



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας
μέσης ισχύος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιωτοπούλου Κ. Αικατερίνη

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Φούντη Μαρία

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας μέσης ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιωτοπούλου Κ. Αικατερίνη

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Φούντη Μαρία

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 6^η Οκτωβρίου 2016

.....

.....

.....

Μ. Φούντη

Δ. Χουντάλας

Ε. Γιακουμής

Καθηγήτρια ΕΜΠ

Καθηγητής ΕΜΠ

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2016

.....
Αικατερίνη Κ. Παναγιωτοπούλου

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π

Copyright© Παναγιωτοπούλου Κ. Αικατερίνη,2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserve

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται ηπηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Περίληψη

Στο σύγχρονο κόσμο, οι απαιτήσεις για ενέργεια όλο και αυξάνονται. Ταυτόχρονα, όμως αυξάνεται και η ανάγκη για ποιοτικότερη και «καθαρότερη» ενέργεια, σε σχέση με τη συμβατική παραγωγή ενέργειας, όπως αυτή με ορυκτό καύσιμο. Με δεδομένο ότι οι «παραδοσιακές» πηγές ενέργειας δεν είναι ανεξάντλητες και είναι και ταυτόχρονα επιβλαβείς για το περιβάλλον, έχει στραφεί το ενδιαφέρον στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Ωστόσο, οι ΑΠΕ είναι ασταθείς και απρόβλεπτες και για αυτό είναι απαραίτητη η αποθήκευση της ενέργειας έτσι ώστε να γίνει ισοστάθμιση του φορτίου. Αυτήν την ανάγκη ήρθαν να καλύψουν οι μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στόχος της εν λόγω εργασίας είναι να γίνει αντιληπτή η σπουδαιότητα της αποθήκευσης ενέργειας και να μελετηθούν και αναλυθούν οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα οι τεχνολογίες μέσης ισχύος στα 10MW. Οι τεχνολογίες που εξετάστηκαν εκτενέστερα στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι οι μπαταρίες νατρίου-θείου και οι διατάξεις των σφονδύλων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ενεργειακό τοπίο της εποχής μας και αναφέρονται οι τρόποι και η χρησιμότητα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι τρόποι αποθήκευσης ενέργειας και συγκεκριμένα η αποθήκευση ενέργειας υπό τη μορφή χημικής (μπαταρίες) και μηχανικής (σφόνδυλοι) ενέργειας. Για τις μπαταρίες νατρίου-θείου και για τους σφονδύλους δημιουργούνται οι πίνακες S.W.O.T. (Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats). Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δύο αυτών μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με τους αντίστοιχους πίνακες. Στο τέταρτο κεφάλαιο δημιουργείται το διάγραμμα ροής ενέργειας (διάγραμμα Sankey) των δύο αυτών τεχνολογιών. Στο πέμπτο κεφάλαιο, καταγράφονται τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από την εν λόγω εργασία και πραγματοποιείται μία σύγκριση για τις δύο αυτές τεχνολογίες ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Λέξεις Κλειδιά

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας, Σφόνδυλος, Μπαταρίες Νατρίου, S.W.O.T, Διάγραμμα Sankey

Abstract

In the modern world, the requirements for energy are increasingly growing. At the same time, the need for better quality and “cleaner” energy is also increasing, compared with conventional power generation, such as fossil fuel. Given that the “traditional” energy sources, are not inexhaustible and are harmful for the environment, has turned the interest in renewable energy sources (RES). However, RES are unstable and unpredictable and so it is necessary to store energy in order to balance the load. Electricity storage methods are developed in order to fill this need.

The aim of this project is the understanding of the importance of energy storage and to study and analyze the methods of electricity storage and especially the technology of 10 MW power. The provisions, that are extensively examined are the sodium-sulfur batteries and flywheels.

The first chapter presents the energy situation of modern world and the utilities and methods of electricity storage. In the second chapter the methods of electrical methods are analyzed and in particular the energy storage in the form of chemical (batteries) and mechanical (flywheels) energy. The S.W.O.T (Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats) tables are created for sodium-sulfur batteries and flywheels. The third chapter analyzes the technical features of these two electricity storage methods and their corresponding tables are created. In the fourth chapter, the energy flow diagram (Sankey diagram) for these methods is designed. In the fifth chapter, the conclusions that have emerged from this work are presented and a comparison of these two technologies is made.

KeyWords

Renewable Energy Sources, Electricity Energy Storage, Flywheel, Sodium-based Batteries, S.W.O.T, Sankey Diagram

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ την καθηγήτριά μου κα. Φούντη Μαρία και την κα. Σταματιάδου Μαριάννα για την κατανόηση και τη βοήθεια που μου έδειξε.

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τη συμφοιτήτρια και πολύ καλή φίλη μου Χουλάκη Μαρία για όλη τη στήριξη, τη βοήθεια και συμπαράσταση που μου έδειξε σε όλη την κοινή μας πορεία στη σχολή. Θέλω να την ευχαριστήσω για τη συνεργασία της και τη βοήθεια της τόσο σε μαθήματα, εργασίες στη σχολή και για την εκπόνηση της εν λόγω εργασίας όσο και για τη στήριξή της σε όλα τα επίπεδα της ζωής μου.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου, Κώστα και Μαρία για την οικονομική και συναισθηματική τους στήριξη για τα χρόνια που πέρασα ως φοιτήτρια.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	5
Abstract	7
1.Ενεργειακό ζήτημα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	13
1.1.Ενεργειακή κατάσταση	13
1.2 Αποθήκευση ενέργεια και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	17
1.3 Πλεονεκτήματα (Τεχνικά, οικονομικά) αποθήκευσης ενέργειας	20
1.4 Διαθέσιμες τεχνολογίες 10MW- Σκοπός της διπλωματικής.....	23
2. Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσης ισχύος	25
2.1 Αποθήκευση χημικής ενέργειας.....	25
2.2 Δομή μπαταρίας	27
2.1.1 VRB: Οξειδοαναγωγικές μπαταρίες βαναδίου _____	29
2.1.2 Μπαταρίες Μολύβδου οξέος- Lead/Acid Batteries _____	32
2.1.3 Sodium-based high temperature batteries _____	35
2.1.3.1 Μπαταρίες νατρίου- θείου _____	39
2.1.3.2 Νάτριο/ χλωριούχο-μέταλλο _____	47
2.1.4 Εφαρμογές-State of the art _____	50
2.1.4.1 VRB-State of the art _____	50
2.1.4.2 Lead Acid Batteries- State of the art _____	51
2.1.4.3 Sodium-based high temperature batteries-Εφαρμογές/State of the art _____	53
2.1.4.3.1 NaS batteries _____	53
2.1.4.3.2 Zebra batteries _____	56
2.1.5 Διάγραμμα SWOT για τις μπαταρίες τεχνολογίας NaS _____	57
2.2.1 Σφόνδυλοι- Flywheels _____	61
2.2.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά _____	61
2.2.1.2 Χρησιμότητα συστημάτων αποθήκευσης σφονδύλων στη ρύθμιση ποιότητας της τάσης του δικτύου _____	78

2.2.1.3 Υπολογισμός αποθηκευόμενης ενέργειας _____	79
2.2.1.4 Σύγκριση σφονδύλων με βάση το υλικό κατασκευής τους (χαλύβδινοι σφόνδυλοι και σφόνδυλοι από νήματα κραμάτων) _____	84
2.2.2 State of the art- Εφαρμογές _____	85
2.2.3 Ανάλυση διαγράμματος SWOT _____	95
3. Χαρακτηριστικές ιδιότητες κάθε τεχνολογίας.....	97
3.1 Αποθηκευτική ικανότητα- χωρητικότητα.....	97
3.2 Διαθέσιμη ισχύς.....	97
3.3 Βάθος αποφόρτισης ή ρυθμός μεταφοράς ισχύος.....	98
3.4 Χρόνος αποφόρτισης.....	98
3.5 Αποδοτικότητα.....	99
3.5.1 Αποδοτικότητα αποφόρτισης.....	99
3.5.2 Αποδοτικότητα κύκλου _____	100
3.6 Κύκλοι ζωής-ανθεκτικότητα.....	101
3.7 Αυτονομία.....	101
3.8 Κόστος.....	102
3.9 Τεχνική ωριμότητα.....	104
3.10 Επίδραση στο περιβάλλον.....	106
3.11 Πυκνότητα ισχύος και ενεργειακή πυκνότητα.....	107
3.12 Ειδική ενέργεια.....	108
3.13 Χρόνος απόκρισης.....	108
4. Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών για μέση ισχύ.....	111
4. 1 Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο.....	112
4.1.1 Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο στις μπαταρίες NaS _____	112
4.1.2 Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο στη διάταξη των σφονδύλων _____	116
5. Συμπεράσματα.....	121
Βιβλιογραφία.....	124

1.Ενεργειακό ζήτημα και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

1.1 Ενεργειακή κατάσταση

Ο τομέας της ενέργειας αποτελεί ίσως τον περισσότερο «παγκοσμιοποιημένο» τομέα της οικονομίας με άμεσες ή έμμεσες επιπτώσεις σε όλους τους τομείς καθώς και καθοριστικό παράγοντα για την χάραξη πολιτικής σε ενεργοβόρους τομείς (μεταφορές, οικοδομή, βιομηχανία), την επίτευξη συγκεκριμένων ρυθμών ανάπτυξης την έρευνα και την τεχνολογία αλλά και την οικονομία. Η αγορά της ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο με τη σύγχρονη μορφή της (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) δεν έχει μακρά ιστορία, όμως οι εξελίξεις στην αγορά ενέργειας αποδείχτηκαν ραγδαίες και έντονες με αποτέλεσμα η παγκόσμια κοινότητα να έχει βιώσει σημαντικές εμπειρίες, όπως:

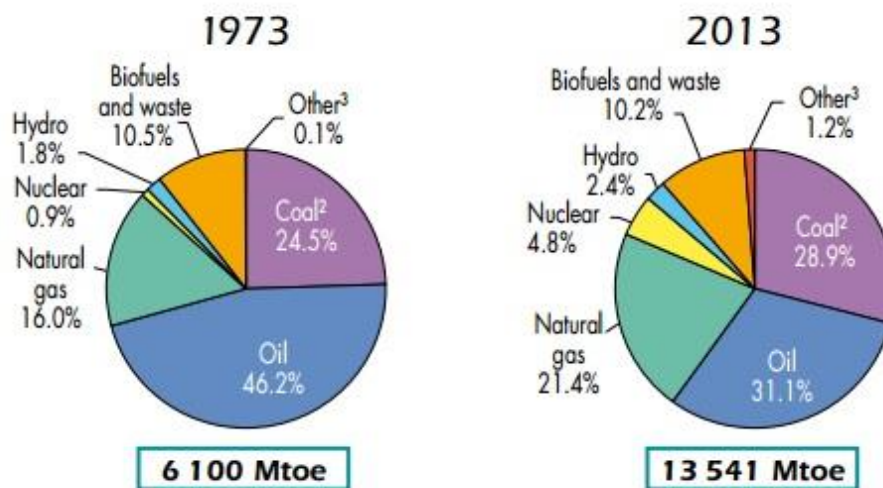
-Την περιορισμένη διαθεσιμότητα των χρησιμοποιούμενων πηγών ενέργειας, καθώς και η διάρκεια αποθεμάτων για κάποιες από αυτές δεν φαίνεται να ξεπερνά μερικές δεκαετίες.

-Τη δραματική επίπτωση της ενέργειας στην παγκόσμια οικονομία, η οποία εκφράστηκε με δύο πετρελαϊκές κρίσεις.

-Τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλεί η αυξανόμενη χρήση ρυπογόνων πηγών ενέργειας με έντονα φαινόμενα περιορισμένης έκτασης (όξινη βροχή, πυρηνικά ατυχήματα κλπ) ή και παγκόσμιας κλίμακας, το φαινόμενο θερμοκηπίου για παράδειγμα. Τα «παραδοσιακά» μέσα παραγωγής ενέργειας παρουσιάζουν σαν μειονέκτημα την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), που είναι αρκετά επιβλαβές για το περιβάλλον.

-Τη συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας. Συγκεκριμένα σήμερα ο ρυθμός με τον οποίο παράγεται και καταναλώνεται ενέργεια γύρω στα 13TW παγκοσμίως, νούμερο που θα φτάσει στα 25-30 TW το 2050 και στα 40-50 TW το 2100 σύμφωνα με το Αμερικάνικο Υπουργείο Ενέργειας (Department of Energy).[1] Για παράδειγμα τη

δεκαετία του 70 και συγκεκριμένα το 1973 οι υπολογιζόμενες ανάγκες ήταν περίπου 6100 Mtoe¹, ενώ το 2010 έφτασαν στα 13541 Mtoe (υπερδιπλάσιες), όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα:



Εικόνα 1.1: Κατανομή πηγών ενέργειας και καταναλισκόμενα ποσά ενέργειας [2]

Μέσα λοιπόν, από την πρόσφατη ιστορία του ενεργειακού τομέα αναδεικνύεται η ανάγκη για::

-Την ανάπτυξη νέων ενεργειακών τεχνολογιών, που θα συμβάλουν στην καλύτερη αξιοποίηση των χρησιμοποιούμενων καυσίμων ώστε να περιορίζονται οι ενεργειακές δαπάνες και να μετατίθεται το πρόβλημα ανεπάρκειας των αποθεμάτων «κερδίζοντας» με αυτό τον τρόπο πολύτιμο χρόνο για την ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επιτρέψουν την αντιμετώπισή του.

-Την ανάπτυξη νέων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των σχετικών τεχνολογιών αξιοποίησης τους που θα εξασφαλίζουν σημαντικότερα αποθέματα ή πρακτικά ανεξάντλητα ώστε να αντιμετωπισθεί ριζικά το πρόβλημα επάρκειας των ενεργειακών αποθεμάτων και ταυτόχρονα της περιβαλλοντικής προστασίας.

Η αντικατάσταση μορφών ενέργειας βασισμένων σε ορυκτά καύσιμα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελεί μοναδική μακροπρόθεσμη απάντηση στην πορεία προς τη βιώσιμη διαχείριση της ενέργειας. Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους, παρουσιάστηκε αρχικά μετά την

πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1979 και παγιώθηκε την επόμενη δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Οι κύριες ΑΠΕ είναι οι παρακάτω:

- Ηλιακή ενέργεια, η οποία εκμεταλλεύεται την ενέργεια του ήλιου και διακρίνεται στα παρακάτω:
 1. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα
 2. Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα
 3. Τα φωτοβολταϊκά

Τα δύο πρώτα χρησιμοποιούνται για παραγωγή θερμότητας μέσω ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική.

- Αιολική ενέργεια, κατά την οποία παράγεται ενέργεια από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Είναι μία ήπια μορφή ενέργειας και καθαρή, καθώς δεν παράγει ρύπους. Αποτελεί ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής καθώς το «καύσιμό» της είναι δωρεάν, άφθονο και αποκεντρωμένο.
- Υδραυλική ενέργεια, που βασίζεται στην εκμετάλλευση και μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού των λιμνών και της κινητικής ενέργειας του νερού των ποταμών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή γίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, μετατρέπεται η κινητική ενέργεια σε μηχανική μέσω της περιστροφής του άξονα της πτερωτής και στο δεύτερο μετατρέπεται η μηχανική σε ηλεκτρική, με τη βοήθεια της γεννήτριας. Τα υδροηλεκτρικά έργα διακρίνονται σε μικρής και μεγάλης κλίμακας. Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα εγκαθίστανται δίπλα σε ποτάμια ή κανάλια και χαρακτηρίζονται από μικρή περιβαλλοντική όχληση. Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών και σαν αποτέλεσμα έχουν τεράστιες επιπτώσεις στο περιβάλλον, επηρεάζουν το οικοσύστημα καθώς μεταβάλλουν ριζικά τη μορφολογία της περιοχής (για παράδειγμα μετακίνηση ψαριών).

Μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα παρακάτω:

1. Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές.
2. Έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και σχετικά μικρή διάρκεια κατασκευής.
3. Συμβάλλουν στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.
4. Είναι φιλικές προς το περιβάλλον, αλλά και τον άνθρωπο.
5. Είναι πηγές ενέργειας εγχώριες και βοηθούν στην ενεργειακή αυτάρκεια σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματά τους οι ΑΠΕ εμφανίζουν και αυτές μειονεκτήματα. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι ότι παρουσιάζουν διακυμάνσεις στις επιδόσεις τους καθώς συσχετίζονται άμεσα με τα καιρικά φαινόμενα και παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές από τόπο σε τόπο.

Γεγονός είναι ότι θα υπάρχει ενεργειακό έλλειμμα τα επόμενα χρόνια το οποίο μπορεί να λυθεί με μία προσαρμογή της κατανάλωσης ενέργειας και με τη χρήση των ΑΠΕ.

1.2 Αποθήκευση ενέργεια και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η ανάπτυξη και η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει παρουσιάσει αύξηση τα τελευταία χρόνια. Η αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρισμού από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποφέρει ικανοποίηση της ζήτησης με αξιοπιστία και με τον ελάχιστο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Εν τούτοις η απρόβλεπτη φύση των συγκεκριμένων ενεργειακών πηγών απαιτεί τη ρύθμιση των απαραίτητων συστημάτων ελέγχου διανομής και χρήσης της ισχύος. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι οι διακυμάνσεις της παραγόμενης ισχύος και οι διαφορές μεταξύ της παραγωγής και της ζήτησης. Ωστόσο ολοένα και περισσότερες τεχνολογίες μετατροπής και αποθήκευσης ενέργειας αναπτύσσονται και βελτιστοποιούνται για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας (electrical energy storage –EES) αναφέρεται στη διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα δίκτυο τροφοδοσίας σε μία μορφή η οποία μπορεί να αποθηκευτεί για να μπορεί να μετατραπεί και πάλι σε ηλεκτρική, όταν αυτό απαιτηθεί. Η αποθήκευση ενέργειας έχει πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των φορητών συσκευών, των μεταφορικών οχημάτων και των σταθερών πηγών ενέργειας, με τις οποίες θα ασχοληθούμε στην εν λόγω διπλωματική.

Οι καινοτομίες που μειώνουν δραστικά το κόστος των συστημάτων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ριζοσπαστικές αλλαγές στο σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα προβλήματα που αφορούν το φορτίο αιχμής, θα μπορούσαν να μειωθούν δραστικά, η ηλεκτρική σταθερότητα θα μπορούσε να βελτιωθεί και οι διαταραχές να εξαλειφθούν.

Η ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να αποθηκευτεί πρέπει να μετατραπεί σε μία άλλη μορφή ενέργειας, η οποία θα μετασχηματιστεί και πάλι σε ηλεκτρική. Πιο συγκεκριμένα η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στις παρακάτω μορφές:

- ❖ Χημική ενέργεια (μπαταρίες- συσσωρευτές)
- ❖ Μηχανική υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας σε σφόνδυλο
- ❖ Υπό τη μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς
- ❖ Υπό τη μορφή μαγνητικού πεδίου (υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης)
- ❖ Υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα (compressed air energy storage- CAES)
- ❖ Σε υδραυλική μορφή (συστήματα αντλησιοταμίευσης)
- ❖ Υπό τη μορφή υδρογόνου- Θερμοχημική αποθήκευση (κυψέλες καυσίμου-fuel cells-hydrogen energy storage)

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. Οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να διαιρεθούν σε δύο πολύ 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 ηλεκτροπαραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια θέση της ζήτησης και έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα για μικρά χρονικά διαστήματα. 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 αυτή την κατηγορία ανήκουν οι σφόνδυλοι (flywheels), οι υπερ-πυκνωτές (supercapacitors) και τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (Superconducting Magnetic Energy Storage-SMES).

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. 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 αν παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια ωρών ή ημερών και αν συντελούν ειδικότερα στη διαχείριση της ενέργειας, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου.

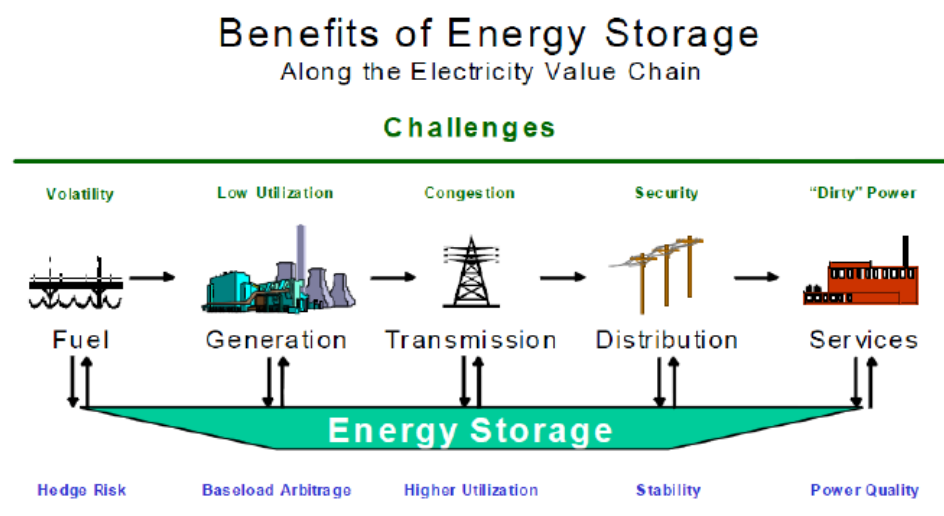
1.3 Πλεονεκτήματα (Τεχνικά, οικονομικά) αποθήκευσης ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα οφέλη της αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία διακρίνονται σε τεχνικά και οικονομικά.

Η παραδοσιακή αλυσίδα ενέργειας θεωρείται ότι περιλαμβάνει πέντε συνδέσμους, οι οποίοι είναι οι παρακάτω:

- Καύσιμο/πηγή ενέργειας
- Παραγωγή
- Μεταφορά
- Διανομή
- Εξυπηρέτηση καταναλωτικού κοινού.

Η αποθήκευση της ενέργειας θα αποτελέσει τον έκτο σύνδεσμο αυτής της αλυσίδας με τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

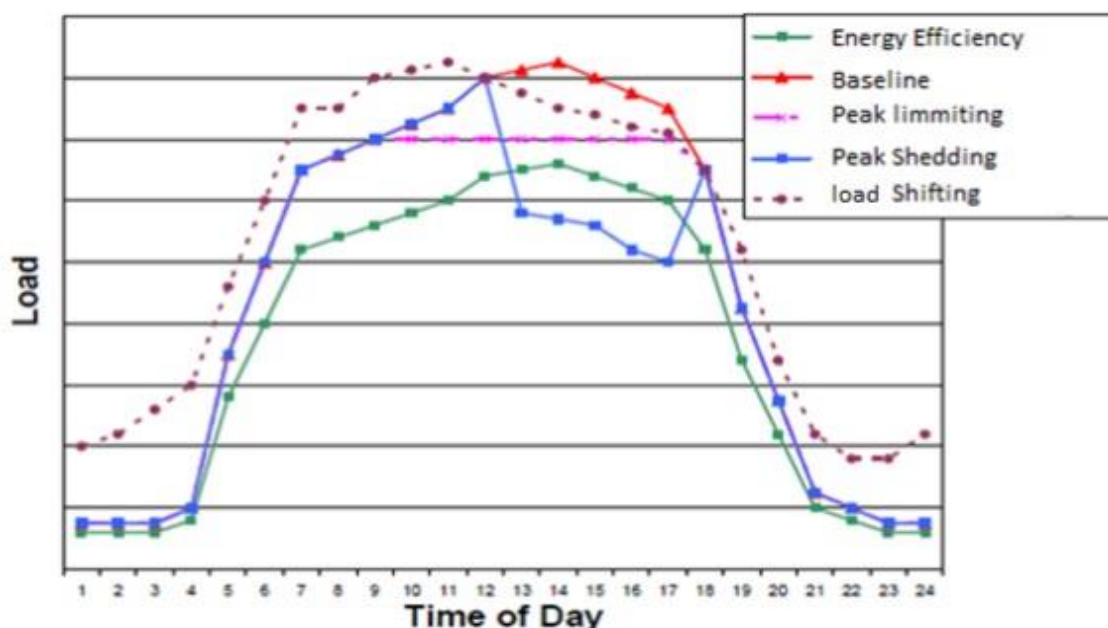


Εικόνα 1.2 : Τα οφέλη της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας [1]

1) Η ενδιάμεση ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το μετασχηματισμό πρωτογενούς ενέργειας χαμηλού κόστους, καθώς και η μετέπειτα χρησιμοποίηση της οπότε υπάρχει αυξημένη ζήτηση, είναι δυνατό να αντικαταστήσει την ακριβή ενέργεια που παράγεται από τους σταθμούς που μπαίνουν σε λειτουργία για την αναπλήρωση των

αιχμών του φορτίου. Σε δύο μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος η αποθήκευση παίζει ιδιαίτερο ρόλο. Η πρώτη είναι η συμβατική παραγωγή ενέργειας, η αποθήκευση της οποίας θα είναι σε θέση να αποζημιώσει για τις προσωρινές ενεργειακές απώλειες της παραγωγής, καθώς και να εκπληρώσει την εμπορική υποχρέωση του πληρωμένου ενεργειακού αποθέματος. Η δεύτερη είναι η αποθήκευση ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές, η οποία βοηθά στην αντιμετώπιση του προβλήματος που προκαλεί η απρόβλεπτη φύση αυτών των πηγών σε ότι αφορά την προσφορά της ενέργειας.

2) Είναι γεγονός ότι υπάρχουν διακυμάνσεις στην κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1 (γραμμή baseline), όπου η ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας κυμαίνεται περίπου στο μέσο των αιχμών της ζήτησης. Αυτή η ενεργειακή χρήση οδηγεί τελικά σε μεταφορά ενέργειας όσον αφορά τις αιχμές του φορτίου και όχι τη μέση ημερήσια κατανάλωση.



Εικόνα 1.3 : Διάγραμμα για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας [3]

3) Η ευελιξία των συστημάτων αποθήκευσης και ανάκτησης της ενέργειας βοηθά στην άμεση απόκριση και κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης. Η αδυναμία εξισορρόπησης του δικτύου μπορεί να προκληθεί από προσωρινό έλλειμμα ενέργειας, το οποίο είναι εφικτό να προβλεφθεί. Επίσης τυχαίες βλάβες της παραγωγικής μονάδας μπορούν να οδηγήσουν σε αδυναμία κάλυψης της ζήτησης. Με βάση τα προηγούμενα φαίνεται για ποιο λόγο είναι σημαντικά τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Είναι

σημαντικά, γιατί διασφαλίζουν την ανταπόδοση του κόστους της παρακάτω διπλής αλυσίδας:

Ηλεκτρική ενέργεια → Αποθηκευμένη ενδιάμεση ενέργεια → Ηλεκτρική ενέργεια

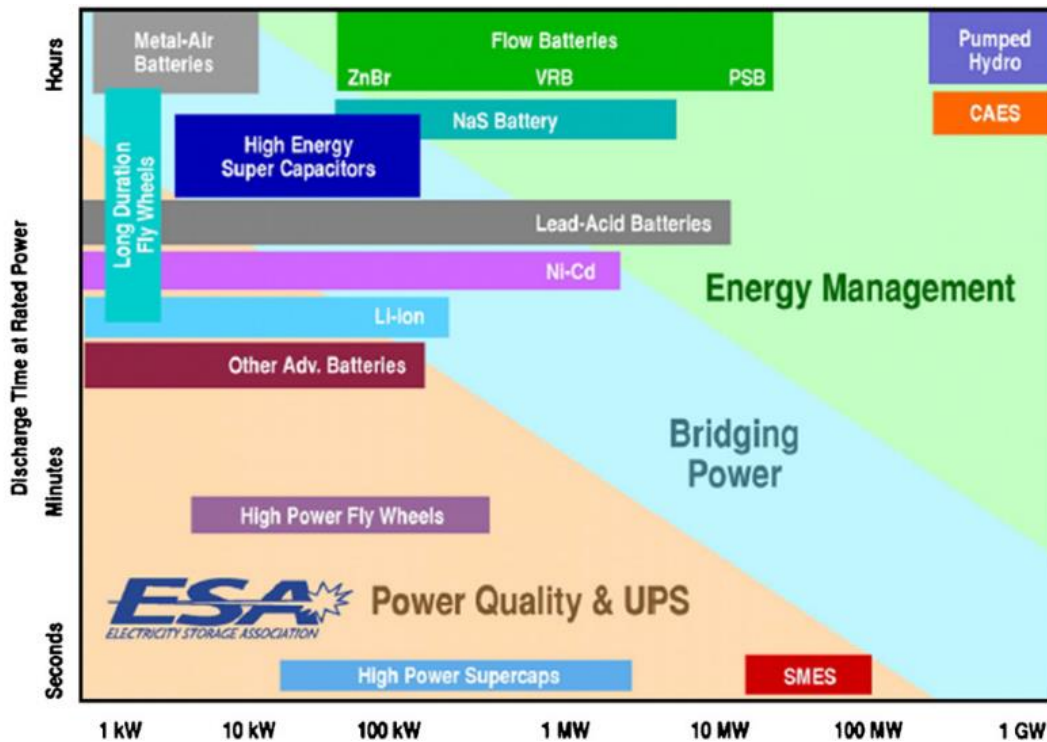
1.4 Διαθέσιμες τεχνολογίες 10MW- Σκοπός της διπλωματικής

Σε αυτήν την εργασία θα εξετάσουμε τις διαθέσιμες τεχνολογίες ηλεκτρικής ενέργειας μέσης ισχύος, συγκεκριμένα στα 10 MW και θα αναδείξουμε την αναγκαιότητα και τη σπουδαιότητα της μελέτης και της έρευνας των συγκεκριμένων τεχνολογιών, καθώς όπως έχουμε ήδη αναφέρει αποτελούν τη βιώσιμη λύση του μέλλοντος στο ενεργειακό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η κοινωνία μας. Ωστόσο θα επικεντρωθούμε σε δύο συγκεκριμένα τεχνολογίες, τις μπαταρίες με βάση το νάτριο που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (sodium based high temperature batteries) και στους σφονδύλους. Ειδικότερα οι διαθέσιμες τεχνολογίες μέσης ισχύος είναι οι παρακάτω, σύμφωνα και με την εικόνα 4:

- 1)VRB: Οξειδοαναγωγικές μπαταρίες βαναδίου
- 2)Μπαταρίες Νατρίου- θείου (NaS Batteries)
- 3)Μπαταρίες Μολύβδου- οξέος (Lead- Acid Batteries)
- 4)Σφόνδυλοι (Flywheels)

Θα αναφερθούμε στις παραπάνω τεχνολογίες στα επόμενα κεφάλαια. Παρ' όλα αυτά, εκτενέστερα θα μελετηθούν οι μπαταρίες νατρίου-θείου υψηλής θερμοκρασίας (sodium based high temperature batteries) και οι διατάξεις των σφονδύλων. Οι δύο αυτές τεχνολογίες θα εξετασθούν η κάθε μία ξεχωριστά, ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, την εμπορική τους ωριμότητα, την αποδοτικότητα τους, τον τρόπο λειτουργίας τους, την περιβαλλοντική τους επίδραση, το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης, στην ικανότητα εφαρμογής τους και την απόδοσή τους. Θα προσεγγίστουν τα διαγράμματα ενεργειακής απόδοσης και στο τέλος θα συγκριθούν.

Σκοπός είναι να αναδειχθεί η αναγκαιότητα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και να τονισθεί ότι οι βελτιώσεις των τεχνολογιών αυτών θα αποτελέσουν και τη λύση για το ενεργειακό πρόβλημα της σύγχρονης εποχής.



Εικόνα 1.4: Χρόνος αποφόρτισης και ικανότητα αποθήκευσης για τις διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας [4]

¹ Toe (τόνος ισοδύναμου πετρελαίου (TIP)): Είναι μονάδα ενέργειας και ορίζεται ως τη ποσότητα της ενέργειας που απελευθερώνεται από την καύση ενός τόνου αργού πετρελαίου. Είναι περίπου 42 GJ. Η μονάδα toe χρησιμοποιείται μερικές φορές για μεγάλα ποσά ενέργειας. Πολλαπλάσια που χρησιμοποιούνται, κυρίως το Mtoe= 100000 toe και το Gtoe=1000000000 toe. Μια υποπολλαπλάσια μονάδα είναι το χιλιόγραμμο ισοδύναμου πετρελαίου (kgoe) που είναι το 1/1000 του Toe

2. Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσης ισχύος

2.1 Αποθήκευση χημικής ενέργειας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια συσσωρευτών (μπαταριών), οι οποίοι αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια υπό τη μορφή χημικής ενέργειας.

Όπως περιγράψαμε και στην εισαγωγή, είναι προφανές ότι πρέπει να απεμπλακούμε από τις μη αναστρέψιμες συνέπειες των εκπομπών CO₂ και όσο το δυνατό γρηγορότερα. Για να γίνει αυτό πρέπει να βρεθούν και άλλοι τρόποι αποθήκευσης ενέργειας καθώς, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, οι πηγές ορυκτών καυσίμων δεν είναι ανεξάντλητες. Αυτά αποτελούν μέρος ενός μακροπρόθεσμου πλάνου και όχι μια τάση της εποχής. Σκοπός είναι να δημιουργηθεί ένα σύστημα αποθήκευσης που είναι πιο φιλικό στο οικοσύστημα (περιβάλλον και άνθρωπος), άλλα να είναι εξίσου αποδοτικό και ικανό να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες που συνεχώς αναπτύσσονται, καθώς εξελίσσεται και η κοινωνία. Μία μορφή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί και η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική.

Η χημική αποθήκευση ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω συσσωρευτών (μπαταριών). Αυτά τα συστήματα έχουν τη διπλή λειτουργία της αποθήκευσης και της απελευθέρωσης της ηλεκτρικής ενέργειας με την εναλλαγή των φάσεων φόρτισης- αποφόρτισης. Μπορούν να μετατρέψουν τη χημική ενέργεια που παράγεται από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις σε ηλεκτρική και αντίστροφα, με τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- ✓ Μη επιβλαβείς εκπομπές
- ✓ Αθόρυβη λειτουργία
- ✓ Απαίτηση ελάχιστης συντήρησης.

Γενικά υπάρχουν πολλών ειδών μπαταρίες. Από τις πολύ μικρές και απλές μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα ρολόγια μέχρι τις πολύ μεγάλες βιομηχανικές μπαταρίες. Σίγουρα, όμως, παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά στη λειτουργία τους, στα οποία θα αναφερθούμε παρακάτω για να γίνει αντιληπτός ο τρόπος λειτουργίας της μπαταρίας. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην κατα-

σκευή των συσσωρευτών (μολύβδου- οξέος, νικελίου-καδμίου, νικελίου-σιδήρου, ψευδαργύρου-αέρος, σιδήρου-αέρος, νατρίου-θείου κλπ) και τα κύρια στοιχεία τους είναι η ενεργειακή τους πυκνότητα (για παράδειγμα για το λίθιο είναι από 150 έως και 2000Wh / kg) [5] και την τεχνολογική ωριμότητα. Μειονέκτημα αποτελεί η σχετικά χαμηλή αντοχή τους για κύκλους ζωής μεγάλου εύρους. Χρησιμοποιούνται συχνά σε φορητά συστήματα, αλλά επίσης και σε μόνιμες εφαρμογές (όπως αποθήκευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε απομονωμένες περιοχές, κ.λπ.).

