



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ,
ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ
ΠΕΔΙΟΥ**



Φοιτητής: Ανδρεάδης Μάριος

ΑΜ: 47386

Επιβλέπων Καθηγητής

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΟΚΑΣ

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Energy Storage via Supercapacitors, Flow Batteries, and Magnetic Field Technologies



Student: Andreadis Marios
Registration Number: 47386

Supervisor

GEORGIOS VOKAS

ATHENS-EGALEO, JANUARY 2023

ΒΟΚΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ Καθηγητής	ΚΑΜΙΝΑΡΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ Καθηγητής	ΚΑΛΟΓΕΡΟΠΟΥΛΟΥ ΣΟΦΙΑ Καθηγήτρια
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Ανδρεάδης Μάριος, Ιανουάριος, 2023

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 η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ανδρεάδης Μάριος του Ευθυμίου, με αριθμό μητρώου

48347386 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 30/12/2023 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών

Ανδρεάδης Μάριος

Ημερομηνία 23/2/2023



(Υπογραφή)

*Αφιερώνεται
Στην
Οικογένεια μου.*

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου για την στήριξη και την βοήθεια τους. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Γεώργιο Βόκα για την ανάθεση της εργασίας με ένα αρκετά ενδιαφέρον θέμα και τον κύριο Κορακιανίτη Νικόλαο για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε συνεργασία με τον κύριο Βόκα. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον αδερφό μου, Ιωάννη Ανδρεάδη απόφοιτο ηλεκτρολόγο μηχανικό και μηχανικό υπολογιστών ΕΜΠ, ο οποίος μου έδωσε πολύτιμες γνώσεις για την δομή της διπλωματική.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θίγεται ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της εποχής μας παγκοσμίως και ιδιαιτέρως στην Ελλάδα. Το 1970, όπου εκείνη τη δεκαετία ξεκίνησε το πρόβλημα της πετρελαϊκής κρίσης αποτέλεσε αφετηρία για την αφύπνιση του κόσμου σχετικά με το έντονο πρόβλημα ενεργειακού ελλείμματος. Έτσι αυτό το πρόβλημα συνεχίζεται μέχρι και σήμερα όπου το κόστος της ενέργειας εκτινάσσεται αυξάνοντας έτσι τα ελλείμματα όλο και περισσότερο επηρεάζοντας κάθε ευρωπαϊκή χώρα αλλά και την Ελλάδα. Έχοντας αυτά τα προβλήματα ως κίνητρο η αποθήκευση ενέργειας καθώς, η ανάπτυξη και ενίσχυση κάθε μεθόδου αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας όπως και η ανακάλυψη νέων ενεργειακών πόρων φαίνονται ως μονόδρομος στις μέρες μας. Η διπλωματική αυτή λοιπόν στοχεύει στο να βοηθήσει τον αναγνώστη να κατανοήσει την έννοια και τη σημασία της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κάποιων πληροφοριών, συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο που θα περιλαμβάνει την εισαγωγή θα γίνει λεπτομερής ανάλυση της αποθήκευσης ενέργειας, θα γίνει αναφορά στις μεθόδους τους καθώς και τη σημασία ανάπτυξης αυτών των μεθόδων προκειμένου να μπορέσει ο άνθρωπος να αντιμετωπίσει το πρόβλημα αυτό του ενεργειακού ελλείμματος. Μετά από τις αναφορές αυτές θα γίνει διεξοδική ανάλυση τριών συγκεκριμένων μεθόδων οι οποίες θα μελετηθούν σε αυτή τη διπλωματική και είναι οι εξής : αποθήκευση ενέργειας μέσω υπερπυκνωτών (supercapacitors), μέσω συσσωρευτών ροής (flow batteries) και μέσω τεχνολογιών μαγνητικού πεδίου (SMES). Αναλυτικότερα δηλαδή θα έχουμε στο δεύτερο κεφάλαιο την μέθοδο αποθήκευση ενέργειας με υπερπυκνωτές. Για τη μέθοδο αυτή θα γίνει μια αναφορά στους συμβατικούς πυκνωτές και μετά από μια περίληψη της ιστορίας τους θα αναλυθούν τα είδη, η λειτουργία και η δομή των υπερπυκνωτών, καταλήγοντας σε κάποιες εφαρμογές τους και στη διαθεσιμότητα τους. Το τρίτο κεφάλαιο θα περιλαμβάνει την αποθήκευση ενέργειας μέσω συσσωρευτών ροής όπου για αρχή θα γίνει μια σύντομη αναφορά στις συμβατικές μπαταρίες, την ιστορία τους και τις κατηγορίες τους. Κατόπιν θα αναλυθούν οι μπαταρίες ροής, η δομή τους, η λειτουργία τους, τα είδη τους, εφαρμογές τους φτάνοντας στα κόστη τους στην αγορά στηρίζοντας τις πληροφορίες σε επίκαιρες έρευνες. Στο τέταρτο κεφάλαιο θα περιγράψει η μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας μέσω τεχνολογιών μαγνητικού πεδίου (υπέραγώγιμα πηνία ή SMES) η οποία θα περιλαμβάνει την αρχή λειτουργίας τους, τα κατασκευαστικά τους μέρη, κάποιες χρήσιμες εφαρμογές και και την περιγραφή τεχνοοικονομικών χαρακτηριστικών όπως και των προηγούμενων δύο μεθόδων. Στο πέμπτο κεφάλαιο θα γίνει μία σύγκριση μεταξύ πολλαπλών μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας συμπεριλαμβανομένων και των τριών μεθόδων που αναλύονται στη διπλωματική με βάση κριτήρια οικονομικά, κοινωνικά, περιβαλλοντικά, τεχνολογικά κ.ά με την βοήθεια πολλών γραφημάτων. Έτσι θα έχει ο αναγνώστης μια πλήρη εικόνα για όλες τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας και ειδικά για τις τρεις που πρωταγωνιστούν στην εργασία.

Τέλος το έκτο κεφάλαιο θα έχει τα συμπεράσματα τα οποία θα παρουσιάζονται με βάση τη σύγκριση των μεθόδων. Με την βοήθεια των συμπερασμάτων αυτών στο 6^ο κεφάλαιο θα υπάρχουν και μελλοντικές προοπτικές για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Επιπρόσθετα μετά από την ανάλυση κάθε μεθόδου αλλά και την ανάλυση του ενεργειακού προβλήματος και την ανάγκη της αποθήκευσης ενέργειας, ο κάθε αναγνώστης θα είναι σε θέση μέσα από έρευνες που έχουν ακολουθήσει και τις πληροφορίες που έχουν δοθεί σε αυτή την διπλωματική να κρίνει αν μπορούμε ή όχι να χρησιμοποιήσουμε ένα ανεκμετάλλευτο ποσοστό τρόπων αποθήκευσης ενέργειας για την αντιμετώπιση του παγκόσμιου προβλήματος αυτού.

Λέξεις – κλειδιά

Αποθήκευση ενέργειας, υπέρπυκνωτές, συσσωρευτές, μαγνητικό πεδίο, μπαταρία οξειδοαναγωγής βαναδίου, εφαρμογές, κόστος, φόρτιση, εκφόρτιση, SMES, υπεραγωγός, μπαταρίες ροής, υπεραγώγιμη μαγνητική ενεργειακή αποθήκευση, μπαταρίες μολύβδου-οξέος, ηλεκτροχημική αποθήκευση, μαγνήτης υψηλού επιπέδου, μαγνητική ενέργεια

Abstract

The present thesis addresses one of the biggest problems of our time worldwide and especially in Greece. The 1970s, when the problem of the oil crisis started in that decade, was the starting point for the awakening of the world to the intense problem of energy shortage. So, this problem continues until today where the cost of energy is soaring thus increasing the deficits more and more affecting every European country and Greece. Having these problems as a motivation the storage of energy as well as the development and strengthening of any method of storing electricity like the discovery of new energy resources seem to be a one-way street nowadays. This thesis's objective therefore is to help the reader to understand the concept and importance of electricity storage through some information, specifically in the first chapter which will include the introduction, a detailed analysis of energy storage will be made, their methods will be mentioned as well as the importance of developing these methods in order to be able to face this problem of energy deficit. After these references we will have a thorough analysis of three specific methods which will be studied in this thesis and they are: energy storage through supercapacitors, through flow batteries and through magnetic field technologies (SMES). In more detail we will have in the second chapter the method of energy storage with supercapacitors. For this method, a reference to conventional capacitors will be made and after a summary of their history, the types, function and structure of supercapacitors will be analyzed, concluding with some applications and their availability. The third chapter will cover energy storage through flow batteries where first a brief reference will be made to conventional batteries, their history and their categories. Then flow batteries, their structure, their function, their types, their applications reaching to their costs in the market basing the information on current researches will be analyzed. The fourth chapter will describe the method of energy storage through magnetic field technologies (superconducting coils or SMES) which will include their operating principle, their construction parts, some useful applications and the description of techno-economic characteristics as well as the previous two methods. In chapter five a comparison between multiple energy storage methods including the three methods discussed in the thesis will be made based on economic, social, environmental, technological and other criteria with the help of several graphs. This will provide the reader with a complete picture of all energy storage technologies, especially the three that feature prominently in the thesis. Finally, the sixth chapter will have the conclusions which will be presented based on and comparison of the methods. With the help of these conclusions in chapter six there will also be future perspectives for the development of energy storage technologies. Additionally, after analyzing each method and also analyzing the energy problem and the need for energy storage, each reader will be able to judge

through research that has been followed and the information given in this thesis whether or not we can use an untapped percentage of energy storage ways to address this global problem.

Keywords

Energy storage, supercapacitors, accumulators, magnetic field, vanadium redox battery, applications, cost, charging, discharging, SMES, superconductor, flow batteries, superconducting magnetic energy storage, lead-acid batteries, electrochemical storage, high-field magnet, magnetic energy

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	13
Κατάλογος Εικόνων	14
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	20
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	21
1.1 Σκοπός και στόχοι	31
1.2 Μεθοδολογία	32
1.3 Καινοτομία	33
1.4 Δομή.....	33
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΥΠΕΡ-ΠΥΚΝΩΤΕΣ	35
2.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ	35
2.2 Τι είναι ο υπερπυκνωτής – Τεχνικά χαρακτηριστικά	41
2.2.1 Ιστορική αναδρομή για τον υπερπυκνωτή.....	48
2.2.2 Σύγκριση υπερπυκνωτών με συμβατικούς πυκνωτές και μπαταρίες.....	50
2.2.3 Δομή και υλικά ενός Υπερπυκνωτή	52
2.3 Είδη υπερπυκνωτών – Αρχή λειτουργίας	61
2.3.1 Πυκνωτές διπλού στρώματος (Double layer Capacitors)	62
2.3.2 Ψευδοπυκνωτές (Pseudocapacitors).....	67
2.3.3 Υβριδικοί πυκνωτές (Hybrid capacitors).....	68
2.4 Εφαρμογές Υπερπυκνωτών	70
2.4.1 Μέσα μαζικής μεταφοράς.....	71
2.4.2 Αγωνιστικά οχήματα.....	73
2.4.3 Συμβατικά και εμπορικά οχήματα	74
2.4.4 Ανυψωτικά και γερανοί.....	79
2.5 Κόστη Υπερπυκνωτών	79
2.5.1 Προοπτικές της αγοράς	82
2.5.2 Εμπορική δραστηριότητα υπερπυκνωτών σήμερα.....	83
2.6 Δυσκολίες των υπερπυκνωτών.....	95
2.7 Απόδοση των υπερπυκνωτών	97
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ –	
ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΟΥΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΡΟΗΣ.....	100
3.1 Ιστορική αναδρομή του συσσωρευτή	100
3.2 Συμβατικές μπαταρίες.....	104
3.2.1 Αρχή λειτουργίας.....	109
3.3 Κατηγορίες μπαταριών	109
3.3.1 Μπαταρίες μολύβδου -οξέος (Lead – Acid Batteries).....	110
3.3.2 Μπαταρίες Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd).....	112
3.3.3 Μπαταρίες λιθίου -ιόντων (Lithium Batteries).....	114
3.3.4 Μπαταρίες νατρίου – θείου (Sodium Sulphur Batteries, NaS).....	117
3.4 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΡΟΗΣ	120
3.4.1 Αρχή Κατασκευής	122
3.4.2 Ιστορική Αναδρομή Των Μπαταριών Ροής Οξειδοαναγωγής (RFB)	126
3.5 Τύποι Μπαταριών Ροής	127
3.5.1 Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής χρωμίου σιδήρου	128
3.5.2 Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου (VRB).....	130
3.5.3 Μπαταρία ροής πολυσουλφιδίου οξειδοαναγωγής βρωμίου (PSB)	132
3.5.4 Μπαταρία οξειδοαναγωγικής ροής διαλυτού μολύβδου	134
3.5.5 Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής νικελίου ψευδαργύρου	135

3.5.6	Μπαταρίες ροής ψευδαργύρου-βρωμίου (ZnBr)	137
3.5.7	Μπαταρία ροής αέρα βαναδίου (VARFB).....	139
3.6	Χαρακτηριστικά μπαταριών ροής.....	141
3.7	Εφαρμογές μπαταριών ροής	142
3.7.1	Εφαρμογές ελέγχου ποιότητας ισχύος.....	142
3.7.2	Εφαρμογές με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	143
3.7.3	Εφαρμογές με ηλεκτρικά οχήματα.....	146
3.8	Κόστη μπαταριών ροής	146
3.9	Μελλοντική εξέλιξη μπαταριών ροής	151
3.10	Υπάρχοντα έργα μπαταριών ροής	152
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ	
	ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (SMES)	155
4.1	Εισαγωγή - Ορισμοί	155
4.2	Ιστορική αναδρομή των υπεραγωγίμων μαγνητικών συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης(SMES)	156
4.3	Γενική περιγραφή του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με υπεραγωγίμα πηνία	159
4.3.1	Δομή και λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	163
4.3.2	Υπεραγωγός και πηνίο.....	165
4.3.3	Δοχείο Ντιούαρ και Δομή.....	166
4.3.4	Κρυσταλλικό Σύστημα	167
4.3.5	Σύστημα κλιματισμού ισχύος	169
4.4	Εφαρμογές των συστημάτων SMES	171
4.4.1	Μείωση των ταλαντώσεων του συστήματος	172
4.4.2	Αδιάλειπτη παροχή ισχύος.....	173
4.4.3	Βελτίωση των επιδόσεων του ευέλικτου συστήματος μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος	174
4.4.4	Εξισορρόπηση ασταθών φορτίων	175
4.4.5	Αντιμετώπιση κρίσιμων φορτίων με εφεδρική παροχή ρεύματος.....	176
4.4.6	Εξισορρόπηση των ασυμμετρικών συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	177
4.5	Κόστος του συστήματος SMES	177
4.6	Εμπορική δραστηριότητα και σύγχρονες εγκαταστάσεις SMES	180
4.7	Δυσκολίες των συστημάτων SMES.....	184
4.8	Απόδοση των συστημάτων SMES	185
4.9	Προτάσεις για μελλοντική ανάπτυξη της τεχνολογίας των SMES.....	186
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	187
5.1	Χαρακτηριστικά των τεχνικών αποθήκευσης ενέργειας.....	187
5.2	Σύγκριση Μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.....	194
5.2.1	Σύγκριση ισχύος σε συνάρτηση με το πεδίο εφαρμογής	195
5.2.2	Σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης (ανά κύκλο) των συστημάτων αποθήκευσης	196
5.2.3	Σύγκριση του κόστους επένδυσης.....	197
5.2.4	Σύγκριση του κόστους επένδυσης ανά κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης	198
5.2.5	Σύγκριση με βάση την πυκνότητα μάζας η όγκου.....	199
5.2.6	Σύγκριση με βάση τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	200
5.2.7	Σύγκριση με βάση τις κοινωνικές επιπτώσεις	201
5.2.8	Σύγκριση με βάση την τεχνολογική ωριμότητα	203
5.2.9	Σύγκριση με βάση την προσέγγιση	204
5.3	Συνολική ανάλυση των συγκρίσεων των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας	205
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	225
	Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	227

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.2.(1)-Τυπικά χαρακτηριστικά επιδόσεων μικρών υπερπυκνωτών	[45]
Πίνακας 2.2.(2)-Τυπικά χαρακτηριστικά επιδόσεων μεγάλων υπερπυκνωτών	[46]
Πίνακας 2.3.1-Ειδική χωρητικότητα διαφόρων υλικών ηλεκτροδίων	[67]
Πίνακας 2.3.3(1)-Υπολογιζόμενη απόδοση υβριδικών σχεδίων πυκνωτών	[71]
Πίνακας 2.3.3(2)-Σημερινές και μελλοντικές επιδόσεις τεχνολογιών υπερπυκνωτών	[71]
Πίνακας 2.4.4(5)-Παγκόσμιες δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης σε υπερπυκνωτές..	[79]
Πίνακας 2.5-Ετήσιο κόστος για κάθε τεχνολογία, 2018 και 2025 (\$/kW)	[82]
Πίνακας 2.5.1-Τάση κόστους SC	[83]
Πίνακας 2.5.2-Απόδοση των υπερπυκνωτών	[99]
Πίνακας 2.7-Χρονολογική ανασκόπηση των προτύπων αξιολόγησης SC	[100]
Πίνακας 3.3.1-Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών μολύβδου-οξέος	[111]
Πίνακας 3.3.2-Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα συσσωρευτών Νικελίου-Καδμίου	[115]
Πίνακας 3.3.3-Πίνακας 3.3.3- Συγκρίσεις συμβατικών τεχνολογιών μπαταριών	[117]
Πίνακας 3.3.4-Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών Νατρίου-Θείου[120]	[120]
Πίνακας 3.5.7-Σύγκριση των βασικών τεχνολογιών μπαταριών ροής	[142]
Πίνακας 3.7-Σύνοψη των RFB	[143]
Πίνακας 3.7.2 (1)-Πίνακας εγκαταστάσεων RFB σε συνδυασμό με ηλιακή ενέργεια	[145]
Πίνακας 3.7.2 (2)-Πίνακας εγκαταστάσεων RFB σε συνδυασμό με ανεμογεννήτριες	[146]
Πίνακας 3.8(1) -Εκτιμήσεις κόστους για συστήματα μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής 1 MW και 10 MW.....	[148]
Πίνακας 3.8(2)-Εκτιμήσεις κόστους για διάφορες διάρκειες για RFBs.....	[149]
Πίνακας 3.8(3)-Εκτιμήσεις κόστους για ένα RFB 10 MW σε διάφορες διάρκειες	[150]
Πίνακας 3.8(4)-Κατανομή τιμών για διάφορες κατηγορίες για RFB 10 MW, 100 MWh Vanadium	[151]
Πίνακας 3.8(5)-Ποσοστά μάθησης που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του κόστους κεφαλαίου και των σταθερών δαπανών λειτουργίας και διαχείρισης για το 2030	[152]
Πίνακας 4.3.1-Χαρακτηριστικά μονάδας 5000 MWh SMES	[166]
Πίνακας 4.4.2- Πρόσφατη υλοποίηση UPS με βάση το σύστημα SMES.....	[175]

Πίνακας 4.5-σύγκριση του κόστους εγκαταστάσεων SMES 5000 MWhr για διαφορετικά χαρακτηριστικά και κόστος υπεραγωγών	[186]
Πίνακας 5.2.7-Κόστος της αποθηκευμένης ενέργειας σε SEK/kWh.....	[204]
Πίνακας 5.2.8-Κατάλογος επιπέδων τεχνολογικής ωριμότητας	[205]
Πίνακας 5.2.9- Μελέτη περίπτωσης επιλογών αποθήκευσης ενέργειας.....	[207]
Πίνακας 5.3(1)- Πίνακας σύγκρισης Τεχνολογιών μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας	[209]
Πίνακας 5.3(2),(3)-Πίνακες σύγκρισης Τεχνολογιών χημικής αποθήκευσης ενέργειας συμβατικών μπαταριών.....	[211]
Πίνακας 5.3.2(4)-Πίνακας σύγκρισης Τεχνολογιών χημικής αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών ροής	[213]
Πίνακας 5.3.2(5)-Πίνακας σύγκρισης Τεχνολογιών ηλεκτρομαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας	[215]
Πίνακας 5.3.2(6)-Πίνακας σύγκρισης των τριών τεχνολογιών που αναλύθηκαν.....	[225]

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1(1)-Απώλειες αποθήκευσης ενέργειας	[26]
Εικόνα 1(2)-Διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας.....	[27]
Εικόνα 1(3)-Επισκόπηση των κύριων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και των χρήσεών του	[28]
Εικόνα 1 (4)-Μέγεθος, εφαρμογές και τεχνολογική ωριμότητα των διαφόρων πηγών αποθήκευσης	[30]
Εικόνα 1 (5)-Καταλληλότητα διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα και την ισχύ τους	[30]
Εικόνα 1 (6)-Καταλληλότητα διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα και την ισχύ τους	[31]
Εικόνα 2.1(1)-Συμβατικός πυκνωτής.....	[35]
Εικόνα 2.1 (2)-Δομή πυκνωτή	[37]
Εικόνα 2.1 (3)-Προσανατολισμός φορτίου στον πυκνωτή	[38]
Εικόνα 2.1(4)-Πυκνωτές διαφόρων ειδών.....	[41]

Εικόνα 2.2(1)-Υπερπυκνωτές.....	[43]
Εικόνα 2.2(2)-Χαρακτηριστικά Υπερπυκνωτή	[43-44]
Εικόνα 2.2(3)-Πολικότητα Υπερπυκνωτή.....	[45]
Εικόνα 2.2(4),(5)-Σειρές υπερπυκνωτών και χαρακτηριστικά τους	[46-47]
Εικόνα 2.2.1(1)-Πυκνωτής που πατένταρε η General Electric	[49]
Εικόνα 2.2.1(2)-Ηλεκτρολυτική συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που πατένταρε η SOHIO	[49]
Εικόνα 2.2.1(3)-Πυκνωτής που πατένταρε η SOHIO	[49-50]
Εικόνα 2.2.2(1)-Σύγκριση Υπερπυκνωτών με συμβατικούς πυκνωτές	[51]
Εικόνα 2.2.2(2)-Σύγκριση Υπερπυκνωτών με μπαταρίες.....	[52]
Εικόνα 2.2.3(1)-Κατασκευή Υπερπυκνωτή	[53]
Εικόνα 2.2.3(2)-Υλικά ηλεκτροδίων Υπερπυκνωτή	[54]
Εικόνα 2.2.3(3)-Ενεργός άνθρακας.....	[55]
Εικόνα 2.2.3(4)-Ένα μπλοκ αερογέλης πυριτίου στο χέρι	[56]
Εικόνα 2.2.3(5)-Γραφένιο	[57]
Εικόνα 2.2.3(6)-Νανοσωλήνες άνθρακα.....	[58]
Εικόνα 2.2.3(7)-Η απόδοση του υπερπυκνωτή εξαρτάται από τις ιδιότητες του ηλεκτρολύτη	[61]
Εικόνα 2.3-Ταξινόμηση υπερ-πυκνωτών	[63]
Εικόνα 2.3.1(1)-Πυκνωτές διπλού στρώματος της Panasonic και της KEMET	[63]
Εικόνα 2.3.1(2)-Φόρτιση-εκφόρτιση υπερπυκνωτή.....	[64]
Εικόνα 2.3.1(3)-Φαινόμενο πυκνωτων διπλού στρώματος σε αύξηση τάσεως.....	[65]
Εικόνα 2.3.1(4)-Σχηματικό υπερπυκνωτή διπλού στρώματος.....	[66]
Εικόνα 2.3.2(1)-Ψευδοπυκνωτές.....	[68]
Εικόνα 2.3.2(2)-Τεχνικά χαρακτηριστικά ψευδοπυκνωτών	[69]
Εικόνα 2.3.3(1)-Υβριδικοί υπερπυκνωτές της VINATECH και της PANASONIC	[69-70]

Εικόνα 2.3.3(2)-Χαρακτηριστικές φόρτισης αποφόρτισης EDLC και υβριδικών υπερπυκνωτών. [70]	
Εικόνα 2.4.1(1)-Ultracapbus [73]	
Εικόνα 2.4.1(2)-Ultracapbus [73]	
Εικόνα 2.4.2(1)-Σύστημα K.E.R.S. [74]	
Εικόνα 2.4.2(2)-Toyota TS030 [75]	
Εικόνα 2.4.3(1)-Σύστημα i-Eloop [76]	
Εικόνα 2.4.3(2)-mazda 6 [76]	
Εικόνα 2.4.3(3)-Υπερπυκνωτές και συστοιχίες υπερπυκνωτών που διατίθενται στο εμπόριο..... [77]	
Εικόνα 2.4.3(4)-Συνδεσμολογία και δομή μονάδας εκκίνησης οχήματος [77-78]	
Εικόνα 2.5-Πλεονεκτήματα -Μειονεκτήματα Υπερπυκνωτών..... [82]	
Εικόνα 2.5.2(1)-Υπερπυκνωτής της TDK [85]	
Εικόνα 2.5.2(2)-Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της TDK [86]	
Εικόνα 2.5.2(3)-Υπερπυκνωτής της KEMET [87]	
Εικόνα 2.5.2(4)-Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της KEMET..... [87]	
Εικόνα 2.5.2(5)-Υπερπυκνωτής της Kyocera AVX..... [88]	
Εικόνα 2.5.2(6)-Τεχνικά χαρακτηριστικά της Kyocera AVX..... [88]	
Εικόνα 2.5.2(7)-Υπερπυκνωτής της Eaton [89]	
Εικόνα 2.5.2(8)-Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της Eaton [90]	
Εικόνα 2.5.2(9)-Υπερπυκνωτής της Cornell Dubilier..... [91]	
Εικόνα 2.5.2(10)-Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της Cornell Dubilier [92]	
Εικόνα 2.5.2(11)-Υπερπυκνωτής της Maxwell Technologies [93]	
Εικόνα 2.5.2(12)-Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της Maxwell Technologies [95]	
Εικόνα 2.5.2(13)-Υπερπυκνωτής της Elna..... [96]	
Εικόνα 2.5.2(14)-Τεχνικά χαρακτηριστικά Υπερπυκνωτή της Elna [96]	

Εικόνα 2.7-Απεικόνιση των βασικών μετρικών επιδόσεων, των μεθόδων δοκιμής, των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν την αξιολόγηση των SCs	[100]
Εικόνα 3.1(1)-Δομικά στοιχεία της μπαταρίας της Βαγδάτης	[102]
Εικόνα 3.1(2)-Βολταϊκή στήλη και το "στέμμα κυπέλων"	[103]
Εικόνα 3.1 (3)-Ο συσσωρευτής του William Cruickshank	[104]
Εικόνα 3.1(4)-Συσσωρευτής Daniel	[105]
Εικόνα 3.1(5)-Το στοιχείο Leclanche	[105]
Εικόνα 3.2-Διάγραμμα μπαταρίας	[107]
Εικόνα 3.3.1-Μπαταρίες μολύβδου-οξέος ανοιχτού τύπου βαθιάς εκφόρτισης για χρήση σε σύστημα ΑΠΕ.....	[112]
Εικόνα 3.3.2(1)-Συσσωρευτής Νικελίου-Καδμίου σφραγισμένου τύπου.....	[114]
Εικόνα 3.3.2(2)-Μπαταρία Νικελίου-Καδμίου με εκτονωτική βαλβίδα	[114]
Εικόνα 3.3.3-Μπαταρία Ιόντων-Λιθίου	[117]
Εικόνα 3.3.4 (1)-Δομή μπαταρίας νατρίου-θείου.....	[120]
Εικόνα 3.3.4 (2)-Μπαταρίες νατρίου -θείου	[121]
Εικόνα 3.4.1(1)-Σχηματικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας RFB	[125]
Εικόνα 3.4.1(2)-Αναλυτική άποψη ενός μεμονωμένου κυττάρου μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής.	[126]
Εικόνα 3.4.2-Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης μπαταριών ροής	[129]
Εικόνα 3.5.1(1)-Σχηματικό διάγραμμα ροής οξειδοαναγωγής χρωμίου σιδήρου μπαταρία	[131]
Εικόνα 3.5.1(2)-Η μεγαλύτερη μπαταρία ροής σιδήρου-χρωμίου στον κόσμο ξεκινά στην Καλιφόρνια.....	[132]
Εικόνα 3.5.2-Σχηματικό διάγραμμα Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου	[133]
Εικόνα 3.5.3(1)-Αρχή της μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής πολυσουλφιδίου βρωμίου	[135]
Εικόνα 3.5.3(2)-Μπαταρία ροής πολυσουλφιδίου οξειδοαναγωγής βρωμίου	[135]

Εικόνα 3.5.4(1)-Διαλυτές μπαταρίες Redox Flow	[137]
Εικόνα 3.5.4(2)-Μια μπαταρία μολύβδου οξέος 12 V	[137]
Εικόνα 3.5.5-Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής νικελίου ψευδαργύρου	[139]
Εικόνα 3.5.6(1)-Αρχή μπαταριών ροής βρωμίου ψευδαργύρου	[140]
Εικόνα 3.5.6(2)-Οι "μικρότερες" μπαταρίες ροής ψευδαργύρου βρωμίου στον κόσμο έρχονται για το λίθιο πηγή	[140]
Εικόνα 3.5.7(1)-Σχηματική μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής αέρα βαναδίου	[142]
Εικόνα 3.5.7(2)-Μπαταρία ροής αέρα αέρα βαναδίου.....	[142]
Εικόνα 3.10(1)-Τοποθεσία των εταιρειών μπαταριών ροής	[156]
Εικόνα 3.10(2)-Εγκατάσταση μπαταρίας ροής πολυσουλφιδίου Regenesys.....	[157]
Εικόνα 3.10(3)-Επιχείρηση μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου της TNG	[157]
Εικόνα 3.10(4)-Η Redflow προμηθεύει 2MWh μπαταριών ροής ψευδαργύρου-βρωμίου σε μονάδα βιοενέργειας στην Καλιφόρνια.....	[158]
Εικόνα 4.1-Συμπεριφορά υλικού πριν και μετά την κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας...	[160]
Εικόνα 4.2-Φωτογραφίες του κρυστάτη για το πρωτότυπο SMES 10 MVA/20 MJ	[162]
Εικόνα 4.3-Μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος SMES	[164]
Εικόνα 4.3.1-Σχηματική παράσταση μιας μονάδας SMES που δείχνει τα διάφορα συστατικά και τις αλληλεπιδράσεις τους	[167]
Εικόνα 4.3.4(1)-Γενικό διάγραμμα κρυογονικού συστήματος ενός SMES συστήματος	[172]
Εικόνα 4.3.4(1)-Γενικό διάγραμμα κρυογονικού συστήματος ενός SMES συστήματος	[173]
Εικόνα 4.4.1-Μια τυπική σύνδεση μονάδας SMES της οποίας η ενεργός και η άεργος ισχύς μπορούν να διαμορφωθούν για τη μείωση της ταλάντωσης	[177]
Εικόνα 4.4.3-Διαμόρφωση για τη βελτίωση του FACTS σε ένα ισοδύναμο σύστημα δύο μηχανών	[179]
Εικόνα 4.4.4-Ένα τυπικό σύστημα με SMES για εφαρμογή εξισορρόπησης κυμαινόμενου φορτίου	[180]

Εικόνα 4.6(1)-Ανάπτυξη της αγοράς υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας (SMES)	[187]
Εικόνα 4.6(2)-SMES 1-MJ/0,5-MVA που ενσωματώνει σύρμα Bi-2223.Υποσταθμός Baiyan στην επαρχία Gansu από το 2011	[188]
Εικόνα 5.1(1)-Μεταβολή της ενεργειακής χωρητικότητας, της αυτοεκφόρτισης και της εσωτερικής αντίστασης μιας μπαταρίας υδριδίου νικελίου-μετάλλου (6V, 950 mA) με τον αριθμό των κύκλων	[193]
Εικόνα 5.1(2)-Διαγράμματα που αναπαριστούν την επίδραση του ρεύματος ή του χρόνου εκφόρτισης, καθώς και την επίδραση της αυτοεκφόρτισης σε στην απόδοση του ηλεκτροχημικού συσσωρευτή.....	[194]
Εικόνα 5.1(3)-Απόδοση ισχύος μιας μπαταρίας μολύβδου	[195]
Εικόνα 5.1(4)-Εξέλιξη της ικανότητας ανακύκλωσης ως συνάρτηση του βάθους εκφόρτισης για μια μπαταρία μολύβδου-οξέος	[196]
Εικόνα 5.1(5)-Πεδία εφαρμογής των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης ανάλογα με την αποθηκευμένη ενέργεια και την παραγόμενη ισχύ	[198]
Εικόνα 5.2-Δείκτης απόδοσης για τις εννέα τεχνολογίες αποθήκευσης για τις τέσσερις κατηγορίες εφαρμογών	[200]
Εικόνα 5.2.1-Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με το πεδίο εφαρμογής τους	[201]
Εικόνα 5.2.2-Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με την ενεργειακή απόδοση και το προσδόκιμο ζωής	[202]
Εικόνα 5.2.3-Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με το κόστος επένδυσης ανά μονάδα ισχύος ή ανά μονάδα ενέργειας	[203]
Εικόνα 5.2.4-Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με το κόστος επένδυσης που υπολογίζεται ανά κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης	[204]
Εικόνα 5.2.5-Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με τις πυκνότητες μάζας και όγκου της αποθηκευμένης ενέργειας για εφαρμογές μικρής κλίμακας	[205]
Εικόνα 5.3(1)-Σύγκριση Τεχνολογιών μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας	[212]

Εικόνες 5.3(2),(3)-Σύγκριση Τεχνολογιών χημικής αποθήκευσης ενέργειας συμβατικών μπαταριών[216]

Εικόνα 5.3.2(4)-Σύγκριση Τεχνολογιών χημικής αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών ροής[217]

Εικόνα 5.3.2(5)-Σύγκριση Τεχνολογιών ηλεκτρομαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας.....[219]

Αλφαβητικό Ευρετήριο

SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage

PHES – Pumped Hydro Energy Storage

UPS – Uninterrupted Power Supply

O&M – Operation and maintenance

VRB – Vanadium redox battery

ΑΠΕ – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Na-S – Sodium-Sulphur

DC – Direct Current

AC – Alternating Current

CAES – Compressed Air Energy System

Σ.Η.Ε – Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

RFB – Redox flow battery

VRFB – Vanadium redox flow battery

E/P – energy to power

MWh – megawatt-hour

SC – Supercapacitor

CNT – Carbon nanotubes

CP – Conducting Polymer

ZBB – Zinc bromine battery

FC – Fuel Cell

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Μέχρι τον 19ο αιώνα οι ανθρώπινες ανάγκες καλύπτονταν με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για παράδειγμα την ηλιακή ενέργεια δηλαδή με χρήση ανεμόμυλων ή όπως υδραυλική ενέργεια με χρήση νερόμυλων. Μετά όμως από τη βιομηχανική εξέγερση τα ορυκτά καύσιμα-φυσικοί πόροι της γης (πετρέλαιο, γαιάνθρακες, Φυσικό αέριο) αποτέλεσαν την βασική μορφή ενέργειας για την κοινωνία και την οικονομία της ανθρωπότητας. Το ενεργειακό ζήτημα ξεκίνησε πολύ καιρό πριν και οι πηγές του προβλήματος είναι τα παρακάτω.

Η πολύ έντονη ανάπτυξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με τη συνεχή αύξηση του πληθυσμού στη γη είχε ως αποτέλεσμα αυξημένες απαιτήσεις για κατανάλωση της ενέργειας. Αυτό είναι ένα γεγονός το οποίο μπορεί ο κάθε άνθρωπος να αντιληφθεί αν σκεφτεί τον αριθμό των συσκευών που χρησιμοποιεί στο σπίτι του και απαιτεί ενέργεια για να λειτουργήσει (κλιματισμός, υπολογιστές, τηλεόραση, κουζίνα). Όλα τα παραπάνω καλύπτονται σε ένα ποσοστό 85% από τον ορυκτό πλούτο της γης ο οποίος δεν θα υπάρχει για πάντα. Σε αυτό τον πλούτο που αναφέρθηκε πρόσβαση δεν έχουν όλες οι χώρες επομένως αυτές οι χώρες που δεν έχουν πρόσβαση πρέπει να κάνουν εισαγωγή γεγονός που έχει ως έκβαση τις έντονες διακυμάνσεις στις τιμές των ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, η χρήση των ορυκτών καυσίμων πέρα από την άνεση που δίνει στην ενέργεια δημιουργεί και πολλά πρόβλημα τα οποία έχουν καταστρεπτικές συνέπειες όχι μόνο στο οικοσύστημα και στην υγεία των ανθρώπων αλλά και γενικότερα στη διαβίωση του. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί το θέμα των ενεργειακών αποθεμάτων της γης. Τα τελευταία 100 χρόνια η ανθρωπότητα έχει καταναλώσει ένα μεγάλο μέρος των πρώτων υλών και πηγών ενέργειας του πλανήτη και συνεχίζεται να καταναλώνεται με ραγδαίους ρυθμούς αποθέματα συμβατικών καυσίμων. Για να κατανοηθεί η σοβαρότητα της κατάστασης αρκεί να εξετάσει κάποιος ότι και να βρεθεί στο μέλλον χιλιαπλάσιο των αποθεμάτων τους με το ρυθμό κατανάλωση ενέργειας σήμερα θα παρατείνουν για περίπου ακόμα 150 χρόνια τον “ενεργειακό χειμώνα” που επέρχεται στη γη. Έπειτα από έρευνα το 60% των ενεργειακών αποθεμάτων καταναλώνεται από τις πλούσιες χώρες ενώ το υπόλοιπο 40% καταναλώνεται από τις υπόλοιπες χώρες. Ένα ερώτημα λοιπόν που τίθεται λοιπόν είναι ότι αν οι χώρες που δεν έχουν φτάσει λόγω περιορισμένης ανάπτυξης την κατανάλωση των υπολοίπων χωρών τι θα γίνει όταν το επίπεδο ανάπτυξης τους συμβαδίζει με το μέσο επίπεδο ανάπτυξης; Η απάντηση σε αυτό είναι ότι αυτό θα επιφέρει καταστροφικές συνέπειες για τον πλανήτη καθώς θα κατά ποιόν όλη την ενέργεια του πλανήτη οι χώρες αυτές τα προβλήματα του οικοσυστήματος θα αυξηθούν σε βαθμό μόλυνσης του περιβάλλοντος όπου θα είναι επικίνδυνο πλέον για κάθε ζωντανό οργανισμό και θα φτάσουμε σε ένα σημείο όπου θα χαθούν πράγματα που θεωρούνται δεδομένα σήμερα, όπως τη θέρμανση και

οτιδήποτε άλλο χρησιμοποιείται στην καθημερινότητά του ανθρώπου για την δική άνεση του δεν θα λειτουργεί.

Το ενεργειακό πρόβλημα αυτό στην χώρα μας είναι ακόμα πιο έντονο και έχει έναν μεγάλο ρόλο στην πτώση της οικονομίας μας. Αυτό οφείλεται στην εξάρτηση της Ελλάδας από την εισαγόμενη μη ανανεώσιμη ενέργεια καθώς και της χαμηλής απόδοσης στον ενεργειακό κλάδο το οποίο συνεπάγεται και υψηλό κόστος για τα παραγόμενα προϊόντα κατανάλωσης ενέργειας. Επιπροσθέτως αυτή η εξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα καθιστούν την Ελλάδα επιβλαβή προς το περιβάλλον. Το πετρέλαιο καλύπτει το 50% των ενεργειακών αναγκών όσον αφορά τη βιομηχανία, καθώς στον οικιακό και τριτογενή τομέα το 37% των καταναλωτικών αναγκών καλύπτεται από την ηλεκτρική ενέργεια το πετρέλαιο και η βιομάζα έχουν ποσοστό 51% και 12% αντίστοιχα. Βασική παραγωγή στην Ελλάδα είναι ο λιγνίτης του οποίου τα περισσότερα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα υπάρχουν στην περιοχή της Πτολεμαΐδας, της Φλώρινας, του Αμύνταιου, της Δράμας, της Ελασσόνας και στην Πελοπόννησο. Τα παραπάνω κοιτάσματα με βάση τις μελέτες και τα αποθέματα που έχουμε θα καλύψουν τις καταναλωτικές ανάγκες της ανθρωπότητας για ακόμα 60 με 100 χρόνια. Η Ελλάδα επίσης έχει αξιόλογο δυναμικό σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας των οποίων ένα μεγάλο ποσοστό παραμένει ανεκμετάλλευτο. Ωστόσο πλέον η εκμετάλλευση του ηλιακού δυναμικού μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ ή του αιολικού δυναμικού μέσω ανεμογεννητριών έχει φτάσει σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Παρόλα αυτά ένα μεγάλο ποσοστό βιομάζας παραμένει ανεκμετάλλευτο καθώς και γεωθεμίας η οποία είναι άφθονη στον ελλαδικό χώρο λόγω ισχυρών γεωθεμικών πεδίων σε κάποια νησιά όπως είναι η Μήλος Η Νίσυρος και στη Βόρεια Ελλάδα.

Η κλιματική αλλαγή, η προστασία του φυσικού περιβάλλοντος καθώς και η ποιότητα ζωής συνδέονται άμεσα με τον κλάδο της ενέργειας της οποίας η χρήση και η παραγωγή προκαλεί σε ένα ποσοστό 90% ρύπανση στο περιβάλλον. Όπως αναφέρθηκε και στην περίληψη ιδιαίτερα μετά το 1973 της ενεργειακής κρίσης υπήρξε σε έντονο βαθμό η προσπάθεια στις βιομηχανικές χώρες μειώσεις συμβατικών καυσίμων είτε αυτάρκεια σε ενέργεια. Όλα αυτά είναι θέματα που όπως είπαμε προϋπήρχαν αλλά έγιναν πολύ πιο έντονα μετά την πανδημία (covid-19), καθώς το επίπεδο ενεργειακής εξάρτησης ειδικά στην Ευρώπη καθώς και η διαχείριση υψηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα από τα βασικότερα θέματα που απασχολούν την ανθρωπότητα το τελευταίο διάστημα. Πλέον η Ευρώπη αντιμετωπίζει μία πρωτόγνωρη ενεργειακή κρίση με σοβαρές επιπτώσεις στους πολίτες. Η κρίση αυτή έχει φέρει σε πολύ υψηλά επίπεδα τα κόστη της ηλεκτρικής ενέργειας του φυσικού αερίου από τα μέσα του 2021 εμποδίζοντας όχι μόνο την ανάπτυξη της χώρας αλλά και την βελτίωση ποιότητας της ζωής των ανθρώπων καθώς και τη δυσαρέσκειά τους σχετικά με αυτά τα υψηλά κόστη.

ΑΝΑΓΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ζούμε σε μία εποχή στην οποία οι νέες ενεργειακές απαιτήσεις και το προφίλ των καταναλωτών υπαγορεύουν εκτός από την παραγωγή περισσότερης ενέργειας και την αποθήκευση της άλλοτε για μικρά άλλοτε για μεγάλα διαστήματα. Ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας ορίζεται η διάταξη η οποία μπορεί να απορροφά ηλεκτρική ενέργεια από μονάδες παραγωγής ή και το δίκτυο να την αποδίδει πίσω την κατάλληλη στιγμή σύμφωνα με τις ανάγκες που υπάρχουν. Η αποθήκευση της ενέργειας (energy storage) αποτελεί τόσο μία φυσική διεργασία όσο και μία τεχνητή μέθοδο για την εξυπηρέτηση των αναγκών του ανθρώπου. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίστηκε αρχικά το 1970 με την κατασκευή των πρώτων σταθμών αντλησιοταμίευσης μεγάλης κλίμακας. Όπως προαναφέρθηκε το ενεργειακό ζήτημα γίνεται όλο και πιο έντονο στις μέρες μας γεγονός που καθιστά την εξέλιξη της αποθήκευσης ενέργειας μονόδρομο, η οποία υπάρχει σε όλες τις εργασίες του ανθρώπου. Η ενέργεια δεν μπορεί να καταστραφεί η να δημιουργηθεί παρόλα αυτά μπορεί να μετατραπεί από μία μορφή ενέργειας σε μία άλλη μέσω μιας διαδικασίας με την οποία θα έχουμε το κατάλληλο αποτέλεσμα. Πέρα από την ηλιακή ενέργεια, της οποίας πηγή είναι ο ήλιος και φτάνει στην επιφάνεια της γης περίπου το 50% της αρχικής ηλιακής ακτινοβολίας καθώς το 30% ανακλάται στην ατμόσφαιρα και το υπόλοιπο 20% απορροφάται από αυτήν, για τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας του βασική πηγή ενέργειας θα είναι πάντα το περιβάλλον όπου γίνεται η αποθήκευση. Μέχρι και σήμερα έχουν βρεθεί και έχουν αναρτηθεί πολλές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας κάποιες από τις οποίες βρίσκονται σε ένα πολύ προχωρημένο στάδιο τεχνολογικά ενώ άλλες βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Η ραγδαία εξέλιξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με με την πηγή τους η οποία βρίσκεται σε αφθονία στην χώρα μας καθιστά τον τρόπο αποθήκευσης ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως μία πολύ σημαντική λύση απέναντι στο ενεργειακό πρόβλημα. Επιπλέον οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν έναν κλάδο ο οποίος βρίσκεται σε συνεχή εξέλιξη και δεν σταματάει να ερευνάται για τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Η χώρα μας λόγω της γεωγραφίας και του κλίματος παρέχει πολύ ισχυρά καύσιμα για τη μέθοδο αυτή κυρίως από τα νησιά μας (άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία) ενισχύει και δίνει κίνητρο για την ανάπτυξη αποθήκευση ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την καθιστά επικερδή σε διάφορους τομείς. Ωστόσο, όπως είναι γνωστό η ενέργεια και κυριότερα ηλεκτρική ενέργεια παίζει καταλυτικό ρόλο στην ανάπτυξη της οικονομίας αλλά κυρίως στη διαβίωση για την εξυπηρέτηση των ανθρώπινων αναγκών. Αυτό το γεγονός έχει ως αποτέλεσμα ότι οι ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια είναι υψηλά απαιτητικές και σταθερές που σημαίνει ότι η αποθήκευση ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν μπορεί να τις καλύψει μόνη της, καθώς αυτή η μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας στηρίζεται κυρίως στα μετεωρολογικά φαινόμενα τα οποία δεν έχουν σταθερή απόδοση καθόλη τη διάρκεια του χρόνου, όπως για παράδειγμα η ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας εξαρτάται από τις

καιρικές συνθήκες που επικρατούν ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας βρίσκεται σε μηδενικά επίπεδα, άρα εύκολα συμπεραίνεται ότι είναι πολύ πιθανό να μην μπορούν να καλυφθούν σταθερές ενεργειακές απαιτήσεις σε ένα χρονικό διάστημα έτους. Για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά πάνελ εκμεταλλεύονται την ηλιακή ακτινοβολία η οποία κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι αδύναμη ενώ αντίστοιχα οι ανεμογεννήτριες εκμεταλλεύονται την ένταση του ανέμου η οποία δεν είναι σταθερή καθόλη τη διάρκεια ενός χρονικού έτους. Επομένως οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας έχουν το μειονέκτημα αυτό της ανισοροπίας το οποίο είναι ότι άλλοτε μπορεί να υπάρχει περίσσεια ενέργειας οπότε πρέπει αυτή η περίσσεια κάπου να αποθηκευτεί κι άλλοτε μπορεί να υπάρχει έλλειμμα ενέργειας και να μην είναι διαθέσιμη όση ενέργεια απαιτείται. Η αποθήκευση ενέργειας λοιπόν δίνει τη λύση για την εξισορρόπηση και συμβάλλει στη δημιουργία ενός αξιόπιστου και σταθερού συστήματος δικτύου. Για παράδειγμα τις στιγμές όπου η παραγωγή υπερτερεί της κατανάλωσης όπως είναι τις πρωινές ώρες κατά τις οποίες η ηλιοφάνεια είναι μεγάλη ενώ συγχρόνως οι απαιτήσεις για το ρεύμα είναι πολύ μικρότερες από το βράδυ, η ηλεκτρική ενέργεια αυτή που περισσεύει θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ενώ στο άλλο σκέλος, τη νύχτα τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν παράγουν καθόλου ηλεκτρική ενέργεια καθώς και στις ώρες όπου η ένταση του ανέμου είναι πολύ χαμηλή, επομένως έχουμε απειροελάχιστη παραγωγή ρεύματος, η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την προσφορά. Η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας υπάρχει εδώ και πολύ καιρό καθώς θερμικές μονάδες δεν είναι ευέλικτες και ανά περιόδους η ενέργεια που παράγουν μπορεί να ξεπερνάει αυτή τη ζήτησης.

Ένα μεγάλο πρόβλημα που παρουσιάζει η ηλεκτρική ενέργεια είναι ότι η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων μπορεί να είναι δύσκολη σε ορισμένες περιπτώσεις και μπορεί να είναι αντιοικονομική ανάλογα με τις εφαρμογές που πρέπει να υλοποιήσουμε για την αποθήκευση της. Επειδή σε γενικές γραμμές σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε) η ενέργεια που παράγεται δεν μπορεί να αποθηκευτεί ηλεκτρικά απαιτείται η ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων που μετατρέπουν την ενέργεια που παράγεται σε άλλη μορφή ενέργειας προκειμένου να γίνει αποθήκευση της με λιγότερη δυσκολία. Έτσι είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ένα πλεονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι το γεγονός ότι μετατρέπεται με αρκετά καλή απόδοση σε κάποια άλλη μορφή η οποία προφανώς μπορεί να αποθηκευτεί με λιγότερη δυσκολία. Συνεπώς η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ηλεκτρομαγνητικά, ηλεκτροχημικά και υπό μορφή κινητικής και δυναμικής ενέργειας. Είναι κατανοητό λοιπόν πως η κατασκευή σταθμών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και οι συνεχείς έρευνες και αναπτύξεις νέων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι πολύ σημαντικές καθώς δίνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας παραγόμενης ενέργειας η οποία δεν καταναλώνεται να αποθηκεύεται σε άλλη μορφή. Επιπρόσθετα τα συστήματα αποθήκευσης παρέχουν βοήθεια στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό να γίνει

μείωση των λειτουργικών δαπανών. Δηλαδή στηρίζουν την παροχή επικουρικών υπηρεσιών οι εφεδρείες ενέργειας. Οι κύριες υπηρεσίες διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Ρύθμιση της συχνότητας για αυτόνομες μονάδες.
- Στρεφόμενη εφεδρεία για προσωρινή υποστήριξη παραγωγής.
- Έλεγχος τάσεως του δικτύου.
- Επανεκκίνηση του συστήματος.

Πέρα από αυτά τα οφέλη που προσφέρει η αποθήκευση ενέργειας στη μεταφορά και στη διανομή έχουμε και το πλεονέκτημα της ευστάθειας του συστήματος. Επιπλέον η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να καλύψει τις στιγμές όπου υπάρχει διακοπή ρεύματος αλλά και μειώνοντας την παραγόμενη ενέργεια στις ώρες αιχμής κατά τις οποίες το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας έχει υψηλά επίπεδα.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Το ενδιαφέρον της ενεργειακής αποθήκευσης επικεντρώνεται στην αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας της οποίας η μεταφορά είναι εύκολη σε μεγάλες αποστάσεις. Όπως προαναφέρθηκε για την αποτελεσματική αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας επειδή οικονομικά δεν είναι εφικτή η απευθείας αποθήκευση της πρέπει να γίνει πρώτα μέσω μετατροπής της σε μία άλλης μορφής ενέργειας και έπειτα να ξανά μετατραπεί πάλι σε ηλεκτρική ενέργεια. Σύμβολο αυτής της κυκλικής διαδικασίας είναι το 'ξ'. Η απαραίτητη συνθήκη έτσι ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμη η αποθήκευση ενέργειας για μερικές από τις παραπάνω εφαρμογές παραλείποντας το κόστος εγκατάστασης της είναι:

$$\xi > \frac{Cost_{high}}{Cost_{low}}$$

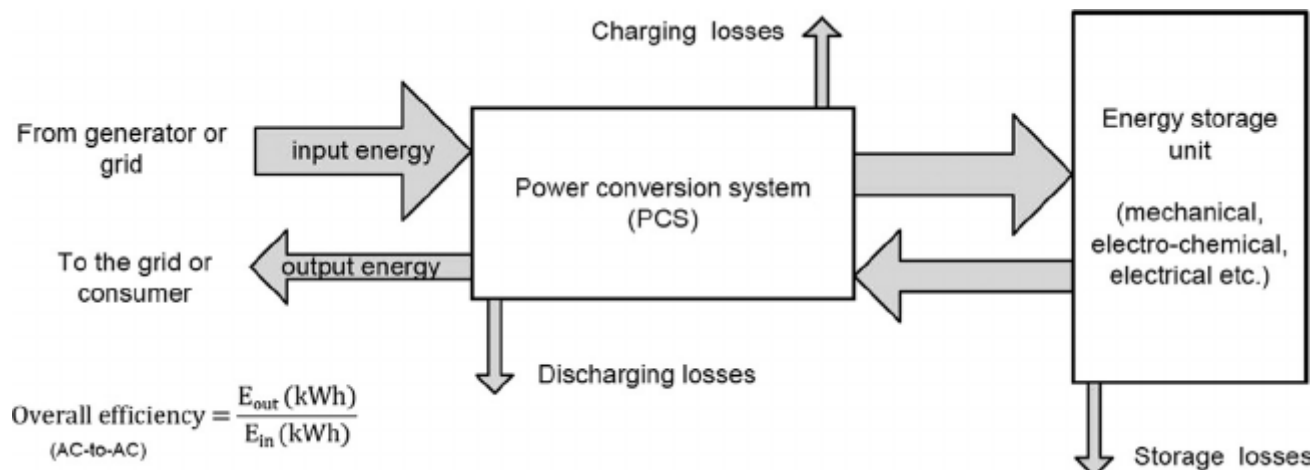
Όπου έχουμε ότι:

Cost_{low}: το κόστος για την αποθήκευση ενέργειας και

Cost_{high}: το όφελος από την χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας

Προκειμένου να θεωρηθεί οικονομικώς βιώσιμη η εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να ισχύει ότι η ωφέλεια από την αποθήκευση ενέργειας είναι τέτοια χάρη στην οποία θα αποπληρώνεται σε χρονικό διάστημα σε λογικά πλαίσια η επένδυση για την προμήθεια καθώς και τη συντήρηση της αποθηκευτικής διάταξης.

Ένα προφανές συμπέρασμα είναι ότι κατά την κυκλική αυτή διαδικασία μετά από τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλη μορφής ενέργειας και μετέπειτα τη μετατροπή αυτής της ενέργειας ξανά σε ηλεκτρική θα υπάρχουν σίγουρα απώλειες, επομένως ακολουθεί ένα σχεδιάγραμμα για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας αποθήκευσης ενέργειας καθώς και των απωλειών που υπάρχουν κατά τη διαδικασία αυτή.



