

## Battery energy storage



Εισηγητής εκπαιδευτικός : Καραπιδάκης Εμμανουήλ

Σπουδαστής : Γαλανάκης Ι. Δημήτριος

### Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου της διπλωματικής μου εργασίας τον κ. Καραπιδάκη Εμμανουήλ για την άμεση συμπαράσταση, βοήθεια, καθοδήγηση την οποία μου προσέφερε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, την μνηστή μου για την συμπαράσταση και την υποστήριξη τους κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους συμφοιτητές μου για την αρμονική συνύπαρξη και την αμέριστη αλληλοϋποστήριξη.

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup></b> .....	6
1.1 Η ανακάλυψη της μπαταρίας-Ιστορική αναδρομή .....	6
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup></b> .....	9
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά μπαταρίας.....	9
2.2 Ταξινόμηση στοιχείων και μπαταριών .....	12
2.2.1 Πρωτεύουσες μπαταρίες.....	12
2.2.2 Δευτερεύουσες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.....	13
2.2.3 Μπαταρίες αποθήκευσης.....	14
2.3 Μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β συστήματα.....	14
2.4 Η λειτουργία της μπαταρίας στα Φ/Β συστήματα.....	15
2.5 Απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν τα συστήματα αποθήκευσης.....	16
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup></b> .....	18
3.1 Οι αποθηκευτικές διατάξεις σε συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.).....	18
3.2 Τρόποι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας .....	18
3.3 Ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας-μπαταρίες. Μπαταρίες μολύβδου-οξέος .....	19
3.4 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου.....	20
3.5 Μπαταρίες λιθίου-ιόντος.....	20
3.6 Μπαταρίες μετάλλου-αέρα.....	21
3.7 Εναλλακτικές αποθηκευτικές διατάξεις.....	21
3.8 Υπέρ-πυκνωτές (supercapacitor).....	23
3.9 Υπεραγωγίμα πηνία (SMES).....	23
3.10 Αποθήκευση μακράς διάρκειας.....	24
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup></b> .....	25
4.1 Αναγκαιότητα αποθηκευτικής διάταξης σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές... ..	25
4.2 Σύγκριση των εφαρμογών των κυριοτέρων αποθηκευτικών μέσων.....	27
<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup></b> .....	29

5.1 Αποθήκευση ενέργειας.....	29
5.2 Εφαρμογές αποθήκευσης με βάση τις τεχνικές/μεθόδους μετατροπής.....	34
5.3 Ηλεκτρικές στήλες.....	35
<b>Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup></b> .....	38
6.1 Μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας.....	38
6.2 Απόδοση του μοντέλου προσομοίωσης της μπαταρίας.....	39
<b>Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup></b> .....	40
7.1 Περιγραφή των ιδιοτήτων και της κατάστασης της μπαταρίας.....	40
7.2 Κατάσταση ζωής (State of health).....	40
7.3 Χωρητικότητα κυψέλης (Cell capacity).....	40
7.4 C- επίπεδο ( C-rate).....	41
7.5 Εσωτερική αντίσταση.....	41
<b>Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup></b> .....	42
8.1 Προκλήσεις και τρόποι προσομοίωσης μπαταρίας.....	43
8.2 Συντελεστής κατάστασης φόρτισης (Soc).....	43
8.3 Συντελεστής κατάστασης ζωής (SoH).....	45
<b>Κεφάλαιο 9<sup>ο</sup></b> .....	46
9.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταρίας.....	46
9.2 Τάση.....	49
9.3 Στάθμη φόρτισης.....	50
9.4 Βάθος εκφόρτισης.....	51
9.5 Κύκλος ζωής.....	51
9.6 Αποδοτικότητα.....	53
9.7 Μέρη αυτονομίας.....	54
9.8 Ρεύμα μπαταρίας.....	54
9.9 Χρόνος ζωής.....	55
9.10 Αυτοεκφόρτιση.....	56
9.11 Κατάσταση υγείας.....	56
9.12 Ρυθμός εκφόρτισης.....	57

9.13 Ενεργειακό περιεχόμενο .....	57
9.14 Ειδική ενέργεια, ενεργειακή πυκνότητα.....	58
9.15 Εσωτερική αντίσταση.....	59
9.16 Ειδικό βάρος .....	61
9.17 Ειδική Ισχύς .....	61
<b>Κεφάλαιο 10<sup>ο</sup></b> .....	61
10.1 Γενικά για την φόρτιση. Φόρτιση/εκφόρτιση μπαταρίας.....	61
10.1.1 Χωρητικότητα μπατ. ρεύμα εκφόρτισης.....	62
10.1.2 Συντελεστής φόρτισης .....	62
10.1.3 Χρόνος φόρτισης .....	63
10.1.4 Τάση αεριοποίησης .....	63
10.1.5 Γενικές αρχές φόρτισης μπαταρίας μολύβδου.....	64
10.1.6 Μέθοδοι φόρτισης μπαταριών.....	65
10.1.7 Φόρτιση σταθερού ρεύματος.....	66
10.1.8 Φόρτιση σταθερού δυναμικού.....	67
10.1.9 Φόρτιση πλήρωσης (taper charging) .....	69
10.2.0 Παλμική φόρτιση .....	70
10.2.1 Φόρτιση συντήρησης (trickle charging).....	71
10.2.2 Σταθερή φόρτιση/ φόρτιση αναμονής .....	71
10.2.3 Ταχεία φόρτιση .....	72
10.2.4 Φόρτιση μπαταριών μολύβδου οξέως .....	73
10.2.5 Φόρτιση σταθερής τάσης .....	74
10.2.6 Γρήγορη φόρτιση.....	75
10.2.7 Σταθερή φόρτιση/ φόρτιση αναμονής .....	75
10.2.8 Φόρτιση σταθερού ρεύματος.....	77
10.2.9 Φόρτιση με ρεύμα πληρωμής.....	78
10.3.0 Παράλληλη φόρτιση / φόρτιση σε σειρά.....	81
10.3.1 Αποδοτικότητα ρεύματος.....	82

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

### 1.1 Η ανακάλυψη της μπαταρίας- Ιστορική αναδρομή

Από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις της ανθρωπότητας εδώ και τέσσερις αιώνες είναι ο ηλεκτρισμός. Γενικά ο όρος ηλεκτρισμός δίνει μια ευρεία έννοια που παρατηρείται στο φαινόμενο ήλεκτρο[1]. Όπως χαρακτηριστικά διαπίστωσε ο Θαλή του Μιλήσιου όταν δηλαδή ένα κομμάτι ήλεκτρου που τρίβεται σε ξηρό ύφασμα έλκει μικρά κομμάτια άχυρου. Ο ηλεκτρισμός πάντα ήταν ένα ανεξήγητο φαινόμενο έως ότου ο Άγγλος επιστήμονας William Gilbert αποπεράτωσε μια ολοκληρωμένη έρευνα πάνω στον ηλεκτρισμό και τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται. Έτσι λοιπόν ήταν η απαρχή διαφερόντων ανακαλύψεων και εξελίξεων στην ανθρωπότητα. Προγενέστερα του 19<sup>ου</sup> αιώνα η διάθεση του ηλεκτρισμού ήταν μηδαμινή έτσι ουσιαστικά ξεκίνησε η ανάπτυξη σε διάφορων ειδών εφαρμογές.

Το φαινόμενο του στατικού φορτίου ήταν μια μέθοδο που εφαρμόστηκε για την παραγωγή ενέργειας ηλεκτρικής. Έτσι λοιπόν η πρώτη μηχανή που κατασκευαστική ήταν στα μέσα του 1600 με εφευρέτη τον Otto von Guericke με τεχνικά χαρακτηριστικά ένα έμβολο, ένα κύλινδρο το οποίο απωθούσε τον αέρα από το δοχείο. Με αυτόν τον τρόπο προσπάθησε να αποδείξει ότι οι σπινθήρες ήταν αποτέλεσμα της τριβής.

Ο φυσικός Alessandro Volta ήταν ο εφευρέτης του στατικού ηλεκτρισμού, το πείραμα του ονομάστηκε << ηλεκτρικό πιστόλι >> τα χαρακτηριστικά του μέρη αποτελούνται από ένα δοχείο με μεθάνιο και ένα ηλεκτρικό σύρμα έτσι στέλνοντας ηλεκτρικό σπινθήρα μέσω του ηλεκτρικού σύρματος με αποτέλεσμα να συμβαίνει έκρηξη μέσα στο δοχείο.

Το συμπέρασμα του πειράματος ήταν ο Volta να μπορέσει να μεταφέρει επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις. Με μια απλή κατασκευή από ξύλινους πασσάλους και στηριγμένο επάνω του ένα σύρμα σιδήρου κατάφερε να συνδέσει την πόλη του Κόμο με το Μιλάνο της Ιταλίας. Ο ηλεκτρονικός σπινθήρας

διαπερνούσε το σύρμα και με αυτόν τον τρόπο προσπάθησε να μεταφέρει επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις αλλά αυτό δεν πραγματοποιήθηκε ποτέ.

Ο Luigi Galvani ήταν γιατρός στο πανεπιστήμιο της Μπολόνια ανακάλυψε ότι τα νεύρα και μυς των ζώων παράγουν ρεύμα. Αυτό λοιπόν ονομάστηκε ζωικός ηλεκτρισμός ένας όρος όπου στη συνέχεια η θεωρία καταρρίφτηκε. Μέσα από αυτή την ανακάλυψη ο Volta διαδικασία πειραμάτων χρησιμοποιώντας θετικά και αρνητικά ηλεκτρόδια όπως μόλυβδο, κασσίτερο, σίδηρο, χρυσό, ασήμι, γραφίτη.

Από την διαδικασία των πειραμάτων ανακάλυψε διαπίστωσε παραγόταν ηλεκτρική ισχύς χρησιμοποιούντων συγκεκριμένα υγρά σαν αγωγοί και έτσι δημιουργούνταν μια χημική αντίδραση μεταξύ των μετάλλων. Έτσι με αυτόν τον τρόπο ανακαλύφθηκε το πρώτο βολταϊκό στοιχείο που ονομάστηκε μπαταρία. Επίσης ανακάλυψε ότι η τάση αυξάνεται όταν τα στοιχεία είναι τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο.

Παράλληλα ο Volta παρουσίασε τα αποτελέσματα της ανακάλυψης του για μια συνεχή πηγή ηλεκτρισμού. Με αυτόν τον τρόπο αποκάλυψε ότι η στιγμιαία εμφάνιση του σπινθήρα δεν ήταν πλέον στιγμιαία αλλά συνεχόμενη ροή ηλεκτρικού ρεύματος ήταν πλέον διαθέσιμη.

Ο Sir Humphry Davy ήταν ο εφευρέτης της λάμπας και εγκατέστησε την μεγαλύτερη μπαταρία και με την πιο ισχυρή. Τα βασικά μέρη ήταν πολύ απλά σύνδεσε ηλεκτρόδια από κάρβουνο σε μια μπαταρία και παρήγαγε ηλεκτρικό φως. Η ηλεκτροχημεία ήταν ο σημαντικότερος τομέας έρευνας που μελέτησε ο Davy. Το βολταϊκό στοιχείο ήταν η ανακάλυψη του Davy μέσα από πειράματα έτσι ο γαλβανικός ηλεκτρισμός είχε πλέον διαδοθεί ευρέως. Στην συνέχεια ο Davy ξεκίνησε να αναλύει τα αποτελέσματα του ηλεκτρισμού, γρήγορα διαπίστωσε ότι η διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από κάποιες ουσίες οι οποίες υφίστανται αποσύνθεση συμπερασματικά ονομάστηκε ηλεκτρόλυση. Ο Davy διαπίστωσε ότι η ηλεκτρόλυση και το βολταϊκό στοιχείο ήταν ίδιο. Κατάλαβε ότι όταν ο ηλεκτρολύτης αντιδράει με το μέταλλο έχει ως αποτέλεσμα παραγόμενη τάση.

Ο Σκωτσέζος Δρ. William Cruickshank στρατιωτικός χειρουργός και χημικός ήταν ο πρώτος που σχεδίασε την μπαταρία. Η μπαταρία σχεδιάστηκε για μαζική παραγωγή. Η σχεδιαστική παρέμβαση του William ο οποίος είχε εγκαταστήσει

τετράγωνα φύλλα χαλκού και ψευδαργύρου τα οποία ήταν συγκολλημένα στις άκρες. Εγκαταστάθηκαν σε ορθογώνιο κιβώτιο και κλείστηκε με τσιμέντο. Οι μεταλλικές πλάκες παρέμεναν σταθερές με αυλακώσεις που υπήρχαν στο κιβώτιο. Παράλληλα στο κιβώτιο το γέμισε με ηλεκτρολύτη άλμης.

Ο ηλεκτρισμός μέσω μαγνητισμού ήταν άλλος ένας τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Γάλλος φυσικός Andre Marie Ampere ασχολήθηκε κυρίως με τον ηλεκτρομαγνητισμό παρατήρησε ότι κατά την μεταφορά ηλεκτρικού ρεύματος από τα καλώδια κάποιες φορές έλκονταν και κάποιες φορές απωθούνταν.

Ο Michael Faraday πέτυχε να αποδείξει όταν σε ένα μαγνητικό πεδίο ένας περιστρεφόμενος δίσκος χαλκού μπορούσε να παρέχει σταθερή ροή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Faraday σε συνεργασία με τον Davy πέτυχαν άπειρη ηλεκτρική ενέργεια μέσα από την συνεχή κίνηση μιας σπείρας και ενός μαγνήτη. Με αυτόν τον τρόπο εφευρέθηκε η ηλεκτρική γεννήτρια και κατ'επέκταση δημιουργήθηκε ο ηλεκτρικός κινητήρας. Μετά τις ανακαλύψεις αυτές εφευρέθηκαν οι μετασχηματιστές οι οποίοι είχαν την δυνατότητα να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε οποιαδήποτε επιθυμητή τάση.

Ο Άγγλος χημικός John F. Daniel έγινε εφευρέτης ενός βελτιωμένου μοντέλου μπαταρίας που παρήγαγε σταθερό ρεύμα. Μέχρι εκείνη την εποχή οι μπαταρίες είχαν πρωτεύοντα στοιχεία που αυτό σήμαινε ουσιαστικά ότι οι μπαταρίες δεν μπορούσαν να φορτίσουν ξανά. Έτσι η βελτιωμένη τύπου μπαταρία μολύβδου οξέως είναι μια μέθοδος που μέχρι και σήμερα χρησιμοποιείται.

Από εκεί και πέρα κατασκευάστηκαν γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία παρείχαν στον άνθρωπο ανέσεις όπως παραγωγή φωτός, θέρμανσης και κίνησης. Με το πέρας των ετών η ηλεκτρική ενέργεια απλουστεύτηκε ακόμα περισσότερο.

Ο Σουηδός μηχανικός Waldemar Jungner εφευρέτης της μπαταρίας νικελίου και χρησιμοποιούσε νικέλιο για το θετικό και κάδμιο για το αρνητικό. Ο Αμερικανός εφευρέτης Thomas Alva Edison εφάρμοσε μια μετατροπή και αντικατέστησε το κάδμιο με το σίδηρο. Ο λόγος που το έκανε αυτό ήταν το μεγάλο κόστος απέναντι των ξηρών στοιχείων ή των συσσωρευτών αποθήκευσης μολύβδου οξέως και περιορίστηκαν μπαταρίες νικελίου καδμίου και νικελίου σιδήρου.



Ως εκ τούτου σημαντική πρόοδο στην βελτίωση της μπαταρίας δεν υπήρξε έως ότου οι Shlecht και Ackermann να ανακαλύψουν το ηλεκτρόδιο συμπυκνωμένων πόλων. Ήταν μια σημαντική ανακάλυψη ανταποκρίθηκε στα ψηλά ρεύματα και σε μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Ο μαθηματικός και εφευρέτης Neumann κατάφερε την μπαταρία νικελίου καδμίου κλειστού τύπου να την τελειοποιήσει και να την κάνει τελείως κλειστεί[2].

Έτσι λοιπόν μέσα από το πέρασμα των χρόνων η βελτίωση της μπαταρίας είναι πολύ μικρή σε σχέση με την μικροηλεκτρονική διότι όσο στηρίζονται σε ηλεκτροχημικές διαδικασίες οι περιορισμοί θα επικρατούν. Τα στοιχεία που αποτελείτε είναι το αρνητικό, το θετικό και τον ηλεκτρολύτη.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### 2.1 Γενικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας

Η μπαταρία έχει την δυνατότητα να μετατρέψει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδραση. Όταν ένα σύστημα έχει ανάγκη να επαναφορτίσει η μπαταρία έχει την ιδιότητα να επαναφορτίσει το σύστημα με την αντίστροφη αυτή διαδικασία. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεταφορά ηλεκτρονίων από ένα υλικό σε ένα άλλο δια μέσου ηλεκτρικού κυκλώματος.

Με τον όρο μπαταρία εννοούμε μια ηλεκτροχημική μονάδα η οποία αποτελείται από στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά είναι συνδεδεμένα σε συνδεσμολογία σε σειρά ή παράλληλα ή είναι συνδεδεμένα με συνδυασμό για να επιτευχτεί η ανάλογη τάση και η χωρητικότητα στην έξοδο. Έτσι το στοιχείο αποτελείται από το αρνητικό, το θετικό και τον ηλεκτρολύτη.

Το αρνητικό ηλεκτρόδιο δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά την διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Το θετικό ηλεκτρόδιο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και μειώνεται κατά την διάρκεια της ηλεκτροχημικής διαδικασίας. Όσο αφορά τον ηλεκτρολύτη είναι το

μέσο για την μεταφορά του φορτίου μέσα στο στοιχείο ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο. Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα ρευστό όπως το νερό με διαλυμένα άλατα όπου μεταδίδουν την ιοντική αγωγιμότητα. Υπάρχουν τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούν στερεούς ηλεκτρολύτες οι οποίοι είναι ιοντικοί αγωγοί στη θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου.

Οι χημικές αντιδράσεις των ηλεκτροδίων συμβαίνουν και στα δύο ηλεκτρόδια και απελευθερώνουν ή απορροφούν ηλεκτρόνια. Έτσι με αυτόν τον τρόπο το αρνητικό και το θετικό ηλεκτρόδιο δηλώνουν την μείωση και την οξείδωση των χημικών ενώσεων που αντιδρούν μαζί με το σύνολο των αριθμών των ηλεκτρονίων που εμπλέκονται στη διαδικασία. Οπότε ο διαχωρισμός της αντίδρασης του στοιχείου σε δύο ξεχωριστές αντιδράσεις ηλεκτροδίων είναι η βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση οποιουδήποτε ηλεκτροχημικού στοιχείου. Η ανταλλαγή των ηλεκτρονίων που συνδέεται με τις αντιδράσεις των ηλεκτροδίων να συλλεχτεί σαν ένα ρεύμα που ρέει μέσα από τον καταναλωτή και η ενέργεια εισόδου ή εξόδου που συνδέεται με την χημική αντίδραση να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Διαφορετικά η αντίδραση θα εμφανιζόταν απλώς ως μια χημική αντίδραση.

Θα γινόταν ανταλλαγή του φορτίου απευθείας ανάμεσα στις αντιδρούσες ουσίες και η ενέργεια που θα απελευθερωνόταν θα μετατρέποταν κυρίως σε θερμότητα και σε κάποιο βαθμό σε ενεργειακή ένταση[3]. Το σύστημα της ηλεκτροχημικής αποθήκευσης βασίζεται στη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα στοιχείο καθορίζεται από το διαφορετικό ενεργειακό περιεχόμενο των χημικών ουσιών που αναπαριστά την κατάσταση φόρτισης και εκφόρτισης. Συνεπώς οι χαρακτηριστικές παράμετροι του συστήματος καθορίζονται από ένα σύνολο ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και τις ενεργειακές μεταβολές που συνδέονται με αυτές τις αντιδράσεις. Συνολικά αυτές οι αντιδράσεις αποτελούν τις αντιδράσεις στοιχείου που χαρακτηρίζουν το σύστημα της μπαταρίας.

Οι σύνδεσμοι των υλικών ανόδου και καθόδου που έχουν τα περισσότερα πλεονεκτήματα είναι αυτοί που θα είναι ελαφρύτεροι και θα δίνουν υψηλή τάση και χωρητικότητα στοιχείου. Παρόλα αυτά, τέτοιοι σύνδεσμοί μπορεί να μην είναι πάντα πρακτικοί, εξαιτίας της αντιδραστικότητας με άλλα συστατικά του στοιχείου, της πόλωσης, της δυσκολίας στο χειρισμό, του υψηλού κόστους και άλλων

ατελειών[9]. Σε ένα πρακτικό σύστημα, η άνοδο επιλέγεται με βάση τις ακόλουθες ιδιότητες όπως να έχει αποδοτικότητα σαν παράγοντας μείωσης, καλή αγωγιμότητα, σταθερότητα, ευκολία κατασκευής και χαμηλό κόστος. Το υδρογόνο είναι ελκυστικό σαν υλικό ανόδου, αλλά προφανώς πρέπει να περιοριστεί με κάποιο τρόπο, κάτι που μειώνει αποτελεσματικά την ηλεκτροχημική του ισοδυναμία.

Πρακτικά, κυρίως μέταλλα χρησιμοποιούνται σαν το υλικό ανόδου. Ο ψευδάργυρος έχει κυριαρχήσει σαν άνοδος, λόγω των ευνοϊκών του ιδιοτήτων. Το λίθιο, το ελαφρύτερο μέταλλο, με υψηλή ηλεκτροχημική ισοδυναμία, έχει γίνει μια αρκετά ελκυστική άνοδος, αφού έχουν αναπτυχθεί κατάλληλοι και συμβατοί ηλεκτρολύτες και σχεδιασμοί στοιχείων για να ελέγχουν τη δραστηριότητα του.

Ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιοντική αγωγιμότητα αλλά να μην είναι ηλεκτρονικά αγωγίμο, γιατί αυτό θα προκαλούσε εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η μη-αντιδραστικότητα με τα υλικά των ηλεκτροδίων, μικρή αλλαγή των ιδιοτήτων με αλλαγή θερμοκρασίας, ασφάλεια στο χειρισμό και χαμηλό κόστος. Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες είναι υδάτινα διαλύματα, αλλά υπάρχουν σημαντικές εξαιρέσεις όπως, για παράδειγμα στις μπαταρίες θερμικής ανόδου ή ανόδου λιθίου όπως λιωμένο αλάτι και άλλοι μη υδάτινοι ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται για να αποφευχθεί η αντίδραση της ανόδου με τον ηλεκτρολύτη.

Φυσικά, τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου είναι ηλεκτρονικά απομονωμένα στο στοιχείο για την αποφυγή εσωτερικού βραχυκυκλώματος, αλλά περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη. Σε πρακτικούς σχεδιασμούς στοιχείων ένα υλικό διαχωρισμού χρησιμοποιείται για να χωρίζει τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου μηχανικά. Ο διαχωριστής, όμως είναι διαπερατός από τον ηλεκτρολύτη για να διατηρείται η επιθυμητή ιοντική αγωγιμότητα. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο ηλεκτρολύτης ακινητοποιείται για ένα σχεδιασμό χωρίς διαρροή. Ηλεκτρικά αγωγίμες δομές ή υλικά μπορούν επίσης να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για μείωση της εσωτερικής αντίστασης.

Το στοιχείο μπορεί να κατασκευαστεί σε διάφορους σχηματισμούς-κυλινδρικό, επίπεδο, πρισματικό-και τα μέρη του στοιχείου σχεδιάζονται για να διευκολύνουν το συγκεκριμένο σχήμα. Τα στοιχεία σφραγίζονται με πολικούς τρόπους για να

αποφευχθεί διαρροή και στέγνωμα. Κάποια στοιχεία είναι εφοδιασμένα με συσκευές εξαερισμού ή άλλα μέσα που επιτρέπουν στα συσσωρευμένα αέρια να διαφύγουν. Κατάλληλες θήκες ή δοχεία, μέσα για τερματική σύνδεση και τιτλοφόρηση προστίθενται για να ολοκληρωθεί η κατασκευή του στοιχείου και της μπαταρίας.

## **2.2 Ταξινόμηση στοιχείων και μπαταριών**

Τα ηλεκτροχημικά στοιχεία και οι μπαταρίες χαρακτηρίζονται ως πρωτεύουσες δηλαδή ως μη επαναφορτιζόμενες ή δευτερεύουσες επαναφορτιζόμενες με βάση την ικανότητα τους να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά. Αυτές οι δύο μεγάλες κατηγορίες περιέχουν υποκατηγορίες που έχουν να κάνουν με συγκεκριμένες δομές ή σχεδιασμούς.[9]

### **2.2.1 Πρωτεύουσες μπαταρίες**

Αυτές οι μπαταρίες δεν έχουν τη δυνατότητα εύκολης ή αποτελεσματικής ηλεκτρικής επαναφόρτισης και για τον λόγο αυτό, εκφράζονται μια φορά και στη συνέχεια απορρίπτονται. Πολλά πρωτεύοντα στοιχεία στα οποία ο ηλεκτρολύτης περιέχεται σε ένα απορροφητικό ή διαχωριστικό υλικό δηλαδή δεν υπάρχει ελεύθερος ή υγρός ηλεκτρολύτης και ονομάζεται ξηρά στοιχεία.

Η πρωτεύουσα μπαταρία είναι μια βολική, συνήθως οικονομική, ελαφριά πηγή συσκευασμένης ενέργειας για φορητές και ηλεκτρικές συσκευές, φωτισμό, φωτογραφικό εξοπλισμό, παιχνίδια, εφεδρικές μνήμες και μια σειρά από άλλες εφαρμογές. Γενικά τα πλεονεκτήματα των πρωτευουσών μπαταριών είναι καλή διάρκεια ζωής και υψηλής ενεργειακής πυκνότητας σε χαμηλούς έως μέτριους ρυθμούς εκφόρτισης, μικρή ή καθόλου ανάγκη για συντήρηση και ευκολία στη χρήση. Παρόλο που μεγάλες πρωτεύουσες μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές, σηματοδότηση, ενέργεια αναμονής και αλλού, η συντριπτική πλειοψηφία των πρωτευουσών μπαταριών είναι οι

γνωστές σε όλους μας μπαταρίες ενός κυλινδρικού στοιχείου ή πολυκυτταρικές μπαταρίες που χρησιμοποιούν αυτά τα στοιχεία σαν συστατικά.

### 2.2.2 Δευτερεύουσες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες

Αυτές οι μπαταρίες μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά, μετά από την εκφόρτιση τους, στην αρχική τους κατάσταση με τη διαδικασία ροής ρεύματος εκφόρτισης. Είναι συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και είναι επίσης γνωστές σαν μπαταρίες αποθήκευσης ή συσσωρευτές.

Οι εφαρμογές των δευτερευουσών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες : Εφαρμογές στις οποίες η δευτερεύουσα μπαταρία χρησιμοποιείται σαν μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, που συνήθως είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένη και φορτίζεται από μια κύρια πηγή ενέργειας και μεταφέρει την ενέργεια της στο φορτίο όταν της ζητηθεί. Όπως για παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι συστήματα αυτοκινήτων και αεροσκαφών, πηγές ενέργειας αναμονής για να μην υπάρξει αποτυχία σε περίπτωση ανάγκης και συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης για ηλεκτρική χρήση ανύψωσης φορτίου.

Εφαρμογές στις οποίες η δευτερεύουσες μπαταρία χρησιμοποιείται ή εκφορτίζεται ουσιαστικά σαν μια πρωτεύουσα μπαταρία, αλλά αντί να απορρίπτεται μετά τη χρήση επαναφορτίζεται. Οι δευτερεύουσες μπαταρίες χρησιμοποιούνται κατ' αυτό τον τρόπο, για παράδειγμα σε φορητές ηλεκτρονικές καταναλώσεις, ηλεκτρικά εργαλεία, για μείωση του κόστους αφού μπορούν να επαναφορτιστούν αντί να αντικατασταθούν και σε εφαρμογές που απαιτούν άντληση ενέργειας πέρα από τα όρια μιας πρωτεύουσας μπαταρίας.

Οι δευτερεύουσες μπαταρίες χαρακτηρίζονται εκτός από την ικανότητα τους να επαναφορτίζονται από υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και καλές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι ενεργειακές τους πυκνότητες είναι γενικά χαμηλότερες από αυτές των πρωτευουσών μπαταριών και η κατακράτηση φορτίου είναι επίσης φτωχότερη από ότι στις περισσότερες πρωτεύουσες μπαταρίες, όμως η χωρητικότητα που χάνεται σε μια δευτερεύουσα μπαταρία μπορεί να αποκτηθεί με την επαναφόρτιση.

Μερικές μπαταρίες, γνωστές σαν μηχανικά επαναφορτιζόμενες, επαναφορτίζονται αντικαθιστώντας το εκφορτιζόμενο ή απεμπλουτισμένο ηλεκτρόδιο, συνήθως το μέταλλο της ανόδου με ένα καινούργιο. Κάποιες από τις μπαταρίες μετάλλου/αέρος είναι χαρακτηριστικές αυτού του τύπου μπαταρίας.

### **2.2.3 Μπαταρίες αποθήκευσης**

Σε αυτούς τους τύπους, ένα βασικό συστατικό χωρίζεται από την υπόλοιπη μπαταρία πριν από την ενεργοποίηση της. Σε αυτήν την κατάσταση ο κίνδυνος χημικής αλλοίωσης ή για αυτοεκφόρτισης ουσιαστικά εξαλείφεται και έτσι η μπαταρία μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Συνήθως το συστατικό που απομονώνεται είναι ο ηλεκτρολύτης. Σε άλλα συστήματα, όπως η θερμική μπαταρία, η μπαταρία είναι ανενεργή μέχρι να θερμανθεί, λιώνοντας έναν στερεό ηλεκτρολύτη ο οποίος μετά γίνεται αγωγίμος. Ο σχεδιασμός των μπαταριών αποθήκευσης χρησιμοποιείται για να ανταποκριθεί σε υπερβολικά μεγάλες ή περιβαλλοντικά ακραίες απαιτήσεις αποθήκευσης οι οποίες δεν μπορούν να ικανοποιηθούν από μια ενεργεί μπαταρία που έχει σχεδιαστεί για τα ίδια χαρακτηριστικά απόδοσης. Τέτοιες μπαταρίες χρησιμοποιούνται για παράδειγμα για να αποθηκεύσουν μεγάλη ισχύς για σχετικά μικρά χρονικά διαστήματα σε πυραύλους, τορπίλες και άλλα οπλικά συστήματα.