2.2 Δομή μπαταρίας

Αποτελούνται από ένα δοχείο ή μια θήκη από πλαστικό ή μέταλλο μέσα στην οποία εμπεριέχονται τα υλικά της μπαταρίας. Μέσα σε αυτή τη θήκη υπάρχουν τα ηλεκτρόδια ή οι πλάκες, που καταλαμβάνουν και το μεγαλύτερο μέρος της μπαταρίας. Διακρίνονται στην κάθοδο ή αλλιώς το θετικό ηλεκτρόδιο και στην άνοδο ή αρνητικό ηλεκτρόδιο. Η κάθοδος δέχεται τα ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα και προσλαμβάνει ηλεκτρόνια κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση. Η άνοδος δίνει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα και είναι αυτή που οξειδώνεται, που αποβάλλει δηλαδή ηλεκτρόνια κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση. Ακόμα υπάρχει ένα υγρό, κατά κύριο λόγο, που παίζει το ρόλο του ηλεκτρολύτη και αποτελεί τον τρόπο σύνδεσης των ηλεκτροδίων και χρησιμοποιείται για να γίνει η αντίδραση με τα ηλεκτρόδια έτσι ώστε να υπάρξει ροή ιόντων. Ο ηλεκτρολύτης εξ' αιτίας των ιόντων του είναι σε θέση να μεταφέρει ένα ηλεκτρικό ρεύμα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Η ονομαστική πυκνότητά του αλλάζει με την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Σε μερικές περιπτώσεις ο ηλεκτρολύτης είναι στερεός. Η χρήση του γίνεται για να αποφευχθούν φθορές, λόγω υπερχειλίσης του υγρού ηλεκτρολύτη. Ακόμη, ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια υπάρχει ο διαχωριστής ο οποίος εμποδίζει την επαφή των ηλεκτροδίων κατά τη μεταφορά των ηλεκτρονίων μεταξύ τους. Ο διαχωριστής είναι διαπερατός από τον ηλεκτρολύτη ώστε να διατηρείται η ιοντική αγωγιμότητα. Επίσης ηλεκτρικοί αγωγοί με δομή πλέγματος μπορούν να προστεθούν στα ηλεκτρόδια για να μειώσουν την εσωτερική αντίσταση.

Οι πιο επωφελείς συνδυασμοί των υλικών της ανόδου και της καθόδου είναι εκείνοι που θα δώσουν υψηλή τάση στο στοιχείο και θα είναι ελαφρύτεροι. Ωστόσο τέτοιοι συνδυασμοί μπορεί να μην είναι πάντα πρακτικοί εξ' αιτίας διαφόρων παραγόντων, όπως είναι η αντίδραση του υλικού με τα υπόλοιπα υλικά, η πόλωση, η δυσκολία χειρισμού και το υψηλό κόστος.

Η άνοδος επιλέγεται με βάση τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Αποτελεσματικότητα ως αναγωγικό μέσο. Δηλαδή να προκαλεί αναγωγή ενώ η ίδια οξειδώνεται.
- Υψηλή απόδοση αμπερωρίων, η οποία είναι πρακτική μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου και εκφράζει την ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που μεταφέρεται από έναν αγωγό όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης ενός αμπερ σε χρόνο μίας ώρας.
- Σταθερότητα
- Καλή αγωγιμότητα
- Ευκολία κατασκευής
- Χαμηλό κόστος

Τα καταλληλότερα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί ως τώρα ως αρνητικά ηλεκτρόδια είναι το υδρογόνο, ο ψευδάργυρος και το λίθιο.

Η κάθοδος επιλέγεται με βάση τα παρακάτω:

- Να είναι ένας αποτελεσματικός οξειδωτικός παράγοντας, δηλαδή να προκαλεί οξείδωση ενώ η ίδια ανάγεται.
- Να είναι σταθερή όταν έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη.
- Να έχει ικανοποιητική τάση λειτουργίας.

Τα πιο συνηθισμένα υλικά είναι μεταλλικά οξείδια ενώ για ειδικά συστήματα συσσωρευτών χρησιμοποιούνται αλογόνο, θείο και τα οξείδια του.

Τέλος ο ηλεκτρολύτης πρέπει να έχει καλή ιοντική αγωγιμότητα αλλά να μην είναι ηλεκτρικά αγώγιμος, καθώς τότε θα δημιουργούνταν εσωτερικά βραχυκυκλώματα. Λογικό είναι ότι ο ηλεκτρολύτης δεν πρέπει να αντιδρά με τα ηλεκτρόδια και να μην επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, να είναι ασφαλής αλλά και χαμηλού κόστους. Οι περισσότεροι ηλεκτρολύτες είναι υδατικά διαλύματα αλλά μπορεί να είναι και τήγμα άλατος ή άλλοι μη υδατικοί ηλεκτρολύτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αποφυγή αντίδρασης με την άνοδο.

Παρακάτω, γίνεται αναφορά και ανάλυση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μέσης ισχύος.

2.1.1 VRB: Οξειδοαναγωγικές μπαταρίες βαναδίου

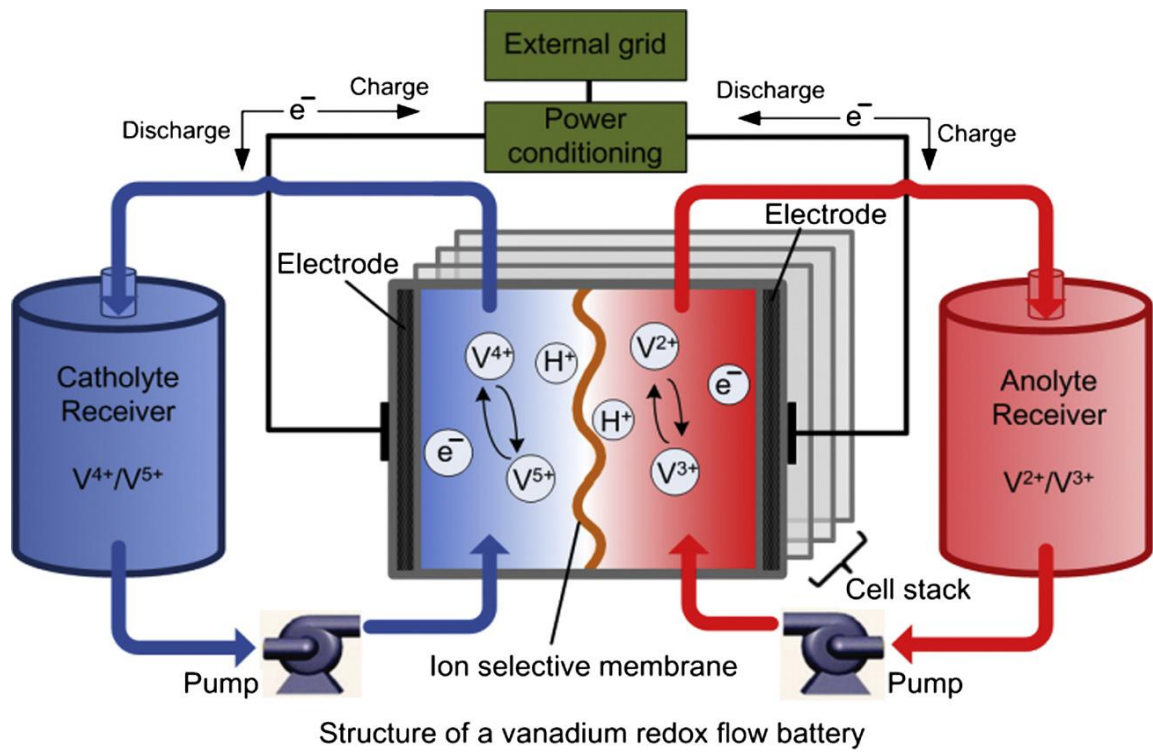
Θα αναφερθούμε αρχικά στην κατηγορία των μπαταριών ροής. Είναι προηγμένα συστήματα μπαταριών υδατο-ηλεκτρολύτη και πλεονεκτούν στη λειτουργία σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Ο πολύπλοκος σχεδιασμός αυτού του συστήματος και η κυκλοφορία των ηλεκτρολυτών είναι απαραίτητες για την επίτευξη των στόχων απόδοσης. Οι έρευνες στην ανάπτυξη αυτών των μπαταριών ροής ξεκίνησαν με την εφεύρεση της μπαταρίας ένυδρου ψευδαργύρου/ χλωρίου το 1968 [6]. Το σύστημα αυτό ήταν αντικείμενο της ανάπτυξης των εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας στις αρχές της δεκαετίας του '70 μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '80 [6] στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και από το 1980 μέχρι το 1992 στην Ιαπωνία [6]. Οι έρευνες έχουν εγκαταλειφθεί τώρα και έχουν στραφεί σε άλλες μπαταρίες ροής με τις πιο σημαντικές να είναι οι μπαταρίες βαναδίου-οξειδοαναγωγής. Η πρώτη VRB φτιάχτηκε στα τέλη του 1980 στο Πανεπιστήμιο New South Wales.[6]

Οι συγκεκριμένες μπαταρίες, -οι vanadium redox batteries ή οι VRB, όπως έχουν καθιερωθεί- είναι οι πιο γνωστές αυτής της κατηγορίας των μπαταριών ροής και είναι και οι μόνες οι οποίες εξελίσσονται. Η οξειδοαναγωγική μπαταρία βαναδίου εκμεταλλεύεται την ικανότητα του βαναδίου να βρίσκεται σε τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις οξείδωσης και χρησιμοποιεί αυτή την ιδιότητα για να κάνει μια μπαταρία που έχει ένα ηλεκτρικά ενεργό στοιχείο αντί για δύο. Πιο συγκεκριμένα, οι VRB αποθηκεύουν ενέργεια δεσμεύοντας ζεύγη βαναδίου οξειδοαναγωγής (V^{2+}/V^{3+} στα αρνητικά κελιά και V^{4+}/V^{5+} στα θετικά)[7]. Αυτά τα ενεργά χημικά τμήματα διαλύονται πλήρως σε θετικό διάλυμα ηλεκτρολυτών (σχήμα 5)

Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι τα παρακάτω:

- Μπορεί να προσφέρει σχεδόν ανεξάντλητη παραγωγή, απλά χρησιμοποιώντας μεγαλύτερες αποθηκευτικές δεξαμενές.
- Μπορεί να μείνει εντελώς αφόρτιστη για μεγάλες περιόδους χωρίς να εξασθενεί η λειτουργία της.
- Μπορεί να ξαναφορτισθεί απλά αντικαθιστώντας τον ηλεκτρολύτη, αν δεν υπάρχει διαθέσιμη πηγή να τη φορτίσει.
- Αν οι ηλεκτρολύτες αναμιχθούν τυχαία δεν υφίσταται βλάβη η μπαταρία.
- Έχει αποδειχθεί ότι ξεπερνούν τους 14000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης και αυτό γιατί η αντίδραση οξειδοαναγωγής περιλαμβάνει μόνο αλλαγή στον αριθμό σθένους των ιόντων βαναδίου. Οι εν λόγω κύκλοι ζωής αντιστοιχούν σε 7-15 χρόνια ζωής. [7]
- Η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι ανεξάρτητη από την ονομαστική της ισχύ και καθορίζεται από το μέγεθος των δεξαμενών και μόνο. Αυτό προσδίδει στο σύστημα μεγάλη ευελιξία, αφού μπορεί να προσαρμοστεί σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες.
- Λειτουργούν σε θερμοκρασία δωματίου και έτσι τα υλικά της μπαταρίας δεν υφίστανται επιπλέον καταπόνηση.
- Απαιτούν λίγη και εύκολη συντήρηση, γιατί οι ηλεκτρολύτες δεν είναι τοξικοί και είναι ασφαλείς και η θερμοκρασία λειτουργίας της μπαταρίας είναι χαμηλή.
- Είναι ανθεκτικές σε βαθιές εκφορτίσεις, χωρίς τον κίνδυνο να καταστραφούν.
- Έχουν πολύ γρήγορους χρόνους απόκρισης και μπορούν να αποδώσουν πολύ μεγάλη ισχύ (μεγαλύτερης της ονομαστικής) για σύντομες περιόδους (παλμική απόκριση).
- Λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ισχύος, πέραν της ονομαστικής με αρκετά καλό βαθμό απόδοσης μέχρι και 10% της ονομαστικής ισχύος. [7]

Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι έχουν σχετικά χαμηλό λόγο ενέργειας όγκου. Οι τελευταίες έρευνες στο Pacific Northwest National Laboratory έχουν διπλασιάσει την πυκνότητα ενέργειας.



Εικόνα 2.1: Σχηματικό διάγραμμα VRB [5]

2.1.2 Μπαταρίες Μολύβδου οξέος- Lead/Acid Batteries

Το στοιχείο μολύβδου-οξέος που είναι και η πρώτη πρακτικώς φορτιζόμενη και πιθανώς ευρύτατα χρησιμοποιούμενη μπαταρία σήμερα, επινοήθηκε από τον Gaston Plante, Γάλλο φυσικό, το 1859. Είναι γεγονός ότι έχουν ένα πολύ μικρό λόγο ενέργειας βάρους, καθώς και ένα χαμηλό λόγο ενέργειας όγκου, παρ' όλα αυτά η ικανότητα της να παρέχει υψηλά κρουστικά ρεύματα σημαίνει ότι τα κελιά έχουν ένα σχετικά υψηλό λόγο ισχύος βάρους. Ακόμα και αν το ρεύμα υπέρτασης δεν είναι σημαντικό σε σχέση με άλλες νεότερες τεχνολογίες, οι μπαταρίες μολύβδου/οξέος χρησιμοποιούνται λόγω του χαμηλού τους κόστους και ως μην μπορούν να παράσχουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι οι περισσότερο ευρέως χρησιμοποιούμενες μπαταρίες.

Τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι τα εξής:

- 1) Γρήγορη απόκριση
- 2) Μικρή ημερήσια αποφόρτιση ($< 0.3\%$) [9]
- 3) Σχετικά υψηλές αποδόσεις κύκλου (63-90 %) [3] και
- 4) Χαμηλό κόστος
- 5) Αποτελείται από εύκολα ανακυκλώσιμα μέρη
- 6) Είναι δημοφιλείς μπαταρίες, ικανές για μεταφορά ενέργειας από τα χαμηλά ποσοστά παραγωγής στα υψηλά τόσο σε τοπικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο
- 7) Υψηλή απόδοση
- 8) Υψηλή ηλεκτρική απόδοση, έως και 70% [6]
- 9) Ικανοποιητική απόδοση τόσο σε υψηλές όσο και σε χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας
- 10) Υψηλή τάση κυψελών

Τα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι τα παρακάτω:

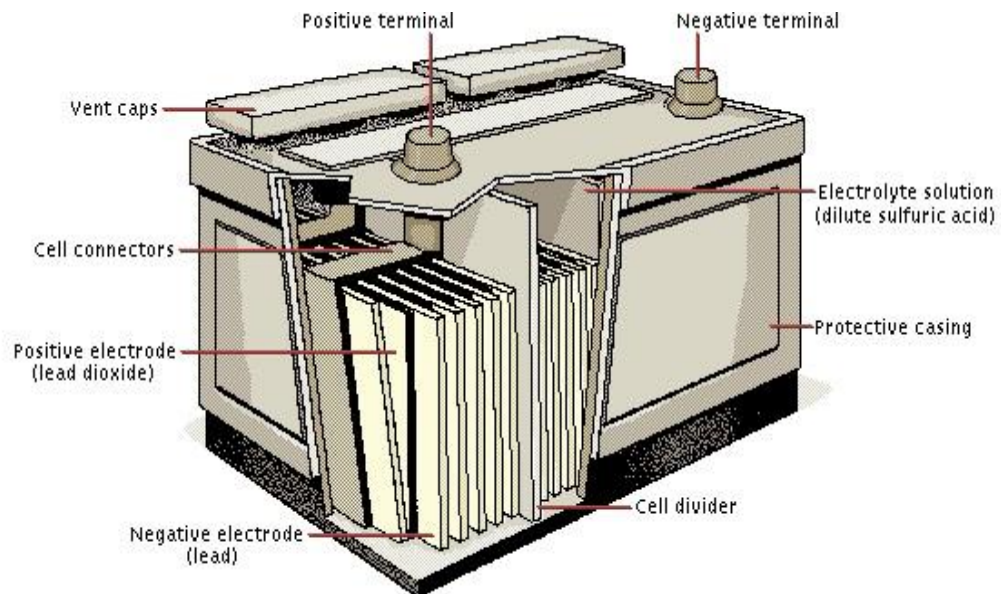
- 1) Σχετικά μικρός κύκλος ζωής(50-500 κύκλοι) [6]
- 2) Περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα, συνήθως 30-40 Wh/kg [6]
- 3) Η παραμονή μεγάλης διάρκειας στην κατάσταση της αποφόρτισης μπορεί να οδηγήσει σε μη αναστρέψιμη πόλωση των ηλεκτροδίων.
- 4) Είναι δύσκολη η κατασκευή στις μικρές διαστάσεις.
- 5) Αργή φόρτιση, η πλήρης φόρτιση διαρκεί 14-16 ώρες.[8]

Στο εσωτερικό μίας Lead Acid Battery

Η κάθοδος είναι διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2), η άνοδος είναι μόλυβδος (Pb) και ο ηλεκτρολύτης είναι θειικό οξύ. Μία μπαταρία 12 Volt αποτελείται από έξι ταυτόσημα κελιά 2 Volt [6]. Κάθε κελί περιέχει πλάκες μολύβδου διαφορετικής σύνθεσης μέσα σε αραιό θειικό οξύ. Οι πλάκες του διοξειδίου του μολύβδου (που συνδέονται με το θετικό πόλο της μπαταρίας) αντιδρούν με το οξύ για να σχηματιστεί θειικός μόλυβδος δίνοντας ηλεκτρόνια, αφήνουν δηλαδή την πλάκα θετική. Οι καθαρές πλάκες μολύβδου που συνδέονται με τον αρνητικό ακροδέκτη της μπαταρίας αντιδρούν με τα ιόντα θειικής ρίζας για το σχηματισμό θειικού μολύβδου και έτσι γίνονται αρνητικά φορτισμένες, εφόσον τροφοδοτούν δύο θετικά φορτία. Όταν η μπαταρία επαναφορτίζεται, ο θειικός μόλυβδος σε κάθε κύτταρο διασπάται, με αποτέλεσμα το διοξείδιο του μολύβδου επανατοποθετείται στο θετικό ηλεκτρόδιο, και ο μόλυβδος αντικαθίσταται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο.

Όταν είναι αποφορτισμένες για αρκετό καιρό, τότε δημιουργείται θείωση. Κάποια μόρια του θείου από το οξύ της μπαταρίας αρχίζουν να καλύπτουν το μόλυβδο των πλακών. Μόλις ο μόλυβδος καλυφθεί με θείο η μπαταρία δεν μπορεί να επαναφορτισθεί. Η θείωση ξεκινά όταν η μπαταρία είναι φορτισμένη κάτω από 75%, γι' αυτό και εάν είναι να χρησιμοποιηθούν για αρκετό καιρό πρέπει να φροντίζονται καλά.[10]

Παρακάτω απεικονίζεται μία μπαταρία μολύβδου- οξέος και τα τμήματα από τα οποία αποτελείται.



Εικόνα 2.2: Μπαταρία μολύβδου οξέος [10]

2.1.3 Sodium-based high temperature batteries

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στις μπαταρίες που έχουν σαν βάση τους το νάτριο. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται κυρίως και αναπτύσσονται με ταχύτερο ρυθμό είναι οι μπαταρίες νατρίου θείου (NaS batteries), ενώ ακολουθούν και οι μπαταρίες νατρίου-χλωριούχου μετάλλου που χρησιμοποιούνται κυρίως σε ηλεκτρικά οχήματα και λιγότερα για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω χαμηλών αποδόσεων. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα μας απασχολήσουν οι μπαταρίες νατρίου θείου.

Η τεχνολογία του νατρίου-θείου εισήχθη στα μέσα της δεκαετίας του εβδομήντα. Μια δεκαετία αργότερα, λανσαρίστηκε το σύστημα νατρίου/χλωριούχου μετάλλου. Αυτή η τεχνολογία πρόσφερε κάποιες λύσεις σε μερικά από τα θέματα που είχαν προκύψει με τις μπαταρίες νατρίου-θείου. Από τη στιγμή που ανακαλύφθηκαν μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '90, αυτές οι δύο τεχνολογίες θεωρούνταν ότι κάλυπταν τις ανάγκες ενός μεγάλου αριθμού εφαρμογών αποθήκευσης ενέργειας. Δεδομένου όμως της στροφής της έρευνας στην ανάπτυξη της τροφοδοσίας των ηλεκτρικών οχημάτων, οι βιομηχανίες και οι κυβερνητικοί οργανισμοί στράφηκαν και επένδυσαν για την ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής. Σημαντικές εξελίξεις πραγματοποιήθηκαν και λόγω των υψηλών αποδόσεων, διάρκειας, ασφάλειας και δυνατοτήτων κατασκευής

Οι επαναφορτιζόμενες τεχνολογίες μπαταριών υψηλών θερμοκρασιών που χρησιμοποιούν μεταλλικό νάτριο προσφέρουν ελκυστικές λύσεις για πολλές εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας υψηλής κλίμακας. Πολλές χρήσεις τους αφορούν την παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ισχύος και κάποιες αφορούν κινητές συσκευές, όπως είναι οι αεροδιαστημικοί δορυφόροι. Οι χρήσεις που είναι σχετικές με την ηλεκτρική ισχύ συχνά αναφέρονται ως σταθερές εφαρμογές για να διαφοροποιούνται από τις κινητές. Πολλά είδη μπαταριών που έχουν σαν βάση το νάτριο έχουν μελετηθεί, αλλά αυτή που έχει επικρατήσει είναι η sodium-beta μπαταρία. Τα υλικά με τα οποία κατασκευάζεται, είναι το ενεργό υγρό νάτριο, που χρησιμοποιείται σαν αρνητικό ηλεκτρόδιο και η κεραμική beta-alumina (β -alumina, Al_2O_3), που λειτουργεί σαν ηλεκτρολύτης. Οι ηλεκτρολύτες παίζουν έναν καθοριστικό ρόλο στην πυκνότητα της ισχύος, της χρονικής σταθερότητας και στην ασφάλεια της μπαταρίας. Πέρα από την ιοντική αγωγιμότητα, μία καλή ηλεκτροχημική σταθερότητα και συμβατότητα με τα

ηλεκτρόδια είναι επίσης επιθυμητά με σκοπό τη βελτιστοποίηση του ηλεκτρολύτη. Ο στερεός ηλεκτρολύτης είναι σημαντικό κομμάτι της διαμόρφωσης της κυψέλης. Σαν συνέπεια για να αποδώσει την αναμενόμενη απόδοση πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις:

- Υψηλή ιοντική αγωγιμότητα για να μειωθούν οι επιδράσεις της αντίστασης πόλωσης στην μπαταρίας στερεής κατάστασης.
- Η αναγκαιότητα να είναι θερμοδυναμικά σταθερή και να λειτουργεί σταθερά σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.
- Πρέπει να είναι φυσικά και χημικά συμβατός με την άνοδο και την κάθοδο.

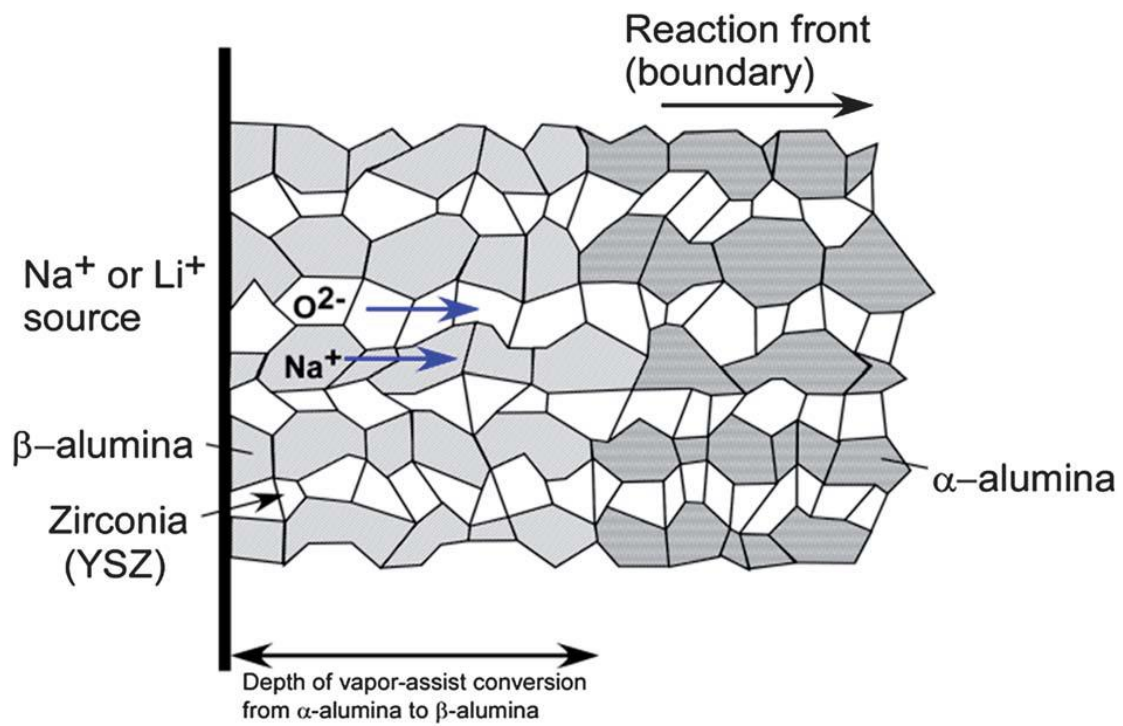
Συγκεκριμένα τώρα θα μελετήσουμε τη β -alumina (beta-alumina).

Η beta-alumina είναι ένας στερεός ηλεκτρολύτης. Είναι ιστορικά ο πρώτος γρήγορος ιοντικός αγωγός που χρησιμοποιείται τόσο στις μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS batteries), όσο και στις μπαταρίες νατρίου-χλωριούχου μετάλλου). Χρησιμοποιείται για την αυξημένη αγωγιμότητα που παρουσιάζει σε υψηλές θερμοκρασίες. Υπάρχουν δύο διακριτές κρυσταλλικές δομές: β - Al_2O_3 και β'' - Al_2O_3 . Η β - Al_2O_3 έχει τη στοιχειομετρία του $\text{NaO}_2 \cdot (8-11) \text{Al}_2\text{O}_3$ ενώ η β'' - Al_2O_3 , η οποία παρουσιάζει υψηλότερη ιοντική αγωγιμότητα, έχει χαμηλότερο περιεχόμενο σε αργίλιο και μία στοιχειομετρία $\text{NaO}_2 \cdot (5-7) \text{Al}_2\text{O}_3$. [11] Ως εκ τούτου διαφέρουν σε χημική στοιχειομετρία και στην αλληλουχία στοίχισης των ιόντων οξυγόνου κατά μήκος του στρώματος αγωγού. Η βασική μονάδα αποτελείται από το μπλοκ του σπινελίου (spinel block) και το τμήμα σύνδεσης. Το spinel block είναι ένα στρώμα τεσσάρων επιπέδων ABCA που αποτελείται από ιόντα οξυγόνου και ιόντα αργιλίου. Το κομμάτι σύνδεσης περιέχει λιγότερα ιόντα οξυγόνου και περισσότερο χώρο για κατιόντα νατρίου. Μία ολόκληρη κυψέλη απαιτεί τρία ζεύγη των παραπάνω στοιχείων.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για συνθέσεις β'' - Al_2O_3 , όπως είναι μέσω μίας συμβατικής στερεής αντίδρασης και μηχανοχημικοί τρόποι. Η β'' - Al_2O_3 χρησιμοποιείται σαν καλύτερος αγωγός. Ωστόσο, στη μέθοδο με την αντίδραση σε στερεή κατάσταση και στις χημικές μεθόδους είναι δύσκολο να αποκτηθεί ένα ομοιογενές υλικό και αυτό γιατί η συνθετική β'' - Al_2O_3 συχνά αναμειγνύεται με τη β - Al_2O_3 και με το υπολειπόμενο NaAlO_2 . Ο βοημήτης έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή καθαρού β'' - Al_2O_3 .

Πέρα από τη σύνθεσή της, η ιοντική αγωγιμότητα της πολυκρυσταλλικής β'' - Al_2O_3 εξαρτάται από το λόγο β''/β και την μικροδομή (μέγεθος κόκκων, προσμείξεις κ.λ.π).

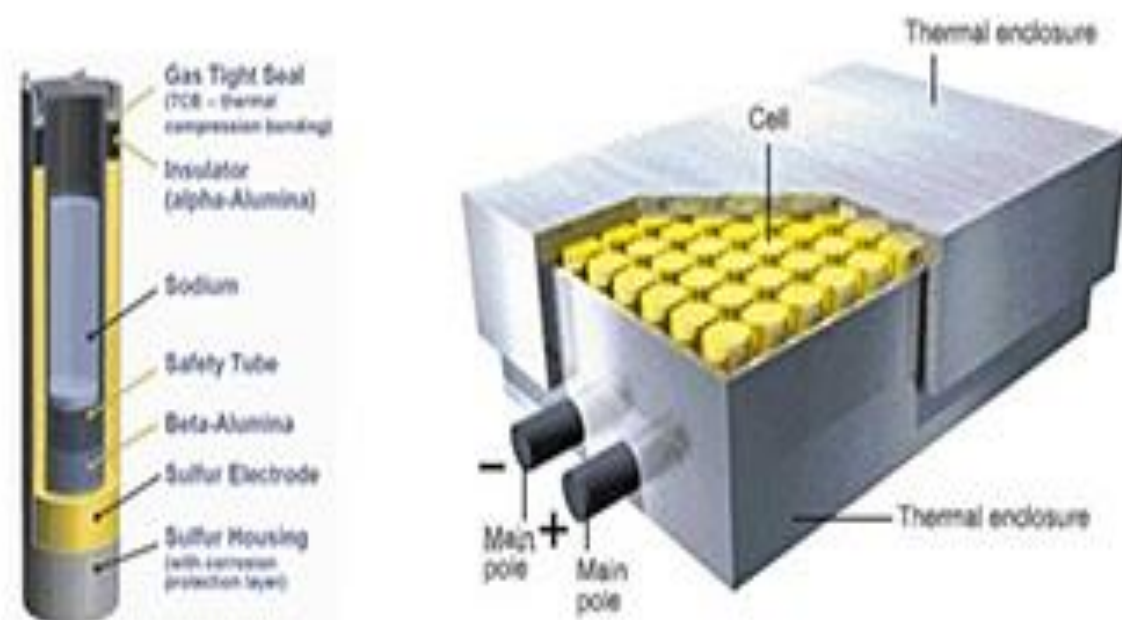
Είναι επίσης σημαντικό να ληφθεί υπόψη η αντιδραστικότητα του β/β'' - Al_2O_3 με το νερό. Η συμβατική αντίδραση στερεάς κατάστασης αφήνει υπόλοιπο NaAlO_2 , καθι-
στώντας το προϊόν ευπαθές στο νερό (H_2O) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) της
ατμόσφαιρας. Μία μέθοδος ατμών έχει προταθεί για να αποκτηθεί $\text{Na-}\beta''$ - Al_2O_3 με
περισσότερη σταθερότητα και μηχανική ισχύ σε σχέση με το $\text{Na-}\beta''$ - Al_2O_3 από τη
συμβατική αντίδραση στερεής κατάστασης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μία
σχηματική περιγραφή της λειτουργίας της μεθόδου ατμών. Σε αυτή τη διαδικασία, το
αρχικό υλικό α - Al_2O_3 και YSZ (σταθεροποιημένη υτρία ζirkονίου) τήκονται στους
1500-1600°C [11] και μετά θάβονται σε σκόνη από νάτριο (π.χ. Na_2CO_3). Οι αλκαλι-
κές ενώσεις διασπώνται και επιτρέπουν αντίδραση των οξειδίων των αλκαλίων με το
τον α - Al_2O_3 .



Εικόνα 2.3: Σχηματική επεξήγηση του μηχανισμού υποβοήθησης ατμού για αγωγούς ιόντων συνθετικής β -alumina [11]

2.1.3.1 Μπαταρίες νατρίου- θείου

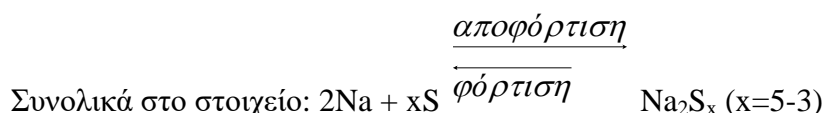
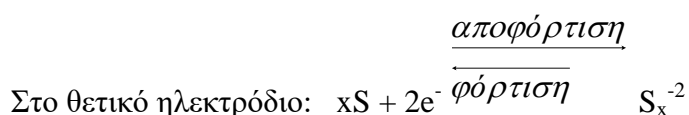
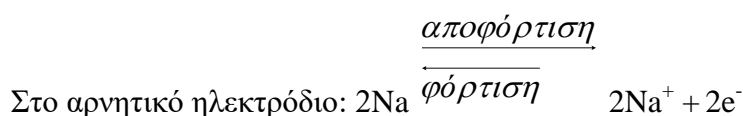
Οι μπαταρίες νατρίου θείου κυκλοφόρησαν αρχικά στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και αργότερα έγιναν πολλές μελέτες από την Ευρώπη, όπως και στην Ιαπωνία τόσο για τη χρήση των μπαταριών αυτών σε συστήματα ηλεκτρικών οχημάτων όσο και σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Η εταιρεία NGK στην Ιαπωνία ξεκίνησε την ανακάλυψη του ηλεκτρολύτη β-alumina χρησιμοποιώντας την εμπειρία στην τεχνολογία των κεραμικών υλικών το 1984 [15]. Αυτό επεκτάθηκε και στην εφεύρεση των μπαταριών NaS το 1989. Μια μπαταρία νατρίου-θείου απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



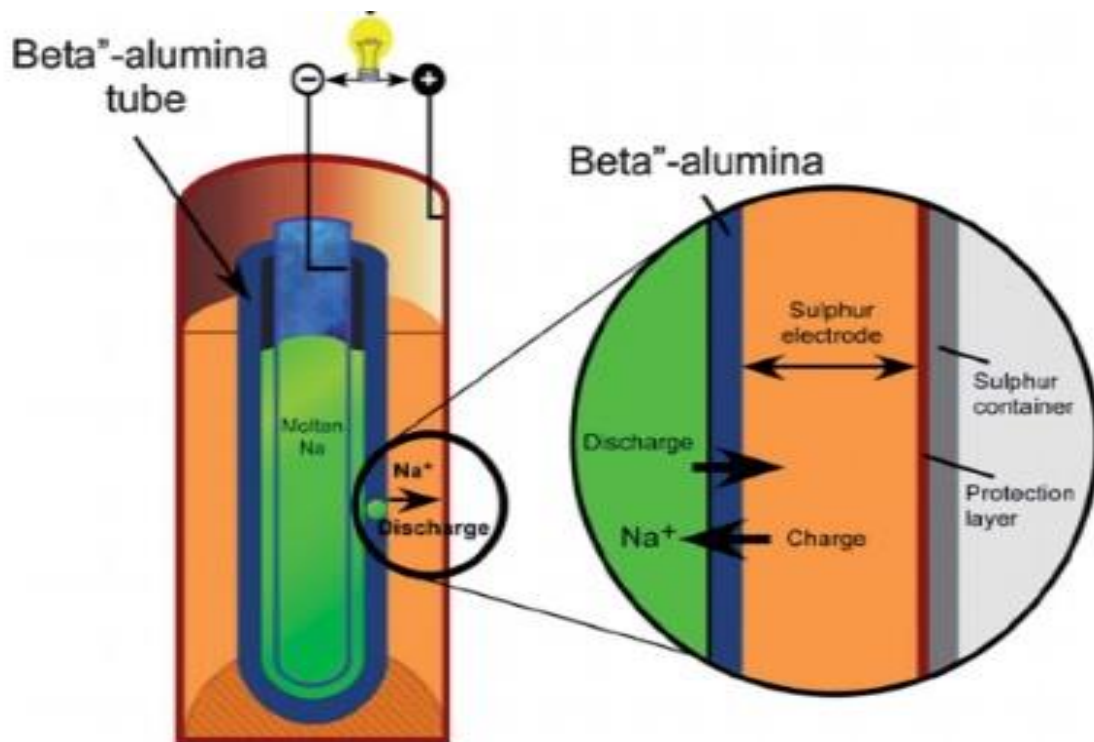
Sodium-Sulfur (NaS) Batteries

Εικόνα 2.4: Μπαταρία Νατρίου- Θείου. [12]

Η κυψέλη μιας μπαταρίας νατρίου-θείου αποτελείται από θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος): τηγμένο θείο, αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) : τηγμένο νάτριο, ηλεκτρολύτη: στερεή και κεραμική β-alumina. Η μεμβράνη του ηλεκτρολύτη είναι ένας στερεός οξειδίου του αλουμινίου και δεν επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να ρέουν. Κατά την αποφόρτιση το νάτριο οξειδώνεται στη αλληλεπίδραση του με τα τριοξείδια του αλουμινίου σχηματίζοντας ιόντα νατρίου. Τα τελευταία μέσω του ηλεκτρολύτη, αλληλεπιδρούν με το θείο και δημιουργείται πενταθειούχο νάτριο (Na_2S_5). Το πενταθειούχο νάτριο δεν αλληλεπιδρά με το υπόλοιπο θείο και σαν αποτέλεσμα δεν αναμειγνύεται με το θείο που έχει μείνει και έτσι σχηματίζεται ένα υγρό μίγμα δύο φάσεων. Έπειτα το υπόλοιπο θείο, που είναι ελεύθερο, καταναλώνεται, το Na_2S_5 σταδιακά μετατρέπεται σε πολυσουλφίδια νατρίου μίας φάσης αποκτώντας περισσότερο θείο προοδευτικά. Κατά τη φόρτιση, αυτές οι χημικές αντιδράσεις αντιστρέφονται. Οι αντιδράσεις είναι οι παρακάτω:



Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά η φόρτιση-αποφόρτιση:



Εικόνα 2.5: Μπαταρία νατρίου-θείου. Σχηματική απεικόνιση φόρτισης-αποφόρτισης.[11]

Αν και τα ενεργά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κελιών νατρίου/θείου έχουν σχεδιασθεί ανεξάρτητα, η συνολική συμπεριφορά τάσης ακολουθεί τα προβλεπόμενα από τη θερμοδυναμική. Η τάση του κυκλώματος είναι σταθερή στα 2,076V στο 60- 75% της αποφόρτισης, όταν υπάρχει το διφασικό μίγμα θείου και του Na_2S_5 . Η τάση στη συνέχεια μειώνεται γραμμικά στη μονοφασική περιοχή του Na_2S_x μέχρι το σημείο λήξης της αποφόρτισης. Το τέλος της αποφόρτισης συνήθως γίνεται στα 1,78 έως 1,9 V. [6].

