

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**



**Διπλωματική Εργασία**  
**‘ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ’**

Τσάπρας Αθανάσιος

Εξεταστική Επιτροπή :    Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)  
   Μπάλας Κωνσταντίνος  
   Χατζάκης Ιωάννης

Χανιά, Ιούλιος 2003

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καλαϊτζάκη για την βοήθεια και συμπαράστασή του μέχρι το πέρας της εργασίας αυτής, καθώς και τους μεταπτυχιακούς και προπτυχιακούς συναδέλφους για τις συμβουλές και την βοήθειά τους.

Ιδιαίτερα δε θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χατζάκη, για την αμέριστη βοήθεια και συμβολή του στην διπλωματική αυτή, χωρίς την οποία δεν θα είχε έρθει εις πέρας.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Τα Συστήματα Διαχείρισης Συσσωρευτών (Battery Management System - BMS) χρησιμοποιούνται σε πολλά βιομηχανικά και εμπορικά συστήματα τα οποία λειτουργούν με συσσωρευτές για να κάνουν την λειτουργία τους περισσότερο αποδοτική και την εκτίμηση της κατάστασης τους μη καταστροφική.

Ένα γενικά αξιόπιστο σύστημα διαχείρισης συσσωρευτών προτείνεται από αυτή τη διπλωματική εργασία το οποίο είναι βασισμένο στην παρατήρηση της τάσης κάθε στοιχείου του συσσωρευτή (cell based BMS). Το βασικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου συστήματος σε σχέση με τα υπάρχοντα συστήματα είναι ότι παρέχει εξελιγμένη ικανότητα αντοχής σε σφάλματα (fault tolerance) και προστασία στην μπαταρία.

Το προτεινόμενο σύστημα στηρίζεται σε μια βασική έξυπνη υπομονάδα αποτελούμενη από τρεις μονάδες διαχείρισης συσσωρευτή (BMU) και μία μονάδα μικροεπεξεργαστή (μPU), οι οποίες παρέχουν εξίσωση, παρακολούθηση και προστασία σε μια συστοιχία συσσωρευτών μολύβδου-οξέος 36V που αποτελείται από τρεις συσσωρευτές (12V) των έξη στοιχείων.

## **Περιεχόμενα:**

### **Περιεχόμενα**

#### **Συντομεύσεις**

#### **Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή στην ‘Διαχείριση Συσσωρευτών’**

- 1.1 Εισαγωγή
- 1.2 Χρήσεις και εξέλιξη των συσσωρευτών
- 1.3 Συστήματα διαχείρισης συσσωρευτών
- 1.4 Σημερινό επίπεδο εξέλιξης
- 1.5 Καθορισμός του προβήματος

#### **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Συσσωρευτές και Μοντέλα Συσσωρευτών**

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Συσσωρευτές Μολύβδου – Οξέος
- 2.3 Συσσωρευτές αλκαλικού ηλεκτρολύτη
- 2.4 Μοντέλα συσσωρευτών

#### **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Εξίσωση Κατάστασης Φόρτισης Συσσωρευτών**

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Διακοπτικοί μετατροπείς για εξίσωση της φόρτισης
- 3.3 Διακοπτικοί μετατροπείς για εξίσωση της εκφόρτισης
  - 3.3.1 Λειτουργία κατά την εκφόρτιση
  - 3.3.2 Λειτουργία κατά την φόρτιση

#### **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Το BMS που Υλοποιήθηκε και Λειτουργία του**

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Το SBM που αναπτύχθηκε
  - 4.2.1 Η μονάδα του μP
  - 4.2.2 Ο αλγόριθμος του μικροεπεξεργαστή
  - 4.2.3 Η BMU
- 4.3 Τελική μορφή του συστήματος
- 4.4 Επεκτασιμότητα του συστήματος

#### **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Πειραματικά Αποτελέσματα**

- 5.1 Εισαγωγή
- 5.2 Φόρτιση – εκφόρτιση χωρίς τη χρήση εξίσωσης

### 5.3 Φόρτιση - εκφόρτιση με τη χρήση εξίσωσης

#### 5.3.1 Συμπεριφορά του BMS σε κανονικές συνθήκες

#### 5.3.2 Συμπεριφορά του BMS σε περίπτωση βλάβης

### 5.4 Συμπεράσματα

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα - Μελλοντική Επέκταση**

### 6.1 Γενικά

### 6.2 Μελλοντική εξέλιξη του συστήματος

### 6.3 Επίλογος

## ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

<b>BCVE</b>	Battery Cell Voltage Equalizer, Εξισωτής Τάσης Στοιχείων Συσσωρευτή
<b>BESS</b>	Battery Energy Storage System, Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας σε Συσσωρευτές
<b>BMS</b>	Battery Management System, Σύστημα Διαχείρισης Συσσωρευτή
<b>BMU</b>	Battery Module Unit, Μονάδα Διαχείρισης Συσσωρευτή
<b>EV</b>	Electric Vehicle, Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο
<b>PCL</b>	Premature Capacity Loss
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation, Διαμόρφωση Εύρους Παλμών
<b>SBM</b>	Smart Battery Module, Έξυπνη Υπομονάδα Συσσωρευτή
<b>SLA</b>	Sealed lead-acid
<b>SOC</b>	State Of Charge, Κατάσταση φόρτισης
<b>SPWM</b>	Sinusoidal Pulse Width Modulation, ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών
<b>UPS</b>	Uninterruptible Power Supply, τροφοδοτικό αδιάλειπτου λειτουργίας
<b>VRLA</b>	Valve Regulated Lead-Acid

## **Κεφάλαιο 1**

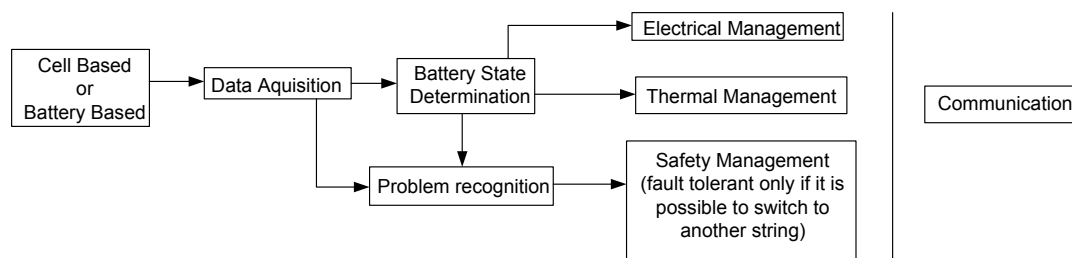
### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ**

#### **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

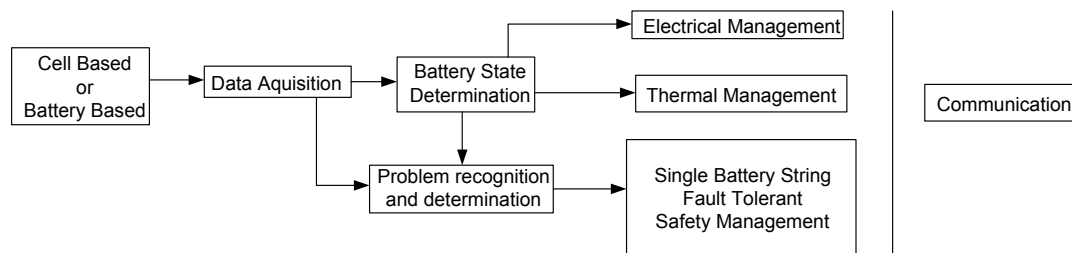
Τα τελευταία χρόνια χαρακτηρίζονται από την αύξηση της χρήσης των συσσωρευτών, κυρίως των δευτερογενών, αυτών δηλαδή που έχουν την ικανότητα να επαναφορτίζονται. Σε αυτό έχει συμβάλει κυρίως η εξέλιξη στην κατασκευή των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών, που έχει αποδώσει κλειστού τύπου επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές με ικανότητα ανασύνδεσης του οξυγόνου και του υδρογόνου, τα οποία παράγονται από την ηλεκτρόλυση του νερού, που είναι το κύριο συστατικό του ηλεκτρολύτη, κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Αυτοί οι νέοι στεγανοί τύποι συσσωρευτών μπορούν να λειτουργούν σε οποιαδήποτε θέση και να συνυπάρχουν μαζί με ανθρώπους σε κλειστούς χώρους. Σε αυτές τους τις ιδιότητες οφείλουν και την ευρεία διάδοσή τους. Το κύριο πρόβλημα που παρουσιάζουν αυτού του τύπου οι συσσωρευτές είναι η σύντομη καταστροφή τους από τις ακατάλληλες συνθήκες φόρτισης. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι κλασικές μέθοδοι φόρτισης πρέπει να αντικατασταθούν από μια διαφορετική προσέγγιση στη φόρτιση. Η προσέγγιση αυτή στηρίζεται στη μη-καταστροφική απόκτηση γνώσης της κατάστασης φόρτισης συσσωρευτών και την παράλληλη ρύθμιση των συνθηκών φόρτισης ώστε αυτές να είναι βέλτιστες και ονομάζεται **Διαχείριση Συσσωρευτών** (Battery Management).

Αν και μέχρι σήμερα έχουν παρουσιαστεί αρκετές προτάσεις για την υλοποίηση Διαχείρισης Συσσωρευτή, καμιά από αυτές δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν αιχμή της τεχνολογίας στον συγκεκριμένο τομέα (state-of-the-art), επειδή ακόμα δεν έχει αρχίσει να καθιερώνεται μια συγκεκριμένη τοπολογία, με αποτέλεσμα την πολυμορφία των συστημάτων διαχείρισης συσσωρευτή και την υπεροχή συγκεκριμένων συστημάτων σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Το πρόβλημα αυτό έχει γίνει προσπάθεια να αντιμετωπιστεί με τη συγκέντρωση των χαρακτηριστικών που υπάρχουν στα σημερινά συστήματα και τον εμπλουτισμό τους. Με τον τρόπο αυτό παράγεται τελικά ένα BMS που δεν υστερεί κάπου συγκρινόμενο με ένα σημερινό σύστημα αλλά αντίθετα υπερτερεί στην ασφάλεια και είναι ανθεκτικό απέναντι σε βλάβες που μπορούν να παρουσιαστούν στη συστοιχία των συσσωρευτών. Τα χαρακτηριστικά ενός state-of-the-art BMS φαίνονται στο Σχ. 1.1.



α) BMS σημερινής αιχμής της τεχνολογίας



β) Προτεινόμενη τεχνολογία για BMS

Σχ. 1.1. Χαρακτηριστικά ενός state-of-the-art BMS.

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας έχει αναπτυχθεί και προτείνεται μια μεθοδολογία για τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός νέου γενικευμένου Συστήματος Διαχείρισης Συσσωρευτών (Battery Management System, BMS). Το σύστημα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε χρήση συσσωρευτών, όπου οι συσσωρευτές επιτρέπουν πρόσβαση στις συνδέσεις των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται, χωρίς αυτό να αποτελεί περιορισμό, εφόσον η **προτεινόμενη γενικευμένη μέθοδος μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να αντιμετωπίζει τον κάθε συσσωρευτή σαν μια αδιαίρετη οντότητα με αποτέλεσμα να μπορεί να εφαρμοστεί και σε οποιαδήποτε άλλη συστοιχία συσσωρευτών.**

Τα κύρια χαρακτηριστικά του προτεινόμενου BMS είναι:

- Ομοιόμορφη φόρτιση των στοιχείων ώστε να μεγιστοποιείται η προσλαμβανόμενη από τον συσσωρευτή ενέργεια, χωρίς να μειώνεται ο χρόνος ζωής της.
- Ομοιόμορφη εκφόρτιση των στοιχείων ώστε να μεγιστοποιείται η αποδιδόμενη από τον συσσωρευτή ενέργεια και να αποφεύγεται η καταστροφή των στοιχείων από αντίστροφη πόλωση, όπως και το φαινόμενο σχηματισμού δένδριτη στην περίπτωση στοιχείων με αλκαλικό ηλεκτρολύτη.
- Προστασία σε περίπτωση διάγνωσης σφάλματος.

- Αντοχή σε προβλήματα του συσσωρευτή, με απομόνωση του τμήματος που παρουσίασε το πρόβλημα και διατήρηση της τάσης στο συγκεκριμένο τμήμα, με ενέργεια που παρέχεται από το τμήμα που έχει μείνει σε λειτουργία.

Το BMS αποτελείται από μια βασική "έξυπνη" μονάδα συσσωρευτή (Smart Battery Module, SBM), που έχει τη δυνατότητα χειρισμού ενός συσσωρευτή με ονομαστική τάση 12V και μπορεί να επαναληφθεί τόσες φορές όσες απαιτεί η εφαρμογή. Μια κύρια μονάδα, ή ένας υπολογιστής, αναλαμβάνει τον συγχρονισμό της επικοινωνίας των SBM και ταυτόχρονα αποτελεί τον σύνδεσμο με τον υπόλοιπο κόσμο.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως υπόβαθρο την μελέτη των τροφοδοτικών αδιάλειπτης λειτουργίας (Uninterruptible Power Supplies), των οποίων τμήμα μπορεί να αποτελεί το BMS και γι' αυτό έχει συμβάλει και στη βελτίωση των μεθόδων υλοποίησης, καθώς και στο προηγούμενο BMS που μελετήθηκε και κατασκευάστηκε [1].

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία περιλαμβάνει την ανάπτυξη και υλοποίηση ενός μοντέλου BMS, το οποίο είναι ένα SBM αποτελούμενο από τρεις BMUs και μία μPU, οι οποίες διαχειρίζονται ένα string τριών συσσωρευτών συνδεδεμένων σε σειρά, με δυνατότητες επέκτασης σε μεγαλύτερα συστήματα, καθώς και τρόπους εξάλειψης των προβλημάτων που θα μπορούσε να παρουσιάσει.

Η υλοποίηση του προηγούμενου SBM από το προτεινόμενο BMS και η ορθή λειτουργία του έδωσε το έναυσμα για την δημιουργία μεγαλύτερου συστήματος, με μεγαλύτερες δυνατότητες και αντοχή σε σφάλματα. Η σύνδεση του εξελεγμένου BMS με ένα υπολογιστή επιβεβαίωσε την ορθή λειτουργία του και τις δυνατότητες της τελικά προτεινόμενης μεθοδολογίας και επέτρεψε να προκύψουν πολλά χρήσιμα συμπεράσματα για τη σχέση ακρίβειας πρόβλεψης – κόστους – ισχύος, σε ένα πραγματικό σύστημα.

Αναλυτικότερα σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η οριοθέτηση του προβλήματος και η περιγραφή των κυριότερων λύσεων που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η λειτουργία των κυριότερων τύπων συσσωρευτών και περιγράφονται οι μέθοδοι μοντελοποίησής τους. Το Κεφάλαιο 3 πραγματεύεται τη διαδικασία, τις δυνατότητες της εξίσωσης της κατάστασης φόρτισης στους συσσωρευτές και ασχολείται με τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς που μπορεί να χρησιμοποιηθούν ή να συνεργαστούν με ένα BMS. Σε αυτό το κεφάλαιο περιέχονται οι δύο μεθοδολογίες για υλοποίηση αντιστροφών και μια μεθοδολογία προστασίας [1]. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ο τρόπος που υλοποιήθηκε το παρόν BMS και γίνεται περιγραφή της λειτουργίας του. Τα πειραματικά αποτελέσματα



παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5. Τελικά, τα συμπεράσματα και η προτεινόμενη παραπέρα έρευνα περιέχονται στο Κεφάλαιο 6.

## **1.2 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ**

Στο ξεκίνημα του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου υπήρχαν διαθέσιμοι μονάχα μερικοί τύποι συσσωρευτών, κυρίως οι πρωτογενείς συσσωρευτές ψευδαργύρου-άνθρακα (Leclanché zinc-carbon) καθώς και οι μολύβδου-οξέως (Lead-Acid) και οι νικελίου-σιδήρου (Edison nickel-iron) δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενοι) συσσωρευτές [2]. Οι χρήσεις τους περιοριζόταν κυρίως στα αυτοκίνητα, τη σήμανση και το φορητό ραδιόφωνο.

Σήμερα υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία στις χρήσεις των συσσωρευτών. Σχεδόν σε κάθε χρήση του ηλεκτρισμού υπάρχει χώρος και για ένα συσσωρευτή. Το φάσμα των χρήσεων των συσσωρευτών καλύπτει εφαρμογές που ξεκινούν από τις φορητές μικροσυσκευές και φτάνει μέχρι τη χρήση των συσσωρευτών στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο, εφαρμογή για την οποία τα τελευταία χρόνια έχει ανανεωθεί το ενδιαφέρον. Σε πολλές από αυτές τις εφαρμογές ο συσσωρευτής είναι το μέρος εκείνο που προσδιορίζει την απόδοση, το μέγεθος καθώς και το βάρος. Για αυτό το λόγο υπάρχει μια ασταμάτητη ανάγκη για ολοένα και καλύτερους συσσωρευτές.

Η βιομηχανία συσσωρευτών με τη σειρά της έχει ανταποκριθεί σε αυτή την ανάγκη έχοντας διαρκώς ανοιχτά προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης (R&D). Το αποτέλεσμα είναι η σημαντική αύξηση της απόδοσης των περισσότερων τύπων συνηθισμένων συσσωρευτών, καθώς και η δημιουργία νέων τύπων που χρησιμοποιούν περισσότερο δραστήρια ενεργειακά υλικά. Έτσι, για παράδειγμα η χωρητικότητα των αλκαλικών στοιχείων ψευδαργύρου (zinc-alkaline) έχει αυξηθεί περισσότερο από 40%, ενώ παράλληλα έχει περιοριστεί ο υδράργυρος που περιέχεται στο στοιχείο, με σκοπό να ικανοποιηθούν οι περιβαλλοντολογικές προδιαγραφές που έχουν επιβληθεί.

Στους δευτερογενείς συσσωρευτές, η εξέλιξη περιλαμβάνει την εμφάνιση των στοιχείων νικελίου-υδριδίου του μετάλλου (nickel-metal hydride) με χωρητικότητα περισσότερο από 40% μεγαλύτερη από τα ήδη υπάρχοντα, η βελτίωση των οποίων εξακολουθεί να εξελίσσεται.

Η χρήση του λιθίου ως υλικό κατασκευής της ανόδου τόσο των πρωτογενών όσο και των δευτερογενών συσσωρευτών τους δίνει τα πλεονεκτήματα της υψηλότερης τάσης και των καλύτερων ενεργειακών χαρακτηριστικών αυτού του μετάλλου. Η ανάγκη ικανοποίησης των πολύ πιεστικών απαιτήσεων που

παρουσιάζει το ηλεκτρικό αυτοκίνητο επιτάχυνε την εξέλιξη ενός μεγάλου φάσματος συσσωρευτών, που περιλαμβάνει τους συνηθισμένους υγρού τύπου, όπως και μια ποικιλία τεχνολογιών που χρησιμοποιούν λίθιο και άλλα ενεργητικά υλικά σε συσσωρευτές που δουλεύουν στη συνηθισμένη θερμοκρασία δωματίου ή λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία.

Εκτός από τις φορητές συσκευές και το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, άλλες χρήσεις στις οποίες οι συσσωρευτές αποτελούν πρωτεύουσα επιλογή για την αποθήκευση της ενέργειας είναι τα φορητά ηλεκτρικά εργαλεία, τα Τροφοδοτικά Αδιάλειπτου Λειτουργίας (Uninterruptible Power Supplies, UPS's) και οι αυτόνομοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

### **1.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ (BMS)**

Το κόστος του συσσωρευτή αποτελεί σε πολλές περιπτώσεις ένα σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους ενός συστήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί σήμερα απαιτείται αρκετά προσεγμένη κατασκευή και επειδή ο συσσωρευτής χρησιμοποιεί εξειδικευμένα υλικά που είναι συνήθως δυσεύρετα και συνεπώς υψηλού κόστους. Στα μεγάλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε συσσωρευτές (Battery Energy Storage System, BESS) πραγματοποιούνται τεχνοοικονομικές μελέτες πριν την υλοποίησή τους. Αυτές ασχολούνται με την εύρεση της βέλτιστης χωρητικότητας των συσσωρευτών [3], αλλά και με το όφελος [4] που θα αποδοθεί από τη συνολική λειτουργία του συστήματος. Οι μελέτες αυτές καθώς και οι φυσικοί περιορισμοί [5] καθορίζουν αν τελικά κρίνεται επικερδής η υλοποίηση και ποια θα είναι η τελική συνολική χωρητικότητα. Αν τα συστήματα αυτά αποτελούν μέρος σταθμού ή υποσταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να λάβουν υπόψη και την τυποποίηση IEEE 485.

Σε κάθε συσκευή που χρησιμοποιεί συσσωρευτή, ένας από τους μεγαλύτερους παράγοντες κόστους είναι η συντήρηση και η αντικατάσταση του συσσωρευτή. Είναι λοιπόν φανερό ότι υπάρχει ανάγκη για μεγιστοποίηση της ζωής του συσσωρευτή.

Το κυριότερο πρόβλημα που εμφανίζουν οι καταπονημένοι συσσωρευτές είναι ότι κάνουν αισθητή τη φθορά τους ακριβώς τη στιγμή που υπάρχει η ανάγκη της χρήσης τους [6]. Έτσι για την αποφυγή απρόοπτων καταστάσεων, οι συσσωρευτές πρέπει να ελέγχονται περιοδικά. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για να γίνει αυτό είναι να μελετηθεί η καμπύλη εκφόρτισης του συσσωρευτή μέχρι τη βαθιά της εκφόρτιση [7]. Παρόλο που η μέθοδος αυτή προτείνεται ως η πιο αξιόπιστη και έχουν γίνει

προσπάθειες [8] για να έχει και καλή ακρίβεια, παρουσιάζει σημαντικά ελαττώματα. Οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης είναι όμως περιορισμένοι και μια βαθιά εκφόρτιση μπορεί να μειώσει δραστικά τη ζωή ενός συσσωρευτή. Αυτός ο λόγος καθώς και το ότι ο συγκεκριμένος τρόπος ελέγχου του συσσωρευτή παρουσιάζει πολλά πρακτικά προβλήματα (π.χ. χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό και κατά τη διάρκεια των τουλάχιστον πέντε ωρών που διαρκεί ο έλεγχος ο συσσωρευτής δεν είναι διαθέσιμος), οδήγησαν την έρευνα στην εύρεση νέων μεθόδων εκτίμησης των παραμέτρων του συσσωρευτή.

Η αρχική ιδέα ήταν ότι η εκτίμηση των παραμέτρων μπορεί να γίνει όχι καταστροφικά, αλλά μετά από παρακολούθηση της συμπεριφοράς του συσσωρευτή κατά τη φόρτιση και την εκφόρτισή του. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μέτρησης των αμπερωρίων που προλάμβανε και απέδιδε ο συσσωρευτής για την εκτίμηση της αποθηκευμένης ενέργειας. Η μέθοδος αυτή είχε πολλά μειονεκτήματα. Τα σφάλματα που παρουσιαζόταν οφείλονταν κυρίως στη μείωση της χωρητικότητας του συσσωρευτή λόγω γήρανσης, όπως και στη μη πρόσληψη φορτίου κατά την υπερφόρτιση.

Το 1992 δημοσιεύεται η εργασία των Aylor et al. [9] που προσπαθεί να ξεπεράσει τα υπάρχοντα προβλήματα κάνοντας προσαρμογή τόσο των αμπερωρίων που έχει προσλάβει ο συσσωρευτής, όσο και της συνολικής εναπομένουσας χωρητικότητας από την τάση ηρεμίας του συσσωρευτή.

Κατά τα επόμενα χρόνια, η μείωση της τιμής των εξαρτημάτων και το μεγάλο εύρος του πεδίου εφαρμογής της μεθόδου αυτής δημιουργεί συστήματα πλήρως αυτοματοποιημένα [10] και με πολύ περισσότερες δυνατότητες. Η σχετικά μεγάλη εξάρτηση της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του συσσωρευτή από τη θερμοκρασία και την πυκνότητα του ηλεκτρολύτη δημιουργεί σφάλματα που καθιστούν τη μέθοδο αναξιόπιστη κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η ανάγκη για πιο αξιόπιστη και γρήγορη πρόβλεψη της κατάστασης του συσσωρευτή οδηγεί στην παρακολούθηση (monitoring) της εσωτερικής της αντίστασης [11]. Η μέθοδος αυτή μετρά την εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά επίπεδα ρεύματος και ενσωματώνεται στα UPS της εταιρίας κατασκευής UPS "Square D" μαζί με ένα καλό σύστημα παρακολούθησης συσσωρευτή [12]. Η συσχέτιση της αύξησης της εσωτερικής αντίστασης των συσσωρευτών με οποιαδήποτε βλάβη (θραύση του περιβλήματος, χαμηλή πυκνότητα ηλεκτρολύτη, υπερβολική θέρμανση, υψηλό ρυθμό κύκλων φόρτισης εκφόρτισης, ξήρανση του ηλεκτρολύτη, θείωση των πλακών, διόγκωση της θετικής πλάκας λόγω γήρανσης, διάβρωση των πλακών, αποσάθρωση των πλακών, χαλάρωση ένωσης ή διασύνδεσης, υπερβολική γήρανση, υπερβολική απόδοση θερμότητας, υπερβολικά κυμαινόμενο ρεύμα) [13] οδήγησε και άλλες

εταιρίες κατασκευής UPS όπως την «BTECH» στον προσδιορισμό της κατάστασης του συσσωρευτή από τη παρατήρηση της εσωτερικής του αντίστασης. Για τη μέτρηση της εσωτερικής αντίστασης με ακρίβεια και χωρίς την αναγκαστική τοποθέτηση φορτίου, έχει προταθεί από τον Markle το 1992 [14] η χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας ( $<100$  Hz).

