



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

«Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας»

Γεώργιος Σταυρακάκης

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟΦΟΙΤΩΝ

«ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Το πρόγραμμα συνδιοργανώνεται από:

Το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Το Τμήμα Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
Πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Η ΠΡΑΞΗ ΥΛΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ (ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ – ΕΚΤ) ΚΑΙ ΑΠΟ ΕΘΝΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ ΕΣΠΑ 2007-2013

Στοιχεία επικοινωνίας

Εισηγητής: Γεώργιος Σταυρακάκης

Εργαστήριο

Ίδρυμα: Πολυτεχνείο Κρήτης

Τηλ: 2821037205

Fax:

Email: gstavr@electronics.tuc.gr

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Κατηγοριοποίηση διατάξεων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	2
1.1 Η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση.....	2
1.2 Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης	4
Κεφάλαιο 2. Μπαταρίες	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Βασικά μεγέθη μπαταριών.....	8
2.3 Μπαταρίες μολύβδου – οξέος	9
2.4 Μπαταρίες νικελίου–καδμίου.....	15
2.5 Μπαταρίες λιθίου–ιόντος	16
Κεφάλαιο 3. Υπόλοιπες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	17
3.1 Σφόνδυλοι (Flywheels)	17
3.2 Υπερπυκνωτές	18
3.3 Υπεραγώγιμη μαγνητική ενεργειακή αποθήκευση	20
3.4 Συστήματα αντλησιοταμίευσης	21
3.5 Συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα.....	23
3.6 Θερμική Αποθήκευση.....	26
3.7 Αποθήκευση Υδρογόνου	26

Κεφάλαιο 1. Κατηγοριοποίηση διατάξεων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

1.1 Η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν τη μοναδική μακροπρόθεσμη απάντηση στην πορεία προς μια βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας. Η χώρα μας είναι ιδιαίτερα ευνοημένη σε αυτό το πεδίο, λόγω της παρουσίας σε μεγάλο βαθμό ανανεώσιμων πηγών (άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία) σε όλη την Επικράτεια και ιδιαίτερα στα νησιά της. Ωστόσο, η ενέργεια που παράγεται από τις διατάξεις των ΑΠΕ, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πλαίσια και οι ανεμογεννήτριες, κυμαίνεται σημαντικά σε ημερήσια, ωριαία και εποχιακή βάση λόγω της μεταβολής στη διαθεσιμότητα του ήλιου, του ανέμου και των άλλων ανανεώσιμων πηγών. Κατά συνέπεια, οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας έχουν το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής (προσφοράς), η οποία δεν επιδέχεται ανθρώπινο έλεγχο, με την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας. Η αναντιστοιχία αυτή σημαίνει ότι η ενέργεια μερικές φορές δεν είναι διαθέσιμη όταν απαιτείται, ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας. Δημιουργείται, επομένως, η ανάγκη τη ενσωμάτωσης της ενεργειακής αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ΑΠΕ, είτε στις αυτόνομες είτε στις διασυνδεδεμένες στο δίκτυο εγκαταστάσεις. Η ανάγκη της αποθήκευσης υπήρχε και παλαιότερα, επειδή οι θερμικές μονάδες δεν είναι ευέλικτες και κατά περιόδους (τη νύχτα) η ενέργεια που παράγουν είναι μεγαλύτερη της ζήτησης. Εντούτοις, η ανάγκη αυτή θα μεγαλώσει στο μέλλον σημαντικά, λόγω της μεγαλύτερης συμμετοχής των ΑΠΕ.

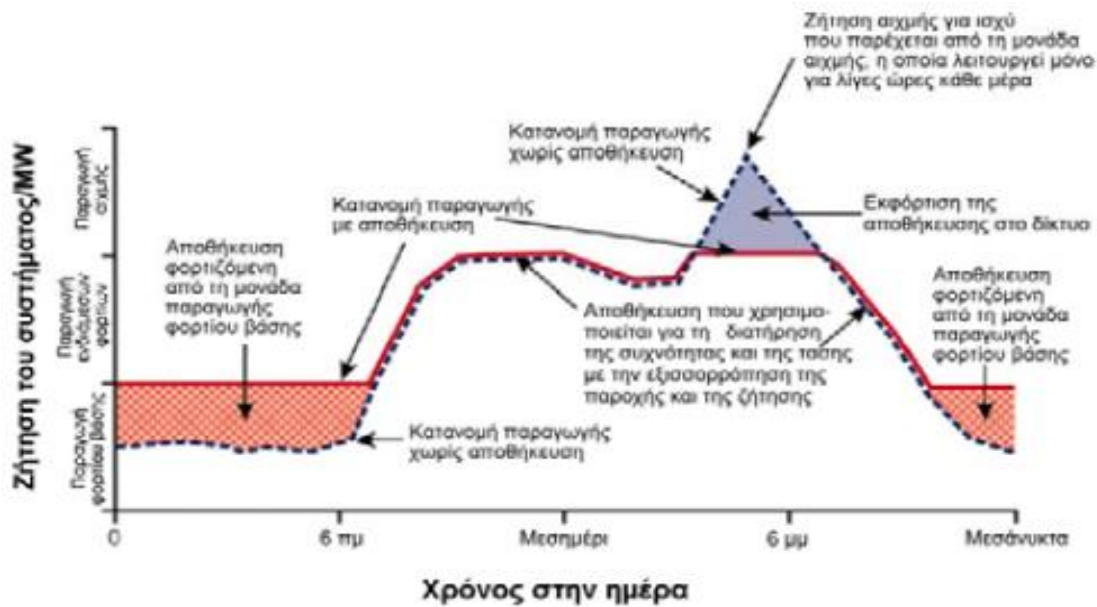
Στα αυτόνομα συστήματα, όπως είναι αυτά πολλών ελληνικών νησιών, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο ελπιδοφόρος ΑΠΕ για την ηλεκτροπαραγωγή. Η παραγόμενη όμως ενέργεια από τις αιολικές μηχανές και τα Φ/Β εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις, δεδομένου ότι βασίζεται σε μη προβλέψιμα μετεωρολογικά δεδομένα (π.χ., ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία). Επομένως, σε τέτοια συστήματα η μονάδα αποθήκευσης είναι σημαντική για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρησιμοποίησή της όταν υφίσταται έλλειμμα από ΑΠΕ (π.χ., σε περίπτωση άπνοιας, ή κατά τη διάρκεια της νύχτας). Μάλιστα, για την αύξηση της απόδοσης τέτοιων συστημάτων, η μονάδα αποθήκευσης συνδέεται με τα λεγόμενα υβριδικά συστήματα, δηλαδή συστήματα τα οποία διαχειρίζονται περισσότερες της μίας μορφής ενέργεια.

Στα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα, η ανάγκη για ενεργειακή αποθήκευση ανακύπτει από την ανάγκη κάλυψης των αιχμών ισχύος. Σε τέτοια συστήματα, η μονάδα αποθήκευσης προσθέτει αξία στις διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές, διευκολύνοντας τον καλύτερο συσχετισμό της τροφοδοσίας με τη ζήτηση.

Τα σημαντικότερα οφέλη που προκύπτουν από την ενεργειακή αποθήκευση είναι τα ακόλουθα:

- Σε συνδυασμό με την ανανεώσιμη πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να αυξήσει την αξία του ηλεκτρισμού που παράγεται από τα Φ/Β και τα αιολικά συστήματα, καθιστώντας ικανή την τροφοδοσία να συμπίπτει με την περίοδο της μέγιστης ζήτησης της κατανάλωσης (Σχήμα 1.1). Παράλληλα, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διευκολύνει την ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα των διακοπτόμενων ΑΠΕ, όπως τα αιολικά και τα ηλιακά συστήματα, στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η εφαρμογή των διατάξεων των ανανεώσιμων πηγών παράλληλα με συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης, παρέχει στις

ανανεώσιμες πηγές ευελιξία εγκατάστασης με ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.



Σχήμα 1.1: Αρχή ενεργειακής αποθήκευσης

- Η ενεργειακή αποθήκευση διαδραματίζει επίσης έναν ευέλικτο και πολυπαραγοντικό ρόλο στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού, όσον αφορά στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων. Ως παραγωγική πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση στις λειτουργικές δαπάνες ή την επένδυση κεφαλαίων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η στρεφόμενη εφεδρεία για την προσωρινή υποστήριξη της παραγωγής, η ρύθμιση της συχνότητας για τις αυτόνομες μονάδες, η αναβολή εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής. Ακόμα, τα βάση στρατηγικής εγκατεστημένα συστήματα αποθήκευσης μπορεί να αυξήσουν τη χρησιμοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού μεταφοράς και διανομής (M&Δ), μετατοπίζοντας ή εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για δαπανηρές προσθήκες M&Δ.
- Η αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές μεταφοράς που είναι κοντά στη μέγιστη ονομαστική τιμή, με τη μείωση του φορτίου αιχμής του υποσταθμού. Μεταξύ των ειδικών οφελών για τη μεταφορά και διανομή είναι η ευστάθεια των γραμμών μεταφοράς για σύγχρονη λειτουργία ώστε να αποτραπεί η καθίζηση του συστήματος, η ρύθμιση της τάσης ώστε να μην ξεφεύγει από το 5% της καθορισμένης τιμής, και η αναβολή της κατασκευής ή αναβάθμισης των γραμμών μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστών, συστοιχιών πυκνωτών και υποσταθμών. Καθώς εξελίσσεται η αναδόμηση του συστήματος, μπορούν να ανακύψουν ευκαιρίες για τους χειριστές των ανεξάρτητων συστημάτων προκειμένου να εφαρμόσουν την αποθήκευση για να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση των περιφερειακών φορτίων.
- Η ενεργειακή αποθήκευση μπορεί να εξυπηρετήσει τους πελάτες ως μια επιλογή ελεγχόμενης διαχείρισης από μέρους της ζήτησης, που επίσης μπορεί να παράσχει ανταποδοτικές υπηρεσίες, περιλαμβανομένων της ποιότητας ισχύος σε βυθίσεις ή κυματισμούς που διαρκούν λιγότερο από πέντε δευτερόλεπτα, της αδιάλειπτης τροφοδοσίας με ηλεκτρικό ρεύμα σε διακοπές λειτουργίας που διαρκούν για περίπου δέκα

λεπτά, και τη μείωση της ζήτησης αιχμής ώστε να μειωθούν οι λογαριασμοί του ηλεκτρισμού.

1.2 Διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης

Το ενδιαφέρον για την ενεργειακή αποθήκευση εστιάζεται στην αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της εύκολης μεταφοράς της σε μεγάλες αποστάσεις. Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά. Επειδή, όμως, δεν είναι εφικτή (οικονομικά) η απευθείας αποθήκευσή της, απαιτείται να μετατραπεί πρώτα σε άλλη μορφή και όταν χρειαστεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική. Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές ενεργειακής αποθήκευσης, βασιζόμενες σε σχεδόν όλες τις μορφές ενέργειας. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στις ακόλουθες μορφές:

- Σε χημική μορφή (μπαταρίες)
- Σε μηχανική μορφή υπό την μορφή κινητικής ενέργειας σε σφόνδυλο
- Υπό μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς (υπερπυκνωτές)
- Υπό μορφή μαγνητικού πεδίου (υπεραγωγίμο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης)
- Υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα (συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα).
- Σε υδραυλική μορφή (συστήματα αντλησιοταμίευσης)
- Υπό μορφή υδρογόνου (κυψέλες καυσίμου)
- Σε θερμότητα

Οι διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης είναι προφανώς διαφορετικών τύπων, αφού απαντούν σε συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, τα οποία ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τις εφαρμογές και τις ανάγκες. Επομένως, μια συγκριτική μελέτη των τεχνολογιών αυτών καθίσταται δύσκολη, δεδομένου ότι, μεταξύ των άλλων, τα επίπεδα ανάπτυξής τους διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και την εφαρμογή τους:

1. *Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας*, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής (όταν δηλαδή η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης) και έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα για μικρά χρονικά διαστήματα
2. *Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας*, οι οποίες είναι κυρίως μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις και έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους

Αναλυτικότερα, οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης χρησιμοποιούνται σε μικρής κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Οι διατάξεις αυτές εφαρμόζονται για να βελτιώσουν την ποιότητα ισχύος στα ηλεκτρικά συστήματα και συγκεκριμένα για να διατηρήσουν σταθερή την τάση κατά την ενεργειακή συνεισφορά, σε περιπτώσεις βυθίσεων ή κυματισμών που διαρκούν για λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά. Στην κατηγορία των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας εντάσσονται οι σφόνδυλοι (flywheels), οι

υπερπυκνωτές (supercapacitors) και τα υπεραγωγίμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES).