### **2.3 Μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα.**

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται φανερό ότι οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Μερικά παραδείγματα επαναφορτιζόμενων συστημάτων μπαταριών είναι : Νικελίου καδμίου, Μολύβδου οξέος, Νικελίου σιδήρου, Υδριδικές νικελίου και επαναφορτιζόμενες λιθίου διαφόρων τύπων.

Από αυτές μόνο οι μολύβδου οξέος και σε μικρό βαθμό οι νικελίου καδμίου χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα μέχρι σήμερα. Οι μπαταρίες νικελίου σιδήρου σπάνια χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές και υποφέρουν από έναν ιδιαίτερα υψηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης κάτι το οποίο τις καθιστά ακατάλληλες για

τις περισσότερες φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Οι υδριδικές μπαταρίες νικελίου και οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου είναι σχετικά σύγχρονες εξελίξεις και οι κύριες εφαρμογές τους μέχρι σήμερα είναι σε υψηλή αξίας ηλεκτρονικά αγαθά όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί υπολογιστές. Δεν είναι ευρέως διαθέσιμες στις μεγάλες χωρητικότητες δηλαδή εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες Ah που απαιτούνται σε μεγάλα φωτοβολταϊκά συστήματα. Είναι αρκετές πιο ακριβές ανά kWh σήμερα με σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου οξέος και συχνά χρειάζονται μια κάπως περίπλοκη προστασία για το κύκλωμα φόρτισης τους, κάτι το οποίο δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί με τη μεταβλητή φύση των ρευμάτων φόρτισης των φωτοβολταϊκών. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο η πρόοδος που έχει σημειωθεί στις μπαταρίες λιθίου έχει ανοίξει το δρόμο για τη χρησιμοποίησή τους σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Υπάρχουν και άλλοι τύποι μπαταρίας όπως επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που είναι υπό ανάπτυξη για μελλοντικές εφαρμογές μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα ή ανύψωση φορτίου. Δεν υπάρχει κάτι που δηλώνει προς το παρόν ότι κάποιες από αυτές τις μπαταρίες θα έχουν τις απαιτούμενες ιδιότητες ή την τιμή για να είναι ανταγωνιστικές στα φωτοβολταϊκά συστήματα αλλά μπορούμε πάντα να ελπίζουμε.

#### **2.4 Η λειτουργία της μπαταρίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Υπάρχουν τρεις κύριες λειτουργίες που μια μπαταρία επιτελεί σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Έτσι δρα σαν ένα βοηθητικό ποσό ενέργειας για να εξαλείψει την αναντιστοιχία μεταξύ της διαθέσιμης από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία ισχύος και της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος. Η ισχύς που παράγει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο ή συστοιχία κάθε στιγμή ποικίλει ανάλογα με την ποσότητα ακτινοβολίας που προσκρούει σε αυτή και είναι μηδέν το βράδυ. Στα περισσότερα ηλεκτρικά φορτία χρειάζεται να αποδίδει ένα σταθερό ποσό ισχύος. Η μπαταρία παρέχει ισχύς όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία δεν παράγει τίποτα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν παράγει λιγότερη ισχύς από όση απαιτεί το ηλεκτρικό φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης η μπαταρία απορροφά την περίσσεια ισχύος από την φωτοβολταϊκή συστοιχία όταν αυτή παράγει περισσότερη ισχύ από το φορτίο απαιτεί.

Η μπαταρία παρέχει ένα αποθεματικό ενέργειας δηλαδή αυτονομία στο σύστημα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια μερικών ημερών πολύ συννεφιασμένου καιρού ή σε κάποια περίπτωση ανάγκης εάν παρουσιαστεί βλάβη σε κάποιο τμήμα του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Η μπαταρία αποτρέπει μεγάλες, πιθανόν καταστροφικές διακυμάνσεις τάσης. Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία μπορεί να αποδώσει ισχύ σε κάθε σημείο μεταξύ βραχυκυκλώματος και ανοικτού κυκλώματος, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φορτίου που είναι συνδεδεμένο σε αυτήν. Σε ένα σύστημα ονομαστικής τάσης 12V, παράδειγμα αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0V και περίπου 20V είναι πιθανό να προκύψει από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Πολλά φορτία δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα τόσο μεγάλο εύρος τάσεων.

Η τοποθέτηση μιας μπαταρίας μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και του φορτίου διασφαλίζει ότι το φορτίο δε θα βλέπει τίποτα έξω από το εύρος τάσεων στο οποίο η μπαταρία μπορεί να λειτουργήσει στην περίπτωση ενός συστήματος 12V από περίπου 9.5V σε βαθιά εκφόρτιση μέχρι περίπου 16V υπό συνθήκες ακραίας φόρτισης [10].

## **2.5 Απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν τα συστήματα αποθήκευσης.**

Οι απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούν τα συστήματα αποθήκευσης σε ένα αυτόνομο σύστημα παραγωγής ισχύος είναι πολυάριθμες. Μερικές από αυτές έρχονται σε αντίθεση η μια με την άλλη και επομένως δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα. Ορισμένες από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

- Υψηλή ενεργειακή απόδοση
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Μεγάλη διάρκεια ζωής από την άποψη της απόδοσης χωρητικότητας
- Χαμηλό κόστος
- Καλή αποδοτικότητα φόρτισης ακόμα και σε πολύ μικρά ρεύματα



- Χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης
- Μικρές απαιτήσεις συντήρησης
- Υψηλή διαθεσιμότητα παγκοσμίως
- Υψηλή διαθεσιμότητα ενέργειας
- Εύκολη εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης
- Χαμηλή έκθεση σε ακατάλληλες συνθήκες
- Εύκολα ανακυκλώσιμη
- Χαμηλή τοξικότητα των υλικών
- Ασφαλής συμπεριφορά σε περίπτωση υπερφόρτισης ή βαθειάς εκφόρτισης
- Εύκολη επεκτασιμότητα τάσης και χωρητικότητας μέσω συνδέσεων σε σειρά και παράλληλα
- Μικρό χάσμα τάσης μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης δηλαδή να επιτρέπει τη σύνδεση φορτίων κατευθείαν στη μπαταρία
- Ικανότητα γρήγορης φόρτισης
- Κανένα φαινόμενο μνήμης
- Χαμηλές εκρηκτικές δυνατότητες
- Υψηλή αξιοπιστία στη λειτουργία – πολύς χρόνος μεταξύ αστοχιών

Ο σχεδιασμός αυτόνομων συστημάτων παροχής ενέργειας θα πρέπει να εξετάζει τις ιδιότητες και τις απαιτήσεις του συστήματος αποθήκευσης από την αρχή. Αν σχεδιαστεί το σύστημα και στην συνέχεια προστεθεί το σύστημα αποθήκευσης, θα έχουμε αμελήσει τις πολυάριθμες αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στην μπαταρία, τα περιφερειακά και συνολικά στο σχεδιασμό και τον έλεγχο όλου του συστήματος. Ως εκ τούτου, μόνο ένας ολοκληρωμένος προγραμματισμός του συστήματος μας επιτρέπει να κάνουμε χρήση όλων των συνεργειών και να σχεδιάσουμε συστήματα τα οποία θα είναι σε θέση να λειτουργούν με το ελάχιστο κόστος για όλη τη διάρκεια ζωής τους[3].

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Οι αποθηκευτική διάταξη σε συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας(Α.Π.Ε.)

Η ανάγκη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται με διάφορους τρόπους και οι αποθηκευτικές διατάξεις βρίσκουν διάφορες εφαρμογές. Προφανείς και πολυχρησιμοποιημένες οι αποθηκευτικές διατάξεις (μπαταρίες) στα κινητά τηλέφωνα ή στους φορητούς υπολογιστές. Εκτός από τις συσκευές καθημερινής χρήσης αποθηκευτικές διατάξεις χρειάζονται και σε πλήθος άλλων εφαρμογών, π.χ. ηλεκτρικό αυτοκίνητο, συστήματα με φωτοβολταϊκά και γενικά με ανανεώσιμες πηγές. Για κάθε εφαρμογή θα πρέπει να επιλεγεί και το μέσο αποθήκευσης με τις κατάλληλες ιδιότητες.

Το ιδανικό μέσο αποθήκευσης θα πρέπει να μπορεί να αποθηκεύει μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε μικρό χώρο και να είναι σε θέση να διοχετεύει αυτή την ενέργεια αργά ή ταχύτατα ανάλογα με τις απαιτήσεις και πάντα πλήρως ελεγχόμενα. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί με έναν κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης με μεγάλη διάρκεια ζωής και με βαθιά εκφόρτιση χωρίς να καταστρέφεται. Θα πρέπει επίσης να είναι ασφαλές, σχετικά οικονομικό και να μην απαιτεί ιδιαίτερη συντήρηση. Φυσικά δεν υπάρχει αποθηκευτική διάταξη που να συνδυάζει όλους αυτούς τους παράγοντες. Παρακάτω γίνεται μία σύντομη αναφορά στις διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας και στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους.

### 3.2 Τρόποι – διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας

Η απευθείας αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι εφικτή. Απαιτείται να μετατραπεί πρώτα σε μια άλλη μορφή ενέργειας. Έτσι για παράδειγμα, μπορεί να αποθηκευτεί ως:

- χημική ενέργεια (μπαταρίες),
- μηχανική (στρεφόμενες μάζες),
- σε ηλεκτρικό πεδίο (πυκνωτές) ή σε μαγνητικό πεδίο (μαγνητικοί υπεραγωγοί),

- με συμπιεσμένο αέρα και στη συνέχεια να ξαναμετατραπεί στην αρχική της μορφή όταν θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί.

Γενικά οι περισσότερες μορφές ενέργειας προκειμένου να αποθηκευτούν χρειάζεται να μετατραπούν σε μία άλλη 'ενδιάμεση' μορφή. Ένα σπάνιο παράδειγμα μορφής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί άμεσα είναι η θερμότητα. Μπορεί π.χ. να φυλαχτεί στο σκελετό κατάλληλα σχεδιασμένων κτηρίων, στο νερό (όπως στους ηλιακούς-θερμικούς συλλέκτες), ή σε καυτά πετρώματα και βράχους (γεωθερμικώς).

Τα απολιθωμένα καύσιμα αντιπροσωπεύουν ένα φυσικό παράδειγμα αποθήκευσης χημικής ενέργειας. Ωστόσο από όταν ο ηλεκτρισμός καθιερώθηκε καθολικά ως μέσο που μπορεί να μεταφέρει ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις το ενδιαφέρον για την αποθήκευση ενέργειας εστιάστηκε στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

### **3.3 Ηλεκτροχημική αποθήκευση ενέργειας – μπαταρίες. Μπαταρίες μολύβδου – οξέος**

Οι μπαταρίες αυτές είναι οι πιο διαδεδομένες παγκοσμίως. Για το ένα τρίτο του πληθυσμού της γης που ακόμη δεν είναι συνδεδεμένο με ένα δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, η μπαταρία (ηλεκτροχημικό κύτταρο ή συσσωρευτής) παραμένει ο βασικός φορέας ενεργειακής αποθήκευσης. Οι αμέτρητοι ιδιοκτήτες εξοπλισμού γεννητριών ντίζελ και οι αγρότες στηρίζονται στις συμβατικές μπαταρίες μολύβδου – οξέος με το χαμηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης, τη γρήγορη απόκριση και τα ευέλικτα ποσά τροφοδοσίας ισχύς. Ο περιορισμένος κύκλος ζωής των μπαταριών αυτών (ειδικά σε συνθήκες βαθιάς εκφόρτισης), δεν αποτελεί πρόβλημα λόγω του χαμηλού κόστους τους.

Ωστόσο τα συστήματα μολύβδου – οξέος βελτιώνονται σταδιακά και με διάφορους τρόπους. Μια από τις βελτιώσεις είναι η χρήση ηλεκτρολυτών σε μορφή gel, αντί για υγρούς, είχε ως αποτέλεσμα να μπορούν οι μπαταρίες να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε θέση χωρίς να χρειαστεί να ανεφοδιαστούν, και να είναι ανθεκτικές σε κλονισμούς και κραδασμούς. Στις ρυθμιζόμενες από βαλβίδα, μπαταρίες μολύβδου – οξέος (VRLA) η διαφυγή αερίου ρυθμίζεται από ευαίσθητες βαλβίδες πίεσης. Η απόδοση και ο χρόνος ζωής βελτιώνονται από τις καινοτόμες τεχνικές φόρτισης, όπως οι παλμικές μέθοδοι φόρτισης. Η τεχνολογία μολύβδου – οξέος μπορεί να

χρησιμοποιηθεί σε μια ευρεία κλίμακα. Μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για τη διαχείριση αιολικής ή ηλιακής ενέργειας σε συστήματα ισχύος π.χ. συστήματα αγροκτημάτων. Για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές αιολικής ενέργειας, έχει προταθεί η αποθήκευση ισχύος της τάξης των 100MW ή περισσότερο, σε μπαταρίες. Αυτό θα βοηθούσε όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο να αποθηκεύεται η αιολική ενέργεια για τα διαστήματα όπου θα υπάρχει ζήτηση και θα καθιστούσε περιττή την αποκοπή αιολικής ενέργειας όταν δεν υπάρχει ζήτηση.

### **3.4 Μπαταρίες νικελίου – καδμίου**

Η αποθήκευση σε διατάξεις νικελίου-καδμίου αποδίδει επίσης σε μεγάλο βαθμό. Μια καινούρια εγκατάσταση στην Αλάσκα πρόκειται να παρέχει 40MW ισχύος, χρησιμοποιώντας 13760 κύτταρα νικελίου – καδμίου από τη SAFT Batteries. Η εγκατάσταση δεν έχει λειτουργήσει ακόμη αλλά οι αριθμοί είναι ενδεικτικοί για το βαθμό αποθήκευσης που μπορεί να επιτευχθεί.

Οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου παρόλο που είναι ακριβότερες από τις μολύβδου – οξέος, έχουν διπλάσιο χρόνο ζωής και επειδή δεν απαιτείται παρακολούθηση κατά τη λειτουργία τους μπορούν να τοποθετηθούν σε απομακρυσμένες περιοχές με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες και στην κυριολεξία να ξεχαστούν. Στα μειονεκτήματά τους εκτός από το κόστος ανήκουν και η μεγάλη διάρκεια ζωής των τοξικών σκουπιδιών (ύστερα από τη χρήση της μπαταρίας) καθώς και η πεπερασμένη ποσότητα καδμίου στον πλανήτη.

### **3.5 Μπαταρίες λιθίου – ιόντος**

Οι μπαταρίες αυτές έχουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας (300-400 KWh/m<sup>3</sup> λιθίου), σχεδόν 100% αποτελεσματικότητα και μεγάλο κύκλο ζωής (περίπου 3000 κύκλοι για βάθος εκφόρτισης 80%). Επειδή το λίθιο είναι το ελαφρύτερο στερεό στοιχείο, οι μπαταρίες που βασίζονται σε αυτό μπορούν να είναι κατά πολύ ελαφρύτερες από τις συνηθισμένες. Γι' αυτό το λόγο και λόγω της μεγάλης αποτελεσματικότητάς τους, βρίσκουν πολλές εφαρμογές στα κινητά τηλέφωνα και στους φορητούς υπολογιστές.

### 3.6 Μπαταρίες μετάλλου – αέρα

Το γεγονός ότι είναι οι φθηνότερες μπαταρίες, σε συνδυασμό με την υψηλή πυκνότητά τους εξηγεί γιατί τις παράγουν πολλές γνωστές εταιρείες. Ως άνοδος χρησιμοποιούνται συνήθως κατάλληλα μέταλλα π.χ. αλουμίνιο, ψευδάργυρος, μόλυβδος ή ακόμη και σίδηρος, τα οποία τοποθετούνται σε ρευστό ή πολυμερή ενσωματωμένο ηλεκτρολύτη π.χ. από κάλιο, και απελευθερώνουν ηλεκτρόνια κατά τη μετέπειτα αντίδραση οξείδωσης. Αυτά καθώς έλκονται από την κάθοδο καταλύτη και άνθρακα και καθώς ρέουν σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, δημιουργούν διαφορά δυναμικού στα άκρα της μπαταρίας.

Οι μπαταρίες μετάλλου – αέρα είναι δομικά ασφαλείς και φιλικές προς το περιβάλλον. Αλλά ενώ η υψηλή ενέργεια, η ελεγχόμενη εκφόρτιση και το χαμηλό κόστος θα μπορούσαν να τις καθιστούν κατάλληλες για πολλές εφαρμογές, η μόνη γνωστή και κατάλληλη επαναφορτιζόμενη συσκευή είναι ένα σύστημα ψευδαργύρου – αέρος. Το σύστημα αυτό έχει πολύ μικρό κύκλο ζωής και αποτελεσματικότητα φόρτισης/εκφόρτισης μόνο 50% περίπου. Μερικοί κατασκευαστές ξεπερνούν τη δυσκολία επαναφόρτισης προσφέροντας συσκευές που είναι δυνατό να ανεφοδιαστούν έτσι ώστε να αντικατασταθεί το μέταλλο που καταναλώθηκε. Αυτή η λύση όμως έχει συνέπειες στον κύκλο ζωής, το κόστος και την ευκολία χρήσης.

### 3.7 Εναλλακτικές αποθηκευτικές διατάξεις

Μια εναλλακτική λύση στην ηλεκτροχημική αποθήκευση είναι να μετατραπεί η ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική και να αποθηκευτεί σε μια περιστρεφόμενη μάζα. Αρχές όπως η Federal Transit Administration στις Ηνωμένες Πολιτείες βλέπουν ότι τα συστήματα στρεφόμενων τροχών έχουν δυνατότητες στα υβριδικά - ηλεκτρικά λεωφορεία, όπου θα ήταν ελαφρύτερα από τα ισοδύναμα πακέτα μπαταριών. Αντίθετα από τις μπαταρίες, τα συστήματα στρεφόμενων μαζών δεν είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει ως και 80-90%, έναντι στο 65-75% των μπαταριών. Η ενέργεια που αποθηκεύεται με την περιστροφή μίας στρεφόμενης μάζας σε υψηλή ταχύτητα μπορεί να μετατραπεί ξανά ηλεκτρική ισχύ με τη σύνδεση της μάζας σε μια γεννήτρια. Το ποσό ενέργειας που μπορεί να

αποθηκευτεί στη στρεφόμενη μάζα είναι ανάλογο της μάζας του στροφέα και ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας του στροφέα (σύμφωνα με την εξίσωση  $k=(mv^2)/2$  όπου  $k$ = κινητική ενέργεια,  $m$ = μάζα και  $v$ = ταχύτητα). Γι' αυτό το λόγο αν θέλουμε αυξηθεί η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί είναι αποτελεσματικότερο να αυξηθεί η ταχύτητα παρά η μάζα. αυξάνεται ταχύτερα όσο αυξάνεται η περιστροφική ταχύτητα σε σχέση με την αύξηση της μάζας της ρόδας. Για αυτό τα τελευταία χρόνια στο σχεδιασμό των στρεφόμενων μαζών η έμφαση έχει μετατοπιστεί από το σχεδιασμό της γεωμετρίας της μάζας στην προσπάθεια να επιτευχθούν υψηλές περιστροφικές ταχύτητες. Ταχύτητες μέχρι 40000rpm έχουν ήδη επιτευχθεί, ενώ μέχρι 60000rpm προβλέπονται για τις μελλοντικές γενεές. Κυλινδρικοί στροφείς, φτιαγμένοι από υψηλής απόδοσης γυαλί και άνθρακα ενισχυμένοι με πλαστικά υλικά για μεγαλύτερη αντίσταση στις υψηλές φυγοκεντρικές δυνάμεις, θα περιστρέφονται στον αέρα.

Οι στρεφόμενες μάζες καθώς παρέχουν μια υψηλής ενέργειας ώθηση, εκφορτίζονται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα αν είναι απαραίτητο. Έτσι προτιμούνται όλο και περισσότερο για εκτεταμένες εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών καθώς και για την ικανοποίηση της ζήτησης ενέργειας σε ώρες αιχμής όπου απαιτείται άμεση παροχή σχετικά μεγάλης ποσότητας ενέργειας.

Μαγνητικά αιωρούμενοι σύνθετοι στροφείς με ταχύτητες 60.000rpm θα παρείχαν χρόνο πλήρους εκφόρτισης ως και 15 λεπτά. Πιστεύεται ότι οι στρεφόμενες μάζες θα μπορούσαν να συμπληρώσουν τις μπαταρίες στα συστήματα ισχύος ανανεώσιμων πηγών. Οι στρεφόμενες μάζες θα μπορούσαν να εξισορροπήσουν τις απότομες και γρήγορες μεταβολές στο φορτίο. Οι μεταβολές αυτού του είδους θα έφθειραν γρήγορα τις μπαταρίες λόγω των περιορισμένων κύκλων ζωής που έχουν. Αντίθετα οι ηλεκτροχημικές μονάδες θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν τις πιο αργές μεταβολές.

Έρευνες γίνονται για τη μείωση του κόστους των στρεφόμενων μαζών. Ωστόσο ο αναμενόμενος χρόνος ζωής τους που φτάνει τα 15 – 20 χρόνια (για χρήση σε υψηλές συχνότητες), καθώς και η ελάχιστη συντήρηση και παρακολούθηση που απαιτείται, αντισταθμίζουν το μέχρι τώρα υψηλό κόστος.

### 3.8 Υπέρ - πυκνωτής (supercapacitor)

Μια εναλλακτική λύση για την εξυπηρέτηση των γρήγορων και απότομων μεταβολών του φορτίου είναι ο υπέρ - πυκνωτής. Οι μονάδες υπέρ - πυκνωτών έχουν χωρητικότητα ισχύος και ενέργειας χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών πυκνωτών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εξομαλύνουν τις 'βυθίσεις' που παρατηρούνται στην παραγωγή του ανεμοκινητήρα καθώς τα περύγια περνούν από τον πύργο που τον στηρίζει, οπότε η ροή αέρα διαταράσσεται και μειώνεται με αποτέλεσμα να εμφανίζονται βυθίσεις στην παραγωγή. Για να αντιμετωπιστεί αυτό απαιτείται επαναλαμβανόμενη παροχή ενέργειας και ταχύτατη απόκριση με σύντομους υψηλής συχνότητας παλμούς. Οι υπέρ - πυκνωτές είναι ικανοί να παρέχουν ισχύ της τάξης των 100kW, ενώ η ενέργειά τους είναι δυνατό να διοχετευτεί μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου ως και μέσα σε ένα λεπτό. Ειδικοί (π.χ. SAFT, ELIT) αναφέρουν ότι αναπτύσσουν μονάδες υπέρ - πυκνωτών βασισμένες σε προηγμένους οργανικούς ηλεκτρολύτες που θα είναι ικανές να παρέχουν ενεργειακές πυκνότητες των 25kW/ m<sup>3</sup>

### 3.9 Υπεραγωγία πηνία (SMES)

Ένας άλλος τύπος διάταξης που αναπτύσσεται κυρίως για τη σταθεροποίηση των διακυμάνσεων στην τάση του δικτύου και την ενίσχυση της ισχύος σε ώρες αιχμής αλλά και με προοπτική για εφαρμογή σε ανανεώσιμες πηγές είναι το υπεραγωγίο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES).

Τα χαρακτηριστικά της διάταξης των υπεραγωγίων πηνίων είναι τέτοια ώστε να εμφανίζουν σχεδόν μηδενική αντίσταση στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και να οδηγούν τον ηλεκτρισμό, σχεδόν χωρίς απώλειες, σε συστήματα ειδικά σχεδιασμένα ώστε να 'εγκλωβίζουν' αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Πρόσφατες παρουσιάσεις εφαρμογών διανομής ενέργειας στις ΗΠΑ και στην Ευρώπη δείχνουν ότι και τα υπεραγωγία πηνία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να συμπληρώσουν τις ανανεώσιμες πηγές, ειδικά όπου υπάρχει ήδη κατάλληλη υποδομή ψύξης. Τα πρώιμα υπεραγωγία υλικά για να αποδώσουν χρειάζονται κρυογόνο ψύξη η όποια έχει μεγάλο κόστος. Τελευταία εμφανίστηκαν

υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγοί ('High Temperature' Superconductors, HTS) οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες σύμφωνες με τη βιομηχανικά τυποποιημένη ψύξη υγρού αζώτου, περισσότερο συμφέρουσα από την κρυογόνο ψύξη. Λόγω αυτού του γεγονότος αρκετές αμερικανικές επιχειρήσεις έχουν καταφέρει να κυκλοφορήσουν στο εμπόριο υπεραγωγία καλώδια και ταινίες.

Πέρα από τα παραπάνω μια περαιτέρω στροφή στην ιστορία της υπεραγωγιμότητας ήταν η πρόσφατη ανακάλυψη ότι μία κοινή ένωση η  $MgB_2$  μπορεί να ημι - άγει. Ωστόσο αυτό το υλικό χρειάζεται ψύξη περίπου στα  $20^{\circ}K$ , γι' αυτό οι επιστήμονες αναζητούν ένα υλικό που θα ήταν σε θέση να ημι - άγει σε αρκετά υψηλότερες θερμοκρασίες. Το ιδανικό θα ήταν κάποιο υλικό που θα παρουσίαζε αμελητέα ηλεκτρική αντίσταση στη θερμοκρασία δωματίου. Μέχρι τώρα όμως έχει ανακαλυφθεί το ασβέστιο  $130^{\circ}K$  ως ανώτερο όριο μετάβασης. Ανάμεσα στα υλικά που ερευνώνται είναι και ορισμένα πολυμερή πλαστικά και μερικοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι έχουν παρατηρήσει τα σημάδια της υπεραγωγιμότητας στη θερμοκρασία δωματίου στον άνθρακα nanotubes.

### 3.10 Αποθήκευση μακράς διάρκειας

Στα μεγάλα συστήματα ΑΠΕ που είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο, για να συμπέσει η τροφοδοσία ενέργειας από αποθηκευτικές διατάξεις με τις προβλέψεις για ζήτηση ενέργειας απαιτείται μεγάλης κλίμακας και μακράς διάρκειας αποθήκευση ενέργειας. Μία πολλά υποσχόμενη λύση είναι ένα ηλεκτροχημικό σύστημα αποθήκευσης, η κυψέλη καυσίμων. Στη διάταξη αυτή ο ηλεκτρολύτης αποθηκεύεται σε χωριστές δεξαμενές, από τις οποίες ρέει μέσα σε σωλήνες, συγκρατώντας τη συναρμολόγηση των ηλεκτροδίων της μπαταρίας. Αυτή η διάταξη διευκολύνει πολύ τους ογκομετρικούς περιορισμούς που τίθενται σχετικά με την ποσότητα ηλεκτρολύτη που μπορεί να συνδεθεί με ένα δεδομένο σύστημα, και ως εκ τούτου και την ισχύ που μπορεί να αποθηκευτεί. Η ηλεκτροχημική απελευθέρωση της ενέργειας εμφανίζεται όταν δύο διαφορετικές ενώσεις άλατος (ηλεκτρολύτες) φέρνονται κοντά η μία στην άλλη μέσα στην κυψέλη αλλά χωρίζονται από μία μεμβράνη διεξαγωγής ιόντων. Η ροή ρεύματος μέσω της μεμβράνης δημιουργεί διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια και κατά συνέπεια



ενέργεια σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Αυτή ή ροή ρεύματος συνοδεύεται από χημικές μεταβολές και στους δύο ηλεκτρολύτες. Αυτές οι μεταβολές αναιρούνται αν κατά τη διάρκεια του κύκλου επαναφόρτισης εφαρμοστεί εξωτερικά στα ηλεκτρόδια ένα αντίστροφο δυναμικό. Με αυτό τον τρόπο οι συνδεδεμένοι ηλεκτρολύτες επιστρέφουν στην αρχική ηλεκτροχημική κατάσταση τους.

Με αυτή τη διαδικασία μπορούν να αποθηκευτούν τεράστια ποσά ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα σύστημα που υλοποιείται πρόσφατα στο Little Barford, Cambridgeshire, της Αγγλίας έχει χωρητικότητα 120 MWh – καθιστώντας το τη μεγαλύτερη μπαταρία παγκοσμίως. Αυτό το σύστημα έχει δύο δεξαμενές 1800m<sup>3</sup> που περιέχουν υγρούς ηλεκτρολύτες πολυσουλφιδίων νατρίου και βρωμίδων νατρίου. Η εκφόρτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια λεπτών ή ωρών και ο κύκλος φόρτισης/ εκφόρτισης μπορεί να επαναληφθεί επ' άοριστο. Η μέγιστη εκτιμώμενη ισχύς είναι 15MW. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι χαμηλή και η αποδοτικότητα περιορίζεται σε περίπου 75-80%. Άλλες χημικές δομές των κυψελών ροής είναι οι ψευδάργυρου/ βρωμίου, νατρίου/ βρωμίου και θειικό οξύ/ βαναδίου. Οι κυψέλες καυσίμων έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί με ανανεώσιμες πηγές. Για παράδειγμα διάφορα μακρινά χωριά στη Μαλαισία που τροφοδοτήθηκαν από υβριδικά συστήματα 'εκτός δικτύου' είχαν εγκατεστημένες κυψέλες καυσίμων.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### **4.1 Αναγκαιότητα αποθηκευτικής διάταξης σε συστήματα με ανανεώσιμες πηγές.**

Επειδή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από φυσικά φαινόμενα (π.χ. αιολική και ηλιακή ενέργεια) υπάρχει ενδεχόμενο, αρκετές φορές η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ να μη συμπίπτει χρονικά με τη ζήτηση από την πλευρά των καταναλωτών. Η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας και η μετέπειτα χρήση της σε διαστήματα όπου θα υπάρχει ζήτηση, θα βοηθούσε ώστε να εκμεταλλευτούμε πλήρως τα πλεονεκτήματα που παρέχουν οι ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον σε αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει καλύτερη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας αφού πλέον σχεδόν εκμηδενίζεται η

πιθανότητα να μην υπάρξει ενέργεια τη στιγμή που θα ζητηθεί και έτσι επιτρέπεται η δημιουργία περισσότερο μακροπρόθεσμων σχεδίων διαχείρισης. Η ύπαρξη αποθηκευτικού μέσου λοιπόν δίνει στις ΑΠΕ την αξιοπιστία ενός συμβατικού συστήματος παραγωγής ενέργειας (π.χ. γεννήτριες ντίζελ) και ανοίγει το δρόμο για τη δημιουργία συστημάτων παραγωγής ενέργειας που βασίζονται αποκλειστικά και μόνο σε ανανεώσιμες πηγές.

Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή για την οποία θα χρησιμοποιούνται οι ΑΠΕ χρειάζεται και μία αποθηκευτική διάταξη με κατάλληλες ιδιότητες. Προκειμένου να αποφασιστεί ποιο αποθηκευτικό μέσο είναι κατάλληλο για κάθε περίπτωση εφαρμογής χρειάζεται να εξεταστεί μια ευρεία γκάμα αποθηκευτικών διατάξεων.

Ιδιαίτερη είναι λοιπόν, η χρησιμότητα των ανανεώσιμων πηγών στα συστήματα τροφοδοσίας ενέργειας. Στα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποθηκευτικά μέσα βραχείας ή μακράς διάρκειας αποθήκευσης, ανάλογα με τη χρήση του συστήματος και τις ιδιότητες του αποθηκευτικού μέσου. Ανάλογα με το μέγεθος του αποθηκευτικού μέσου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διατάξεις για σχετικά μικρής διάρκειας αποθήκευση, π.χ. μία μέρα ή βδομάδα, ή για μεγάλης διάρκειας που είναι ικανές να τροφοδοτήσουν με ενέργεια κατά τη διάρκεια σχεδόν όλου του χειμώνα, για παράδειγμα σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, χωρίς να υπάρχει υποστήριξη συμβατικών γεννητριών. Σαν αποθηκευτικές διατάξεις βραχείας διάρκειας χρησιμοποιούνται κυρίως μπαταρίες μολύβδου λόγω του χαμηλού τους κόστους σε σχέση με τα άλλα μέσα, ενώ για μεγάλη διάρκεια ενδείκνυνται κυρίως αποθηκευτές υδρογόνου. Με τη βοήθεια του αποθηκευτικού μέσου λοιπόν, μπορούν να υπάρξουν εγκαταστάσεις αμιγώς ανανεώσιμων πηγών (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια) χωρίς την εφεδρεία συμβατικής γεννήτριας.

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή της αποθηκευτικής διάταξης είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες πρόκειται να εκτεθεί η διάταξη. Έτσι ανάλογα με την περίπτωση και τις εγκαταστάσεις μπορεί να επιλεγεί διάταξη που μπορεί να εκτεθεί σε θερμοκρασίες από  $-10$  ως  $45^{\circ}\text{C}$ , δηλαδή πρακτικά να τοποθετηθεί σε εξωτερικούς χώρους σχεδόν χωρίς καμία προστασία, διάταξη που πρέπει να τοποθετηθεί μέσα σε κτίριο ( $5$  ως  $20^{\circ}\text{C}$ ) ή διάταξη που χρειάζεται να τοποθετηθεί σε μονωμένους χώρους ή χώρους με ενεργό έλεγχο θερμοκρασίας ώστε η θερμοκρασία να διατηρείται στους  $15$  ως  $25^{\circ}\text{C}$ .

Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι αν οι ανανεώσιμες πηγές καλύπτουν ένα μικρό μέρος από τη ζήτηση σε ενέργεια, η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να μην είναι απαραίτητη καθώς η ζήτηση μπορεί να καλυφθεί από τα άλλα στοιχεία (π.χ. γεννήτριες ντίζελ). Ωστόσο όμως όσο αυξάνει η συμβολή των ανανεώσιμων πηγών στην εξυπηρέτηση του ζητούμενου φορτίου, γεγονός που είναι αναμενόμενο για τα επόμενα χρόνια, τόσο γίνεται απαραίτητη η διάταξη αποθήκευσης. Αυτό γίνεται εμφανές σε εγκαταστάσεις παροχής ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επειδή τη νύχτα δεν υπάρχει ηλιοφάνεια είναι πιθανό η ζήτηση σε φορτίο να αυξηθεί νωρίς το απόγευμα, γιατί οι καταναλωτές θα προνοήσουν για τη νύχτα, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία αιχμή στο φορτίο εκείνη την ώρα, η οποία θα πρέπει να καλυφθεί από συμβατικές πηγές. Η εγκατάσταση ενός αποθηκευτικού συστήματος θα βοηθούσε να εξομαλυνθούν αυτές οι κορυφές στη ζήτηση ενέργειας και να δημιουργηθεί στο βαθμό που είναι εφικτό ένα σταθερό φορτίο βάσης. Επίσης η αποθήκευση βοηθάει στο να εξισορροπηθεί η υψηλή παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά το καλοκαίρι με τη χαμηλή κατά τη διάρκεια του χειμώνα όπως προαναφέρθηκε.

Πολλά υποσχόμενη είναι επίσης η ύπαρξη αποθηκευτικού μέσου σε εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών για την τροφοδοσία απομακρυσμένων περιοχών. Το κόστος δημιουργίας μίας γραμμής μεταφοράς προκείμενου να μεταφερθεί ηλεκτρική ενέργεια από τον πλησιέστερο υποσταθμό και το κόστος παραγωγής αυτής της ενέργειας με συμβατικούς τρόπους (π.χ. το κόστος του καυσίμου της συμβατικής γεννήτριας) είναι ασύγκριτα μεγαλύτερο, από ότι η τροφοδοσία ενέργειας από ΑΠΕ με τη συνεισφορά κατάλληλης αποθηκευτικής διάταξης.

Τέλος οι αποθηκευτικές διατάξεις βοηθούν στο να ξεπεραστεί το γεγονός ότι η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ δεν μπορεί να είναι πλήρως προβλέψιμη. Έτσι είναι δυνατή η διαχείριση ενέργειας και ισχύος. Ένα μέρος από την παραγόμενη ενέργεια των ΑΠΕ καταναλώνεται αμέσως ώστε να αντικαταστήσει συμβατικές πηγές και το υπόλοιπο πρέπει να αποθηκεύεται για μετέπειτα χρήση.

#### **4.2 Σύγκριση των εφαρμογών των κυριότερων αποθηκευτικών μέσων.**

Με κριτήριο την ταχύτητα εκφόρτισης, πρώτα στην κλίμακα είναι τα υπεραγωγίμα πηνία και οι υψηλής ισχύος πυκνωτές με χρόνο εκφόρτισης λίγα δευτερόλεπτα. Η

ισχύς των πυκνωτών υψηλής ισχύος κυμαίνεται από 100kW ως 1MW. Με χρόνο εκφόρτισης αρκετά δευτερόλεπτα ως και μερικά λεπτά ακολουθούν οι υψηλής ισχύος στρεφόμενες μάζες (flywheels), για συστήματα ισχύος από 10 ως λίγες εκατοντάδες kW. Στη συνέχεια ακολουθούν με τη σειρά οι μπαταρίες λιθίου – ιόντος, νικελίου – καδμίου, μολύβδου – οξέως και οι υψηλής ενέργειας υπέρ – πυκνωτές (super capacitors) με χρόνο εκφόρτισης αρκετά λεπτά ως και μία ώρα αντίστοιχα. Η ισχύς των συστημάτων με μπαταρίες λιθίου – ιόντος κυμαίνεται από 1 ως 100kW, με μπαταρίες νικελίου – καδμίου από 1kW ως 5MW, με μπαταρίες μολύβδου - οξέως από 1kW ως 10MW και τέλος για τους υψηλής ενέργειας υπέρ - πυκνωτές από 5 ως 100kW. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και οι μακράς διάρκειας στρεφόμενες μάζες για συστήματα ισχύος ως και 5kW περίπου. Στην τελευταία κατηγορία με χρόνο εκφόρτισης της τάξεως κάποιων ωρών βρίσκονται οι μπαταρίες μετάλλου – αέρος για συστήματα ισχύος ως 10kW, οι μπαταρίες ροής ZnBr, VRB, PSB για συστήματα ισχύος από 10kW ως 10MW, ενώ στην ίδια κατηγορία για συστήματα 1GW κατάλληλη είναι η αντλησιοταμίευση και τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα.

Με κριτήριο το κόστος εγκατάστασης ανά μονάδα ενέργειας (\$-kWh) φθηνότερες είναι οι μπαταρίες μετάλλου – αέρος με αρχικό κόστος 20 – 50\$, ακολουθούν οι διατάξεις αντλησιοταμίευσης με 40 – 100\$, οι μπαταρίες ροής (flow batteries) με κόστος από 100 ως 1100\$, οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος με 200 – 1000\$, οι νικελίου – καδμίου, οι λιθίου – ιόντος και οι μακράς διάρκειας στρεφόμενες μάζες με 800 – 2000\$ και στη συνέχεια οι μακράς διάρκειας στρεφόμενες μάζες και οι υψηλής ισχύος E.C. Capacitors με κόστος που πλησιάζει τα 10000\$.

Με κριτήριο το κόστος εγκατάστασης ανά μονάδα ισχύος φθηνότεροι είναι οι υψηλής ισχύος E.C. Capacitors με 100 – 700\$, στη συνέχεια έρχονται οι υψηλής ισχύος στρεφόμενες μάζες και οι E.C. Capacitors με 150 – 700\$, ακολουθούν οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος με 300 – 800\$. Στην επόμενη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα συμπιεσμένου αέρα με 700 ως 1000\$, οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου και τα συστήματα αντλησιοταμίευσης με 700 ως 1200\$, οι μπαταρίες μετάλλου αέρα με κόστος 1000 – 1700\$ και τέλος οι λιθίου – ιόντος με 1200 – 6500\$ και οι μακράς διάρκειας στρεφόμενες μάζες με 3000 – 10000\$ όπως στον πίνακα 1.2.

Ως προς τη διάρκεια αποθήκευσης τα αποθηκευτικά μέσα μπορούν να ταξινομηθούν σε 4 κατηγορίες:

- Διατάξεις πολύ βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης – κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος
- Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης – κατάλληλες για εφαρμογές εξομάλυνσης διακυμάνσεων της αιολικής παραγωγής
- Διατάξεις μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης – κατάλληλες για εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίου
- Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης – κατάλληλες για αποθέματα αιολικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### 5.1 Αποθήκευση ενέργειας

Για δεκαετίες, η έρευνα στην αποθήκευση ενέργειας εστιάζοταν κυρίως σε μεγάλη κλίμακας τεχνολογίες για την αποθήκευση ενέργειας, σε συνθήκες χαμηλής ζήτησης με σκοπό την εξυπηρέτηση φορτίου τις ώρες αιχμής κατά τη διάρκεια της χρήσης. Αν και οι εγκαταστάσεις αυτές μπορούν ακόμη να είναι οικονομικά αποδοτικές, έχουν αναπτυχθεί μια σειρά από μικρότερες συσκευές αποθήκευσης με σημαντική διεύρυνση των εφαρμογών τους τα τελευταία δέκα χρόνια σε ένα ευρύ φάσμα θεμάτων κοινής ωφέλειας. Όπως είναι οι προηγμένες μπαταρίες, οι υπέρ-πυκνωτές, οι υψηλής απόδοσης κυψέλες καυσίμου, που έχουν τη δυνατότητα να αυξάνουν την αποτελεσματικότητα, την αξιοπιστία, την ποιότητα της ισχύος σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε σε εγκαταστάσεις ενός μεμονωμένου χρήστη.

Εφόσον η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η οποία επέδειξε ανάπτυξη σε παγκόσμιο επίπεδο, σπάνια μπορεί να παρέχει άμεση ανταπόκριση στη ζήτηση, καθώς οι πηγές αυτές ενέργειας δεν παρέχουν ένα συνεχή εφοδιασμό και επομένως δεν προσαρμόζονται εύκολα στις ανάγκες της ζήτησης. Έτσι, η ανάπτυξη της αποκεντρωμένης παραγωγής σημαίνει μεγαλύτερο φορτίο στο δίκτυο μεταφοράς δημιουργώντας προβλήματα σταθερότητας και επομένως κρίνεται αναγκαία η απαίτηση για αποθήκευση της ενέργειας.

Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας σε ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας είναι οποιαδήποτε εγκατάσταση, η οποία δύναται να αποθηκεύσει ενέργεια, που παράγεται στο κυρίως ενεργειακό σύστημα, να τη διατηρήσει και να την αποδώσει στο σύστημα όταν αυτό είναι απαραίτητο. Με τα συστήματα αποθήκευσης μειώνεται η κατανάλωση σε ενέργεια και αυξάνεται η απόδοση του όλου συστήματος. Ανάλογα με το σύστημα παραγωγής ενέργειας και την χρονική περίοδο αποθήκευσης μεταβάλλεται η μορφή αποθήκευσης της ενέργειας και η διάρκεια του κύκλου λειτουργίας της. Η αποθήκευση ενέργειας, μπορεί να είναι είτε θερμική είτε ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ευρίσκεται σε ποιο ώριμο τεχνολογικό στάδιο και για αυτό το λόγο δύναται μεγαλύτερη βαρύτητα. Τα κύρια πλεονεκτήματα που καθιστούν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ένα ενδιαφέρον εγχείρημα θα μπορούσαν να περιγράψουν ως εξής:

- Η ασφάλεια εφοδιασμού. Η ενέργεια που προέρχεται από του σταθμού παραγωγής, μέσω της μετατροπής της σε χαμηλούς κόστους πρωτογενή πηγή ενέργειας που οφείλεται στην χρησιμοποίηση συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να αποθηκεύεται και να χρησιμοποιείται σε κατάλληλη χρονική στιγμή για να υποκαταστήσει τη δαπανηρή πρωτογενή ενέργεια που απαιτείται στην αιχμή φορτίου των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται αναγκαία, είτε με συμβατική μορφή όπως χρήση ορυκτών καυσίμων, είτε με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Η εξοικονόμηση του δικτύου. Σχηματικά, ένα δίκτυο ενέργειας αποτελείται από πολλές μονάδες, με διαφορετικά επίπεδα των γραμμών μεταφοράς και διανομής δηλαδή γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής/ υψηλής τάσης, μέση τάση, των συναφών σταθμών, των υποσταθμών και ένα μεγάλο φορτίο με απαιτήσεις σε κατανάλωση που πρέπει να καλυφθεί. Σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, είτε αυτό είναι ένα ισχυρό διασυνδεδεμένο δίκτυο όπως αυτό της ηπειρωτικής χώρας είτε είναι αυτόματο μεγάλης ή μικρότερης ισχύος, όπως τα νησιά ανάλογα με το μέγεθος τους σε κάθε χρονική στιγμή πρέπει να ικανοποιείται το ισοζύγιο της ισχύος, δηλαδή η ισχύς που απορροφάται από τους καταναλωτές το φορτίο πρέπει να είναι ίση, με μικρές αποκλίσεις, προς αυτή που παράγουν οι σταθμοί παραγωγής. Όμως η κατανάλωση ενέργειας από τους χρήστες, κατά την διάρκεια της ημέρας, χαρακτηρίζεται από ανισότητα

και διακύμανση, με την έννοια ότι η ελάχιστη κατανάλωση εμφανίζεται σχεδόν μισή φορά σε σχέση με την μέγιστη αιχμή. Η ζήτηση των χρηστών, όσον αφορά την αναλογία μεταξύ της μέσης προβλεπόμενης ισχύος και τη πραγματική στιγμιαία ισχύος αιχμής, έχει μεγάλες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό οδηγεί στη διαστασιολόγηση της παραγωγής και της μεταφοράς του εξοπλισμού, που έχουν σχεδιαστεί σε συνάρτηση με τις αιχμές της ζήτησης και όχι με την ημερήσια κατανάλωση.

- Ωστόσο, η μέση ζήτηση φορτίου συμβάλλει στη μείωση των διακυμάνσεων στο ελάχιστο, καθιστώντας την πιο προβλέψιμη για αυτό στις εγκαταστάσεις μεταφοράς και διανομής θα πρέπει να υπολογίζεται η καμπύλη μέσης ημερησίας κατανάλωσης, που συμβάλει τόσο στον προγραμματισμό της ανάγκης σε ισχύ του υφιστάμενου δικτύου αλλά και την καλύτερη αξιοποίηση των υφιστάμενων εγκαταστάσεων. Παρά τις στατιστική ανάλυση της μέσης κατανάλωσης η ζήτηση ενέργειας ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την ώρα της ημέρας ή από την εποχή σε εποχή. Εδώ βρίσκεται η σημασία της αποθήκευσης ενέργειας. Με τη χρήση αποθήκευσης παρέχεται τοπική παροχή αντιστάθμισης στις διακυμάνσεις του φορτίου επομένως θα είναι δυνατόν να λειτουργούν τα δίκτυα μεταφοράς και τα δίκτυα διανομής με απλούστερες ηλεκτρικές διατάξεις.
- Το πλεονέκτημα της ευελιξίας στη χρήση. Η ευελιξία των συστημάτων αποθήκευσης και ανάκτησης μπορεί να βοηθήσει ώστε να παρέχει άμεση απόκριση στη ζήτηση και κατά συνέπεια, να αυξηθεί η ευελιξία του δικτύου όσον αφορά τη ζήτηση. Η ανάγκη σε αποθήκευση μπορεί να προκληθεί από ένα προσωρινό έλλειμμα παραγωγής, το οποίο θα μπορούσε ενδεχομένως να προβλεφθεί. Η ανάγκη θα μπορούσε επίσης να είναι αποτέλεσμα ενός σφάλματος στην παραγωγή. Αυτός είναι ο λόγος που προκύπτουν κέρδη μέσω του ενδιάμεσου συστήματος αποθήκευσης με σκοπό να διασφαλιστεί η απόδοση των δαπανών της διπλής μετατροπής ηλεκτρισμού-ενδιάμεση αποθήκευση ενέργειας-ηλεκτρισμός.
- Η ανάγκη εξομάλυνσης της παραγόμενης ενέργειας. Η χρονική διακύμανση του φορτίου είναι σχετικά προβλέψιμη ώστε να προσαρμόζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Για τεχνικούς λόγους και σε περιόδους χαμηλού φορτίου, οι μεγάλοι θερμικοί σταθμοί δεν μπορούν να μειώσουν την παραγωγή τους

κάτω από ένα τεχνικό ελάχιστο όριο οπότε τις χρονικές αυτές περιόδους φαίνεται να περισσεύει ισχύς στο δίκτυο. Επίσης στις χρονικές περιόδους υψηλού φορτίου και ιδιαίτερα στις αιχμές του φορτίου είναι ιδιαίτερα επιθυμητή στον διαχειριστή ενός δικτύου η διαθεσιμότητα μεγάλης ισχύος σε σύντομο χρονικό διάστημα. Από τα προηγούμενα προκύπτει η ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας τις ώρες που υπάρχει αυτή διαθέσιμη και η δυνατότητα πρόσδοσης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τις περιόδους αιχμής.

Συνοψίζοντας πιθανές εφαρμογές που μπορούν να έχουν οι αποθηκευτικές διατάξεις σε ένα Σ.Η.Ε. (Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας) κάποιες από τις οποίες μπορούν να εξυπηρετούνται από την ίδια αποθηκευτική διάταξη είτε ταυτόχρονα είτε σε διαφορετικές περιόδους:

- α. Χρήση αποθηκευμένης ενέργειας λόγω έλλειψης ικανότητας παραγωγής των διαθέσιμων μονάδων.
- β. Αποθήκευση ενέργειας για αποφυγή παραβίασης τεχνικών ελαχίστων θερμικών μονάδων.
- γ. Χρήση αποθηκευτικής διάταξης για εξομάλυνση της παραγόμενης ενέργειας από Α.Π.Ε. και αποδοτικότερης συμμετοχής τους στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, αποθηκεύοντας στις ώρες χαμηλού κόστους και χρησιμοποιώντας την στις ώρες υψηλού κόστους εκμεταλλευόμενοι τη διαφορά τιμών.
- δ. Περιορισμός αποκτώμενης ενέργειας από Α.Π.Ε. αποθήκευσης ενέργειας για χρήση σε επόμενο χρονικό διάστημα οπότε και δεν θα υπάρχει διαθέσιμη παραγωγή. Είναι η συνηθισμένη πρακτική σε μικρά αυτόνομα και απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.
- ε. Για εκμετάλλευση της διαφοράς κόστους παραγωγής από τις συμβατικές μονάδες είτε χωρίς αλλαγή του προγράμματος ένταξης μονάδων με οικονομική κατανομή, είτε μεταβάλλοντας κάπως το πρόγραμμα ένταξης μονάδων.



στ. Παροχή στρεφόμενης εφεδρείας, παροχή σε έκτακτη χρονική στιγμή. Περιορισμός απωλειών δικτύου λόγω της παροχής ισχύος σε πολύ τοπικό επίπεδο.

ζ. Αποφυγή ή μετάθεση επενδύσεων ενίσχυσης δικτύου, διανομής ειδικά αν υπάρχει συνδυασμός της διάταξης αποθήκευσης με κάποιας μορφής παραγωγής από Α.Π.Ε. , αν έχουν επιλεγεί οι κατάλληλες θέσεις για την εγκατάσταση της.

η. Διαχείριση ζητημάτων ποιότητας ισχύος λόγω της γρήγορης απόκρισης των μονάδων αυτών.

θ. Αδιάλειπτη παροχή ισχύος.

ι. Εκκίνηση μετά από σφάλμα (Black start).

κ. Υποστήριξη τάσης και συχνότητας.

λ. Παραγωγή άλλου αγαθού και αποθήκευσής του π.χ. θερμότητας, σε ώρες

στις οποίες το κόστος είναι χαμηλό για την αποφυγή κατανάλωσης

ενέργειας σε ώρες υψηλού φορτίου.

Επιπλέον οι χρονικοί ορίζοντες για τη χρήση των αποθηκευτικών διατάξεων για μία από τις παραπάνω δυνατές εφαρμογές τους χωρίζουν τις διατάξεις αποθήκευσης σε διατάξεις :

- Βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης. Πρόκειται για τις διατάξεις αποθήκευσης που μπορούν να προσφέρουν ή να απορροφήσουν ενέργεια για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (λίγα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά). Τυπικές εφαρμογές αυτού του είδους είναι η παροχή αδιάλειπτης παροχής ισχύος και ευστάθειας λειτουργίας ΣΗΕ.
- Μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης. Αφορά διατάξεις που χρησιμοποιούνται για χρονικούς ορίζοντες από μερικά λεπτά ως μερικές ώρες. Τέτοιου είδους εφαρμογές είναι η διαχείριση ΑΠΕ, η ενίσχυση της παροχής στρεφόμενης εφεδρείας και η διαχείριση παρεχόμενης ισχύος στους καταναλωτές.

- Μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Αφορά διατάξεις αποθήκευσης από αρκετές ώρες μέχρι βδομάδα και μήνες. Κυρίως χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση της ζήτησης μεταξύ ωρών αιχμής και μη αιχμής ή την ικανοποίηση ζήτησης αιχμής έχοντας αποθηκεύσει ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης.

## 5.2 Εφαρμογές αποθήκευσης με βάση τις τεχνικές/μεθόδους μετατροπής

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά, αρχικά με την μετατροπή σε άλλη μορφή ενέργειας και να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική όταν χρειάζεται. Υπάρχουν πολλές τεχνικές για την αποθήκευση της ενέργειας, σε σχεδόν όλες τις μορφές ενέργειας: μηχανική, χημική και θερμική. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης που θα ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με τις εφαρμογές και τις εκάστοτε ανάγκες.

Οι τεχνικές αποθήκευσης μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τις εφαρμογές τους:

- Εφαρμογές χαμηλής ισχύος σε απομονωμένες περιοχές, για την κάλυψη έκτακτων αναγκών και των τερματικών σταθμών.
- Εφαρμογές μέσης ισχύος σε απομονωμένες περιοχές (επιμέρους ηλεκτρικά συστήματα).
- Εφαρμογή μεγίστης ζήτησης σε αποκεντρωμένα δίκτυα.
- Εφαρμογές που απαιτείται ποιοτικός έλεγχος της ισχύος.

Οι δύο πρώτες κατηγορίες είναι μια μικρής κλίμακας συστήματα όπου η ενέργεια θα μπορούσε να αποθηκευθεί ως κινητική ενέργεια, χημική ενέργεια, ή ως υδρογόνο (κυψέλες καυσίμου), ή σε υπέρ-πυκνωτές ή υπεραγωγούς.

Οι κατηγορίες τρία και τέσσερα είναι μια μεγάλης κλίμακας συστήματα όπου η ενέργεια θα μπορούσε να αποθηκευθεί ως βαρυτική ενέργεια (υδραυλικά συστήματα), θερμική ενέργεια (λανθάνουσα θερμότητα), χημική ενέργεια

(συσσωρευτές, μπαταρίες ροής), ή συμπιεσμένου αέρα (ή σε συνδυασμό με υγρά ή με την αποθήκευση φυσικού αερίου).

Τα διάφορα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους σε μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική ενέργεια και στη συνέχεια την εκ νέου μετατροπή της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική.

Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή χρειάζεται και μια αποθηκευτική διάταξη με κατάλληλες ιδιότητες. Προκειμένου να αποφασιστεί ποιο αποθηκευτικό μέσο είναι κατάλληλο για κάθε περίπτωση εφαρμογής χρειάζεται να εξεταστεί μια ευρεία γκάμα αποθηκευτικών διατάξεων. Η διαδικασία αποθήκευσης της ενέργειας και στη συνέχεια της επαναπόδοσης της στην κατανάλωση γίνεται με την ανάπτυξη απωλειών με αποτέλεσμα η ενέργεια που αποδίδεται να είναι μικρότερη από την ενέργεια που αποθηκεύεται. Ο τύπος των απωλειών εξαρτάται από την μέθοδο αποθήκευσης. Από όλες τις μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας, μόνο η αποθήκευση της σε μορφή υδραυλικής ενέργειας και υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα καλύπτουν την περιοχή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, όποτε είναι εφαρμόσιμες στην περίπτωση ηλεκτρικού δικτύου.

### 5.3 Ηλεκτρικές στήλες

Οι Ηλεκτρικές στήλες (μπαταρία) είναι ένας συσσωρευτής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μικρότερη μονάδα της είναι ένα στοιχείο. Κατά κανόνα μια μπαταρία αποτελείται από μια σειρά στοιχείων τα οποία είναι μεταξύ τους συνδεδεμένα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Ο συσσωρευτής είναι χημική πηγή ρεύματος, ικανή να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια (αφού τη μετατρέψει σε χημική) και όταν χρειαστεί, να την αποδώσει σε εξωτερικό κύκλωμα. Αποτελείται από δοχείο κατασκευασμένο από μονωτικό υλικό (εβονίτη, πλαστικό, γυαλί) με ηλεκτρολύτη (οξύ ή αλκάλιο), στο οποίο βυθίζονται τα ηλεκτρόδια. Η σύνδεσή τους σε εξωτερικό κύκλωμα προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος (εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή). Έτσι, στον ηλεκτρικό συσσωρευτή γίνονται χημικές διεργασίες, που έχουν σχέση με τη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Ο ηλεκτρικός συσσωρευτής χαρακτηρίζεται: από τη χωρητικότητα, δηλ. την ποσότητα του ηλεκτρισμού σε αμπερώρια, που μπορεί ο συσσωρευτής να δώσει στο κύκλωμα που τροφοδοτεί, από τη μέση τάση σε Volt κατά το χρόνο της φόρτισης και εκφόρτισης, από την ειδική ενέργεια κατά βάρος και όγκο, δηλ. την ενέργεια σε βατώρια που παρέχεται κατά την εκφόρτιση από 1 kg βάρους ή 1 δεκατόμετρο του όγκου του ηλεκτρικού συσσωρευτή, από την απόδοση κατά χωρητικότητα, δηλ. το λόγο της ποσότητας των αμπερωρίων που αποδίδεται κατά την εκφόρτιση προς την ποσότητα των αμπερωρίων που απορροφάται κατά την φόρτιση, από την απόδοση κατά ενέργεια, δηλ. το λόγο της ενέργειας που αποδίδεται κατά την εκφόρτιση προς την ενέργεια που απορροφάται κατά τη φόρτιση. Υπάρχουν ηλεκτρικοί συσσωρευτές σε μόνιμη εγκατάσταση (για τις ανάγκες των ηλεκτρικών σταθμών, των τηλεφωνικών και τηλεγραφικών σταθμών, των ραδιοσταθμών κ.ά.) και φορητοί (για τροφοδότηση κινητών ραδιοσυσκευών και συσκευών ενσύρματης τηλεπικοινωνίας, αυτοκινήτων, αεροπλάνων κ. ά.).

Ευρεία χρήση έχουν (κυρίως σε μόνιμες εγκαταστάσεις) οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές μόλυβδου-οξέως, στους οποίους σαν ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται διάλυμα θεικού οξέος με πυκνότητα  $1,18-1,29 \frac{gr}{cm^3}$  και σαν ηλεκτρολύτες διοξειδίου του μόλυβδου  $PbO^2$  και σπογγώδης μόλυβδος.

Σαν φορητοί ηλεκτρικοί συσσωρευτές, χρησιμοποιούνται συχνά οι αλκαλικοί συσσωρευτές, που έχουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή. Αυτοί δεν έχουν κατά τη λειτουργία επιζήμιες εξατμίσεις και είναι απλούστεροι στη χρησιμοποίησή τους από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές οξέος ελαίου, στους οποίους σαν ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται διάλυμα καυστικού καλίου, σαν θετικό ηλεκτρόδιο οξειδία νικελίου σε μείγμα με γραφίτη και σαν αρνητικό ηλεκτρόδιο ρινίσματα σιδήρου ή καδμίου σε μείγμα με σπογγώδη σίδηρο. Οι μέσες τάσεις φόρτισης είναι αντίστοιχα: 1,74V και 1,65V.