Πολλοί ερευνητές διάλεξαν να περιορίσουν την αποφόρτιση σε λιγότερο από εκείνη της θεωρητικής για δύο λόγους:

A) Η διαβρωτική δράση μειώνεται καθώς αυξάνει το x στο Na_2S_x και

B) Για να περιοριστεί η υπέρ- αποφόρτιση από τοπικά κελιά, λόγω πιθανής ανομοιομορφίας στο εσωτερικό της μπαταρίας.

Αν η αποφόρτιση συνεχιστεί και μετά από το Na_2S_3 , άλλα διφασικά μίγματα εμφανίζονται, όπως στερεό Na_2S_2 . Ο σχηματισμός του Na_2S_2 είναι ανεπιθύμητος, καθώς εμφανίζει πολύ χαμηλή επαναφόρτιση και μπορεί να προκαλέσει και βλάβες στη δο-

μή του ηλεκτρολύτη. Σε υψηλές καταστάσεις φόρτισης, η τάση αυξάνεται σημαντικά και αυτό μπορεί να προκαλέσει μικρή αύξηση της τάσης και στο κελί στην αρχή της αποφόρτισης.

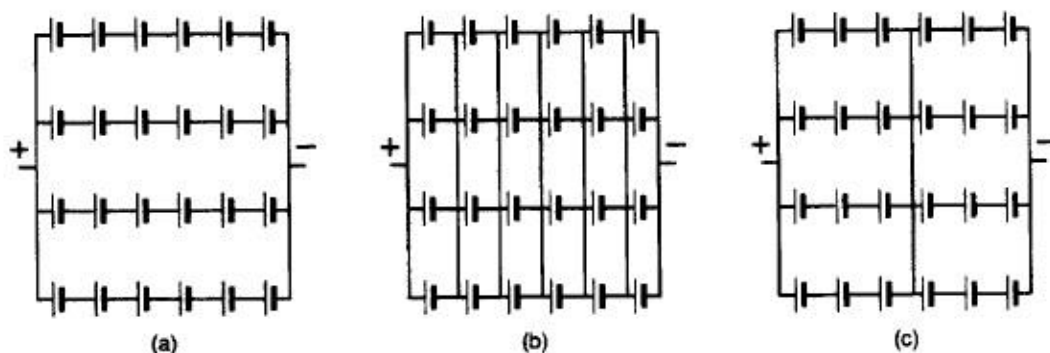
Ο κύριος οργανισμός που αναπτύσσει και εμπορεύεται την τεχνολογία μπαταριών NaS είναι η ιαπωνικά σύμπραξη των εταιρειών NGK Insulatod, Ltd και της Tokyo Electric Power Company (TEPCO) που ξεκίνησε το 1984. Κύριος σκοπός ήταν η δημιουργία κυψελών με επαρκή ενεργειακή πυκνότητα που να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κατά το κανονικό φορτίο και σε ώρες αιχμής και να έχουν μία αποφόρτιση περιόδου οχτώ ωρών. Η τεχνολογία αυτών των κελιών απαιτεί μία κατασκευή «σωλήνων» από β-alumina ακριβών διαστάσεων, μεγάλης διαμέτρου (ξεκίνησε από τα 40mm και έφτασε και τα 45mm) και υψηλής ποιότητας.

Σχεδιασμός μπαταριών NaS

Το σύστημα περιλαμβάνει μηχανική υποστήριξη για τις κυψέλες, ένα σύστημα θερμικής διαχείρισης για να διασφαλίζεται ότι το κάθε κελί αντέχει στις σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (π.χ. για τις μπαταρίες NaS οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 300°C έως 350°C[6]), ηλεκτρικές διασυνδέσεις (π.χ κελί με κελί), συσκευές προστασίας σε περίπτωση αστοχίας της κυψέλης και συσκευές που σχετίζονται με την ασφάλεια, όπως είναι οι ασφάλειες τήξης. Οι μπαταρίες συναρμολογούνται συνδέοντας τις κυψέλες σε σειρές και σε συστοιχίες παράλληλες ώστε να παραχθεί η απαιτούμενη τάση και ισχύς από τις κυψέλες. Ηλεκτρικές θερμάστρες τοποθετούνται εντός του θαλάμου, με σκοπό να θερμαίνονται οι κυψέλες και να αντισταθμίζεται η απώλεια θερμότητας κατά τη διάρκεια των περιόδων όπου η μπαταρία βρίσκεται σε αδράνεια. Κανονικά δεν απαιτείται επιπλέον θερμότητα κατά τη διάρκεια της τακτικής φόρτισης και αποφόρτισης, λόγω της ωμικής θέρμανσης και των επιδράσεων της χημικής αντίδρασης.

Ηλεκτρική δικτύωση: Κατά τη διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας οι μεμονωμένες κυψέλες θα αστοχήσουν και έτσι θα υποβαθμιστεί η ηλεκτρική απόδοση. Ο ρυθμός της υποβάθμισης είναι μία συνάρτηση της αστοχίας των χαρακτηριστικών των κυψελών και της διαμόρφωσης της ηλεκτρικής δικτύωσης της μπαταρίας. Κάποια κάλυψη αυτής της υποβάθμισης παρέχεται από την πρόσθετη ικανότητα απόδοσης, που μπορεί να υπάρχει κατά την έναρξη της λειτουργίας. Ωστόσο, σε μερικές διαμορφώσεις ειδικά σε αυτές με την υψηλή τάση, ακόμα και οι μικρές αστοχίες της κυψέλης είναι ση-

μαντικές και επιζήμιες, για αυτό πρέπει να ελέγχονται και να μετριάζονται. Τα κελιά τοποθετούνται σε σειρά για να παραχθεί η απαιτούμενη τάση. Εάν η χωρητικότητα ενός κελιού είναι μικρότερη από εκείνη που απαιτείται τότε επιπλέον παράλληλη σύνδεση είναι αναγκαία. Κάθε διαμόρφωση των κυψελών είναι ικανή να ικανοποιήσει τις ίδιες ονομαστικές τιμές για τάση και απόδοση, αλλά και κάθε μία έχει μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα που εξαρτώνται από την αξιοπιστία των κυψελών, την ηλεκτρική συμπεριφορά του κελιού κατά την αστοχία και την ικανότητα απόδοσης του κελιού. Επιπλέον αυτή η διαμόρφωση επηρεάζει και την ασφάλεια. Όσον αφορά την σύνδεση των κυψελών κατά σειρά, εάν μία κυψέλη αστοχήσει με χαμηλή αντίσταση, θα είναι ικανή να κρατήσει μία λογική τιμή για το ρεύμα λειτουργίας. Αλλιώς, αν αστοχήσει τελείως ένα κελί θα κάνει και την υπόλοιπη σειρά δυσλειτουργική. Για αυτό και συσκευή βραχυκυκλώματος συνδέεται παράλληλα με τα κελιά. Επίσης σειρές με πολλές κυψέλες δεν είναι επιθυμητές και αυτό γιατί εάν το πρώτο κελί υπερφορτισθεί με υψηλή τάση τότε αυτή θα μοιραστεί και στα υπόλοιπα κελιά και υπάρχει περίπτωση αστοχίας όλο και περισσότερων κελιών. Στην παράλληλη σύνδεση, η αντίσταση κάθε κυψέλης που έχει αστοχήσει πρέπει να είναι υψηλή ώστε να εμποδιστεί η αποφόρτιση των υπόλοιπων κυψελών που έχουν μείνει. Για αυτό το λόγο μία συσκευή τοποθετείται σε σειρά με κάθε κυψέλη ώστε αν συμβεί το παραπάνω να το μεταφέρει σε κατάσταση «ανοιχτού κυκλώματος». Όταν συνδυασμός παράλληλων και εν σειρά, όπου οι παράλληλες συνδέσεις παρέχονται σε τακτά διαστήματα κατά μήκος της σειράς, παρέχει μία συμβιβαστική λύση μεταξύ των δύο πρώτων επιλογών και περιορίζει την ανάγκη για μεμονωμένες συσκευές σε περίπτωση αστοχίας της κυψέλης. Μία αστοχία της κυψέλης έχει σαν αποτέλεσμα την επαναφόρτιση των υπόλοιπων κυψελών που έχουν μείνει σε σειρά από τα υπόλοιπα που είναι παράλληλα. Μία από αυτές τις κυψέλες, στη συνέχεια, γίνεται αρκετά ανθεκτική ώστε κατά την πλήρη φόρτιση αποτρέπει επιπλέον ρεύμα να διαρρεύσει τη σειρά. Σαν συνέπεια, μία κυψέλη λειτουργεί σαν μία συσκευή ανοιχτού κυκλώματος. Το σπουδαιότερο μειονέκτημα αυτού του συνδυασμού είναι η αποτυχία μίας κυψέλης απομακρύνει τα εναπομείναντα κελιά από τη σειρά με τη συμβολή του στην ενέργεια της μπαταρίας. Επιπλέον, εάν χρησιμοποιούνται κυψέλες υψηλής ικανότητας, ο αριθμός των παράλληλων είναι μικρός, η μπαταρία γίνεται ευάλωτη σε αστοχία των κυψελών.



Εικόνα 2.6: Τρόποι σύνδεσης κυψελών (a)κατά σειρά (b) παράλληλα (c) κατά σειρά και παράλληλα [6]

Οι σχεδιαστές πρέπει να διασφαλίσουν ότι τα σχέδιά τους θα οδηγήσουν σε μία μπαταρία που θα έχει επαρκή διάρκεια ζωής. Πάλι ο ρυθμός «υποβάθμισης» της μπαταρίας είναι μια συνάρτηση της αστοχίας των χαρακτηριστικών των κυψελών και της διαμόρφωσης του ηλεκτρικού δικτύου της μπαταρίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά αναφέρονται με τον όρο της αξιοπιστίας. Οι σχεδιαστές των μπαταριών NaS συχνά χρησιμοποιούν τη στατιστική κατανομή Weibull για να περιγράψουν την αξιοπιστία των μεμονωμένων κελιών. Αυτή η πληροφορία (που απορρέει κατά τη δοκιμή της κυψέλης) σε συνδυασμό με μία επιλεγμένη κυψέλη σε συνδυασμό με μία επιλεγμένη ηλεκτρική διαμόρφωση και τον αριθμό των απαιτούμενων σειρών και παραλλήλων χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η διάρκεια της ζωής της μπαταρίας αυξάνεται όσο ο αριθμός των κυψελών που είναι σε παράλληλη σύνδεση αυξάνεται. Εν προκειμένω οι σταθερές εφαρμογές μπαταριών είναι πολύ πιο ευέλικτες λόγω του μεγάλου αριθμού των κυψελών που απαιτούνται.

Όλες οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στην αποθήκευση ενέργειας υψηλής κλίμακας, συμπεριλαμβανομένων και αυτών με το λίθιο ή το νικέλιο, είναι πολύ πιθανό να χρειαστούν κάποια μορφή θερμικής διαχείρισης. Αυτή η απαίτηση είναι προφανής για τις μπαταρίες υψηλών θερμοκρασιών με τεχνολογία νατρίου- β alumina. Συχνά χρησιμοποιείται ένα λογισμικό που ελέγχει και διατηρεί τη θερμοκρασία μέσα στην μπαταρία και κυρίως στις εφαρμογές ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Αυτό το λογισμικό αναφέρεται και ως σύστημα θερμικής διαχείρισης (thermal management system-TMS). Το TMS ελαχιστοποιεί την απώλεια θερμότητας κατά τη λειτουργία και τις περιόδους που είναι αδρανής, με σκοπό να διατηρείται η υψηλή απόδοση της μπαταρίας. Ακόμη, επιτρέπει παρατεταμένες περιόδους αποφόρτισης, χωρίς να ανεβαίνει η θερμοκρασία σε πολύ υψηλές τιμές ή να δημιουργούνται ανεπιθύμητες θερμοκρασια-

κές τιμές εντός της μπαταρίας. Για να διασφαλιστούν αυτές οι τεχνικές απαιτήσεις σε μία μπαταρία NaS, το TMS περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- Ένα θερμικά μονωμένο περίβλημα μπαταρίας
- Ένα ενεργό ή παθητικό σύστημα ψύξης
- Ένα σύστημα διανομής θερμότητας στο εσωτερικό του περιβλήματος της μπαταρίας
- Θερμάστρες για να ζεσταίνεται η μπαταρία και να διατηρεί τη θερμοκρασία λειτουργίας της κατά περιόδους μακροχρόνιας αδράνειας.

Η ποσότητα και ο τύπος της θερμικής μόνωσης που χρησιμοποιείται στο θερμικό περίβλημα (για παράδειγμα μεταβλητή αγωγιμότητας) εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί. Σχετικές απαιτήσεις εφαρμογής που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι το φυσικό μέγεθος της μπαταρίας, ο λόγος ισχύος προς την ενέργεια και οι περίοδοι αδρανείας.

Από την άλλη υπάρχει και η ανάγκη για ένα σύστημα ψύξης, το οποίο καθορίζεται από την ποσότητα της θερμότητας που δημιουργείται κατά την παρατεταμένη αποφόρτιση, τη θερμική χωρητικότητα της μπαταρίας και το ανώτερο θερμικό όριο της μπαταρίας. Οι τεχνικές, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί ή εξετάζονται περιλαμβάνουν άμεση και έμμεση ανταλλαγή θερμότητας με τον αέρα, έμμεση με βάση τα υγρά ανταλλαγής θερμότητας, αγωγούς μεταφοράς, θερμικής διαφυγής, λανθάνουσας θερμότητας αποθήκευσης.

Η προσέγγιση που υιοθετείται για να εξασφαλιστεί ότι ο σχεδιασμός των κυψελών και της μπαταρίας θα είναι ασφαλής υπό κανονικές συνθήκες και σε περιπτώσεις αποτυχίας, επικεντρώθηκε στο στην πρόληψη των ηλεκτρικών βραχυκυκλωμάτων και στην ελαχιστοποίηση της αλληλεπίδρασης με τυχόν αντιδραστικά υλικά. Οι σχετικοί παράγοντες ασφαλείας που έχουν χρησιμοποιηθεί σε σχεδιασμούς μπαταριών και κελιών της τεχνολογίας NaS είναι μερικοί από τους παρακάτω:

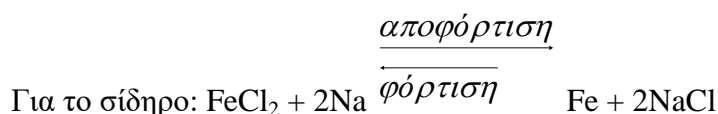
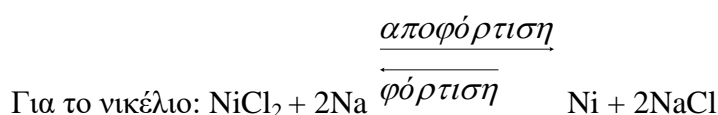
- Επιλογή των σωστών δομικών υλικών (όπως είναι αυτά με χαμηλή αντιδραστικότητα, υψηλό σημείο τήξης).
- Περιορισμός της πιθανότητας διαρροής νατρίου στον ηλεκτρολύτη ή σε κυψέλη που έχει αστοχήσει, μειώνοντας την πιθανότητα μεγάλες θερμικές αυξήσεις στις κυψέλες, κάτι που μπορεί να προκαλέσει βλάβες.

- Χρήση στοιχείων που ελαχιστοποιούν την επίδραση της αστοχίας των κυψελών σε διπλανά κελιά
- Θερμάστρες και ηλεκτρικές ασφάλειες για να εξαιρεθεί η πιθανότητα καταστροφικών βραχυκυκλωμάτων.

Τελικά, όταν η μπαταρία φτάσει στο τέλος του κύκλου ζωής της πρέπει να ανακυκλωθεί ή να πεταχτεί. Όσον αφορά τις μπαταρίες NaS, το πολυσουλφίδιο του νατρίου έχει ταξινομηθεί ως το πιο επικίνδυνο υλικό, λόγω της διαβρωτικής του δράσης. Το χρώμιο ή ενώσεις του χρωμίου χρησιμοποιούνται σαν επιστρώσεις για προστασία από τη διάβρωση. Οι μπαταρίες NaS χρησιμοποιούνται και επιστρέφονται σε ένα κέντρο επεξεργασίας για σωστή ανακύκλωση, ανάκτηση ή διάθεση.

2.1.3.2 Νάτριο/ χλωριούχο-μέταλλο

Η βασική ηλεκτροχημική διαφορά ανάμεσα σε αυτήν την τεχνολογία και την προηγούμενη βρίσκεται στο θετικό ηλεκτρόδιο. Στη δεύτερη ένα ενεργό χλωριούχο μέταλλο. Το δεύτερο χρησιμοποιείται σαν αγωγός των ιόντων νατρίου από τον ηλεκτρολύτη με το ηλεκτρόδιο από στερεό χλωριούχο μέταλλο. Τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται είναι το νικέλιο (Ni) και ο σίδηρος (Fe). Αυτά τα μέταλλα επιλέχθηκαν λόγω της αδιαλυτότητάς τους στο NaAlCl_4 . Κατά την αποφόρτιση το στερεό χλωριούχο- μέταλλο μετατρέπεται στο αρχικό μέταλλο και δημιουργούνται και κρύσταλλοι χλωριούχου νατρίου. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι:



Τεχνολογία νατρίου- χλωριούχου νικελίου

Το νάτριο τοποθετείται έξω από το $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ηλεκτρολύτη. Μία διαμόρφωση εσωτερικού νατρίου θα απαιτούσε τη χρήση ενός ακριβού δοχείου από νικέλιο. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του «εξωτερικού νατρίου» είναι ότι μία εξωτερική θήκη κελιού με τετραγωνική διατομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτή η γεωμετρία επιτρέπει τη μέγιστη ογκομετρική απόδοση. Ακόμη ένα πλεονέκτημα είναι η συμπεριφορά του κελιού κατά τη «ψύξη/απόψυξη». Εδώ, δεν εμφανίζονται επιζήμιες εφελκυστικές τάσεις στον ηλεκτρολύτη και σαν συνέπεια περιορίζεται σημαντικά η πιθανή αστοχία. Το θετικό ηλεκτρόδιο βρίσκεται μέσα στον ηλεκτρολύτη. Σε μία πλήρως φορτισμένη κυψέλη, το ηλεκτρόδιο είναι μία πορώδης μήτρα νικελίου, που σταδιακά μετατρέπεται σε διχλωρίδιο του νικελίου. Το υπόλοιπο νικέλιο χρησιμεύει ως μέρος του θετικού ηλεκτροδίου σαν συλλέκτης ρεύματος. Περίπου το 30% [6] του νικελίου χρησιμοποιείται στις αντιδράσεις των κυψελών. Η μήτρα εμποτίζεται με NaAlCl_4 τηγμένο άλας.

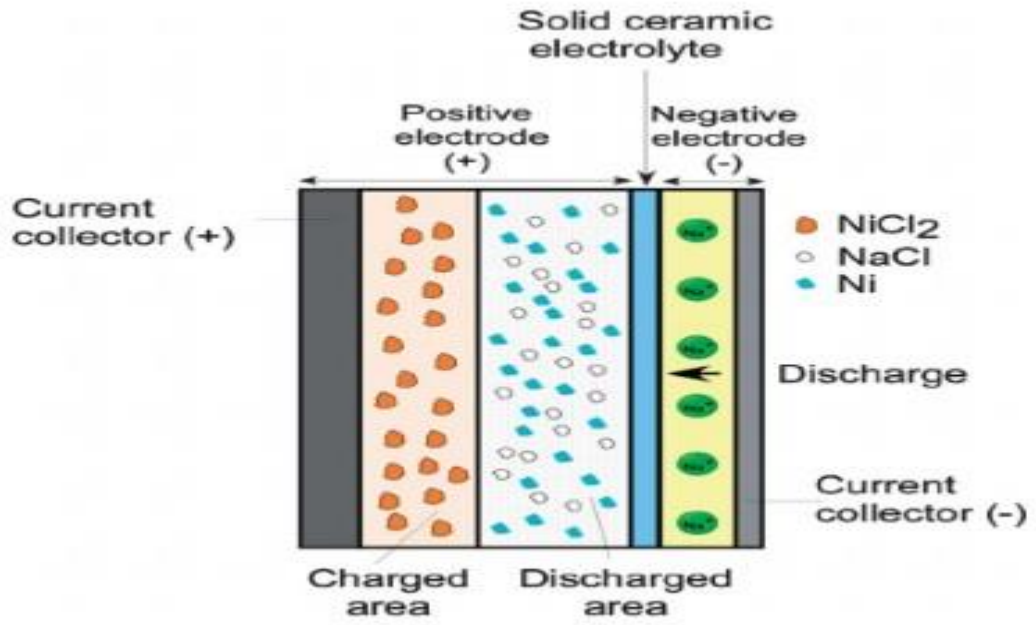
Το τμήμα του νατρίου είναι λιγότερο περίπλοκο σε σχέση με εκείνο των μπαταριών νατρίου-θείου και αυτό γιατί δεν υπάρχει ανάγκη λειτουργίας ασφαλείας. Καθώς εξελίσσεται η αποφόρτιση, οι αντιδράσεις στο θετικό ηλεκτρόδιο προκύπτουν εξωτερικά της στερεής δομής του νικελίου και προχωρούν μέσω ολοένα αυξανόμενου πάχους του μειωμένου νικελίου. Αυτή η συρρίκνωση πυρήνα έχει σαν συνέπεια μία αυξανόμενη ηλεκτρική αντίσταση όσο η κυψέλη αποφορτίζεται λόγω της μείωσης της περιοχής του χλωριούχου νικελίου. Η χημεία της αποφόρτισης παρέχει ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις μπαταρίες NaS: οι κυψέλες μπορούν να συναρμολογηθούν με ασφάλεια με τα προϊόντα αποφόρτισης (μεταλλικό νικέλιο και άλας) και μετά να φορτισθούν.

Τεχνολογία μπαταρίας νατρίου-χλωριούχου νικελίου

Ο σχεδιασμός θερμικής διαχείρισης είναι παρόμοιος με εκείνον των μπαταριών νατρίου-θείου, που είδαμε προηγουμένως. Χρησιμοποιείται ψύξη αέρα μέσω των πλακών ψύξης, οι οποίες βρίσκονται εσωτερικά της μπαταρίας και διαχωρίζουν τον αέρα από τις κυψέλες. Για θέρμανση, υπάρχει ένας θερμαντήρας AC, ο οποίος τροφοδοτείται εξωτερικά και ένας DC θερμαντήρας που τροφοδοτείται από την μπαταρία. Ωστόσο, αν και οι μπαταρίες νατρίου-θείου όσο και οι νατρίου-χλωριούχου νικελίου είναι συστήματα υψηλών θερμοκρασιών και χρησιμοποιούν κυψέλες συγκρίσιμης τάσης και ικανότητας, πολλοί σχεδιαστικοί παράγοντες διαφέρουν. Αυτοί με το περισσότερο ενδιαφέρον είναι οι παρακάτω:

Ηλεκτρικά δίκτυα: Κατά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, μεμονωμένα κύτταρα μπορεί να αποτύχουν. Κάτι τέτοιο, έχει ως αποτέλεσμα μόνο τη μείωση της τάσης του ανοιχτού κυκλώματος κατά 2.58V [6] κάθε κυψέλης που έχει αστοχήσει. Λόγω αυτού μακριές «αλυσίδες» με 216 [6] κυψέλες μπορούν να κατασκευασθούν. Συνδέσεις κυψελών δεν είναι απαραίτητες.

Αξιοπιστία της μπαταρίας/κυψελών: Δοκιμές έχουν δείξει ότι μπορεί να επιτευχθούν και 2.500 [6] ηλεκτρικοί κύκλοι της μπαταρίας 1.300 [6] ηλεκτρικοί κύκλοι πραγματοποιήθηκαν κατά τη δοκιμή του ECN ευρωπαϊκού οχήματος, κάτι που προβλέπεται ότι θα βελτιωθεί τα επόμενα δέκα χρόνια.



Εικόνα 2.7: Μπαταρία νατρίου-χλωριούχου νικελίου [11]

2.1.4 Εφαρμογές-State of the art

2.1.4.1 VRB-State of the art

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτροχημικής ενέργειας προσφέρουν το καλύτερο συνδυασμό απόδοσης, κόστους με τα συστήματα οξειδοαναγωγικών μπαταριών ροής να κυριαρχούν. Συγκεκριμένα οι VRB είναι αυτές που έχουν την περισσότερη προσοχή, καθώς είναι οι περισσότερο υποσχόμενες σε διάφορες εμπορικές εφαρμογές. Την τελευταία περίοδο έρευνες για τις VRB έχουν χρηματοδοτηθεί στο Ηνωμένο Βασίλειο με συνολικό κόστος 1.2 εκατομμύρια λίρες. [4] Μία έρευνα εξελίσσεται στο University of Southampton, όπου πρόκειται να δοκιμάσουν μία οξειδοαναγωγική μπαταρία ροής 100 kW για να ελεγχθεί η χρησιμότητά της στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας[6]. Τέλος ακόμα μία έρευνα εκτελείται από το Lawrence Berkeley National University στις Η.Π.Α. [8]

Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσοχή στρέφεται σε υβριδικά κύτταρα καυσίμου οξειδοαναγωγής που υπόσχονται να ανοίξουν το δρόμο για μελλοντικές εφαρμογές σε μηχανικά και ηλεκτρικά οχήματα.

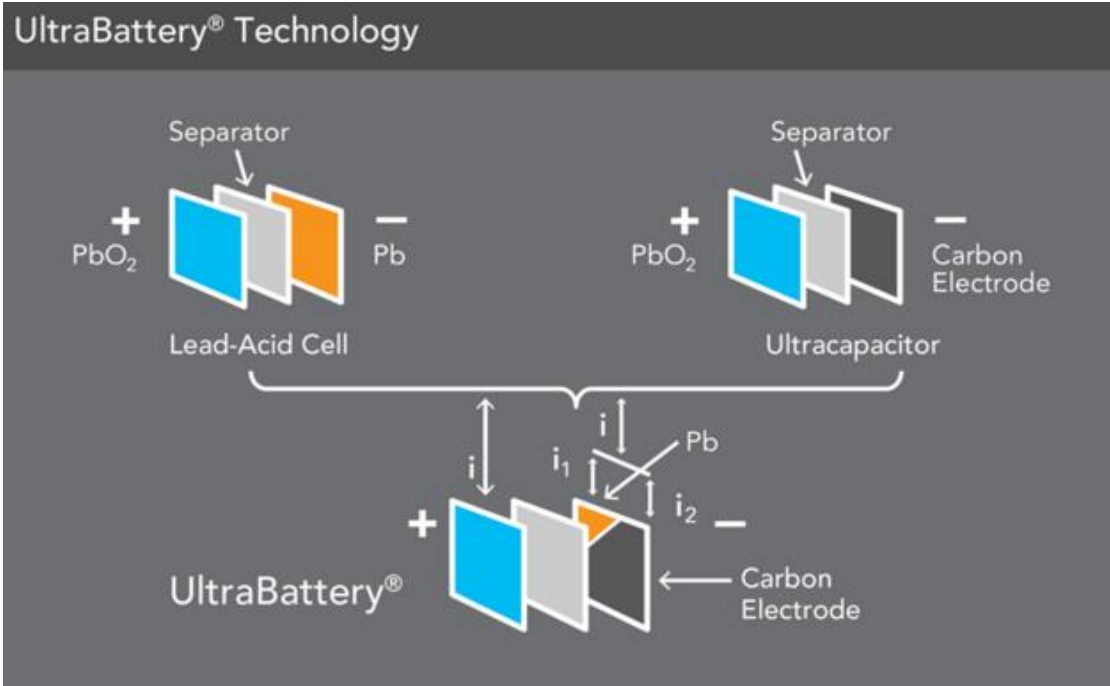
2.1.4.2 Lead Acid Batteries- State of the art

Νέες χρήσεις, σχέδια διαδικασίες κατασκευής εισάγονται με σημαντικό ρυθμό. Μερικά από τα νέα σχέδια αφορούν τη σύγχρονη τεχνολογία ηλεκτρικών οχημάτων, αποθήκευσης ενέργειας και ηλεκτρονικές εφαρμογές. Έχουν υπάρξει πολλές βελτιώσεις στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος τόσο στο σχεδιασμό της μπαταρίας, όσο και στο φορτιστή της μπαταρίας, ώστε να κάνουν τις μπαταρίες υψηλής τάσης πιο ομοιόμορφες σε απόδοση. Η μεγαλύτερη μπαταρία αποθήκευσης ενέργειας στον κόσμο ολοκληρώθηκε στα τέλη του 1988. Αυτή η μπαταρία 40-MWh, που βρίσκεται στο Chino, στην Καλιφόρνια, χρησιμοποιεί κυψέλες μολύβδου-οξέος σε σειρά και παράλληλη σύνδεση για συνδέσει ένα σύστημα 10 MW στο δίκτυο για 4 ώρες [6]. Αυτή η μπαταρία λειτουργούσε δοκιμαστικά για μία δεκαετία. Ακόμα, τώρα χρησιμοποιούνται και μικρές μπαταρίες μολύβδου- οξέος για γρήγορες συνδέσεις με μικρές ηλεκτρικές εφαρμογές, που θέλουν χαμηλή συντήρηση και χαμηλό σχεδιασμό συντήρησης.

Οι τελευταίες έρευνες και η εξελίξεις των μπαταριών μολύβδου-οξέος εστιάζουν στα παρακάτω:

- Καινοτόμα υλικά με σκοπό τη βελτίωση των αποδόσεων (όπως επέκταση του κύκλου ζωής και βελτίωση της ικανότητας αποφόρτισης).
- Η εφαρμογή τους στην αιολική ενέργεια, στα φωτοβολταϊκά και στον τομέα αυτοκίνησης.

Πολλές προηγμένες μπαταρίες μολύβδου- οξέος που έχουν γρήγορες ανταποκρίσεις σε σχέση με τους σφονδύλους και τους υπερπυκνωτές έχουν αναπτυχθεί ή βρίσκονται στο στάδιο της επίδειξης, όπως τα συστήματα Ecoult Ultra Battery (η λειτουργία της οποίας παρουσιάζεται στο σχήμα) και οι προηγμένες μπαταρίες μολύβδου-οξέος Dry Cell.



Εικόνα 2.8: Τεχνολογία UltraBattery [13]

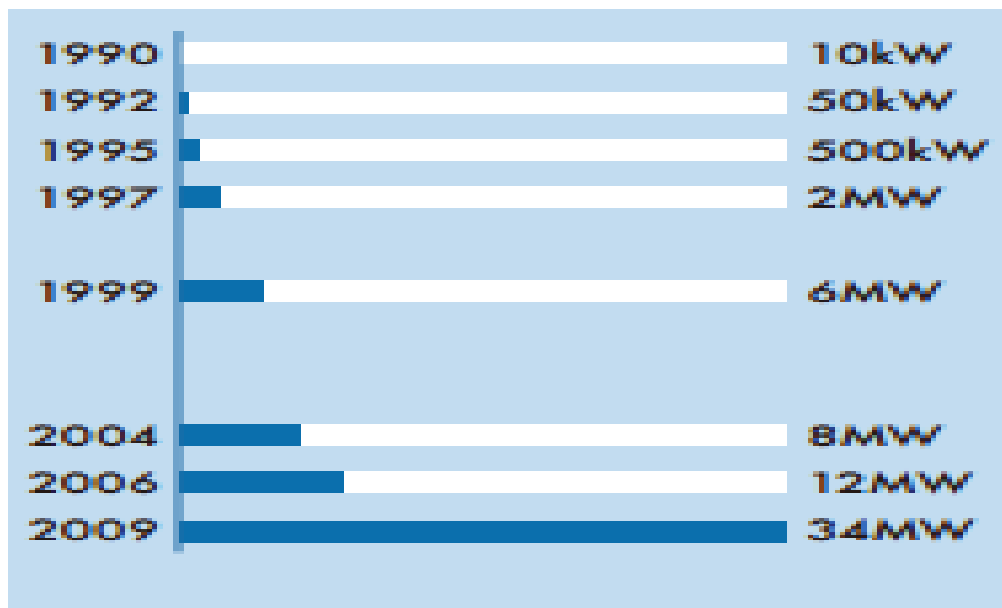
2.1.4.3 Sodium-based high temperature batteries-Εφαρμογές/State of the art

2.1.4.3.1 NaS batteries

Όσον αφορά τις μπαταρίες νατρίου- θείου, η έρευνα και η ανάπτυξη επικεντρώνεται κυρίως στην ενίσχυση της απόδοσης των κυψελών και στη μείωση/εξάλειψη των περιορισμών λειτουργίας λόγω υψηλών θερμοκρασιών. Για παράδειγμα η Sumitoms Electric Industries και το Kyoto University έχουν εφεύρει μία μπαταρία νατρίου, όπου το υλικό που περιέχει νάτριο λιώνει στους 330 K, δηλαδή στους 56,85°C.[6] Επίσης ο εφευρέτης ισχυρίστηκε ότι η νέα μπαταρία μπορεί να επιτύχει ενεργειακή πυκνότητα 290 Wh/L.[6] Τέλος, κάποια συμπεράσματα της έρευνας «Wind of Battery» τα οποία παρουσιάστηκαν πρόσφατα, εστιάζουν στη σπουδαιότητα και την αξία των μπαταριών NaS, όσον αφορά την αιολική ενέργεια.

