στην βιβλιογραφία (Βρεττός, 2010).

4.4.1 Ο νόμος του Peukert

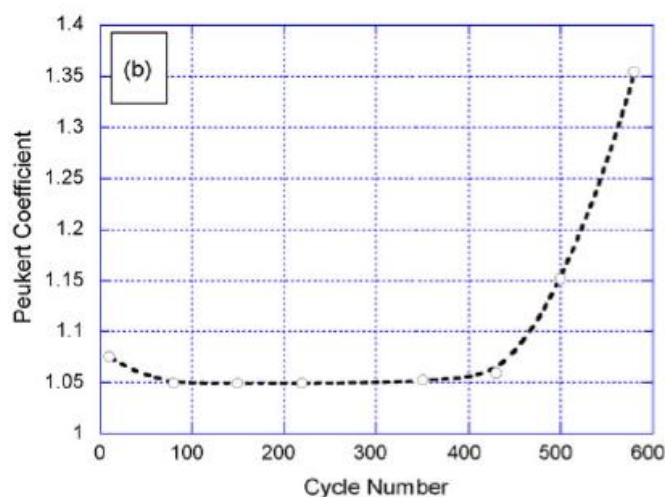
Στην εισαγωγική θεώρηση έγινε αναφορά στον νόμο του Peukert που είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο των ηλεκτρικών διατάξεων. Για λόγους πληρότητας μια αναφορά στις αρχές του μοντέλου ακολουθεί. Ο νόμος του Peukert μοντελοποιεί την επίδραση των διαφορετικών ρυθμών φόρτισης / εκφόρτισης στη χωρητικότητα της μπαταρίας. Δεν εξετάζει όμως τη δυναμική συμπεριφορά της μπαταρίας. Λειτουργεί υπό τη θεώρηση ότι υφίστανται στάσιμες καταστάσεις (quasi-stationary), δηλαδή υπό την υπόθεση ότι ο ρυθμός εκφόρτισης είναι σταθερός. Επιπλέον, για χαμηλές τιμές ρεύματος το μοντέλο δεν είναι ακριβές. Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές χαρακτηρίζεται από ακρίβεια. Σε βασικές αρχές περιγράφεται από την εξίσωση (Βρεττός, 2010):

$$C_p = I^k T \quad (4.1)$$

σε συνάρτηση με:

- σταθερό ρεύμα έντασης I
- η εκφόρτιση θα διαρκέσει T ώρες
- C_p το μέγεθος της χωρητικότητας Peukert. Είναι σταθερό και χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο τύπο της μπαταρίας.
- k σταθερά που έχει συγκεκριμένη τιμή για κάθε τύπο μπαταρίας και ονομάζεται «συντελεστής του Peukert». Ο συντελεστής του Peukert (k) συνδέεται άμεσα με την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας. Μια μπαταρία με μεγαλύτερη εσωτερική αντίσταση έχει ανάλογα μεγαλύτερη τιμή του k.

Επίσης, αφού η εσωτερική αντίσταση αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και την αύξηση του πλήθους κύκλων φόρτισης (cycle life) κατά αντιστοιχία και ο συντελεστής k ακολουθεί ανάλογη αύξηση. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται, ενδεικτικά, οι τιμές του k συναρτήσει του πλήθους κύκλων φόρτισης / εκφόρτισης μιας μπαταρίας (Βρεττός, 2010).



Σχήμα 25: Τιμές του k συναρτήσει του πλήθους κύκλων φόρτισης / εκφόρτισης μιας μπαταρίας

Προς υπολογισμό του συντελεστή Peukert απαιτείται η γνώση των τιμών χωρητικότητας (C_1 και C_2) σε δύο διαφορετικούς χρόνους εκφόρτισης (T_1 και T_2). Οπότε τότε θα ισχύει:

$$I_1 = \frac{C_1}{T_1} \quad (4.2)$$

$$I_2 = \frac{C_2}{T_2} \quad (4.3)$$

Η χωρητικότητα Peukert C_p δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$C_p = I_1^k \cdot T_1 \quad (4.4)$$

$$C_p = I_2^k \cdot T_2 \quad (4.5)$$

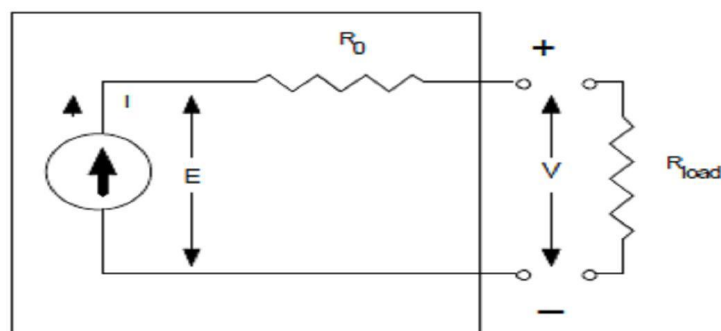
οπότε, έχοντας δυο εξισώσεις με δυο αγνώστους προκύπτουν οι τιμές C_p , k .

4.4.2 Μοντέλο KiBaM

Το Kinetic Battery Model-KiBaM (Manwell και McGowan, 1991, 1993b; Manwell, et al. 1995) αναπτύχθηκε αρχικά στα πλαίσια του μοντέλου προσομοίωσης Hybrid - 2 και στη συνέχεια έγινε εμπορικά διαθέσιμη μία ανεξάρτητη έκδοσή του. Σε αυτό το μοντέλο η μπαταρία διαδραματίζει το ρόλο μίας πηγής τάσης σε σειρά με μία εσωτερική αντίσταση η οποία θεωρείται σταθερή. Αντίθετα, το επίπεδο της ΗΕΔ (E) της μπαταρίας μεταβάλλεται ανάλογα με το ρεύμα φόρτισης-εκφόρτισης και με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (SOC). Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται

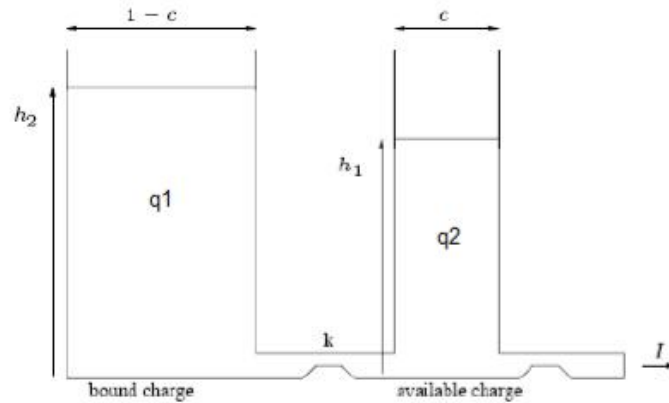
το ισοδύναμο κύκλωμα του συσσωρευτή σύμφωνα με το KiBaM. Το μοντέλο αυτό είναι ιδανικό για την προσομοίωση λειτουργίας των μπαταριών Μολύβδου- Οξέως και των μπαταριών Νικελίου-Καδμίου. Η τάση ακροδεκτών συνδέεται με την ΗΕΔ, το ρεύμα και την εσωτερική αντίσταση με βάση τη σχέση (Βασιλάκης, 2013. Βρεττός, 2010):

$$V = E - IR \quad (4.6)$$



Σχήμα 26: Ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρίας στο KiBaM (Βασιλάκης, 2013)

Το KiBaM ονομάστηκε έτσι γιατί βασίζεται στη λογική της ηλεκτροχημικής κίνησης που συμβαίνει μέσα στις μπαταρίες και παρομοιάζει τη λειτουργία τους με ένα σύστημα δύο δεξαμενών. Η πρώτη δεξαμενή περιέχει την «διαθέσιμη ενέργεια» ή αλλιώς την ενέργεια που μπορεί άμεσα να αποδοθεί με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας. Η δεύτερη δεξαμενή περιέχει την «δεσμευμένη ενέργεια» ή την ενέργεια που είναι χημικά δεσμευμένη και όχι άμεσα διαθέσιμη προς απόδοση ενέργειας και εκφόρτιση της μπαταρίας. Η δεξαμενή διαθέσιμης ενέργειας παρέχει ηλεκτρόνια κατευθείαν στο φορτίο, ενώ η δεξαμενή δεσμευμένης ενέργειας παρέχει ηλεκτρόνια μόνο στην πρώτη δεξαμενή. Το μοντέλο περιλαμβάνει πέντε επιμέρους μοντέλα που περιγράφουν τον τρόπο μεταβολής των ακόλουθων μεγεθών: χωρητικότητα, τάση, αποδιδόμενη και απορροφούμενη ενέργεια, απώλειες κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης και διάρκεια ζωής (Βασιλάκης, 2013. Βρεττός, 2010):



Σχήμα 27: Το μοντέλο των δύο δεξαμενών του KiBaM. Τα μεγέθη h_1 και h_2 είναι τα ύψη των δεξαμενών KiBaM (Βασιλάκης, 2013)

Για την εφαρμογή του μοντέλου είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός κάποιων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την μπαταρία και που αποτελούν τα δεδομένα εισόδου. Οι παράμετροι αυτές αναλύονται στην επόμενη ενότητα που ακολουθεί και η περιγραφή του μοντέλου. Τα βασικά σημεία όμως του μοντέλου συνοψίζονται:

- Η μέγιστη χωρητικότητα μίας μπαταρίας Q_{max} (Ah), η οποία είναι η συνολική ενέργεια που μπορεί να περιέχεται στο σύστημα των δύο δεξαμενών. Στην εκφόρτιση η χωρητικότητα αυτή αντιπροσωπεύει την ενέργεια που μπορεί να αποδοθεί από την μπαταρία όταν αυτή εκφορτιστεί με πολύ αργό ρυθμό.
- Ο συντελεστής χωρητικότητας c που εκφράζει το ποσοστό ενέργειας που είναι άμεσα διαθέσιμη από την μπαταρία όταν αυτή είναι φορτισμένη στα ονομαστικά της.
- Η σταθερά k που σχετίζεται με την δυνατότητα «επικοινωνίας» μεταξύ των δύο δεξαμενών ενέργειας και δείχνει πόσο γρήγορα μπορεί να μετατραπεί η δεσμευμένη ενέργεια σε άμεσα διαθέσιμη και το αντίστροφο.
- Το όριο ρυθμού φόρτισης A/Ah , που συνήθως έχει τιμή 1. Αυτό το όριο αποδίδει την κοινή πρακτική σύμφωνα με την οποία ο ρυθμός φόρτισης μειώνεται καθώς η μπαταρία τείνει να φορτιστεί πλήρως, για λόγους αποφυγής καταστροφής του συσσωρευτή.
- Τέσσερις σταθερές που προκύπτουν από την εφαρμογή μεθόδων μη γραμμικής προσαρμογής σε τέσσερις καμπύλες εκφόρτισης. Οι καμπύλες

εκφόρτισης έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα για τέσσερις διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης. Οι σταθερές αυτές όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια προσδιορίζουν το μέτρο τάσης της μπαταρίας κατά την διάρκεια της εκφόρτισης.

- Ομοίως τέσσερις σταθερές που προκύπτουν από την εφαρμογή μεθόδων μη γραμμικής προσαρμογής σε τέσσερις καμπύλες φόρτισης και που προσδιορίζουν το μέτρο τάσης της μπαταρίας κατά την διάρκεια της φόρτισης.
- Η εσωτερική αντίσταση των μπαταριών σε Ohm, η οποία θεωρείται ότι είναι σταθερή. Η τιμή αυτή μπορεί να δίνεται από τον κατασκευαστή ή μπορεί να προκύψει από πειραματικά δεδομένα.
- Τα δεδομένα που προσδιορίζουν τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών. Σε μία απλή προσέγγιση η διάρκεια ζωής μπορεί να θεωρηθεί ίση με μία ονομαστική τιμή. Σε μία πιο σωστή προσέγγιση για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής δίνονται σαν είσοδος τιμές βάθους εκφόρτισης με τον αντίστοιχο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης μέχρι τη βλάβη (cycles to failure method).
- Δεδομένα που προσδιορίζουν τη χωρητικότητα της μπαταρίας σα συνάρτηση του ρεύματος εκφόρτισης.

Ο σκοπός της ενότητας αυτής είναι να παρουσιάσει τα πιο βασικά μοντέλα για τους συσσωρευτές σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης με στόχο να επιλεγεί εκείνο που μπορεί να εφαρμοστεί για την παρούσα μελέτη. Όπως διαφαίνεται, η κατηγοριοποίηση και το πλήθος των διαθέσιμων μοντέλων καθορίζει το εύρος των διαθέσιμων εφαρμογών και για τον λόγο αυτό η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου θα πρέπει να βασίζεται κυρίως στις ειδικές συνθήκες που διέπουν την κάθε λειτουργία που εξετάζεται (Βασιλάκης, 2013. Βρεττός, 2010).

5 Προσομοίωση του μοντέλου μπαταρίας

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω, επιλέγεται το μοντέλο KiBaM για την αναπαράσταση της διάταξης των αποθηκευτικών μονάδων για εφαρμογές σε ηλεκτροκίνηση. Πριν την αναλυτική περιγραφή και θεώρηση του μοντέλου όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ορίζεται το περιβάλλον μοντελοποίησης που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μελέτη.

5.1 Περιβάλλον προσομοίωσης

Το περιβάλλον προσομοίωσης που επιλέγεται είναι το ευρέως διαδεδομένο πρόγραμμα Matlab. Το MATLAB, έχει ονομαστεί από τις λέξεις MATrix LABoratory, και αποτελεί ένα λογισμικό περιβάλλον προγραμματισμού αριθμητικών μεθόδων, προσομοίωσης και γραφικής οπτικοποίησης. Το βασικό στοιχείο / μεταβλητή του MATLAB είναι ο πίνακας και έτσι όλοι οι φιλόδοξοι μελλοντικοί προγραμματιστές πρέπει να γνωρίζουν τις βασικές μαθηματικές αρχές πινάκων και γραμμικής άλγεβρας.

Το Simulink είναι προέκταση του λογισμικού MATLAB. Όπως δηλώνεται και από το όνομα, ρόλος του είναι η σχεδίαση, η προσομοίωση και η ανάλυση μοντέλων συστημάτων. Η μοντελοποίηση γίνεται μέσα από ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) σε αντίθεση με την πληκτρολόγηση στο παράθυρο εντολών του MATLAB. Ένα μοντέλο συστήματος αποτελείται από δομικά στοιχεία που ονομάζονται «blocks». Το Simulink περιλαμβάνει πολλά blocks στις βιβλιοθήκες του, αλλά υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθούν νέα από τον χρήστη ή να εισαχθούν έτοιμα (π.χ. από το internet). Κάθε block έχει δική του εμφάνιση και όνομα και περιγράφεται από τις παραμέτρους με τις οποίες επηρεάζει το υπόλοιπο σύστημα. Λόγω των πολλών δυνατοτήτων που προσφέρει και του μεγάλου φάσματος εφαρμογών που καλύπτει, το Simulink (και κατ' επέκταση το MATLAB) θεωρείται από τα δημοφιλέστερα εργαλεία του είδους του.

5.2 Προσομοίωση μοντέλου KiBaM στο περιβάλλον Simulink

Το μοντέλο KiBaM κατά κύριο λόγο συσχετίζει την χωρητικότητα αποθήκευσης με το ρυθμό εκφόρτισης του συσσωρευτή. Το μοντέλο περιγράφεται από δυο κύρια μέρη:

- Το μοντέλο υπολογισμού της χωρητικότητας
- Το μοντέλο υπολογισμού της τάσης

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τη μοντελοποίηση των επιμέρους κυκλωμάτων στο πρόγραμμα προσομοίωσης. Αυτά τα δυο μοντέλα συνθέτουν τη βάση για την παρούσα εξέταση αν και για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται και τα μοντέλα που προσομοιώνουν τους εξωγενείς παράγοντες που επιδρούν στο σύστημα των συσσωρευτών.

