



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

Γενικό Τμήμα

**ΠΜΣ «Ευφυής Διαχείριση Ανανεώσιμων
Ενεργειακών Συστημάτων»**

ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής
Ενέργειας**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Γκόνης Παναγιώτης

Όνοματεπώνυμο: Κάγιος Αντώνιος

ΧΑΛΚΙΔΑ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2021

Περίληψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας επικεντρώσαμε το ενδιαφέρον μας στις τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά ασχοληθήκαμε με την παγκόσμια παραγωγή ενέργειας και τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αφού αποτελούν τον προθάλαμο της αποθήκευσης ενέργειας.

Το μεγαλύτερο κομμάτι της εργασίας (τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο) μελετά τα υπάρχοντα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά είναι: αντλιοσταμείωση, πεπιεσμένος αέρας, σφόνδυλοι, θερμικά μέσα, υγροποίηση αέρα, συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια, χημικά μέσα.

Παράλληλα γίνεται αναφορά στους συσσωρευτές-μπαταρίες που αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή αποθήκευσης ενέργειας. Ταυτόχρονα, δίνουμε μεγάλη σημασία στους υδάτινους πόρους ως μορφές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στην τεχνολογία Power to Gas και στις κυψέλες καυσίμου. Τέλος γίνεται αναφορά στην Υπεραγωγίμη Αποθήκευση Ενέργειας.

Λέξεις Κλειδιά: Μπαταρίες, Αντλιοσταμείωση, Σφόνδυλοι, Κυψέλες Καυσίμου

Abstract

In the context of this dissertation we focused our interest on electricity storage technologies. We first dealt with global energy production and electricity systems as they are the vestibule of energy storage.

Most of the work (chapters three and four) studies the existing electricity storage systems. These are: pump storage, compressed air, flywheels, thermal media, air liquefaction, concentrated solar energy, chemical media.

At the same time, reference is made to batteries, which are the most common form of energy storage. At the same time, we attach great importance to water resources as forms of electricity storage, as well as to Power to Gas technology and fuel cells. Finally, reference is made to Superconducting Energy Storage.

KeyWords: Batteries, Pump storage, Flywheels, Fuel Cells

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	σελ.8
2. Αποθήκευση Ενέργειας.....	σελ.9
2.1 Εισαγωγή στην Παγκόσμια Παραγωγή Ενέργειας.....	σελ.9
2.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	σελ.10
2.3 Γενικά περί αποθήκευσης Ενέργειας.....	σελ.11
3. Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	σελ.14
3.1 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας με Αντλιοσταμείωση.....	σελ.14
3.2 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα.....	σελ.17
3.3 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας σε σφονδύλους.....	σελ.19
3.4 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας με θερμικά μέσα.....	σελ.20
3.4.1 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας με άντληση θερμότητας.....	σελ.20
3.4.2 Αποθήκευση Ενέργειας με υγροποίηση αέρα.....	σελ.21
3.4.3 Αποθήκευση ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια.....	σελ.22
3.5 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας με χημικά μέσα (H ₂ και SNG).....	σελ.24
3.6 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας με ηλεκτροχημικά μέσα-συσσωρευτές.....	σελ.26
3.6.1 Δευτερογενείς Συσσωρευτές.....	σελ.26
3.6.2 Μπαταρίες Ροής.....	σελ.30
3.7 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας με ηλεκτρικά μέσα.....	σελ.31
4. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας και έξυπνα πλέγματα.....	σελ.33
4.1 Εισαγωγή-Ιστορική Αναδρομή	σελ.33
4.2 Τεχνολογίες	σελ.36
5. Συμπεράσματα-Σχολιασμός-Περαιτέρω Έρευνα.....	σελ.40
Βιβλιογραφία-Αναφορές.....	σελ.42

1. Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα διαδραματίσουν ακόμη μεγαλύτερο ρόλο ως πηγή ενέργειας στο μέλλον. Αυτό θα οδηγήσει σε μείωση της καύσης ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας με τη σχετική μείωση του CO₂. Θα μειωθεί επίσης η υπερθέρμανση του πλανήτη και η εξάρτηση από τις πρωτογενείς πηγές ενέργειας των ορυκτών καυσίμων.

Τα ποσοστά παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως ο άνεμος ή ο ήλιος, δεν συμφωνούν με το ρυθμό κατανάλωσης. Η αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιείται για την επίτευξη χρονικής αποσύνδεσης μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας.

Με την αυξανόμενη ποσότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, απαιτείται όλο και περισσότερη αποθήκευση ενέργειας για την αντιστάθμιση της κυμαινόμενης ισχύος που παράγεται από την αιολική ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά. Μόνο αυτό θα εξασφαλίσει σταθερή τροφοδοσία. Αυτές οι προκλήσεις μπορούν να ξεπεραστούν μέσω μιας συνδυασμένης διαχείρισης ενέργειας, επέκτασης δικτύου ή μέσω της χρήσης αποθήκευσης ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας μπορεί πάντα να προσαρμόζεται ουσιαστικά στις τρέχουσες απαιτήσεις ισχύος κατά την παραγωγή. Αυτή η προσαρμογή δεν είναι δυνατή με σταθμούς αιολικής ή ηλιακής ενέργειας. Στην περίπτωση υψηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η υψηλότερη παραγωγική ποσότητα ισχύος περιορίζεται από τη στιγμιαία ταχύτητα ανέμου ή το φως του ήλιου. Αντίθετα, η μείωση της εξόδου ηλεκτρικής ισχύος θα ήταν σπατάλη της διαθέσιμης ισχύος. Το αποτέλεσμα θα ήταν η κακή χρήση του σταθμού παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

2. Αποθήκευση Ενέργειας

2.1 Εισαγωγή στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας

Οι ενεργειακές ανάγκες αυξάνονται συνεχώς σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ τα αποθέματα από συμβατικές πηγές ενέργειας είναι πεπερασμένα και αναλώσιμα, τουλάχιστον όσον αφορά τις περιοχές εκμετάλλευσης και τις χαρτογραφημένες περιοχές. Ο εντοπισμός και η εκμετάλλευση νέων πηγών συμβατικής ενέργειας καθίσταται ολοένα και πιο δύσκολος λόγω των άγνωστων αποθεμάτων άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου ως αποτέλεσμα είτε του μεγάλου βάθους του υπεδάφους και των ωκεανών είτε της δαπανηρής και επικίνδυνης διαδικασίας εξόρυξης [1].

Η σύγχρονη κοινωνία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση των ενεργειακών πόρων και η ενέργεια έχει χαρακτηριστεί ακόμη και η αιτία της τεχνολογικής και οικονομικής ανάπτυξης. Το σημερινό παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα κυριαρχείται από ορυκτά καύσιμα και πάσχει από περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την ατμοσφαιρική ρύπανση σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο καθώς και από θέματα ενεργειακής ασφάλειας, ενώ ταυτόχρονα 3 δισεκατομμύρια άνθρωποι εξακολουθούν να μην έχουν πρόσβαση στη σύγχρονη ενέργεια Υψηλές. Ως λύση σε αυτά τα ζητήματα προτείνεται συνήθως ένας μετασχηματισμός του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της μετάβασης από την τρέχουσα κατάσταση σε ένα ενεργειακό σύστημα βασισμένο σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να εξαχθούν από διάφορες πηγές όπως ο άνεμος, τα ποτάμια, τα κύματα των ωκεανών, η βιομάζα από δάση ή η γεωργία, η γεωθερμική ενέργεια από το εσωτερικό της Γης ή απευθείας από τον Ήλιο. Ωστόσο, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια θεωρείται συνήθως ότι έχουν το υψηλότερο τεχνικό δυναμικό, ειδικά σε ανεπτυγμένες χώρες όπου οι «παλαιές» ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια, πλησιάζουν τη μέγιστη εκμετάλλευση. Ορισμένοι πιστεύουν ότι η βιομάζα θα είναι επίσης σημαντική στο μέλλον και μια οικονομία «βιο-βασισμένη» έχει προταθεί ως εναλλακτική λύση έναντι της τρέχουσας με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Ενώ ορισμένοι προτείνουν ότι μια μετάβαση σε ένα παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα που κυριαρχείται από την αιολική και την ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να επιτευχθεί σε μερικές δεκαετίες, άλλοι υποστηρίζουν ότι μια τέτοια μετάβαση θα διαρκέσει πολύ περισσότερο. Ένα πιθανό ζήτημα που θα μπορούσε να περιορίσει μια τέτοια μετάβαση είναι ότι για να αναπτυχθούν αυτές οι τεχνολογίες σε κλίμακα επαρκή για τον μετασχηματισμό ολόκληρου του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος, θα απαιτηθούν μεγάλες ποσότητες ευρέος φάσματος πόρων, συμπεριλαμβανομένων των μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων. Όχι μόνο μια πλήρης μετάβαση του ενεργειακού συστήματος

απαιτεί την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα μετατρέπουν την ανανεώσιμη ενέργεια σε χρήσιμη μορφή, αλλά θα απαιτούν επίσης αλλαγές στη μεταφορά ενεργειακών φορέων και τη χρήση ενεργειακών υπηρεσιών, η οποία απαιτεί την ανάπτυξη πολλών διαφορετικών ενεργειακών τεχνολογιών. Έχει υποστηριχθεί ότι πολλές από αυτές τις τεχνολογίες είναι ουσιαστικά πιο έντονες από μέταλλο από τις τρέχουσες κοινές τεχνολογίες και η μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα βασισμένο σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα απαιτούσε σημαντική αναβάθμιση των δυνατοτήτων εξόρυξης πολλών διαφορετικών μετάλλων. Έχει επισημανθεί ότι θα χρειαστούν προσθήκες μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων για τη χρήση σημαντικών ποσοτήτων αιολικής και ηλιακής ενέργειας από βέλτιστες τοποθεσίες, οι οποίες θα απαιτούσαν μεγάλες ποσότητες μετάλλων όπως ο χαλκός. Άλλοι υποστηρίζουν ότι η χρήση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας θα απαιτούσε αποθήκευση ενέργειας για την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης. Δεδομένου ότι όλες αυτές οι τεχνολογίες κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά, υπάρχουν πολλοί δυνητικά ενδιαφέροντες φυσικοί πόροι για διερεύνηση στο πλαίσιο των ενεργειακών μεταβάσεων. Μερικά παραδείγματα υλικών και πόρων που έχουν αναφερθεί ως σημαντικά είναι ο χάλυβας (σιδηρομετάλλευμα) και ο χαλκός για ανεμογεννήτριες και οι υποδομές και το λίθιο για αποθήκευση ενέργειας και ηλεκτρικά οχήματα. Επίσης, η αύξηση των μη διατροφικών καλλιεργειών για βιοκαύσιμα που χρειάζονται λίπασμα φωσφόρου, καθώς και η αυξημένη χρήση μπαταριών που περιέχουν φωσφορικά άλατα για ηλεκτρικά οχήματα, θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά τη ζήτηση για φωσφορικά πετρώματα [2].



Εικόνα 2.1 Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως ηλεκτρικό δίκτυο ορίζεται ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο που χρησιμοποιείται για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς

στους καταναλωτές και το οποίο αποτελείται από τρία μέρη, την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει χώρα σε εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, φυσικό αέριο, βιομάζα) ή τον αέρα, το νερό, τα πυρηνικά καύσιμα και τον ήλιο [3].

Προκειμένου να γίνει δυνατή η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ειδικά κατασκευασμένες γραμμές μεταφοράς που μεταφέρουν την ενέργεια από τα εργοστάσια στα κέντρα ζήτησης. Το τελευταίο στάδιο είναι η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά το στάδιο αυτό η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει στους υποσταθμούς όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης με τη βοήθεια μετασχηματιστών. Μέσω των γραμμών διανομής και με περαιτέρω υποβιβασμό της τάσης, η ηλεκτρική ενέργεια είναι πλέον κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί από τα οικιακά δίκτυα.

Γίνεται λοιπόν εμφανής η ανάγκη της σχεδόν ταυτόχρονης με την παραγωγή, κατανάλωσής της, ή η προσπάθεια αποθήκευσής της, αφού βέβαια μετατραπεί πρώτα σε άλλες μορφές ενέργειας (π.χ. χημική). Η ανάγκη αυτή, άμεσης κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας, οδήγησε τις διάφορες χώρες στη δημιουργία ενός παγκοσμίου πλέγματος ηλεκτρικών δικτύων, το οποίο καθιστά δυνατή την εύκολη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το σημείο παραγωγής της, στο σημείο κατανάλωσης. Σήμερα τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε), έχουν μεγάλη πολυπλοκότητα καθώς αποτελούνται από χιλιάδες ζυγούς και εκατοντάδες γεννήτριες. Γεννάται λοιπόν η ανάγκη για καλύτερη αξιοποίηση, χρήση και εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ισχύος, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα αξιοπιστία και ασφάλεια τροφοδοσίας [4].