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας

Αποθηκευτική διάταξη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμ. Ισχύος	Εφαρμ. Ενέργειας
Αντλησιοταμίευση (rumped storage)	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία		
CAES	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία και αέριο καύσιμο		
Μπαταρίες ροής (flow): PSB, VRBr, ZnBr	Υψηλή χωρητικότητα, ανεξάρτητη εκτίμηση ισχύος - ενέργειας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας	/	
Μετάλλου - αέρος	Πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας	Δύσκολη η ηλεκτρική φόρτιση		
NaS	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή αποτελεσματικότητα	Κόστος παραγωγής, μέτρα ασφαλείας (λόγω σχεδιασμού)		
Li – ion	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή αποτελεσματικότητα	Υψηλό κόστος παραγωγής, απαιτεί ειδικό κύκλωμα φόρτισης		–
Ni – Cd	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, αποτελεσματικότητα			/
Άλλες ενισχυμένες μπαταρίες	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος	Υψηλό κόστος παραγωγής		–
Μολύβδου – οξέος	Χαμηλό αρχικό κόστος	Περιορισμένος κύκλος ζωής σε βαθιά εκφόρτιση		–
Στρεφόμενες μάζες (flywheels)	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας		–
SMES, DSMES – Υπεραγωγίμα Πηνία	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό κόστος παραγωγής		
E.C Capacitors	Μεγάλος κύκλος ζωής, υψηλή αποτελεσματικότητα	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας		/

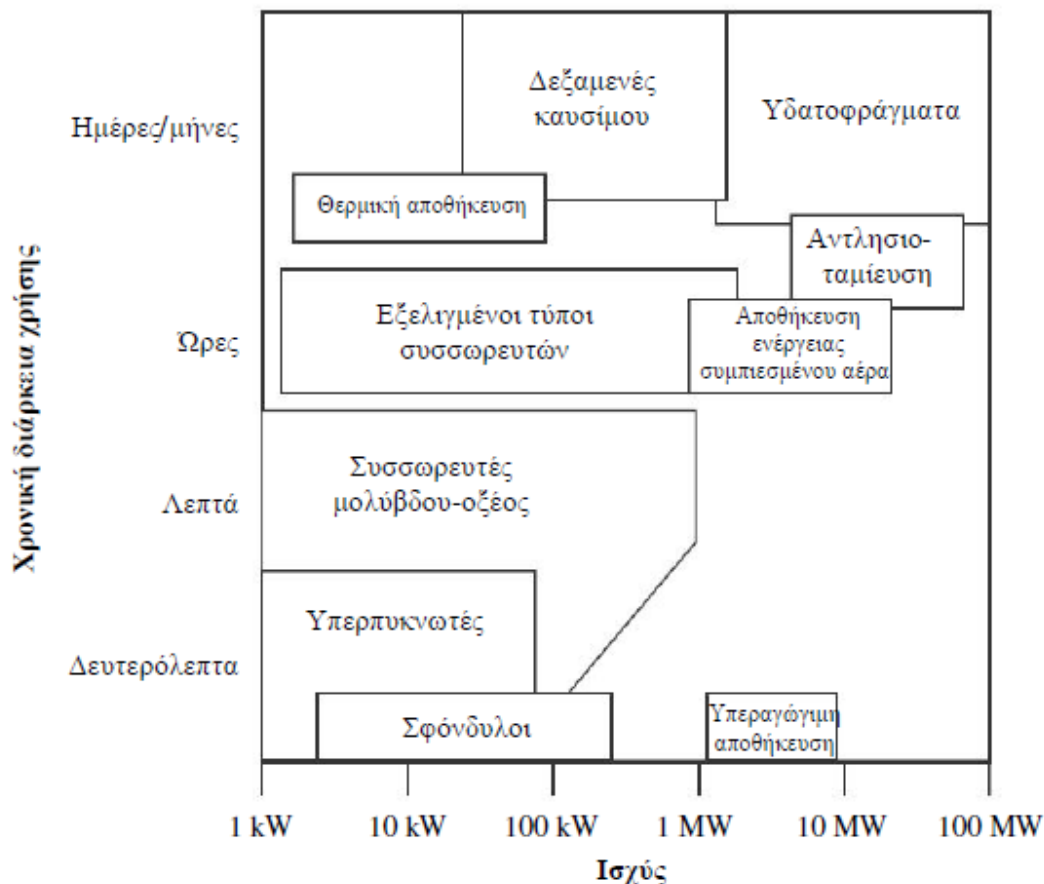
Επεξηγήσεις:

| : πλήρως κατάλληλο και λογικό
 / : λογικό για αυτή την εφαρμογή
 _ : εφικτό αλλά όχι αρκετά πρακτικό ή οικονομικό
 κανένα σύμβολο: μη εφικτό ή μη οικονομικό

Από την άλλη μεριά, οι διατάξεις μακροπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης χρησιμοποιούνται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίων, καθώς και για αποθέματα αιολικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια ωρών ή ημερών, και να

συντελούν ειδικότερα στη διαχείριση της ενέργειας, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο. Στην κατηγορία των διατάξεων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας ανήκουν οι μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (compressed air energy storage, CAES) και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου (fuel cells – hydrogen energy storage).

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται οι βασικές εφαρμογές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το τυπικό τους εύρος ισχύος και χρονικής διάρκειας χρήσης. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των κυριότερων αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, οι μπαταρίες θα εξεταστούν ξεχωριστά από τις υπόλοιπες διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας, καθώς είναι η πιο διαδεδομένη αποθηκευτική τεχνολογία που συνδυάζεται με Φ/Β συστήματα.



Σχήμα 1.2: Εφαρμογές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Κεφάλαιο 2. Μπαταρίες

2.1 Εισαγωγή

Μια μπαταρία (ή αλλιώς συσσωρευτής) είναι μια χημική πηγή ρεύματος, ικανή να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια, αφού τη μετατρέψει σε χημική, και όταν χρειαστεί να την αποδώσει σε εξωτερικό κύκλωμα. Σχηματίζεται από ένα ή περισσότερα *ηλεκτρικά στοιχεία* συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο, ανάλογα με την επιθυμητή παραγόμενη τάση. Το ηλεκτρικό στοιχείο αποτελείται από δύο πλάκες, φτιαγμένες από διαφορετικά μέταλλα και βυθισμένες σε ένα δοχείο με υγρό. Οι πλάκες, οι οποίες πρέπει να είναι αγωγίμες, ονομάζονται ηλεκτρόδια, ενώ το υγρό είναι και αυτό αγωγίμο και καλείται ηλεκτρολύτης. Τα ηλεκτρόδια αντιδρούν χημικά με τον ηλεκτρολύτη και η αντίδραση περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος/φορτίου. Δηλαδή, η σύνδεση των ηλεκτροδίων σε εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα προκαλεί σε αυτό διέλευση ρεύματος (εκφόρτιση της ηλεκτρικής μπαταρίας). Η εκφορτισμένη ηλεκτρική μπαταρία φορτίζεται όταν περάσει από αυτήν συνεχές ρεύμα (DC) από άλλη πηγή, ενώ ταυτόχρονα αντίστροφες χημικές διεργασίες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική.

Το κάθε στοιχείο αποτελείται από τα παρακάτω συστατικά:

- Το *ηλεκτρόδιο ανόδου* ή αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο παραχωρεί ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης
- Το *ηλεκτρόδιο καθόδου* ή θετικό ηλεκτρόδιο, το οποίο δέχεται ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα
- Τον *ηλεκτρολύτη* (συνήθως υγρός και σε ορισμένες περιπτώσεις στερεός), ο οποίος παρέχει το μέσο για τη μεταφορά του φορτίου, με τη μορφή ιόντων, μέσα στο στοιχείο ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο

Πίνακας 2.1: Βασικά χαρακτηριστικά των πιο διαδεδομένων τύπων μπαταριών

Τύπος μπαταρίας	Ειδική ενέργεια (Wh/kg)	Πυκνότητα ενέργειας (Wh/L)	Ειδική ισχύς (W/kg)	Ονομαστική τάση κυψέλης (V)
Μολύβδου-οξέος	30	75	250	2.0
Νικελίου-καδμίου	50	80	150	1.2
Νικελίου-μεταλλικού υδριδίου	65	150	200	1.2
Λιθίου-ιόντος	90	150	300	3.6
Ψευδαργύρου-αέρα	230	270	105	1.65

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι μπαταριών, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, περιγράφονται στον Πίνακα 2.1. Από αυτούς, μόνο οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος και σε μικρό βαθμό οι νικελίου-καδμίου χρησιμοποιούνται στα Φ/Β συστήματα μέχρι σήμερα. Οι μπαταρίες νικελίου-μεταλλικού υδριδίου και οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου είναι σχετικά σύγχρονες εξελίξεις και οι κύριες εφαρμογές τους μέχρι σήμερα είναι σε υψηλής αξίας ηλεκτρονικά αγαθά όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Οι τύποι αυτοί δεν είναι όμως ευρέως διαθέσιμοι σε μεγάλες χωρητικότητες που απαιτούνται σε μεγάλα Φ/Β συστήματα. Επιπλέον, οι μπαταρίες αυτές είναι αρκετά πιο ακριβές σήμερα ανά αποθηκευμένη kWh με σχέση με τις

μπαταρίες μολύβδου-οξέος και συχνά χρειάζονται μια κάπως περίπλοκη προστασία για το κύκλωμα φόρτισής τους, κάτι το οποίο δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί με τη μεταβλητή φύση των ρευμάτων φόρτισης των Φ/Β. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, η πρόοδος που έχει σημειωθεί στις μπαταρίες λιθίου έχει ανοίξει το δρόμο για τη χρησιμοποίησή τους σε Φ/Β συστήματα. Υπάρχουν και άλλοι τύποι επαναφορτιζόμενων μπαταριών υπό ανάπτυξη για μελλοντικές εφαρμογές μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα ή ανύψωση φορτίου. Δεν είναι εμπορικά διαθέσιμοι ακόμα, εκτός από κάποιες περιορισμένες περιπτώσεις.

Υπάρχουν τρεις κύριες λειτουργίες που επιτελεί μια μπαταρία σε ένα Φ/Β σύστημα:

- Δρα σαν ένα βοηθητικό ποσό ενέργειας για να εξαλείψει την αναντιστοιχία μεταξύ της διαθέσιμης από τη Φ/Β συστοιχία ισχύος και της απαιτούμενης από το φορτίο ισχύος. Η ισχύς που παράγει ένα Φ/Β πλαίσιο ή συστοιχία κάθε στιγμή ποικίλει ανάλογα με την ποσότητα ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτήν, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι ίση με μηδέν. Στα περισσότερα ηλεκτρικά φορτία χρειάζεται να αποδίδεται ένα σταθερό ποσό ισχύος. Η μπαταρία παρέχει ισχύ όταν η Φ/Β συστοιχία δεν παράγει τίποτα κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν παράγει λιγότερη ισχύ από όση απαιτεί το ηλεκτρικό φορτίο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης, η μπαταρία, απορροφά την περίσσεια ισχύος από την Φ/Β συστοιχία όταν αυτή παράγει περισσότερη ισχύ από ότι το φορτίο απαιτεί.
- Η μπαταρία παρέχει ένα αποθεματικό ενέργειας (αυτονομία του συστήματος) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια μερικών ημερών πολύ συνεφιασμένου καιρού, ή σε κάποια περίπτωση ανάγκης εάν παρουσιαστεί βλάβη σε κάποιο τμήμα του Φ/Β συστήματος.
- Η μπαταρία αποτρέπει μεγάλες, πιθανόν καταστροφικές, διακυμάνσεις τάσης. Μια Φ/Β 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, για παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0V και περίπου 20V είναι πιθανό να προκύψει από τη Φ/Β συστοιχία. Πολλά φορτία δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα τόσο μεγάλο εύρος τάσεων. Η τοποθέτηση μιας μπαταρίας μεταξύ της Φ/Β 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 9.5 V σε βαθιά εκφόρτιση μέχρι περίπου 16V υπό συνθήκες ακραίας φόρτισης.

2.2 Βασικά μεγέθη μπαταριών

Οι τέσσερις πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση μιας μπαταρίας είναι:

1. η χωρητικότητα
2. η απόδοση
3. ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης
4. η διάρκεια ζωής

Δευτερεύοντες παράγοντες που επηρεάζουν την επίδοση μιας μπαταρίας είναι η θερμοκρασία, η αυτοεκφόρτιση και η γήρανση. Στη συνέχεια θα περιγραφούν συνοπτικά τα βασικότερα μεγέθη σε μια μπαταρία.