Εικόνα 1(1)- Απώλειες αποθήκευσης ενέργειας (πηγή : <https://www.researchgate.net/profile/Behnam-Zakeri/publication/281277805/figure/fig1/AS:284514464092163@1444844942832/Main-sections-of-EES-systems-and-energy-losses.png>)

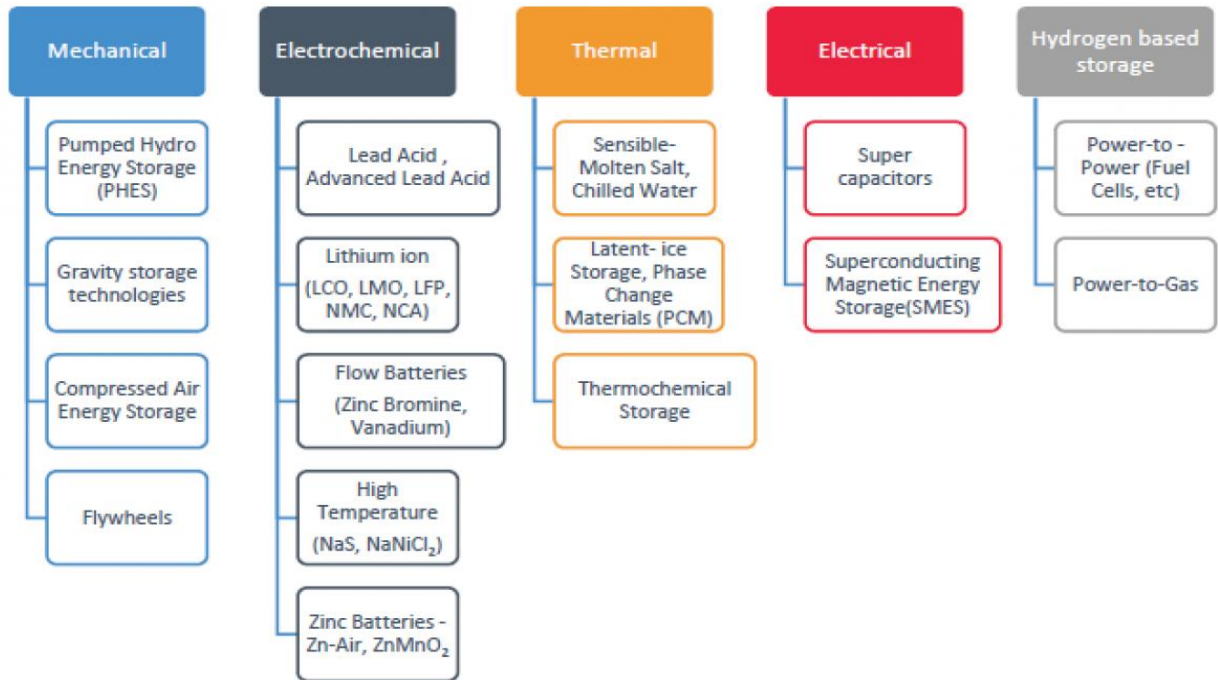
Με αυτά τα δεδομένα λοιπόν παρουσιάζεται παρακάτω μία σύνοψη των μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο διανομής μέσω δύο γραφημάτων ενώ στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθούν λεπτομερώς τρεις μέθοδοι από αυτές οι οποίες είναι αποθήκευση ενέργειας μέσω υπέρ πυκνωτών, συσσωρευτών ροής και μέσω υπεραγωγίων πηνίων.

Όλα αυτά τα αναφερόμενα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική ενέργεια και έπειτα την εκ νέου μετατροπή της ενέργειας αυτής ξανά σε ηλεκτρική. Όπως φαίνεται και με το παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές ενέργειας στις οποίες μετατρέπεται ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό να αποθηκευτεί καθώς και χαρακτηριστικά παραδείγματα διατάξεις για την οποιαδήποτε μορφή μετατροπής.

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ-ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ (BATTERIES)
- ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΕΣ (SUPER CAPACITORS)
- ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (SMES)
- ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ (PUMPED HYDRO)
- ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΑΕΡΑ (CAES)

- ΣΦΟΝΔΥΛΟΙ (FLYWHEELS)
- ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΡΟΗΣ (FLOW BATTERIES)
- ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΜΙΟΥ-FUEL CELLS)
- ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (THERMAL ENERGY STORAGE)



Εικόνα 1(2)- Διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας (πηγή :

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fenr.com%2Fstory%2Fenergy-storage-classification-of-energy-storage-technologies-an-overview&psig=AOvVaw0C3m3jHdc2bvBFw->

[CRGEjz&ust=1666785314700000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCKDp36ap- oCFQAAAAAdAAAAABAE](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fenr.com%2Fstory%2Fenergy-storage-classification-of-energy-storage-technologies-an-overview&psig=AOvVaw0C3m3jHdc2bvBFw-)

Τεχνολογία αποθήκευσης που χρειάζεται...	Συσσωρευτές									
	Αποθήκευση μέσω άντλησης νερού	Ιόντων λιθίου	Μολύβδου-οξέως	Οξειδοαναγωγής	Νατρίου-θειού	Υπερπυκνωτής	Κυψέλη υδρογόνου	Σφόνδυλος κινητήρα	Συμπιεσμένος ή υγροποιημένος αέρας	Αποθήκευση θερμότητας
...στο δίκτυο για...										
Εποχιακή αποθήκευση Ανάγκη: Μεγάλη δυναμικότητα αποθήκευσης, αργή έκλυση	✓						✓			
Ημερήσια αποθήκευση (μεταβαλλόμενη αιχμή της ζήτησης) Ανάγκη: Ώρες εφοδιασμού	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓
Υπηρεσίες υποστήριξης δικτύου (π.χ. απόκριση συχνότητας) Ανάγκη: Ταχεία απόκριση, εφοδιασμός από δευτερόλεπτα έως ώρες	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Οικιακές εφαρμογές Ανάγκη: Μικρή κλίμακα, μακρά διάρκεια ζωής		✓	✓	✓			✓			
...στις μεταφορές για...										
Οδικές μεταφορές Ανάγκη: Υψηλή ισχύς, χαμηλό βάρος, μικρό μέγεθος		✓				✓	✓			
Αεροπορία/ναυτιλία Ανάγκη: Υψηλή ισχύς, υψηλή ενέργεια κατ' όγκο						✓	✓			

Εικόνα 1(3)-Επισκόπηση των κύριων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας και των χρήσεών τους
(πηγή : <https://www.samaras-co.gr/wp-content/uploads/2021/10/%CE%A62-%CE%91%CE%A0%CE%9F%CE%98%CE%97%CE%9A%CE%95%CE%A5%CE%A3%CE%97-%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%95%CE%99%CE%91%CE%A3.png>)

Οι διατάξεις αυτές της ενεργειακής αποθήκευσης είναι διαφορετικών τύπων και αυτό είναι οφθαλμοφανές εφόσον κάθε διάταξη απαντάει σε διαφορετικά και ιδιαίτερα τεχνικά καθώς και οικονομικά κριτήρια τα οποία μεταβάλλονται αναλόγως των απαιτήσεων και των εφαρμογών για τις οποίες προορίζονται. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως είναι αρκετά δύσκολη η σύγκριση των τεχνολογιών αυτών καθώς τα επίπεδα ανάπτυξη τους είναι διαφορετικά μεταξύ τους. Παρόλα αυτά οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να διαιρεθούν σε τρεις κατηγορίες σύμφωνα με την κλίμακα αποθήκευσης καθώς και την εφαρμογή τους.

Διατάξεις Βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης: Αυτές οι διατάξεις χρησιμοποιούνται σε τυπικές εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής και η ιδιότητά τους είναι ότι προσφέρουν ή απορροφούν ενέργεια για ένα απειροελάχιστο χρονικό διάστημα το οποίο κυμαίνεται μεταξύ λίγων δευτερολέπτων ή μέχρι μερικών λεπτών. Κάποια τυπικά παραδείγματα εφαρμογής τους είναι η τροφοδοσία αδιάλειπτης παροχής ισχύος και ευστάθειας λειτουργίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε).

Διατάξεις Μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης: Πρόκειται για διατάξεις των οποίων η λειτουργία κυμαίνεται μεταξύ μερικών λεπτών έως και μερικών ωρών. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι η διαχείριση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η υποστήριξη της παροχής στρεφόμενης εφεδρείας καθώς και η διαχείριση παρεχόμενης ισχύος στους καταναλωτές.

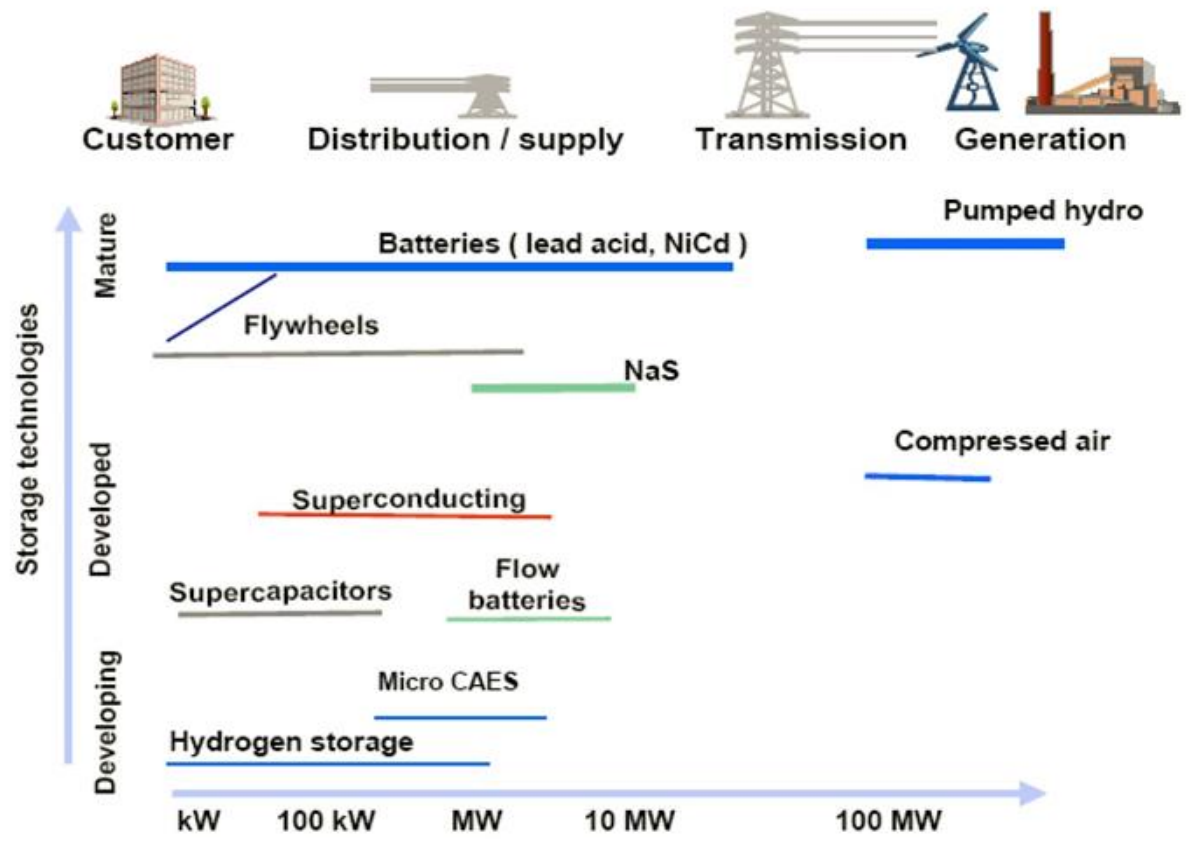
Διατάξεις Μακροπρόθεσμης αποθήκευσης: Εδώ πρόκειται για μεγάλες διατάξεις οι οποίες κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται σε κεντρικές εγκαταστάσεις έχοντας την ιδιότητα να αποθηκεύουν

και να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για διαστήματα από αρκετών ωρών μέχρι εβδομάδες ή και μήνες. Κυρία χρήση τους είναι η εξομάλυνση της ζήτησης μεταξύ ωρών αιχμής και μη αιχμής καθώς και ικανοποίηση ζήτησης αιχμής έχοντας αποθηκεύσει ενέργεια σε διαστήματα χαμηλής ζήτησης.

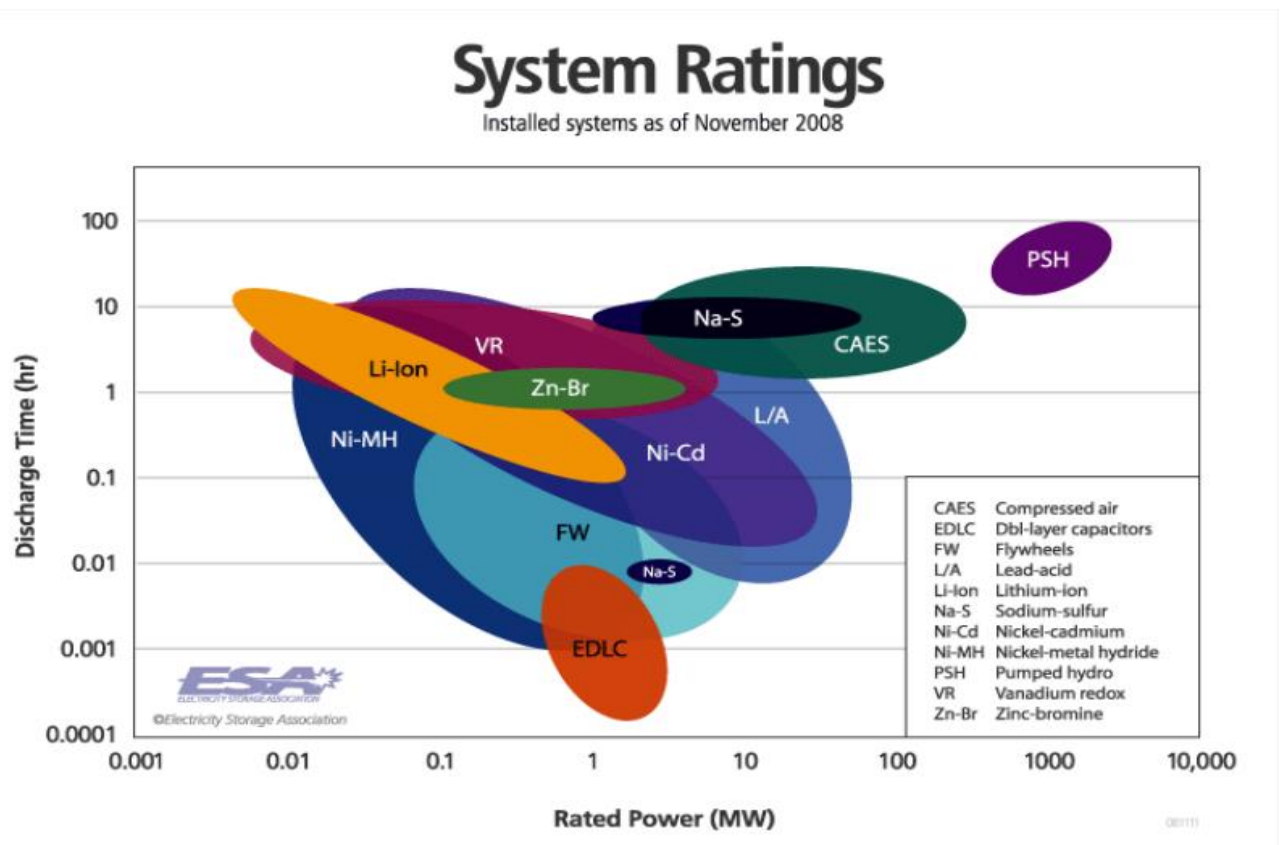
Μπαίνοντας σε μεγαλύτερο βάθος, οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο σε μικρής κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές βελτίωσης ποιότητας ισχύος. Οι διατάξεις αυτές βοηθούν στην βελτίωση ποιότητας ισχύος στα ηλεκτρικά συστήματα και επιπλέον στη διατήρηση σταθερής τάσης κατά την ενεργειακή συνεισφορά σε περιστάσεις βυθίσεων ή κυματισμών οι οποίες διαρκούν για λίγα δευτερόλεπτα ή μερικά λεπτά. Σε αυτή την κατηγορία των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας ανήκουν οι σφόνδυλοι (Flywheels), οι υπερπυκνωτές (supercapacitors) και τα υπεραγωγία μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης (superconducting magnetic energy storage, SMES).

Έπειτα υπάρχει η διάταξη μακροπρόθεσμης ενεργειακής αποθήκευσης οι οποίες είναι διατάξεις που παίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο σε μεγάλης κλίμακας συστήματα και είναι χρήσιμες σε εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίων αλλά και για αποθέματα αιολικής ενέργειας μεγάλης χωρητικότητας. Όπως αναφέρθηκε αυτές οι διατάξεις έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης καθώς και να συντελούν ειδικότερα στη διαχείριση της ενέργειας, τη ρύθμιση της συχνότητας αλλά και τη διαχείριση συμφόρησης στο δίκτυο. Εντάσσονται οι συσσωρευτές ροής (flow batteries), τα συστήματα αντλησιοταμίευσης (pumped storage systems), τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (compressed air energy storage systems) και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου (hydrogen energy storage technologies).

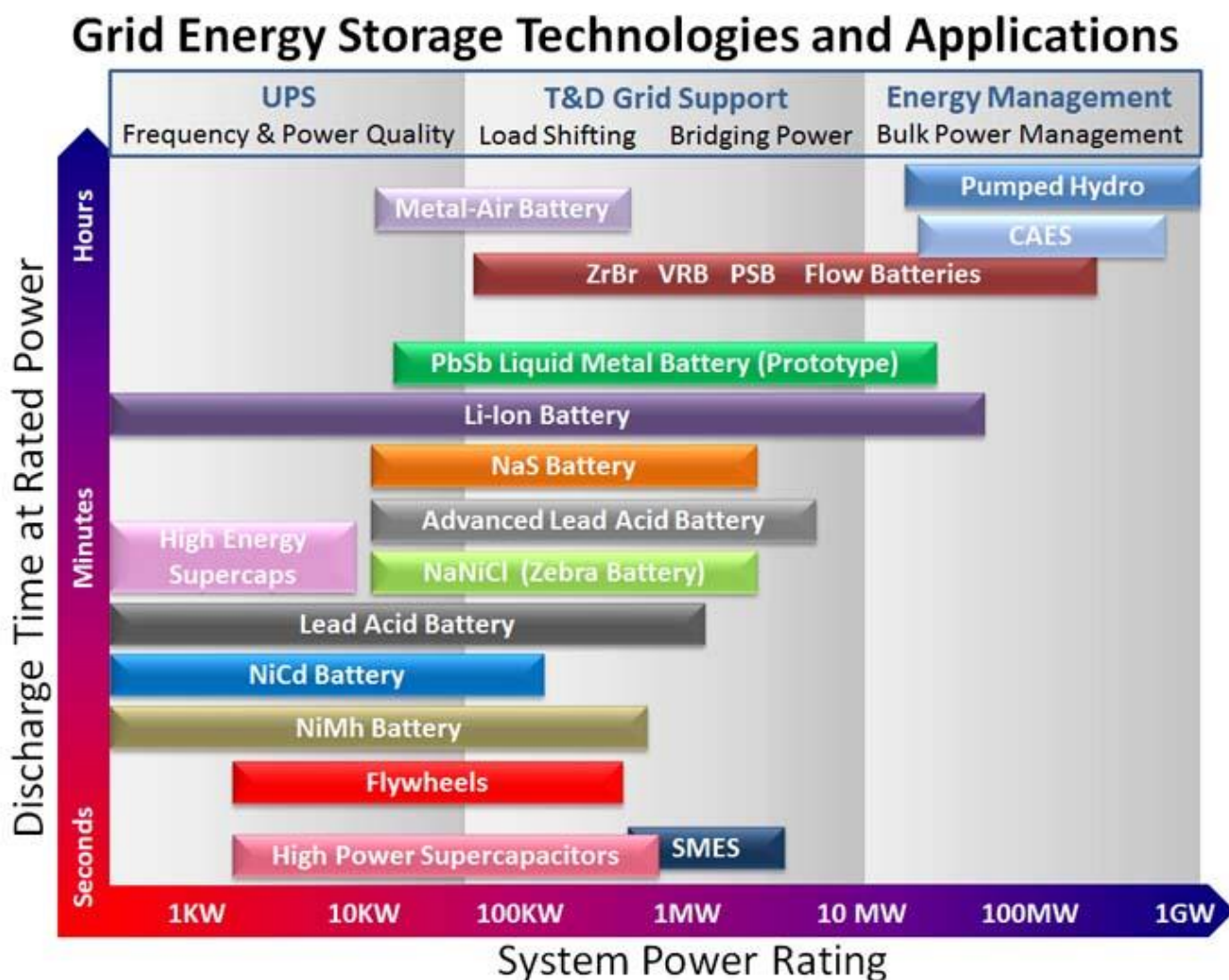
Αναλόγως λοιπόν την εφαρμογή απαιτείται και μία αποθηκευτική διάταξη με τις κατάλληλες ιδιότητες. Για να οριστεί ποιο αποθηκευτικό μέσο είναι κατάλληλο για την εκάστοτε περίπτωση εφαρμογής θα χρειαστεί να γίνει μία εξέταση μιας μεγάλης γκάμας αποθηκευτικών διατάξεων. Τα δύο παρακάτω γραφήματα λοιπόν παρουσιάζουν συνοπτικά την καταλληλότητα διαφόρων αποθηκευτικών διατάξεων για εφαρμογές ισχύος και ενέργειας καθώς και για τις συνηθισμένες τους εφαρμογές. Το σχήμα 1(εικόνα 1 (4)) αποτελεί ένα σχετικό διάγραμμα για τα τυπικά μεγέθη των αποθηκευτικών διατάξεων, των τυπικών εφαρμογών τους καθώς και την ωριμότητα τους. Απο την άλλη μεριά δίνονται τα σχήματα 2 και 3(εικόνες 1(5) και 1(6)) τα οποία παρουσιάζουν την καταλληλότητα των διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης αναλόγως του χρονικού ορίζοντα και της ισχύος τους.



Εικόνα 1 (4)- Μέγεθος, εφαρμογές και τεχνολογική ωριμότητα των διαφόρων πηγών αποθήκευσης. (πηγή : https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTffcvuCmwcwvOtpw_CGRxyK-8zadLcTIRofMCd8oexxkaw_24-vFZtYbZ5wTp2OfVbIiA&usqp=CAU)



Εικόνα 1 (5)- Καταλληλότητα διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα και την ισχύ τους (πηγή : <https://www.researchgate.net/profile/Ghulam-Bhutto-2/publication/280447307/figure/fig1/AS:669466237091852@1536624597942/Comparison-of-electricity-storage-technologies-based-on-rated-power-and-storage-duration.png>)



Εικόνα 1(6): Καταλληλότητα διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα και την ισχύ τους (πηγή : https://www.mpoweruk.com/images/storage_technologies.jpg)

1.1 Σκοπός και στόχοι

Στόχος και σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι σε πρώτο στάδιο η κατανόηση του προβλήματος που επικρατεί σχετικά με το ενεργειακό πρόβλημα στις μέρες μας και της σημασίας της αποθήκευσης ενέργειας και των διατάξεων που περιλαμβάνει. Σε δεύτερη φάση γίνεται αναλυτική παρουσίαση τριών συγκεκριμένων μεθόδων οι οποίες είναι η αποθήκευση ενέργειας μέσω υπερπυκνωτών, συσσωρευτών ροής και τεχνολογιών μαγνητικού πεδίου με σκοπό να ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ανδρεάδης Μάριος

καταλάβει ο αναγνώστης ότι υπάρχουν πολλά περιθώρια ανάπτυξης αυτών των μεθόδων. Τελικός προορισμός είναι, έχοντας παρουσιάσει μια πληθώρα ερευνών και μελετών να γίνει σύγκριση διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, αλλά και των τριών που αναλύθηκαν έτσι ώστε να διεξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα και οι προοπτικές για τις μελλοντικές τους εξελίξεις.

1.2 Μεθοδολογία

1^η Φάση: Ξεκινώντας εισαγωγικά αναλύεται το ζήτημα της ενεργειακής ανάγκης που αυξάνεται όλο και περισσότερο στις μέρες μας λόγω των αυξανόμενων ανθρώπινων αναγκών χρησιμοποιώντας στατιστικές έρευνες και μελέτες.

2^η Φάση: Επιπλέον στην εισαγωγή μετά το ενεργειακό ζήτημα ακολουθεί και η συνοπτική ανάλυση της αποθήκευσης ενέργειας. Δηλαδή εξηγείται η έννοια της, ο τρόπος λειτουργίας της καθώς και οι διατάξεις που περιλαμβάνει η αποθήκευση ενέργειας .

3^η Φάση: Προχωρώντας ακολουθεί η ανάλυση της πρώτης τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας η οποία είναι οι υπερπυκνωτές (supercapacitors). Η ανάλυση εμπεριέχει ιστορική ανδρομή, ανάλυση δομής, τεχνικά χαρακτηριστικά, υλικά ηλεκτροδίων και τρόπου λειτουργίας για την καλύτερη κατανόηση των συσκευών αυτών. Κλείνοντας περιγράφονται οι εφαρμογές τους καθώς και τα κόστη που υπάρχουν στο εμπόριο.

4^η Φάση: Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η επόμενη μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας, οι συσσωρευτές ροής (flow batteries). Ακολουθώντας ίδια λογική παρουσιάζονται αρχικά οι συμβατικές μπαταρίες και η ιστορία τους για την καλύτερη κατανόηση. Συνεχίζοντας αναλύονται οι τύποι συσσωρευτών ροής, οι εφαρμογές τους και τα κόστη που υπάρχουν στην αγορά.

5^η Φάση: Εδώ περιγράφεται η τελευταία μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας, τεχνολογίες μαγνητικού πεδίου ή υπεραγώγιμα πηνία (SMES). Η περιγραφή έχει για αρχή την εξήγηση λειτουργίας τους, δομής τους και των κατασκευαστικών μερών του συστήματος. Διατηρώντας την ίδια φιλοσοφία θα κλείσει το κεφάλαιο με την αναφορά στις εφαρμογές τους, τα κόστη τους, εμπορική δραστηριότητα και μελλοντική εξέλιξη.

6^η Φάση: Μετά την ανάλυση των τριών μεθόδων που προαναφέρθηκαν είναι λογικό ότι θα γίνει μια σύγκριση μεταξύ τους. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται εξήγηση των κριτηρίων με τα οποία πρέπει να γίνει η σύγκριση των μεθόδων και κλείνοντας με τη βοήθεια πινάκων και σκιαγραφημάτων παρουσιάζεται αναλόγως τον προορισμό ποια τεχνολογία είναι αποδοτικότερη.

7^η Φάση: Τέλος ακολουθούν τα συμπεράσματα και οι προοπτικές κάθε μεθόδου. Αυτά τα συμπεράσματα θα βγούν με βάση το κεφάλαιο της 6^{ης} φάσης (5^ο κεφάλαιο) .

1.3 Καινοτομία

Στη διπλωματική εργασία αυτή έγινε ανάλυση της σημασίας της αποθήκευσης ενέργειας στις μέρες μας για την Ελλάδα και αναλύθηκαν με βάση πολλών ερευνών και μελετών οι τρεις μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας που εμπεριέχει και ο τίτλος της διπλωματικής (αποθήκευση ενέργειας μέσω υπέρπυκνωτών, μέσω συσσωρευτών ροής και τεχνολογιών μαγνητικού πεδίου). Η διπλωματική αυτή αποτελεί μία καινοτόμα έρευνα καθώς είναι η μοναδική που μελετάει σε ένα τόσο μεγάλο βάθος τις τρεις συγκεκριμένες μεθόδους χρησιμοποιώντας δεδομένα και πληροφορίες από πολλές πηγές τα οποία καλύπτουν χρονικό διάστημα δέκα ετών. Δηλαδή η εργασία αυτή χρησιμοποιεί τα παλιά δεδομένα σε συνεργασία με τα σημερινά για την ανάλυση και τις προοπτικές των μεθόδων αυτών.

1.4 Δομή

Η παρούσα εργασία είναι βιβλιογραφική η οποία αποτελείται από έξι κεφάλαια στηρίζοντας όλες τις πληροφορίες στη βιβλιογραφία και έμπιστες πηγές κυρίως μέσω του διαδικτύου.

Όπως αναφέρθηκε η διπλωματική αυτή εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια και η δομή της που θα ακολουθηθεί θα είναι η εξής:

Ξεκινώντας με τη διπλωματική το πρώτο μέρος περιλαμβάνει μία περίληψη για το τι πραγματεύεται με σκοπό να εντάξει τον αναγνώστη στο πρόβλημα για το οποίο προορίζεται η διπλωματική αυτή να ανταποκριθεί με μία λύση. Συνεχίζοντας η περίληψη αυτή μεταφράζεται στην Αγγλική γλώσσα και τελειώνοντας το πρώτο κομμάτι της εργασίας έχουμε τον πίνακα περιεχομένων στον οποίο περιέχονται τα παρακάτω κεφάλαια.

- ➔ Κεφάλαιο 1^ο : Στο πρώτο κεφάλαιο τοποθετείται η εισαγωγή η οποία ξεκινώντας δίνει μία σαφή εικόνα σχετικά με το ενεργειακό ζήτημα που επικρατεί στις μέρες μας και συνεχίζοντας με τη βοήθεια του ενεργειακού ζητήματος τονίζεται η ανάγκη για την αποθήκευση της ενέργειας. Τελειώνοντας από την εισαγωγή αναφέρονται συνοπτικά όλες οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας με τη βοήθεια πληροφοριών και γραφημάτων. Έπειτα ακολουθούν οι στόχοι που έχει αυτή η εργασία, η μεθοδολογία που έλαβε μέρος, η καινοτομία που υπάρχει στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και τέλος η δομή της.
- ➔ Κεφάλαιο 2^ο : Το δεύτερο κεφάλαιο έχει πλήρη ανάλυση των υπέρπυκνωτών και της αποθήκευσης ενέργειας μέσω αυτών. Η ανάλυση ξεκινάει με την παρουσίαση των συμβατικών πυκνωτών, των ειδών τους και συνεχίζει με μια ιστορική ανδρομή αυτών. Ακολουθώντας εξηγείται τι είναι οι υπέρπυκνωτές, τα είδη τους και η λειτουργία τους με τη

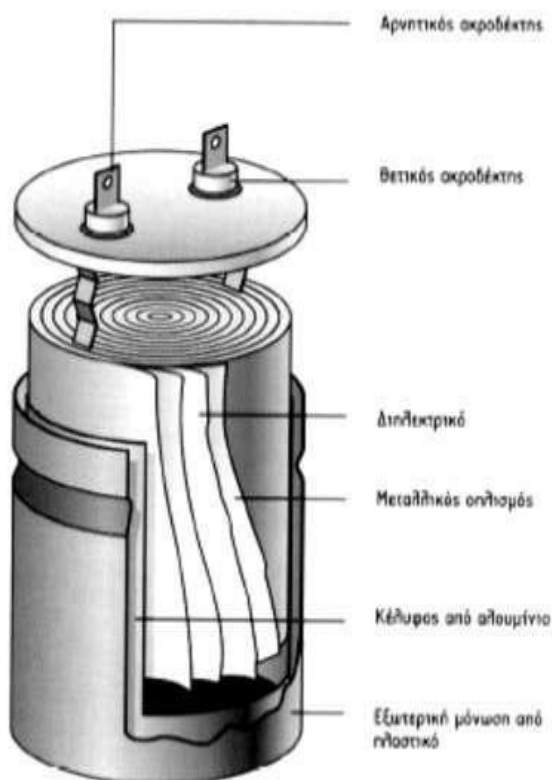
βοήθεια πολλών πληροφοριών και εικόνων. Τέλος εκμεταλλεύοντας το διαδίκτυο αναφέρονται μία-μία οι εφαρμογές τους και η διαθεσιμότητα τους και τα κόστη τους στο εμπόριο.

- ➔ Κεφάλαιο 3^ο : Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται οι συσσωρευτές ροής και η αποθήκευση ενέργειας μέσω αυτών. Έχοντας την ίδια λογική με το 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά οι συμβατικές μπαταρίες, τα είδη τους και η ιστορία τους. Μετέπειτα, ακολουθεί η ανάλυση των μπαταριών ροής, των ειδών τους (και τα πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα τους) της δομής τους και των ηλεκτροχημικών εξισώσεων που υπάρχουν. Κλείνοντας αναφέρονται οι εφαρμογές τους και τα κόστη που υπάρχουν στην αγορά.
- ➔ Κεφάλαιο 4^ο : Στο παρών κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας μέσω μαγνητικού πεδίου ή αλλιώς γνωστή ως SMES. Ξεκινώντας εισάγονται κάποιοι ορισμοί για την κατανόηση του. Εξηγείται το σύστημα αυτό, περιγράφονται τα στοιχεία απο τα οποία δομείται και αναλύεται το καθένα. Μετά φαίνονται οι διάφορες αναπτύξεις των εφαρμογών του συστήματος αυτού και τέλος αναφέρονται τα κόστη αναλόγως το μέγεθος του συστήματος.
- ➔ Κεφάλαιο 5^ο : Μετά την ανάλυση των τριών μεθόδων υπάρχει το 5^ο κεφάλαιο στο οποίο γίνεται μία σύγκριση των μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας. Πριν γίνει η σύγκριση αναλύονται τα κριτήρια με τα οποία θα έπρεπε κάποιος να κάνει την σύγκριση μεταξύ των μεθόδων. Έπειτα με την βοήθεια αρκετών γραφικών παραστάσεων, πινάκων και εικόνων στο τέλος του κεφαλαίου ο αναγνώστης έχει μια σαφή εικόνα για την χρησιμότητα της κάθε μεθόδου.
- ➔ Κεφάλαιο 6^ο : Στο 6^ο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προοπτικές των μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας. Αυτά τα συμπεράσματα πηγάζουν απο τις πληροφορίες του 5^{ου} κεφαλαίου κατά κύριο λόγο.

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΥΠΕΡ-ΠΥΚΝΩΤΕΣ

2.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Προτού αναλυθούν οι υπερπυκνωτές θα ήταν σημαντικό για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας τους και του τρόπου λειτουργίας τους να ειπωθούν λίγα λόγια για τους πυκνωτές. Οι πυκνωτές αποτελούν την πρώτη μέθοδο αποθήκευσης ενέργειας που ανακαλύφθηκε. Ως πυκνωτής ορίζεται ένα παθητικό ηλεκτρονικό στοιχείο το οποίο σε γενικές γραμμές αποτελείται από ένα ζεύγος αγώγιμων επιφανειών οι οποίες αποκαλούνται οπλισμοί και είναι χωρισμένες από διηλεκτρικό (μονωτή). Η διάταξη αυτή αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια μαζεύοντας θετικό και αρνητικό φορτίο στους οπλισμούς. Η λειτουργία τους είναι σχετικά απλή. Η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος των πλακών, την μεταξύ τους απόσταση καθώς και τις διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών που βρίσκονται ανάμεσα στις πλάκες. Το μέγεθος που χαρακτηρίζει τους πυκνωτές είναι η χωρητικότητα η οποία συμβολίζεται με το αγγλικό γράμμα C και ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας αποθηκευμένου φορτίου Q, προς την τάση V ανάμεσα των οπλισμών του πυκνωτή.



Εικόνα 2.1(1)-Συμβατικός πυκνωτής (πηγή: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fmoodle.sepiet.gr%2Fmod%2Fpage%2Fview.php%3Fid%3D383&psig=AOvVaw16IGKiqkL9I6EnkfedkLud&ust=1666698522597000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCIjp2fzl-PoCFQAAAAAdAAAAABAS>)

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι εξαρτώμενη της απόστασης d των οπλισμών του, της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ , του διηλεκτρικού καθώς και του εμβαδού S της επιφάνειας ενός οπλισμού του. Οι τρεις κομβικές σχέσεις περιγραφής ενός πυκνωτή είναι οι κάτωθι:

$$Q = C \cdot V$$

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (\text{για πυκνωτή επίπεδων οπλισμών})$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

Όπου ισχύουν:

E: είναι η ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ο πυκνωτής Q του φορτίου των οπλισμών του.

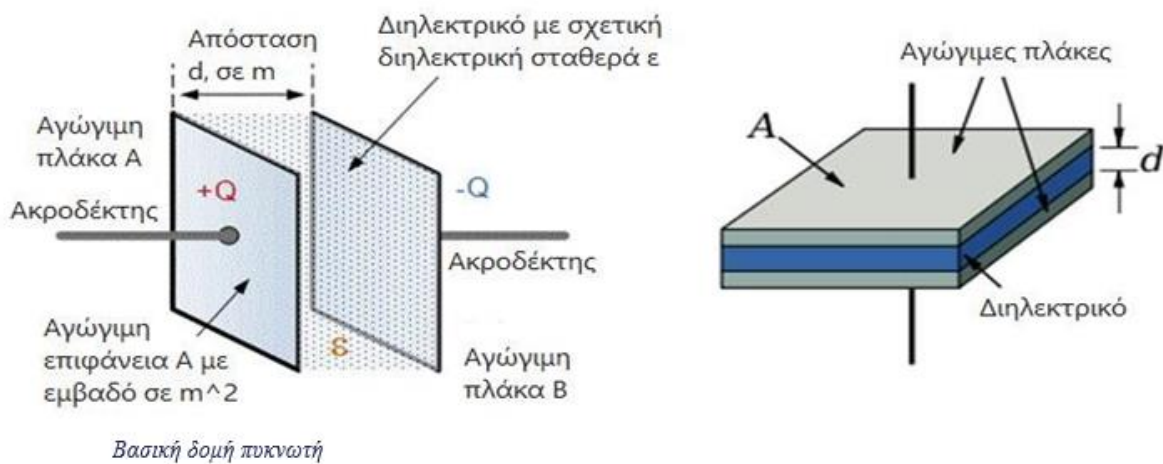
V: είναι η τάση των οπλισμών του.

Υπό ορισμένες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου κάθε μονωτής ο οποίος χρησιμοποιείται ως ηλεκτρικό μπορεί να γίνει αγωγός με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός βραχυκυκλώματος ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή καταστρέφοντας τον. Η τάση με την οποία έχουμε αυτό το φαινόμενο καλείται τάση διάσπασης. Λόγω του φαινομένου αυτού λοιπόν η μέγιστη επιτρεπτή ενέργεια που μπορούμε να αποθηκεύσουμε στον πυκνωτή χωρίς να έχουμε καταστροφικές συνέπειες περιορίζεται και πρακτικά η μέγιστη πυκνότητα ενέργειας ενός πυκνωτή είναι άμεσα εξαρτώμενη του διηλεκτρικού που χρησιμοποιείται. Σε περίπτωση χρήσης κενού ως διηλεκτρικό η ένταση διάσπασης είναι της τάξεως των 10^7 V/m. Κατά την διάρκεια κανονικής λειτουργίας οι ικανότητες του διηλεκτρικού εκδηλώνονται υπό τάση η οποία έχει τιμή κάτω αυτής της τάσης διάσπασης. Όπως είναι γνωστό πρακτικά στη φύση δεν μπορεί να βρεθεί τέλειος μονωτής, και το διηλεκτρικό στην πραγματικότητα το οποίο χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των οπλισμών του πυκνωτή άγει το ρεύμα σε ένα ελάχιστο ποσοστό. Ένας φορτισμένος πυκνωτής μετά την πάροδο ενός ικανοποιητικού χρόνου είναι ικανός να χάσει το φορτίο στα άκρα του, και ο χρόνος αυτός ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα των υλικών και της κατασκευής του.

Τελικά πρέπει να τονιστεί ότι η χωρητικότητα ενός πυκνωτή, η οποία όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι το κύριο χαρακτηριστικό μέγεθος του πυκνωτή, δεν παραμένει αμετάβλητη αναλογικά με το χρόνο αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φθίνει λόγω της σταδιακής γηραιότητας του διηλεκτρικού. Κατά το φαινόμενο αυτό, καταλυτικό ρόλο παίζουν οι συνθήκες στις οποίες βρίσκεται ο πυκνωτής όπως θα μπορούσε να είναι οι καιρικές συνθήκες αλλά και γενικά το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται ο πυκνωτής δηλαδή κατά πόσο επιτρέπεται η είσοδος της ατμόσφαιρας και της υγρασίας.

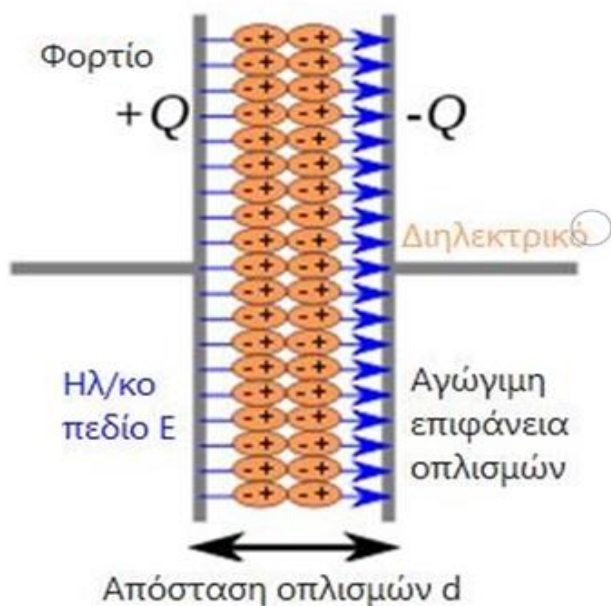
Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας ενός πυκνωτή στηρίζεται στη βασική ιδιότητα του πυκνωτή η οποία είναι η αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου δηλαδή ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού στους δύο αγωγούς, παραδείγματος χάριν όταν μία μπαταρία συνδέεται με ένα πυκνωτή αναπτύσσεται ηλεκτρικό πεδίο διαμέσου του διηλεκτρικού, έχοντας ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση ενός καθαρά θετικού φορτίου σε μία πλάκα και ενός καθαρά αρνητικού φορτίου στην άλλη πλάκα. Δεν υπάρχει διέλευση ρεύματος εντός του διηλεκτρικού παρόλα αυτά υπάρχει ροή φορτίου δια μέσω του κυκλώματος της γης. Με τη βοήθεια των παρακάτω εικόνων είναι πολύ πιθανόν να γίνει καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας ενός πυκνωτή .



Εικόνα 2.1 (2) -Δομή πυκνωτή (πηγή:

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fgr.weblogographic.com%2Fdifferencebetween ceramic&psig=AOvVaw2OEHA3cz5PXmC2czDvj_BO&ust=1666698922667000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCJDK0bvn-PoCFQAAAAAdAAAAABAN)



Εικόνα 2.1 (3)- προσανατολισμός φορτίου στον πυκνωτή(πηγή : https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fpediaa.com%2Fdifference-between-capacitor-and-inductor%2F&psig=AOvVaw22e6kE-WKaeEryfu2uROzm&ust=1666698793857000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCJik_v3m-PoCFQAAAAAdAAAAABAE)

Είδη πυκνωτών

Οι δύο κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι πυκνωτές είναι οι ακόλουθοι

- Διηλεκτρικοί.
- Ηλεκτρολυτικοί.

Οι δύο κατηγορίες αυτές ακολουθούν την ίδια φιλοσοφία στη λειτουργία τους παρόλα αυτά έχουν διαφορά ως προς την κατασκευή τους και τον τρόπο χρήσης τους.

ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Οι διηλεκτρικοί πυκνωτές αναλόγως με τη χωρητικότητά τους χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής:

- Σταθερής: Η πρώτη μεγάλη κατηγορία είναι αυτή των πυκνωτών σταθερής χωρητικότητας όπου οι πυκνωτές αυτοί χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες αναλόγως του υλικού κατασκευής τους:
 - Πυκνωτές τύπου χάρτου. Η ονομασία αυτών των πυκνωτών προέκυψε διότι το υλικό του ηλεκτρικού είναι το χαρτί.

- Πυκνωτές πλαστικής ταινίας. Όπου ακολουθώντας την ίδια λογική το όνομα αυτό προέκυψε διότι το υλικό του διηλεκτρικού τους αποτελείται από διάφορα πλαστικά υλικά όπως είναι το πολυστυρένιο, ο πολυεστέρας, το τεφλόν και το πολυπροπυλένιο.

Αναλυτικότερα τα είδη πυκνωτών πλαστική ταινία χωρίζονται ως εξής:

- Πυκνωτές πολυεστέρα (ΜΚΤ).
 - Πυκνωτές πολυστυρενίου.
 - Πυκνωτές πολυπροπυλενίου (ΜΚΡ).
 - Πολυανθρακικοί πυκνωτές.
 - Πυκνωτές τεφλόν.
- Πυκνωτές μίκας. Όπου αυτοί οι πυκνωτές χωρίζονται σε δύο τύπους οι οποίοι είναι:
- Φύλλων Μίκας.
 - Ταινίας Μίκας.

Για τον πρώτο τύπο (φύλλων Μίκας) ισχύει ότι χρησιμοποιεί ως διηλεκτρικό φυσική μίκα μικρής επιφάνειας, ενώ για τον δεύτερο τύπο (ταινίας Μίκας) ισχύει ότι χρησιμοποιείται μίκα υπό μορφή ταινίας υπό κατάλληλη επεξεργασία.

- Πυκνωτές γυαλιού. Χαρακτηριστικό αυτών των πυκνωτών είναι ότι κατασκευάζονται από μικρά ελάσματα γυαλιού και φύλλων μετάλλου, των οποίων η τεχνική θυμίζει αυτή των πυκνωτών μίκας.

- Κεραμικοί πυκνωτές. Σε αυτούς τους πυκνωτές χαρακτηριστικό είναι ότι το διηλεκτρικό είναι αποτελούμενο από κεραμικό υλικό δηλαδή από οξείδιο του ζirkονίου, από μείγματα πυριτιούχου μαγνησίου, από αλουμίνιο κτλ.

- Μεταβλητής. Σε αυτήν εδώ την κατηγορία έχουμε τους πυκνωτές οι οποίοι έχουν μεταβλητή χωρητικότητα και αυτοί οι πυκνωτές είναι απαραίτητοι σε εγκαταστάσεις όπου χρειάζεται ακρίβεια της τιμής της χωρητικότητας ενός πυκνωτή σε ένα κύκλωμα και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες οι οποίες είναι:

- Μεταβλητοί πυκνωτές.
- Ρυθμιζόμενοι πυκνωτές.

ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΙΚΟΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές έχουν σταθερή χωρητικότητα και το διηλεκτρικό είναι οξείδιο του μετάλλου της ανόδου. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αρχή της ηλεκτρόλυσης. Προκειμένου να εμφανιστεί ένα οξείδιο είναι απαραίτητο να υπάρχουν τα εξής:

- Μέταλλο της ανόδου.
- Ένας ηλεκτρολύτης.
- Κάθοδος όπου μπορεί να είναι το ίδιο ή και διαφορετικό μέταλλο με την άνοδο.

Το αλουμίνιο και το ταντάλιο είναι τα οξείδια που χρησιμοποιούνται συνήθως. Έτσι διακρίνονται οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές σε δύο κατηγορίες:

- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αλουμινίου.
- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τανταλίου.

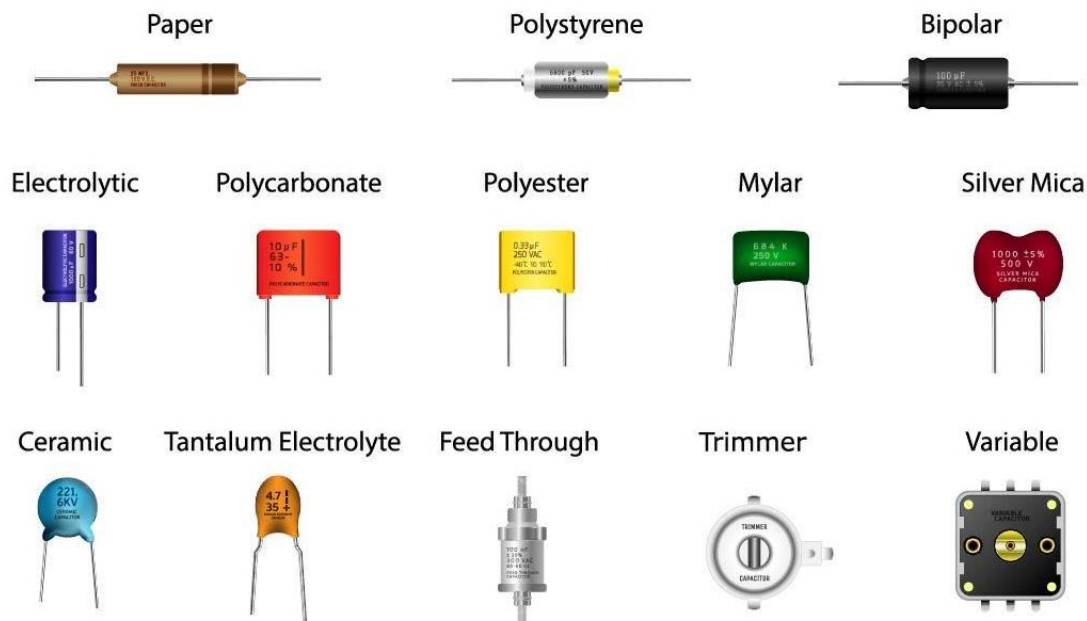
Επιπλέον οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές χωρίζονται σε δύο είδη τα οποία είναι:

- Υγροί ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές.
- Ξηροί ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές.

Στους ξηρούς ηλεκτρολογικούς πυκνωτές η διάλυση συγκρατείται μέσω ενός φύλλου απορροφητικού χαρτιού ή γάζας η οποία βρίσκεται μεταξύ των οπλισμών ενώ από την άλλη πλευρά οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές για τη διάλυση περιέχουν υγρό στοιχείο. Για τη σωστή λειτουργία των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών είναι απαραίτητο να υπάρχει ορθή πόλωση, εννοώντας ότι απαιτείται θετικό δυναμικό στην άνοδο και αρνητικό δυναμικό στην κάθοδο. Αυτή η προϋπόθεση είναι πολύ σημαντική γιατί έχοντας ανάστροφη πόλωση θα υπάρξουν καταστροφικές συνέπειες για τον ηλεκτρολυτικό πυκνωτή. Η μεταξύ απόσταση των οπλισμών του πυκνωτή είναι πολύ μικρή για αυτό και υπάρχει μεγάλη χωρητικότητα. Τέλος οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες αναλόγως του υλικού κατασκευής τους οι οποίες είναι:

- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τανταλίου.
- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αλουμινίου.

Capacitor Types



Εικόνα 2.1 (4)-Πυκνωτές διαφόρων ειδών (πηγή: https://www.ultralibrarian.com/wp-content/uploads/2022/07/shutterstock_731355235.jpg)

Εφαρμογές πυκνωτών

Η διάρκεια ζωής των πυκνωτών κυμαίνεται μεταξύ 4-5 ετών με μία απόδοση ενός τυπικού βαθμού 60-70%. Η χρήση τους απασχολεί συστήματα λίγων kWh και ο κύριος ρόλος τους είναι η διόρθωση του συντελεστή ισχύος (cosφ). Επιπλέον οι εφαρμογές των πυκνωτών αφορούν συστήματα μεταφοράς και διανομής και αντιμετωπίζουν βυθίσεις τάσεων και στιγμιαίων διακοπών. Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως προσθετικά μέλη σε συστήματα ΑΠΕ μέσω της εξομάλυνσης της τάσεως με σκοπό την αύξηση του προσδόκιμου ζωής στις μπαταρίες. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι σε καμία των περιπτώσεων δεν μπορούν να αποτελέσουν βασική μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2 Τι είναι ο υπερπυκνωτής – Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ο υπερπυκνωτής (supercapacitor ή ultra capacitor) είναι συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές και δεν είναι τίποτε άλλο από έναν ηλεκτροχημικό πυκνωτή ο οποίος προσφέρει πολύ υψηλή ηλεκτρική χωρητικότητα σε μία μικρή συσκευασία. Χάρη στην πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος του, ο υπέρπυκνωτής μας ενδιαφέρει σε πάρα πολλές εφαρμογές. Είναι ικανός να παρέχει ενέργεια ακόμα και σε πολύ γρήγορες μεταβολές του φορτίου. Η τιμή της χωρητικότητας του είναι πολύ μεγαλύτερη από άλλους πυκνωτές με χαμηλότερα όμως όρια τάσης, που γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ ηλεκτρονικών επικοινωνιών και επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Στην ουσία υπερπυκνωτής αντί να αποθηκεύει ενέργεια ηλεκτροχημικά την αποθηκεύει ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ανδρεάδης Μάριος

μέσω ηλεκτρικού πεδίου. Τον υπερπυκνωτή μπορούμε να τον συναντήσουμε επίσης με ονόματα όπως ηλεκτρικός πυκνωτής διπλού στρώματος, υπέρσυμπυκνωτής, ψευδοπυκνωτής, ηλεκτροχημικός πυκνωτής διπλού στρώματος και υπέρπυκνωτής. Τα απαιτούμενα υλικά για την κατασκευή των υπερπυκνωτών έχουν μεγάλη ποικιλία. Κάποια είναι κατασκευασμένα από ενεργό άνθρακα ή και σκόνη. Κλείνοντας το εισαγωγικό κομμάτι σχετικά με το τι είναι ο υπέρπυκνωτής είναι σημαντικό να δώσουμε μία έμφαση στην τάξη μεγέθους της χωρητικότητας του. Οι κλασικοί πυκνωτές έχουν χωρητικότητα της τάξεως των pF μέχρι των χαμηλών nF, σε αντίθεση με τους υπερπυκνωτές οι οποίοι έχουν χωρητικότητα τάξεως των F.

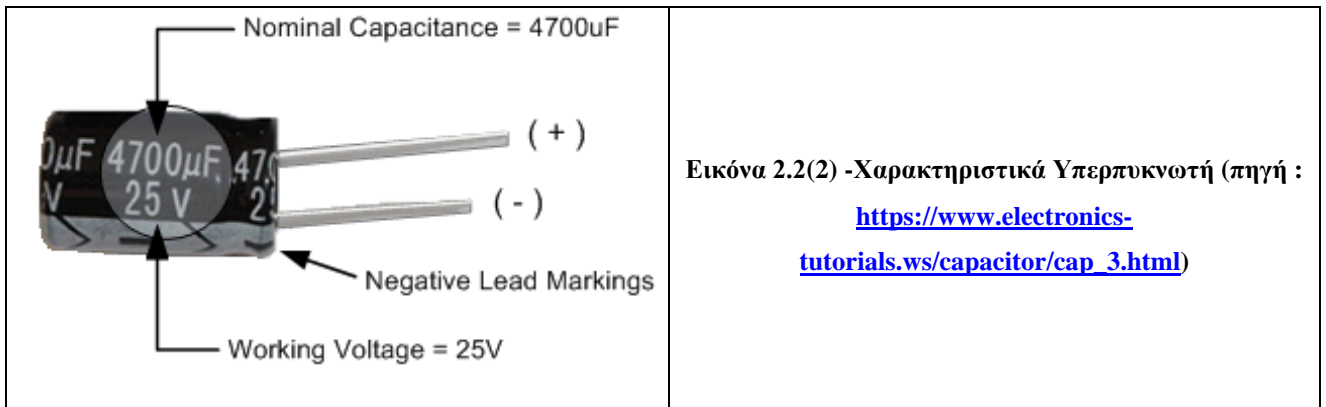


Εικόνα 2.2(1) -Υπερπυκνωτές (πηγή :

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.escomponents.com%2Fultracapfaq89&psig=AOvVaw2u33GCgfA1678pc3n8mV8S&ust=1668770706976000&source=images&cd=vfe&ved=0CBAQjRxqFwoTCIifquONtfsCFOAAAAA_dAAAAABAS\)](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.escomponents.com%2Fultracapfaq89&psig=AOvVaw2u33GCgfA1678pc3n8mV8S&ust=1668770706976000&source=images&cd=vfe&ved=0CBAQjRxqFwoTCIifquONtfsCFOAAAAA_dAAAAABAS)

Χαρακτηριστικά ενός Υπερπυκνωτή

Ο πυκνωτής, όπως και κάθε άλλο ηλεκτρονικό στοιχείο, καθορίζεται από μια σειρά χαρακτηριστικών. Αυτά τα χαρακτηριστικά του πυκνωτή μπορούν πάντα να βρεθούν στα φύλλα δεδομένων που μας παρέχει ο κατασκευαστής του πυκνωτή.