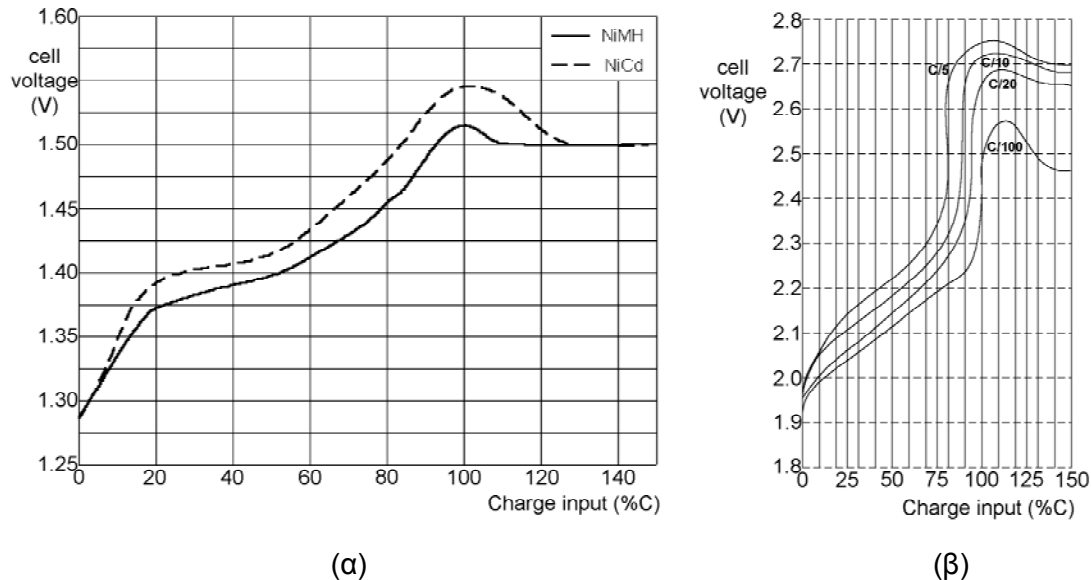
Όμως παρά την ύπαρξη εκτεταμένων μελετών [15] για τη πρόβλεψη του ποσοστού φόρτισης και της βλάβης στους συσσωρευτές, η χρήσιμη ζωή του συσσωρευτή δεν αυξάνεται ιδιαίτερα, γιατί αυτή εξαρτάται κυρίως από τις συνθήκες της φόρτισης [16]. Οι δοκιμές που γίνονται σε συσσωρευτές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η παρατεταμένη τάση συντήρησης (τελευταίο στάδιο της φόρτισης) [17] επιδρά αρνητικά στο χρόνο ζωής του συσσωρευτή. Τα πειραματικά δεδομένα [18] δείχνουν ότι οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέως καταστρέφονται από την παρατεταμένη συντήρηση με δύο κυρίως μηχανισμούς: οξείδωση του πλέγματος της θετικής πλάκας και στέγνωμα του ηλεκτρολύτη.

Το πρόβλημα του καθοριστικού ελέγχου των χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν μέσα σε ένα συσσωρευτή είναι φανερό ότι χρειάζεται μια διαφορετική αντιμετώπιση για να έχει πολύπλευρα αποτελεσματική λύση. Η αντιμετώπιση αυτή είναι η **Διαχείριση Συσσωρευτή** (Battery Management) [19]. Το **Σύστημα Διαχείρισης Συσσωρευτή** (Battery Management System, BMS) είναι ένα σύστημα προσαρμοσμένο στο συσσωρευτή, που δεν στηρίζεται στην άμεση μέτρηση των παραμέτρων της κατάστασης του συσσωρευτή. Το BMS χρησιμοποιεί τη βοήθεια ενός συστήματος μετρήσεων μεγάλης ακριβείας και παρακολουθεί συνεχώς τον συσσωρευτή, παρατηρώντας τις αλλαγές και τα λάθη που συμβαίνουν στο σύστημα του συσσωρευτή. Η δουλειά του είναι όχι μόνο να ειδοποιήσει έγκαιρα για τυχόν προβλήματα και να λάβει μέτρα για τη διόρθωσή τους, αλλά να λαμβάνει και μέτρα ώστε να αυξηθεί η ενέργεια που μπορεί να αποδώσει ο συσσωρευτής και να αυξάνει τη διάρκεια ζωής του συσσωρευτή και επιπλέον τα διαστήματα συντήρησης της εγκατάστασης.

#### **1.4 ΣΗΜΕΡΙΝΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΞΕΛΙΞΗΣ**

Η ανάγκη για διαχείριση συσσωρευτή υπάρχει σε κάθε περίπτωση χρήσης δευτερογενούς συσσωρευτή. Σε πολλές περιπτώσεις, το όφελος είναι σημαντικό ακόμα και όταν το κόστος του BMS είναι συγκρίσιμο με το κόστος του συσσωρευτή. Έτσι τα τελευταία χρόνια εμφανίστηκε μια πληθώρα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, που παρέχουν λύσεις για διαχείριση συσσωρευτή [20] και μπορούν εύκολα να

συμπεριληφθούν στη σχεδίαση κάθε φορητής συσκευής μικρής ισχύος. Πολλά από αυτά έχουν την ικανότητα να αναγνωρίσουν τη μικρή πτώση τάσης που παρουσιάζει συνήθως η καμπύλη φόρτισης, όταν ξεκινά η υπερφόρτιση (Σχ. 1.2) και σταματούν τη φόρτιση σχεδόν ακριβώς στο 100% [21].



Σχ. 1.2. Χαρακτηριστικές καμπύλες φόρτισης στοιχείων  
(α) με αλκαλικό ηλεκτρολύτη (β) μολύβδου-οξέος

Ταυτόχρονα με την παρακολούθηση της καμπύλης φόρτισης αυτά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα παρακολουθούν και την αύξηση της θερμοκρασίας των συσσωρευτών καθώς φορτίζονται [22]. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο ό,τι η απόδοση της φόρτισης μειώνεται καθώς ο συσσωρευτής φορτίζεται, συνεπώς αυτά τα ολοκληρωμένα κυκλώματα μπορούν να προστατέψουν τον συσσωρευτή από υπερφόρτιση.

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι φορητές συσκευές στη διαχείριση του συσσωρευτή τους είναι ότι, όταν ο συσσωρευτής πρέπει να φορτιστεί μακριά από τη συσκευή, η πληροφορία της κατάστασης του συσσωρευτή χάνεται κατά τη μετακίνηση. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έχουν κάνει την εμφάνισή τους ολοκληρωμένα κυκλώματα που μπορούν να τοποθετηθούν μέσα στο συσσωρευτή και να παρέχουν με σειριακή επικοινωνία πληροφορίες για το συσσωρευτή στη συσκευή [23].

Τα τελευταία χρόνια έχουν κάνει την εμφάνισή τους κάποια ολοκληρωμένα κυκλώματα που μπορούν να συνδυαστούν με τα προαναφερθέντα και τα οποία πραγματοποιούν τη φόρτιση με την περιοδική εναλλαγή παλμών φόρτισης, διαστημάτων ξεκούρασης και παλμών εκφόρτισης [24]. Αυτή η μέθοδος φόρτισης μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπου απαιτείται γρήγορη φόρτιση

συσσωρευτών με αλκαλικό ηλεκτρολύτη (Ni-Cd, Ni-MH) [25], καθώς και στην περίπτωση «αναζωογόνησης» συσσωρευτών μολύβδου-οξέος για να αποφεύγεται το φαινόμενο θείωσης [26], με αμφίβολα πάντως αποτελέσματα.

Το πρόβλημα της διαχείρισης συσσωρευτή στις φορητές συσκευές, οι οποίες χρησιμοποιούν συσσωρευτές αλκαλικού ηλεκτρολύτη (Ni-Cd, Ni-MH), συσσωρευτές λιθίου και συσσωρευτές μολύβδου, είναι φανερό ότι έχει βρει ικανοποιητική λύση τόσο σε εμπορικές όσο και σε ορισμένες στρατιωτικές εφαρμογές [27]. Οι εφαρμογές αυτές χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος συσσωρευτή, την απουσία συντήρησης και την εύκολη αντικατάσταση του συσσωρευτή. Έτσι, η επιμήκυνση της ζωής του συσσωρευτή με χαμηλό κόστος είναι ευπρόσδεκτη, ακόμα και αν αυτή δεν μεγιστοποιείται από σφάλματα και ατέλειες που παρουσιάζει το σύστημα διαχείρισης συσσωρευτή. Πέραν όμως από τις φορητές συσκευές, υπάρχουν απαιτητικές ανάγκες για διαχείριση συσσωρευτή που ξεκινούν από τα μεγάλα UPS και καλύπτουν το φάσμα από τις ερευνητικές εφαρμογές της πλήρως τεχνητής καρδιάς [28] μέχρι αυτής του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Η ανάγκη για διαχείριση συσσωρευτή υπάρχει ακόμα και σε πολλές διαστημικές εφαρμογές, όπου ήδη εφαρμόζονται μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης για τη σωστή διαχείριση του συσσωρευτή [29], καθώς και άλλες εξειδικευμένες τεχνικές, οι οποίες, λόγω του κόστους υλοποίησης και της ασυμβατότητάς τους με τις συνηθισμένες εφαρμογές, δεν προβλέπεται να διαδοθούν σύντομα και στα υπόλοιπα BMS.

Στις απαιτητικές εφαρμογές υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη αξιοπιστία από το BMS, ενώ πολλές φορές παρατηρείται και η ανάγκη για επεκτασιμότητα. Οι απαιτήσεις δεν είναι τόσο γενικές όπως συμβαίνει με τις φορητές συσκευές και έτσι είναι δύσκολο να καλυφθούν από μια οικογένεια ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Πολλές εταιρίες έχουν αρχίσει να παράγουν προγραμματιζόμενα ολοκληρωμένα κυκλώματα χαμηλής κατανάλωσης [30] με σκοπό να χρησιμοποιηθούν σε τέτοια BMS. Παρόλα αυτά, οι μέχρι σήμερα υλοποιήσεις BMS σε απαιτητικές εφαρμογές είναι όλες αρκετά διαφορετικές μεταξύ τους, με μόνο ίσως κοινό σημείο τη χρήση ενός ή περισσοτέρων μικροελεγκτών.

Το 1991 παρουσιάζονται από τον Noworolski [31-32] δύο παρόμοιες εργασίες που περιγράφουν δύο συστήματα που προσπαθούν να αναγνωρίσουν και να προβλέψουν σφάλματα σε συστοιχίες συσσωρευτών και προορίζονται για χρήση σε σταθμούς τηλεπικοινωνιών. Το πρώτο σύστημα [31] σύστημα στηρίζεται σε υπομονάδες με δυνατότητα μέτρησης της τάσης 16 στοιχείων, που μπορούν να συνδέονται σε σειρά σε ένα δίκτυο 6 αγωγών με οπτική απομόνωση. Ο αριθμός των υπομονάδων καθορίζεται από τον συνολικό αριθμό των στοιχείων που πρέπει να

παρακολουθούνται. Το σύστημα συνδέεται με έναν υπολογιστή μέσω εσωτερικής κάρτας του.

Το δεύτερο σύστημα [33] είναι και αυτό παρόμοιο με το προηγούμενο, αλλά η κάθε υπομονάδα του μπορεί να παρακολουθήσει έως 12 στοιχεία και μπορεί να υπολογίσει και την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών. Αν και τα δύο αυτά συστήματα δεν πληρούν τις προϋποθέσεις για να ονομαστούν BMS, γιατί δεν ελέγχουν τη φόρτιση, αλλά είναι απλά συστήματα παρακολούθησης των συσσωρευτών, η δομή τους μπορεί να θεωρηθεί πρόδρομος της δομής που έχουν πολλά BMS που θα ακολουθήσουν.

Το 1995 η εταιρία BEST ανακοινώνει μια νέα μέθοδο διαχείρισης συσσωρευτή που εφαρμόζει στα UPS της [33]. Σύμφωνα με αυτή ο φορτιστής λειτουργεί σε τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις:

- α) **Κατάσταση διατήρησης**, στην οποία περνά ο συσσωρευτής μετά από μια πλήρη φόρτιση. Το ρεύμα του συσσωρευτή είναι μηδέν.
- β) **Κατάσταση σταθερής ισχύος**, κατά την οποία ο συσσωρευτής φορτίζεται με σταθερή ισχύ και ο χρόνος που χρειάζεται για να ανυψωθεί η τάση της χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης και χωρητικότητας. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας σταματά μόλις η τάση του συσσωρευτή φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή.
- γ) **Κατάσταση σταθερής τάσης**, η οποία ακολουθεί της προηγούμενης κατάστασης και χρησιμοποιείται για σταθερό χρόνο μέχρι την πλήρη φόρτιση του συσσωρευτή.
- δ) **Περιοδική Κατάσταση**, η οποία είναι περιοδική ή έκτακτη κατάσταση λειτουργίας που χρησιμοποιείται για την εξίσωση της φόρτισης των στοιχείων και την παραγωγή διαγνώσεων.

Με τη χρήση αυτού του τρόπου φόρτισης γίνεται προσπάθεια να αποφευχθεί η μόνιμη υπερφόρτιση του συσσωρευτή από τη μόνιμη επιβολή τάσης συντήρησης. Ο συσσωρευτής μετά από μια πλήρη φόρτιση «ξεκουράζεται» και αν δεν χρησιμοποιηθεί συντηρείται σε τακτικά και σύντομα χρονικά διαστήματα. Με τη μέθοδο αυτή δεν υπάρχει περίπτωση να παρουσιαστεί πρόβλημα από την αυτοεκφόρτιση της, ενώ ταυτόχρονα περιορίζεται και η υπερφόρτισή της.

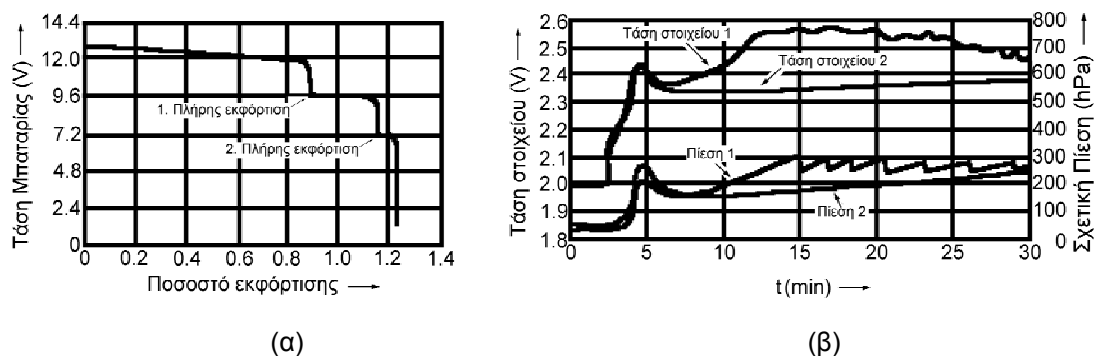
Την ίδια χρονιά και η εταιρία «Delttec» ανακοινώνει μια παρόμοια μέθοδο φόρτισης συσσωρευτών [34], την οποία ονομάζει ABM (Advanced Battery Management) και με την οποία η φόρτιση γίνεται μόνο σε τρία στάδια:

- α) **φόρτιση με σταθερό ρεύμα**, που διαρκεί μόνο τρεις ώρες και φορτίζει σχεδόν πλήρως το συσσωρευτή.
- β) **Φόρτιση με σταθερή τάση**, που επιβάλλεται μετά το προηγούμενο στάδιο και αντιστοιχεί σε τάση 2,3V ανά στοιχείο και διαρκεί περίπου 48 ώρες.

### γ) Διακοπή του φορτιστή.

Αν και η καινοτομία αυτής της μεθόδου βρίσκεται και εδώ στη διακοπή της φόρτισης μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα την περιορισμένη υπερφόρτωση του συσσωρευτή, η μέθοδος αυτή δεν έχει κάποιο πλεονέκτημα συγκρινόμενη με αυτή της BEST.

Το 1996, παρουσιάζεται από τους Fischer, Lohner και Mauracher [35] ένα από τα πιο αντιπροσωπευτικά δείγματα BMS για UPS. Είναι σχεδιασμένο για να χρησιμοποιηθεί με συσσωρευτές τύπου VRLA (Valve Regulated Lead-Acid). Πρόκειται για ένα σύστημα που βασίζεται σε υπομονάδες με δυνατότητα μέτρησης της τάσης μέχρι και οκτώ συσσωρευτών των 12V. Οι υπομονάδες μπορούν να συνδεθούν σε ένα σειριακό δίκτυο επικοινωνίας με τη βοήθεια οπτικών ινών και, διαβιβάζοντας τα δεδομένα διαδοχικά ή μία στην άλλη, επικοινωνούν με την κεντρική υπομονάδα. Ο αριθμός των υπομονάδων που χρησιμοποιούνται είναι ανάλογος του αριθμού των συσσωρευτών που πρέπει να εξυπηρετηθούν. Αξιοσημείωτη σε αυτή την εργασία είναι η αντιμετώπιση του συσσωρευτή σαν ένα σύνολο στοιχείων σε σειρά, τόσο στη φόρτιση, όσο και στην εκφόρτιση. Οι χαρακτηριστική καμπύλη της τάσης εκφόρτισης του συσσωρευτή και οι χαρακτηριστικές καμπύλες της τάσης και της πίεσης του περισσότερο και του λιγότερο φορτισμένου στοιχείου κατά τη φόρτιση φαίνονται στο Σχ. 1.3, όπως περιέχονται σε αυτή την εργασία.



Σχ. 1.3. (α) χαρακτηριστική καμπύλη της τάσης εκφόρτισης του συσσωρευτή  
(β) χαρακτηριστικές καμπύλες της τάσης και της πίεσης του περισσότερο  
και του λιγότερο φορτισμένου στοιχείου κατά τη φόρτιση.

Κατά τη φάση της εκφόρτισης [Σχ. 1.3(α)], η εκφόρτιση πρέπει να σταματήσει με την εκφόρτιση του πρώτου στοιχείου, γιατί σε άλλη περίπτωση αυτό θα αρχίσει να πολώνεται ανάστροφα με αποτέλεσμα τη σύντομη καταστροφή του. Στη φάση της φόρτισης [Σχ. 1.3(β)], μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στο στοιχείο που φορτίζεται πρώτο αρχίζει η ηλεκτρόλυση του νερού του ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης. Η πριονωτή καμπύλη της πίεσης αυτού του στοιχείου οφείλεται στα ανοίγματα της βαλβίδας διαφυγής.



Η ίδια ομάδα ερευνητών εφαρμόζει την ίδια χρονιά μια παρόμοια μέθοδο BMS στον ίδιο τύπο συσσωρευτών σ' ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο [36]. Η ιδιαιτερότητα αυτού του BMS είναι η δυνατότητά του να επαναφέρει μέρος από την πρόωρα χαμένη χωρητικότητα (Premature Capacity Loss, PCL), ένα φαινόμενο από το οποίο υποφέρουν οι συσσωρευτές αυτού του τύπου επειδή έχει γίνει αντικατάσταση του αντιμονίου που περιέχεται στις πλάκες με ασβέστιο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας ειδικής διαδικασίας που περιλαμβάνει μια εκφόρτιση με χαμηλό ρεύμα και στη συνέχεια μια φόρτιση με μεγάλο αρχικό ρεύμα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται κάθε 30 – 60 κύκλους και σύμφωνα με τους συγγραφείς η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί έως και 10% μετά από αυτή τη διαδικασία.

Την ίδια χρονική περίοδο παρουσιάζονται τρεις εργασίες από την Ιαπωνία [37-39] που προτείνουν BMS που βασίζονται σε παρακολούθηση των στοιχείων (cell based monitoring). Αν και αυτή είναι η φυσικά καλύτερη θεώρηση του θέματος, είναι αμφίβολα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει σε σχέση με τη μέθοδο που στηρίζεται σε παρακολούθηση ενός ολόκληρου συσσωρευτή. Η εκτίμηση αυτή δικαιολογείται από την κοντινή απόσταση που παρουσιάζουν τα σημεία διακοπής της εκφόρτισης στις δύο μεθόδους.

Ταυτόχρονα κάνει την εμφάνισή της και μια γαλλική πρόταση για την εφαρμογή BMS σε VRLA για χρήση σε ηλεκτρικό αυτοκίνητο [40]. Η ουσιαστική διαφορά αυτής της εργασίας είναι η πρόταση της εφαρμογής ταχείας φόρτισης σε αυτούς τους συσσωρευτές. Πάνω από το 50% της συνολικής χωρητικότητας μπορεί να πληρωθεί σε χρόνο 20 λεπτών με τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Είναι βέβαιο ότι η μελέτη αυτή είναι χρήσιμη σε ανάγκη γρήγορης φόρτισης, όπως είναι βέβαιο και το ότι η χρήση της σε κανονικές θερμοκρασίες μειώνει σημαντικά τη ζωή του συσσωρευτή.

Το BMS που προτείνει ο Retzlaff [41], το οποίο ονομάζει BADICHEQ, είναι και αυτό βασισμένο στην παρακολούθηση ανά συσσωρευτή. Η ιδιαιτερότητά του βρίσκεται στην ικανότητα να παρέχει επιπλέον ρεύμα στους συσσωρευτές που δεν μπορούν να φτάσουν τη τάση κατωφλίου φόρτισης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνει εξίσωση φόρτισης όλων των συσσωρευτών με αποτέλεσμα την αποφυγή της υπερφόρτισης και την παραπέρα καταστροφή των ασθενέστερων στοιχείων των συσσωρευτών.

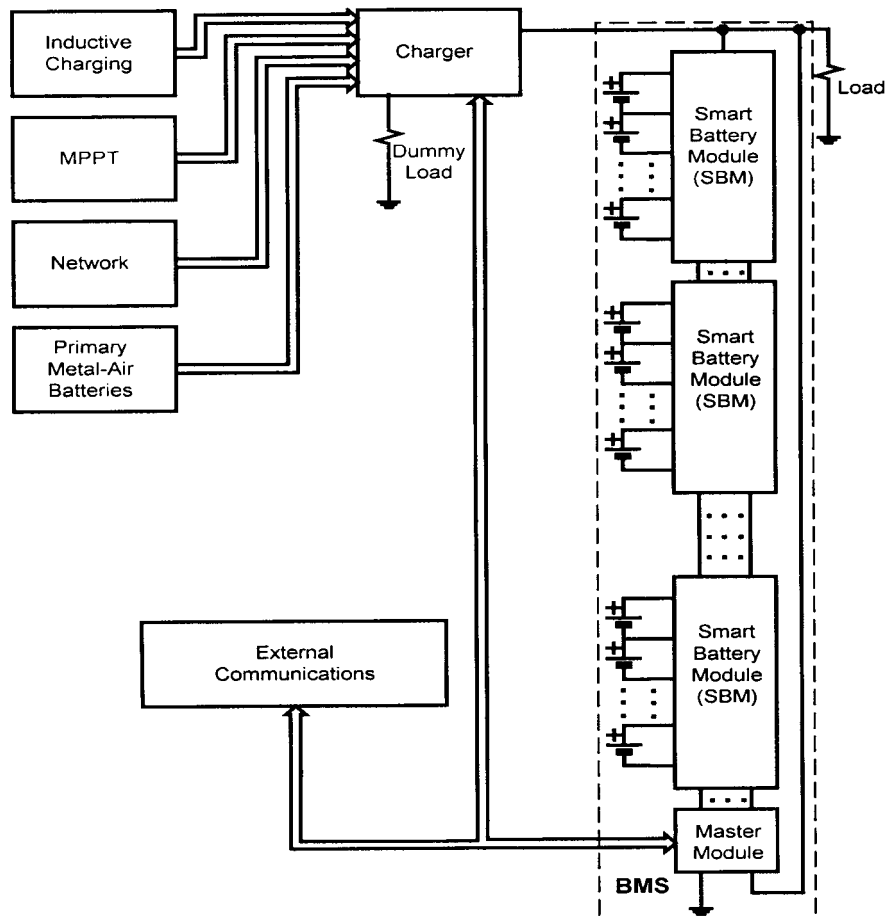
Ένα ιδιόμορφο BMS παρουσιάζεται το 1996 από τους McAndrews και Jones [42]. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει όχι μία, αλλά δύο συστοιχίες συσσωρευτών. Αυτή η ιδιομορφία του δίνει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί το φορτίο από τη μία συστοιχία ενώ εκφορτίζει και ελέγχει την άλλη. Αν και έχει και άλλα πλεονεκτήματα, η συγκεκριμένη τοπολογία παρουσιάζει το προφανές σημαντικό μειονέκτημα της χρησιμοποίησης διπλάσιου αριθμού συσσωρευτών. Μια διαφορετική πρόταση που

περιέχεται στην εργασία αυτή για τη φάση συντήρησης στη φόρτιση, είναι αυτή να γίνεται με σταθερό ρεύμα και όχι με σταθερή τάση. Η πρόταση αυτή επιβεβαιώνεται ως ευεργετική στη ζωή του συσσωρευτή [43].