5.2.1 Μοντέλο Χωρητικότητας

Το KiBaM λαμβάνει υπόψη την μείωση της χωρητικότητας ενός συσσωρευτή με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης ή εκφόρτισης με τη θεώρηση των δύο δεξαμενών ενέργειας. Στο εξής θα συμβολίζεται με q το συνολικό φορτίο που είναι αποθηκευμένο στη μπαταρία, με q_1 το διαθέσιμο και με q_2 το δεσμευμένο φορτίο. Ισχύει προφανώς

$$q = q_1 + q_2 \quad (5.1)$$

Το σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει τη ροή του διαθέσιμου και του δεσμευμένου φορτίου κατά τη διάρκεια φόρτισης ή εκφόρτισης υπό σταθερό ρεύμα είναι:

$$\frac{dq_1}{dt} = -I - k(1-c)q_1 + kcq_2 \quad (5.2)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k(1-c)q_1 - kcq_2$$

Οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος είναι:

$$q_1(0) = c \cdot Q_{no\ min\ al} \quad (5.3)$$

$$q_2(0) = (1-c) \cdot Q_{no\ min\ al}$$

Όταν ένα φορτίο εφαρμόζεται στους ακροδέκτες της μπαταρίας, το διαθέσιμο φορτίο μειώνεται και η διαφορά των υψών των δύο δεξαμενών αυξάνεται. Από την άλλη μεριά, όταν το φορτίο αφαιρεθεί φορτίο ρέει από τη δεξαμενή δεσμευμένης στη δεξαμενή διαθέσιμης ενέργειας μέχρις ότου οι δύο δεξαμενές να αποκτήσουν και πάλι το ίδιο ύψος, σύμφωνα με μία λογική συγκοινωνούντων δοχείων, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια μίας ουδέτερης περιόδου περισσότερο φορτίο γίνεται διαθέσιμο σε σχέση με αυτό που ήταν προηγουμένως, δηλαδή η μπαταρία διαρκεί περισσότερο σε σχέση με την περίπτωση που το φορτίο εφαρμόζεται διαρκώς και όχι επανειλημμένα. Επιλύοντας το παραπάνω σύστημα με εφαρμογή του μετασχηματισμού Laplace και θεωρώντας ότι το ρεύμα παραμένει σταθερό για όλη τη διάρκεια της εκφόρτισης, λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση που εκφράζει τη μέγιστη χωρητικότητα (σε Ah) ως συνάρτηση του ρεύματος εκφόρτισης (σε A):

$$q_{\max}(I) = \frac{Q_{\max} kct}{1 - e^{-kt} + c(kt - 1 + e^{-kt})} \quad (5.4)$$

όπου T είναι ο χρόνος φόρτισης ή εκφόρτισης σε ώρες και δίνεται από τη σχέση:

$$T = \frac{q_{\max}(I)}{I} \quad (5.5)$$

Η σταθερά Q_{\max} (Ah) συμβολίζει τη μέγιστη θεωρητική χωρητικότητα που επιτυγχάνεται με απειροστό ρεύμα εκφόρτισης. Οι σταθερές k, c, Q_{\max} προσδιορίζονται εάν είναι γνωστές τουλάχιστον τρεις καμπύλες τάσης-SOC για τρεις διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης ή εκφόρτισης. Σημειώνεται ότι οι σταθερές αυτές θεωρούνται ίσες και κατά τη φόρτιση και κατά την εκφόρτιση. Η εξίσωση εξήχθη θεωρώντας ότι το ρεύμα είναι σταθερό για όλη τη διάρκεια της εκφόρτισης, η οποία είναι εν γένει πολλές ώρες. Για την προσομοίωση των μπαταριών στα υβριδικά συστήματα τα χρονικά βήματα που χρησιμοποιούνται είναι πολύ μικρότερα του χρόνου T, επομένως το KiBaM θεωρεί μία μόνιμη (quasi steady) προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, το ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης θεωρείται σταθερό κατά τη διάρκεια ενός βήματος της προσομοίωσης. Σε αυτή την περίπτωση το διαθέσιμο και το δεσμευμένο φορτίο στο τέλος κάθε χρονικού βήματος δίνονται από τις σχέσεις

$$q_1 = q_{1,0} e^{-kDt} + \frac{(q_o kc - I)(1 - E^{-kDt})}{k} - \frac{Ic(kt - 1 + E^{-kDt})}{k} \quad (5.6)$$

$$q_2 = q_{2,0}e^{-kDt} + q_0(1-c)(1-e^{-kDt}) - \frac{I(1-c)(kt-1+E^{-kDt})}{k}$$

όπου:

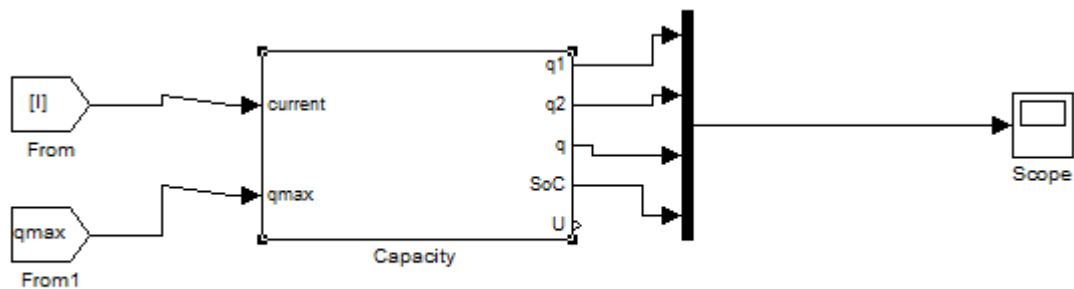
$q_{1,0}$ το διαθέσιμο φορτίο (σε Ah) στην αρχή του χρονικού βήματος.

$q_{2,0}$ το δεσμευμένο φορτίο (σε Ah) στην αρχή του χρονικού βήματος.

q_0 το συνολικό φορτίο (σε Ah) στην αρχή του χρονικού βήματος.

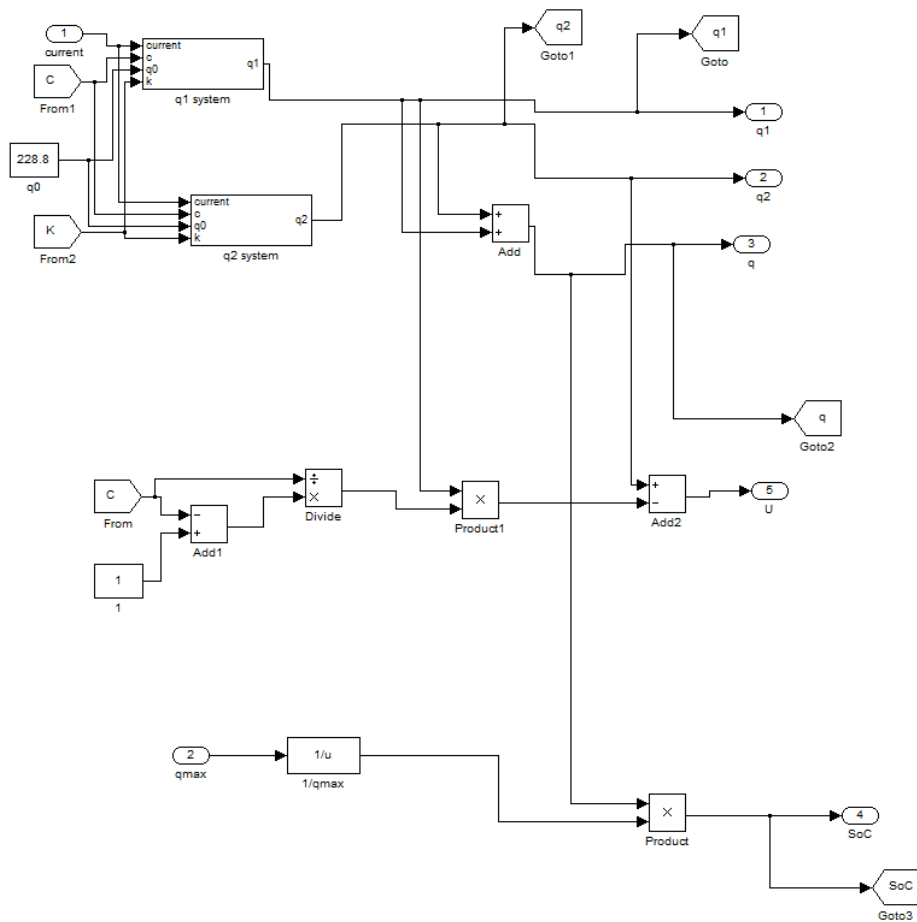
Δt η διάρκεια του χρονικού βήματος σε ώρες.

Η διαγραμματική απεικόνιση των εξισώσεων στο πρόγραμμα Simulink αποτυπώνεται:



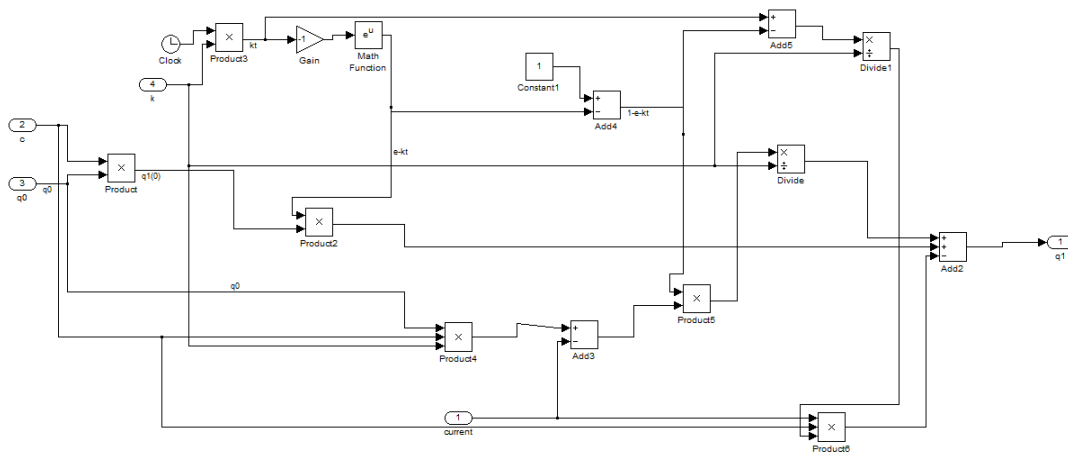
Σχήμα 28: Αναπαράσταση μοντέλου χωρητικότητας

Σαν παράμετροι εισόδου λαμβάνονται το ρεύμα φόρτισης και οι παράμετροι της μπαταρίας με βάση το μοντέλο KiBaM (c, K, Q_{max}) και σαν έξοδο λαμβάνονται οι παράμετροι ενέργειας q και SoC.



Σχήμα 29: Λεπτομερής αναπαράσταση μοντέλου Capacity

Ο υπολογισμός των q , q_1, q_2 και SoC με βάση τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν αποτυπώνεται στο ανωτέρω σχήμα. Για τον υπολογισμό των q_1, q_2 οι εξισώσεις επίσης περιγράφονται:



Σχήμα 30: Λεπτομερής αναπαράσταση μοντέλου q_1

5.2.2 Μοντέλο Τάσης

Σύμφωνα με το KiBaM η τάση εξόδου της μπαταρίας εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας (φόρτιση ή εκφόρτιση), το επίπεδο φόρτισης (SOC), το ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης και την εσωτερική αντίσταση. Από την εξίσωση που ακολουθεί είναι προφανές ότι η τερματική τάση εξαρτάται από το ρεύμα και από την εσωτερική αντίσταση, η οποία θεωρείται σταθερή. Η ΗΕΔ εξαρτάται τόσο από το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας όσο και από το ρεύμα φόρτισης-εκφόρτισης. Η εξάρτηση αυτή μοντελοποιείται στο KiBaM με τη σχέση:

$$E = E_o + AX + \frac{CX}{D - X} \quad (5.7)$$

όπου:

- E: η ΗΕΔ της μπαταρίας.
- E_o : η ΗΕΔ της μπαταρίας σε κατάσταση πλήρους φόρτισης (μετά το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο).
- X: η κανονικοποιημένη τιμή της χωρητικότητας για δεδομένο ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης.
- A: μία σταθερά που εκφράζει την αρχική γραμμική εξάρτηση της ΗΕΔ με το SOC. Λαμβάνει συνήθως αρνητικές τιμές κατά την εκφόρτιση και θετικές τιμές κατά τη φόρτιση.
- C: μία σταθερά που αντικατοπτρίζει τη μείωση (αύξηση) της τάσης όταν η μπαταρία εκφορτίζεται (φορτίζεται) προοδευτικά. Λαμβάνει πάντα αρνητική τιμή στην εκφόρτιση και θετική στη φόρτιση.
- D: μία σταθερά που περιγράφει το ίδιο φαινόμενο με την σταθερά C. Η σταθερά D λαμβάνει πάντα θετικές τιμές και θεωρητικά ισούται σχεδόν με τη μέγιστη χωρητικότητα για το δεδομένο ρεύμα, $q_{\max}(I)$.

Η μεταβλητή X ορίζεται διαφορετικά για τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Στη φόρτιση ορίζεται από το φορτίο που υπάρχει στη μπαταρία με βάση τη σχέση:

$$X = q_{out} \frac{q_{\max,0}}{q_{\max}(I)} \quad (5.8)$$

όπου

$$q_{out} = q_{max} - q \quad (5.9)$$

και

$$q = q_1 + q_2 \quad (5.10)$$

Επιπλέον, ορίζεται και ο συντελεστής του SOC ως:

$$SOC = \frac{q_{max,0} - q_{out}}{q_{max,0}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{max,0}} \quad (5.11)$$

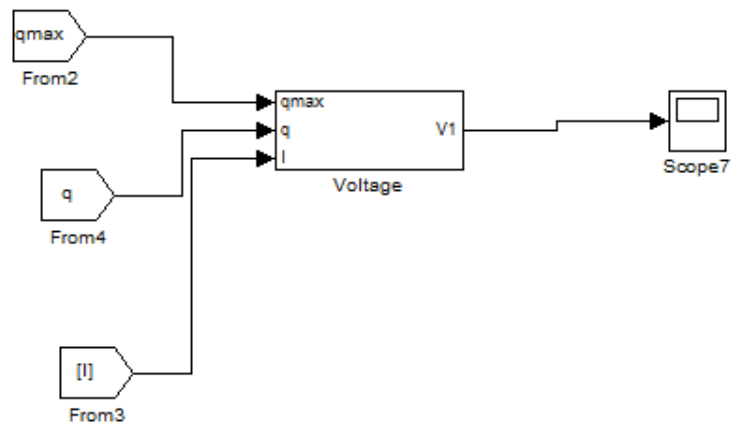
Στην εκφόρτιση ορίζεται από το φορτίο που έχει απομακρυνθεί από την μπαταρία με βάση τη σχέση:

$$X = \frac{q_{max}(I) - q}{q_{max}(I)} \quad (5.12)$$

Δεδομένου ότι η ΗΕΔ εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας, οι τέσσερις σταθερές της εξ. 4.10 είναι διαφορετικές για τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Επομένως, για τη χρησιμοποίηση του μοντέλου τάσης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός οχτώ συνολικά παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτές προσδιορίζονται με μεθόδους μη γραμμικής προσαρμογής εάν είναι γνωστές τέσσερις καμπύλες φόρτισης και τέσσερις καμπύλες εκφόρτισης για τέσσερις διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης-εκφόρτισης. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης λαμβάνεται η πειραματική εξέταση από την βιβλιογραφία προκειμένου να καταστεί εφικτή η θεώρηση των παραμέτρων. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η εφαρμογή του μοντέλου KiBaM χωρίς τη χρήση του μοντέλου της τάσης παρά μόνο αυτού της χωρητικότητας και της τάσης, στο βαθμό που ενδιαφέρει μόνο η προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος από ενεργειακή σκοπιά και όχι η μελέτη των δυναμικών παραμέτρων της συστοιχίας των συσσωρευτών. Για την εφαρμογή του μοντέλου της χωρητικότητας είναι απαραίτητη η γνώση των μεγεθών k , c , Q_{max} για κάθε τύπο μπαταρίας, στοιχεία που δεν είναι εύκολο να προσδιοριστούν για τον ίδιο λόγο με προηγουμένως. Για την παράκαμψη αυτής της δυσκολίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα HOMER. Πρόκειται για ένα μοντέλο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση, διαστασιολόγηση και προσομοίωση τόσο διασυνδεδεμένων όσο και αυτόνομων συστημάτων ενέργειας. Το πρόγραμμα HOMER για την προσομοίωση των συσσωρευτών χρησιμοποιεί το μοντέλο KiBaM, ενώ παρέχει τις τιμές των μεγεθών k , c , Q_{max} για διάφορους τύπους μπαταριών. Για την προσομοίωση του

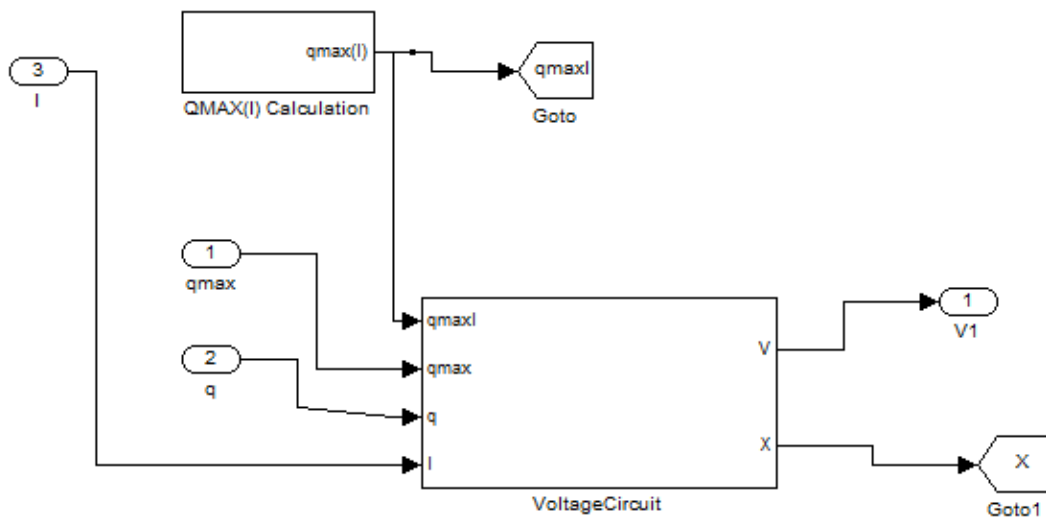
συστήματος χρησιμοποιούνται τύποι των μπαταριών που περιλαμβάνονται στο HOMER, έτσι ώστε να είναι γνωστοί οι παράμετροι χωρητικότητας.