Εικόνα 2.2(2) -Χαρακτηριστικά Υπερπυκνωτή (πηγή : https://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap_3.html)

- Ονομαστική χωρητικότητα, (C)

Η ονομαστική τιμή της χωρητικότητας C ενός πυκνωτή είναι το πιο σημαντικό από όλα τα χαρακτηριστικά του πυκνωτή. Η τιμή αυτή μετριέται σε pico-Farads (pF), nano-Farads (nF) ή micro-Farads (μF) και αναγράφεται στο σώμα του πυκνωτή ως αριθμοί, γράμματα ή έγχρωμες λωρίδες. Όλοι οι πυκνωτές έχουν μια τιμή ανοχής που μπορεί να κυμαίνεται από -20% έως και +80% για τους ηλεκτρολυτικούς αλουμινίου, επηρεάζοντας την πραγματική ή πραγματική τιμή τους.

- Τάση

Η τάση που προβλέπεται στις προδιαγραφές είναι η μέγιστη τάση λειτουργίας για ένα μόνο πυκνωτή. Η ονομαστική τάση είναι η τάση στην οποία μετρούνται τα δεδομένα απόδοσης. Είναι δυνατόν οι πυκνωτές να εμφανίζουν τάσεις που υπερβαίνουν την ονομαστική τάση. Ο αντίκτυπος εξαρτάται από το χρόνο και τη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια αυτής της έκθεσης. Σε καμία περίπτωση ο πυκνωτής δεν πρέπει να υποβάλλεται σε τάσεις που υπερβαίνουν το 10% της ονομαστικής τάσης.

- Ειδική Ισχύς

Η ειδική ισχύς αποτελεί υπολογισμό του λόγου της υψηλότερης ισχύος εξόδου προς τη συνολική μάζα του. Συγκριτικά με τις μπαταρίες η ειδική ισχύς των υπερπυκνωτών ξεπερνάει την ειδική ισχύ των μπαταριών κατά 10 φορές.

- Θερμοκρασία περιβάλλοντος

Η τυπική θερμοκρασία λειτουργίας των υπερπυκνωτών είναι $-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$. Η θερμοκρασία και η τάση είναι δύο μεγέθη που έχουν κυρίαρχο ρόλο στην διάρκεια ζωής του υπερπυκνωτή. Στην περίπτωση που η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 10% η διάρκεια ζωής μειώνεται κατά 30% έως 50%. Ενόλιγους αν ο υπερπυκνωτής λειτουργεί σε περιβάλλον με χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτή που έχει καθοριστεί να λειτουργεί, θα λειτουργεί με τάση υψηλότερη της καθορισμένης .

- Φόρτιση και εκφόρτιση

Ένας υπερπυκνωτής μπορεί να φορτιστεί από οποιαδήποτε πηγή συνεχούς ρεύματος, DC τροφοδοτικό, μπαταρία ή ηλιακή κυψέλη. Δεν υπάρχει περιορισμός στο ρεύμα και την τάση εντός της μέγιστης ονομαστικής τιμής ρεύματος και τάσης. όπως αναφέρεται στο φύλλο προδιαγραφών κάθε προϊόντος. Πρέπει όμως να διασφαλιστεί ότι η τάση φόρτισης δεν υπερβαίνει την ονομαστική της τάση.

- Πολικότητα

Πρέπει να βεβαιωθεί η πολικότητα του πυκνωτή πριν από τη χρήση. Εάν εφαρμοστεί αντίστροφη τάση για μεγάλο χρονικό διάστημα, η διάρκεια ζωής του πυκνωτή μειώνεται και μπορεί να προκληθεί σοβαρή βλάβη, όπως διαρροή ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, ενδέχεται να παραμείνει ηλεκτρικό φορτίο από τη δοκιμή του πυκνωτή που θα μπορούσε να προκαλέσει βλάβη σε άλλα εξαρτήματα του κυκλώματος, όπως τα τμήματα χαμηλής αντοχής τάσης των ημιαγωγών κ.λ.π. Η πλειονότητα των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών έχουν τον αρνητικό, -ve ακροδέκτη τους σαφώς επισημασμένο είτε με μια μαύρη λωρίδα, είτε με μια ταινία, είτε με βέλη, είτε με βέλη στη μία πλευρά του σώματός τους, όπως φαίνεται στην εικόνα, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε λανθασμένη σύνδεση με την παροχή συνεχούς ρεύματος.



- Ρεύμα διαρροής

Σταθερό παρασιτικό ρεύμα που αναμένεται όταν ο πυκνωτής διατηρείται επ' αόριστον σε φόρτιση στην ονομαστική τάση. Η τιμή αυτή εξαρτάται από την τάση και τη θερμοκρασία. Η μέτρηση στο φύλλο δεδομένων είναι σε ονομαστική τάση και 25°C.

- Εσωτερική αντίσταση

Είναι ένα μέτρο της συνιστώσας αντίστασης υψηλής συχνότητας και αποδίδεται κυρίως στην αντίσταση επαφής. Λόγω της σταθεράς χρόνου των υπερπυκνωτών, η λειτουργία σε αυτή τη συχνότητα είναι εξαιρετικά αναποτελεσματική. Η μέτρηση αυτή παρέχεται επειδή είναι απλή να μετρηθεί και συσχετίζεται εύκολα με την αντίσταση DC.

- Διάρκεια ζωής

Αναμενόμενη αλλαγή απόδοσης μετά από κύκλους 500K φορές από την ονομαστική τάση στη μισή ονομαστική τάση. Η ανακύκλωση εκτελείται σε κύκλο λειτουργίας που δεν οδηγεί σε θέρμανση του υπερπυκνωτή με το υπερπυκνωτή που διατηρείται στους 25°C.

- Ισοδύναμη αντίσταση σειράς, (ESR)

Η Ισοδύναμη αντίσταση σειράς ή ESR, ενός πυκνωτή είναι η αντίσταση εναλλασσόμενου ρεύματος του πυκνωτή όταν χρησιμοποιείται σε υψηλές συχνότητες και περιλαμβάνει την αντίσταση του διηλεκτρικού υλικού, την αντίσταση συνεχούς ρεύματος των ακροδεκτών, την αντίσταση συνεχούς ρεύματος των συνδέσεων με το διηλεκτρικό και την αντίσταση των πλακών του πυκνωτή, όλα μετρημένα σε συγκεκριμένη συχνότητα και θερμοκρασία.

Πίνακας 2.2(1)-Τυπικά χαρακτηριστικά επιδόσεων μικρών υπερπυκνωτών (πηγή :

https://escholarship.org/content/qt9n905017/qt9n905017_noSplash_374aa49d9bdeebfa43cd806774094157.pdf)

Device	Voltage (V)	Capacity (F)	Resistance (mΩ)	RC (s)	W h/kg	(W/kg) (95% efficiency)	Weight (g)
Superfarad	1.4	114	20	2.3	2.5	324	8.5
Maxwell	3	10	100	1.0	1.75	444	6.6
PowerStor	3	2.5	40	0.1	0.57	1150	5.5
Cap xx	3	120	26	3.1	5.8	374	26
Cap xx	3	30	7.4	0.22	1.5	1368	25
Cap xx	3	10	8.1	0.08	0.74	1838	17

Πίνακας 2.2(2)-Τυπικά χαρακτηριστικά επιδόσεων μεγάλων υπερπυκνωτών (πηγή :

https://escholarship.org/content/qt9n905017/qt9n905017_noSplash_374aa49d9bdeebfa43cd806774094157.pdf)

Device	Voltage (V)	Capacity (F)	Resistance (mΩ)	RC (s)	W h/kg	(W/kg) (95% efficiency)	Weight (kg)
Superfarad (Kiev)	3	4000	1.25	5.0	5.0	203	1.0
Superfarad (F2)	1.4	500	15	7.5	3.3	131	0.028
Panasonic	3	800	2.0	1.6	3.1	395	0.32
	3	2000	3.5	7.0	4.4	127	0.57
Maxwell	3	2700	0.6	1.6	4.2	527	0.80
Saft (Gen 2)	3	130	16.5	2.1	5.1	479	0.032
Cap. xx	3	250	0.77	0.19	1.1	1114	0.295
ESMA	1.3	3200	0.4	1.3	1.5	371	0.32
ECOND (1 V/cell)	60	7	20	0.14	0.36	506	10 (estimated)

ΣΕΙΡΕΣ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥΣ

FM Series



FC Series



FG, FR, FY, FT, FS,
FA, FE Series



HVZ Series



Εικόνα 2.2(4),2.2(5)-Σειρές υπερπυκνωτών και χαρακτηριστικά τους (πηγή :

<https://www.kemet.com/en/us/technical-resources/choosing-the-right-supercapacitor-for-your-application.html>)

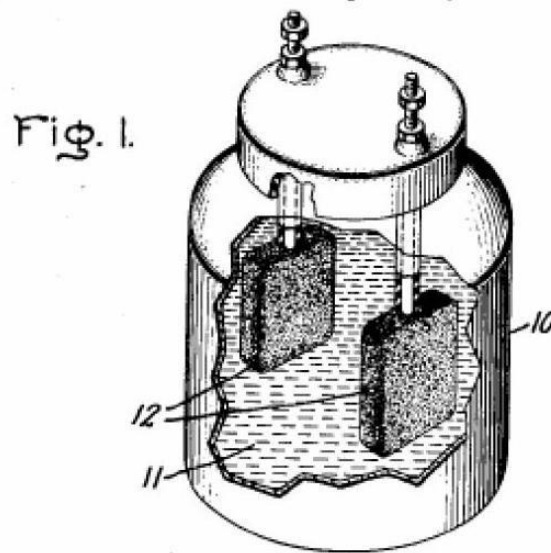
Electrical/Physical Characteristics

Series	Output Current	Maximum Operating Temperature	Maximum Operating Voltage	Capacitance	Maximum ESR (Ohms)
Supercapacitors					
FM	100 μ A	+ 70°C	3.5V 5.5V 6.5V	0.047 – 0.22 F 0.01 – 0.22 F 0.047 F	200 – 100 300 – 100 200
FMR	100 μ A	+ 85°C	3.5V 5.5V	0.1 F 0.047 – 0.1 F	200 50
FME	50 mA	+ 70°C	5.5V	0.022 – 0.047 F	40 – 6.5
FMC	100 μ A	+ 70°C	5.5V	0.047 – 0.33 F	100 – 25
FC	1 mA	+ 70°C	3.5V 5.5V	0.1 – 0.47 F 0.047 – 1.0 F	50 – 25 50 – 7
FCS	1 mA	+ 70°C	3.5V 5.5V	0.1 – 0.47 F 0.047 – 0.22 F	100 – 50 100 – 50
FG, FGH	1 mA	+ 70°C	3.5V 5.5V	1.5 F 0.01 – 4.7 F	65 300 – 35
FGR	1 mA	+ 85°C	5.5V	0.47 – 2.2 F	120 – 35
FR	1 mA	+ 85°C	5.5V	0.022 – 1.0 F	220 – 60
FYL			5.5V	0.01 – 0.047 F	300 – 200
FYD	1 mA	+ 70°C	5.5V	0.022 – 2.2 F	220 – 35
FYH			5.5V	0.022 – 1.0 F	200 – 20
FT	50 mA	+ 85°C	5.5V	0.1 – 5.6 F	16 – 0.6
FS	50 mA	+ 70°C	5.5V 11V 12V	0.022 – 1.0 F 0.47 – 1.0F 1.0 – 5.0F	60 – 7 7 7.5 – 4
FA, FE	1 A	+ 70°C	5.5V 11V	0.047 – 1.5 F 0.022 – 0.47 F	14 – 0.6 20 – 4
HVZ	5 A	+ 60°C (+ 70°C)	2.7V (2.5V)	1 – 200 F	0.3 – 0.03

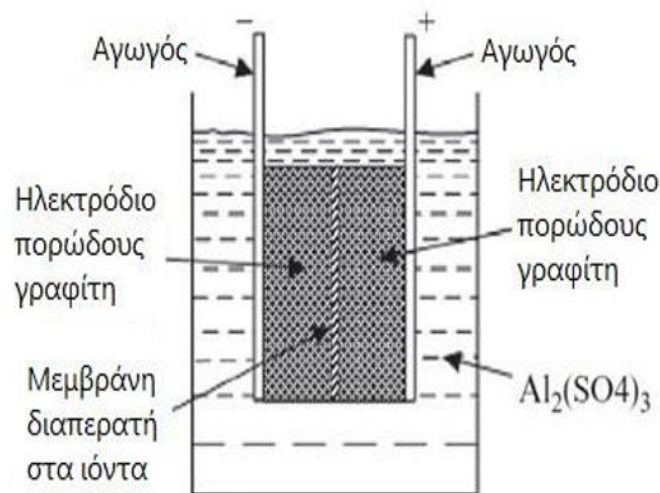
2.2.1 Ιστορική αναδρομή για τον υπερπυκνωτή

Η μελέτη αποθήκευσης ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ μετάλλου και ηλεκτρολυτικού διαλύματος είχε ξεκινήσει από τον 19ο αιώνα από κάποιους χημικούς, η χρήση όμως των πυκνωτών διπλού στρώματος για πρακτικές εφαρμογές ξεκίνησε το 1957 όπου η General Electric δημιούργησε μία κατασκευή ενός ηλεκτρολυτικού πυκνωτή με τη χρήση ηλεκτροδίων από άνθρακα (εικόνα 2.2.2(1)). Παρόλο που στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αναφέρεται ρητά ότι “ δεν είναι γνωστό τι ακριβώς γίνεται όταν οι συσκευές (...) χρησιμοποιούνται ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας”, υπήρχε η άποψη πως η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται στους πόρους του άνθρακα και αναφέρθηκε ότι ο πυκνωτής έδειχνε “εξαιρετικά υψηλή χωρητικότητα”. Η Standard Oil Company, Κλίβελαντ, Οχάιο (SOHIO) το 1996 απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μία συσκευή η οποία μπορούσε να αποθηκεύσει ενέργεια στην διεπαφή διπλού στρώματος (σχήμα 2.2.2(2)). Αναγνωρίστηκε από την SOHIO πως «η διεπαφή διπλού στρώματος» έχει τη συμπεριφορά ενός πυκνωτή με υψηλή ειδική χωρητικότητα. Η SOHIO συνέχισε φτιάχνει το 1971 πυκνωτή με σχήμα δίσκου χρησιμοποιώντας μία πάστα άνθρακα εμποτισμένη σε ηλεκτρολύτη. Παρόλα αυτά το 1971 λόγω των απειροελάχιστων πωλήσεων το αποτέλεσμα ήταν η ίδια εταιρεία να παρατήσει την περαιτέρω ανάπτυξη και δόθηκε η άδεια για αυτήν τεχνολογία στην NEC. Αυτή η εταιρεία είχε τον τίτλο παραγωγής του πρώτου εμπορικά επιτυχημένου διπλού στρώματος έχοντας το όνομα ‘υπερπυκνωτής’. Σε αυτές τις συσκευές χαμηλής τάσεως υπάρχει μεγάλη εσωτερική αντίσταση, επομένως αρχικά σχεδιάστηκαν για εφαρμογές backup μνήμης, και σιγά-σιγά βρέθηκε εφαρμογή σε ευρείας χρήσης καταναλωτικά προϊόντα.

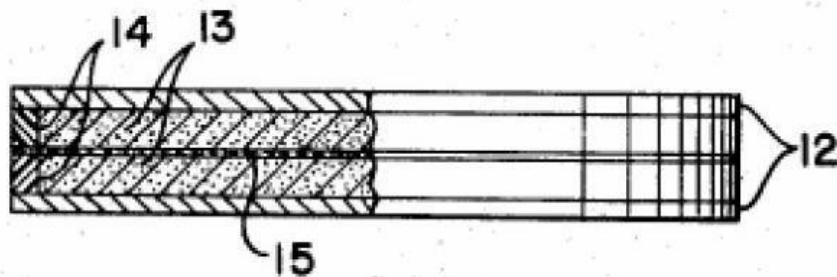
Μετά το 1980 ένας αρκετά μεγάλος αριθμός εταιρειών άρχισε να παράγει ηλεκτροχημικούς πυκνωτές. Το 1978 αναπτύχθηκε ο “ Χρυσός πυκνωτής” από την Matsushita Electric Industrial Co. η οποία είναι γνωστή και ως Panasonic στον κόσμο του δυτικού τομέα. Αυτές οι συσκευές όπως και οι ανάλογες συσκευές της NEC, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές backup μνήμης. Έπειτα μετά το 1987 ξεκίνησε η παραγωγή ενός πυκνωτή διπλού στρώματος με την ονομασία “ Dynacap”, και αυτή η παραγωγή δημιουργήθηκε από την ELNA. Η PRI είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία του πρώτου πυκνωτή υψηλής ισχύος διπλού στρώματος. Το 1982 μετά την ίδρυση της “PRI Ultracapacitor” έγινε η ενσωμάτωση ηλεκτροδίων από οξείδια μετάλλων τα οποία προορίστηκαν για στρατιωτικές εφαρμογές όπως συστήματα καθοδήγησης πυραύλων ή όπλα λείζερ. Μία μελέτη η οποία πραγματεύεται τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα από το Αμερικανικό υπουργείο ενέργειας (DoE) είχε ως αποτέλεσμα την κατασκευή πολλών νέων τέτοιων συσκευών, και μέχρι το 1992 το αναπτυξιακό πρόγραμμα υπερπυκνωτών του DoE βρισκόταν σε εξέλιξη στα εργαστήρια της Maxwell.



Εικόνα 2.2.1(1)-Πυκνωτής που πατένταρε η General Electric (πηγή : https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FB978044462616500019X&psig=AOvVaw0nFzmctvhesPGxeUae_7GQ&ust=1666701738921000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCIDrjPvx-PoCFQAAAAAdAAAAABAE)



Εικόνα 2.2.1(2)-Ηλεκτρολυτική συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που πατένταρε η SOHIO (πηγή : https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FB978044462616500019X&psig=AOvVaw0nFzmctvhesPGxeUae_7GQ&ust=1666701738921000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCLi00-nv-PoCFQAAAAAdAAAAABAc)



Εικόνα 2.2.1(3)- Πυκνωτής που πατένταρε η SOHIO (πηγή : <http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/15824/1/DT2010-0240.pdf>)

2.2.2 Σύγκριση υπερπυκνωτών με συμβατικούς πυκνωτές και μπαταρίες

Υπερπυκνωτές – Συμβατικοί πυκνωτές

Όπως έχει αναφερθεί οι υπερπυκνωτές είναι στοιχεία που χρησιμοποιούνται για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την ύπαρξη χημικών αντιδράσεων. Η εμπορική τους διαθεσιμότητα ξεκίνησε από το 1996 και χάρη στην εξέλιξη που έγινε στα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν ανοδική πορεία. Το συνεχώς μειούμενο κόστος τους με την πάροδο του χρόνου σε συνάρτηση με την ελάχιστη απαιτούμενη συντήρηση που έχουν τα καθιστούν μία αρκετά δελεαστική επιλογή έχοντας αρκετά πλεονεκτήματα όπως είναι μεγάλη διάρκεια ζωής, γρηγόρη δυναμική απόκριση, υψηλή απόδοση, σημαντική ανοχή σε υπερφόρτιση και υπερθέρμανση. Σε σύγκριση με τους συμβατικούς πυκνωτές, οι υπερπυκνωτες έχουν αρκετά μεγαλύτερα εμβαδόν επιφάνειας ηλεκτροδίου. Κι όμως η ποσότητα του ρεύματος μπορεί να απορροφήσει ένας συμβατικός πυκνωτής είναι άμεσα εξαρτώμενη από την εκτεθειμένη επιφάνεια των ηλεκτροδίων του. Από την άλλη μεριά οι υπερπυκνωτες βασίζονται στην τεχνολογία ανάπτυξης «ενεργούς επιφάνειας» σε ολόκληρη τη μάζα των ηλεκτροδίων και όχι μονάχα στην εξωτερική τους επιφάνεια. Χάρη σε αυτόν τον τρόπο έχουμε μείωση του συνολικού όγκου σε ένα μικρό κλάσμα αυτού των συμβατικών πυκνωτών και η ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί πολλαπλασιάζεται ανά μονάδα βάρους. Επίσης έχουμε την χωρητικότητα ενός υπέρπυκνωτή μέχρι και 5.000 F, και με ενεργειακή πυκνότητα να φτάνει τις 5 Wh/kg, ενώ οι συμβατικοί πυκνωτές έχουν τυπικές τιμές ενεργειακής πυκνότητας 0,5 Wh/kg. Επιπλέον έχουμε και τιμές πυκνότητας ισχύος υπερπυκνωτών εξαιρετικά υψηλές, όπως 10.000 W/kg, τιμή η οποία ξεπερνάει με μεγάλη διαφορά τις τυπικές πυκνότητες ισχύος των μπαταριών. Παρόλα αυτά, λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας του υπέρπυκνωτή, το ποσό ισχύος που αναφέρθηκε πάνω θα είναι διαθέσιμο για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Property	CAP-XX Supercapacitors	Capacitors
Charge/Discharge Time	Milliseconds to Seconds	Picoseconds to Milliseconds
Operating Temperature	-40 to +85°C	-20 to +100°C
Operating Voltage	2.3 to 2.75V	6 to 800V
Capacitance	100mF to 1500F	10pF to 2.2mF
Life	50,000+ hrs Unlimited cycles	>100,000 cycles
Weight	1 g to 230g	1g to 10kg
Power Density	10 to 120 kW/kg	0.25 to 10,000 kW/kg
Energy Density	1 to 10 Wh/kg	0.01 to 0.05 Wh/kg
Pulse Load	Up to 100A	Up to 1000A

Εικόνα 2.2.2(1)-Σύγκριση υπερπυκνωτών με συμβατικούς πυκνωτές (πηγή :

<https://www.exponent.com/knowledge/alerts/2018/02/supercapacitors/?pageSize=NaN&pageNum=0&loadAllByPageSize=true>)

Υπερπυκνωτές – Μπαταρίες

Όταν απαιτείται μια έκρηξη ενέργειας, η χαμηλή εσωτερική αντίσταση του υπερπυκνωτή παρέχει το απαιτούμενο ρεύμα, ενώ η υψηλότερη αντίσταση της χημικής μπαταρίας προκαλεί την τάση της μπαταρίας να καταρρεύσει. Οι υπερπυκνωτές χρησιμεύουν για την εξάλειψη των στιγμιαίων ενεργειακών απαιτήσεων που τίθενται στην μπαταρία και αυτό με τη σειρά του παρατείνει το χρόνο λειτουργίας της μπαταρίας και αποτρέπει τη μείωση της χωρητικότητας φόρτισης μπαταρίας. Οι υπερπυκνωτές, σε αντίθεση με τις μπαταρίες, δεν χρειάζονται συντήρηση και λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Οι υπερπυκνωτές που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μπαταρίες ή άλλες πηγές ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά ή κυψέλες καυσίμου, παρέχουν μια αποτελεσματική λύση όταν οι μπαταρίες από μόνες τους δεν ανταποκρίνονται στους στόχους απόδοσης. Οι υπερπυκνωτές αποτελούν επίσης εξαιρετική επιλογή για βραχυπρόθεσμη εφεδρική τροφοδοσία που απαιτείται σε δευτερόλεπτα ή λεπτά. Οι φορητές εφαρμογές και η ψηφιακή τεχνολογία έχουν ξεπεράσει την τεχνολογία των χημικών μπαταριών. Ένα τυπικό σύμπτωμα της ανεπαρκούς απόδοσης της μπαταρίας είναι η αναλογία του χρόνου χρήσης της συσκευής σε σχέση με τον χρόνο

επαναφόρτισης της συσκευής. Μια άλλη ενόχληση είναι όταν η μπαταρία πρέπει να αντικατασταθεί πρόωρα, καθώς δεν θα κρατά πλέον μια φόρτιση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η χρήση μπαταριών σε συνδυασμό με υπερπυκνωτές μπορεί συχνά να βελτιώσει συνολική απόδοση του συστήματος και να παρατείνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να φορτίζονται και να εκφορτίζονται με τον ίδιο ρυθμό. Σε μια προσέγγιση με βάση τις μπαταρίες οι σχεδιαστές περιορίζεται στο πόσο γρήγορα η μπαταρία μπορεί να δεχτεί τη φόρτιση.

Function	Supercapacitor	Lithium-ion (general)
Charge time	1 – 10 seconds	10 – 60 minutes
Cycle life	1 million or 30, 000h	500 and higher
Cell voltage	2.3 to 2.75V	3.6 to 3.7V
Specific energy (Wh / kg)	5 (typical)	100 – 200
Specific power (W / kg)	Upto 10, 000	1000 – 3000
Cost per Wh	\$20 (typical)	\$0.50 - \$1.00 (large system)
Service life (in vehicle)	10 to 15 years	5 to 10 years
Charge temperature	-40 to 65°C (-40 to 149°F)	0 to 45°C (32° to 113°F)
Discharge temperature	-40 to 65°C (-40 to 149°F)	-20 to 60°C (-4 to 140°F)

Εικόνα 2.2.2(2)-Σύγκριση Υπερπυκνωτών με μπαταρίες (πηγή : <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-mobility/supercapacitors-a-viable-alternative-to-lithium-ion-battery-technology/>)

2.2.3 Δομή και υλικά ενός Υπερπυκνωτή

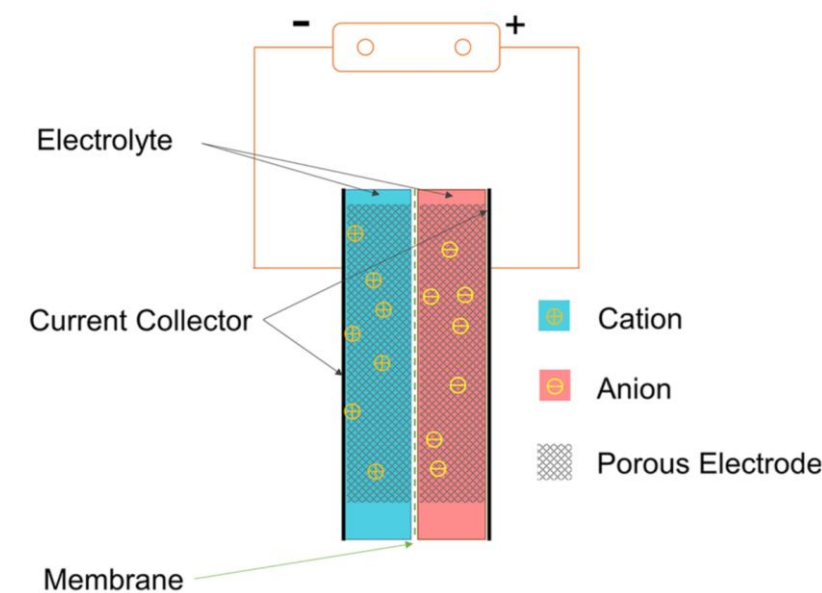
ΔΟΜΗ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΗ

Η κατασκευή των υπερπυκνωτών θυμίζει αρκετά την κατασκευή των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών. Η δομή τους αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια από αλουμίνιο, από έναν ηλεκτρολύτη και έναν διαχωριστή φύλλου. Ο λεγόμενος διαχωριστής βρίσκεται στο ενδιάμεσο των ηλεκτροδίων και το φύλλο διπλώνεται με τρόπο ώστε το σχήμα του να είναι είτε ορθογώνιο είτε κυλινδρικό. Στη συνέχεια τοποθετείται σε περίβλημα, το οποίο γεμίζει με ηλεκτρολύτες και σφραγίζεται ερμητικά. Οι ηλεκτρολύτες που λαμβάνουν χρήση εδώ διαφέρουν σημαντικά από αυτούς των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών.

Στους υπερπυκνωτές, τον ρόλο των διαχωριστών τον έχουν πορώδη υλικά για την αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου. Σε ατομικό επίπεδο αποθεματοποιεί σίδηρο σε αυτούς τους πόρους. Ένα σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται στους υπερπυκνωτές είναι ο ενεργός άνθρακας. Λόγω της περιορισμένης μέγιστης τάσης λειτουργίας του (κάτω από 3 Volt), ο άνθρακας δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί ως καλύτερος μονωτήρας. Επιπλέον, ο ενεργός άνθρακας δεν αποτελεί ιδανικό

υλικό καθώς οι φορείς φορτίου είναι συγκρίσιμοι σε μέγεθος με το υλικό των πόρων και κάποιιοι από αυτούς δεν μπορούν να προσαρμοστούν στους μικρότερους πόρους. Αυτό το γεγονός οδηγεί σε μειωμένη αποθηκευτική ικανότητα.

Εντούτοις, ένα από τα πιο ενδιαφέροντα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην μελέτη για τους υπερπυκνωτές είναι το **γραφένιο**. Είναι ένα υλικό που αποτελείται από καθαρό γραφίτη, διευθετημένο σε ένα επίπεδο φύλλο πάχους μόνο ενός ατόμου. Οι ενεργειακές πυκνότητες που επιτυγχάνονται με τη χρήση γραφενίου στους υπερπυκνωτές είναι συγκρίσιμες με τις ενεργειακές πυκνότητες που συναντώνται στις μπαταρίες.



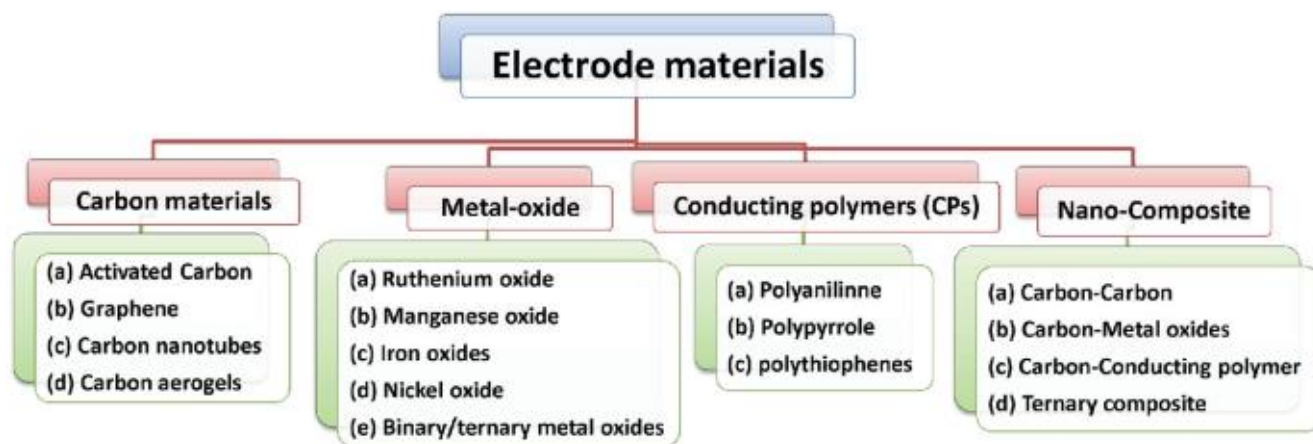
Εικονα 2.2.3(1)-Κατασκευή υπερπυκνωτή (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FSupercapacitor&psig=AOvVaw1H4q4J4AvT_o3VNFVNqAh7&ust=1667471906825000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxaFwoTCLCt14enj_sCFQAAAAAAdAAAAABAE)

ΥΛΙΚΑ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΗ

Τα υλικά των ηλεκτροδίων έχουν μεγάλη σημασία για την απόδοση των υπερπυκνωτών. Για να έχουμε άριστα αποτελέσματα απόδοσης υπερπυκνωτή, το υλικό πρέπει να έχει υψηλή χωρητικότητα. Η χωρητικότητα του υπερπυκνωτή βασίζεται στην αποτελεσματική επιφάνεια που σχετίζεται με τα υλικά ηλεκτροδίων του. Ωστόσο, δεν είναι ολόκληρη η αποτελεσματική επιφάνεια πλήρως διαθέσιμη για την αλληλεπίδραση του ηλεκτροδίου ηλεκτρολύτη. Η χωρητικότητα των υλικών των ηλεκτροδίων δεν είναι αυστηρά ανάλογη με την αποτελεσματική επιφάνειά τους. Ως εκ τούτου, η ηλεκτροχημικά διαθέσιμη επιφάνεια θα μπορούσε να υποδειχθεί ως ενεργός ηλεκτροχημική επιφάνεια. Επιπλέον, το μέγεθος των πόρων που σχετίζεται με τα αγωγιμα υλικά καθορίζει την ηλεκτροχημικά ενεργό επιφάνεια, η οποία θα μπορούσε απλά να ρυθμιστεί μέσω της χρήσης νανοδομών. Οι έρευνες αναφέρουν ότι επιτυγχάνεται 0,7 μέγιστη χωρητικότητα. Η απόσταση μεταξύ των πόρων αυξάνεται όταν το μέγεθος των πόρων θα αυξηθεί, ενώ θα υπάρξει

μείωση της χωρητικότητας. Τελικά, η χωρητικότητα, η περιοχή των διαγώνιων διατομής και το μέγεθος των πόρων εξαρτώνται μεταξύ τους. Για τους υπερπυκνωτές, η καθαρότητα του υλικού είναι σημαντική, δεδομένου ότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη διάρκεια ζωής των κύκλων και το ρεύμα διαρροής τους. Επιπλέον, οι ακαθαρσίες στον ηλεκτρολύτη ή στο υλικό του ηλεκτροδίου συμβάλλουν στο ανεπιθύμητο ρεύμα διαρροής του υπερπυκνωτή, καθώς και επακόλουθη αυτοεκφόρτιση. Ενώ είναι απλό να κατασκευαστούν συσκευές για τις οποίες η έξοδος δεν είναι σημαντικά επηρεαζόμενη από την αυτοεκφόρτιση επιφάνεια, η οποία θα μπορούσε απλά να ρυθμιστεί μέσω της χρήσης νανοδομών. Με βάση τον τύπο της αποθήκευσης ενέργειας και τα εύρη χωρητικότητας που απαιτούνται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, οι υπερπυκνωτές μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα υλικά και με αναφορά στους τύπους υπερπυκνωτών που θα αναφερθούν παρακάτω, τα υλικά ηλεκτροδίων μπορούν να χωριστούν σε 3 τύπους με βάση τη χρήση τους σε υβριδικούς πυκνωτές, ψευδοπυκνωτές και EDLC. Ο πρώτος επικεντρώνεται στον άνθρακα, που παρέχει επιφάνεια $3000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ με δυνατότητα παραγωγής χωρητικότητας 145 Fg^{-1} . Οι υπερπυκνωτές που σχηματίζονται από άνθρακα αναφέρονται ως EDLCs, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.1(2). Επιπλέον, η δεύτερη αφορά υπερπυκνωτές με βάση την αντίδραση οξειδοαναγωγής (ψευδοπυκνωτές), όπου τα ηλεκτρόδια κατασκευάστηκαν από ηλεκτρονικά αγωγά πολυμερή ή οξείδια μετάλλων. Συνήθως, οι τιμές χωρητικότητάς τους αποδίδουν μεταξύ 300 και 400 Fg^{-1} , ωστόσο έχουν ένα ζήτημα μακροχρόνιας σταθερότητας που δίνει μόλις χιλιάδες κύκλους σε ένα ευρύ φάσμα τάσεων. Επιπλέον, ένας συνδυασμός ηλεκτροδίου ψευδο-χωρητικότητας και ηλεκτροδίου διπλής στιβάδας έχει δημιουργηθεί στην τρίτη ομάδα που είναι γνωστή ως υβριδικοί πυκνωτές.



Εικόνα 2.2.3(2)-Υλικά ηλεκτροδίων υπερπυκνωτή (πηγή :

<https://www.google.com/search?q=EDLCs%20electrode%20material&tbm=isch&tbs=rim:CeDuoqmS7FsFYV7YnM0gWTxM8AEAsgIMCgIIABAAOgQIABAB&client=firefox-b-d&hl=el&sa=X&ved=0CBsQuIIBahcKEwiAsIG4sZn7AhUAAAAAHQAAAAAQBw&biw=1903&bih=955>

• Υλικά ηλεκτροδίων EDLCs

Οι μηχανικοί της General Electric ανακάλυψαν τα EDLCs σε σειρά πειραμάτων το έτος 1957 με συσκευές με βάση πορώδη ηλεκτρόδια άνθρακα. Μετά από αυτό, αναφέρθηκε ότι η ενέργεια περιέχεται μέσα στους πόρους άνθρακα. Αν και δεν κατέβαλαν μεγάλες προσπάθειες για τη βελτίωσή της, η Standard Oil του Οχάιο, το έτος 1961, έκανε ακούσια την ανακάλυψη όταν λειτουργούσε με κυψέλες καυσίμου. Την κατασκεύασαν με τη χρήση ενεργού άνθρακα ως υλικό ηλεκτροδίου, όπου ένας λεπτός μονωτής διαχωρίζει τα ηλεκτρόδια. Αυτό χρησιμεύει ως βάση μέχρι σήμερα για τον σχεδιασμό των SC. Η εταιρεία δεν εμπορευματοποίησε την εν λόγω ανακάλυψη, ωστόσο η τεχνολογία παραχωρήθηκε με άδεια στη NEC, η οποία μετά από αυτό έφερε στην αγορά σε 1978.

1) Ενεργός άνθρακας

Αυτό θεωρείται ως μία από τις επεξεργασμένες μορφές άνθρακα που παράγεται μέσω μιας σειράς σχετικά απλών και φθηνών διαδικασιών ενεργοποίησης. Λαμβάνεται με την καύση υλικών άνθρακα χωρίς οξυγόνο και στη συνέχεια το καμένο υλικό υφίσταται χημική και φυσική επεξεργασία. Επεξεργάζεται για να ληφθεί μικρού μεγέθους, πεπερασμένους πόρους που αυξάνουν την επιφάνεια που παρέχεται για χημικές αντιδράσεις ή απορρόφηση. Λόγω του γεγονότος ότι είναι λιγότερο δαπανηρά και έχουν μεγάλη επιφάνεια σε σύγκριση με τα άλλα υλικά με βάση τον άνθρακα υλικά, ο ενεργός άνθρακας ήταν το κύριο χρησιμοποιούμενο υλικό ηλεκτροδίου στα SC. Ενεργοποιημένος άνθρακας έχει την ικανότητα αποθήκευσης ειδικής χωρητικότητας σε εύρος (50-150) Fg^{-1} για οργανικούς ηλεκτρολύτες και (100-200) Fg^{-1} για υδατικούς ηλεκτρολύτες και επιτυγχάνοντας χωρητικότητες 225 και 160 Fg^{-1} , αντίστοιχα, με ενεργό άνθρακα επεξεργασμένο με KOH στους υδατικούς ηλεκτρολύτες.



Εικόνα 2.2.3(3)-Ενεργός άνθρακας (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.carbotecnia.info%2Flearning-center%2Factivated-carbon-theory%2Fwhat-is-activated-carbon%2F%3Flang%3Den&sig=AOvVaw2KpPJ_Yb4Xs380JD1gHVMY&ust=1667482417572000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0OjRxqFwoTCOjzzZvOj_sCFQAAAAAdAAAAABAL)

2) Αερογέλη άνθρακα

Τα αερογέλη άνθρακα έχουν σχηματιστεί με διάσπαρτους μεσοπόρους από συνεχές δίκτυο που σχετίζεται με τα αγωγά νανοσωματίδια άνθρακα. Εξωτερικός συγκολλητικός παράγοντας σύνδεσης δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί μέσω των αερογελών άνθρακα, λόγω των εν λόγω συνεχών δομών καθώς και της ικανότητάς τους για χημική σύνδεση με τον συλλέκτη ρεύματος. Επίσης, τα αερογέλη άνθρακα έχουν χαμηλό ESR σε σύγκριση με τον ενεργό άνθρακα ως ηλεκτρόδιο χωρίς συνδετικό υλικό. Ο κύριος τομέας ενδιαφέροντος στις μελέτες SC που περιλαμβάνουν αερογέλες άνθρακα ήταν αυτό το μειωμένο ESR, το οποίο αποδίδει μεγαλύτερη αντοχή.

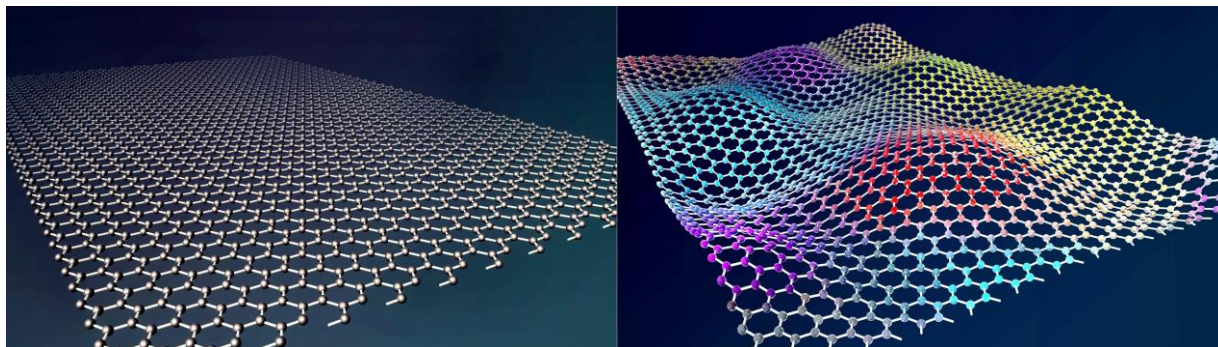


Εικόνα 2.2.3(4)- Ένα μπλοκ αερογέλης πυριτίου στο χέρι (πηγή : <https://en-m-wikipedia-org.translate.goog/wiki/Supercapacitor? x tr sl=en& x tr tl=el& x tr hl=el& x tr pto=sc>)

3) Γραφένιο

Πρόσφατα, δόθηκε σημαντική έμφαση στο γραφένιο. Επίσης, προσδιορίζεται ως μια δομή 2D με ένα στρώμα πάχους ενός ατόμου, που αναδύεται ως ένα ξεχωριστό υλικό άνθρακα που χρησιμοποιείται για συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, δεδομένου ότι απορροφά μεγάλη επιφάνεια, υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα και χημική σταθερότητα που χαρακτηρίζει. Πρόσφατα προτάθηκε ότι το γραφένιο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ένα από τα υποστρώματα για τις εφαρμογές του SC, λόγω του γεγονότος ότι όταν χρησιμοποιείται το γραφένιο ως υλικό ηλεκτροδίων SC, σε αντίθεση με τα άλλα υλικά άνθρακα, συμπεριλαμβανομένων των νανοσωλήνων άνθρακα, του ενεργού άνθρακα και ούτω καθεξής δεν βασίζεται στην κατανομή των πόρων σε στερεά κατάσταση. Το νεοσχηματισμένο γραφένιο έχει υψηλή ειδική επιφάνεια περίπου $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ από όλα τα υλικά άνθρακα που χρησιμοποιούνται ως EDLCs για υλικά ηλεκτροδίων. Το γραφένιο έχει την ικανότητα να παράγει χωρητικότητες 550 Fg^{-1} στην περίπτωση που εντελώς εκμεταλλεύεται ολόκληρη την ακριβή επιφάνεια. Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης του γραφενίου ως ένα από τα υλικά ηλεκτροδίων ήταν ότι οι κύριες επιφάνειες του γραφενίου ήταν εξωτερικές και φιλικές προς τον ηλεκτρολύτη. Οι έρευνες διεξάγονται για την ανάπτυξη πολλών μορφών γραφενίου, οι οποίες

περιλαμβάνουν μικρο-μηχανικές όπως η απολέπιση, εκκένωση τόξου, χημική εναπόθεση ατμών, ηλεκτροχημικές και χημικές μέθοδοι και μέθοδοι παρεμβολής γραφίτη.



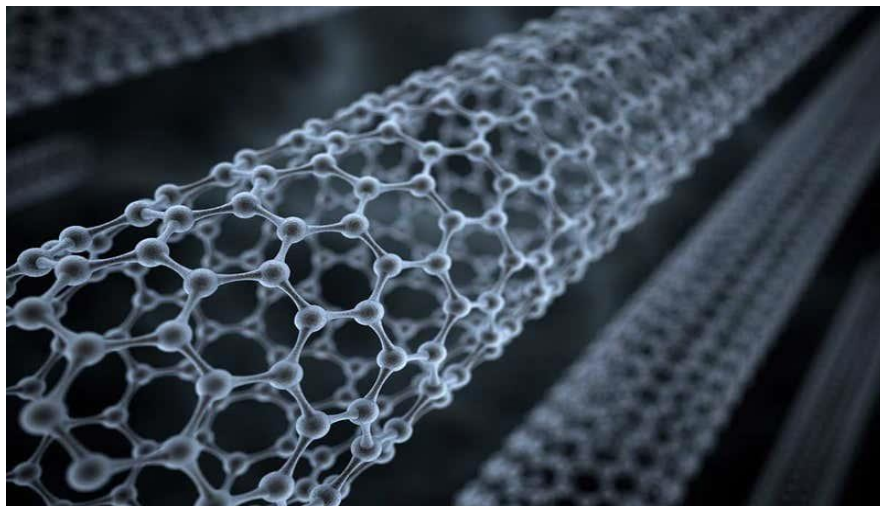
Εικόνα 2.2.3(5)-Γραφένιο (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fsitn.hms.harvard.edu%2Fflash%2F2011%2Fgraphene-the-coolest-material-that-shouldnt-exist%2F&psig=AOvYaw0WcjlSVfxmU7m1xHVgFso8&ust=1667482880195000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxaFwoTCLCSlvjPj_sCFQAAAAAdAAAAABAE)

4) Νανοσωλήνες άνθρακα (CNT)

Υπήρξε μια σημαντική εξέλιξη στη μηχανική και την επιστήμη που σχετίζεται με τα υλικά άνθρακα με την ανακάλυψη των CNT. Η συνολική αντίσταση των εξαρτημάτων είναι το στοιχείο που καθορίζει την πυκνότητα ισχύος σε έναν υπερπυκνωτή. Λόγω των χαρακτηριστικών δομών πόρων, των ισχυρών θερμικών, των μηχανικών σταθερότητας καθώς και τα άριστα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, μεγάλη προσοχή στράφηκε προς τους CNT ως υλικά ηλεκτροδίων SC. Διαφορετικά από τα άλλα ηλεκτρόδια με βάση τον άνθρακα, οι CNT έχουν διασυνδεδεμένους μεσοπόρους, οι οποίοι επιτρέπουν συνεχείς κατανομές όσον αφορά το φορτίο, το οποίο εφαρμόζει την πλειονότητα των προσβάσιμων περιοχών της επιφάνειας. Οι CNTs μπορούν να διαβαθμιστούν ως CNTs ενός τοιχώματος ή ως CNTs πολλαπλών τοιχωμάτων, όλα εξετάστηκαν ως υλικά για ηλεκτρόδια SC. Τα υλικά CNT υποδείχθηκαν ως υλικά ηλεκτροδίων υψηλής ισχύος, ως αποτέλεσμα της απλά προσβάσιμης επιφάνειάς τους, καθώς και της υψηλής τους ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Σε γενικές γραμμές, η επιφάνεια των νανοσωλήνων άνθρακα είναι μικρή (<500 m²/g), δηλαδή συμβάλλει στη χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τον ενεργό άνθρακα.

Προκειμένου να αυξηθεί η βασική του χωρητικότητα, ο νανοσωλήνας άνθρακα θα μπορούσε να ενεργοποιηθεί (χημικά) με τη βοήθεια του KOH. Η παραπάνω μέθοδος θα οδηγήσει σημαντικά σε αύξηση της επιφάνειας των νανοσωλήνων άνθρακα (κατά έναν παράγοντα 2-3 φορές) και να διατηρήσει τη νανοσωληνοειδή μορφολογία του.



Εικόνα 2.2.3(6)-Νανοσωλήνες άνθρακα (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.newscientist.com%2Farticle%2F2093356-carbon-nanotubes-too-weak-to-get-a-space-elevator-off-the-ground%2F&sig=A0vVaw3xX7p8pineixaPHaEi6LO5&ust=1667483599834000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCJiWpM_Sj_sCFQAAAAAdAAAAABAP)

- Υλικά ηλεκτροδίων ψευδοπυκνωτών

Συνήθως, τα ηλεκτρικά αγωγά πολυμερή και τα οξείδια μετάλλων μετάπτωσης επιλέγονται ως ψευδο-υλικά ηλεκτροδίων πυκνωτών. Επίσης, τα ηλεκτρόδια ψευδο-πυκνωτών χρησιμοποιούν αντιδράσεις οξειδοαναγωγής στις επιφάνειες των ηλεκτροενεργών υλικών. Ενώ οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής εξαρτώνται από το δυναμικό του ηλεκτροδίου και μεταβάλλονται ανάλογα με την εκφόρτιση και τη φόρτιση. Αυτή η διαδικασία παρέχει εξαιρετική ενεργειακή πυκνότητα και χωρητικότητα σε σύγκριση με τα EDLCs που βασίζονται αποκλειστικά στον άνθρακα. Ωστόσο, μια τόσο σημαντική χαρακτηριστικά αντισταθμίζονται συνήθως με κακούς κύκλους ζωής. Για παράδειγμα, τα EDLCs μπορεί να επιτυγχάνουν έως και 500.000 κύκλους, ενώ οι ψευδοπυκνωτές έχουν υποστεί συμβιβασμό με τα ζητήματα της ανακύκλωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι πολλαπλοί κύκλοι που σχετίζονται με τις χημικές αντιδράσεις ενδέχεται να καταστρέφουν τα ψευδοπυκνωτικά υλικά μαζί με την πρόκληση ανεπιθύμητων αλλαγών μορφολογίας, με αποτέλεσμα τη μείωση των επιδόσεων με την πρόοδο της ανακύκλωσης. Σε απάντηση, τα υποστηρίγματα άνθρακα συχνά προστίθενται για την επίλυση της βλάβης .

- 1) Οξείδια μετάλλων

Τα Co_3O_4 , NiO , RuO_2 , MnO_2 και V_2O_5 είναι τα κυριότερα οξείδια μετάλλων μετάπτωσης που μελετώνται επί του παρόντος για ηλεκτρόδια ψευδοπυκνωτών. Αύξηση της χωρητικότητας προκαλείται όταν αυτά τα οξείδια μετάλλων είναι υφίστανται πολλαπλές καταστάσεις οξειδωσης

σε συγκεκριμένα δυναμικά. Οξειδίο του ρουθηνίου (RuO_2) σε κρυσταλλική και άμορφη μορφή, το RuO_2 έχει μεγάλη σημασία για πρακτικούς και θεωρητικούς σκοπούς, λόγω των διαφόρων ιδιοτήτων του, όπως η μεταλλική αγωγιμότητα, οι καταλυτικές δραστηριότητες, οι υψηλές θερμικές και χημικές σταθερότητα, ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά οξείδωσης αναγωγής και συμπεριφορά εκπομπής πεδίου. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, το RuO_2 χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, όπως, λεπτές ή παχιές αντιστάσεις, ηλεκτρονικές εφαρμογές, ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και σε σιδηροηλεκτρικά υμένα. Η πιο πρόσφατη εφαρμογή του RuO_2 είναι ως υλικό ηλεκτροδίων σε SCs. Από τα διάφορα οξείδια μετάλλων που χρησιμοποιούνται ως υλικά ηλεκτροδίων, το RuO_2 ήταν ευρέως αποτελεσματικό λόγω των πλεονεκτημάτων του κύκλου μεγάλης διάρκειας ζωής, της εξαιρετικά αναστρέψιμης οξείδωσης με αναγωγή αντίδραση, το ευρύ παράθυρο δυναμικού όσον αφορά την υψηλή ειδική χωρητικότητα, μαζί με τα μεταλλικά τους τύπου αγωγιμότητας. Όσον αφορά τις εφαρμογές SC, το RuO_2 έχει παραχθεί (ηλεκτροχημικά) μέσω της προσέγγισης της ηλεκτροαπόθεσης.

2) Αγωγή πολυμερή (CPs)

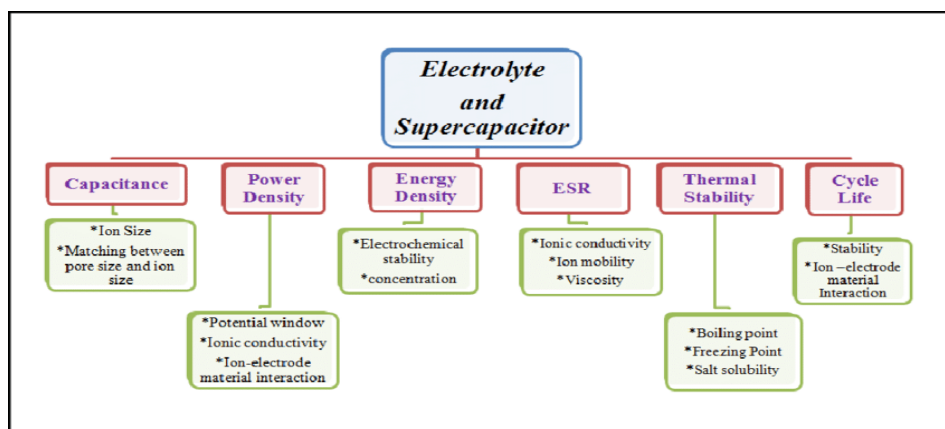
Τα CPs έχουν εξεταστεί κυρίως ως υλικά ψευδο-πυκνωτών, στα οποία τα φορτία αποθηκεύονται μέσα από αντιστρεπτές και γρήγορες οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις στην επιφάνεια καθώς και στον όγκο που σχετίζεται με το ηλεκτρόδιο. Επιπλέον, τα υλικά ηλεκτροδίων CP, όπως το πολυπυρόλιο (PPy), η πολυανιλίνη (PANi) και το πολυαιθυλένιο dioxy thiophene (PEDOT), παρουσιάζουν μέγιστη θεωρητική ειδική χωρητικότητα 1000F/g (100F/cm^2 - 400F/cm^2), η οποία είναι περίπου διπλάσια σε σύγκριση με εκείνη που σχετίζεται με EDLCs. Γενικά, η καλή αγωγιμότητα της CP οφείλεται στον αποεστιασμό των ηλεκτρονίων κατά μήκος της ραχοκοκαλιάς του συζευγμένου πολυμερούς, η οποία επιτρέπει τη μεταφορά ηλεκτρονίων σε ντοπαρισμένη κατάσταση. Η εγγενής ικανότητα του CP της αγωγιμότητας θα μπορούσε να τροποποιηθεί από τη χημική τους δομή με τη χρήση οικονομικών προσεγγίσεων, σε σύγκριση με το TMO. Επίσης, τα CPs θα μπορούσαν να συντεθούν μέσω χημικού πολυμερισμού ή ηλεκτρο-πολυμερισμού των αντίστοιχων μονομερών. Παρά τα πλεονεκτήματα των CP, συμπεριλαμβανομένων των υψηλότερων ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων, το χαμηλό κόστος και την εξαιρετική πυκνότητα φορτίου, η δομική καταστροφή του υλικού αυτού (συρρίκνωση / διόγκωση) κατά τη διαδικασία φόρτισης / εκφόρτισης μπορεί να είναι σημαντικά διακόπτοντας την απόδοση της ικανότητας ρυθμού και τη σταθερότητα των SC. Όσον αφορά υλικά άνθρακα, για παράδειγμα γραφένιο, πορώδη άνθρακα, CNTs, CNFs και οξειδίο του γραφενίου προτάθηκε ως μια εξαιρετική προσέγγιση για τη διατήρηση της ηλεκτροχημικής σταθερότητας των CP.

• Υλικά ηλεκτροδίων υβριδικών πυκνωτών

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από συνδυασμούς σχετικά με αγώγιμα πολυμερή ή οξειδία μετάλλων με υλικά άνθρακα. Έτσι, ενσωματώνουν τις πτυχές που σχετίζονται με τον ψευδοπυκνωτή και τα υλικά EDLC που προσφέρουν χημική και φυσική αποθήκευση φορτίου μαζί σε ένα ηλεκτρόδιο.