Το BMS που παρουσιάζεται από τον Αυστραλό Bell προορίζεται για να χρησιμοποιηθεί σε ένα ηλιακό αυτοκίνητο [44]. Στηρίζεται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα DS2437 που προορίζονται για παρακολούθηση συσσωρευτών και τα συνδέει με οπτική απόζευξη σε ένα δίκτυο ώστε να έχουν την ικανότητα να παρακολουθήσουν μια συστοιχία συσσωρευτών με τάση 100 – 150V. Ένας μικροεπεξεργαστής συμπληρώνει το σύστημα. Το συγκεκριμένο BMS χαρακτηρίζεται από πολύ χαμηλό κόστος, βάρος και κατανάλωση. Το αυτοκίνητο τερματίζει πρώτο στην κατηγορία του στον αντίστοιχο αγώνα που γίνεται στο Darwin της Αδελαΐδας. Φυσικά ένας αγώνας δεν είναι αρκετός για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Είναι φανερό ότι οι προσπάθειες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα είναι για την υλοποίηση BMS, αν και έχουν δώσει αρκετά αποτελεσματικά συστήματα, είναι αποσπασματικές και δεν έχουν αποδώσει ακόμα μια γενική μέθοδο που να μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση. Μία βελτιωμένη περίπτωση BMS η οποία πληρεί κάποιες από τις προϋποθέσεις που τα άλλα BMS αγνοούν ή παρακάμπτουν, είναι η διατριβή του κ. Χατζάκη Ιωάννη [1].

Η τοπολογία που προτείνεται για ένα BMS από τους Χατζάκης et al [89] είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 1.4.



Σχ. 1.4 Block διάγραμμα τοπολογίας ενός τυπικού BMS

## 1.5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΕΝΟΣ BMS

Για να γίνει δυνατή η δημιουργία μιας γενικής μεθοδολογίας που θα μπορεί να καλύψει κάθε ανάγκη σε BMS θα πρέπει πρώτα να προσδιοριστούν όλες οι δυνατές ιδιότητες ενός τέτοιου συστήματος. Αν αυτό γίνει με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία [45] τότε το BMS πρέπει να είναι ικανό για:

- Ανάκτηση δεδομένων
- Προσδιορισμό της κατάστασης του συσσωρευτή
- Ηλεκτρική διαχείριση
- Διαχείριση ασφάλειας
- Θερμική διαχείριση
- Επικοινωνία

Μια αναλυτική ματιά σε κάθε μια από αυτές τις ιδιότητες μπορεί να κάνει ορατά τα κενά των υπάρχοντων μεθοδολογιών και να δημιουργήσει τον δρόμο για την ύπαρξη μιας γενικής μεθοδολογίας:

### **Ανάκτηση Δεδομένων**

Η είσοδος των χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων σε BMS είναι κυρίως μετρήσεις. Γι' αυτό τον λόγο και η ακρίβεια, ο ρυθμός δειγματοληψίας και η χαρακτηριστική του φίλτρου εισόδου είναι σημαντικά και καθορίζονται από το είδος της εφαρμογής. Είναι φανερό ότι μια γενική μεθοδολογία πρέπει να χαρακτηρίζεται από επεκτασιμότητα, ώστε ο χειρισμός των δεδομένων να μπορεί να μοιράζεται σε ανάλογο αριθμό επεξεργαστών, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ταχύτητα επεξεργασίας.

### **Υπολογισμός κατάστασης του συσσωρευτή**

Η κατάσταση του συσσωρευτή χρησιμοποιείται ως είσοδος για την ηλεκτρική διαχείριση από το ίδιο το BMS αλλά αποτελεί και μια σημαντική παράμετρο για το χρήστη. Η κατάσταση του συσσωρευτή μπορεί να περιγραφεί απλά από δύο παραμέτρους:

- *Κατάσταση φόρτισης (State Of Charge, SOC)*
- *Κατάσταση υγείας (State Of Health, SOH)*

Η κατάσταση της υγείας του συσσωρευτή είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, ιδιαίτερα σε BMS που βασίζονται σε παρακολούθηση συσσωρευτή. Η έρευνα για τον ακριβή προσδιορισμό της συνεχίζεται. Σήμερα δύο κυρίως παράμετροι μετρούνται για να δώσουν μια άποψη για την υγεία του συσσωρευτή:

- Η μεταβολή της συνολικής της χωρητικότητας και
- η αύξηση της εσωτερικής της αντίστασης.

Για τον υπολογισμό της κατάστασης φόρτισης ήδη έχουν δοκιμαστεί ένας αριθμός μεθόδων οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν και να δώσουν αρκετά αξιόπιστα αποτελέσματα [46]. Αυτές είναι:

**α) Έλεγχος εκφόρτισης.** Ο έλεγχος εκφόρτισης γίνεται σε ελεγχόμενες συνθήκες και αποτελεί την πιο αξιόπιστη μέθοδο προσδιορισμού της κατάστασης φόρτισης. Το μειονέκτημά του είναι ότι διαρκεί πολύ χρόνο και συνήθως το φορτίο πρέπει να σταματήσει να λειτουργεί κατά τη διάρκεια του ελέγχου.

**β) Μέτρηση αμπερωρίων (με υπολογισμό των απωλειών).** Αποτελεί την πιο συνηθισμένη μέθοδο υπολογισμού του SOC. Δύο παράγοντες σφάλματος πρέπει να προσεχτούν για να έχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Αυτοί είναι η ακρίβεια του συστήματος μέτρησης του ρεύματος και η ορθότητα του υπολογισμού των απωλειών.

**γ) Απευθείας μέτρηση των φυσικών ιδιοτήτων του ηλεκτρολύτη.** Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στις μη στεγανούς συσσωρευτές μολύβδου-οξέος. Στηρίζεται στη στενή σχέση που έχουν η κατάσταση φόρτισης και η πυκνότητα του ηλεκτρολύτη. Η μέθοδος αυτή έχει χαμηλή πρακτική αξία.

**δ) Τάση ανοιχτού κυκλώματος.** Δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα στην περίπτωση που οι συσσωρευτές παραμένουν εντελώς αχρησιμοποίητοι για ικανά μεγάλα χρονικά διαστήματα. Όταν είναι στην ηρεμία η τάση και κατάσταση φόρτισης συνδέονται με γραμμική σχέση. Η τάση ηρεμίας του συσσωρευτή εξαρτάται και από την πυκνότητα του ηλεκτρολύτη και τη θερμοκρασία, παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν για να υπάρχει ακρίβεια στον υπολογισμό του SOC [47]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους τις οποίες και ρυθμίζει όταν ο συσσωρευτής βρεθεί σε ηρεμία.

**ε) Αρνητική κλίση της καμπύλης φόρτισης.** Η ανίχνευση της αρνητικής κλίσης της καμπύλης φόρτισης μπορεί να δώσει με καλή ακρίβεια το σημείο της πλήρους φόρτισης. Χρησιμοποιείται συνήθως ταυτόχρονα με έλεγχο της θερμοκρασίας, γιατί αρνητική κλίση της καμπύλης φόρτισης, ιδιαίτερα σε φόρτιση με χαμηλό ρεύμα, είναι πιθανό να προκαλέσει και απότομη πτώση της θερμοκρασίας του συσσωρευτή, ενώ κοντά στην πλήρη φόρτιση παρουσιάζεται και ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της πτώσης του βαθμού απόδοσης της φόρτισης.

**στ) Χρήση μαθηματικού μοντέλου.** Πολλά μαθηματικά μοντέλα έχουν δημιουργηθεί που μπορούν να υπολογίζουν την κατάσταση της φόρτισης λαμβάνοντας σαν είσοδο τις μετρήσεις της τάσης και της έντασης. Πολλά από αυτά έχουν την ικανότητα της προσαρμογής στις μετρήσεις ώστε να μειώσουν τα σφάλματα. Αποτελούν την πιο συνηθισμένη μέθοδο στα BMS. Για την ακριβέστερη κατανόησή της λειτουργίας των μοντέλων πρέπει πρώτα να γίνει κατανοητή η κατασκευή και η λειτουργία των συσσωρευτών και για αυτό το λόγο τα μοντέλα των συσσωρευτών αναπτύσσονται σε άλλο κεφάλαιο της διατριβής.

**ζ) Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.** Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν αρχίσει ήδη να δοκιμάζονται στην ακριβή πρόβλεψη του SOC. Τα πρώτα αποτελέσματα δείχνουν να

είναι ενθαρρυντικά [48]. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα γίνεται προσπάθεια εκτός από το SOC να προβλέπουν και την βλάβη στο συσσωρευτή [49].

**η) Φασματογραφία της σύνθετης αντίστασης.** Η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης του συσσωρευτή είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται για να τη διερεύνηση της ηλεκτροχημικής διαδικασίας και έχει μελετηθεί σε κάθε τύπο συσσωρευτή. Χρησιμοποιείται τόσο για τον προσδιορισμό του SOC όσο και του SOH.

**θ) Εσωτερική Αντίσταση.** Κατά τη λειτουργία του συσσωρευτή η εσωτερική του αντίσταση μπορεί να προσδιοριστεί αν διαιρεθούν οι μεταβολές της τάσης με τις μεταβολές του ρεύματος. Η μέθοδος είναι σχετική με τη φασματογραφία της σύνθετης αντίστασης αλλά γενικά λιγότερο ακριβής. Σημαντικά σφάλματα μπορεί να προκύψουν από παράγοντες όπως η διάχυση του ηλεκτρολύτη και οι αντιδράσεις μεταφοράς αν τα χρονικά διαστήματα ξεπεράσουν τα 10 msec.

**ι) Φίλτρα Kalman.** Αλγόριθμοι που υλοποιούν φίλτρα Kalman έχουν χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραμέτρων στο εσωτερικό του συσσωρευτή. Τα αποτελέσματα δεν είναι ακόμα ικανοποιητικά αλλά αυτό μπορεί να ανατραπεί καθώς η έρευνα συνεχίζεται πάνω στην συγκεκριμένη μέθοδο.

### **Ηλεκτρική διαχείριση**

Με την ηλεκτρική διαχείριση οι παράμετροι εισόδου ρεύματος, τάσης, θερμοκρασίας, SOC και SOH ελέγχουν τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης. Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία το BMS πρέπει να:

- να ελέγχει τη διαδικασία φόρτισης συμπεριλαμβανόμενης της εξίσωσης φόρτισης και
- να περιορίζει το ρεύμα εκφόρτισης ανάλογα με τους SOC και SOH.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνεται και η εξέταση της επίδρασης της εξίσωσης κατά την εκφόρτιση και η εύρεση μιας πλεονεκτικής τοπολογίας για την εφαρμογή της. Αναλυτικά η μέθοδος και τα πρακτικά της αποτελέσματα θα αναφερθούν στα επόμενα κεφάλαια.

### **Διαχείριση ασφάλειας**

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ένα BMS πρέπει να παρέχει:

- Προστασία από βαθιά εκφόρτιση
- Προστασία από την υπερεκφόρτιση μεμονωμένου στοιχείου

- Προστασία από υπερθέρμανση
- Απομόνωση του συσσωρευτή σε περίπτωση θραύσης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνεται επίσης η εισαγωγή της πιο γενικευμένης έννοιας της προστασίας του συσσωρευτή [50] στην περίπτωση του BMS. Οποιαδήποτε διαρροή του συσσωρευτή, είτε αυτή είναι εσωτερικό βραχυκύκλωμα, είτε είναι διαρροή προς τη γη, θα πρέπει να μπορεί να ανιχνευτεί και το συγκεκριμένο στοιχείο να απομονώνεται.

Προχωρώντας ακόμα περισσότερο το BMS θα πρέπει να έχει αντοχή σε σφάλματα. Η τάση του απομονωμένου τμήματος πρέπει να μπορεί να αποκατασταθεί με επιπλέον ισχύ που μπορεί να παρέχει το υγιές τμήμα της ώστε το φορτίο να παραμείνει σε λειτουργία, αν αυτό είναι απαραίτητο.

### **Θερμική διαχείριση**

Η θερμική διαχείριση είναι απαραίτητη για τις περισσότερες εφαρμογές υψηλής ισχύος και για του συσσωρευτές που λειτουργούν σε υψηλή θερμοκρασία. Το BMS μπορεί να είναι υπεύθυνο για την εξίσωση της θερμοκρασίας μεταξύ των στοιχείων, τη ψύξη του συσσωρευτή ή ακόμα και τη θέρμανσή του, αν πρόκειται ένα συσσωρευτή υψηλής θερμοκρασίας.

### **Επικοινωνία**

Ποικίλες ανάγκες για επικοινωνία υπάρχουν συνήθως εσωτερικά στο BMS. Αυτές καλύπτουν συνήθως επικοινωνίες με αισθητήρια ή μεταξύ των μικροελεγκτών του, αν αυτοί είναι περισσότεροι από ένας. Σημαντική όμως είναι και η επικοινωνία του BMS με τον χρήστη. Αυτή μπορεί να είναι άμεση, δηλαδή μέσω ενός μικρού πληκτρολογίου και μιας μικρής οθόνης LCD, μπορεί να γίνει μέσω υπολογιστή, ή ακόμα σε ειδικές περιπτώσεις μπορεί να γίνεται μέσω δικτύου υπολογιστών ή και τηλεφώνου.

## **Κεφάλαιο 2**

### **ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ**

#### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Παρά τη μεγάλη ποικιλία τύπων συσσωρευτών που είναι γνωστοί σήμερα στα μεγάλα εμπορικά και βιομηχανικά συστήματα δύο μόνο τύποι συσσωρευτή έχουν επικρατήσει. Αυτοί είναι οι συσσωρευτές με αλκαλικό ηλεκτρολύτη (Ni-Cd, Ni-MH) και οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος. Οι συσσωρευτές Ni-Cd και Ni-MH, αν και είναι γνωστό ότι παρουσιάζουν κάποιες διαφορές στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους ιδίως κατά τη φόρτιση, εξετάζονται παράλληλα, γιατί συμπεριφέρονται πολύ παρόμοια. Περιβαλλοντικοί λόγοι έχουν επιβάλλει οδηγίες για τον περιορισμό της χρήσης του καδμίου στην ΕΕ και τις ΗΠΑ. Έτσι, ήδη έχει αρχίσει η σταδιακή αντικατάσταση της χρήσης συσσωρευτών Ni-Cd με συσσωρευτές Ni-MH.

Αναμφίβολα, η πιο απαιτητική εφαρμογή τόσο για τους συσσωρευτές όσο και για το BMS είναι το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Όλες οι παράμετροι του συνδυασμού συσσωρευτή-BMS έχουν εδώ πρωτεύουσα σημασία. Αν χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός συσσωρευτών, τότε θα αρχίσουν να παρουσιάζονται διάφορα προβλήματα: περιορισμός του εσωτερικού και του χώρου αποσκευών, αύξηση του βάρους και του κόστους καθώς και μείωση των επιδόσεων. Έτσι, στη συγκεκριμένη εφαρμογή πρέπει να προσεχθούν η ειδική ενέργεια, η ειδική ισχύς, η ενεργειακή απόδοση, ο ρυθμός φόρτισης, ο αριθμός των κύκλων ζωής (κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης), το περιβάλλον λειτουργίας, το κόστος, η ασφάλεια και η δυνατότητα ανακύκλωσης.

Αν και μέχρι σήμερα ο συσσωρευτής μολύβδου-οξέος εξακολουθεί να είναι η ελκυστικότερη λύση και για την εφαρμογή του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, ένας αριθμός από εξελιγμένους συσσωρευτές παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον [51]. Αυτοί είναι οι νικελίου-σιδήρου (nickel-iron, Ni-Fe), οι Ni-Cd και οι Ni-MH. Από την άλλη πλευρά οι συσσωρευτές ψευδαργύρου-αλογόνου, όπως οι Zn-Br, και οι συσσωρευτές υψηλής θερμοκρασίας, όπως οι νατρίου-θείου (sodium-sulfur, Na-S) εξακολουθούν να είναι ελκυστικοί. Το υψηλό όμως κόστος και τα άλλα προβλήματα που παρουσιάζει η χρήση τους οδηγούν και εδώ στη χρήση κυρίως των τριών κυρίαρχων τύπων συσσωρευτών (Pb-Acid, Ni-Cd, Ni-MH).



Αναφέρουμε μόνο με τους συσσωρευτές Pb-Acid, Ni-Cd και Ni-MH, επειδή αυτοί έχουν ευρεία εφαρμογή. Οι μεθοδολογίες που εξάγονται μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλους τύπους συσσωρευτών με μικρές τροποποιήσεις. Εξαίρεση ίσως να αποτελούν οι συσσωρευτές Na-S. Όπως όμως είναι φανερό, αυτοί προορίζονται μόνο για πολύ εξειδικευμένες χρήσεις ή για ερευνητικούς σκοπούς. Ακόμα και αγωνιστικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα [52] προτιμούν τη χρήση συσσωρευτών Ni-Cd.

Ήδη στις ΗΠΑ έχει γίνει προσπάθεια να θεσπιστούν βιομηχανικές προδιαγραφές και κώδικες για τη χρήση και τη συντήρηση των συσσωρευτών [53]:

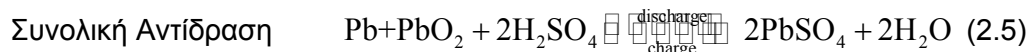
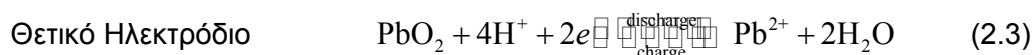
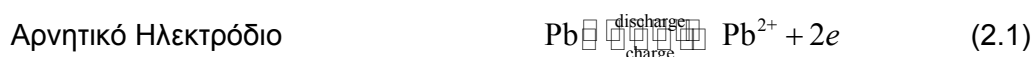
1. National Electrical Code, Article 480: Πραγματεύεται τις ηλεκτρικές απαιτήσεις για τη χρήση συσσωρευτών
2. National Electrical Safety Code, Section 14: Πραγματεύεται τις απαιτήσεις ασφαλείας για συσσωρευτές σε σταθμούς παροχής ρεύματος.
3. Code of Federal Regulation Title 29, "Occupational Safety and Health Administration, Labor", Article 1910.305: Αναφέρεται στη διάχυση και τον εξαερισμό των αερίων που παράγουν οι συσσωρευτές για την αποφυγή συσσώρευσης εκρηκτικών μιγμάτων αερίων.
4. ANSI/IEEE Standard 450, "IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing and Replacement of Large Lead Storage Batteries for Generating Stations and Substations"
5. ANSI/IEEE Standard 484, "IEEE Recommended Practice for Installation Design and Installation of Large Lead Storage Batteries for Generating Stations and Substations"
6. ANSI/IEEE Standard 485, "IEEE Recommended Practice for Sizing Large Lead Storage Batteries for Generating Stations and Substations"

## **2.2 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ – ΟΞΕΟΣ**

Ο συσσωρευτής μολύβδου-οξέος (Pb-Acid) είναι ένα πετυχημένο εμπορικά είδος για περισσότερο από ένα αιώνα. Η ζήτηση και η παραγωγή του αυξάνονται συνεχώς, καθώς εμφανίζονται νέες ανάγκες για χρήση συσσωρευτών. Αυτό συμβαίνει γιατί αποτελεί συνήθως τη φθηνότερη λύση για οποιαδήποτε εφαρμογή, ενώ παράλληλα εξακολουθεί να παρουσιάζει καλά χαρακτηριστικά επιδόσεων και διάρκεια ζωής. Κυκλοφορεί σε δύο κύριους τύπους οι οποίοι παρουσιάζουν αρκετές διαφορές που θα αναλυθούν παρακάτω. Ο πρώτος τύπος είναι ο συσσωρευτής μολύβδου ανοιχτού τύπου (flooded type Lead-Acid battery) που επιτρέπει πρόσβαση

στον ηλεκτρολύτη από ειδικές φρασσόμενες οπές (τάπες) και ο δεύτερος τύπος είναι ο στεγανός συσσωρευτής μολύβδου (sealed lead-acid, SLA ή valve-regulated lead-acid, VRLA) που δεν επιτρέπει πρόσβαση στο εσωτερικό της.

Ο συσσωρευτής μολύβδου χρησιμοποιεί ως ενεργό υλικό στο θετικό ηλεκτρόδιο διοξείδιο του μολύβδου και στο αρνητικό ηλεκτρόδιο μεταλλικό μόλυβδο διαμορφωμένο σε μια μεγάλης επιφάνειας πορώδη κατασκευή. Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται θειικό οξύ ειδικού βάρους περίπου 1.28. Κατά την εκφόρτιση, και τα δύο ηλεκτρόδια μετατρέπονται σε θειικό μόλυβδο. Η διαδικασία αυτή αντιστρέφεται κατά τη φόρτιση. Η λειτουργία του συσσωρευτή μολύβδου περιγράφεται από τις εξισώσεις:



Καθώς το στοιχείο πλησιάζει την πλήρη φόρτιση και η πλειονότητα του  $\text{PbSO}_4$  έχει μεταβληθεί σε  $\text{Pb}$  και  $\text{PbO}_2$ , η τάση φόρτισης γίνεται μεγαλύτερη από τη τάση απελευθέρωσης αερίων (περίπου 2,39V ανά στοιχείο) και αρχίζει η παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου με αποτέλεσμα την απώλεια νερού:



Στους στεγανούς συσσωρευτές μολύβδου, αυτή η αντίδραση ελέγχεται ώστε να ελαχιστοποιηθεί η εκπομπή υδρογόνου και η απώλεια νερού με την επανασύνδεση του παραγόμενου οξυγόνου με την αρνητική πλάκα. Για να συμβεί αυτό η εσωτερική κατασκευή του στοιχείου γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόσταση μεταξύ των πλακών, και ο διαχωριστής κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να συγκρατεί και να φέρνει σε επαφή τα ιόντα. Η επανασύνδεση είναι ικανοποιητική όσο το ρεύμα παραμένει μικρότερο του C/3.

Η ονομαστική τάση ενός στοιχείου μολύβδου είναι τα 2V. Η τάση του στοιχείου στην ηρεμία είναι γραμμική συνάρτηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη. Ξεκινά από τα 2,125V για ένα στοιχείο με ηλεκτρολύτη ειδικού βάρους 1,28 και φτάνει τα 2,05V για ειδικό βάρος ηλεκτρολύτη 1,21. Η επιλογή του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το στοιχείο και πρέπει να είναι αρκετά υψηλή, ώστε να επιτυγχάνεται αρκετά υψηλή ιοντική αγωγιμότητα και ο συσσωρευτής να ανταποκρίνεται στις ηλεκτροχημικές απαιτήσεις. Από την άλλη πλευρά θα πρέπει να μην είναι τόσο υψηλή που να προκαλέσει διάβρωση των διαχωριστών ή να δημιουργήσει οξείδωση σε άλλα τμήματα του στοιχείου, με αποτέλεσμα να προκληθεί μείωση της ζωής και αύξηση της αυτοεκφόρτισης.

Η τάση διακοπής της εκφόρτισης, σε συνθήκες μέτριας εκφόρτισης, είναι τα 1,75V, αλλά μπορεί να φτάσει και μέχρι το 1V σε εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης σε χαμηλή θερμοκρασία. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι χαμηλός και πάντα μικρότερος από το 50% της χωρητικότητας στους έξι μήνες.

Η διάρκεια ζωής των στεγανών συσσωρευτών μολύβδου είναι συνήθως από 3 έως 10 χρόνια και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι μεταξύ 20 και 25°C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες επιταχύνονται οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που προκαλούν γήρανση και μειώνουν τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών μολύβδου. Η πιο σπουδαία από αυτές είναι η διαδικασία οξείδωσης του θετικού πλέγματος σε διοξείδιο του μολύβδου (PbO<sub>2</sub>) που είναι μια συνάρτηση των αμπερωίων υπερφόρτισης [54]. Η οξείδωση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τον ηλεκτρικό και μηχανικό εκφυλισμό του στοιχείου. Ηλεκτρικά, η αγωγιμότητα του πλέγματος μειώνεται και η αντίσταση αυξάνεται. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της ικανότητας παροχής ρεύματος στην εκφόρτιση και η χαμηλότερη αποδοχή φορτίου κατά την φόρτιση (μείωση χωρητικότητας), με αποτέλεσμα αύξηση στη θερμοκρασία του συσσωρευτή και στις δύο περιπτώσεις. Ο μηχανικός εκφυλισμός προκύπτει από το γεγονός ότι το διοξείδιο του μολύβδου απαιτεί περισσότερο χώρο από τον μεταλλικό μολύβδο και προκαλεί αύξηση (διόγκωση) στο θετικό ηλεκτρόδιο τόσο προς τα έξω όσο και κάθετα. Η προς τα έξω αύξηση του ηλεκτροδίου μπορεί τελικά να προκαλέσει ρήξη στο διαχωριστικό και να προκαλέσει βραχυκύκλωμα με το γειτονικό αρνητικό ηλεκτρόδιο. Η κάθετη αύξηση μπορεί να προκαλέσει βραχυκύκλωμα με το έλασμα σύνδεσης του αρνητικού ηλεκτροδίου. Σε συνήθεις συνθήκες η αύξηση του θετικού ηλεκτροδίου είναι μια αργή διαδικασία, αλλά η υπερφόρτιση και οι υψηλές θερμοκρασίες την επιταχύνουν.