Τα πλεονεκτήματά τους είναι η μεγάλη ειδική ενέργεια και η ικανότητα να λειτουργούν σε ερμητικά κιβώτια και σε ύψος (με χαμηλή θερμοκρασία και πίεση). Το μειονέκτημά τους είναι ότι έχουν κόστος 4-10 φορές μεγαλύτερο από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές μόλυβδου-οξέος. Οι αλκαλικοί ηλεκτρικοί συσσωρευτές χρησιμοποιούνται επίσης, σε όργανα βαρηκοΐας κ.α. Για τη λήψη μεγάλων τάσεων και ρευμάτων οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές συνδέονται σε συστοιχίες.

Στα αυτοκίνητα ο συσσωρευτής χρησιμεύει για την εναποθήκευση του ηλεκτρικού ρεύματος που προέρχεται από τη δυναμομηχανή (δυναμό) και τη διανομή του στη συνέχεια στις διάφορες συσκευές της ηλεκτρικής εγκατάστασης του οχήματος. Μεταξύ του δυναμό και του συσσωρευτή παρεμβάλλεται αυτόματος διακόπτης, ο οποίος παρεμποδίζει την εκφόρτιση του συσσωρευτή προς το δυναμό όταν ο κινητήρας εργάζεται στο ρελαντί ή δεν εργάζεται.

Σε σύγκριση με άλλες προηγμένες τεχνολογίες αποθήκευσης, το μεγάλο πλεονέκτημα των ηλεκτρικών στηλών είναι η εγγενώς υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η οποία προκύπτει από την χρήση των χημικών και όχι φυσικών μεθόδων για την αποθήκευση ενέργειας.

Άλλες προηγμένες ηλεκτρικές στήλες τώρα αναπτύσσονται για χρήση σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEVs) αλλά και για σταθερές εφαρμογές. Τόσο το νικέλιο – υβρίδιο μετάλλου (NiMH) αλλά και οι ηλεκτρικές στήλες ιόντων λιθίου (Li-ion) έχουν επιδείξει ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας πολύ υψηλότερη από εκείνες των συμβατικών συσσωρευτών μολύβδου-οξέος με κύκλο ζωής 5 έως 10 φορές μεγαλύτερο. Αν οι προηγμένες μπαταρίες PHEVs επιτύχουν εμπορικά, το κόστος των NiMH και Li-ion μπαταριών θα μπορούσε να μειωθεί έως και κατά 80% σε ένα σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να γίνουν πιο προσιτές για σταθερές χρήσεις. Μία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η δυνατότητα χρήσης ενός PHEV ως εφεδρική μονάδα ενέργειας στο σπίτι.

Για μεγάλης διάρκειας εφαρμογές, χρησιμοποιούνται μπαταρίες ενεργού υλικού που περιέχεται στο υγρό ηλεκτρολυτών και όχι σε στερεά ηλεκτρόδια. Το πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι η ενέργεια της μπαταρίας εξαρτάται από τον όγκο των ηλεκτρολυτών, ενώ η ισχύς εξόδου εξαρτάται από το μέγεθος της αντίδρασης των στοιβάδων των κυψελών. Ως αποτέλεσμα, το κόστος της επέκτασης του χρόνου μιας μπαταρίας εξαρτάται μόνο από το μέγεθος της δεξαμενής που χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση των ηλεκτρολυτών, που είναι χαμηλό σε σύγκριση με το κόστος της μεταβολής του αριθμού των κυττάρων σε παραδοσιακά συστήματα μπαταρίας. Έτσι, η μπαταρία με χρήση υγρών ηλεκτρολυτών είναι ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές που απαιτούν την χρήση της ενέργειας για πολλές ώρες. Το μειονέκτημα είναι ότι οι αντίστοιχες μπαταρίες ροής τείνουν να είναι περίπλοκα συστήματα με αντλίες, και άλλες βοηθητικές εγκαταστάσεις.

Υπάρχουν δυο είδη μπαταριών ροής, η μπαταρία οξειδαναγωγής Βαναδίου (VRB) και η μπαταρία του ψευδαργύρου Βρωμίου που είναι διαθέσιμες σε εμπορική χρήση. Η τεχνολογία αυτή παρέχει μια ανατρέψιμη ηλεκτροχημική αντίδραση μεταξύ δυο ηλεκτρολυτών διαλύματος άλατος. Όπως και άλλες ηλεκτρικές στήλες ροής, η διακύμανση της ισχύος και της ενέργειας είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η καθαρή απόδοση της μπαταρίας είναι περίπου 75%. Αυτή η μπαταρία λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου. Υπήρξαν αρκετές εφαρμογές VRB που έχουν λάβει χώρα. Το 2003, για παράδειγμα, η εταιρεία PacifiCorp εγκατέστησε μια μπαταρία VRB, διάρκειας 8 ωρών και ισχύος 250kW σε εγκατάσταση για διανομή τροφοδοσίας στην περιοχή Moab, στην κοινότητα της Utah, που έχει σχεδιαστεί για αποφυγή των αιχμών ζήτησης και υποστήριξης των συστημάτων τροφοδοσίας.

Ωστόσο, οι ηλεκτρικές στήλες δεν έχουν αντοχή σε πολλούς κύκλους φόρτισης – αποφόρτισης και δεν μπορούν να αποθηκεύουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε μικρό όγκο. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο αναπτύσσονται και υλοποιούνται άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης.

Το γεγονός αυτό οδήγησε στην εμφάνιση της αποθήκευσης ως ένα αναπόσπαστο στοιχείο στη διαχείριση της ενέργειας, επιτρέποντας την ενέργεια να αποθηκευτεί και να κυκλοφορήσει στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής, όταν είναι πιο πολύτιμη.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### 6.1 Μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας.

Τα ανθρακώδη υλικά που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες ιόντων-λιθίου έχουν μεγάλη επίδραση στη μείωση της χωρητικότητας για μεγάλα ρεύματα εκφόρτισης. Κατά την λειτουργία η κυψέλη της μπαταρίας υποφέρει από μη αντιστρεπτές χημικές αντιδράσεις, οι οποίες συμβαίνουν στην επιφάνεια του γραφίτη. Τα παράγωγα από αυτές τις χημικές αντιδράσεις δημιουργούν μια επιφάνεια ταινίας πάνω στο ηλεκτρόδιο από άνθρακα που είναι γνωστή ως Solid Electrolyte Interface (SEI). Η μπαταρία σταματά να λειτουργεί αποδοτικά όταν τα ιόντα λιθίου δεν μπορούν να διασχίσουν αυτήν την επιφάνεια εξαιτίας του πάχους της. Έτσι, η

διάρκεια ζωής και ο αριθμός κύκλων μιας κυψέλης της μπαταρίας βασίζονται σε αυτήν την επιφάνεια.

Ο βαθμός μείωσης της χωρητικότητας της μπαταρίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως ο μέσος βαθμός εκφόρτισης της μπαταρίας και η θερμοκρασία υπό την οποία λειτουργεί ένα κυψέλη της μπαταρίας. Αν η μπαταρία εκφορτίζεται με μεγάλο ρεύμα τότε η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας αυξάνεται, καθώς αυξάνεται και η θερμοκρασία της κυψέλης της μπαταρίας. Υψηλή θερμοκρασία και υψηλό ρεύμα εκφόρτισης μπορεί να αυξήσει την ταχύτητα των χημικών αντιδράσεων και να δημιουργήσει την γνωστή επιφάνεια ταινίας SEI. Οι μπαταρίες λιθίου συμπεριφέρονται καλύτερα σε υψηλές θερμοκρασίες αφού οι χημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται ταχύτερα. Το πρόβλημα που δημιουργείται είναι ότι σε υψηλές θερμοκρασίες μειώνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

## 6.2 Απόδοση του μοντέλου προσομοίωσης της μπαταρίας

Κατά τη λειτουργία της μπαταρίας είναι σημαντικό το μοντέλο να λαμβάνει υπ' όψιν την μεταβολή λειτουργίας της με βάση την θερμοκρασία, το επίπεδο ρεύματος καθώς και την κατάσταση φόρτισης. Αν το μοντέλο δεν είναι ικανό να προβλέψει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας τότε αυτή μπορεί να οδηγηθεί πέρα από την περιοχή ομαλής λειτουργίας (πλήρης αποφόρτιση, υπερφόρτιση). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα που αποδίδει στο δίκτυο ή σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή να είναι μεγαλύτερο από το επιτρεπτό για την ομαλή λειτουργία της μπαταρίας και αυτή να οδηγείται σε πρόωρη “γήρανση”. Έτσι το μοντέλο προσομοίωσης της μπαταρίας πρέπει να είναι σε θέση να προβλέπει το επιτρεπτό ρεύμα που μπορεί να αποδώσει στο δίκτυο ή σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή με βάση τις ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας της. Κατάσταση πέρα της φυσιολογικής λειτουργίας της μπαταρίας όπως είναι η κατάσταση υπερφόρτισης έχουμε, όταν το μοντέλο υπερεκτιμά το επιτρεπόμενο ρεύμα εκφόρτισης και έτσι η τάση της μπαταρίας πέφτει κάτω από την ελάχιστη επιτρεπτή τάση με αποτέλεσμα να μην ικανοποιεί τις ανάγκες του δικτύου. Από την άλλη μεριά, κατάσταση υπερφόρτισης έχουμε όταν το μοντέλο προσομοίωσης υπερεκτιμά το επιτρεπόμενο ρεύμα φόρτισης, με αποτέλεσμα η τάση της μπαταρίας να ξεπερνά την μεγαλύτερη επιτρεπόμενη τάση αυτής.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

### 7.1 Περιγραφή των ιδιοτήτων και της κατάστασης της μπαταρίας.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί όροι για να περιγράψουν την κατάσταση της μπαταρίας και των ιδιοτήτων της. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε παρερμηνεύση των αποτελεσμάτων και σύγκρισης αποτελεσμάτων με διαφορετικές ιδιότητες. Σε αυτήν την ενότητα θα περιγραφούν οι όροι που αφορούν την λειτουργία της μπαταρίας.

### 7.2 Κατάσταση ζωής (State of Health)

Η κατάσταση φόρτισης υποδηλώνει τον βαθμό φόρτισης σε αμπερώρες που έχουν απομείνει στην μπαταρία. Η κατάσταση φόρτισης μπορεί να χωριστεί σε δύο είδη: α) μηχανική κατάσταση φόρτισης και β) θερμοδυναμική κατάσταση φόρτισης.

Η μηχανική κατάσταση φόρτισης είναι η κατάσταση της χωρητικότητας σε διαφορετικά επίπεδα εκφόρτισης, έτσι διαφορετικά επίπεδα εκφόρτισης θα συντελέσουν σε διαφορετικό για τον ίδιο βαθμό φόρτισης της μπαταρίας. Η θερμοδυναμική κατάσταση φόρτισης καθορίζεται από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες της κυψέλης της μπαταρίας και καθορίζονται από την τάση ανοιχτού κυκλώματος της μπαταρίας. Είναι η κατάσταση της αξιοποιήσιμης χωρητικότητας της κυψέλης. Στην συνέχεια αυτής της εργασίας θα χρησιμοποιήσουμε την θερμοδυναμική κατάσταση φόρτισης για να προσδιορίζουμε τον βαθμό φόρτισης της μπαταρίας [3].

### 7.3 Χωρητικότητα κυψέλης (Cell Capacity)

Η προφανής χωρητικότητα είναι η ποσοστιαία εξαρτώμενη χωρητικότητα που έχει προκύψει από τα πειράματα του χρήστη. Αυτή η χωρητικότητα κυψέλης είναι ισχυρά εξαρτώμενη από την εσωτερική αντίσταση της κυψέλης και μεταβάλλεται εκτεταμένα [3] σύμφωνα με τις συνθήκες λειτουργίας της. Από την άλλη μεριά η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα είναι ο επίπεδο φόρτισης που περιέχεται στην μπαταρία. Είναι θεωρητικά η πιθανή ποσότητα φόρτισης η οποία μπορεί να αποδοθεί στο δίκτυο ή σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή, από την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας με ένα απείρως μικρό ρεύμα για μια ελάχιστη τιμή τάσης μιας κυψέλης της μπαταρίας, έτσι



ώστε η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας να γίνει θεωρητικά μηδέν. Και οι δύο έννοιες για την χωρητικότητα είναι εξαρτώμενες από την θερμοκρασία. Αφού η εσωτερική αντίσταση επιφέρει πτώση τάσης, η μπαταρία φτάνει την ελάχιστη τάση πριν ο συντελεστής κατάστασης φόρτισης (SoC) φτάσει το 0%, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η πλήρης αξιοποιήσιμη χωρητικότητα.

Για να διαπιστωθεί η φθορά της χωρητικότητας της μπαταρίας, οι όροι πραγματική χωρητικότητα και 1C χωρητικότητα υιοθετούνται. Η πραγματική χωρητικότητα είναι η αξιοποιήσιμη χωρητικότητα κάτω από μία θερμοκρασία αναφοράς και χρησιμοποιείται ως μέτρηση για τον προσδιορισμό της φθοράς της χωρητικότητας. Η 1C χωρητικότητα προσδιορίζεται με ένα C-rate, ενός 1C κάτω από συνθήκες αναφοράς και γενικότερα χρησιμοποιείται για την μέτρηση της φθοράς της χωρητικότητας [4].

#### **7.4 C-επίπεδο (C-rate)**

Το Επίπεδο είναι το μετρούμενο ρεύμα της κυψέλης της μπαταρίας και κλιμακοποιείται με βάση την ονομαστική χωρητικότητα της κυψέλης που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή στις συνθήκες αναφοράς. Το επίπεδο ρεύματος που η κυψέλη της μπαταρίας μπορεί να αποδώσει εξαρτάται από την χωρητικότητα της μπαταρίας. Ένα ρεύμα από 1C σημαίνει ότι η κυψέλη της μπαταρίας μπορεί ιδανικά να φορτιστεί ή να εκφορτιστεί μέσα σε μία ώρα, από C/2 σε δύο ώρες και από 2C σε μισή ώρα [3].

#### **7.5 Εσωτερική αντίσταση**

Η εσωτερική αντίσταση μιας κυψέλης μιας μπαταρίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και δεν μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερό μέγεθος, παρ' όλο που οι κατασκευαστές τείνουν να το δίνουν ως σταθερό. Η εσωτερική αντίσταση είναι εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία, από τον συντελεστή κατάστασης φόρτισης και από το C-επίπεδο. Η εσωτερική αντίσταση πολλές φορές θεωρείται ως η ωμική αντίσταση μιας κυψέλης, η οποία υποδηλώνει την απότομη αλλαγή της τάσης μετά από μία εφαρμογή ρεύματος στη κυψέλη της μπαταρίας, όταν αυτή βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Άλλος ορισμός για την εσωτερική αντίσταση είναι το άθροισμα της ωμικής, της πόλωσης ενεργοποίησης και πόλωσης διάχυσης αντίστασης, η οποία είναι και η

μεγαλύτερη δυνατή πτώση τάσης στη κυψέλη. Με την εσωτερική αντίσταση εκτός από την πτώση τάσης μπορούμε να μοντελοποιήσουμε και την διάχυση ενέργειας με την μορφή θερμότητας από την μπαταρία [3].

## **Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>**

### **8.1 Προκλήσεις και τρόποι προσομοίωσης μπαταρίας**

Μία εκτεταμένη έρευνα θα βελτιώσει την απόδοση ενός μοντέλου προσομοίωσης μπαταρίας και θα καταφέρει να καλύψει τις ανάγκες στα πεδία εφαρμογής της, όπως είναι το “έξυπνο” δίκτυο (smart grid). Αυτή η έρευνα περιέχει ανάπτυξη αλγορίθμων κατά την λειτουργία της μπαταρίας, που θα μπορούν να υπολογίσουν τους συντελεστές κατάστασης φόρτισης και κατάστασης ζωής της μπαταρίας με μεγάλη ακρίβεια. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι ένα ακριβές μοντέλο που θα απεικονίζει την δυναμική και την στατική συμπεριφορά της μπαταρίας είναι προαπαιτούμενο για τον ακριβή υπολογισμό της κατάστασης της. Τα αποτελέσματα από την μοντελοποίηση και τον υπολογισμό της κατάστασης της κάθε κυψέλης της μπαταρίας είναι απαραίτητα, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί το ισοζύγιο ενέργειας σε κάθε κυψέλη της μπαταρίας και για να αυξηθεί η αποδοτικότητά της.

### **8.2 Μοντελοποίηση Μπαταρίας**

Ένα ακριβές μοντέλο, το οποίο έχει την δυνατότητα να απεικονίζει τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας, είναι αναγκαίο για τον υπολογισμό των συντελεστών κατάστασης χωρητικότητας και κατάστασης ζωής με ακρίβεια. Πολλοί ερευνητές [5], [6], [7] έχουν πραγματοποιήσει σχολαστική έρευνα για να αναλύσουν την μοντελοποίηση των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων μέσα στην μπαταρία. Αυτός ο τύπος μοντελοποίησης είναι χρήσιμος για τους κατασκευαστές, έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουν τον σχεδιασμό των μπαταριών. Παρ’ όλα αυτά ο μεγάλος χρόνος και μνήμη που απαιτείται για να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας και να λυθούν οι διαφορικές εξισώσεις του μοντέλου της μπαταρίας κάνουν τους ερευνητές να αναζητήσουν άλλο τρόπο υλοποίησης. Άλλος τρόπος που έχουν μελετήσει ερευνητές είναι η μοντελοποίηση της μπαταρίας ως μαύρο κουτί με

διαθέσιμα τα πειραματικά αποτελέσματα, που είναι οι μετρήσεις τάσης εξόδου και ρεύματος.

Τα αρνητικά των δύο προαναφερθέντων μοντέλων είναι ότι δεν λαμβάνουν υπ' όψιν την δυναμική συμπεριφορά της μπαταρίας. Γι' αυτό και οι επιστήμονες στρέφονται προς το μοντέλο Thevenin. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες για την βελτίωση του μοντέλου Thevenin, θεωρώντας την πηγή τάσης ως εξαρτημένη, που η τιμή της μεταβάλλεται ανάλογα την γήρανση της μπαταρίας, την εκφόρτιση της χωρίς να βρίσκεται υπό φορτίο και φυσικά τον συντελεστή κατάστασης φόρτισης. Ακόμη προσπαθούν να βελτιώσουν το μοντέλο Thevenin προσθέτοντας έναν κλάδο RC που θα λαμβάνει υπ' όψιν το φαινόμενο υστέρησης [8]. Ο αριθμός των RC κλάδων που θα επιλεγεί για την προσομοίωση είναι ανάλογος με την ακρίβεια που θα έχει το μοντέλο και ανάλογος της πολυπλοκότητας του μοντέλου. Αυξάνοντας τον αριθμό των κλάδων βελτιώνεται η ακρίβεια αλλά παράλληλα αυξάνεται και η πολυπλοκότητα. Γι' αυτό τον λόγο επιλέγεται η χρησιμοποίηση ενός κλάδου σε σειρά με μία αντίσταση σε on line υπολογισμούς [9], [10] για την προσομοίωση της λειτουργίας της μπαταρίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι παράμετροι είναι υποκειμένες σε αλλαγές για κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας, του επιπέδου ρεύματος και της γήρανσης της μπαταρίας. Στόχος είναι να πραγματοποιείται ο υπολογισμός αυτών των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την λειτουργία της μπαταρίας, καθώς αυτή είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο ή σε οποιαδήποτε εφαρμογή, στην οποία χρησιμοποιείται.

## 8.2 Συντελεστής κατάστασης φόρτισης (SoC)

Αρκετοί αλγόριθμοι και προσεγγίσεις έχουν προταθεί για τον υπολογισμό του συντελεστής κατάστασης φόρτισης από τις διαθέσιμες μετρήσεις που έχουμε για την μπαταρία. Η μέθοδος Coulomb - counting ή Ah -counting [11] είναι μία από τις πιο γνωστές και συμβατικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον υπολογισμό, στην οποία ολοκληρώνοντας το ρεύμα στην έξοδο της μπαταρίας ανάμεσα σε δύο χρονικές στιγμές είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τον συντελεστής κατάστασης φόρτισης. Παρ' όλο που η μέθοδος αυτή είναι εύκολα υλοποιήσιμη, το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι πρέπει να είναι γνωστή η αρχική τιμή του συντελεστής κατάστασης φόρτισης, καθώς και ότι το όργανο μέτρησης του ρεύματος εισάγει

σφάλμα στον υπολογισμό μέσω της ολοκλήρωσής του ανάμεσα σε δύο χρονικές στιγμές. Μία άλλη προσέγγιση για τον υπολογισμό του συντελεστή είναι η μέτρηση της ανοιχτής τάσης κυκλώματος [12], που στηρίζεται στην στατική σχέση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος με τον συντελεστή κατάστασης φόρτισης. Παρ' όλα αυτά, εξαιτίας των αργών φαινομένων που πραγματοποιούνται κατά τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, για την μέτρηση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος απαιτείται μεγάλος χρόνος, στον οποίο η μπαταρία δεν θα είναι συνδεδεμένη. Όμοια, η ηλεκτροχημική φασματοσκοπία της αντίστασης (EIS) της μπαταρίας [13] είναι ακόμη ένας τρόπος για τον υπολογισμό του συντελεστή. Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας υπολογίζεται, εφαρμόζοντας μικρά σήματα ρεύματος με διαφορετικές συχνότητες στην μπαταρία και μετρώντας την απόκριση της τάσης, χρησιμοποιώντας έναν ειδικό εξοπλισμό ανάλυσης της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας της αντίστασης. Και αυτή η μέθοδος απαιτεί μεγάλο χρόνο καθώς και να μην βρίσκεται σε σύνδεση με το φορτίο.

Πρόσφατα, μέθοδοι υπολογισμού με την μπαταρία να βρίσκεται εντός δικτύου [14], [15], [16] έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται στις διάφορες εφαρμογές χρήσης της μπαταρίας. Η δυναμική λειτουργία της μπαταρίας μοντελοποιείται ως ένα μη γραμμικό σύστημα. Πολλές τεχνικές εφαρμόζονται για τον σχεδιασμό μονάδων ελέγχου που θα καταγράφουν τον συντελεστή κατάστασης χωρητικότητας του συστήματος. Τα περισσότερα συστήματα μέχρι τώρα υλοποιούνταν βασιζόμενα σε καταγραφή των παραμέτρων, που επηρεάζουν την λειτουργία της μπαταρίας, όταν αυτή βρισκόταν εκτός δικτύου μέσα από πειράματα που πραγματοποιούνται σε διαφορετικά επίπεδα ρεύματος, σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και για διαφορετικές τιμές του συντελεστή κατάστασης χωρητικότητας. Αυτός ο τρόπος μπορεί να δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα, παρ' όλα αυτά είναι δύσκολο να μελετηθούν και να πραγματοποιηθούν όλα τα πειράματα για κάθε παράγοντα που επηρεάζει την λειτουργία της μπαταρίας.

Στόχος της διπλωματικής αυτής, είναι η δημιουργία ενός μοντέλου που θα υπολογίζει τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το μοντέλο της μπαταρίας, όταν αυτή βρίσκεται εντός δικτύου και θα λαμβάνει υπ' όψιν όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργία της. Έρευνες για την υλοποίηση ενός τέτοιου μοντέλου έχουν πραγματοποιηθεί, αλλά οι περισσότερες αδυνατούν να παρουσιάσουν μία πλήρη απεικόνιση το πως ανταποκρίνεται το μοντέλο σε αλλαγή των συν-

θηκών λειτουργίας. Πρώτο βήμα για την δημιουργία του μοντέλου είναι η γραμμικοποίηση της χαρακτηριστικής τάση ανοιχτού κυκλώματος -συντελεστής κατάστασης φόρτισης, έπειτα γίνεται ενημέρωση των παραμέτρων έτσι ώστε να απεικονίζουν με ακρίβεια όλα τα στατικά και δυναμικά φαινόμενα της μπαταρίας και τέλος θα υλοποιηθεί ένας παρατηρητής για τον υπολογισμό του συντελεστή κατάστασης φόρτισης (SoC) και της χωρητικότητας.

### 8.3 Συντελεστής κατάστασης ζωής (SoH)

Παρ' όλο που μέθοδοι για τον υπολογισμό του ποσοστού φόρτισης που έχει απομείνει στην μπαταρία έχουν καλώς οριστεί, δεν έχουν βρεθεί καλώς οριζόμενοι μέθοδοι για τον υπολογισμό της κατάστασης ζωής της μπαταρίας. Οι περισσότερες μελέτες θεωρούν την ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό του συντελεστή κατάστασης ζωής (SoH):

$$SOH = \frac{Q_{act}}{QR} * 100\%$$

Όπου QR είναι η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας και Qact είναι η πραγματική χωρητικότητα της μπαταρίας, η τιμή της οποίας μειώνεται εξαιτίας των αριθμών κύκλων που έχει πραγματοποιήσει η μπαταρία κατά την διάρκεια ζωής της. Το αρνητικό της χρήσης της παραπάνω μεθόδου για τον υπολογισμό του συντελεστή κατάστασης ζωής είναι ότι δεν λαμβάνει υπ' όψιν το είδος της εφαρμογής στην οποία χρησιμοποιείται η μπαταρία.

Παρ' όλο που γνωρίζουμε όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την ζωή της μπαταρίας, είναι δύσκολο να εντοπίσουμε ένα τρόπο υπολογισμού της κατάστασης ζωής της. Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει αφορούν την μείωση της χωρητικότητας ή την αύξηση της εσωτερικής αντίστασης ή ένα συνδυασμό αυτών των δύο. Οι δύο αυτοί παράγοντες είναι μόνο μία ένδειξη για την μείωση ζωής της μπαταρίας και γι' αυτό είναι αναγκαίο να ληφθεί υπ' όψιν η εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται η μπαταρία. Σε εφαρμογές “έξυπνου” δικτύου η μέθοδος που προτείνεται είναι ο υπολογισμός των παραγόντων της απομένουσας χρήσιμης ζωής (remaining useful life - RUL) και του τέλους ζωής (end of life - EOL) [18], [19]. Με βάση τα παραπάνω κρίνεται ότι είναι απαραίτητη, για την σωστή μοντελοποίηση της μπαταρίας, η αναγνώριση των παραμέτρων που μεταβάλλονται καθώς η μπαταρία

γερνάει καθώς αυτή βρίσκεται υπό φορτίο. Με την γνώση αυτών των παραμέτρων, έπειτα από στατιστική ανάλυση μπορούμε να προβλέψουμε τους παράγοντες της απομένουσας χρήσιμης ζωής (remaining useful life - RUL) και του τέλους ζωής (end of life - EOL). Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής θα μελετήσουμε την μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας αλλά και την αύξηση της εσωτερικής αντίστασης για να μοντελοποιήσουμε τη γήρανση της μπαταρίας.

## Κεφάλαιο 9<sup>ο</sup>

### 9.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταρίας

Χωρητικότητα μιας μπαταρίας  $C$  (από την αγγλική λέξη capacity) είναι το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που μπορούμε να πάρουμε από μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες εκφόρτισης (ρυθμό εκφόρτισης, τάση και θερμοκρασία). Η χωρητικότητα που μπορεί να δώσει μια μπαταρία είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ποσό των υλικών ανόδου και καθόδου (δηλαδή των ενεργών υλικών) που περιέχει[11]. Η χωρητικότητα ενός στοιχείου/μπαταρίας μετριέται συνήθως σε αμπέρ – ώρες (Ah) και καθορίζεται από ένα σταθερό ρεύμα εκφόρτισης που εκφορτίζει τη μπαταρία μέχρι μια ορισμένη τελική τάση εκφόρτισης (συνήθως 1.75 V περίπου).

Η χωρητικότητα εξαρτάται σημαντικά από το ρεύμα εκφόρτισης και τη θερμοκρασία[3]. Ο υπολογισμός της χωρητικότητας γίνεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή του ρεύματος εκφόρτισης με το χρόνο που χρειάζεται για να φτάσει η μπαταρία στην τελική τάση. Οι κατασκευαστές μπαταριών μπορούν να ορίσουν οι ίδιοι το ρεύμα και την τελική τάση εκφόρτισης. Ο όρος που χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει την ικανότητα της μπαταρίας να μεταφέρει ρεύμα είναι η ονομαστική της χωρητικότητα. Οι κατασκευαστές συχνά καθορίζουν την ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών τους σε αμπερ – ώρες για ένα συγκεκριμένο ρυθμό εκφόρτισης.

Για παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι μια μπαταρία 200Ah (για ένα ρυθμό 10 ωρών) θα μεταφέρει 20 A ρεύματος για 10 ώρες κάτω από κανονικές συνθήκες

θερμοκρασίας ( 25ο C ή 77ο F). Εναλλακτικά, ένας ρυθμός εκφόρτισης μπορεί να καθορίζεται από το ρυθμό φόρτισης, C – rate, ο οποίος εκφράζεται σαν ένα πολλαπλάσιο της ονομαστικής χωρητικότητας του στοιχείου ή της μπαταρίας. Για παράδειγμα, μια μπαταρία μπορεί να έχει χωρητικότητα 200 Ah για ένα ρυθμό εκφόρτισης C/10. Ο ρυθμός εκφόρτισης καθορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C/10 (A) = 200Ah / 10 Ah = 20 A$$

Η χωρητικότητα της μπαταρίας ποικίλει για διάφορους ρυθμούς εκφόρτισης. Όσο πιο μεγάλος είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, τόσο μικρότερη είναι η χωρητικότητα του στοιχείου. Χαμηλότεροι ρυθμοί εκφόρτισης έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη χωρητικότητα. Οι κατασκευαστές μπαταριών συνήθως ορίζουν μερικούς ρυθμούς εκφόρτισης (σε αμπέρ) μαζί με τους χρόνους εκφόρτισης που συνδέονται με αυτούς (σε ώρες). Η χωρητικότητα της μπαταρίας για κάθε έναν από αυτούς τους ρυθμούς εκφόρτισης υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Η ονομαστική χωρητικότητα για τις μπαταρίες μολύβδου οξέος συνήθως καθορίζεται για ρυθμούς 8- , 10- ή 20-ωρών (C/8, C/10, C/20). Οι UPS μπαταρίες βαθμονομούνται σε 8 – ωρών χωρητικότητες και οι μπαταρίες τηλεπικοινωνιών σε 10 – ωρών χωρητικότητες[12].