- Ηλεκτρολύτες

Υπάρχει μια πηγή αγωγής σε όλες τις συσκευές. Για παράδειγμα, υπάρχει ένα διηλεκτρικό στους συμβατικούς πυκνωτές. Συγκριτικά, οι SC περιέχουν έναν ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται για την κίνηση ή την αγωγιμότητα των ιόντων. Επιπλέον, οι σημαντικές παράμετροι για την επιλογή των ηλεκτρολυτών ήταν ο τύπος και το μέγεθος των ιόντων, η συγκέντρωση και τα υλικά των ηλεκτροδίων, καθώς και η αλληλεπίδραση διαλύτη και ιόντων. Η πυκνότητα ισχύος, η διάρκεια ζωής του κύκλου και η χωρητικότητα ενδέχεται να επηρεάζονται μέσω των ηλεκτρολυτών. Είναι απαραίτητο το μέγεθος των ιόντων του ηλεκτρολύτη πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο με το μέγεθος των πόρων που σχετίζονται με το υλικό του ηλεκτροδίου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που το NaOH ήταν το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως ηλεκτρολύτης και το χαρούπι, τότε το μέγεθος των πόρων του άνθρακα πρέπει να είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με το μέγεθος των ιόντων του ηλεκτρολύτη που θα οδηγήσει σε υψηλή χωρητικότητα καθώς και σε πυκνότητα ισχύος. Στο σχήμα 2.2.1(7) απεικονίζονται σημαντικές ιδιότητες του υπερπυκνωτή που επηρεάζονται έντονα από τις ιδιότητες των ηλεκτρολυτών



Εικόνα 2.2.3(7)- Η απόδοση του υπερπυκνωτή εξαρτάται από τις ιδιότητες του ηλεκτρολύτη (πηγή : https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FSupercapacitor-Performance-Reliant-on-Electrolyte_fig3_337917546&psig=AOvVaw0Y6AvcaVB8ezFMJ3SQ5XRT&ust=1667511830099000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCJiYxeS7kPsCFQAAAAAdAAAAABAE)

1) Οξίνος Ηλεκτρολύτης

Πολλά οξέα χρησιμοποιήθηκαν ως ηλεκτρολύτες και το θειικό οξύ χρησιμοποιήθηκε συχνότερα στα SC. Η κίνηση ή αγωγιμότητα γινόταν με βάση τη συγκέντρωση. Η ιοντική αγωγιμότητα του

ηλεκτρολύτη μπορούσε να μειωθεί γρήγορα στην περίπτωση που η συγκέντρωση αυξανόταν ή μειωνόταν απότομα. Επίσης, ο συνδυασμός όσον αφορά δύο διακριτά ηλεκτρόδια σε διάφορα δυναμικά λειτουργίας μπορεί να αυξάνει το παράθυρο δυναμικού λειτουργίας σε υδατικό ηλεκτρολύτη.

2) Αλκαλικός ηλεκτρολύτης

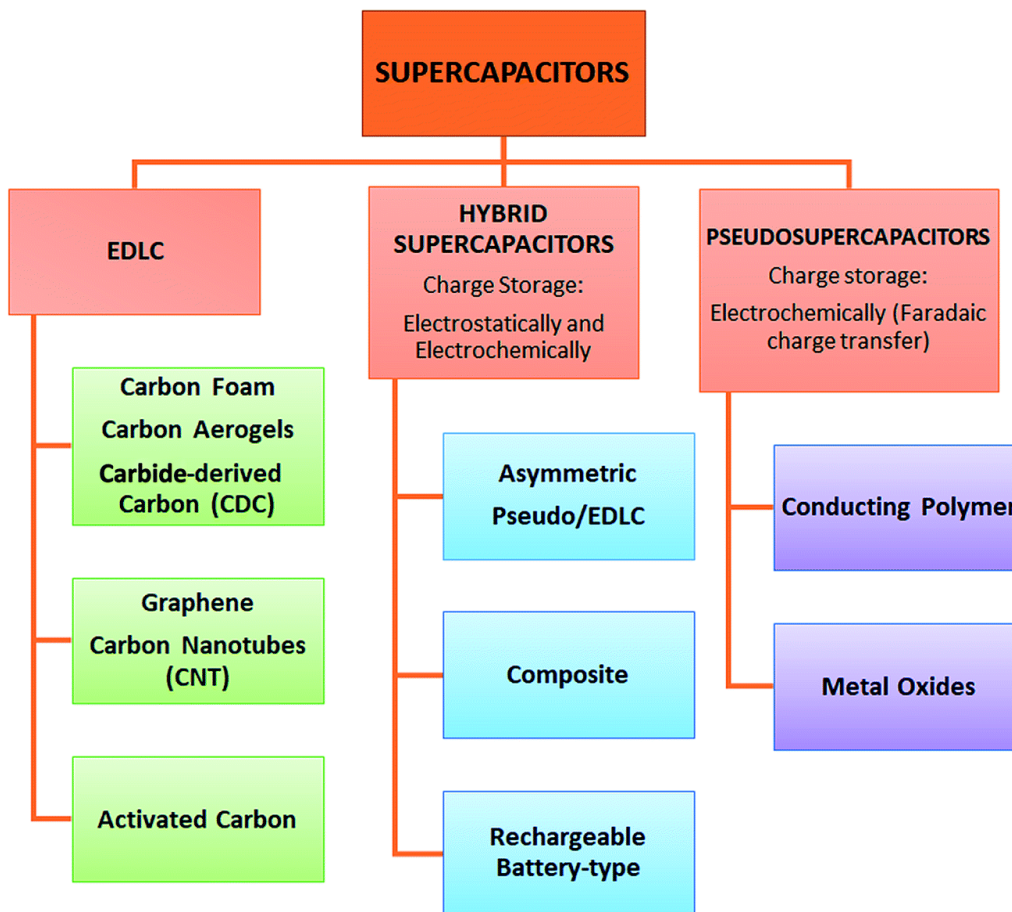
Οι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες είναι ζωτικής σημασίας εναλλακτική λύση, δεδομένου ότι οι όξινοι ηλεκτρολύτες δεν ήταν επαρκείς για όλα τα μεταλλικά υλικά. Το KOH είναι ο σημαντικότερος αλκαλικός υδατικός ηλεκτρολύτης, καθώς παρέχει εξαιρετική ιοντική αγωγιμότητα.

3) Ουδέτερος ηλεκτρολύτης

Τα λιγότερο διαβρωτικά χαρακτηριστικά και το μεγάλο δυναμικό εργασίας είναι τα κύρια σημαντικά χαρακτηριστικά των ουδέτερων ηλεκτρολυτών. Πολλοί τύποι ουδέτερων ηλεκτρολυτών χρησιμοποιήθηκαν στις έρευνες SC, όπως το Na₂SO₄, LiCl, KCl, NaCl και K₂SO₄. Ο κυριότερος ουδέτερος ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις είναι Na₂SO₄, ενώ το σημαντικότερο ψευδο-χωρητικό υλικό και κυρίως εξεταζόμενο σε ουδέτερους ηλεκτρολύτες είναι το MnO₂. Επίσης, οι ουδέτεροι ηλεκτρολύτες χρησιμοποιήθηκαν όσον αφορά τις ασύμμετρες διατάξεις SC, προσφέροντας ευρεία δυναμικό παράθυρο για την επίτευξη υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας.

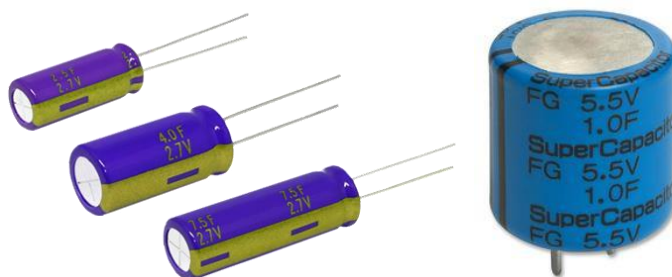
2.3 Είδη υπερπυκνωτών – Αρχή λειτουργίας

Οι υπερπυκνωτές αποτελούν μία εναλλακτική λύση για την εξυπηρέτηση των γρήγορων και απότομων μεταβολών του φορτίου. Παρόλα αυτά, οι υπερπυκνωτές δεν έχουν εξελιχθεί τόσο πολύ πλέον έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται ευρέως ως τεχνολογία διαρκούς αποθήκευσης για εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Ένας υπερπυκνωτής έχει συνιστώσες οι οποίες σχετίζονται με αυτές μίας μπαταρίας όσο και με αυτές ενός πυκνωτή. Επομένως η τάση ενός στοιχείου περιορίζεται σε λίγα volt. Ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιεί ένα μοριακά λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη για τον διαχωρισμό της φόρτισης. Κάθε φορά που ασκείται τάση στους ακροδέκτες του εμφανίζεται το διηλεκτρικό. Έτσι με αυτό τον τρόπο χωρίς να πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις, αποθηκεύεται το φορτίο ηλεκτροστατικά μέσα στα πολωμένα στρώματα υγρού που βρίσκεται ανάμεσα στον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο. Αναλόγως με τον τρόπο τον οποίο αποθηκεύεται η ενέργεια του και η τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτροδίων του μπορεί να χωριστεί σε διάφορα είδη. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, ένας υπερπυκνωτής χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες, οι πυκνωτές διπλού στρώματος (Double-layer capacitors), οι ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors) και τέλος ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω οι οποίοι καλούνται υβριδικοί (hybrid capacitors).



Εικόνα 2.3-Ταξινόμηση υπερπυκνωτών. (Πηγή: https://pubs.rsc.org/image/article/2019/NA/c9na00345b/c9na00345b-f1_hi-res.gif)

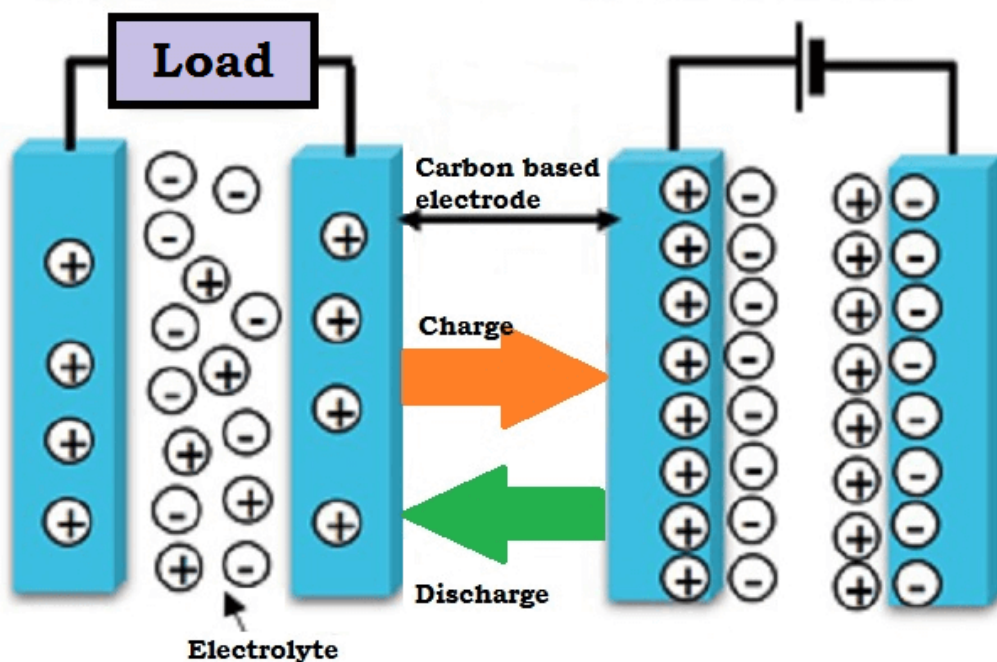
2.3.1 Πυκνωτές διπλού στρώματος (Double layer Capacitors)



Εικόνα 2.3.1(1)-Πυκνωτές διπλού στρώματος της Panasonic και της KEMET(πηγή : <https://na.industrial.panasonic.com/products/capacitors/electric-double-layer-capacitors-gold-capacitor>, <https://www.avnet.com/shop/emea/products/kemet/fg0h105zf-3074457345629065334/>)

Σε περίπτωση που ο υπερπυκνωτής έχει φόρτιση ηλεκτρονίων στην κάθοδο elchim τα θετικά ιόντα και η απουσία ηλεκτρονίων στην άνοδο τραβάει τα αρνητικά ιόντα προκειμένου να επιτευχθεί τοπική ισορροπία φορτίων. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μία χωρητικότητα μεταξύ

των ιόντων και της επιφάνειας του οπλισμού. Τα δύο στρώματα ιόντων σε κάθε οπλισμό δηλώνονται μέσω της ονομασίας “dual layer”. Το πρώτο στρώμα το οποίο βρίσκεται κοντά στον οπλισμό έχει τη δράση διηλεκτρικού ενώ το δεύτερο είναι υπεύθυνο για να συγκρατεί τα φορτία. Αυτό συμβαίνει και στους δύο οπλισμούς του υπερπυκνωτή και η συνολική χωρητικότητα αποτελείται από τις δύο χωρητικότητες που περιγράφηκαν παραπάνω συνδεδεμένες σε σειρά. Το παρακάτω σχήμα θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση το παραπάνω φαινομένου καθώς αναπαριστά την ιδανική περίπτωση στην οποία όλα τα ιόντα έχουν προσκολληθεί στους αντίστοιχους οπλισμούς.

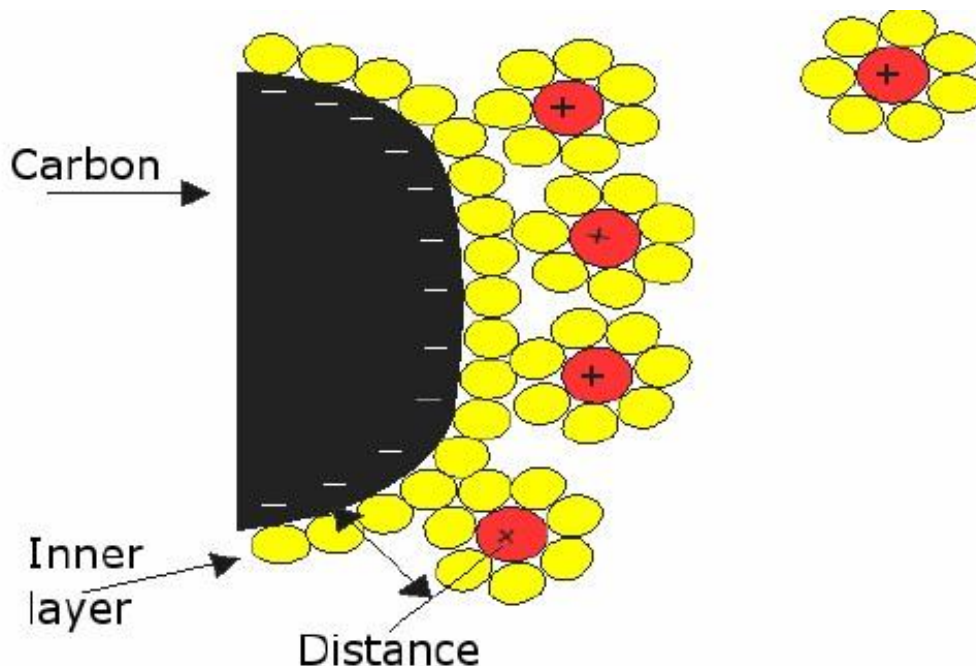


Εικόνα 2.3.1(2)- Φόρτιση-εκφόρτιση υπερπυκνωτή (πηγή :

<https://i0.wp.com/electricalfundablog.com/wp-content/uploads/2018/11/Working-of-a-Supercapacitor-Ultracapacitor.png?ssl=1>)

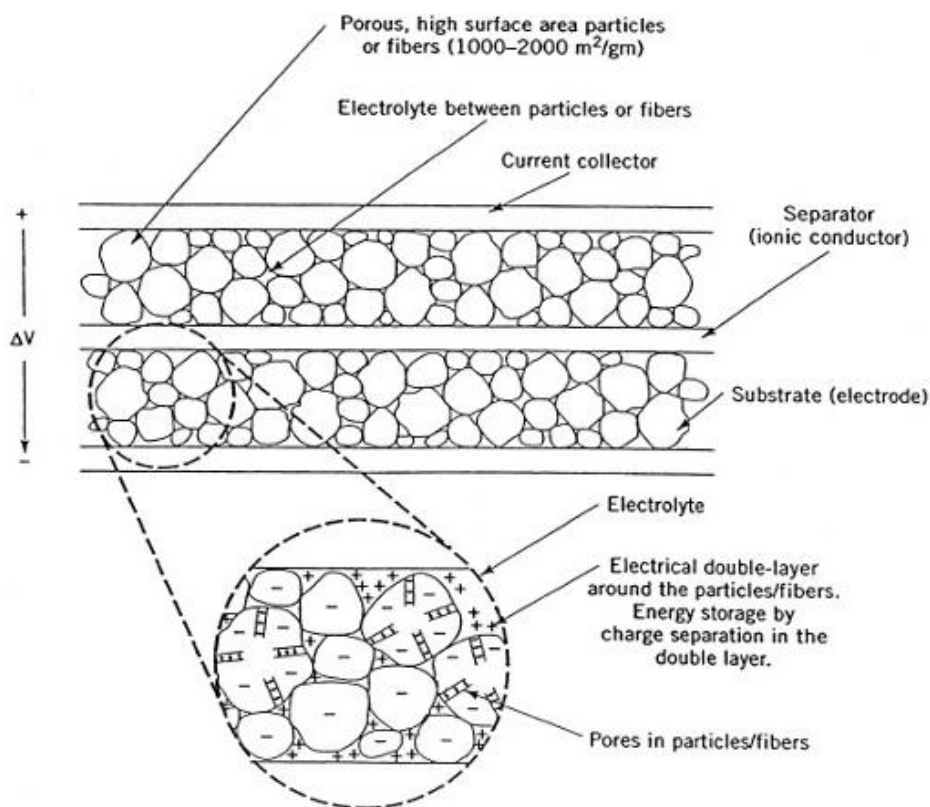
Στην πραγματικότητα, τα ιόντα βρίσκονται σε διάφορες τυχαίες αποστάσεις κοντά στους οπλισμούς και αυτό συμβαίνει λόγω διάχυσης. Όπως είναι αναμενόμενο η αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσεως προκαλεί αύξηση στη συγκέντρωση των ιόντων στους οπλισμούς επομένως έχουμε αύξηση και στη συνολικά εμφανιζόμενη χωρητικότητα. Οι επιφάνειες των οπλισμών δεν είναι λίγες αλλά είναι πορώδεις και συνήθως από άνθρακα. Το πρώτο από τα δύο στρώματα πάνω στο υπόστρωμα από άνθρακα δημιουργείται μέσω των μορίων του ηλεκτρολύτη. Από την άλλη το δεύτερο στρώμα είναι αποτελούμενο από ιόντα τα οποία περικυκλώνονται από μόρια ηλεκτρολύτη και έλκονται προς τον οπλισμό ο οποίος περιγράφηκε παραπάνω. Η απόσταση μεταξύ ιόντων-επιφάνειας από άνθρακα είναι της τάξης της απόστασης των οπλισμών όπως ενός συμβατικού

πυκνωτή. Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά το φαινόμενο αυτό πολύ κοντά στον οπλισμό της καθόδου για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου. Στην άνοδο έχουμε ακριβώς το ίδιο φαινόμενο αλλά με αρνητικά ιόντα.



Εικόνα 2.3.1(3)-Φαινόμενο πυκνωτών διπλού στρώματος σε αύξηση τάσεως (πηγή : https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fikee.lib.auth.gr%2Frecord%2F126458%2Ffiles%2FIOANNIDIS_electrochemical%2520ultracapacitors.pdf&psig=AOvVaw1JQOheISRm-Y0F3nYnOfJ0&ust=1666702408535000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCPDc-Ln0-PoCFQAAAAAAdAAAAABAE)

Όπως έχει προαναφερθεί μία βασική διαφορά μεταξύ υπερπυκνωτών και των συμβατικών πυκνωτών είναι η τεράστια διαφορά που έχουν στις χωρητικότητες τους έχοντας ότι η χωρητικότητα των υπερπυκνωτών είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων έως και χιλιάδων, μέχρι σήμερα, Farads. Με βάση λοιπόν όσα έχουν ειπωθεί αυτή η εξαιρετικά μεγάλη διαφορά μπορεί να εξηγηθεί. Βασιζόμενοι στο φαινόμενο του διπλού στρώματος με τις αρκετά μικρές, μοριακής τάξης μεγέθους, αποστάσεις αλλά και την πολύ μεγάλη επιφάνεια η οποία προκύπτει λόγω της πορώδους δομής των οπλισμών δύναται εφικτή η κατασκευή πυκνωτών έως και 5.000 Farad. Στο ακόλουθο σχήμα έχουμε έναν υπέρ πυκνωτή διπλού στρώματος.



Εικόνα 2.3.1(4)- Σχηματικό υπερπυκνωτή διπλού στρώματος (πηγή <https://api.intechopen.com/media/chapter/10024/media/image1.jpg>)

Τα ιόντα που εκτοπίζονται, σχηματίζουν τα δύο στρώματα μέσα στους πόρους και μεταφέρονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια με διάχυση μέσω του ηλεκτρολύτη. Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα ηλεκτροχημικό πυκνωτή είναι $\frac{1}{2}CV^2$, ενώ το φορτίο που αποθηκεύεται είναι CV . Η χωρητικότητα είναι άμεσα εξαρτώμενη των χαρακτηριστικών του υλικού του ηλεκτροδίου τα οποία είναι το εμβαδόν της επιφάνειας και η κατανομή μεγέθους των πόρων. Η σχέση $\frac{C}{g} = (F/cm^2)_{act} \cdot (cm^2/g)_{act}$ εκφράζει την ειδική χωρητικότητα ενός υλικού του ηλεκτροδίου, όπου όταν λέμε εμβαδόν επιφάνειας εννοούμε το ενεργό εμβαδόν μέσα στους πόρους όπου σχηματίζεται από τα δύο στρώματα. Ενολίγους η χωρητικότητα ανά μονάδα ενεργού εμβαδού δίνεται από την ακόλουθη σχέση $(F/cm^2)_{act} = (K/\text{πάχος των 2 στρωμάτων})_{eff}$.

Για τον υπολογισμό της ειδικής διηλεκτρικής σταθεράς K_{eff} του πάχους και του ηλεκτρολύτη των δύο στρωμάτων απαιτεί τη μία όχι κατανοητή και αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Έχουμε πολύ μεγάλη τιμή ειδικής χωρητικότητας της τάξεως των $15-30 \mu F/cm^2$ και αυτό οφείλεται στο πολύ μικρό πάχος του διπλού στρώματος. Μία πιθανή χωρητικότητα $150-300 F$ ανά γραμμάριο υλικού του ηλεκτροδίου αντιστοιχεί σε ένα εμβαδόν επιφάνειας $1000 m^2/g$. Όπως διακρίνεται από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.3.1), η μετρούμενη σε ειδικές χωρητικότητες υλικών από άνθρακα οι οποίες χρησιμοποιούνται στους υπερπυκνωτές, είναι ως επί το πλείστον περιπτώσεις μικρότερες από αυτές τις υψηλές τιμές. Η διακύμανση τους είναι μεταξύ $75-175 F$ ανά γραμμάριο για ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ανδρεάδης Μάριος

υδατικούς ηλεκτρολύτες και μεταξύ 40-100 F ανά γραμμάριο για οργανικούς ηλεκτρολύτες. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται γιατί στα περισσότερα υλικά από άνθρακα, ένα μεγάλο μέρος του εμβαδού της επιφάνειας υπάρχει στους πόρους όπου δεν μπορεί να υπάρξει πρόσβαση στα ιόντα του ηλεκτρολύτη. Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμα πιο έντονο στους οργανικούς ηλεκτρολύτες καθώς το μέγεθος των ιόντων είναι μεγαλύτερο από αυτό στους υδατικούς. Για να μπορέσει ο πορώδης άνθρακας να χρησιμοποιηθεί στους υπερπυκνωτές, απαιτείται να έχει μεγάλο μέρος του όγκου του σε πόρους διαθέτοντας διάμετρο από 1 μέχρι 5 nm. Υλικά τα οποία έχουν μικρούς πόρους δηλαδή μικρότερο της τιμής του 1 nm εμφανίζουν μία πτώση σε χωρητικότητα για ρεύματα εκφόρτισης ανώτερης τιμής των 100 mA/cm² κυρίως όταν χρησιμοποιούνται οργανικοί ηλεκτρολύτες. Από την άλλη μεριά υλικά τα οποία διαθέτουν μεγάλη διάμετρο πόρων, είναι ικανά να φορτιστούν με πυκνότητες ρευμάτων τιμών ανώτερων των 500 mA/cm² με μία ελάχιστη πτώση στη χωρητικότητα.

Material	Density (g/cm ³)	Electrolyte	F/g	F/cm ³
Carbon cloth	0.35	KOH	200	70
		organic	100	35
Carbon black	1.0	KOH	95	95
Aerogel carbon	0.6	KOH	140	84
Particulate from SiC	0.7	KOH	175	126
		organic	100	72
Particulate from TiC	0.5	KOH	220	110
		organic	120	60
Anhydrous RuO ₂	2.7	H ₂ SO ₄	150	405
Hydrous RuO ₂	2.0	H ₂ SO ₄	650	1300
Doped conducting polymers	0.7	organic	450	315

Πίνακας 2.3.1-Ειδική χωρητικότητα διαφόρων υλικών ηλεκτροδίων (πηγή : <https://www.researchgate.net/profile/Andrew-Burke/publication/222564305/figure/tbl2/AS:780227500310529@1563032140680/The-specific-capacitance-of-selected-electrode-materials.png>)

2.3.2 Ψευδοπυκνωτές (Pseudocapacitors)




Εικόνα 2.3.2(1)- Ψευδοπυκνωτές (πηγή

https://www.mouser.com/datasheet/2/257/CE_2017_Datasheet_2_3V50F_Pseudo_3001969_EN_1-1274211.pdf)

Σε περίπτωση ενός ιδανικού πυκνωτή διπλού στρώματος, υπάρχει μεταφορά του φορτίου μέσα στο διπλό στρώμα και δεν τηρούνται καθόλου φαρανταικές αντιδράσεις μεταξύ στερεού υλικού και του ηλεκτρολύτη, οι οποίες είναι οι αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου που συμβαίνουν στην επιφάνεια οπλισμών του πυκνωτή. Κατά αυτή την περίπτωση, η χωρητικότητα ορίζεται ως μία σταθερά η οποία δεν εξαρτάται από την τάση. Στις συσκευές οι οποίες κάνουν χρήση ψευδόχωρητικότητας, το περισσότερο φορτίο μεταφέρεται στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια του υλικού του στερεού ηλεκτροδίου ή στην επιφάνεια. Επομένως σε αυτή την περίπτωση, κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης του στερεού υλικού και του ηλεκτρολύτη παρατηρούνται φαρανταικές αντιδράσεις, των οποίων η περιγραφή πολλές φορές συναντάται ως αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η ψευδόχωρητικότητα εξαρτάται από την τάση καθώς το φορτίο που μεταφέρεται σε αυτές τις αντιδράσεις επίσης εξαρτάται από την τάση. Για την εξέλιξη των υπερπυκνωτών χρησιμοποιώντας την ψευδόχωρητικότητα έχει γίνει χρήση τριών ειδών ηλεκτροχημικών διαδικασιών. Οι τρεις αυτές ηλεκτροχημικές διαδικασίες είναι η επιφανειακή προσρόφιση ιόντων από τον ηλεκτρολύτη, η νόθευση ενεργών αγωγίμων πολυμερών υλικών στα ηλεκτρόδια καθώς και οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που περιλαμβάνουν ιόντα από τον ηλεκτρολύτη. Η πρώτη και η τρίτη διαδικασία είναι κυρίως οι επιφανειακοί μηχανισμοί επομένως εξαρτώνται σε ένα σχετικά μεγάλο βαθμό από το εμβαδόν της επιφάνειας του υλικού του ηλεκτροδίου. Από την άλλη μεριά η δεύτερη διαδικασία περιλαμβάνει το αγωγή πολυμερές υλικό επομένως γίνεται κυρίως στον όγκο του υλικού. Συμπερασματικά, η ειδική χωρητικότητα εξαρτάται λιγότερο από το εμβαδόν επιφάνειας, ακόμα και αν γνωρίζουμε ότι σχετικά μεγάλο εμβαδού υλικού με μικρό πόρους, είναι προαπαιτούμενο για την κατανομή των ιόντων από και προς τα ηλεκτρόδια σε ένα στοιχείο. Σε κάθε περίπτωση, τα ηλεκτρόδια οφείλουν να έχουν μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα έτσι ώστε να μπορούν να κατανοούν και να συλλέγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Η καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού μεταφοράς φορτίου γίνεται μέσω της καμπύλης

C(V) η οποία συνήθως προσδιορίζεται με τη χρήση κυκλικής βολταμετρίας. Όπως φαίνεται από τον πίνακα παραπάνω (πίνακας 2.3.1) ειδική χωρητικότητα των ψευδοχωρητικών υλικών είναι αρκετά μεγαλύτερη από τα υλικά με άνθρακα.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΨΕΥΔΟΠΥΚΝΩΤΗ

	
ELECTRICAL SPECIFICATIONS	
Rated Voltage, V_R	2.3 VDC
Surge Voltage ¹	2.5 VDC
Rated Capacitance, C^2	50 F
Capacitance Tolerance	Min. / Max. -10% / +20%
Initial DC-ESR, R_{DC}^3	Max. 36 mΩ
Maximum Leakage Current ⁴	76 μA
Maximum Peak Current, Non-repetitive ⁵	20 A

Εικόνα 2.3.2(2)- Τεχνικά χαρακτηριστικά ψευδοπυκνωτών(πηγή

https://www.mouser.com/datasheet/2/257/CE_2017_Datasheet_2_3V50F_Pseudo_3001969_EN_1-1274211.pdf)

2.3.3 Υβριδικοί πυκνωτές (Hybrid capacitors)

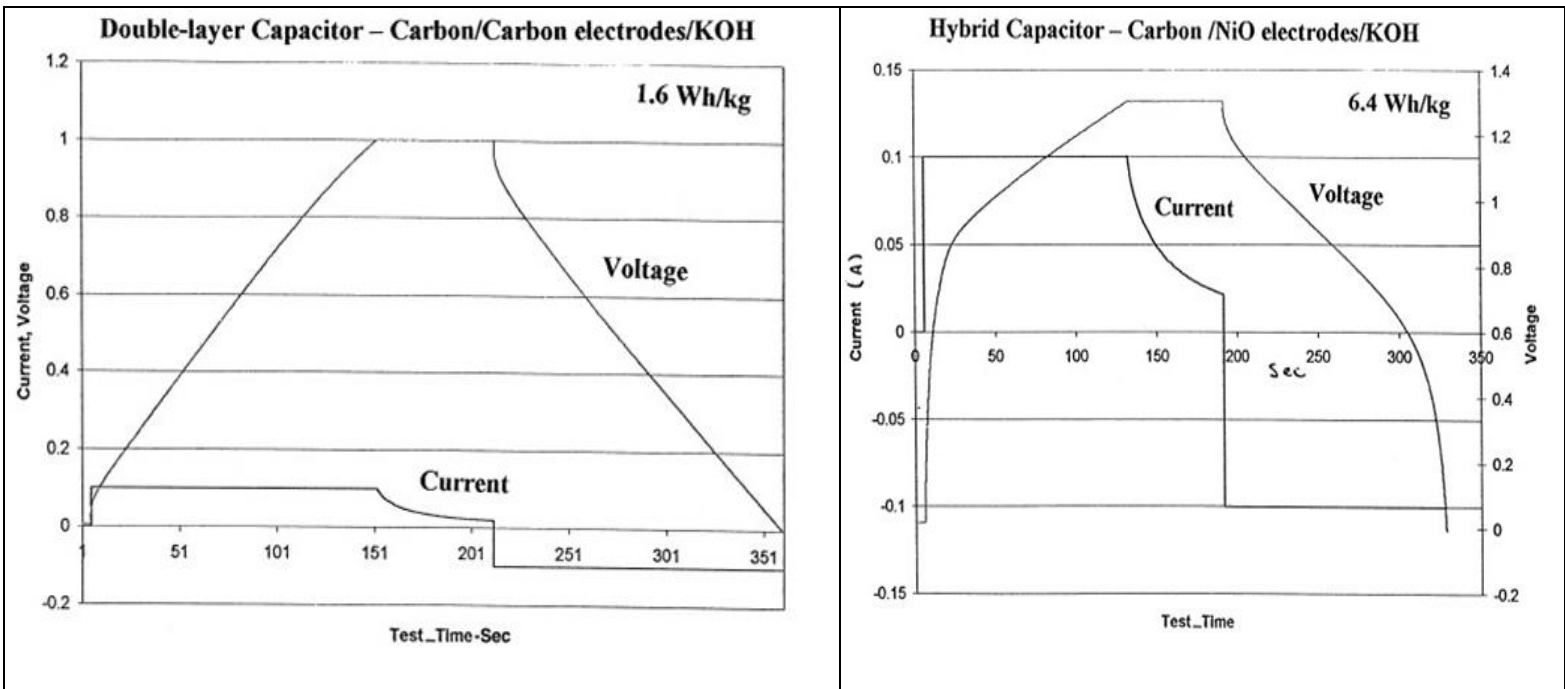


Εικόνα 2.3.3(1) – Υβριδικοί υπερπυκνωτές της VINATECH και της PANASONIC

(πηγή : <https://www.vinatech.com/eng/product/supercapacitor-2v3.php>, <https://www.mouser.co.uk/new/panasonic/panasonic-hybrid-capacitors/>)

Η δημιουργία των υπερπυκνωτών είναι δυνατή να κατασκευαστεί με ένα ηλεκτρόδιο φτιαγμένο από διπλού στρώματος (άνθρακα) υλικό και το άλλο ηλεκτρόδιο κατασκευασμένο από ψευδοχωρητικό υλικό. Αυτές οι συσκευές αποκαλούνται υβριδικοί πυκνωτές. Μέχρι και σήμερα το μεγαλύτερο ποσοστό των υβριδικών αυτοκινήτων που έχουν αναπτυχθεί χρησιμοποιούν οξείδιο του νικελίου για ψευδοχωρητικό υλικό ως το θετικό ηλεκτρόδιο. Είναι σημαντικό να τονίσουμε πως η

ενεργειακή πυκνότητα των συσκευών αυτών είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των double-layer πυκνωτών, αλλά όπως δείχνει και το παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.3.3), τα χαρακτηριστικά φόρτισης και αποφόρτισης τους έχουν μεγάλη απόκλιση από τα ιδανικά. Οι υβριδικοί πυκνωτές έχουν τη δυνατότητα επίσης να μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας δύο ανόμοια αναμιγμένα μεταλλικά οξείδα ή και νοθευμένα αγώγιμα πολυμερή υλικά.



Εικόνα 2.3.3(2) – Χαρακτηριστικές φόρτισης αποφόρτισης EDLC και υβριδικών υπερπυκνωτών

(πηγή :

https://escholarship.org/content/qt9n905017/qt9n905017_noSplash_374aa49d9bdeebfa43cd806774094157.pdf)

Πίνακας 2.3.3. – Υπολογιζόμενη απόδοση υβριδικών σχεδίων πυκνωτών

(πηγή :

https://escholarship.org/content/qt9n905017/qt9n905017_noSplash_374aa49d9bdeebfa43cd806774094157.pdf)

Hybrid capacitor (carbon/PbO ₂)	Hybrid capacitor (carbon, NiOOH)
<i>Carbon — negative</i>	<i>Carbon — negative</i>
Current collector: 25- μ m-thick titanium foil coated on both sides	Current collector: 25- μ m-thick nickel foil coated on both sides
Carbon material: 0.8 g/cm ³ , 200 F/gm, 125- μ m-thick	Carbon material: 0.8 g/cm ³ , 200 F/g, 100- μ m-thick
Voltage range: -0.5 to +0.5 V	Voltage range: -0.35 to +0.35 V
<i>PbO₂ — positive</i>	<i>NiOOH — positive</i>
Current collector: 25- μ m-thick lead foil coated on both sides	Current collector: 25- μ m-thick nickel foil coated on both sides
PbO ₂ material: 50% porosity, 792 A s capacity, 50- μ m-thick	NiO material: 50% porosity, 1044 A s capacity, 10- μ m-thick
Voltage range: 1.1–2.1 V	Voltage range: 0.7 to 1.4 V
Separator: 85% porosity, 25- μ m-thick	Separator: 85% porosity, 25- μ m-thick
Electrolyte: sulfuric acid	Electrolyte: KOH
<i>Calculations per cm² of device area</i>	<i>Calculations per cm² of device</i>
Weight: 64 mg	Weight: 42 mg
Charge stored: 2 A s	Charge stored: 1.14 A s
Energy stored: 4.27 W s	Energy stored: 1.2 W s
Energy density: 18.5 W h/kg, 52 W h/l, not including packaging	Energy density: 7.95 W h/kg, 20.8 W h/l, not including packaging

Σύνοψη των σημερινών και προβλεπόμενων μελλοντικών επιδόσεων των διαφόρων τεχνολογιών υπερπυκνωτών

Πίνακας 2.3.3(2) – Σημερινές και μελλοντικές επιδόσεις τεχνολογιών υπερπυκνωτών

(πηγή :

https://escholarship.org/content/qt9n905017/qt9n905017_noSplash_374aa49d9bdeebfa43cd806774094157.pdf)

Type	Electrode/electrolyte	Present status		Future projections	
		W h/kg	kW/kg	W h/kg	kW/kg
Double-layer	Carbon/aqueous	1.0	1.0	1.5	2.0
	carbon/organic	5–6	0.5	8–10	1–1.5
Pseudo-capacitance	Anhydrous RuO ₂ aqueous	0.6	0.5–2.0	1.0	2–3
	hydrous RuO ₂ aqueous	–	–	8–10	4–6
	mixed metal oxides/aqueous	–	–	1.5	2–3
	doped metal oxides/organic	–	–	8–12	1–2
	doped conducting polymer/organic	1.0	1.8	8	4
Hybrid	Carbon/NiO/aqueous	1.5	0.3	8–10	2–3
	carbon/PbO ₂ aqueous	–	–	10–20	2–3

2.4 Εφαρμογές Υπερπυκνωτών

Οι ηλεκτροχημικοί υπερπυκνωτές εξακολουθούν να είναι αρκετά νέες συσκευές που δεν έχουν ακόμη εφαρμοστεί ευρέως. Αυτό οφείλεται στις περιορισμένες δυνατότητες ισχύος και ενέργειας που διαθέτουν και, ως εκ τούτου, είναι χρήσιμες μόνο σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος και ενέργειας, όπως η δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας μνήμης. Επί του παρόντος, έχουν σημειωθεί μεγάλες

πρόοδοι στη βελτίωση χαρακτηριστικών όπως η ενέργεια και η πυκνότητα ισχύος. Οι υπερπυκνωτές βρίσκουν εφαρμογή στα ηλεκτρικά οχήματα, στην ενίσχυση των μπαταριών, στην εφεδρική μνήμη, στη βελτίωση της ποιότητας της ενέργειας και σε πολλά άλλα.

2.4.1 Μέσα μαζικής μεταφοράς

Οι υπερπυκνωτές λαμβάνουν χρήση στα εξής μέσα:

- ➔ Τρένα : Οι υπερπυκνωτές σε αυτή την περίπτωση έχουν το ρόλο του συμπληρώματος των μπαταριών σε σύστημα εκκίνησης κινητήρων diesel με μεταφορά ισχύος. Ο άλλος της ρόλος σχετίζεται με την αναγεννητική πέδηση, ανακτώντας την ενέργεια που παράγεται στο φρενάρισμα.
- ➔ Ελαφριά τρένα και τραμ : Σε αυτή την περίπτωση έχουν τον ρόλο αποθήκευσης ενέργειας, προκειμένου να περιοριστεί όσο γίνεται η χρήση των εναέριων καλωδίων σε περιοχές στις οποίες η εγκατάσταση τους καθιστάται δύσκολη, και σε περιοχές όμως που έχουν ιστορική σημασία.
- ➔ Λεωφορεία : Όπως προαναφέρθηκε οι υπερπυκνωτές αξιοποιούνται σε υβριδικά και ηλεκτρικά λεωφορεία. Το λεωφορείο το οποίο συμμετείχε πρώτο στην χρήση υπερπυκνωτών κατασκευάστηκε από τη MAN, και το όνομα του ήταν «Ultracapbus». Η λειτουργία του λεωφορείου αυτού βρισκόταν υπό κανονικές συνθήκες το 2001/2002. Ο εφοδιασμός του συγκεκριμένου λεωφορείου γινόταν με οχτώ μονάδες κελιών από υπερπυκνωτές, όπου η καθεμία κατείχε 36 εξαρτήματα, στα 80 V το καθένα, φτάνοντας έτσι στην λειτουργία των 640 V καθώς η φόρτιση- εκφόρτιση γινόταν στα 400 A.



Εικόνα 2.4.1(1)-Ultracapbus (πηγή : https://chariot-electricbus.com/wp-content/uploads/2020/11/Electric-bus_Chariot-Motors_Belgrade.jpg)



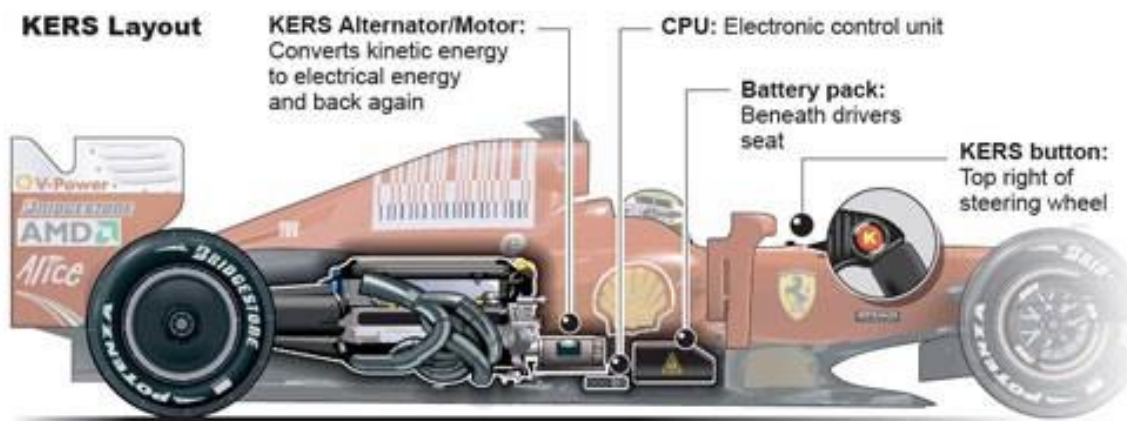
Εικόνα 2.4.1(2)-Ultracapbus (πηγή : https://www.sustainable-bus.com/wp-content/uploads/2019/05/LEAD_Wrightbus-Fuel-Cell-DD-1-1024x495-2.jpg)

Στην Σαγκάη στο ξεκίνημα του 2005, ξεκίνησε η προσπάθεια λειτουργίας ενός λεωφορείου που ονομάζεται Carbus. Η κίνηση του λεωφορείου αυτού εκτελείται δίχως χρήση καλωδίων και ο εφοδιασμός του αποτελείται από υπερπυκνωτές που φορτίζουν μερικώς σε ειδικές περιοχές κατά τη ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ανδρεάδης Μάριος

διάρκεια του δρομολογίου του και ολοκληρωτικά γίνεται η φόρτιση τους στους τερματικούς. Υπολογίζεται πως οι υπερπυκνωτές αποτέλεσαν πιο οικονομική λύση απο τις μπαταρίες ιόντων-λιθίου, καθώς το κάθε λεωφορείο έκανε οικονομία γύρω στα 200.000 \$ τον χρόνο όσον αναφορά τα καύσιμα.

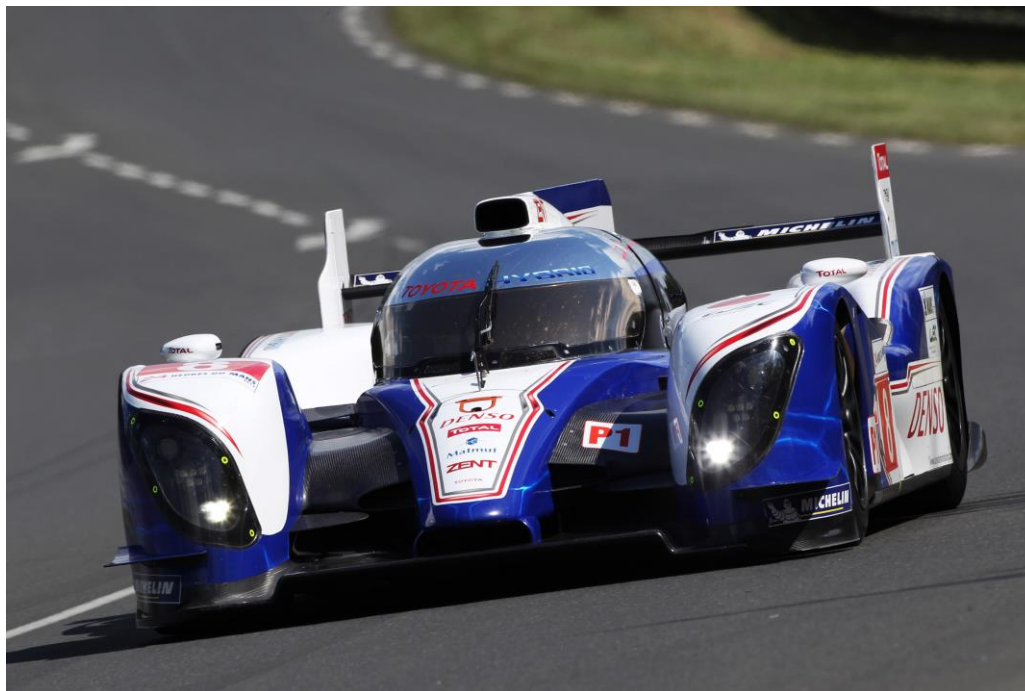
2.4.2 Αγωνιστικά οχήματα

Η FIA το 2007 στις 23 Μαΐου, καθιέρωσε την χρήση υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, εκμεταλλεύοντας μηχανές εσωτερικής καύσης και «υπερμπαταριών» των οποίων η σύσταση ήταν μπαταρίες και υπερπυκνωτές συνδεδεμένοι σε παραλληλία (Kinetic Energy Recovery System – K.E.R.S.). Με την πάροδο του χρόνου πλέον το σύστημα έχει φτάσει σε σπουδαία στάδια ανάπτυξης, έχοντας αυξηθεί η ισχύς απο τα 60 kW στα 120 kW, απο το 2014. Επιπλέον, οι υπερπυκνωτές λαμβάνουν χρήση και σε αγωνιστικά οχήματα σε αγώνες αντοχής (Endurance Racing). Ειδικότερα, το Toyota TS030 το οποίο είναι ένα υβριδικό όχημα κατηγορίας LMP1, λειτουργεί μέσω υβριδικού συστήματος κίνησης με υπερπυκνωτές. Οι αποδόσεις του ήταν εξαιρετικά καλές και αυτό φαίνεται και απο τα αποτελέσματα του αφού κέρδισε τρεις απο τους οκτώ αγώνες τη σεζόν 2012 του FIA World Endurance Championship (WEC).



Εικόνα 2.4.2(1)-Σύστημα K.E.R.S. (Πηγή :

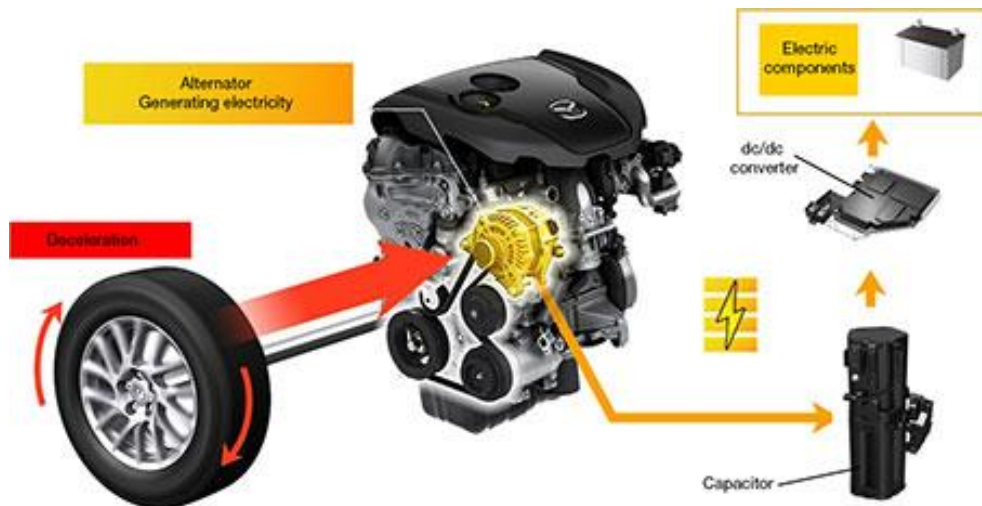
https://miro.medium.com/max/1088/0*LXwSnFY14Ssu9IRR.jpg)



Εικόνα 2.4.2(2)-Toyota TS030 (πηγή : <https://www.automobilesreview.com/img/toyota-ts030-hybrid/toyota-ts030-hybrid-03.jpg>)

2.4.3 Συμβατικά και εμπορικά οχήματα

Η ενσωμάτωση της λειτουργίας με υπερπυκνωτές σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα είναι μια ιδέα και μελέτη που βρίσκεται σε στάδια μελέτης, και αυτο ισχύει ειδικότερα στην αναγεννητική πέδηση. Απο στατιστικές έρευνες ισχύει πως η χρήση αναγεννητικής πέδησης σε υβριδικά οχήματα επιφέρει μείωση της κατανάλωσης απο 20 έως 60%. Η ιδιότητα των υπερπυκνωτών της γρήγορης φόρτισης συγκριτικά με τις μπαταρίες, της σταθερότητας των ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, επιπλέον, του μεγαλύτερου εύρους θερμοκρασιών τους και τέλος της μεγάλης διάρκειας ζωής τους, τους καθιστά χρήσιμους για χρήσεις στα συμβατικά οχήματα. Παρόλα αυτά, συγκριτικά με τις μεγάλες μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά οχήματα το βάρος, ο όγκος και κυρίως το κόστος των υπερπυκνωτών συμβάλλουν σαν εμπόδια για την ανατροπή των πλεονεκτημάτων τους. Άρα, η καλύτερη λύση είναι η παράλληλη χρήση των μπαταριών με τους υπερπυκνωτές για την ταχεία απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη για την αναγεννητική πέδηση και για το σύστημα Start/Stop υπερπυκνωτές λαμβάνουν χρήση σε οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης. Παραδείγματος χάρη το μοντέλο Mazda 6, για να εκμεταλλευτεί την παραγόμενη ενέργεια από τον εναλλακτήρα χρησιμοποιεί υπερπυκνωτές μέσω της αναγεννητικής πέδησης κατά τη διάρκεια επιβράδυνση του οχήματος, σε ένα σύστημα της το οποίο έχει την ονομασία i-Eloop και εφοδιάζεται με υπερπυκνωτές της Nippon Chemi-Con Corp.



Εικόνα 2.4.3(1)-Σύστημα i-Loop (πηγή : <http://blogmedia.dealerfire.com/wp-content/uploads/sites/561/2016/05/mazda-i-loop-technology-summary.jpg>)



Εικόνα 2.4.3(2)-Mazda 6 (πηγή : https://carhero.gr/images/flexgallery/images/photos/resized/img_Mazda-6-1_0x0.jpg)

Επιπροσθέτως, οι υπερπυκνωτές χάρη στη φύση τους, λαμβάνουν χρήση σε βοηθητικά συστήματα τα οποία έχουν απαιτήσεις βραχυπρόθεσμης απόδοσης ενός μεγάλου ποσού ενέργειας, μεγάλης διάρκειας ζωής της ηλεκτρικής πηγής και εννοείται μικρό μέγεθος καθώς και βάρος της κατασκευής.

Ειδικότερα, οι βοηθητικές εφαρμογές που βρίσκουν τα οχήματα είναι οι ακόλουθες :

- ➔ Συστήματα ασφαλείας, έχοντας το ρόλο μιας δευτερεύουσας πηγής ενέργειας σε περίπτωση όπου η μπαταρία του οχήματος υποστεί αστοχία. Αυτά τα συστήματα είναι συνήθως:

-Δευτερεύοντα συστήματα αυτόματου κιβωτίου ταχυτήτων.

-Ελεγκτές του συστήματος Ride-By-Wire.

-Και συστήματα αυτόματου ελέγχου σύγκρουσης.

➔ Σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Επίσης, η χρήση των υπερπυκνωτών βρίσκεται σε εφαρμογές όπου χρειάζεται μία αξιόπιστη πηγή ενέργειας σε συνδυασμό με μεγάλη διάρκεια ζωής.

Κάποιες από τις εφαρμογές αυτές είναι οι εξής:

-Συστήματα ενεργής ανάρτησης.

-Έπειτα έχουμε ηλεκτρικά υποβοηθούμενους υπερπληρωτές.

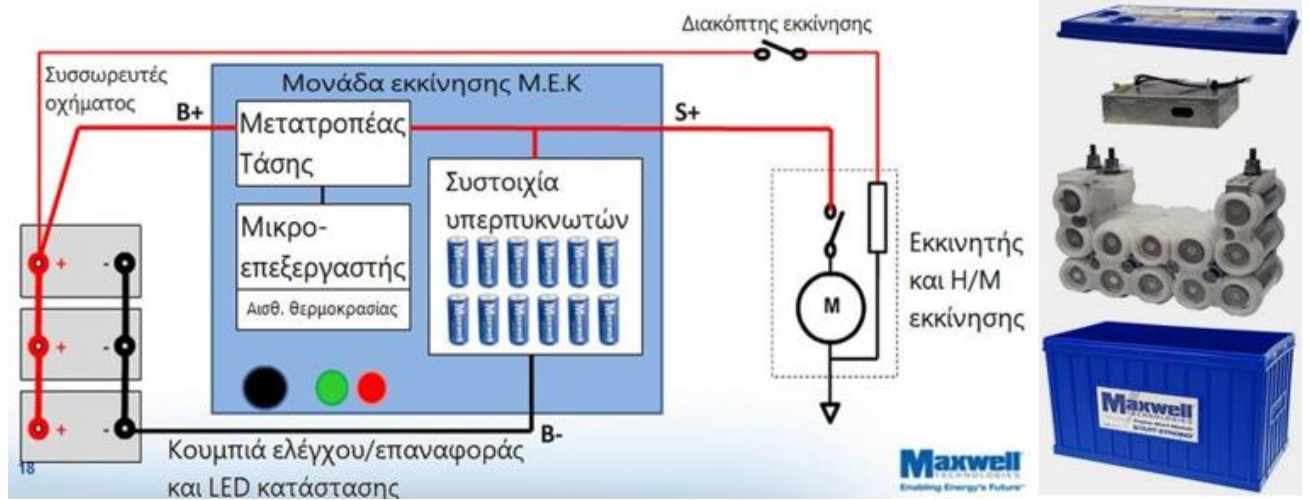
-Τέλος ηλεκτρική υποβοήθηση τιμονιού (Electric Power Steering – EPS).



Εικόνα 2.4.3(3)-Υπερπυκνωτές και συστοιχίες υπερπυκνωτών που διατίθενται στο εμπόριο (πηγή : <https://passive-components.eu/wp-content/uploads/2020/07/Maxwell-supercapacitors.jpg>)

Επιπρόσθετα, συστοιχίες υπερπυκνωτών είναι ήδη στην αγορά και συνδέονται με την μπαταρία του οχήματος για εκκίνηση σε αντίξοες συνθήκες (χαμηλή θερμοκρασία) και όταν η μπαταρία αποφορτιστεί πλήρως από συνεχείς εκκινήσεις ή το ηλεκτρικό φορτίο του οχήματος. Το κύριο πεδίο χρήσης αυτών των μονάδων είναι τα βαρέα επαγγελματικά οχήματα. Το παρακάτω

διάγραμμα δείχνει τη δομή και την καλωδίωση μιας τέτοιας διάταξης για την εκκίνηση του οχήματος.