Φόρτιση/εκφόρτιση: Είναι οι διαδικασίες της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική (φόρτιση) ή της χημικής σε ηλεκτρική (εκφόρτιση) κατά το πέρασμα του (συνεχούς) ρεύματος από την μπαταρία

Χωρητικότητα: Συμβολίζεται με C και αντιπροσωπεύει την ποσότητα φορτίου (σε Ah) που μια μπαταρία μπορεί να παρέχει κατά τη διάρκεια μιας εκφόρτισης

Ονομαστική χωρητικότητα: Είναι η ποσότητα φορτίου που μπορεί να αντληθεί θεωρητικά από μια μπαταρία σε δεδομένο χρονικό διάστημα (συνήθως 10h (C_{10}) ή 20h (C_{20})) υπό θερμοκρασία 20°C

Βάθος εκφόρτισης: Ο λόγος του αντλούμενου φορτίου μιας μπαταρίας προς την ονομαστική χωρητικότητά της (εκφράζεται ως ποσοστό)

Μέγιστο βάθος εκφόρτισης: Η μέγιστη τιμή βάθους εκφόρτισης που μπορεί να λειτουργήσει ένας συσσωρευτής χωρίς να προκληθεί βλάβη σ' αυτόν

Στάθμη φόρτισης (SOC): Η χωρητικότητα που μπορεί να εκφορτιστεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή (εκφράζεται ως ποσοστό)

Ενεργός αξιοποιήσιμη χωρητικότητα: Ορίζεται ως το γινόμενο της ονομαστικής χωρητικότητας και του μέγιστου βάθους εκφόρτισης

Ρυθμός εκφόρτισης/φόρτισης: Αντιπροσωπεύει το ρεύμα στο οποίο φορτίζονται/εκφορτίζονται οι μπαταρίες για συγκεκριμένο αριθμό ωρών (π.χ., $C/5$ για 5 ώρες, $C/20$ για 20 ώρες, κλπ)

Απόδοση: Ορίζεται ως ο λόγος των Ah που εκφορτίζονται από τη μπαταρία προς τις Ah που φορτίζονται στην μπαταρία μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο

Κύκλος: Η επαναλαμβανόμενη διαδικασία εκφόρτισης και φόρτισης που συμβαίνει σε μια μπαταρία εν λειτουργία

Κύκλος ζωής: Είναι ένα μέτρο του πόσους κύκλους μια μπαταρία μπορεί να δώσει κατά τη διάρκεια της χρήσιμης ζωής της, και αντιστοιχεί συνήθως στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης για ένα συγκεκριμένο βάθος που η μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει πριν η διαθέσιμη χωρητικότητά της μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό (συνήθως 80%) της αρχικής χωρητικότητας

Αυτοεκφόρτιση: Η απώλεια φορτίου σε μια μπαταρία αν αυτή αφεθεί σε κατάσταση ανοικτού κυκλώματος για υπολογίσιμο χρονικό διάστημα (τυπικές τιμές: 1-4% ανά μήνα σε θερμοκρασία 20-25°C)

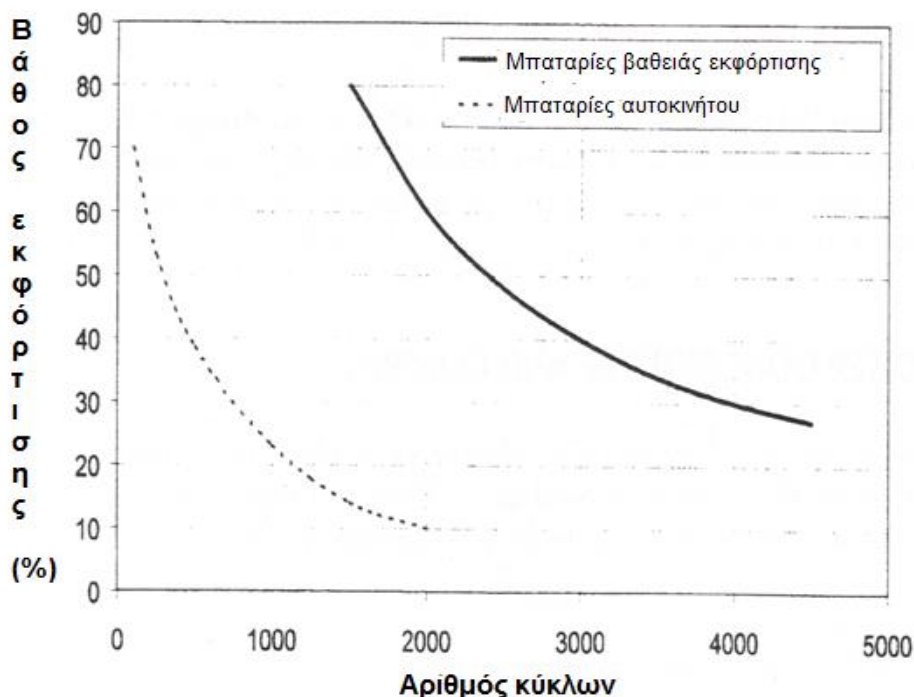
2.3 Μπαταρίες μολύβδου – οξέος

Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος (lead-acid), που εφευρέθηκαν το 1859, αποτελούν την παλαιότερη και πιο διαδεδομένη μορφή επαναφορτιζόμενων ηλεκτροχημικών συσκευών. Έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα και αποτελούν πλέον ώριμη τεχνολογία. Η βασικότερη αιτία της τόσο ευρείας διάδοσης των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι το μικρό κόστος τους συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες μπαταριών (100-300 €/kWh), σε συνδυασμό με την εμπορική διαθεσιμότητα, αλλά και η πολυετής συσσωρευμένη λειτουργική εμπειρία. Επιπρόσθετα, οι μπαταρίες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλούς βαθμούς απόδοσης της τάξης του 80-85%, καθώς και από υψηλή αξιοπιστία. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ο ρυθμός αστοχίας των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι μικρότερος από 0.25%. Οι εφαρμογές των μπαταριών μολύβδου-οξέος κυμαίνονται από τις μπαταρίες αυτοκινήτων, έως τις τεράστιες συστοιχίες μπαταριών που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας (Σχήμα 2.1).

Οι μπαταρίες αυτοκινήτου έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να εκτελούν το πιο σημαντικό τους στόχο, που είναι η εκκίνηση της μηχανής του αυτοκινήτου. Για να το πετύχουν, παρέχουν για σύντομο χρονικό διάστημα πολύ μεγάλα ρεύματα (400-600A). Μόλις εκκινήσει η μηχανή, ο εναλλάκτης τους γρήγορα ξαναφορτίζει τη μπαταρία, το οποίο σημαίνει ότι κάτω από κανονικές συνθήκες η μπαταρία είναι σχεδόν πάντα κοντά στην πλήρη φόρτιση. Οι μπαταρίες αυτοκινήτου δεν έχουν σχεδιαστεί να αντέχουν βαθιές εκφορτίσεις, και στην πραγματικότητα θα αποτύχουν μόλις έπειτα από μόνο μερικούς πλήρεις κύκλους εκφόρτισης. Αυτό τις κάνει ακατάλληλες για τα περισσότερα Φ/Β συστήματα, στα οποία κατά κανόνα συμβαίνουν αργές, αλλά βαθιές, εκφορτίσεις. Αν θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν, όπως μερικές φορές συμβαίνει σε αναπτυσσόμενες χώρες όπου ίσως να είναι οι μόνες διαθέσιμες μπαταρίες, ημερήσιες εκφορτίσεις λιγότερο από 20% μπορούν να οδηγήσουν σε περίπου 1000 κύκλους, ή ισοδύναμα σε δύο με τρία χρόνια λειτουργίας (διακεκομμένη γραμμή Σχήματος 2.2).



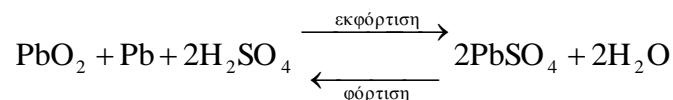
Σχήμα 2.1: Συστοιχία μπαταριών μολύβδου – οξέος μεγάλης κλίμακας



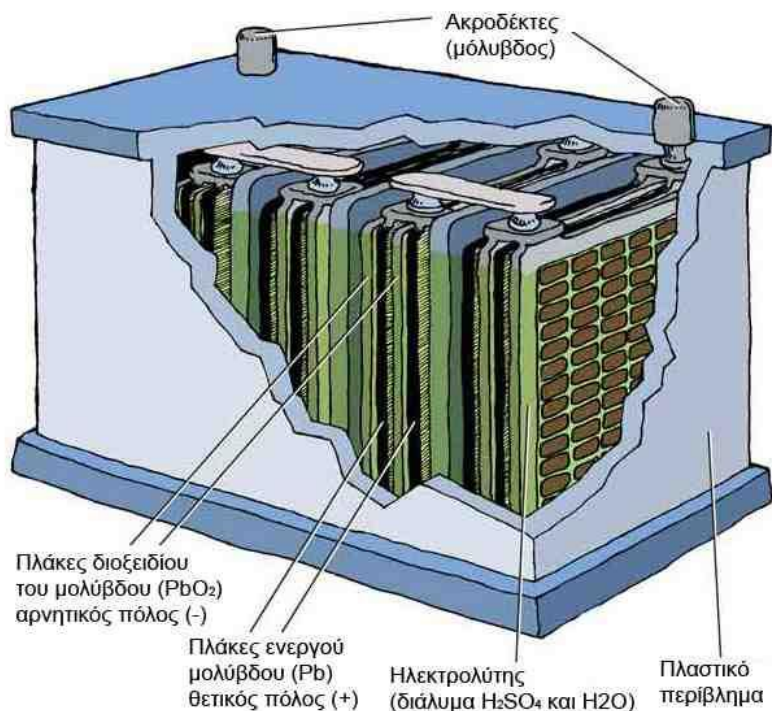
Σχήμα 2.2: Αριθμός κύκλων λειτουργίας ως συνάρτηση του βάθους εκφόρτισης

Σε σχέση με τις μπαταρίες αυτοκινήτου, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος βαθιάς εκφόρτισης έχουν πιο παχιές πλάκες, που τοποθετούνται σε μεγαλύτερα περιβλήματα που έχουν μεγαλύτερο χώρο πάνω και κάτω από τις πλάκες, οπότε οι μπαταρίες αυτές είναι μεγάλες και βαριές. Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης είναι σχεδιασμένες να εκφορτίζονται επανειλημμένως κατά 80% της ικανότητάς τους χωρίς ζημιά, αν και τέτοιες βαθιές εκφορτίσεις οδηγούν σε μικρότερο αριθμό κύκλων κατά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Το Σχήμα 2.2 (συνεχής γραμμή) δείχνει ότι μία τυπική μπαταρία μολύβδου-οξέως βαθιάς εκφόρτισης μπορεί να κάνει 4500 κύκλους όταν εκφορτίζεται κατά 30% της ονομαστικής της χωρητικότητας, το οποίο μπορεί να δώσει διάρκεια ζωής πάνω από 10 χρόνια. Με ημερήσια εκφόρτιση κατά 80%, αναμένονται περίπου 1600 κύκλοι, οπότε η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι περίπου 5 χρόνια. Ενώ το Σχήμα 2.2 παρέχει μία χονδρική ένδειξη της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, άλλοι παράγοντες, όπως η ποιότητα της μπαταρίας, η συχνότητα συντήρησης, και οι ρυθμοί φόρτισης, είναι επίσης σημαντικοί.

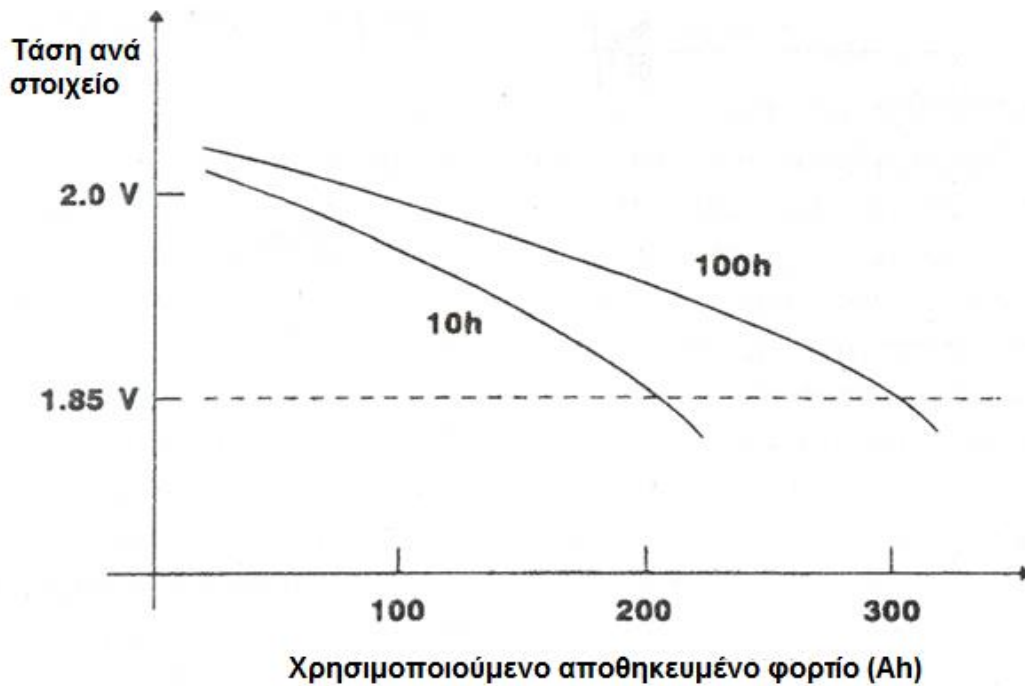
Στην κατάσταση πλήρους φόρτισης αποτελούνται από ένα ηλεκτρόδιο μολύβδου (άνοδος) και ένα ηλεκτρόδιο διοξειδίου του μολύβδου (κάθοδος) βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη με περιεκτικότητα περίπου 37% σε θειικό οξύ. Σε κατάσταση πλήρους εκφόρτισης και τα δύο ηλεκτρόδια αποτελούνται από θειικό μόλυβδο, η τάση στα άκρα του στοιχείου μηδενίζεται και ο ηλεκτρολύτης δεν περιέχει πλέον θειικό οξύ και ουσιαστικά μετατρέπεται σε νερό. Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την εκφόρτιση και την φόρτιση είναι οι ακόλουθες:



Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται τα βασικά δομικά στοιχεία ενός συσσωρευτή μολύβδου-οξέος.