Η χωρητικότητα όλων των μπαταριών μολύβδου οξέος (για δεδομένη τελική τάση) μειώνεται στις χαμηλές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει λόγω πολλών παραγόντων μεταξύ των οποίων είναι η αυξημένη αντίσταση και ο μειωμένος ρυθμός διάχυσης στον ηλεκτρολύτη. Το δεύτερο φαινόμενο σημαίνει ότι οι μπαταρίες μολύβδου οξέος με μεγάλο απόθεμα οξέος τείνουν να χάνουν περισσότερη χωρητικότητα στις χαμηλές θερμοκρασίες από ότι αυτές που έχουν μικρότερο όγκο οξέος. Οι ονομαστικές χωρητικότητες συνήθως αναφέρονται σε θερμοκρασία λειτουργίας 20°C.

Αν μια μπαταρία χρειάζεται να παρέχει αυτονομία σε χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, είναι συνήθης πρακτική να αυξάνεται η ονομαστική χωρητικότητα για να ληφθεί υπ' όψιν η μειωμένη χωρητικότητα για τη χειρότερη θερμοκρασία. Οι χωρητικότητες αυξάνονται ελαφρώς για θερμοκρασίες πάνω από 20°C αλλά δεν είναι φυσιολογικό να μειώνεται η καθορισμένη χωρητικότητα της μπαταρίας λόγω αυτού.

Στις χωρητικότητες που δίνονται από τον κατασκευαστή πρέπει να αναφέρεται η τελική τάση στην οποία αυτές εφαρμόζονται. Για μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η τάση αυτή είναι συνήθως μεταξύ 1.75V και 1.85V ανά στοιχείο. Όταν συγκρίνονται δύο διαφορετικές μπαταρίες, πρέπει οι προς σύγκριση χωρητικότητες να είναι ως προς την ίδια τελική τάση. Προφανώς, όσο χαμηλότερη είναι η τελική τάση, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διαθέσιμη χωρητικότητα.



## 9.2 Τάση

Για να είναι ικανό ένα στοιχείο ή μια μπαταρία να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, πρέπει να υπάρχει μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στο θετικό και το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Αυτή η διαφορά δυναμικού, η οποία μετριέται σε volts αναφέρεται ως τάση του στοιχείου ή της μπαταρίας. Ένα μόνο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει διαφορά δυναμικού περίπου 2 V υπό φορτίο. Ένα πλήρως εκφορτισμένο στοιχείο μολύβδου οξέος έχει διαφορά δυναμικού περίπου 1.75 V, ανάλογα με το ρυθμό εκφόρτισης[12].

Η τάση ισορροπίας ενός στοιχείου είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη και της θερμοκρασίας. Η τάση ανοικτού κυκλώματος (OCV) μπορεί να μετρηθεί εάν κανένα εξωτερικό ρεύμα δε διαρρέει τη μπαταρία. Αυτή ταυτίζεται με την τάση ισορροπίας αν όλες οι εσωτερικές υπερτάσεις, που προκαλούνται κυρίως από διαδικασίες διάχυσης, έχουν σταθεροποιηθεί. Ο χρόνος για να επιτευχθεί αυτό το στάδιο εξαρτάται από την τεχνολογία της μπαταρίας και τις συνθήκες λειτουργίας και κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι πολλές ώρες. Η OCV μιας μπαταρίας εξαρτάται από το πρότυπο δυναμικό των χρησιμοποιούμενων ενεργών υλικών και το ποσό του φορτίου που απομένει. Το λίθιο χρησιμοποιείται ευρέως ως άνοδος σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες μπαταρίες γιατί προσφέρει το υψηλότερο πρότυπο δυναμικό από όλες τις χημείες των μπαταριών[11].

Η τάση του στοιχείου υπό φορτίο, η τάση κλειστού κυκλώματος (CCV), εξαρτάται από το ρεύμα, τη στάθμη φόρτισης και το ιστορικό του στοιχείου, όπως τη διάρκεια ζωής του ή το χρόνο αποθήκευσης.

Τυπικά, οι ονομαστικές τάσεις των στοιχείων είναι μεταξύ 1.2 και 3.6 V. Ως εκ τούτου, αρκετά στοιχεία συνδέονται συνήθως σε σειρά για να χτίσουν μια αλυσίδα με μεγαλύτερη ονομαστική τάση.

Επομένως, η ονομαστική τάση μιας μπαταρίας καθορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά επί την ονομαστική τάση του ενός στοιχείου. Οι μπαταρίες συχνά πωλούνται σε δομές, στις οποίες είναι ενσωματωμένα και συνδεδεμένα σε σειρά μερικά στοιχεία με μόνο ένα σετ ακροδεκτών[3]. Ένα γνωστό παράδειγμα είναι οι SLI μπαταρίες αυτοκινήτων, όπου 6 στοιχεία συνδέονται σε σειρά αλλά πωλούνται ως ένα μπλοκ των 12 V. (Το SLI προέρχεται από τις λέξεις starting, lighting, ignition που σημαίνουν εκκίνηση, φωτισμός και ανάφλεξη.) Η

τελική τάση φόρτισης (end-of-charge voltage) καθορίζει ένα άνω όριο για την τάση. Η φόρτιση μιας μπαταρίας δε σταματά όταν φτάσει την τελική τάση φόρτισης ( όπως συμβαίνει με την τελική τάση εκφόρτισης – end-of-discharge voltage), αλλά το ρεύμα φόρτισης μειώνεται κατάλληλα για να διατηρεί την τελική τάση φόρτισης με την πάροδο του χρόνου.

### 9.3 Στάθμη φόρτισης

Η στάθμη φόρτισης (state of charge – SOC) δίνει τη χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή. Εκατό τοις εκατό στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, ενώ 0% στάθμη φόρτισης σημαίνει ότι η ονομαστική χωρητικότητα έχει εκφορτιστεί[3].

Για τη λειτουργία και τη διαχείριση της ενέργειας στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας, η χωρητικότητα της μπαταρίας και η πραγματική στάθμη φόρτισης είναι οι πιο σημαντικές παράμετροι. Ο καθορισμός της στάθμης φόρτισης είναι δύσκολος σε αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επειδή η πλήρης φόρτιση της μπαταρίας όπως γίνεται συχνά με τους συμβατικούς φορτιστές μπαταρίας είναι πολύ ασυνήθιστη.

Αν μας δίνεται η στάθμη φόρτισης, το ερώτημα που εγείρεται είναι ποια είναι η σημασία των συγκεκριμένων τιμών. Υπάρχουν επιμέρους ορισμοί για τη χωρητικότητα της μπαταρίας και οι αντίστοιχοι ορισμοί για τη στάθμη φόρτισης. Η μετρούμενη χωρητικότητα μιας μπαταρίας μπορεί να είναι μικρότερη ή ακόμα και μεγαλύτερη από την ονομαστική χωρητικότητα που δίνεται από τον κατασκευαστή. Καθ'όλη τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η μετρούμενη χωρητικότητα μειώνεται όλο και περισσότερο λόγω των επιπτώσεων της γήρανσης.

Η πρακτική χωρητικότητα είναι μικρότερη από τη μετρούμενη χωρητικότητα. Λόγω των ειδικών συνθηκών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι μπαταρίες δεν επαναφορτίζονται πλήρως σχεδόν ποτέ (ο αριθμός των ωρών φόρτισης είναι περιορισμένος). Η μέγιστη στάθμη φόρτισης που μπορεί να επιτευχθεί κατά τη φυσιολογική λειτουργία του συστήματος ονομάζεται στάθμη φόρτισης πλήρους ακτινοβολίας (solar-full state of charge). Επίσης, το σύστημα καθορίζει ένα κριτήριο τέλους εκφόρτισης για να αποφευχθεί η βαθειά εκφόρτιση της μπαταρίας και κατά

συνέπεια η επιτάχυνση της γήρανσης, το οποίο συνήθως διαφέρει από τα κριτήρια τέλους εκφόρτισης που χρησιμοποιούνται στους ελέγχους της χωρητικότητας. Έτσι, η πρακτική χωρητικότητα της μπαταρίας είναι μικρότερη από τη μετρούμενη χωρητικότητα[3].

Η ονομαστική χωρητικότητα ορίζεται ως η χωρητικότητα για εκφόρτιση 10 ωρών (C/10). Αυτή είναι η βάση για τον καθορισμό της στάθμης φόρτισης. Η ονομαστική χωρητικότητα δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, ενώ η μετρούμενη χωρητικότητα μεταβάλλεται με το χρόνο. Η στάθμη φόρτισης που σχετίζεται με τη μετρούμενη χωρητικότητα ονομάζεται σχετική στάθμη φόρτισης (relative state of charge – SOC<sub>r</sub>). Η στάθμη φόρτισης που σχετίζεται με την πρακτική χωρητικότητα λέγεται πρακτική στάθμη φόρτισης (practical state of charge – SOC<sub>p</sub>). Η SOC<sub>p</sub> είναι 100% αν μια solar-full στάθμη φόρτισης έχει αποκτηθεί.

#### 9.4 Βάθος εκφόρτισης

Το βάθος εκφόρτισης (depth of discharge – DOD) είναι το κλάσμα ή το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Το αντίθετο, δηλαδή, από τη στάθμη φόρτισης που όπως είδαμε παραπάνω είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που είναι ακόμα διαθέσιμη στη μπαταρία. Παρόλα αυτά, οι τιμές για τη στάθμη φόρτισης και το βάθος εκφόρτισης συνήθως αναφέρονται στην ονομαστική χωρητικότητα (π.χ. τη χωρητικότητα για το ρυθμό των 10 ωρών). Για χαμηλότερα ρεύματα εκφόρτισης, μπορεί να συναντήσουμε αναφορές για DOD μεγαλύτερο του 100%. Αυτό απλά σημαίνει ότι η μπαταρία μπορεί να παράγει περισσότερο από το 100% της ονομαστικής της χωρητικότητας σε ρυθμούς εκφόρτισης χαμηλότερους από τον ονομαστικό ρυθμό εκφόρτισης[10].

#### 9.5 Κύκλος ζωής

Με τον όρο κύκλος, περιγράφουμε την επαναλαμβανόμενη διαδικασία εκφόρτισης και φόρτισης που συμβαίνει σε μια μπαταρία σε λειτουργία. Ένας κύκλος ισοδυναμεί με μια εκφόρτιση που ακολουθείται από μια φόρτιση. Ο κύκλος ζωής είναι ένα μέτρο του πόσους κύκλους μια μπαταρία μπορεί να δώσει κατά τη διάρκεια

της χρήσιμης ζωής της. Συνήθως αντιστοιχεί στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης για ένα συγκεκριμένο DOD που η μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει πριν η διαθέσιμη χωρητικότητά της μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό (συνήθως 80%) της αρχικής χωρητικότητας.

Ο κύκλος ζωής εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το βάθος του κάθε κύκλου. Εάν ο κύκλος ζωής μετριέται πειραματικά για ένα υψηλό DOD, τότε σε χαμηλότερα DODs το αποτέλεσμα του γινομένου του αριθμού των κύκλων επί το DOD είναι περίπου σταθερό, δηλαδή ο κύκλος εργασιών της χωρητικότητας (capacity turnover) είναι περίπου ο ίδιος για χαμηλότερα DODs.

Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή όταν αναλύουμε τον κύκλο ζωής που δίνεται από τους κατασκευαστές μπαταρίας. Συνήθως μετριέται σε σχετικά μεγάλα ρεύματα (μικρούς χρόνους εκφόρτισης) και το αναγραφόμενο DOD συχνά αναφέρεται στη χωρητικότητα που είναι διαθέσιμη σε αυτό το μικρό χρόνο εκφόρτισης. Ας δώσουμε ένα πιο συγκεκριμένο παράδειγμα. Ένας κατασκευαστής δίνει κύκλο ζωής 400 κύκλων για 50% DOD για το προϊόν του. Σχολαστικότερη παρατήρηση των στοιχείων που δίνει ο κατασκευαστής δείχνουν ότι αυτό έγινε για ρυθμό εκφόρτισης 5 ωρών και το DOD που αναγράφεται αναφέρεται στη χωρητικότητα για αυτό το ρυθμό. Η ονομαστική χωρητικότητα αυτής της μπαταρίας όμως έχει υπολογιστεί για ρυθμό εκφόρτισης 20 ωρών και η χωρητικότητα για ρυθμό εκφόρτισης 5 ωρών είναι το 85% της ονομαστικής χωρητικότητας. Παρόλο που ο κύκλος εργασιών της χωρητικότητας είναι  $400 \times 50\% = 200$  για τον ρυθμό των 5 ωρών, όταν αναφερόμαστε στις πραγματικές Ah είναι μόνο  $400 \times 50\% \times 85\% = 170$  για την ονομαστική χωρητικότητα (για ρυθμό 20 ωρών). Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να περιμένουμε μόνο 340 κύκλους σε 50% DOD για την ονομαστική χωρητικότητα, όχι 400.

Στις δοκιμές του κύκλου ζωής, στις μπαταρίες πραγματοποιείται μια πλήρης επαναφόρτιση μετά από κάθε εκφόρτιση. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα, η επαναφόρτιση δεν είναι τόσο πλήρης. Είναι δηλαδή συνετό, σαν παράγοντας ασφάλειας, να φθείρεται κάπως ο κύκλος ζωής όταν χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των χρόνων ζωής σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα ποσοστό 80% του κύκλου ζωής που προκύπτει από τις δοκιμές. Έτσι, στο παραπάνω παράδειγμα για την μπαταρία που ξεκίνησε στους 400 κύκλους

για 50% DOD και μειώθηκε στους 340 κύκλους για το πραγματικό 50% DOD, θα παίρναμε μόνο 272 τέτοιους κύκλους σε συνθήκες φωτοβολταϊκού συστήματος.

Τα πρώτα χρόνια του σχεδιασμού φωτοβολταϊκών συστημάτων, η «εύκολη λύση» για την αύξηση της ζωής της μπαταρίας όταν αυτή ήταν απογοητευτικά χαμηλή σε κάποιες περιπτώσεις, ήταν η αναζήτηση μιας μπαταρίας με αυξημένο κύκλο ζωής. Δυστυχώς, ο κύκλος ζωής δεν είναι ο μόνος παράγοντας που καθορίζει το χρόνο ζωής της μπαταρίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα και σε μερικές περιπτώσεις αυτή η αλλαγή οδηγούσε σε ακόμα μικρότερο χρόνο ζωής[10].

Στα αυτόνομα συστήματα παρατηρούνται πολλοί μερικοί κύκλοι (partial cycles) μέσα σε έναν μακρόκυκλο (macrocycle).

Ένας μακρόκυκλος είναι ο χρόνος μεταξύ 2 πλήρως φορτισμένων καταστάσεων, ενώ ο μερικός κύκλος ορίζεται ως η μεταφορά φορτίου μέσα στο χρόνο της αλλαγής της κατεύθυνσης του ρεύματος της μπαταρίας. Γενικά, η μεταφορά φορτίου της μπαταρίας στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας καθορίζεται από της απόδοση χωρητικότητας (capacity throughput). Αυτή δίνεται από τις συσσωρευμένες αμπερ – ώρες που έχουν εκφορτιστεί από τη μπαταρία δια την ονομαστική χωρητικότητα. Ο αριθμός που προκύπτει είναι επίσημα ισοδύναμος με τον αριθμό των 100% DOD κύκλων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της ζωής της μπαταρίας. Αυτός ο κανονικοποιημένος αριθμός αναφέρεται ως απόδοση χωρητικότητας[3].

## 9.6 Αποδοτικότητα

Η αποδοτικότητα αμπερ – ωρών η Ah ορίζεται ως ο λόγος των αμπερ – ωρών που εκφορτίζονται από τη μπαταρία προς τις αμπερ – ώρες που φορτίζονται στην μπαταρία μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (τυπικές περιόδους είναι ένας μήνας ή ένας χρόνος ή μια περίοδος ανάμεσα σε δύο διαδικασίες πλήρους φόρτισης). Συχνά, αντί για την αποδοτικότητα αμπερ – ωρών χρησιμοποιείται ο παράγοντας φόρτισης, ο οποίος ορίζεται ως  $1/η Ah$ . Για μια βιώσιμη λειτουργία μπαταρίας είναι απαραίτητοι παράγοντες φόρτισης μεγαλύτεροι της μονάδας.

Η αποδοτικότητα ενέργειας η Wh είναι ο λόγος της ενέργειας που εκφορτίζεται από μια μπαταρία προς την ενέργεια που φορτίζεται σε μια μπαταρία μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο[3]. Η ενεργειακή αποδοτικότητα μιας μπαταρίας είναι

χαμηλότερη από την αποδοτικότητα αμπερ – ωρών διότι οι μπαταρίες εκφορτίζονται σε χαμηλότερη τάση από ότι φορτίζονται. Επειδή η αποδοτικότητα αμπερ – ωρών είναι κοντά στη μονάδα, θεωρείται πιο βολικό να δουλεύουμε σε Ah όταν υπολογίζουμε πόση φόρτιση χρειάζεται για να αντικατασταθεί ένα συγκεκριμένο ποσό εκφόρτισης σε φωτοβολταϊκούς (και άλλους) υπολογισμούς. Παρόλα αυτά, επειδή η αποδοτικότητα αμπερ – ωρών για μια πλήρη επαναφόρτιση είναι πάντα ελάχιστα μικρότερη της μονάδας, πρέπει να τροφοδοτηθεί η μπαταρία με λίγο περισσότερες Ah από όσες πραγματικά καταναλώνονται στη διαδικασία φόρτισης. Αυτό το επιπρόσθετο φορτίο, ή η υπερφόρτιση, καταναλώνεται από άλλες, ανεπιθύμητες, χημικές αντιδράσεις μέσα στη μπαταρία. Στις μπαταρίες 33 μολύβδου οξέος και νικελίου καδμίου, αυτές είναι η παραγωγή αερίων οξυγόνου από το νερό στο θετικό ηλεκτρόδιο και στις ανοικτές μπαταρίες, η παραγωγή αερίων υδρογόνου από το νερό στο αρνητικό ηλεκτρόδιο[10].

### **9.7 Μέρες αυτονομίας**

Το μέγεθος μιας μπαταρίας δίνεται από το ονομαστικό ενεργειακό περιεχόμενο (energy content) σε κατάσταση πλήρους φόρτισης. Για να εκφράσουμε το σχετικό μέγεθος μιας μπαταρίας σε σχέση με το φορτίο στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας, χρησιμοποιείται συχνά ο όρος μέρες αυτονομίας. Οι μέρες αυτονομίας καθορίζονται από το λόγο του ονομαστικού ενεργειακού περιεχομένου της μπαταρίας (kWh) προς τη μέση ημερήσια ενεργειακή κατανάλωση (kWh/ημέρα). Επομένως, η μονάδα είναι οι «μέρες» και εκφράζει το χρονικό διάστημα για το οποίο το σύστημα μπορεί να τροφοδοτείται μόνο από την πλήρως φορτισμένη μπαταρία[3].

### **9.8 Ρεύμα μπαταρίας**

Τα ρεύματα μπαταρίας δίνονται συνήθως σε σχέση με το μέγεθος της μπαταρίας. Ο λόγος είναι ότι οι εντάσεις και οι εξαρτώμενες από το ρεύμα ηλεκτρικές ιδιότητες σχετίζονται με συγκεκριμένα φορτία στα ηλεκτρόδια όσον αφορά τα ενεργά υλικά. Για μεγαλύτερες χωρητικότητες που έχουν δημιουργηθεί από την παράλληλη σύνδεση ηλεκτροδίων ή κυττάρων ή από μεγαλύτερα ηλεκτρόδια, η κανονικοποίηση

του ρεύματος ως προς την χωρητικότητα είναι ένα κατάλληλο μέτρο. Ως εκ τούτου, τα ρεύματα μπαταρίας εκφράζονται ως πολλαπλάσια της χωρητικότητας σε αμπερ – ώρες ή ως πολλαπλάσια του ρεύματος εκφόρτισης που καθορίζεται από τη χωρητικότητα.

Για μια μπαταρία με χωρητικότητα  $C = 100 \text{ Ah}$ , ένα ρεύμα  $10 \text{ A}$  ορίζεται ως  $0.1 \times C$ . Στο παράδειγμα, τα  $100 \text{ A}$  καλούνται  $C - \text{rate}$ . Το  $I_{10}$  είναι το ρεύμα που εκφορτίζει μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία μέσα σε  $10$  ώρες στην καθορισμένη τελική τάση εκφόρτισης. Η τυπική ονοματολογία για τη χωρητικότητα είναι  $C_x$ , όπου  $x$  είναι ο χρόνος μέσα στον οποίο η μπαταρία εκφορτίζεται. Για παράδειγμα,  $C_{10} = 10 \text{ h} \times I_{10}$  ή  $C_{10} = 100 \text{ Ah}$ ,  $I_{10} = 10 \text{ A} = 0.1 \times C_{10}$ .

Αξίζει να σημειωθεί ότι το  $1 \times I_{10}$  δεν είναι ισοδύναμο με το  $10 \times I_{100}$  αφού η χωρητικότητα  $C_{100}$  είναι γενικά μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα  $C_{10}$ [3].

## 9.9 Χρόνος ζωής

Ο χρόνος ζωής μιας μπαταρίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας και από τις στρατηγικές ελέγχου. Ο όρος χρόνος ζωής, έχει διαφορετική σημασία για τις πρωτεύουσες και για τις δευτερεύουσες μπαταρίες. Ο χρόνος ζωής (ή ζωή «ραφίου» - shelf life) στις πρωτεύουσες μπαταρίες περιορίζεται από την αυτοεκφόρτιση τους και ορίζεται συνήθως σαν ο χρόνος που χρειάζεται η μπαταρία για να φτάσει το 90% της αρχικής της χωρητικότητας. Αντίθετα, ο χρόνος ζωής των δευτερευουσών μπαταριών ορίζεται σαν τη διάρκεια ικανοποιητικής επίδοσης που μετράται σε χρόνια (float ή ημερολογιακός χρόνος ζωής) ή σαν τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης (κύκλος ζωής).

Το κριτήριο τέλους ζωής για τις δευτερεύουσες μπαταρίες καθορίζεται συνήθως από το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει η μπαταρία το 80% της αρχικής της χωρητικότητας. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης τυπικά αυξάνεται καθώς μειώνεται το DOD. Και οι δύο τύποι χρόνου ζωής των δευτερευουσών μπαταριών, επηρεάζονται από έναν αριθμό συνθηκών, μεταξύ αυτών από τη θερμοκρασία κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση, το DOD, το ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης, τη μέθοδο ελέγχου της φόρτισης, την έκθεση σε υπερφόρτιση και/ή υπερεκφόρτιση και τη διάρκεια και τις συνθήκες αποθήκευσης.

### 9.10 Αυτοεκφόρτιση

Αυτοεκφόρτιση ονομάζεται η απώλεια φορτίου σε μια μπαταρία αν αυτή αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για υπολογίσιμο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, σε μια πρωτεύουσα μπαταρία που είναι τοποθετημένη στο ράφι ενός καταστήματος για μερικά χρόνια δε θα έχει απομείνει ολόκληρη η χωρητικότητά της.

Για επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης συνήθως αντιστοιχεί σε ένα ποσοστό χωρητικότητας που χάνεται ανά μήνα όταν αρχίζουμε με μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία, πρέπει όμως να αναφέρεται μαζί με τη θερμοκρασία της μπαταρίας. Σε πολλές περιπτώσεις, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης διπλασιάζεται για κάθε αύξηση 10oC στη θερμοκρασία της μπαταρίας.

Στους περισσότερους υπολογισμούς για φωτοβολταϊκές μπαταρίες, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης των προτιμώμενων τύπων μπαταριών είναι χαμηλός (μεταξύ 1 και 4% ανά μήνα σε θερμοκρασία 20 – 25oC ) και η αυτοεκφόρτιση απαιτεί τόσο μικρό ποσοστό επιπρόσθετης φόρτισης συγκριτικά με το φορτίο (ή ακόμα και τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό ελέγχου) που μπορεί εύκολα να αγνοηθεί[10].

### 9.11 Κατάσταση υγείας

Η κατάσταση της υγείας ορίζεται σαν ο λόγος της πραγματικά μετρούμενης χωρητικότητας και της ονομαστικής χωρητικότητας. Η κατάσταση υγείας υποδεικνύει σε ποιο βαθμό η μπαταρία είναι ακόμα ικανή να πληροί τις απαιτήσεις του συστήματος. Σύμφωνα με τα πρότυπα, οι μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι στο τέλος της ζωής τους αν η κατάσταση της υγείας τους είναι κάτω από 80%. Παρόλα αυτά, οι μπαταρίες μπορούν να λειτουργήσουν για πολύ περισσότερο, οι μέρες αυτονομίας τους όμως μειώνονται αναλόγως και το σύστημα μπορεί να μην είναι σε θέση να ικανοποιήσει πλέον τις ενεργειακές απαιτήσεις.

Μπαταρίες που λειτουργούν σε κατάσταση υγείας περίπου 50% συναντώνται συχνά, κυρίως σε υβριδικά συστήματα. Αυτό έχει σαν συνέπεια το μερίδιο της γεννήτριας να αυξάνεται[3].



### 9.12 Ρυθμός εκφόρτισης, ρυθμός φόρτισης

Οι ρυθμοί εκφόρτισης και φόρτισης είναι βολικές κλίμακες για τη σύγκριση ρευμάτων στα οποία φορτίζονται οι μπαταρίες, ανεξάρτητα από τη χωρητικότητά τους. Εκφράζονται ως ένας αριθμός ωρών, π.χ. ο ρυθμός 10 ωρών, 240 ωρών κλπ. Το ρεύμα στο οποίο αντιστοιχούν είναι η κατάλληλη ολική χωρητικότητα εκφόρτισης διαιρεμένη με τον αριθμό των ωρών[10]:

$$\text{Ρυθμός} = \frac{\text{χωρητικότητα (Ah)}}{\text{χρόνος (h)}}$$

Για παράδειγμα, C/10 (ρυθμός 10 ωρών) είναι ένα ρεύμα που ισούται με την ονομαστική χωρητικότητα σε Ah διαιρεμένη δια 10.

### 9.13 Ενεργειακό περιεχόμενο

Στη γενική της μορφή, η ενέργεια σε Wh που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία αναπαρίσταται από το γινόμενο όπου U η τάση σε V, I το ρεύμα εκφόρτισης σε A και t ο χρόνος εκφόρτισης σε ώρες[13]. Οι μετρήσεις χωρητικότητας συνήθως διεξάγονται σε ένα φορτίο σταθερού ρεύματος και η ενέργεια εξόδου υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη χωρητικότητα που μετρήθηκε επί την τάση εκφόρτισης. Ως εκ τούτου, είτε χρησιμοποιείται το ακριβές ολοκλήρωμα της παραπάνω εξίσωσης είτε μέσες τάσεις. Αντίστοιχοι όροι είναι:

- Αρχική τάση εκφόρτισης: τάση τη στιγμή που εφαρμόζεται το φορτίο.
- Μέση τάση εκφόρτισης: η μέση τιμή της τάσης καθ'όλη τη διάρκεια της εκφόρτισης.
- Τάση εκφόρτισης στο μέσο της διαδρομής: η τάση όταν το 50% της χωρητικότητας έχει εκφορτιστεί (περίπου ίση με τη μέση τάση).

Για εκφόρτιση με σταθερή αντίσταση, όπως συνήθως συμβαίνει στις πρωτεύουσες μπαταρίες, με  $R(\Omega) = \text{σταθερό ωμικό φορτίο}$ .

#### 9.14 Ειδική ενέργεια, ενεργειακή πυκνότητα

Για τη σύγκριση συστημάτων, έχει γίνει κοινή πρακτική να συσχετίζεται το ενεργειακό περιεχόμενο μιας δοσμένης μπαταρίας με το βάρος ή τον όγκο της. Η σχετική με το βάρος ενέργεια ονομάζεται ειδική ενέργεια και μετριέται σε Wh/kg. Μια τυπική τιμή για την ειδική ενέργεια μιας μπαταρίας έλξης (traction battery) μολύβδου οξέος είναι 25 Wh/kg. Για σύγκριση, παρατίθεται ότι μια σύγχρονη μπαταρία ιόντων λιθίου προσφέρει περίπου 125 Wh/kg[13].

Η σχετική με τον όγκο ενέργεια ονομάζεται ενεργειακή πυκνότητα και συναντάται με τις μονάδες Wh/L ή Wh/cm<sup>3</sup>. Η ενεργειακή πυκνότητα έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις μπαταρίες που σχεδιάζονται να τροφοδοτούν φορητό εξοπλισμό. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, το μέγεθος της μπαταρίας είναι συνήθως πιο σημαντικό από ότι το βάρος της. Τα σημερινά συστήματα καλύπτουν ένα εύρος από 150 mWh/cm<sup>3</sup> (ψευδάργυρος/ άνθρακας) μέχρι 1.2 Wh/cm<sup>3</sup> (alkaline zinc / αέρας).

Πολλές πρόοδοι έχουν σημειωθεί στην τεχνολογία των μπαταριών τα τελευταία χρόνια, τόσο μέσω της συνεχούς βελτίωσης ενός συγκεκριμένου ηλεκτροχημικού συστήματος όσο και μέσω της ανάπτυξης και εισαγωγής μπαταριών διαφορετικής χημικής σύστασης. Όμως οι μπαταρίες δε συμβαδίζουν με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών, όπου οι επιδόσεις διπλασιάζονται κάθε 18 μήνες, ένα φαινόμενο γνωστό ως ο νόμος του Moore. Οι μπαταρίες, λοιπόν, αντίθετα με τις ηλεκτρονικές συσκευές, καταναλώνουν υλικά όταν παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια και υπάρχουν θεωρητικοί περιορισμοί στο ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποδοθεί ηλεκτροχημικά από τα διαθέσιμα υλικά. Το άνω όριο τώρα επιτυγχάνεται εφόσον τα περισσότερα από τα υλικά που είναι ικανά να λειτουργήσουν ως ενεργά υλικά έχουν διερευνηθεί και η λίστα των ανεξερεύνητων υλικών μικραίνει.