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω και με τις εξισώσεις που συνθέτουν το μοντέλο, παρουσιάζεται το μοντέλο τάσης της KiBaM μοντελοποίησης της διάταξης:



Σχήμα 31: Αναπαράσταση Voltage κυκλώματος

Το μοντέλο αυτό λαμβάνει σαν είσοδο τις παραμέτρους της μπαταρίας και τα αποτελέσματα από το μοντέλο χωρητικότητας για την εξέταση της τάσης στο ισοδύναμο κύκλωμα. Η λεπτομερής αναπαράσταση του μοντέλου ακολουθεί:



Σχήμα 32: Λεπτομερής Αναπαράσταση Voltage κυκλώματος

5.2.3 Μοντέλο Απωλειών

Σύμφωνα με το KiBaM το φορτίο της μπαταρίας διατηρείται οπότε οι απώλειες που υφίστανται κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση οφείλονται στην μεταβολή της τάσης κατά τις διαδικασίες αυτές. Οι απώλειες ενέργειας υφίστανται τόσο στη φόρτιση όσο και στην εκφόρτιση και για τον υπολογισμό τους η τιμή της τερματικής τάσης συγκρίνεται με την ονομαστική τιμή της. Η τιμή της τάσης εξόδου υπολογίζεται από τις εξισώσεις της προηγούμενης ενότητας γνωρίζοντας την τιμή του ρεύματος και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Όταν η μπαταρία είναι σχεδόν άδεια και το ρεύμα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές, τότε η τερματική τάση θα προσεγγίζει την τιμή της ΗΕΔ άδειας μπαταρίας, δηλαδή $E_{c,0}$ για τη φόρτιση και $E_{d,0}$ για την εκφόρτιση. Η απώλεια ισχύος θα είναι ελαφρά μεγαλύτερη από το γινόμενο του ρεύματος επί τη διαφορά μεταξύ της εσωτερικής ΗΕΔ και της ονομαστικής τάσης. Στην περίπτωση της φόρτισης όταν η μπαταρία προσεγγίζει την ονομαστική χωρητικότητα ή το ρεύμα φόρτισης είναι μεγάλο, η τερματική τάση θα είναι αρκετά διαφορετική από την ΗΕΔ και συνεπώς οι απώλειες θα είναι σχετικά υψηλές. Οι απώλειες ενέργειας σε αυτήν την περίπτωση δίνονται από το γινόμενο του ρεύματος φόρτισης επί τη διαφορά μεταξύ ονομαστικής και τερματικής τάσης, όπως φαίνεται στην επόμενη σχέση:

$$L_{ch} = I * [V(q,I) - V_{nom}] \quad (5.13)$$

όπου $V(q,I)$ είναι η εξαρτώμενη από το επίπεδο φόρτισης και το ρεύμα τερματική τάση. Οι απώλειες της μπαταρίας κατά την εκφόρτιση υπολογίζονται επίσης από την εξ. 5.13, ενώ οι συνολικές απώλειες είναι το άθροισμα των απωλειών φόρτισης και εκφόρτισης, δηλαδή:

$$L_{total} = L_{ch} + L_{dish} \quad (5.14)$$

Όπως έχει αναφερθεί, στην προσομοίωση δεν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο απωλειών καθότι στηρίζεται στην θεώρηση για την απλοποίηση της διαδικασίας προσομοίωσης. Παρά ταύτα, οι απώλειες αυτές θα ήταν χρήσιμες για πιο σύνθετες εφαρμογές όπου ο υπολογισμός είναι κρίσιμος για την όλη θεώρηση της μοντελοποίησης πλήθους καταστάσεων. Όμως σε περιπτώσεις ηλεκτροκίνησης και μάλιστα μοντελοποίησης της διαδικασίας της φόρτισης, η θεώρηση για σταθερές απώλειες κατά την διαδικασία είναι ασφαλής.

5.2.4 Μοντέλο Διάρκειας Ζωής

Για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής των συσσωρευτών χρησιμοποιείται η καμπύλη κύκλων ζωής – βάθους εκφόρτισης. Σύμφωνα με το KiBaM ως κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης μίας μπαταρίας ορίζεται η εκφόρτιση της μπαταρίας από ένα αρχικό επίπεδο SOC, σε ένα τελικό επίπεδο και στη συνέχεια επαναφόρτισή στο αρχικό επίπεδο. Η μέθοδος που εφαρμόζεται στηρίζεται στον «κανόνα των ανθρακωρύχων» που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της διάρκειας ζωής των μπαταριών για πρώτη φορά από τον Facinelli το 1983.

Σύμφωνα με τον κανόνα αυτό, η επιβάρυνση της μπαταρίας λόγω ενός κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης εξαρτάται κυρίως από το βάθος της εκφόρτισης (και στη συνέχεια της φόρτισης) στην οποία υποβάλλεται. Γενικότερα, η επιβάρυνση εξαρτάται κατά πολύ περισσότερο από το εύρος του κύκλου παρά από το μέσο βάθος εκφόρτισης κατά τη διάρκεια του. Με άλλα λόγια, σύμφωνα με τη μέθοδο του Facinelli, όταν υφίσταται εκφόρτιση εύρους 20% η επιβάρυνση της μπαταρίας είναι περίπου η ίδια είτε η εκφόρτιση γίνεται από SOC 90% σε SOC 70%, είτε από SOC 60% σε SOC 40%.

Η μέθοδος του Facinelli είναι κατάλληλη για συστήματα όπου οι κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης των συσσωρευτών δεν είναι επικαλυπτόμενοι, δηλαδή δεν παρατηρούνται μικρότεροι κύκλοι στο εσωτερικό ενός μεγαλύτερου. Τέτοια είναι συστήματα φωτοβολταϊκών με αποθήκευση όπου οι συσσωρευτές υποβάλλονται σε ένα κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης ημερησίως. Όμως, στην περίπτωση ενός συστήματος οι μπαταρίες υποβάλλονται σε μια πιο ακανόνιστη εκφόρτιση και φόρτιση με την ύπαρξη επικαλυπτόμενων κύκλων. Σε αυτήν την περίπτωση για να μπορεί να προσδιοριστεί η διάρκεια ζωής των συσσωρευτών απαιτείται μία μέθοδος προσδιορισμού των κύκλων.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται από το KiBaM ονομάζεται «Rainflow cycle counting method» (Collins 1981). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή εφαρμόζεται μία προσέγγιση δύο σταδίων στη χρονοσειρά επιπέδων φόρτισης (SOC). Αρχικά, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος για τον προσδιορισμό σχετικά υψηλών και σχετικά χαμηλών σημείων στη χρονοσειρά, που ονομάζονται κορυφές και κοιλάδες αντίστοιχα. Στη νέα χρονοσειρά των κορυφών και κοιλάδων εφαρμόζεται ένας δεύτερος αλγόριθμος για τον προσδιορισμό των επιμέρους κύκλων. Το μέγιστο εύρος εκφόρτισης χωρίζεται σε τουλάχιστον είκοσι bins ίδιου πλάτους και κάθε κύκλος

κατατάσσεται σε κάποιο από αυτά τα bins ανάλογο με το εύρος του. Στη συνέχεια, μετράται ο αριθμός των κύκλων σε κάθε bin.

Η εξάρτηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας από το βάθος εκφόρτισης μοντελοποιείται με μία διπλό εκθετική σχέση

$$C_F = a_1 + a_2 e^{a_3 R} + a_4 e^{a_5 R} \quad (5.15)$$

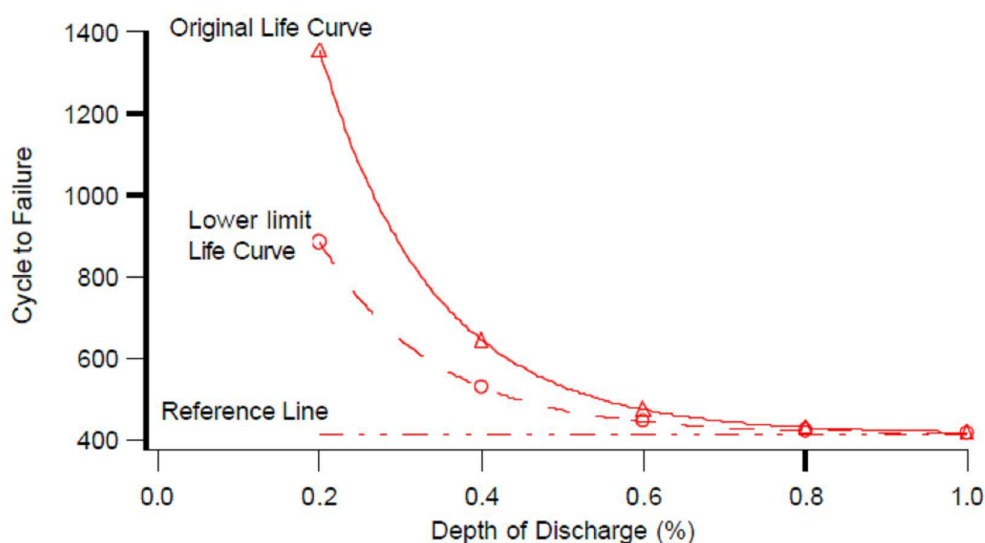
όπου:

C_F ο αριθμός των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης μέχρι τη βλάβη

a_i σταθερές προσαρμογής

R το βάθος εκφόρτισης στο οποίο υποβάλλεται η μπαταρία

Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει μια καμπύλη πειραματικών δεδομένων για τη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή με εφαρμογή της διπλό-εκθετικής εξίσωσης του KiBaM. Απεικονίζεται επίσης η γραμμή αναφοράς και το κάτω όριο της καμπύλης διάρκειας ζωής.



Σχήμα 35: Curve fitting πειραματικών δεδομένων για τη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή

Η όλη θεώρηση παρουσιάζεται με γνώμονα την πληρότητα του μοντέλου, αφού η εξέταση στα σενάρια που ακολουθούν δεν επιτρέπουν την εξέταση των σεναρίων κατά την διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Στόχος είναι η θεώρηση του μοντέλου της λειτουργίας της μπαταρίας ανεξάρτητα από τις απώλειες που μπορεί να οφείλονται σε εξωγενείς παράγοντες όπως είναι η διάρκεια ζωής της μονάδας εξέτασης.

5.3 Προσδιορισμός παραμέτρων για το μοντέλο εξέτασης

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, ο υπολογισμός των παραμέτρων που απαιτούνται για το μοντέλο είναι:

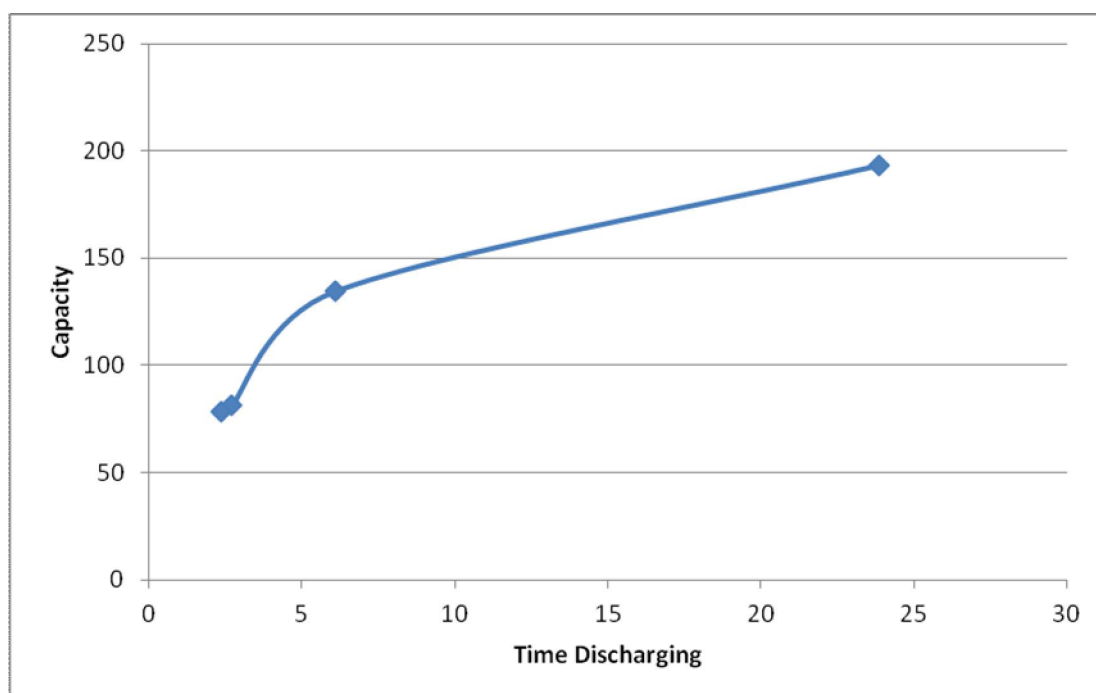
- $q_{\max,0}$: η μέγιστη χωρητικότητα σε Ah
- c : αντανακλά το ποσοστό του συνολικού φορτίου της μπαταρίας άμεσα διαθέσιμου
- k : υποδεικνύει το ρυθμό με τον οποίο το δεσμευμένο φορτίο γίνεται διαθέσιμο σε hrs^{-1}

Η μπαταρία εξέτασης όπως λαμβάνεται από το πρόγραμμα HOMER έχει τα κάτωθι χαρακτηριστικά:

Χρόνος Εκφόρτισης	Ρεύμα Εκφόρτισης	Συνολικό Φορτίο
23.8722	8.0849	193.0048
6.0972	22.0466	134.4228
2.7111	30.0513	81.4725
2.3528	33.3178	78.3894

Πίνακας 6: Μετρήσεις πειραματικής διάταξης συσσωρευτή

Το επόμενο διάγραμμα παρουσιάζει την σχέση χρόνου χωρητικότητας:



Σχήμα 36: Χωρητικότητα των μπαταριών για διαφορετικές τιμές ρεύματος εκφόρτισης.