Ένα επιπλέον πρόβλημα, που παρουσιάζεται στους κλειστού τύπου συσσωρευτές μολύβδου, είναι το στέγνωμα του στοιχείου. Το νερό του ηλεκτρολύτη

χάνεται ακόμα και σε συνηθισμένες συνθήκες λειτουργίας. Η υπερφόρτιση δημιουργεί απώλεια μικρών ποσοτήτων υδρογόνου και οξυγόνου (από διάσπαση του νερού). Με τον χρόνο αυτό, οδηγεί στο μόνιμο στέγνωμα από ηλεκτρολύτη.

Ανάλογα με το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων, σε λειτουργία με μεγάλες εκφορτίσεις, μπορεί να υπάρξει πρόωρη απώλεια της χωρητικότητας των συσσωρευτών μολύβδου. Το ενεργό υλικό (υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων) γίνεται σπογγώδες ή εύθραυστο. Στους συσσωρευτές ανοιχτού τύπου αποβάλλεται ή ξεφλουδίζει. Στις στεγανές μπορεί να κρατιέται δυνατά από τα διαχωριστικά που συνήθως κατασκευάζονται από ύφασμα ινών γυαλιού και τεφλόν, ώστε να διατηρεί σταθερή πίεση άσχετα με τη διόγκωση που παρουσιάζουν οι πλάκες.

Προσπαθώντας να ελαχιστοποιήσουν αυτά τα προβλήματα, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν διαφορετικά κράματα για την κατασκευή του θετικού ηλεκτροδίου. Έτσι εκτός από τον καθαρό μόλυβδο (Pb) χρησιμοποιείται κράμα μολύβδου - κασσιτέρου (Pb-Sn), μολύβδου - αντιμονίου - καδμίου (Pb-Sb-Cd), ενώ το πιο συνηθισμένο είναι το κράμα είναι μολύβδου - κασσιτέρου - ασβεστίου - αργιλίου (Pb-Sn-Ca-Al). Η επιλογή του κράματος επιδρά στα χαρακτηριστικά οξειδωσης και διόγκωσης του ηλεκτροδίου. Με κατάλληλη κατασκευή των ηλεκτροδίων (ελάχιστο πάχος 0,2 ίντσες = 5 mm) και ρύθμιση του ηλεκτρολύτη η ζωή ενός συσσωρευτή μπορεί να φτάσει και τα 20 χρόνια.

Οι μελέτες που έχουν γίνει [55] βεβαιώνουν ότι η οξείδωση του πλέγματος του θετικού ηλεκτροδίου και η συνεπακόλουθη διόγκωση είναι ο κύριος συντελεστής άμεσου προσδιορισμού της ζωής ενός σωστά σχεδιασμένου στοιχείου. Η οξείδωση και ο τρόπος αύξησης του κράματος μολύβδου - ασβεστίου - κασσιτέρου που συνήθως χρησιμοποιείται στα VRLA στοιχεία, ακολουθεί τις ίδιες βασικές αρχές με το διπλό κράμα μολύβδου - ασβεστίου. Η αύξηση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη όπως συχνά χρησιμοποιείται σε αυτά τα στοιχεία, επιταχύνει την διόγκωση του θετικού ηλεκτροδίου και έτσι βοηθά στη μείωση της ζωής του στοιχείου. Η οξείδωση του μολύβδου στο θετικό ηλεκτρόδιο δημιουργείται ταυτόχρονα με τη μείωση της συνολικής ποσότητας του νερού στο στοιχείο. Οι συσσωρευτές ανασύνδεσης με διαχωριστικό από απορροφητικό ύφασμα ινών γυαλιού (Absorptive Glass Mat, AGM), λειτουργούν καλύτερα σε ένα επίπεδο διαπότισης γύρω στο 95%. Αυτό το επίπεδο διαπότισης πετυχαίνει ένα καλό συμβιβασμό για την ύπαρξη αρκετού ηλεκτρολύτη στο συσσωρευτή για την απόδοση λογικής χωρητικότητας και μιας αρκετά ανοικτής κατασκευής στο διαχωριστικό για να επιτρέπεται η ελεύθερη μεταφορά οξυγόνου και έτσι ικανοποιητικός ρυθμός ανασύνδεσης. Έχει, πάντως,δειχτεί ότι μια μείωση 10% στο επίπεδο διαπότισης στο διαχωριστικό, από 95% στο 85% έχει συνήθως σαν αποτέλεσμα 20% ή και μεγαλύτερη απώλεια στη χωρητικότητα. Όταν αυτό συμβεί, το στοι-

χείο φτάνει στο τέλος της ζωής του. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται στέγνωμα (dryout). Σε ένα AGM συσσωρευτή, η μέση εκπομπή αερίου πρέπει να διατηρηθεί στα 20 ml για κάθε 100Ah ημερησίως σε συντήρηση, αν σκοπός είναι η ζωή της να φτάσει τα 20 χρόνια [56]. Όμως, και η συνηθισμένη λειτουργία του συσσωρευτή με φορτίσεις και εκφορτίσεις δημιουργεί αυξημένη παραγωγή αερίων. Δραστήριες εκφορτίσεις και φορτίσεις μπορούν να έχουν σαν αποτέλεσμα την αυξημένη εκπομπή αερίου. Σαράντα βαθιές εκφορτίσεις και επιτυχείς φορτίσεις μπορούν να επιφέρουν απώλεια βάρους (ή απώλεια νερού) ίση με την αναμενόμενη σε 4 χρόνια λειτουργίας με βέλτιστες συνθήκες συντήρησης [57]. Μερικοί από τους παράγοντες που δρουν ευεργετικά στη ζωή του συσσωρευτή είναι η χαμηλή τάση συντήρησης, η συντήρηση με σταθερό ρεύμα και ο έλεγχος των συνθηκών φόρτισης μετά από μια πιεστική εκφόρτιση. Πάντως, σε στοιχεία που βρίσκονται στο εσωτερικό ενός συσσωρευτή συνδεδεμένα σε σειρά, οι βέλτιστες συνθήκες που μεγιστοποιούν τη διάρκεια ζωής σπάνια θα επιτευχθούν σε όλα ή και στα περισσότερα από αυτά.

### **2.3 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΑΛΚΑΛΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗ**

Ο όρος συσσωρευτές αλκαλικού ηλεκτρολύτη περικλείει δύο τύπους συσσωρευτών, τους νικελίου καδμίου (Ni-Cd) και τους νικελίου-υδριδίου του μετάλλου (Ni-MH). Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συσσωρευτές αυτοί παρουσιάζουν ομοιότητες που επιτρέπουν την αντικατάσταση των συσσωρευτών Ni-Cd από τους Ni-MH για περιβαλλοντολογικούς λόγους. Παρουσιάζουν βέβαια και αρκετές διαφορές που θα συζητηθούν παρακάτω.

Οι συσσωρευτές Ni-Cd μπορεί να βρεθούν τόσο σε μορφή ανοιχτού τύπου όσο και σε κλειστού τύπου ελεύθεροι συντήρησης. Ανάλογα με τη χρήση τους, ακολουθείται διαφορετικός τρόπος κατασκευής, οπότε αποκτούν και διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι συσσωρευτές αυτοί μπορούν να αντέξουν πολύ υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης. Για τη φόρτισή τους έχουν προταθεί μέθοδοι [58] ικανές να την περατώσουν μέσα σε μόνο 10 λεπτά. Οι ανοιχτού τύπου συσσωρευτές Ni-Cd είναι γενικά ανθεκτικότεροι από τους αντίστοιχους Lead-Acid, τόσο από μηχανική όσο και από ηλεκτρική άποψη. Έχουν ακόμα πολύ μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Οι αποδοτικότερες μέθοδοι κατασκευής αυτών των συσσωρευτών δίνουν συσσωρευτές που παρουσιάζουν το πρόβλημα που είναι γνωστό ως «φαινόμενο μνήμης», το οποίο εμφανίζεται έπειτα από ημιτελείς φορτίσεις ή εκφορτίσεις και μειώνει την ωφέλιμη χωρητικότητα του στοιχείου και είναι πλήρως αντιστρεπτό.

Οι συσσωρευτές Ni-MH είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία και μπορούν να βρεθούν μόνο σε στεγανό τύπο. Η κύρια διαφορά που έχουν στην κατασκευή τους από τους Ni-Cd είναι ότι το ενεργό αρνητικό υλικό είναι, αντί για κάδμιο, υδρογόνο που έχει απορροφηθεί από ένα μεταλλικό κράμα. Το ηλεκτρόδιο υδριδίου του μετάλλου έχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από αυτό του καδμίου. Αυτό επιτρέπει στο θετικό ηλεκτρόδιο να καταλάβει περισσότερο όγκο, με αποτέλεσμα τα στοιχεία Ni-MH να επιτυγχάνουν μεγαλύτερες χωρητικότητες. Αν και τα περισσότερα χαρακτηριστικά τους είναι παρόμοια με αυτά των Ni-Cd δεν μπορούν να εργαστούν σε τόσο υψηλούς ρυθμούς. Επιπλέον το ηλεκτρόδιο του υδριδίου του μετάλλου είναι λιγότερο ανθεκτικό στην υπερφόρτιση. Σαν αποτέλεσμα η φόρτιση πρέπει πάντα να έχει ελεγχόμενη διακοπή, πράγμα που στις Ni-Cd δεν είναι πάντα απαραίτητο.

Τα ενεργά υλικά στους συσσωρευτές Ni-Cd είναι το κάδμιο (Cd) για το αρνητικό ηλεκτρόδιο και το οξυ-υδροξείδιο του νικελίου (NiOOH) για το θετικό. Σαν ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται διάλυμα καυστικού καλίου (KOH).

Κατά τη φόρτιση το υδροξείδιο του νικελίου, Ni(OH)<sub>2</sub>, μετατρέπεται σε ένα υψηλότερου σθένους οξειδίο:



Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο το υδροξείδιο του καδμίου, Cd(OH)<sub>2</sub>, μετατρέπεται σε κάδμιο:



Η συνολική αντίδραση είναι:

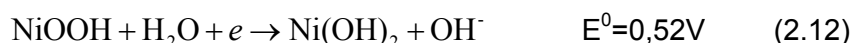


Από τη συνολική αντίδραση είναι φανερό ότι τα ενεργά υλικά υπόκεινται σε αλλαγές της κατάστασης οξειδωσής τους, αλλά παθαίνουν μικρή αλλαγή της φυσικής τους κατάστασης. Παρόμοια, η αλλαγή στον ηλεκτρολύτη είναι από μικρή ως καμία. Τα ενεργά υλικά και στη φόρτιση και στην εκφόρτιση είναι σχετικά αδιάλυτα στον αλκαλικό ηλεκτρολύτη, παραμένουν στερεά και δεν διαλύονται καθώς μεταβάλλουν την κατάσταση οξειδωσής τους. Από αυτές, αλλά και από τις υπόλοιπες ιδιότητές τους, τα στοιχεία Ni-Cd χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής και σε κυκλική αλλά και σε κατάσταση αναμονής. Ταυτόχρονα παρουσιάζουν σχετικά επίπεδη τάση σε ένα ευρύ φάσμα ρευμάτων εκφόρτισης.

Στους συσσωρευτές Ni-MH το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου είναι όπως και στις Ni-Cd το οξυ-υδροξείδιο του νικελίου (NiOOH). Το αρνητικό ενεργό υλικό στην κατάσταση της φόρτισης είναι υδρογόνο σε μορφή υδριδίου ενός μετάλλου. Αυτό το μεταλλικό «κράμα» έχει την ικανότητα να υπόκειται σε μια αντιστρεπτή αντίδραση απορρόφησης-απόδοσης υδρογόνου. Ένα υδατικό διάλυμα

καυστικού καλίου είναι το κύριο συστατικό του ηλεκτρολύτη. Η ελάχιστη ποσότητα ηλεκτρολύτη χρησιμοποιείται σε αυτό το στεγανό στοιχείο, όπου το περισσότερο υγρό απορροφάται από το διαχωριστή και τα ηλεκτρόδια. Αυτή η στερημένη ηλεκτρολύτη σχεδίαση είναι παρόμοια του αντίστοιχου στοιχείου Ni-Cd και διευκολύνει τη διάχυση του οξυγόνου στο αρνητικό ηλεκτρόδιο (το ηλεκτρόδιο του υδριδίου του μετάλλου), κατά το τέλος της φόρτισης, για την αντίδραση ανασύνδεσης του οξυγόνου. Ουσιαστικά αυτή είναι μια κατασκευή ξηρού στοιχείου ικανού να εργαστεί σε οποιαδήποτε θέση.

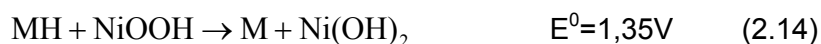
Κατά την εκφόρτιση το οξυ-υδροξείδιο του νικελίου υποβιβάζεται σε υδροξείδιο του νικελίου:



και το υδρίδιο του μετάλλου MH οξειδώνεται σε μέταλλο M:



Η συνολική αντίδραση κατά την εκφόρτιση είναι:



Η διαδικασία αυτή αντιστρέφεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Πολλών ειδών κράματα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του αρνητικού ηλεκτροδίου. Ανάλογα με αυτά η απόδοση των στοιχείων μπορεί να αυξηθεί σε υψηλές / χαμηλές θερμοκρασίες, στην αυτοεκφόρτιση, ή στους υψηλούς ρυθμούς λειτουργίας.

Κατά την εκφόρτιση, οι συσσωρευτές Ni-MH συμπεριφέρονται παρόμοια με τους Ni-Cd. Στην περίπτωση που υποστούν μερική εκφόρτιση με μεγάλο ρεύμα ή επαναλαμβανόμενες ημιτελείς φορτίσεις υποφέρουν και αυτοί από το φαινόμενο μνήμης.

## 2.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Για να καταφέρει ένα BMS να φέρει εις πέρας με επιτυχία την αποστολή του, πρέπει να είναι σε θέση να προσδιορίζει κάθε στιγμή την κατάσταση του συσσωρευτή. Για να συμβεί αυτό οι μετρήσεις που λαμβάνονται πρέπει να αποτελέσουν είσοδο σε ένα φίλτρο εξισώσεων που θα έχει την ικανότητα να παράγει ως έξοδο τις παραμέτρους που περιγράφουν την κατάσταση του συσσωρευτή. Αυτό το φίλτρο εξισώσεων αποτελεί στην ουσία ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία του συσσωρευτή. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στα BMS πρέπει να μπορούν με ακρίβεια να προσδιορίσουν τη κατάσταση του συσσωρευτή, αλλά

πρέπει και να μπορούν να εκτελεστούν από τους σχετικά αδύναμους στα μαθηματικά μικροελεγκτές που χρησιμοποιούν τα BMS, χωρίς μεγάλο πρόβλημα.

Η ανάγκη για χρήση μοντέλων που περιγράφουν τη συμπεριφορά των συσσωρευτών παρουσιάστηκε ταυτόχρονα με την εμφάνιση των συσσωρευτών. Αρχικά οι συσσωρευτές θεωρήθηκαν ιδανικές πηγές, μετά θεωρήθηκαν πηγές με εσωτερική αντίσταση και στη συνέχεια ανάλογα με την πολυπλοκότητα και τις ανάγκες των εφαρμογών άρχισαν να χρησιμοποιούνται πολυπλοκότερα μοντέλα για την παράσταση της συμπεριφοράς τους [59]. Η συστηματική δουλειά και η μελέτη της συμπεριφοράς των συσσωρευτών έχει αποδώσει ηλεκτρικά ισοδύναμα με μη-γραμμικά στοιχεία, τα οποία ουσιαστικά αποτελούν μαθηματικά μοντέλα της συμπεριφοράς των συσσωρευτών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων τους που δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα [60]. Ορισμένα από αυτά τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν υπό συνθήκες να παριστάνουν με καλή ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός συσσωρευτή [61]. Οι συνθήκες αυτές συνήθως είναι η παρακολούθηση ολόκληρων κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης που γίνονται με μέτριες τιμές ρεύματος. Αυτό συμβαίνει γιατί στους ολόκληρους κύκλους η αρχή και το τέλος της κάθε φάσης είναι χρονικά επαναλαμβανόμενα σημεία με καλώς γνωστή την κατάσταση του συσσωρευτή. Επιπλέον στα μέτρια ρεύματα δεν είναι εμφανής η επίδραση της κινητικότητας των ιόντων. Αν και έχουν γίνει προσπάθειες για την παραγωγή μοντέλων που στηρίζονται στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του συσσωρευτή [62] τα αποτελέσματα απέδωσαν εξαιρετικά πολύπλοκες μαθηματικές εξισώσεις που είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν με την επιθυμητή ακρίβεια από ένα μικροελεγκτή σε πραγματικό χρόνο. Ένα δεύτερο πρόβλημα που παρουσιάζουν αυτού του τύπου τα μοντέλα είναι ότι η φυσική διάσταση των παραμέτρων τους είναι δύσκολο να γίνει κατανοητή από ανθρώπους που δεν έχουν στενή σχέση με τη χημεία, όπως δηλαδή τους μηχανικούς που σχεδιάζουν το BMS. Τα μοντέλα αυτά μπορούν βέβαια να απλοποιηθούν και να μετατραπούν και σε ηλεκτρικά ισοδύναμα [63] και να επιτρέψουν με καλή ακρίβεια την εκτίμηση των παραμέτρων του συσσωρευτή.

Στην πραγματικότητα τα φαινόμενα που συμβαίνουν μέσα σε ένα συσσωρευτή είναι εξαιρετικά πολύπλοκα για να περιγραφούν με ακρίβεια από ένα μοντέλο [64]. Ένα μεγάλο πρόβλημα στη μοντελοποίηση των συσσωρευτών δημιουργείται από τους πόρους που συνήθως υπάρχουν στα ηλεκτρόδια προκειμένου να αυξήσουν την επιφάνειά τους. Αυτοί μπορεί περιστασιακά ή μόνιμα να φράζουν, λόγω θείωσης στα στοιχεία Lead-Acid ή λόγω της δημιουργίας δενδρίτη στα στοιχεία με καυστικούς ηλεκτρολύτες, με αποτέλεσμα την μεταβολή της συμπεριφοράς τους. Ακόμα όμως και όταν αυτό δεν συμβαίνει, οι πόροι επηρεάζουν



την κατανομή του ρεύματος κοντά στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Σε μεγάλα ρεύματα εκφόρτισης, η είσοδος των ιόντων στο εσωτερικό των πόρων γίνεται κυρίως με διάχυση και αυτό επηρεάζει τη συμπεριφορά του συσσωρευτή σε παρόμοιες συνθήκες. Στα στοιχεία Lead-Acid παρατηρείται ακόμα το φαινόμενο της αραίωσης του θειικού οξέος κοντά στη θετική πλάκα [65], που δημιουργεί αύξηση στην εσωτερική αντίσταση με ό,τι αυτή συνεπάγεται.

Η επίδραση των πόρων γίνεται εμφανής κυρίως σε πολύ απαιτητικές εφαρμογές όπως αυτή του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Για να μπορούν σε τέτοιες εφαρμογές τα μοντέλα να παρέχουν ακρίβεια, πρέπει να λάβουν υπόψη τους παράγοντες που προαναφέρθηκαν. Ένα τέτοιο μοντέλο παρουσιάστηκε το 1997 από τον Karden et al [66]. Μοντέλο με παρόμοια αντιμετώπιση των συσσωρευτών Ni-Cd είχε ήδη παρουσιαστεί από τους Fan και White το 1991 [67].

Το 1997, οι Mauracher και Karden παρουσιάζουν ένα μοντέλο που παρέχει πολύ καλή ακρίβεια και χρησιμοποιεί σαν είσοδο για την εκτίμηση των παραμέτρων τη σύνθετη αντίσταση που παρουσιάζει ο συσσωρευτής [68]. Βέβαια το μοντέλο αυτό προορίζεται για χρήση με συγκεκριμένο συσσωρευτή του οποίου όλα τα χαρακτηριστικά είναι καλώς γνωστά.

Παράλληλα στη Βουλγαρία το 1997, γίνεται προσπάθεια να μοντελοποιηθεί η συμπεριφορά των συσσωρευτών στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο με τη βοήθεια και εμπειρικών κανόνων [69]. Το αποτέλεσμα είναι ένα μοντέλο που υπολογίζει με τη βοήθεια πέντε παραμέτρων τη κατάσταση του συσσωρευτή. Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται με τη σειρά τους με τη βοήθεια της κατάστασης φόρτισης.

Ειδικά για την περίπτωση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, όπου γίνεται προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν συσσωρευτές Ni-MH που θα λειτουργούν με μεγάλες τιμές ρεύματος, η θερμική συμπεριφορά των συσσωρευτών έχει ιδιαίτερη σημασία για την απόδοσή τους. Το 2000 δημοσιεύεται στην Ιαπωνία [70] η πρώτη εργασία που προσπαθεί να μοντελοποιήσει τη θερμική συμπεριφορά των συσσωρευτών, προκειμένου να βοηθήσει στη διαχείριση θερμότητας των συσσωρευτών.

Το 1998 παρουσιάζεται από τους Cantrell et al [71] ένα γενικό μοντέλο που προσπαθεί με χρήση πεπερασμένων διαφορικών εξισώσεων να συνδέσει τη συμπεριφορά ενός στοιχείου Lead-Acid τόσο με τις χημικές αντιδράσεις, όσο και με τις γεωμετρικές του διαστάσεις. Τέτοια μοντέλα είναι πιθανώς βολικά για κατασκευαστές συσσωρευτών, αλλά ιδιαίτερα δύσχρηστα για σχεδιαστές BMS.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί η εργασία των Bejan και Dan [72] για τη συσχέτιση της λειτουργίας του συσσωρευτή και του χρόνου ζωής της. Στην εργασία αυτή εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να μεγιστοποιηθεί η εργασία

που μπορεί να αποδώσει ένας συσσωρευτής κατά τη διάρκεια της ζωής της. Σε παρόμοια πλαίσια κινείται και η εργασία του Sauer [73] η οποία προσπαθεί να μοντελοποιήσει το στέγνωμα των στοιχείων Lead-Acid και τη συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη κοντά στα πορώδη ηλεκτρόδια ώστε να καταφέρει τελικά να υπολογίσει τη γήρανση των συσσωρευτών.

## **Κεφάλαιο 3**

# **ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ**

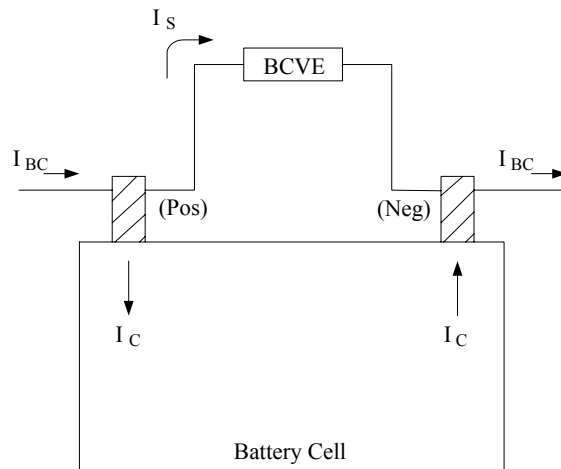
## **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Τα περισσότερα συστήματα που χρησιμοποιούν συσσωρευτές χρησιμοποιούν πολλά στοιχεία συσσωρευτή συνδεδεμένα σε σειρά και μερικές φορές παράλληλα. Για παράδειγμα τα συστήματα συσσωρευτή μολύβδου-οξέος των 48V και 120V συνήθως αποτελούνται από 24 και 60 στοιχεία των 2V αντίστοιχα. Ένας φορτιστής χρησιμοποιείται συνήθως για να φορτίσει ολόκληρο το συσσωρευτή. Αν και ο προορισμός του φορτιστή είναι να φορτίζει όλα τα στοιχεία το ίδιο, διαφορές τάσης μπορεί και εμφανίζονται από στοιχείο σε στοιχείο για έναν αριθμό από λόγους. Πιθανότατα ο πιο συνηθισμένος λόγος να είναι η χημική ανεπάρκεια που παρουσιάζεται σε στοιχεία. Καθώς οι κατασκευαστές προσπαθούν να κατασκευάσουν πανομοιότυπα στοιχεία, μικρές διαφορές μπορεί να παρουσιαστούν οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα διαφορετικές χαρακτηριστικές φόρτισης. Γι' αυτό οι συσσωρευτές σε ένα σύστημα μπορεί να έχουν τάσεις οι οποίες μπορεί να είναι υψηλότερες ή χαμηλότερες από την μέση συνιστούμενη τάση φόρτισης.