Όπως αναφέραμε οι μπαταρίες τεχνολογίας νατρίου-beta δημιουργήθηκαν για να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με σχετικά υψηλή κλίμακα ενέργειας. Χρησιμοποιούνται τόσο σε σταθερές εφαρμογές ,όπως είναι η παραγωγή ενέργειας, όπου απαιτείται μία μπαταρία που θα μένει σταθερή κατά τη διάρκεια της χρήσης. Χρησιμοποιούνται και στις ΑΠΕ (ηλιακή ενέργεια, αιολική), σε εγκαταστάσεις διανομής (π.χ. για σταθερότητα της γραμμής, ρύθμιση τάσης).

Οι μπαταρίες νατρίου- θείου από το 1983, που ξεκίνησαν να μελετώνται από την Tokyo Electricity Company (όπως αναφέραμε και παραπάνω) και τη NGK Insulator έως και σήμερα έχει υπάρξει μεγάλη πρόοδος στην απόδοση ισχύος τους. Αυτό παρουσιάζεται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 2.9: Πρόοδος στην απόδοση ισχύος των NaS μπαταριών [14]

Πιο συγκεκριμένα, σε απομονωμένες γραμμές συγκοινωνίας, όπως στις Η.Π.Α., στο Presidio, όπου υπάρχει μία απομονωμένη γραμμή 60 μίλια μακριά, 69-kV και 50 ετών κατασκευή. Για χρόνια οι κάτοικοι υπέφεραν συχνές διακοπές ρεύματος και διακυμάνσεις από ισχυρές καταιγίδες. Σε περίπτωση διακοπής της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι μπαταρίες NaS παρέχουν ισχύ για την πόλη, λόγω της γρήγορης ανταπόκρισης που παρουσιάζουν. Το σύστημα μπαταριών NaS επιτρέπει τη διατήρηση της μεταφορικής γραμμής χωρίς ηλεκτρικές απώλειες. Η ισχύς που αποδίδει το σύστημα είναι κοντά στα 10MW [14].Ακόμα στο Τόκυο, για να μειώσουν την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από την Tokyo Metropolitan Government θέσπισαν μέτρα ενεργειακής απόδοσης με την ενσωμάτωση των μπαταριών NaS στο σύστημα. Πιο συγκεκριμένα, το αναφερόμενο σύστημα αποτελείται από τέσσερις μπαταρίες 2MW η καθεμία, οι οποίες παρέχουν εφεδρική ενέργεια. Άλλο ένα παράδειγμα αποτελούν οι μπαταρίες αυτής της τεχνολογίας, οι οποίες χρησιμοποιούνται στο Abu Dhabi για ρύθμιση φορτίου, συνολικής ισχύος 8MW [6]. Η ADWEA (Abu Dhabi Water and Electricity Authority) έχει ενσωματώσει στο ηλεκτρικό δίκτυο μπαταρίες νατρίου θείου. Η ADWEA BESS είναι ένα από τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιούνται για σκοπούς ισοστάθμισης της καμπύλης φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να μειωθεί το υψηλό κόστος της λειτουργίας του φορτίου αιχμής. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποθήκευση περίσσειας διαθέσιμης ενέργεια τη νύχτα και με την απόδοσή της στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τη

διάρκεια της ημέρας. Ακόμα οι εταιρείες NGK Insulators Ltd και η Terna S.P.A, η μεγαλύτερη εταιρεία διαχείρισης του συστήματος μεταφοράς συνεργάστηκαν και πρόκειται να ενσωματωθεί μονάδα μπαταριών NaS στο δίκτυο, προκειμένου να ισοσταθμιστεί η ζήτηση και η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η απόδοση υπολογίζεται περί τα 12 MW[15]. Επίσης, χρήσιμο είναι να γίνει αναφορά και σε εφαρμογές πολύ υψηλών αποδόσεων. Το Μάιο του 2008 η JWD κατασκεύασε ένα αιολικό πάρκο κοντά στο χωριό Rokkasho, στο Aomori Prefecture στην Ιαπωνία. Αποτελεί την πρώτη εγκατάσταση, η οποία χρησιμοποιεί μπαταρίες NaS για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την παροχή της στο εθνικό δίκτυο. Αυτές οι μπαταρίες φορτίζονται το βράδυ, όπου η ζήτηση είναι χαμηλότερη και η αποθηκευμένη ενέργεια παρέχεται μαζί με εκείνη που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες την ημέρα. Αυτό το σύστημα φτάνει επιδόσεις 34MW.[15]



Εικόνα 2.10 : Αιολικό πάρκο κοντά στο χωριό Rokkasho, στην Ιαπωνία.[15]

2.1.4.3.2 Zebra batteries

Προς το παρόν η εταιρεία που μελετά τις συγκεκριμένες μπαταρίες είναι η ελβετική εταιρεία MES-DEA SA. Αγόρασαν την τεχνολογία από τον οργανισμό AEG Anglo Battery Holdings (AABH), που τον διαχειρίζεται η γερμανική εταιρεία AEG σε συνεργασία με τους αρχικούς προγραμματιστές (Zebra Power Systems and Beta R&D Ltd.). Πολλές φορές αυτή η τεχνολογία ονομάζεται και Zebra λόγω της προέλευσής της.[6] Μέχρι σήμερα, οι έρευνες έχουν εστιάσει σχεδόν αποκλειστικά στην αύξηση της τάσης, αλλά χρησιμοποιώντας σίδηρο σαν προσθήκη στο θετικό ηλεκτρόδιο. Αυτοί οι πρόοδοι έχουν σαν αποτέλεσμα βελτιωμένη ικανότητα παλμικής ισχύος (ειδικά κοντά στη λήξη της αποφόρτισης). Στο 80% της αποφόρτισης, η ισχύς μιας καινούριας κυψέλης είναι 2,5 φορές καλύτερη από αυτή του 1992 [6].

Οι μπαταρίες τύπου ZEBRA ανακαλύφθηκαν κυρίως για τις εφαρμογές ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Οι πρώτες μπαταρίες κατασκευάστηκαν από την ομάδα της ZEBRA χρησιμοποιώντας τόσο το χλωρίδιο του σιδήρου όσο και το χλωρίδιο νικελίου. Ένα σημαντικό πρόβλημα με αυτές τις μπαταρίες ήταν η πολύ χαμηλή ικανότητά τους.

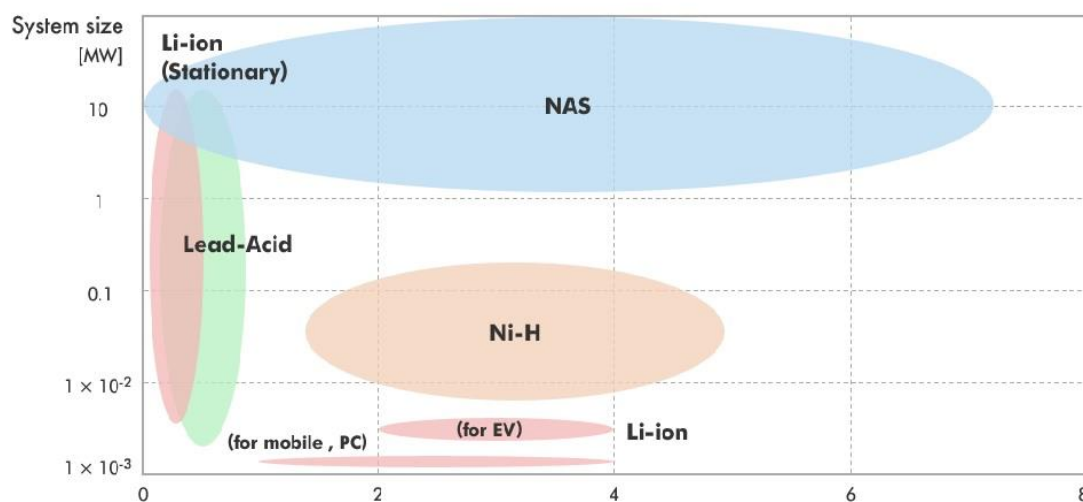
Οι μπαταρίες νατρίου- χλωριούχου νικελίου χρησιμοποιούνται στο σύστημα μπαταριών Durathon για την οικοδόμηση της ενεργειακής διαχείρισης. Χρησιμοποιούνται στην Ιαπωνία και είναι εξαιρετικά αποτελεσματικές, ενσωματώνονται σε οποιοδήποτε δίκτυο, παράγουν από 100kWh [15] έως πολλές MWh και προσφέρουν ενέργεια από δύο έως έξι ώρες. Χρησιμοποιούνται ακόμα και για να αποθηκεύσουν ηλεκτρική ενέργεια από ανεμογεννήτριες. Στον Καναδά, για παράδειγμα, χρησιμοποιείται για να συνδέσει την ενέργεια που παράγεται από αιολικό πάρκο 10MW [15].

2.1.5 Διάγραμμα SWOT για τις μπαταρίες τεχνολογίας NaS

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα αναφερθούμε στην ανάλυση SWOT για τις μπαταρίες τεχνολογίας νατρίου-θείου, γιατί είναι και αυτές που αναφέρονται κυρίως στα 10MW (όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα), που μας απασχολούν σε αυτή τη εργασία και συνδέονται κυρίως με τις ΑΠΕ, συγκριτικά με τις μπαταρίες της τεχνολογίας νατρίου- χλωριούχου νικελίου.

	Μολύβδου-οξέος	Νικελίου-Καδμίου	Νατρίου-θείου	Νατρίου-χλωριούχου νικελίου	Λιθίου ιόντος
Ανώτατο όριο ονομαστικής ισχύος	Δεκάδες MW	Δεκάδες MW	MW	Εκατοντάδες kW	Δεκάδες kW
Ειδική ενέργεια (Wh / kg)	35-50	45-80	100	115	160

Πίνακας 2.1: Επιδόσεις μπαταριών [16]

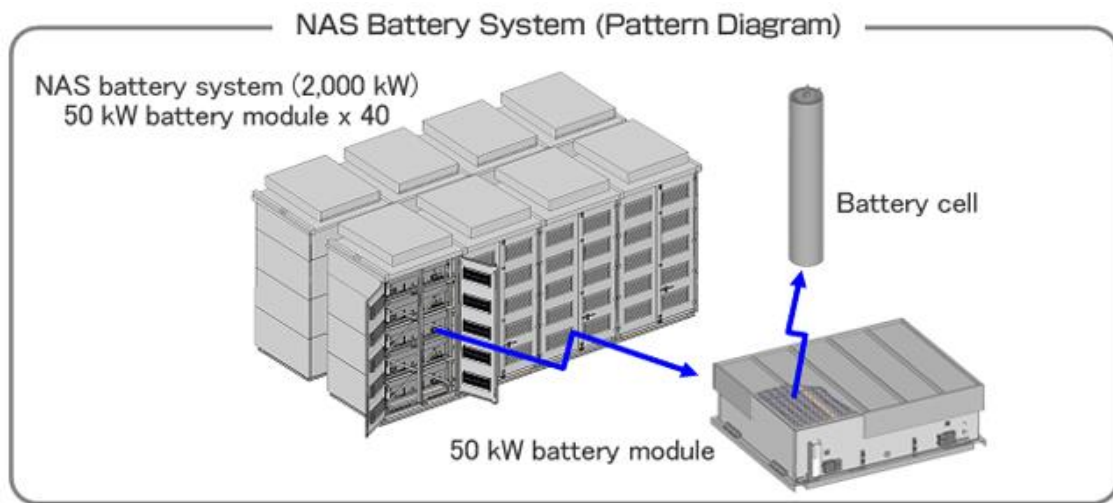


Εικόνα 2.11: Επιδόσεις μπαταριών [14]

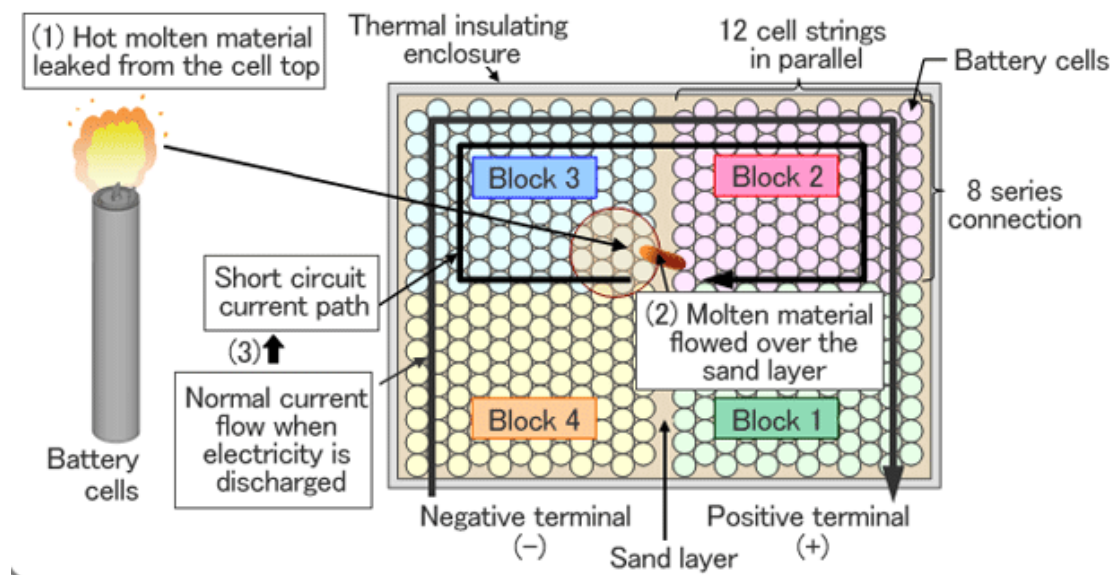
Στο τμήμα των δυνατών σημείων (strengths) καταγράφονται τα πλεονεκτήματα που καθιέρωσαν τις μπαταρίες NaS σαν έναν πολλά υποσχόμενο τρόπο αποθήκευσης ενέργειας. Τα πιο βασικά είναι:

- Μεγάλη διάρκεια ζωής, συγκεκριμένα για τις μπαταρίες NaS είναι 4.500 κύκλοι (15 χρόνια- 300 κύκλοι ανά έτος) [14]
- Δεν απαιτείται μεγάλη έκταση εγκατάστασης (και συγκριτικά με τα συστήματα σφονδύλων).
- Αποτελεσματική μπαταρία για αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας.
- Γρήγορη απόκριση της τάξεως του 1 millisecond [14]
- Χαμηλό κόστος συντήρησης και μάλιστα από απομακρυσμένο σύστημα ελέγχου.

Στα αδύνατα σημεία (weaknesses) αναφέρονται τα μειονεκτήματα που προβληματίζουν στη χρήση αυτών των μπαταριών. Το σημαντικότερο πρόβλημα είναι οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, που καθιστούν δύσκολη τη θερμοκρασιακή διαχείριση. Πιο συγκεκριμένα η κυψέλη αποφορτίζεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες και τα ιόντα του νατρίου περνούν από το αρνητικό ηλεκτρόδιο νατρίου διαμέσου του ηλεκτρολύτη στο θετικό ηλεκτρόδιο. Εκεί αντιδρούν με το θείο για να σχηματίσουν τα πολυσουλφίδια του νατρίου. Μη ελεγχόμενη χημική αντίδραση του τηγμένου νατρίου και του θείου μπορεί να προκαλέσει φωτιά και διάβρωση στο εσωτερικό του κελιού. Αυτό συμβαίνει μετά τη θραύση του ηλεκτρολύτη. Αυτό το πρόβλημα, όμως μπορεί να επιλυθεί με την εισαγωγή μίας προστατευτικής «γραμμής» στον ηλεκτρολύτη, η οποία θα επιτρέπει μία ομαλή ροή του νατρίου εσωτερικά του ηλεκτρολύτη αλλά θα εμποδίζει τη ροή κατά τη θραύση του σωλήνα. Αξίζει να σημειωθεί και ένα ατύχημα που είχε πραγματοποιηθεί στην Ιαπωνία, το 2012. Σε μία μονάδα που αποτελούταν από 40 μπαταρίες NaS, μία κυψέλη ήταν ελαττωματική, ξεκίνησε η διαρροή ζεστού τηγμένου υλικού, η οποία προχώρησε και στις διπλανές κυψέλες και δημιουργήθηκε βραχυκύκλωμα. Λόγω έλλειψης ασφαλείας καταστράφηκε μία σειρά στοιχείων της μπαταρίας και έτσι έπιασε φωτιά που εξαπλώθηκε σε ολόκληρη τη μονάδα. Παρακάτω φαίνεται και το διάγραμμα του ατυχήματος. Επίσης πρόβλημα παρουσιάζεται κατά τις περιόδους αδράνειας ή μικρής χρήσης, όπου εμφανίζονται θερμικές απώλειες.



Εικόνα 2.12: Σχηματική απεικόνιση συστήματος μπαταριών NaS [14]



Εικόνα 2.13: Ατύχημα για το αίτιο της πυρκαγιάς [14]

Στις ευκαιρίες (opportunities) κατατάσσονται τα στοιχεία εκείνα που σε ορισμένες περιπτώσεις δίνουν πλεονεκτήματα στην χρήση τους. Σε αυτά συγκαταλέγεται η δυνατότητα τους να ενσωματώσουν πάρα πολλές εφαρμογές ΑΠΕ και η αποθήκευση ρεύματος όταν υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα.

Τέλος, σαν απειλές (threats) αναφέρονται τα στοιχεία εκείνα που εν δυνάμει μπορούν να αποτελέσουν εμπόδιο στην εφαρμογή τους. Ο κυριότερος λόγος αυτής της κατηγορίας είναι η περίπτωση διαρροής πολυσουλφιδίου του νατρίου, το οποίο είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό. Λόγω του παραπάνω εντοπίζεται και πρόβλημα στην ανακύκλωση κατά το τέλος της λειτουργίας της μπαταρίας. Επίσης σημαντική «απειλή» στον τομέα των ΑΠΕ είναι οι διατάξεις των σφονδύλων, που θα αναλυθούν εκτενώς παρακάτω.

Παρακάτω παρουσιάζεται και το διάγραμμα:

ΑΝΑΛΥΣΗ SWOT- NaS Batteries	
<p style="text-align: center;"><u>STRENGTHS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Αποτελεσματικές για αποθήκευση μεγάλων ποσών ενέργειας • Ευέλικτες από άποψη χώρου • Γρήγορη απόκριση • Εύκολη συντήρηση 	<p style="text-align: center;"><u>WEAKNESSES</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Πρόβλημα θερμικής διαχείρισης • Θερμικές απώλειες
<p style="text-align: center;"><u>OPPORTUNITIES</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Στροφή στις ΑΠΕ • Αποθήκευση ενέργειας ακόμα και για μικρή διαθεσιμότητα 	<p style="text-align: center;"><u>THREATS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Φόβοι για διαρροή πολυσουλφιδίων του νατρίου • Φόβοι για τη σωστή ανακύκλωση • Διάταξη σφονδύλων

Πίνακας 2.2: Παρουσίαση SWOT μπαταριών NaS

2.2.1 Σφόνδυλοι- Flywheels

2.2.1.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η λειτουργία των σφονδύλων είναι σχετικά απλή και είναι πολύ πιθανό να έχουμε έρθει σε επαφή μαζί της και από πολύ μικρή ηλικία. Ένα παράδειγμα αποτελούν τα αυτοκινητάκια που θέτονται σε κίνηση αφού περιστραφούν οι ρόδες τους. Αυτά τροφοδοτούνται από έναν σφόνδυλο.

Αρχικά θα απαντηθεί το ερώτημα: «τι είναι σφόνδυλος;». Σφόνδυλοι είναι περιστρεφόμενοι τροχοί με μεγάλη μάζα που αποθηκεύουν ενέργεια μηχανικά υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας, δηλαδή λειτουργούν σαν μηχανικές μπαταρίες. Μία διάταξη σφονδύλου αποτελείται από τον σφόνδυλο και από μία ηλεκτρική συσκευή, που λειτουργεί τότε σαν γεννήτρια και τότε σαν κινητήρας περισσότερο σε μικρούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αεριοστροβίλους.

Το σύστημα λειτουργεί ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου σε τρεις φάσεις, οι οποίες είναι φόρτιση, σταθεροποίηση και αποφόρτιση. Κατά τη φόρτιση, η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας και τροφοδοτείται με ηλεκτρική ισχύ από το δίκτυο, περιστρέφοντας τον δρομέα άρα και τον σφόνδυλο που είναι συνδεδεμένος με αυτόν. Έτσι, ο σφόνδυλος επιταχύνεται αποκτώντας κινητική ενέργεια, που αντιστοιχεί στην αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος. Κατά τη σταθεροποίηση, η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί πάλι ως κινητήρας και έχει ως στόχο να διατηρήσει σταθερή την ταχύτητα του σφονδύλου. Σε αυτή τη φάση η κατανάλωση του συστήματος σε ενέργεια είναι μικρή και αντιστοιχεί στην ενέργεια που απαιτείται για να αντισταθμιστούν οι μηχανικές απώλειες τριβής κατά την περιστροφή του σφονδύλου και οι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες των τμημάτων του συστήματος. Κατά την αποφόρτιση του συστήματος, η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια και τροφοδοτεί με ισχύ το δίκτυο. Η ισχύς αυτή προέρχεται από την αποθηκευμένη ενέργεια του σφονδύλου. Η μείωση της κινητικής ενέργειας του σφονδύλου συνοδεύεται από την ταυτόχρονη επιβράδυνση του, μέχρι μια ελάχιστη ταχύτητα πέραν της οποίας είναι αδύνατη η τροφοδότηση του δικτύου με ισχύ.

Το είδος της λειτουργίας του σφονδύλου, το αν, δηλαδή, απορροφά ενέργεια από το δίκτυο ή παρέχει εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο

και καθορίζεται από το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ δικτύου και μηχανής-σφονδύλου. Το σύστημα ελέγχου του μετατροπέα παρακολουθεί διάφορες παραμέτρους του δικτύου. Όταν υπάρχει ανάγκη για παροχή ενέργειας δίνει εντολή ώστε να αρχίσει η τροφοδότηση δικτύου με ενέργεια ενώ σε αντίθετη περίπτωση δίνει εντολή ώστε να αποκτηθεί και στη συνέχεια να διατηρηθεί η ενέργεια στο σύστημα.

Η εντολή για λειτουργία αποφόρτισης μπορεί να δοθεί για να προστατευθεί το δίκτυο από διάφορα προβλήματα, όπως είναι η υπέρταση ή υπόταση, έντονα μεταβατικά φαινόμενα, μεταβολή της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας κ.τ.λ. .

Η βασική ιδέα για την ανάπτυξη της διάταξης του σφονδύλου είναι η έκφραση

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.1)$$

με I : ροπή αδρανείας του σώματος ως προς τον άξονα περιστροφής ($J(\text{kgm}^2)$) και

ω : ταχύτητα περιστροφής (rad/sec)

Σύμφωνα με αυτήν την έκφραση μια μάζα με αδράνεια I , που περιστρέφεται γύρω από τον άξονά της με γωνιακή ταχύτητα ω αποκτά κινητική ενέργεια E , υπολογιζόμενη σε Joule.

Η ροπή αδρανείας για οποιοδήποτε αντικείμενο είναι μία συνάρτηση του σχηματός του και της μάζας του. Για τους χαλύβδινους ρότορες το σχήμα που επικρατεί είναι ένας στερεός κύλινδρος που δίνει στη ροπή αδράνειας την παρακάτω έκφραση:

$$I = \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot m = \frac{1}{2} \cdot r^4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \rho \quad (2.2)$$

με r : ακτίνα

α : το μήκος του κυλίνδρου

m : μάζα

ρ : πυκνότητα κυλινδρικού υλικού

Το δεύτερο σχήμα που επικρατεί είναι ένας κοίλος κύλινδρος, που προσεγγίζεται από μία σύνθετη ή χαλύβδινη στεφάνη που συνδέεται με την άτρακτο με ένα νεύρο. Σε αυτήν την περίπτωση η ροπή αδρανείας ισούται με:

$$I = \frac{1}{4} \cdot m \cdot (r_o^2 + r_i^2) = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \rho \cdot (r_o^4 - r_i^4) \quad (2.3)$$

Ο σφόνδυλος αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής του όταν συσσωρεύεται ενέργεια και επιβραδύνεται όταν αποβάλλει ενέργεια για χρήση.

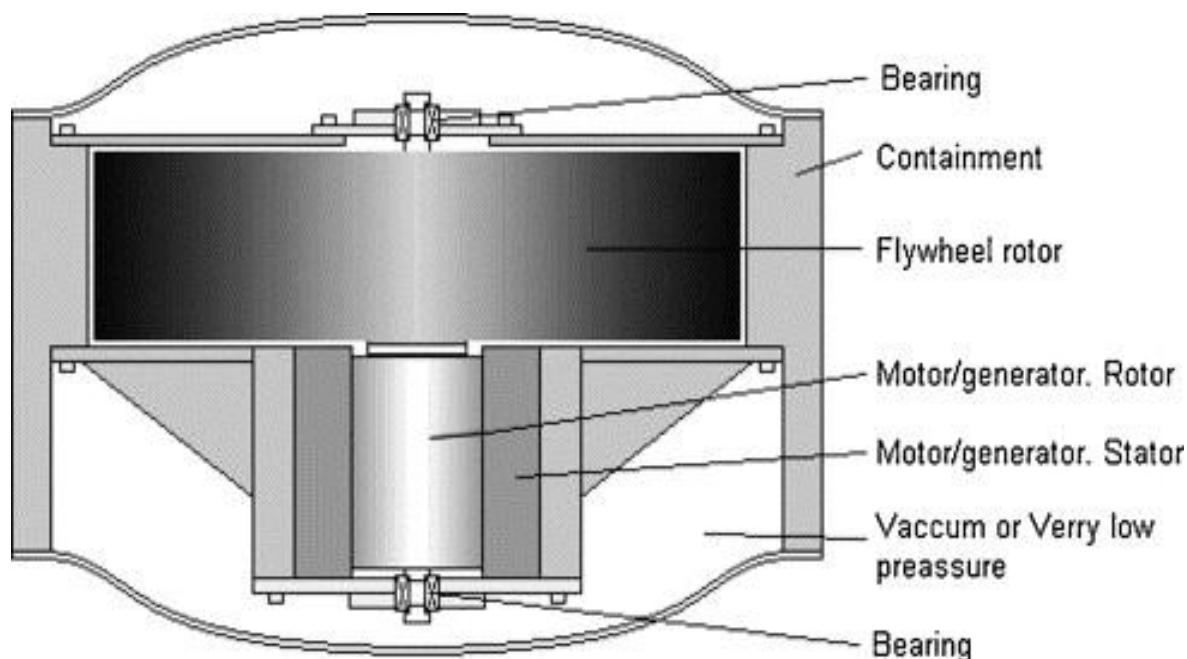
Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτών των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλων, που αναφέρονται και ως FES είναι η πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος τους. Μπορούν να αποδίδουν πολύ υψηλή ισχύ, με μόνους περιορισμούς τη ροπή που μπορεί να αντέξει ο σφόνδυλος και το ρυθμό μεταφοράς του συστήματος. Ακόμη χρησιμοποιούνται θάλαμος υποπίεσης και μαγνητικοί τριβείς που έχουν ως αποτέλεσμα να μειώνονται οι ενεργειακές απώλειες και οι μαγνητικοί τριβείς (τα πιο συνηθισμένα ρουλεμάν που χρησιμοποιούνται) μειώνουν τους κραδασμούς. Στο εσωτερικό των σφονδύλων υπάρχει κενός αέρας για την αποφυγή αεροδυναμικής υπερθέρμανσης που θα οδηγήσει σε φθορές. Επίσης η διάταξη περιλαμβάνει μετατροπείς και ελεγκτές ισχύος. Οι ελεγκτές επιτελούν έλεγχο της ισχύος. Οι μετατροπείς μεταβαλλόμενης ταχύτητας περιστροφής είναι αμφίδρομης ρύθμισης και μεταβαλλόμενου πλάτους, είναι είτε μονοφασικοί είτε διφασικοί. Οι μονοφασικοί μετατρέπουν το εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα και οι διφασικοί μετατρέπουν το εναλλασσόμενο σε συνεχές και ξανά σε εναλλασσόμενο.

Για την κατασκευή ενός σφονδύλου λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

- Ποια θα είναι η μάζα που θα δημιουργήσει την αναγκαία ροπή για να επιτευχθεί η επιθυμητή ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας.
- Η γεωμετρία του σφονδύλου πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ικανοποιείται το γεγονός ότι η απαιτούμενη ροπή αδρανείας παρέχεται από μία διάταξη με τις μικρότερες διαστάσεις και είναι ασφαλής σε περίπτωση σφάλματος της ταχύτητας λειτουργίας.

Τα σημαντικότερα στοιχεία ενός σφονδύλου

Θα γίνει παρουσίαση των τμημάτων από τα οποία αποτελείται ένας σφόνδυλος, τα οποία, παρουσιάζονται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.14: Σφόνδυλος και τα μέρη από τα οποία αποτελείται.[17]

1) Περιστρεφόμενη μάζα- σφόνδυλος (ρότορας/flywheel/hub) : Είναι το περιστρεφόμενο μέρος της διάταξης και το πιο σημαντικό μέρος της, καθώς αποτελεί το μέσο στο οποίο γίνεται η αποθήκευση ενέργειας. Ο σχεδιασμός του σφονδύλου αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα της αποτελεσματικότητας και αποδοτικότητας της διάταξης. Οι σφόνδυλοι σχεδιάζονται έτσι ώστε να μεγιστοποιούν την πυκνότητα ενέργειας για δοσμένη περιστροφική ταχύτητα και να διατηρούν τη δομική τους ακεραιότητα στις περιστροφικές και θερμικές καταπονήσεις. Συνδέεται με το δρομέα της ηλεκτρικής μηχανής. Αποτελείται από στοιχεία του εδράνου και της γεννήτριας και υλικά τα οποία έχουν σαν σκοπό να παρέχουν ροπή αδρανείας.

Οι σφόνδυλοι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής, σε σφονδύλους χαμηλής ταχύτητας και σε σφονδύλους υψηλής ταχύτητας. Η ταχύτητα περιστροφής των πρώτων μετριέται σε κάποιες χιλιάδες στροφές το λεπτό, ενώ των δεύτερων σε κάποιες δεκάδες χιλιάδες στροφές το λεπτό.








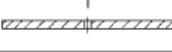

Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ένας σφόνδυλος είναι ανάλογο με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής του. Το μέγιστο ποσό κινητικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα περιστρεφόμενο στοιχείο στερεό είναι ανάλογο της γεωμετρίας του και των ιδιοτήτων του υλικού κατασκευής του. Για ένα ρότορα που είναι κατασκευασμένος από ένα ισοτροπικό υλικό, όπως είναι τα περισσότερα μέταλλα, η μέγιστη ειδική ενέργεια e δίνεται από το παρακάτω τύπο:

$$e = K\sigma_u/\rho \quad (2.4)$$

όπου σ_u = τάση θραύσης και

ρ = πυκνότητα υλικού

Το K είναι ένας γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται μόνο από το σχήμα του ρότορα, έτσι η ειδική ενέργεια είναι ανεξάρτητη μεγέθους. Στην εικόνα 18 παρουσιάζονται ενδεικτικά τιμές του συντελεστή K ανάλογα με το σχήμα του σφονδύλου και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται δίσκος με ύψος πολύ μικρότερο από τη διάμετρο και το υλικό είναι ομοιογενές ισοτροπικό με αναλογία Poisson 0.3 [18], δηλαδή χάλυβας. Επειδή η κινητική ενέργεια είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας συμπεραίνουμε ότι για συγκεκριμένες αναλογίες γεωμετρίας, η περιφερειακή ταχύτητα στην οποία ένας ρότορας θα κινδυνέψει από θραύση είναι ανεξάρτητη του μεγέθους.

Fly wheel geometry	Cross section	Shape factor K
Disc		1.000
Modified constant stress disc		0.931
Conical disc		0.806
Flat unpierced disc		0.606
Thin firm		0.500
Shaped bar		0.500
Rim with web		0.400
Single bar		0.333
Flat pierced bar		0.305

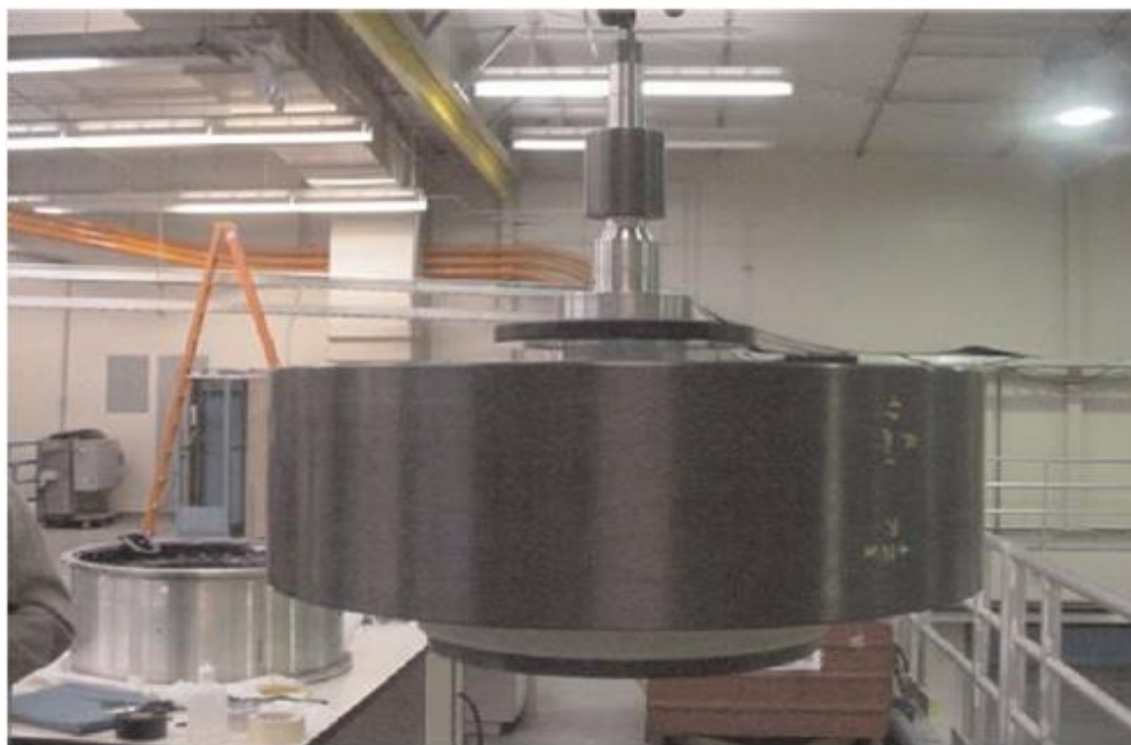
Εικόνα 2.15: Τιμές συντελεστή K ανάλογα με τη γεωμετρία του σφονδύλου. [33]

Τα ισότροπο υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως το τιτάνιο και το ατσάλι λόγω ενεργειακής πυκνότητας, το οποίο μας ενδιαφέρει και στους σφονδύλους. Οι σφόνδυλοι με χαλύβδινους ρότορες παρουσιάζουν ενεργειακή πυκνότητα 5Wh/kg[20] ενώ αυτοί με ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής παρουσιάζουν 100Wh/kg.[20]

Η κινητική ενέργεια των σφονδύλων μπορεί να αυξηθεί σημαντικά αν χρησιμοποιηθούν ανισότροπα υλικά, όπως είναι οι συνθετικές ίνες, για το ρότορα. Αν και πολλοί συνδυασμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα συνθετικά υλικά, τα συνηθέστερα είναι πολύκλινα σύρματα υψηλής αντοχής ενσωματωμένα σε μία μήτρα.