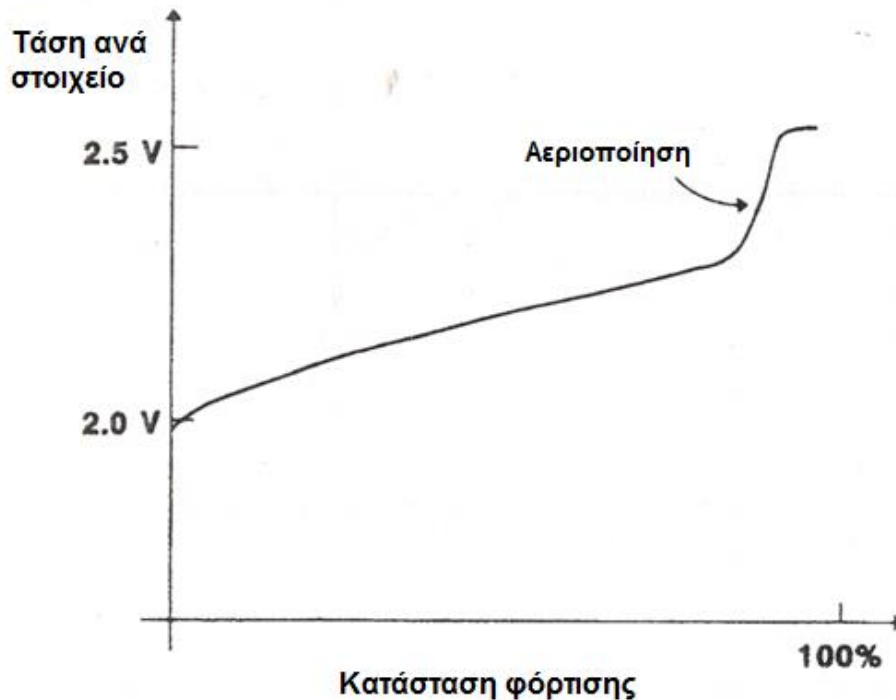
Σχήμα 2.3: Δομή μπαταρίας μολύβδου - οξέος



Σχήμα 2.4: Εκφόρτιση μπαταρίας μολύβδου - οξέος

Καθώς η μπαταρία μολύβδου-οξέος πλησιάζει στην κατάσταση πλήρους εκφόρτισής της, η τάση του στοιχείου μειώνεται απότομα (Σχήμα 2.4) ενώ η εσωτερική του αντίσταση αυξάνει απότομα. Ενδιάμεσα, κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης το ειδικό βάρος του ηλεκτρολύτη μειώνεται καθώς ιόντα θειϊκού άλατος αφήνουν το διάλυμα, παρέχοντας ένα ακριβή δείκτη της κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας. Η μπαταρία είναι περισσότερο ευάλωτη στην ψύξη στην κατάσταση εκφόρτισής της επειδή η αντιψυκτική δράση του θειϊκού οξέως μειώνεται όταν υπάρχει λίγη ποσότητα από αυτό. Μία πλήρως εκφορτισμένη μπαταρία μολύβδου-οξέος ψύχεται περίπου στους -8°C , ενώ μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία δεν ψύχεται μέχρι ο ηλεκτρολύτης να πέσει κάτω από τους -57°C . Σε πολύ κρύες συνθήκες, η ανησυχία για ψύξη μπορεί να περιορίσει το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας.

Οι αντίθετες αντιδράσεις συμβαίνουν κατά τη διάρκεια φόρτισης. Η τάση της μπαταρίας και το ειδικό βάρος αυξάνουν (Σχήμα 2.5), ενώ η θερμοκρασία ψύξης και η εσωτερική αντίσταση μειώνονται. Το θειϊκό άλας απομακρύνεται από τις πλάκες και εισέρχεται ξανά στον ηλεκτρολύτη με τη μορφή ιόντων θειϊκού άλατος. Δυστυχώς, δεν επιστρέφουν όλα τα θειϊκά άλατα στο διάλυμα, και ο κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης κάθε μπαταρίας αφήνει λίγο περισσότερο θειϊκό άλας μόνιμα προσκολλημένο στις πλάκες. Αυτός είναι ο κύριος λόγος της πεπερασμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Το ποσό του PbSO_4 που προσκολλάται στα ηλεκτρόδια εξαρτάται από τη διάρκεια του χρόνου που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο αυτό, το οποίο σημαίνει ότι για μία καλή μακροβιότητα της μπαταρίας είναι σημαντικό να κρατάμε τις μπαταρίες όσο το δυνατόν πλήρως φορτισμένες και να τις φορτίζουμε πλήρως σε κανονική βάση. Αυτό δείχνει ότι είναι μία σημαντική θεώρηση η ύπαρξη ενός συστήματος με εφεδρική γεννήτρια προκειμένου να ξαναγεμίσει τις μπαταρίες.

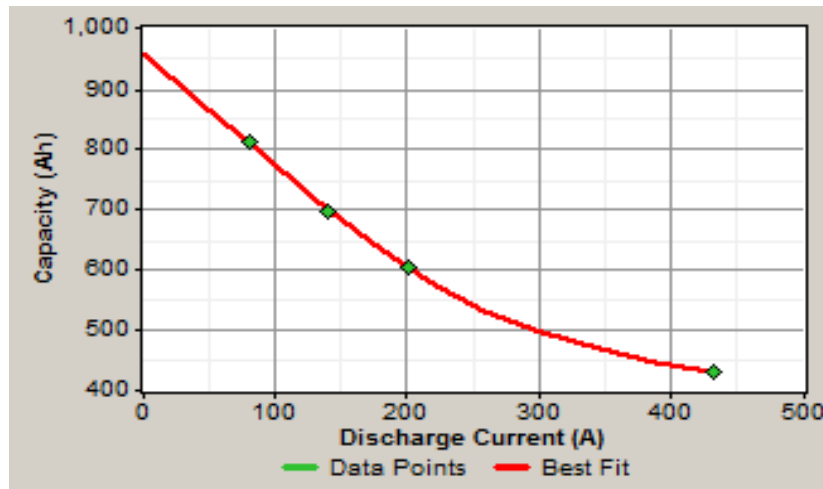


Σχήμα 2.5: Φόρτιση μπαταρίας μολύβδου - οξέος

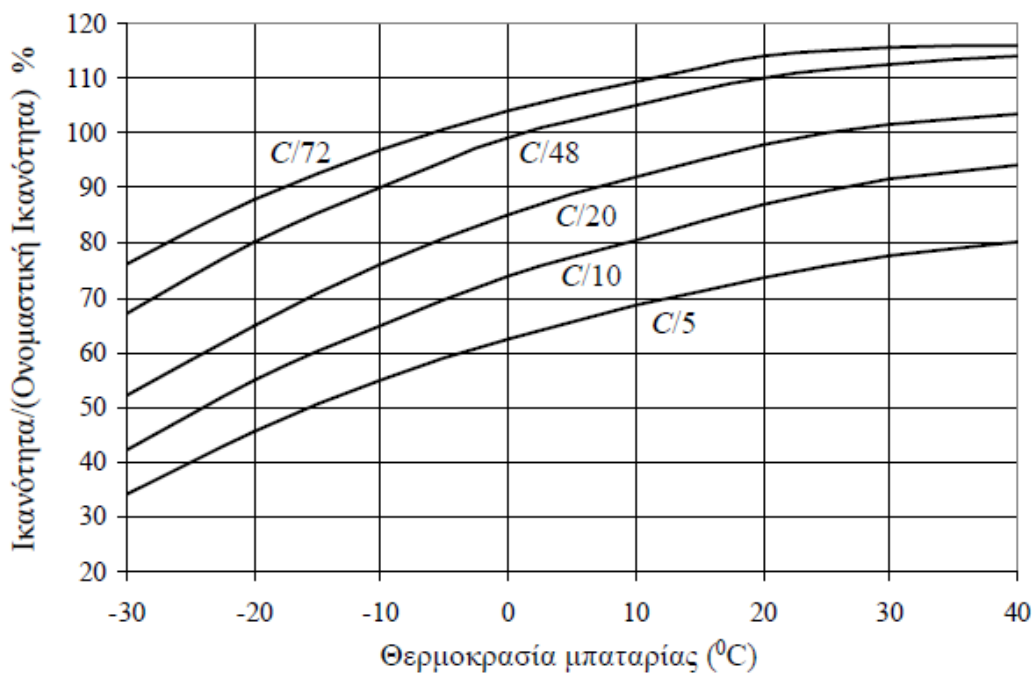
Η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας μίας μπαταρίας δίνεται σε Ah σε κάποια ονομαστική τάση και σε κάποιο ρυθμό εκφόρτισης. Μία μπαταρία μολύβδου-οξέος, για παράδειγμα, έχει ονομαστική τάση 2V ανά στοιχείο (πχ 6 στοιχεία για μία μπαταρία των 12V) και οι κατασκευαστές προσδιορίζουν την ικανότητα σε Ah σε ένα ρυθμό εκφόρτισης που θα εκφορτίσει κάθε στοιχείο της μπαταρίας στα 1.75V σε ένα προδιαγεγραμμένο χρονικό διάστημα και σε θερμοκρασία 25°C. Για παράδειγμα, μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία 12V που είναι προδιαγεγραμμένη να έχει για 10h ικανότητα 200Ah, θα παραδίδει 20A για 10h, και μετά την πάροδο αυτών των 10h η μπαταρία θα έχει τάση 10.5V (δηλαδή $6 \times 1.75 = 10.5$) οπότε και θεωρείται ότι είναι πλήρως εκφορτισμένη. Ο προσδιορισμός της ποσότητας ενέργειας που παρέδωσε η μπαταρία κατά τη διάρκεια της εκφόρτισής της κρύβει παγίδες. Η ενέργεια είναι το γινόμενο τάσης, ρεύματος, και χρονικής διάρκειας, αλλά επειδή η τάση μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια εκφόρτισης, δεν είναι σωστό να πούμε ότι η ενέργεια είναι $12V \times 20A \times 10h = 2400Wh$. Για να αποφευχθεί αυτή η δυσκολία, η ικανότητα της μπαταρίας προσδιορίζεται σε Ah και όχι σε Wh.

Μία μπαταρία 200Ah που παραδίδει 20A λέγεται ότι εκφορτίζεται με ρυθμό C/10, όπου το C αναφέρεται στα Ah και το 10 είναι οι ώρες που χρειάζεται για να εκφορτιστεί (πράγματι, $C/10 = 200Ah/10h = 20A$). Αυτή η ίδια μπαταρία των 200Ah δεν θα είναι ικανή να παραδίδει 50A για 4 πλήρεις ώρες (C/4), όμως στην πραγματικότητα θα παραδίδει 10A για περισσότερες από 20h (C/20). Με άλλα λόγια, η ικανότητα σε Ah εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο το ρεύμα μειώνεται. Η γρήγορη εκφόρτιση μίας μπαταρίας οδηγεί σε μικρότερη ικανότητα σε Ah, ενώ οι μεγάλοι χρόνοι εκφόρτισης οδηγούν σε μεγαλύτερη ικανότητα σε Ah. Οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης που προορίζονται για Φ/Β συστήματα συχνά προδιαγράφονται με βάση το ρυθμό εκφόρτισης 20h (C/20), το οποίο είναι σε γενικές γραμμές ένα πρότυπο, καθώς επίσης και με βάση τον πολύ μεγαλύτερο ρυθμό εκφόρτισης C/100 που είναι πιο αντιπροσωπευτικός του τρόπου με τον οποίο

χρησιμοποιούνται. Στο Σχήμα 2.6 διακρίνεται ξεκάθαρα η μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας με την αύξηση του ρυθμού εκφόρτισης.