2.3 Γενικά περί αποθήκευσης ενέργειας

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι η αποθήκευση διαφορετικών μορφών ενέργειας για μια χρονική περίοδο. Οι νέες τεχνολογίες παρέχουν αποτελεσματικά και φιλικά προς το περιβάλλον συστήματα αποθήκευσης. Επί του παρόντος υπάρχουν 140 GW μεγάλης κλίμακας ηλεκτρικού, συνδεδεμένου δικτύου, αποθήκευσης ενέργειας εγκατεστημένα παγκοσμίως. Έως και το 99% αυτού αποτελείται από τεχνολογίες Pumped Hydroelectric Energy Storage (PHES), καθιστώντας το το μεγαλύτερο είδος αποθήκευσης ενέργειας. Το υπόλοιπο 1% αποτελείται κυρίως από ένα μείγμα αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (CAES), Flywheel Energy Storage (FES) και Electrochemical Energy Storage (EES) με τη μορφή μπαταριών θείου νατρίου (Na / S) και Lithium-Ion (Li- I) μπαταρίες.

Από οικονομική άποψη, η αποθήκευση ενέργειας γίνεται όλο και πιο σημαντική. Η αποθήκευση ενέργειας είναι επίσης πολύ ελκυστική για την εξισορρόπηση του φορτίου στο ηλεκτρικό δίκτυο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να

ελαχιστοποιήσει τις διακυμάνσεις στη συχνότητα και έτσι να αυξήσει την ευελιξία και την αξιοπιστία του πλέγματος. Η χρήση ενεργειακών αποθηκών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε τοποθεσίες που αποτελούνται από μεγάλη ποσότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως αιολικά και ηλιακά αγροκτήματα, καθώς μπορεί να επιτρέψει τη βελτιστοποίηση της παραγωγής τους και να έχει μια πιο σταθερή παροχή, παρόλο που η ανανεώσιμη πηγή είναι διαλείπουσα. Η ενέργεια αποθηκεύεται επίσης ως θερμική ενέργεια για εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης. Ο πάγος μπορεί να αποθηκευτεί εποχικά σε απομονωμένα δωμάτια για χρήση σε κλιματισμό σε ζεστές περιόδους του έτους και η θερμότητα από τον καλοκαιρινό ήλιο μπορεί να αποθηκευτεί για ψυχρότερες περιόδους του έτους. Η απόβλητη θερμότητα από εργοστάσια μπορεί επίσης να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί τόσο για παραγωγή ηλεκτρισμού όσο και για θέρμανση κτιρίων. Η αποθήκευση και η επαναχρησιμοποίηση των αποβλήτων μπορεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να συμβάλει σε μια πιο βιώσιμη ανάπτυξη [5].

Με βάση τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν ως:

(Α) Αποθήκευση Ηλεκτρισμού

1. Δυναμική Ενέργεια

1.1 Άντληση νερού (pumped hydro storage)

1.2 Συμπιεσμένος αέρας (compressed gas)

1.3 Ελατήρια (springs)

2. Κινητική Ενέργεια

2.1 Σφόνδυλοι (flywheels)

3. Χημική Ενέργεια

3.1 Συνθετικά καύσιμα

3.2 Ηλεκτροχημικές ενεργειακές πηγές (συσσωρευτές – batteries, υδρογόνο υγρό/ή αέριο, στοιχεία καυσίμων – fuel cells)

4. Αποθήκευση ηλεκτρικής και μαγνητικής ενέργειας

4.1 Μαγνητικά πεδία (υπεραγώγιμα πηνία εμβαπτισμένα σε υγρό ήλιο υπό κενό – super conducting magnetic energy storage, προβληματική η διατήρηση των χαμηλών θερμοκρασιών)

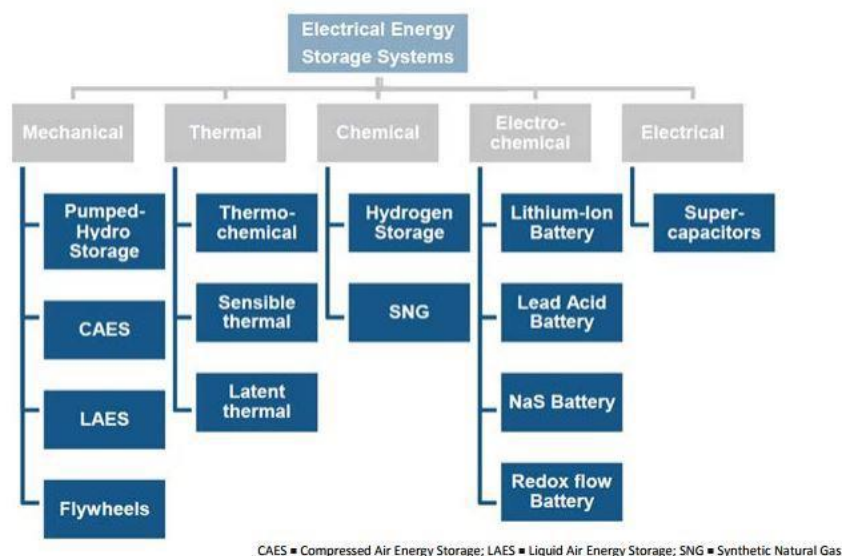
4.2 Ηλεκτρικά πεδία (υπερ-πυκνωτές από άνθρακα κ.α – advanced electrochemical capacitor)

(B) Αποθήκευση Θερμότητας

1. Θερμό νερό (βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη αποθήκευση)
2. Θερμά στερεά
3. Τήξη ορισμένων στερεών (λανθάνουσα θερμότητα τήξης)

3. Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί με τη χρήση διαφόρων ειδών τεχνολογιών, όπως είναι η αποθήκευση σε μορφή μηχανικής, θερμικής, χημικής, ηλεκτροχημικής και ηλεκτρικής ενέργειας.

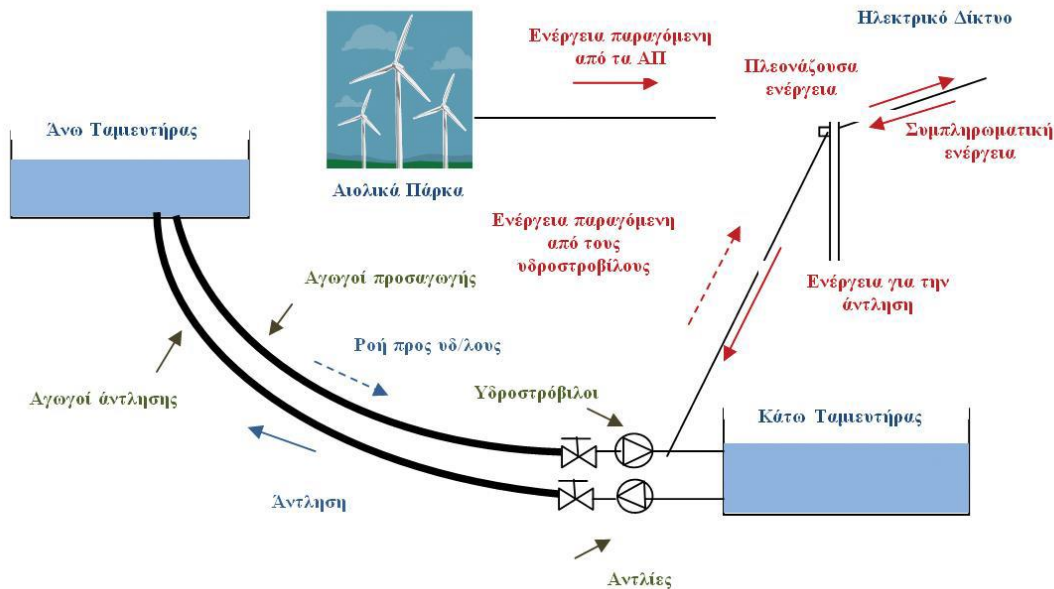


Εικόνα 3.1: Μορφές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [πηγή: European Commission (2017), Energy Storage – the role of electricity, Commission Staff Working Document]

Κάθε διαθέσιμη μορφή τεχνολογίας από αυτές παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όσον αφορά τα κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει μια τεχνολογία αποθήκευσης, όπως είναι ο συνδυασμός ισχύος και χωρητικότητας, το κόστος, η απόδοση και άλλα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των διάφορων μεθόδων αποθήκευσης.

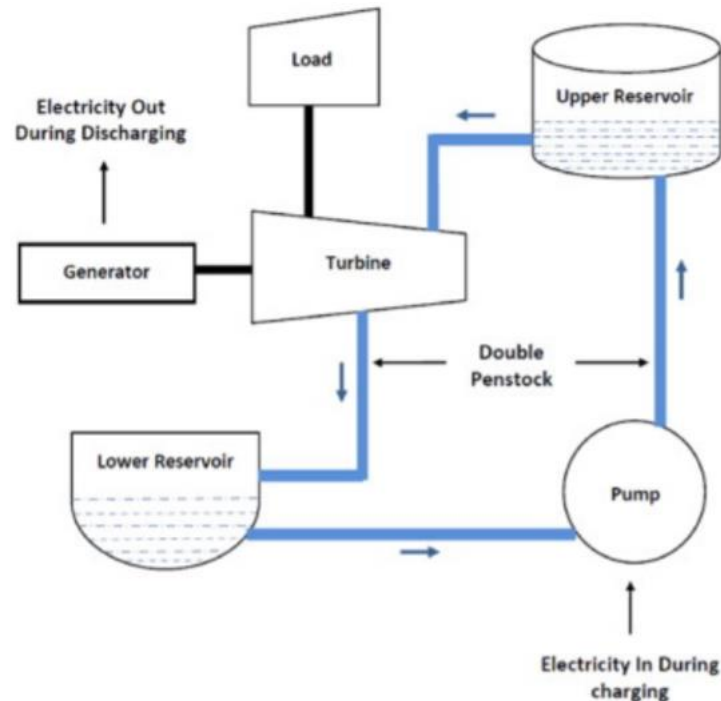
3.1 Αποθήκευση ηλεκτρικής Ενέργειας με αντλιοσταμείωση

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με αντλία υδροηλεκτρικής ενέργειας (PHES) αποτελείται από δύο δεξαμενές νερού με σημαντική διαφορά ύψους μεταξύ της κάτω και της άνω δεξαμενής. Όταν η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας υπερβαίνει τη ζήτηση, οι αντλίες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά (αντλία) του νερού από την κάτω δεξαμενή στην άνω δεξαμενή, αυξάνοντας έτσι την πιθανή ενέργεια του νερού. Όταν η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας υπερβαίνει την προσφορά, η διαδικασία αντιστρέφεται. Στη συνέχεια, η πιθανή ενέργεια απελευθερώνεται από το νερό στην άνω δεξαμενή επιτρέποντάς της να ρέει πίσω στην κάτω δεξαμενή. [6].



Εικόνα 3.2α: Σχηματική απεικόνιση συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με αντλιοσταμείωση [πηγή: Shafiqur Rehman et al. (2015)]

Το PHES έχει σχετικά χαμηλό ενεργειακό κόστος, πολύ υψηλή χωρητικότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής. Άλλα χαρακτηριστικά του PHES είναι ο σύντομος χρόνος εκκίνησης και η ευελιξία στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, οι δεξαμενές υδροηλεκτρικής ενέργειας, τόσο συμβατικές όσο και PHES, είναι σήμερα ο κύριος τρόπος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, που αποτελείται από το 99% της παγκόσμιας μεγάλης κλίμακας ηλεκτρικής χωρητικότητας αποθήκευσης. Οι συμβατικοί υδροηλεκτρικοί σταθμοί με δεξαμενές περιορίζονται στην παραγωγική τους ικανότητα λόγω υδρολογικών περιορισμών όπως: βροχοπτώσεις, εποχιακός καιρός, ροή ρεύματος, περιορισμοί σε δεξαμενές κ.λπ. Τα αντλημένα υδροηλεκτρικά συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί από το 1890 και μπορούν να ξεπεράσουν μερικούς από αυτούς τους περιορισμούς συνδέοντας σε μια ηλιακή ή αιολική φάρμα και χρησιμοποιώντας υπερβολική ενέργεια για την άντληση νερού στην άνω δεξαμενή, βελτιστοποιώντας έτσι τη χρήση τέτοιων διαλείπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.