Συγκεκριμένα, οι ίνες γραφίτη είναι ισχυρότερες 3 έως και 10 φορές από εκείνες του χάλυβα. Ο γραφίτης είναι μία κρυσταλλική μορφή του άνθρακα και η διάμετρος μίας ίνας γραφίτη κυμαίνεται από 25 mm έως 800 mm. Γενικότερα όσο πιο μικρή διάμετρο έχει μία ίνα, τόσο πιο μεγάλη αντοχή έχει. [19]

Πέρα από την υψηλή ειδική ενέργεια, οι συνθετικές ίνες παρέχουν και περισσότερη ασφάλεια. Αυτό, γιατί όταν ένας ρότορας από ισοτροπικό μέταλλο αστοχήσει, μεγάλα κομμάτια πετιούνται με μεγάλη ταχύτητα σε αντίθεση με τις σύνθετες ίνες, όπου τα κομμάτια θα είναι πολύ μικρά, ίσως και μικροί κόκκοι.

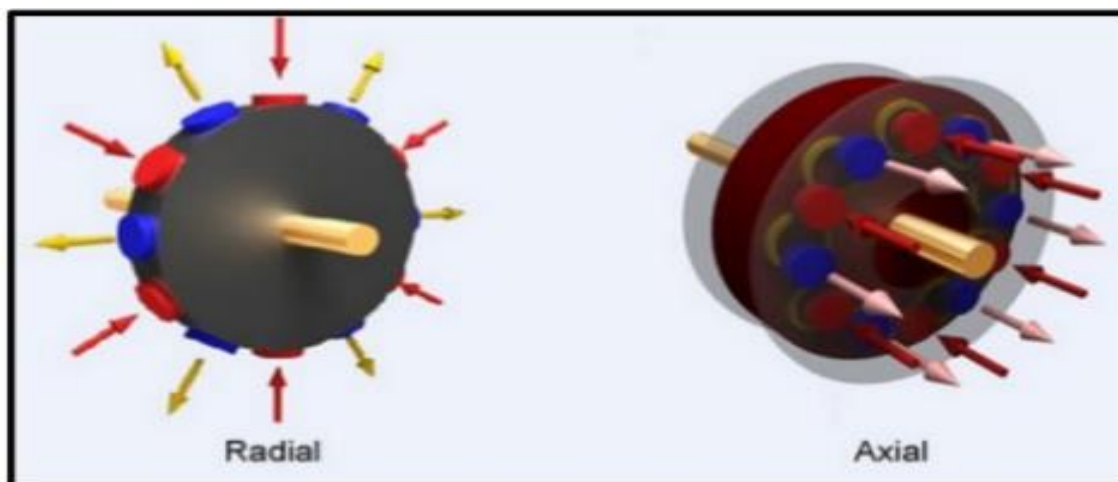


Εικόνα 2.16: Φωτογραφία ενός σφονδύλου 1kWh με περιστρεφόμενη μάζα κατασκευασμένη από ίνες γραφίτη [19]

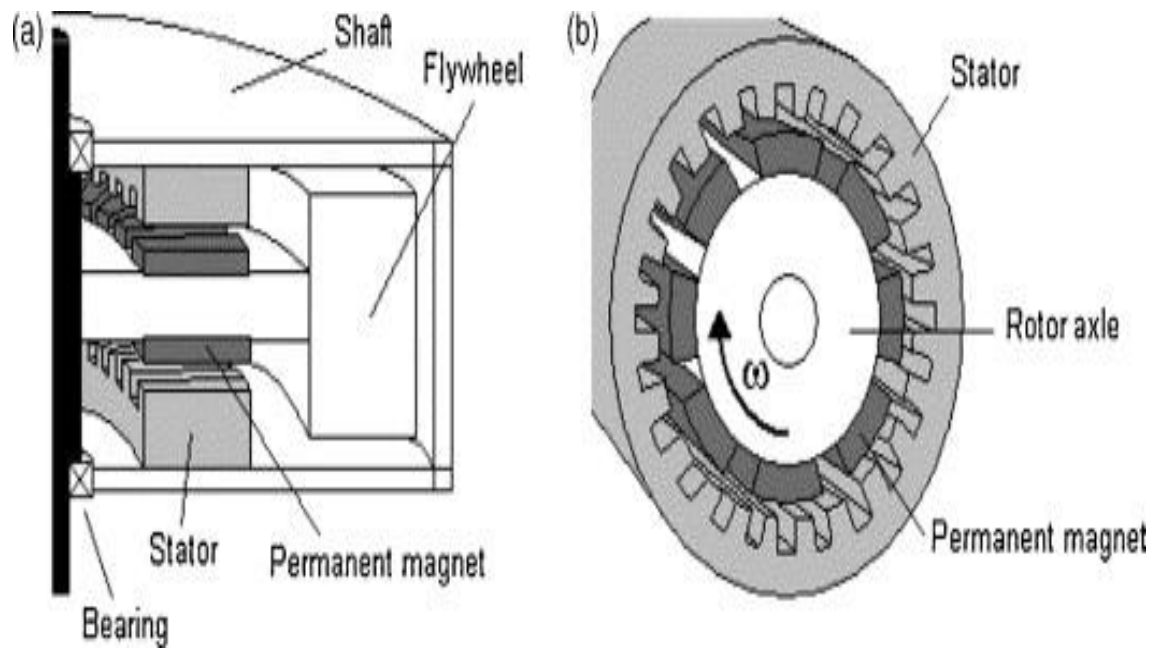
2)Ηλεκτρική μηχανή: Πρόκειται για το ηλεκτρικό μέρος του συστήματος. Λειτουργεί σαν κινητήρας, όπου μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική-περιστροφική ή σαν γεννήτρια, όπου γίνεται το αντίστροφο. Θεωρητικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε τύπος μηχανής, όμως η κάθε εφαρμογή ορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή του συστήματος. Γενικά στους μεγάλους και αργούς σφονδύλους χρησιμοποιούνται οι κλασσικές ασύγχρονες επαγωγικές μηχανές ενώ στους μικρότερους και ταχύτερους ιδανικές είναι οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη.

Πιο συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις για τυποποιημένη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος έχουν οδηγήσει τους κατασκευαστές συστημάτων διατάξεων σφονδύλων να επιλέγουν γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (για να διευκολύνεται η σταδιακή επιβράδυνση του σφονδύλου κατά την 2αποφόρτιση) και διόδους για την παροχή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος. Οι δύο κύριοι τύποι μηχανών που χρησιμοποιούνται είναι οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής και ακτινικής ροής (AFPM –axial flux permanent magnet και RFPM- radial flux permanent magnet). Υπάρχουν πολλές εναλλακτικές στο σχεδιασμό της AFPM μηχανής, όπως είναι εσωτερικός ρότορας, εσωτερικός στάτορας, ρότορες με εσωτερικούς ή επιφανειακούς μαγνήτες. Από την άλλη, οι α-

ακτινικές μηχανές δεν έχουν τόσους συνδυασμούς και μπορούν να έχουν μόνο δύο επιφάνειες εργασίας, είτε δύο ρότορες συνδυασμένους με ένα στάτη, είτε δύο στάτες συνδυασμένους με ένα ρότορα. Το όφελος από τη χρήση δύο επιφανειών εργασίας είναι η αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αξονικές μηχανές υπερτερούν σε σχέση με τις ακτινικές και αυτό γιατί διαθέτουν ένα επίπεδο ρυθμιζόμενο διάκενο αέρος και εύκολη ρύθμιση ψύξης, το οποίο είναι σημαντικό όταν λειτουργούν υπό συνθήκες χαμηλής πίεσης. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην βελτιστοποίηση των ακτινικών μηχανών και ιδιαίτερα στο διάκενο. Σε μία μηχανή RFPM οι μαγνήτες μπορούν να τοποθετούνται επιφανειακά στον άξονα του ρότορα που περιβάλλεται από το στάτη. Η μηχανή ακτινικής ροής χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρής κλίμακας μηχανές υψηλής ταχύτητας, όπου η αντοχή σε εφελκυσμό του μόνιμου μαγνήτη απαιτεί την τοποθέτηση κοντά σε περιστρεφόμενο άξονα. Ένας άλλος τύπος κινητήρα/γεννήτριας είναι οι συστοιχίες μαγνητών εσωτερικού διπόλου, τύπου Halbach. Όταν η συστοιχία μόνιμου μαγνήτη περιστρέφεται μαζί με το σφόνδυλο και αλληλεπιδρά με ένα σύνολο σταθερών πηνίων παράγει ροπή. Στο Halbach τύπο, η συστοιχία μόνιμου μαγνήτη σχηματίζει ένα κυλινδρικό κέλυφος, σαν ο άξονας να δημιουργεί το εσωτερικό δίπολο.



Εικόνα 2.17: Ακτινική και αξονική κατεύθυνση.[21]



Εικόνα 2.18: Σφόνδυλος με AFPM και RFPM διάταξη [18]

3) Ρουλεμάν ή έδρανα: Τα έδρανα συνδέουν, όπως αναφέραμε πιο πάνω, το περιστρεφόμενο τμήμα με ένα σταθερό και επιτελούν τους παρακάτω σκοπούς:

- Αντέχουν το βάρος της περιστρεφόμενης μάζας
- Συγκρατούν το σφόνδυλο
- Αφήνουν ελεύθερο το σφόνδυλο να περιστραφεί
- Μειώνουν τις τριβές

Τα έδρανα πρέπει να εξασφαλίζουν σταθερότητα τόσο στην ομαλή περιστροφή του σφονδύλου όσο και σε ενδεχόμενες αστάθειες της περιστροφής. Η ταχύτητα του σφονδύλου περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό λόγω της τριβής από τα ρουλεμάν.

Τα είδη εδράνων που χρησιμοποιούνται στους σφονδύλους είναι τα μηχανικά και τα μαγνητικά, αλλά κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται τα μαγνητικά.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει πώς εμπλέκεται ο τύπος του εδράνου στο σχεδιασμό του σφονδύλου.

Influence of Bearing Type on the Design and Performance of Flywheels with Stored Energy in the 1- to 10-kWh Range

Bearing type	Levitation pressure (MPa)	Intrinsic loss fraction of KE_{max}/h	Parasitic loss fraction of KE_{max}/h	Total loss fraction of KE_{max}/h	Criticals	Sensitive to rotor imbalance
Mechanical	> 10	0.1	0.02	0.12	Design out of operating range	Most
Magnetic	0.6	<0.001	0.01	0.01	Tunable	Some
Superconducting	0.3	<0.0001	0.001	0.001	Far below operating range	Least

Πίνακας 2.3: Τύποι εδράνων και η επίδρασή τους στο σχεδιασμό σφονδύλου.[19]

Παρακάτω θα αναφερθούμε εκτενέστερα στα βασικά έδρανα που χρησιμοποιούνται.

Μηχανικά έδρανα

Τα μηχανικά ρουλεμάν είναι η απλούστερη μορφή ρουλεμάν και είναι εύκολα στην κατασκευή, αξιόπιστα και χαμηλού κόστους. Το αρνητικό τους είναι ότι καταπονούνται αρκετά λόγω φθοράς, γιατί χρησιμοποιούν μεγάλες δυνάμεις τριβής, εισάγοντας έτσι περιορισμούς στις υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες μηχανικών εδράνων, όσον αφορά τον σφόνδυλο, οι βασικότερες είναι: ένσφαιροι τριβείς κυλίνδρου, υδροδυναμικά λιπαινόμενα έδρανα, αερολιπαινόμενα έδρανα.

Αν η περιστρεφόμενη μάζα εκτελεί περιστροφές στον αέρα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλοι οι παραπάνω τύποι ρουλεμάν. Αν περιστρέφεται στο κενό η κατάσταση δυσκολεύει καθώς είναι δύσκολο να βρεθεί το κατάλληλο μηχανικό έδρανο και η πίεση ατμών του λιπαντικού πρέπει να είναι χαμηλή. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται στερεά λιπαινόμενα κεραμικά ρουλεμάν.

Μαγνητικά έδρανα

Τα μαγνητικά ρουλεμάν χρησιμοποιούνται σε συστήματα σφονδύλων που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Σε αυτήν την περίπτωση η έδραση επιτυγχάνεται χάρη στην ελκτική δύναμη που αναπτύσσεται ανάμεσα σε έναν ενεργοποιημένο μαγνήτη (στατικός ηλεκτρομαγνήτης) και ένα σιδηρομαγνητικό σώμα (περιστρεφό-

μενη μάζα). Ένα σύστημα σαν και αυτό είναι σχετικά ασταθές, γι' αυτό χρησιμοποιείται και ένας αισθητήρας για να ρυθμίζεται το πεδίο του ηλεκτρομαγνήτη ανάλογα με τη θέση του δρομέα. Έδρανα σαν και αυτά χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές για δεκαετίες και τα τελευταία χρόνια και στους σφονδύλους. Αυτά τα συστήματα ελέγχονται με αλγορίθμους διαφορικούς- ολοκληρωτικούς- αναλογικούς.

Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι ότι τα μαγνητικά έδρανα προσαρμόζονται εύκολα στις συνθήκες λειτουργίας. Επίσης το κενό ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε η θέση του σφονδύλου να διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από το φορτίο. Επίσης σημαντικό είναι ότι με τη χρήση μαγνητικών εδράνων επιτυγχάνεται μείωση απωλειών.

Ένα βασικό μειονέκτημα και ταυτόχρονο περιορισμός είναι ο περιορισμός στη δύναμη έδρασης και αυτό γιατί τα μαγνητικά πεδία είναι επαγωγικά και υπάρχει ένα άνω όριο στην τάση. Αυτό οδηγεί σε αργή αλλαγή δύναμης του εδράνου σε σχέση με το δοθέν σήμα και υπάρχει υστέρηση φάσης. Συνδέουν το περιστρεφόμενο τμήμα με μία ακίνητη πλατφόρμα. Χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των αξόνων του δρομέα της μηχανής και του σφονδύλου, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση των τριβών.

4)Θάλαμος συγκράτησης (Housing): Μέσα σε αυτόν τον θάλαμο βρίσκεται ο σφόνδυλος και χρησιμοποιείται για προστασία σε περίπτωση αστοχίας του υλικού, για να μην εκσφενδονιστούν κομμάτια του σφονδύλου και να συγκρατηθούν μέσα στο θάλαμο. Ακόμη χρησιμοποιείται για τη διατήρηση κενού αέρος, ώστε να μειωθούν οι ατμοσφαιρικές τριβές.

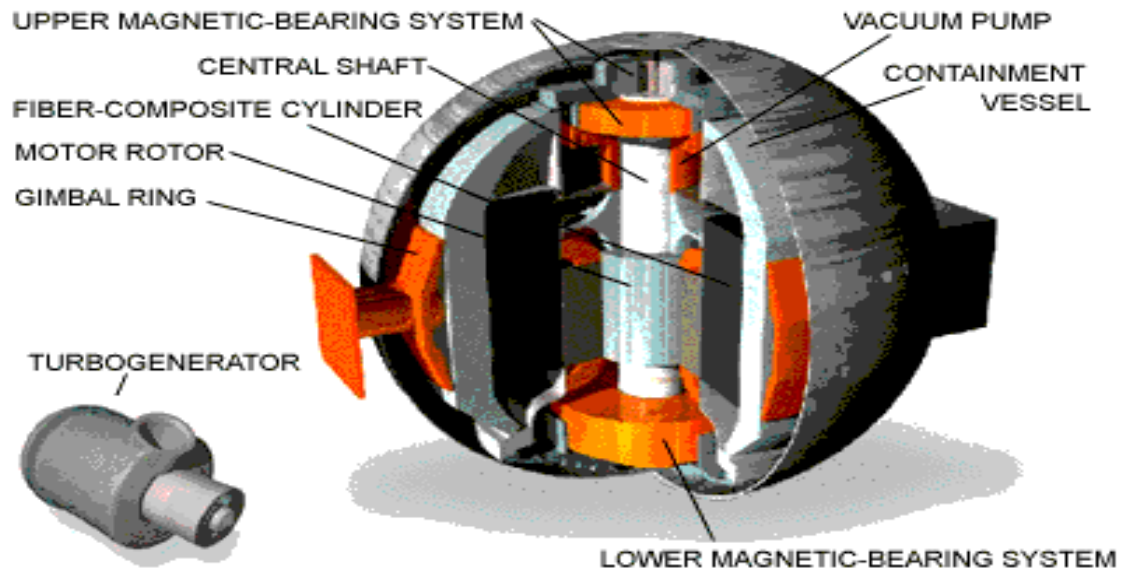
5)Ηλεκτρονικά ισχύος (Power Electronics): Είναι διακοπτικές διατάξεις ελέγχου της ροής της ισχύος. Αποτελούνται από δύο τριφασικούς μετατροπείς διακοπτικού τύπου των οποίων οι ρόλοι (ανόρθωση-αντιστροφή) εναλλάσσονται ανάλογα με τη ροή ισχύος (φόρτιση- εκφόρτιση). Οι μετατροπείς αποτελούνται από πλήρως ελεγχόμενους διακόπτες. Κατά τη φόρτιση και σταθεροποίηση του συστήματος, η κύρια λειτουργία τους είναι να τροφοδοτήσουν κατάλληλα τον κινητήρα με ισχύ, ώστε να τον επιταχύνουν ομαλά και να διατηρήσουν τον κινητήρα στην επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας, σύμφωνα πάντα με τους περιορισμούς και τις απαιτήσεις. Κατά την αποφόρτιση του συστήματος, η κύρια λειτουργία τους είναι να μεταφέρουν τη ενέργεια του συστήματος σφονδύλου- γεννήτριας στο δίκτυο, μέχρις ότου η συχνότητα και η ισχύς εξόδου της γεννήτριας να φτάσουν στο κατώτερο όριο λειτουργίας. Στην

πραγματικότητα, η κατώτερη ταχύτητα, στην οποία το σύστημα γεννήτριας-σφονδύλου μπορεί να εκφορτισθεί εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου και την ικανότητα μεταφοράς ισχύος του μετατροπέα.

6) Μονάδα και όργανα ελέγχου (Control Unit): Η μονάδα και τα όργανα ελέγχου αποτελούνται από οθόνες, όργανα μέτρησης και τα ηλεκτρονικά, που απεικονίζουν, μετρούν και ελέγχουν τη λειτουργία του συστήματος, ώστε να εξασφαλίσουν ότι το σύστημα λειτουργεί στα όρια του αρχικού σχεδιασμού. Τα όργανα μέτρησης χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν στις οθόνες κρίσιμες μεταβλητές του συστήματος, όπως είναι η ταχύτητα και η ευθυγράμμιση του δρομέα, καθώς και η θερμοκρασία. Καθορίζει τη ροή ισχύος (φόρτιση- εκφόρτιση) στέλνοντας τα κατάλληλα σήματα ελέγχου στους μετατροπείς, ανάλογα με τις συνθήκες δικτύου.

7) Διάταξη ελέγχου των ηλεκτρονικών ισχύος (Power Electronics Control): Πρόκειται για τη διάταξη που καθορίζει τη φορά της ροής της ενέργειας στο σύστημα, δίνοντας τα κατάλληλα σήματα διέγερσης στους διακόπτες των μετατροπέων, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο.

Ολόκληρο το σύστημα τοποθετείται μέσα σε ένα δοχείο με κατάλληλα διακοπτικά μέσα και ανεμιστήρες για ασφαλή λειτουργία. Τα σημερινά συστήματα λειτουργούν ανάμεσα στην ατμοσφαιρική πίεση (περίπου 100kPa)[19] έως 1mPa, με τα συστήματα με την υψηλότερη ταχύτητα να λειτουργούν στη χαμηλότερη πίεση. Οι σφόνδυλοι χαμηλής ταχύτητας είναι μεγαλύτεροι, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν σε αέρα με κάποιες αποδεκτές απώλειες. Η μείωση του συντελεστή αεροδυναμικής είναι σημαντική για τους σφονδύλους υψηλής απόδοσης, όχι μόνο για να μειωθεί ο ρυθμός απωλειών αλλά και για να προστατευθεί ο σφόνδυλος από την υπερθέρμανση. Είναι γεγονός ότι ένας καλός σχεδιασμός καθιστά σχεδόν αδύνατη την αστοχία του σφονδύλου, αλλά είναι γεγονός ότι για σφονδύλους υψηλής απόδοσης ένα ασφαλές περιβάλλον είναι αναγκαίο. Όταν ένας σφόνδυλος αστοχήσει τα εκτοξευόμενα κομμάτια διατηρούν την στροφορμή τους. Αυτά τα κομμάτια κινούνται ανωστικά και περιστροφικά. Τα συνθετικά υλικά εκτοξεύουν πολύ μικρά θραύσματα μεγέθους μίας βελόνας ή μικρών κόκκων, ενώ τα μεταλλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερα.



Εικόνα 2.19 : Τα μέρη που αποτελείται ένας σφόνδυλος [22]



Εικόνα 2.20: Κύρια μέρη του συστήματος με κάθετο άξονα περιστροφής [23]

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε και τους παράγοντες που επηρεάζουν και την απόδοση ενός συστήματος FES. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος, ώστε να είναι αποδοτικό, αποτελεσματικό και ασφαλές. Αυτοί οι παράγοντες είναι:

- Καταπόνηση του δρομέα και αστοχία του υλικού: Η κατασκευή σφονδύλων με μεγάλη ακτίνα και υψηλή ταχύτητα περιστροφής είναι επιθυμητή, γιατί επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλου ποσού ενέργειας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Παρ' όλα αυτά ο σχεδιασμός του σφονδύλου περιορίζεται από την ικανότητα του υλικού το σφονδύλου να αντέχει τις πιέσεις και τις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω περιστροφής. Εάν η ταχύτητα του σφονδύλου ξεπεράσει το ανώτατο επιτρεπτό όριο, τότε θα αρχίζουν να εκσφενδονίζονται κομμάτια του σφονδύλου, τερματίζοντας έτσι και τη διάρκεια ζωής του σφονδύλου. Ένα ανεπιθύμητο ατύχημα σαν αυτό μπορεί να προκαλέσει τραυματισμό ατόμων, καθώς και καταστροφή εξοπλισμού.
- Μετατροπή ενέργειας: Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν κινητική ενέργεια για την τροφοδότηση εφαρμογών, που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή από την κινητική στην ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρικών μηχανών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μηχανών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα FES. Όμως, στόχος είναι να γίνει η σωστή σύνδεση ανάμεσα στο ηλεκτρικό δίκτυο που έχει σταθερή συχνότητα και στο σύστημα μηχανής/σφονδύλου, το οποίο επιβραδύνεται κατά την αποφόρτιση και επιταχύνεται κατά τη φόρτιση. Για να γίνει αυτή η σύνδεση, χρησιμοποιούνται, είτε μηχανικοί συμπλέκτες, είτε ηλεκτρονικά ισχύος. Η πλειοψηφία των συστημάτων χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ισχύος για μετατροπή της συχνότητας, ενώ οι μηχανικοί συμπλέκτες χρησιμοποιούνται μόνο σε πολύ μεγάλα αργόστροφα συστήματα.
- Ενεργειακές απώλειες και τριβή: Σε ένα σύστημα FES, υπάρχουν δυνάμεις οι οποίες δρουν αντίθετα στη φορά περιστροφής του σφονδύλου, προκαλώντας την επιβράδυνση του και την ταυτόχρονη απώλεια ενέργειας. Οι δυνάμεις αυτές προκύπτουν από την τριβή μεταξύ της στρεφόμενης μάζας και του περιβάλλοντος που την περιβάλλει, καθώς και από την τριβή των ρουλεμάν με τη βάση στην οποία εδρεύουν. Ακόμα, οι ενεργειακές απώλειες του συστήματος επιβαρύνονται

από τις απώλειες υστέρησης των δινορρευμάτων της μηχανής, καθώς και από τις απώλειες μετάβασης του μετατροπέα.

- Επίδραση θερμότητας: Η ενέργεια που χάνεται κατά την περιστροφή και οφείλεται σε τριβές μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία αυξάνει στη συνέχεια τη θερμοκρασία του σφονδύλου. Εάν συσσωρευτούν μεγάλα ποσά θερμότητας, θα πρέπει να απομακρυνθούν ώστε να αποτρέψουν πιθανή βλάβη στο σφόνδυλο ή και σε άλλα μέρη του συστήματος. Η μέγιστη βλάβη στο σφόνδυλο ή σε άλλα μέρη του συστήματος. Η μέγιστη θερμοκρασία αντοχής περιορίζεται από τα υλικά κατασκευής του σφονδύλου. Ένας τρόπος ελέγχου της θερμοκρασίας είναι η μείωση της ονομαστικής ταχύτητας λειτουργίας του συστήματος. Ο περιορισμός αυτός της ταχύτητας, θα μειώσει επίσης και την αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος.

Οι σφόνδυλοι ανάλογα με το αν δίνεται έμφαση στο σφόνδυλο τον ίδιο ή στη ηλεκτρική μηχανή διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Συστήματα ενέργειας (energy wheels), όπου κυριαρχεί το κόστος του σφονδύλου και είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο χρόνο αποφόρτισης.
- Συστήματα ισχύος (power wheels), όπου κυριαρχεί το κόστος της ηλεκτρικής μηχανής και των ηλεκτρονικών ισχύος και είναι κατάλληλα για εφαρμογές μικρού χρόνου αποφόρτισης.

Τα πλεονεκτήματα των σφονδύλων είναι:

- Η άμεση απόκριση στις απαιτήσεις ενέργειας. Χαρακτηρίζεται για υψηλές ταχύτητες φόρτισης αποφόρτισης για πολλούς κύκλους.
- Μεγάλη απόδοση που φθάνει το 90%. [20]
- Μεγάλη διάρκεια ζωής (15 με 30 χρόνια), ανάλογα με την ταχύτητα λειτουργίας τους. [20]
- Απαιτούν ελάχιστη συντήρηση με μηδενικό κόστος, μπορεί και καθόλου.
- Η μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα (5-100Wh/kg). [20]
- Είναι σύστημα αποθήκευσης ενέργειας φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς αποτελούνται από αδρανή μη τοξικά υλικά.

- Έχουν σχεδόν απεριόριστο αριθμό κύκλων φόρτισης- εκφόρτισης.
- Αποθηκεύουν και αποδίδουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Δίνουν στιγμιαία μεγάλη ποσά ενέργειας, γι' αυτό και προτιμώνται περισσότερο σε ώρες αιχμής που απαιτείται σχετικά μεγάλη παροχή ενέργειας.
- Αντέχουν στις περιβαλλοντικές αλλαγές της θερμοκρασίας. Για την ακρίβεια, η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από εξωτερικές θερμοκρασίες. Λειτουργούν ακόμα και σε περιβάλλον με υψηλή θερμοκρασία σε αντίθεση με τα συστήματα μπαταριών, που λειτουργούν αποδοτικά σε θερμοκρασίες κάτω από 40°C.[20]
- Μετρώντας απλά την ταχύτητα του σφονδύλου μπορούμε να γνωρίζουμε ποσότητα της αποθηκευόμενης ενέργειας.
- Δεν υπάρχει μείωση της ονομαστικής ισχύος με την πάροδο του χρόνου λόγω γήρανσης της συσκευής αποθήκευσης (όπως συμβαίνει και με τις μπαταρίες).
- Τα μειονεκτήματα είναι:
- Το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τις μπαταρίες.
- Κίνδυνος καταστροφής του σφονδύλου από τις αναπτυσσόμενες φυγόκεντρες δυνάμεις όταν υπερβεί το σύστημα την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του.
- Λόγω του παραπάνω μειονεκτήματος, απαιτείται ο σφόνδυλος να βρίσκεται μέσα σε ένα ειδικά κατασκευασμένο δοχείο, ώστε σε περίπτωση ατυχήματος τα κομμάτια που θα εκτιναχθούν να μην το τρυπήσουν και προκληθούν και επιπλέον ζημιές και ατυχήματα. Αυτό είναι κάτι που αυξάνει το βάρος και τον όγκο του.
- Οι ενεργειακές απώλειες όταν οι κύκλοι φόρτισης αποφόρτισης είναι ασυνεχείς.
- Ο θόρυβος κατά την παραγωγή ενέργειας.
- Τα τρέχοντα συστήματα flywheels λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα ενέργειας.
- Ο σφόνδυλος λόγω των υψηλών ποσοστών αυτοεκφόρτισης, τα οποία φθάνουν μέχρι και το 20% της αποθηκευτικής του ικανότητας ανά ώρα, οδηγείται σε χειροτέρευση της ενεργειακής του απόδοσης όταν ο κύκλος φόρτισης- αποφόρτισης

δεν είναι συνεχής. Αυτό, τον καθιστά μη κατάλληλο για μακροπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση.[20]

Με βάση το τελευταίο μειονέκτημα τα συστήματα FES δεν χρησιμοποιούνται για μακροπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση, αλλά είναι απολύτως αξιόπιστα για βραχυπρόθεσμη. Επιπλέον χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τις ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, όπως προείπαμε και είναι φυσικό οι ΑΠΕ είναι σε πλήρη εξάρτηση με τα καιρικά φαινόμενα με αποτέλεσμα να υπάρχουν περιπτώσεις όπου υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας και περιπτώσεις όπου υπάρχει έλλειμμα.

2.2.1.2 Χρησιμότητα συστημάτων αποθήκευσης σφονδύλων στη ρύθμιση ποιότητας της τάσης του δικτύου

Σε οποιοδήποτε δίκτυο, είτε αυτό είναι ισχυρά διασυνδεδεμένο είτε αυτόνομο, πρέπει κάθε στιγμή να πραγματοποιείται το ισοζύγιο ισχύος. Η ισχύς που απορροφάται από το φορτίο (καταναλωτή) πρέπει να είναι ίση –με μικρές αποκλίσεις- με αυτή που παράγεται από τους σταθμούς. (είτε είναι θερμικοί, υδροηλεκτρικοί κλπ). Το πρόβλημα που παρουσιάζεται με ένα θερμικό σταθμό για παράδειγμα, είναι ότι σε περιόδους χαμηλού φορτίου δεν μπορούν να μειώσουν την παραγωγή τους κάτω από ένα τεχνικό όριο και σαν συνέπεια περισσεύει ισχύς. Αντίστοιχα, σε περιόδους αιχμής (υψηλού φορτίου) υπάρχει έλλειμμα λόγω του ότι δεν μπορεί να αυξηθεί η παραγωγή. Επιπλέον, για να καλύψουν το φορτίο οι θερμικοί σταθμοί καταναλώνουν μεγαλύτερα ποσά καυσίμου. Αυτό έχει σαν συνέπεια την αύξηση ρύπων του θερμοκηπίου και συγκεκριμένα CO₂.

Η ανάγκη για αξιόπιστη παροχή τάσης – τόσο κατά μέτρο και συχνότητα- καθιστά αναγκαία την αποθήκευση ενέργειας. Εδώ σημαντικό ρόλο παίζουν οι σφόνδυλοι. Τα συστήματα των σφονδύλων καλύπτουν τη διαφορά, απελευθερώνοντας την προϋπάρχουσα αποθηκευμένη ενέργεια και συμβάλλουν στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου. Όταν το φορτίο πέσει κάτω από τα παραγόμενα επίπεδα –κυρίως τις βραδινές ώρες- κάτι που επιταχύνει τις γεννήτριες και αυξάνει τη συχνότητα, τότε η περίσσεια ενέργειας αποθηκεύεται στο σφόνδυλο σαν περιστροφική ενέργεια και χρησιμοποιείται αργότερα.

Ο μικρός χρόνος απόκρισης των συστημάτων αποθήκευσης των σφονδύλων τα καθιστά κυρίαρχα μέσα αποθήκευσης ενέργειας και λειτουργούν σαν ανακυκλωτές του δικτύου και όχι σαν παραγωγοί.

2.2.1.3 Υπολογισμός αποθηκευόμενης ενέργειας

Αν θεωρηθεί ότι σε ένα κύκλο λειτουργίας η γωνιακή ταχύτητα ενός σφονδύλου μεταβάλλεται από ω_{\max} σε ω_{\min} , μπορούμε να ορίσουμε ως συντελεστή διακύμανσης (C_F) το λόγο της διαφοράς $\Delta\omega$ προς την ονομαστική ταχύτητα του ω

$$C_F = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega} \quad (2.5)$$

Ο συντελεστής αυτός είναι μία παράμετρος που ορίζεται από το σχεδιαστή. Όσο πιο μικρός είναι ο συντελεστής τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο σφόνδυλος και το κόστος του συστήματος. Όσο μικραίνει ο συντελεστής αυτός τόσο επιτυγχάνεται πιο ομαλή λειτουργία αποφεύγοντας τις μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας.

Ως μέση ταχύτητα του συστήματος ορίζεται ο παρακάτω λόγος:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \quad (2.6)$$

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω η κινητική ενέργεια που αποθηκεύει μία περιστρεφόμενη μάζα δίνεται από τη σχέση

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.7)$$

Με I να είναι η ροπή αδρανείας. Ροπή αδρανείας μιας μάζας είναι συνάρτηση της ίδιας της μάζας και σχήματός της και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I = \int x^2 dm \quad (2.8)$$

Όπου x είναι η απόσταση της στοιχειώδους μάζας dm από τον άξονα περιστροφής.

Για κυλινδρικές και σφαιρικές μάζες, ακτίνας R η ροπή αδρανείας (ως προς τον άξονα συμμετρίας) είναι

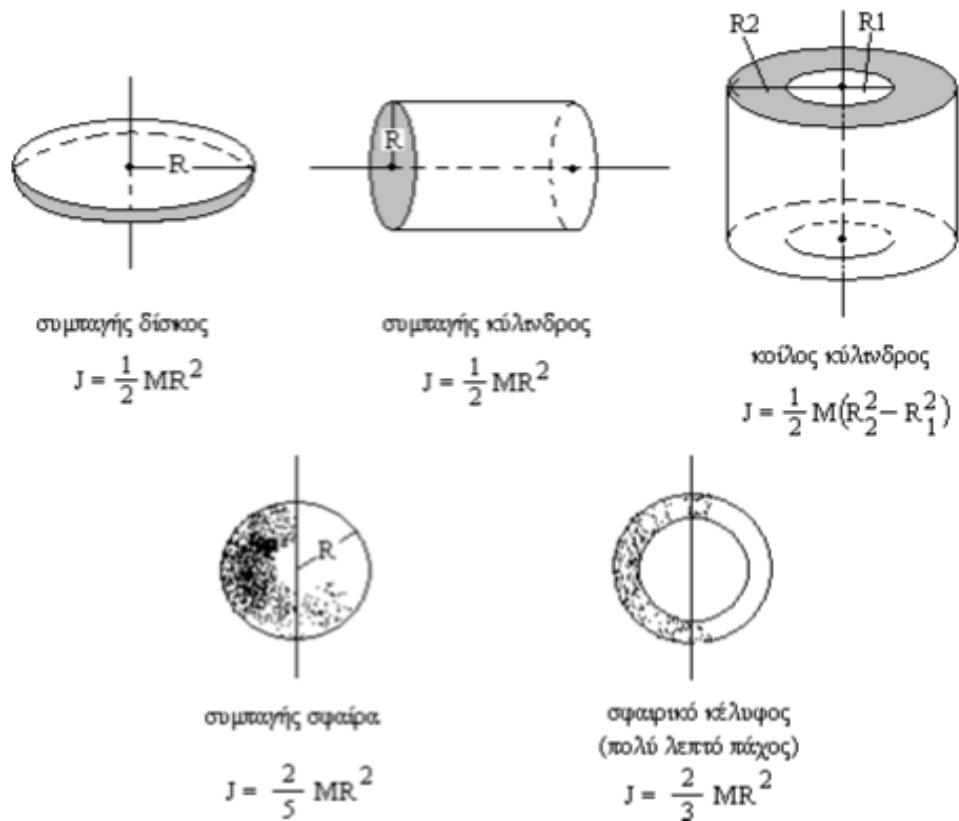
$$I = k \cdot M \cdot R^2 \quad (2.9)$$

Με k = σταθερά ανάλογη της γεωμετρίας της μάζας

M = ολική μάζα

R = ακτίνα σφαίρας ή κυλίνδρου

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες ροπές αδρανείας βασικών στερεών



Εικόνα 2.21: Ροπές αδρανείας βασικών στερεών [24]

Για ένα κοίλο κύλινδρο μήκους L , με R_1 εσωτερική ακτίνα και R_2 εξωτερική ακτίνα σε μία τυχαία απόσταση r , με $R_1 < r < R_2$ ισχύει:

$$I = \int r^2 dm \quad (2.10)$$

$$\text{Όμως είναι: } \frac{dm}{M} = \frac{dV}{V} \Rightarrow dm = \frac{M}{V} dV = \frac{M}{\pi(R_2^2 - R_1^2)L} 2\pi r dr L \quad (2.11)$$

Και αντικαθιστώντας στην (6) έχουμε

$$I = \frac{1}{2} M(R_2^2 - R_1^2) \quad (2.12)$$

Όταν $R_1 = R_2 = 0$ (συμπαγής κύλινδρος) από σχέση 8 έχω:

$$I = \frac{1}{2} MR^2 \quad (2.13)$$

Και όταν $R_1 = R_2 = R$ (περίπτωση λεπτού κελύφους) τότε από την 4 προκύπτει:

$$I = \int r^2 dm = \int R^2 dm = R^2 \int dm = R^2 M \quad (2.14)$$

Τότε από τη σχέση (2.1) έχουμε ότι η αποθηκευόμενη ενέργεια στο σφόνδυλο που είναι η περίπτωση κυλινδρικού κελύφους είναι

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} M R^2 \omega^2 = \frac{1}{2} M u^2 \quad (2.15)$$

Με u να είναι η γραμμική ταχύτητα του στροφέα

Η σχέση που συνδέει την αποθηκευόμενη ενέργεια με τη μάζα είναι γραμμική και προκειμένου να πετύχουμε μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια μας συμφέρει να λειτουργούμε το σφόνδυλο στη μέγιστη γωνιακή ταχύτητα μιας και αυτή αυξάνει στο τετράγωνο.