Σχήμα 2.6: Εξάρτηση χωρητικότητας μπαταρίας από ρυθμό εκφόρτισης



Σχήμα 2.7: Επίδραση ρυθμού εκφόρτισης και θερμοκρασίας σε μπαταρία μολύβδου-οξέος

Η ικανότητα σε Ah μίας μπαταρίας δεν εξαρτάται μόνο από το ρυθμό εκφόρτισης, αλλά επίσης εξαρτάται και από τη θερμοκρασία. Το Σχήμα 2.7 δείχνει μια προσεγγιστική συσχέτιση των δύο αυτών φαινομένων, συγκρίνοντας την ικανότητα της μπαταρίας κάτω από μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες και ρυθμούς εκφόρτισης χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς το ρυθμό C/20 και τη θερμοκρασία των 25°C. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, η ικανότητα της μπαταρίας μειώνεται δραματικά σε ψυχρότερες συνθήκες. Για παράδειγμα, σε θερμοκρασία -30°C η μπαταρία που εκφορτίζεται με ρυθμό C/20 θα έχει μόνο τη μισή ονομαστική της ικανότητα. Ο συνδυασμός των επιδράσεων της ψυχρής θερμοκρασίας, δηλαδή:

1. η μείωση της ικανότητας

2. η μείωση της τάσης εξόδου
3. η αυξημένη ευπάθεια στην ψύξη κατά την εκφόρτιση

σημαίνει ότι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος πρέπει να προστατεύονται καλά στα ψυχρά κλίματα. Επίσης η προφανής αύξηση της ικανότητας της μπαταρίας στις υψηλές θερμοκρασίες δε σημαίνει ότι η θερμότητα κάνει καλό στη μπαταρία. Στην πραγματικότητα, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μειώνεται κατά 50% για κάθε 10°C πάνω από τη βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας των 25°C.

Τα περισσότερα συστήματα Φ/Β-μπαταριών βασίζονται σε μπαταρίες 6V ή 12V, οι οποίες συνδέονται σε σειρά, ή παράλληλα, ή μικτά (σειρά/παράλληλα). Για ίδιες μπαταρίες που συνδέονται σε σειρά, η συνολική τάση είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των ατομικών μπαταριών, και επειδή το ίδιο ρεύμα ρέει μέσα από κάθε μπαταρία, η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών (Ah) είναι ίδια με την χωρητικότητα κάθε ατομικής μπαταρίας. Για ίδιες μπαταρίες που συνδέονται παράλληλα, η τάση στα άκρα κάθε μπαταρίας είναι ίδια και ίση με τη συνολική τάση, αλλά επειδή το συνολικό ρεύμα είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων των ατομικών μπαταριών, η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών (Ah) είναι ίση με το άθροισμα των χωρητικότητων των ατομικών μπαταριών.

Οι τεχνολογίες μπαταριών μολύβδου-οξέος βελτιώνονται σταδιακά και με διάφορους τρόπους. Μια από τις βελτιώσεις είναι η χρήση ηλεκτρολυτών σε μορφή gel, αντί για υγρούς, που 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.

2.4 Μπαταρίες νικελίου-καδμίου

Συγκριτικά με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου έχουν μεγαλύτερες τιμές ειδικής ενέργειας, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (2000-2500 κύκλοι), υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης και εκφόρτισης, αλλά έχουν μικρότερη απόδοση (60-75%) είναι και πιο ακριβές. Επιπλέον πλεονεκτήματά τους αποτελούν η αυξημένη αξιοπιστία και οι πολύ μικρές ανάγκες συντήρησης ακόμα και σε ψυχρά κλίματα, η δυνατότητα βαθιάς εκφόρτισης και η εξαιρετική παροχή βηματικής τάσης. Για τους λόγους αυτούς είναι γενικά κατάλληλες για φορητές συσκευές, φωτισμό έκτακτης ανάγκης, UPS και εκκίνηση κινητήρων.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το βασικό μειονέκτημα τους είναι το σχετικά υψηλό κόστος (800€/kWh) εξαιτίας της ακριβούς κατασκευαστικής διαδικασίας. Επιπλέον, το κάδμιο είναι ένα βαρύ τοξικό μέταλλο που εισάγει προβλήματα διάθεσης και ανακύκλωσης των μπαταριών νικελίου-καδμίου. Αρνητικό χαρακτηριστικό αποτελεί και το φαινόμενο μνήμης (memory effect), σύμφωνα με το οποίο όταν μία μπαταρία νικελίου-καδμίου φορτίζεται και εκφορτίζεται εκατοντάδες φορές σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής χωρητικότητας, τείνει να το «θυμάται» και τελικά μπορεί να εκφορτιστεί αποτελεσματικά μόνο μέχρι το ποσοστό αυτό. Στην πραγματικότητα, στο σημείο που άρχιζε η επαναφόρτιση παρατηρείται μία δραματική μείωση της τάσης της μπαταρίας, σαν να ήταν πλήρως εκφορτισμένη, ενώ πρωτογενώς η χωρητικότητα δεν μειώνεται σημαντικά. Ωστόσο, εάν το σύστημα που ηλεκτροδοτείται από την μπαταρία δε μπορεί να λειτουργήσει κατά

τη διάρκεια της χαμηλής τιμής της τάσης, είναι αδύνατο να αξιοποιήσει όλη την αποθηκευμένη ενέργεια, οπότε πρακτικά η μπαταρία εμφανίζει μειωμένη χωρητικότητα. Αν παρατηρηθεί το φαινόμενο μνήμης, μπορεί να εξαλειφθεί μετά από μία σειρά πλήρων εκφορτίσεων της μπαταρίας.

2.5 Μπαταρίες λιθίου-ιόντος

Οι μπαταρίες αυτές έχουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας (300-400 kWh/m³ λιθίου), πολύ μεγάλους βαθμούς απόδοσης που μπορεί να αγγίξουν και το 100%, καθώς 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. Επιπρόσθετα πλεονεκτήματα αποτελούν ο χαμηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης (<5% ανά μήνα), η μικρή ανάγκη για συντήρηση και η ικανότητα παροχής ρευμάτων πολύ υψηλής τιμής.

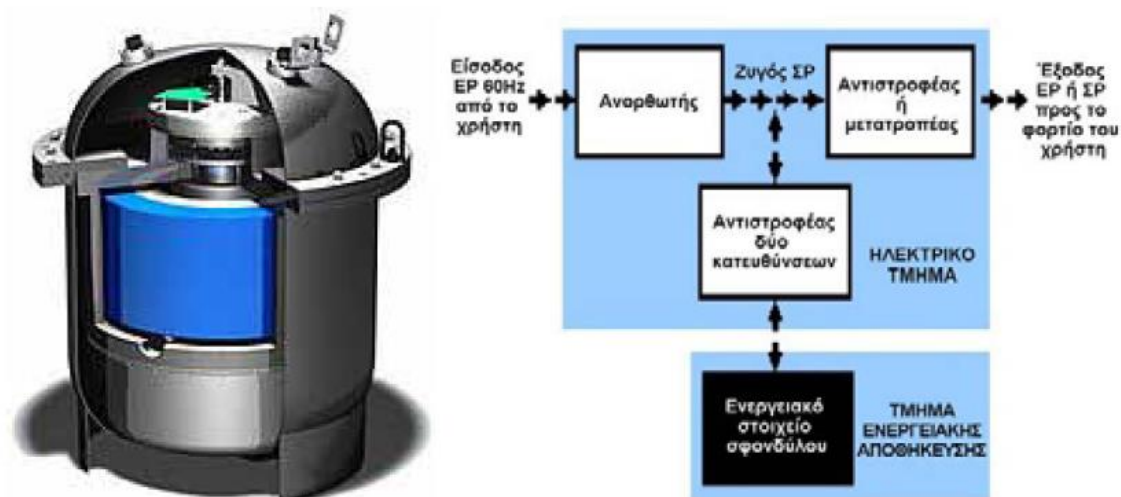
Ωστόσο, η διάρκεια ζωής τους επηρεάζεται αρνητικά σε μεγάλο βαθμό από τις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ μπορεί να μειωθεί δραστικά σε περίπτωση υπερβολικά βαθιάς εκφόρτισης, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για εφαρμογές εφεδρείας. Επιπλέον αρνητικά στοιχεία αποτελούν ο περιορισμένος ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης και η μεγάλη τους ευαισθησία σε περίπτωση υπερφόρτισης.

Κεφάλαιο 3. Υπόλοιπες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

3.1 Σφόνδυλοι (Flywheels)

Ο σφόνδυλος είναι μια περιστρεφόμενη μάζα γύρω από έναν άξονα, η οποία μπορεί να αποθηκεύσει την ενέργεια μηχανικά υπό τη μορφή της κινητικής ενέργειας. Μια διάταξη αποθήκευσης σφονδύλου αποτελείται από τον σφόνδυλο και μια ενσωματωμένη ηλεκτρική συσκευή, που μπορεί να λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια. Η ηλεκτρική συσκευή λειτουργεί ως κινητήρας για να περιστρέφει το σφόνδυλο και να αποθηκεύει ενέργεια. Πράγματι, μόλις ο σφόνδυλος αρχίσει να περιστρέφεται αποτελεί ουσιαστικά μια μηχανική μπαταρία η οποία εμπεριέχει ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί ανάλογα με την περιστροφική ταχύτητα και τη ροπή αδράνειας του σφονδύλου. Όσο πιο γρήγορα περιστρέφεται ο σφόνδυλος τόσο περισσότερη ενέργεια αποθηκεύει. Σήμερα, οι ταχύτητες περιστροφής των σφονδύλων ξεπερνούν πλέον τις 50000 RPM.

Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να ανακτηθεί επιβραδύνοντας το σφόνδυλο μέσω επιβραδυνομένης στρεπτικής ροπής και επιστρέφοντας την κινητική ενέργεια στην ηλεκτρική συσκευή. Στην περίπτωση αυτή, η ηλεκτρική συσκευή λειτουργεί ως γεννήτρια, η οποία παράγει ηλεκτρική ισχύ κατά τη ζήτηση χρησιμοποιώντας την ενέργεια που αποθηκεύτηκε στο σφόνδυλο. Επιπρόσθετα, για τη μείωση των ενεργειακών απωλειών χρησιμοποιούνται μαγνητικοί τριβείς και ένας θάλαμος υπό κενό. Ο τελευταίος συνεισφέρει στη μείωση των αεροδυναμικών απωλειών και των πιέσεων του στρόφρα. Στο Σχήμα 3.1 δίνεται σχηματικά μια ενεργειακή μονάδα σφονδύλου και η λειτουργία της.



Σχήμα 3.1: Μονάδα σφονδύλου και η λειτουργία της

Αντίθετα από τις μπαταρίες, τα συστήματα σφονδύλων δεν είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει ως και 80-90%. Επιπλέον, παρουσιάζουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα (της τάξης των 5-100 Wh/kg). Ο αναμενόμενος χρόνος ζωής τους φτάνει τα 15-20 χρόνια (για χρήση σε υψηλές συχνότητες), ενώ επιπλέον απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και παρακολούθηση.

Οι σφόνδυλοι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ισχύος, καθώς μπορούν να εκφορτιστούν μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα αν είναι απαραίτητο. Έτσι προτιμώνται όλο και περισσότερο για εκτεταμένες

εφαρμογές ΑΠΕ καθώς και για την ικανοποίηση της ζήτησης ενέργειας σε ώρες αιχμής όπου απαιτείται άμεση παροχή σχετικά μεγάλης ποσότητας ενέργειας. Πιστεύεται ότι οι σφόνδυλοι θα μπορούσαν να συμπληρώσουν τις μπαταρίες στα συστήματα ισχύος ανανεώσιμων πηγών. Οι σφόνδυλοι 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.

Τα κύρια μειονεκτήματα της τεχνολογίας του σφονδύλου είναι το υψηλό κόστος, ο κίνδυνος ατυχήματος σε περίπτωση που σπάσει κάποιος δίσκος, αλλά και οι ενεργειακές απώλειες όταν οι κύκλοι φόρτισης-εκφόρτισης δεν είναι συνεχείς. Τα ποσοστά αυτοεκφόρτισης για τα συστήματα σφονδύλου είναι υψηλά, με ελάχιστο ποσοστό το 20% της αποθηκευτικής ικανότητας ανά ώρα. Αυτά τα υψηλά ποσοστά χειροτερεύουν την ενεργειακή απόδοση, όταν ο κύκλος φόρτισης-εκφόρτισης δεν είναι συνεχής, για παράδειγμα όταν αποθηκεύεται ενέργεια για μια χρονική περίοδο μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης. Τέτοια υψηλά ποσοστά εκφόρτισης ενισχύουν την άποψη ότι ο σφόνδυλος δεν αποτελεί επαρκή διάταξη για μακροπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση, αλλά μόνο για να παρέχει αξιόπιστη εφεδρική ενέργεια.