Εικόνα 3.2β: Συνδυασμός Ανεμογεννήτριας με Σύστημα Αποθήκευσης Υδροηλεκτρικής Ενέργειας με Αντλιοσταμείωση

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζουμε τα τεχνικά χαρακτηριστικά που μπορεί να έχει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με αντλιοσταμείωση:

Ισχύς [MW]	450-3000
Χωρητικότητα Αποθήκευσης [MWh]	<126000
Διάρκεια Αποθήκευσης	Μέρες έως και Μήνες
Χρόνος Ζωής [Κύκλοι]	12800-33000
Αναμενόμενη Διάρκεια Ζωής [Έτη]	30-60
Κόστος Ενέργειας [Ευρώ/kWh]	0-23
Κόστος Ισχύος [Ευρώ/kW]	600-2000
Αρχικό Κόστος Εγκατάστασης [Ευρώ/kW]	500-4600

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας με Αντλιοσταμείωση

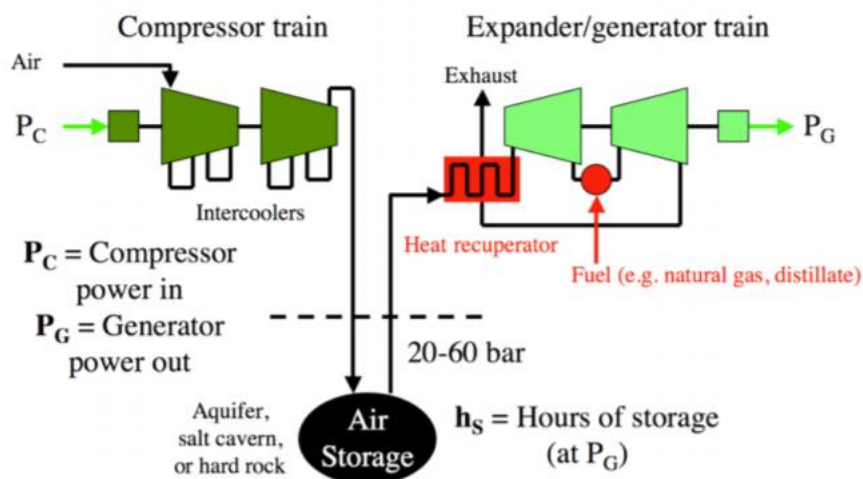
3.2 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα

Στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας συμπιεσμένου αέρα (CAES), ο αέρας συμπιέζεται και αποθηκεύεται υπό υψηλή πίεση σε υπόγεια σπήλαια. Το CAES είναι μια εναλλακτική λύση για το αντλούμενο υδροηλεκτρικό, δεδομένου ότι έχει σχετικά υψηλή ισχύ εξόδου και ικανότητα αποθήκευσης. Ωστόσο, με το CAES, αντί να αντλείται νερό σε μια άνω δεξαμενή όταν η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή, ο ατμοσφαιρικός αέρας συμπιέζεται και αποθηκεύεται σε υπόγειες εγκαταστάσεις υπό υψηλή πίεση. Όταν η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι υψηλή, ο αποθηκευμένος αέρας θερμαίνεται και επεκτείνεται και οδηγείται μέσω ενός στροβίλου που οδηγεί μια γεννήτρια, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 3.3α: Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα [πηγή: T. Hino & A. Lejeune (2012)]

CAES system



Εικόνα 3.3β: Σχηματικό Διάγραμμα ενός Συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας με Συμπιεσμένο Αέρα

Όταν απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα, ο πεπιεσμένος αέρας θερμαίνεται και διαστέλλεται, κινώντας έναν στρόβιλο διαστολής ο οποίος οδηγεί μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το CAES υποστηρίζει διάφορες εφαρμογές στο δίκτυο, όπως μετατόπιση φορτίου στις ώρες αιχμής, αποθήκευση ενέργειας για μεγάλες χρονικές περιόδους και σταθεροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου. Προς το παρόν υπάρχουν μόνο δύο μονάδες CAES στον κόσμο, ένας σταθμός παραγωγής ενέργειας 290 MW και 580 MWh στο Huntorf της Γερμανίας και ένας σταθμός 110 MW στην Αλαμπάμα των ΗΠΑ. Αυτά τα φυτά είναι μοναδικά στον κόσμο σήμερα, αλλά υπάρχουν και άλλα που αναπτύσσονται. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για ισχύ και χωρητικότητα στον Πίνακα 2 αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο εργοστάσιο που λειτουργεί επί του παρόντος, αν και η έρευνα δείχνει ότι τόσο η ισχύς όσο και η χωρητικότητα του CAES μπορούν να αυξηθούν. Οι τεχνολογικά διαθέσιμοι τύποι συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα είναι [7]:

- 1) Διαβατικοί Σταθμοί CAES
- 2) Αδιαβατικοί Σταθμοί CAES
- 3) Προηγμένοι Αδιαβατικοί Σταθμοί CAES
- 4) Ισοθερμικοί Σταθμοί CAES

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά της εν' λόγω τεχνολογίας:

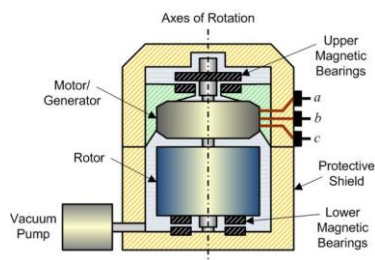
Ισχύς [MW]	<290
Χωρητικότητα Αποθήκευσης [MWh]	<580
Διάρκεια Αποθήκευσης	Ημέρες-Μήνες
Χρόνος Ζωής [Κύκλοι]	8000-17000
Αναμενόμενη Διάρκεια Ζωής [Έτη]	20-40
Κόστος Ενέργειας [Ευρώ/kWh]	2-140
Κόστος Ισχύος [Ευρώ/kW]	400-800
Αρχικό Κόστος Εγκατάστασης [Ευρώ/kW]	500-1500

Πίνακας 3.2 Βασικά Χαρακτηριστικά Τεχνολογίας Αποθήκευσης με Συμπιεσμένο Αέρα

Ωστόσο, αποτρεπτικός παράγοντας για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων μπορεί να είναι το κόστος, τόσο κατασκευής όσο και λειτουργίας. Σύμφωνα με τους Lund & Salgi [7], τέτοιου είδους σταθμοί αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να λειτουργήσουν ανταγωνιστικά σε σχέση με τις άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες, μόνο αν λειτουργήσουν ταυτόχρονα στην ημερήσια και στη ρυθμιστική αγορά στη Σκανδιναβική Αγορά Ενέργειας, και χαρακτηρίζονται ως επενδύσεις υψηλού ρίσκου.

3.3 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε σφονδύλους (flywheels)

Ο σφόνδυλος είναι μια μηχανική συσκευή, συνήθως κατασκευασμένη από χάλυβα, η οποία επιτρέπει την αποθήκευση περιστροφικής κινητικής ενέργειας. Η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής του σφονδύλου. Οι παραδοσιακοί σφόνδυλοι περιορίζονται γενικά σε ταχύτητα περιστροφής μερικών χιλιάδων στροφών ανά λεπτό (RPM) λόγω ρουλεμάν και υλικών. Τα σύγχρονα συστήματα σφονδύλου κατασκευάζονται από ανθρακονήματα και χρησιμοποιούν μαγνητικά έδρανα και κενό για να ελαχιστοποιούν την τριβή και την οπισθέλκηση. Αυτοί οι σφόνδυλοι μπορούν να φθάσουν σε ταχύτητες περιστροφής έως και 60.000 σ.α.λ. που αυξάνουν σημαντικά την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας και την απόδοση.



Εικόνα 3.4 Σύστημα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Σφονδύλους [πηγή: K. Oshimo et al. (1999)]

Τα συστήματα Flywheel Energy Storage (FES) μπορούν να είναι πολύ ευεργετικά σε διάφορους τομείς, μεταξύ των οποίων βελτιώνεται το ηλεκτρικό

δίκτυο παρέχοντας αυξημένη αξιοπιστία και ευελιξία. Οι σφόνδυλοι μπορούν να φορτιστούν από διαλείπουσες πηγές ενέργειας και να παρέχουν σταθερότερη ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Είναι επίσης σε θέση να αντιδρούν άμεσα σε αλλαγές στο πλέγμα που τις καθιστούν ιδανικές για ρύθμιση συχνότητας. Μερικά πλεονεκτήματα του FES, είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής και η υψηλή ειδική ισχύς. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για αξιόπιστη ρύθμιση συχνότητας. Άλλα πλεονεκτήματα είναι αμελητέες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και χαμηλή συντήρηση. Μερικές από τις αρνητικές πτυχές με τους σφόνδουλους είναι η σχετικά μικρή περίοδος αποθήκευσης και η υψηλή τιμή ανά κιλοβατώρα. Λόγω αυτού, τα FES χρησιμοποιούνται συχνότερα για σταθεροποίηση δικτύου και σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα αντί για αποθήκευση ενέργειας για μεγάλες χρονικές περιόδους. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας αποθήκευσης με σφονδύλους:

Ισχύς [MW]	<20
Χωρητικότητα Αποθήκευσης [MWh]	<5
Διάρκεια Αποθήκευσης	Ώρες-Ημέρες
Χρόνος Ζωής [Κύκλοι]	20000-175000
Αναμενόμενη Διάρκεια Ζωής [Έτη]	15-20
Κόστος Ενέργειας [Ευρώ/kWh]	250-400
Κόστος Ισχύος [Ευρώ/kW]	230-150000
Αρχικό Κόστος Εγκατάστασης [Ευρώ/kW]	130-500

Πίνακας 3.3: Βασικά Χαρακτηριστικά Τεχνολογίας Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας με Σφονδύλους

3.4 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με θερμικά μέσα

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας (TES) περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές τεχνολογίες. Η θερμική ενέργεια μπορεί να εναποτεθεί ως λογική θερμότητα, λανθάνουσα θερμότητα και χημική ενέργεια χρησιμοποιώντας χημικές αντιδράσεις. Η επιλογή της μεθόδου αποθήκευσης που χρησιμοποιείται εξαρτάται από την εφαρμογή θέρμανσης ή ψύξης και την πηγή της θερμικής ενέργειας. Το TES μεταφέρει θερμότητα ή κρύο στο μέσο αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της περιόδου φόρτισης και απελευθερώνει τη θερμότητα ή το κρύο κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Μπορεί πρακτικά να εφαρμοστεί π.χ. ηλιακά εργοστάσια ή σε βιομηχανικές διεργασίες π.χ. αποθήκευση απορριμμάτων θερμότητας για περαιτέρω χρήση. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε οικιστικές και εμπορικές εγκαταστάσεις.

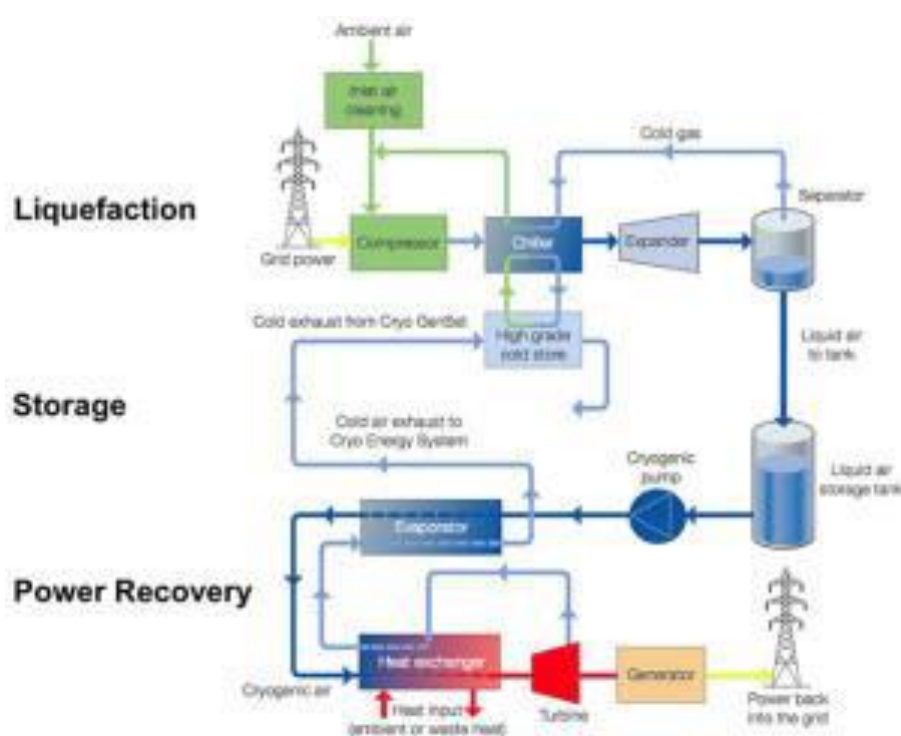
3.4.1. Αποθήκευση ενέργειας με άντληση θερμότητας (PHES)

Η ευαίσθητη αποθήκευση θερμότητας (SHS) βασίζεται στην αποθήκευση ενέργειας με ψύξη ή θέρμανση ενός υγρού ή ενός στερεού μέσου αποθήκευσης όπως νερό, άμμος, βράχοι και λιωμένα άλατα, όπου το νερό είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη επιλογή. Αυτός ο τύπος αποθήκευσης θερμότητας χρησιμοποιείται συχνά σε ηλιακούς πύργους και παραβολικούς συλλέκτες. Για

αυτήν την εφαρμογή του SHS, τα πιο κοινά υλικά αποθήκευσης είναι λιωμένα άλατα και ορυκτέλαια, αντίστοιχα.

3.4.2. Αποθήκευση ενέργειας με υγροποίηση αέρα

Τα συστήματα λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας (LHS) βασίζονται σε υλικά αλλαγής φάσης (PCMs), όπου η μετατροπή στερεού-υγρού θεωρείται ως η πιο αποτελεσματική μετατροπή σε σύγκριση με το υγρό αέριο και το στερεό. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη μεταβολή του όγκου στη μετάβαση υγρού-αερίου και στη χαμηλή τιμή της λανθάνουσας θερμότητας κατά τη μετάβαση στερεού-στερεού. Σε σύγκριση με το SHS, το LHS επιτρέπει μεγαλύτερη ειδική ενέργεια και ελεγχόμενες θερμοκρασίες εκφόρτισης. Τα PCM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βραχυπρόθεσμη (ωριαία) αποθήκευση καθώς και για μακροχρόνια (μηνιαία) αποθήκευση. Τα PCM ταξινομούνται σε σχέση με τη θερμοκρασία τήξης τους και μπορούν να χωριστούν σε δύο κύρια τμήματα: χαμηλή θερμοκρασία (<200 ° C) και υψηλή θερμοκρασία (> 200 ° C).