Όπως φαίνεται εκτός από μερικά συστήματα, όπου το βάρος του ενεργού υλικού της καθόδου δεν περιλαμβάνεται στον υπολογισμό, οι τιμές για τη θεωρητική ενεργειακή πυκνότητα δεν υπερβαίνουν τις 1500 Wh/L. Οι περισσότερες από τις τιμές είναι, στην πραγματικότητα, χαμηλότερες. Τα δεδομένα στον πίνακα αυτό, δείχνουν επίσης ότι η ειδική ενέργεια που παρέχεται από αυτές τις μπαταρίες (με βάση τις πραγματικές επιδόσεις όταν έχουμε εκφόρτιση υπό βέλτιστες συνθήκες) δεν υπερβαίνει τις 450 Wh/kg.

Ομοίως, οι τιμές της ενεργειακής πυκνότητας δεν υπερβαίνουν τις 1000 Wh/L. Αξίζει, ακόμα, να σημειωθεί ότι οι τιμές για τα επαναφορτιζόμενα συστήματα είναι χαμηλότερες από αυτές στις πρωτεύουσες μπαταρίες, κατά ένα μέρος λόγω του πιο περιορισμένου εύρους υλικών που μπορούν να επαναφορτιστούν πρακτικά και της ανάγκης για σχεδιασμούς που θα βελτιώνουν την επαναφόρτιση και τον κύκλο ζωής[9]. Αναγνωρίζοντας αυτούς τους περιορισμούς, όταν θα διερευνούνται νέα συστήματα μπαταριών, θα είναι πολύ πιο δύσκολο να αναπτυχθεί ένα νέο σύστημα μπαταρίας το οποίο θα έχει σημαντικά υψηλότερη ενεργειακή έξοδο και ταυτόχρονα θα πληροί τις προϋποθέσεις ενός επιτυχημένου εμπορικού προϊόντος, συμπεριλαμβανομένης της διαθεσιμότητας των υλικών, του αποδεκτού κόστους και της ασφάλειας και προστασίας του περιβάλλοντος.

Η έρευνα και η ανάπτυξη στις μπαταρίες θα εστιάσουν στη μείωση της αναλογίας ανενεργών προς ενεργών υλικών με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας, στην αύξηση της απόδοσης μετατροπής και ικανότητας επαναφόρτισης, στη μεγιστοποίηση της απόδοσης υπό τις πιο αυστηρές συνθήκες λειτουργίας και στην ενίσχυση της ασφάλειας και προστασίας του περιβάλλοντος.

### **9.15 Εσωτερική αντίσταση**

Η εσωτερική αντίσταση χαρακτηρίζει την ικανότητα της μπαταρίας να χειρίζεται ένα συγκεκριμένο φορτίο. Καθορίζει την ισχύ εξόδου της μπαταρίας και μια γενική απαίτηση είναι η DC εσωτερική αντίσταση να είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή της συσκευής (1/10 ή λιγότερο), διαφορετικά η πτώση τάσης που θα προκληθεί από την απαίτηση ρεύματος της συσκευής κατανάλωσης θα περιορίζει την διάρκεια της λειτουργίας της μπαταρίας πολύ νωρίς.

Η ερμηνεία του όρου «εσωτερική αντίσταση» θέλει προσοχή, γιατί δεν είναι απλά μια ωμική αντίσταση και ο καθορισμός της εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιείται καθώς επίσης και από τη στάθμη φόρτισης της μπαταρίας. Στα περισσότερα συστήματα μπαταριών, η εσωτερική αντίσταση αυξάνεται όταν η μπαταρία πλησιάζει το τέλος της εκφόρτισης λόγω της μειωμένης αγωγιμότητας των ενώσεων που έχουν σχηματιστεί.

Κυρίως, εφαρμόζεται η μέθοδος συνεχούς ρεύματος, όπου η τελική τάση συγκρίνεται σε 2 διαφορετικά φορτία. Η μπαταρία φορτίζεται για μερικά

δευτερόλεπτα με το ρεύμα  $i_1$  και προκύπτει η τάση  $U_1$ . Στη συνέχεια, το ρεύμα αυξάνεται στην τιμή  $i_2$  και η τάση της μπαταρίας μειώνεται στην τιμή  $U_2$  και η εσωτερική αντίσταση  $R_i$

Αυτό το  $R_i$  περιλαμβάνει την ωμική αντίσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη καθώς επίσης και την υπέρταση στα όρια φάσης μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη. Η παραπάνω εξίσωση υποδεικνύει ότι η υπέρταση είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με την ωμική πτώση τάσης.

Για μπαταρίες με υδάτινο ηλεκτρολύτη, η εσωτερική αντίσταση μπορεί να καθοριστεί με αυτή τη μέθοδο μόνο για την εκφόρτιση. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης αυτό δεν είναι δυνατό λόγω της υψηλής υπέρτασης των αντιδράσεων αεριοποίησης. Όταν μια διαδικασία διάχυσης περιορίζει τη μεταφορά των αντιδρώντων σωματιδίων και δημιουργεί ένα ρεύμα περιορισμού, η αύξηση της τάσης δεν μπορεί πια να αυξήσει το ρεύμα. Η παραπάνω εξίσωση θα οδηγούσε σε αυτή την περίπτωση σε  $R_i$ . Ένα παράδειγμα τέτοιας συμπεριφοράς είναι το σύστημα αέρα/ψευδαργύρου: με την αύξηση του ρεύματος  $i$  η μεταφορά του οξυγόνου, που καθορίζεται από το ρυθμό διάχυσης, και η τάση υπό ένα μεγαλύτερο φορτίο καταρρέουν.

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος έχει ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για μεγάλες στάσιμες μπαταρίες, εφόσον αναπαριστά το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δώσει η μπαταρία για μια μικρή χρονική περίοδο. Η τιμή του βοηθάει στην εκτίμηση του μεγέθους μιας ασφάλειας που μπορεί να λειτουργεί μαζί με την μπαταρία. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος καθορίζεται από την παραπάνω εξίσωση με προέκταση του αποτελέσματος για μηδενική τάση. Αναπαριστά μια δυναμική παράμετρο, η οποία μειώνεται γρήγορα με τη διαδικασία της εκφόρτισης. Οι τιμές που δίνονται πάντα αναφέρονται σε φορτισμένη μπαταρία, αν δε διευκρινίζεται το αντίθετο.

Η AC εσωτερική αντίσταση μιας μπαταρίας είναι μια σύνθετη παράμετρος με δυσκολία στην ερμηνεία, αφού η AC συμπεριφορά μιας μπαταρίας μπορεί μόνο να προσεγγιστεί από ένα ισοδύναμο κύκλωμα με πολλά στοιχεία. Τις τελευταίες δεκαετίες, το ωμικό μέρος της αντίστασης έχει αποκτήσει μεγαλύτερη σημασία ως μια δυνατότητα ελέγχου της κατάστασης των ρυθμιζόμενων από βαλβίδα μπαταριών μολύβδου οξέος, οι οποίες διαφορετικά θα μπορούσαν να καθοριστούν μόνο από την εκφόρτιση.

Η αντίσταση μετράται κυρίως σε μια συχνότητα 1000Hz. Σε μια τόσο μεγάλη συχνότητα δε δίνει καμία πληροφορία για την ηλεκτροχημεία της μπαταρίας παρά μόνο για τα ωμικά στοιχεία του συμπεριλαμβανομένου του ηλεκτρολύτη. Οι τιμές που προκύπτουν χρησιμοποιούνται μόνο για τη σύγκριση και τον εντοπισμό ελαττωματικών κυττάρων σε μια σειρά[13].

### **9.16 Ειδικό βάρος**

Ειδικό βάρος (specific gravity) ονομάζεται ο λόγος ενός διαλύματος προς έναν ίσο όγκο νερού σε μια καθορισμένη θερμοκρασία. Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται σαν δείκτης για τη στάθμη φόρτισης ενός στοιχείου ή μιας μπαταρίας[12].

### **9.17 Ειδική ισχύς**

Η ειδική ισχύς (specific power) δείχνει την ικανότητα φόρτισης ή το ποσό του ρεύματος που μπορεί να τροφοδοτήσει η μπαταρία. Μπαταρίες για εργαλεία ισχύος παρουσιάζουν υψηλή ειδική ισχύ αλλά μειωμένη ειδική ενέργεια[14]. Ειδική ισχύς σημαίνει χαμηλή εσωτερική αντίσταση. Μια μπαταρία μπορεί να έχει υψηλή ειδική ενέργεια αλλά χαμηλή ειδική ισχύ, όπως είναι η περίπτωση της αλκαλικής μπαταρίας. Εναλλακτικά, μια μπαταρία μπορεί να έχει χαμηλή ειδική ενέργεια αλλά να μπορεί να αποδώσει μεγάλη ειδική ισχύ, κάτι το οποίο είναι δυνατό με τους super capacitors.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>**

### **10.1 Γενικά για τη φόρτιση –Φόρτιση/εκφόρτισης της μπαταρίας**

Η ελλιπής φόρτιση είναι από τις σημαντικότερες αιτίες μείωσης της ζωής μιας μπαταρίας. Ως εκ τούτου, είναι προφανές ότι οι διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης και ο έλεγχός τους είναι ουσιώδεις για τη διατήρηση των μπαταριών σε καλή κατάσταση και συνεπώς την επιμήκυνση της ζωής τους. Η φόρτιση των μπαταριών πρέπει να γίνεται με συνεχές ρεύμα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα πρέπει να μετασχηματίζεται και για την εργασία αυτή χρησιμοποιούνται κυρίως ημιαγωγοί ανορθωτές[13]. Η φόρτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους, το

αντικείμενο της όμως, το οποίο είναι η οδήγηση ρεύματος μέσα από τη μπαταρία στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν της εκφόρτισης, παραμένει το ίδιο[12].

### **10.1.1 Χωρητικότητα μπαταρίας, ρεύμα εκφόρτισης και ρεύμα φόρτισης.**

Οι ηλεκτρικές μπαταρίες είναι DC αποθηκευτικά συστήματα, τα οποία μπορούν είτε να αποθηκεύσουν είτε να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσα από χημικές διεργασίες. Η διαδικασία αποθήκευσης ενέργειας καλείται φόρτιση ενώ η παραγωγή ενέργειας καλείται εκφόρτιση. Οι χημικοί μετασχηματισμοί είναι ανάλογοι με το ποσό του ρεύματος που καταναλώνεται, ή παράγεται αντίστοιχα, σε Ah, που αντιστοιχεί στους νόμους του Faraday. Επομένως, το μέγεθος μιας μπαταρίας δίνεται σε Ah (αμπέρ (A) x χρόνος (h))[13].

Εφ'όσον η χωρητικότητα εξαρτάται από το ρεύμα και τη διάρκεια της εκφόρτισης, η τιμή της δεν είναι σταθερή. Αυτό μπορεί να προκύψει από τον προσδιορισμό της μπαταρίας από τους κατασκευαστές. Η ονομαστική χωρητικότητα δίνεται για χρόνο εκφόρτισης 5 ωρών (C5) για μπαταρίες οχημάτων και μπαταρίες νικελίου καδμίου, ενώ για σταθερές μπαταρίες δίνεται χωρητικότητα εκφόρτισης 10 ωρών (C10) και για μπαταρίες εκκίνησης, μπαταρίες μοτοσυκλετών και μικρών συσσωρευτών μολύβδου οξέος, δίνεται χωρητικότητα για εκφόρτιση 20 ωρών (C20). Μια χωρητικότητα C5 των 100 Ah σημαίνει ότι αυτή η μπαταρία παράγει 100 Ah σε διάρκεια εκφόρτισης 5 ωρών και το ρεύμα εκφόρτισης είναι  $I_5 = 100/5 = 20 \text{ A}$ .

Το αντίστοιχο ρεύμα εκφόρτισης ( $I_5$ ,  $I_{10}$ ) είναι επίσης ένα μέτρο για το ρεύμα φόρτισης. Εάν αναφέρεται ένα ρεύμα φόρτισης  $2 \times I_5$ , αυτό σημαίνει ότι η φόρτιση διενεργείται με ρεύμα διπλάσιο του ρεύματος εκφόρτισης των 5 ωρών. Για μια χωρητικότητα 100 Ah αυτό υπολογίζεται ως  $2 \times 100/5 = 40 \text{ A}$ .

### **10.1.2 Συντελεστής φόρτισης**

Ο λόγος της ποσότητας του ρεύματος που απαιτείται για την πλήρη επαναφόρτιση προς το ρεύμα που λαμβάνεται ονομάζεται συντελεστής φόρτισης. Ανέρχεται σε 1.1 με 1.2 για τις μπαταρίες μολύβδου οξέος ανάλογα με το σχεδιασμό τους και 1.2 με 1.4 για τους συσσωρευτές νικελίου καδμίου.

Κατά τη διάρκεια κάθε διεργασίας φόρτισης, ένα μέρος της ενέργειας χάνεται κυρίως πάνω από την τάση αεριοποίησης, μέσω της διαδικασίας χημικής αποσύνθεσης νερού και υδρογόνου στον ηλεκτρολύτη. Επομένως, πρέπει να εφαρμοστεί ένα μεγαλύτερο ποσό ενέργειας για τη φόρτιση από αυτό που έχει δεχθεί η μπαταρία πριν την επαναφόρτιση. Για παράδειγμα, για δεδομένη μπαταρία με ονομαστική χωρητικότητα 125 Ah, εκφορτισμένη κατά 80% (100 Ah), με συντελεστή φόρτισης 1.2, πρέπει να παρασχεθούν  $100 \text{ Ah} \times 1.2 = 120 \text{ Ah}$  έτσι ώστε να επιτευχθεί η πλήρως φορτισμένη κατάσταση.

### 10.1.3 Χρόνος φόρτισης

Οι δοθέντες χρόνοι φόρτισης είναι εξιδανικευμένες υπολογιζόμενες τιμές με δεδομένο ότι όλα τα χαρακτηριστικά δεδομένα της μπαταρίας και του ανορθωτή είναι σταθερά. Στην πράξη, οι προϋποθέσεις αυτές δεν πληρούνται αφού υπάρχουν διακυμάνσεις στο δίκτυο που επηρεάζουν τη φόρτιση. Η γήρανση της μπαταρίας και οι αλλαγές της θερμοκρασίας έχουν επίσης επιρροή στις συνθήκες της φόρτισης.

Διακύμανση της θερμοκρασίας του ηλεκτρολύτη κατά 10oC (θερμοκρασία αναφοράς για μπαταρίες κίνησης 30oC, για σταθερές μπαταρίες 20oC και για μπαταρίες εκκίνησης 27oC) αλλάζει το χρόνο φόρτισης κατά 1 ώρα. Εάν η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη θερμοκρασία αναφοράς, τότε η φόρτιση παρατείνεται ενώ η υψηλότερη θερμοκρασία συντομεύει το χρόνο της φόρτισης. Εφόσον αυτές οι ενοχλητικές μεταβολές δεν μπορούν να ελεγχθούν, δε λαμβάνονται υπ' όψιν για τον υπολογισμό του χρόνου φόρτισης. Ως εκ τούτου είναι αναμενόμενη μια διακύμανση περίπου  $\pm 0.5$  ώρας στο χρόνο φόρτισης.

### 10.1.4 Τάση αεριοποίησης

Η τιμή της τάσης πάνω από την οποία μια μπαταρία δείχνει σημαντική δραστηριότητα όσον αφορά την αεριοποίηση, ονομάζεται τάση αεριοποίησης. Στην πράξη, για τη μπαταρία μολύβδου οξέος που μας ενδιαφέρει εδώ, συναντάται η τιμή 2.4 V/στοιχείο.

### 10.1.5 Γενικές αρχές φόρτισης μπαταριών μολύβδου οξέος

Κατά τη διαδικασία φόρτισης, DC ηλεκτρική ισχύς χρησιμοποιείται για να μετασχηματίσει τις ενεργές χημικές ουσίες του συστήματος της μπαταρίας στη φορτισμένη κατάσταση υψηλής ενέργειας. Στην περίπτωση της μπαταρίας μολύβδου οξέος, η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη μετατροπή του θεϊκού μολύβδου στο θετικό ηλεκτρόδιο σε οξειδίο του μολύβδου ( $PbO_2$ ), τη μετατροπή του θεϊκού μολύβδου στο αρνητικό ηλεκτρόδιο σε μεταλλικό μόλυβδο (σφουγγάρι μολύβδου) και την αποκατάσταση του ηλεκτρολύτη από ένα χαμηλής συγκέντρωσης θεϊκό οξύ σε ένα υψηλής συγκέντρωσης και ειδικού βάρους περίπου 1.21 με 1.30.

Εφόσον υπάρχει αλλαγή φάσης από στερεό σε διάλυμα στην οποία εμπλέκεται το θεϊκό ιόν, η φόρτιση μιας μπαταρίας μολύβδου οξέος έχει ειδικές εκτιμήσεις διάχυσης και είναι ευαίσθητη στη θερμοκρασία. Κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση τα στερεά υλικά που πηγαίνουν στο διάλυμα σαν ιόντα καταβυθίζονται σαν ένα διαφορετικό στερεό. Αυτό προκαλεί επίσης αναδιανομή του ενεργού υλικού και η αναδιάταξη αυτή τείνει να κάνει το ενεργό υλικό να περιέχει μια κρυσταλλική δομή με λιγότερες ατέλειες που έχει ως αποτέλεσμα λιγότερη χημική και ηλεκτροχημική δραστηριότητα.

Ως εκ τούτου, η μπαταρία μολύβδου οξέος δεν είναι αντιστρέψιμη φυσικά όπως είναι χημικά. Αυτή η φυσική υποβάθμιση μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με κατάλληλη φόρτιση και συχνά μπαταρίες που απορρίπτονται σαν «νεκρές» μπορούν να ανακτηθούν με μια μακρά, αργή επαναφόρτιση (3 με 4 ημέρες σε 2 με 3 A για τις SLI μπαταρίες)[9]. Μια μπαταρία μολύβδου οξέος μπορεί, γενικά, να φορτίζεται σε οποιοδήποτε ρυθμό δεν προκαλεί υπερβολική αεριοποίηση, υπερφόρτιση ή υψηλές θερμοκρασίες. Η μπαταρία μπορεί να απορροφήσει πολύ μεγάλο ρεύμα κατά το πρώτο στάδιο της φόρτισης, αλλά υπάρχει ένα όριο όσον αφορά το ασφαλές ρεύμα όσο η μπαταρία φορτίζεται. Επειδή υπάρχει μεγάλο περιθώριο ελιγμών, υπάρχει μια σειρά από συστήματα φόρτισης και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων όπως είναι ο τύπος και ο σχεδιασμός της μπαταρίας, οι συνθήκες λειτουργίας, ο διαθέσιμος για φόρτιση χρόνος, ο αριθμός των στοιχείων ή των μπαταριών προς φόρτιση και οι εγκαταστάσεις φόρτισης. Οι καμπύλες δείχνουν ότι μια πλήρως εκφορτισμένη μπαταρία μπορεί να απορροφήσει υψηλά ρεύματα με την τάση φόρτισης να παραμένει σχετικά χαμηλή. Ωστόσο, όσο η



μπαταρία φορτίζεται, η τάση αυξάνεται σε υπερβολικά υψηλές τιμές αν διατηρείται ο υψηλός ρυθμός φόρτισης και προκαλείται έτσι υπερφόρτιση και αεριοποίηση. Το ρεύμα φόρτισης πρέπει να μειώνεται σε λογικές τιμές καθώς η μπαταρία πλησιάζει την πλήρη φόρτιση.

### 10.16 Μέθοδοι φόρτισης μπαταριών μολύβδου οξέως

Η κατάλληλη επαναφόρτιση είναι σημαντική για να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή ζωή για κάθε μπαταρία μολύβδου οξέος σε οποιοσδήποτε συνθήκες χρήσης. Παρακάτω δίνονται κάποιοι κανόνες για κατάλληλη φόρτιση και εφαρμόζονται σε όλους τους τύπους μπαταριών μολύβδου οξέος.

1. Το ρεύμα φόρτισης στην αρχή της επαναφόρτισης μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή δεν παράγει μέση τάση στοιχείου μεγαλύτερη από την τάση αεριοποίησης (περίπου 2.4 V ανά στοιχείο).
2. Κατά την επαναφόρτιση και μέχρι το 100% της προηγούμενης χωρητικότητας εκφόρτισης να έχει ανακτηθεί, το ρεύμα πρέπει να ελέγχεται έτσι ώστε να συντηρείται τάση χαμηλότερη από την τάση αεριοποίησης. Για ελαχιστοποίηση του χρόνου φόρτισης, αυτή η τάση μπορεί να είναι ακριβώς κάτω από την τάση αεριοποίησης.
3. Όταν το 100% της εκφορτισμένης χωρητικότητας έχει επιστραφεί υπό τη συγκεκριμένη τάση, ο ρυθμός φόρτισης θα έχει φτάσει στον «τελικό» ρυθμό φόρτισης. Η φόρτιση θα πρέπει να τελειώσει με ένα σταθερό ρεύμα όχι μεγαλύτερο από αυτό το ρυθμό, τυπικά 5 A για 100 Ah ονομαστικής χωρητικότητας.

Μια σειρά από μεθόδους φόρτισης των μπαταριών μολύβδου οξέος έχουν αναπτυχθεί για να ικανοποιηθούν αυτές οι συνθήκες. Οι μέθοδοι αυτές είναι:

1. Σταθερό ρεύμα – ένα ρεύμα
2. Σταθερό ρεύμα – πολλαπλά βήματα μειούμενου ρεύματος
3. Τροποποιημένο σταθερό ρεύμα
4. Σταθερό δυναμικό
5. Τροποποιημένο σταθερό δυναμικό με σταθερό αρχικό ρεύμα
6. Τροποποιημένο σταθερό δυναμικό με σταθερό τελικό ρυθμό
7. Τροποποιημένο σταθερό δυναμικό με σταθερό αρχικό και τελικό ρυθμό

8. Φόρτιση πλήρωσης (taper charge)
9. Παλμική φόρτιση (pulse charge)
10. Φόρτιση συντήρησης (trickle charging)
11. Σταθερή φόρτιση / φόρτιση αναμονής (float charging)
12. Ταχεία φόρτιση (rapid charging)

### 10.1.7 Φόρτιση σταθερού ρεύματος

Η φόρτιση με σταθερό ρεύμα πρακτικά σημαίνει ότι ο φορτιστής τροφοδοτεί τη μπαταρία με ένα σχετικά ομοιόμορφο ρεύμα, ανεξάρτητα από τη στάθμη φόρτισης της μπαταρίας ή τη θερμοκρασία[12]. Η επαναφόρτιση σταθερού ρεύματος, σε μία ή περισσότερες τιμές ρεύματος, δεν χρησιμοποιείται ευρέως για μπαταρίες μολύβδου οξέος. Αυτό συμβαίνει λόγω της ανάγκης για προσαρμογή του ρεύματος εκτός εάν το ρεύμα φόρτισης κρατείται σε χαμηλό επίπεδο καθ'όλη τη διάρκεια της φόρτισης (κανόνας αμπερ – ωρών), κάτι το οποίο θα οδηγήσει σε μεγάλους χρόνους φόρτισης των 12 ωρών ή και περισσότερο.

Τυπικά χαρακτηριστικά φορτιστή και μπαταρίας για τη φόρτιση σταθερού ρεύματος (για φόρτιση ενός και δύο βημάτων) [9].

Η φόρτιση σταθερού ρεύματος χρησιμοποιείται για μερικές μικρές μπαταρίες μολύβδου οξέος. Χρησιμοποιείται, επίσης, κάποιες φορές στο εργαστήριο λόγω της ευκολίας στον υπολογισμό των αμπερ – ωρών εισόδου και επειδή μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλό και οικονομικό εξοπλισμό. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μειώσει τη θειίκωση στις μπαταρίες που έχουν εκφορτιστεί υπερβολικά ή δεν έχουν φορτιστεί επαρκώς. Η θεραπεία αυτή, ωστόσο, μπορεί να ελαττώσει το χρόνο ζωής της μπαταρίας και πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο με τη συμβουλή του κατασκευαστή.

Ένας άλλος τύπος φόρτισης σταθερού ρεύματος είναι η φόρτιση διαιρεμένου ρυθμού (split-rate).

Ένας φορτιστής διαιρεμένου ρυθμού εφαρμόζει ένα υψηλό αρχικό ρεύμα στο στοιχείο και μετά αλλάζει σε ένα χαμηλό ρυθμό με βάση το χρόνο της φόρτισης, την τάση ή και τα δύο. Η επιλογή της μεθόδου και του σημείου εναλλαγής μπορεί να επηρεάζεται από τη σχετική προτεραιότητα της ελαχιστοποίησης εξαερισμού

(πρώωρη εναλλαγή) ή της συντήρησης της καλής ισορροπίας στοιχείου (εναλλαγή αργότερα). Σε μερικούς φορτιστές διαιρεμένου ρυθμού, η εναλλαγή μεταξύ υψηλού και χαμηλού ρυθμού γίνεται καθώς η μπαταρία πλησιάζει στην πλήρη φόρτιση. Αυτού του είδους οι φορτιστές είναι χρήσιμοι όταν η εκφόρτιση δεν μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως αναμονής ή κυκλική (float or cyclic), αλλά βρίσκεται κάπου ανάμεσα στις δύο εφαρμογές[12].

### **10.1.8 Φόρτιση σταθερού δυναμικού.**

Η φόρτιση σταθερής τάσης ή σταθερού δυναμικού πραγματοποιείται με σχεδόν την ίδια τάση εισόδου της μπαταρίας καθ'όλη τη διάρκειά της, ανεξάρτητα από τη στάθμη φόρτισης της μπαταρίας. Οι φορτιστές σταθερής τάσης παρέχουν ένα υψηλό αρχικό ρεύμα στη μπαταρία λόγω της μεγάλης διαφοράς δυναμικού που υπάρχει ανάμεσα στη μπαταρία και το φορτιστή. Μια φόρτιση με σταθερή τάση μπορεί να επιστρέψει έως και 70% της προηγούμενως εκφορτισμένης χωρητικότητας μέσα σε 30 λεπτά. Αυτό αποδεικνύεται χρήσιμο σε πολλές εφαρμογές μπαταριών όπου εμπλέκονται πολλαπλά σενάρια εκφόρτισης.

Καθώς η μπαταρία φορτίζεται, η τάση της αυξάνεται γρήγορα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του δυναμικού που οδηγεί το ρεύμα, και μια αντίστοιχη ταχεία μείωση στο ρεύμα φόρτισης. Συμπεραίνουμε ότι, η απόκτηση πλήρους φορτίου στη μπαταρία απαιτεί παρατεταμένη φόρτιση παρά το γεγονός ότι μέρος του φορτίου προσλαμβάνεται πολύ γρήγορα. Τα χαρακτηριστικά της φόρτισης σταθερού δυναμικού φαίνονται στο σχήμα 8.4[9]. Σε κανονικές βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται τροποποιημένες μέθοδοι φόρτισης σταθερού δυναμικού (μέθοδοι 5,7 και 8). Η τροποποιημένη μέθοδος σταθερού δυναμικού (μέθοδος 5) χρησιμοποιείται για οχήματα δρόμου, τηλέφωνα και εφαρμογές συστημάτων αδιάλειπτης παροχής ισχύος όπου το κύκλωμα φόρτισης είναι συνδεδεμένο με την μπαταρία. Σε αυτή την περίπτωση, το κύκλωμα φόρτισης έχει ένα όριο για το ρεύμα και η τιμή αυτή διατηρείται μέχρι να επιτευχθεί μια προκαθορισμένη τάση. Στη συνέχεια, η τάση κρατείται σταθερή έως ότου η μπαταρία κληθεί να εκφορτιστεί.

Οι αποφάσεις σχετικά με το όριο του ρεύματος και την τιμή της σταθερής τάσης επηρεάζονται από το χρονικό διάστημα στο οποίο η μπαταρία είναι στη σταθερή τάση και σε 100% στάθμη φόρτισης. Σε αυτή τη λειτουργία αναμονής με τη μπαταρία

να είναι πάντα σε φόρτιση, ένα χαμηλό ρεύμα φόρτισης είναι επιθυμητό για να ελαχιστοποιήσει την υπερφόρτιση, τη διάβρωση του πλέγματος που συνδέεται με την υπερφόρτιση, την απώλεια νερού από την ηλεκτρόλυση του ηλεκτρολύτη και τη συντήρηση που χρειάζεται για την αντικατάσταση αυτού του νερού. Για την επίτευξη πλήρους επαναφόρτισης με ένα χαμηλό σταθερό δυναμικό απαιτείται κατάλληλη επιλογή του αρχικού ρεύματος, το οποίο βασίζεται στις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

Η τροποποιημένη φόρτιση σταθερού δυναμικού με σταθερό αρχικό και τελικό ρυθμό είναι συνήθης στην περίπτωση μπαταριών βαθέως κύκλου, οι οποίες εκφορτίζονται τυπικά με ρυθμό 6-h σε βάθος 80%. Η επαναφόρτιση ολοκληρώνεται τυπικά σε μία περίοδο 8-h. Ο φορτιστής έχει οριστεί για το σταθερό δυναμικό των 2.39 V ανά στοιχείο (τάση αεριοποίησης) και το αρχικό ρεύμα περιορίζεται στα 16 με 20 A ανά 100 Ah της ονομαστικής χωρητικότητας 6-h αμπερ – ωρών με τη χρήση μιας σειράς αντιστάσεων στο κύκλωμα του φορτιστή. Αυτό το αρχικό ρεύμα παραμένει σταθερό έως ότου η μέση τάση στοιχείου στη μπαταρία να φτάσει τα 2.39 V. Το ρεύμα μειώνεται σε σταθερή τάση στον τελικό ρυθμό των 4.5 με 5 A ανά 100 Ah, το οποίο διατηρείται ως το τέλος της φόρτισης.