Οι διαφορές τάσης μεταξύ των στοιχείων στη διάρκεια ζωής των στοιχείων θα αυξηθούν, καθώς τα στοιχεία που παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση, ενώ αυτά με το χαμηλότερο βαθμό απόδοσης παρουσιάζουν χαμηλότερη τάση. Περιοδική εξίσωση των φορτίων συνιστάται από τους κατασκευαστές των συσσωρευτών για να αυξηθεί το φορτίο στα χαμηλότερης τάσης (χαμηλότερης απόδοσης) στοιχεία και με αυτό το τρόπο τείνουν να εξισωθούν οι τάσεις σε όλα τα στοιχεία. Πάντως, η εξίσωση των φορτίων έχει την τάση να αυξάνει το «ζόρισμα» των στοιχείων και μπορεί να προκαλέσει παραπέρα φθορά σε κάποια στοιχεία.

Το 1991 προτάθηκε η θεωρία του εξισωτή (equalizer) τάσης στοιχείου [74], που διασφαλίζει ότι κάθε ξεχωριστό στοιχείο σε ένα σύστημα συσσωρευτή έχει σταθερή φόρτιση στην κατάλληλη τάση φόρτισης. Ο εξισωτής κάθε ξεχωριστού στοιχείου του συσσωρευτή είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που παρακάμπτει ρεύμα από ένα στοιχείο που χρειάζεται μικρότερη ροή ρεύματος, ή θα εξαναγκάσει σε μεγαλύτερη ροή ρεύματος μέσα από το στοιχείο έτσι ώστε να διατηρήσει τη βέλτιστη

τάση φόρτισης. Με αυτό το τρόπο και η υποφόρτιση και η υπερφόρτιση του κάθε στοιχείου εξαλείφονται (Σχ. 3.1).



$I_{BC}$  = Battery Charger Current  
 $I_C$  = Cell Charging Current  
 $I_S$  = Shunt Current Through BCVE

Σχ. 3.1. Λειτουργία του εξισωτή τάσης στοιχείων συσσωρευτή (BCVE, Battery Cell Voltage Equalizer).

Τα φανερά πλεονεκτήματα της χρήσης του εξισωτή κάθε ξεχωριστού στοιχείου του συσσωρευτή είναι:

- Μειωμένη θείωση από υποφόρτιση μεμονωμένων στοιχείων
- Μειωμένη κατανάλωση ύδατος από υπερφόρτιση μεμονωμένων στοιχείων
- Αύξηση της διάρκειας ζωής των στοιχείων από την κατάλληλη φόρτιση
- Εξάλειψη της ανάγκης εξίσωσης των φορτίων των στοιχείων
- Απλότητα στη συντήρηση του συσσωρευτή: Τα προβληματικά στοιχεία μπορούν γρήγορα να προσδιοριστούν από μεταβολές τάσης μεγαλύτερες από τις συνηθισμένες
- Πρόσθεση νέων στοιχείων σε παλαιά συστήματα συσσωρευτή: τα νέα στοιχεία χρειάζονται λιγότερο φορτίο στήριξης από τα παλαιότερα στοιχεία.

Επίσης, πλεονεκτήματα προσφέρει στο σύστημα η δυνατότητα της χρήσης εξίσωσης κατά την εκφόρτιση. Αν ο εξισωτής εκφόρτισης έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει την πλήρη ισχύ ενός ή περισσότερων στοιχείων τότε έχουμε τα εξής πλεονεκτήματα:

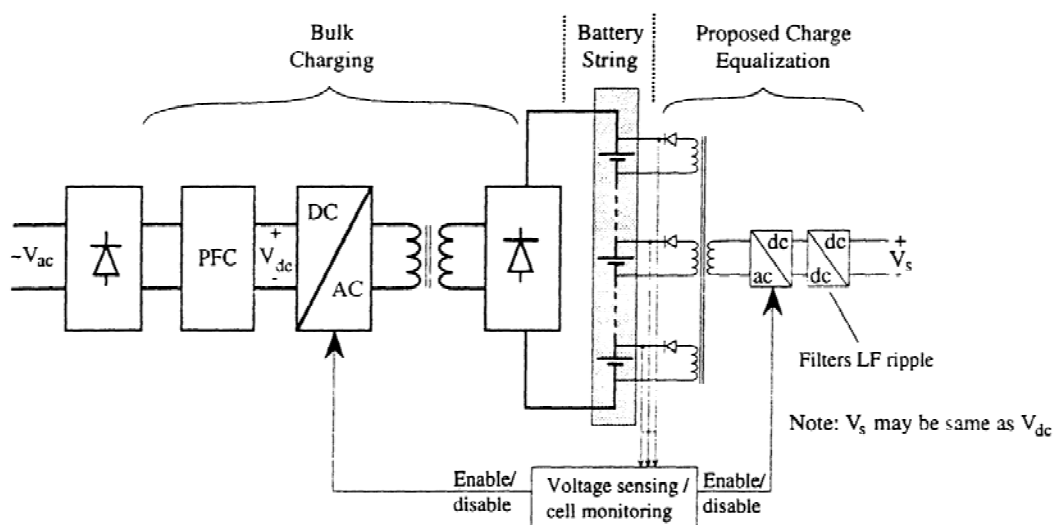
- Προστασία των στοιχείων από ανάστροφη πόλωση ακόμα και σε βαθιά εκφόρτιση του συστήματος συσσωρευτή.

- Αντοχή σε σφάλμα, γιατί, αν ένα στοιχείο αποκοπεί, το σύστημα του συσσωρευτή εξακολουθεί να λειτουργεί χωρίς πρόβλημα, διατηρώντας το κύκλωμα, αλλά και την τάση του στοιχείου μέσω του κυκλώματος εξίσωσης.
- Μειωμένη θείωση στα στοιχεία Lead-Acid από υπερεκφόρτιση μεμονωμένων στοιχείων
- Πλήρη και ταυτόχρονη εκφόρτιση σε όλα τα στοιχεία σε συστήματα συσσωρευτή αλκαλικού ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα την αποφυγή του φαινομένου μνήμης
- Μεγιστοποίηση του αποδιδόμενου φορτίου από τον συσσωρευτή.
- Η εξίσωση της φόρτισης μπορεί να γίνει μέσα από τον ίδιο μετατροπέα που χρησιμοποιείται και στην εκφόρτιση.

Φυσικά η προσθήκη ενός εξισωτή εκφόρτισης αυξάνει το κόστος του συστήματος αρκετά, αλλά πολλές φορές το κόστος δεν είναι ο πρωτεύων παράγοντας για κάποιες εφαρμογές.

### 3.2 ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΓΙΑ ΕΞΙΣΩΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Μια από τις πιο χαρακτηριστικές εργασίες για εξισωτή φορτίου έχει εκπονηθεί από τους Kutkut et al. [76-78]. Η ιδέα αυτή ενσωματώθηκε στο κύκλωμα φόρτισης, με αποτέλεσμα να δημιουργήσει ένα κύκλωμα εξίσωσης φόρτισης. Η προτεινόμενη τοπολογία φαίνεται στο Σχ. 3.2:



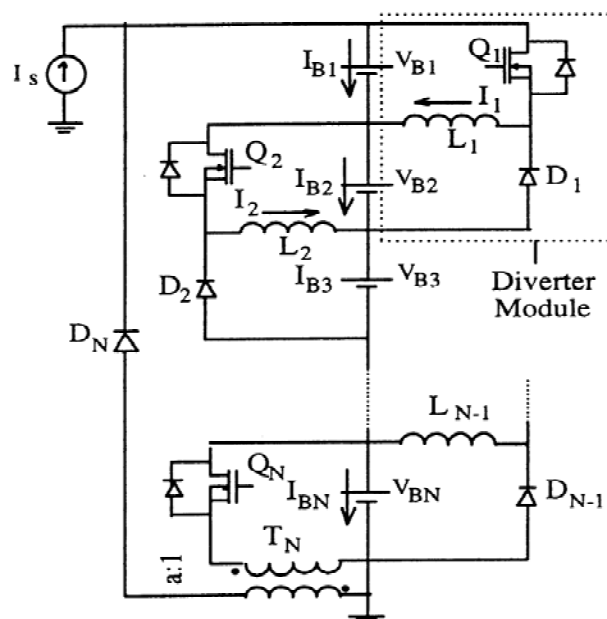
Σχ. 3.2. Η προτεινόμενη τοπολογία των Kutkut et al.

Στην συγκεκριμένη τοπολογία υπάρχει ένας μετατροπέας DC/DC που συνδέεται στη συνολική τάση του συστήματος του συσσωρευτή. Στη συνέχεια, ο μετατροπέας οδηγεί ένα αντιστροφέα μεταβλητής συχνότητας και με έξοδο τετραγωνικό παλμό. Στην έξοδο του μετατροπέα συνδέεται ο μετασχηματιστής που εξισώνει τις τάσεις των στοιχείων σε σειρά με ένα πηνίο. Η μεταβολή της συχνότητας του αντιστροφέα μεταβάλλει το ρεύμα εξίσωσης λόγω της ύπαρξης του πηνίου.

Στις πιο πάνω αναφερόμενες εργασίες [76-78], η μεθοδολογία και τα προβλήματα που παρουσιάζει, αναλύονται αρκετά καλά και **προτείνεται η κατασκευή μετασχηματιστή με ειδική γεωμετρία, ώστε όλα τα δευτερεύοντα να παρουσιάζουν ίσες παρασιτικές αυτεπαγωγές και να μην παρουσιάζονται διαφορές στα ρεύματα φόρτισης των στοιχείων**. Η θεώρηση ότι η φόρτιση μπορεί να συνεχιστεί και με κάποιο βραχυκυκλωμένο στοιχείο, που δημοσιεύεται σε επόμενη εργασία [79], χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ελκυστικό και με χαμηλό κόστος. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία αναλύεται εκτενώς σε μία ακόμα εργασία [80] που διερευνά τους περιορισμούς που εισάγει ο αλληλοεπηρεασμός των δευτερευόντων τυλιγμάτων και τη σχέση του χωρητικού φίλτρου της εξόδου με την αυτεπαγωγή και τη συχνότητα του αντιστροφέα.

Μια παραλλαγή αυτής της μεθόδου που χρησιμοποιεί τον μισό αριθμό τυλιγμάτων παρουσιάστηκε από τον H. Leung [81] και αναλύθηκε από τους Z. Ye και T. Stuart [82].

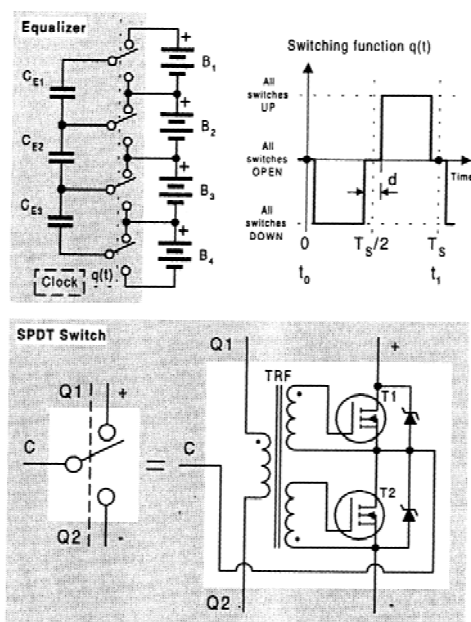
Ένας ακόμα προτεινόμενος τρόπος από τον Kutkut είναι ο κατανεμητής ρεύματος με πηνία [83]. Η βασική του ιδέα φαίνεται στο Σχ. 3.3:



Σχ. 3.3. Κατανεμητής ρεύματος με πηνία.

Ο κατανεμητής αυτός μπορεί να ανταλλάξει φορτίο μεταξύ δύο γειτονικών στοιχείων και με την επανάληψή του μπορεί τελικά να λειτουργήσει για να παρέχει εξίσωση σε ένα ολόκληρο σύστημα συσσωρευτή. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του κατανεμητή ρεύματος με πηνία είναι ότι μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιαδήποτε συστοιχία με ανάλογη επανάληψη του βασικού του τμήματος. Ο κατανεμητής ρεύματος με πηνία μπορεί να τροποποιηθεί σε ένα ελεγχόμενο κατανεμητή [84] από διαμορφωτή εύρους παλμών (PWM, Pulse Width Modulation).

Σε παρόμοια αρχή με τον κατανεμητή ρεύματος με πηνία στηρίζεται και το σύστημα εξίσωσης διακοπτόμενου πυκνωτή [85]. Η αρχή λειτουργίας του φαίνεται στο Σχ. 3.4:



Σχ. 3.4. Αρχή λειτουργίας συστήματος εξίσωσης διακοπτόμενου πυκνωτή.

Το κύριο μειονέκτημα που παρουσιάζει η χρήση πυκνωτών σε παρόμοιες εφαρμογές είναι η απαίτηση χρήσης ιδιαίτερα υψηλής συχνότητας μεταλλαγής, προκειμένου να διατηρηθεί ο όγκος του συστήματος σε λογικά επίπεδα, και οι σχετικά υψηλές απώλειες για το συνολικά μεταφερόμενο φορτίο.

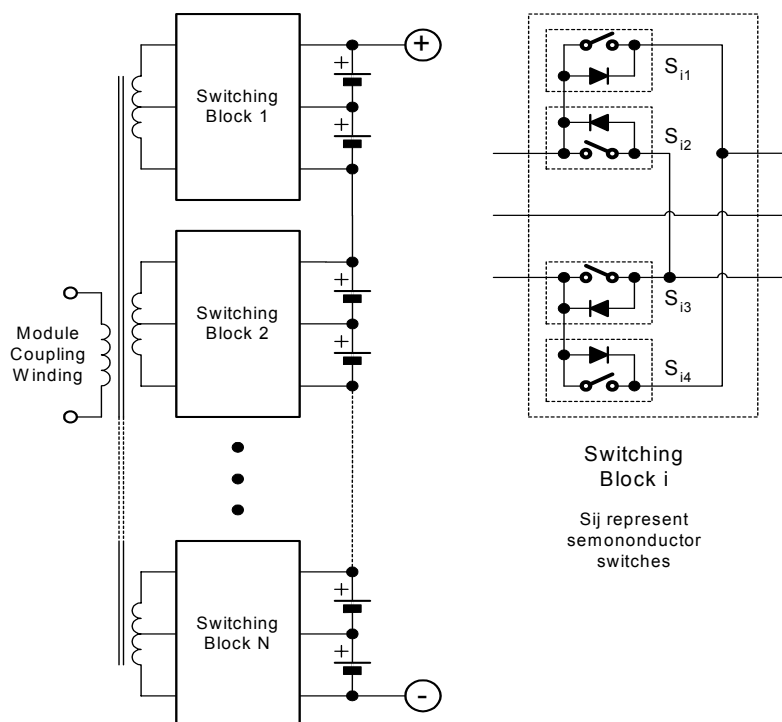
Ένας αριθμός παραλλαγών των παραπάνω μεθόδων και συγκρίσεις μεταξύ τους βρίσκονται σε δύο ακόμα εργασίες του Kutkut [86-87]. Όλες αυτές οι τοπολογίες που χρησιμοποιούν μετασχηματιστή έχουν κοινό χαρακτηριστικό την ασύμμετρη διέγερσή του, ή την υπό συνθήκες ασύμμετρη λειτουργία του με

αποτέλεσμα να δημιουργούνται ερωτήματα τόσο για τη παραγωγή θορύβου από αυτά, όσο και για την ορθότητα της λειτουργίας τους σε ακραίες συνθήκες.

### 3.3 ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΓΙΑ ΕΞΙΣΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ

Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία μια σοβαρή αντιμετώπιση της εφαρμογής εξίσωσης κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Η ικανότητα εξίσωσης κατά την εκφόρτιση συνήθως αποτελεί μια «παρενέργεια» της εξίσωσης της φόρτισης και με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζεται από τις συνδεσμολογίες εξίσωσης που την υποστηρίζουν. Μια εργασία είναι αυτή των Hung et al. [88] που αντιμετωπίζει την εξίσωση κατά την εκφόρτιση σαν μια μέθοδο αντοχής σε σφάλμα που παρουσιάζεται στην περίπτωση ανοιχτοκυκλωμένου στοιχείου. Η συγκεκριμένη αντιμετώπιση θεωρήθηκε ελλιπής και διερευνήθηκε περισσότερο από τους Χατζάκης et al [89], την οποία χρησιμοποιεί η παρούσα διπλωματική, και η λειτουργία εξηγείται παρακάτω.

Για την δυνατότητα ενός BMS να παρέχει τόσο εξίσωση στη φόρτιση όσο και στην εκφόρτιση, αναπτύχθηκε μια νέα τοπολογία που **έχει ως βασικό χαρακτηριστικό την ικανότητα να παρέχει εξίσωση με χαμηλό θόρυβο και με σχετικά μεγάλη ισχύ**. Στην τοπολογία αυτή απουσιάζει ο έλεγχος, επειδή υπάρχει η ιδιότητα να **παρέχεται παθητική εξίσωση των τάσεων των στοιχείων του συσσωρευτή**. Το βασικό διάγραμμα αυτής της προτεινόμενης τοπολογίας φαίνεται στο Σχ. 3.5:



Σχ. 3.5. Το βασικό διάγραμμα της προτεινόμενης τοπολογίας.



Το κύκλωμα εξίσωσης που προκύπτει από την προτεινόμενη τοπολογία είναι πλήρως συμμετρικό για άρτιο αριθμό  $N$  στοιχείων και χρησιμοποιεί ένα μετασχηματιστή με  $N/2$  τυλίγματα με μεσαία λήψη. Κάθε τύλιγμα συνδέεται στα δύο γειτονικά του στοιχεία με τέσσερα ζεύγη διακόπτη – διόδου. Με τον τρόπο αυτό υλοποιείται ένας πλήρους κύματος, διπλής κατεύθυνσης, push-pull μετατροπέας DC/DC για κάθε στοιχείο συσσωρευτή, ο οποίος εξισώνει την τάση των στοιχείων. Πρέπει να σημειωθεί ότι, αν η αντίσταση του κλειστού διακόπτη είναι μηδέν, τότε δεν υπάρχει ροή ρεύματος μέσα από τις διόδους. Ροή ρεύματος μέσα από τις διόδους μπορεί να υπάρξει στην περίπτωση που οι διακόπτες δεν είναι διπλής κατεύθυνσης ή στην περίπτωση που εμφανίζουν σχετικά υψηλή αντίσταση αγωγής. Η πλήρως συμμετρική λειτουργία του μετασχηματιστή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός παλμού τάσης στο επιπρόσθετο τύλιγμα ζεύξης υπομονάδας (module coupling winding) ανάλογου με την τάση στοιχείου, έτσι ώστε αυτό το τύλιγμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ζεύξη περισσότερων μετασχηματιστών. Με τον τρόπο αυτό **υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης πολλών ίδιων κυκλωμάτων που μπορούν πλέον να συνεργάζονται πάνω στην ίδια σειρά συνδεδεμένων στοιχείων**. Στην περίπτωση που ένας μετασχηματιστής πρέπει να παρέχει εξίσωση σε ένα περιττό αριθμό  $N$  στοιχείων, τότε ο απαιτούμενος μετασχηματιστής πρέπει να διαθέτει  $(N+1)/2$  τυλίγματα με μεσαία λήψη.

Στη θέση των ζευγών διακοπών - διόδων χρησιμοποιούνται MOSFET ισχύος γιατί έχουν τη δυνατότητα να εμφανίζουν πολύ μικρή πτώση τάσης όταν βρίσκονται σε αγωγή στην ωμική τους περιοχή. Έχουν ακόμη το πλεονέκτημα της εύκολης οδήγησης και συνήθως περιέχουν μια δίοδο τοποθετημένη παράλληλα στην παρασιτική δίοδο που δημιουργείται με την κατασκευή τους. Ένα τέτοιο MOSFET οδηγείται σε αγωγή με ένα θετικό παλμό και αποκόπτεται με μηδενική τάση ή με αρνητικό παλμό. Ένας μόνο μετασχηματιστής πολλών τυλιγμάτων μπορεί να παράγει και τα τρία αυτά επίπεδα τάσης και να οδηγήσει όλους τους διακόπτες – MOSFET που φαίνονται στο Σχ. 3.5. Όλοι οι διακόπτες είναι ανοικτοί, όταν η τάση είναι μηδενική. Οι διακόπτες  $S_{i1}$  και  $S_{i3}$  κλείνουν με ένα θετικό παλμό και ανοίγουν με ένα αρνητικό, ο οποίος στη συνέχεια κλείνει τους διακόπτες  $S_{i2}$  and  $S_{i4}$ . Στη περίπτωση που η μέθοδος χρησιμοποιηθεί σε φορητά εργαλεία, όπου το βάρος είναι μια σημαντική παράμετρος, τότε το τύλιγμα ζεύξης υπομονάδας μπορεί να καταργηθεί. Το υπόλοιπο κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για εξίσωση της εκφόρτισης των στοιχείων και οι διακόπτες MOSFET μπορούν να οδηγηθούν απλά, χρησιμοποιώντας ένα δεύτερο μετασχηματιστή πολλών τυλιγμάτων που οδηγείται από ένα πολυδονητή ο οποίος τροφοδοτείται από το διακόπτη τροφοδοσίας του εργαλείου.

### **3.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ**

Για να προκληθεί εξίσωση κατά την εκφόρτιση, οι διακόπτες  $S_{i1}$ ,  $S_{i3}$  και οι διακόπτες  $S_{i2}$ ,  $S_{i4}$  κλείνουν και ανοίγουν εναλλακτικά. Στην περίπτωση αυτή, κάθε στοιχείο βρίσκεται συνδεδεμένο σε κάθε χρονική στιγμή στο ήμισυ ενός τυλίγματος με μεσαία λήψη. Επειδή όλα τα τυλίγματα με μεσαία λήψη είναι πανομοιότυπα, οι τάσεις στα άκρα τους είναι ίσες και συνεπώς όλα τα στοιχεία εκφορτίζονται έχοντας την ίδια τάση. Όταν τα στοιχεία εκφορτίζονται με την ίδια τάση, δεν παρουσιάζεται πρόβλημα, γιατί το ρεύμα που συνεισφέρουν στο φορτίο καθορίζεται από την εσωτερική τους αντίσταση. Η εσωτερική τους αντίσταση αυξάνεται απότομα καθώς αυτά πλησιάζουν στο γόνατο της χαρακτηριστικής εκφόρτισης. Έτσι τελικά το ρεύμα ελέγχεται ώστε όλα τα στοιχεία να εκφορτίζονται σχεδόν ταυτόχρονα. Με τον τρόπο αυτό, η συνολική τάση του συσσωρευτή παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι τη στιγμή της πλήρους εκφόρτισής της, γιατί κάτω από αυτές τις συνθήκες δεν μπορεί να υπάρξει ανάστροφη πόλωση των στοιχείων. Έτσι τελικά μπορεί να επιτευχθεί βαθιά εκφόρτιση σε στοιχεία με αλκαλικό ηλεκτρολύτη και να αποφευχθεί ο σχηματισμός δενδρίτη.

### **3.3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΦΟΡΤΙΣΗ**

Η φόρτιση, όταν στο συσσωρευτή δεν υπάρχουν βραχυκυκλωμένα στοιχεία, μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις. Μια χονδρική φόρτιση με ταυτόχρονη παρακολούθηση της τάσης των στοιχείων και μια φάση εξίσωσης της φόρτισης που ξεκινά τη στιγμή που κάποιο στοιχείο φθάσει την προκαθορισμένη τάση κατωφλίου. Κατά τη διάρκεια και των δύο φάσεων της φόρτισης, οι διακόπτες μπορούν να είναι όλοι ανοιχτοί. Έτσι στη χονδρική φάση φόρτισης τα στοιχεία φορτίζονται με το ίδιο ρεύμα (συνδεδεμένα σε σειρά), ενώ στη φάση της εξίσωσης φόρτισης, φορτίζονται με την ίδια τάση με τη βοήθεια ενός ειδικού μετατροπέα (ramp converter) που συνδέεται στα παραλληλισμένα τυλίγματα ζεύξης υπομονάδας και με ελεγχόμενο ρεύμα. Στην περίπτωση που υπάρχουν βραχυκυκλωμένα στοιχεία στον συσσωρευτή, αυτά απομονώνονται με τη χρήση ειδικών ηλεκτρομηχανικών ασφαλειών που ελέγχονται από ρεύμα και είναι συνδεδεμένες σε σειρά με κάθε στοιχείο συσσωρευτή. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος εξίσωσης από τη φύση της ρυθμίζει την τάση στα άκρα του απομονωμένου στοιχείου και έτσι εξασφαλίζει σε ολόκληρο το σύστημα αντοχή σε σφάλμα. Ένα σύστημα διαχείρισης συσσωρευτή (BMS) μπορεί να ενσωματώσει την προτεινόμενη μέθοδο εξίσωσης φόρτισης – εκφόρτισης και μπορεί να ελέγχει τις

ηλεκτρομηχανικές ασφάλειες. Η μέτρηση του ρεύματος των στοιχείων μπορεί να γίνει έμμεσα, χρησιμοποιώντας ένα κύριο αισθητήριο ρεύματος του συσσωρευτή και ένα αισθητήριο ρεύματος για κάθε ζεύγος διακόπτη – διόδου.