Εικόνα 3.5: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υγροποίηση αέρα [πηγή: Energy Storage Association]

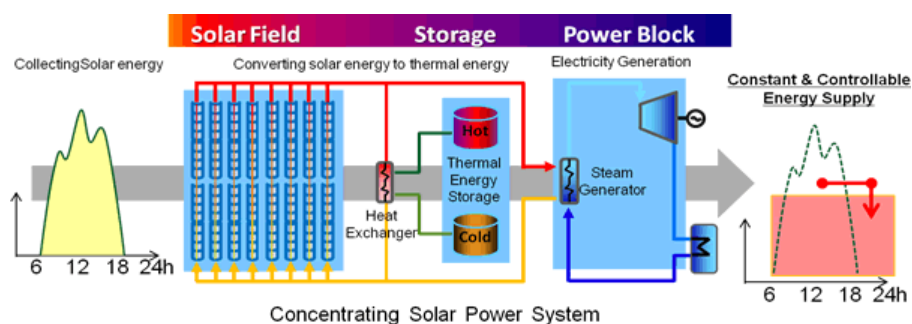
Διάφορα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση ενέργειας ως λανθάνουσα θερμότητα. Μερικά κοινά υλικά που χρησιμοποιούνται ως PCM είναι η παραφίνη, ο πάγος και η ερυθριτόλη. Ο πάγος είναι ένα παράδειγμα τρόπου αποθήκευσης κρύου που χρησιμοποιείται συνήθως και χρησιμοποιείται εδώ και πολύ καιρό. Μπορεί να βρεθεί σε συστήματα ψύξης σε σχολεία, νοσοκομεία, κτίρια γραφείων και σουπερ μάρκετ. Τα υλικά που

χρησιμοποιούνται έχουν διαφορετικές ιδιότητες που τους επιτρέπουν να αποθηκεύουν διαφορετική ποσότητα θερμότητας ανά μονάδα μάζας ή όγκο. Αυτός ο τύπος αποθήκευσης ενέργειας μπορεί για παράδειγμα να εφαρμοστεί ως παθητικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης σε κτίρια. Εδώ ένα PCM ψύχεται και στερεοποιείται τη νύχτα και λιώνει κατά τη διάρκεια της ημέρας για να παράγει κρύο αέρα μέσω ενός συστήματος κλιματισμού. [9].

3.4.3 Αποθήκευση ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (Concentrated Solar Power)

Τα συστήματα συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση κάποιου υγρού μέσου, το οποίο αεριοποιείται και χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας θερμικής μηχανής και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια συγκεντρώνεται μέσω κάποιων κάτοπτρων και θερμαίνει το υγρό μέσο. Ανάλογα με το είδος των συλλεκτών υπάρχουν διαφορετικοί τύποι τέτοιων ηλιοθερμικών σταθμών με διαφορές στη θερμοκρασία λειτουργίας τους, την απόδοσή τους και το κόστος κατασκευής και λειτουργίας τους.

Το γεγονός ότι οι ηλιοθερμικοί σταθμοί λειτουργούν μόνο κατά τη διάρκεια της μέρας και όταν υπάρχει ικανοποιητική ηλιοφάνεια, κάνει απαραίτητη την εγκατάσταση κάποιου συστήματος αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας που αυτοί παράγουν για χρήση σε διαφορετικές στιγμές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει άμεση αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά αποθήκευση θερμικής ηλιακής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού.



Εικόνα 3.6: Θερμική αποθήκευση ενέργειας σε συγκεντρωμένους ηλιακούς σταθμούς [πηγή: Giovanni Perillo (2017)]

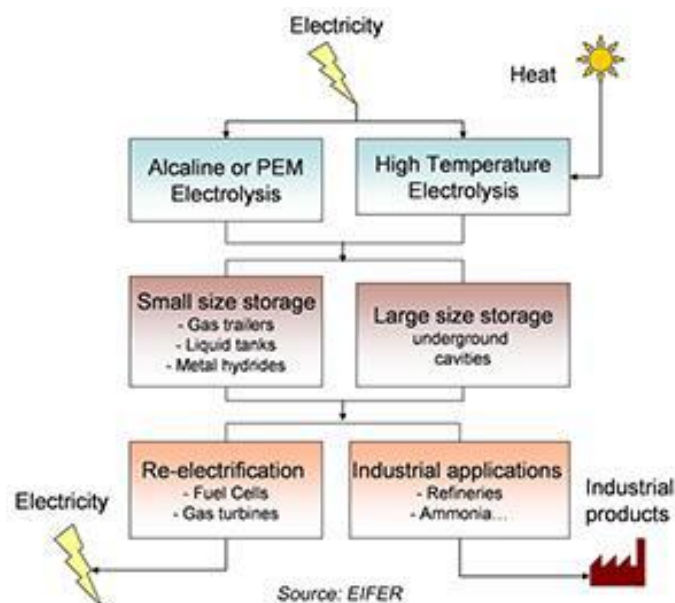
Η τεχνολογία των συγκεντρωμένων ηλιακών σταθμών είναι ήδη αρκετά ώριμοι, αφού οι σταθμοί που βρίσκονται σε λειτουργία μέχρι τώρα ξεπερνούν τους 100 σε όλο τον κόσμο. Χαρακτηριστικό είναι ότι περίπου το 50% από αυτούς εφαρμόζουν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Ωστόσο, οι χωρητικότητες

αποθήκευσης είναι ακόμα σε μικρά επίπεδα της τάξης της μιας ώρας. Προβλέπεται όμως ότι μελλοντικά θα μπορούν να τροφοδοτήσουν το σύστημα από την αποθηκευμένη τους ενέργεια μέχρι και 4 ώρες.

3.5. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χημικά μέσα (H₂ και SNG)

Η χημική αποθήκευση ενέργειας (CES) είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία και είναι ακόμη υπό ανάπτυξη για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Οι έρευνες δείχνουν ότι υπάρχει μεγάλη δυνατότητα αποθήκευσης υδρογόνου και υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για αυτήν την τεχνολογία.

Το Hydrogen Energy Storage (HES) είναι ένα σύστημα αποθήκευσης χημικής ενέργειας. Το HES επιτρέπει τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο με ηλεκτρόλυση, η οποία μπορεί να αποθηκευτεί και στη συνέχεια να ηλεκτροδοτηθεί. Το υδρογόνο μπορεί να ηλεκτριστεί εκ νέου σε κυψέλες καυσίμου με απόδοση μετ'επιστροφής έως και 50%. Επί του παρόντος υπάρχουν δύο διαφορετικές ώριμες τεχνολογίες για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο: Αλκαλική ηλεκτρόλυση και Proton Exchange Membrane (PEM). Αυτά χρησιμοποιούνται για μεγάλα κεντρικά και μικρότερα αποκεντρωμένα συστήματα αντίστοιχα και τα δύο έχουν μονόδρομη απόδοση 65-70%. Μια αναδυόμενη τεχνολογία είναι η ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας όπου τόσο ηλεκτρική ενέργεια όσο και θερμότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου, αυτή η τεχνολογία έχει πιθανή απόδοση έως και 90%.



Εικόνα 3.7 Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με υδρογόνο [πηγή: H. Lund & G. Salgi]

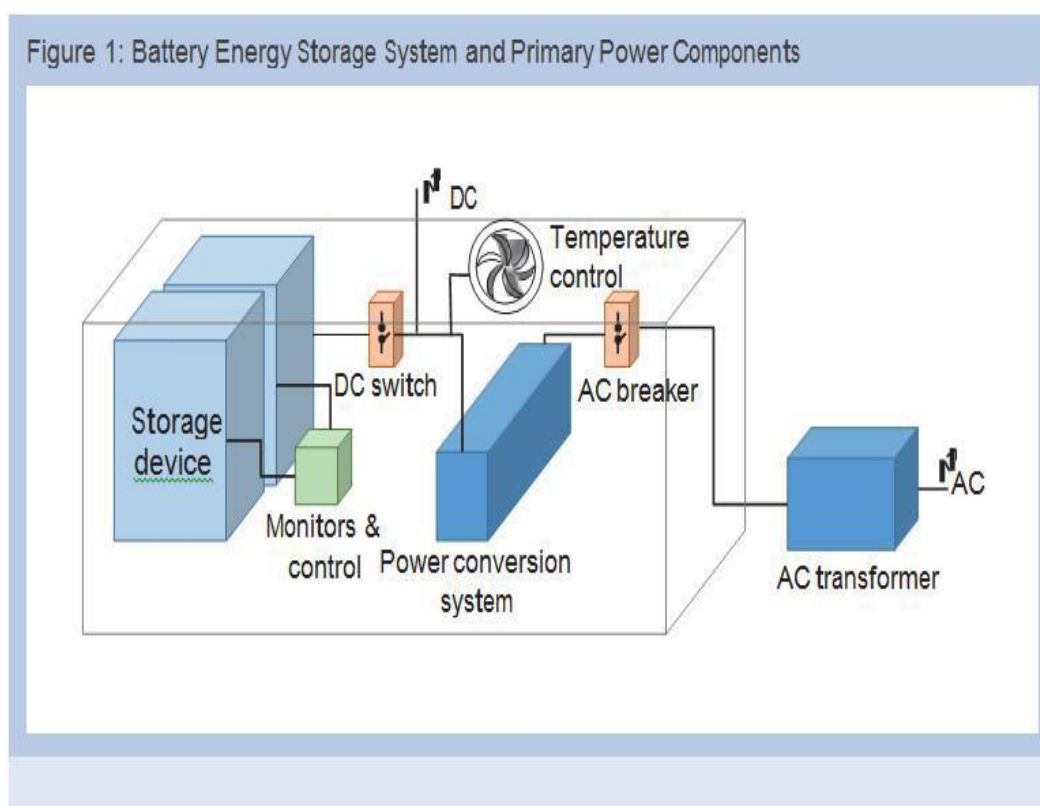
Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί είτε σε υγρή μορφή, άρα σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία, είτε σε αέρια μορφή που σημαίνει πολύ υψηλή πίεση. Σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπου απαιτείται υψηλή πυκνότητα, αποθηκεύεται σε υγρή μορφή, ενώ σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές αποθηκεύεται σε αέρια, η οποία είναι και η πιο οικονομική. Σε αέρια μορφή αποθηκεύεται συνήθως σε μεγάλους υπόγειους φυσικούς χώρους, όπως είναι παλιά σπήλαια, εξαντλημένα κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου και σπανιότερα σε τεχνητές δεξαμενές. Επομένως για

μεγάλες εφαρμογές υπάρχει ο περιορισμός της καταλληλότητας της τοποθεσίας εγκατάστασης.

Σύμφωνα με την Ένωση Αποθήκευσης Ενέργειας, προς το παρόν υπάρχουν δύο μεγάλες και τρεις μικρότερης κλίμακας σπηλιές αποθήκευσης υδρογόνου στον κόσμο. Οι μεγάλης κλίμακας βρίσκονται στο Τέξας των ΗΠΑ όπου ο μεγαλύτερος μπορεί να αποθηκεύσει πάνω από 100.000 MWh υδρογόνου. Τα μικρότερα βρίσκονται στο Teesside του Ηνωμένου Βασιλείου και μπορούν να αποθηκεύσουν 27.000 MWh το καθένα. Το υδρογόνο ως φορέας καθαρής ενέργειας θεωρείται ως πηγή καθαρής ενέργειας του μέλλοντος τόσο για αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας όσο και για τον τομέα των μεταφορών. Η απόδοση του HES είναι σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης, τόσο σε μικρή κλίμακα (μπαταρίες) όσο και σε μεγαλύτερη κλίμακα (PHES και CAES). Αλλά λόγω της πολύ υψηλής χωρητικότητας αποθήκευσης, το ενδιαφέρον της HES αυξάνεται. Η χωρητικότητα αποθήκευσης 100 GWh αντιστοιχεί στην ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από υδρογόνο αποθηκευμένο σε σπήλαιο αλατιού 500 000 m³ στα 200 bar [10].

3.6. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτροχημικά μέσα – συσσωρευτές

Η πρώτη γνωστή ηλεκτροχημική συσκευή κατασκευάστηκε πριν από περίπου 2000 χρόνια και αποτελείται από ηλεκτρόδια σιδήρου και χαλκού που εναιωρούνται εντός ενός φυσικού ηλεκτρολύτη (πιθανό χυμό φρούτων). Η πρώτη συστηματική διερεύνηση της ηλεκτροχημείας πραγματοποιήθηκε από τον Alessandro Volta (1745-1827) ο οποίος διερεύνησε την ηλεκτροχημεία δίσκων ψευδαργύρου και χαλκού που στοιβάζονται μαζί σε άλμη, αλλιώς γνωστός ως «βολταϊκός σωρός». Αυτή ήταν η πρώτη σύγχρονη συσκευή αποθήκευσης ηλεκτροχημικής ενέργειας. Μέσω του συνδυασμού των υπερσυμπιεστών, των μπαταριών και των στοιχείων καυσίμου, μπορεί να συναρμολογηθεί μια εναλλακτική λύση για τον κινητήρα καύσης που δεν απαιτεί ορυκτά καύσιμα ούτε παράγει αέρια θερμοκηπίου [11].