Ο συνολικός χρόνος φόρτισης ελέγχεται από χρονοδιακόπτη. Ο χρόνος φόρτισης επιλέγεται έτσι ώστε να εξασφαλίζει μια χωρητικότητα εισόδου επαναφόρτισης ίση με ένα προκαθορισμένο ποσοστό των αμπερ – ωρών εξόδου της προηγούμενης εκφόρτισης, τυπικά 110 με 120% ή 10 με 20% υπερφόρτιση. Ο χρόνος φόρτισης των 8-h μπορεί να ελαττωθεί αυξάνοντας την τιμή του ορίου του αρχικού ρεύματος.

Φορτιστές σταθερής τάσης συναντώνται συχνά σε εφαρμογές, όπου είναι επιτρεπτή η παρατεταμένη διάρκεια φόρτισης για να επιτευχθεί πλήρης φόρτιση. Αντίθετα, τέτοιου τύπου φορτιστές δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται όπου υπάρχουν συχνοί κύκλοι της μπαταρίας. Επαναλαμβανόμενες εκφορτίσεις χωρίς να επιστρέφει το στοιχείο στο 102 πλήρες φορτίο του θα μειώσουν τελικά τη χωρητικότητα της μπαταρίας και μπορεί να προκαλέσουν ζημιές σε μεμονωμένα στοιχεία. Αυτός ο τύπος φόρτισης χρησιμοποιείται συχνά σε δύο πολύ διαφορετικές περιπτώσεις: σαν γρήγορη φόρτιση για την ανάκτηση ενός μεγάλου ποσοστού του φορτίου σε μικρό χρονικό διάστημα ή σαν float τύπου φόρτιση για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της υπερφόρτισης σε μπαταρίες που έχουν σπάνιες εκφορτίσεις[12].

### 10.1.9 Φόρτιση πλήρωσης (taper charging)

Η φόρτιση πλήρωσης είναι μια παραλλαγή της τροποποιημένης φόρτισης σταθερού δυναμικού, η οποία χρησιμοποιεί λιγότερο εξελιγμένους ελέγχους για μείωση του κόστους εξοπλισμού. Τα χαρακτηριστικά της φόρτισης πλήρωσης φαίνονται στο σχήμα 8.5. Ο αρχικός ρυθμός είναι περιορισμένος αλλά η σχέση τάσης και ρεύματος είναι τέτοια ώστε να γίνεται υπέρβαση των 2.39 V ανά στοιχείο στους 25oC πριν την ανάκτηση στο 100% των εκφορτισμένων αμπερ – ωρών.

Αυτή η μέθοδος έχει ως αποτέλεσμα την αεριοποίηση στο κρίσιμο σημείο της επαναφόρτισης και αύξηση της θερμοκρασίας του στοιχείου. Ο βαθμός της αεριοποίησης και της αύξησης της θερμοκρασίας είναι μια μεταβλητή που εξαρτάται από το σχεδιασμό του φορτιστή και είναι μεγάλης σημασίας για τη ζωή της μπαταρίας, η οποία μπορεί να υποβαθμιστεί από την υπερβολική θερμοκρασία της μπαταρίας και τα αέρια της υπερφόρτισης. Η τάση αεριοποίησης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παράγοντες διόρθωσης της τάσης για άλλες θερμοκρασίες εκτός των 25oC δίνονται στον πίνακα 8.1[9].

Το τέλος της φόρτισης ελέγχεται συνήθως από μία καθορισμένη τάση και όχι από ένα καθορισμένο ρεύμα. Για το λόγο αυτό, όταν μια καινούρια μπαταρία έχει υψηλή αντίσταση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (Counter-EMF) ο τελικός ρυθμός φόρτισης είναι χαμηλός και συχνά η μπαταρία δε λαμβάνει επαρκές φορτίο μέσα στο χρονικό διάστημα που παραχωρείται για να συντηρηθεί η βέλτιστη κατάσταση φόρτισης. Κατά το τελευταίο διάστημα της ζωής της μπαταρίας, όταν η αντίσταση στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι χαμηλή, ο ρυθμός φόρτισης είναι υψηλότερος από τον κανονικό τελικό ρυθμό και έτσι η μπαταρία λαμβάνει υπερβολικό φορτίο. Έτσι, η φόρτιση πλήρωσης υποβαθμίζει τη ζωή της μπαταρίας, γεγονός το οποίο δικαιολογείται από τη χρήση λιγότερο ακριβού εξοπλισμού.

Για φωτοβολταϊκά συστήματα μπαταριών και άλλα συστήματα σχεδιασμένα για βέλτιστη ζωή, ο έλεγχος της φόρτισης και τα κυκλώματα ρύθμισης πρέπει να παράγουν ένα σχέδιο για την τάση και το ρεύμα ισοδύναμο με αυτό των καλύτερων βιομηχανικών κυκλωμάτων. Οι μέθοδοι που προτιμώνται είναι τροποποιημένες μέθοδοι φόρτισης σταθερού δυναμικού με σταθερό αρχικό ρεύμα (μέθοδοι 5 και 7). Ο βέλτιστος έλεγχος για τη μεγιστοποίηση της ζωής και της ενεργειακής εξόδου της μπαταρίας επιτυγχάνεται όταν το βάθος εκφόρτισης και ο χρόνος επαναφόρτισης

είναι προκαθορισμένα και επαναλαμβανόμενα, μια συνθήκη που δεν ικανοποιείται πάντα σε ηλιακές φωτοβολταϊκές εφαρμογές.

### 10.2.0 Παλμική φόρτιση

Η παλμική φόρτιση χρησιμοποιείται συχνά για εφαρμογές κίνησης, κυρίως στην Ευρώπη. Στην περίπτωση αυτή, ο φορτιστής απομονώνεται περιοδικά από τους ακροδέκτες της μπαταρίας και μετράται αυτόματα η τάση ανοικτού κυκλώματος της μπαταρίας (χωρίς 104 αντίσταση μέτρηση της τάσης της μπαταρίας). Εάν η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι πάνω από μια προκαθορισμένη τιμή, σε σχέση με μια θερμοκρασία αναφοράς, ο φορτιστής δε μεταφέρει ενέργεια. Όταν η τάση ανοικτού κυκλώματος πέφτει κάτω από αυτό το όριο, ο φορτιστής δίνει ένα DC παλμό για μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο.

Όταν η στάθμη φόρτισης της μπαταρίας είναι πολύ χαμηλή, το ρεύμα φόρτισης είναι συνδεδεμένο σχεδόν στο 100% του χρόνου επειδή η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι, ή πέφτει απότομα, κάτω από το επιθυμητό επίπεδο. Οι διάρκειες του ανοικτού κυκλώματος και των παλμών φόρτισης επιλέγονται έτσι ώστε όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη ο χρόνος μείωσης της τάσης ανοικτού κυκλώματος να είναι ο ίδιος ακριβώς με τη διάρκεια του παλμού. Όταν οι ελεγκτές φόρτισης εντοπίζουν αυτή τη συνθήκη, ο φορτιστής μεταπηδά αυτόματα στην τελική τιμή του ρεύματος και στενοί παλμοί φόρτισης μεταδίδονται περιοδικά στην μπαταρία για να τη διατηρήσουν σε πλήρες φορτίο. Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται μπαταρίες υψηλής τάσης και παρουσιάζονται δυσκολίες όσον αφορά τη διατήρηση των στοιχείων σε ισορροπημένη κατάσταση.

Αυτό συμβαίνει κυρίως όταν τα στοιχεία έχουν μεγάλες περιόδους αναμονής με διαφορετικούς ρυθμούς αυτοεκφόρτισης. Σε αυτές τις εφαρμογές, οι μπαταρίες εκφορτίζονται πλήρως και επαναφορτίζονται περιοδικά (συνήθως κάθε εξάμηνο) σε ένα φορτίο εξισορρόπησης το οποίο επαναφέρει όλη τη σειρά των στοιχείων στην πλήρως φορτισμένη κατάσταση. Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, πρέπει να ελέγχονται τα επίπεδα του υγρού στα στοιχεία και να προστίθεται νερό όπου χρειάζεται.

Με τους νεότερους τύπους στοιχείων που δε χρειάζονται συντήρηση, τα οποία είναι ημισφραγισμένα, η φόρτιση εξισορρόπησης και η προσθήκη νερού μπορεί να μην είναι δυνατές και πρέπει να λαμβάνονται ειδικές προφυλάξεις κατά το σχεδιασμό

του φορτιστή έτσι ώστε να διατηρούνται τα στοιχεία στην κατάλληλη στάθμη φόρτισης.

Λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για αποδοτική φόρτιση της μπαταρίας στα φωτοβολταϊκά συστήματα, εξετάζεται η εφαρμογή παλμικής φόρτισης με υψηλούς παλμούς ρεύματος ως μέσο επιτάχυνσης της διαδικασίας φόρτισης[26]. Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι η παλμική φόρτιση από μόνη της ήταν υπεύθυνη για σημαντικές βελτιώσεις όσον αφορά την αποδοτικότητα του σχηματισμού του θετικού ηλεκτροδίου, τη μείωση του χρόνου επαναφόρτισης και την αυξημένη διάρκεια κύκλου μέσα από τη μικρότερη πιθανότητα πρόωρης απώλειας χωρητικότητας.

### **10.2.1 Φόρτιση συντήρησης (trickle charging)**

Αυτού του είδους η φόρτιση περιλαμβάνει ένα συνεχόμενο ή περιοδικό φορτίο σταθερού ρεύματος σε χαμηλό ρυθμό (περίπου  $C/100$ ), που χρησιμοποιείται για να διατηρεί την μπαταρία σε κατάσταση πλήρους φόρτισης, επαναφορτίζοντας τις απώλειες λόγω αυτοεκφόρτισης καθώς επίσης και ανακτώντας την ενέργεια που έχει εκφορτιστεί από διακοπτόμενη χρήση της μπαταρίας.

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται τυπικά για τις SLI μπαταρίες και άλλους παρόμοιους τύπους, όταν η μπαταρία αφαιρείται από το όχημα ή από την κανονική πηγή φόρτισής της[9]. Η φόρτιση συντήρησης χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως για φορητά εργαλεία και εξοπλισμό όπως είναι οι φακοί ή τα ηλεκτρικά κατσαβίδια τροφοδοτούμενα από μπαταρίες[12].

### **10.2.2 Σταθερή φόρτιση/ φόρτιση αναμονής(float charging)**

Η φόρτιση αναμονής χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές αποθήκευσης και ενέργειας έκτακτης ανάγκης, όπου εκφόρτιση της μπαταρίας πραγματοποιείται σπάνια. Σε αυτό τον τύπο φόρτισης, ο φορτιστής, η μπαταρία και το φορτίο είναι συνδεδεμένα παράλληλα. Η φόρτιση αναμονής είναι μια χαμηλού ρυθμού σταθερού δυναμικού φόρτιση, η οποία χρησιμοποιείται και αυτή για να διατηρήσει τη μπαταρία σε κατάσταση πλήρους φόρτισης[9].

Η λειτουργία του φορτιστή σε χαμηλή τάση, συνήθως λιγότερο από 2.4 V ανά στοιχείο, διατηρεί το ρεύμα φόρτισης χαμηλό και έτσι ελαχιστοποιεί τις καταστροφικές επιπτώσεις της υπερφόρτισης σε υψηλό ρεύμα[12]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για σταθερές μπαταρίες οι οποίες μπορεί να φορτιστούν από μια DC πηγή. Η τάση αναμονής για μια μπαταρία με ηλεκτρόδια χωρίς αντιμόνιο που περιέχει ηλεκτρολύτη ειδικού βάρους 1.210 και έχει τάση ανοικτού κυκλώματος 2.059 V ανά στοιχείο, είναι 2.17 με 2.25 V ανά στοιχείο.

### 10.2.3 Ταχεία φόρτιση

Σε πολλές εφαρμογές, είναι επιθυμητή η ταχεία επαναφόρτιση της μπαταρίας μέσα σε μία ώρα ή και λιγότερο. Όπως συμβαίνει σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης, είναι σημαντικό να ελέγχεται η φόρτιση για τη διατήρηση της μορφολογίας του ηλεκτροδίου, για την αποφυγή μιας αύξησης στη θερμοκρασία, ιδιαίτερα σε ένα σημείο στο οποίο λαμβάνουν χώρα επιβλαβείς παράπλευρες αντιδράσεις (διάβρωση, μετατροπή σε μη αγωγίμα οξειδία, υψηλή διαλυτότητα υλικών, αποσύνθεση), και για τον περιορισμό της υπερφόρτισης και της αεριοποίησης. Καθώς αυτές οι συνθήκες είναι πιο επιρρεπείς να συμβούν σε υψηλό ρυθμό φόρτισης, ο έλεγχος της φόρτισης υπό αυτές τις συνθήκες είναι κρίσιμος[9].

Η διαθεσιμότητα μικρών, χαμηλού κόστους αλλά εξελιγμένων ημιαγωγών chip, έχει καταστήσει εφικτές αποτελεσματικές μεθόδους ελέγχου του προφίλ τάσης – ρεύματος της φόρτισης. Αυτές οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον τερματισμό της φόρτισης, τον περιορισμό του ρεύματος φόρτισης ή για αλλαγή μεταξύ διαφορετικών συστημάτων φόρτισης εάν εμφανιστούν καταστροφικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της φόρτισης.

Ένα πλήθος διαφορετικών τεχνικών έχει αναπτυχθεί για την αποτελεσματική ταχεία επαναφόρτιση. Σε μία μέθοδο, στην οποία αναφερόμαστε ως «αντανακλαστική» φόρτιση, ένας σύντομος παλμός εκφόρτισης ενός κλάσματος του δευτερολέπτου ενσωματώνεται στο σύστημα της φόρτισης. Η τεχνική αυτή έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην πρόληψη μιας υπέρμετρης αύξησης της θερμοκρασίας κατά την ταχεία (15 λεπτά) επαναφόρτιση σε υψηλό ρυθμό.



#### 10.2.4 Φόρτιση μπαταριών μολύβδου οξέος ρυθμιζόμενων από βαλβίδα – VRLA

Η φόρτιση της VRLA μπαταρίας, όπως και κάθε άλλου συστήματος μπαταριών, ανάγεται ουσιαστικά στην αντικατάσταση της ενέργειας που έχει χαθεί κατά την εκφόρτιση. Λόγω της μη αποδοτικότητας της διαδικασίας αυτής, είναι απαραίτητο να επιστρέφεται περισσότερο από το 100% της ενέργειας που έχει χαθεί κατά την εκφόρτιση. Το απαραίτητο ποσό ενέργειας για την επαναφόρτιση εξαρτάται από το πόσο βαθιά εκφόρτιση έχει υποστεί η μπαταρία, από τη μέθοδο επαναφόρτισης, το χρόνο επαναφόρτισης και τη θερμοκρασία. Η υπερφόρτιση που απαιτείται για τη μπαταρία μολύβδου οξέος συνδέεται με την παραγωγή αερίων και τη διάβρωση των υλικών του θετικού ηλεκτροδίου.

Όπως έχουμε δει, στις συμβατικές μπαταρίες ανοικτού τύπου, τα αέρια που παράγονται αφήνουν το σύστημα της μπαταρίας με αποτέλεσμα την απώλεια νερού, το οποίο αναπληρώνεται κατά τη συντήρηση. Η VRLA μπαταρία ενσωματώνει την αρχή ανασυνδυασμού των αερίων, η οποία επιτρέπει στο οξυγόνο που παράγεται από φυσιολογικούς ρυθμούς υπερφόρτισης να μειώνεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο εξαλείφοντας την έξοδο των αερίων οξυγόνου από το σύστημα της μπαταρίας.

Η παραγωγή αερίων υδρογόνου έχει μειωθεί ουσιαστικά από τη χρήση μολύβδου χωρίς αντιμόνιο στο ηλεκτρόδιο. Η διάβρωση της θετικής πλάκας έχει μειωθεί από τη χρήση καθαρού μολύβδου ή ειδικού κράματος μολύβδου. Επίσης, η επίδραση της διάβρωσης του θετικού ηλεκτροδίου έχει ελαχιστοποιηθεί από την κατασκευή του στοιχείου.

Η φόρτιση μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Η φόρτιση με σταθερή τάση είναι η συμβατική μέθοδος για τις μπαταρίες μολύβδου οξέος και είναι αυτή που προτιμάται και για τις VRLA. Ωστόσο, και άλλες μέθοδοι από τις προαναφερθείσες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν.

Οι VRLA μπαταρίες κατά τη διάρκεια του κύκλου και της φόρτισης αναμονής μπορεί να εμφανίσουν μια ανισορροπία όσον αφορά το ρυθμό διάβρωσης του θετικού ηλεκτροδίου που γίνεται άνισος με το ρυθμό αυτοεκφόρτισης στο αρνητικό. Μια προτεινόμενη λύση είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα καταλύτη στο χώρο εξαερισμού του στοιχείου για την αποκατάσταση της ισορροπίας μέσω του ανασυνδυασμού υδρογόνου και οξυγόνου.

### 10.2.5 Φόρτιση σταθερής τάσης

Η φόρτιση σταθερής τάσης είναι η πιο αποτελεσματική και γρήγορη μέθοδος φόρτισης μιας VRLA μπαταρίας. Ο χρόνος επαναφόρτισης σε διάφορες τάσεις φόρτισης για ένα στοιχείο που έχει εκφορτιστεί στο 100% της χωρητικότητάς του. Ο φορτιστής που απαιτείται για να επιτευχθούν αυτοί οι χρόνοι σε δεδομένες τιμές τάσης πρέπει να είναι ικανός για ρυθμό τουλάχιστον 2C. Εάν ο φορτιστής που χρησιμοποιείται έχει μικρότερο ρυθμό, οι χρόνοι φόρτισης πρέπει να παραταθούν με βάση τον ωριαίο ρυθμό στον οποίο περιορίζεται ο φορτιστής.

Για παράδειγμα, εάν ο φορτιστής περιορίζεται στο ρυθμό C/10, τότε πρέπει να προστεθούν 10 ώρες σε κάθε σχέση τάσης φόρτισης – χρόνου, εάν ο φορτιστής περιορίζεται στο ρυθμό C/5 πρέπει να προστεθούν 5 ώρες κλπ. Δεν υπάρχουν περιορισμοί στο μέγιστο ρεύμα που επιβάλλονται από τα χαρακτηριστικά φόρτισης της μπαταρίας. Ένα σύνολο καμπυλών κανονικοποιημένης αποδοτικότητας φόρτισης σε σχέση με το χρόνο σε λεπτά για τρεις διαφορετικές τάσεις. Ο υπολογισμός της αποδοτικότητας αυτής έγινε διαιρώντας το σύνολο της χωρητικότητας που επιστρέφει σε αμπέρ – ώρες με τη χωρητικότητα εκφόρτισης που είχε αφαιρεθεί προηγουμένως. Στη φόρτιση με 2.55 V, το 100% της χωρητικότητας που είχε αφαιρεθεί κατά τον προηγούμενο κύκλο επέστρεψε σε 15 λεπτά, ενώ με 2.7 V μια υπερφόρτιση 60% επέστρεψε στο τέλος της φόρτισης διάρκειας 60 λεπτών.

Ένα σύνολο μπαταριών αναφοράς φορτίστηκε σε σταθερή τάση 2.5 V για 16 ώρες και εκφορτίστηκε με ρυθμό 1C. Αυτή η καμπύλη αναφοράς παρουσιάζεται για να δείξει την αναμενόμενη χωρητικότητα σε ρυθμό 1C. Από τα δεδομένα του διαγράμματος φαίνεται ότι η καμπύλη για 2.55 V ανά στοιχείο προσεγγίζει περισσότερο την καμπύλη αναφοράς. Η μπαταρία που φορτίστηκε στα 2.7 V έλαβε πολλή υπερφόρτιση και έτσι η χωρητικότητα υποβαθμίστηκε μετά από 15 κύκλους.

Τέλος, η μπαταρία που φορτίστηκε στα 2.35 V έφτασε σε μια τιμή περίπου ίση με το 75 % της καμπύλης αναφοράς και συνέχισε να κάνει κύκλους σε αυτό το επίπεδο. Τα δεδομένα αυτά δείχνουν ότι η VRLA μπαταρία λεπτών πλακών μπορεί να φορτιστεί γρήγορα στο 100% της ονομαστικής χωρητικότητας σε λιγότερο από 1 ώρα. Ένας φορτιστής σταθερής τάσης ρυθμισμένος στα 2.5 με 2.55 V ανά στοιχείο και ικανός για ρυθμούς φόρτισης 3C με 4C είναι προτιμότερος. Αξίζει να σημειωθεί

ότι φόρτιση στα 2.7 V ανά στοιχείο για εκτεταμένες περιόδους θα καταστρέψει τη μπαταρία.

### 10.2.6 Γρήγορη φόρτιση

Η γρήγορη φόρτιση ορίζεται σε μια μέθοδος φόρτισης, η οποία επιστρέφει πλήρως τη χωρητικότητα σε λιγότερο από 4 ώρες. Παρόλα αυτά, πολλές εφαρμογές απαιτούν 1 ώρα ή και λιγότερο. Αντίθετα με ότι συμβαίνει στις συμβατικές ανοικτού τύπου μπαταρίες μολύβδου οξέος, ο σχεδιασμός των VRLA χρησιμοποιεί ένα σύστημα (starved electrolyte system) στο οποίο το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρολύτη περιέχεται σε έναν ιδιαίτερα συγκρατητικό διαχωριστή, ο οποίος στη συνέχεια δημιουργεί τις στερημένες από ηλεκτρολύτη πλάκες (starved plates) που χρειάζονται για τη μεταφορά των αερίων. Το πρόβλημα της αεριοποίησης που ενυπάρχει στα συμβατικά στοιχεία μολύβδου οξέος δεν παρουσιάζεται σε αυτό το σύστημα, καθώς το οξυγόνο που εκλύεται κατά την εκφόρτιση μπορεί να συνδυαστεί στη VRLA μπαταρία. Η μεγάλη επιφάνεια των λεπτών πλακών που χρησιμοποιούνται σε μερικές VRLA μπαταρίες μειώνει την πυκνότητα ρεύματος σε ένα επίπεδο πολύ χαμηλότερο από αυτό που συναντάται συνήθως στις συμβατικές μπαταρίες μολύβδου οξέος και έτσι ενισχύονται οι ικανότητες της γρήγορης φόρτισης.

Ο ρυθμός φόρτισης ή το ρεύμα που μπορεί να δεχτεί μια VRLA μπαταρία για φόρτιση μιας ώρας σε τρεις διαφορετικές τάσεις. Ο φορτιστής μπορεί να αποδώσει ρυθμό φόρτισης μέχρι 5C. Η μπαταρία έχει υψηλή δεκτικότητα φορτίου στην αρχή της φόρτισης. Στην πραγματικότητα, στην περίπτωση της φόρτισης με 2.55 V ανά στοιχείο, το στοιχείο αποδέχεται πλήρως το ρεύμα που είναι ικανός να δώσει ο φορτιστής στα πρώτα 3 με 4 λεπτά. Στην περίπτωση της φόρτισης με 2.7 V ανά στοιχείο, υπάρχει σημαντικό ποσό υπερφόρτισης που αρχίζει στα 30 λεπτά, το οποίο προκαλεί εσωτερική θέρμανση και συνεπώς αύξηση στο ρεύμα φόρτισης.

### 10.2.7 Σταθερή φόρτιση/Φόρτιση αναμονής

Όταν η VRLA μπαταρία πρόκειται να φορτιστεί για μια εφαρμογή αναμονής, ο φορτιστής σταθερής τάσης πρέπει να διατηρείται μεταξύ 2.3 και 2.4 V για μέγιστη

διάρκεια ζωής. Συνεχόμενη φόρτιση σε τάση μεγαλύτερη από 2.4 V ανά στοιχείο δε συνίσταται λόγω της επιταχυνόμενης διάβρωσης του πλέγματος. Το διάγραμμα στο σχήμα 8.12 δίνει προσεγγιστικά τις τιμές της τάσης που θα φτάσει μια μπαταρία σε φόρτιση αναμονής στους 25 και στους 65oC, ή το ρυθμό φόρτισης που θα δεχτεί εάν έχει φορτιστεί για επαρκές χρονικό διάστημα έτσι ώστε να βρίσκεται σε μια κατάσταση ισορροπίας υπερφόρτισης.

Αυτές οι καμπύλες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί προσεγγιστικά η τιμή του συνεχόμενου σταθερού ρεύματος (trickle charge) που θα διατηρήσει την κατάλληλη σταθερή τάση αναμονής. Για παράδειγμα, αν μια μπαταρία φορτιζόταν με trickle φόρτιση σε ρυθμό 0.001C, η μέση τάση ανά στοιχείο στην υπερφόρτιση θα ήταν 2.35 V στους 25oC. Αντίστροφα, εάν ένα στοιχείο φορτιζόταν με σταθερή τάση στα 2.35 V, ο ρυθμός υπερφόρτισής του θα ήταν 0.001C.

Οι υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνουν το ρυθμό των αντιδράσεων που μειώνουν τη ζωή μιας μπαταρίας. Σε αυξημένες θερμοκρασίες, η απαραίτητη τάση για την επιστροφή σε πλήρη χωρητικότητα σε δεδομένο χρόνο μειώνεται λόγω των αυξημένων ρυθμών αντίδρασης μέσα στη μπαταρία. Για μεγιστοποίηση της ζωής, ένας αρνητικός συντελεστής θερμοκρασίας φόρτισης περίπου -2.5 mV/oC ανά στοιχείο χρησιμοποιείται σε θερμοκρασίες σημαντικά διαφορετικές από 25oC.

Η συνιστώμενη τάση φόρτισης σε διάφορες θερμοκρασίες για μία κλειστού τύπου μπαταρία που βρίσκεται σε φόρτιση αναμονής στα 2.35 V ανά στοιχείο στους 25oC. Είναι προφανές από την καμπύλη ότι σε υπερβολικά χαμηλές θερμοκρασίες απαιτείται ένας σημαντικά μεγαλύτερος συντελεστής θερμοκρασίας από -2.5 mV/oC για να επιτευχθεί η πλήρης επαναφόρτιση του στοιχείου. Το διάγραμμα δείχνει επίσης την αντιστάθμιση της τάσης κατά τον κύκλο της μπαταρίας. Η αντιστάθμιση της τάσης διατηρεί το ρεύμα φόρτισης περίπου στην ίδια τιμή που θα είχε στους 25oC όταν η θερμοκρασία της μπαταρίας είναι διαφορετική. Η αντιστάθμιση της τάσης φόρτισης με βάση τη θερμοκρασία αποτρέπει την καταστροφή λόγω θερμότητας (Thermal runaway) των μπαταριών όταν χρησιμοποιούνται σε υψηλές θερμοκρασίες και διασφαλίζει επαρκή φόρτιση αν η θερμοκρασία της μπαταρίας είναι χαμηλή.

Σημειώνεται εδώ ότι, η καταστροφή λόγω θερμότητας είναι μια κατάσταση που συμβαίνει σε μια μπαταρία (κυρίως σε τύπους ρυθμιζόμενους από βαλβίδα) όταν η ενέργεια φόρτισης έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θερμότητας στο εσωτερικό της

μπαταρίας, που είναι περισσότερη από τη θερμότητα που διαχέεται, προκαλώντας έτσι μια ανεξέλεγκτη αύξηση στη θερμοκρασία της μπαταρίας. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκαλέσει ξήρανση του στοιχείου, μείωση της ζωής της μπαταρίας και/ή τήξη της μπαταρίας. Σε φόρτιση συντήρησης ίσως είναι απαραίτητο να αυξάνεται ο ρυθμός φόρτισης σε υψηλές θερμοκρασίες για να διατηρηθεί η κατάλληλη σταθερή τάση. Μια μπαταρία σε trickle φόρτιση με ρυθμό 0.001C στους 25oC, η σταθερή τάση θα ήταν 2.34 V. Ωστόσο, με τον ίδιο ρυθμό αλλά σε θερμοκρασία 65oC η τάση θα ήταν περίπου 2.12 V, τιμή η οποία είναι κάτω από την τάση ανοικτού κυκλώματος του στοιχείου. Στους 65oC το ρεύμα της trickle φόρτισης θα έπρεπε να αυξηθεί περίπου στο 0.01C έτσι ώστε να διατηρείται η κατάλληλη σταθερή τάση.

### 10.2.8 Φόρτιση σταθερού ρεύματος

Το σταθερό ρεύμα είναι άλλη μια αποδοτική μέθοδος φόρτισης των VRLA μπαταριών. Η φόρτιση με σταθερό ρεύμα επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μιας μη μεταβλητής πηγής σταθερού ρεύματος. Αυτή η μέθοδος φόρτισης είναι ιδιαίτερα αποδοτική όταν πολλά στοιχεία φορτίζονται σε σειρά, αφού τείνει να εξαφανίσει οποιαδήποτε ανισορροπία φορτίου στη μπαταρία. Η φόρτιση με σταθερό ρεύμα φορτίζει εξίσου όλα τα στοιχεία επειδή δεν εξαρτάται από την τάση φόρτισης κάθε στοιχείου στη μπαταρία. Επίσης η μπαταρίας σε σχέση με το ποσοστό της χωρητικότητας από προηγούμενες εκφορτίσεις που έχει επιστραφεί σε διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης με σταθερό ρεύμα.

Οι καμπύλες σε διαφορετικούς ρυθμούς φόρτισης η τάση αυξάνεται απότομα καθώς προσεγγίζεται η κατάσταση πλήρους φόρτισης. Αυτή η αύξηση στην τάση προκαλείται από τα ηλεκτρόδια που υπερφορτίζονται όταν το περισσότερο μέρος του ενεργού υλικού στα ηλεκτρόδια έχει μετατραπεί από θειικό μόλυβδο σε μόλυβδο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο και σε διοξείδιο του μολύβδου στο θετικό ηλεκτρόδιο. Η αύξηση της τάσης θα συμβεί σε χαμηλότερες στάθμες φόρτισης όταν το στοιχείο φορτίζεται σε υψηλότερους ρυθμούς. Αυτό συμβαίνει επειδή σε υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης με σταθερό ρεύμα, μειώνεται η αποτελεσματικότητα της φόρτισης . Οι καμπύλες της τάσης στο είναι κάπως διαφορετικές από αυτές μιας συμβατικής μπαταρίας μολύβδου οξέος λόγω της επίδρασης του ανασυνδυασμού των αερίων

μέσα στο σύστημα κατά την υπερφόρτιση. Η VRLA μπαταρία έχει τη δυνατότητα να ανασυνδυάζει το οξυγόνο που παράγεται στην υπέρταση για ρυθμούς φόρτισης σταθερού ρεύματος μέχρι  $C/3$ . Σε υψηλότερους ρυθμούς, η αντίδραση ανασυνδυασμού υπερβαίνεται από το ρυθμό παραγωγής αερίων.