3.2 Υπερπυκνωτές

Ο υπερπυκνωτής είναι ένας ηλεκτροχημικός πυκνωτής και περιέχει συνιστώσες που σχετίζονται τόσο με μια μπαταρία όσο και με έναν πυκνωτή. Συνεπώς, η τάση ενός στοιχείου περιορίζεται σε μερικά Volt. Ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιεί ένα μοριακά-λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη σαν διηλεκτρικό για το διαχωρισμό της φόρτισης. Η εμφάνιση του διηλεκτρικού γίνεται κάθε φορά που ασκείται τάση στους ακροδέκτες του. Με τον τρόπο αυτό, το φορτίο αποθηκεύεται ηλεκτροστατικά, δηλαδή χωρίς να πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις, μέσα στα πολωμένα στρώματα υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο. Ένας υπερπυκνωτής αποτελείται από δυο αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια, έναν διαχωριστή, τον ηλεκτρολύτη και συλλέκτες ρεύματος. Ανάλογα με την τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτροδίων, οι υπερπυκνωτές μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Ηλεκτροχημικούς πυκνωτές διπλού στρώματος (electrochemical double layer capacitors, ECDL)
- Ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors)
- Υβριδικούς πυκνωτές (hybrid capacitors)

Οι υπερπυκνωτές ECDL είναι συνήθως οι λιγότερο δαπανηροί ως προς την κατασκευή τους και είναι αυτή τη στιγμή οι πιο διαδεδομένοι τύποι υπερπυκνωτών. Κατά τη διάρκεια της φόρτισής τους, τα ηλεκτρικά φορτισμένα ιόντα στον ηλεκτρολύτη μεταναστεύουν προς τα ηλεκτρόδια αντίθετης πολικότητας, εξαιτίας του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των φορτισμένων ηλεκτροδίων που έχει δημιουργηθεί από την εφαρμοζόμενη τάση. Κατά συνέπεια, παράγονται δύο ξεχωριστά φορτισμένα στρώματα. Παρόμοια με μια μπαταρία, ο υπερπυκνωτής ECDL βασίζεται στην ηλεκτροστατική δράση. Δεδομένου όμως ότι καμιά χημική αντίδραση δεν συμβαίνει, το αποτέλεσμα είναι εύκολα αναστρέψιμο με ελάχιστη υποβάθμιση σε μεγάλη φόρτιση ή υπερφόρτιση και η τυπική διάρκεια ζωής είναι εκατοντάδες χιλιάδες κύκλοι. Ο περιοριστικός παράγοντας από την άποψη της διάρκειας

ζωής μπορεί να είναι τα έτη λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, έχει αναφερθεί διάρκεια ζωής μέχρι 12 έτη.

Ένας άλλος περιοριστικός παράγοντας είναι το υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης, που φθάνει σε ένα επίπεδο της τάξης του 14% της ονομαστικής ενέργειας για κάθε μήνα. Εκτός από την υψηλή αντοχή σε μεγάλες φορτίσεις, το γεγονός ότι καμιά χημική αντίδραση δεν πραγματοποιείται σημαίνει ότι οι υπερπυκνωτές μπορούν εύκολα να φορτιστούν και να εκφορτιστούν σε δευτερόλεπτα, πολύ ταχύτερα δηλαδή από τις μπαταρίες. Παράλληλα, ούτε θερμότητα ούτε επικίνδυνες ουσίες απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η ενεργειακή απόδοση είναι πολύ υψηλή και κυμαίνεται από 85% έως 98%.

Συγκριτικά με τους συμβατικούς πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές έχουν σημαντικά μεγαλύτερο εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίου. Η ποσότητα του ρεύματος που μπορεί να απορροφήσει ένας συμβατικός πυκνωτής εξαρτάται άμεσα από την εκτεθειμένη επιφάνεια των ηλεκτροδίων του. Η τεχνολογία, όμως, των υπερπυκνωτών βασίζεται στην ανάπτυξη «ενεργού επιφάνειας» σε ολόκληρη τη μάζα των ηλεκτροδίων και όχι μόνο στην εξωτερική τους επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται ο συνολικός όγκος σε ένα μικρό μόλις κλάσμα αυτού των συμβατικών πυκνωτών και πολλαπλασιάζεται η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα βάρους. Έχει αναφερθεί χωρητικότητα υπερπυκνωτή 5000F, ενώ η ενεργειακή του πυκνότητα φθάνει τις 5Wh/kg, σε αντίθεση με τους συμβατικούς πυκνωτές, που παρουσιάζουν τυπική ενεργειακή πυκνότητα 0.5Wh/kg. Επιπρόσθετα, η πυκνότητα ισχύος των υπερπυκνωτών είναι εξαιρετικά υψηλή, παίρνοντας τιμές όπως 10000W/kg, πολύ μεγαλύτερη δηλαδή από τις πυκνότητες ισχύος των μπαταριών. Παρόλα αυτά, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας του υπερπυκνωτή, το υψηλό αυτό ποσό ισχύος είναι διαθέσιμο μόνο για πολύ μικρή χρονική διάρκεια.

Το κόστος του υπερπυκνωτή είναι ένα σημαντικό ζήτημα για την περαιτέρω εμπορική χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συγκριτικά με τα κόστη των καθιερωμένων τεχνολογιών ενεργειακής αποθήκευσης, όπως είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, ο υπερπυκνωτής εμφανίζει σημαντικά υψηλότερο κόστος. Επομένως, είναι απαραίτητη η δραστική μείωση του κόστους του ιδιαίτερα στους τομείς του άνθρακα, του ηλεκτρολύτη και του διαχωριστή. Σήμερα, η υψηλή ικανότητα αποθήκευσης ισχύος των υπερπυκνωτών σε συνδυασμό με τους πολύ σύντομους κύκλους εκφόρτισης, καθιστά ιδανική την εφαρμογή τους στην παροχή συμπληρωματικής φόρτισης για την ικανοποίηση ξαφνικών ενεργειακών αναγκών.



Χωρητικότητα	2700 Farads (-10% / +30%)
Τάση	2,5 V
Ονομαστικό ρεύμα	625 A (5 sec ρυθμός εκκένωσης στα 0,5V)
Μέγεθος	161 x 61,5 x 61,5 mm
Βάρος	725 gr
Θερμοκρασία	-40°C έως 70 °C
Διαρροή	6 mA (μετά από 72 ώρες)

Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστικά υπερπυκνωτή

Προς το παρόν, υπερπυκνωτές πολύ μικρού μεγέθους της τάξης των 7-10W, διατίθενται στο εμπόριο για εφαρμογές ποιότητας ισχύος από την πλευρά του καταναλωτή και βρίσκονται συνήθως

σε οικιακές ηλεκτρικές συσκευές (Σχήμα 3.2). Η εξέλιξη για τους πυκνωτές μεγαλύτερης κλίμακας έχει εστιαστεί στα ηλεκτρικά οχήματα. Μέχρι σήμερα, η ποιότητα ισχύος μικρής κλίμακας (<250kW) θεωρείται ως η πιο ελπιδοφόρος ηλεκτροπαραγωγική χρήση για τους υπερπυκνωτές.

3.3 Υπεραγώγιμη μαγνητική ενεργειακή αποθήκευση

Ένας άλλος τύπος διάταξης που αναπτύσσεται κυρίως για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων της τάσης του δικτύου και την ενίσχυση της ισχύος σε ώρες αιχμής, αλλά και με προοπτική για εφαρμογή σε ΑΠΕ είναι το υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES). Σε ένα σύστημα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης αποθηκεύεται ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη ροή DC σε ένα πηνίο από υπεραγώγιμο υλικό. Συγκεκριμένα, τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μετατρέπουν το AC από ένα ηλεκτρικό σύστημα σε DC, το οποίο ρέει μέσα στην υπεραγώγιμη σπείρα και αποθηκεύει την ενέργεια υπό μορφή μαγνητικού πεδίου. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να αποδοθεί στο σύστημα AC, όταν το απαιτούν οι συνθήκες.

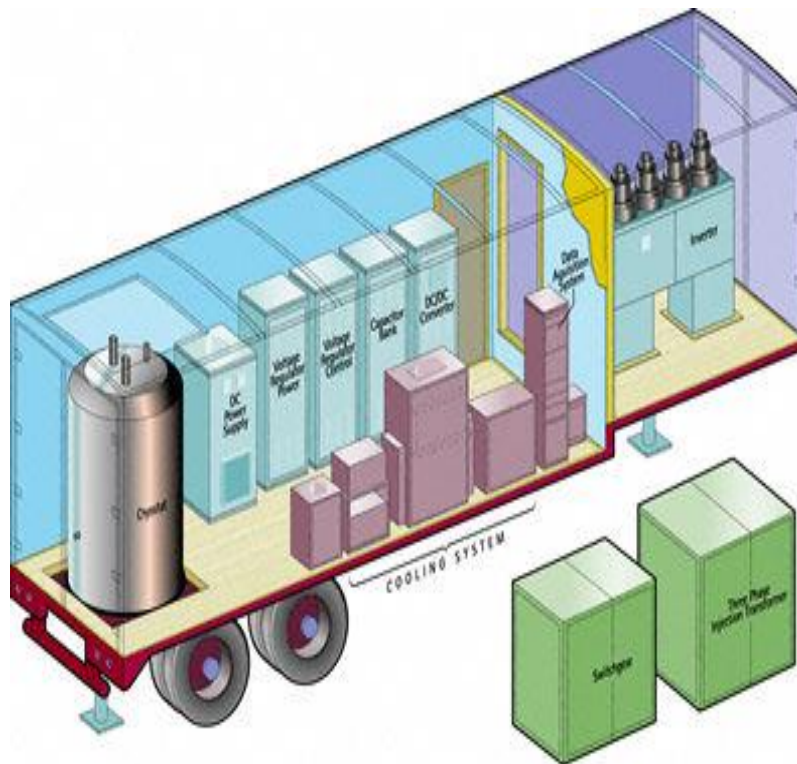
Προκειμένου να διατηρηθεί το πηνίο στην υπεραγώγιμη κατάστασή του, στα πρώτα συστήματα SMES βυθιζόταν σε υγρό ήλιο που περιεχόταν σε έναν μονωμένο υπό κενό κρυστάτη. Αυτός ο τρόπος ψύξης είχε όμως μεγάλο κόστος. Τα τελευταία χρόνια εμφανίστηκαν υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγοί, οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες σύμφωνες με τη βιομηχανικά τυποποιημένη ψύξη υγρού αζώτου, που είναι περισσότερο συμφέρουσα από την κρυογόνο ψύξη. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης του υπεραγώγιμου πηνίου είναι τέτοια ώστε να εμφανίζουν σχεδόν μηδενική αντίσταση στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και να οδηγούν τον ηλεκτρισμό, σχεδόν χωρίς απώλειες, σε συστήματα ειδικά σχεδιασμένα για να “εγκλωβίζουν” αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του συστήματος υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης είναι η πολύ μικρή χρονική καθυστέρηση κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης. Η ισχύς διατίθεται σχεδόν στιγμιαία και η πολύ υψηλή παροχή ισχύος διατίθεται για σύντομη χρονική περίοδο. Ακόμα, η συχνή φόρτιση και εκφόρτιση δεν έχει καμιά επίδραση στη διάρκεια ζωής του. Τα συστήματα αυτά έχουν μεγάλο κύκλο ζωής και, κατά συνέπεια, είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν σταθερή, πλήρη ανακύκλωση και συνεχή ρυθμό λειτουργίας. Η ενεργειακή απόδοση ενός συστήματος υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης μπορεί να γίνει μεγαλύτερη από 97%.

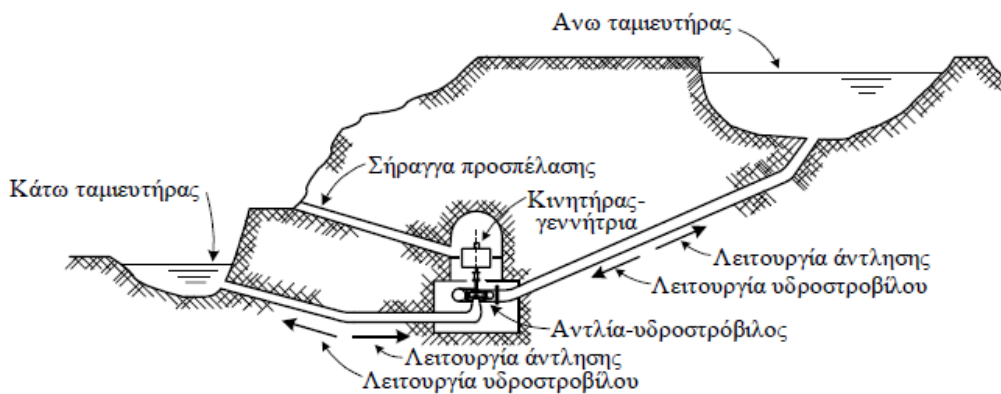
Στα μειονεκτήματα των συστημάτων υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης συγκαταλέγονται η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, αλλά και η αστάθεια που εμφανίζουν κυρίως τα μεγάλα συστήματα αυτού του είδους, η οποία προκαλείται από το δημιουργούμενο ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση των μεγάλων συστημάτων υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης, το προκύπτον μαγνητικό πεδίο μπορεί να έχει και σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε διατάξεις της τάξης των 1 έως 10MW. Οι διατάξεις μικροσυστημάτων διατίθενται για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Στο Σχήμα 3.3, παρατίθεται σχηματικά μια μονάδα υπεραγώγιμης μαγνητικής ενεργειακής αποθήκευσης με ισχύ

3MW και χρόνο απόκρισης <0.5 ms. Αυτή η μονάδα μπορεί να συνδεθεί σε δίκτυα μεταφοράς από 69 έως 500kV.