Εικόνα 3.8: Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με συσσωρευτές [πηγή: M. G, Molina (2010)]

3.6.1. Δευτερογενείς συσσωρευτές

Οι δευτερεύουσες μπαταρίες είναι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που έχουν σχεδιαστεί για να χρησιμοποιούνται πολλές φορές, σε αντίθεση με τις πρωτογενείς μπαταρίες που είναι μπαταρίες μιας χρήσης που έχουν σχεδιαστεί για χρήση μία

φορά και στη συνέχεια απορρίπτονται. Η τεχνολογία αποθήκευσης μπαταριών παρέχει την πιο διαδεδομένη και ικανοποιητική μέθοδο αποθήκευσης σχετικά μικρών ποσοτήτων ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία φορητών ηλεκτρικών συσκευών. Η ενέργεια αποθηκεύεται σε ηλεκτροχημική μορφή. κατά τη φόρτιση το θετικό ενεργό είδος οξειδώνεται, ενώ το αρνητικό μειώνεται. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα διαθέσιμων τεχνολογιών μπαταριών, οι οποίες χρησιμοποιούνται στο εμπόριο για εφαρμογές κοινής ωφέλειας, καθώς και για εφαρμογές μικρότερης κλίμακας. Για μεγαλύτερες εφαρμογές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρθρωτά συστήματα, αν και αυτά πρέπει να είναι πολύπλοκα στην κατασκευή για να ικανοποιούν τις απαιτήσεις υψηλής τάσης και ρεύματος. Οι τεχνολογίες με βάση το λίθιο έχουν τις καλύτερες ενεργειακές πυκνότητες (έως 2000Wh / kg)

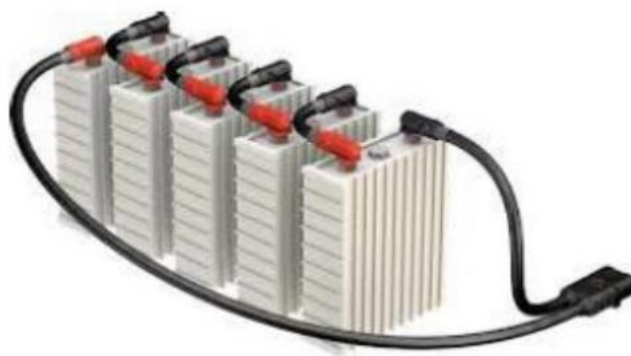
Λόγω περιορισμών στη διάρκεια ζωής του κύκλου, του βάθους εκφόρτισης και της πολυπλοκότητας που απαιτείται για την κάλυψη απαιτήσεων υψηλής τάσης και ρεύματος, οι δευτερεύουσες μπαταρίες δεν είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη ποδηλασία. Τα εμπλεκόμενα χημικά είδη σημαίνουν επίσης ότι οι δευτερεύουσες μπαταρίες δεν είναι κατάλληλες για χρήση σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες τοποθεσίες και απομακρυσμένες τοποθεσίες με σκληρά περιβάλλοντα. Προς το παρόν η τεχνολογία φαίνεται πιο κατάλληλη για απαιτήσεις χωρητικότητας μικρής κλίμακας όπου δεν απαιτείται ταχεία επαναφόρτιση, η συντήρηση μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί και δεν υπάρχουν περιβαλλοντικές ανησυχίες - δηλαδή δεν είναι γενικά εφαρμόσιμη σε εχθρικά περιβάλλοντα όπου η διαρροή θα μπορούσε να είναι ένα ζήτημα.

Η σύγχρονη έρευνα για τις μπαταρίες επικεντρώνεται στην επίτευξη υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας- με τη χρήση πυριτικών νανοσωλήνων, η ενεργειακή πυκνότητα μιας μπαταρίας με βάση το λίθιο μπορεί να αυξηθεί κατά ένα συντελεστή 10. Ωστόσο, το θεμελιώδες εμπόδιο για τις μπαταρίες είναι μια σχετικά σύντομη διάρκεια κύκλου (ειδικά για μεγάλο εύρος ποδηλασία) και τρέχον υψηλό κόστος. Μια άλλη πολλά υποσχόμενη παραλλαγή για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας μη κινητής τηλεφωνίας είναι οι μπαταρίες Sodium Sulphur, οι οποίες έχουν σχετικά υψηλή απόδοση (άνω του 85%) και μεγάλη διάρκεια ζωής. Αν και συχνά αναφέρεται ότι δεν έχουν αυτοεκφόρτιση, πρέπει να θερμαίνονται συνεχώς για να διατηρούνται σε θερμοκρασίες περίπου 300°C, οι οποίες μπορούν αποτελεσματικά να μετατραπούν σε απώλεια εξαρτώμενη από το χρόνο, ανάλογα με το επίπεδο μόνωσης. Αυτός ο τύπος τεχνολογίας έχει αποδειχθεί εκτός εργαστηριακών συνθηκών, αλλά το τρέχον κόστος είναι πολύ υψηλό για να είναι εμπορικά ελκυστικό - προς το παρόν οι εκτιμήσεις κόστους ανέρχονται σε περίπου 2-3 εκατομμύρια £ για μια μονάδα 10 MWh.

Οι δευτερογενείς μπαταρίες μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά όταν αυτές εκφορτιστούν και να φτάσουν στην αρχική τους κατάσταση με τη διαδικασία ροής του ρεύματος σε αυτές αλλά με αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του ρεύματος εκφόρτισης.

Αποτελούν συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας γνωστές και ως «μπαταρίες αποθήκευσης». Με βάση τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Εφαρμογές, στις οποίες οι δευτερογενείς μπαταρίες χρησιμοποιούνται ως μέσον αποθήκευσης ενέργειας συνδεδεμένο και φορτιζόμενο από μία κύρια πηγή ενέργειας και μεταφέρει την ενέργεια της στο φορτίο όταν της ζητηθεί. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούν τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα και τα συστήματα στάσιμης ενεργειακής αποθήκευσης για την ηλεκτρική χρήση ανύψωσης φορτίου.
- Σε εφαρμογές στις οποίες η δευτερογενής μπαταρία χρησιμοποιείται ή εκφορτίζεται όπως μία πρωτογενής, αλλά αντί να απορρίπτεται με το πέρας της χρήσης της, επαναφορτίζεται για περαιτέρω χρήση της. Έτσι σε αυτές τις περιπτώσεις αυτού του τύπου οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε φορητές ηλεκτρικές συσκευές, σε ηλεκτρικά εργαλεία, κα. Για τη μείωση του κόστους, αλλά και σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν άντληση ενέργειας για μεγαλύτερα όρια από αυτά της πρωτογενούς. Πέραν από τα παραπάνω πλεονεκτήματα των δευτερογενών μπαταριών έχουν επίσης υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλό ρυθμό εκφόρτισης, επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και καλές επιδόσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες. Αν και οι ενεργειακές τους πυκνότητες και η κατακράτηση φορτίου είναι μικρότερες από αυτές των πρωτογενών μπαταριών, πλεονεκτούν στο γεγονός ότι η χωρητικότητα που χάνεται σε μία δευτερογενή μπαταρία μπορεί να ανακτηθεί με την επαναφόρτιση.



Εικόνα 3.9: Παράδειγμα Δευτερογενούς Μπαταρίας

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δευτερογενών συσσωρευτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

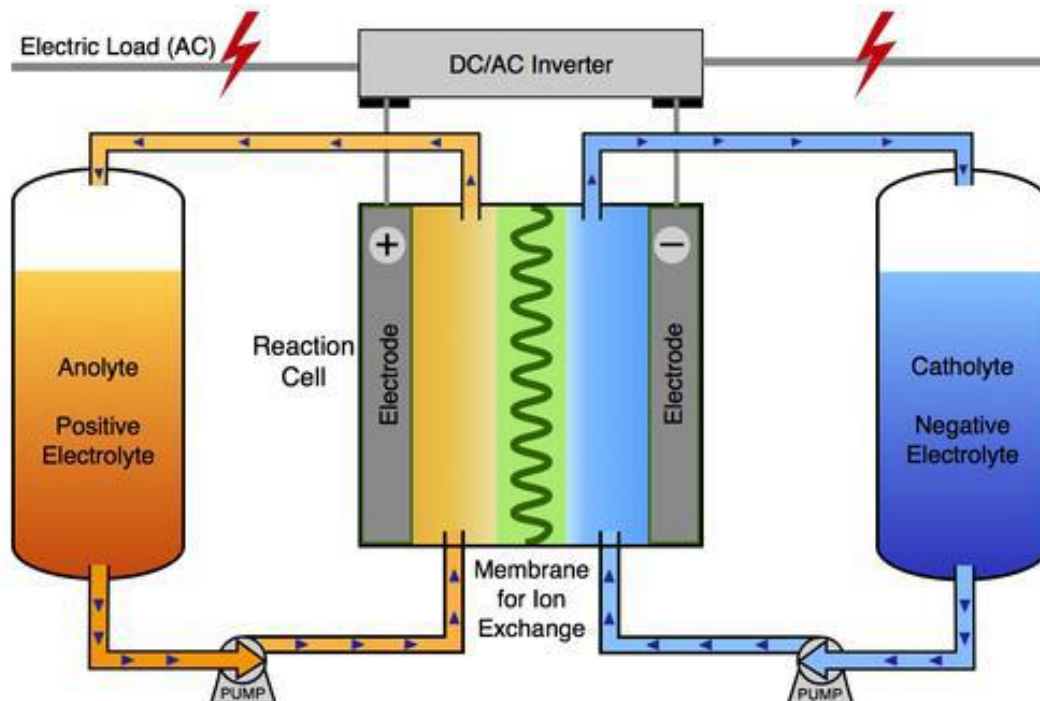
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
διαθέσιμοι σε πολλές ποσότητες και μεγέθη (λιγότερο από 1 έως περισσότερα από 10.000 αμπερώρια)	σχετικά λίγοι κύκλοι ζωής (50-300 κύκλοι)
ικανότητα λειτουργίας σε υψηλά ρεύματα, κατάλληλη για εκκίνηση μηχανών	περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα
αρκετά καλή απόδοση σε χαμηλές και υψηλές θερμοκρασίες	μεγάλη αποθήκευση ενώ είναι εκφορτισμένοι, μπορεί να οδηγήσει σε μόνιμη πόλωση των ηλεκτροδίων
ηλεκτρικώς αποτελεσματικοί/ικανότητα ανάκαμψης της αποδοτικότητάς τους πάνω από 70%	δύσκολη κατασκευή πολύ μικρών μεγεθών
υψηλή τάση του ηλεκτροχημικού στοιχείου, μεγαλύτερη από 2V	η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να αποτελέσει κίνδυνο ανάφλεξης
εύκολη ένδειξη της κατάστασης φόρτισης	θερμική διαφυγή σε ελλιπής κατασκευές
καλή διατήρηση της φόρτισης σε διακοπόμενη λειτουργία	
χαμηλό κόστος	
εύκολη ανακύκλωση των ηλεκτροχημικών στοιχείων	
διατίθενται για συντήρηση	

Πίνακας 3.10: Συνοπτική Παρουσίαση Πλεονεκτημάτων-Μειονεκτημάτων Συσσωρευτών

3.6.2. Μπαταρίες ροής (Flow Batteries)

Η μπαταρία ροής είναι ουσιαστικά μια επαναφορτιζόμενη κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί με τη διέλευση ηλεκτρολυτών μέσω μιας ηλεκτροχημικής κυψέλης ισχύος που μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια και το αντίστροφο. Η βασική αρχή περιλαμβάνει την αποθήκευση δύο ενεργών ειδών (ηλεκτρολύτες) σε διαφορετικές καταστάσεις οξείδωσης. Αυτά τα είδη στη συνέχεια ρέουν μέσω του ηλεκτροχημικού κυττάρου όπου υπάρχει ανταλλαγή ιόντων μέσω μιας επιλεκτικής μεμβράνης ιόντος. Τα κύρια πιθανά πλεονεκτήματα των μπαταριών ροής είναι η ικανότητα ανεξάρτητου χειρισμού της ισχύος και των ενεργειακών δυνατοτήτων (η ισχύς μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τα μεγέθη των ηλεκτροδίων ενώ η ενεργειακή ικανότητα μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις συγκεντρώσεις ιόντων και το μέγεθος της δεξαμενής ηλεκτρολυτών) και ότι μπορούν επίσης να είναι πλήρως φορτισμένο και αποφορτισμένο χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τη μακροζωία. Ωστόσο, η τεχνολογία είναι ακόμη στα σπάργανα και υπάρχουν λίγα προϊόντα διαθέσιμα σε εμπορική βάση.

Παραλλαγές όπως κύτταρα Vanadium (V / V), Polysulphide Bromide μπαταρίες (PSB) και ψευδάργυρος βρωμίου (ZnBr) προσφέρουν υπόσχεση και έχουν πραγματοποιηθεί πρόσφατες εργασίες διερεύνησης των δυνατοτήτων ολοκλήρωσης της αιολικής ενέργειας.