Ενώ η φόρτιση σταθερού ρεύματος είναι μια αποδοτική μέθοδος, συνεχής εφαρμογή της σε ρυθμούς πάνω από  $C/500$ , αφού η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, μπορεί να είναι επιβλαβής για τη ζωή της μπαταρίας. Σε βραδινούς ρυθμούς φόρτισης ( $C/10$  με  $C/20$ ), η μεγάλη αύξηση στην τάση στη σχεδόν πλήρως φορτισμένη κατάσταση είναι μια χρήσιμη ένδειξη για τερματισμό της φόρτισης ή μείωση των ρυθμών για ένα φορτιστή σταθερού ρεύματος. Εάν ο ρυθμός μειωθεί στο  $C/500$ , η μπαταρία μπορεί να μείνει συνδεδεμένη συνεχόμενα και να δώσει 8 με 10 χρόνια ζωής στους  $25^{\circ}\text{C}$ .

Η τάσης χρόνου για μια μπαταρία που φορτίζεται με συνεχές ρεύμα σε ρυθμό  $C/15$  στους  $25^{\circ}\text{C}$ . Η μπαταρία αυτή είχε προηγουμένως εκφορτιστεί σε βάθος εκφόρτισης 100% με ρυθμό  $C/5$ . Η καμπύλη δείχνει ότι η μπαταρία δεν είναι πλήρως φορτισμένη τη στιγμή που συμβαίνει η αύξηση της τάσης και πρέπει να δεχτεί επιπλέον φορτίο. Εάν μια μπαταρία πρόκειται να φορτιστεί με σταθερό ρεύμα σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία δωματίου, τότε πρέπει να ενσωματωθεί στο δίκτυο ανίχνευσης τάσης ένα είδος αντιστάθμισης θερμοκρασίας.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, σε υψηλότερες θερμοκρασίες και δεδομένους ρυθμούς φόρτισης, η τάση της μπαταρίας στην υπερφόρτιση μειώνεται. Επομένως, η αύξηση στην τάση κοντά στο πλήρες φορτίο θα είναι κάπως περιορισμένη.

### **10.2.9 Φόρτιση με ρεύμα πλήρωσης**

Παρά το γεγονός ότι οι φορτιστές για το συγκεκριμένο είδος φόρτισης είναι από τους πιο οικονομικούς τύπους φορτιστών, η έλλειψη ρύθμισης τάσης που παρουσιάζουν μπορεί να αποβεί επιζήμια για τον κύκλο ζωής για κάθε τύπο μπαταρίας. Οι VRLA μπαταρίες μπορούν να αντέξουν μεταβολές στην τάση, όμως συνίσταται προσοχή όταν χρησιμοποιούνται φορτιστές για taper charging. Ένας τέτοιος φορτιστής περιλαμβάνει ένα μετασχηματιστή για μείωση της τάσης και έναν ημιανορθωτή ή πλήρη ανορθωτή για μετατροπή από εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα.

Τα χαρακτηριστικά εξόδου είναι τέτοια ώστε καθώς η τάση της μπαταρίας αυξάνει κατά τη φόρτιση, το ρεύμα φόρτισης να μειώνεται. Ο μετασχηματιστής είναι ουσιαστικά ένας μετασχηματιστής σταθερής τάσης, η ρύθμιση της τάσης εξόδου του οποίου εξαρτάται πλήρως από τη ρύθμιση της εναλλασσόμενης τάσης της γραμμής. Λόγω αυτής της μεθόδου ρύθμισης τάσης, οποιαδήποτε αλλαγή στην τάση εισόδου, επηρεάζει άμεσα την έξοδο του φορτιστή. Ανάλογα με τη σχεδίαση του φορτιστή, η αλλαγή στην τάση μπορεί να μην είναι ανάλογη. Για παράδειγμα, μια αλλαγή 10% στην τάση της γραμμής, μπορεί να προκαλέσει μια αλλαγή 13% στην τάση εξόδου.

Όταν σκεφτόμαστε το πλεονέκτημα κόστους της χρήσης ενός ημιανορθωτή αντί για μια συσκευή πλήρους ανόρθωσης σε έναν taper current φορτιστή, πρέπει να λαμβάνουμε υποψηφίον ότι ο ημιανορθωτής παρέχει 50% υψηλότερη αναλογία μέγιστης προς μέσης τάσης από ότι ο πλήρης ανορθωτής. Επομένως, η συνολική ζωή της μπαταρίας για δεδομένη μέση τάση φόρτισης μπορεί να είναι μειωμένη στο φορτιστή με ημιανόρθωση λόγω των υψηλότερων μέγιστων τάσεων.

Ένας κυματισμός συνεχούς ρεύματος (DC ripple), μπορεί να οδηγήσει με τον καιρό σε μειωμένη απόδοση μέσα από την υποβάθμιση του ενεργού υλικού και του πλέγματος. Ένας κυματισμός εναλλασσόμενου ρεύματος (AC ripple), μπορεί να είναι πιο σημαντικός παράγοντας για την πρόωρη αποτυχία της μπαταρίας, ειδικά σε συστήματα αναμονής ή αδιάλειπτης παροχής ισχύος. Η επαναλαμβανόμενη φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας μειώνει τη ζωή της μέσα από την παραγωγή θερμότητας και τη διάβρωση.

Υπάρχουν διάφορες παράμετροι φόρτισης που πρέπει να αναλυθούν. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι ο χρόνος επαναφόρτισης στο 100% της ονομαστικής χωρητικότητας. Αυτή η παράμετρος μπορεί να οριστεί ως ο διαθέσιμος ρυθμός φόρτισης στη μπαταρία όταν το κάθε στοιχείο είναι στα 2.2 και 2.5 V. Η τάση φόρτισης στην οποία περίπου το 50% του φορτίου έχει επανέλθει στη μπαταρία σε φυσιολογικούς ρυθμούς φόρτισης (C/10 με C/20) είναι 2.2 V ανά στοιχείο. Τα 2.5 V ανά στοιχείο παριστάνουν την τάση στην οποία η μπαταρία βρίσκεται σε υπερφόρτιση.

Συνίσταται ο ρυθμός φόρτισης στα 2.5 V να είναι μεταξύ C/50 (μέγιστος) και C/100 (ελάχιστος) για να εξασφαλίζεται η επαναφόρτιση της μπαταρίας σε κανονικούς ρυθμούς και να αποφεύγεται η σοβαρή υπερφόρτιση εάν ο φορτιστής παραμείνει συνδεδεμένος για εκτεταμένες χρονικές περιόδους.

Ένας κυματισμός συνεχούς ρεύματος (DC ripple), μπορεί να οδηγήσει με τον καιρό σε μειωμένη απόδοση μέσα από την υποβάθμιση του ενεργού υλικού και του πλέγματος. Ένας κυματισμός εναλλασσόμενου ρεύματος (AC ripple), μπορεί να είναι πιο σημαντικός παράγοντας για την πρόωρη αποτυχία της μπαταρίας, ειδικά σε συστήματα αναμονής ή αδιάλειπτης παροχής ισχύος. Η επαναλαμβανόμενη φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας μειώνει τη ζωή της μέσα από την παραγωγή θερμότητας και τη διάβρωση.

Υπάρχουν διάφορες παράμετροι φόρτισης που πρέπει να αναλυθούν. Η πιο σημαντική παράμετρος είναι ο χρόνος επαναφόρτισης στο 100% της ονομαστικής χωρητικότητας. Αυτή η παράμετρος μπορεί να οριστεί ως ο διαθέσιμος ρυθμός φόρτισης στη μπαταρία όταν το κάθε στοιχείο είναι στα 2.2 και 2.5 V. Η τάση φόρτισης στην οποία περίπου το 50% του φορτίου έχει επανέλθει στη μπαταρία σε φυσιολογικούς ρυθμούς φόρτισης (C/10 με C/20) είναι 2.2 V ανά στοιχείο. Τα 2.5 V ανά στοιχείο παριστάνουν την τάση στην οποία η μπαταρία βρίσκεται σε υπερφόρτιση. Με δεδομένο το ρυθμό φόρτισης στα 2.2 V, ο χρόνος επαναφόρτισης για έναν φορτιστή taper current φόρτισης ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

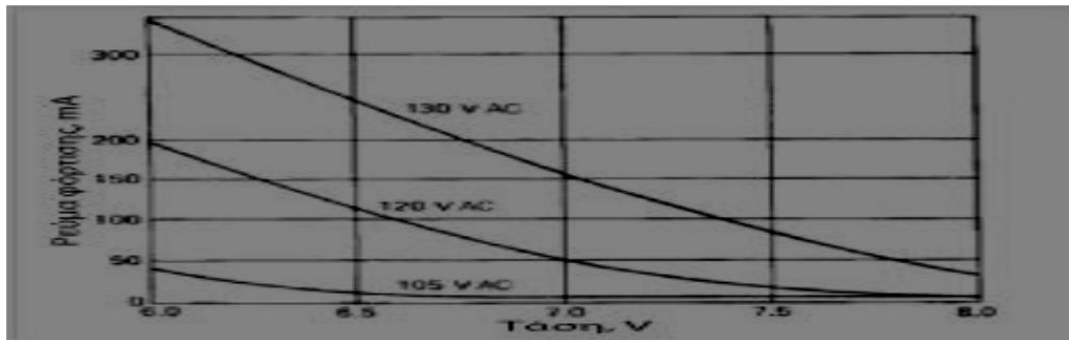
$$\text{Recharge time} = \frac{1.2 \times \text{capacity discharged previously}}{\text{charge rate at 2.2V}}$$

Συνίσταται ο ρυθμός φόρτισης στα 2.5 V να είναι μεταξύ C/50 (μέγιστος) και C/100 (ελάχιστος) για να εξασφαλίζεται η επαναφόρτιση της μπαταρίας σε κανονικούς ρυθμούς και να αποφεύγεται η σοβαρή υπερφόρτιση εάν ο φορτιστής παραμείνει συνδεδεμένος για εκτεταμένες χρονικές περιόδους.

Στο διάγραμμα του σχήματος 8.16 φαίνεται ένα σύνολο καμπυλών τάσης εξόδου – ρεύματος για έναν τυπικό φορτιστή taper current φόρτισης για μπαταρία 2.5 Ah. Οι τρεις καμπύλες δείχνουν την αλλαγή στην έξοδο με μεταβολή στην τάση εισόδου από 105 στα 130 V AC. Ο συγκεκριμένος φορτιστής, σε AC είσοδο 120 V, θα φορτίσει μια μπαταρία τριών στοιχείων (με ονομαστική χωρητικότητα 2.5 Ah) η οποία είχε προηγουμένως εκφορτιστεί σε 100% βάθος εκφόρτισης σε 30 ώρες σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{Recharge time} = \frac{1.2 \times 2.5 \text{Ah}}{0.1 \text{A}} = 30 \text{h}$$





**Σχήμα 8.16:** Χαρακτηριστικά taper – current φορτιστή για μια κυλινδρική VRLA μπαταρία τριών στοιχείων 2.5 Ah.

### 10.3.0 Παράλληλη φόρτιση/φόρτιση σε σειρά

Οι VRLA μπαταρίες μπορούν να φορτιστούν ή να εκφορτιστούν παράλληλα. Όταν περισσότερες από τέσσερις σειρές στοιχείων είναι συνδεδεμένες παράλληλα, συνίσταται η χρήση διόδων τόσο στο δρόμο φόρτισης όσο και στο δρόμο εκφόρτισης στο κύκλωμα. Οι διάοδοι εκφόρτισης αποτρέπουν την εκφόρτιση μιας μπαταρίας με παράλληλη συνδεσμολογία εάν συμβεί βραχυκύκλωμα σε ένα στοιχείο της μπαταρίας. Οι διάοδοι φόρτισης, σε συνδυασμό με την ασφάλεια, αποτρέπουν την μπαταρία στην οποία έχει βραχυκυκλωθεί ένα στοιχείο, από το να προσλάβει όλο το ρεύμα φόρτισης από τον φορτιστή και συνεπώς αποτρέπει τις άλλες μπαταρίες που είναι συνδεδεμένες παράλληλα από το να φορτιστούν πλήρως.

Το μέγεθος της ασφάλειας θα πρέπει να υπολογίζεται διαιρώντας το μέγιστο ρεύμα φόρτισης με τον αριθμό των μπαταριών που είναι συνδεδεμένες παράλληλα και πολλαπλασιάζοντας την τιμή που προκύπτει επί 2. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα το άνοιγμα της ασφάλειας κατά τη φόρτιση σε μια παράλληλη σειρά που έχει ένα βραχυκυκλωμένο στοιχείο.

Όταν σε φόρτιση αναμονής φορτίζονται πολλά στοιχεία σε σειρά, 12 ή περισσότερα για παράδειγμα, είναι ωφέλιμη η χρήση μιας trickle φόρτισης με μέγιστο ρυθμό C/500 παράλληλα με το φορτιστή αναμονής. Αυτή η trickle φόρτιση τείνει να ισορροπήσει όλα τα στοιχεία στη μπαταρία οδηγώντας ένα συνεχόμενο trickle φορτίο ισοδύναμα μέσα από όλα τα στοιχεία.

### 10.3.1 Αποδοτικότητα ρεύματος φόρτισης

Ως αποδοτικότητα ρεύματος φόρτισης ορίζεται ο λόγος του ρεύματος που χρησιμοποιείται για την ηλεκτροχημική μετατροπή του ενεργού υλικού από θειικό μόλυβδο σε μόλυβδο και διοξείδιο του μολύβδου προς το συνολικό ρεύμα με το οποίο τροφοδοτείται το στοιχείο κατά την επαναφόρτιση. Το ρεύμα που δε χρησιμοποιείται για τη φόρτιση καταναλώνεται σε παρασιτικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του στοιχείου όπως είναι η διάβρωση και η παραγωγή αερίων.

Η αποδοτικότητα της φόρτισης είναι υψηλή για μια VRLA μπαταρία. Η εμφανώς υψηλή αναλογία της επιφάνειας των ηλεκτροδίων προς τις αμπερ – ώρες χωρητικότητας επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς και επομένως αποδοτική φόρτιση.

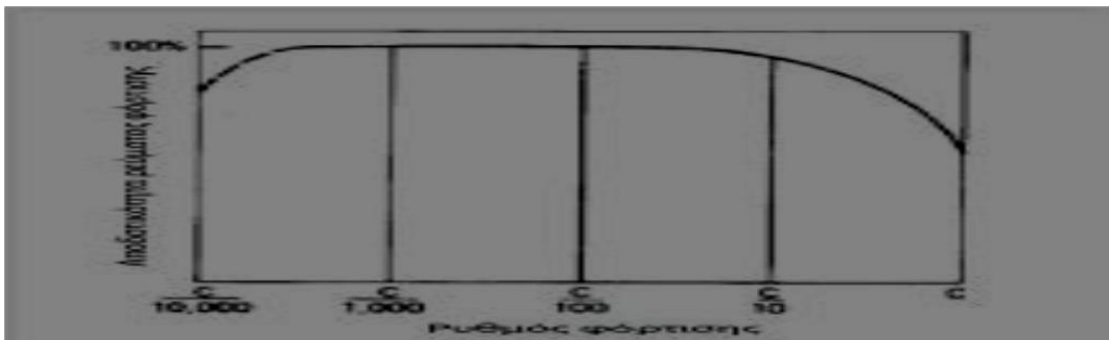
Η αποδοτικότητα ρεύματος φόρτισης είναι άμεση συνάρτηση της στάθμης φόρτισης. Η αποδοτικότητα φόρτισης μιας μπαταρίας είναι υψηλή μέχρι το σημείο που η μπαταρία προσεγγίζει την πλήρη φόρτιση, όπου αρχίζουν οι αντιδράσεις υπερφόρτισης και η αποδοτικότητα φόρτισης μειώνεται. Είναι προφανές ότι μετά το σημείο της πλήρους επαναφόρτισης, η αποδοτικότητα πέφτει στο μηδέν.

Το διάγραμμα του σχήματος 8.17 δείχνει μια καμπύλη της αποδοτικότητας ρεύματος φόρτισης ως προς την τάση σε διάφορες σταθερές τάσεις. Αύξηση της τάσης μειώνει την αποδοτικότητα λόγω της ύπαρξης αυξημένων παρασιτικών ρευμάτων. Η αποδοτικότητα παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη μείωση κάτω από την τάση ανοικτού κυκλώματος, τυπικά 2.15 με 2.18 V, επειδή η τάση φόρτισης δεν είναι αρκετά υψηλή για να υποστηρίξει την αντίδραση της φόρτισης.



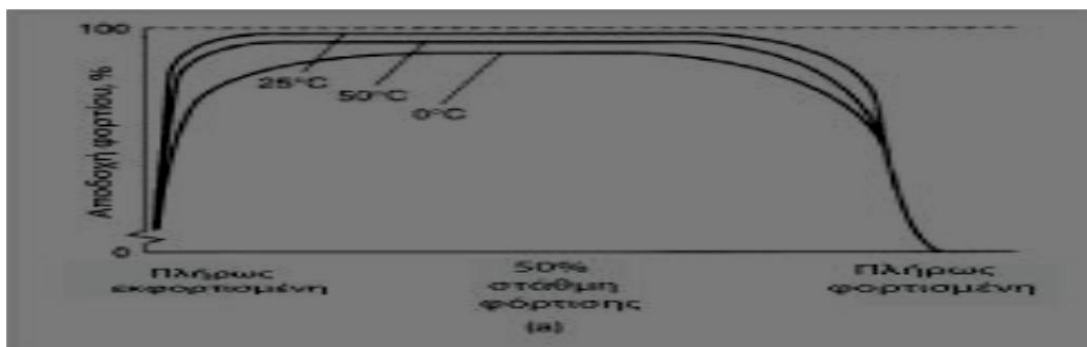
Σχήμα 8.17: Αποδοτικότητα φόρτισης σταθερής τάσης

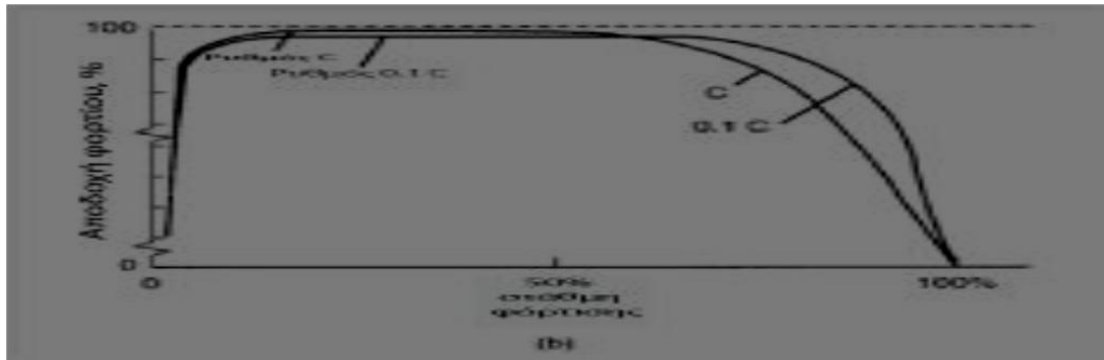
Το διάγραμμα του σχήματος 8.18 είναι μια καμπύλη της αποδοτικότητας ως προς το ρυθμό σε διάφορους ρυθμούς φόρτισης σταθερού ρεύματος. Όπως φαίνεται από την καμπύλη, σε ρυθμούς μέχρι  $C/10$  η αποδοτικότητα πλησιάζει το 100%. Σε υψηλότερους ρυθμούς, παρατηρείται μια μείωση στην αποδοτικότητα επειδή, όσο το στοιχείο πλησιάζει στην πλήρως φορτισμένη κατάσταση, η επιφάνεια των ηλεκτροδίων γίνεται πλήρως φορτισμένη. Αυτό αυξάνει τους ρυθμούς της αντίδρασης φόρτισης και έχει ως αποτέλεσμα αυξημένες τάσεις και αεριοποίηση. Σε χαμηλούς ρυθμούς φόρτισης, η αποδοτικότητα πέφτει επειδή το ρεύμα φόρτισης είναι ισοδύναμο με τα παρασιτικά ρεύματα και η τάση της μπαταρίας προσεγγίζει την τιμή της τάσης ανοικτού κυκλώματος.



Σχήμα 8.18: Αποδοτικότητα φόρτισης σταθερού ρεύματος

Τέλος, το διάγραμμα του σχήματος 8.19 δείχνει την αποδοχή φορτίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης σε διάφορες θερμοκρασίες και ρυθμούς φόρτισης.





**Σχήμα 8.19:** Αποδοχή φορτίου κλειστών μπαταριών μολύβδου οξέος (a) σε διάφορες θερμοκρασίες και (b) σε διάφορους ρυθμούς φόρτισης

## Βιβλιογραφία

- [1] <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82>
- [2] Isidor Buchmann, *Batteries in a Portable World*, Cadex Electronics Inc, 2nd edition 2001
- [3] Antonio Luque, Steven Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons Ltd 2003
- [4] Θωμάς Ζαχαρίας, *Ήπιες Μορφές Ενέργειας II*, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών 2005
- [5] Νικόλαος Α. Βοβός, *Ανάλυση, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 2004
- [6] European Photovoltaic Industry Association (EPIA), *Solar Photovoltaics Competing in the Energy Sector – on the Road to Competitiveness*, EPIA website <http://www.epia.org/publications/epiapublications.html>, 09/2011
- [7] Κ. Καγκαράκης, *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1992
- [8] A. Daoud, A. Midoun, *Fuzzy Control of a Lead Acid Battery Charger*, Journal of Electrical Systems 01/2005
- [9] David Linden, Thomas Reddy, *Handbook of Batteries*, Mc Graw – Hill, 3rd edition 2001
- Systems, IEEE (2006) 1–8.
- [10] Tom Markvart, Luis Castaner, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, Elsevier Ltd 2003
- [11] Maria Teresa Penella – Lopez, Manuel Gasulla – Forner, *Powering Autonomous Sensors: An Integral Approach With Focus on Solar And RF Energy Harvesting*, Springer 2011
- [12] DOE Handbook, *Primer on Lead Acid Storage Batteries*, Department of Energy, United States of America, 09/1995
- [13] H.A. Kiehne, *Battery Technology Handbook*, Marcel Dekker Inc, 2nd edition 2003
- [14] [http://batteryuniversity.com/learn/article/battery\\_definitions](http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions)
- [15] Thomas Crompton, *Battery Reference Book*, Newnes, 3rd edition 2000
- [16] [http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93cadmium\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93cadmium_battery)

- [17] <http://www.renewableenergyfocus.com/view/23890/lithium-batteries-could-enhance-solar-energy/>
- [18] [http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/advancing-li-ion-\\_100006681/501/#axzz2831Uhbds](http://www.pv-magazine.com/archive/articles/beitrag/advancing-li-ion-_100006681/501/#axzz2831Uhbds)
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion\\_battery](http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery)
- [20] Dennis Doerffel, Suleiman Abu Sharkh, *Large Lithium – Ion Batteries – a Review*, EMA Electro Mobil Ausstellung, Germany, 10/2006
- [21] Simon Schwunk, *Battery Systems for Storing Renewable Energy*, Branchen -/und Expertenforum Erneuerbare Energien, Hannover, 04/2011
- [22] Y. Thiaux, L. Schmerber, J. Seigneurbieux, B. Multon, H. Ben Ahmed, *Comparison Between Lead – acid and Lithium – ion Accumulators in Stand Alone Photovoltaic System Using the Gross Energy Requirement Criteria*, Published in 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany 2009
- [23] [http://www.southampton.ac.uk/mediacentre/news/2012/feb/12\\_24.shtml](http://www.southampton.ac.uk/mediacentre/news/2012/feb/12_24.shtml)
- [24] ObservatoryNANO, Briefing No.31 – Supercapacitors, Seventh Framework Programme, observatoryNANO website, [www.observatorynano.eu](http://www.observatorynano.eu), 03/2012
- [25] Electricity Storage – Technology Brief, International Renewable Energy Agency website, [www.irena.org](http://www.irena.org), 04/2012
- [26] Tom Hund, *Capacity Loss in PV Batteries and Recovery Procedures*, Sandia National Labs website, Photovoltaic Systems Applications Dept., <http://photovoltaics.sandia.gov/docs/PDF/caploss.pdf>
- [27] James P. Dunlop, *Batteries and Charge Control in Stand Alone Photovoltaic Systems: Fundamentals and Application*, Prepared for Sandia National Laboratories, Photovoltaic Systems Application Dept., 01/1997
- [28] Joseph R. Woodworth, Michael G. Thomas, John W. Stevens, Steven R. Harrington, James P. Dunlop, M. Ramu Swamy, Leighton Demetrius, *Evaluation of the Batteries and Charge Controlllers in Small Stand Alone Photovoltaic Systems*, Presented at the 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1994
- [29] James P. Dunlop, Brian N. Farhi, *Recommendations for Maximizing Battery Life in Photovoltaic Systems: A Review of Lessons Learned*, Proceeding of Forum 2001 – Solar Energy: The Power to Choose, 04/2001
- [30] F. Mattera, D. Benchetrite, D. Desmetre, J.L. Martin, E. Potteau, *Irreversible Sulphation in Photovoltaic Batteries*, Journal of Power Sources, 2003 173

- [31] P. Baca, P. Krivak, *Causes of the Life Shortening of Lead – acid Batteries in Photovoltaic (PV) Applications*, 7th Advanced Batteries and Accumulators – ABA 2006
- [32] Cesar Ortega – Sanchez, *Individual – cell Monitoring System in Energy Backup Banks*, 26th IEEE Annual International Telecommunications Energy Conference, Chicago USA, 09/2004
- [33] Philip T. Krein, Robert Balog, *Life Extension through Charge Equalization of Lead – acid Batteries*, 24th Annual International Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2002
- [34] Abd El – Shafy A. Nafeh, *An Effective and Safe Charging Algorithm for Lead – acid Batteries in PV Systems*, World Engineering & Applied Sciences Journal 1, 2010
- [35] <http://www.freewebs.com/acselectronics/batterypulser.html>
- [36] [http://en.wikipedia.org/wiki/Lead-acid\\_battery#Sulfation\\_and\\_desulfation](http://en.wikipedia.org/wiki/Lead-acid_battery#Sulfation_and_desulfation)
- [37] Y. Shi, C. Ferone, C. Rao, C.D. Rahn, *Capacity Recovery of a Sulfated Lead – Acid Battery Using Pressure Feedback Charging Control*, to appear in Proceedings of 2012 ASME Dynamic Systems and Control Conference (DSCC), 10/2012
- [8] D. Linden, Handbook of Batteries, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, N.Y, 1995.
- [9] Vrb power systems, Inc., Canada: <http://www.vrbpower.com/>.
- [13] D. Daly, 20mw battery power conditioning system for puerto rico electric Power authority, in: Proceedings of the Tenth Annual Battery Conference on Applications and Advances, January 10–13, 1995, pp. 233–237.
- [14] P. Taylor, Update on the Puerto rico electric power authority’s spinning reserve Battery system, in: Proceedings of the Eleventh Annual Battery Conference on Applications and Advances, January 9–12, 1996, pp. 249–252.
- [15] R.S. Tahllam, S. Eckroad, Multimode battery energy storage for custom power Applications, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2(31) 31 January–4 February, 1999, pp. 1147–1150
- [16] M.-T. Tsai, C.-E. Lin, W.-I. Tsai, C.-L. Huang, Design and implementation of a Demand-side multifunction battery energy storage system, IEEE Transactions on Industrial Electronics 42 (6) (1995) 642–652.
- [17] C. Zhan, M. Barnes, V. Ramachandaramurthy, N. Jenkins, Dynamic voltage Restorer with battery energy storage for voltage dip mitigation, in: Proceedings Of the Eighth International Conference on Power Electronics and Variable

Speed Drives, September 18–19, 2000, pp. 360–365.

[18] S. Chiang, S. Huang, C. Liaw, Three-phase multifunctional battery energy IEE Proceedings-Electric Power Applications 142 (4) (1995) 275–284.

[23] D. Kottick, M. Blau, D. Edelstein, Battery energy storage for frequency regulation

In an island power system, IEEE Transactions on Energy Conversion 8 (3) (1993) 455–459.

[24] R. Sebastian, J. Quesada, Distributed control system for frequency control in a Isolated wind system, Renewable Energy 31 (3) (2006) 285–305.

[25] S.A. Lone, Mufti. M.D., Integrating redox flow battery system with a wind diesel Power system, in: Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES'06, December 12–15, 2006, pp. 1–6.

[26] D. Georgakis, S. Papathanassiou, N. Hatziargyriou, A. Engler, C. Hardt, Operation

Of a prototype micro grid system based on micro-sources quipped with fast acting Power electronics interfaces, Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC'04, 4, 2004, pp. 2521–2526.

[27] S. Kusagawa, E. Masada, J. Baba, M. Ohshima, I. Nagy, Coordinate control of Distributed generations with power converters in amicro grid, in: Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications, September 11–14, 2005, p. 10.Storage System,

[28] Z.Yang, C. Shen, L. Zhang, M.Crow, S.Atcitty, Integration of a statcom and battery

Energy storage,

IEEE Transactions on Power Systems 16 (2) (2001) 254–260.

[30] A. Arulampalam, M. Barnes, N. Jenkins, J. Ekanayake, Power quality and stability

Improvement of a wind farm using statcom supported with hybrid battery

Energy storage, IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution 153 (6) (2006) 701–710.

[31] K. Leung, D. Sutanto,



Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Ενεργειακά Συστήματα

Storage power flow controller using battery storage,

IEEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution 150 (6) (2003) 727–  
735.