Με βάση τις μετρήσεις αυτές και την καμπύλη που προκύπτει και αξιοποιώντας τη σχέση 5.4 προκύπτει ο υπολογισμός των παραμέτρων:

$$k = 4.84 \text{ 1/h}$$

$$c = 0.0489$$

$$q_{\max,0} = 240.8 \text{ Ah}$$

Οι παράμετροι αυτοί λαμβάνονται για το μοντέλο της χωρητικότητας. Για το μοντέλο της τάσης ο προσδιορισμός των παραμέτρων γίνεται λαμβάνοντας μια σειρά από πειραματικές μετρήσεις. Λόγω ελλείψεως των μετρήσεων, λαμβάνονται οι τιμές από το μοντέλο Homer για ένα συγκεκριμένο τύπο μπαταρίας:

$$E_0 = 65.56 \text{ V}$$

$$A = -0.01939 \text{ V/Ah}$$

$$C = -0.3635 \text{ V}$$

$$D = 290.2 \text{ Ah}$$

Τα δεδομένα αυτά αποτυπώνονται στο μοντέλο της τάσης, ώστε να ορίσει η αντίστοιχη προσομοίωση των συνθηκών. Για τον υπολογισμό της εσωτερικής αντίστασης αυτή λαμβάνεται σταθερή είτε κατά τη διαδικασία της φόρτισης είτε κατά τη διαδικασία της αποφόρτισης. Με γνώμονα τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος προκύπτει το μέγεθος αυτό. Για την παρούσα μελέτη και με την θεώρηση ότι η τιμή της εσωτερικής αντίστασης είναι πολύ χαμηλή λαμβάνουμε το μέγεθος:

$$R_0 = 0.1 \text{ Ohm}$$

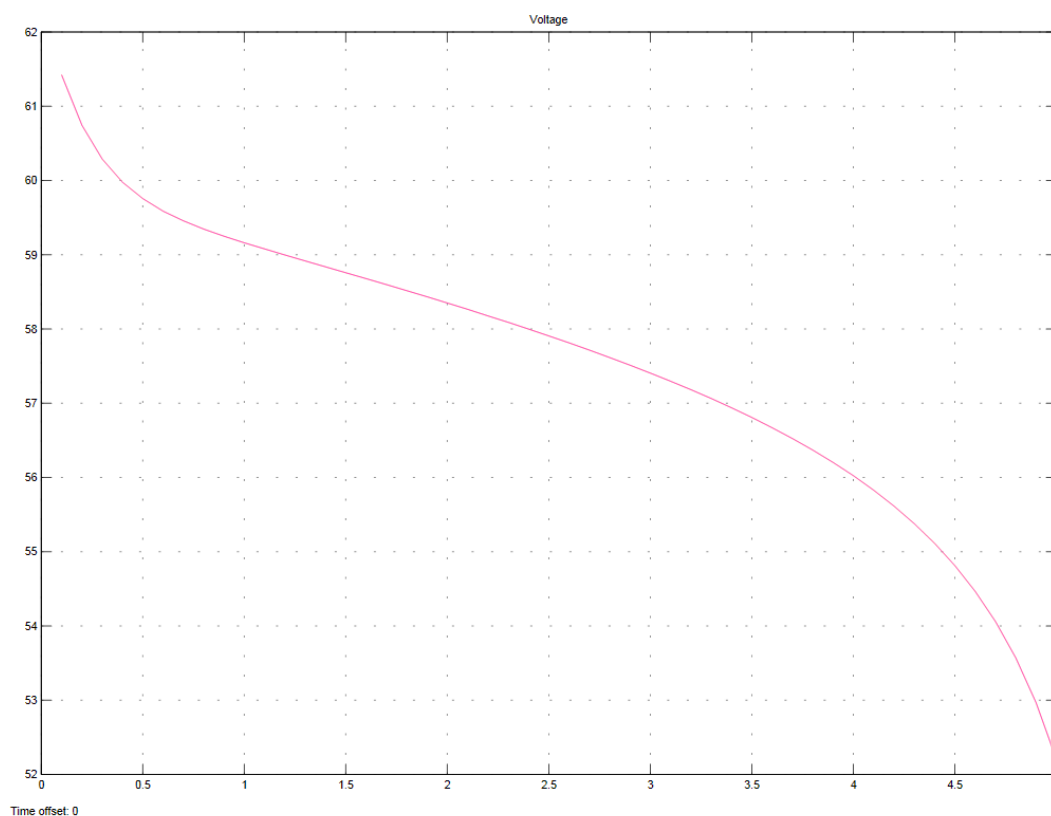
Είναι προφανές ότι η έλλειψη πραγματικών πειραματικών δεδομένων εμποδίζει την σωστή προσέγγιση για το μοντέλο που παρουσιάζεται. Όμως, η εξαγωγή αυτών των παραμέτρων είναι μια τυπική διαδικασία και εξάγεται είτε από το manual του κατασκευαστή της διάταξης είτε από τα πειραματικά δεδομένα από μετρήσεις επί της διάταξης. Σε κάθε περίπτωση, αυτές οι παράμετροι συνιστούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της διάταξης και για τον λόγο αυτό πρέπει να δίνεται πολύ μεγάλη προσοχή στην ορθή αποτύπωση των παραμέτρων αυτών.

6 Αποτελέσματα μοντελοποίησης

Στην παρούσα ενότητα, και με βάση την μοντελοποίηση που προηγήθηκε γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα της διαδικασίας. Μια σειρά από σενάρια παρέχονται που έχουν ως στόχο να τονίσουν τα χαρακτηριστικά της μοντελοποίησης που προηγήθηκε. Τα σενάρια αυτά λαμβάνουν αρχικά διαφορετικούς τύπους φόρτισης ώστε να τονιστεί η επίδραση του ρεύματος φόρτισης στα χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας της μπαταρίας. Κατόπιν και με γνώμονα την εξέταση της επίδρασης των παραμέτρων της μπαταρίας στα τελικά αποτελέσματα μια αναλυτική εξέταση ακολουθεί που λαμβάνει την επίδραση των τιμών στην ολική προσομοίωση.

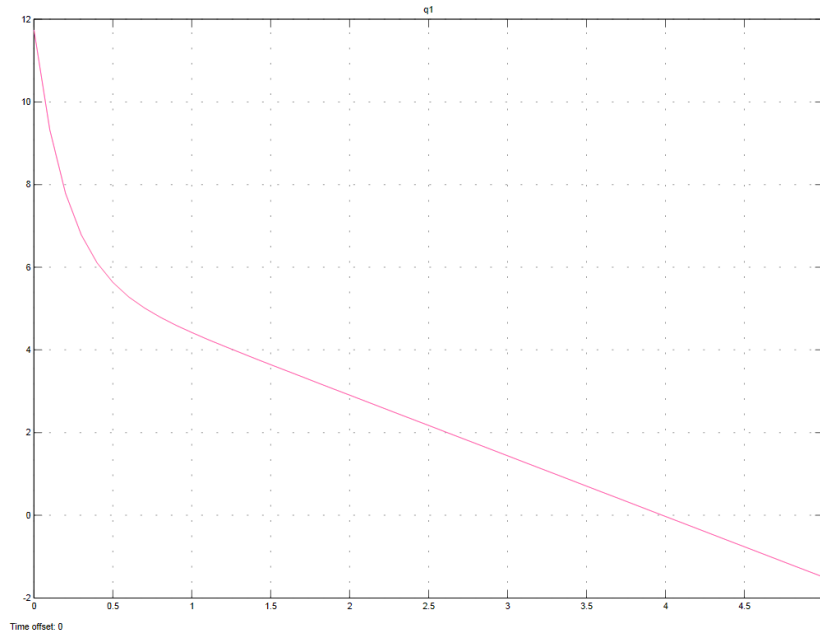
6.1 Σενάριο με σταθερό ρεύμα εκφόρτισης

Στο πρώτο σενάριο εξέτασης θεωρείται ότι το ρεύμα εκφόρτισης παραμένει σταθερό. Λαμβάνεται το ρεύμα αυτό ίσο με $I=30A$. Με παραμέτρους εισόδου τις τιμές που αναφέρθηκαν ανωτέρω αφήνεται το μοντέλο προσομοίωσης και λαμβάνονται τα αποτελέσματα της τάσης:

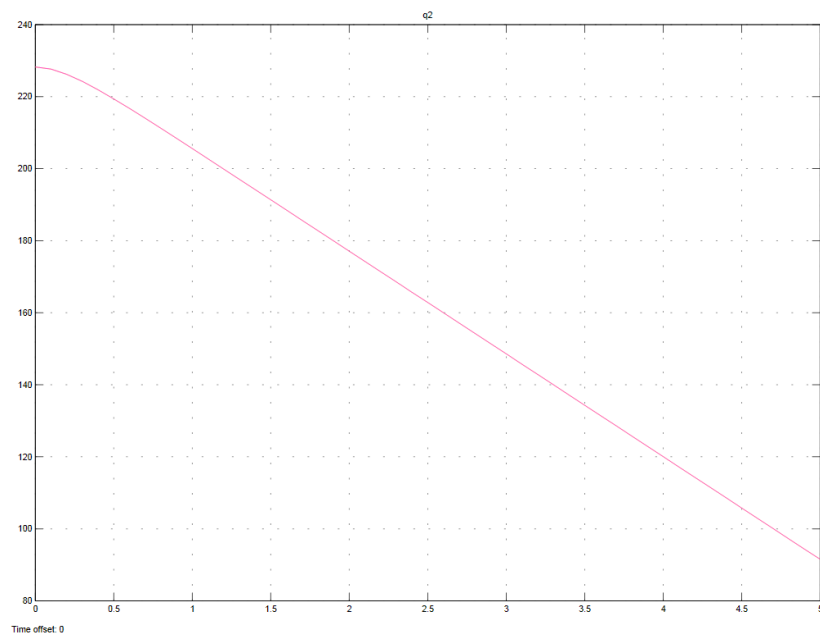


Σχήμα 37: Διάγραμμα Τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

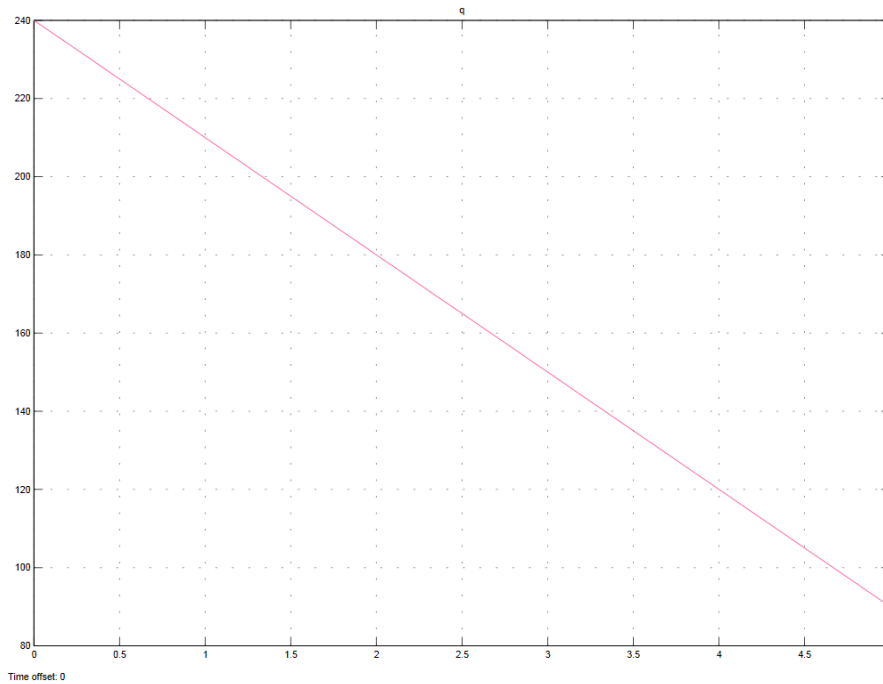
Κατά αντιστοιχία παρουσιάζονται και τα διαγράμματα για τα εσωτερικά μεγέθη του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, οι παράγοντες q , q_1 , q_2 και SoC από το μοντέλο χωρητικότητας συνοψίζονται:



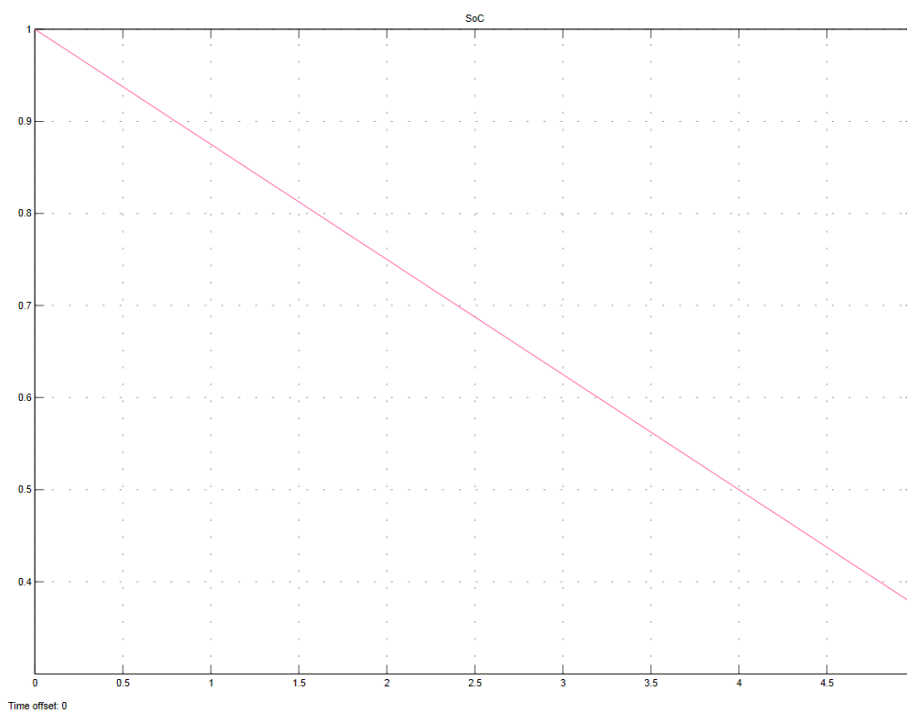
Σχήμα 38: Διάγραμμα q_1 συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης



Σχήμα 39: Διάγραμμα q_2 συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης



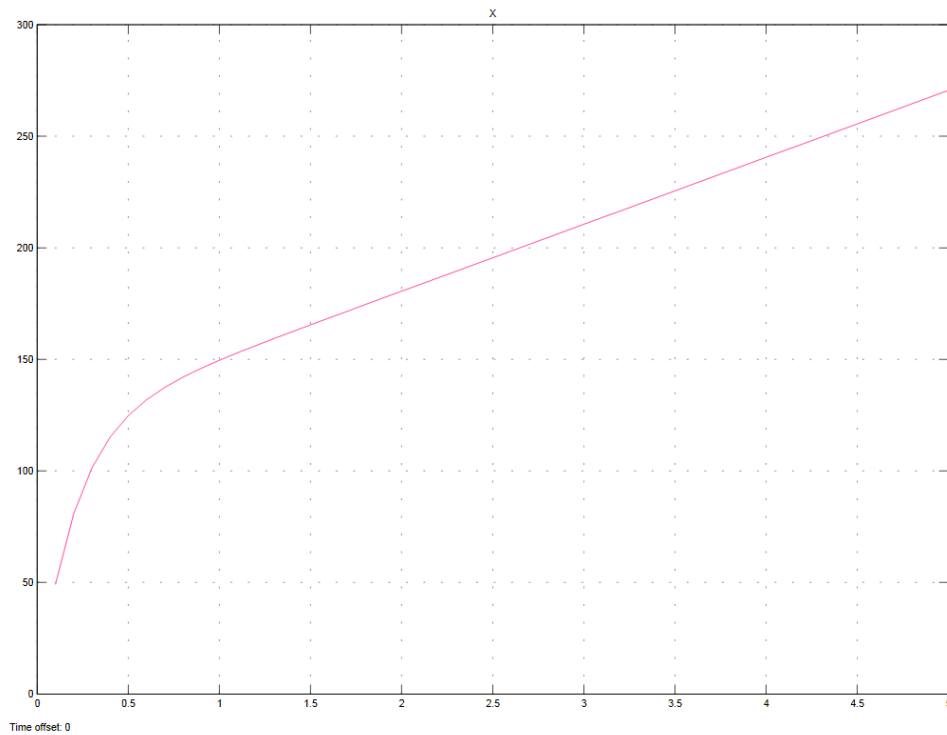
Σχήμα 40: Διάγραμμα q συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης



Σχήμα 41: Διάγραμμα SoC συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Όπως ήταν αναμενόμενο το SoC της κατάστασης της μπαταρίας μειώνεται καθώς αυτή εκφορτίζεται. Μάλιστα, αυτό συμβαίνει με σταθερό ρυθμό δεδομένης της σταθερής ροής ρεύματος.