Εικόνα 2.4.3(4)-Συνδεσμολογία και δομή μονάδας εκκίνησης οχήματος (πηγή : http://eureka.teithe.gr/jspui/bitstream/123456789/11619/1/Theodoridis_Kinatidis.pdf)

Πίνακας 2.4.3(5)- Παγκόσμιες δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης σε υπερπυκνωτές

(πηγή : https://www.researchgate.net/publication/222564305_Ultracapacitors_Why_How_and_Where_Is_the_Technology)

Country	Company or lab	Funding	Description of the technology	Device characteristics	Energy density (W h/kg)	Power density (W/kg)	Status/availability
<i>Carbon particulate composites</i>							
Japan	Panasonic	Private	Spiral wound, particulate with binder, organic electrolyte	3 V, 800–2000 F	3–4	200–400	Commercial
France/US	Saft/Alcatel	US DOE/private	Spiral wound, particulate with binder, organic electrolyte	3 V, 130 F	3	500	Packaged prototypes
Australia	Cap xx	Private	Spiral wound and monoblock, particulate with binder, organic electrolyte	3 V, 120 F	6	300	Packaged prototypes
Japan	NEC	Private	Monoblock, multi-cell, particulate with binder, aqueous electrolyte	5–11 V, 1–2 F	0.5	5–10	Commercial
Russia (Moscow)	ELIT	Russian Government/private	Bipolar, multi-cell, carbon with sulfuric acid	450 V, 0.5 F	1.0	900–1000 > 100,000 cycles	Commercial
<i>Carbon fiber composites</i>							
United States	Maxwell	US DOE/private	Monoblock, carbon cloth on aluminium foil, organic electrolyte	3 V, 1000–2700 F	3–5	400–600	Commercial
Sweden/Ukraine	Superfarad	Private	Monoblock, multi-cell, carbon cloth on aluminum foil, organic electrolyte	40 V, 250 F	5	200–300	Packaged prototypes
<i>Aerogel carbons</i>							
United States	PowerStor	US DOE/private	Spiral wound, aerogel carbon with binder, organic electrolyte	3 V, 7.5 F	0.4	250	Commercial
<i>Conducting polymer films</i>							
United States	Los Alamos National Lab	US DOE	Single-cell, conducting polymer (PFPT) on carbon paper, organic electrolyte	2.8 V, 0.8 F	1.2	2000	Laboratory prototype
<i>Mixed metal oxides</i>							
United States	Pinnacle Research Institute	US DOE/private	Bipolar, multi-cell, ruthenium oxide, on titanium foil, sulfuric acid	15 V, 125 F 100 V, 1 F	0.5–0.6	200	Packaged prototypes
United States	US Army, Fort Monmouth	US DOD	Hydrous ruthenium oxide, bipolar, multi-cell, sulfuric acid	5 V, 1F	1.5	4000	Unpacked lab prototype
<i>Hybrid</i>							
United States	Evans	Private	Double-layer/electrolytic, single cell, monoblock, ruthenium oxide/tantalum powder dielectric, sulfuric acid	28 V, 0.02 F	0.1	30,000	Packaged prototype
Russia (Moscow)	ESMA	Russian Government/private	Double-layer/Faradaic, monoblock, multi-cell modules, carbon/nickel oxide/KOH	1.7 V cells/17 V modules/20 A h (50,000 F)	8–10	80–100 (95% discharge effic.) cycle life 10–20 K cycles	Commercial

2.4.4 Ανυψωτικά και γερανοί

Οι υπερπυκνωτές έχουν μικρή εφαρμογή στον τομέα των οχημάτων τεχνικών PROJECTS. Ειδικά σε υβριδικούς γεραμούς (ντίζελ/ηλεκτρικούς) χρησιμοποιούνται για την παροχή υψηλών ρευμάτων κατά την ταχεία ανύψωση φορτίων και την ανύψωση βαρέων αντικειμένων. Χρησιμοποιούνται επίσης σε υβριδικά οχήματα περονοφόρων ανυψωτικών οχημάτων, όπου οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση των κορυφών ρεύματος, την αποθήκευση ενέργειας κατά την ανάκτηση πέδησης και την απελευθέρωση ενέργειας αμέσως κατά την επιτάχυνση και την ανύψωση φορτίων. Το αποτέλεσμα είναι 50% εξοικονόμηση ενέργειας και περιορισμένη αντικατάσταση μπαταρίας κατά τη διάρκεια της εργασίας λόγω πλήρους αποφόρτισης (αντικατάσταση μπαταρίας στη μέση βάρδια).

2.5 Κόστη Υπερπυκνωτών

Το κόστος των υπερπυκνωτών ήταν ένα κρίσιμο ζήτημα στην προσπάθεια προώθησης τους στην αγορά για εφαρμογές σε οχήματα καθώς και για άλλες εφαρμογές. Η ικανοποιητική απόδοση του υπερπυκνωτή δεν αρκεί για την επιτυχή εμπορία του. Πρέπει να είναι ανταγωνιστικός ως προς το κόστος σε σχέση με μια εναλλακτική λύση, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις περιλαμβάνει τη χρήση μπαταριών. Εάν ο υπερπυκνωτής πρόκειται να χρησιμοποιηθεί με μια μπαταρία για την κάλυψη υψηλών απαιτήσεων ισχύος, τότε το κόστος του υπερπυκνωτή πρέπει να είναι ανταγωνιστικό με τη χρήση περισσότερων μπαταριών ή μιας επανασχεδιασμένης μπαταρίας για την κάλυψη των απαιτήσεων ισχύος της συστήματος. Ο πιο κρίσιμος παράγοντας για το κόστος του υπερπυκνωτή είναι το κόστος του υλικού του ηλεκτροδίου, το οποίο σε πολλές περιπτώσεις είναι υψηλής επιφάνειας, ειδικά σωματίδια άνθρακα ή ύφασμα. Ο εν λόγω άνθρακας είναι επί του παρόντος ακριβός, καθώς ανέρχεται σε 50 έως 100 χιλιογράμματα δολαρίων ΗΠΑ. Επιπλέον, η επιφάνεια του ηλεκτροδίου στους υπερπυκνωτές είναι πολύ υψηλή, γεγονός που οδηγεί σε υψηλό κόστος για το υλικό διαχωρισμού. Για τους υπερπυκνωτές που χρησιμοποιούν οργανικούς ηλεκτρολύτες, το κόστος του ηλεκτρολύτη είναι επίσης υψηλό. Η απλή εκτίμηση κόστους που δόθηκε δείχνει ότι για μεγάλους υπερπυκνωτές υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, όπως αυτοί που απαιτούνται για εφαρμογές σε οχήματα, το κόστος του άνθρακα θα πρέπει να είναι το πολύ US\$5-8/kg δολάρια ΗΠΑ για να είναι το κόστος του υπερπυκνωτή 1-2\$/Wh. Ορισμένοι άνθρακες, για παράδειγμα, οι μαύροι άνθρακες είναι λιγότερο από US\$5/kg, αλλά οι ειδικοί άνθρακες που χρησιμοποιούνται σήμερα στους υπερπυκνωτές έχουν πολύ υψηλότερη τιμή.

Κόστος κεφαλαίου

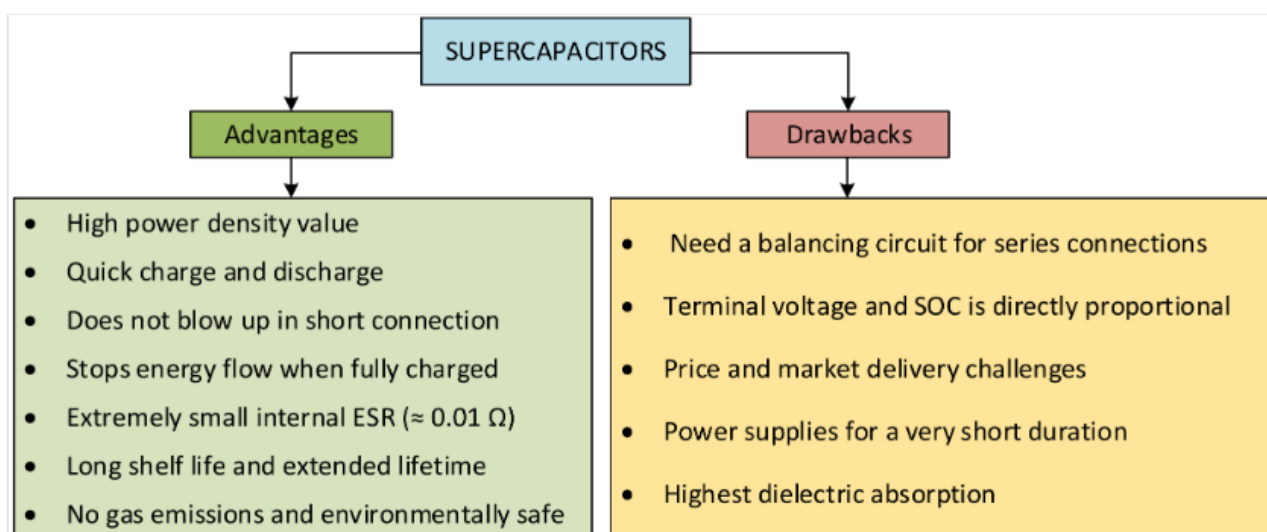
Οι πυκνωτές μπορούν να αποτελούνται από πολλαπλές κυψέλες/μονάδες για να κλιμακωθούν στο επιθυμητό εύρος χωρητικότητας ενός έργου με τρόπο παρόμοιο με τα ηλεκτροχημικά συστήματα, όπως των ιόντων λιθίου. Η Ioxus energy παρείχε λεπτομέρειες σχετικά με τον πυκνωτή συνεχούς

ρεύματος 250 kW και δήλωσε ότι το συνολικό κόστος του συστήματος είναι 40.000 δολάρια, που αντιστοιχεί σε 160 δολάρια/kW. Δεδομένης της χαμηλής ειδικής ενέργειας και ενεργειακής πυκνότητας των υπερπυκνωτών, δεν είναι ανταγωνιστικοί σε επίπεδο \$/kWh με τις τεχνολογίες μπαταριών. Ωστόσο, σε επίπεδο ισχύος \$/kW, είναι πιο ανταγωνιστικοί λόγω υψηλής ειδικής ισχύος και πυκνότητας ισχύος. Η Maxwell παρείχε ένα κόστος 241.000 \$ για ένα σύστημα 1000 kW/7,43 kWh. ενώ ένα σύστημα 1000 kW/ 12,39 kWh κόστισε 401.000 δολάρια. Αυτό αντιστοιχεί σε 32.565 \$/kWh για το 7,43 kWh και 32.365 \$/kWh για το σύστημα των 12,39 kWh, με τα \$/kW να αυξάνονται από 241 \$/kW σε 401\$/kW για σταθερή ονομαστική ισχύ καθώς η ενέργεια αυξάνεται από 7,43 kWh σε 12,39 kWh. Παρόλο που το ενεργειακό περιεχόμενο του συστήματος Ioxus δεν αποκαλύφθηκε, η εκτίμησή τους για 160 \$/kW είναι στην ίδια τάξη μεγέθους με το κόστος των πυκνωτών Maxwell. Προφανώς, επειδή η ονομαστική ισχύς του συστήματος διατηρείται σταθερή στα 1000 kW, το κόστος κλιμακώνεται με την ενέργεια και η μοναδιαία ενέργεια μειώνεται πολύ ελαφρά καθώς αυξάνεται η ενέργεια. Για μεμονωμένες κυψέλες και μονάδες, ο λόγος της πυκνότητας ενέργειας προς την πυκνότητα ισχύος ήταν 0,001 h ή 3,6 s. Η Maxwell πρότεινε διάρκεια 60 s ως πιθανή περίπτωση χρήσης για τους πυκνωτές της. Οι εκτιμήσεις κόστους που δόθηκαν αφορούσαν συστήματα με διάρκεια 27 και 45 s. Το κόστος κεφαλαίου είναι \$401/kW ή 32,365\$/kWh με λόγο E/P 0,0124. Σημειώστε ότι υποθέτοντας ένα μέγιστο 4,5 Wh/kg, για αποθήκευση 45 δευτερολέπτων, η μέγιστη πυκνότητα ισχύος είναι 360 W/kg. Δεδομένου ότι οι υπερπυκνωτές έχουν ειδική ισχύ περίπου 2000 W/kg, πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μικρότερη από την ονομαστική ισχύ για διάρκειες >8 s, όπου 8 s είναι απλά ο λόγος 4 Wh/kg προς 2000 W/kg. Με άλλα λόγια, η \$/πραγματική ωφέλιμη ισχύς για μεγάλες διάρκειες θα είναι υψηλότερη, ενώ τα \$/kWh αναμένεται να είναι σταθερά γύρω στα \$32.500/kWh.

Πίνακας 2.5- Ετήσιο κόστος για κάθε τεχνολογία, 2018 και 2025 (\$/kW) (πηγή :
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwikvFLbysH7AhUe7rsIHSNzDBEQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F342535573_An_Evaluation_of_Energy_Storage_Cost_and_Performance_Characteristics&usq=AOvVaw3TIOlwip_ebCMnirO8keI9)

Technology	Year	Capital Cost	BOP	PCS	C&C	O&M	Total
Sodium-sulfur	2018	\$349	\$13	\$46	\$70	\$12	\$490
	2025	\$246	\$13	\$28	\$67	\$9	\$362
Lithium-ion	2018	\$174	\$16	\$46	\$65	\$11	\$312
	2025	\$121	\$15	\$34	\$62	\$9	\$241
Lead Acid	2018	\$405	\$39	\$136	\$274	\$11	\$866
	2025	\$343	\$37	\$82	\$260	\$9	\$731
Sodium-Metal Halide	2018	\$385	\$14	\$48	\$63	\$11	\$521
	2025	\$265	\$13	\$29	\$60	\$9	\$377
Zinc-Hybrid Cathode	2018	\$170	\$16	\$56	\$111	\$11	\$365
	2025	\$123	\$15	\$34	\$105	\$9	\$287
Redox Flow	2018	\$293	\$13	\$46	\$100	\$12	\$464
	2025	\$207	\$13	\$28	\$95	\$10	\$352
Pumped Storage Hydro	2018	\$288	\$0	\$0	\$0	\$20	\$308
	2025	\$288	\$0	\$0	\$0	\$20	\$308
Compressed Air	2018	\$182	\$0	\$0	\$0	\$21	\$203
	2025	\$182	\$0	\$0	\$0	\$21	\$203
Flywheels	2018	\$284	\$0	\$0	\$5	\$4	\$293
	2025	\$284	\$0	\$0	\$0	\$4	\$288
Ultracapacitor	2018	\$51	\$13	\$45	\$0	\$0	\$109
	2025	\$51	\$12	\$33	\$0	\$0	\$96
Combustion Turbine	2018	\$111	\$0	\$0	\$0	\$16	\$127
	2025	\$111	\$0	\$0	\$0	\$16	\$127

Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των SC συγκρίνονται στο ακόλουθο σχήμα. Παρόλο που έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, τα πλεονεκτήματα των SC τους προσδίδουν υπεροχή έναντι των άλλων αποθηκευτικών συσκευές αποθήκευσης με πολλούς τρόπους. Η σύγκριση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων, η χρήση τους σε ορισμένες εφαρμογές με τις άλλες συσκευές αποθήκευσης φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 2.5- Πλεονεκτήματα -Μειονεκτήματα Υπερπυκνωτών (πηγή :

https://www.mdpi.com/energies/energies-15-00674/article_deploy/html/images/energies-15-00674-g006-550.jpg)

2.5.1 Προοπτικές της αγοράς

Σήμερα, εμπορικά SCs είναι διαθέσιμα από διάφορες χώρες, όπως η Αυστραλία, η Γαλλία, η Ιαπωνία και η Ρωσία, Νότια Κορέα και Ρωσία. Οι ενδιαφέρουσες προοπτικές της αγοράς που προβλέπονται για τους νέους τομείς εφαρμογής εν μέρει αντισταθμίζονται αρνητικά από το υψηλό κόστος των SC, το οποίο καθυστέρησε την ευρεία διάδοση. Παρ' όλα αυτά, η πρόοδος των τεχνολογιών και οι αυξημένες προσπάθειες των κατασκευαστών πρόκειται να μειώσουν το κόστος και να επεκτείνουν τεχνικές επιδόσεις σε μεγαλύτερο αριθμό εφαρμογών.

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τη μέση τάση του κόστους των SC, που δείχνει σαφώς ότι το ειδικό κόστος ανά μονάδα χωρητικότητας έχει μειωθεί σημαντικά μέσα σε 15 χρόνια (περίπου 150 φορές), καθώς και το κόστος ανά μονάδα ενέργειας (περίπου 220 φορές μικρότερο). Η αγορά SC έχει αυξηθεί απότομα τα τελευταία 20 χρόνια, ακόμη και αν εξακολουθεί να αποτελεί μόνο μερικά ποσοστά της συνολικής αγοράς πυκνωτών. Το 1989 κυκλοφόρησαν στο εμπόριο περίπου 75 εκατομμύρια μονάδες με συνολικά έσοδα περίπου 40 εκατομμυρίων δολαρίων. Το 1999 παρήχθησαν περίπου 201 εκατομμύρια μονάδες με συνολική αξία περίπου 115 εκατομμυρίων δολαρίων, ενώ το 2004 σημειώθηκε περαιτέρω αύξηση έως 660 εκατομμύρια μονάδες με σχετική αξία 276 εκατομμυρίων δολαρίων. Το κυρίαρχο μερίδιο (>95%) αυτών των αγορών αφορούσε τις μικρές SC, αλλά οι πρόσφατες προβλέψεις είναι αρκετά αισιόδοξες με προοπτικές σημαντικής αύξησης στα επόμενα σχεδόν 5 χρόνια. Οι προσδοκίες είναι να πλησιάσουν περίπου τα 877 εκατ. δολάρια σε παγκόσμιες πωλήσεις μέχρι το 2014, με μεγάλο μερίδιο των πωλήσεων να αντιπροσωπεύουν οι μεγάλες εφαρμογές SC, όπως αυτές στις μεταφορές και τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις κοινής ωφέλειας, που εκτιμάται ότι θα φθάσουν περίπου τα 330 εκατ. δολάρια.

Πίνακας 2.5.1. Τάση κόστους SC(πηγή :

https://www.researchgate.net/publication/357930520_A_Comprehensive_Review_on_Supercapacitor_Applications_and_Developments)

Year	Specific capacitance cost, \$/Farad	Specific energy cost, \$/kJ
1996	0,750	281,55
1998	0,400	151,23
2000	0,100	32,00
2002	0,023	7,51
2006	0,010	2,85
2010	0,005	1,28

2.5.2 Εμπορική δραστηριότητα υπερπυκνωτών σήμερα

Μετά από μερικά χρόνια στασιμότητας, η βιομηχανία υπερπυκνωτών παρουσιάζει νέα σημάδια διεύρυνσης στην αγορά, κυρίως στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας με την υιοθέτηση της τεχνολογίας start-stop υπερπυκνωτών στις ΗΠΑ από τη General Motors και τη Mercedes. Οι υπερπυκνωτές γίνονται επίσης η κυρίαρχη τεχνολογία σε εφαρμογές ελέγχου κλίσης μεγάλων ανεμογεννητριών και η παγκόσμια εξάπλωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από τον άνεμο θα ευνοήσει την ανάπτυξη της τεχνολογίας υπερπυκνωτών. Για την ακρίβεια, η αγορά του δικτύου που περιλαμβάνει τις ανεμογεννήτριες, την αποθήκευση ενέργειας στο δίκτυο και τις σιδηροδρομικές διαδρομές προσφέρει ευκαιρίες ανάπτυξης για όλους τους παίκτες. Ταυτόχρονα, ανοίγονται πολλές νέες εφαρμογές, με τις εφαρμογές χαμηλότερου επιπέδου ηλεκτροτεχνίας στα 1-400 Farad να αποτελούν νέο επίκεντρο. Οι Κινέζικοι κατασκευαστές υπερπυκνωτών αναδύονται και ενδεχομένως να εκτοπίσουν τις δυτικές εταιρείες στο εσωτερικό της χώρας τα επόμενα χρόνια. Η αγορά υπερπυκνωτών στην Κίνα για τις μη Κινέζικες εταιρείες είναι πλέον εξαιρετικά αβέβαιη και επιδιώκουν να διαφοροποιηθούν από την Κινεζική αγορά ηλεκτρικών λεωφορείων και να στραφούν σε αναδυόμενους τομείς όπως το δίκτυο. Η Κίνα ανέτρεψε πρόσφατα την πολιτική της για τα παραδοσιακά υβριδικά οχήματα, δηλώνοντας ότι το 2030 το 30% των αυτοκινήτων που κατασκευάζονται θα είναι υβριδικά που δεν θα συνδέονται με την πρίζα. Η επιχείρηση αναγέννησης σιδηροδρόμων στην Κίνα δημιούργησε τη μεγαλύτερη παραγγελία υπερπυκνωτών στον κόσμο το 2015 και επεκτείνεται γεωγραφικά εκεί. Οι μπαταρίες τιτανικού λιθίου είναι ο κύριος ανταγωνιστής των τεχνολογιών υπερπυκνωτών, πρώτα στην αυτοκινητοβιομηχανία και πρόσφατα στη συγκομιδή ενέργειας για εφαρμογές IoT. Οι υβριδικοί πυκνωτές ιόντων λιθίου έχουν επίσης τη δυνατότητα να κατακτήσουν την αξία της αγοράς σε τομείς όπου η υψηλή ισχύς εξακολουθεί να είναι υψίστης σημασίας, αλλά και κάποια επιπλέον χωρητικότητα είναι επίσης επιθυμητή.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι 7 κορυφαίοι κατασκευαστές υπερπυκνωτών στον κόσμο.

1) TDK

Ο ηλεκτρικός πυκνωτής διπλής στοιβάδας (EDLC) της TDK γίνεται λεπτότερος με τεχνολογία συσκευασίας όπου χρησιμοποιείται μεμβράνη με απανωτές στρώσεις μεταλλικού φύλλου και επιτρέπει τη μέγιστη χρήση του χώρου για το πάχος του βουνού. Οι EDLC της TDK, οι οποίοι κατασκευάζονται με την τελευταία τεχνολογία υλικών καθώς και με την τεχνολογία επεξεργασίας, ενώ διαθέτουν υψηλή χωρητικότητα και χαμηλή αντίσταση, είναι εξαιρετικοί για χρήση σε εφαρμογές όπως βοηθητικά τροφοδοτικά ισχύος μέγιστης ισχύος και συσκευές αποθήκευσης για συγκομιδή ενέργειας. Διατίθενται προϊόντα με μέγιστη χωρητικότητα 500mF και λεπτά προϊόντα

με πάχος 0,45 mm σε εύρος από 5 έως 15mF. Η τάση λειτουργίας είναι μεγάλη στα 3,2 έως 5,5V, με σχέδια που καθιστούν εύκολη τη χρήση τους με κυκλώματα. Τα προϊόντα που χαρακτηρίζονται από το λεπτό τους πάχος έχουν πάχος όπου μπορούν να τοποθετηθούν σε κάρτες ολοκληρωμένου κυκλώματος που συμμορφώνονται με το διεθνές πρότυπο ISO/IEC7810 και είναι προσαρμόσιμα σε δοκιμές κάμψης και στρέψης (συμμόρφωση με το πρότυπο ISO/IEC 10373-1), οι οποίες απαιτούνται για τις κάρτες ολοκληρωμένου κυκλώματος. Οι EDLC της TDK σχεδιάζονται επίσης με προδιαγραφές. Η TDK έχει το όνομά της μεταξύ των 7 κορυφαίων κατασκευαστών υπερπυκνωτών στον κόσμο.









Εικόνα 2.5.2(1)-Υπερπυκνωτής της TDK (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fproduct.tdk.com%2Fen%2Flanding%2Fedlc%2Findex_b.html&psig=AOvVaw3eDZPt8cBzQkP4CCEBcs62&ust=1667560434709000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxcFwoTCPiv6uzwkfsCFQAAAAAdAAAAABAE)

Εικόνα 2.5.2(2)-Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της TDK (πηγή :

<https://product.tdk.com/en/techlibrary/productoverview/slim-pouch-edlc.html>)

Product Image	Features	Height	L×W size	Capacitance	Rated Voltage	Impedance	Operating Temperature Range	Series, Types
	Thin Type	0.4mm	27 x 17mm	5 to 15mF	3.2V(Continuous) 5.0V(Peak)	7Ω (1kHz)	-20 ~ +60°C	EDLC041720 (Preliminary)
	Low Profile Type	2.1mm	20 x 25mm (Without Lead)	350mF	4.2V(Continuous) 5.5V(Peak)	55mΩ (1kHz)	-40 ~ +70°C	EDLC212520
		2.6mm		500mF		35mΩ (1kHz)	-40 ~ +70°C	EDLC262520
		2.7mm		500mF	4.2V(Continuous) 5.5V(Peak)	95mΩ (1kHz)	-20 ~ +85°C	EDLC302520 (Preliminary)
	Small Footprint Type	3.7mm	20 x 14mm (Without Lead)	500mF	4.2V(Continuous) 5.5V(Peak)	40mΩ (1kHz)	-40 ~ +70°C	EDLC371420
		3.8mm		500mF	3.2V(Continuous) 4.2V(Peak)	70mΩ (1kHz)	-30 ~ +85°C	EDLC381420

2) KEMET

Η KEMET προσφέρει μια μεγάλη γκάμα υπερπυκνωτών σε επιφανειακή και ακτινική κατασκευή με δυνατότητες υψηλής απόδοσης. Οι υπερπυκνωτές έχουν χαρακτηριστικά που είναι κοινά τόσο με τις μπαταρίες όσο και με τους παραδοσιακούς πυκνωτές. Ως αποτέλεσμα, ένας υπερπυκνωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δευτερεύουσα μπαταρία όταν εφαρμόζεται σε κύκλωμα συνεχούς ρεύματος. Αυτές οι διατάξεις είναι καταλληλότερες για χρήση σε εφαρμογές χαμηλής τάσης, συγκράτησης συνεχούς ρεύματος, όπως ενσωματωμένα συστήματα μικροεπεξεργαστών με μνήμη flash. Η τεράστια συλλογή της την έχει καταστήσει έναν από τους 7 κορυφαίους κατασκευαστές υπερπυκνωτών στον κόσμο.



Εικόνα 2.5.2(3)-Υπερπυκνωτής της KEMET (πηγή :

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.tme.eu%2Fen%2Fnews%2Fabout-product%2Fpage%2F9656%2Fnew-product-kemet-supercapacitors%2F&psig=AOvVaw2e8iilvIm1NF50vB8Cn0t1&ust=1667560399286000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCkib9dvwkfsCFOAAAAAdAAAAABAE>)

Εικόνα 2.5.2(4)-Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της KEMET (πηγή :

<https://www.kemet.com/en/us/capacitors/supercapacitors.html?t=550>)



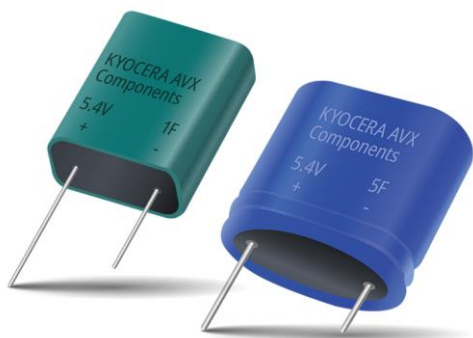
Specifications	
Capacitance	0.22 F
Capacitance Tolerance	-20/+80%
Voltage DC	5.5 VDC, 4.2 VDC (Holding Voltage)
Temperature Range	-25/+70°C
Rated Temperature	70°C
Resistance	25000 mOhms (1kHz)
Discharge Current	0.33 mAmps (30 Minutes After Charging)



Specifications	
Capacitance	1F
Capacitance Tolerance	-20/+80%
Voltage DC	5.5 VDC
Temperature Range	-40/+85°C
Rated Temperature	85°C
Resistance	60000 mOhms (1kHz)
Discharge Current	1.5 mAmps (30 Minutes After Charging)

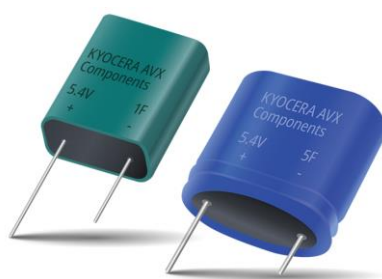
3) Kyocera AVX

Οι υπερπυκνωτές ή πυκνωτές διπλής στρώσης της Kyocera AVX έχουν αναγνωρισθεί γρήγορα, όχι μόνο ως ένας άριστος συμβιβασμός μεταξύ "ηλεκτρονικών" ή "διηλεκτρικών" πυκνωτών, όπως κεραμικών, τανταλίου, φιλμ και ηλεκτρολυτικού αλουμινίου, και μπαταριών, αλλά και ως μια πολύτιμη τεχνολογία για την παροχή ενός μοναδικού συνδυασμού χαρακτηριστικών, ιδιαίτερα πολύ υψηλών πυκνοτήτων παλμικής ισχύος και χωρητικότητας.



Εικόνα 2.5.2(5)-Υπερπυκνωτής της Kyocera AVX

(πηγή : <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.kyocera-avx.com%2Fproducts%2Fsupercapacitors%2Fscm-series%2F&psig=AOvVaw08Oes4dRxU94USGYGVGMvP&ust=1667560532785000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCIDg15vxkfsCFQAAAAAdAAAAABAP>)



AVX Part Number	Diameter (mm)	Length (mm)	Rated Capacitance (F)	Capacitance Tolerance	Rated Voltage (V)	Rated Temperature (°C)	DCL Max @ 72 Hrs (μA)	ESR Max @ 1000 Hz (mΩ)	ESR Max @ DC (mΩ)	Peak Current (A)	Power Density (W/kg)	Max Energy (Wh)	Energy Density (Wh/kg)
Shrink Wrap / Radial Lead													
SCMQ14C474PRBA0	6.3	14	0.47	+100%/-0%	5.0/4.2*	65/85*	6	400	1000	0.80	2143	0.0016	1.17
SCMQ14C474PRTA0	6.3	14	0.47	+100%/-0%	5.0/4.2*	65/85*	6	400	1000	0.80	2143	0.0016	1.17
SCMQ14D474PRBB0	6.3	14	0.47	+100%/-0%	5.4/4.6*	65/85*	6	400	1000	0.86	2499	0.0019	1.36
SCMQ14D474PRTB0	6.3	14	0.47	+100%/-0%	5.4/4.6*	65/85*	6	400	1000	0.86	2499	0.0019	1.36
SCMR14C474PRBA0	8	14	0.47	+100%/-0%	5.0/4.2*	65/85*	6	300	1000	0.80	1429	0.0016	0.78
SCMR14D474PRBB0	8	14	0.47	+100%/-0%	5.4/4.6*	65/85*	6	300	1000	0.86	1666	0.0019	0.91
SCMR18C105PRBA0	8	18	1	+100%/-0%	5.0/4.2*	65/85*	8	200	720	1.45	1667	0.0035	1.39
SCMR18D105PRBB0	8	18	1	+100%/-0%	5.4/4.6*	65/85*	10	200	720	1.57	1944	0.0041	1.62
SCMR22C155PRBA0	8	22	1.5	+100%/-0%	5.0/4.2*	65/85*	10	190	580	2.01	1669	0.0052	1.68
SCMR22D155PRBB0	8	22	1.5	+100%/-0%	5.4/4.6*	65/85*	15	190	580	2.17	1946	0.0061	1.96
SCMS22C255PRBA0	10	22	2.5	+100%/-0%	5.0/4.2*	65/85*	20	140	360	3.29	1852	0.0087	1.93
SCMS22D255PRBB0	10	22	2.5	+100%/-0%	5.4/4.6*	65/85*	25	140	360	3.55	2113	0.0101	2.20
SCMT22C505PRBA0	12.5	22	5	+100%/-0%	5.0/4.2*	65/85*	25	100	150	7.14	2740	0.0174	2.38
SCMT22D505PRBB0	12.5	22	5	+100%/-0%	5.4/4.6*	65/85*	30	100	150	7.71	3069	0.0203	2.66
SCMT32C755SRBA0	12.5	32	7.5	+30%/-10%	5.0/4.2*	65/85*	65	70	160	8.52	1953	0.0260	2.71
SCMT32D755SRBB0	12.5	32	7.5	+30%/-10%	5.4/4.6*	65/85*	70	70	160	9.20	2209	0.0304	3.07

Εικόνα 2.5.2(6)-Τεχνικά χαρακτηριστικά της Kyocera AVX

(πηγή : <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.kyocera-avx.com%2Fproducts%2Fsupercapacitors%2Fscm-series%2F&psig=AOvVaw08Oes4dRxU94USGYGVGMvP&ust=1667560532785000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCIDg15vxkfsCFQAAAAAdAAAAABAP>)

4) Eaton

Οι υπερπυκνωτές της Eaton είναι μοναδικές διατάξεις εξαιρετικά υψηλής χωρητικότητας που χρησιμοποιούν την κατασκευή πυκνωτή διπλής ηλεκτρικής στιβάδας (EDLC) σε συνδυασμό με νέα υλικά υψηλής απόδοσης. Αυτός ο συνδυασμός προηγμένων τεχνολογιών επιτρέπει στην Eaton να προσφέρει μια μεγάλη ποικιλία λύσεων πυκνωτών προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένες εφαρμογές που κυμαίνονται από μερικά μικροαμπέρ για αρκετές ημέρες έως εκατοντάδες αμπέρ για δευτερόλεπτα. Παρέχοντας υπερπυκνωτές παγκόσμιας κλάσης, έχει κατακτήσει ένα όνομα στους 7 κορυφαίους κατασκευαστές υπερπυκνωτών στον κόσμο.



Εικόνα 2.5.2(7)-Υπερπυκνωτής της Eaton (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.eaton.com%2Fus%2Fen-us%2Fcatalog%2Felectronic-components%2Fxt-supercapacitor.html&psig=AOvVaw1Yz15nmCIRyDHcGBh_fI0B&ust=1667560736663000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCPIQ5fzxkfsCFQAAAAAdAAAAABAE)



Ratings

Capacitance	275 F to 555 F
Working voltage	3.0 V
Surge voltage	3.3 V
Capacitance tolerance	-5% to +20% (+20 °C)
Operating temperature range	-40 °C to +65 °C
Extended operating temperature range	-40 °C to +85 °C (with linear voltage derating to 2.6 V @ +85 °C)

Specifications

Capacitance ¹ (F)	Part Number	Maximum initial ESR ¹ (mΩ)	Continuous current ⁶ (A)	Peak current ⁵ (A)	Nominal leakage current ² (mA)	Peak power ⁴ (W)	Stored energy ³ (mWh)	Typical thermal resistance ⁷ Rth (°C/W)	Short circuit current ^{**8} (A)
275	XT3550-3R0287-R	4.5	20.4	184	0.60	500	344	8	670
370	XT3560-3R0377-R	3.2	25.9	254	0.85	700	463	7	940
555	XT3585-3R0567-R	2.6	33.0	341	1.30	870	694	5	1150

Εικόνα 2.5.2(8)-Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της Eaton (πηγή :

<https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/data-sheet/eaton-xt-supercapacitors-cylindrical-cells-data-sheet.pdf>)

5) Cornell Dubilier (CDE)

Η εταιρεία προσφέρει ένα ευρύ φάσμα τιμών χωρητικότητας και τάσεων. Η τεχνολογία τους χρησιμοποιείται σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, από την εφεδρική μπαταρία σε έξυπνους μετρητές έως την αναγεννητική πέδηση. Επιλέγεται από συναρμολογούμενες σε πλακέτες τύπου νομίσματος και ακτινωτές μορφές ή συνεργάζονται μαζί τους για την ανάπτυξη προσαρμοσμένων μονάδων υψηλότερης τάσης με ενεργή ή παθητική εξισορρόπηση. Η CDE έχει κερδίσει το όνομά της στον κατάλογο των 7 κορυφαίων κατασκευαστών υπερπυκνωτών στον κόσμο. Η CDE προσφέρει μία από τις ευρύτερες επιλογές παγκοσμίως σε ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές αλουμινίου, πυκνωτές μαρμαρυγίας, πυκνωτές μεμβράνης AC και πυκνωτές μεμβράνης DC. Είναι επίσης ο μοναδικός κατασκευαστής στις ΗΠΑ πυκνωτών μαρμαρυγίας υψηλής ποιότητας.



CDE EXPANDS CAPABILITIES IN SUPERCAPACITORS WITH ADDED CAPACITANCE VALUES, AND CELL SIZES
<https://www.cde.com/capacitors/ultracapacitors>

Εικόνα 2.5.2(9)-Υπερπυκνωτής της Cornell Dubilier (πηγή

: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.powersystemsdesign.com%2Farticles%2Fcornell-dubilier-announces-expanded-supercapacitor-offerings%2F6%2F17724&psig=AOvVaw0w7azh9cbTjweuI4RNZzRz&ust=1667563496235000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCNjYzaD8kfsCFOAAAAAAdAAAAABAE>)



Series	Description	Cap Range	Rated Voltage	Temp Range	Construction
DGH	85c Low ESR Supercapacitor	1F-600F	2.7v	-40C to +85c	Cylindrical
DGH	85c Low ESR Supercapacitor	0.5F-5.0F	5.5v	-40C to +85c	Module
DSF	85c Low ESR Supercapacitor	3F-600F	3v	-40C to +85c	Cylindrical
DSF	85c Low ESR Supercapacitor	1.5F-5F	6v	-40C to +85c	Module
VMF	LiC Hybrid Supercapacitor	10F-220F	3.8v	-15C to +85C	Cylindrical
VPF	LiC Hybrid Supercapacitor	40F-220F	3.8v	-25C to +70C	Cylindrical
EDC	70c Coin Cell Supercapacitor	.047F-1.5F	5.5v	-25c to +70c	Coin
EDS	85c Coin Cell Supercapacitor	.047F-1.5F	5.5v	-25c to +85c	Coin

Εικόνα 2.5.2(10)- Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της Cornell Dubilier (πηγή :

<https://gr.mouser.com/c/ds/passive-components/capacitors/?m=Cornell%20Dubilier>)

6) *Maxwell Technologies*

Η Maxwell Technologies είναι πρωτοπόρος στο σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την εφαρμογή της τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας με υπερπυκνωτές για την αντιμετώπιση του ενεργειακού κενού για λύσεις ταχείας απόκρισης και παροχής υψηλής ισχύος. Η ηγετική θέση της Maxwell έχει εκδηλωθεί σε πολύτιμες παγκόσμιες συνεργασίες και σε περισσότερα από 65 εκατομμύρια κυψέλες υπερπυκνωτών Maxwell που έχουν αναπτυχθεί σε κινητές και σταθερές εφαρμογές παγκοσμίως. Το χαρτοφυλάκιο της Maxwell για την αποθήκευση ενέργειας υψηλής απόδοσης περιλαμβάνει μια ποικιλία σειρών προϊόντων σχεδιασμένων για να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του συστήματός. Η τεχνολογία κυψελών υπερπυκνωτών (υπερπυκνωτών) της Maxwell πληρεί τα υψηλότερα πρότυπα ποιότητας του κλάδου και μπορεί να βασιστεί κανείς στην ανθεκτικότητα, την ελάχιστη συντήρηση και τη μεγάλη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τις εναλλακτικές επιλογές αποθήκευσης ενέργειας που κυκλοφορούν στην αγορά. Ο σχεδιασμός με επίκεντρο τον πελάτη, η εμπειρία δεκαετιών σε δοκιμές προϊόντων και οι αποδεδειγμένες επιδόσεις στο πεδίο είναι οι λόγοι για τους οποίους οι επιχειρήσεις συνεχίζουν να επιλέγουν τις κορυφαίες λύσεις της Maxwell.



Εικόνα 2.5.2(11)-Υπερπυκνωτής της Maxwell Technologies (πηγή :

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.solarpowerworldonline.com%2F2013%2F08%2Fultracapacitors-help-with-solar-grid-challenges%2F&psig=AOvVaw2r5oR0wSpkMSzxDWcJV2Eh&ust=1667563700011000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCLi694H9kfsCFOAAAAAdAAAAABAE\)](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.solarpowerworldonline.com%2F2013%2F08%2Fultracapacitors-help-with-solar-grid-challenges%2F&psig=AOvVaw2r5oR0wSpkMSzxDWcJV2Eh&ust=1667563700011000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCLi694H9kfsCFOAAAAAdAAAAABAE)

Maxwell Ultracapacitor Cells

Product	Model Number	Rated Voltage (V) ¹	Rated Capacitance ¹ (F)	ESR _{DC} ¹ (mohm)				Leakage Current ² (mA) 72 hours, 25°C	Max. Continuous Current ³ (A _{RMS}) ΔT=15°C ΔT=40°C	Stored Energy ² (Wh) at V _n	Specific Energy ² (Wh/kg) Gravimetric	Dimensions (mm)		Mass (g)	Terminals	
				Max (10ms)	Typical (10ms)	Max (5s)	Typical (5s)					Diameter	Length			
	BCAP0100 P270 T01 ⁴	2.7	100	-	-	15	-	0.260	6.7	11	0.101	4.39	22.0	45.0	23	Straight Lead
	BCAP0150 P270 T07 ⁴	2.7	150	-	-	14	-	0.500	7.7	13	0.152	4.75	25.0	50.0	32	Snap-In
	BCAP0650 P270 K04'05 ⁴	2.7	650	-	-	0.8	-	1.5	54	88	0.66	4.1	60.4	79.5 57.86	160	Threaded Weldable
	BCAP1200 P270 K04'05 ⁴	2.7	1,200	-	-	0.58	-	2.7	70	110	1.22	4.7	60.4	102 80.36	260	Threaded Weldable
	BCAP0050 P270 X01 ⁴ ESHSR-0050C0-002R7UC	2.7	50	16	10	-	16	0.073	6.1	10.0	0.05	4.0	18.0	41.0	12.4	Straight Lead
	BCAP0003 P300 X11/X12 ⁴	3.0	3	95	62	-	-	0.007	1.4	2.3	0.0038	2.7	8.0	19.5	1.4	Straight Lead Bent Lead

Product	Model Number	Rated Voltage (V) ¹	Rated Capacitance ¹ (F)	ESR _{DC} ¹ (mohm) DC	Leakage Current ² (mA) 72 hours, 25°C	Max. Continuous Current ³ (A _{RMS}) ΔT=15°C ΔT=40°C		Stored Energy ² (Wh) at V _n	Specific Energy ² (Wh/kg) Gravimetric	Vibration Specification	Cell Voltage Management	Max. Rated String Voltage ⁴	High Pot Capability ⁵ VDC	Dimensions (mm)			Mass (kg)
						Length	Width							Height			
	BMOD0002 P005 B02 EMHSR-0002C5-005R0	5	2.5	< 85	< 0.008	1.6	2.6	0.0086	1.7	None	None	100	None	23	21.5	12	0.005
	BMOD0058 E016 B02 ⁴	16	58	22	170	12	19	2.1	3.3	IEC60068-2-6	Passive	750	5,600	226.5	49.5	76	0.63
	BMOD0500 P016 B01 ⁴ BMOD0500 P016 B02 ⁴	16	500	2.1	5.2 170	100	160	18	3.2	SAE J2380	VMS 2.0 Passive	750	2,500	418	68	179	5.4
	BMOD0010 P090 B02/C02 EMHSR-0010C0-090R0 C1/C2	90	10	< 121	26, typical	-	-	11.2	1.7	SAE J2380	Passive	750	4,000	292	116	282.6	6.3
	BMOD0063 P125 B04 BMOD0063 P125 B08	125	63	18	10	140	240	140	2.3	ISO16750-3 Table 14	VMS 2.0	1,500	4,000	619	425	265	61

Εικόνα 2.5.2(12)-Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών της Maxwell Technologies (πηγή : <https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/ProductMatrix.pdf>)

7) Elna

Η Elna σχεδιάζει, κατασκευάζει και πωλεί ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές αλουμινίου, στερεού αγωγίμου πολυμερούς και ηλεκτρικούς πυκνωτές διπλής στρώσης. Τα πιστοποιημένα κατά IATF 16949, ISO 9001, ISO 14001 και ISO 45001 εργοστάσιά της βρίσκονται στην Ιαπωνία, την Ταϊλάνδη και τη Μαλαισία. Η πελατειακή βάση της Elna έχει αυξηθεί με την πάροδο των ετών και περιλαμβάνει όλα τα τμήματα της αγοράς της βιομηχανίας ηλεκτρονικών ειδών, συμπεριλαμβανομένων της αυτοκινητοβιομηχανίας, των τηλεπικοινωνιών, της ιατρικής, της βιομηχανίας και της κατανάλωσης. Η ευελιξία, η επικοινωνία και η κατανόηση των πελατών τους έχουν καταστήσει το όνομά τους στον κατάλογο των 7 κορυφαίων κατασκευαστών υπερπυκνωτών στον κόσμο.



Εικόνα 2.5.2(13)-Υπερπυκνωτής της Elna (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Falltroniccomputer.com.sg%2Fproducts%2Fdynacap-supercapacitor-0-1f-5-5v-13-5x7-5-horizontal-db-5r5d104-elna&psig=AOvVaw3Qlo1z3FRHVv8PzEIEhfKv&ust=1667564440248000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCOi44eL_kfsCFQAAAAAdAAAAABAE)

Item	Performance							
Category temperature range (°C)	-25 to +70							
Tolerance at rated capacitance (%)	-20 to +80							
Internal resistance at 1 kHz	Rated capacitance (F)	0.047	0.1	0.22	0.33	0.47	1.0	1.5
	Internal resistance (Ω)	120	75	75	75	30	30	30
Characteristics at high and low temperature	Percentage of capacitance change	Within ±30% of the value at 20°C						
	Internal resistance	Less than five times of the value at 20°C						
Endurance (70°C)	Test time	1000 hours						
	Percentage of capacitance change	Within ±30% of the initial measured value						
	Internal resistance	Within four times of the initial specified value						
Shelf life (70°C)	Test time : 1000 hours ; Same as endurance.							

Εικόνα 2.5.2(14)-Τεχνικά χαρακτηριστικά Υπερπυκνωτή της Elna (πηγή :

<https://www.es.co.th/Schematic/PDF/ELNA-DYNACAP.PDF>)

Στον πίνακα 2.5.2 παρουσιάζονται οι επιδόσεις των επιλεγμένων υπερπυκνωτών που διατίθενται σήμερα δίνονται

Πίνακας 2.5.2- Απόδοση των υπερπυκνωτών (πηγή :

https://www.researchgate.net/publication/260400351_Properties_and_Applications_of_Supercapacitors_From_the_State-of-the-art_to_Future_Trends)

Companies	Voltage [V]	Capacity [F]	Energy [Wh/kg]	Power [W/kg]
Asahi Glass (J)	2.5	3000	7	0.4
Econd (R)	500		0.3	56
Elna Comp. (J)	5.5	1		
Epcos (D)	2.3	2700	2.5	2.7
Evans (US)	100	200	1.1	
Matsushita (J)	2.3	470	1.1	0.35
Maxwell (US)	2.3	2700	2.5	2.7
Montena (CH)	2.5	800	2.4	2.8
Nec (Tokin) (J)	5.5		1.3	0.5
Polystor (USA)	2.5	7		4

2.6 Δυσκολίες των υπερπυκνωτών

Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται ευρέως στις μεταφορές, τη βιομηχανία, το στρατό, την κατανάλωση ηλεκτρονικά και σε άλλους τομείς λόγω των εξαιρετικών χαρακτηριστικών τους. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές έχουν ορισμένες ελλείψεις. Τα υφιστάμενα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν, περιγράφονται κυρίως στις ακόλουθες τέσσερις πτυχές.

Τεχνικά προβλήματα των υπερπυκνωτών

Οι ενεργειακές πυκνότητες των υπερπυκνωτών δεν είναι πολύ υψηλές. Επί του παρόντος, υπάρχει ακόμη ένα ορισμένο χάσμα μεταξύ των υπερπυκνωτών (<20 Wh kg⁻¹) και των μπαταριών (30-200 Wh kg⁻¹) όσον αφορά τις ενεργειακές πυκνότητες, ο τρόπος βελτίωσης της ενεργειακής πυκνότητας εξακολουθεί να αποτελεί το ερευνητικό επίκεντρο και τη δυσκολία στον τομέα των υπερπυκνωτών. Η βελτίωση της διαδικασίας κατασκευής και της τεχνολογίας είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για τη βελτίωση της αποθηκευτικής ικανότητας των υπερπυκνωτών, αλλά μακροπρόθεσμα, είναι απαραίτητη και δύσκολη η εύρεση νέων ηλεκτρολυτών και ενεργών υλικών ηλεκτροδίων με υψηλότερες αντίστοιχες ηλεκτροχημικές επιδόσεις. Οι υπερπυκνωτές χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας οδηγούν σε ογκωδέστερες διατάξεις και ως εκ τούτου δεν είναι συμπαγείς. Οι ενεργειακές πυκνότητες των υπερπυκνωτών μπορούν να βελτιωθούν με την αύξηση της αποτελεσματικής επιφάνειας των υλικών ηλεκτροδίων στους πυκνωτές διπλής στρώσης ή αυξάνοντας το παράθυρο τάσης λειτουργίας ή και τα δύο. Όλο και περισσότερες έρευνες

συνεχίζονται για την ανάπτυξη νέων υλικών με μεγάλη επιφάνεια και με τη χρήση κατάλληλων οργανικών ηλεκτρολυτών που μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερο παράθυρο τάσης. Εάν αντιμετωπιστούν κατάλληλα αυτές οι εκτάσεις, οι ενεργειακές πυκνότητες των υπερπυκνωτών μπορούν να γίνουν συγκρίσιμες με τις μπαταρίες.

Καθιέρωση μοντέλου ηλεκτρικών παραμέτρων

Σε ορισμένους τομείς, το μοντέλο του υπερπυκνωτή μπορεί να είναι ισοδύναμο με το ιδανικό μοντέλο, αλλά σε στρατιωτικές εφαρμογές, ιδίως σε εφαρμογές τροφοδοσίας ισχύος δορυφόρων και διαστημόπλοια, ορισμένες μη ιδανικές παράμετροι μπορεί να επιφέρουν πιθανούς κινδύνους, οι οποίοι δεν μπορούν να μην ληφθούν υπόψη. Συντονισμός που προκαλείται από το συνηθισμένο σήμα, το φίλτρο και τον πυκνωτή αποθήκευσης ενέργειας έχει μια ώριμη λύση λόγω της περιορισμένης ενέργειάς του. Ο υπερπυκνωτής έχει την ικανότητα στιγμιαίας απόδοσης και τεράστιας ενέργειας λόγω της υψηλής ενέργειάς του. Ως εκ τούτου, είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει ένας αξιόπιστος σχεδιασμός για τη μελέτη των επιπτώσεων στη φύση του φορτίου, την διακύμανση ή το εξωτερικό περιβάλλον και τις τυχαίες διαταραχές στο σύστημα σταθερότητα.

Ανίχνευση συνέπειας

Η ονομαστική τάση του υπερπυκνωτή είναι πολύ χαμηλή (λιγότερο από 2,7V), η οποία απαιτεί πολλές συνδέσεις σε σειρά για πρακτικές εφαρμογές. Λόγω της ανάγκης για υψηλό ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης στις εφαρμογές, η υπερφόρτιση έχει σοβαρές επιπτώσεις στην διάρκεια ζωής των πυκνωτών, είναι πολύ σημαντικό αν οι τάσεις στις επιμέρους πυκνωτές σε σειρά είναι συνεπείς ή όχι.

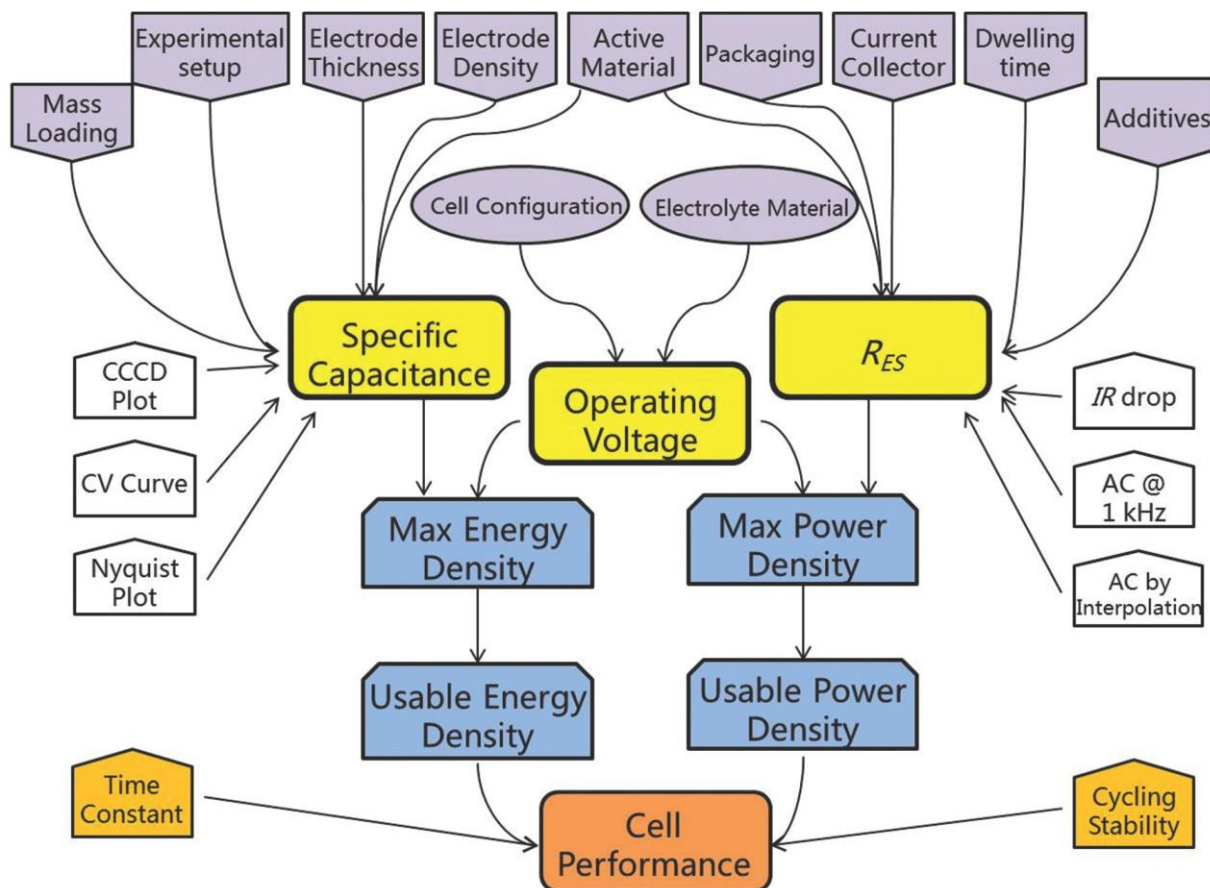
Βιομηχανικό πρότυπο

Οι υπερπυκνωτές έχουν σύντομο χρόνο ανάπτυξης και γρήγορη ταχύτητα. Επιχειρήσεις που ασχολούνται στον κλάδο των υπερπυκνωτών έχουν διαφορετικά επίπεδα. Ως νέα συσκευή αποθήκευσης ενέργειας, η υγιής ανάπτυξη των υπερπυκνωτών δεν μπορεί να διαχωριστεί από τη βιομηχανία και την εποπτεία της αγοράς, η οποία αποσκοπεί στη διαμόρφωση πρακτικών βιομηχανικών προτύπων, εθνικών προτύπων και ακόμη διεθνή πρότυπα. Ένα σύνολο συστημάτων τεχνικών προτύπων, όπως όροι, μέθοδος ονοματοδοσίας μοντέλου ταξινόμησης, μέθοδος δοκιμής ηλεκτρικής απόδοσης, ασφάλεια τεχνικές απαιτήσεις, γενικές προδιαγραφές, προδιαγραφές υλικού ηλεκτροδίου, προδιαγραφές ηλεκτρολύτη, σειρά προδιαγραφών φορτιστή, τεχνικές προδιαγραφές παραγωγής απαιτήσεις, απαιτήσεις μεταφοράς, απαιτήσεις ανάκτησης και καταστροφής θα πρέπει να θεσπιστούν για τους υπερπυκνωτές. Για παράδειγμα, οι γενικές απαιτήσεις και οι απαιτήσεις αποθήκευσης και διαχείρισης των μονομερών και των μονάδων υπερπυκνωτών στη διάθεση των

απορριμμάτων, συμπεριλαμβανομένης της αποσυναρμολόγησης των απορριμμάτων μονομερούς και υπερπυκνωτή μονάδων και ανακύκλωση χειρισμού, επεξεργασία κελύφους πυκνωτή ηλεκτρολύτη, επεξεργασία πλακών, την επεξεργασία του διαφράγματος και άλλες πτυχές, αποσκοπεί στην καθοδήγηση και την τυποποίηση της βιομηχανίας υπερπυκνωτών να επιτύχει τον στόχο της χαμηλού κόστους, πράσινης διάθεσης ανακύκλωσης. Είναι ένα απαραίτητο μέσο για την προώθηση της υγιούς ανάπτυξης της βιομηχανίας.