Το άνω όριο της γωνιακής ταχύτητας της μάζας εξαρτάται από το όριο ελαστικότητας του υλικού (σ_{\max}). Με αυτό καταλαβαίνουμε ότι δεν μπορώ να περιστρέψω με οποιαδήποτε ταχύτητα οποιοδήποτε υλικό θέλω, μιας και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις στα άτομά του θα οδηγήσουν στην παραμόρφωσή του. Αν υπερβώ το όριο ελαστικότητας, αρχίζει η διαρροή (παραμόρφωση του υλικού λόγω της επιμήκυνσης της μάζας του). Για έναν κυλινδρικό κέλυφος ακτίνας R η μέγιστη τάση θραύσης είναι:

$$\sigma_{\max} = \rho \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (2.16)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα της μάζας του σφονδύλου..

Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.15) βρίσκω ότι η μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια στο σφόνδυλο είναι:

$$E_{k,\max} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \frac{\sigma_{\max}}{\rho} \quad (2.17)$$

Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι μπορούμε να επιτύχουμε μέγιστη αποθήκευση ενέργειας στο σφόνδυλο, όταν αυτός είναι κατασκευασμένος από υλικό με μεγάλο όριο ελαστικότητας και μικρή πυκνότητα.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει μερικά υλικά για την κατασκευή του σφονδύλου καθώς και μερικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους:

	Density [kg.m ⁻³]	Strength [MN.m ⁻²]	Theoretical maximum specific energy [Wh.kg ⁻¹]
Steel (AISI 4340)	7800	1800	32
Alloy (AlMnMg)	2700	600	31
Titanium (TiAl6Zr5)	4500	1200	37
GFRP Glass fibre reinforced polymer (60 vol% E-glass)	2000	1600	111
CFRP Carbon fibre reinforced polymer (60 vol% HT Carbon)	1500	2400	222

Πίνακας 2.4: Υλικά κατασκευής σφονδύλου [24]

Η ειδική ενέργεια ανά μονάδα μάζας είναι:

$$E_m = \frac{1}{2} R^2 \omega^2 \quad (2.18)$$

Η ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής περιορίζεται κυρίως από τη ροπή της κινούσας μηχανής μιας και

$$P = T \cdot \omega \quad (2.19)$$

Με P= ισχύς μηχανής και

$$T = \text{ροπή του άξονά της}$$

Η ισχύς της μηχανής διατηρείται σταθερή και η ροπή αυξάνεται με τη μείωση της γωνιακής ταχύτητας. Το όριο της ροπής και το γεγονός ότι η περισσότερη ενέργεια αποθηκεύεται στις υψηλότερες συχνότητες, έχουν σαν αποτέλεσμα ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη γωνιακή ταχύτητα (s) να είναι όχι μικρότερος από 0.2. Η χρήσιμη αποθηκευόμενη ενέργεια τότε είναι:

$$E_k = E_{k,\max} (1 - s^2) \quad (2.20)$$

Για την κατασκευή των διατάξεων σφονδύλων ακολουθούνται δύο στρατηγικές. Η πρώτη αφορά την αύξηση της ροπής αδρανείας του σφονδύλου. Αυτό επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας τη μάζα του ρότορα (περιστρεφόμενης μάζας) από ατσάλι με μεγάλη ακτίνα και πετυχαίνοντας ταχύτητες περιστροφής περίπου 10000 rpm [25]. Ένας κοινός κινητήρας και απλά ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν το σύστημα μετατροπής ισχύος. Έχουν κατασκευαστεί πολλά συστήματα σφονδύλων αυτής της κατηγορίας και λειτουργούν σαν αδιάλειπτοι παραγωγοί ισχύος για εμπορικούς σκοπούς. Ο σχεδιασμός αυτός οδηγεί σε σχετικά μεγάλα και βαριά συστήματα. Οι απώλειες της ενέργειας κατά την περιστροφική κίνηση περιορίζουν την ικανότητα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας.

Η δεύτερη κατηγορία συστημάτων σφονδύλων περιλαμβάνει σφονδύλους από ελαφρότερα υλικά που είναι ικανά να αναπτύξουν ταχύτητες περιστροφής της τάξης των 100.000 rpm.[26] Η κατηγορία αυτή, μπορεί να αντικαταστήσει ένα σύστημα σφονδύλου που αποτελείται από λίγες ογκώδεις μονάδες σε ένα σύστημα από πολλές μικρότερες που επιτρέπει έναν αρθρωτό σχεδιασμό. Η κατηγορία αυτή περιορίζει την αντίσταση του αέρα και τις τριβές με τα έδρανα (χρησιμοποιούνται μαγνητικά ρουλεμάν), παράγοντες που οδήγησαν στην αυτοεκφόρτιση του σφονδύλου. Για αυτούς τους λόγους αυτή η κατηγορία σφονδύλων χρησιμοποιείται για εφαρμογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Οι έρευνες τα τελευταία χρόνια εστιάζουν στην κατασκευή υπεραγώγιμων μαγνητικών ρουλεμάν για εφαρμογές σε τέτοια συστήματα. Όσο περισσότερο μειώνονται οι απώλειες περιστροφής τόσο αυξάνεται η ικανότητα φόρτισης-αποφόρτισης. Το επίπεδο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος καθορίζεται από το μετατροπέα και την ηλεκτρική μηχανή.

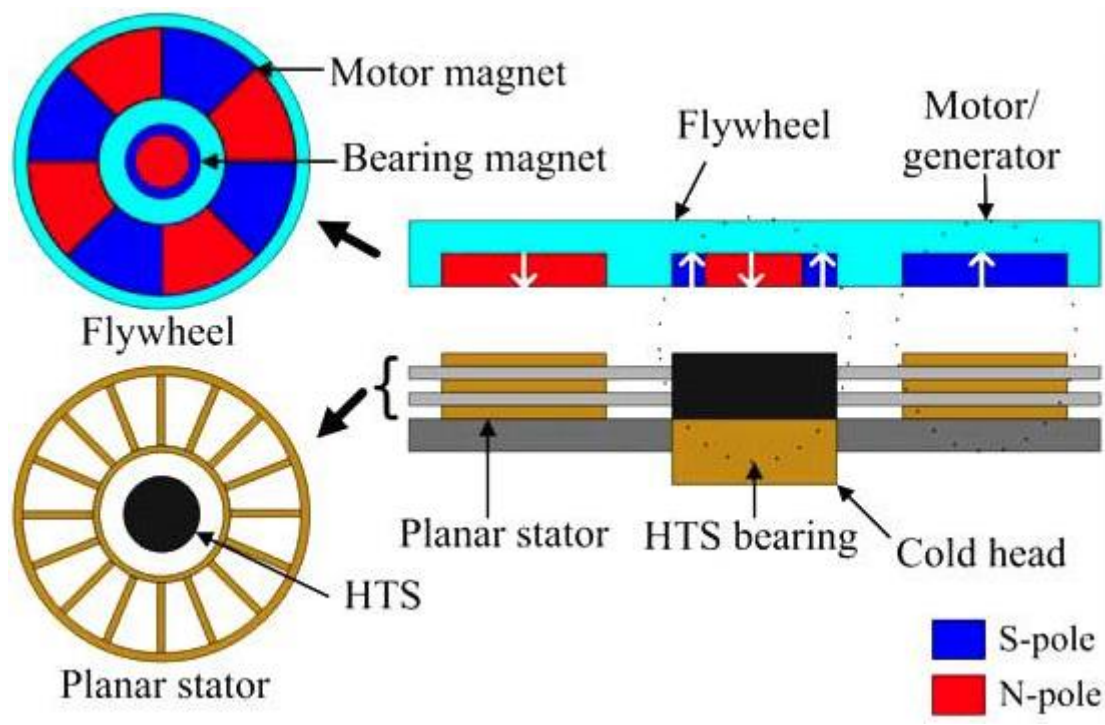
2.2.1.4 Σύγκριση σφονδύλων με βάση το υλικό κατασκευής τους (χαλύβδινοι σφόνδυλοι και σφόνδυλοι από νήματα κραμάτων)

Οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει σφονδύλους υψηλών ταχυτήτων από νήματα ελαφρά κράματα και νήματα. Παρά το γεγονός ότι το ατσάλι κοστίζει έως και 10 φορές περισσότερο από τα νήματα κραμάτων, οι σφόνδυλοι από νήματα μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες και ειδική ενέργεια μεγαλύτερη έως και 15 φορές από εκείνη του ατσαλιού. [24] Οι σφόνδυλοι με νήματα μπορούν να κατασκευασθούν με δύο τεχνικές. Στην πρώτη, τα νήματα περνούν αρχικά μέσα από ένα ρητινοειδές διάλυμα για να εμποτισθούν και στη συνέχεια τυλίγονται στον άξονα και το ρουλεμάν. Με την τεχνική αυτή παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής σφονδύλων πολλών στρώσεων, με κάθε στρώση να μπορεί να κατασκευασθεί από νήματα διαφορετικού υλικού. Η δεύτερη μέθοδος αφορά την τοποθέτηση μπλεγμένων νημάτων σε καλούπι και κάλυψη τους με κολλώδες διάλυμα. Η μέθοδος αυτή αφορά τη μαζική κατασκευή σφονδύλων μικρότερης ποιότητας από εκείνους της πρώτης.

Όσον αφορά τους σφονδύλους από κράματα (composite rotors), το κόστος αφορά κυρίως το υλικό τους παρά το χρόνο κατασκευής και τον εξοπλισμό που απαιτείται. Κατασκευάζονται κυρίως από ανθρακονήματα για τα τμήματα που υπόκεινται στις μεγαλύτερες δυνάμεις και από νήματα υαλού για τη μείωση της μάζας του σφονδύλου και αύξηση της ταχύτητας περιστροφής τους. Για να καταλάβουμε τη διαφορά το κόστος του χάλυβα είναι 1\$ ανά kg ενώ το κόστος των σφονδύλων με ανθρακονήματα είναι από 10 έως 30 \$ ανά kg. [24] Βέβαια πλεονεκτούν σε σχέση με τους χαλύβδινους, καθώς έχουν μικρότερη μάζα και αποκτούν μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής και έτσι αποθηκεύουν μεγαλύτερη ενέργεια. Αυτό έχει σαν συνέπεια το κόστος ανά kWh να είναι περίπου ίδιο και για τα δύο είδη (composite rotor και steel rotor).

2.2.2 State of the art- Εφαρμογές

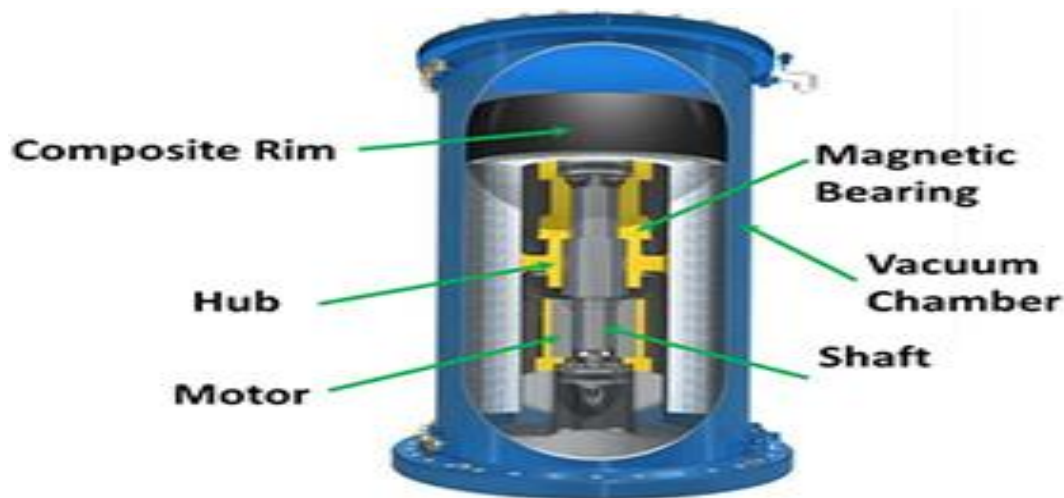
Ο τομέας της έρευνας και της ανάπτυξης των σφονδύλων αφορά το υλικό του με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του, την ικανότητα και την πυκνότητα ισχύος και την υψηλή ικανότητα μεταφοράς των εδράνων. Οι διατάξεις των σφονδύλων ή αλλιώς των περιστρεφόμενων τροχών αποτελούν μία ιδανική περίπτωση αποθήκευσης μεγάλων ποσών ενέργειας. Όσον αφορά το τεχνικό κομμάτι, πρόκειται για μία ώριμη τεχνολογία με αρκετές εφαρμογές. Τα ζητήματα που απασχολούν πλέον είναι η φθηνότερη κατασκευή, η αύξηση της απόδοσης και τέλος η βελτιστοποίηση και εγκατάσταση οικιακών συστημάτων. Γενικά είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία με μικρό κόστος. Μία πρόοδος στην τεχνολογία σφονδύλων είναι τα μαγνητικά έδρανα High Temperature Superconducting (HTS) που είναι μία πολλά υποσχόμενη επιλογή για τη βελτίωση της απόδοσης των ρουλεμάν. Μπορούν να σταθεροποιούν το σφόνδυλο αυτόματα χωρίς να χρειάζονται συστήματα ελέγχου. Παρ' όλα αυτά απαιτείται σύστημα κρυογονικής ψύξης από υγρό άζωτο. Πιο συγκεκριμένα στις Η.Π.Α , στο Argonne National Laboratory,[3] αναπτύχθηκε ένα σύστημα σφονδύλου 2 kW με χρήση υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας και μόνιμων μαγνητών σαν παθητικά ρουλεμάν για τη μελέτη. Επίσης, βελτιστοποιημένοι σφόνδυλοι για σχετικά μακροχρόνια λειτουργία (έως και αρκετές ώρες) μελετώνται για χρήση σε οχήματα και σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 2.22: HTS τεχνολογία [27]

Θα αναφέρουμε παραδείγματα εφαρμογής του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας των σφονδύλων. Στην Αμερική, η VYCON παρέχει στην Austin Energy, που αποτελεί την ένατη μεγαλύτερη ηλεκτρική κοινότητα, αποθήκευση ενέργειας με τη βοήθεια διάταξης σφονδύλων 4,8MW για την προστασία του κεντρικού συστήματος ελέγχου. Όταν το δίκτυο, λόγω καιρικών φαινομένων, για παράδειγμα καταιγίδα, δεν μπορεί να αποδώσει την απαραίτητη ισχύ, χρησιμοποιούνται οι σφόνδυλοι. Τα συστήματα FES αντικατέστησαν το σύστημα μπαταριών Lead-Acid, γιατί προσφέρουν αξιοπιστία εφεδρικής ενέργειας, καθαρή, φιλική προς το περιβάλλον λύση σε αντίθεση με τις τοξικές μπαταρίες. Ακόμα, πολλές εφαρμογές έχουν γίνει και σε συμβατικά συστήματα που χρησιμοποιούν υδρογονάνθρακες. Συνδέονται σφόνδυλοι σε παλιές ιδιως μονάδες οι οποίες λόγω της αύξησης του πληθυσμού της περιοχής, δεν επαρκούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες σε ώρες αιχμής. Μία ακόμα σύγχρονη μεγάλη εφαρμογή έγινε στην Καλιφόρνια, σε πρόγραμμα που έχει σχεδιαστεί από την California Energy Commission και έχουν συμπεριληφθεί ως κύριες διατάξεις αποθήκευσης σφόνδυλοι. Η εγκατάσταση έγινε από την Beacon Power Corporation στο αιολικό πάρκο του Tehachari της Καλιφόρνια. Είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί ο στόχος αυτού του προγράμματος είναι η απόδειξη της επάρκειας, ασφάλειας και σιγουριάς που

προσφέρουν τα συστήματα ΑΠΕ και κατά συνέπεια να βοηθήσει στην επέκταση της παροχής της παροχής αιολικής ενέργειας μέσω της ουσιαστικής αύξησης της ικανότητας των περιορισμένων εγκαταστάσεων μεταφοράς στην περιοχή. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο σφόνδυλο ώστε να εκμεταλλευτούν στο έπακρο τις δυνατότητες του. Χρησιμοποιήθηκε ο Gen4 flywheel με διάρκεια ζωής τα 20 έτη και μέγιστες στροφές λειτουργίας τις 1600 rpm [26]. Η κύρια λειτουργία του σφονδύλου είναι η εξισορρόπηση των τάσεων όλου του δικτύου, καθώς και να αποθηκεύει όλο το ενεργειακό πλεόνασμα. Σε περιπτώσεις όμως που παρατηρείται ενεργειακό έλλειμμα θα τίθεται σε πλήρη λειτουργία ώστε να καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις. Επίσης, στο νησί Aruba, στην Αμερική η εταιρεία Web Aruba μαζί με την Temporal Power ανακοίνωσαν τη συνεργασία τους για αποθήκευση ενέργειας μέσω σφονδύλων. Το σύστημα σφονδύλων θα προσφέρει ευελιξία και ανθεκτικότητα στο δίκτυο χωρητικότητας 5MW. Ακόμα, μία μονάδα 20 MW στις Η.Π.Α, που αποτελείται από συστοιχία 200 σειρών με 400 σφονδύλους Beacon, θα παρέχει σταθεροποίηση στο δίκτυο PJM Interconnection.[12]



Σχήμα 2.23: Σφόνδυλος της εταιρείας Beacon [28]

Οι διατάξεις αποθήκευσης σφονδύλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν ισχύ, όταν η παραγόμενη ισχύς από τις ανανεώσιμες πηγές είναι ανεπαρκής και να αποθηκεύουν την περίσσεια ισχύος. ανανεώσιμες πηγές είναι ανεπαρκής, και να αποθηκεύουν την περίσσεια ισχύος. Μια άλλη σημαντική εφαρμογή για τη διάταξη αποθήκευσης σφονδύλου είναι η βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και η παροχή ισχύος όταν υπάρχει ολική απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας, ως αποτέλεσμα της “αστοχίας” του ηλεκτρικού δικτύου (black-out). Στην Πορτογαλία υπάρχουν δύο

υβριδικά συστήματα βασιζόμενα στην τεχνολογία των σφονδύλων, τα οποία εφαρμόζονται στα νησιά Φλόρες και Γκρασιόζα (νησιά Αζόρες).

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένας VYCON σφόνδυλος.



Σχήμα 2.24: Σφόνδυλος VYCON [30]

Παρακάτω καταγράφονται άλλες εφαρμογές των συστημάτων FES:

Στην αυτοκινητοβιομηχανία: Για παράδειγμα το 2013, η VOLVO ανακοίνωσε ένα σύστημα σφονδύλων διαστάσεων 20cm, 6kg, κατασκευασμένων από ανθρακονήματα που θα τοποθετούνται στον οπίσθιο άξονα. Κατά την πέδηση, περιστρέφεται ο σφόνδυλος με ταχύτητα 60.000 rpm και σταματά την εμπρόσθια μηχανή. Αυτό το σύστημα, όταν συνεργάζεται με τετρακύλινδρο κινητήρα, επιτρέπει έως και 25% μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, παρέχει ώθηση 80hp και επιτρέπει να φτάσει μέχρι και τα 100km/h σε 5,5 δευτερόλεπτα.[30]

Στον ηλεκτρικό σιδηρόδρομο: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επί των ηλεκτροφόρων γραμμών, για να βοηθήσει τη ρύθμιση τάσης της γραμμής βελτιώνοντας την επιτάχυνση των τρένων και την ποσότητα της ενέργειας που ανακτάται κατά τη διάρκεια της πέδησης. Δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί στο Λονδίνο, στη Νέα Υόρκη.

Εφαρμογή αποθήκευσης ενέργειας σε στρεφόμενους σφονδύλους, για εφαρμογή στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου.

Ως γνωστών, μια από τις βασικότερες συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η σύγχρονη μηχανή. Στη σύγχρονη γεννήτρια, η συχνότητα της παραγόμενης τάσης είναι σταθερά συνδεδεμένη με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής 'n' (σε rpm) και τον αριθμό των πόλων 'p' σύμφωνα με τη σχέση:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \text{ σε Hz} \quad (2.21)$$

Αυτό σημαίνει ότι μια γεννήτρια συγκεκριμένου αριθμού μαγνητικών πόλων πρέπει να περιστρέφεται με συγκεκριμένη ταχύτητα 'n' προκειμένου να παράγεται τάση συχνότητας 50 ή 60 Hz [24] αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, για να μείνει συγχρονισμένη η γεννήτρια αυτή, θα πρέπει η ταχύτητα περιστροφής 'n' να είναι ίση και με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου. Και επειδή σήμερα η απαίτηση των ηλεκτρικών συσκευών για ολοένα και πιο σταθερή συχνότητα τάσης αυξάνεται διαρκώς, καταλαβαίνουμε ότι η διατήρησή της στην ονομαστική τιμή αποτελεί σημαντικό μέλημα όλων των ηλεκτρικών εταιριών παγκοσμίως.

Η σταθερότητα της συχνότητας του δικτύου σχετίζεται άμεσα με την ισορροπία ανάμεσα στο φορτίο του δικτύου και την παραγωγή. Παραδοσιακά, η σταθεροποίηση της συχνότητας γίνεται με ρύθμιση της ισχύς εξόδου των γεννητριών, ρυθμίζοντας τη μηχανική ισχύ στην είσοδό τους. Ανάλογα αν η γεννήτρια κινείται από ατμοστρόβιλο, από υδροστρόβιλο ή από πετρελαιοκινητήρα, ρυθμίζουμε τη ροή ατμού, νερού ή πετρελαίου. Αν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη από το φορτίο, η ταχύτητα ή η συχνότητα της γεννήτριας αυξάνουν, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ελαττώνονται. Οι διακυμάνσεις αυτές από την ονομαστική ταχύτητα ή συχνότητα (με μέγιστη τιμή συνήθως τα + 0,5 Hz)[24] χρησιμοποιούνται σαν σήματα ελέγχου για να προκαλέσουν την αυτόματη και κατάλληλη ρύθμιση της παροχής μηχανικής ισχύος. Ένας ειδικός ελεγκτής ρυθμίζεται για μια συγκεκριμένη συνθήκη λειτουργίας και φροντίζει για τη κάλυψη μικρών μεταβολών του φορτίου. Όταν με τη πάροδο του χρόνου οι μεταβολές του φορτίου γίνονται μεγάλες, απαιτείται επαναρύθμιση του ελεγκτή. Η συσκευή που ελέγχει τη ροή ατμού στον ατμοστρόβιλο ονομάζεται ρυθμιστής ταχύτητας.

Ανάλογη συσκευή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής νερού ή τη θέση των πετρυγίων στον υδροστρόβιλο. Η λειτουργία αυτή του συστήματος ελέγχου, βασίζεται σε ένα σήμα ACE (Area Control Error) το οποίο σχετίζεται με τη διαφορά μεταξύ συνολικής παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος. Το σήμα αυτό έχει ισχύ ίση με το 1-2% της ολικής παραγόμενης ισχύς από έναν σταθμό και σαν συνέπεια κάθε μονάδα φροντίζει να φυλάει 1-400MW για σταθεροποίηση συχνότητας[24]. Επειδή το παραγόμενο αυτό σήμα που στέλνεται στους ρυθμιστές είναι πιο αργό από την πραγματική μεταβολή του φορτίου, η ρύθμισης της συχνότητας με την κλασική μέθοδο αποτελεί ένα δύσκολο έργο που πρέπει να πραγματοποιηθεί. Με τα συστήματα στρεφόμενων σφονδύλων μπορούμε να πετύχουμε σταθεροποίηση συχνότητας, ανακυκλώνοντας την ηλεκτρική ενέργεια και αξιοποιώντας όλα τα σημαντικά πλεονεκτήματα που είδαμε παραπάνω ότι προσφέρουν τα συστήματα αυτά. Αρχικά, απορροφάται ενέργεια όταν αυτή είναι σε αφθονία και στη συνέχεια αποδίδεται πίσω για την επιθυμητή ρύθμιση συχνότητας. Αποτελέσματα εξομοίωσης που βασίζονται σε πραγματικά τέτοια σήματα, δείχνουν ότι ένα αρθρωτό σύστημα σφονδύλων μπορεί να παρέχει σταθερότητα συχνότητας. Το ελκυστικό κόστος ενός τέτοιου συστήματος σε σχέση με την κλασική μέθοδο ρύθμισης της συχνότητας και το γεγονός ότι τα συστήματα αυτά παρέχουν ταυτόχρονα και ρύθμιση της άεργου ισχύος, επεκτείνουν την ικανότητα των συστημάτων των σφονδύλων στην σταθεροποίηση τάσης. Επιπρόσθετα, με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να οδηγήσουν και στην χρήση των συστημάτων αυτών για απόσβεση ταλαντώσεων. Όλες οι παραπάνω λειτουργίες μπορούν να αποτρέψουν μεταβολές στη τάση και συχνότητα του δικτύου, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τα μεγαλύτερα blackouts στην πρόσφατη ιστορία. Η σχέση ανάμεσα στη συχνότητα και την έλλειψη ή πλεόνασμα ενεργού ισχύος κάθε χρονική στιγμή εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sum_i P_{source} - P_{load} = \frac{d}{dt}[K_E] = \frac{d}{dt}[\sum_i J_i \omega_i^t] \quad (2.22)$$

Με: $P_{\text{source}} =$ ισχύς σύγχρονης γεννήτριας (παραγωγή)

$P_{\text{load}} =$ ισχύς φορτίου (ζήτηση)

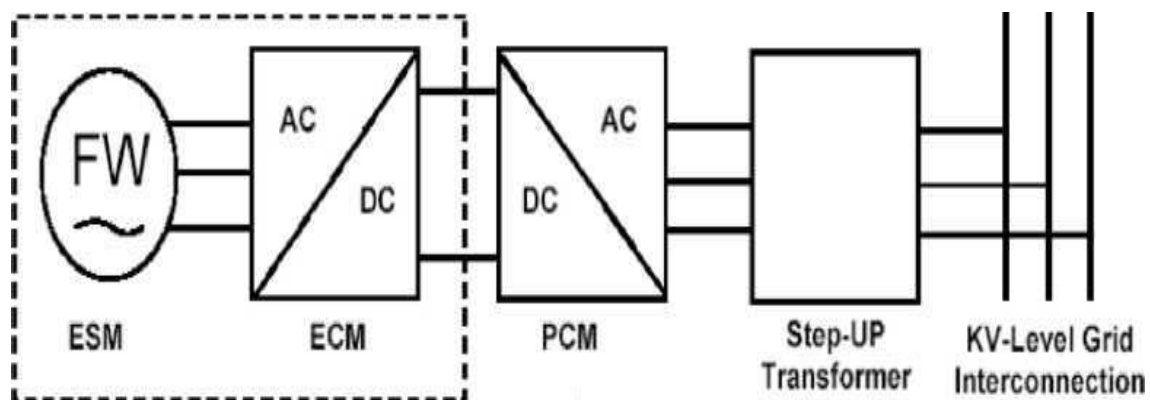
$K_E =$ κινητική ενέργεια σύγχρονων μηχανών συστήματος

$J =$ ροπή αδράνειας περιστρεφόμενης μάζας

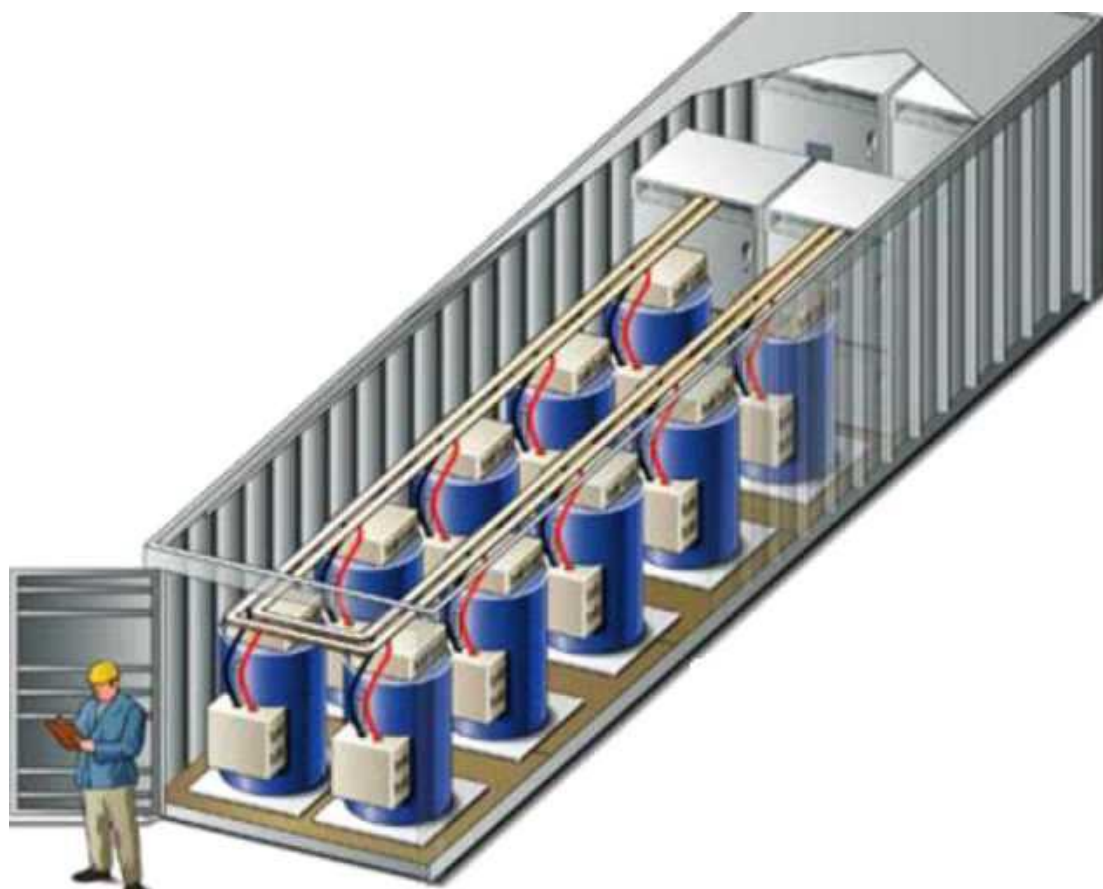
$\omega =$ γωνιακή ταχύτητα συστήματος σύγχρονων μηχανών συστήματος

Με δεδομένο ότι ακόμα και οι πιο απότομες μεταβολές της ζήτησης ενέργειας μπορούν να γίνουν και στη διάρκεια ενός λεπτού. Η σταθεροποίηση της συχνότητας αφορά την εποπτεία της πραγματικής ακανόνιστης καμπύλης φορτίου από την παραγόμενη ισχύ. Σκοπός δηλαδή είναι η παραγόμενη ισχύς να ακολουθεί τις μεταβολές φορτίου όσο πιο πιστά και γρήγορα γίνεται.

Ένα χαρακτηριστικό σύστημα με στρεφόμενες μάζες έχει αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό η Beacon Power Corporation. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν πίνακα που περιέχει 10 παράλληλα συνδεδεμένα συστήματα flywheel.[24] Το σύστημα μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια έτσι ώστε να είναι ικανό να επιστρέψει 1MW για 15 λεπτά. Η εταιρία σκοπεύει να εμπορευτεί τον πίνακα αυτό με την ονομασία Smart Energy Matrix (SEM). Κάθε μια από τις 10 μονάδες αποθήκευσης περιέχει μονάδα μετατροπής της τάσης από ac σε dc και συνεπώς το μόνο που χρειάζεται το SEM για την λειτουργία του είναι ένα σύστημα PCM που θα μετατρέψει την dc τάση σε ac για τη σύνδεσή του με το δίκτυο. Ο πίνακας αυτός είναι εύκολος τόσο στην εγκατάσταση όσο και στην μετακόμισή του και έχει σχεδιαστεί για διάρκεια ζωής έως και πάνω από 20 χρόνια. Το σφάλμα σε οποιοδήποτε ηλεκτρικό ή μηχανικό εξάρτημα δεν αποσυνδέει τον υπόλοιπο πίνακα από το δίκτυο, απλά περιορίζει την διάρκεια της αποδιδόμενης ενέργειας, διασφαλίζοντας έτσι αξιοπιστία στη λειτουργία του. Επιπρόσθετα, ο πίνακας είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε η συντήρησή του να γίνεται χωρίς να είμαστε αναγκασμένοι να διακόπτουμε τη λειτουργία του. Κάθε flywheel έχει dc τάση εξόδου 750V. [24] Για επίτευξη μέγιστης πυκνότητας αποθηκευμένης ενέργειας οι σφόνδυλοι περιστρέφονται σε ταχύτητα μεγαλύτερη των 15.000rpm. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα μπλοκ – διάγραμμα συνδεσμολογίας του SEM με το δίκτυο και στο σχήμα (β) παρουσιάζεται η πραγματική μορφή του SEM.[24]



Σχήμα 2.24: Σύνδεση με τοσίκτυο[24]



Σχήμα 2.25: Μονάδα SEM [24]

Τόσο το SEM όσο και το PCM συνεισφέρουν στην ολική φαινόμενη ισχύ με διαφορετικό και ανεξάρτητο τρόπο. Το SEM παρέχει ή απορροφάει πραγματική ισχύ [W], ενώ το PCM διαχειρίζεται την άεργο ισχύ [Var]. Παρόλο που το SEM δεν επιδρά καθόλου στην άεργο ισχύ και το PCM δεν επιδρά στην πραγματική ισχύ, ο συνδυασμός

ενός SEM και PCM δίνει τη δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Να θυμίσουμε ότι για σταθεροποίηση συχνότητας απαιτείται μόνο ρύθμιση της πραγματικής ισχύς ενώ η ρύθμιση της άεργου ισχύος αφορά τη σταθεροποίηση τάσης.