Κατά τη φάση της φόρτισης, στην περίπτωση που υπάρχουν ανοικτοκυκλωμένα στοιχεία, οι διακόπτες λειτουργούν όπως και στην περίπτωση της εκφόρτισης, ρυθμίζοντας την τάση στα άκρα των ανοικτοκυκλωμένων στοιχείων και παρέχοντας συνεχή τάση με χαμηλή κυμάτωση. Παρά τη μικρή απώλεια στη συνολική τάση του συσσωρευτή, τα ανοικτοκυκλωμένα στοιχεία πρέπει να αντικαθίστανται για να αποφεύγεται η συνεχής λειτουργία του κυκλώματος.

Αναλυτική μαθηματική ανάλυση των παραπάνω, καθώς και προσομοίωσή τους, υπάρχει αναλυτικά στην διδακτορική διατριβή του κ. Χατζάκη Ιωάννη [1]. Επίσης τον μετατροπέα αυτόν και την προτεινόμενη τοπολογία χρησιμοποιήσαμε, με κάποιες αλλαγές – τροποποιήσεις στην παρούσα διπλωματική.

## **Κεφάλαιο 4**

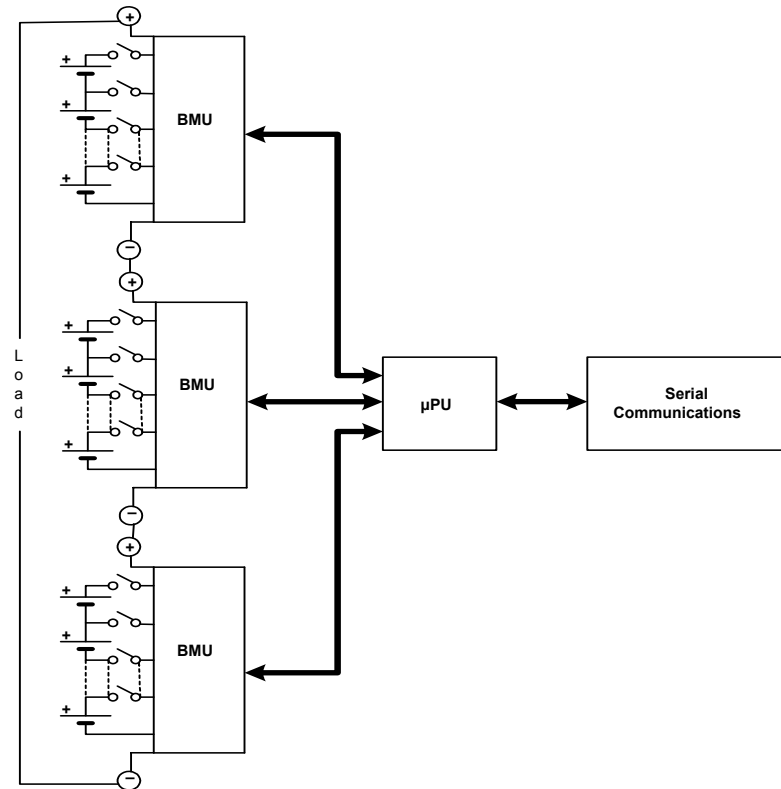
### **ΤΟ BMS ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΚΑΙ Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ**

#### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η τοπολογία για BMS που εξελίσσεται με την παρούσα διπλωματική είχε SBM σχεδιασμένο για τη διαχείριση ενός συσσωρευτή 6 στοιχείων [1]. Το νέο BMS χρησιμοποιεί SBM σχεδιασμένο ώστε να διαχειρίζεται τρεις συσσωρευτές μολύβδου των 6 στοιχείων (συνολική τάση μπαταρίας 36V). Επίσης ως master module χρησιμοποιούμε έναν υπολογιστή, ο οποίος μπορεί να αντικατασταθεί μελλοντικά όπως θα αναφερθεί στο κεφάλαιο 6.

#### **4.2 ΤΟ SBM ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ**

Όπως προαναφέρθηκε το σύστημα που υλοποιήθηκε αποτελείται από τρεις μονάδες διαχείρισης συσσωρευτή (BMUs) και μία μονάδα μικροεπεξεργαστή (μPU) που τις ελέγχει. Το block diagram της προτεινόμενης τοπολογίας φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχ. 4.1 SBM block diagram

Η τροποποίηση αυτή στην τοπολογία παρέχει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε σφάλμα (fault tolerance) γιατί αποκλείει την περίπτωση να μείνει ο επεξεργαστής του SBM χωρίς τροφοδοσία στη περίπτωση που εμφανιστεί βλάβη και για κάποιο λόγο αργήσει η εκκίνηση της εξίσωσης των τάσεων. Όπως και το αρχικό μοντέλο του BMS έτσι και αυτό το μοντέλο παρέχει την δυνατότητα εξίσωσης των στοιχείων των συσσωρευτών κατά την φόρτιση, καθώς και κατά την εκφόρτιση, όπως επίσης και την δυνατότητα αποσύνδεσης (βλάβης), ενός ή περισσότερων στοιχείων, ακόμα και ολόκληρου του συσσωρευτή, από το σύστημα, χωρίς αυτό να σταματήσει να είναι λειτουργικό. Επίσης διαθέτει οπτική απόζευξη μεταξύ των modules και της μονάδας του  $\mu P$ , το οποίο βοηθάει την αποφυγή καταστροφικής αλληλεπίδρασης των μονάδων, σε τυχόν δυσλειτουργία.

Το παρόν BMS διαθέτει όλες τις ιδιότητες που πρέπει να έχει ένα τέτοιο σύστημα, όπως αυτές αναφέρονται στην παράγραφο 1.5. Η ανάκτηση δεδομένων και η επικοινωνία με τον έξω κόσμο έχει γίνει μέσω ενός υπολογιστή (από την σειριακή θύρα), ο οποίος προγραμματιζόμενος κατάλληλα μας παρέχει την δυνατότητα να παρατηρούμε real time το σύστημα, καθώς και την δυνατότητα καταγραφής των μετρήσεων σε ένα αρχείο ενόσω το σύστημα είναι ενεργό, αλληλεπιδρώντας με τον  $\mu P$ .

#### **4.2.1 Η ΜΟΝΑΔΑ ΤΟΥ $\mu$ P**

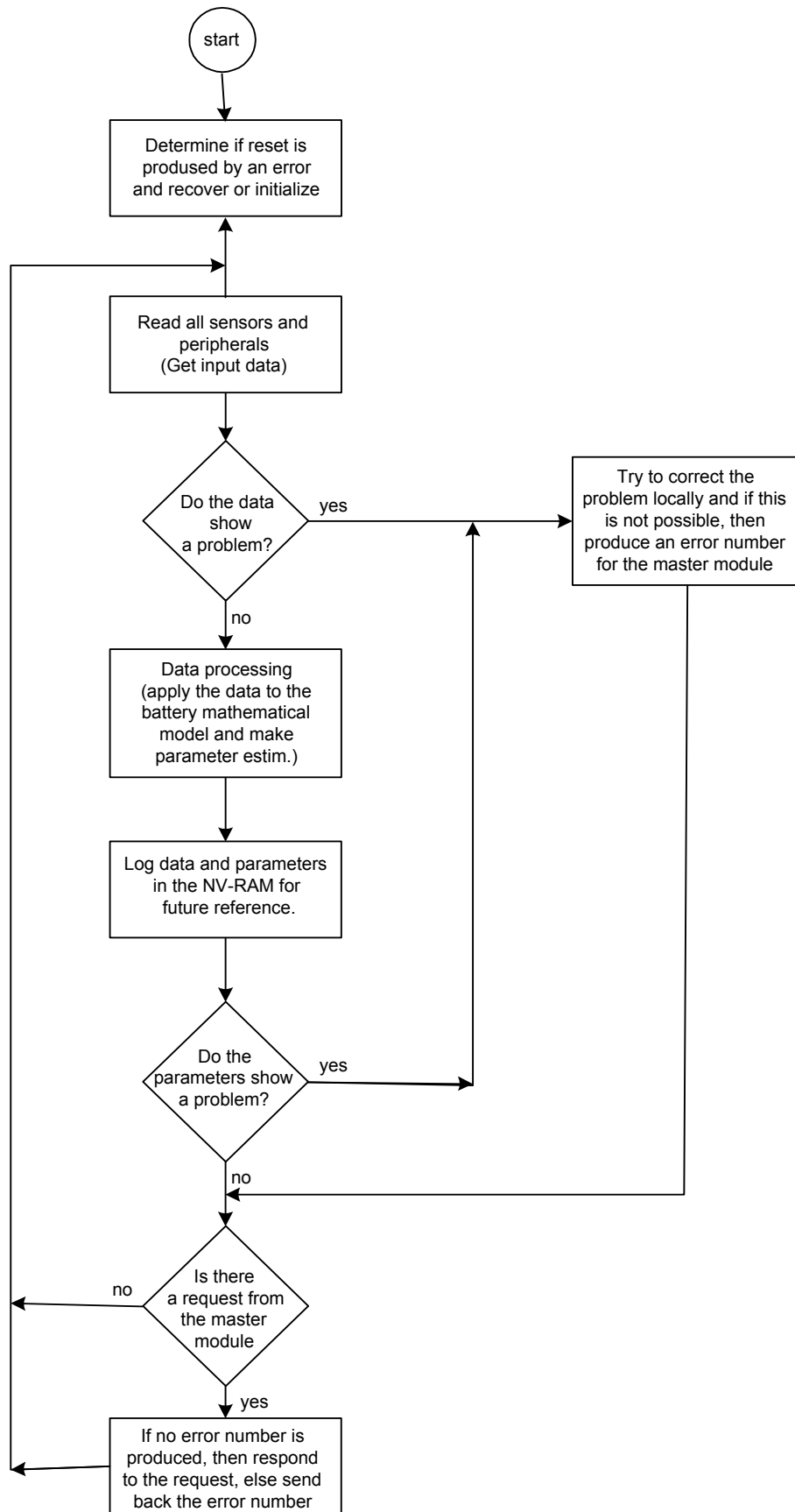
Η μονάδα του μικροεπεξεργαστή είναι πολύ βασικό κομμάτι του συστήματος, γιατί αυτή ελέγχει όλα τα σήματα τα οποία ενεργοποιούν τις λειτουργίες των BMU όπως το equalization, καθώς και την ανάκτηση των δεδομένων και την διεπικοινωνία με τον υπολογιστή.

Η μονάδα αυτή έχει ως βασικό εξάρτημα τον μικροεπεξεργαστή, ο οποίος είναι ο DS5000FP. Η Dallas τον χορηγεί μαζί με 64 K NV-RAM, ρολόι πραγματικού χρόνου και μπαταρία λιθίου σε ένα ενοποιημένο module. Το γεγονός αυτό καθιστά το module αυτό κατάλληλο για την συγκεκριμένη εφαρμογή, γιατί υπάρχει η μπαταρία η οποία χρησιμεύει στην διατήρηση των δεδομένων στις μνήμες μέχρι και 10 χρόνια, καθώς επίσης και σε περίπτωση βλάβης αποθηκεύεται στην μνήμη το αίτιο που την προξένησε και έτσι μπορούμε να επιδιορθώσουμε τη βλάβη και γενικότερα να ξέρουμε τι έγινε ανά πάσα στιγμή στο σύστημα.

Επίσης οι πόροι που μας παρέχονται από το module είναι υπέρ αρκετοί. Ο μικροεπεξεργαστής δεν δεσμεύει κανένα από τα ports που έχει για να επικοινωνήσει με την εξωτερική μνήμη, η οποία είναι αρκετά μεγάλη και έτσι μας παρέχει την δυνατότητα εξαιρετικά μεγάλων προγραμμάτων. Ταυτόχρονα διαθέτει και watchdog timer οποίος χρησιμεύει στο να μην σταματάει το σύστημα σε πιθανό λάθος, γιατί ενεργοποιεί το reset αν το σύστημα μείνει αδρανές για καθορισμένο χρονικό διάστημα.

#### **4.2.2 Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΟΥ ΜΙΚΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ**

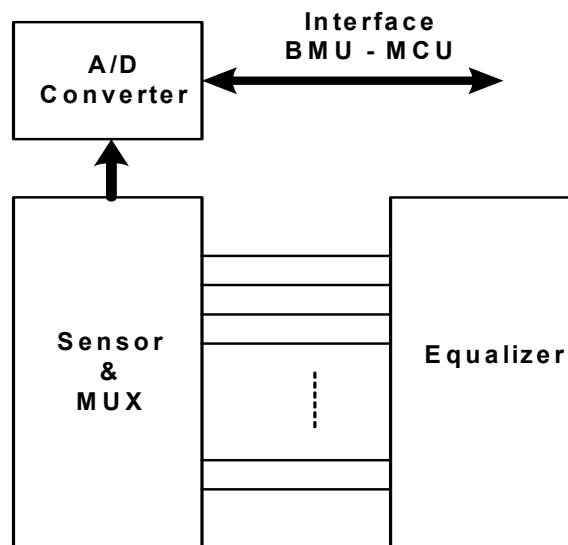
Ο μικροεπεξεργαστής είναι συμβατός με τον 8051 και έχουν ίδιο instruction set. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε είναι βασισμένος στον κορμό του αλγορίθμου του προηγούμενου BMS [1], με κατάλληλες τροποποιήσεις έτσι ώστε να μπορεί να διαχειριστεί και τους τρεις συσσωρευτές. Τα βήματα του αλγορίθμου φαίνονται στο σχήμα 4.2.



Σχ. 4.2 Flow chart του κώδικα του SBM

### 4.2.3 Η BMU

Η μονάδα αυτή είναι υπεύθυνη για την εξίσωση των στοιχείων κάθε συσσωρευτή όταν της σταλεί το κατάλληλο σήμα από την μονάδα του μικροεπεξεργαστή. Στη μονάδα αυτή του συστήματος βρίσκεται ο αισθητήρας του ρεύματος, ο A/D converter από τον οποίο συλλέγουμε τα δεδομένα μας, ένας πολυπλέκτης από τον οποίο επιλέγουμε ποια δεδομένα θέλουμε να σταλούν στο μικροεπεξεργαστή και ένας DC/DC converter. Η μονάδα αυτή φαίνεται στο σχήμα 4.3.



Σχ. 4.3 Τα μέρη της BMU

### 4.3 ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Οι δύο παραπάνω μονάδες, BMU και μPU, συνδέθηκαν για να δώσουν την τελικό σύστημα, το οποίο και φαίνεται στην Φωτ. 4.1. Στην φωτογραφία φαίνονται οι τέσσερις πλακέτες του συστήματος: η πλακέτα με το module του μικροεπεξεργαστή (επίπεδο 1) από την οποία ξεκινούν τρεις δίαυλοι επικοινωνίας με τις BMU οι οποίες φαίνονται στη συνέχεια, (επίπεδο 2) και τέλος, στο βάθος, οι συσσωρευτές μολύβδου ανοιχτού τύπου οι οποίοι ενώνονται στοιχείο – στοιχείο με τις BMUs. Επίσης βλέπουμε και το καλώδιο της σειριακής με το οποίο συνδέεται το σύστημα με τον έξω κόσμο (υπολογιστής). Στην υλοποίηση αυτή για πρώτη φορά εξετάστηκε η συμπεριφορά του τυλίγματος ζεύξης υπομονάδων του εξισωτή εκφόρτισης με εξαιρετικά τελικά αποτελέσματα.





Σχ. 4.4 Τελικό σύστημα (SBM)

#### 4.4 ΕΠΕΚΤΑΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στη σχεδίαση του συστήματος έχει φυσικά ληφθεί υπόψη η επεκτασιμότητα του συστήματος. Η μονάδα που έχει υλοποιηθεί έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει τρεις συσσωρευτές σε σειρά, και με σύνδεση ικανού αριθμού μονάδων μπορεί τελικά να υποστηριχτεί η διαχείριση μιας οσοδήποτε μεγάλης συστοιχίας στοιχείων μπαταρίας. Έτσι το σύστημα μπορεί να γίνει πολύ μεγαλύτερο.

## **Κεφάλαιο 5**

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

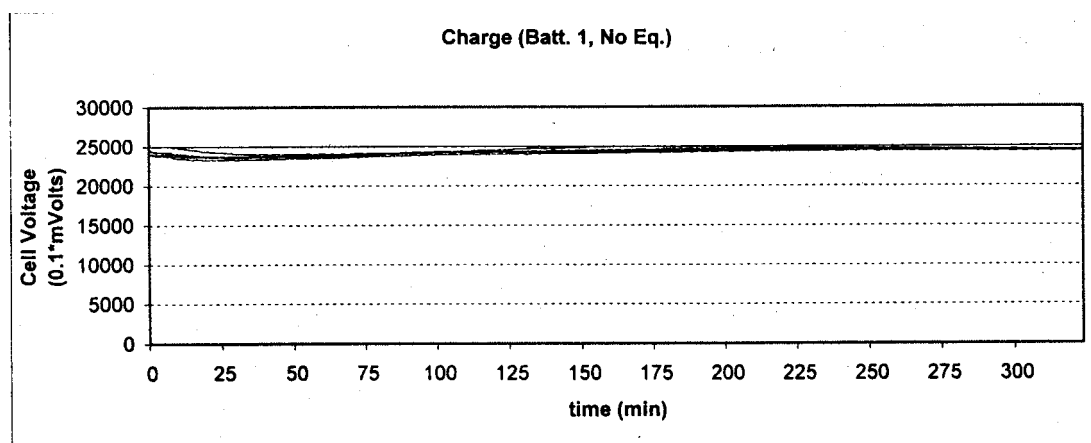
#### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το σύστημα το οποίο αναπτύχθηκε, υπέβαλε σε αρκετές και εξαντλητικές δοκιμές τους συσσωρευτές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εξακρίβωση ότι το παρόν BMS λειτουργεί όπως αναμένεται σε δεδομένες συνθήκες, καθώς και την απόκτηση πολύτιμης εμπειρίας πάνω στην συμπεριφορά των συσσωρευτών σε ακραίες καταστάσεις της φόρτισης και της εκφόρτισης. Τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάζονται παρακάτω, εκτός από την ορθή λειτουργία του συστήματος, πιστοποιούν και τα πλεονεκτήματα χρήσης της εξίσωσης τόσο κατά τη φόρτιση όσο και κατά την εκφόρτιση των συσσωρευτών.

#### **5.2 ΦΟΡΤΙΣΗ – ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ**

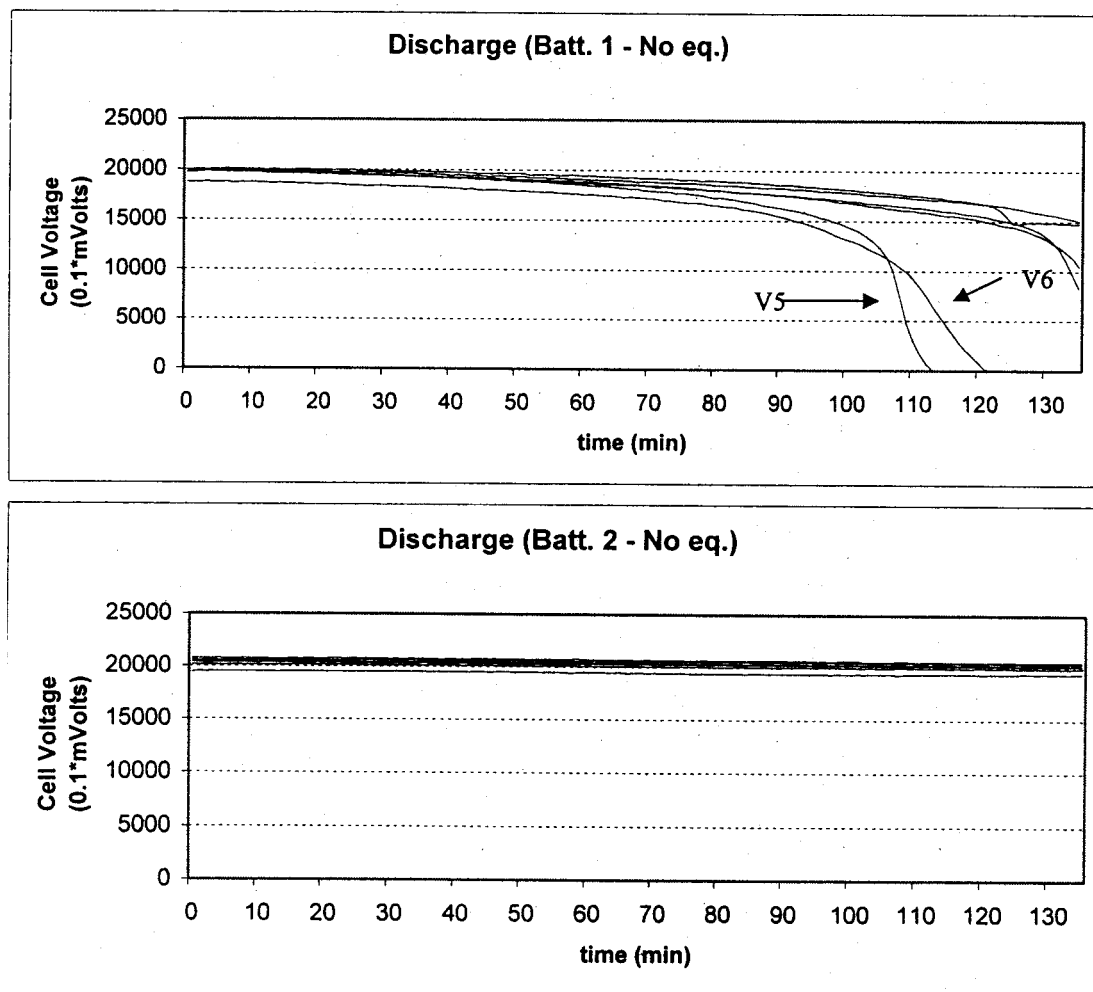
Αρχικά οι μετρήσεις έγιναν χωρίς να τεθεί σε λειτουργία ο εξισωτής του συστήματος, δηλαδή δεν γίνεται εξίσωση των τάσεων των στοιχείων των συσσωρευτών όταν αυτή χρειάζεται. Με τον τρόπο αυτό έγινε μία φόρτιση σταθερού ρεύματος - σταθερής τάσης (Constant Voltage – Constant Current) και μία εκφόρτιση με φορτίο 36 Volt / 135 Watt. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στις παρακάτω γραφικές παραστάσεις.

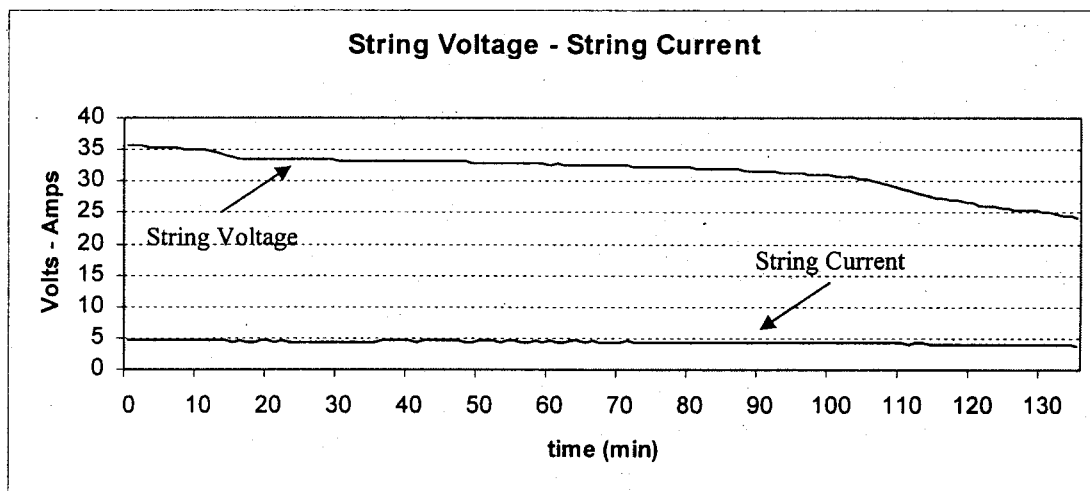
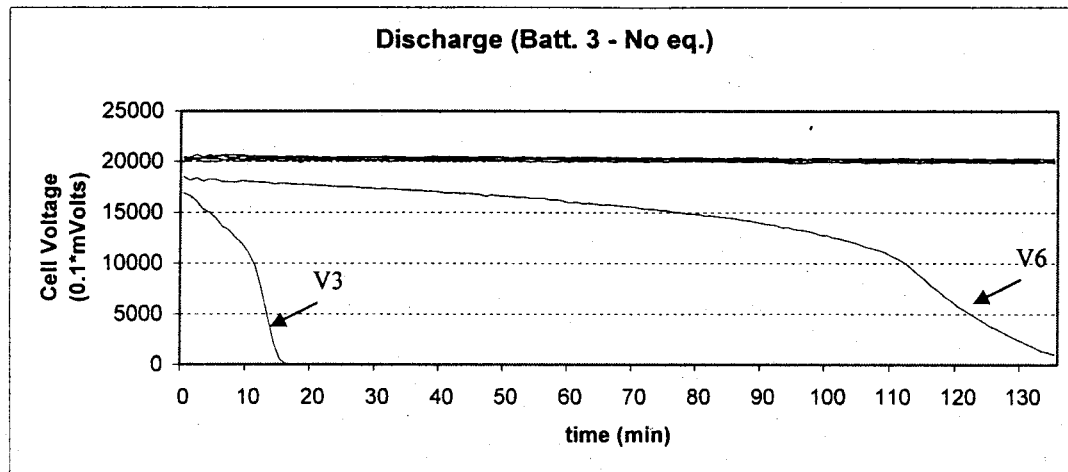
- **Χαρακτηριστικές φόρτισης χωρίς equalization**



Παρατηρούμε από τις χαρακτηριστικές φόρτισης ότι κάποια στοιχεία των συσσωρευτών αναπτύσσουν τάση μεγάλη στα άκρα τους (2,5 Volt), η οποία είναι καταστροφική γι' αυτά, γιατί υπερφορτίζονται με αποτέλεσμα να εμφανίζουν ηλεκρόλυση που οδηγεί στο στέγνωμά τους και τη γρήγορη καταστροφή τους. Το γεγονός αυτό δεν είναι τόσο σημαντικό στους συσσωρευτές ανοιχτού τύπου όσο είναι στους συσσωρευτές κλειστού τύπου, γιατί στους πρώτους είναι δυνατή η συμπλήρωση του χαμένου νερού του ηλεκτρολύτη, ενώ στους δεύτερους η απώλεια του νερού του ηλεκτρολύτη οδηγεί στη γρήγορη αντικατάστασή τους. Αυτό το φαινόμενο, της υπερφόρτισης, όπως θα δειχτεί και παρακάτω, χρησιμοποιώντας την κατασκευή που υλοποιήθηκε, εξαλείφεται.