2.7 Απόδοση των υπερπυκνωτών

Για την αξιολόγηση της απόδοσης των SCs, τρεις βασικές παράμετροι, η (συνολική) χωρητικότητα κυττάρου CT, τάση λειτουργίας V_0 και ισοδύναμη αντίσταση σειράς RES, χρησιμοποιούνται συχνά για την αξιολόγηση των επιδόσεων ενέργειας και ισχύος τους και συνήθως είναι επαρκείς για εμπορικά προϊόντα όπου τα υλικά, η κατασκευή και ο σχεδιασμός των κυψελών είναι σταθερά. Ωστόσο, στον ερευνητικό χώρο της συνεχούς διερεύνησης νέων υλικών, πιο προηγμένων διαδικασιών κατασκευής και νέου σχεδιασμού κυψελών, ορισμένοι άλλοι παράγοντες καθίστανται απαραίτητοι. Στην πραγματικότητα, υπάρχει μια αρκετά μεγάλη ομάδα σημαντικών παραγόντων που είναι απαραίτητοι για τη διαμόρφωση της συνολικής εικόνας για τους υπερπυκνωτές, και μια ματιά στην πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων μετρικών επιδόσεων, των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν και των αντίστοιχων μεθόδων δοκιμής παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4.



Εικόνα 2.7 – Απεικόνιση των βασικών μετρικών επιδόσεων, των μεθόδων δοκιμής, των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν την αξιολόγηση των SCs (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fonlinelibrary.wiley.com%2Fdoi%2F10.1002%2Faenm.201401401&psig=AOvVaw0ew.J7TU4sd5p_DpfNgNJwk&ust=1667822342666000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCIjYp8TAmfsCFQAAAAAdAAAAABAE)

Στο σχήμα χρησιμοποιούνται διάφορα χρωματικά σχήματα: οι τρεις βασικές παράμετροι επισημαίνονται με κίτρινο χρώμα, οι πυκνότητες ισχύος και ενέργειας με σκούρο μπλε χρώμα, η σταθερά χρόνου και η σταθερότητα σε κύκλους με ανοιχτό πορτοκαλί χρώμα, όλοι οι σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν με ανοιχτό μοβ χρώμα και οι αντίστοιχες μέθοδοι δοκιμής με λευκό χρώμα. Το διάγραμμα είναι περισσότερο για λόγους απεικόνισης και σε καμία περίπτωση δεν είναι αποκλειστικό στην παρουσίαση όλων των παραγόντες ή την αναλυτική παρουσίαση των πολύπλοκων και πολύπλευρων συνδέσεων μεταξύ τους. Για παράδειγμα, η μέθοδος αξιολόγησης της V_0 και η επίδραση των υλικών ηλεκτρολύτη στην ειδική χωρητικότητα δεν παρουσιάζονται ρητά. Δίνοντας τέτοιες πολλαπλές μετρήσεις επιδόσεων, μεθόδους δοκιμής, παράγοντες που επηρεάζουν τους παράγοντες που παρουσιάζονται στην σχήμα, και τις πολύπλευρες σχέσεις μεταξύ τους, οι ασυνέπειες καθίστανται αναπόφευκτες στα αποτελέσματα των δοκιμών για το ίδιο στοιχείο που μετρήθηκαν σε διαφορετικά εργαστήρια, με διαφορετικές μεθόδους και μεταξύ ακαδημαϊκών και βιομηχανικών φορέων. Για την κατανόηση των αιτιών για τις εν λόγω ασυνέπειες, ορισμένες

πρέπει να εξεταστούν σε σημαντικά ζητήματα, όπως οι ιδιότητες του υλικού σε σχέση με την απόδοση της συσκευής, και η εξάρτηση της απόδοσης των υπερπυκνωτών από το ρυθμό.

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την τυποποίηση των μεθόδων αξιολόγησης των υπερπυκνωτών. Ορισμένοι εθνικοί και διεθνείς φορείς, συμπεριλαμβανομένου του DOD (Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ), DOE (Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ), IEC (Διεθνής Ηλεκτροχημική Επιτροπή) και SAE (Society of Automotive Engineers) έχουν ασχοληθεί εντατικά με το θέμα αυτό. Τα έγγραφα που προέκυψαν συνοψίζονται στον πίνακα 2.7 με χρονολογική σειρά.

Πίνακας 2.7- Χρονολογική ανασκόπηση των προτύπων αξιολόγησης SC. (πηγή : <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Ftypeset.io%2Fauthors%2Fning-pan-4we5htvunc&psig=AOnVaw0mzGOLlsoIccqpuBVud68&ust=1667822957652000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCKCCvOnCmfsCFQAAAAAdAAAAABAO>)

Έτος	Οργανισμός	Τίτλος	Αναγνωριστικό εγγράφου
1986	DOD	Πυκνωτές, σταθεροί, ηλεκτρολυτικοί, διπλής στρώσης, άνθρακα (μετρικοί), γενικές προδιαγραφές	DOD-C-29501
1994	DOE	Εγχειρίδιο διαδικασιών δοκιμής πυκνωτών ηλεκτρικών οχημάτων	DOE/ID-10491
2004	DOE	Εγχειρίδιο δοκιμής υπερπυκνωτή FreedomCAR	DOE/NE-ID-11173
2006	IEC	Σταθερός ηλεκτρικός πυκνωτής διπλού στρώματος για χρήση σε ηλεκτρονικό εξοπλισμό	IEC 62391
2009	IEC	Ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλής στρώσης για χρήση σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα - Μέθοδοι δοκιμής ηλεκτρικών χαρακτηριστικών	IEC 62576
2012	IEC	Σιδηροδρομικές εφαρμογές - Εξοπλισμός τροχαίου υλικού - Πυκνωτές για ηλεκτρονικά ισχύος	IEC 61881-3
2013	SAE	Απαιτήσεις συσκευών αποθήκευσης χωρητικής ενέργειας για εφαρμογές κίνησης αυτοκινήτων	J3051

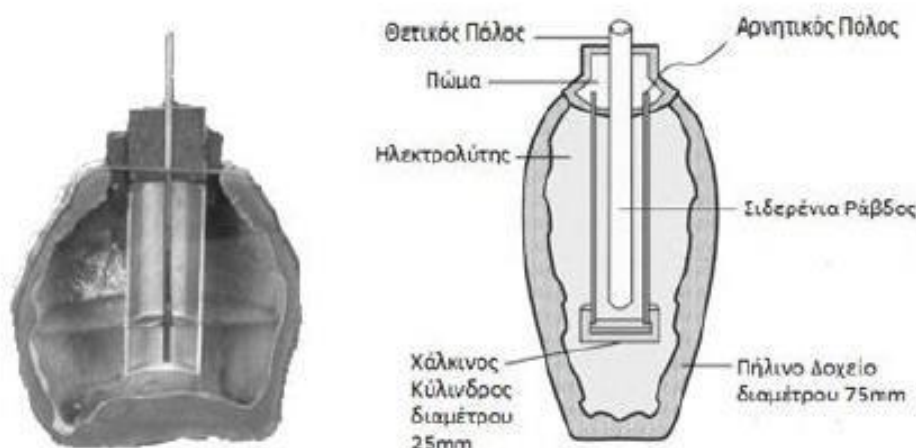
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ – ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΟΥΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΡΟΗΣ

Πριν γίνει ανάλυση του υπό μελέτη μηχανισμού αποθήκευσης ενέργειας ο οποίος είναι η αποθήκευση ενέργειας μέσω συσσωρευτών ροής καλό θα ήταν να γίνει μία σύντομη και περιεκτική αναφορά για τις μπαταρίες γενικότερα. Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μπαταριών μέχρι προσφάτως έχουν αναδειχθεί σαν μία από τις πιο υποσχόμενες μεσοπρόθεσμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας οι οποίες καλύπτουν ένα τεράστιο εύρος εφαρμογών όπως θα μπορούσε να είναι σταθεροποίηση τάσης, βελτίωση ποιότητας ισχύος μικρής αλλά και μεγάλης διάρκειας, παροχή στρεφόμενη της εφεδρείας και ρύθμιση συχνότητας.

3.1 Ιστορική αναδρομή του συσσωρευτή

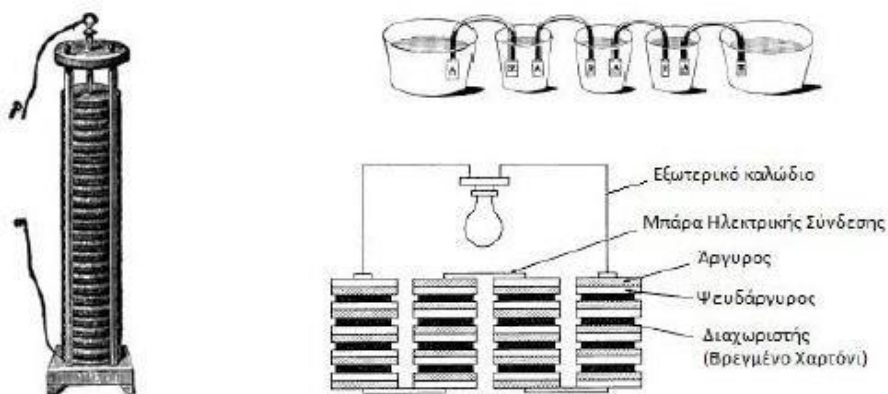
Όπως ήδη είναι γνωστό τα τελευταία 400 χρόνια η πιο σημαντική και σπουδαία ανακάλυψη του ανθρώπου που έχει αποδειχτεί, είναι ο ηλεκτρισμός. Παρόλα αυτά είναι σημαντικό να τονιστεί πως η πηγή έμπνευσης ανακάλυψης του ηλεκτρισμού ήταν η ανακάλυψη της μπαταρίας στα τέλη του 1800. Προτού ανακαλυφθούν οι γεννήτριες και τα ηλεκτρικά δίκτυα, πηγή ενέργειας αποτελούσαν οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές και χάρη στην ακατάπαυστη εξέλιξη της τεχνολογίας υπήρξαν πολύ σημαντικές ανακαλύψεις.

Η πρώτη μπαταρία ανακαλύφθηκε από εργάτες στη Βαγδάτη το 1936 κατά τη διάρκεια κατασκευής ενός σιδηροδρόμου. Η μπαταρία αυτή είναι γνωστή και ως «μπαταρία της βαγδάτης» ή μπαταρία της Παρθιάς και χρονολογείται να είναι 2.000 ετών. Η δομή της αποτελείται από ένα πήλινο δοχείο στο οποίο μέσα υπήρχε ένας χάλκινος κύλινδρος με μία σιδερένια ράβδος στο εσωτερικό του. Αυτό πρακτικά, όταν γέμιζε με τη βοήθεια ενός διαλύματος ξυδιού ή άλλου ηλεκτρολύτη, υπήρχε παραγωγή τάσης 1-2 volt.



Εικόνα 3.1(1)-Δομικά στοιχεία της μπαταρίας της Βαγδάτης (πηγή : https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRxZKy0a6DI04g_ngF6y4gKl_mn8zuNbgJUUG&usqp=CAU)

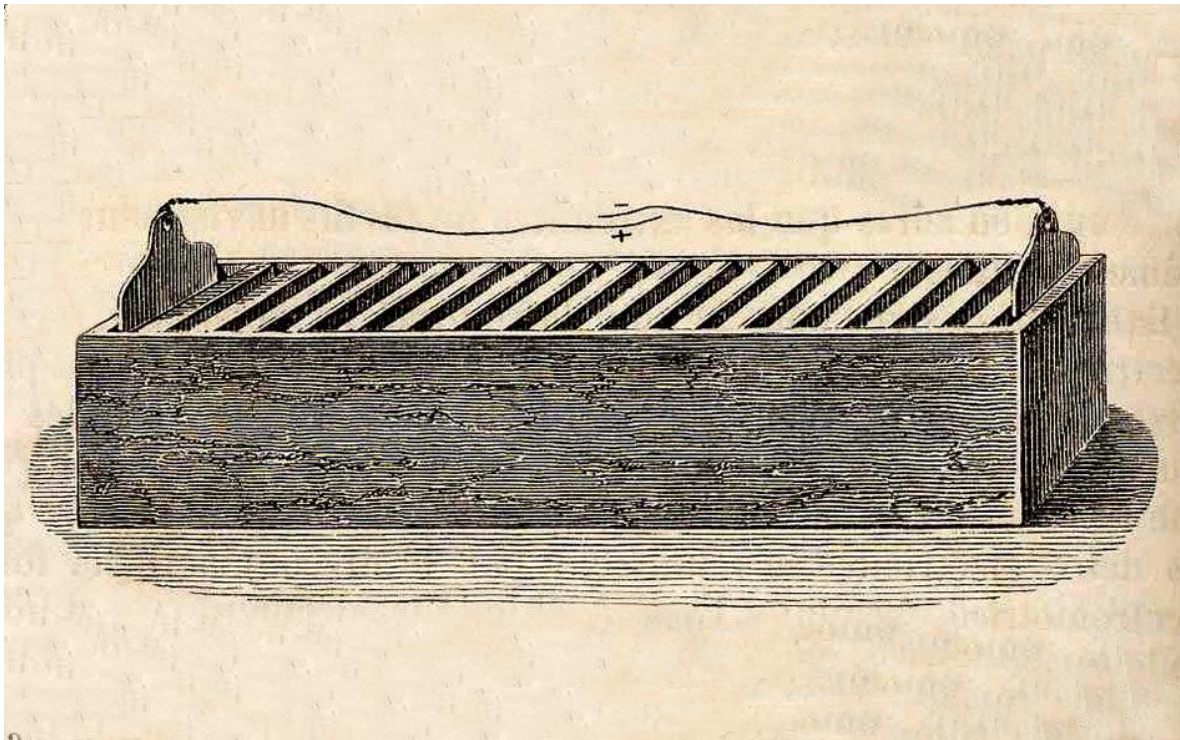
Επίσης το 1791, ο Luigi Galvani, Ιταλός καθηγητής ανατομίας του πανεπιστημίου της Μπολόνια, τυχαία ανακάλυψε πως μπορεί να υπάρξει ροή του ρεύματος κατά μήκος ενός ηλεκτρικού αγωγού μόνο και μόνο επειδή βυθίζονται δύο διαφορετικά μέταλλα μέσα σε μία υγρή ουσία. Μετά από αυτό το γεγονός ο Alessandro Volta, καθηγητής φυσικής Φιλοσοφίας του πανεπιστημίου της Παβίας, επηρεασμένος από αυτή την ανακάλυψη έκανε μία σειρά από πειράματα χρησιμοποιώντας μόλυβδο, κασσίτερο, ψευδάργυρο και σίδηρο για τη θετική πλάκα και χαλκό, άργυρο, χρυσό και γραφίτη για την αρνητική. Επιπλέον το 1800 ανακαλύφθηκε ότι μπορεί να παραχθεί η συνεχής ροή ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση συγκεκριμένων υγρών να έχουν το ρόλο των αγωγών για την πρόκληση της χημικής αντίδρασης μεταξύ των πλακών και των ηλεκτροδίων. Αυτή υπήρξε η αιτία δημιουργίας της «πρώτης μπαταρίας» ή διαφορετικά Βολταϊκής στήλης.



Εικόνα 3.1(2)-Βολταϊκή στήλη και το “στέμμα κυπέλων” (πηγή :

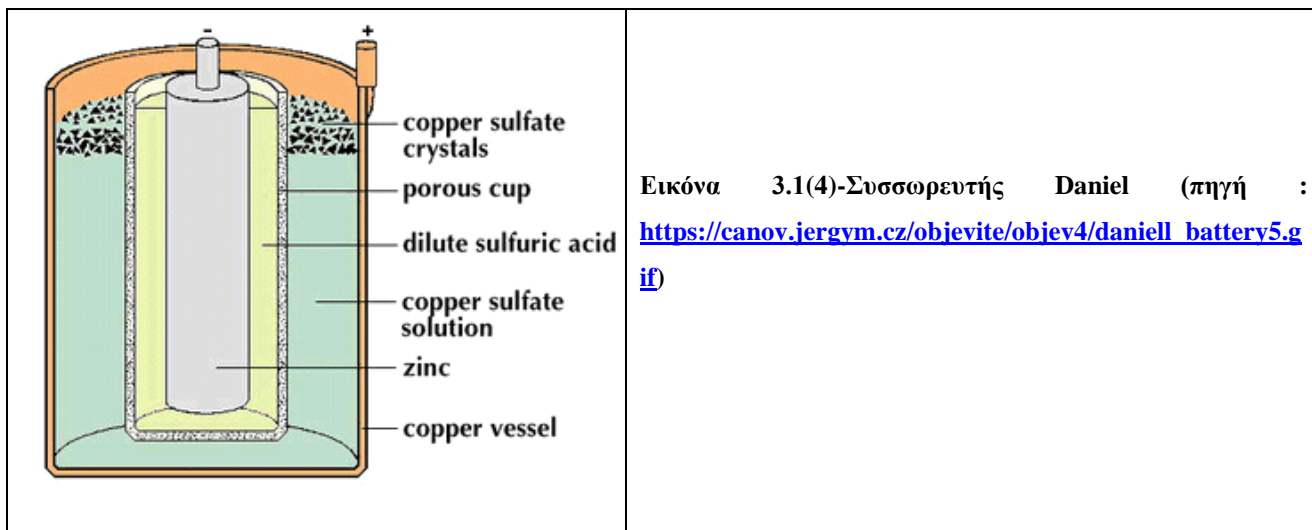
https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fikee.lib.auth.gr%2Frecord%2F291741%2Ffiles%2Fkourtidis_2014.pdf&sig=AOvVaw0bYzAnzflncr75wp6Brn7&ust=1666710412070000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCJi7paKS-foCFQAAAAAdAAAAABAE)

Στη συνέχεια, υπήρξαν πολλές ανακαλύψεις σχετικά με τον κλάδο αυτόν, με τον Σερ Humphry Davy να φτιάχνει στο υπόγειο της Βασιλικής εταιρείας του Λονδίνου μία κατασκευή μιας τεράστιας μπαταρίας, συνδέοντας την σύλληψη ροδιά ξυλάνθρακα με αποτέλεσμα την παραγωγή του πρώτου ηλεκτρικού φωτός. Έπειτα το 1702 βγήκε η στην αγορά η πρώτη μπαταρία μαζικής παραγωγής από τον William Cruickshank, έχοντας τοποθετήσει στα δύο άκρα της Philips υδραργύρου ίδιου μεγέθους στο εσωτερικό ενός ξύλινου ορθογωνίου κουτιού το οποίο ήταν σφραγισμένο με τσιμέντο. Οι πλάκες χρυσού κρατιόντουσαν στη θέση τους μέσω των εσοχών του κουτιού και στη συνέχεια το κουτί γέμισε με έναν ηλεκτρολύτη άλμης ή αραιωμένου οξέος. Αυτή η διάταξη υπήρξε καινοτόμα διότι δεν υπήρχε παρατήρηση διαρροής ηλεκτρολύτη λόγω του βάρους, γεγονός που συνέβαινε σε όλες τις υπόλοιπες μπαταρίες.



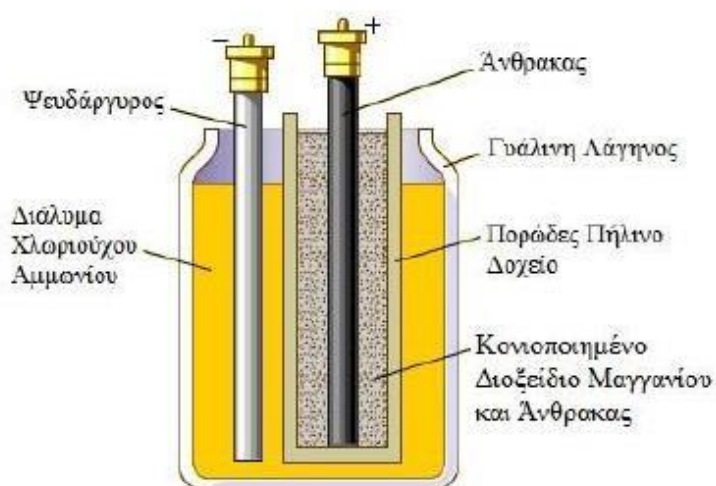
Εικόνα 3.1 (3)-Ο συσσωρευτής του William Cruickshank. (πηγή : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Trough_battery.jpg)

Ο John F. Daniell, καθηγητής στο βασιλικό κολέγιο του Λονδίνου το 1836 έφτιαξε τον πρώτο συσσωρευτή ο οποίος δεν μπορούσε να επαναφορτιστεί μετά την πρώτη αποφόρτιση. Το στοιχείο αυτό το οποίο είναι γνωστό και ως στοιχείο Daniell και το αρνητικό ηλεκτρόδιο, ήταν μία ράβδος καθαρού ψευδαργύρου εντός θεικού οξέος. Υπήρχε επικάλυψη με στρώμα υδραργύρου, προκειμένου να μην προσβληθεί ο ψευδάργυρος από το οξύ, ενώ η κάθοδος ήταν από ένα χάλκινο κάνιστρο που περιείχε θεικό οξύ κορεσμένο με θειούχο χαλκό. Αυτός ο συσσωρευτής υπήρξε καινοτόμος καθώς ήταν μέχρι στιγμής ο μοναδικός ο οποίος παρήγαγε πιο σταθερό ρεύμα συγκριτικά με τους υπόλοιπους.



Εικόνα 3.1(4)-Συσσωρευτής Daniel (πηγή : https://canov.jergym.cz/objevite/objev4/daniell_battery5.gif)

Ο Γάλλος χημικός Georges Leclanche βρήκε το πρώτο ξηρό στοιχείο το 1865, και είναι μέχρι και σήμερα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα επαναφορτιζόμενα στοιχεία. Αρχικά ήταν αποτελούμενο από μία γυάλινη στάμνα η οποία περιείχε διάλυμα χλωριούχου αμμωνίου ως ηλεκτρολύτη και στη συνέχεια η άνοδος ήταν ράβδος ψευδαργύρου όπου στρώμα υδραργύρου την προστάτευε από τη διάβρωση. Με τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος ξεκινούσε η παραγωγή ιόντων υδραργύρου που κινούνταν στο διάλυμα και στο κέντρο της στάμνας υπήρχε ένα πορώδες πήλινο δοχείο το οποίο είχε μείγμα κονιοποιημένου διοξειδίου του μαγγανίου και άνθρακα και ο ρόλος του ήταν ίδιος με αυτός ενός αγωγού υλικού συνδέοντας τη σκόνη του διοξειδίου του μαγγανίου με την κάθοδο.



Εικόνα 3.1(5)-Το στοιχείο Leclanche (πηγή : https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQgK1tzzeMajG1hmbylxnudGrZ2mb5z7YSPfoj_fDv9Hy5xUQFGq5CuxQ4ZLcJ8KhXiso&usqp=CAU)

Έτσι έχουμε τις εξής ανακαλύψεις με τις ανάλογες χρονολογίες τους

- Το 1866 ο Carl Gassner έχοντας το στοιχείο Leclanche δημιούργησε μία παραλλαγή αυτού του στοιχείου το οποίο σήμερα ονομάζεται ο συσσωρευτής ψευδαργύρου-άνθρακα και συνεχίζει να βγαίνει στην παραγωγή.

- Το 1899 ο Σουηδός Waldemar Jungner έκανε την κατασκευή της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας νικελίου-καδμίου η οποία χρησιμοποιούσε ως ηλεκτρόδια νικέλιο για την άνοδο και κάδμιο για την κάθοδο σε διάλυμα υδροξειδίου του καλίου και αποτέλεσε την πρώτη μπαταρία με αλκαλικό ηλεκτρολύτη.

- Το 1955 ο Lewis Urry επινόησε ένα τρόπο για να αυξήσει τη διάρκεια ζωής των συσσωρευτών ψευδαργύρου-άνθρακα. Με αυτόν τον τρόπο η σκόνη ψευδαργύρου προσέφερε στην κάθοδο μεγαλύτερη έκταση επιφάνειας .

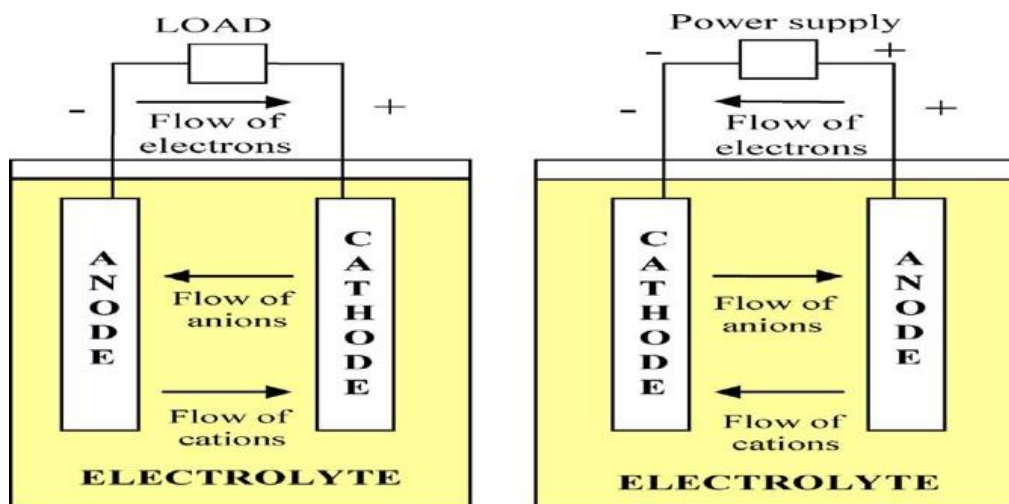
- Το 1970 έκαναν την πρώτη εμφάνιση οι μπαταρίες νικελίου-υδρογόνου των οποίων παραλλαγή αποτέλεσε η μπαταρία νικελίου-υδριδίου-μετάλλου οι οποίες, ουσιαστικά είχαν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το 1980 ήταν τρεις οι σημαντικές εξελίξεις που έγιναν. Η πρώτη είναι του αμερικανού χημικού John B. Goodenough ο οποίος το 1980 χρησιμοποίησε για το ηλεκτρόδιο της καθόδου το οξείδιο του λιθίου-κοβαλτίου για τους συσσωρευτές λιθίου, καθώς και ο Rachid Yazami ως ερευνητής χρησιμοποίησε το γραφίτη για την άνοδο. Αυτό αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για τον ερευνητή Akira Yoshino ο οποίος με την βοήθεια της ομάδας του κατασκεύασε το 1ο πρότυπο μπαταρίες ιόντων λιθίου το 1985, το οποίο ήταν μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία πιο σταθερή από αυτή της μπαταρίας λιθίου. Στο τέλος, μπήκε στην αγορά μέσω της Sony το 1991.

3.2 Συμβατικές μπαταρίες

Τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διατάξεων αποθήκευσης μπαταριών εξελίσσεται όλο και περισσότερο. Μία μπαταρία (ή συσσωρευτής) ορίζεται ως βασική πηγή ρεύματος η οποία έχει την ικανότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, αφού τη μετατρέψει σε χημική, και όταν κριθεί απαραίτητο να την αποδώσει σε εξωτερικό κύκλωμα. Το σχήμα της αρχικά περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα ή και τα δύο, το οποίο κρίνεται με βάση την επιθυμητή η παραγόμενη τάση. Το ηλεκτρικό στοιχείο είναι αποτελούμενο από δύο πλάκες, οι οποίες είναι

φτιαγμένες από διαφορετικά μέταλλα και βρίσκονται βυθιζόμενες σε ένα δοχείο με υγρό. Οι πλάκες, οι οποίες είναι απαραίτητο να είναι αγωγίμες ονομάζονται αλλιώς και ηλεκτρόδια, ενώ το υγρό είναι και αυτό αγωγίμο και αποκαλείται ως ηλεκτρολύτης. Γίνεται μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος-φορτίου χάρη στη χημική αντίδραση μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη των οποίων η αντίδραση προκαλεί τη μεταφορά των ηλεκτρονίων που αναφέρθηκε. Με άλλα λόγια, η σύνδεση των ηλεκτροδίων σε εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα έχει ως συνέπεια την διέλευση ρεύματος δηλαδή την εκφόρτιση της ηλεκτρικής μπαταρίας. Αυτή η φορτισμένη ηλεκτρική μπαταρία φορτίζεται μετά τη διέλευση σε αυτή ενός συνεχούς ρεύματος από διαφορετική πηγή ενώ, συγχρόνως αντίστροφες χημικές διεργασίες είναι υπεύθυνες για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική. Παρακάτω υπάρχει ένα σχηματικό διάγραμμα μιας ηλεκτρικής μπαταρίας για την καλύτερη κατανόηση της δομής της. Το αρνητικό ηλεκτρόδιο ή όπως αλλιώς αποκαλείται άνοδος, παρέχει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα-φορτίο και στη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδώνεται. Έπειτα, έχουμε το θετικό ηλεκτρόδιο το οποίο αποκαλείται και κάθοδος, και εφόσον δέχεται τα ηλεκτρόνια είναι φυσικό επόμενο η μείωση του θετικού φορτίου στη διάρκεια της αντίδρασης. Ακολούθως, ο ηλεκτρολύτης αποτελεί μέσο μεταφοράς των ηλεκτρονίων μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Τελικά, για την ηλεκτρική μόνωση χρησιμοποιούνται διαχωριστές μεταξύ των θετικών και αρνητικών ηλεκτροδίων.



Εικόνα 3.2-Διάγραμμα μπαταρίας (Πηγή:

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS1364032108001664&psig=AOvVaw0Vg6KJ5YnB_UctI3ZseptM&ust=1666710680390000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxaFwoTCLijmaKT-foCFQAAAAAdAAAAABAE\)](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.sciencedirect.com%2Fscience%2Farticle%2Fpii%2FS1364032108001664&psig=AOvVaw0Vg6KJ5YnB_UctI3ZseptM&ust=1666710680390000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxaFwoTCLijmaKT-foCFQAAAAAdAAAAABAE))

Οι συσσωρευτές μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές στα οχήματα και σε μικρές ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες για αδιάλειπτη παροχή ενέργειας ή χρησιμοποιούνται ως

εφεδρείες σε κάποια συστήματα. Τελευταία η συνήθης χρήση τους βρίσκεται στην ηλεκτροπαραγωγή με χρήση ΑΠΕ. Εμφανίζουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης της τάξεως των 70 με 80% συγκριτικά με τις εφαρμογές αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

Κατά την επιλογή μιας μπαταρίας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα χαρακτηριστικά της μπαταρίας:

- Τύπος

1)Πρωτογενείς μπαταρίες

2)Δευτερογενείς μπαταρίες

- Τάση

Η πραγματική τάση που παράγεται θα είναι πάντα χαμηλότερη από τη θεωρητική τάση λόγω της πόλωσης και των απωλειών αντίστασης (πτώση IR) της μπαταρίας και εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου και την εσωτερική αντίσταση του στοιχείου. Αυτοί οι παράγοντες εξαρτώνται από την κινητική των ηλεκτροδίων και συνεπώς μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, την κατάσταση φόρτισης και την ηλικία του στοιχείου. Η πραγματική τάση που εμφανίζεται στον ακροδέκτη πρέπει να είναι επαρκής για την προβλεπόμενη εφαρμογή.

Οι τυπικές τιμές της τάσης κυμαίνονται από 1,2 V για μια μπαταρία Ni/Cd έως 3,7 V για μια μπαταρία Li/ion.

- Καμπύλη εκφόρτισης

Η καμπύλη εκφόρτισης είναι ένα διάγραμμα της τάσης σε σχέση με το ποσοστό της χωρητικότητας που εκφορτίζεται. Μια επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης είναι επιθυμητή, καθώς αυτό σημαίνει ότι η τάση παραμένει σταθερή καθώς η μπαταρία εξαντλείται.

- Χωρητικότητα

Στην πράξη, η πλήρης χωρητικότητα της μπαταρίας δεν θα μπορούσε ποτέ να αξιοποιηθεί, καθώς υπάρχει σημαντική συνεισφορά σε βάρος από μη αντιδραστικά συστατικά, όπως συνδετικά και αγωγίμα σωματίδια, διαχωριστές και ηλεκτρολύτες, συλλέκτες ρεύματος και υποστρώματα, καθώς και συσκευασία. Οι τυπικές τιμές κυμαίνονται από 0,26 Ah/g για Pb έως 26,59 Ah/g για H₂.

- Πυκνότητα ενέργειας

Η ενεργειακή πυκνότητα είναι η ενέργεια που μπορεί να προκύψει ανά μονάδα όγκου από το βάρος του κυττάρου.

- Ειδική πυκνότητα ενέργειας

Η ειδική πυκνότητα ενέργειας είναι η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα βάρους του κυττάρου (ή μερικές φορές ανά μονάδα βάρους του ενεργού υλικού του ηλεκτροδίου). Είναι το γινόμενο της ειδικής χωρητικότητας και της τάσης λειτουργίας σε έναν πλήρη κύκλο εκφόρτισης. Τόσο το ρεύμα όσο και η τάση μπορούν να μεταβληθούν εντός ενός κύκλου εκφόρτισης και, συνεπώς, η ειδική ενέργεια που προκύπτει υπολογίζεται με την ολοκλήρωση του γινομένου του ρεύματος και της τάσης με την πάροδο του χρόνου. Ο χρόνος εκφόρτισης σχετίζεται με το μέγιστο και το ελάχιστο όριο τάσης και εξαρτάται από την κατάσταση διαθεσιμότητας των ενεργών υλικών ή και την αποφυγή μη αναστρέψιμης κατάστασης για μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία.

- Πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος είναι η ισχύς που μπορεί να προκύψει ανά μονάδα βάρους της κυψέλης (W/kg).

- Εξάρτηση από τη θερμοκρασία

Ο ρυθμός της αντίδρασης στο κύτταρο εξαρτάται από τη θερμοκρασία σύμφωνα με τις θεωρίες κινητικής. Η εσωτερική αντίσταση μεταβάλλεται επίσης με τη θερμοκρασία, καθώς οι χαμηλές θερμοκρασίες δίνουν υψηλότερη εσωτερική αντίσταση. Σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ο ηλεκτρολύτης μπορεί να παγώσει δίνοντας χαμηλότερη τάση καθώς εμποδίζεται η κίνηση των ιόντων. Σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες οι χημικές ουσίες μπορεί να αποσυντεθούν ή μπορεί να υπάρχει αρκετή διαθέσιμη ενέργεια για την ενεργοποίηση ανεπιθύμητων, αντιστρεπτών αντιδράσεων, μειώνοντας τη χωρητικότητα.

- Διάρκεια ζωής

Η διάρκεια ζωής ενός κύκλου μπαταρίας για μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία ορίζεται ως ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/επαναφόρτισης που μπορεί να εκτελέσει μια δευτερεύουσα μπαταρία πριν η χωρητικότητά της μειωθεί στο 80% της αρχικής της χωρητικότητας. Αυτή η διάρκεια κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 500 και 1200 κύκλων.

Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας στο ράφι είναι ο χρόνος που μια μπαταρία μπορεί να αποθηκευτεί ανενεργή πριν η χωρητικότητά της πέσει στο 80%. Η μείωση της χωρητικότητας με την πάροδο του χρόνου προκαλείται από την εξάντληση των ενεργών υλικών από ανεπιθύμητες αντιδράσεις εντός του στοιχείου.

- Φυσικές απαιτήσεις

Αυτό περιλαμβάνει τη γεωμετρία της κυψέλης, το μέγεθος, το βάρος και το σχήμα της και τη θέση των ακροδεκτών.

- Κύκλος φόρτισης/εκφόρτισης

Υπάρχουν πολλές πτυχές του κύκλου που πρέπει να εξεταστούν, όπως:

- Τάση που απαιτείται για τη φόρτιση.
- Απαραίτητος χρόνος φόρτισης.
- Διαθεσιμότητα πηγής φόρτισης.
- Πιθανοί κίνδυνοι για την ασφάλεια κατά τη φόρτιση/εκφόρτιση.

- Διάρκεια ζωής

Η διάρκεια ζωής μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας είναι ο αριθμός των κύκλων εκφόρτισης/φόρτισης που μπορεί να υποστεί πριν η χωρητικότητά της πέσει στο 80%.

- Κόστος

Αυτό περιλαμβάνει το αρχικό κόστος της ίδιας της μπαταρίας καθώς και το κόστος φόρτισης και συντήρησης της μπαταρίας.

- Δυνατότητα βαθιάς εκφόρτισης

Υπάρχει μια λογαριθμική σχέση μεταξύ του βάθους εκφόρτισης και της διάρκειας ζωής μιας μπαταρίας, επομένως η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εάν δεν εκφορτιστεί πλήρως. Για παράδειγμα, η μπαταρία ενός κινητού τηλεφώνου θα διαρκέσει 5-6 φορές περισσότερο εάν εκφορτιστεί μόνο κατά 80% πριν από την επαναφόρτιση.

- Απαιτήσεις εφαρμογής

Η μπαταρία πρέπει να είναι επαρκής για την προβλεπόμενη εφαρμογή. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να μπορεί να παράγει το σωστό ρεύμα με τη σωστή τάση. Πρέπει να έχει επαρκή χωρητικότητα, ενέργεια και ισχύ. Δεν πρέπει επίσης να υπερβαίνει κατά πολύ τις απαιτήσεις της εφαρμογής, καθώς αυτό είναι πιθανό να οδηγήσει σε περιττό κόστος. Τέλος, πρέπει να παρέχει επαρκή απόδοση στη χαμηλότερη δυνατή τιμή.

3.2.1 Αρχή λειτουργίας

Ουσιαστικά αυτό που κάνει ένα συσσωρευτής είναι η μετατροπή της χημικής ενέργειας που υπάρχει στο ενεργό υλικό του αμέσως σε ηλεκτρική μέσω της διαδικασίας της ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδοαναγωγής. Μέσω αυτού του τύπου αντίδρασης δύναται εφικτή η μεταφορά των ηλεκτροδίων από το ένα υλικό στο άλλο με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού κυκλώματος και η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου διακοπεί το κύκλωμα ή κάποια από τα αντιδρώντα στοιχεία τελειώσει. Κατά τη διάρκεια της ηλεκτρονικής αντίδρασης οξειδοαναγωγής στους συσσωρευτές, δεν υπάρχει υπακοή σε κάποιον από τους περιορισμούς του κύκλου Carnot, επομένως οι μπαταρίες έχουν μεγαλύτερη απόδοση μετατροπής. Σε περίπτωση επαναφορτιζόμενου συστήματος, οι μπαταρίες φορτίζονται ξανά επιτελώντας την αναστροφή διαδικασία.

3.3 Κατηγορίες μπαταριών


Σήμερα έχουν ανακαλυφθεί και είναι σε διαθεσιμότητα ανεπτυγμένα συστήματα συσσωρευτών τα οποία προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, είναι λεπτά σαν χαρτί και έχουν αντοχή 1000 κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης καθώς είναι γνωστό πως η μέση διάρκεια ζωής μιας επαναφορτιζόμενης μπαταρίας μετριέται σε κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης. Ατυχώς όμως, όλα αυτά τα προτερήματα μία μπαταρία από μόνη της δεν είναι ικανή να μας τα προσφέρει. Παραδείγματος χάριν, ένας συσσωρευτής έχει σχεδιαστεί για να έχει μικρό μέγεθος και μεγάλη αυτονομία, ο ίδιος όμως συσσωρευτής θα έχει περιορισμένη διάρκεια ζωής, κάποιος άλλος θα έχει ανθεκτικότητα θα καταλαμβάνει όμως μεγάλο όγκο, ενώ ένας άλλος συσσωρευτής θα έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα αλλά θα είναι πολύ ακριβός για τους καταναλωτές. Έτσι καταλήγουμε στο ότι υπάρχουν διάφορες κατηγορίες και είδη συσσωρευτών από τους οποίους ο καθένας έχει να προσφέρει διαφορετικά χαρακτηριστικά αναλόγως με τη χρήση για την οποία προορίζεται.

Έτσι οι δύο βασικές κατηγορίες των συσσωρευτών είναι οι πρωτογενείς (μη επαναφορτιζόμενοι) και οι δευτερογενείς (επαναφορτιζόμενοι), αναλόγως της ικανότητάς τους να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά. Βάσει αυτού του διαχωρισμού λοιπόν, υπάρχει περαιτέρω κατηγοριοποίηση των συσσωρευτών για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων δομών και σχεδιασμών των ηλεκτροχημικών στοιχείων και των συσσωρευτών. Στην παρούσα διπλωματική θα γίνει μια συνοπτική εμφάνιση αυτών των συσσωρευτών και θα δωθεί έμφαση στους συσσωρευτές ροής.

3.3.1 Μπαταρίες μολύβδου -οξέος (Lead – Acid Batteries)

Οι συσσωρευτές εμβάπτισης μολύβδου-οξέος αποτελούν τον παλαιότερο τύπο επαναφορτιζόμενων μπαταριών και είναι από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες αποθήκευσης ρεύματος. Η φιλοσοφία τους βασίζεται σε χημικές αντιδράσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν διοξείδιο του μολύβδου (PbO₂) έτσι ώστε να σχηματιστεί το ηλεκτρόδιο της καθόδου, μολύβδο (Pb) προκειμένου να σχηματιστεί το ηλεκτρόδιο της ανόδου και τέλος το θειικό οξύ (H₂SO₄) το οποίο έχει τον ρόλο του ηλεκτρολύτη. Το κόστος τους είναι σχετικά χαμηλό της τάξεως των 100-300 €/kWh και προορίζονται συνήθως σε υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόδοσή τους φτάνει το 85%, ενώ ο αριθμός αστοχίας τους περιορίζεται στο 0,25%. Χαρακτηριστικό των μπαταριών αυτό είναι ότι έχουν αρκετά χαμηλές πυκνότητες ενέργειας, γεγονός που τις καθιστά ακατάλληλες για φορητές συσκευές. Παρόλα αυτά χάρη στην άμεση ανταπόκριση τους κατά την εκκίνηση έχουν γίνει οι πιο συνηθισμένες μπαταρίες για χρήση αυτοκινήτων εφόσον σε ελάχιστο χρόνο, ενώ κάνουν δυνατή την ανάπτυξη ρευμάτων έως και 600Α. Ο χρόνος διάρκειας ζωής τους είναι περίπου 1.000 κύκλοι, αλλά καταλυτικό ρόλο στην εκφόρτιση τους έχει η θερμοκρασία υπό την οποία βρίσκονται. Δηλαδή όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται τόσο μειώνεται και η τιμή της ονομαστικής ικανότητάς τους έχοντας ως αποτέλεσμα να επιβάλλεται η προστασία τους από χαμηλές θερμοκρασίες. Σε γενικές γραμμές θα μπορούσε κάποιος να πει πως αποτελούν μία οικονομική και αξιόπιστη λύση αλλά μέχρι σήμερα η τεχνολογία τους εμποδίζει να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλα συστήματα παραγωγής ενέργειας άρα περιορίζεται σε εφαρμογές μικρές όπως για οικιακή χρήση.

Πίνακας 3.3.1-Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών μολύβδου-οξέος (πηγή : [**https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Finfoservice.com.gr%2Fauto%2Fmpataries-%25C2%25B5olidou-oxeos-vasikes-arches-iiika-ke-efar%25C2%25B5oges%2F&psig=AOvVaw0GFO0b0DYcfDGh5UGHCvLi&ust=1666945313759000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxaFwoTCIDaIKz9_oCFOAAAAAdAAAAABAE\)**](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Finfoservice.com.gr%2Fauto%2Fmpataries-%25C2%25B5olidou-oxeos-vasikes-arches-iiika-ke-efar%25C2%25B5oges%2F&psig=AOvVaw0GFO0b0DYcfDGh5UGHCvLi&ust=1666945313759000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxaFwoTCIDaIKz9_oCFOAAAAAdAAAAABAE))

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Χαμηλό κόστος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας ✓ Ανακυκλώσιμο ✓ Διατίθεται σε έκδοση χωρίς συντήρηση ✓ Εύκολο στην κατασκευή: μαζική παραγωγή ✓ Καλή απόδοση επαναφόρτισης (> 70%) ✓ Διατίθεται σε ποικίλες χωρητικότητας, μεγέθη, και σχέδια ✓ Καλή απόδοση ✓ Καλή λειτουργία σε μεγάλους εύρους θερμοκρασιών (-40°C έως 60°C) ✓ Καλή τάση σε ένα στοιχείο (ανοιχτό κύκλωμα τάσης > 2 V) ✓ Εύκολη ένδειξη φόρτισης-εκφόρτισης 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Σχετικά χαμηλή διάρκεια ζωής (περίπου 500 κύκλοι βαθιάς φορτο-εκφόρτισης) ✓ Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας (τυπικά 30 έως 40 Wh/kg) ✓ Μακροπρόθεσμη αποθήκευση σε κατάσταση αναμονής μπορεί να οδηγήσει σε θείωση του ηλεκτροδίου της μπαταρίας προκαλώντας μη αναστρέψιμη βλάβη ✓ Το πλέγμα περιέχει αντιμόνιο και αρσενικό, τα οποία είναι βλαβερά για την υγεία ✓ Μπαταρίες μικρού μεγέθους (<500 mAh, μπαταρία μεγέθους AA) είναι δύσκολο να γίνουν ✓ Το βραχυκύκλωμα θα προκαλέσει μη αναστρέψιμη βλάβη της μπαταρίας 	

Εικόνα 3.3.1-Μπαταρίες μολύβδου-οξέος ανοιχτού τύπου βαθιάς εκφόρτισης για χρήση σε σύστημα ΑΠΕ (πηγή : <https://www.mipesun.gr/files/products/w270/2496661c4d051a0c92d698b8ab7366e6.jpg>)

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΟΛΥΒΔΟΥ – ΟΞΕΟΣ

(ΠΗΓΗ : https://en.wikipedia.org/wiki/Lead%E2%80%93acid_battery#/media/File:Photo-CarBattery.jpg)



Ειδική ενέργεια : 35-40 Wh/kg

Ενεργειακή πυκνότητα : 80-90 Wh/L

Ειδική ισχύς : 180 W/kg

Απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης : 50%-95%

Ενέργεια/τιμή καταναλωτή : 7 (sld) έως 18 (fld) Wh/US\$

Ρυθμός αυτοεκφόρτισης : 3%-20%/μήνα

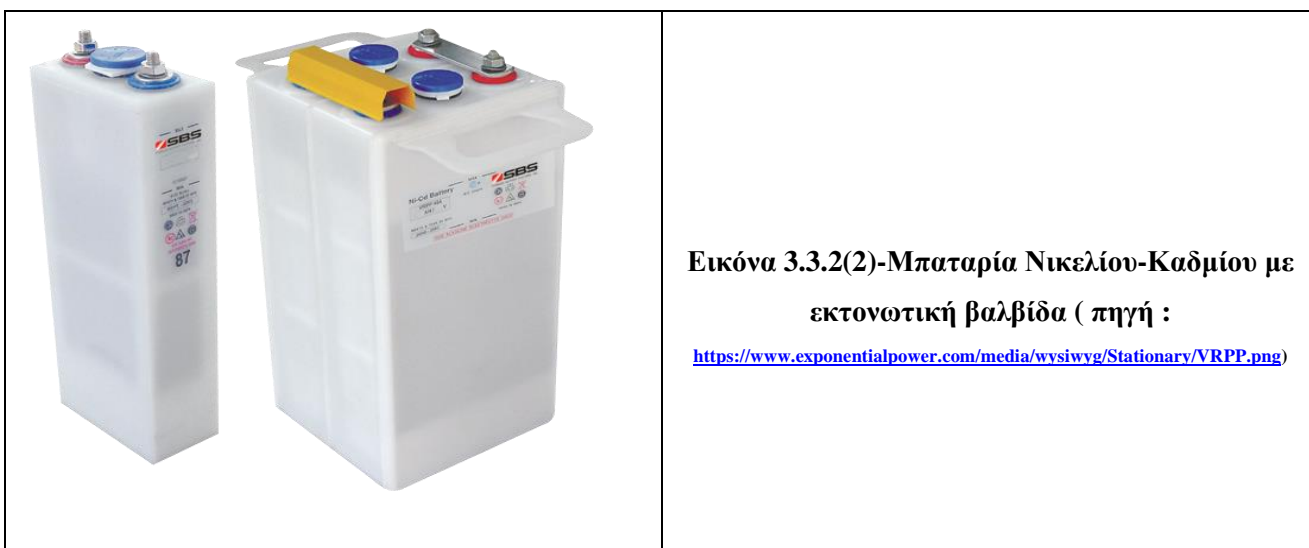
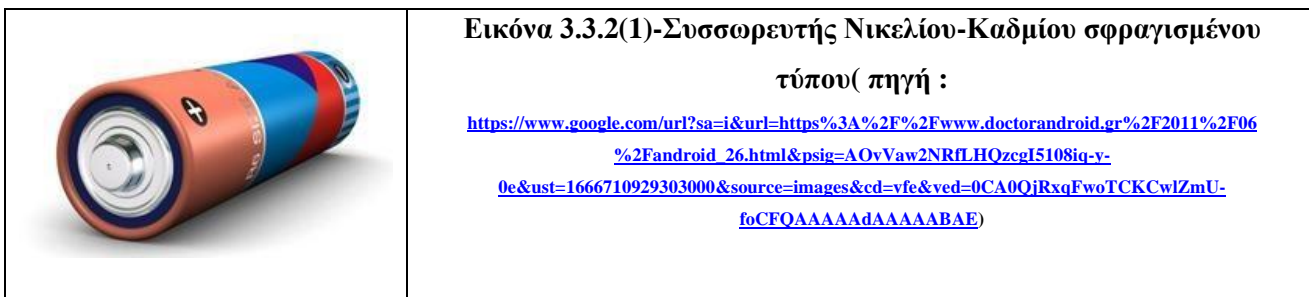
Αντοχή σε κύκλους : <350 κύκλοι

Ονομαστική τάση κυψέλης : 2,1 V

Διάστημα θερμοκρασίας φόρτισης : Ελάχ. -35°C, μέγ. 45°C

3.3.2 Μπαταρίες Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd)

Όλα τα συστήματα αποθήκευσης νικελίου-καδμίου περιέχουν την ίδια χημική σύσταση. Η αρνητική πλάκα ηλεκτροδίου αποτελείται από κάδμιο ενώ η θετική πλάκα ηλεκτροδίου αποτελείται από οξύ-υδροξείδιο νικελίου. Οι συσσωρευτές αυτοί αποτελούν το αντίπαλο δέος των πλέον καθιερωμένων, μολύβδου-οξέος. Διακρίνονται δύο κατηγορίες αυτών των συσσωρευτών οι οποίες είναι οι σφραγισμένες και αυτές με βαλβίδα εκτόνωσης. Οι σφραγισμένες είναι αρκετά γνωστές καθώς παρατηρούνται στη χρήση του ανθρώπου σε καθημερινή βάση όπως π.χ. στο τηλεκοντρόλ της τηλεόρασης οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται είναι οι σφραγισμένες όπως και στο ρολόι του τοίχου. Αυτή η κατηγορία διαθέτει τη δυνατότητα επαναφόρτισης. Οι συσσωρευτές με βαλβίδα εκτόνωσης ακολουθούν ίδια φιλοσοφία με τις σφραγισμένες, με την κύρια διαφορά η οποία είναι μία ασφαλιστική εκτονωτική βαλβίδα η οποία ανοίγει έτσι ώστε να απελευθερώνεται το αέριο λόγω υπερφόρτισης. Παρακάτω υπάρχουν δύο εικόνες για τις δύο αυτές κατηγορίες των μπαταριών.



Μελετώντας τες πρώτη φορά έχουν μία ελκυστική εικόνα εξαιτίας της μεγαλύτερης ειδικής ενέργειας και των κύκλων ζωής που έχουν. Αν όμως αναλυθούν και ερευνηθούν σε βάθος από όλες τις απόψεις θα παρατηρηθεί ότι οι διαφορές αυτές, ναι μεν είναι σημαντικές αλλά εκ του αποτελέσματος είναι πλασματικές. Σε πρώτη φάση λόγω της απόφασης ευρωπαϊκής ένωσης ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ανδρεάδης Μάριος

σχετικά με το πόσο επικίνδυνο είναι το κάδμιο ως προς το περιβάλλον (2008), τα συστήματα αυτά συνάντησαν μεγάλη ύφεση. Επιπρόσθετα ένα γεγονός το οποίο πρέπει να τονιστεί είναι ότι έχουν μεγάλο κόστος για τα δεδομένα τους το οποίο τις υποβαθμίζει αρκετά. Πολύ σημαντικός παράγοντας είναι επίσης οι μεγαλύτερες απώλειες εκφόρτισης που έχουν (5- 20%/μήνα έναντι 1% ανά μήνα του μολύβδου-οξέος). Συν τοις άλλοις, τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν μία περίεργη συμπεριφορά σε συνεργασία με το δίκτυο. Αν δεν γίνει πλήρη αποφόρτιση μετά το τέλος του κύκλου και την αρχή του επόμενου παρατηρείται ότι είχαν χωρητικότητα. Το τελευταίο γεγονός θέτει τα στοιχεία αυτά εκτός κουβέντας σε περίπτωση που εξετάζεται μία λύση για ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής όπου οι παραγωγές αιολικής και ηλιακής ενέργειας είναι διαρκείς και μη σταθερές.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΚΑΔΜΙΟΥ

(ΠΗΓΗ: https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93cadmium_battery)


<p>Ειδική ενέργεια : 40-60 Wh/kg</p> <p>Ενεργειακή πυκνότητα : 50-150 Wh/L</p> <p>Ειδική ισχύς : 150 W/kg</p> <p>Απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης : 70-90%</p> <p>Ρυθμός αυτοεκφόρτισης : 10%/μήνα</p> <p>Αντοχή σε κύκλους : 2.000 κύκλοι</p> <p>Ονομαστική τάση κυψέλης : 1,2 V</p>

Πίνακας 3.3.2-Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα συσσωρευτών Νικελίου-Καδμίου (πηγή : <https://technoluxpro.com/el/akkumulvatory/batarei/ni-cd.html>)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Μεγάλη διάρκεια ζωής και αριθμού κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης.	Ανάγκη για προληπτική εργασία για την πλήρη δυναμικότητα.
Γρήγορη φόρτιση.	Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα συγκριτικά με άλλες μπαταρίες.
Αντοχή σε βαριά φορτία και χαμηλές θερμοκρασίες.	Έχουν ακριβότερη παραγωγή και κατασκευή
Χαμηλό κόστος.	Έχουν πεπερασμένη διάρκεια ζωής.
Ικανότητα αποθήκευσης των μπαταριών σε κατάσταση εκφόρτισης έως και 5 έτη.	Έχουν μεγαλύτερο βάρος απο τις σύγχρονες μπαταρίες.
Διατηρούν την λειτουργικότητα τους σε αντίξοες συνθήκες λειτουργίας.	Μεγάλη αυτοεκφόρτιση.