Σχήμα 3.3: Σύστημα υπεραγωγίμης αποθήκευσης 3MW



Σχήμα 3.4: Τυπικό σύστημα αντλιοσταμείωσης

3.4 Συστήματα αντλιοσταμείωσης

Σήμερα, η πιο αξιόπιστη λύση αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα παρέχεται από τα συστήματα αντλιοσταμείωσης και κυρίως από τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα, των οποίων οι μονάδες μετατροπής ενέργειας είναι αντιστρεπτές, δηλαδή μπορούν να λειτουργούν είτε ως στροβίλοι (φάση παραγωγής) είτε ως αντλίες (φάση αποθήκευσης). Ένα τυπικό σύστημα αντλιοσταμείωσης (Σχήμα 3.4) αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

- Μια αντλία ή ένα σύστημα αντλιών
- Έναν υδροστροβίλο ή ένα σύστημα υδροστροβίλων

- Δύο δεξαμενές νερού (ταμιευτήρες), οι οποίες βρίσκονται σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την άντληση νερού από την κάτω δεξαμενή προς την άνω
- Ένα σύνολο σωληνώσεων για την προσαγωγή νερού από την άνω δεξαμενή προς την κάτω μέσω του υδροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Μια ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια σε κοινή άτρακτο με την αντλία και τον υδροστρόβιλο

Στο Σχήμα 3.5 δείχνεται μια εγκατάσταση αντλησιοταμίευσης. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος έχει ως εξής: η περίσσεια ενέργειας που εμφανίζεται κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου και υψηλής παραγωγής ΑΠΕ αξιοποιείται για την άντληση νερού στον άνω ταμιευτήρα και άρα αποθηκεύεται με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Ανάλογα, κατά τις περιόδους αιχμής ελευθερώνεται νερό από τον άνω ταμιευτήρα το οποίο περιστρέφει τους υδροστροβίλους παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και τελικά καταλήγει στον κάτω ταμιευτήρα. Με αυτόν τον τρόπο το σύστημα μπορεί να καλύψει την έλλειψη ισχύος χρησιμοποιώντας το κατάλληλο ποσό ενέργειας που έχει προηγουμένως αποθηκευτεί. Με μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές μεταξύ των δύο ταμιευτήρων, λιγότερος όγκος νερού παρέχει την ίδια χωρητικότητα και συνεπώς αγωγοί πτώσεως μικρότερης διαμέτρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή του ίδιου ποσού ισχύος.



Σχήμα 3.5: Εγκατάσταση αντλησιοταμίευσης

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να αναλάβουν φορτίο σε λίγα δευτερόλεπτα και το μέγιστο βάθος εκφόρτισης τους είναι έως 95% χωρίς να επηρεάζεται η διάρκεια ζωής της εγκατάστασης. Η τυπική συνολική απόδοση του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 65% και 77%, με τους υδροστροβίλους να εμφανίζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από της αντλίες. Το βασικότερο πλεονέκτημα της αντλησιοταμίευσης είναι ότι παρέχει εγγυημένη ισχύ, δυνατότητα που δεν έχουν οι ΑΠΕ λόγω της μεταβλητής φύσης τους. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα αύξησης της αιολικής διείσδυσης και της διείσδυσης ΑΠΕ γενικότερα σε νησιωτικά συστήματα, που διαφορετικά

περιορίζεται από τα όρια τεχνικού ελάχιστου και δυναμικής απόκρισης. Από την άλλη μεριά, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της αντλιοσταμείωσης είναι οι γεωγραφικοί, γεωλογικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί που σχετίζονται με τη σχεδίαση των ταμιευτήρων, το υψηλό κόστος επένδυσης και οι μακροί χρόνοι υλοποίησης.

Σε ένα σύστημα αντλιοσταμείωσης διακρίνουμε δύο βασικές σχεδιαστικές εκδοχές, αυτής της μονής σωλήνωσης και αυτής της διπλής σωλήνωσης, όπου δηλαδή υπάρχει ανεξάρτητη σωλήνωση για τον στρόβιλο και για τη λειτουργία των αντλιών.

Η περίπτωση της μονής σωλήνωσης εμφανίζει ασφαλώς το πλεονέκτημα της πιο οικονομικής λύσης, δεδομένου ότι μειώνονται τα έξοδα της εγκατάστασης. Ωστόσο, θέτει περιορισμό ως προς τη λειτουργία, δεδομένου ότι δεν επιτρέπει την ταυτόχρονη λειτουργία του στρόβιλου με τις αντλίες. Για το λόγο αυτό, απαιτείται να καθοριστεί αν έχει προτεραιότητα λειτουργίας ο στρόβιλος ή οι αντλίες.

Αναφορικά με τη διπλή σωλήνωση, θα μπορούσε να υποθέσει κανείς ότι είναι περιττή, δεδομένου ότι εάν υπάρχει ανάγκης παραγωγής ενέργειας από το στρόβιλο και ταυτόχρονα υπάρχει απορριπτόμενη ισχύς από τις θερμικές μονάδες ή από τις υδροηλεκτρικές μονάδες βάσεως, τότε θα μπορούσε να απορροφηθεί απευθείας περισσότερη ενέργεια από τις μονάδες αυτές. Ο συλλογισμός αυτός είναι εσφαλμένος, λόγω των περιορισμών του δικτύου. Η άμεση δηλαδή απορρόφηση ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να συμβεί πέραν της επιτρεπόμενης από το δίκτυο ενέργειας. Παράλληλα, η χρονική κατανομή της απορριπτόμενης ισχύος δείχνει ότι η περικοπή καθορίζεται πρώτα από τη διαθέσιμη παραγόμενη ενέργεια και δεύτερον από τις διακυμάνσεις της ζήτησης. Σε ώρες αιχμής της ζήτησης και ταυτόχρονα περίσσειας ισχύος των μονάδων βάσεως, από τη μια υπάρχει περικοπή ισχύος και απαιτείται λειτουργία αντλιών για την εκμετάλλευση της περίσσειας ισχύος, από την άλλη πρέπει να λειτουργήσει ο στρόβιλος (π.χ., λόγω υψηλής ζήτησης). Εάν λειτουργεί η αντλία, θα απαιτηθεί χρόνος μέχρι να σταματήσει και να ξεκινήσει ο στρόβιλος, οπότε το βασικό πλεονέκτημα της άμεσης απόκρισης του στρόβιλου χάνεται.

Τόσο στην περίπτωση της μονής σωλήνωσης όσο και στην περίπτωση της διπλής που περιγράφηκαν ανωτέρω, οι τρεις μηχανές (αντλία – υδροστρόβιλος – κινητήρας/γεννήτρια) τοποθετούνται σε κοινή άτρακτο και η φορά περιστροφής είναι η ίδια ανεξαρτήτως λειτουργίας. Εκτός όμως από τις περιπτώσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, υπάρχει και η δυνατότητα διπλής ταυτόχρονης λειτουργίας με χρήση μονής σωλήνωσης. Πρόκειται για μια δεύτερη κατηγορία συστήματος αντλιοσταμείωσης, το λεγόμενο *αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό σύστημα*. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει μια αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή που λειτουργεί είτε ως αντλία είτε ως στρόβιλος. Αυτή η προτεινόμενη λύση εμφανίζει το πλεονέκτημα ότι είναι οικονομικότερη χωρίς να υστερεί λειτουργικά.

3.5 Συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

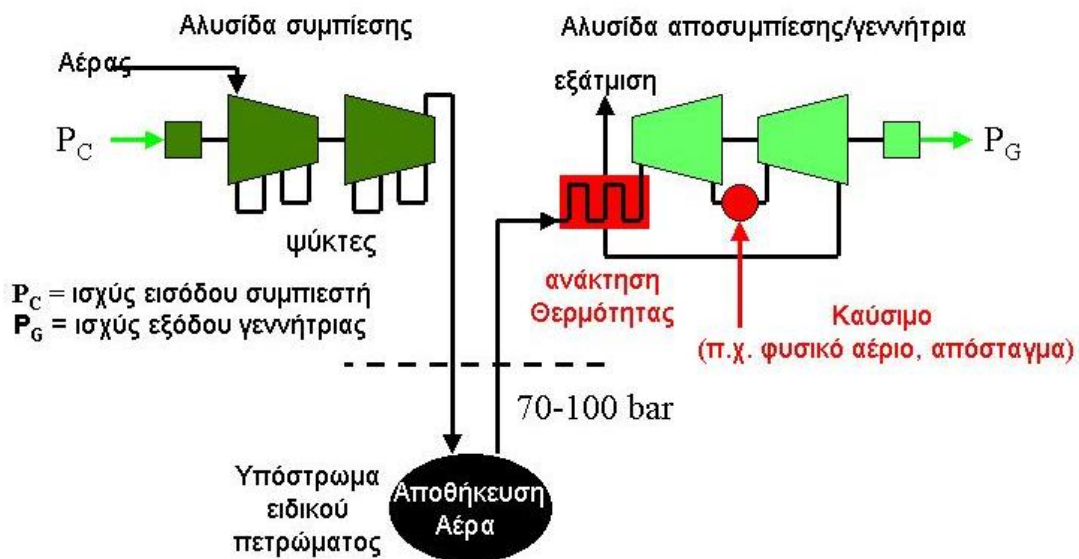
Τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (Compressed air energy storage – CAES) βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικά έργα. Εξαιρώντας τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά συστήματα που περιγράφηκαν παραπάνω, καμιά άλλη μέθοδος δεν έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης τόσο μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και για μεγάλης διάρκειας χρονικές

περιόδους. Η ισχύς ενός τέτοιου συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης μπορεί να ξεκινά από 50MW και να ξεπερνά τα 300MW.

Η βασική εγκατάσταση ενός τυπικού συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (Σχήμα 3.6) αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα:

- Το τμήμα ισχύος, το οποίο αποτελείται από τον προθερμαντήρα/μονάδα επιλεκτικής καταλυτικής μείωσης, το στρόβιλο αέρα, το στρόβιλο καύσης και την ηλεκτρική γεννήτρια
- Το τμήμα συμπίεσης, που αποτελείται από τον ηλεκτρικό κινητήρα και τους αξονικούς και φυγοκεντρικούς συμπιεστές, οι οποίοι συμπληρώνονται με δοχεία ψύξης για την επίτευξη οικονομικής συμπίεσης και τη μείωση της περιεκτικότητας του αέρα σε υγρασία
- Τον υπόγειο αεροστεγή ταμειυτήρα για την αποθήκευση του αέρα που υποβάλλεται σε συμπίεση
- Το κέντρο ελέγχου του εξοπλισμού για τη λειτουργία του στρόβιλου καύσης, του συμπιεστή και των βοηθητικών, αλλά και για τον έλεγχο της μετάβασης από την παραγωγή στην αποθήκευση
- Τον βοηθητικό εξοπλισμό για την αποθήκευση και τη διαχείριση του καυσίμου, και μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα για να υποστηρίξουν τους διάφορους εναλλάκτες θερμότητας που απαιτούνται

Σύστημα συμπίεσης αέρα (CAES)



Σχήμα 3.6: Σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα

Ο κύκλος παραγωγής σε μία εγκατάσταση CAES είναι μία παραλλαγή του κύκλου ενός συμβατικού αεριοστρόβιλου. Η περίσσεια ενέργειας από ΑΠΕ ή η ενέργεια χαμηλού φορτίου χρησιμοποιείται για τη συμπίεση αέρα (70-100 bar) εντός ενός στεγανού αποθηκευτικού χώρου με τη βοήθεια ενός συμπιεστή, αφού προηγουμένως ψυχθεί ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή αποθήκευση. Κατά τις ώρες αιχμής, η αναγκαία ποσότητα αέρα για την κάλυψη του φορτίου ελευθερώνεται από

το χώρο αποθήκευσης, προθερμαίνεται, αναμιγνύεται με μικρή ποσότητα καυσίμου και οδηγείται στο θάλαμο καύσης της εγκατάστασης. Ως μέσα αποθήκευσης μπορούν να πετρώδη σπήλαια, σπήλαια άλατος, εξαντλημένα κοιτάσματα αερίων και αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες, με τους τελευταίους να αποτελούν την πιο οικονομική και συνηθισμένη λύση. Στο Σχήμα 3.7 απεικονίζεται μια διάταξη CAES ισχύος 290MW.