2.2.3 Ανάλυση διαγράμματος SWOT

Στο τμήμα των δυνατών σημείων (strengths) καταγράφονται τα πλεονεκτήματα που καθιέρωσαν τους σφονδύλους ως μέσα αποθήκευσης σε συστήματα ΑΠΕ. Το βασικότερο όλων είναι ο μεγάλος χρόνος ζωής όλων των αποτελούμενων τμημάτων της διάταξης, το οποίο μπορεί να φτάσει 20-25 χρόνια [24]. Δεν απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη έκταση εγκατάστασης, ο χρόνος εγκατάστασης είναι μικρός και η όλη εγκατάσταση δεν χρίζει ιδιαίτερης συντήρησης ούτε σε τεχνικό ούτε σε οικονομικό επίπεδο. Προσοχή πρέπει να δίνεται στον τρόπο που αποδίδεται η αποθηκευμένη ισχύς στο δίκτυο καθώς απαιτούνται ελάχιστα δευτερόλεπτα.

Στα αδύνατα σημεία (weaknesses) αναφέρονται τα μειονεκτήματα που προβληματίζουν τη χρήση του συστήματος σφονδύλων. Αυτά είναι ο θόρυβος κατά την απόδοση ενέργειας. Επίσης το κόστος αγοράς είναι υψηλό για μικρά συστήματα. Τέλος, η έλλειψη διάθεσης αρκετά μικρών συστημάτων που τα καθιστά αδύνατα για οικιακή χρήση με ευοίωνες όμως προβλέψεις.

Στις ευκαιρίες (opportunities) κατατάσσονται τα στοιχεία εκείνα που σε ορισμένες περιπτώσεις δίνουν πλεονεκτήματα στην χρήση τους. Σε αυτά συγκαταλέγεται η δυνατότητα τους να ενσωματώσουν πάρα πολλές εφαρμογές ΑΠΕ, όπως ανεμογεννήτριες. Τέλος, σαν απειλές (threats) αναφέρονται τα στοιχεία εκείνα που εν δυνάμει μπορούν να αποτελέσουν εμπόδιο στην εφαρμογή τους. Ο κυριότερος λόγος αυτής της κατηγορίας είναι αναμφίβολα η ύπαρξη πολλών και ισχυρών υποκατάστατων τεχνολογιών. Τέτοιες είναι η αποθήκευση με υδρογόνο (κυψέλες καυσίμου, μηχανές εσωτερικής καύσης υδρογόνου), οι υπερχημικοί πυκνωτές, τα μέσα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα και η αποθήκευση σε χημική μορφή (μπαταρίες). Υπάρχουν πολλοί αντικαταστάτες που ποικίλουν ως προς τη χωρητικότητα και το κόστος απόκτησης. Παρακάτω παρουσιάζεται και το διάγραμμα SWOT:

ΑΝΑΛΥΣΗ SWOT- ΣΦΟΝΔΥΛΟΙ

<u>STRENGTHS</u>	<u>WEAKNESSES</u>
<ul style="list-style-type: none">• Μεγάλη διάρκεια ζωής εξαρτημάτων• Γρήγορη εγκατάσταση• Εύκολη και οικονομική συντήρηση• Αποδεδειγμένη απόδοση• Άμεση απόδοση ισχύος στο δίκτυο• Ποιότητα ισχύος• Εφαρμογές έως και εκατοντάδες MW• Αντοχές σε θερμοκρασιακές αλλαγές• Μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα	<ul style="list-style-type: none">• Υψηλό κόστος για μικρά συστήματα• Θόρυβος κατά τη λειτουργία• Έλλειψη διαθεσιμότητας/πρόβλεψης για οικιακά συστήματα• Κίνδυνος ατυχήματος
<u>OPPORTUNITIES</u>	<u>THREATS</u>
<ul style="list-style-type: none">• Στροφή στις ΑΠΕ• Υποστήριξη αιολικών/φωτοβολταϊκών πάρκων	<ul style="list-style-type: none">• Έρευνα για υποκατάστατα• Φόβος κοινής γνώμης για ατυχήματα

Πίνακας 2.5: Παρουσίαση SWOT σφονδύλων

3. Χαρακτηριστικές ιδιότητες κάθε τεχνολογίας

3.1 Αποθηκευτική ικανότητα- χωρητικότητα

Είναι η ποσότητα που εκφράζει τη διαθέσιμη ενέργεια στο σύστημα μετά τη φόρτιση. Η αποφόρτιση είναι συχνά ατελής για αυτό και ορίζεται με βάση της συνολικής αποθηκευόμενης ενέργειας, που τη συμβολίζουμε W_{st} (υπολογίζεται σε Wh), η οποία είναι μεγαλύτερη από εκείνη που θα ανακτηθεί, την W_{ut} . Η ωφέλιμη ενέργεια περιορίζεται από το χρόνο αποφόρτισης. Σε περιπτώσεις γρήγορης φόρτισης και αποφόρτισης η αποδοτικότητα επιδεινώνεται και η ενέργεια που ανακτάται μπορεί και είναι μικρότερη και από τη χωρητικότητα αποθήκευσης. Με λίγα λόγια, λοιπόν η αποθηκευτική ικανότητα αντιπροσωπεύει τη διαθέσιμη ενέργεια στη συσκευή μετά τη διάρκεια της φόρτισης.

Συγκεκριμένα όσον αφορά τις μπαταρίες η χωρητικότητα είναι ένα μέγεθος που εκφράζει το μέτρο της ποσότητας του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να προσφερθεί από ένα συσσωρευτή, όταν αυτός εκφορτισθεί από κατάσταση πλήρους φορτίσεως στην ελάχιστη επιτρεπτή τάση. Η τάση δεν παραμένει πάντα σταθερή, αλλά εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης και τη θερμοκρασία του ηλεκτρολύτη.

Όσον αφορά τους σφονδύλους η χωρητικότητα συνδέεται με την ταχύτητα περιστροφής τους και τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένοι. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερο είναι το όριο ελαστικότητας και μικρότερη ενέργεια έχουν τα υλικά κατασκευής, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια αποθηκεύεται.

3.2 Διαθέσιμη ισχύς

Εκφράζει τη μέγιστη ισχύ P_{max} φόρτισης ή αποφόρτισης. Αυτή η παράμετρος καθορίζει το μέγεθος του στροβίλου- γεννήτριας κατά τη μετατροπή ενέργειας. Η παράμετρος αυτή είναι ενδεικτική του μεγέθους και της δομής του ηλεκτροκινητήρα αποθήκευσης της ενέργειας.

Όσον αφορά τους σφονδύλους, αυτή η παράμετρος καθορίζεται από το μέγεθος της ηλεκτρικής μηχανής. Για τις μπαταρίες NaS αυτό το μέγεθος εκφράζει την ισχύ που αποδίδεται κατά την φόρτιση/αποφόρτιση.

3.3 Βάθος αποφόρτισης ή ρυθμός μεταφοράς ισχύος

Η αποθήκευση ενέργειας είναι μία αργή διαδικασία η οποία πρέπει να απελευθερώσει γρήγορα την απαιτούμενη ενέργεια. Η ισχύς εξόδου μπορεί να είναι περιοριστικός παράγοντας που ονομάζεται ρυθμός μετάδοσης ισχύος. Αυτός ο ρυθμός μεταφοράς ισχύος καθορίζει το χρόνο που χρειάζεται για να εξαχθεί η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί. Η ισχύς πρέπει να είναι διαθέσιμη τις ώρες αιχμής, δηλαδή η ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιείται εάν είναι σημαντική, είναι αντιπροσωπευτική ενός μην βέλτιστου σχεδιασμού συστήματος ή ένα θεμελιώδες όριο της συσκευής αποθήκευσης. Για τους σφονδύλους, αυτό το μέγεθος εκφράζεται με το ρυθμό επιβράνδυσής του και για τους συσσωρευτές NaS εκφράζεται με τη διαδικασία της αποφόρτισης, η οποία έχει περιγραφεί και στα παραπάνω κεφάλαια και σχετίζεται άμεσα και με την ανθεκτικότητα της μπαταρίας, στην οποία θα αναφερθούμε και παρακάτω.

3.4 Χρόνος αποφόρτισης

Ο χρόνος αποφόρτισης είναι η μέγιστη διάρκεια αποφόρτισης και εξαρτάται από το βάθος της εκφόρτισης και τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, τη σταθερή ή όχι ισχύ. Ο χρόνος αποφόρτισης, γενικά, εκφράζεται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{W_{st}}{P_{\max}}, \quad (3.1)$$

όπου τ είναι ο χρόνος αποφόρτισης υπολογισμένος σε second (s).

Ο χρόνος αποφόρτισης για τους σφονδύλους κυμαίνεται από λίγα δευτερόλεπτα έως και λίγα λεπτά, ενώ για τις μπαταρίες NaS από λίγα δευτερόλεπτα έως και ώρες, όπως παρουσιάζεται και στο παρακάτω πίνακα.

3.5 Αποδοτικότητα

3.5.1 Αποδοτικότητα αποφόρτισης

Είναι ο λόγος της ενέργειας που ανακτάται και της ενέργειας που αποθηκεύεται. Ονομάζεται βαθμός απόδοσης και συμβολίζεται με η και ισούται με:

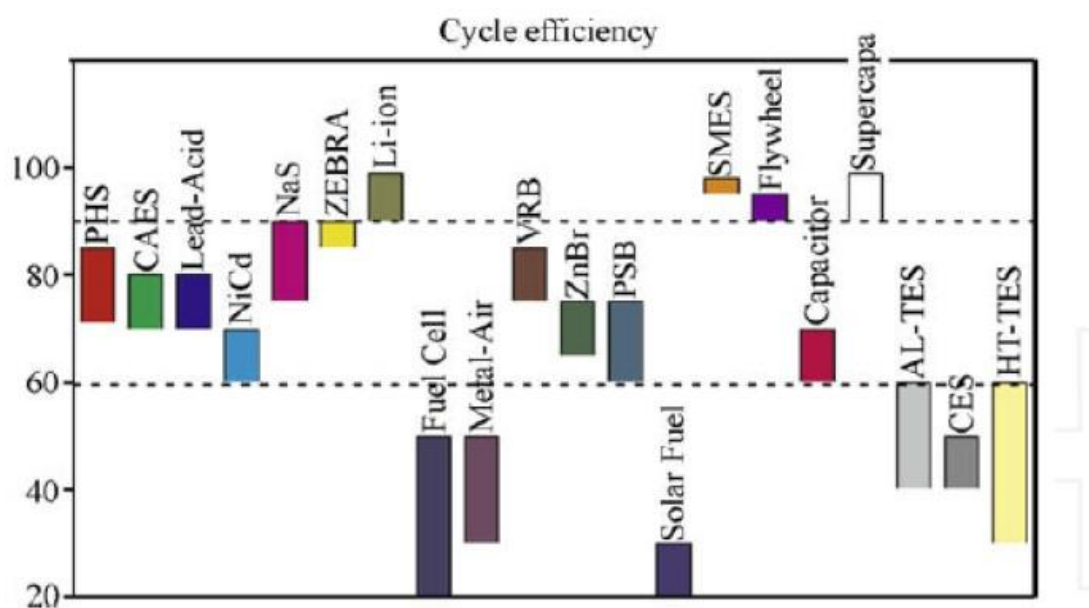
$$\eta = \frac{W_{ut}}{W_{st}} \quad (3.2)$$

Η παραπάνω σχέση είναι υπεραπλουστευμένη, καθώς προκύπτει βάσει ενός μόνο σημείου λειτουργίας της διάταξης. Επιπλέον τα συστήματα έχουν απώλειες φόρτισης, ελλείψεις φορτίου και αποφόρτισης. Γι' αυτό το λόγο ο ορισμός της αποδοτικότητας πρέπει να βασίζεται σε ένα ή και περισσότερους κύκλους λειτουργίας. Ακόμη η αποδοτικότητα ποικίλλει ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης. Η στιγμιαία ισχύς είναι καθοριστικός παράγοντας για την αποδοτικότητα του συστήματος. Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για να είναι ανταγωνιστικό πρέπει να έχει καλή συνολική απόδοση. Αυτό σημαίνει ότι ένα σύστημα ενέργειας πρέπει να έχει περιορισμένες απώλειες κατά τη μετατροπή ενέργειας για τη βέλτιστη λειτουργία του. Για τα συστήματα αυτά ο υπολογισμός αυτού του μεγέθους είναι αρκετά περίπλοκος καθώς εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως το σημείο λειτουργίας και οι συνθήκες της φόρτισης.

3.5.2 Αποδοτικότητα κύκλου

Αυτή η παράμετρος αφορά την αποδοτικότητα ενός συστήματος σε ένα κύκλο φόρτισης εκφόρτισης χωρίς να περιλαμβάνονται οι απώλειες αυτό-αποφόρτισης. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- 1) Πολύ υψηλής αποδοτικότητας: Τα συστήματα με πολύ υψηλή αποδοτικότητα κύκλου είναι οι μαγνητικοί υπεραγωγοί (SMES), υπέρ-πυκνωτές, οι σφόνδυλοι και μπαταρίες ιόντος λιθίου. Η απόδοση των σφονδύλων για μικρούς λόγους εκφόρτισης μειώνεται λόγο κυρίως ότι είναι συνάρτηση της απόδοσης των ηλεκτρονικών ισχύος. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός αυτό-εκφόρτισης τόσο μειώνεται και η απόδοση των σφονδύλων όταν οι εναλλαγές φόρτισης/εκφόρτισης δεν είναι συνεχείς.
- 2) Υψηλής αποδοτικότητας: Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν αντλησιοταμίευσης, συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES), μπαταρίες (πλην μπαταρίες ιόντος- λιθίου) και πυκνωτές.
- 3) Χαμηλής αποδοτικότητας: Σε αυτήν την περίπτωση συναντάμε τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μέσω υδρογόνου, κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες αέρα-μετάλλου, συστήματα ηλιακού καυσίμου, αποθήκευση θερμικής ενέργειας και κρυογονική αποθήκευση ενέργειας.



Εικόνα 3.1: Απόδοση κύκλου συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [31]

3.6 Κύκλοι ζωής-ανθεκτικότητα

Είναι ο χρόνος κατά τον οποίο μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας απελευθερώνει ενέργεια από τη στιγμή που σχεδιάστηκε. Εκφράζεται ως το μέγιστο αριθμό κύκλων N, καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μία φόρτιση και αποφόρτιση. Όλα τα συστήματα υπόκεινται σε κόπωση ή φθορά λόγω της χρήσης τους. Η αντοχή της μονάδας πρέπει να είναι πρωταρχικής σημασίας στην επιλογή μας. Όμως, πολλές φορές ο έλεγχος αντοχής είναι πολύ δύσκολος και όχι καλά ορισμένος.

Για τους συσσωρευτές NaS, όπως και σε όλες τις ηλεκτροχημικές μπαταρίες, οι λιγότερες αποφορτίσεις παρατείνουν τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Πιο συγκεκριμένα, στο 100% της αποφόρτισης, έχουν διάρκεια ζωής 2500 κύκλων, στο 90% έχουν διάρκεια ζωής 4500, ενώ στο 65% έχει διάρκεια 6500 [32]. Για τους σφονδύλους η ανθεκτικότητα εξαρτάται από την αντοχή των υλικών.

3.7 Αυτονομία

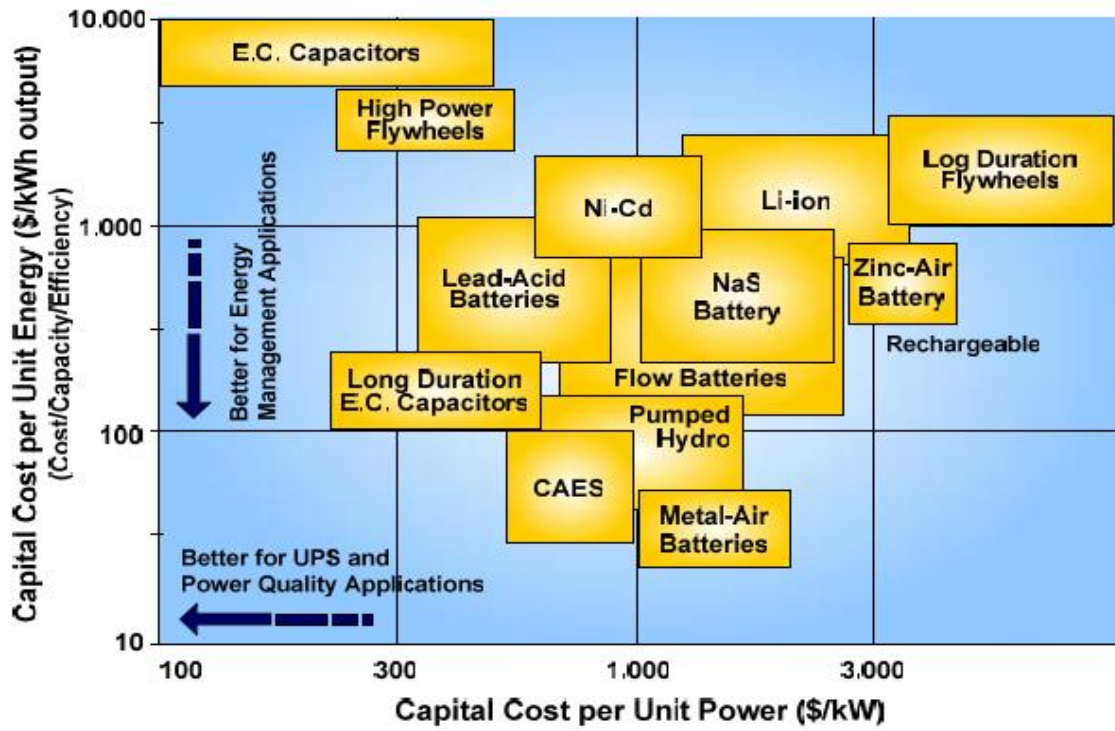
Αυτός ο όρος αφορά το μέγιστο χρόνο κατά τον οποίο το σύστημα απελευθερώνει ενέργεια. Ορίζεται από το λόγο αποθηκευμένης ενέργειας και της μέγιστης ισχύος αποφόρτισης και συμβολίζεται με α .

$$\alpha = \frac{W_{st}}{P_d} \quad (3.3)$$

Η αυτονομία του συστήματος εξαρτάται από τον τύπο αποθήκευσης και τον τύπο της εφαρμογής.

3.8 Κόστος

Σημαντικοί παράμετροι στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι το κεφάλαιο που έχει επενδυθεί και το λειτουργικό κόστος (συντήρηση, ενέργεια που χάνεται κατά τη διάρκεια ζωής, φθορά). Είναι τόσο σημαντικοί που εξετάζονται για όλη τη διάρκεια ζωής των διατάξεων. Τα συστήματα με χαμηλή απόδοση και χαμηλή διάρκεια απαιτούν και μικρότερη επένδυση. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να πραγματοποιείται μία ανάλυση της εκτιμώμενης διάρκειας όλου του συστήματος, συμπεριλαμβανομένου και της μονάδας αποθήκευσης. Επίσης τα συνολικά κόστη ολόκληρης της ζωής του συστήματος, όπως είναι τα υλικά, η ενέργεια και άλλα περιβαλλοντικά κόστη πρέπει να ληφθούν υπόψη. Το κόστος κεφαλαίου αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες για τη βιομηχανική ανάπτυξη των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Εκφράζεται ως κόστος /kW ή κόστος/kWh ή κόστος/(kWh)(κύκλο). Το κόστος ανά μονάδα ενέργειας διαιρείται με την αποδοτικότητα του κύκλου της εκάστοτε τεχνολογίας, έτσι ώστε να προκύψει το κόστος ανά μονάδα χρήσιμης ενέργειας. Το κόστος κύκλου ορίζεται ως το κόστος ανά μονάδα ενέργειας προς τους κύκλους ζωής και αποτελείται από τους καλύτερους τρόπους αξιολόγησης του κόστους της αποθήκευσης ενέργειας, σε μία εφαρμογή με συχνή φόρτιση αποφόρτιση, όπως αυτή της αντιστάθμισης φορτίου. Επίσης, υπάρχει το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, που αφορά για παράδειγμα αφαίρεση και αντικατάσταση κάποιου τμήματος της εγκατάστασης και άλλα έξοδα της ιδιοκτήτριας εταιρείας.



Εικόνα 3.2: Κόστος επένδυσης ανά μονάδα ενέργειας και ισχύος κάθε τεχνολογίας[33]

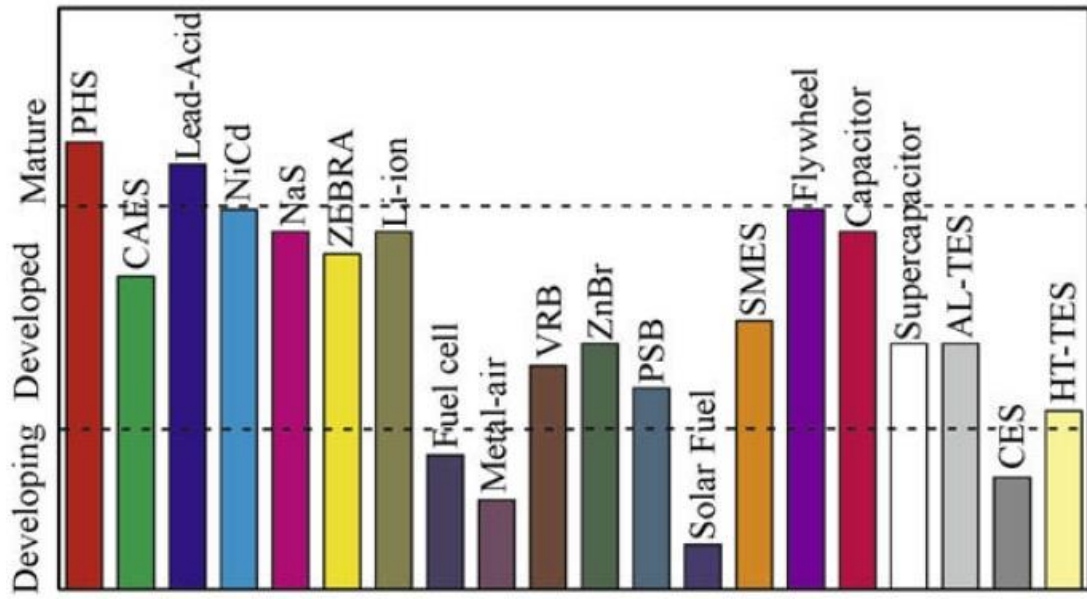
3.9 Τεχνική ωριμότητα

Η τεχνική ωριμότητα των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται ως εξής:

1) Ωριμες τεχνολογίες: Η αντλησιοταμίευση και η τεχνολογία μπαταριών μολύβδου-οξέως είναι ώριμες και χρησιμοποιούνται για πάνω από 100 χρόνια.

2) Αναπτυγμένες τεχνολογίες: Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου, νατρίου-θείου, Zebra λιθίου ιόντος, οι μπαταρίες ροής, οι μαγνητικοί υπεραγώγοι, οι σφόνδυλοι, οι πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές, συστήματα θερμικής αποθήκευσης ενέργειας υψηλής θερμοκρασίας και υδροφόρα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας χαμηλής θερμοκρασίας. Όλες αυτές οι τεχνολογίες είναι τεχνικά ανεπτυγμένες και εμπορικά διαθέσιμες. Παρόλα αυτά στην πράξη, αυτές οι εφαρμογές ειδικά για αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας δεν είναι ακόμα διαδεδομένες. Η ανταγωνιστικότητα και η αξιοπιστία τους, χρειάζονται περισσότερες δοκιμές από τη βιομηχανία ηλεκτρισμού και την αγορά.

3) Αναπτυσσόμενες τεχνολογίες: Εδώ, ανήκουν οι κυψέλες καυσίμου, οι συσσωρευτές αέρα-μετάλλου, το ηλιακό καύσιμο και η κρυογονική αποθήκευση ενέργειας. Πρόκειται για τεχνολογίες που βρίσκονται υπό ανάπτυξη, είναι τεχνικά ανώριμες, οι οποίες όμως μπορούν να εφαρμοσθούν και έχουν ερευνηθεί από πολλά ιδρύματα. Από την άλλη πλευρά αυτές οι τεχνολογίες είναι πολλά υποσχόμενες βιομηχανικά στο άμεσο μέλλον. Τα ενεργειακά κόστη και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες είναι κύριοι λόγοι στροφής προς αυτές τις τεχνολογίες.



Εικόνα 3.2: Ωριμότητα τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας.[34]

3.10 Επίδραση στο περιβάλλον

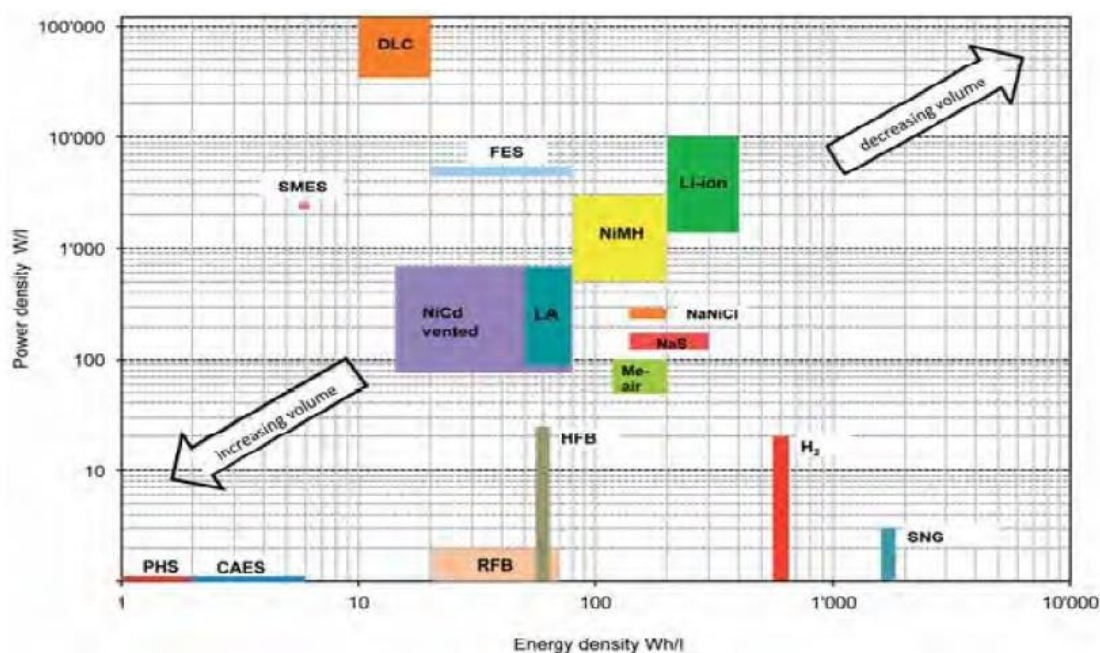
Οι επιδράσεις των τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον συγκρίνονται στο παρακάτω σχήμα.

Παρατηρείται ότι το ηλιακό καύσιμο και η κρυογονική αποθήκευση ενέργειας έχουν θετική επίδραση στο περιβάλλον. Η αποθήκευση ενέργειας με ηλιακό καύσιμο χρησιμοποιεί μόνο ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, την ηλιακή για να παραχθεί ενέργεια και την αποθήκευση σε «πράσινη» μορφή καυσίμου, όπως γίνεται με το υδρογόνο. Η χρήση ηλιακού καυσίμου μπορεί να μειώσει την καύση ορυκτών καυσίμων και ως εκ τούτου είναι φιλική προς το περιβάλλον. Το κρυογονικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να μειώσει τους ρύπους στον αέρα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της υγροποίησης (φόρτιση), το οποίο βοηθάει να μετριαστούν τα αρνητικά περιβαλλοντικά ζητήματα, τα οποία συσχετίζονται με την καύση ορυκτών καυσίμων. Ανεπιθύμητα αερομεταφερόμενα σωματίδια μπορούν να αφαιρεθούν κατά τη διάρκεια παραγωγής υγρού αέρα. Η αντλησιοταμίευση, τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, οι μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής, οι κυψέλες καυσίμου και η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον για διαφορετικούς λόγους το καθένα. Η κατασκευή των συστημάτων αντλησιοταμίευσης αναπόφευκτα περιλαμβάνει κοπή δέντρων και καταστροφή πράσινων εκτάσεων για τη δημιουργία ταμιευτήρων. Η κατασκευή δεξαμεμών είναι πιθανό να αλλάξει το τοπικό οικοσύστημα, κάτι το οποίο έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα βασίζονται σε συμβατική τεχνολογία στροβίλων καυσίμων και περιλαμβάνει καύση ορυκτού καυσίμου, ως εκ τούτου οι εκπομπές αποτελούν λόγο περιβαλλοντικής ανησυχίας. Οι μπαταρίες παράγουν τοξικά απόβλητα τα οποία παραμένουν και επηρεάζουν το περιβάλλον σε βάθος χρόνου. Το ίδιο συμβαίνει με τις μπαταρίες ροής και τις μεγάλες με τις μπαταρίες ροής και τις κυψέλες καυσίμου. Όσον αφορά στην τεχνολογία υπεραγώγιμων πυκνωτών αποθήκευσης ενέργειας, το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό θέμα είναι τα ισχυρά μαγνητικά πεδία, τα οποία μπορεί να είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία. Οι υπόλοιπες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας έχουν σχετικά μικρή επίδραση στο περιβάλλον καθώς δεν περιλαμβάνουν καύση ορυκτών καυσίμων, καταστροφή πράσινων εκτάσεων και τοξικά απόβλητα.

Οι μπαταρίες NaS, συγκεκριμένα είναι φιλικές ως προς το περιβάλλον, καθώς αποτελούνται κατά 99% από ανακυκλώσιμα υλικά και λόγω του κελύφους τους δεν επιτρέπουν καμία εκπομπή τοξικών ουσιών προς το περιβάλλον κατά τη λειτουργία τους. Πρέπει να δίνεται προσοχή όμως στη διαβρωτικότητα του πολυσουλφιδίου του νατρίου, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Οι σφόνδυλοι είναι φιλικό ως προς το περιβάλλον.

3.11 Πυκνότητα ισχύος και ενεργειακή πυκνότητα

Η πυκνότητα ισχύος είναι η ονομαστική ισχύς εξόδου διαιρεμένη με τον αποθηκευτικό όγκο της μονάδας. Η ενεργειακή πυκνότητα υπολογίζεται ως το πηλίκο της αποθηκευμένης ενέργειας προς τον αποθηκευτικό όγκο της μονάδας και υπολογίζεται σε W/kg ή σε W/Lt. Ο όγκος της αποθηκευτικής μονάδας είναι ο όγκος όλου του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συμπεριλαμβανομένου του στοιχείου αποθήκευσης ενέργειας, τα διάφορα εξαρτήματα και τις βοηθητικές δομές καθώς και το σύστημα μετατροπής.



Εικόνα 3.3: Σύσχετιση ενεργειακής πυκνότητας και πυκνότητας ισχύος [35]

3.12 Ειδική ενέργεια

Ως ειδική ενέργεια ορίζεται ο λόγος της αποθηκευμένης ενέργειας με τη μάζα του αποθηκευτικού μέσου και υπολογίζεται σε Wh/kg. Οι ατσάλινοι σφόνδυλοι έχουν ειδική ενέργεια περίπου 5Wh/kg, ενώ οι υψηλής ταχύτητας σφόνδυλοι από ελαφρύτερα υλικά πετυχαίνουν ειδική ενέργεια μέχρι και 100Wh/kg. Η ειδική ισχύς είναι συνάρτηση κυρίως του κέντρου βάρους του σφονδύλου, της ηλεκτρικής μηχανής και των ηλεκτρονικών ισχύος. Έχουν επιτευχθεί τιμές έως 1600 W/kg. Όταν λαμβάνουμε υπόψη το ολικό βάρος του συστήματος (μαζί με τα ηλεκτρονικά ισχύος, το σύστημα κενού, το δοχείο αποθήκευσης του στροφάλου, κτλ) τόσο η ειδική ενέργεια και η ισχύς μειώνονται κατά ένα παράγοντα 10.

3.13 Χρόνος απόκρισης

Αυτή η παράμετρος αφορά το πόσο γρήγορα ή όχι ανταποκρίνεται η διάταξη αποθήκευσης ενέργειας από τη στιγμή της ζήτησης ενέργειας και της απόδοσης της σε αυτό. Πρόκειται, δηλαδή για το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε ζήτηση και απόδοση.

Τα παραπάνω κριτήρια συγκεντρώνονται για τις τεχνολογίες που έχουμε μελετήσει στους παρακάτω πίνακες:

	Flywheels	NaS batteries	
Διάρκεια αποθήκευσης	Δευτερόλεπτα-λεπτά	Δευτερόλεπτα-ώρες	
Χρόνος αποφόρτισης σε ονομαστική ισχύ	Έως 8 δευτερόλεπτα [8] 15 sec- 15min [8]	Seconds-hours [8] ~1h [8]	
Αυτό-αποφόρτιση/μέρα	~20%/ώρα [8,26] 100% [8,26]	20%/μέρα [8,26]	
Χρόνος Ζωής (χρόνια)	~15 [8,26] 15+ [8,27] 20 [8]	10-15 [8,26] 15, 12-20 [8] 14-16 [27]	
Κύκλοι ζωής	20000+ 21000+	2500 [8,26] 3000[8]	
Χρόνος απόκρισης	Miliseconds [1,8,27] <1κύκλο [8] Δευτερόλεπτα [8]	Μηδενικός [8] 1 milisecond [8]	
Κόστος	Ενεργειακό κεφαλικό κόστος (\$/kWh)	1000-5000 [8] 1000-14000 [8]	300-500 [8] 350 [8] 450 [8]
	Κεφαλικό κόστος ισχύος (\$/kW)	250-350 [8]	350-3000 [8] 1000-3000 [8]
	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας	~0,004\$/kWh [8]	80\$/kW/year [8]

	Flywheels	NaS
Ονομαστική Ισχύς	0-250kW [23], <0,25 MW [8,23] 3.6MW [8,23] 0.1-20MW [8,24] 25 MW για 5 min ή 5 MW για 30 min [1]	50kW-8MW [23] <34MW [8], [25]
Χωρητικότητα(MWh)	0.0052 [8], 0.75 [8], <5 [8]	0.4-244.8[8]
Ενεργειακή Πυκνότητα(wh/lit)	20-80 [8]	150-250 [8] 150-300 [8]
Πυκνότητα Ισχύος (W/lit)	1000-2000 [8] ~5000 [8] 1000–, 2000 [23]	140-180 [8]
Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)	10-30 [8,23],5-100,5-80 [8]	150-240 [8,23] 100 [8] 174 [9]
Ειδική Ισχύς (W/kg)	400-1500 [8]	150-230 90-230 115
Απόδοση αποφόρτισης (%)	90-93 [8]	85 [8], 90 [1]
Απόδοση κύκλου(%)	90-95, 90&95 [8], 85+ [27]	75-90, 75, 85 [8] 80-90 [26]
Ωριμότητα	Νεοεισαχθέν	Διαθέσιμο στην αγορά
Επίδραση στο περιβάλλον	Αμελητέα	Χρειάζεται προσοχή στο τέλος της ζωής της μπαταρίας. Σωστή απόρριψη ή ανακύκλωση

Πίνακας 3.1: Παρουσίαση χαρακτηριστικών κάθε τεχνολογίας

4. Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών για μέση ισχύ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε και θα συγκρίνουμε τις τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών νατρίου-θείου και της διάταξης των σφονδύλων. Θα συγκρίνουμε τις διατάξεις ως προς την αποδοτικότητα τους μέσω των απωλειών που παρουσιάζουν.