Εικόνα 3.11: Σχηματικό διάγραμμα μπαταρίας ροής [πηγή: Luis De Sousa (2011), Energy Storage]

3.7. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτρικά μέσα

Ένας σούπερ πυκνωτής (ονομάζεται επίσης ηλεκτρικός πυκνωτής διπλού στρώματος) είναι ένας πυκνωτής με σχετικά υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Η ενέργεια αποθηκεύεται μέσω ηλεκτροστατικού πεδίου. Ενώ ένας συμβατικός πυκνωτής χρησιμοποιεί διηλεκτρικό για να διαχωρίσει τις πλάκες πυκνωτών, ένας υπερ-πυκνωτής αποτελείται από εικονικές πλάκες που είναι στην πραγματικότητα δύο στρώσεις του ίδιου υποστρώματος. Ο υπερπυκνωτής αποθηκεύει στη συνέχεια ενέργεια μεταξύ ενός στερεού πορώδους ηλεκτροδίου και αντίθετα φορισμένων ιόντων ηλεκτροδίων. Η πολύ μεγάλη επιφάνεια του πορώδους ηλεκτροδίου επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα από τους συμβατικούς πυκνωτές. [12].

Η πυκνότητα ενέργειας των υπερπυκνωτών είναι συνήθως μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη από αυτή των κλασικών μπαταριών. Ωστόσο, η πυκνότητα της ισχύος εκφόρτισής τους μπορεί να είναι έως και δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να φορτιστούν και να εκφορτιστούν με εξαιρετικά γρήγορους ρυθμούς. Έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, αφού μπορούν να αντέξουν χιλιάδες κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα και χωρίς ιδιαίτερη ανάγκη συντήρησης.

Από την άλλη πλευρά, έχουν πολύ μεγάλους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης, όταν βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια εκφόρτισής τους η τάση λειτουργίας του μειώνεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου της λειτουργίας των υπερπυκνωτών, με αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος τους.

Η έρευνα που διεξάγεται με αντικείμενο τους υπερπυκνωτές στοχεύει στην εισαγωγή του γραφένιου ως υλικό κατασκευής των υπερπυκνωτών, κάτι το οποίο θα αυξήσει την πυκνότητα ενέργειάς τους και θα μειώσει το κόστος τους. Οι υπερπυκνωτές έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα σε πολλές εφαρμογές σε συνδυασμό με μπαταρίες, έτσι ώστε οι πρώτοι να καλύπτουν τις γρήγορες μεταβολές της ζήτησης ισχύος και οι μπαταρίες την απαίτηση για μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Εφαρμογή βρίσκουν επίσης σε μεγάλα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά πάρκα, όπου υπάρχουν συχνές αυξομειώσεις της τάσης λόγω της μεταβαλλόμενης ηλιοφάνειας. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να καλύψουν μικρά διαστήματα αυξομειώσεων της τάσης και να μετριάσουν την επίδραση του συγκεκριμένου φαινομένου στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Υποφέρουν από σχετικά υψηλά ποσοστά αυτοεκφόρτισης σε σύγκριση με τις συμβατικές μπαταρίες και απαιτούν πιο περίπλοκο ηλεκτρονικό έλεγχο καθώς η τάση των πυκνωτών μειώνεται σημαντικά καθώς εκφορτίζονται. Οι τρέχουσες εφαρμογές βασίζονται στο συνδυασμό υπερ-πυκνωτή και τεχνολογίας μπαταρίας, προκειμένου να συνδυάσουν την απόδοση ισχύος του πρώτου με την ικανότητα

αποθήκευσης ενέργειας του τελευταίου. Οι υπερ-πυκνωτές του εμπορίου διατίθενται με ενεργειακή πυκνότητα $6\text{Wh} / \text{kg}$, παρόλο που υπάρχουν πειραματικές παραλλαγές με βάση υλικά γραφενίου με $28,5\text{Wh} / \text{kg}$ και πυκνότητα ισχύος $10\text{kW} / \text{kg}$.

Η υπεραγωγιμή μαγνητική ενέργεια αποθήκευσης (SMES) είναι μια μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας με βάση το γεγονός ότι ένα ρεύμα θα συνεχίσει να ρέει σε έναν υπεραγωγό ακόμα και μετά την αφαίρεση της τάσης από αυτό. Όταν το πηνίο υπεραγωγού ψύχεται κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγών, έχει αμελητέα αντίσταση, επομένως το ρεύμα θα συνεχίσει να ρέει (ακόμη και μετά την αποσύνδεση μιας πηγής τάσης). Η ιδέα SMES ξεκίνησε με την ιδέα πολύ μεγάλων εγκαταστάσεων με χωρητικότητα GWdays , που προορίζονταν για ισοπέδωση ημερήσιου φορτίου. Ωστόσο, με την πρόοδο της τεχνολογίας υπεραγωγών, ιδίως την αύξηση του T_c (η κρίσιμη θερμοκρασία της μετάβασης υπεραγωγών), η πρόσφατη έρευνα έχει ως επί το πλείστον σε εφαρμογές μικρότερης κλίμακας. Ωστόσο, το κόστος είναι το θεμελιώδες εμπόδιο, με εκτιμήσεις 40 έως 50 εκατομμυρίων Ευρώ για ένα εργοστάσιο 1MWh .

4. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας

4.1 Εισαγωγή-Ιστορική Αναδρομή

Η αρχική ιδέα της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας αποθήκευσης (EES) χρονολογείται από τις αρχές του 20ού αιώνα, όταν οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έκλειναν συχνά μια νύχτα, με τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος να τροφοδοτούν τα εναπομένοντα φορτία στα δίκτυα συνεχούς ρεύματος (DC). Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν οι προόδους του ESS σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής, δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Τα τελευταία χρόνια, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αναγκάζονται να απομακρυνθούν από μεγάλες και παραδοσιακές πηγές ενέργειας σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) που είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον και βιώσιμες. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, η ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, η φροντίδα για τις κλιματικές αλλαγές, η έλλειψη πόρων για την κατασκευή μονάδων παραγωγής ενέργειας και δικτύων διανομής [13].

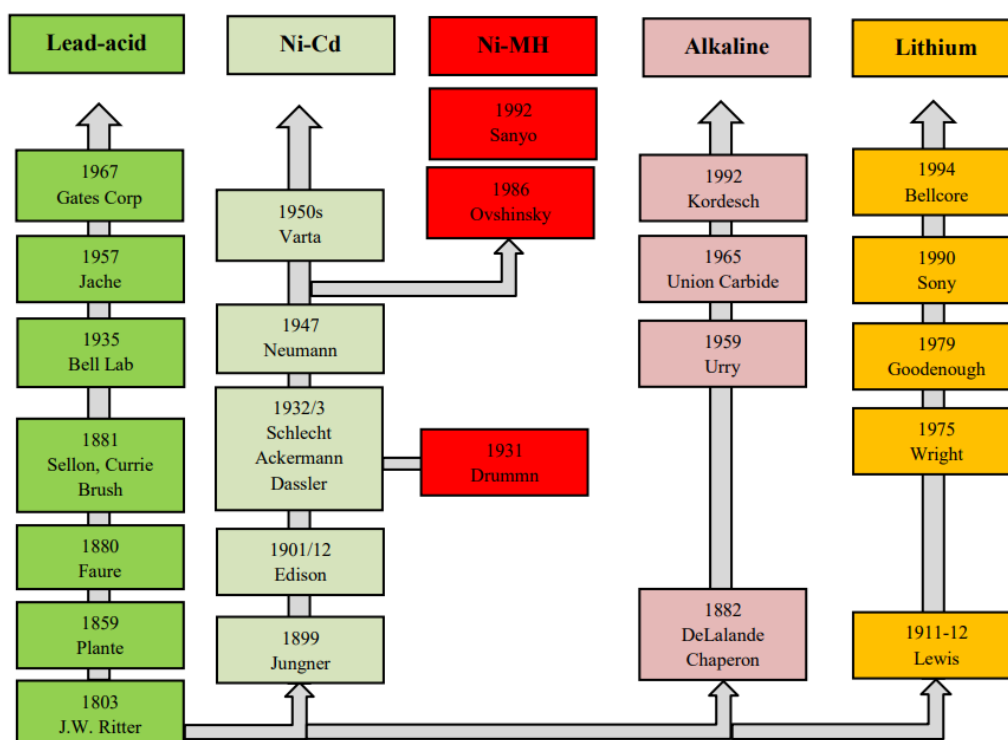
Οι ΑΠΕ όπως το ηλιακό, το αιολικό και το παλιρροιακό κύμα με σημαντική δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα μελλοντικά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Αυτά είναι διαθέσιμα μόνο όταν υπάρχει επαρκής ήλιος, άνεμος και παλίρροια. Στη συνέχεια, η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο λόγω της μεταβλητής και της διαλείπουσας φύσης τους θα είναι προβληματική. Εδώ είναι που η EES γίνεται μια τεχνολογία που επιτρέπει και μια κατάλληλη λύση για την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο και για να καταστήσει τους μη αποσπασίμους πόρους σε μια πηγή αποστολής ενέργειας εισάγοντας νέες εφαρμογές του EES.

Το EES αναφέρεται σε μια διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα δίκτυο ισχύος σε μια μορφή που μπορεί να αποθηκευτεί για τη μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια όταν χρειάζεται. Στη συνέχεια, αυτός ο τύπος διεργασίας στην ΕΣΑ μπορεί να προσφέρει την ευκαιρία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους είτε χαμηλής ζήτησης, χαμηλού κόστους παραγωγής ή από διαλείπουσες πηγές ενέργειας και να χρησιμοποιείται σε περιόδους υψηλής ζήτησης, υψηλού κόστους παραγωγής ή όταν δεν υπάρχει άλλη παραγωγή τα μέσα είναι διαθέσιμα. Υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες για την ΕΣΑ. η πιο κοινή μορφή είναι η μπαταρία. Η μπαταρία είναι αρθρωτή, αθόρυβη και δεν ρυπαίνει. Μπορεί να τοποθετηθεί σχεδόν οπουδήποτε και μπορεί να εγκατασταθεί σχετικά γρήγορα. Η μπαταρία σε μεγαλύτερο μέγεθος ονομάζεται Battery Energy Storage System (BESS). Το BESS είναι μια πιθανή λύση για ορισμένες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν το σημερινό ηλεκτρικό δίκτυο λόγω του μεγάλου αριθμού και της ποικιλίας των υπηρεσιών που μπορούν να παρέχουν, όπως βιομηχανικές υπηρεσίες παραγωγής,

εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, φορητές ηλεκτρονικές συσκευές και ηλεκτρικά οχήματα. Αυτή η εκτίμηση καθιστά ένα BESS ως κρίσιμο συστατικό των μελλοντικών SG. Ως εκ τούτου, απαιτούνται βαθιές και κατάλληλες ερευνητικές εργασίες για τη μελέτη της προόδου των BESS σε διαφορετικές πτυχές με περισσότερες λεπτομέρειες. Οι ιστορικές, τεχνολογικές, χαρακτηριστικές και οικονομικές πτυχές των BESS εξετάζονται στις ακόλουθες ενότητες [14].

Η έκφραση «μπαταρία» χρησιμοποιήθηκε αρχικά για συγκροτήματα πυροβόλων σε μονάδες πυροβολικού, αλλά ο Μπέντζαμιν Φράνκλιν χρησιμοποίησε αυτήν την έκφραση για να περιγράψει τη σύνδεση των πυκνωτών βάζων Leyden περίπου το 1750. Πενήντα χρόνια αργότερα το 1800, ο Alessandro Volta εφευρέθηκε την πρώτη αληθινή μπαταρία, η οποία ήρθε να είναι γνωστό ως το βολταϊκό σωρό. Ο βολταϊκός σωρός αποτελείται από ζεύγη δίσκων χαλκού και ψευδαργύρου που συσσωρεύονται το ένα πάνω στο άλλο και διαχωρίζονται με ένα στρώμα από ύφασμα ή χαρτόνι εμποτισμένο με άλμη (δηλαδή, τον ηλεκτρολύτη). Συγκριτικά με το βάζο Leyden, ο βολταϊκός σωρός παρήγαγε συνεχές και σταθερό ρεύμα, αλλά έχασε λίγη φόρτιση με την πάροδο του χρόνου όταν δεν χρησιμοποιείται. Υπήρχαν ορισμένα τεχνικά σφάλματα στα αρχικά μοντέλα σωρών της Volta, όπως η διαρροή του ηλεκτρολύτη και η πρόκληση βραχυκυκλωμάτων λόγω του βάρους των δίσκων που συμπιέζουν το ύφασμα με άλμη. Αργότερα το 1808, ένας Άγγλος με το όνομα William Cruickshank έλυσε αυτό το πρόβλημα τοποθετώντας τα στοιχεία σε ένα κουτί αντί να τα συσσωρεύσει σε μια στοίβα. Στη συνέχεια, εξελίχθηκε στο κελί του Ντάνιελ το 1836 που περιλάμβανε δύο ηλεκτρολύτες. Η Golding Bird επινόησε την πρώτη έκδοση ενός κελιού του Ντάνιελ σε ένα κελί το 1837 χρησιμοποιώντας ένα σοβά του Παρισιού για να διατηρήσει τις λύσεις ξεχωριστές και επίσης η έκδοση πορώδους δοχείου του κελιού Ντάνιελ βρέθηκε από τον Τζον Ντάνκερ το 1838. Αργότερα κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1860, Ο Callaud εφηύρε μια παραλλαγή του κυττάρου Daniel που ονομάζεται κελί βαρύτητας. Όλα αυτά ονομάζονται πρωτεύοντα κελιά, τα οποία είναι γαλβανικά κύτταρα μίας χρήσης που αποθηκεύουν ηλεκτρικό ρεύμα για βολική χρήση, που συνήθως δείχνουν καλή διάρκεια ζωής Ωστόσο, δεν είναι συνήθως επαναφορτιζόμενες. Σύμφωνα με το αναφερόμενο ιστορικό, η έκφραση «μπαταρία» πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για συναρμολόγηση κυψελίδων σε σειρά ή παράλληλες διευθετήσεις αλλά, η λέξη μπαταρία έγινε μια τεχνική και εμπορική κοινή πρακτική για χρήση ακόμη και για μεμονωμένα κελιά. Σε αντίθεση με την κύρια μπαταρία, μια δευτερεύουσα μπαταρία είναι επαναφορτιζόμενη και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί πολλές φορές. Ως εκ τούτου, ονομάστηκε αποθήκευση ή επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Η επαναφορτιζόμενη ή δευτερεύουσα μπαταρία γεννήθηκε το 1803 όταν ένας Γερμανός φυσικός, Johann Wilhelm Ritter, συνδύασε δίσκους από χαλκό και χαρτόνι με στρώσεις εμποτισμένους με άλμη επιτραπέζιου αλατιού. Το «Ritter pile» θα μπορούσε να φορτιστεί από ένα ρεύμα