3.3.3 Μπαταρίες λιθίου -ιόντων (Lithium Batteries)

Οι συσσωρευτές λιθίου-ιόντων κατά κύριο λόγο στη σημερινή εποχή χρησιμοποιούνται σε καθημερινές συσκευές όπως είναι κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές κλπ, εφόσον διαθέτουν μεγάλη αντοχή σε φορτίσεις και εκφορτίσεις. Τα ηλεκτρόδια τους αποτελούνται από ελαφρύ λίθιο και άνθρακα. Το λίθιο ορίζεται ως ένα εξαιρετικά αντιδραστικό στοιχείο έχοντας ως αποτέλεσμα την ικανότητα αποθήκευσης πώλησης ενέργειας στους ατομικούς του δεσμούς. Η τεχνολογία των μπαταριών λιθίου δεν χρησιμοποιείται ακόμα για ενεργειακή αποθήκευση στα πλαίσια ενός συστήματος αδιάκοπης παροχής ισχύος παρόλο που τέτοιες εφαρμογές αναπτύσσονται. Έχουν εισαχθεί στην αγορά από το 1991 μέσω της Sony. Το τελευταίο χρονικό διάστημα κάποιων χρόνων γίνεται μία αρκετά μεγάλη προσπάθεια έτσι ώστε αυτοί οι συσσωρευτές να γίνουν χρήσιμοι τόσο στην μεταφορά όσο και στην σταθερή αποθήκευση. Ο συσσωρευτής αυτός είναι ανώτερος όλων των άλλων συσσωρευτών σε όλες τις τεχνικές κατηγορίες σύγκρισης άρα αυτόματα καθίσταται μία πολύ ελκυστική λύση η οποία ενστερνίστηκε μαζικά. Όπως είναι και αναμενόμενο με την πάροδο του χρόνου έχει παρατηρηθεί όλο και περισσότερη ζήτηση των μπαταριών αυτών και αυτό οφείλεται στον υπερκαταναλωτισμό των φορητών μέσων, ηλεκτρονικών ειδών όπως κινητά, tablet, υπολογιστές, κονσόλες πράγματα δηλαδή που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος στην καθημερινή του βάση. Πρέπει να τονιστεί ότι εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσουν, η διάρκεια ζωής των μπαταριών αυτών δεν υπερβαίνει τα τρία χρόνια γεγονός που δείχνει ότι πρέπει να

υπάρξουν κατάλληλα συστήματα για την προστασία από εκρήξεις καθώς εξαιτίας των χημικών του συστάσεων μπορούν να πάρουν φωτιά. Ο συσσωρευτής αυτός, ατυχώς για τους ανθρώπους, χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο σε μικρές εφαρμογές για της τάξης μερικών kW. Γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως για παράδειγμα αποθήκευση ενέργειας αιολικό πάρκο μεγάλης τάξης Wh. Τελικά, αξίζει να αναφερθεί ότι οι μπαταρίες λιθίου δεν έχουν τόσο μεγάλη περιβαλλοντική επίδραση εφόσον ταξίδια και τα άλατα του λιθίου μπορούν να ανακυκλωθούν.

Πίνακας 3.3.3-Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών Ιόντων-Λιθίου (πηγή : https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FAdvantages-and-disadvantages-of-Li-ion-batteries-compared-to-other-rechargeable-batteries_fig7_337012019&psig=AOvVaw0sajFePxxhFQF5SZ4NAPNZ&ust=1667045262306000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCPCgudfxgvsCFQAAAAAAdAAAAABAJ)

	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
	Μικρό βάρος	Εμπεριέχει κίνδυνο διάρρηξης
	Έχουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από άλλες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες	Υψηλό κόστος, σε σύγκριση με άλλες μπαταρίες
	Ο ρυθμός απώλειας φόρτισης είναι μικρότερος	Πλήρης εκφόρτιση καταστρέφει τη μπαταρία
	Έχουν μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης δεν χρειάζεται να αποφορτιστούν πλήρως	Εξαιρετικά ευαίσθητη στις υψηλές θερμοκρασίες
	Λειτουργούν σε υψηλότερη τάση από άλλες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες	Πολύ μικρή διάρκεια ζωής

Εικόνα 3.3.3-Μπαταρία Ιόντων-Λιθίου (πηγή : <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Lithium-Ionen-Accumulator.jpg/220px-Lithium-Ionen-Accumulator.jpg>)

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΛΙΘΙΟΥ-ΙΟΝΤΩΝ

(ΠΗΓΗ: https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery)



Ειδική ενέργεια : 100-265 Wh/kg(0,36-0,875 MJ/kg)
 Ενεργειακή πυκνότητα : 250-693 Wh/L (0,90-2,43 MJ/L)
 Ειδική ισχύς : ~250 - ~340 W/kg
 Απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης : 80-90%
 Τιμή ενέργειας/καταναλωτή : 7,6Wh/US\$ USD132/kWh
 Ρυθμός αυτοεκφόρτισης : 0,35% έως 2,5% ανά μήνα ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης.
 Αντοχή σε κύκλους : 400-1.200 κύκλους
 Ονομαστική τάση κυψέλης: 3,6 / 3,7 / 3,8 / 3,85 V, LiFePO4 3,2 V, Li4Ti5O12 2,3 V

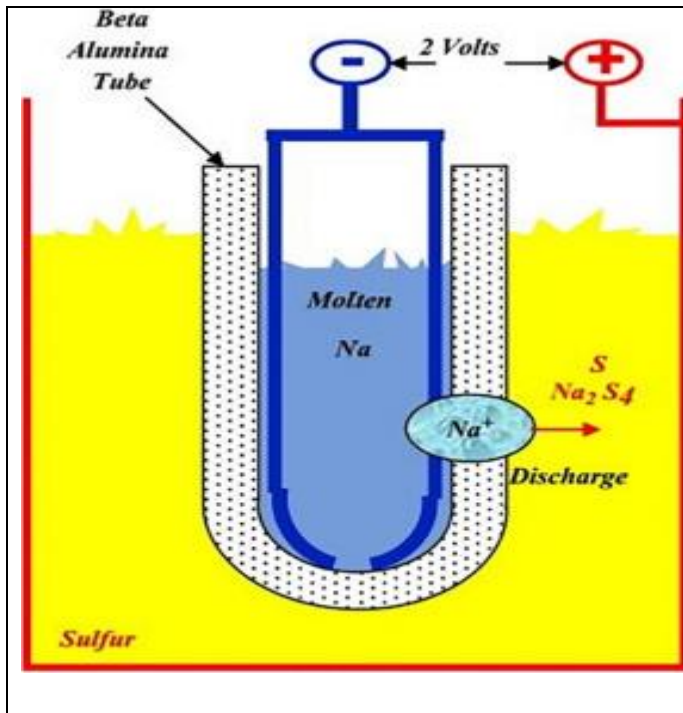
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

	Pb-acid	NiCd	NiHMe	Li-ion
Power rating	5.00	10.00	0.75	0.03
Energy capacity	10.00	1.69	0.00	2.50
Power capital cost	7.50	5.83	7.75	0.00
Energy capital cost	7.50	0.00	7.50	2.50
O&M cost	0.00	6.00	0.00	10.00
Specific power	0.90	0.90	1.10	10.00
Specific energy	2.50	3.00	3.75	10.00
Power density	5.00	1.76	7.35	10.00
Energy density	1.80	3.00	6.00	10.00
Technical maturity	10.00	8.00	10.00	8.00
Daily self-discharge	9.99	9.99	10.00	10.00
Lifetime	7.50	10.00	7.50	7.50
Cycling times	2.00	3.00	1.80	10.00
Round-trip efficiency	9.00	9.00	8.00	10.00

Πίνακας 3.3.3- Συγκρίσεις συμβατικών τεχνολογιών μπαταριών (πηγή : https://www.google.com/url?sa=t&rc=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewiQjJalucn7AhX4gP0HHS41ChY4ChAWegQIBhAB&url=https%3A%2F%2Fmdpi-res.com%2Fattachment%2Felectronics%2Felectronics-10-02037%2Farticle_deploy%2Felectronics-10-02037.pdf%3Fversion%3D1629711454&usq=AOvVaw0wOacCSTJpXk9l6ZlZqc9i)

3.3.4 Μπαταρίες νατρίου – θείου (Sodium Sulphur Batteries, NaS)

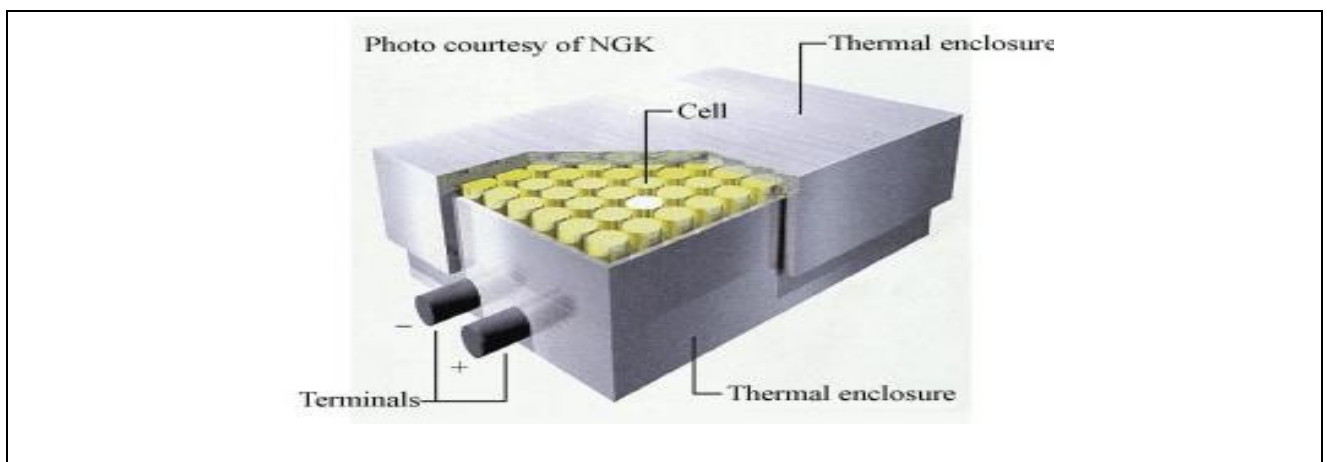
Οι μπαταρίες νατρίου-θείου απαρτίζονται από υγρά ηλεκτρόδια όπου στο θετικό ηλεκτρόδιο έχουν θείο και στο αρνητικό ηλεκτρόδιο έχουν το νάτριο, κι ανάμεσά τους στερεού ηλεκτρολύτη από κεραμικό υλικό. Οι μπαταρίες αυτές αποτελούν τον πιο εξελιγμένο τύπο υψηλής θερμοκρασίας μπαταρίας. Επιτρέπεται μόνο στα θετικά ιόντα νατρίου να περάσουν διαμέσου του ηλεκτρολύτη και να αντιδράσουν με το θείο σχηματίζοντας την πολυσουλφίδα νατρίου. Με την πάροδο του χρόνου αυτοί οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτό το γεγονός είναι φυσικό επόμενο εφόσον οι συσσωρευτές αυτοί είναι ανώτεροι όλων των υπολοίπων σχεδόν σε όλα τα ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια, παρουσιάζουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα της τάξεως των 150-240 kW/kg, μεγάλο κύκλο φορτίσεων-εκφορτίσεων (2.500+) και μεγάλη ενεργειακή απόδοση η οποία φτάνει περίπου το 90%. Επιπρόσθετα, αυτές οι μπαταρίες παρουσιάζουν χαμηλά κόστη συντήρησης και έχουν μεγάλο εύρος λειτουργίας το οποίο κυμαίνεται μεταξύ μερικών kW έως και MW. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι μπαταρίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση συστημάτων ΑΠΕ από μικρής έως και μεγάλης κλίμακας. Σχετικά με την επίδραση τους στο περιβάλλον, μπορεί να χαρακτηριστεί αρκετά φιλική διότι η δομή τους απαρτίζεται κυρίως από ανακυκλώσιμα υλικά. Παρόλα αυτά, υπάρχουν παράγοντες οι οποίοι τις κάνουν να υστερούν αισθητά οι οποίοι είναι αρχικά το αρκετά μεγάλος κόστος εγκατάστασης το οποίο είναι περίπου 2000 €/kW, καθώς και η ανάγκη για τη διατήρησή τους σε αρκετά υψηλές τιμές θερμοκρασίας οι οποίες ξεπερνούν τους 300°C γεγονός που αυξάνει δραματικά το κόστος λειτουργίας της. Αυτή την περίοδο, οι συσσωρευτές αυτοί είναι χρήσιμοι κυρίως σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος και σε εφαρμογές εξομάλυνσης αιχμών.



Εικόνα 3.3.4 (1)-Δομή μπαταρίας νατρίου - θείου (πηγή : <https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780128146453000067-f06-15-9780128146453.jpg>)

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΛΙΘΙΟΥ-ΙΟΝΤΩΝ

(ΠΗΓΗ: <https://ziang.binghamton.edu/sodium-sulfur-battery/>)



Χωρητικότητα: 300MWh (υποστήριξη ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας)/7,2 MWh (δίκτυο και βιομηχανία)

Ισχύς: 50MW (υποστήριξη ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας)/1MW (δίκτυο και βιομηχανία)

Ενεργειακή πυκνότητα: 150-240 J/kg

Πυκνότητα ισχύος: 15-230 W/kg

Διάρκεια φόρτισης/αποφόρτισης: 6 ώρες (υποστήριξη ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας)/7,2 ώρες (δίκτυο και βιομηχανία)

Χρόνος ανταπόκρισης: γρήγορος (μερικά δευτερόλεπτα)

Διάρκεια ζωής (έτη/κύκλοι): 15 έτη/4500 κύκλοι

Αποδοτικότητα μετ' επιστροφής: 80%

Κόστος ανά χωρητικότητα: 520-550 kWh (υποστήριξη ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας)/545-555 kWh (δίκτυο&βιομηχανία)



Εικόνα 3.3.4 (2)-Μπαταρίες νατρίου -θείου (πηγή :

https://www.designnews.com/sites/designnews.com/files/Nas_batteries_low_res_750_500_s.jpg)

Πίνακας 3.3.4-Βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συσσωρευτών Νατρίου-Θείου (πηγή : https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/463/Katsamagkos_46144400.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
Υψηλή πυκνότητα ενέργειας	Υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης
Υψηλός βαθμός απόδοσης	Πολύ μεγάλα έξοδα λειτουργίας
Μεγάλη διάρκεια ζωής σε σχέση με τους υπόλοιπους συσσωρευτές	
Ευρύ πεδίο χρήσης (από μερικά kW μέχρι πολλά MW)	
Φίλικα προς το περιβάλλον	

3.4 ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΡΟΗΣ

Οι μπαταρίες ροής συχνά αποκαλούνται μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (Redox Flow Batteries ή RFB). Η ονομασία μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βασίζεται στην αντίδραση οξειδοαναγωγής μεταξύ των δύο ηλεκτρολυτών στο σύστημα. Η λέξη "οξειδοαναγωγή" είναι η συντομογραφία της αντίδρασης "αναγωγής-οξείδωσης". Οι αντιδράσεις αυτές περιλαμβάνουν όλες τις χημικές διεργασίες στις οποίες τα άτομα αλλάζουν τον αριθμό οξείδωσής τους. Σε μια κυψέλη ροής οξειδοαναγωγής οι δύο ηλεκτρολύτες διαχωρίζονται από μια ημιπερατή μεμβράνη. Αυτή η μεμβράνη επιτρέπει τη ροή ιόντων, αλλά εμποδίζει την ανάμιξη των υγρών. Η ηλεκτρική επαφή γίνεται μέσω αδρανών αγωγών στα υγρά. Καθώς τα ιόντα ρέουν διαμέσου της μεμβράνης, προκαλείται ηλεκτρικό ρεύμα στους αγωγούς.

Το ενδιαφέρον για τις μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής (RFB) έχει αυξηθεί σημαντικά λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για αποθήκευση στατικής ενέργειας και της έλλειψης πιθανών συσκευών. Οι μπαταρίες ροής είναι ένας νέος εισερχόμενος τύπος τεχνολογίας στην αγορά αποθήκευσης μέσω μπαταριών ο οποίος δεν είναι τόσο γνωστός όσο οι τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούνται για ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, παρόλα αυτά έχει συνεχώς αυξανόμενες προοπτικές για την αποθήκευση ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας βρίσκεται σε έρευνα και ανάπτυξη για αρκετές δεκαετίες, αν και το τελευταίο χρονικό διάστημα αρχίζει να τραβάει το ενδιαφέρον για περαιτέρω ανάπτυξη και χρήση στον πραγματικό κόσμο. Οι μπαταρίες αυτές έχουν δυνατότητες ηλεκτροχημικής επαναφόρτισης χωρίς εκπομπές, όπως συμβαίνει με άλλες τεχνολογίες επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Ωστόσο, με τις μπαταρίες ροής, η ισχύς και η ενέργεια αποσυνδέονται το οποίο θυμίζει περισσότερο τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου. Αυτή η αποσύνδεση παρέχει την ευελιξία του ανεξάρτητου σχεδιασμού της μονάδας εξόδου ισχύος και τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, η οποία μπορεί να προσφέρει πλεονεκτήματα κόστους και χρόνου και να απλοποιήσει τις μελλοντικές αναβαθμίσεις τα συστήματα μπαταριών.

Πλεονεκτήματα και οφέλη

Οι μπαταρίες ροής έχουν εγκατασταθεί σε διάφορα μέρη για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Αποτελούν μια αξιόπιστη, χαμηλού κόστους και περιβαλλοντικά φιλική μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

- Η τεχνολογία των μπαταριών ροής είναι αρθρωτή και κλιμακούμενη, έτσι ώστε τα συστήματα να μπορούν να κατασκευαστούν για να ταιριάζουν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από ονομαστικές τιμές ισχύος από W έως MW, και με διάρκεια ενέργειας πολλών ωρών ή ακόμη και ημερών.

- Η μπαταρία μπορεί να κατασκευαστεί από χαμηλού κόστους και εύκολα διαθέσιμα υλικά, όπως θερμοπλαστικά και υλικά με βάση τον άνθρακα. Πολλά μέρη της μπαταρίας μπορούν να ανακυκλωθούν. Οι ηλεκτρολύτες μπορούν να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν, οδηγώντας σε χαμηλό κόστος ιδιοκτησίας.
- Τα υλικά της μπαταρίας έχουν χαμηλή αναφλεξιμότητα και χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Οι ηλεκτρολύτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέρος της στρατηγικής διαχείρισης της θερμότητας της μπαταρίας, μειώνοντας την ανάγκη για πολύπλοκη θέρμανση ή ψύξη του συστήματος της μπαταρίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους.
- Επειδή οι ηλεκτροχημικές κυψέλες μοιράζονται έναν κοινό ηλεκτρολύτη, κάθε κυψέλη μπορεί να βρίσκεται στην ίδια κατάσταση φόρτισης, απλοποιώντας την εξισορρόπηση των κυψελών και τη λειτουργία της μπαταρίας. Η κατάσταση φόρτισης ολόκληρου του συστήματος μπορεί να μετρηθεί σε ένα μόνο σημείο (ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά σημεία μέτρησης για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του συστήματος μπαταρίας).
- Η υπερφόρτιση και η πλήρης εκφόρτιση δεν προκαλούν συνήθως μόνιμη βλάβη στα ηλεκτρόδια ή στους ηλεκτρολύτες.
- Υπάρχει περιορισμένη αυτοεκφόρτιση σε κατάσταση αναμονής και, όταν απενεργοποιείται, δεν υπάρχει αυτοεκφόρτιση.
- Οι ικανότητες αποθήκευσης ενέργειας είναι ανεξάρτητες από την ονομαστική τους ισχύ και έτσι οι μπαταρίες ροής είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για αποθήκευση ενέργειας μεγάλης διάρκειας. Καθώς το αυξημένο κόστος της αύξησης της χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας αντανακλά το κόστος των δεξαμενών και του ηλεκτρολύτη, το συνολικό κόστος μιας μπαταρίας μακράς διάρκειας είναι χαμηλότερο από ό,τι για άλλους τύπους μπαταριών.

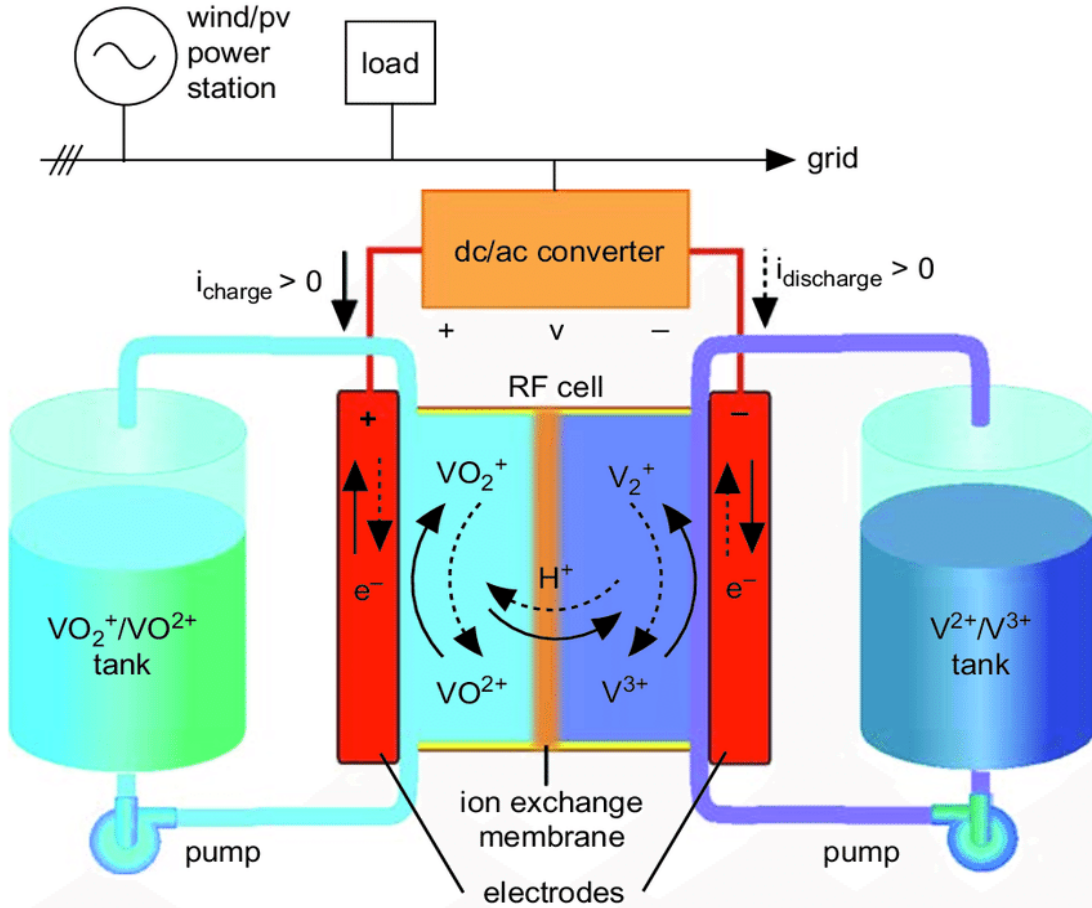
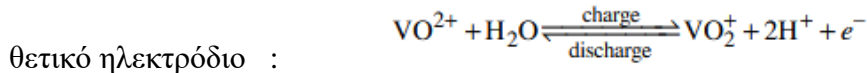
ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ ΡΟΗΣ(ΠΗΓΗ : https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_FlowBattery.pdf)

Εύρος ισχύος	Από αρκετά kW έως μερικά MW
Εύρος ενέργειας	Από 100 kWh έως μερικά MWh
Χρόνος αποφόρτισης	Μερικές ώρες
Διάρκεια ζωής κύκλου	>12.000 κύκλοι
Διάρκεια ζωής	10 - 20 έτη
Χρόνος αντίδρασης	Μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου
Απόδοση	70 - 75 %
Πυκνότητα ενέργειας (ισχύος)	10 - 25 Wh/λίτρο
Κόστος ενέργειας	100 – 400 €/kWh
Κόστος ισχύος	500 – 1,300 €/kW

3.4.1 Αρχή Κατασκευής

Η μπαταρία ροής γνωστή ως και μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής, περιγράφεται ως ένας τύπος μπαταρίας του οποίου ο ρόλος είναι η μετατροπή χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική διαμέσου χρήσης εξωτερικών αποθηκευμένων, ηλεκτρικά αγώγιμων χημικών ουσιών των οποίων το όνομα είναι γνωστό ως ηλεκτρολύτες. Ο όρος “οξειδοαναγωγή” υπάρχει διότι συμβαίνει μία αντίδραση οξείδωσης-αναγωγής, η οποία κατηγοριοποιείται ως μία χημική αντίδραση σύμφωνα με την οποία τα άτομα ή τα μόρια μιας ουσίας χάνουν ηλεκτρόνια η οξειδώνονται με αποτέλεσμα αυτά μιας άλλης ουσίας αποκτούν ηλεκτρόνια ή μειώνονται. Συνεπώς, χάρη στην κίνηση αυτή των φορτισμένων σωματιδίων δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι αποτέλεσμα άντλησης ηλεκτρολυτών από τις δεξαμενές συγκράτησης στις οποίες αποθηκεύονται σε μία στοίβα όπου συνολικά παράγεται μία χημική αντίδραση οξείδωσης-μείωσης η οποία παράγει χρήσιμο ηλεκτρικό ρεύμα.

Οι μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής βασίζονται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις αναγωγής και οξείδωσης δύο υγρών ηλεκτρολυτών που περιέχουν ενώσεις ιονισμένου μετάλλου. Το ένα ηλεκτρόδιο εκτελεί την ημιαντίδραση αναγωγής ενός ηλεκτρολύτη, απελευθερώνοντας ένα ηλεκτρόνιο και ένα ιόν, ενώ το άλλο ηλεκτρόδιο εκτελεί την ημιαντίδραση οξείδωσης, ανασυνδυάζοντάς τα στον άλλο ηλεκτρολύτη. Για παράδειγμα, ένα σύστημα RFB, που αναπαρίσταται στο παρακάτω σχήμα (εικόνα 3.4.1(1)), εκμεταλλεύεται τις ακόλουθες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις:



Εικόνα 3.4.1(1)-Σχηματικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας RFB (πηγή :

<https://www.researchgate.net/profile/Massimo-Guarnieri-3/publication/322197184/figure/fig1/AS:578134284406784@1514849362614/Schematic-of-a-RFB-energy-storage-system-RFB-stack-and-electrolyte-tanks-are-separated.png>)

Τα ιόντα μεταναστεύουν από το ένα ηλεκτρόδιο στο άλλο (από την άνοδο στην κάθοδο) μέσω της μεμβράνης ανταλλαγής ιόντων, η οποία είναι ένας καλός αγωγός πρωτονίου και ένας φτωχός ηλεκτρονικός αγωγός. Από την άλλη πλευρά, τα ηλεκτρόνια εξαναγκάζονται στο εξωτερικό κύκλωμα, επιτρέποντας έτσι την ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η κυψέλη πρέπει να λειτουργεί σε θερμοκρασία δωματίου για να διατηρεί τα διαλύματα σε υγρή φάση. Αυτή η συνθήκη υποδηλώνει ότι η ιοντοανταλλακτική μεμβράνη πρέπει να είναι κατασκευασμένη από πολυμερές υλικό. Και τα δύο ημιστοιχεία συνδέονται με δύο εξωτερικές δεξαμενές όπου αποθηκεύονται τα διαλύματα ηλεκτρολυτών και κυκλοφορούν μέσω δύο αντλιών. Προκειμένου να σχεδιαστεί ένα σύστημα αποθήκευσης RFB, απαιτείται εξειδίκευση στην ηλεκτροχημεία, τη χημεία, τη χημική μηχανική, την ηλεκτρική μηχανική, τα ηλεκτρονικά ισχύος και τη μηχανική ελέγχου.

Το RFB μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος κυψέλης καυσίμου (FC), καθώς μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια εφόσον τροφοδοτείται συνεχώς με καύσιμο και η δομή του είναι πολύ παρόμοια με αυτή μιας κυψέλης καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη μεμβράνης (PEMFC). Ένα χαρακτηριστικό των RFB παρόμοιο με αυτό των FC είναι ότι η ηλεκτροχημική ενέργεια αποθηκεύεται σε δεξαμενές, οι οποίες διαχωρίζονται από την κυψέλη, όπου συμβαίνει η μετατροπή ισχύος. Επομένως, είναι δυνατή η ανεξάρτητη διαστασιολόγηση της ισχύος και του ενεργειακού μεγέθους ενός συστήματος RFB και αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει ουσιαστικά απεριόριστη χωρητικότητα απλά χρησιμοποιώντας όλο και μεγαλύτερες δεξαμενές αποθήκευσης, διατηρώντας παράλληλα την ίδια μπαταρία και μέγεθος μετατροπής ισχύος. Σε σύγκριση με άλλα ηλεκτροχημικά συστήματα, τα οποία ενσωματώνουν ενέργεια και ισχύ σε μία συσκευή, τα RFBs είναι πιο αποδοτικά όταν παράγονται στη μέγιστη ισχύ για 4-6 ώρες ή περισσότερο αν απαιτείται. Μπορούν επίσης να αποφορτιστούν πλήρως και να μείνουν έτσι για μεγάλες περιόδους χωρίς παρενέργειες. Ένα RFB αποτελείται από μια δομή σάντουιτς κατασκευασμένη από ηλεκτροδία και μεμβράνη ηλεκτρολύτη αγωγίμου πρωτονίου που μοιάζει με τη διάταξη ηλεκτροδίων μεμβράνης ενός PEMFC. Τα διαλύματα ηλεκτρολυτών φτάνουν στις ηλεκτροενεργές θέσεις εντός των ηλεκτροδίων ρέοντας μέσα από πορώδη διαχυτικά στρώματα κατασκευασμένα από υλικά όπως πύλημα άνθρακα.



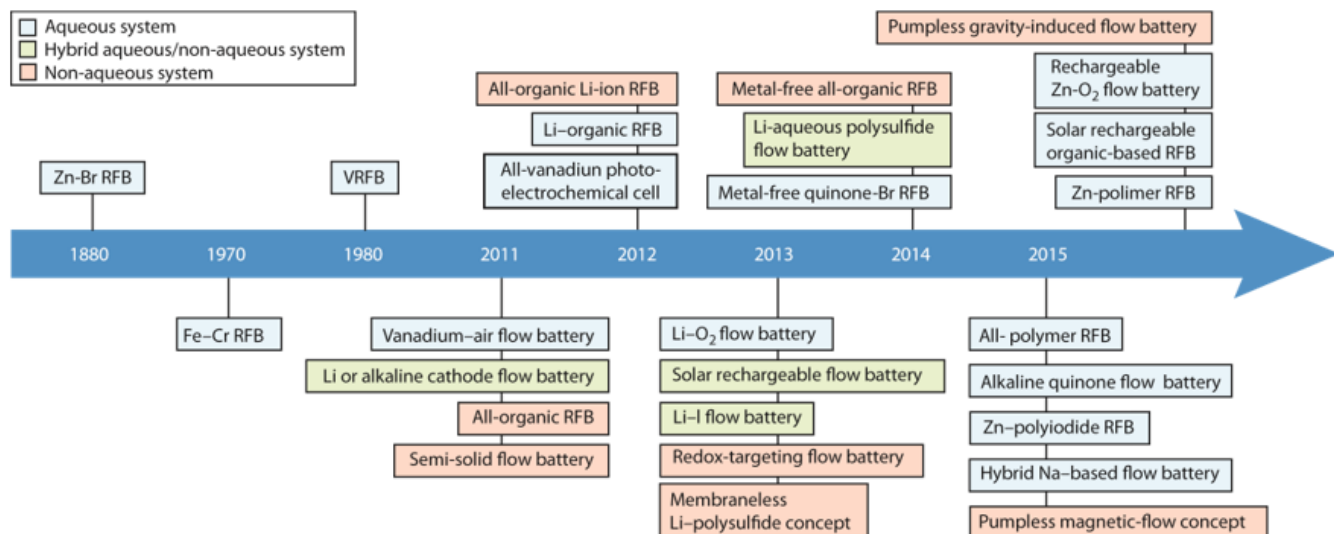
Αντίθετα με ένα σύστημα αποθήκευσης FC, το οποίο απαιτεί μια συγκεκριμένη συσκευή, π.χ. τον ηλεκτρολύτη, για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο και οξυγόνο, τα RFB είναι αναστρέψιμες συσκευές, οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν με αμφίδρομες ροές ισχύος. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα των RFB σε σχέση με τα FC είναι ότι τα καύσιμα τους δεν είναι επικίνδυνα αέρια όπως το υδρογόνο και το οξυγόνο, αλλά πολύ λιγότερο επικίνδυνα διαλύματα ηλεκτρολυτών, τα οποία καθιστούν τον χειρισμό και την αποθήκευση πολύ απλούστερη και φθηνότερη. Όπως

φαίνεται στο Σχ. 3.4.1(1), απαιτούνται μόνο δύο δεξαμενές και δύο αντλίες για αυτές τις λειτουργίες. Επιπλέον, τα RFB λειτουργούν αλλάζοντας το σθένος των μεταλλικών ιόντων και το ίδιο το ιόν δεν καταναλώνεται. Αυτή η δυνατότητα επιτρέπει τη μακροχρόνια υπηρεσία με χαμηλή συντήρηση. Η θερμοκρασία του στοιχείου ελέγχεται εύκολα ρυθμίζοντας τη ροή του ηλεκτρολύτη. Ο έλεγχος RFB είναι εύκολος: στην πραγματικότητα η τάση της κυψέλης επιτρέπει την παρακολούθηση του SOC (State Of Charge) και ταυτόχρονα μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ βαθιά εκφόρτιση επειδή δεν προκαλείται βλάβη στη μορφολογία της κυψέλης. Η πολύ γρήγορη κινητική αντίδραση παρέχει πολύ γρήγορους χρόνους απόκρισης και η υψηλή υπερφόρτωση είναι ανεκτή σε σύντομους χρόνους. Από την άλλη πλευρά, κοιτάζοντας την τελευταία λέξη της τεχνολογίας των RFB, αυτές οι κυψέλες έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με άλλες ηλεκτροχημικές συσκευές. Κατά συνέπεια, τα RFB έχουν μεγάλες ενεργές περιοχές και μεμβράνες αγωγιμότητας ιόντων και το συνολικό μέγεθος των μπαταριών είναι δυσκίνητο, καθιστώντας τις ακατάλληλες για κινητές εφαρμογές. Οι μεγάλες ενεργές περιοχές μπαταρίας προκαλούν υψηλές εγκάρσιες διαβαθμίσεις των διαλυμάτων που τροφοδοτούν τις ηλεκτροχημικά ενεργές θέσεις, ιδιαίτερα όταν λειτουργούν με υψηλή ισχύ και με υψηλές ροές. Αυτό προκαλεί μια ανομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας ρεύματος στη διατομή της κυψέλης, προκαλώντας χαμηλότερη από τη βέλτιστη μέση τιμή. Η τάση του στοιχείου παράγει ένα πεδίο ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στους αγωγίσιμους ηλεκτρολύτες. Αυτά τα λεγόμενα «ρεύματα διακλάδωσης» προκαλούν πρόσθετες απώλειες που επηρεάζουν τη συνολική ηλεκτρική απόδοση. Η βέλτιστη θερμοκρασία ηλεκτρολύτη περιορίζεται σε ένα στενό εύρος, το οποίο είναι περίπου μεταξύ 15°C και 35°C. Εκτός αυτού του εύρους μπορεί να εμφανιστούν ανεπιθύμητες παρενέργειες όπως η καθίζηση διαλύματος.

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες που περιορίζουν την οξειδοαναγωγή και τα ενεργά υλικά μέσα στα ηλεκτρόδια, οι μπαταρίες ροής (RFB), που μερικές φορές αναφέρονται ως αναστρέψιμες κυψέλες καυσίμου, αποθηκεύουν ενέργεια σε ηλεκτρολύτες που αντλούνται στη στοίβα των μπαταριών για μετατροπή ενέργειας. Ένας τέτοιος μηχανισμός λειτουργίας εμποδίζει τα ηλεκτρόδια να υποστούν πολύπλοκες αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, δομικές αλλαγές και μηχανικές καταπονήσεις, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τους. Επιπλέον, ο χωρικός διαχωρισμός δεξαμενών ηλεκτρολυτών και ηλεκτροδίων αποσυνδέει την ενέργεια και την ισχύ των RFB, καθώς η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια διέπεται από τη συγκέντρωση και τον όγκο του ηλεκτρολύτη (μέγεθος δεξαμενής), αντί να περιορίζεται από τα ηλεκτρόδια, και η ονομαστική ισχύς ελέγχεται από την πυκνότητα ρεύματος λειτουργίας και τις συνολικές περιοχές ηλεκτροδίων.

3.4.2 Ιστορική Αναδρομή Των Μπαταριών Ροής Οξειδοαναγωγής (RFB)

Οι πρώτες RFB εντοπίστηκαν στα συστήματα ψευδαργύρου-αλογόνου κατά τον 9ο αιώνα. Η ανάπτυξη σύγχρονων RFB, ωστόσο, αποδείχθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1970 στην Εθνική Υπηρεσία αεροναυπηγικής και διαστήματος των ΗΠΑ (NASA), η οποία χρησιμοποίησε ζευγάρια οξειδοαναγωγής Fe^{3+}/Fe^{2+} και Cr^{3+}/Cr^{2+} στη θετική και αρνητική πλευρά, αντίστοιχα. Το πρωτότυπο παρόλα αυτά, υπέφερε από διασταυρώσεις ενεργών υλικών και ως εκ τούτου η αποσύνθεση της χωρητικότητας υπέφερε οπότε απαιτήθηκε η περαιτέρω ανάπτυξη μεικτών ηλεκτρολυτών ως θετικών και αρνητικών ηλεκτρολυτών για να μετριαστεί το πρόβλημα. Μια άλλη λύση για την καταστολή του προβλήματος της διασταυρούμενης μόλυνσης ήταν η χρήση του ίδιου στοιχείου με διαφορετικές καταστάσεις οξείδωσης και στις δύο πλευρές του RFB, μια ιδέα που προτάθηκε για πρώτη φορά το 1949. Αυτή η ιδέα εφαρμόστηκε τη δεκαετία του 1980 από το πανεπιστήμιο της Νέας Νότιας Ουαλίας, Αυστραλία, για την ανάπτυξη της μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής πλήρως βαναδίου (VRB). Έκτοτε, τα VRB βρίσκονται στο επίκεντρο της έρευνας και ανάπτυξης της τεχνολογίας RFB, με έμφαση στη βελτίωση των επιδόσεων τους μέσω της ανάπτυξης ηλεκτρολυτών, μεμβρανών και ηλεκτροδίων, καθώς και σχεδιασμού πεδίων ροής. Τα τελευταία χρόνια, ειδικά μετά το 2010, οι μοναδικές έννοιες και οι μηχανισμοί της τεχνολογίας RFB δηλαδή η χρήση ενός επεκτάσιμου δοχείου αποθήκευσης και ρευστών οξειδοαναγωγικών ενεργών υλικών έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ενός ευρέος φάσματος νέας υβριδικής αποθήκευσης ενέργειας και συστήματα μετατροπής. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες ροής με βάση το λίθιο-μέταλλο χρησιμοποιούν μια άνοδο λιθίου-μέταλλου, η οποία διαχωρίζεται από τον καθολύτη με μια μεμβράνη ή διαχωριστή έναν κεραμικό διαχωριστή όταν χρησιμοποιείται ένας υδατικός καθολύτης και οργανικά ενεργά υλικά χρησιμοποιούνται στον καθολύτη είτε σε μη υδατική είτε σε υδατική μορφή. Τα τελευταία χρόνια, ειδικά μετά το 2010, οι μοναδικές έννοιες και οι μηχανισμοί της τεχνολογίας RFB δηλαδή η χρήση ενός επεκτάσιμου δοχείου αποθήκευσης και ρευστών οξειδοαναγωγικών ενεργών υλικών έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ενός ευρέος φάσματος νέας υβριδικής αποθήκευσης ενέργειας και συστήματα μετατροπής. Για παράδειγμα, οι μπαταρίες ροής με βάση το λίθιο-μέταλλο χρησιμοποιούν μια άνοδο λιθίου-μέταλλου, η οποία διαχωρίζεται από τον καθολύτη με μια μεμβράνη ή διαχωριστή έναν κεραμικό διαχωριστή όταν χρησιμοποιείται ένας υδατικός καθολύτης. Ζεύγη οξειδοαναγωγής που περιλαμβάνουν οξείδιο μετάλλου, ιώδιο, πολυσουλφίδιο και οργανικά δραστικά υλικά χρησιμοποιούνται στον καθολύτη είτε σε μη υδατική είτε σε υδατική μορφή. Ένα χρονοδιάγραμμα της ανάπτυξης των μπαταριών ροής παρέχεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.4.2- Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης μπαταριών ροής (πηγή :

https://media.springernature.com/m685/springer-static/image/art%3A10.1038%2Fnatrevmats.2016.80/MediaObjects/41578_2017_Article_BFnatrevmats201680_Fig1_HTML.jpg)

Άλλες μπαταρίες ροής, όπως η μπαταρία ουρανίου, οξειδοαναγωγικής ροής ψευδαργύρου βρωμίου και η μπαταρία ροής πολυσουλφιδίου βρωμιούχου αναπτύχθηκαν από διαφορετικούς ερευνητές και εμπορικούς επιχειρήσεις, αλλά οι πρώιμες μπαταρίες ροής που αναπτύχθηκαν είχαν πολλούς περιορισμούς.

Οι μπαταρίες ροής χρησιμοποιούσαν επικίνδυνα χημικά, λειτουργούσαν σε υψηλές θερμοκρασίες και σε υψηλή θερμοκρασία πίεση, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τύποι ηλεκτρολυτών στο αρνητικό και το θετικό ημικύτταρο έτσι η αστοχία μεμβράνης ή μικρή ποσότητα μοριακής μεταφοράς που αναπόφευκτα συμβαίνει μέσω της μεμβράνης θα μπορούσε να προκαλέσει ανάμειξη των ηλεκτρολυτών και έτσι να τους επιμολύνει διασταυρούμενα μετά από λίγα κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης.

Η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου, που εφευρέθηκε στο πανεπιστήμιο της Νέας Νότιας Ουαλίας το 1984, χρησιμοποιεί το ίδιο είδος στον ηλεκτρολύτη και στα δύο μέρη του στοιχείου, αποφεύγοντας έτσι τη διασταυρούμενη μόλυνση του ηλεκτρολύτη.

3.5 Τύποι Μπαταριών Ροής

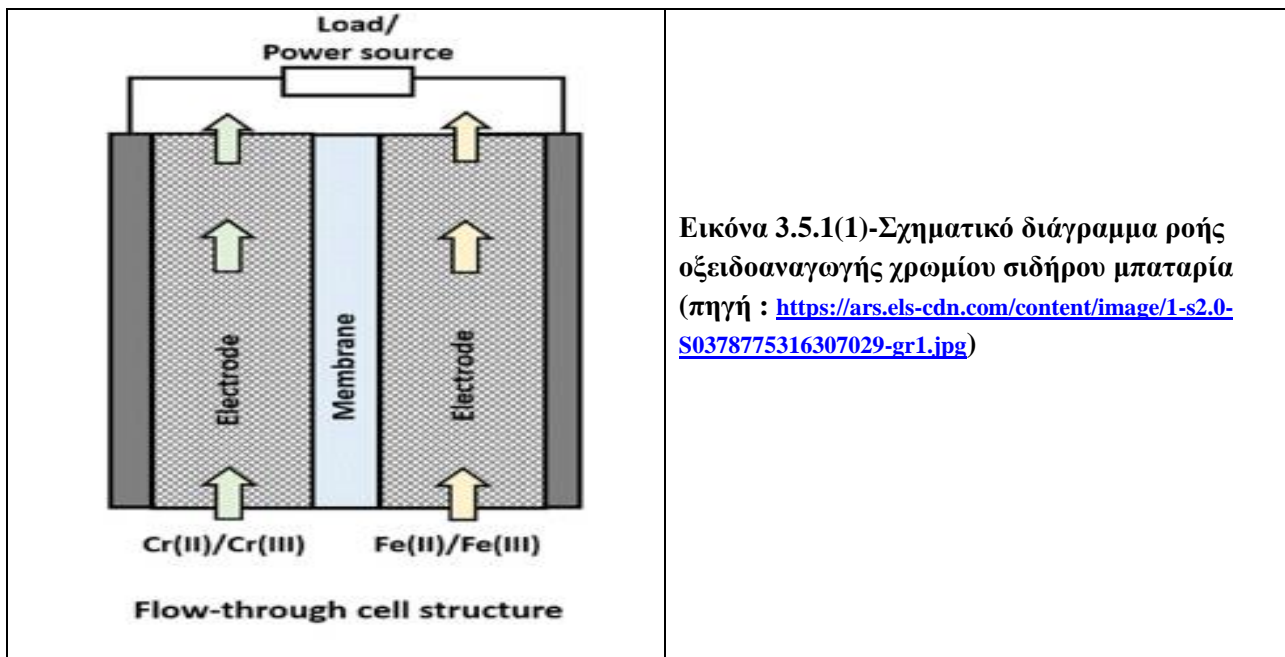
Πρόσφατα, οι μπαταρίες ροής αμφισβήτησαν τις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Οι μπαταρίες ροής έχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως μέτρια απόδοση, χαμηλότερα επίπεδα έκλυσης αερίου, δυναμικό για ανακύκλωση ηλεκτρολυτών μεταξύ των εφαρμογών. Κατά την επιλογή της αποθήκευσης ενέργειας πρέπει κανείς να περάσει από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Απόδοση – Είναι ο λόγος της ονομαστικής ισχύος εξόδου προς την ονομαστική ισχύ εισόδου. Για την αποθήκευση ενέργειας θα πρέπει να επιλέγεται υψηλή απόδοση.
2. Αποθηκευτική ικανότητα – Είναι η ικανότητα αποθήκευσης της ενέργειας. Συνιστώνται ιδιαίτερα οι μπαταρίες υψηλής χωρητικότητας αποθήκευσης.
3. Γρήγορος χρόνος απόκρισης – Για την αποτελεσματική εκτέλεση καθηκόντων ποιότητας ισχύος, είναι απαραίτητοι οι γρήγοροι χρόνοι απόκρισης για τον μετριασμό των πτώσεων τάσης που συμβαίνουν κατά την παραγωγή ενέργειας.
4. Μεγάλη διάρκεια ζωής – Συνιστάται μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Ανάλογα με τον κατασκευαστή και τον τύπο της μπαταρίας, το κόστος μπορεί να αυξηθεί με βάση τη μεγάλη διάρκεια ζωής.
5. Χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις – Οι μπαταρίες αποτελούνται από πολλές ενώσεις και χρησιμοποιούν πολλές χημικές ουσίες. Κάποιος πρέπει να επιλέξει την μπαταρία που έχει μικρό αντίκτυπο στο περιβάλλον.

3.5.1 Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής χρωμίου σιδήρου

Η μπαταρία σιδήρου χρωμίου μελετήθηκε στο ερευνητικό κέντρο Lewis της NASA το έτος 1970. Η μπαταρία σιδήρου χρωμίου οξινίζεται με υδροχλωρικό οξύ που έχει ζεύγος οξειδοαναγωγής ως $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ και $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{2+}$. Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο - $\text{Cr}^{3+} + e \leftrightarrow \text{Cr}^{2+}$
 Στο θετικό ηλεκτρόδιο - $\text{Fe}^{2+} + e \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$.

Η ιοντοανταλλακτική μεμβράνη στο Iron Chromium RFB διαχωρίζει τα δύο ρέοντα αντιδρώντα διαλύματα που αποτρέπουν τη διασταυρούμενη ανάμειξη των αντιδραστικών ιόντων κατιόντων. Η τυπική τάση κυψέλης είναι 1,18V. Ο κινητικός ρυθμός του Cr^{3+} στον Cr^{2+} είναι αργός λόγω της παρουσίας του Cr^{3+} σύμπλοκα όπως το $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_3^{3+}$ και $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_2^{2+}$, επομένως απαιτείται καταλύτης όπως χρυσός, βισμούθιο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.1 δεν απαιτείται καταλύτης για το ηλεκτρόδιο σιδήρου που απαιτείται για το ηλεκτρόδιο σιδήρου



Εικόνα 3.5.1(1)-Σχηματικό διάγραμμα ροής οξειδοαναγωγής χρωμίου σιδήρου μπαταρία (πηγή : <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0378775316307029-gr1.jpg>)

Προκλήσεις:

- Η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής χρωμίου σιδήρου έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα που είναι μικρότερη από 10 Whkg^{-1} .
- Δεδομένου ότι ο ευγενής καταλύτης θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τον κινητικό ρυθμό, το αποτέλεσμα αυτού θα είναι η αύξηση του κόστους του συστήματος.



Εικόνα 3.5.1(2)-Η μεγαλύτερη μπαταρία ροής σιδήρου-χρωμίου στον κόσμο ξεκινά στην Καλιφόρνια (πηγή :

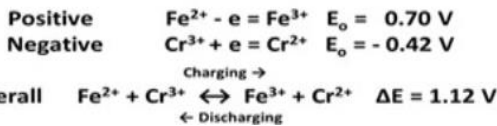
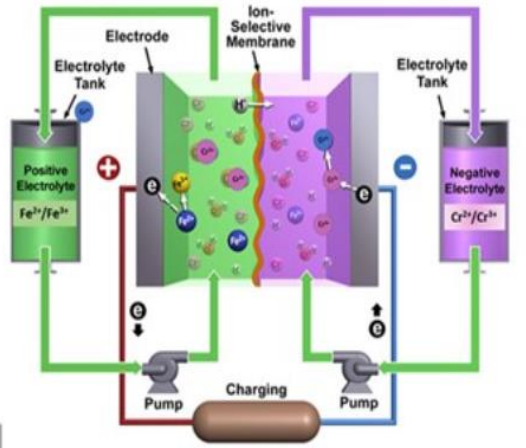
<https://www.aiche.org/chenected/2014/07/worlds-largest-iron-chromium-flow-battery-starts-california>)

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΡΟΗΣ ΧΡΩΜΙΟΥ-ΣΙΔΗΡΟΥ(ΠΗΓΗ:

[https://iopscience-iop-org.translate.google/article/10.1149/MA2021-013222mtgabs? x tr sl=en& x tr tl=el& x tr hl=el& x tr pto=sc](https://iopscience-iop-org.translate.google/article/10.1149/MA2021-013222mtgabs?x_tr_sl=en&x_tr_tl=el&x_tr_hl=el&x_tr_pto=sc))

20 kW 250 kWh System: Technical Parameters

Max power	35 kW
Rated full capacity	250 kWh
DC voltage range	0 - 288 V to 1000 V DC
Max DC current	300 A
AC Power supply	380 V 3-phase
Container size	6.10 X 2.44 X 5.30 m
Space requirement	9.10 X 2.44 X 5.30 m
Total weight w/o e'lyte	4 ton
Total weight w/ e'lyte	31 ton
Ambient temperature	-20 to +55 °C

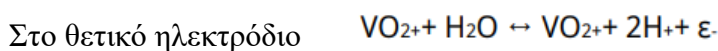


Discharge Performance			
Duration, hr	Power, kW	Energy, kWh	Efficiency, %
5.6	32	180	68
7.2	28	202	71
8.8	24	212	74
15.5	16	240	80

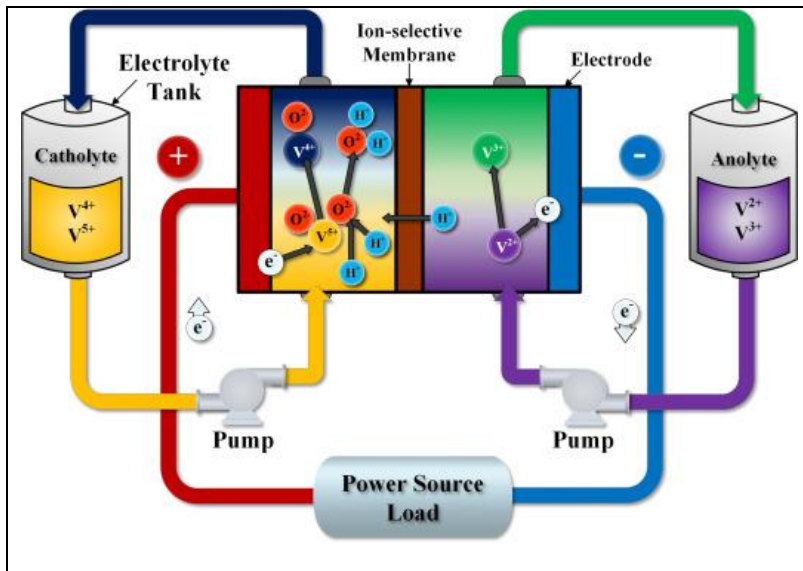
3.5.2 Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου (VRB)

Οι VRB (μπαταρίες οξειδοαναγωγής βαναδίου) ή οι RFB αποκλειστικά βαναδίου, είναι επί του παρόντος η πιο επιτυχημένη τεχνολογία RFB, η μόνη που έχει φθάσει στο εμπόριο. Τα VRB χρησιμοποιούν βανάδιο/βανάδιο διαλυμένο σε υδατικό θειικό οξύ (~5 M). Ένα πλεονέκτημα σε σχέση με άλλα RFB είναι ότι, δεδομένου ότι χρησιμοποιούν το ίδιο μέταλλο σε κάθε ηλεκτρόδιο, τα ηλεκτρόδια και η μεμβράνη δεν επιμολύνονται διασταυρούμενα, αποτρέποντας τη μείωση της χωρητικότητας και παρέχοντας μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αξιοποιώντας την ικανότητα του βαναδίου να υπάρχει σε διάλυμα σε τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις οξείδωσης, το βανάδιο II-III (δισθενές τρισθενές) χρησιμοποιείται στο ένα ηλεκτρόδιο και το βανάδιο IV-V (τετρασθενές-πεντασθενές) στο άλλο.

Το αρνητικό ημικύτταρο αποτελείται από το V²⁺/V³⁺ και το θετικό ημικύτταρο αποτελείται από V⁴⁺/V⁵⁺ ως το ζεύγος οξειδοαναγωγής που έχει τον ηλεκτρολύτη θειικό οξύ.



Το VRFB εξαλείφει το πρόβλημα της διασταυρούμενης μόλυνσης με τη διάχυση διαφορετικών ιόντων οξειδοαναγωγής κατά μήκος της μεμβράνης αφού η ανταλλαγή κατιόντων Nafion και η μεμβράνη ανταλλαγής ανιόντων New Selemion βρέθηκαν χημικά σταθερές. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.2.



Εικόνα 3.5.2(1)- Σχηματικό διάγραμμα Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου (πηγή : <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/vanadium-redox-flow-battery>)

Το VRFB δείχνει τη γρήγορη κινητική του ζεύγους βαναδίου που οδηγεί σε υψηλή φόρτιση και τάση, καθώς και η απόδοση αυξάνεται από 71 έως 90 % που αναφέρεται με στοίβα VRFB 1KW. Ως εκ τούτου, δεν απαιτείται καταλύτης για το VRFB. Στο VRFB δεν υπάρχει πρόβλημα με υπερφόρτιση και βαθιά εκφόρτιση. Ο ηλεκτρολύτης είναι επαναχρησιμοποιήσιμος, επομένως η μπαταρία VRFB έχει μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό κόστος.