Η παράμετρος του X από το μοντέλο της τάσης παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα:

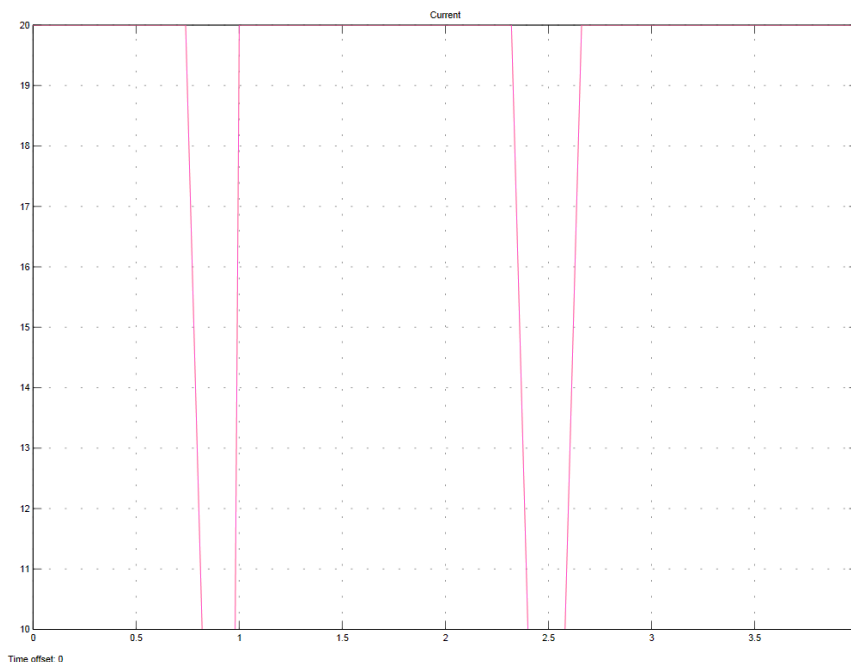


Σχήμα 42: Διάγραμμα X συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Η συναρτήσει του X εκφράζει την κανονικοποιημένη χωρητικότητα που έχει νόημα εξέτασης σε περίπτωσης μη συνεχούς ρεύματος αφού με βάση τον τύπο 5.4 εξαρτάται από το $Q_{\max}(I)$.

6.2 Σενάριο με βηματική συνάρτηση ρεύματος

Στην περίπτωση εξέτασης θεωρείται η βηματική συνάρτηση

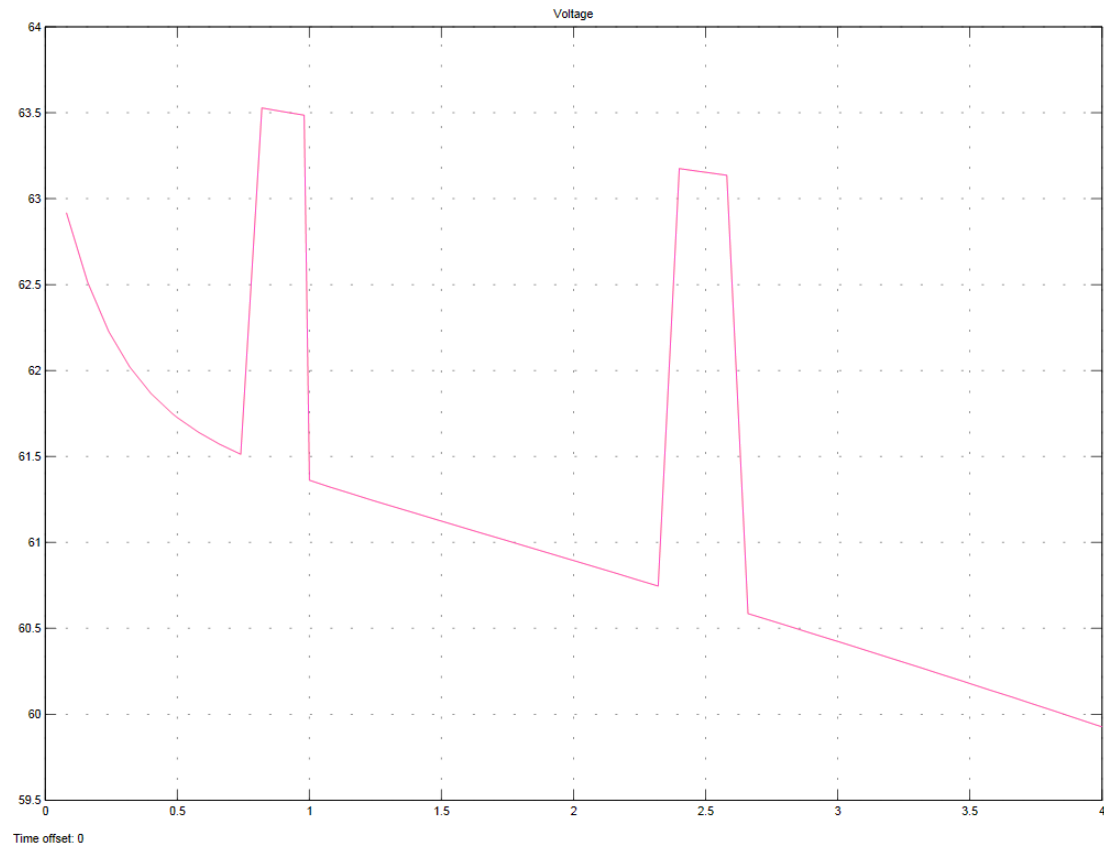


Σχήμα 43: Διάγραμμα ρεύματος συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Η στρατηγική που εξετάζεται είναι η ακόλουθη:

- Η διάταξη είναι πλήρως φορτισμένη
- Η εκφόρτιση και αναμονή διαρκούν ίδια περίοδο
- Καμιά διαδικασία φόρτισης δεν λαμβάνει χώρα

Η συνάρτηση αυτή έχει ένα εύρος από 10 – 20A και η διαδικασία της εκφόρτισης παρουσιάζεται στα ακόλουθα διαγράμματα:



Σχήμα 44: Διάγραμμα τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Όπως διαφαίνεται από τα διαγράμματα το μοντέλο καλύπτει πλήρως τις περιπτώσεις της εκφόρτισης αλλά όχι τις στατικές καταστάσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο δεν έχει μνήμη κατά τη λειτουργία του, οπότε δεν έχει και συνέχεια στις μεταβολές των καταστάσεων. Για το λόγο αυτό το μοντέλο εκτελείται επαναληπτικά για τα διαστήματα εξέτασης, ορίζοντας κάθε φορά τις παραμέτρους στο τέλος της περιόδου. Οπότε, για το ανωτέρω σήμα υπάρχουν τα διαστήματα:

$$0.0 - 0.8\text{h} \rightarrow 20\text{A}$$

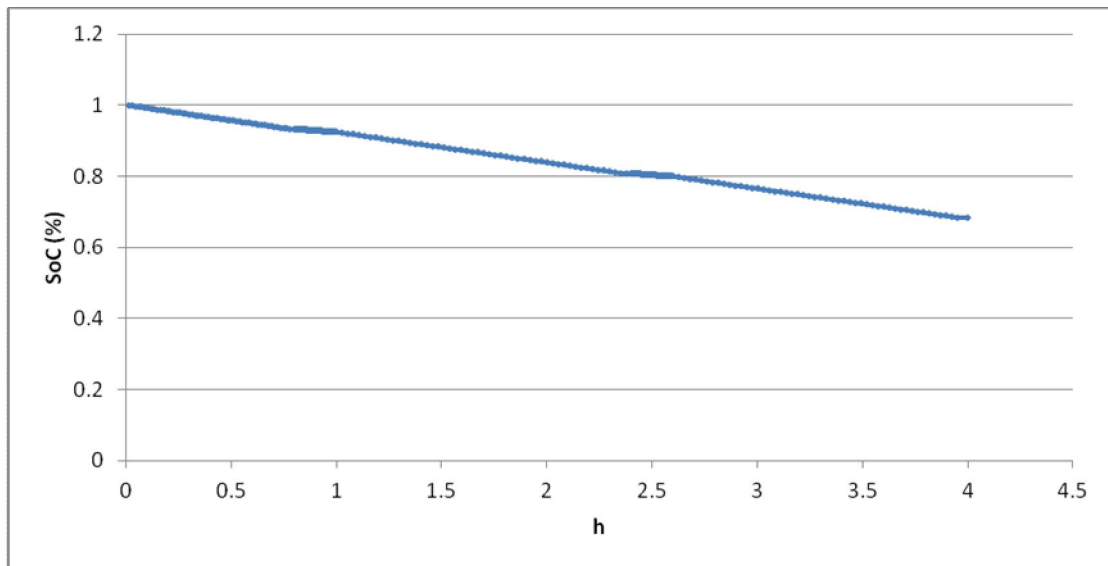
$$0.8 - 1.0\text{h} \rightarrow 10\text{A}$$

$$1.0 - 2.4\text{h} \rightarrow 20\text{A}$$

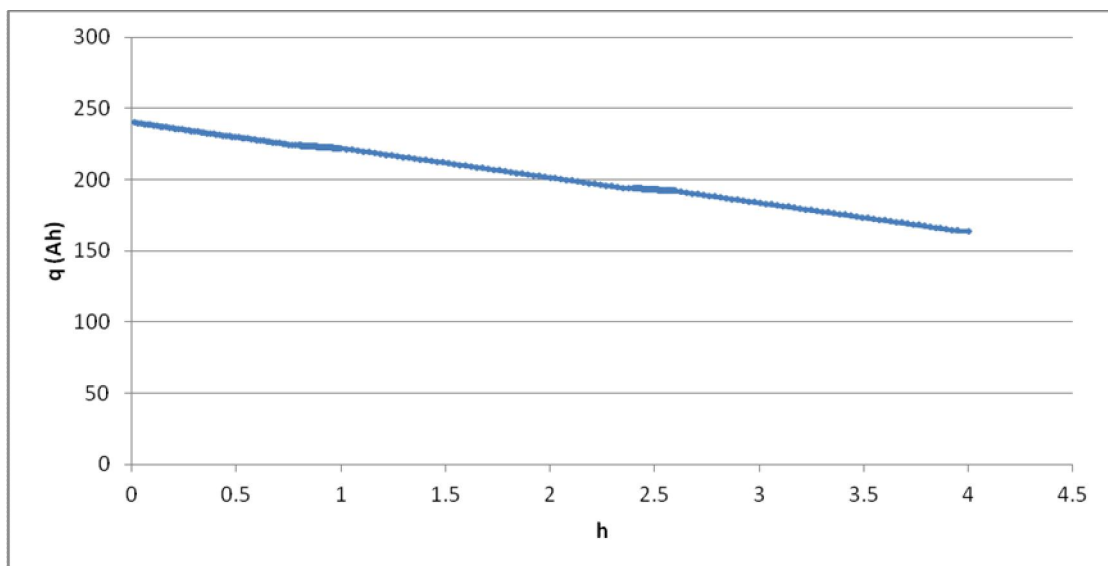
$$2.4 - 2.6\text{h} \rightarrow 10\text{A}$$

$$2.6 - 4.0\text{h} \rightarrow 20\text{A}$$

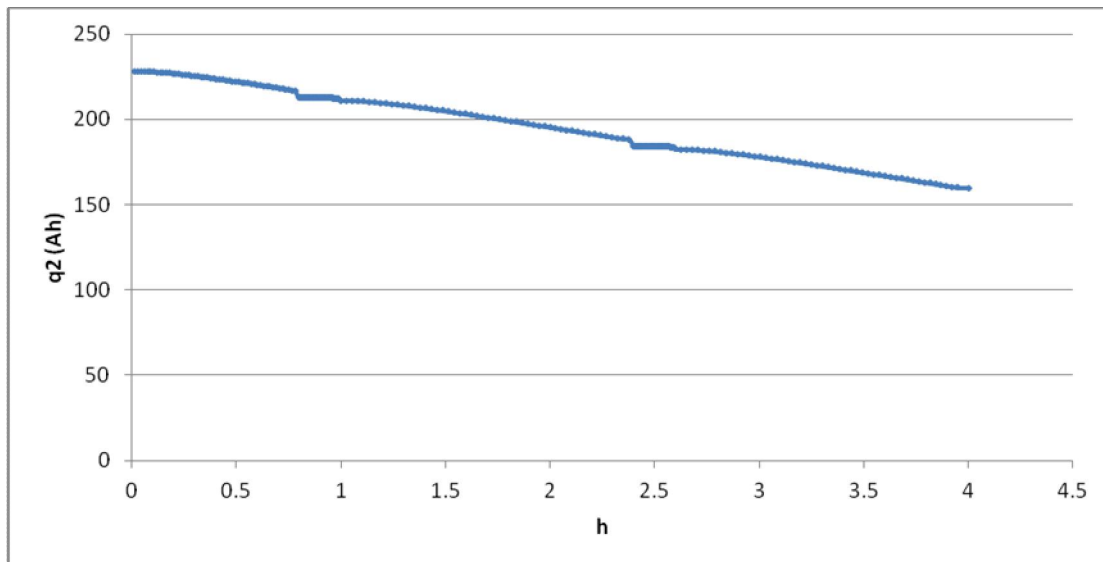
Εκτελώντας επαναληπτικά την διαδικασία για τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα λαμβάνεται:



Σχήμα 45: Διάγραμμα SoC συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης



Σχήμα 46: Διάγραμμα q φορτίου απόδοσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

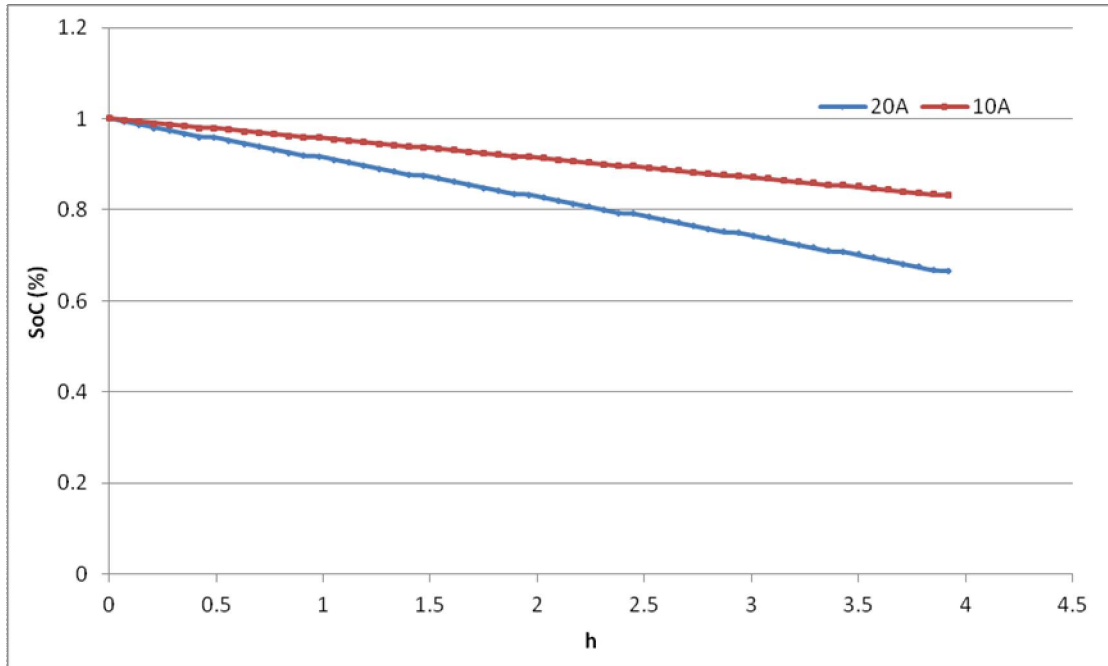


Σχήμα 47: Διάγραμμα q2 χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Είναι προφανές ότι η αλλαγή έγκειται στο γεγονός ότι πλέον η εκφόρτιση δεν είναι συνεχής και κατά συνέπεια η όλη διαδικασία είναι διακοπτόμενη ως προς τα μεγέθη εξέτασης. Το χρονικό διάστημα με χαμηλή τιμή του ρεύματος αναδεικνύει και την διακοπτική λειτουργία του μοντέλου KiBaM. Όλες οι διαδικασίες λαμβάνονται σαν μια ροή από διαστήματα που πρέπει να εξετάζονται σειριακά για την πλήρη αποτύπωση της διαδικασίας. Στο παράρτημα παρουσιάζονται οι τιμές για όλο το διάστημα όπως προκύπτουν από την μοντελοποίηση.