Προκειμένου να αξιολογηθεί μία τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας η μελέτη της αποδοτικότητας σε ένα πλήρη κύκλο, από την είσοδο της ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι και την έξοδο αυτής είναι απολύτως αναγκαία. Οποιοσδήποτε τύπος αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μία απλή μπαταρία, με τη μόνη διαφορά να έγκειται στον τύπο της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση. Στην προσπάθεια να επιτευχθεί όσο το δυνατόν υψηλότερη απόδοση, είναι αναγκαίο οι απώλειες να περιορίζονται. Στο μοντέλο της μπαταρίας λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες, η απόδοση της μπαταρίας ορίζεται ως εξής:

$$\eta_{SC} = \eta_{ch} \cdot \eta_{stor} \cdot \eta_{disch} \quad (4.1)$$

με η_{sc} : η αποδοτικότητα κύκλου,

η_{ch} : η αποδοτικότητα φόρτισης,

η_{stor} : βαθμός απόδοσης αποθήκευσης,

η_{disch} : βαθμός απόδοσης της αποφόρτισης

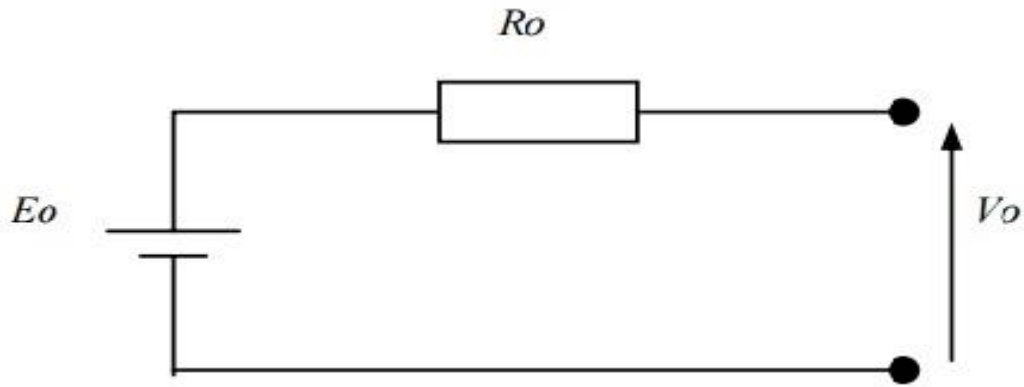
Κατά αυτόν τον τρόπο η απόδοση της μπαταρίας προκύπτει από τις απώλειες σε καθένα από τα τρία παραπάνω στάδια.

4.1 Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο

4.1.1 Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο στις μπαταρίες NaS

Σε αυτό το σημείο της μελέτης θα αξιολογήσουμε την απόδοση κύκλου των μπαταριών νατρίου-θείου. Γενικότερα, η συνολική απόδοση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα βοηθητικά φορτία, τα οποία συνήθως στις περισσότερες μελέτες αμελούνται. Σε ένα κύκλο της διάταξης των μπαταριών NaS παρουσιάζεται το στάδιο της φόρτισης και της αποφόρτισης. Όπως έχουμε αναφέρει και στα προηγούμενα κεφάλαια κατά την αποφόρτιση τα ιόντα νατρίου διέρχονται από τον ηλεκτρολύτη β-alumina όπου αντιδρούν στα θετικά ηλεκτρόδια με το θείο και σχηματίζονται τα πολυσουλφίδια του νατρίου. Κατά τη φόρτιση λαμβάνει χώρα η αντίστροφη αντίδραση. Τα πολυσουλφίδια του νατρίου αποσυντίθενται και τα ιόντα νατρίου μετατρέπονται σε νάτριο στο θετικό ηλεκτρόδιο.

Το πιο συνηθισμένο ηλεκτρικό μοντέλο μπαταρίας NaS είναι αυτό που παρουσιάζει το κελί σαν μία πηγή τάσης E_o με εσωτερική αντίσταση R_o και τα δύο εξαρτώμενα από το βάθος αποφόρτισης (Depth of Discharge- DOD), θερμοκρασία κελιού (T), αριθμός κύκλων αποφόρτισης (N_{cycles}). Η E_o κυρίως εξαρτάται από το DOD, ενώ η εξάρτηση από τη θερμοκρασία T μπορεί να αμεληθεί. Θεωρείται σταθερή όταν το DOD κυμαίνεται στο εύρος 0%-60%, [36] ενώ μειώνεται γραμμικά αν υπερβεί το 60%. Η εσωτερική αντίσταση R_o εξαρτάται τόσο από το DOD όσο και από τη θερμοκρασία T . Η μπαταρία παρουσιάζει απώλειες λόγω της εσωτερικής αντίστασης και της λανθάνουσας θερμότητας κατά τη φόρτιση (ενδόθερμη αντίδραση) και την αποφόρτιση (εξώθερμη αντίδραση), λόγω των θερμικών απωλειών στο περιβάλλον και τελικά των ωφέλιμων θερμικών απωλειών.



Σχήμα 27: Απλοποιημένο ηλεκτρικό μοντέλο της κυψέλης της μπαταρίας NaS [35]

Δύο απλοποιημένοι τύποι, οι οποίοι μπορούν να αποδώσουν την αποτελεσματικότητα και τις βοηθητικές απώλειες ενός συστήματος μπαταριών NaS ως λειτουργίες του ποσοστού χρησιμοποίησής τους. Οι τύποι δεν απαιτούν τη θερμική και ηλεκτρική παράμετρο των μπαταριών NaS.

Η αποδοτικότητα ισούται με:

$$\eta = \frac{E_{out,AC}}{E_{in,AC} + E_{losses}} \quad (4.2)$$

Με $E_{out,AC}$: η ενέργεια που αποδίδεται από το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών NaS

E_{in} : Η απορροφώμενη ενέργεια από το σύστημα μπαταριών και

E_{losses} : Το σύνολο των ωφέλιμων καταναλώσεων και των εσωτερικών απωλειών της μπαταρίας

Θεωρώντας ένα κύκλο φόρτισης/αποφόρτισης ανά ημέρα και σαν E_n την ονομαστική ενέργεια μπορούμε να γράψουμε:

$$E_{out,AC} = \alpha \cdot E_n \cdot \eta_{PCS} \quad (4.3)$$

$$E_{in,AC} = \frac{\alpha \cdot E_n}{\eta_{pcs}} \quad (4.4)$$

Όπου α : Ο ρυθμός χρήσης

η_{pcs} : Βαθμός απόδοσης συστήματος αποκατάστασης ισχύος

Η θερμική ενέργεια απαιτείται για να ορίσει τη θερμοκρασία λειτουργίας στις θερμοκρασίες (300-350°C) της μπαταρίας NaS. Τροφοδοτείται τόσο από τα θερμαντικά σώματα όσο και από τις απώλειες της εσωτερικής αντίστασης. Η συμβολή των θερμαντήρων και των απωλειών εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας, ούτως ή άλλως οι E_{losses} μπορούν να θεωρηθούν κατά προσέγγιση σταθερές και υπολογίζονται με αν υποτεθεί ένας κύκλος φόρτισης/αποφόρτισης η μία μέρα με τον παρακάτω τύπο:

$$E_{losses} = P_{SB} \cdot 24 \quad (4.5)$$

Όπου P_{SB} : οι απώλειες θερμότητας

Η τιμή των απωλειών P_{SB} , αν θεωρήσουμε ένα μοντέλο μπαταρίας 50kW κυμαίνεται από 2,3kW έως 3,4kW και μετατρέποντας αυτή την τιμή σε ποσοστό προκύπτει ότι η απώλεια αυτή κυμαίνεται από 4,6% έως 6,8%. [36]

Στις απώλειες εντάσσονται οι ηλεκτρικές απώλειες και οι χημικές απώλειες.

Από τις παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση:

$$\eta = \frac{\alpha \cdot \eta_{pcs}}{\frac{\alpha}{\eta_{pcs}} + \frac{P_{SB} \cdot 24}{E_n}} = \frac{\alpha \cdot \eta_{pcs}}{\frac{\alpha}{\eta_{pcs}} + e_{SB,pu}} \quad (4.6)$$

Το μέγεθος $24 \cdot \frac{P_{SB}}{E_n}$ αντιπροσωπεύει τις απώλειες θερμότητας ανά μονάδα μάζας της ενέργειας της μπαταρίας.

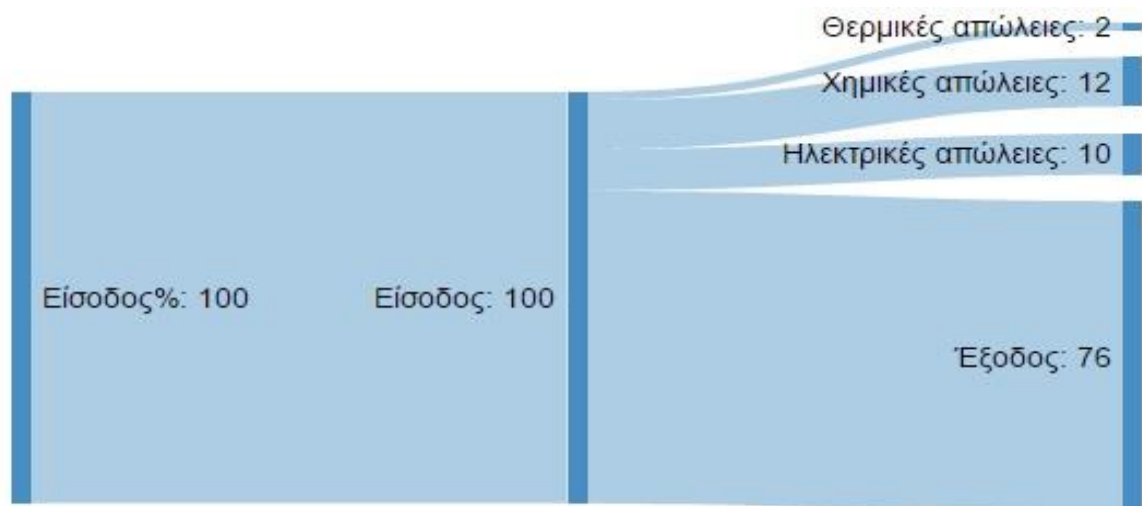
Το μέγεθος $e_{SB,pu}$ είναι ίσο με τις απώλειες θερμότητας ανά μονάδα ονομαστικής ενέργειας. Η παραπάνω σχέση είναι μία καλή προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων, επιβεβαιώνοντας τις παραδοχές για την τιμή του $e_{SB,pu}$ η οποία κυμαίνεται από 0,153 έως 0,227. [36] Οι ωφέλιμες θερμικές καταναλώσεις P_H των μπαταριών NaS μπορούν να αξιολογηθούν με μία πρώτη προσέγγιση:

$$P_A = P_{SB} \cdot N_{\text{mod}} \cdot (1 - 0.8 \cdot \alpha) \quad (4.7)$$

Όπου N_{mod} είναι ο αριθμός των βαθμίδων των συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών ενέργειας μπαταριών NaS. Η κύρια απλοποιημένη παραδοχή της σχέσης είναι ότι η θερμότητα που απαιτείται για να καθορισθεί η θερμοκρασία λειτουργίας ορίζεται από τους θερμοαντήρες όταν η μπαταρία δεν είναι σε λειτουργία (για παράδειγμα $\alpha=0$), ενώ όταν το $\alpha=1$ που συμβαίνει όταν έχω φτάσει το 80% των εσωτερικών απωλειών της μπαταρίας.

Οι απώλειες λόγω θερμότητας είναι περίπου 2%, η χημική απόδοση 12%, και ηλεκτρικές απώλειες εκτιμώνται 10%. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα Sankey. [38]

Στο παρακάτω διάγραμμα Sankey παρουσιάζεται η απόδοση ενός κύκλου (φόρτιση-αποφόρτιση) μπαταριών NaS.



Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα Sankey μπαταριών νατρίου-θείου

4.1.2 Ενεργειακή απόδοση ανά κύκλο στη διάταξη των σφονδύλων

Η απόδοση της διάταξης των σφονδύλων είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό του συστήματος αποθήκευσης. Οι απώλειες αντιπροσωπεύουν την υποβάθμιση της ενέργειας που αποδίδεται στο σύστημα. Αυτό είναι κάτι που μετριέται σε κόστος για τη διάταξη και γι' αυτό και αποτελεί αντικείμενο μελέτης. Σε κάθε σύστημα σφονδύλων, ο σφόνδυλος πρέπει να περιστρέφεται συνεχώς για να υπερκαλύψει τις μηχανικές απώλειες, που περιλαμβάνουν τις απώλειες διακένου και τις απώλειες των εδράνων. Επιπροσθέτως η κινητική ενέργεια πρέπει να μετατρέπεται σε ηλεκτρική συνεχώς με τη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος, τα οποία προκαλούν με τη σειρά τους απώλειες ολίσθησης και απώλειες μετατροπής.

Πιο συγκεκριμένα, οι συνολικές απώλειες ισχύος στους σφονδύλους περιλαμβάνουν τις απώλειες τυλίγματος του στάτη, τις απώλειες του στάτη, τις απώλειες του μόνιμου μαγνήτη, τις περιστροφικές απώλειες και τις απώλειες δινορρευμάτων. Οπότε οι συνολικές απώλειες είναι:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{rot} + \Delta P_{1W} + \Delta P_{1Fe} + \Delta P_{2Fe} + \Delta P_{PM} + \Delta P_e \quad (4.8)$$

Με: ΔP_{total} : οι συνολικές απώλειες

ΔP_{rot} : οι περιστροφικές απώλειες

ΔP_{1W} : οι απώλειες τυλίγματος στάτη

ΔP_{1Fe} : οι απώλειες πυρήνα στάτη

ΔP_{2Fe} : οι απώλειες πυρήνα ρότορα

ΔP_{PM} : οι απώλειες μόνιμου μαγνήτη

ΔP_e : οι απώλειες δινορρευμάτων

Απώλειες τυλίγματος στάτη

Για συνεχές ρεύμα η αντίσταση του στάτη μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R_{1DC} = \frac{N_1 \cdot l_{1av}}{\alpha_p \cdot \alpha_w \cdot \sigma \cdot s_\alpha} \quad (4.9)$$

Με N_1 : αριθμός στροφών ανά φάση

I_{1av} : κατά μέσο όρο μήκος ανά στροφή

α_w : αριθμός παράλληλων αγωγών

σ : ηλεκτρική αγωγιμότητα

s_α : διατομή αγωγού

Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι:

$$\Delta P_{1W} = m_1 \cdot I_\alpha^2 \cdot R_{1DC} \quad (4.10)$$

Όσο πιο υψηλές είναι οι απώλειες του χαλκού τόσο πιο χαμηλή απόδοση θα έχουμε συνολικά και τόσο πιο υψηλή θερμοκρασία θα αποκτήσει το πηνίο.

Για να μειωθούν οι απώλειες χαλκού, πρέπει να μειωθεί είτε το ρεύμα είτε η αντίσταση.

$$\text{Από τον τύπο } R_{1DC} = \frac{N_1 \cdot I_{1av}}{\alpha_p \cdot \alpha_w \cdot \sigma \cdot s_\alpha} \quad (4.11)$$

η αντίσταση μπορεί να μειωθεί με πολλούς τρόπους είτε μειώνοντας τον αριθμό των στροφών, είτε μειώνοντας το μήκος κάθε στροφής, είτε αυξάνοντας ένα από τα $\alpha_p, \alpha_w, \sigma, s_\alpha$.

Περιστροφικές απώλειες

Οι περιστροφικές απώλειες ή μηχανικές απώλειες αποτελούνται από τις απώλειες τριβής (friction) και τις απώλειες λόγω ώσης του διακένου (windage).

Έχουμε δηλαδή:

$$\Delta P_{rot} = \Delta P_{friction} + \Delta P_{windage} \quad (4.12)$$

Μία εκτίμηση για τις απώλειες τριβής των εδράνων είναι η παράκατω:

$$\Delta P_{friction} = 0,06 \cdot k_{fb} \cdot (m_r + m_{sh}) \cdot n \quad (4.13)$$

Όπου k_{fb} :σταθερά τριβής εδράνων (κυμαίνεται από $1-3 \frac{m^2}{s^2}$)[39]

m_r :μάζα ρότορα

m_{sh} :μάζα ατράκτου

Απώλειες ώσης διακένου

Οι απώλειες ώσης διακένου για ένα περιστρεφόμενο δίσκο εκτιμώνται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta P_{windage} = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho \cdot (2 \cdot \pi \cdot n)^3 \cdot (R_{out}^5 - R_{sh}^5) \quad (4.14)$$

Με ρ : ειδική πυκνότητα ψυχτικού μέσου

R_{out} : εξωτερική ακτίνα

R_{sh} :ακτίνα ατράκτου

$$C_f = \frac{3.87}{\sqrt{Re}}, \text{ συντελεστής ώσης} \quad (4.15)$$

Re :αριθμός Reynolds, αδιάστατη ποσότητα που βοηθά να προβλεφθεί η ροή του ρευστού.

Ο αριθμός Reynolds για περιστρεφόμενο δίσκο με εξωτερική ακτίνα είναι ίσος με:

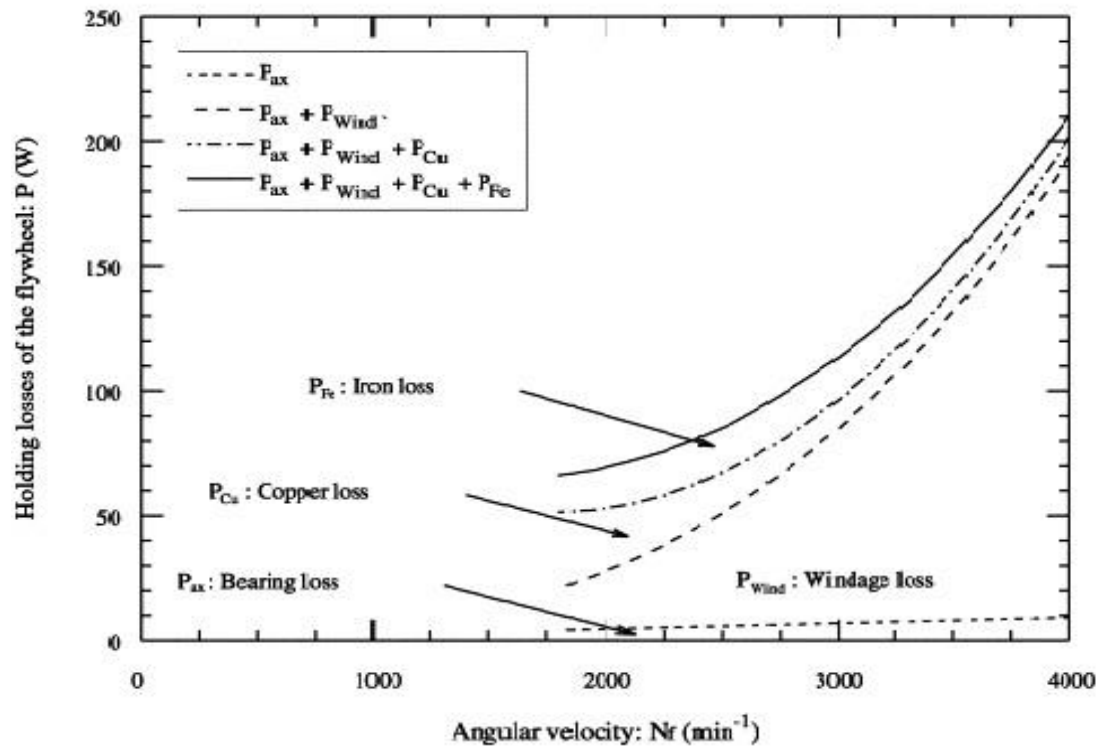
$$Re = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \rho \cdot R_{out}^2}{\mu} \quad (4.16)$$

Η πυκνότητα του αέρα και το δυναμικό ιξώδες σε πίεση 1 atm και θερμοκρασία $\theta=20^\circ C$ είναι $\rho=1,2 \frac{kg}{m^3}$ και $\mu=1,8 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$ [39]

Ο τύπος δείχνει ότι οι απώλειες τριβής μπορούν να μειωθούν για μία δεδομένη ταχύτητα περιστροφής περιορίζοντας τη σταθερά τριβής εδράνων, τη μάζα της ατράκτου ή του ρότορα. Σύμφωνα με τον τύπο οι απώλειες ώσης διακένου μπορεί να περιοριστούν για μία δεδομένη ταχύτητα περιστροφής μειώνοντας ένα από τα ρ , R_{out} , C_f , είτε

αυξάνοντας την ακτίνα ατράκτου. Περιορίζοντας κάποιες από τις παραπάνω απώλειες, χωρίς να μειωθεί η ταχύτητα θα αυξηθεί η απόδοση του κινητήρα AFPM.

Οι κυριότερες απώλειες που πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας είναι οι απώλειες ώσης διακένου, οι απώλειες εδράνου, οι απώλειες χαλκού και οι απώλειες σιδήρου. Με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα αντιλαμβανόμαστε πόσες σημαντικές είναι οι απώλειες ώσης διακένου, οι οποίες καταλαμβάνουν το 80% [39] περίπου των απωλειών. Ένας τρόπος μείωσης αυτών των απωλειών είναι η αντικατάσταση του αέρα με μίγμα αέρα ηλίου στο εσωτερικό του περιβλήματος του σφονδύλου και αυτό γιατί το ήλιο διαθέτει πυκνότητα που ισούται με το 1/7 [39] της πυκνότητας αέρα. Επίσης είναι το δεύτερο πιο ελαφρύ μονοατομικό μόριο. Με την αντικατάσταση του αέρα μειώνονται και οι απώλειες σημαντικά

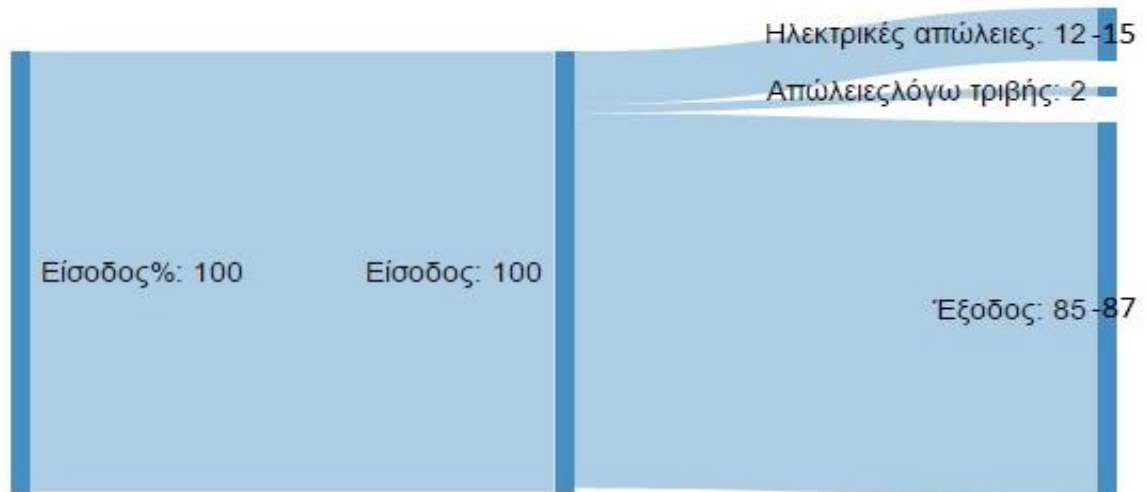


Τελικά η απόδοση του συστήματος σφονδύλου υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P_{total}} \quad (4.17)$$

Σύμφωνα με την ARUP οι πιο σημαντικές απώλειες στη διάταξη των σφονδύλων είναι οι ηλεκτρικές απώλειες και οι απώλειες λόγω τριβής. Οι ηλεκτρικές απώλειες ε-

κτιμώνται 12-15% και οι απώλειες λόγω τριβής 2% την ημέρα. Με αυτά τα δεδομένα σχεδιάζεται και το διάγραμμα Sankey.



Διάγραμμα 4.2: Διάγραμμα Sankey σφονδύλου.

5. Συμπεράσματα

Από την εκπόνηση της εν λόγω εργασίας προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει στραφεί στην αντικατάσταση των παραδοσιακών πηγών ενέργειας με νέες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό απορρέει από το γεγονός της εξάντλησης των εν λόγω πηγών και των προβλημάτων που δημιουργούν στο περιβάλλον, με τις ρυπογόνες εκπομπές τους. Δεν μπορεί να παραβλεφθεί, ωστόσο, η αστάθεια και οι διακυμάνσεις που εμφανίζουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω της φύσης τους. Γι' αυτό το λόγο χρειάζεται η ανάπτυξη τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες θα μπορούν να αντισταθμίζουν τα παραπάνω προβλήματα.

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική στο συνδυασμό της με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιτρέπει την αυξημένη χρησιμοποίηση του συστήματος, βελτιώνει την αξιοπιστία, την ευελιξία και την αποδοτικότητα του δικτύου και διευκολύνει την ενσωμάτωση των διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε πολύ μεγάλο βαθμό. Υπάρχουν πολλοί τρόποι αποθήκευσης ενέργειας και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη μορφή με την οποία αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια μέχρι να τη μετατρέψουν και πάλι σε αυτή (χημική, μηχανική μορφή, υπό μορφή πεπιεσμένου αέρα κλπ.) και ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και εφαρμογής τους, σε βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας μελετήθηκαν οι μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσης ισχύος και συγκεκριμένα στα 10 MW, οι οποίες είναι οι αξιδοαναγωγικές μπαταρίες βαναδίου, οι μπαταρίες μολύβδου οξέος, μπαταρίες με βασικό υλικό το νάτριο που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και συγκεκριμένα οι μπαταρίες νατρίου-θείου, που χρησιμοποιούνται και ευρέως στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και οι νατρίου-χλωριούχου μετάλλου, οι οποίες χρησιμοποιούνται λιγότερο στην αποθήκευση ενέργειας και τέλος οι σφόνδυλοι. Οι τεχνολογίες οι οποίες εξετάστηκαν αναλυτικά είναι οι σφόνδυλοι και οι μπαταρίες νατρίου θείου.

Συμπερασματικά, οι σφόνδυλοι είναι μία ελπιδοφόρα μέθοδος αποθήκευσης μεγάλων ποσών ενέργειας βραχυπρόθεσμου χρόνου. Ο σφόνδυλος λειτουργεί σαν μία μηχανική μπαταρία και είτε αποθηκεύει την πλεονάζουσα ενέργεια, είτε αποδίδει ενέργεια ή

και ρυθμίζει το ακανόνιστο φορτίο. Η αποθηκευμένη ενέργεια εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής και τη ροπή αδρανείας, οπότε και από το σχήμα και το υλικό κατασκευής. Στα πλεονεκτήματα ανήκουν η εύκολη συντήρηση, η γρήγορη αποθήκευση ενέργειας, γρήγορη και σχετικά μικρή εγκατάσταση, μεγάλο χρόνο ζωής και η άμεση απόδοση στις ΑΠΕ. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται ο θόρυβος κατά τη λειτουργία και η έλλειψη διαθεσιμότητας για τα οικιακά συστήματα. Χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερα και ειδικά στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.

Όσον αφορά τις μπαταρίες νατρίου-θείου πρόκειται για μία τεχνολογία μπαταριών που αποτελείται από τηγμένο νάτριο ως θετικό ηλεκτρόδιο και από τηγμένο θείο σαν αρνητικό. Τα ηλεκτρόδια διαχωρίζονται από στερεό ηλεκτρολύτη, τη beta-alumina. Με τη διαδικασία της φόρτισης και αποφόρτισης αποθηκεύεται και αποδίδεται η ενέργεια, αντίστοιχα. Λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Τα πλεονεκτήματα τους είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής, η γρήγορη απόκριση και το χαμηλό κόστος συντήρησης, ενώ μειονέκτημα παραμένει η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Είναι πολλά υποσχόμενη μέθοδος αποθήκευσης και αυτή που χρησιμοποιείται κυρίως για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τις ΑΠΕ, όσον αφορά τις μπαταρίες με βάση το νάτριο.

Συγκρίνοντας τις δύο αυτές τεχνολογίες, διαπιστώνει κανείς ότι αν και είναι δυο τεχνολογίες με διαφορετικό τρόπο λειτουργίας, «απειλεί» η μία την άλλη, καθώς είναι και οι δύο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες οι οποίες βελτιώνονται διαρκώς. Οι σφόνδυλοι υπερτερούν όσον αφορά τους κύκλους ζωής καθώς υπάρχει ελάχιστη ή και μηδενική επαφή του σφονδύλου με τα μαγνητικά έδρανα, γεγονός που μειώνει το κόστος συντήρησης. Ακόμη, η διάρκεια ζωής τους είναι ανεξάρτητη του βάθους αποφόρτισης. Από την άλλη οι μπαταρίες, όσο περισσότερες αποφορτίσεις υφίστανται τόσο μειώνεται η διάρκεια ζωής του και οι κύκλοι ζωής. Επιπροσθέτως, οι σφόνδυλοι είναι πιο φιλικό στο περιβάλλον. Είναι γεγονός, όπως αναφέραμε και στα παραπάνω κεφάλαια ότι η μπαταρία νατρίου-θείου αποτελείται από ανακυκλώσιμα υλικά στην πλειοψηφία της, παρ' όλα αυτά δεν γίνεται να παραβλεφθεί ότι τα πολυσουλφίδια του θείου είναι ιδιαίτερα διαβρωτικά και ότι πρέπει να παρέχεται προσοχή κατά την κατασκευή τους, την ανακύκλωση και την ρίψη τους. Από την άλλη, οι σφόνδυλοι παρουσιάζουν υψηλό κόστος κατασκευής, το οποίο οφείλεται κυρίως στα στοιχεία βελ-

τίωσής τους, όπως είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος, μαγνητικά ρουλεμάν, συνθετικά υλικά. Οι σφόνδυλοι, λόγω της υψηλής τους αποθηκευτικής ικανότητας, αποτελούν τις πιο κατάλληλες διατάξεις για να διατηρούν σταθερή την τάση, ειδικά σε συστήματα με σημαντική διείσδυση διαλείπουσας ανανεώσιμης ενέργειας, όπως η αιολική. Οι μπαταρίες είναι πιο χρήσιμες, όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας σε απομονωμένες περιοχές.

Συμπεραίνουμε ότι η μελέτη των συστημάτων αποθήκευσης θα οδηγήσει στη βελτιστοποίηση των τεχνικών αποθήκευσης υπό το πρίσμα του κόστους, της ενεργειακής απόδοσης, της αξιοπιστίας, της συντήρησης και των περιβαλλοντικών επιδράσεων. Περαιτέρω έρευνα και επενδύσεις στην ενσωμάτωση των διατάξεων αποθήκευσης στα συστήματα παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, θα οδηγήσουν στη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης των συστημάτων, τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και το σπουδαιότερο, στην αντικατάσταση των ρυπογόνων τρόπων παραγωγής ενέργειας με φιλικά προς το περιβάλλον συστήματα.

Βιβλιογραφία

[1]: Αγγελική Σαγάνη, «Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας – Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές», Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Παπαντώνης, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009

[2]: www.iea.org

[3]: Τσαρτσάλη Ελένη, «Μελέτη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ενός οικιακού καταναλωτή», Επιβλέπων Καθηγητής: Ανδρέου Γεώργιος, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2013

[4]: Zhaoyin Wen, Study on Energy Storage Technology of Sodium Sulfur Battery and it's Application in Power System, International Conference on Power System Technology, 2006

[5]: Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke, Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, Applied Energy, Volume 137, 1 January 2015, Pages 511-536

[6]: Handbook of Batteries, Mc Graw-Hill, Third Edition

[7]: Γρηγόριος Κώτσης, «Μοντελοποίηση συσσωρευτών τύπου VRB και εφαρμογή του μοντέλου για προσομοίωση υβριδικού σταθμού παραγωγής με VRB στο σύστημα Κρήτης», Επιβλέπων καθηγητής: Παπαθανασίου Σταύρος, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013

[8]: <http://batteryuniversity.com>

[9]: Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, Progress in Natural Science, Volume 19, Issue 3, 10 March 2009, Pages 291-312

- [10]: <http://www.reuk.co.uk/Lead-Acid-Batteries.htm>
- [11]: High temperature sodium batteries: Status, challenges and future trends, article in energy & environmental science- February 2013
- [12]: <http://www.energystorageexchange.org>
- [13]: www.ecoult.com/technology/ultrabattery
- [14]: <http://www.ngk.co.jp/english/index.html>
- [15]: <http://www.energystorageexchange.org/>
- [16]: Θεόδωρος Ζαρογιάννης, «Οικονομική, περιβαλλοντική, θερμοδυναμική σύγκριση μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ», Επιβλέπων Καθηγητής: Χρ. Κορωναίος, Διεπιστημονικό- Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) «Περιβάλλον και Ανάπτυξη», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011
- [17]: 1,5 kW electromechanical battery system, Flywheel Energy Systems Inc., January 2000
- [18]: Björn Bolund, Hans Bernhoff, Mats Leijon, Flywheel energy and power storage systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 11, Issue 2, February 2007, Pages 235-258
- [19]: John R. Hull, Flywheels, In Encyclopedia of Energy, edited by Cutler J. Cleveland, Elsevier, New York, 2004, Pages 695-704
- [20]: Νικόλαος Φύσσας, «Επισκόπηση και συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές», Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Δανάη Διακουλάκη, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013
- [21]: Carl Ronald Schoombie, «Optimisation of sustainable Flywheel Energy Storage Device», Department of Electrical Engineering University of Cape Town
- [22]: <http://www.physic.oregonstate.edu>

[23]: www.acsystems.com

[24]: Μπεν Μπραχιμ Αμπιντ, «Αποθήκευση ενέργειας-Μέθοδοι και εφαρμογές», Επιβλέπων καθηγητής: Αναγνωστόπουλος Ιωάννης, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

[25]:Γέραλης Νικόλαος, «Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και εφαρμογές στη μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργεια», Επιβλέπων καθηγητής Γιαννακόπουλος Γαβριήλ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών,2009

[26]:Francisco Díaz-González, Andreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt, Roberto Vilafáfila-Robles, A review of energy storage technologies for wind power applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 4, May 2012, Pages 2154-2171

[27]: <http://www.wou.edu>

[28]: <http://beaconpower.com/>

[29]:<http://www.calnetix.com>

[30]: <http://www.extremetech.com>

[31]:Techno-Economic Analysis of Different Energy Storage Technologies, Hussein Ibrahim and Adrian Ilinca

[32]: Electrochemical Energy Storage By Petr Krivik and Petr Baca (Chapter 3)

[33]: J. I. San Martín, I. Zamora, J. J. San Martín, V. Aperribay, P. Eguía,Energy Storage Technologies for Electric Applications

[34]:Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, Progress in Natural Science, Volume 19, Issue 3, 10 March 2009, Pages 291-312

[35]:www.iech.ch

[36]: Battery Energy Storage Efficiency Calculation Including Auxiliary Losses: Technology Comparison and Operating Strategies, F.M. Gatta, A. Geri, S. Lauria, M. Maccioni Department of Astronautics, Electrical and Energetics Engineering (DI-AEE) “Sapienza” University of Rome Rome, Italy

[37]: Zahrul F. Hussien, Lee W. Cheung¹ , Mohd F. M. Siam and Amir B. Ismail, “Modeling of Sodium Sulfur Battery for Power System Applications”, Power Engineering Centre, Universiti Tenaga Nasional, 43009 Kajang, Selangor, Malaysia

[38]: Arup, Five minute guide: Electricity Storage Technologies

[39]: Carl Ronald Schoombie, «Optimisation of sustainable Flywheel Energy Storage Device», Department of Electrical Engineering University of Cape Town