Σχήμα 3.7: Υφιστάμενη μονάδα CAES ισχύος 290 MW

Τα συστήματα CAES παρουσιάζουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, καθιστώντας την τεχνολογία τους εξαιρετικά ανταγωνιστική για εφαρμογές σε μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικά έργα. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ισχύς ενός συστήματος CAES μπορεί να ξεκινά από 50MW και εύκολα να ξεπερνά τα 300MW. Η περίοδος αποθήκευσης μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας καθώς οι αντίστοιχες απώλειες δε θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές. Μια μονάδα CAES μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση ενέργειας για περισσότερο από ένα έτος. Σημαντικό πλεονέκτημα ενός συστήματος CAES αποτελεί επίσης και η γρήγορη εκκίνηση. Σε φυσιολογικές συνθήκες απαιτούνται περίπου 12 λεπτά ενώ σε περιπτώσεις ανάγκης η μονάδα έχει τη δυνατότητα εκκίνησης σε 9 λεπτά, χρόνοι εντυπωσιακοί αν αναλογιστούμε πως μια συμβατική μονάδα απαιτεί 20 με 30 λεπτά.

Ωστόσο, τα συστήματα CAES παρουσιάζουν και ορισμένα σημαντικά μειονεκτήματα. Απώλειες ενέργειας παρατηρούνται τόσο κατά την αποθήκευση στον ταμιευτήρα όσο και κατά την άντληση του συμπιεσμένου αέρα από αυτόν καθώς και εξαιτίας των μηχανολογικών βαθμών αποδόσεων των επιμέρους τμημάτων της εγκατάστασης. Εκτιμήσεις αναφέρουν βαθμούς απόδοσης εγκαταστάσεων συμπιεσμένου αέρα της τάξης του 80%. Επιπρόσθετα, η κατασκευή ενός υπόγειου ταμιευτήρα προϋποθέτει τη διάθεση σημαντικού αρχικού κεφαλαίου που σε πολλές περιπτώσεις καθιστά την πραγματοποίηση ανάλογων σχεδίων αδύνατη. Αν σε αυτό συμπεριλάβουμε και τη δυσκολία εύρεσης υπόγειου ταμιευτήρα, γίνεται κατανοητή η δυσκολία χρησιμοποίησης αυτής της

μεθόδου ενεργειακής αποθήκευσης. Εντούτοις, για τις θέσεις όπου είναι κατάλληλο, μπορεί να παρέχει την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και μακράς διάρκειας περιόδους

3.6 Θερμική Αποθήκευση

Στα συστήματα θερμικής αποθήκευσης (Thermal Energy Storage – TES) χρησιμοποιούνται υλικά που μπορούν να διατηρηθούν σε υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες σε μονωμένα δοχεία. Η θερμότητα ή το ψύχος που αποδίδεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση θερμικών μηχανών. Τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης κατηγοριοποιούνται σε χαμηλής και υψηλής θερμοκρασίας ανάλογα με το αν η θερμοκρασία λειτουργίας του μέσου αποθήκευσης είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία δωματίου. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα TES διακρίνονται σε συστήματα βιομηχανικής ψύξης (<-18°C), οικιακής ψύξης (0-12°C), οικιακής θέρμανσης (25-50°C) και βιομηχανικής θέρμανσης (>175°C).

3.7 Αποθήκευση Υδρογόνου

Το υδρογόνο (H₂) είναι στη συνηθισμένη στοιχειακή του μορφή ένα άχρωμο, άοσμο, άγευστο, εξαιρετικά εύφλεκτο αμέταλλο, διατομικό αέριο. Είναι επίσης, το ελαφρύτερο χημικό στοιχείο. Το υδρογόνο είναι το πιο απλό και πιο άφθονο στοιχείο στον κόσμο. Παρόλα αυτά, το υδρογόνο βρίσκεται σπάνια μόνο του στη φύση, καθώς συμμετέχει σε ενώσεις με άλλα στοιχεία. Έτσι, πολύ λίγο αέριο υδρογόνο υπάρχει στη γήινη ατμόσφαιρα. Μπορεί να συνδυαστεί χημικά με σχεδόν κάθε άλλο στοιχείο και έτσι μπορεί να δώσει περισσότερες ενώσεις από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο. Στις ενώσεις αυτές συγκαταλέγονται το νερό, η αμμωνία, τα οξέα, τα υδροξείδια, διάφοροι υδρογονάνθρακες όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο και μεγάλο ποσοστό των υπόλοιπων οργανικών ενώσεων.

Το υδρογόνο παρουσιάζει υψηλό ενδιαφέρον ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας, λόγω των ακόλουθων χαρακτηριστικών του:

- Έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους (120,7 kJ/gr)
- Συναντάται σε αφθονία στο σύμπαν (90% της μάζας του), σε συνδυασμό όμως με άλλα στοιχεία
- Το προϊόν της χρησιμοποίησής του (καύση ή ηλεκτροχημική μετατροπή) είναι νερό ή υδρατμοί
- Μπορεί να αποθηκευτεί ως αέριο, υγρό και στερεό
- Είναι δυνατή η μεταφορά του με αγωγούς, δεξαμενές, βυτιοφόρα
- Είναι φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς αν γίνει καύση με ατμοσφαιρικό αέρα σε υψηλές θερμοκρασίες παράγει αμελητέες ποσότητες NO_x

Από την άλλη μεριά, παρουσιάζει τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- *Αποθήκευση:* Δεδομένου του ότι το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης υπό ανάπτυξη περιλαμβάνουν δεξαμενές με αέριο υδρογόνο που συμπιέζεται μέχρι 10.000 lb/in², υγρό

υδρογόνο που ψύχεται σε -253°C σε μονωμένες δεξαμενές, και τη χημική ένωση υδρογόνου με ένα άλλο υλικό (όπως τα υδρίδια μετάλλων)

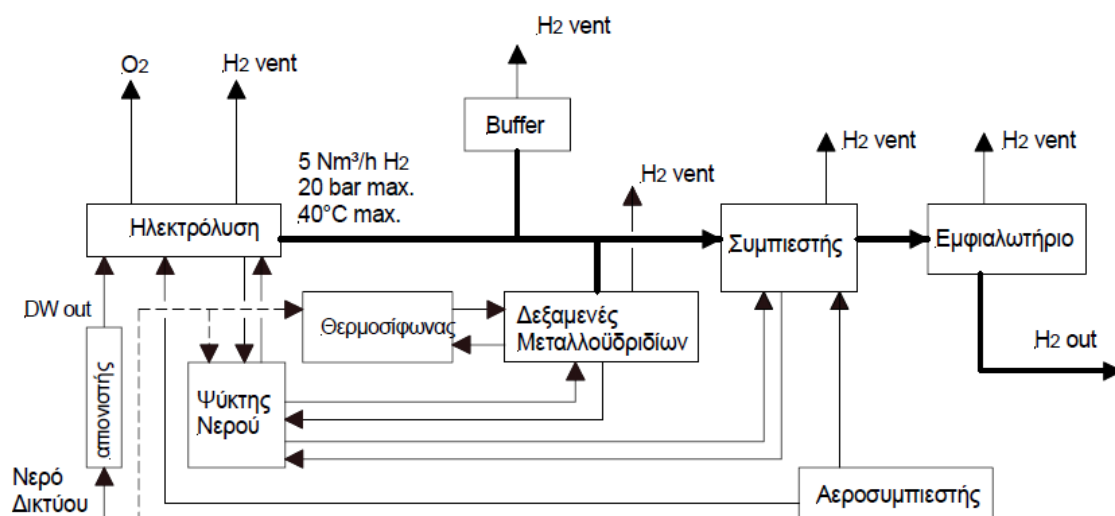
- Έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής του υδρογόνου, το οποίο θα περιλάμβανε δίκτυο αγωγών, υψηλής πίεσης trailers και δεξαμενές σε φορτηγά και πλοία
- Προέλευση της ενέργειας που δαπανάται για την παραγωγή του: Αν χρησιμοποιηθεί ενέργεια προερχόμενη από ανθρακούχα ορυκτά, το συνολικό περιβαλλοντολογικό όφελος είναι πρακτικά αρνητικό (συνυπολογίζοντας και την ενέργεια συμπίεσης/ διαχείρισης)

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- Ως αέριο
- Ως υγρό αν ψυχθεί με κρυοστατικό τρόπο σε θερμοκρασία μικρότερη των 20°K
- Θεωρητικά ως στερεό σε θερμοκρασία κάτω των 4.2°K
- Σε συνδυασμό με άλλα υλικά ως υδρίδιο (ένωση υδρογόνου)
- Ως υδρογονάνθρακας από τον οποίο μπορεί να παρασκευαστεί
- Ως μια άλλη χημική ουσία πλούσια σε υδρογόνο όπως η αμμωνία
- Ως αέριο που έχει προσροφηθεί πάνω σε ένα στερεό υλικό ή μέσα στα διάκενα ενός υλικού με μικροπόρους

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον σήμερα εστιάζεται στην παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ και οι επικρατέστερες τεχνολογίες συνοψίζονται ακολούθως:

- Ηλεκτρόλυση του νερού με την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από την αιολική, υδροηλεκτρική, ηλιακή, κυματική ή γεωθερμική ενέργεια ή από την καύση της βιομάζας
- Αναμόρφωση καυσίμων που προέρχονται από βιομάζα, καθώς και αεριοποίηση ή πυρόλυση βιομάζας
- Βιολογικές και βιομηχανικές μέθοδοι όπως η βιοφωτόλυση και η ζύμωση
- Ηλιοθερμικές αντιδράσεις (θερμόλυση του νερού) με την αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας που προέρχεται από ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις
- Φωτοηλεκτροχημική παραγωγή μέσω της φωτοηλεκτρόλυσης



Σχήμα 3.8: Τμήματα εγκατάστασης παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου

Ένα απλό διάγραμμα μιας χημικής εγκατάστασης παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8. Η εγκατάσταση αποτελείται από τα παρακάτω επιμέρους τμήματα:

1. Τη μονάδα ηλεκτρόλυσης του νερού (Σχήμα 3.9)
2. Τις δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων
3. Μια συμβατική δεξαμενή υδρογόνου
4. Τον συμπιεστή υδρογόνου
5. Τον σταθμό πλήρωσης φιαλών
6. Το κλειστό σύστημα ψύξης νερού
7. Το σύστημα πεπιεσμένου αέρα



Σχήμα 3.9: Μονάδα ηλεκτρόλυσης 25 kW

Κεφάλαιο 4. Βιβλιογραφία.

1. Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, “Φωτοβολταϊκά συστήματα”, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2006
2. Κ. Καγκαράκης, “Φωτοβολταϊκή τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1992
3. G.M. Masters, “Renewable and efficient electric power systems”, John Wiley & Sons, New Jersey, 2004
4. F.A. Farret, M.G. Simões, “Integration of alternative sources of energy”, John Wiley & Sons, New Jersey, 2006
5. D. Linden, T.B. Teddy, “Handbook of batteries – 3rd edition”, McGraw-Hill, New York, 2002
6. A. Ter-Gazarian, “Energy storage for power systems”, IEE, London, UK, 1994
7. J.K. Kaldellis (Editor), “Stand-alone and hybrid wind energy systems – Technology, energy storage and applications”, CRC Press, UK, 2010
8. Ι. Κατσιγιαννης, “Βελτιστοποίηση Δομής και Οικονομική Αξιολόγηση Απομονωμένου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας που Βασίζεται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2008
9. Α.Γ. Τσικαλάκης, “Συμβολή στον προγραμματισμό Λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με Μεγάλη Διείσδυση Διεσπαρμένης και Ανανεώσιμης Παραγωγής και Συσκευών Αποθήκευσης”, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2008
10. ΚΑΠΕ, “Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ”, Αθήνα, 2001
11. Α. Σαγάνη, “Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας – Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009
12. Ε.Ι Βρεττός, “Ενεργειακή Προσομοίωση και Βέλτιστη Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ – Συσσωρευτών - Υδρογόνου”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010
13. Γ. Τσακαλούδης, “Μελέτη και εγκατάσταση αυτόνομου υβριδικού συστήματος”, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και εριβάλλοντος, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, 2014
14. Ε.Ε. Παλαιολούγκα, Π.Β. Φράγκου, “Η Οικονομία του Υδρογόνου”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009
15. Ε. Τσιούμπρη, “Συσσωρευτές στα Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012
16. Μ. Μαρκάτου, “Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος”, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2011
17. Energy Storage Association. Διαθέσιμο στο: <http://energystorage.org/>