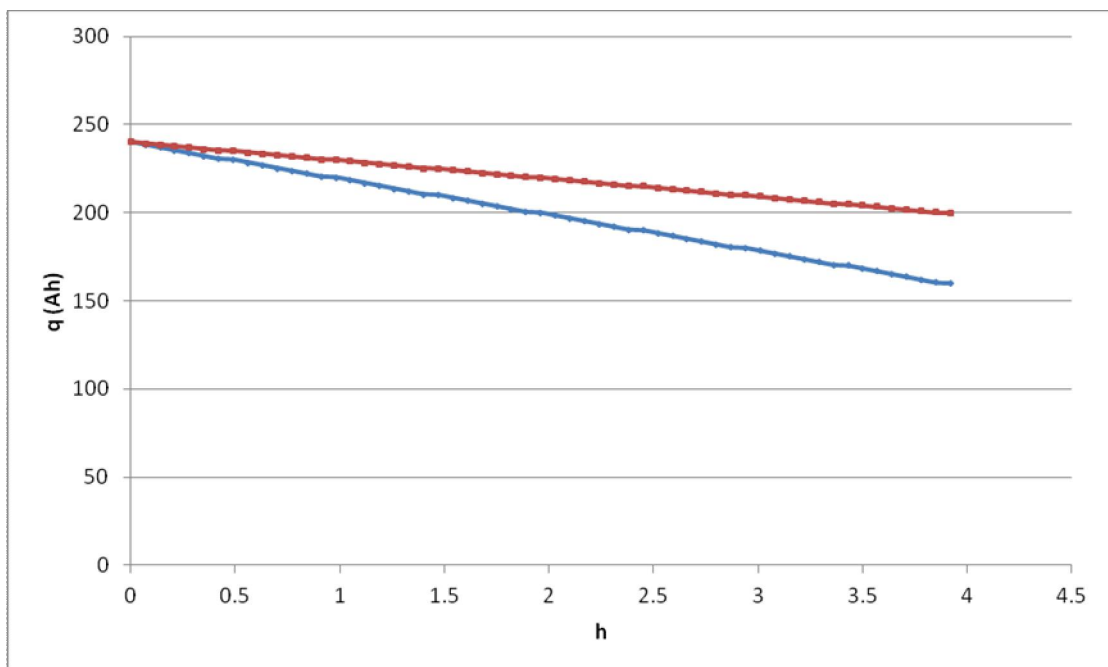
6.3 Συγκριτική αξιολόγηση διαδικασίας

Η μέχρι τώρα εξέταση λαμβάνει υπόψη μονό μια σταθερή διαδικασία φόρτισης / εκφόρτισης. Ο σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να παρουσιάσει την συγκριτική αξιολόγηση των μεγεθών όπως προκύπτουν από την μοντελοποίηση. Έστω σαν αρχικό σενάριο βάσης το σενάριο με ρεύμα 20A και σαν συγκριτικό σενάριο λαμβάνεται η διαδικασία με ρεύμα εκφόρτισης τα 10A. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης είναι τα ακόλουθα:

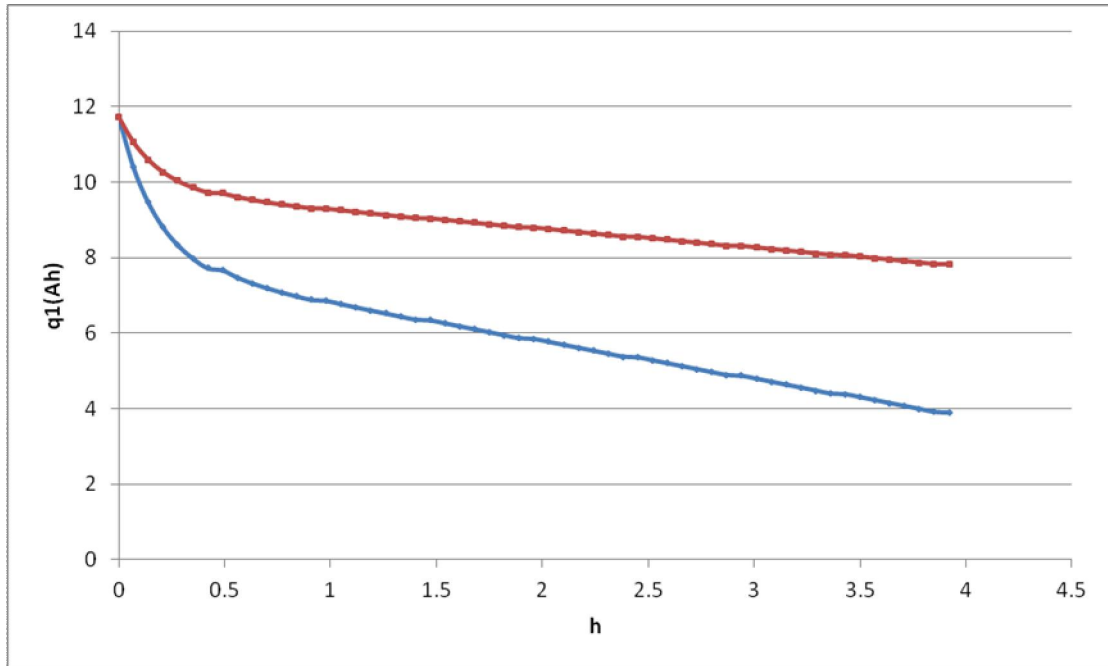


Σχήμα 48: Διάγραμμα SoC χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

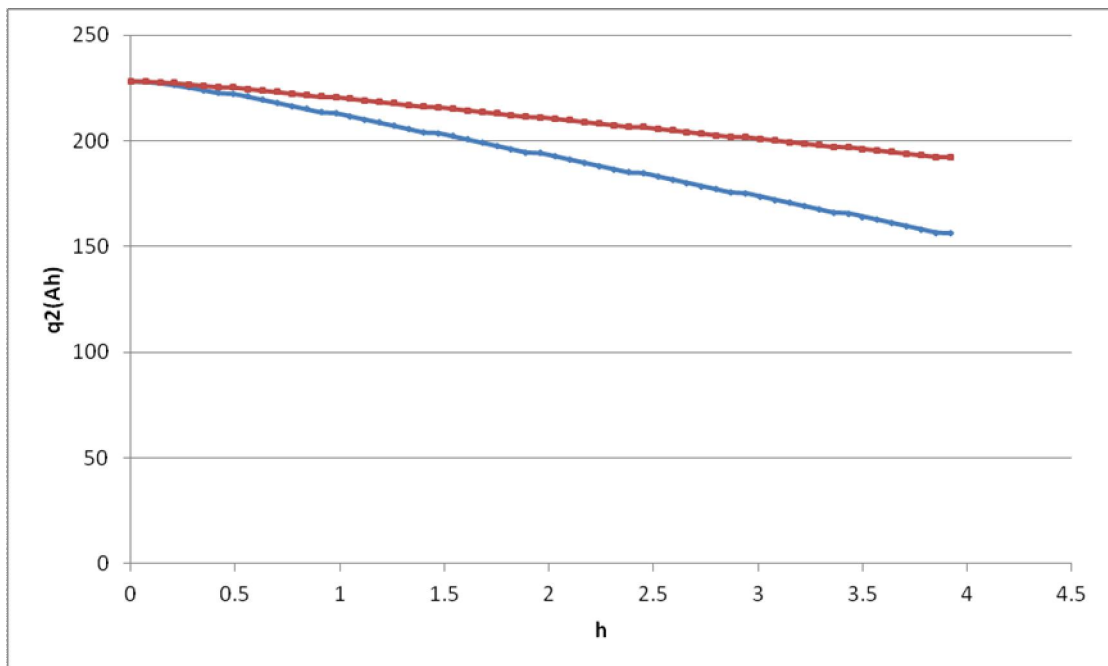
Για τα μεγέθη από το μοντέλο χωρητικότητας έχουμε:



Σχήμα 49: Διάγραμμα q χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

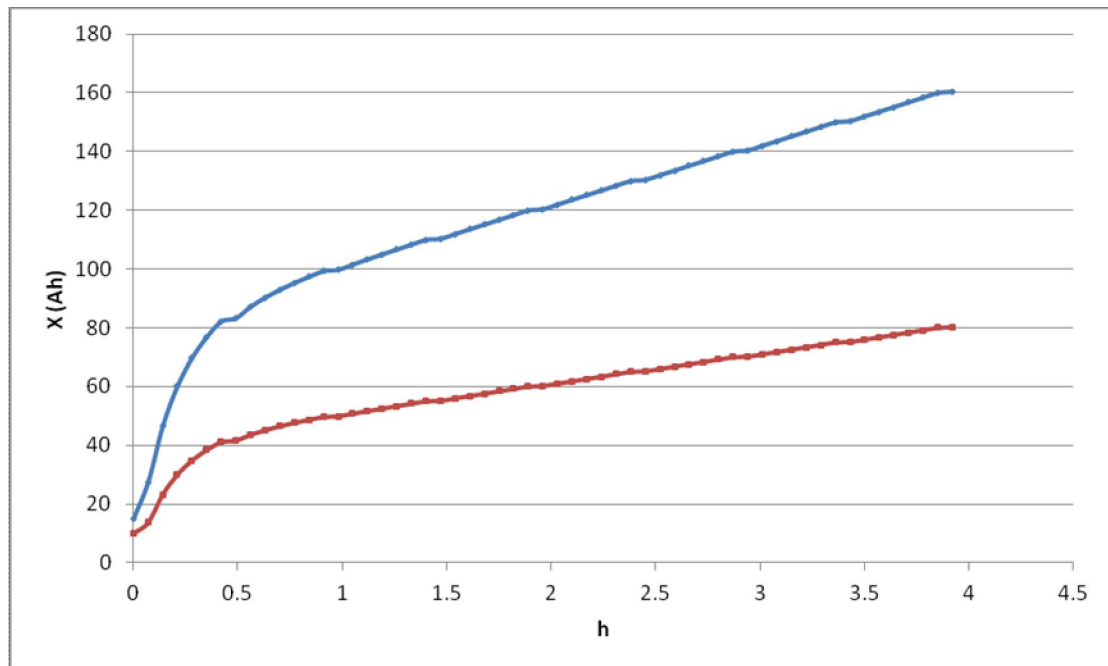


Σχήμα 50: Διάγραμμα q1 χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

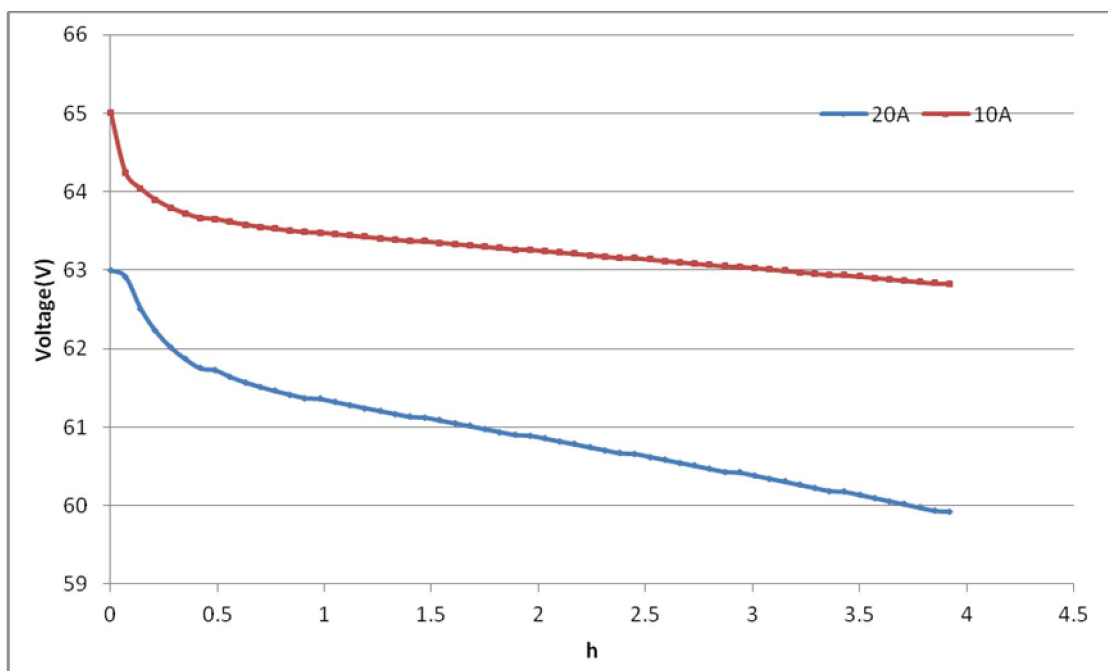


Σχήμα 51: Διάγραμμα q2 χωρητικότητας συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Για τα μεγεθη από το μοντέλο της τάσης λαμβάνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα:



Σχήμα 52: Διάγραμμα X συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης



Σχήμα 53: Διάγραμμα Τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Όπως αποτυπώνεται και στα μοντέλα που οριστήκαν, η μείωση στο ρεύμα εκφόρτισης οδηγεί σε μικρότερα μεγέθη απωλειών χωρητικότητας και κατ' επέκταση του SoC. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης καλύπτει απόλυτα την φυσική μοντελοποίηση και στο πλαίσιο αυτό το μοντέλο KiBaM χαρακτηρίζεται ως το κατάλληλο για την μοντελοποίηση εφαρμογών ηλεκτροκίνησης.

6.4 Ανάλυση παραμέτρων εισόδου

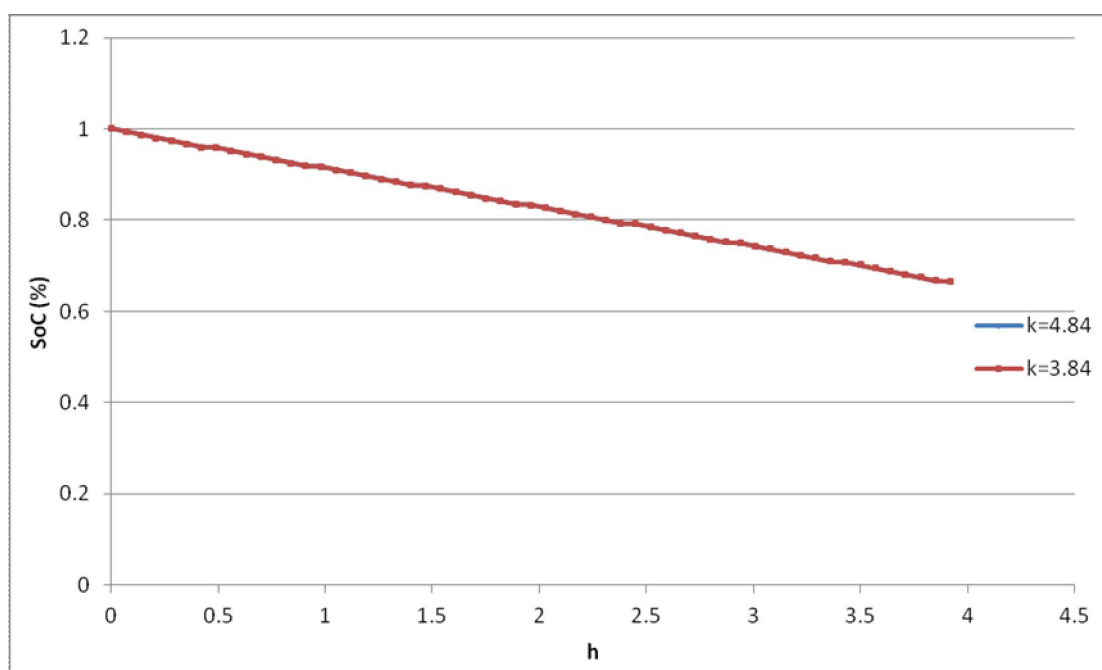
Στην μελέτη που προηγήθηκε οι παράμετροι των μοντέλων έχουν ληφθεί δειγματοληπτικά προς εξέταση του μοντέλου αυτού. Όμως για λόγους πληρότητας πρέπει να εξεταστεί και η επίδραση που δύναται να έχουν οι παράμετροι αυτοί στο τελικό μοντέλο. Για τον λόγο αυτό ακολουθεί μια ανάλυση ευαισθησίας που έχει σαν στόχο να καταδείξει την επίδραση των τιμών στο τελικό μοντέλο. Οι παράμετροι του μοντέλου ορίζονται οι: Q_{\max} , c , k . Επειδή το Q_{\max} χαρακτηρίζει την χωρητικότητα της μπαταρίας και η μοντελοποίηση είναι αναλογική ο λόγος της μελέτης συνοψίζεται στις ακόλουθες παραμέτρους.