- Χαρακτηριστικές εκφόρτισης χωρίς equalization





Παρατηρούμε από τις χαρακτηριστικές εκφόρτισης ότι κάποια στοιχεία, όπως τα 5 και 6 του πρώτου συσσωρευτή και τα 3 και 6 του τρίτου, εκφορτίζουν πολύ σύντομα με αποτέλεσμα τα στοιχεία αυτά να πολώνονται ανάστροφα τελικά και να οδηγούνται σύντομα στην καταστροφή. Το φαινόμενο αυτό εκτός από την καταστροφή των στοιχείων έχει ως αποτέλεσμα και την αισθητά πιο γρήγορη πτώση της τάσης της συστοιχίας με αποτέλεσμα το φορτίο να τροφοδοτείται ικανοποιητικά για λιγότερο χρόνο, από ότι θα θέλαμε. Τέτοια φαινόμενα, όπως η ανάστροφη πόλωση των στοιχείων αποτρέπονται με τη βοήθεια του BMS που υλοποιήθηκε.

### 5.3 ΦΟΡΤΙΣΗ – ΕΚΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΞΙΣΩΣΗΣ

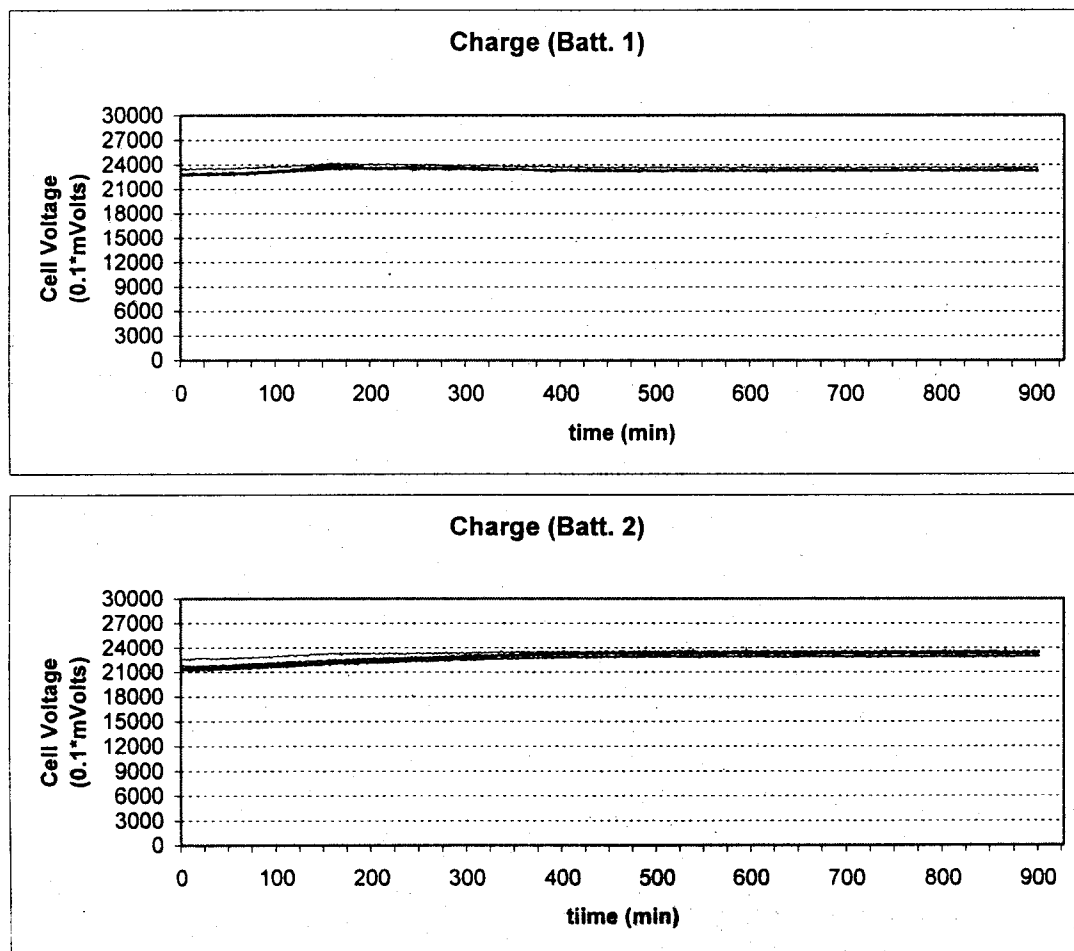
Στη συνέχεια επαναλήφθηκε η παραπάνω διαδικασία (φόρτιση - εκφόρτιση), αλλά κάνοντας χρήση του εξισωτή, δηλαδή με εξίσωση των στοιχείων των συσσωρευτών όταν χρειάζεται. Επίσης, αυτό εφαρμόστηκε και με έναν συσσωρευτή αποσυνδεδεμένο (περίπτωση που μπορεί να εμφανιστεί όταν υπάρχει στη συστοιχία των συσσωρευτών ένας χαλασμένος συσσωρευτής). Τα αποτελέσματα που

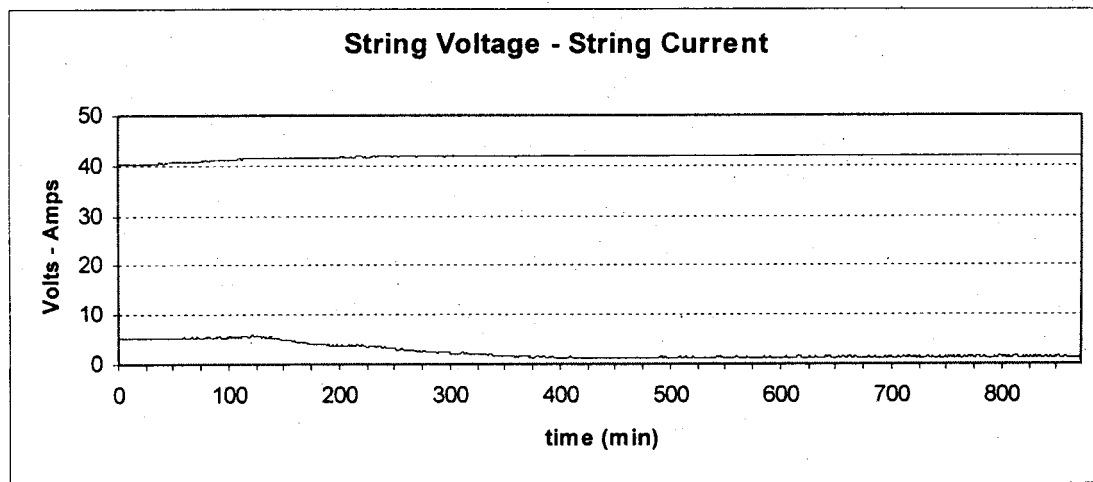
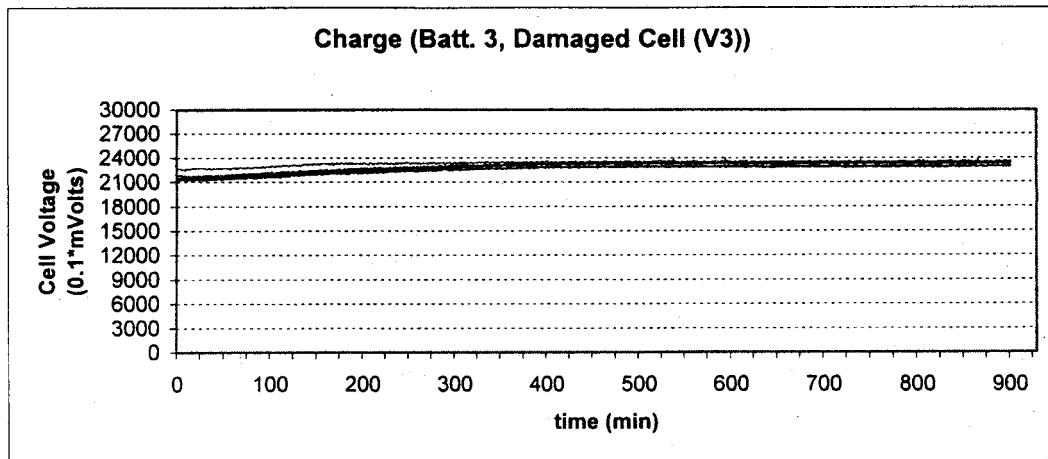
προέκυψαν, όπως θα φανεί στη συνέχεια, αποδεικνύουν την χρησιμότητα της μεθόδου για την διατήρηση της υγείας των συσσωρευτών της συστοιχίας, καθώς και για την ομαλή λειτουργία και παροχή τάσης από την συστοιχία όταν υπάρχει βλάβη σε συσσωρευτή.

### 5.3.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ BMS ΣΕ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Ακολουθούν οι χαρακτηριστικές φόρτισης – εκφόρτισης των συσσωρευτών παρέχοντας εξίσωση των τάσεων των στοιχείων.

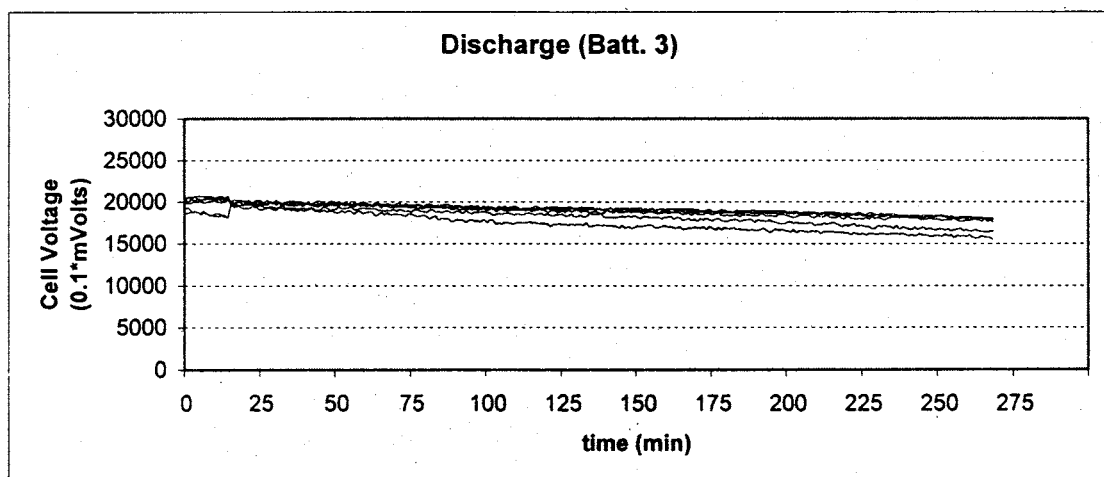
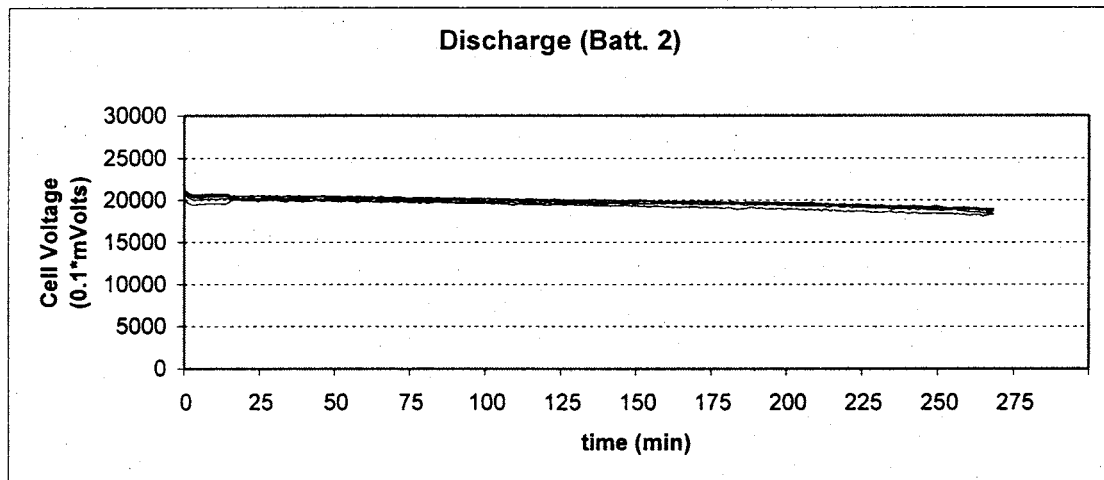
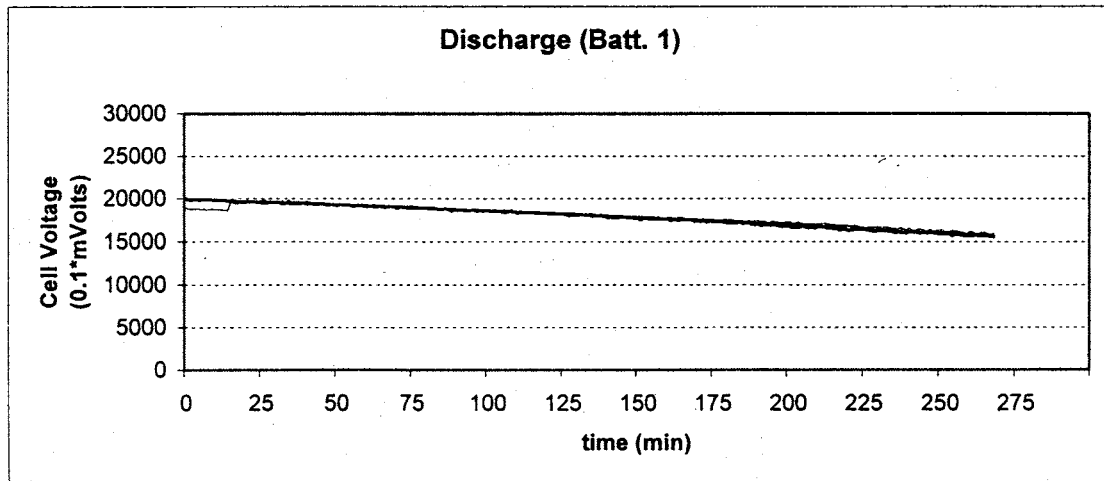
- Χαρακτηριστικές φόρτισης με equalization

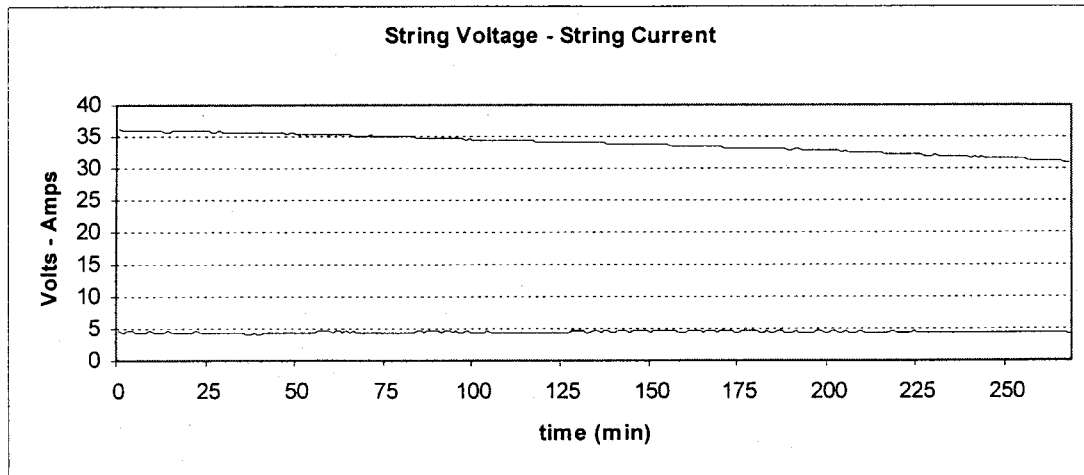




Παρατηρεί κανείς λοιπόν ότι με τη χρήση εξίσωσης τα στοιχεία κατά την φόρτιση μένουν **όλα** μέσα σε ανεκτά πλαίσια τάσης για την ασφάλειά τους, σε αντίθεση με την περίπτωση που δεν τη χρησιμοποιούμε. Επίσης παρατηρούμε ότι το συνολικό ρεύμα μειώνεται όσο η τάση της μπαταρίας ανεβαίνει όπως ακριβώς αναμενόταν. Με αυτόν τον τρόπο συνεπώς τα στοιχεία διατηρούνται για περισσότερο χρόνο σε καλή κατάσταση και έτσι η συστοιχία αντέχει πιο πολύ στο χρόνο.

- Χαρακτηριστικές εκφόρτισης με equalization





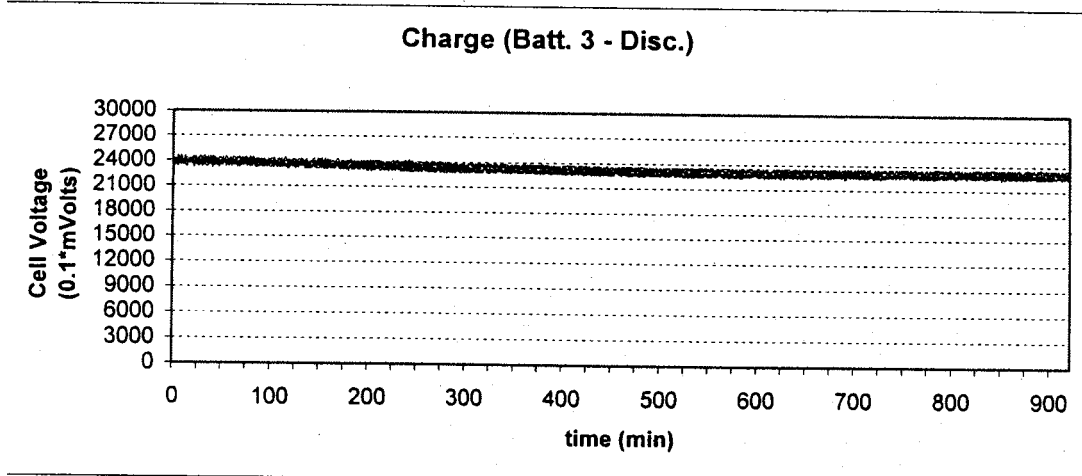
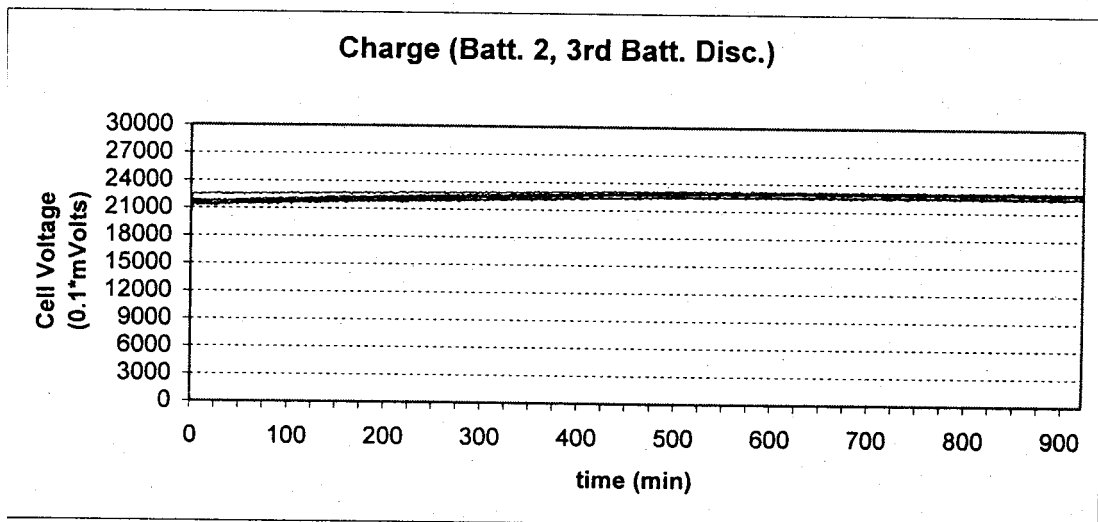
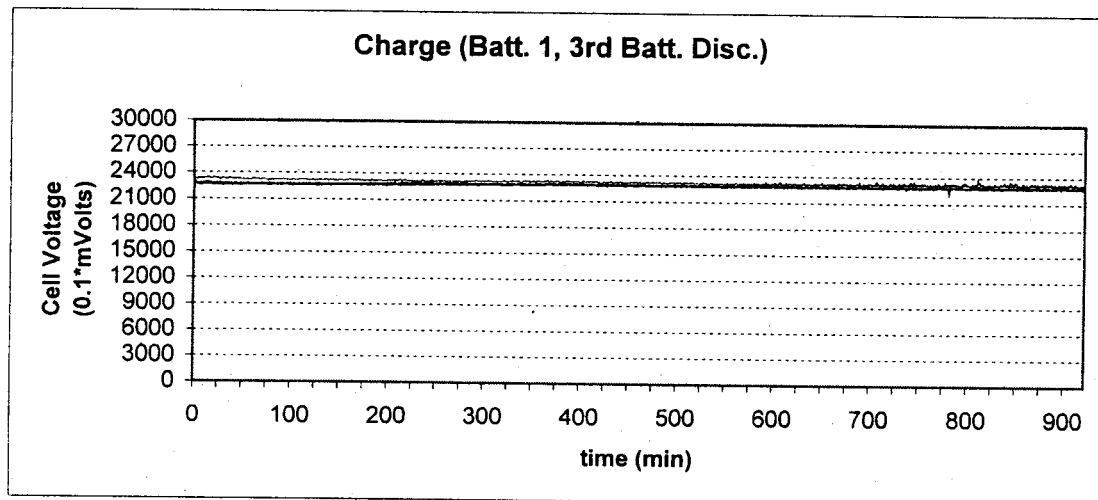
Βλέπουμε λοιπόν από τις χαρακτηριστικές ότι το σύστημα αποδίδει πάρα πολύ καλά. Ελέγχει τις τάσεις και όταν αυτές ξεφύγουν από κάποιο όριο που έχουμε θέσει εμείς (χρονική στιγμή 17). Αρχίζει η εξίσωση των τάσεων, η οποία από ότι φαίνεται στα σχήματα καταφέρνει να διατηρήσει την τάση σε υψηλά επίπεδα ακόμα και στα πιο αδύναμα στοιχεία (βλέπε εκφόρτιση χωρίς εξίσωση). Επίσης βλέπουμε ότι η συνολική τάση της συστοιχίας μειώνεται πολύ πιο ομαλά από ότι προηγουμένως, καθώς και ότι η διαδικασία της εκφόρτισης με το ίδιο ακριβώς φορτίο διαρκεί αρκετά περισσότερο. Πράγμα που σημαίνει περισσότερη διάρκεια λειτουργίας της οποιασδήποτε συστοιχίας που ελέγχεται από ένα BMS.

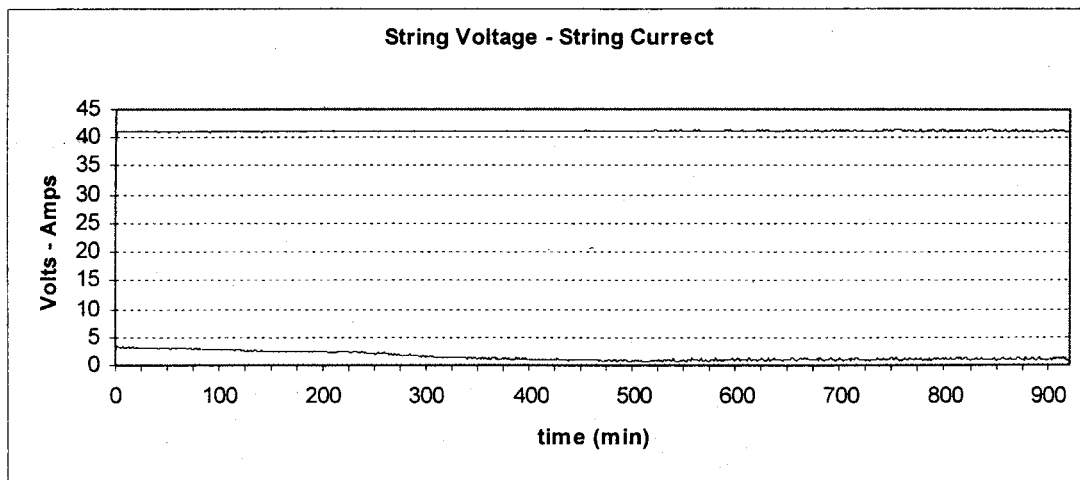
### **5.3.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ BMS ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ**

Ας δούμε τι γίνεται τώρα αν υποθέσουμε ότι ένας συσσωρευτής έχει υποστεί κάποια βλάβη και αποσυνδέεται από την συστοιχία. Οι μετρήσεις και οι χαρακτηριστικές που προέκυψαν φαίνονται παρακάτω.