και να παραδοθεί ενέργεια κατά την εκφόρτιση, αλλά το δευτερεύον ρεύμα ήταν πολύ παροδικό. Γι' αυτό ήταν μόνο γνωστός εξοπλισμός φόρτισης εκείνη την εποχή. Αργότερα το 1859, ο Gaston Plante εφηύρε την πρώτη πρακτική επαναφορτιζόμενη μπαταρία που βασίστηκε στη χημεία μολύβδου-οξέος. Η χρήση μπαταριών μολύβδου-οξέος σε αυτοκίνητα για σκοπούς εκκίνησης, φωτισμού και ανάφλεξης ήταν και είναι μια από τις πιο κοινές εφαρμογές της μπαταρίας μολύβδου-οξέος. Με την πάροδο του χρόνου, άλλοι τύποι επαναφορτιζόμενων μπαταριών εισήχθησαν στην αγορά. Το 1899 ο Ernst Waldemar Jungner ανέπτυξε τον συσσωρευτή νικελίου-καδμίου. Επίσης, οι μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου (Ni-MH), διαφορετικές από τις σφραγισμένες μπαταρίες νικελίου-καδμίου στο ότι το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως ενεργή μάζα αντί του καδμίου, εισήχθησαν το 1985. Ένας άλλος τύπος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας που ήταν γνωστός ως αλκαλική μπαταρία πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους Γάλλους χημικούς, τον Felix de Lalande και τον Georges Chaperon, το 1882 και εξελίχθηκε στην επαναφορτιζόμενη αλκαλική μπαταρία μαγγανίου από τον Karl Kordesch (Αυστρία) το 1992. Σε συνέχεια του πρωτοποριακού έργου των Lewis (1912) και Wright (1975), οι πρώτες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λιθίου που γεννήθηκαν νωρίτερα από το 1980, τότε η Sony Corporation στην Ιαπωνία κατάφερε να εμπορευματοποιήσει δευτερεύουσες κυψέλες λιθίου το 1990. Το 1999, πραγματοποιήθηκε η εμπορία μπαταριών πολυμερών ιόντων λιθίου. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την εξέλιξη ορισμένων από τις κύριες δευτερεύουσες μπαταρίες με την πάροδο του χρόνου [15].



Εικόνα 4.1: Εξέλιξη και ιστορικοί σταθμοί μπαταριών [16]

4.2 Τεχνολογίες

Με βάση τη χρήση διαφορετικών χημικών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη μπαταριών. Μία μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία και κάθε στοιχείο αποτελείται από έναν υγρό, πάστα ή στερεό ηλεκτρολύτη μαζί με ένα θετικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος). Σήμερα, υπάρχει ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών μπαταριών στην αγορά όπου κάθε ένα έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά του. Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών μπαταριών, μερικές από αυτές φαίνεται να είναι πιο κατάλληλες για εφαρμογές συστήματος ισχύος λόγω εγκεκριμένων τεχνικών και οικονομικών πλεονεκτημάτων.

- Μπαταρίες μολύβδου-οξέος

Ο παλαιότερος γνωστός τύπος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας είναι η μπαταρία μολύβδου-οξέος που εφευρέθηκε το 1859 από τον Γάλλο φυσικό Gaston Plante. Έχει αναπτυχθεί εμπορικά γύρω στο 1890. Χρησιμοποιείται τόσο σε κινητές όσο και σε σταθερές εφαρμογές. Μερικές από τις δημοφιλείς εφαρμογές της μπαταρίας μολύβδου-οξέος είναι: συστήματα τροφοδοσίας έκτακτης ανάγκης, αυτόνομα συστήματα με φωτοβολταϊκά (PV), συστήματα μπαταρίας για τον μετρίασμό των διακυμάνσεων εξόδου από την αιολική ενέργεια και ως μπαταρίες εκκίνησης στα οχήματα. Στην κατάσταση φόρτισης, αυτός ο τύπος μπαταρίας αποτελείται από ηλεκτρόδια μολύβδου μετάλλου και οξειδίου μολύβδου σε έναν ηλεκτρολύτη 37% θειικού οξέος ενώ στην κατάσταση εκφόρτισης αμφότερα τα ηλεκτρόδια μετατρέπονται σε θειικό μόλυβδο και ο ηλεκτρολύτης χάνει το διαλυμένο θειικό οξύ του και γίνεται κυρίως νερό. Η μπαταρία μολύβδου-οξέος έχει τυπική διάρκεια ζωής από 5 έως 15 χρόνια με υψηλή αξιοπιστία και αποδοτικότητα (70-90%). Διατίθενται αρκετοί τύποι μπαταριών μολύβδου οξέος. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι δημοφιλής επιλογή αποθήκευσης για ποιότητα ισχύος, αδιάλειπτη τροφοδοσία ρεύματος (UPS) και ορισμένες εφαρμογές περιστρεφόμενου αποθεματικού, αλλά στην περίπτωση εφαρμογών διαχείρισης ενέργειας είναι πολύ περιορισμένες λόγω της μικρής διάρκειας ζωής τους (500-1000 κύκλοι) και της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας (30-50 Wh / kg) [17].

- Μπαταρίες ιόντων λιθίου

Το λίθιο είναι το ελαφρύτερο μέταλλο με τις υψηλότερες δυνατότητες λόγω της πολύ αντιδραστικής συμπεριφοράς του, το οποίο, θεωρητικά, το καθιστά πολύ κατάλληλο ως ένωση για τις μπαταρίες. Η πρώτη μπαταρία ιόντων λιθίου προτάθηκε στη δεκαετία του 1960 και στη συνέχεια, οι πρώτες εμπορικές μπαταρίες ιόντων λιθίου κυκλοφόρησαν στην αγορά από τη Sony το 1990. Αργότερα το 2000, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν γίνει η πιο σημαντική τεχνολογία αποθήκευσης στους τομείς των φορητών και κινητές εφαρμογές όπως φορητό

υπολογιστή, κινητό τηλέφωνο, ηλεκτρικό ποδήλατο και ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Αυτές οι εξελίξεις εξακολουθούν να αυξάνονται ανάλογα με τις βελτιώσεις των χρησιμοποιημένων υλικών σε αυτόν τον τύπο μπαταριών και των χαρακτηριστικών της μπαταρίας όπως η ενεργειακή πυκνότητα, ο κύκλος ζωής και η απόδοση της μπαταρίας. Για παράδειγμα, η ενεργειακή πυκνότητα αυξήθηκε από 75 σε 200 Wh / kg και ο κύκλος ζωής αυξήθηκε σε 10.000 κύκλους. Σε αυτό το είδος μπαταρίας η κάθοδος είναι λιθωμένο μεταλλικό οξείδιο και η άνοδος είναι κατασκευασμένη από γραφικό άνθρακα με δομή στρωματοποίησης. Η κατασκευή μοιάζει κάπως παρόμοια με έναν πυκνωτή, όταν χρησιμοποιεί τρία διαφορετικά στρώματα κουλουριασμένα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χώρος. Το πρώτο στρώμα δρα ως άνοδος και αποτελείται από μια ένωση λιθίου. Το δεύτερο στρώμα είναι η κάθοδος και είναι συνήθως κατασκευασμένο από γραφίτη. Το τρίτο στρώμα που βρίσκεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου είναι ο διαχωριστής που τους χωρίζει ενώ επιτρέπει στα ιόντα λιθίου να περάσουν. Ο διαχωριστής μπορεί να κατασκευάζεται από διάφορες ενώσεις που επιτρέπουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και, κατά συνέπεια, διαφορετικά οφέλη και ελαττώματα. Επιπλέον, τα τρία στρώματα βυθίζονται σε οργανικό διαλύτη. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει στα ιόντα να κινούνται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Κατά τη διαδικασία φόρτισης, τα ιόντα λιθίου περνούν μέσω του διαχωρισμού μικροπορώδους σε χώρους μεταξύ του γραφίτη (αν και δεν είναι σύνθετοι), λαμβάνοντας ένα ηλεκτρόνιο από την εξωτερική πηγή ισχύος. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χρησιμοποιούνται σε περισσότερο από το 50% των μικρών φορητών συσκευών και από το 2000 έχουν αρχίσει επιτυχώς να εισέρχονται στις βιομηχανικές αγορές. Υπάρχουν όμως μερικές σημαντικές προκλήσεις για την παροχή μπαταριών ιόντων λιθίου μεγάλης κλίμακας. Επίσης, το κόστος αυτού του τύπου μπαταριών λόγω χρήσης ειδικής συσκευασίας και εσωτερικού κυκλώματος προστασίας υπερφόρτισης εξακολουθεί να είναι υψηλό (πάνω από 600 \$ / kWh). Η εφαρμογή μπαταριών ιόντων λιθίου στο στατικό πεδίο έχει αυξηθεί σημαντικά από το 2010 και έχει επωφεληθεί από την εκτεταμένη εμπειρία που αποκτήθηκε στην ανάπτυξη μπαταριών για ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Περίπου 100 MW στατικών μπαταριών ιόντων λιθίου λειτουργούν παγκοσμίως σε εγκαταστάσεις συνδεδεμένες στο δίκτυο. Έχουν σχεδιαστεί και δοκιμαστεί με επιτυχία συστήματα σε συνδυασμό με κατανεμημένες ανανεώσιμες γεννήτριες από μερικά kW έως αρκετά MW, καθώς και για υποστήριξη δικτύου με τάσεις έως 6000V [18].

- Μπαταρίες νικελίου-καδμίου

Μαζί με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, μια μπαταρία νικελίου-καδμίου (Ni-Cd) κατατάσσεται επίσης σε όρους ωριμότητας και δημοτικότητας. Οι μπαταρίες Ni-Cd περιλαμβάνουν μια πλάκα θετικού υδροξειδίου του νικελίου, μια αρνητική πλάκα ηλεκτροδίου υδροξειδίου του καδμίου, έναν διαχωριστή και έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη. Οι μπαταρίες Ni-Cd έχουν συνήθως μεταλλική θήκη με πλάκα

στεγανοποίησης εφοδιασμένη με βαλβίδα ασφαλείας αυτοσφράγισης. Οι θετικές και αρνητικές πλάκες ηλεκτροδίων, απομονωμένες η μία από την άλλη από τον διαχωριστή, τυλίγονται σε σπειροειδή μορφή μέσα στη θήκη. Σε περίπτωση ενεργειακής πυκνότητας μπαταρίας, οι μπαταρίες Ni-Cd έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (50-75 Wh / kg) και μπορούν να παρέχουν ισχυρή αξιοπιστία με πολύ χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Ο σχετικά κύκλος ζωής τους κυμαίνεται από 2000 έως 2500. Αυτά τα αναφερόμενα πλεονεκτήματα του Ni-Cd τα καθιστούν προτιμώμενα έναντι των μπαταριών μολύβδου οξέος για ηλεκτρικά εργαλεία, φορητές συσκευές, φωτισμό έκτακτης ανάγκης, UPS, τηλεπικοινωνίες και εκκίνηση γεννήτριας. Ωστόσο, φορητές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα και φορητοί υπολογιστές έχουν ουσιαστικά εκτοπιστεί από αυτές τις αγορές από άλλες ηλεκτροχημικές ουσίες κατά την τελευταία δεκαετία. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των μπαταριών Ni-Cd είναι το σχετικά υψηλό κόστος τους (800-1500 \$ / kWh) λόγω της ακριβούς διαδικασίας κατασκευής. Το κάδμιο είναι ένα τοξικό βαρέα μέταλλο και συνεπώς θέτει ζητήματα που σχετίζονται με την απόρριψη μπαταριών Ni-Cd. Οι μπαταρίες Ni-Cd πάσχουν επίσης από «φαινόμενο μνήμης», όπου οι μπαταρίες θα φορτιστούν μόνο μετά από μια σειρά πλήρων εκφορτίσεων. Οι σωστές διαδικασίες διαχείρισης μπαταρίας μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση αυτού του αποτελέσματος. Εξυπηρετούν ειδικές αγορές όπου η ενέργεια πρέπει να αποθηκεύεται σε ακραίο κλίμα ή ποδηλασία ή συνθήκες γρήγορης φόρτισης [19].