Μεταβολή Παραμέτρου k

Σαν αποτέλεσμα της εξέτασης της τιμής της παραμέτρου k υπάρχουν δύο τιμές:

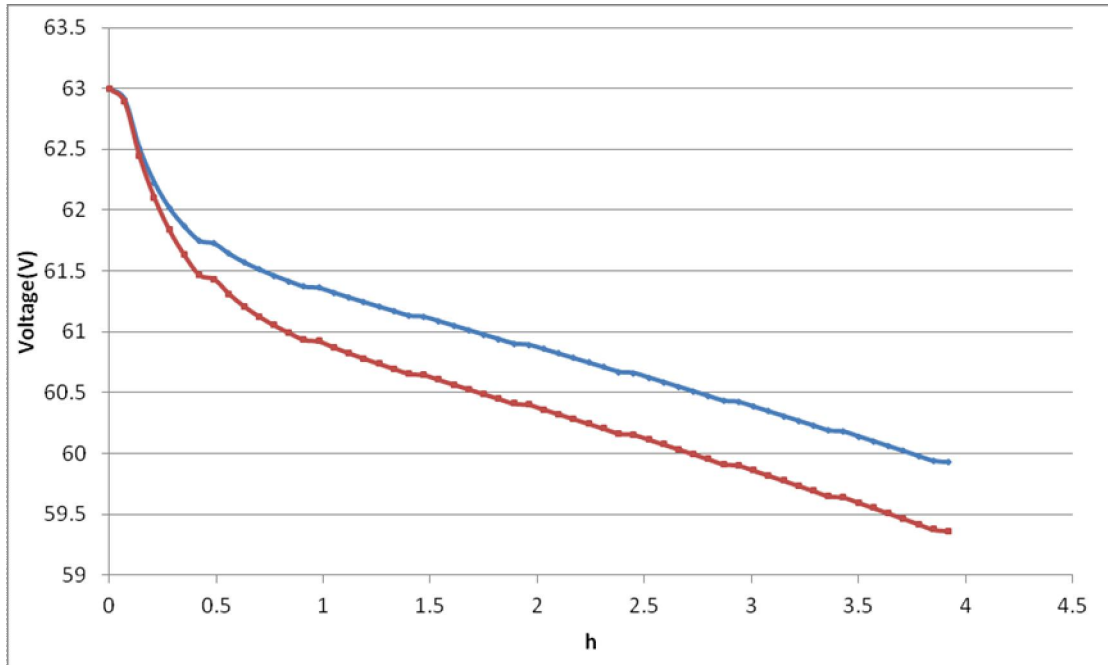
- $k=4.84$
- $k=3.84$

Τα μεγέθη αυτά επιδρούν κυρίως στο μοντέλο της τάσης και τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται:

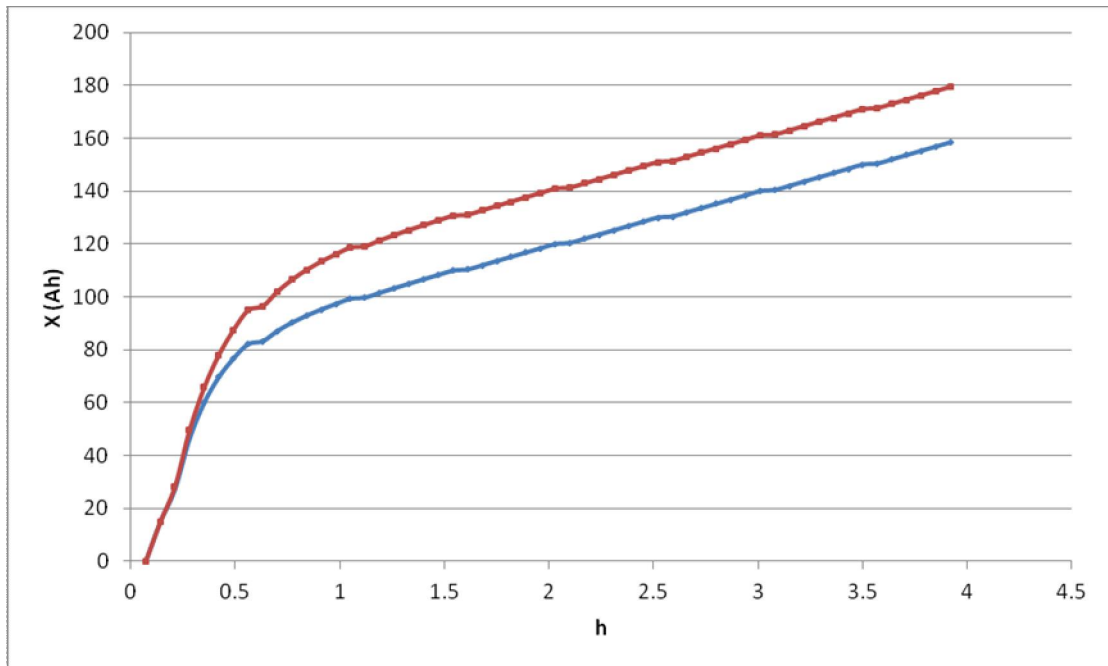


Σχήμα 54: Διάγραμμα SoC συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Όπως είναι αναμενόμενο το SoC δεν μεταβάλλεται εξαιτίας του σταθερού ρεύματος ανά περίπτωση. Σε αντίθετη περίπτωση, τα εσωτερικά χαρακτηριστικά του μοντέλου που σχετίζονται με την τάση εμφανίζουν την μεγαλύτερη μεταβολή όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα που ακολουθούν.



Σχήμα 55: Διάγραμμα Τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης



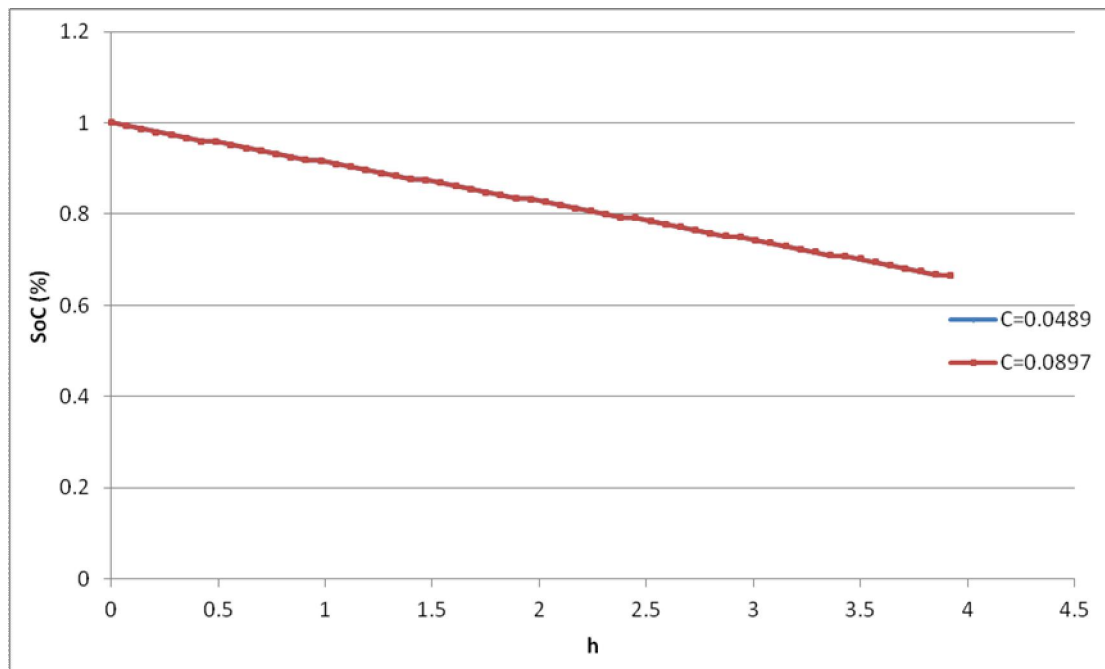
Σχήμα 56: Διάγραμμα X συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Μεταβολή Παραμέτρου c

Σαν αποτέλεσμα της εξέτασης της τιμής της παραμέτρου c υπάρχουν δυο τιμές:

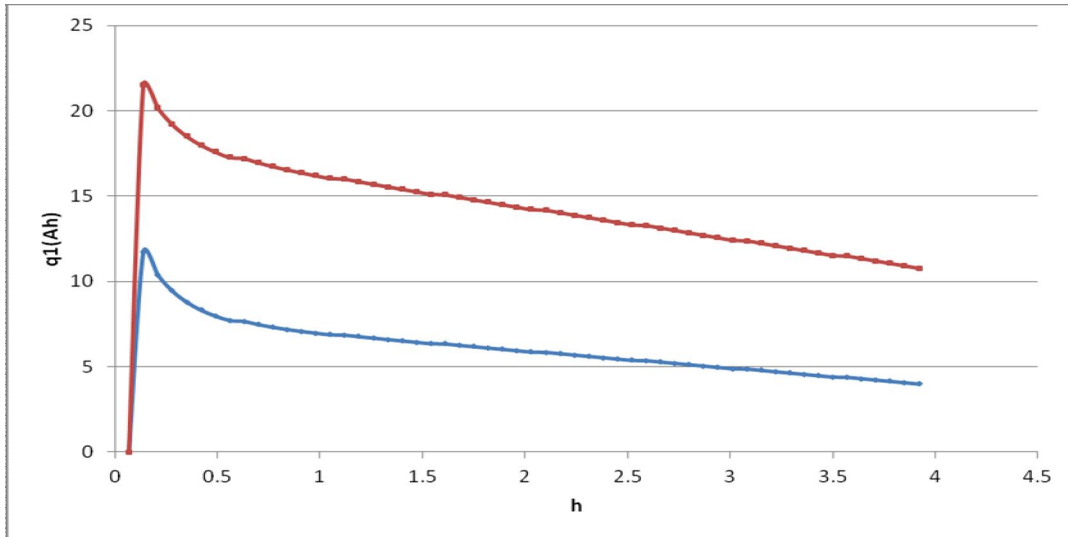
- $c=0.0489$
- $c =0.0897$

Τα μεγέθη αυτά επιδρούν κυρίως στο μοντέλο της τάσης και τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται:

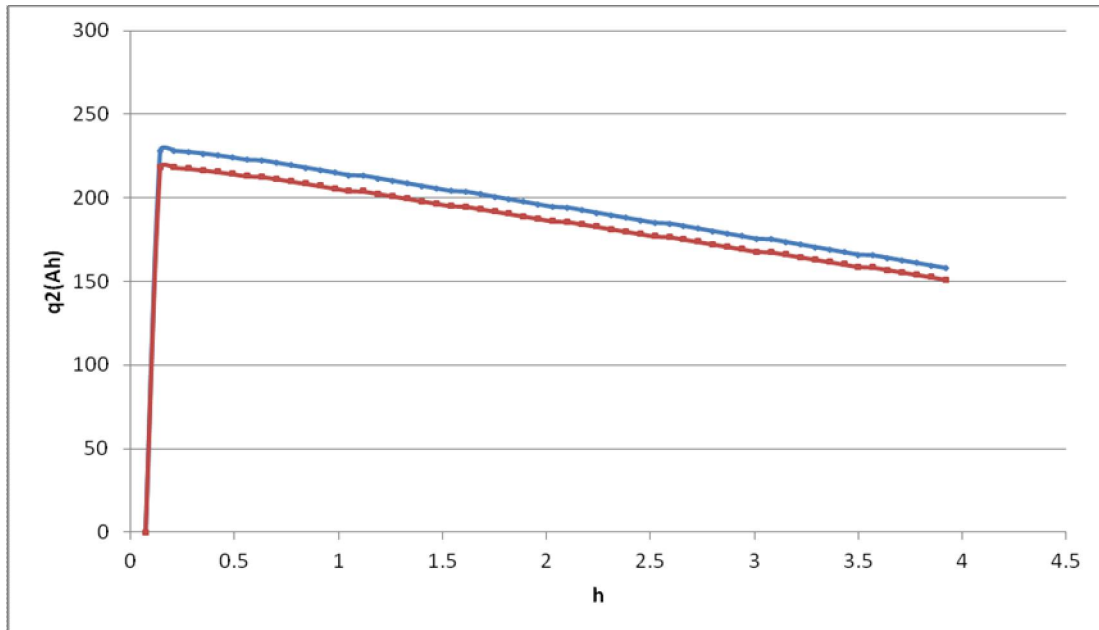


Σχήμα 57: Διάγραμμα SoC συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

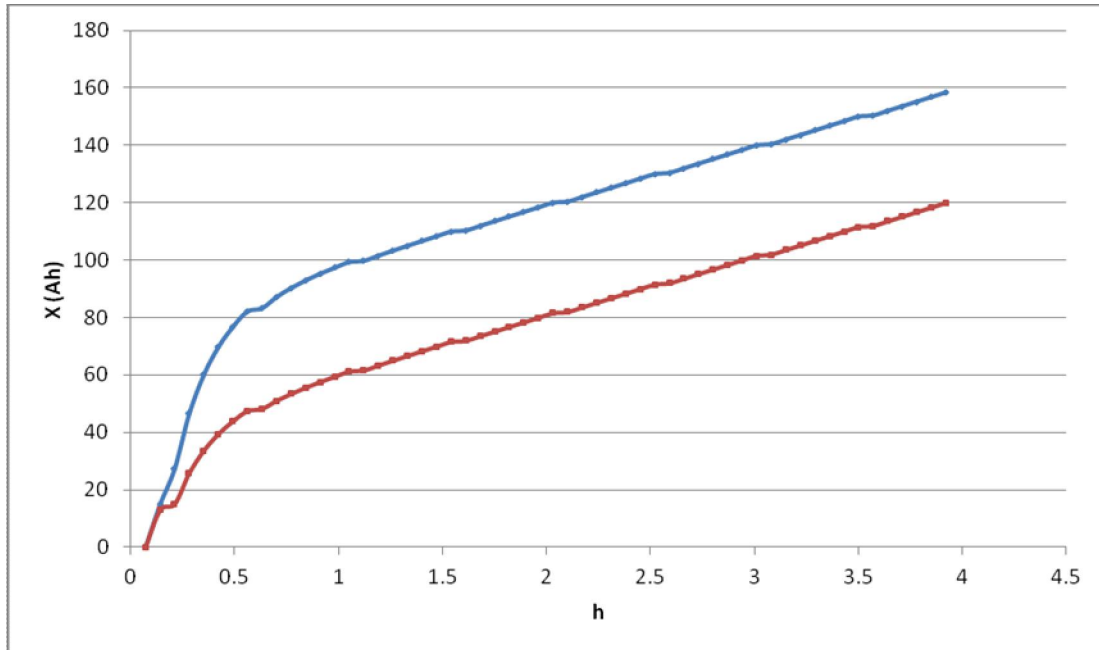
Όπως αναμενόταν το SoC παραμένει αμετάβλητο αλλά μεταβάλλονται οι εσωτερικές παράμετροι του μοντέλου. Οπότε, τα συγκριτικά διαγράμματα για τα q_1 , q_2 , X , Voltage παρουσιάζονται:



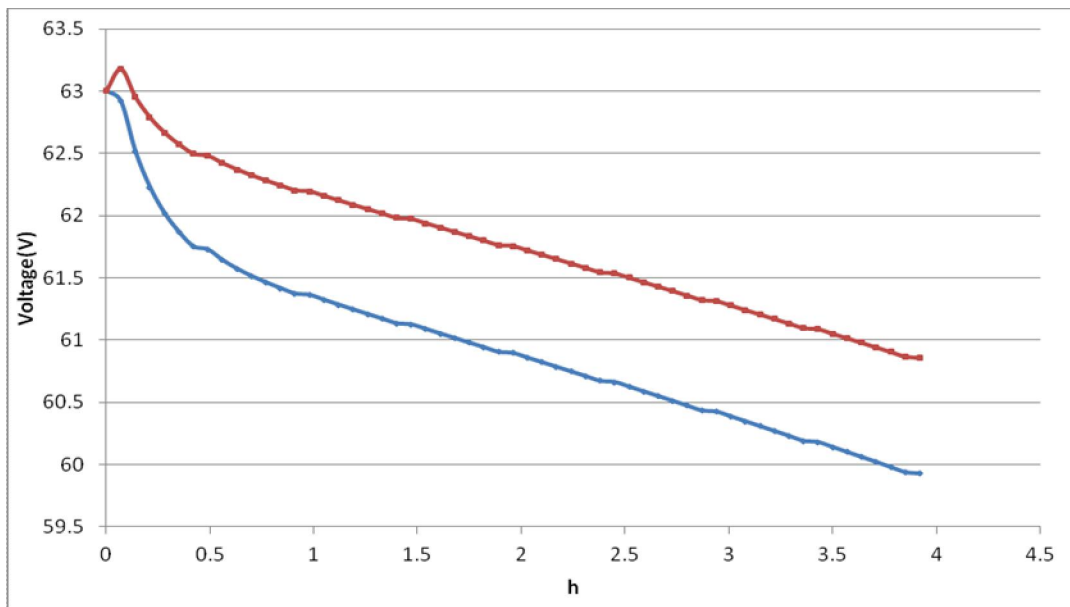
Σχήμα 58: Διάγραμμα $q1$ συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης



Σχήμα 59: Διάγραμμα $q2$ συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης



Σχήμα 60: Διάγραμμα X συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης



Σχήμα 61: Διάγραμμα Τάσης συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης

Όπως τονίστηκε ανωτέρω τα μεγέθη αυτά μοντελοποιούν

- c: αντανακλά το ποσοστό του συνολικού φορτίου της μπαταρίας άμεσα διαθέσιμου
- k: υποδεικνύει το ρυθμό με τον οποίο το δεσμευμένο φορτίο γίνεται διαθέσιμο σε hrs⁻¹

οπότε η τιμή τους είναι ενδεικτική της χρονικής μεταβολής των διαδικασιών για την περίπτωση του k και τις εσωτερικής διεργασίας στα q_1, q_2 για το c . Οπότε η όλη εξέταση δεν επιδρά την τελική κατάσταση του ολικού συστήματος (που επηρεάζεται από το ρεύμα) αλλά επιδρά στις ενδιάμεσες στάθμες λειτουργίας της μπαταρίας όπως αποτυπώνεται από το KiBaM μοντέλο.

Ο σκοπός της ενότητας αυτής ήταν να παρουσιάσει ένα σύνθετο μοντέλο που να καλύπτει τα σενάρια λειτουργίας στην εφαρμογή της ηλεκτροκίνησης. Με το KiBaM μοντέλο και τα σενάρια προσομοίωσης που εξετάζονται παρέχεται μια εποπτική διαδικασία για την συνολική μοντελοποίηση που καταδεικνύει την ευελιξία του μοντέλου σε πλήθος από εφαρμογές.

7 Συμπεράσματα

7.1 Βασικά τελικά συμπεράσματα

Στη παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η αρχή λειτουργίας και η δομή των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση και αναλύθηκαν τα φαινόμενα που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους. Δόθηκε έμφαση στις μπαταρίες που έχουν ως βασική παράμετρο τη καταλληλότητα τους για χρήση σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Αναδείχθηκαν οι τεχνικές παράμετροι – παράγοντες των μπαταριών που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για τον κατασκευαστή του ηλεκτρικού οχήματος και μελετήθηκε η λειτουργία που επιτελεί το Σύστημα Διαχείρισης Μπαταριών (BMS). Παρουσιάστηκαν τα είδη μοντέλων που διατίθενται για την προσομοίωση μπαταριών με ιδιαίτερη έμφαση στα ηλεκτρικά μοντέλα. Από αυτά επιλέχθηκε μοντέλο ικανό να αποτυπώνει και τη δυναμική συμπεριφορά της μπαταρίας. Προτιμήθηκε κατάλληλη διαδικασία μοντελοποίησης που επέτρεψε τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου σε λογικό χρόνο υπολογισμού ενώ ακολούθησε η επεξεργασία των μετρήσεων και ο προσδιορισμός των παραμέτρων. Ο στόχος της μοντελοποίησης και της όλης προσομοίωσης γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την εφαρμογή του μοντέλου στις περιπτώσεις της ηλεκτροκίνησης. Συνεπώς, το μοντέλο που προέκυψε αποδίδει ικανοποιητικά τη δυναμική συμπεριφορά της μπαταρίας, κάτι που αποδεικνύεται χρήσιμο σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, όπου η απαιτούμενη ισχύς παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Ένα μοντέλο σαν αυτό που παρουσιάζεται θα μπορούσε να αποτελέσει το σύστημα βάσης για την υλοποίηση ενός μοντέλου που θα προσομοιώνει με ακρίβεια ολόκληρη τη συστοιχία των μπαταριών που είναι και το κυρίως ζητούμενο για το κατασκευαστή του ηλεκτρικού οχήματος. Συνοπτικά αναφέρουμε για την οργάνωση της διαδικασίας:

- Στο 1ο κεφάλαιο, επισημαίνεται ο σκοπός εκπόνησης της εργασίας, καταγράφεται η συνεισφορά της και παρουσιάζονται συνοπτικά τα περιεχόμενά ανά κεφάλαιο.
- Στο 2ο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι εξέτασης στον κλάδο της ηλεκτροκίνησης με έμφαση στις τεχνολογίες μπαταριών και τα

χαρακτηριστικά τους. Για τον λόγο αυτό παρέχεται μια συνολική σκοπιά στον κλάδο.

- Στο 3ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας και η δομή των μπαταριών που αποτελούν το αντικείμενο εξέτασης. Αναλύονται οι ιδιαιτερότητες της μπαταρίας και αναφέρονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που καθιστούν σημαντική την μελέτη εξέτασης. Επιπλέον, γίνεται εισαγωγική αναφορά στην μοντελοποίηση των αποθηκευτικών διατάξεων.
- Στο κεφάλαιο 4 επιλέγεται από τα πολλά, ένα συγκεκριμένο μοντέλο για τις αποθηκευτικές διατάξεις στην ηλεκτροκίνηση. Το μοντέλο αυτό θα αποτελέσει την βάση για την υλοποίηση στην παρούσα ενότητα.
- Στο 5ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η υλοποίηση σε Matlab του προτεινόμενου μοντέλου, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και αναλύεται η μέθοδος προσδιορισμού των παραμέτρων του μοντέλου από τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.
- Στο 6ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές που προκύπτουν από την προσομοίωση και τα βασικά συμπεράσματα από την χρήση του μοντέλου. Επίσης, αναφέρονται οι φάσεις φόρτισης - εκφόρτισης στις παραμέτρους του μοντέλου.
- Το κεφάλαιο 7 συνοψίζει τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης, επισημαίνει τη συνεισφορά της και αναδεικνύει θέματα που χρήζουν περαιτέρω μελέτης.

7.2 Σημεία εξέτασης και ανάλυσης

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μια σειρά από βασικά σημεία εξεταστήκαν και τα αποτελέσματα από την διαδικασία αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά στην παρούσα ενότητα. Πιο αναλυτικά, τα βασικά εξαγόμενα αποτελέσματα από το μοντέλο που επιλέχτηκε για την εφαρμογή της ηλεκτροκίνησης παρουσιάζονται:

- Η State of the Art ανάλυση που αποτελεί το πρώτο μέρος της εργασίας, ακολουθεί μια προσέγγιση από το γενικό στο ειδικό, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυση των αποθηκευτικών διατάξεων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης.

- Παραμετροποίηση του μοντέλου που προτείνεται από το μοντέλο KiBaM, ώστε να προσομοιώνει με ακρίβεια τη συμπεριφορά του ηλεκτροχημικού στοιχείου της μπαταρίας, με το οποίο θα μπορούσε να εφοδιαστεί ένα ηλεκτρικό όχημα.
- Η διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε, επέτρεψε την παραμετροποίηση του μοντέλου, ώστε οι παράμετροι του μοντέλου να λαμβάνουν τιμές όσο το δυνατόν πιο ακριβείς.
- Το μοντέλο εξέτασης λαμβάνει πλήθος από τις παραμέτρους που πρέπει να εξετάζονται σε αυτής της φύσεως τις διαδικασίες και για τον λόγο αυτό αναφέρεται σαν ένα σύνθετο μοντέλο.
- Τα σενάρια που εξετάζονται λαμβάνονται υπόψη σαν real life scenarios, ώστε η προσομοίωση να λαμβάνει υπόψη όσο το δυνατόν πιο ακριβείς συνθήκες. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα πρέπει να λαμβάνονται όσο δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Τα ζητούμενα εξέτασης είναι επομένως πολλαπλά, δίνοντας βάση κυρίως στο μέρος της μοντελοποίησης των αποθηκευτικών διατάξεων και λιγότερο στην βιβλιογραφική θεώρηση των τεχνολογιών και των μοντέλων στον τομέα της ηλεκτροκίνησης.

7.3 Θέματα για περαιτέρω εξέταση

Το αντικείμενο εξέτασης της παρούσας μελέτης είναι πολυσύνθετο και αγγίζει διαφορετικές πτυχές εξέτασης. Όμως, αποτελεί παράλληλα και την βάση για την εξέταση μιας σειράς από διαφορετικές προσεγγίσεις που έχουν ως στόχο να τονίσουν το ζήτημα της μοντελοποίησης των οχημάτων. Με την ολοκλήρωση της εργασίας, προέκυψαν τα παρακάτω θέματα προς διερεύνηση που θα μπορούσαν να αποτελέσουν τη βάση περαιτέρω έρευνας:

- Η υλοποίηση ενός μοντέλου που προσομοιώνει με ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός στοιχείου αποτελεί σημαντική συνεισφορά. Ωστόσο, αυτό που ενδιαφέρει τελικά το κατασκευαστή του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης είναι η μοντελοποίηση του συνόλου της συστοιχίας των μπαταριών σαν ένα ενιαίο μοντέλο. Το παρόν σύστημα θα μπορούσε να συνδυαστεί με ένα μοντέλο Διαχείρισης Μπαταριών (BMS System) προκειμένου να εξεταστεί

πλήρως η όλη διάταξη τόσο από την μεριά των αποθηκευτικών διατάξεων όσο και από την διαχείριση αυτών.

- Το μοντέλο προσδιορίζει τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του στοιχείου κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Ωστόσο, δεν αξιοποιεί την πληροφορία αυτή ώστε να αποτυπώσει την επίδραση που έχει η θερμοκρασία στα ηλεκτρικά μεγέθη της μπαταρίας (τάση, εσωτερική αντίσταση). Με άλλα λόγια, οι θερμικές και θερμοκρασιακές παράμετροι εξέτασης λαμβάνονται υπόψη με ένα τρόπο σχέδιο στατικό.
- Το μοντέλο που εξετάστηκε είναι στην ουσία ένα ηλεκτρικό κύκλωμα για την μοντελοποίηση. Στην αναφορά όμως αποτυπώθηκε και η ύπαρξη πιο συνθετών μοντέλων που δύνανται να προσομοιώσουν πλήρως την φυσικοχημική λειτουργία των διατάξεων. Για τον λόγο αυτό, η συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών μοντέλων που υλοποιήθηκε θα μπορούσε να αποτελέσει την βάση για την επιπλέον εξέταση.
- Τέλος, για την μοντελοποίηση των αποθηκευτικών διατάξεων χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Matlab και πιο συγκεκριμένα τη βιβλιοθήκη του Simulink. Όμως, υπάρχουν πιο σύνθετα και εξειδικευμένα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση των αποθηκευτικών διατάξεων με έμφαση στα δυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Στο πλαίσιο αυτό η χρήση πιο συνθετών εργαλείων για την διαδικασία της μοντελοποίησης φαντάζει ως βασικός στόχος μελλοντικής έρευνας.

Η όλη εξέταση γίνεται ώστε να καταδείξει την σπουδαιότητα και την σημαντικότητα της προσομοίωσης των αποθηκευτικών διατάξεων σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Πρόκειται για εφαρμογές που ενέχουν πολύ μεγάλο ενδιαφέρον για το μέλλον και στο πλαίσιο αυτό η όσο το δυνατόν ακριβής εξέταση τόσο πιο χρήσιμα αποτελέσματα στην ερευνά προς αυτή την κατεύθυνση.

Βιβλιογραφία

1. Dr. James Gover, 2010, A Tutorial on Hybrid Electric Vehicles: EV, HEV, PHEV and FCEV, Presentation.
2. ERPI, 2009, Advanced Batteries for Electric-Drive Vehicles A Technology and Cost-Effectiveness Assessment for Battery Electric Vehicles, Power Assist Hybrid Electric Vehicles, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles Technical Report, ERPI.
3. Μανιάς, 2001, Ηλεκτρονικά Ισχύος
4. Παπαθανασίου 2012, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
5. Robert Campbell, 2010, Battery characterization and optimization for use in plug-in hybrid electric vehicles hardware-in the- loop duty cycle testing.
6. MOBILE ENERGY RESOURCES IN GRIDS OF ELECTRICITY TASK 1.1, 1.2 & 1.5, DELIVERABLE D1.1
7. MOBILE ENERGY RESOURCES IN GRIDS OF ELECTRICITY TASK 1.6, DELIVERABLE D1.4
8. MOBILE ENERGY RESOURCES IN GRIDS OF ELECTRICITY, TASK 2.1, DELIVERABLE D2.1
9. H.J. Bergveld, 2001, Battery Management Systems Design by Modelling
10. John J.C. Kopera, 2004, Inside the Nickel Metal Hydride Battery, Technical Document
11. Jaycar Electronics, 2001, USING & CHARGING NI-CAD BATTERIES, Technical Document
12. C. E. (Sandy) Thomas, 2002, Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compare, PhD
13. Michael Kintner-Meyer, 2009, Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. Power Grids Part 1: Technical Analysis.
14. Tony Quiroga, 2009, "Driving the Future". Car and Driver (Hachette Filipacchi Media U.S., Inc.): pp. 52.

15. Ν. Σπεντζας, 2010, Ηλεκτροκίνητα Οχήματα στην Ελλάδα: Δυνατότητες και Προοπτικές
16. Νικόλαος Νικολακόπουλος, 2012, Ανασκόπηση τεχνολογίας σύνδεσης οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο (Vehicle to Grid - V2G).
17. Δημήτριος Γ. Ποταμιάς, 2010, Ανάπτυξη Δυναμικού Μοντέλου Μπαταριών Λιθίου για Εφαρμογές Ηλεκτροκίνησης.
18. Κατσαπρακάκης Γιώργος, 2011, Μοντελοποίηση και διαστασιολόγηση υβριδικού συστήματος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη νήσο Ντία.
19. Λάσκαρης Κωνσταντίνος, 2011, Σχεδιασμός και Κατασκευή Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών για Ηλεκτρικά Οχήματα.
20. Olivier Tremblay¹, Louis-A. Dessaint, 2012, Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications.
21. D. Szente-Varga, Gy. Horvath, M. Rencz, 2010, Creating temperature dependent Ni-MH battery models for low power mobile devices.
22. EU Report, 2010, Electric vehicle battery systems, Reference 2012.
23. Troy R. Hawkins, Guillaume Majeau Bettez, Ola Moa Gaussen, and Anders Hammer Strømman, 2010, Life Cycle Assessment of NiMH and Li-Ion Battery Electric Vehicles.
24. Life Cycle Assessment of NiMH and Li-Ion Battery Electric Vehicles.
25. Kwo Young, Caisheng Wang, Le Yi Wang, and Kai Strunz, 2010, Electric Vehicle Battery Technologies.
26. Nick Picciano, 2008, Battery Aging and Characterization of Nickel Metal Hydride and Lead Acid Batteries.
27. Advisor 2.0: A Second-Generation Advanced Vehicle Simulator for Systems Analysis, ERPI.
28. Βασιλάκης Αθανάσιος, 2013, Μελέτη της συμπεριφοράς των Εικονικών Σύγχρονων Μηχανών στη Στήριξη της Συχνότητας, Διπλωματική εργασία.

29. Βρεττός Ευάγγελος, 2010, Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών – Υδρογόνου,, Διπλωματική εργασία