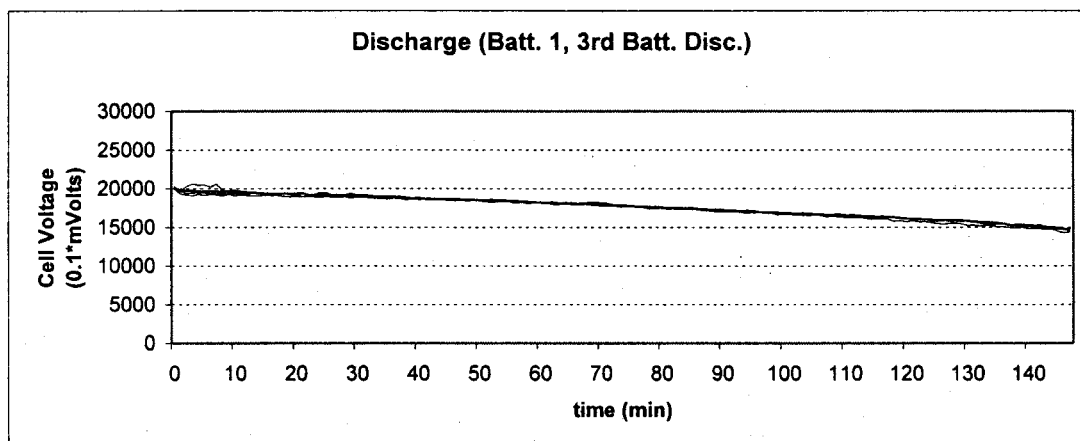
- Χαρακτηριστικές φόρτισης με έναν αποσυνδεδεμένο συσσωρευτή

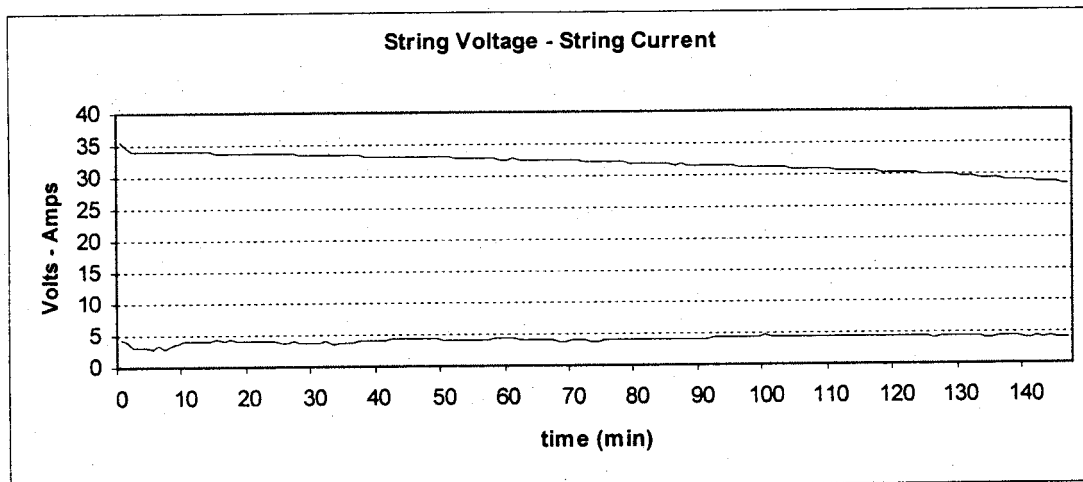
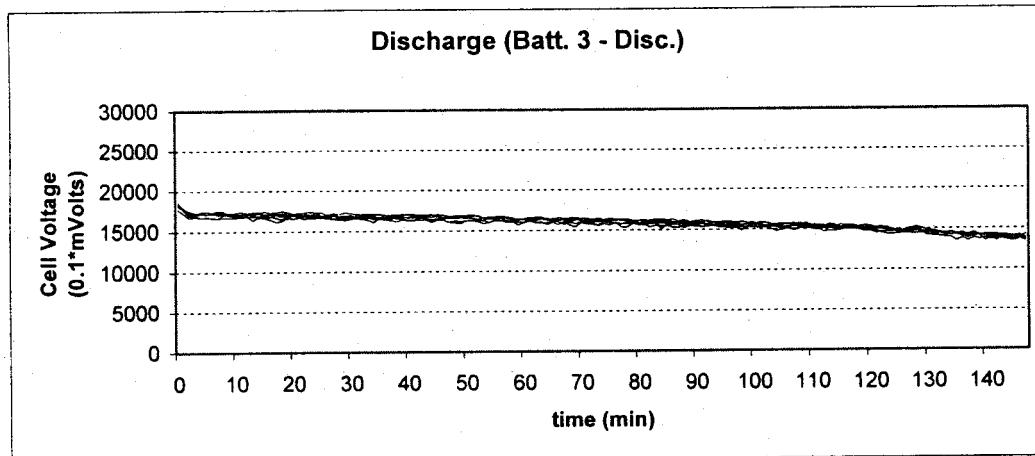
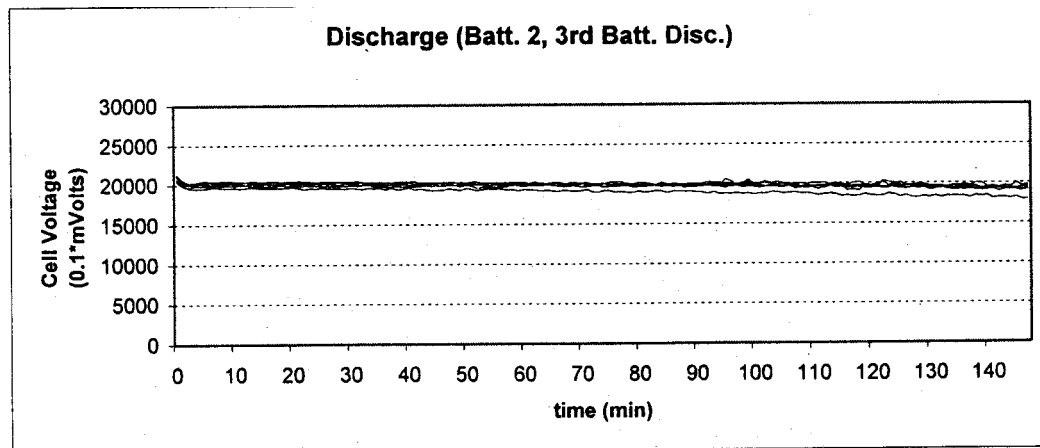




Παρατηρούμε ότι το σύστημα δουλεύει κατά την φόρτιση ομαλά σαν να υπάρχει στη θέση του ο αποσυνδεδεμένος συσσωρευτής. Ακόμα περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση της εκφόρτισης που ακολουθεί.

- **Χαρακτηριστικές εκφόρτισης με έναν αποσυνδεδεμένο συσσωρευτή**





Παρατηρούμε από τις χαρακτηριστικές ότι το σύστημα παρουσιάζει τάση κανονική στο σημείο που λείπει ο συσσωρευτής κι έτσι μπορούμε να τροφοδοτήσουμε την μονάδα μας ικανοποιητικά, αλλά για λιγότερο χρόνο. Σε άλλη περίπτωση όμως αυτό δεν θα ήταν εφικτό. Η τάση αυτή προέρχεται από τις άλλες μπαταρίες της συστοιχίας.

## **5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Από τα παραπάνω είναι εύκολο κανείς να κατανοήσει την αξία που έχει η χρήση ενός BMS με δυνατότητα εξίσωσης φόρτισης και εκφόρτισης για την διαχείριση μιας συστοιχίας συσσωρευτών. Χρησιμοποιώντας το προλαμβάνουμε τους συσσωρευτές από τη γρήγορη γήρανση και καταστροφή, μπορούμε δυναμικά, να αποσυνδέσουμε μια μπαταρία από τη συστοιχία όταν έχει υποστεί βλάβη χωρίς (σημαντικότατο) να χρειάζεται να σταματήσουμε να παρέχουμε τάση από την συστοιχία. Για ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενός τέτοιου BMS.

## **Κεφάλαιο 6**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ**

#### **6.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Τα τελευταία χρόνια η χρήση συσσωρευτών έχει αυξηθεί και οι συσσωρευτές είναι πια απαραίτητοι όλο και περισσότερο γιατί οι φορητές συσκευές καθώς και οι απαιτήσεις τους σε τροφοδότηση, αυξάνονται συνεχώς με αποτέλεσμα την απαραίτητη εξέλιξη των συσσωρευτών αυτών καθ'αυτών και μεθόδων διαχείρισής τους για την καλύτερη και ασφαλέστερη λειτουργία τους. Μέθοδοι λοιπόν σαν κι αυτή που παρουσιάσαμε παραπάνω είναι αναγκαίες και παρουσιάζουν εξέλιξη.

#### **6.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Το BMS αυτό, παρόλο που η λειτουργία του ήταν άψογη, υπάρχει δυνατότητα βελτίωσης – τροποποίησης περαιτέρω. Για παράδειγμα θα μπορούσε να βελτιωθεί η ακρίβεια του συστήματος, αν χρησιμοποιηθεί A/D converter μεγαλύτερης ακρίβειας. Θα μπορούσε το μέγεθος της κατασκευής να γίνει σημαντικά μικρότερο αν χρησιμοποιηθούν εξαρτήματα τεχνολογίας SMD.

#### **6.3 ΕΠΙΛΟΓΟΣ**

Η συμβολή του παρόντος BMS είναι η διαφοροποίηση της τοπολογίας του προηγούμενου [1], έτσι ώστε να βελτιωθεί η αντοχή του σε σφάλματα (fault tolerance). Έδειξε ότι το σύστημα λειτουργεί ικανοποιητικά και σε «αντίξοες συνθήκες» (καταστροφή στοιχείου ή συσσωρευτή), επιβεβαιώνοντας την ορθότητα των ισχυρισμών του προηγούμενου BMS [1]. Επιβεβαίωσε την επεκτασιμότητα του συστήματος σε περισσότερους του ενός συσσωρευτές.

Το πεδίο με το οποίο ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον και εξέλιξη, καθώς οι ανάγκες για συσσωρευτές αυξάνονται, και ειδικά για επαναφορτιζόμενους.

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Χατζάκης Ιωάννης 'Σύστημα Διαχείρισης Συσσωρευτών', Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Ελλάδα, 2002.
- [2] Linden D., "Handbook of Batteries", Second Edition, McGRAW-HILL INC, ISBN 0-07-037921-1, pp xvii.
- [3] T. Y. Lee, N. Chen, "Optimal capacity of the battery energy storage system in a power system", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 8 No. 4, Dec 1993.
- [4] R. Reckrodt, M. Anderson, R. Kluczny, "Economic models for battery energy storage: Improvements for existing methods", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 5, No. 4, Dec 1990.
- [5] S. Eckroad, B. Radimer, "Review of engineering design considerations for battery energy management systems", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, June 1991.
- [6] R. Solieau, "A Diagnostic Testing Program for Large Lead Acid Storage Battery Banks", IEEE Trans on Industry Applications, Vol. 30, No. 4 Jan/Feb 1994.
- [7] J. Disosway, "Comparison of service test results with analytical predictions for lead-acid battery", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3, Sep 1992.
- [8] W. Lynch, M. Casacca, Z. Salameh, "Linear Current Mode Controller for Battery Test Applications", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 8, No. 1, March 1993.
- [9] J. Aylor, A. Thieme, W. Johnson, "A Battery State-of-Charge Indicator for Electric Wheelchairs", IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol. 39, No. 5, Oct. 1992.
- [10] J. Mills, "Results with advanced, in situ monitoring of electric-vehicle and stationary batteries", Journal of power sources Vol. 78, 1999 p 231-236.
- [11] A. Perra, J. Aguer, "Tracking internal resistance extends life of UPS batteries", Instrumentation & Control Systems Vol. 67 No. 5 1994.

- [12] A. Perra, J. Aguer, "Advanced Battery Monitoring and charging techniques for UPS", Proceedings of the annual battery conference 1994.
- [13] C. Cotton, "Battery impedance monitoring update, predicting battery failure", Proceedings of Power Quality, Sep 1994.
- [14] G. Markle, "AC Impedance testing for Valve Regulated Cells", INTELEC 1992.
- [15] T. Suntio, A. Glad, "The Batteries as a Principal Component in DC UPS Systems", INTELEC 1990.
- [16] F. Vaccaro, J. Mc Andrews, "VRLA Battery Float Operation Management: Specific Controls and Operating Limits", INTELEC 1997.
- [17] G. Markle, "Float behavior of VRLA cells: Theory vs reality", INTELEC 1995.
- [18] S. Misra, A. Williamson, "Impact of Grid Corrosion on Valve Regulated Lead-Acid Battery on Standby Float Service", INTELEC 1995.
- [19] B. Bentley, "Basics of Rechargeable Battery Management", PCIM Oct 1996.
- [20] W. Bentley, D. Heacock, "Battery Management Considerations for Multichemistry Systems", IEEE Aerospace and Electronic System Magazine, Vol. 11, No. 5, 1996.
- [21] "Intelligent battery management", Electronics World & Wireless World, 1993.
- [22] "NiMH and NiCd battery management", Microprocessors and Microsystems Vol. 19 No. 3 Apr 1995.
- [23] D. Heacock, P. Fundaro, "Low cost battery management", 13th annual battery conf. on applications and advantages, Jan 1998.
- [24] K. Halligen, "Advanced battery charging and management", Electronic Product Design, Vol. 16, No. 3, 1995.
- [25] K. Halligen, "State-of-the-Art Battery Charging and Management", International Power Sources Symposium, 1995.

- [26] K. Warlaven, "Lead-Acid Battery Revitaliser", Elektor Electronics, Sep. 2001.
- [27] M. Juzkow, "Development of a BB-2590/U rechargeable lithium-ion battery", Journal of power sources Vol. 80, 1999 p 286-292.
- [28] W. E. Kim, J. M. Ahn, S. W. Choi, B. G. Min, "Intelligent Li Ion Battery Management Based on a Digital Signal Processor for a Moving Actuator Total Artificial Heart", ASAIO Journal, Vol. 43 No. 5 Sep-Oct 1997.
- [29] J. Boscher, P. Marrot, K. Bouridah, "Mathematical Modeling and Expert System for Battery Management", Proceedings of the European Space Power Conference, 1989.
- [30] D. W. Chu, "A mixed-signal controller for intelligent battery management", High Frequency Power Conversion, May 1995.
- [31] Z. Noworolski, "A Microcomputer -Based Battery Management System", INTELEC Nov. 1991.
- [32] Z. Noworolski, "A Microcomputer -Based Battery Management System", Applied Power Electronics Conf., 1991.
- [33] T. Hubert, "A Battery System using Adaptive Run-Time Estimation, Software controlled multi-mode charging and intrinsic diagnostics combine to enhance UPS reliability", High Frequency Power Conversion Proceedings, May 1995.
- [34] "Advanced battery management system ", Australian and Pacific Electrical World, Vol. 60, No. 2, Feb 1995.
- [35] D. Fischer, A. Lohner και P. Mauracher, "Batteriemanagement: Erhöhung der Zuverlässigkeit von USV", ETZ 4/1996.
- [36] E. Karden, P. Mauracher και A. Lohner, "Battery Management System for Energy-Efficient Battery Operation: Strategy and Practical experience", International Electric Vehicle Symposium 1996, vol. 2, pp. 91-98, 1996.



- [37] N. Shirai, M. Nihei, K. Shimitzu, "On-board Battery Management System with SOC Estimation", Trans. of the society of automotive engineers of Japan, v28, No. 3, pp. 83-88, 1997.
- [38] K. Shimitzu, N. Shirai, A. Abudula, "Battery Management System for Electric Vehicles-On the Effect of Cell Based Monitoring", Koenkai Maesurishn, Japan 1998.
- [39] K. Shimitzu, N. Shirai, M. Nihei, "On-board Battery Management System with SOC Indicator", International Electric Vehicle Symposium 1996, vol. 2, pp. 99-104, 1996.
- [40] J. Alzieu, P. Gagnol, H. Smimite, "Development of an on-board charge and discharge management system for electric-vehicle batteries", Journal of Power Sources 53, 1995.
- [41] W. Retzlaff, "BAttery Diagnostic and CHarge EQualizing system (BADICHEQ)", 12th International Electric Vehicle Symposium, 1994.
- [42] J. McAndrews, R. Jones, "A VRLA Battery Management System", INTELEC 1996.
- [43] F. Vaccaro, J. Rhoades, B. Le, "The effect of temperature on VRLA reaction rates and the determination of battery state of charge. Part 2-Fundamental considerations", INTELEC 1997.
- [44] D. Bell, "A Battery Management System", Master Thesis, School of Engineering, University of Queensland, St Lucia, Australia, 7-2-2000.
- [45] A. Jossen, V. Späth, H. Döring, J. Garche, "Reliable battery operation – a challenge for the battery management system", Journal of power sources Vol. 84, 1999 p 283-286.
- [46] S. Piller, M. Perrin, A. Jossen, "Methods for state-of-charge determination and their applications", Journal of power sources Vol. 96, 2001, p 113-120.
- [47] C. Burns, "Automatic individual cell charging in monitoring systems", Battcon 99.

- [48] C. C. Chan, E. W. C. Lo, S. Weixiang, "The available capacity computation model based on artificial neural network for lead-acid batteries in electric vehicles", Journal of power sources Vol. 87, 2000, p 201-204.
- [49] M. Urquidi-Macdonald, N. Bomberger, "Predicting failure of secondary batteries", Journal of power sources Vol. 74, No 1, 1998.
- [50] R. Nailen, "Battery protection - Where Do We Stand?", IEEE Trans on Industry Applications, Vol. 27, No. 4 Jul/Aug 1991.
- [51] C. C. Chan, K. T. Chau, "An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles", IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 1, Feb. 1997.
- [52] K. Hansen, R. Bailey, M. Rykiel, H. Reed, "Battery Management: The Tortoise and Hare Approach to Racing Electric Vehicles", Proceedings of the Annual Battery Conference on Applications and Advances, 1998.
- [53] J. Nelson, W. Bolin, "Basics and Advances in Battery Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 31, No. 2 Mar/Apr 1995.
- [54] M. Weis, "Emerging Trends in UPS Batteries", YUASA/EXIDE, E.E. Times. Jan. 1996"
- [55] S. S. Misra, A. J. Williamson, "Impact of Grid Corrosion in Valve Regulated Lead-Acid Battery on Standby Float Service", INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings) 1995, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 95CH35824, p 360-363.
- [56] W. E. Jones, D. O. Feder, "Float Behavior of VRLA Cells: Theory vs Reality", INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings) 1995, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 95CH35824, p 154-160.
- [57] D. Calasanzio, M. Caselli, J. McDowall, "Understanding VRLA charging and other operational characteristics", IEEE International Communications and Energy Conference 1994, IEEE, Piscataway, NJ, USA, 94CH3469-4, p 176-180.

- [58] H. Surmann, "Genetic Optimization of a Fuzzy System for Charging Batteries", IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 5, Oct. 1996.
- [59] Y. H. Kim, H. D. Ha, "Design of Interface Circuits with Electrical Battery Models", IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 1, Oct. 1997.
- [60] M. Casacca, Z. Salameh, "Determination of Lead-Acid Battery Capacity Via Mathematical Modeling Techniques", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3, Sep 1992.
- [61] Z. Salameh, M. Casacca, W. Lynch, "A mathematical model for lead-acid batteries", IEEE Trans on Energy Conversion, Vol. 7, No. 1, March 1992.
- [62] Weinter and Timmerman, "Effect of Proton Diffusion, Electron conductivity and charge-transfer Resistance on Nickel Hydroxide discharge curves", The journal of Electrochemistry Society, Vol. 141, No. 2, Feb. 1994.
- [63] H. Bergveld, W. Kruijt, P. H. Notten, "Electronic-network modelling of rechargeable NiCd cells and its application to the design of battery management systems", Journal of power sources Vol. 77, 1999 p 143-158.
- [64] D. Baert, A. Vervaet, "Lead – acid battery model for the derivation of Peukert's law", Electrochimica Acta, 1999, Vol 44, pp. 3491-3504.
- [65] J. Landfors, D. Simonsson, A. Sokirko, "Mathematical modeling of a lead/acid cell with immobilized electrolyte", Journal of Power Sources 55, pp. 217-230, 1995.
- [66] E. Karden, P. Mauracher, F. Schöpe, "Electrochemical modeling of lead/acid batteries under operating conditions of electric vehicles", Journal of power sources 64, 1997.
- [67] D. Fan, R. White, "A Mathematical Model of a Sealed Nickel-Cadmium Battery", Journal of Electrochemistry Society, Vol. 138, No. 1, Jan. 1991.
- [68] P. Mauracher, E. Karden, "Dynamic modeling of lead acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification", Journal of Power Sources 67, 1997.

- [69] Z. Stoyanov, T. Nilsev, V. Vachena, N. Stamenova, "Nonstationary analysis and modelling of battery load performance", *Journal of Power Sources* 64, pp. 189-192, 1997.
- [70] N. Sato, K. Yagi, "Thermal behavior analysis of nickel metal hydride batteries for electric vehicles", *Japan Society of Automotive Engineers, Rev.* 21, pp. 205-211, 2000.
- [71] R. Cantrell, D. Edwards, P. Gill, "Predicting lead-acid battery electrode performance using finite difference equations", *Journal of power sources* 73, 1998.
- [72] A. Bejan, N. Dan, "Maximum work from an electric battery model", *Energy*, Vol. 22, No. 1, pp. 93-102, 1997.
- [73] D. Sawyer, "Modelling of local conditions in flooded lead/acid batteries in photovoltaic systems", *Journal of power sources* 64, pp. 181-187, 1998.
- [74] B. Lindemark, "Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance", *INTELEC* 91, Nov. 1991.
- [75] Σ. Μανιάς, και Δ. Στάμπας, "ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΟ SPICE", *ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ*, 1991.
- [76] N. Kutkut, D. Divan, D. Novotny, "Charge equalization for series connected battery strings", *Industry Applications Society*, ISBN 0-7803-1993-1, Vol. 2, pp. 1008-1015, 1994.
- [77] N. Kutkut, H. Wiegman, D. Divan, D. Novotny, "Design considerations for charge equalization of an electric vehicle battery system", *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC '95*, ISBN 0-7803-2482-X, Vol. 1, pp. 96-103.
- [78] N. Kutkut, D. Divan, D. Novotny, "Charge equalization for series connected battery strings", *IEEE Trans on Industry Applications* Vol. 31, No. 3, May/June 1995.

- [79] N. Kutkut, H. Wiegman, D. Divan, D. Novotny, "Equalization of an electric vehicle battery system", IEEE Trans. on Aerospace and Electronics systems, Vol. 34, No. 1, Jan. 1998.
- [80] N. Kutkut, D. Divan, D. Novotny, "Charge equalization for series connected battery strings", IEEE Trans on Industry Applications Vol. 35, No. 1, Jan/Feb 1999.
- [81] H. Leung, "Equalization of EV and HEV Batteries With a Ramp Converter" , IEEE Trans on Aerospace and Electronics System Vol. 33, No. 1, Jan 1997.
- [82] Z. Ye, T. Stuart, "Sensitivity of a Ramp Equalizer for Series Batteries", IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 30, No. 4, Oct 1998.
- [83] N. Kutkut, "A Modular non Dissipative Current Diverter for EV Battery Charge Equalization", Applied Power Electronics Conf., 1998.
- [84] K. Nishijima, H. Sakamoto, K. Harada, "A PWM controlled simple and high performance battery balancing system", 2000.
- [85] C. Pascual, P. Krein, "Switched Capacitor System for Automatic Series Battery Equalization", Applied Power Electronics Conf., 1997.
- [86] N. Kutkut, D. Divan, "Dynamic equalization techniques for series battery stacks", INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings) 1996, ISBN 0-7803-3507-4, p 514-521.
- [87] N. Kutkut, "Charge equalization using a non-current diverter with a centralized multi-winding transformer", EPE '97, Trondheim, Norway, September 1997.
- [88] S. Hung, D. Hopkins, C. Mosling, "Extension of Battery Life via Charge Equalization Control", IEEE Trans on Industrial Electronics Vol. 40, No. 1 Feb. 1993.
- [89] J. Chatzakis, K. Kalaitzakis, N. C. Voulgaris and S. Manias, "A New Charge-Discharge Equalization Technique for Series Connected Battery Cells", EPE 2001.