- Μπαταρίες θείου νατρίου

Μια μπαταρία θείου νατρίου (NaS) αποτελείται από υγρό (λειωμένο) θείο στο θετικό ηλεκτρόδιο και υγρό (λειωμένο) νάτριο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο ως δραστικά υλικά που διαχωρίζονται από έναν στερεό κεραμικό ηλεκτρολύτη βήτα αλουμίνης. Οι μπαταρίες NaS έχουν τυπική διάρκεια ζωής 2500 κύκλους. Επίσης, η τυπική πυκνότητα ενέργειας και ισχύος είναι της τάξης των 150-240 Wh / kg και 150-230 W / kg, αντίστοιχα. Η αποδοτικότητα των κυψελών μπαταρίας NaS κυμαίνεται από 75% έως 90% και έχουν ικανότητα παλμού πάνω από έξι φορές τη συνεχή βαθμολογία τους (για 30s) Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει στις μπαταρίες NaS να χρησιμοποιούνται οικονομικά σε συνδυασμένες εφαρμογές ποιότητας και αιχμής ξυρίσματος. Η πρώτη επίδειξη του συστήματος NaS στην Αμερική ξεκίνησε από την American Electric Powers στο Οχάιο με ισχύ έως 1,2 MW. Το κύριο μειονέκτημα είναι ότι απαιτείται πηγή θερμότητας που χρησιμοποιεί τη δική της αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας, μειώνοντας εν μέρει την απόδοση της μπαταρίας, καθώς η μπαταρία NaS πρέπει να λειτουργεί σε υψηλή θερμοκρασία (300- 350 ° C) Ένα άλλο μειονέκτημα είναι το αρχικό κόστος κεφαλαίου (300-500 \$ / kWh), αλλά αναμένεται να μειωθεί καθώς αυξάνεται η παραγωγική ικανότητα [20].

- Χλωριούχο νάτριο

Η μπαταρία χλωριούχου νατρίου είναι περισσότερο γνωστή ως μπαταρία ZEBRA. Αυτός ο τύπος μπαταριών είναι συστήματα υψηλής θερμοκρασίας (300 ° C) που χρησιμοποιούν χλωριούχο νικέλιο ως θετικό ηλεκτρόδιο και έχουν την ικανότητα να λειτουργούν σε ένα ευρύ εύρος θερμοκρασίας από -40 έως + 70 ° C χωρίς ψύξη. Οι μπαταρίες ZEBRA μπορούν να αντέξουν σε περιορισμένη υπερφόρτιση και εκφόρτιση και έχουν δυνητικά καλύτερα χαρακτηριστικά ασφαλείας και υψηλή τάση κυψελών σε σύγκριση με τις μπαταρίες NaS (2,58V). Τα μειονεκτήματα σε σχέση με τις μπαταρίες NaS είναι η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (100-120 Wh / kg) και η πυκνότητα ισχύος (150-200 W / kg), αν και η πρώτη εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει σημαντική βελτίωση σε σχέση με την τεχνολογία μπαταρίας μολύβδου οξέος. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι μόνο μία εταιρεία, η Beta R&D (UK), στον κόσμο παράγει αυτού του είδους την μπαταρία και η τεχνολογία αποκτήθηκε από την MES (Swiss) το 1999. Επί του παρόντος, η Beta R&D αναπτύσσει μια έκδοση υψηλής ισχύος της μπαταρίας ZEBRA για υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, μια έκδοση υψηλής ενέργειας για την αποθήκευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μια μπαταρία ισοστάθμισης φορτίου για βιομηχανικές εφαρμογές. Επίσης, ανακοινώθηκε πρόσφατα η εφαρμογή των μπαταριών ZEBRA στο νέο Σύστημα Διάσωσης Υποβρυχίων NATO (NSRS). Ο παρακάτω πίνακας συγκρίνει τα χαρακτηριστικά των προαναφερθέντων τεχνολογιών μπαταριών [21].

Technology	Power rating (MW)	Self-discharge (% per day)	Energy density (Wh/kg)	Power density (W/kg)	Life time (year)	Cycle life (cycle)	Capital cost (\$/kWh)
Lead-acid	0 - 20	0.1 - 0.3	30 - 50	75 - 300	5 - 15	500 - 1000	200 - 400
Li-ion	0 - 0.1	0.1 - 0.3	75 - 200	150 - 315	5 - 15	1000 - 10000	600 - 2500
Ni-Cd	0 - 40	0.2 - 0.6	50 - 75	150 - 300	10 - 20	2000 - 2500	800 -1500
NaS	0.05 - 80	20	150 - 240	150 - 230	10 - 15	2500	300 - 500
ZEBRA	0 - 0.3	15	100 - 200	150 - 200	10 - 14	2500	100 - 200

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων μπαταριών [22]

5. Συμπεράσματα-Σχολιασμός-Περαιτέρω Έρευνα

Ο στόχος αυτής της εργασίας ήταν να δώσει στον αναγνώστη μια γενική επισκόπηση και σύγκριση πολλών διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας που είναι διαθέσιμες σήμερα. Αυτό έγινε μέσω μιας συνοπτικής περιγραφής κάθε τεχνολογίας, της συλλογής των δεδομένων για κάθε τεχνολογία και, τέλος, ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Μέσω αυτής της έκθεσης μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει βέλτιστο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για όλες τις εφαρμογές, δηλαδή καμία τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας δεν μπορεί να προωθηθεί ως η μόνη που θα ερευνηθεί και θα αναπτυχθεί περαιτέρω.

Αντ' αυτού, ένας συνδυασμός διαφόρων τύπων αποθηκών ενέργειας είναι ο καλύτερος τρόπος για να προχωρήσουμε. Αυτή είναι επίσης η εξέλιξη που παρατηρείται σήμερα στον κόσμο, όπου πολλές διαφορετικές χώρες επενδύουν σε διαφορετικές τεχνολογίες. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το PHES είναι και θα εξακολουθεί να είναι η μεγαλύτερη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, τουλάχιστον όσον αφορά την εγκατεστημένη χωρητικότητα, για πολλά ακόμη χρόνια. Άλλα συστήματα αποθήκευσης έχουν ακόμη πολύ δρόμο για να μπορέσουν να αντικαταστήσουν ή να είναι μια εναλλακτική λύση για το PHES. Το PHES πιθανότατα δεν θα αντικατασταθεί ποτέ αλλά θα συμπληρωθεί με άλλα συστήματα.

Οι εναλλακτικές λύσεις που αναπτύσσονται ταχύτερα και επομένως είναι πολύ πιθανό να είναι οι πιο βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις για το PHES για αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας είναι τα ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ακολουθούμενα από λογική αποθήκευση θερμότητας και πιθανώς αποθήκευση ενέργειας υδρογόνου. Σε μελλοντικές μελέτες, αυτή η εργασία θα μπορούσε να βελτιωθεί συμπληρώνοντας τα κενά και καθορίζοντας κριτήρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση διαφόρων τύπων αποθήκευσης ενέργειας χωρίς υπερβολική σύγχυση. Αυτό πρέπει να γίνει με περισσότερη έρευνα με γνώμες εμπειρογνομόνων και προσεκτικές υποθέσεις.

Ωστόσο, η σύγκριση και ανάλυση διαφορετικών τύπων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας δημιουργεί πολλά προβλήματα όταν εξετάζουμε μόνο τους αριθμούς που παρουσιάζονται για διαφορετικά κριτήρια διαφορετικών τεχνολογιών. Οι συγκεκριμένες περιπτώσεις πρέπει να αναλύονται ανεξάρτητα, προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Γι' αυτό οι συγκρίσεις που έχουν γίνει σε αυτήν την εργασία μπορούν να χρησιμεύσουν μόνο ως οδηγίες και ως εισαγωγές. Σε μια πραγματική εφαρμογή πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες πτυχές, όπως το τοπικό

Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

περιβάλλον, η γεωγραφική θέση, η εφαρμογή, η υποδομή, οι οικονομικές συνθήκες και η αρχική πηγή ενέργειας.

Βιβλιογραφία-Αναφορές

- [1] European Commission (2017), Energy Storage – the role of electricity, Commission Staff Working Document, Online: [https:// ec.europa.eu/energy /sites/ener/files/documents/swd2017_61_document_travail_service_part1_v6.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/swd2017_61_document_travail_service_part1_v6.pdf)
- [2] Shafiqur Rehman et al. (2015), Pumped hydro energy storage system: A technological Review, Renewable and Sustainable Reviews/Elsevier, vol. 44, pp. 586-598
- [3] T. Hino & A. Lejeune (2012), Pumped storage hydropower developments, Comprehensive Renewable Energy/Elsevier, vol. 6, pp. 405 – 435
- [4] K. Oshimo et al. (1999), Development of Pump Turbine for Seawatered Pumped Storage Power Plant, Waterpower
- [5] Energy Storage Association, [http:// energystorage.org](http://energystorage.org)
- [6] Giovanni Perillo (2017), Air could be the world’s next battery, SINTEF, Online: [http:// www.sciencedaily.com/releases/2017/03/170328083107.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2017/03/170328083107.htm)
- [7] H. Lund & G. Salgi (2009), The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems, Energy Conversion Management, vol. 50, pp. 1172 – 1179
- [8] M. G. Molina (2010), Dynamic modelling and control design of advanced energy storage for power systems applications, Dynamic Modelling, Intech, DOI: 10.5772/7092, Online: www.intechopen.com/books/dynamic-modelling/dynamic-modelling-and-control-design-of-advanced-energy-storage-for-power-systems-applications
- [9] Luis De Sousa (2011), Energy Storage – Flywheel, The Oil Drum, Online: www.resilience.org/stories/2011-10-05/energy-storage-flywheel
- [11] International Electrotechnical Commission (2011), Electrical Energy Storage, White Paper, Online: www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf
- [12] Energy Storage Sense, [http:// energystoragesense.com](http://energystoragesense.com)
- [13] G. Carpinelli, S. Khormali, F. Mottola, and D. Proto, "Battery energy storage sizing when time of use pricing is applied," The Scientific World Journal, vol. 2014, pp. 1-8, September 2014.
- [14] A. Testa, S. De-Caro, R. La-Torre, and T. Scimone, "Optimal design of energy storage systems for stand-alone hybrid wind/pv generators," in Proc. International

Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion, SPEEDAM 2010, Pisa, Italy, 14-16 June, 2010.

[15] G. Carpinelli, G. Ferruzzi, and A. Russo, "Trade-off analysis to solve a probabilistic multi-objective problem for passive filtering system planning," *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 14(3), pp. 275-284, June 2013.

[16] G. Carpinelli, A. R. di Fazio, S. Khormali, and F. Mottola, "Optimal sizing of battery storage systems for industrial applications when uncertainties exist," *Energies*, vol. 7(1), pp. 130-149, January 2014.

[17] F. Yahyaie, and T. Soong, "Optimal operation strategy and sizing of battery energy storage systems," in *Proc. 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE 2012, Montreal, QC, Canada, 29 April-2 May, 2012*.

[18] *Notes in Green engineering / Born. - Flensburg : Fachhochschule Flensburg, 2012*

[19] *Flywheel energy and power storage systems / Bolund. - Elsevier, 2007. - Renewable and Sustainable Energy Reviews*

[20] *Flywheel energy and power storage systems / Bolund. - Elsevier, 2007. - Renewable and Sustainable Energy Reviews*

[21] *Heavy Mud Backfilled In Submerged Shaft In Deep Soft Rock / M.HAYASHI Department of Civil Engineering, University of Tokai, Tokai - Tokyo : International Society for Rock Mechanics, 1995*

[22] Mulder, G., Daan, S., Bert, C., Thijs, B., Noshin, O., Van., M., 2013, "The dimensioning of PV-battery systems depending on the incentive and selling price conditions", *Appl Energy*, vol. 111, 1126–35.

[23] National Renewable Energy Laboratory, "The value of energy storage for grid applications", NREL, Technical Report, TP-6A20-58465, 2013

[24] National Renewable Energy Laboratory, "The impact of wind and solar on the value of energy storage", NREL, Technical Report, TP-6A20-60568, 2013

[25] Pascesila, M., Burcea, S., G., Colesca, S., E., 2016, "Analysis of renewable energies in European Union", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 156-170

[26] Shcherbakova, A., Andrew Kleit, A., Cho, J., 2014, "The value of energy storage in South Korea's electricity market: A Hotelling approach", *Applied Energy*, vol. 125, pp.93-102

[27] Xu, L., Tretheway, D, 2012, “Flexible Ramping Products”, Draft Final Proposal. California Independent System Operator

[28] Zafirakis, D., Chalvatzis, K., Baiocchi, G., Daskalakis, G., 2013, “Modeling of financial incentives for investments in energy storage systems that promote the large-scale integration of wind energy”, *Appl Energy*, May vol. 105, pp. 138–54