Προκλήσεις:

- Η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου έχει χαμηλή ειδική ενέργεια (25-30 Wh/kg).
- Εάν η συγκέντρωση πάνω από 2M αυξηθεί, τότε η κατακρήμνιση εμφανίζεται στο V5+ ηλεκτρολύτης σε θερμοκρασία άνω των 40°C και στερεά οξείδια βαναδίου V2+ ή V3+ σε θερμοκρασία κάτω από 100°C. Ως εκ τούτου, μια χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα είναι μια μεγάλη πρόκληση.
- Ιδιαίτερα οξειδωτική φύση του V3+ προκαλεί την αποικοδόμηση της ιοντοανταλλακτικής μεμβράνης και του υλικού του θετικού ηλεκτροδίου.
- Η μπαταρία ροής VRFB περιορίζει την επιλογή θετικού ηλεκτροδίου όπως ο άνθρακας, αυξάνοντας έτσι το κόστος του συστήματος VRFB.

-Ο ακριβός ηλεκτρολύτης βαναδίου και τα στοιχεία κυψελών, συμπεριλαμβανομένων των μεμβρανών με βάση το Nafion και των υλικών ηλεκτροδίων, έχουν υψηλό κόστος.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΡΟΗΣ ΒΑΝΑΔΙΟΥ

(ΠΗΓΗ: https://en.wikipedia.org/wiki/Vanadium_redox_battery)

Ειδική ενέργεια	10–20 Wh/kg (36–72 J/g)
Ειδική ισχύς	100 W/kg
Πυκνότητα ενέργειας	15–25 Wh/L (54–65 kJ/L)
Τάση κυψέλης	1,2 V
Κύκλοι	>12,000-14,000 κύκλοι
Διάρκεια ζωής	20-30 χρόνια
Απόδοση	85%
Μέγιστο βάθος εκφόρτισης	100%

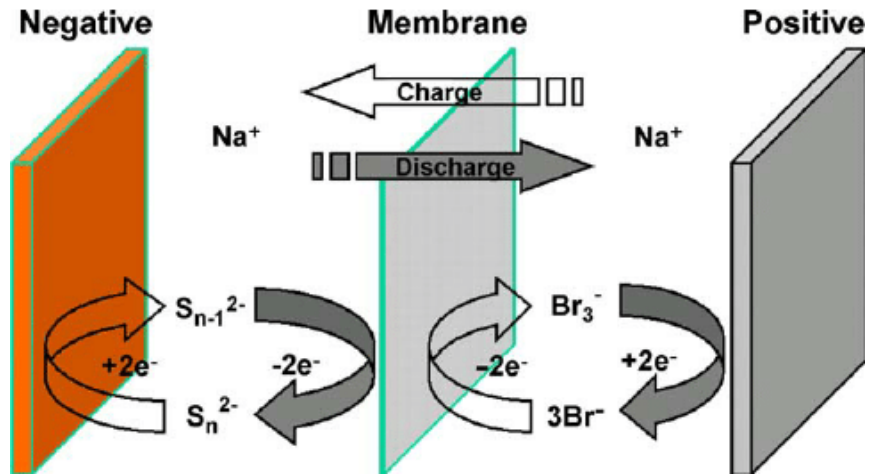
3.5.3 Μπαταρία ροής πολυσουλφιδίου οξειδοαναγωγής βρωμίου (PSB)

Το πολυσουλφίδιο βρωμίου RFB αποτελείται από ηλεκτρολύτη NaBr στο θετικό ημικύτταρο και Na₂ ηλεκτρολύτη στο αρνητικό ημικύτταρο. Διαχωρίζεται από μια μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων για την πρόληψη ανιόντων θείου απευθείας με βρώμιο.

Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο $S_4^{2-} + 2e^- \leftrightarrow 2 S_2^{2-}$

Στο θετικό ηλεκτρόδιο $3Br^- - 2e^- \leftrightarrow Br_3^-$

Το πολυσουλφίδιο βρωμίου έχει γραφίτη ως θετικό ηλεκτρόδιο και πορώδες θειούχο νικέλιο ως αρνητικό ηλεκτρόδιο. Η ηλεκτρική ισορροπία επιτυγχάνεται με τη μεταφορά Na⁺ κατά μήκος της μεμβράνης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.3. Η τάση λειτουργίας είναι 1,7V σε πλήρως φορτισμένη κατάσταση.



Εικόνα 3.5.3(1)- Αρχή της μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής πολυσουλφιδίου βρωμίου (πηγή : <https://www.researchgate.net/profile/Hantao-Zhou/publication/228907220/figure/fig1/AS:300795737198599@1448726700170/The-principle-of-sodium-polysulfide-bromine-redox-flow-battery.png>)



Εικόνα 3.5.3(2)- Μπαταρία ροής πολυσουλφιδίου οξειδοαναγωγής βρωμίου(πηγή : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782420132000091>)

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΡΟΗΣ ΠΟΛΥΣΟΥΛΦΙΔΙΟΥ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ ΒΡΩΜΙΟΥ

(ΠΗΓΗ:

https://www.researchgate.net/publication/267939992_Survey_of_Rechargeable_Batteries_for_Robotic_Applications)

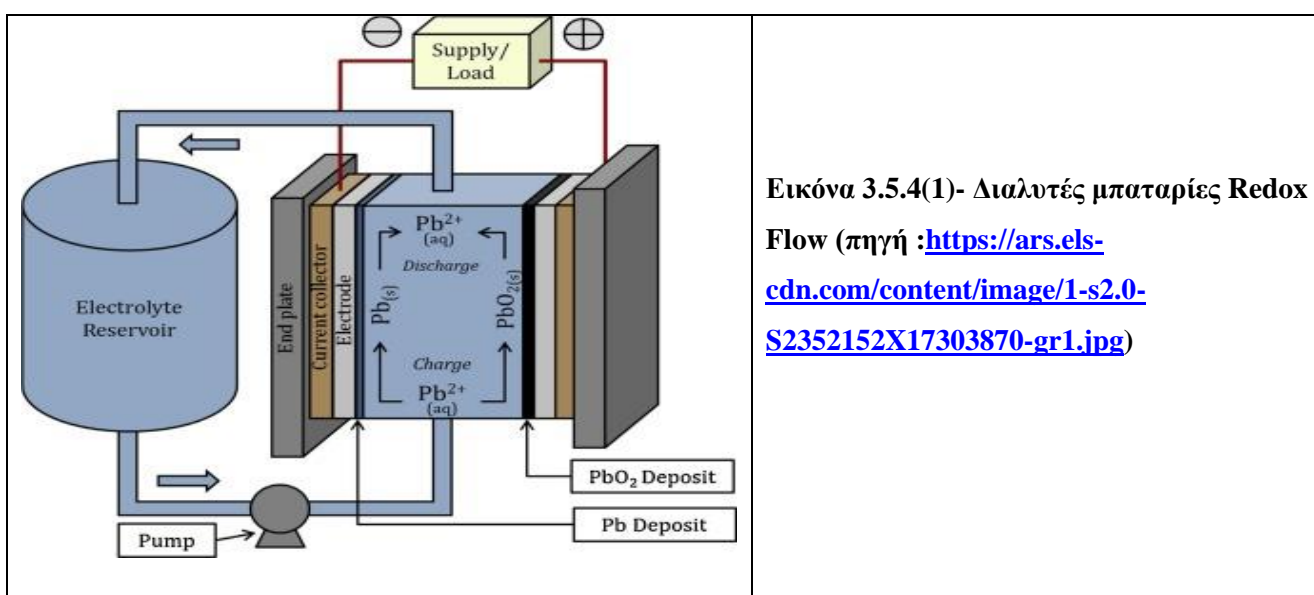
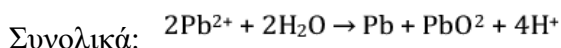
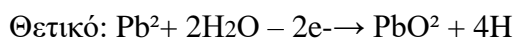
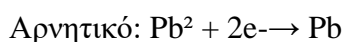
Τάση κυψέλης	1,5 V
Κύκλοι	2.000 (κατ' εκτίμηση)
Απόδοση	75%
Θερμοκρασία λειτουργίας	20-40°C

Προκλήσεις:

- Λόγω της διασταύρωσης ιοντικών ειδών μέσω της μεμβράνης υπάρχει κίνδυνος διασταυρούμενης μόλυνσης ηλεκτρολυτών.
- Σε ηλεκτρόδια ή μεμβράνες συσσώρευση ειδών θείου όπως το S²⁻ λαμβάνει χώρα η οποία έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια θείου από το σύστημα.
- Δεδομένου ότι η ανάμειξη ηλεκτρολύτη λαμβάνει χώρα σε αυτήν την μπαταρία μπορεί να δημιουργήσει θερμότητα και τοξικά αέρια όπως Br₂ και H₂S.

3.5.4 Μπαταρία οξειδοαναγωγικής ροής διαλυτού μολύβδου

Pb(II) και Pb(IV). Οι ηλεκτρολύτες παρασκευάζονται από οξείδιο μολύβδου, ανθρακικό μολύβδο ή υδατικό μεθανοσουλφονικό μολύβδο, Pb(CH₃SO₃H)₂ και μεθανοσουλφονικό οξύ (MSA), CH₃SO₃H. Κατά τη φόρτιση η αντίδραση οξείδωσης συμβαίνει στο Pb²⁺ που οδηγεί σε εναπόθεση οξειδίου του μολύβδου στο θετικό ηλεκτρόδιο. Κατά την εκφόρτιση, οι εναποθέσεις ηλεκτρολύτων διαλύονται ξανά στον ηλεκτρολύτη. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.4, οι μπαταρίες οξειδοαναγωγικής ροής διαλυτού μολύβδου έχουν χαμηλό κόστος καθώς δεν υπάρχει μεμβράνη και μπορούν εύκολα να κλιμακωθούν. Ακολουθούν οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια



Εικόνα 3.5.4(1)- Διαλυτές μπαταρίες Redox Flow (πηγή : <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S2352152X17303870-gr1.jpg>)



Εικόνα 3.5.4(2)- Μια μπαταρία μολύβδου οξέος 12 V(πηγή : <https://www.mdpi.com/2313-0105/3/2/15>)

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΡΟΗΣ ΔΙΑΛΥΤΟΥ ΜΟΛΥΒΔΟΥ

(ΠΗΓΗ: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjztNe-qL_7AhWLjKQKHdHrBj8QFnoECEQQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F2313-0105%2F3%2F2%2F15%2Fpdf&usg=AOvVaw3pLr8BM4Tjopk4Zf7EWA4B)

Τάση κυψέλης, V	1,78
Ενεργειακή απόδοση, %	65%
Διάρκεια ζωής κύκλου	2000
Βάθος εκφόρτισης	100%
Εύρος θερμοκρασίας	35-55°C
Κόστος, €/kWh	-

Προκλήσεις:

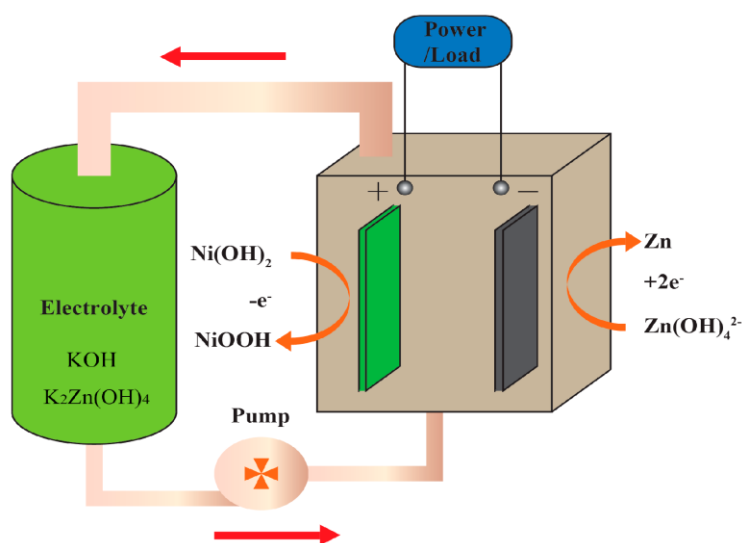
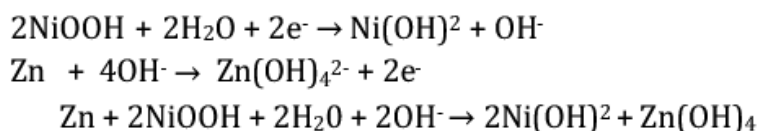
- Ανάπτυξη δενδρίτη Pb στο αρνητικό ηλεκτρόδιο.
- Κακή αναστρεψιμότητα PbO₂ στο θετικό ηλεκτρόδιο.

3.5.5 Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής νικελίου ψευδαργύρου

Αυτοί οι τύποι μπαταριών αποτελούνται από στοίβα κυψελών, δεξαμενή ηλεκτρολυτών, αντλία και πλάκα ροής. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.5, η μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής νικελίου ψευδαργύρου χρησιμοποιεί έναν συλλέκτη αδρανούς μετάλλου ως αρνητικό ηλεκτρόδιο, αλκαλικό διάλυμα ψευδαργύρου υψηλής συγκέντρωσης ως ηλεκτρολύτη και οξείδιο του νικελίου ως θετικό

ηλεκτρόδιο. Στην μπαταρία συμβαίνουν δύο ταυτόχρονες αντιδράσεις. Κατά την εκφόρτιση με τη βοήθεια της αντλίας, ο ηλεκτρολύτης ρέει στη στοίβα κυψελών και το NiOOH μετατρέπεται σε Ni(OH)² σε στερεά φάση. Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο ο ψευδάργυρος οξειδώνεται σε ψευδάργυρο. Η αντίστροφη διαδικασία συμβαίνει κατά τη φόρτιση.

Ακολουθούν οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην μπαταρία. Η μπαταρία οξειδοαναγωγικής ροής ψευδαργύρου νικελίου είναι χαμηλού κόστους, περιβαλλοντικά αποδεκτή και έχει υψηλές προδιαγραφές με υψηλές ενεργειακές πυκνότητες.



Εικόνα 3.5.5-Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής νικελίου ψευδαργύρου (πηγή : https://www.mdpi.com/energies/energies-10-01101/article_deploy/html/images/energies-10-01101-g001.png)

Προκλήσεις

- 1.Σχηματισμός δενδριτών ψευδαργύρου.
- 2.Μείωση της διάρκειας ζωής των ZNBs.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΡΟΗΣ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ

(ΠΗΓΗ: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjztNe-qL_7AhWLjKQKHdHrBj8QFnoECEQOAO&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F2313-0105%2F3%2F2%2F15%2Fpdf&usq=AOvVaw3pLr8BM4Tjopk4Zf7EWA4B)

Ρυθμός ροής	2.85-8.55 mL/s
Θερμοκρασία	295.15 K
Πίεση εξόδου ηλεκτρολύτη	0 Pa
Πυκνότητα εφαρμοζόμενου ρεύματος	100/300 A m ⁻²
Αρχική συγκέντρωση ιόντων υδροξειδίου	9×10 ⁶ mol L ⁻¹
Αρχική συγκέντρωση ιόντων ψευδαργύρου	8×10 ⁵ mol L ⁻¹

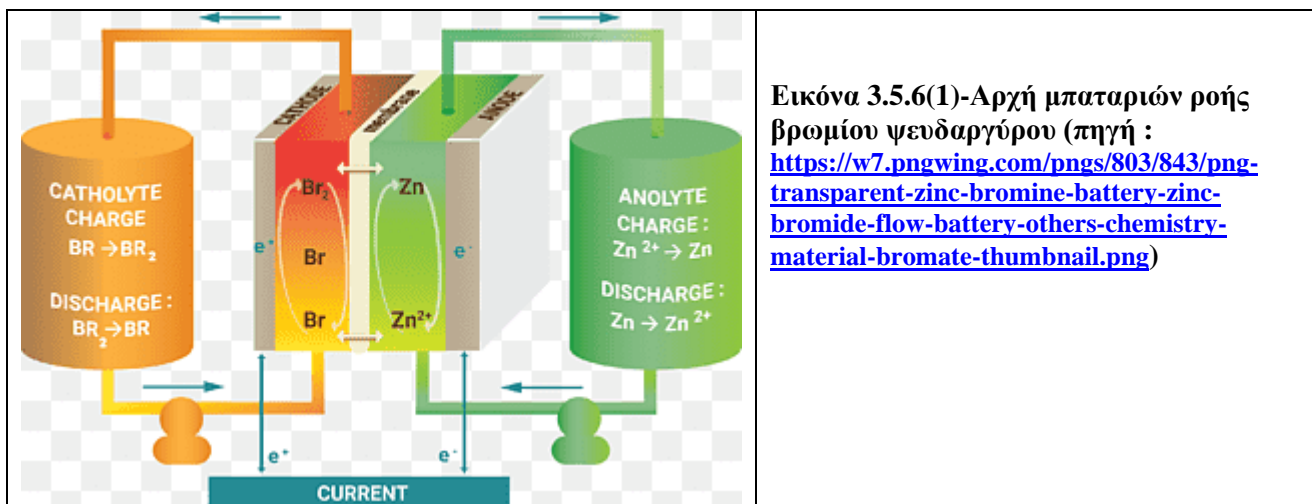
3.5.6 Μπαταρίες ροής ψευδαργύρου-βρωμίου (ZnBr)

Οι μπαταρίες ροής βρωμιούχου ψευδαργύρου χρησιμοποιούν ζεύγος οξειδοαναγωγής Zn²⁺/Zn και Br²/Br⁻. Χρησιμοποιεί φθινό και άφθονο βρωμιούχο ψευδάργυρο ως ηλεκτρολύτη.

Στην αρνητική πλευρά $Zn \leftrightarrow Zn^{2+} + 2e^-$

Στη θετική πλευρά $Br_2 + 2e^- \leftrightarrow 2Br^-$

Λόγω του υψηλού δυναμικού Zn και Br έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα περίπου 65-75 Whkg⁻¹



Εικόνα 3.5.6(1)-Αρχή μπαταριών ροής βρωμίου ψευδαργύρου (πηγή : <https://w7.pngwing.com/pngs/803/843/png-transparent-zinc-bromine-battery-zinc-bromide-flow-battery-others-chemistry-material-bromate-thumbnail.png>)

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η μεταλλική πλάκα ψευδάργυρος επιστρώνεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο από τον ηλεκτρολύτη ενώ το βρώμιο παράγεται στο θετικό ηλεκτρόδιο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.6.



Εικόνα 3.5.6(2)- Οι "μικρότερες" μπαταρίες ροής ψευδαργύρου βρωμίου στον κόσμο έρχονται για το λίθιο πηγή : <https://electrek.co/2017/11/06/zinc-bromine-batteries-coming-for-lithium/>

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΡΟΗΣ ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ-ΒΡΩΜΙΟΥ

(ΠΗΓΗ: https://www.researchgate.net/publication/267939992_Survey_of_Rechargeable_Batteries_for_Robotic_Applications)

Ειδική ενέργεια	65-85 Wh/kg
Ειδική ισχύς	90-110 W/kg
Τάση κυψέλης	1,8 V
Κύκλοι	2.000
Απόδοση	75-80%
Μέγιστο βάθος εκφόρτισης	100%

Προκλήσεις

- Ο σχηματισμός δενδρίτη ψευδαργύρου είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη μπαταρία ZBFB, αυξάνει την εσωτερική αντίσταση
- Λόγω της αύξησης της εσωτερικής αντίστασης υπάρχει χαμηλή πυκνότητα ισχύος λόγω της χαμηλής αγωγιμότητας του ηλεκτρολύτη και λόγω της μεγάλης πόλωσης στο θετικό ηλεκτρόδιο.
- Πρόσφατα για την καταστολή του σχηματισμού δενδρίτη ψευδαργύρου, το μεθανοσουλφονικό οξύ (MSA) χρησιμοποιείται για την αύξηση της ιοντικής αγωγιμότητας, μειώνει την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας και επίσης λόγω της αύξησης της απόδοσης της μπαταρίας MSA.

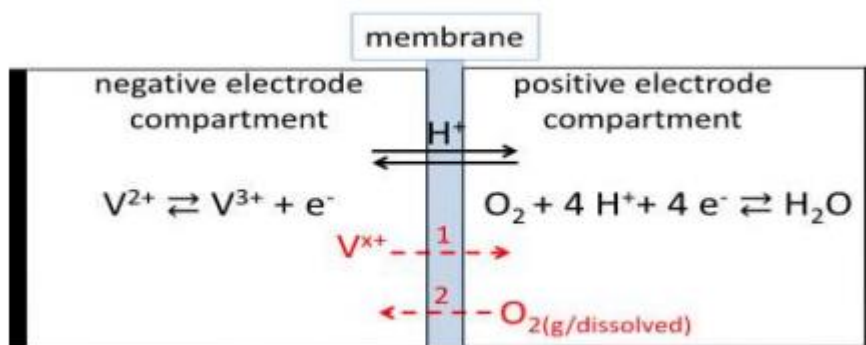
3.5.7 Μπαταρία ροής αέρα βαναδίου (VARFB)

Στη μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής αέρα βαναδίου το θετικό οξειδοαναγωγικό ζευγάρι δηλαδή (VO²⁺/VO₂⁺) αντικαθίσταται από το (H₂O/O₂) ζευγάρι. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι αυξημένη από τη μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου (VRFB). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.7.

Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, το $V^{2+} \leftrightarrow V^{3+} + e^{-}$

Στο θετικό ηλεκτρόδιο, το $O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \leftrightarrow H_2O$

Το O₂ για τη διαδικασία εκφόρτισης δίνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα.



Εικόνα 3.5.7(1)-σχηματική μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής αέρα βαναδίου (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.irjet.net%2Farchives%2FV7%2Fi7%2FIRJET-V7I7480.pdf&psig=AOvVaw2l_lidMuTOO4eIZPt0qEfw&ust=1666716700907000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCLCHjdmp-foCFQAAAAAdAAAAABAE)

Η κόκκινη διαδικασία μεταφοράς υποδεικνύει ανεπιθύμητη διαδικασία μεταφοράς.



Εικόνα 3.5.7(2)- Μπαταρία ροής αέρα αέρα βαναδίου (πηγή : <https://ipsnews.net/business/2021/07/09/energy-storage-boom-drives-vanadium-use-in-long-duration-battery-applications-vanitec/>)

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΒΑΝΑΔΙΟΥ(ΠΗΓΗ: https://www.researchgate.net/publication/267939992_Survey_of_Rechargeable_Batteries_for_Robotic_Applications)

Ειδική ενέργεια	200 Wh/kg
Ειδική ισχύς	100 W/kg σε 80% εκφόρτιση
Τάση κυψέλης	1,6 V
Κύκλοι	300
Απόδοση	50%

Προκλήσεις

-Κατά τη φόρτιση, το οξυγόνο παράγεται στο πορώδες θετικό ηλεκτρόδιο που έρχεται σε επαφή απευθείας με τη μεμβράνη, επομένως το παραγόμενο οξυγόνο μπορεί να διεισδύσει σε διαλυμένη ή αέρια μορφή από θετικό σε αρνητικό ηλεκτρόδιο που μπορεί να μειώσει την απόδοση μιας μπαταρίας ροής οξειδοαναγωγής αέρα βαναδίου.

-Μια άλλη πρόκληση είναι η διασταύρωση βαναδίου από το αρνητικό ηλεκτρόδιο στο θετικό ηλεκτρόδιο που μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη κολομβική απόδοση και μπορεί να μειώσει τον κύκλο ζωής της μπαταρίας λόγω μη αναστρέψιμης απώλειας χωρητικότητας. Πρόσφατα είχε γίνει τροποποίηση στη μεμβράνη του VARFB που είναι μεμβράνες N117 (PEI/Nafion), όπου έχει χρησιμοποιηθεί και έχει ενισχύσει την κολομβική απόδοση.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν κυρίως τρεις από τους παραπάνω τύπους μπαταριών ροής μέχρι το στάδιο της εμπορικής αξιοποίησης και επίδειξης. Αυτοί οι τύποι είναι οι μπαταρίες βαναδίου (V/V), οι μπαταρίες βρωμιούχου πολυσουλφιδίου (PSB) και οι μπαταρίες βρωμιούχου ψευδαργύρου (ZnBr).

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΡΟΗΣ**Πίνακας 3.5.7(πηγή :**

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiQjJalucn7AhX4gP0HHS41ChY4ChAWegQIBRAB&url=https%3A%2F%2Fwww.dynamicidalpower.eu%2Fresources%2FDocumenten%2FJournal_of_Power_Technologies_97_3_2017.pdf&usq=AOvVaw3uThKkEMUD9EqCiO-1Rct-

	VRB	ZnBr	PSB
Power rating	2.00	1.33	10.00
Energy capacity	5.00	10.00	0.15
Power capital cost	1.43	0.00	0.00
Energy capital cost	0.00	0.00	0.00
O&M cost	0.00	10.00	10.00
Specific power	10.00	6.67	0.00
Specific energy	5.88	10.00	3.53
Power density	10.00	2.55	1.25
Energy density	4.71	10.00	8.57
Technical maturity	6.00	4.00	2.00
Daily self-discharge	10.00	10.00	10.00
Lifetime	6.67	6.67	10.00
Cycling times	10.00	2.19	1.25
Round-trip efficiency	8.50	7.50	7.50

3.6 Χαρακτηριστικά μπαταριών ροής

Οι μπαταρίες αυτές αναπτύσσονται κυρίως για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Το 2004 ο κύριος κατασκευαστής συστημάτων ZnBr ZBB ξεκίνησε εμπορικές δραστηριότητες πλήρους κλίμακας με αυτοματοποιημένη γραμμή παραγωγής.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των μπαταριών ροής:

- Υψηλή ισχύς: Το δυναμικό της κυψέλης εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη χημική αντίδραση, η ονομαστική ισχύς καθορίζεται από το σχεδιασμό και το μέγεθος της συστοιχίας ισχύος.
- Μεγάλη διάρκεια: Η ονομαστική ενέργεια εξαρτάται από την ποσότητα του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται και το αντίστοιχο μέγεθος των δεξαμενών αποθήκευσης.
- Ο σχεδιασμός της ονομαστικής ισχύος και της ονομαστικής ενέργειας είναι αποσυνδεδεμένοι.
- Το σύστημα είναι επαναλειτουργικό, οι ηλεκτρολύτες μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα.
- Οι περισσότερες αντιδράσεις οξειδοαναγωγής είναι πολύ γρήγορες (γρήγορη κινητική αντίδρασης), γεγονός που καθιστά το χρόνο αντίδρασης πολύ σύντομο.

Οι μπαταρίες ροής έχουν γρήγορη απόκριση και μπορούν να μεταβούν από κατάσταση φόρτισης σε κατάσταση εκφόρτισης σε περίπου 1/1000 s.

-Η απόδοση πλήρους κύκλου της μπαταρίας είναι σχετικά χαμηλή (75%-80%), λόγω της ενέργειας που απαιτείται για την κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη και των απωλειών λόγω χημικών αντιδράσεων, π.χ. σχηματισμός υδρογόνου.

-Το σύστημα δεν έχει αυτοεκφόρτιση, καθώς οι ηλεκτρολύτες δεν μπορούν να αντιδράσουν όταν αποθηκεύονται χωριστά. Αυτό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε περιπτώσεις όπου η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται για μεγαλύτερη διάρκεια.

3.7 Εφαρμογές μπαταριών ροής

Από τη δεκαετία του 1970, έχουν εισαχθεί διάφορα RFB, αλλά μόνο μπαταρίες αποκλειστικά βαναδίου, πολυαλογονιδίου βαναδίου, ψευδάργυρου-βρωμίου, ψευδαργύρου-δημητρίου και βρωμίου-πολυσουλφιδίου έχουν δοκιμαστεί ή διατεθεί στο εμπόριο σε μεγάλη κλίμακα. Οι εμπορικές προδιαγραφές αυτών των RFB συνοψίζονται στον πίνακα 3.6. μεταξύ των τεσσάρων RFB, το VRFB έχει την υψηλότερη απόδοση και τον μεγαλύτερο κύκλο ζωής, ενώ τα συστήματα ψευδαργύρου-δημητρίου και βρωμιδίου-πολυσουλφιδίου έχουν πλεονεκτήματα στην πυκνότητα ισχύος και το κόστος, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.7-Σύνοψη των RFB(πηγή : [Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage - RSC Advances \(RSC Publishing\)](#))

Specifications and operation performance of the most developed/commercially available RFB systems (NG: not given)				
	All-vanadium	Zinc-bromine	Bromine-polysulfide	Zinc-cerium
Cell open-circuit voltage/V	1.4	1.8	1.5	2.4
Energy density/W L ⁻¹	16-33	Up to 60	20-30	12-20
Cycle round-trip DC energy efficiency/%	78-80	65-75	60-75	63
Cycle life (cycles)	>12 000	>2 000	>2 000	NG
Operation T/°C	30	50	35	60
Total system cost/\$ kW ⁻¹	1828	1044	639	750
Cost attribution of storage module/%	80	80	60	50
Typical size range/MWh	0.5-5	0.01-5	0-120	NG
Unit design life time/years	5-10	5-10	15	15
Stage of development	Demonstration/Commercial units	Demonstration / Commercial units	Demonstration	Demonstration
Major companies involved	Prudent Energy (formerly Pinnacle, VRB), Sumitomo Electric Industries, Cellstorm GmbH, Mitsubishi Chemical, Cellenium, V-fuel Pty, Ashlawn Energy and Re-fuel Tech.	ZBB, Premium Power, Kyushu Electric Power, Meidensha, Primus Power and Redflow	VRB (using Regenesys technology), further acquired by Prudent Energy	Plurion
Number of installations	>20	>10	2	1
Largest installation	4 MW/6 MWh in Subaru windfarm, Hokkaido by Sumitomo Electric Industries	1 MW in Kyushu, by Kyushu Electric Power	15 MW in Little Barford, UK by Regenesys Technology	2 kW-1 MW testing facility in Glenroth Scotland by Plurion

Μέχρι τώρα, μόνο συστήματα βαναδίου και ψευδάργυρου-βρωμίου έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, όπως ισοπέδωση φορτίου, εφαρμογές ελέγχου ποιότητας ισχύος, διευκόλυνση της ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποθήκευση ενέργειας για ηλεκτρικά οχήματα

3.7.1 Εφαρμογές ελέγχου ποιότητας ισχύος

Η αστοχία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί συχνά στην κατάρρευση του συστήματος του δικτύου, η οποία μπορεί να είναι δαπανηρή καθώς και καταστροφική. Ως αποτέλεσμα, είναι απαραίτητη η γρήγορη σταθεροποίηση. Τα RFB είναι ευνοϊκά σε αυτές τις καταστάσεις, καθώς ο χρόνος απόκρισής τους σε ισχύ μπορεί να είναι μικρότερος από

1 λεπτό και η μέγιστη έξοδος υπερφόρτωσης βραχυχρόνιου χρόνου μπορεί να είναι πολλές φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική χωρητικότητα. Αυτό καθιστά τα RFB ελκυστικά τόσο για έλεγχο τάσης όσο και για έλεγχο συχνότητας. Τα RFB μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σύστημα UPS με υποστήριξη μπαταρίας για προστασία από βλάβες στα συστήματα μετάδοσης και διανομής του βοηθητικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποθήκευση ενέργειας για το σύστημα UPS είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διακοπή ρεύματος, η οποία χρησιμοποιείται γενικά για την ομαλή διακοπή λειτουργίας συστημάτων υπολογιστών ή την ενεργοποίηση του backupgenerator. Δεδομένου ότι οι γεννήτριες ντίζελ είναι συχνά δύσκολο να ενεργοποιηθούν, απαιτούνται μεγαλύτεροι χρόνοι εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Σε σύγκριση με τις σφραγισμένες μπαταρίες μολύβδου-οξέος, οι RFB έχουν το πλεονέκτημα μεγαλύτερου χρόνου εκφόρτισης. Ορισμένα από τα RFB, όπως αυτά που αποθηκεύουν ενέργεια στους ηλεκτρολύτες, έχουν χωρητικότητα συστήματος που μπορεί να αυξηθεί εύκολα χρησιμοποιώντας περισσότερο όγκο ηλεκτρολύτη και μεγαλύτερες δεξαμενές. Επιπλέον, τα RFB μπορούν να επανεκκινηθούν από την αδράνεια εντός 1 λεπτού αντλώντας ηλεκτρολύτη στις στοίβες κυττάρων. Οι εγκαταστάσεις RFB σε εφαρμογές UPS έχουν γίνει κυρίως VRFB της SEI στην Ιαπωνία. Από το 2001, η SEI έχει εγκαταστήσει έναν αριθμό VRFB σε εργοστάσια υψηλής τεχνολογίας και κτίρια γραφείων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το 3 MW x 1,5 s συν ένα σύστημα 1,5 MW x 1h στο εργοστάσιο παραγωγής υγρών κρυστάλλων της TottoriSanyo Electric το 2001. Αυτό το σύστημα δεν χρησιμεύει μόνο ως UPS, αλλά και για ισοστάθμιση φορτίου. Άλλα παραδείγματα εξισορρόπησης φορτίου και εφεδρικής υποστήριξης UPS περιλαμβάνουν την πρώτη εγκατάσταση ισχύος 250 kW/500 kWhVRFB από τη VRB το 2001 στο Πανεπιστήμιο Stellenbosch.

3.7.2 Εφαρμογές με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Λόγω της μεγάλης χωρητικότητας και του μεγάλου χρόνου εκφόρτισης, οι μπαταρίες ροής είναι ελκυστικές όταν συνδέονται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ως παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οι πηγές είναι συνήθως διακοπτόμενες και δεν συνδέονται με το δίκτυο, η αποθήκευση ενέργειας είναι επομένως σημαντική. Λόγω της ταχέως αναπτυσσόμενης ζήτησης για ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δημιουργήθηκαν τεράστιες ευκαιρίες στην αγορά.

Σύζευξη με ηλιακά κύτταρα

Τα ηλιακά πάνελ είναι παραδοσιακά συνδεδεμένα με συμβατικές μπαταρίες μολύβδου-οξέος, οι οποίες χρησιμοποιούν μόνο 25-75% της κατάστασης χρέωσης τους ως εκ τούτου μόνο το 50% της πραγματικής χωρητικότητας χρησιμοποιείται. Τα RFB έχουν πλεονεκτήματα έναντι του συμβατικού μολύβδου μπαταρίες σε υψηλή απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλό κόστος. Ο επόμενος πίνακας (Πίνακας 3.6.2(1)) συνοψίζει τις κύριες εγκαταστάσεις RFB σε συνδυασμό με ηλιακή ενέργεια.

Πίνακας 3.7.2(1) – Πίνακας εγκαταστάσεων RFB σε συνδυασμό με ηλιακή ενέργεια(πηγή : [Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage - RSC Advances \(RSC Publishing\)](#)

Major installations of RFBs coupled with solar energy

System	Company	Customer	Basic specification	Start date
All-vanadium	University of South New Wales, Thai Gypsum	Solar Demonstration House, Thailand	5 kW/12 kWh	1994
		Obayashi, Japan	DC 30 kW × 8 h	Apr 2001
	Sumitomo Electric Industries	University of Aalborg, Denmark	5 kW × 4 h	2006
	VRB Power System	Risø TDU, Denmark	15 kW × 8 h	May 2007
	Prudent Energy	Zhangbei, Heibei, China	1 MWh	May 2011
Zinc-bromine	ZBB Energy	California Public Utilities Commission	100 kW/300 kWh	2011
		Australian Inland Energy, Australia	500 kWh	Jun 2002
	Redflow Department of Energy, US	Power Light, US	2 × 50 kWh	Nov 2003
		CSIRO research center, Australia	500 kWh	Dec 2009
		University of Queensland, Australia	12 × 120 kWh	Apr 2011
	Albuquerque, New Mexico, US	2.8 MWh	2011	

Η πρώτη χρήση RFB με ηλιακές πηγές ενέργειας ήταν 5 kW σύστημα VRFB 12 kWh εγκατεστημένο στην Ταϊλάνδη από την Thai Gypsum Products Co., Ltd., το 1994, η οποία ήταν η πρώτη άδεια με βάση την τεχνολογία που αναπτύχθηκε από τους Skyllas-Kazacos et al. Το 2001, η δεύτερη σύζευξη συστήματος VRFB με ηλιακούς συλλέκτες εγκαταστάθηκε από VRB σε γήπεδο γκολφ στην Ιαπωνία. Πρώιμη εγκατάσταση του ψευδαργύρου σύστημα βρωμίου ήταν ένα 50 kW/100 kWh από το ZBB, το οποίο είναι μέσα παράλληλα με ηλιακά κύτταρα ταρατάσας ισχύος 50 kW σε εμπορικό πελάτη εγκατάσταση στη Νέα Υόρκη. Δύο επιπλέον μπαταρίες ψευδαργύρου-βρωμίου ZBB έχουν εγκατασταθεί στην Αυστραλία (500 kWh) και στις ΗΠΑ (2650 kWh) το 2002 και το 2003, αντίστοιχα. Το υπουργείο των Η.Π.Α η Energy κατασκευάζει επί του παρόντος μια μπαταρία ροής ψευδαργύρου-βρωμίου 2,8 MWh στο Αλμπουκέρκι, με ηλιακούς συλλέκτες 500 kW.

Σύζευξη με ανεμογεννήτριες

Η σύζευξη RFB με ανεμογεννήτριες είναι χρήσιμη για την εξάλειψη των διακυμάνσεων και τη μεγιστοποίηση της αξιοπιστία ισχύος. Η ζήτηση αποθήκευσης ενέργειας από τον άνεμο και οι εκμεταλλεύσεις πρόκειται να αυξηθούν δραματικά τις επόμενες δεκαετίες. Για παράδειγμα, η American Electric Power ισχυρίστηκε ότι θα εγκαταστήσει 1000 MW αποθήκευσης ενέργειας έως το 2020. Οι κύριες εγκαταστάσεις RFB σε συνδυασμό με ανεμογεννήτριες συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 3.6.2(2)).

Πίνακας 3.7.2 (2)-Πίνακας εγκαταστάσεων RFB σε συνδυασμό με ανεμογεννήτριες(πηγή :
https://www.academia.edu/18982904/Progress_in_redox_flow_batteries_remaining_challenges_and_their_applications_in_energy_storage)

Major installations of RFBs coupled with wind energy

System	Company	Customer	Basic specification (nominal DC power and energy)	Start date
All-vanadium	VRB Power System	Hydro Tasmania, Japan	200 kW × 4 h	Nov 2003
		Tapbury Management Ireland	2 MW × 6 h	Aug 2006
		University of Aalborg, Denmark	5 kW × 4 h	2006
		Risø TDU, Denmark	15 kW × 8 h	May 2007
	Prudent Energy	Zhangbei, Hebei, China	1 MWh	May 2011
	Sumitomo Electric Industries	Hokkaido Electric Power Wind Farm, Japan	170 kW/1 MWh	2001
		Institute of Applied Energy, Japan	AC 170 kW × 6 h	Mar 2001
Zinc-bromine	Pinnacle VRB	J Power at Subaru Wind Farm, Hokkaido, Japan	4 MW/6MWh	2005
	ZBB Energy	Hydro Tasmania, King island, Australia	250 kW/1MWh	2003
		Dundalk Institute of Technology, Ireland	125 kW/500 kWh	Dec 2008

Στην Ιαπωνία και την Ιρλανδία, έχουν εγκατασταθεί αρκετά RFB ανεμογεννήτριες από το 2000. Στις γνωστές συγκαταλέγονται οι πρώιμες εγκατάσταση VRFB ισχύος 170 kW/1 MWh της Sumitomo Electric Power στο Χοκάιντο της Ιαπωνίας, ενώ η SEI εγκατέστησε πρόσφατα ένα άλλο 4 MW/6 MWh VRFB στο Χοκάιντο για αιολικό πάρκο Subaru, είναι η μεγαλύτερη εγκατάσταση VRFB μέχρι στιγμής. Εκτός από το SEI, τα μεγαλύτερα RFB σε συνδυασμό με ανεμογεννήτριες είναι τα 2 MW x 6 h Το VRFB εγκαταστάθηκε από τη VRB στο λόφο Sorne, Ιρλανδία το 2006. Αν και τα περισσότερα από τα μεγάλης κλίμακας RFB σε συνδυασμό με την αιολική ενέργεια εγκαταστάθηκαν από τη SEI, μικρότερες κλίμακες βαναδίου και μπαταρίες ροής ψευδαργύρου-βρωμίου σε συνδυασμό με ένα αιολικό πάρκο εγκατεστημένο από κατασκευαστές, όπως το Pinnacle και το ZBB. Το 2011, η Prudent Energy εγκατέστησε μια μπαταρία 1 MWh πλήρως βαναδίου με ονομαστική ισχύ 500 kW για την εθνική αιολική ενέργεια Κέντρο Έρευνας και Δοκιμών Ενσωμάτωσης της Κίνας στο Zhangbei.

3.7.3 Εφαρμογές με ηλεκτρικά οχήματα

Ήδη από το 1980, ερευνήθηκε ένα RFB ψευδαργύρου-χλωρίου 50 kWh από την Energy Development Associates (EDA) για ένα όχημα σύστημα ισχύος για να ανταγωνιστεί την μπαταρία μολύβδου-οξέος. Εν τω μεταξύ, το Studiengesellschaft für Energiespeicher και Antriebssysteme (SEA, PowerCell of Boston, GmbH) στο Mu'zzuschlag, στην Αυστρία, έχει αναπτύξει μπαταρίες ψευδαργύρου/βρωμίου για ηλεκτρικά οχήματα από το 1983 και έχει παράγει μπαταρίες με χωρητικότητες που κυμαίνονται μεταξύ 5 και 45 kWh. Σε λεωφορείο Volkswagen έχει τοποθετηθεί μπαταρία SEA 45 kWh/216 V, που χρησιμοποιεί η Αυστριακή ταχυδρομική υπηρεσία. Ένα ηλεκτρικό όχημα με μπαταρία 15 kWh/114 V σχεδιάστηκε από Hotzenblitz (Γερμανία). Τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία ψευδαργύρου-βρωμίου 35 kWh ήταν που ξεκίνησε από το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια την δεκαετία του 1990. Στην Ιαπωνία, μια μπαταρία ψευδαργύρου-βρωμίου εγκαταστάθηκε από την Toyota Motor εταιρεία σε ηλεκτρικό όχημα, συγκεκριμένα EV-3036 και, σε Αυστραλία, ένα ηλεκτρικό καρότσι γκολφ με βανάδιο 36 V, 3.9 kWh. Το πρωτότυπο της μπαταρίας επιδείχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Νότου Ουαλία το 1994. Το καρότσι του γκολφ ήταν υπό δοκιμή στο δρόμο για περισσότερα από δύο χρόνια και αναφέρθηκε ότι είχε μέγιστη ταχύτητα 19 km h^{-1} . Το συνολικό βάρος του οχήματος, συμπεριλαμβανομένων δύο επιβατών ήταν πάνω από 400 kg. Δεδομένου ότι η ενέργεια αποθηκεύεται στον ηλεκτρολύτη, η λειτουργία ενός ηλεκτρικού οχήματος για 24 ώρες είναι δυνατή εάν ο ηλεκτρολύτης είναι ανεφοδιάζεται κάθε 4 ή 5 ώρες. Ωστόσο, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα των VRFB παραμένει η κύρια πρόκληση. Ως εκ τούτου, πρόσφατα έργα έχουν δείξει ότι οι μπαταρίες ροής θα μπορούσαν να είναι πολλά υποσχόμενες για μεγαλύτερα χιλιόμετρα ηλεκτρικού ρεύματος οχήματα, αλλά τις συνθήκες ασφαλείας της χρήσης μπαταρίας ροής λιθίου πρέπει ακόμη να εντοπιστούν.

3.8 Κόστη μπαταριών ροής

Δεν υπάρχει σημαντικός αριθμός δεδομένων για το κόστος κεφαλαίου για τα συστήματα ροής οξειδοαναγωγής. Οι πληροφορίες για τις τιμές προέκυψαν κυρίως από συζητήσεις με έναν εμπειρογνώμονα σε θέματα αποθήκευσης ενέργειας, έναν κατασκευαστή RFB και από παλαιότερη έρευνα που διεξήγαγε το PNNL. Εκτιμήσεις για ένα σύστημα ροής οξειδοαναγωγής 1 MW και 10 MW από την Baxter (2020ε) παρουσιάζονται στον πίνακα 3.8(1). Και οι δύο εκτιμήσεις αφορούν συστήματα διάρκειας 4 ωρών.

Πίνακας 3.8(1)-Εκτιμήσεις κόστους για συστήματα μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής 1 MW και 10

MW(πηγή : https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fnetl.doe.gov%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fnetl-file%2F22FERD_ES_Kumfer.pdf&psig=AOvVaw2CXaS_sPJq4IrVM9VsjQcx&ust=1666947598099000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0OjRxqFwoTCJCA0O2FgPsCFQAAAAAdAAAAABAH)

Estimate Year	1 MW/4 MWh System		10 MW/40 MWh System	
	2020	2030	2020	2030
DC system (with SB and container costs) (\$/kWh)	\$367	\$299	\$341	\$278
PCS (\$/kWh)	\$22	\$17	\$17	\$13
PCS markup (\$/kW)	\$2.2	\$1.7	\$2	\$1
ESS equipment total (\$/kWh)	\$391	\$318	\$360	\$292
Integrator margin (\$/kWh)	\$58	\$48	\$36	\$29
Complete ESS equipment total (\$/kWh)	\$449	\$365	\$396	\$321
EPC (\$/kWh)	\$101	\$82	\$79	\$64
AC Installed Cost (\$/kWh)	\$551	\$447	\$475	\$386

Οι εκτιμήσεις από προηγούμενες έρευνες του PNNL για τις RFB παρείχαν πρόσθετες πληροφορίες για το κόστος και προσαρμόστηκαν με βάση μια αντικειμενική συνάρτηση που μείωνε το συνολικό κόστος κεφαλαίου για συστήματα με διάφορες αναλογίες E/P (A. Crawford et al., 2015- V. Viswanathan et al., 2014). Υποτίθεται ότι οι στοίβες για μπαταρίες ροής λειτουργούσαν σε διάφορες πυκνότητες ισχύος ανάλογα με τον λόγο E/P. Αυτό σημαίνει ότι για υψηλό λόγο E/P, δεδομένου ότι ο ηλεκτρολύτης το κόστος κυριαρχεί, η πυκνότητα ισχύος θα προσαρμοζόταν χαμηλότερα για να βελτιωθεί η απόδοση και έτσι να μειωθεί το κόστος του ηλεκτρολύτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερα \$/kWh για το ενεργειακό συστατικό (ηλεκτρολύτης) και υψηλότερα \$/kW για τη συνιστώσα ισχύος (στοίβες). Για την παρούσα εργασία, τα \$/kW για τις στοίβες και τα \$/kWh για τον ηλεκτρολύτη και το δεξαμενές υπολογίστηκε ο μέσος όρος για τις διάρκειες που μελετήθηκαν (1, 4 και 10 ώρες). Θεωρείται επίσης ότι οι υπολογισμένοι αριθμοί αντιστοιχούν σε σύστημα 10 MW. Η προσέγγιση της βελτιστοποίησης προσφέρεται επίσης για μεγαλύτερο DOD με υψηλότερο λόγο E/P για εξοικονόμηση κόστους ηλεκτρολύτη. Η βελτιστοποιημένη DOD σε διάρκειες 1, 4 και 10 ωρών ήταν βρέθηκε να είναι 78%, 85% και 85% αντίστοιχα. Με άλλα λόγια, δεν παρατηρήθηκε καμία αλλαγή στο DOD μεταξύ 4 και 10 ωρες, ενώ η DOD 1 ώρας ήταν 78%. Με την υπόθεση ότι η DOD των 2 ωρών θα ήταν το ένα τρίτο της διαδρομής μεταξύ των DOD 1 και 4 ωρών, η DOD για ένα σύστημα 2 ωρών εκτιμήθηκε σε 80.3%. Ο μέσος όρος DOD για συστήματα 2, 4 και 10 ωρών βρέθηκε να είναι 83,4%. Η συνομιλία με έναν κατασκευαστή RFB έδειξε ότι η υπερδιαστασιολόγηση του ηλεκτρολύτη στη δεξαμενή μπορεί να επιτύχει αποτελεσματικό DOD 75% (Cipriano, 2020b). Το BMS ρυθμίζει το SOC έτσι ώστε, σε DOD 75%, το SOC καταγράφει 0% (και σε πλήρη φόρτιση, το SOC καταγράφει 100%). Το DOD για την παρούσα μελέτη ορίστηκε ως ο μέσος όρος των της εκτίμησης του PNNL που περιγράφηκε προηγουμένως (83,4%) και της τιμής 75% που παρέχεται από τη ροή οξειδοαναγωγής

ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ανδρεάδης Μάριος

κατασκευαστή (Cirriano, 2020b) για να προκύψει 79,2% DOD. Μετά από αυτές τις προσαρμογές, το μοναδιαίο κόστος ισχύος του DC SB εκτιμήθηκε σε 351,5 \$/kW, ενώ το κόστος που σχετίζεται με την ενέργεια για το SB ήταν 177,7 \$/kWh. Το SBOS για το σύστημα RFB υποτίθεται ότι είναι σύμφωνο με τα BESS ιόντων λιθίου και μολύβδου-οξέος στο 20% του SB κόστος. Ενώ το SBOS της μπαταρίας ροής αναμένεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό του μολύβδου-οξέος λόγω της χαμηλότερης ειδικής ενέργειας και της ενεργειακής πυκνότητας, ορισμένα από τα στοιχεία SBOS, όπως οι αντλίες, περιλαμβάνονται ήδη στο SB κόστος κεφαλαίου. Ο πίνακας 3.8(2) παρουσιάζει αποτελέσματα για διάφορες διάρκειες στα 10 MW από την προηγούμενη ανάλυση του PNNL (A.Crawford et al., 2015- V. Viswanathan et al., 2014) καθώς και το συνολικό κόστος του συστήματος DC για τα 10 MW, 4- ωρών που παρέχεται από τον Baxter (2020e) για σύγκριση.

Πίνακας 3.8(2)- Εκτιμήσεις κόστους για διάφορες διάρκειες για RFBs(πηγή :

<https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>)

Ε/Ρ	DCSB Cost (\$/kWh)	SBOS Cost (\$/kWh)	Total DC System Cost (\$/kWh) ^(a)	Total DC System Cost (\$/kWh) ^(b)
2	353	71	424	
4	266	53	319	341
6	236	47	283	
8	222	44	266	
10	213	43	255	

^(a) A. Crawford et al. (2015); V. Viswanathan et al. (2014)

^(b) Baxter (2020e)

Συγκρίνοντας το συνολικό κόστος του συστήματος DC από τους A. Crawford et al. (2015), V. Viswanathan et al. (2014) και Baxter (2020e), διαπιστώνεται ότι είναι παρόμοιο για τη διάρκεια των 4 ωρών. Λαμβάνοντας το μέσο όρο του συνολικού κόστους και στις δύο εκτιμήσεις δίνει 330\$/kWh, που είναι 1,035 φορές ο αριθμός του PNNL. Για να προκύψουν εκτιμήσεις για τις υπόλοιπες διάρκειες, οι αριθμοί PNNL για τα συστήματα 2, 6, 8 και 10 ωρών πολλαπλασιάστηκαν με αυτόν τον λόγο με αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.8(3)

Πίνακας 3.8(3)- Εκτιμήσεις κόστους για ένα RFB 10 MW σε διάφορες διάρκειες (πηγή :

<https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>)

E/P	DC SB Cost (\$/kWh)	SBOS Cost (\$/kWh)	Total DC System Cost (\$/kWh)
2	366	73	439
4	275	55	330
6	245	49	293
8	229	46	275
10	220	44	264

Για να προκύψουν εκτιμήσεις κόστους για διάφορες δυναμικότητες ισχύος, προστέθηκε προσαύξηση 5% για σύστημα 1 MW και μια έκπτωση 5% για ένα σύστημα 100 MW, συμπεριλαμβανομένων επίσης του κόστους PCS, C&C και του κόστους ενσωμάτωσης στο δίκτυο. Η ολοκλήρωση του συστήματος, το EPC και το έργο ανάπτυξης ως ποσοστό των προηγούμενων στοιχείων διατηρήθηκαν στο 15%, όπως και για το μολύβδου-οξέος, λόγω του υψηλότερου κόστους κεφαλαίου σε σύγκριση με το σύστημα ιόντων λιθίου και των χαμηλότερων ζητημάτων που σχετίζονται με την ασφάλεια. Ο πίνακας 3.8(4) παρέχει λεπτομερή ανάλυση του κόστους κατηγοριών για ένα BESS ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου 10 MW, 100 MWh, με αναλυτικό κατάλογο αναφοράς για κάθε κατηγορία. Σημειώστε ότι το SB έχει κόστος ισχύος και ενέργειας συνιστώσες. Το κόστος ισχύος σχετίζεται με την καμινάδα, τις αντλίες και τις σωληνώσεις, ενώ το κόστος ενέργειας είναι το κόστος του ηλεκτρολύτη και της δεξαμενής.

Πίνακας 3.8(4)- Κατανομή τιμών για διάφορες κατηγορίες για RFB 10 MW, 100 MWh Vanadium(
πηγή : <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>)

Cost Category	Nominal Size	2020 Price	Content	Additional Notes	Source(s)
SB	100 MWh	\$352/kW for power \$178/kWh for energy			Baxter (2020e); Cipriano (2020a); A. Crawford et al. (2015); V. Viswanathan et al. (2014)
BOS		\$44/kWh		Used same 20% of SM cost as for lead-acid	Raiford (2020a)
DC-DC converter	10 MW	\$60/kW	DC-DC converter cost		Wood Mackenzie (2020b)
PCS	10 MW	\$73/kW	PCS cost	Includes cost for additional equipment such as safety disconnects that are site-specific, cost aligns with numbers provided by PCS vendor for utility scale	Austin (2020); Baxter (2020a); Goldie-Scot (2019); Vartanian (2020); Wood Mackenzie (2020a)
C&C	10 MW	\$7.8/kW	C&C cost	PNNL approach for scaling across various power levels	Baxter (2020d)
System integration	N/A	7.5% markup on hardware + 7.5% profit on sum of above rows	System integration cost	Lowered from 10% markup and 10% profit for lithium-ion due to lower safety concerns	Baxter (2020b)
EPC	N/A	15% markup + profit on sum of above rows	EPC cost	Lowered from 15% markup and 5% profit for lithium-ion due to lower safety concerns	
Project Development	N/A	15% markup + profit on sum of above rows	Project development cost	Lowered from 5% markup and 15% profit for lithium-ion due to lower safety concerns	
Grid Integration	10 MW	\$24.9/kW	Grid integration cost	PNNL approach for scaling across various power levels	
O&M			O&M fixed costs		Aquino et al. (2017); DNV GL (2016)
Performance metrics			Calendar life		Aquino et al. (2017); EASE (2016); G. J. May et al. (2018)
Performance metrics			Cycle life		Aquino et al. (2017); Greenspon (2017); EASE (2016); G. J. May et al. (2018)
Performance metrics			RTE		Aquino et al. (2017); EASE (2016); G. J. May et al. (2018); Uhrig, Koenig, Suriyah, and Leibfried (2016)

Το εύρος τιμών για το 2020 ήταν 0,9 έως 1,1 φορές οι ονομαστικές τιμές για κάθε κατηγορία. Για το έτος 2030, ο ρυθμός μάθησης για το SB ορίστηκε στο 4,5%, με το χαμηλό και το υψηλό άκρο του εύρους τιμών να έχουν μάθηση ποσοστά μάθησης 9% και 2% αντίστοιχα. Τα ποσοστά μάθησης για τις υπόλοιπες κατηγορίες ορίστηκαν να είναι τα ίδια με εκείνα για το σύστημα ιόντων λιθίου και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.8(5).

Πίνακας 3.8(5)- Ποσοστά μάθησης που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του κόστους κεφαλαίου και των σταθερών δαπανών λειτουργίας και διαχείρισης για το 2030 (πηγή :

<https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/Final%20-%20ESGC%20Cost%20Performance%20Report%2012-11-2020.pdf>)

Component	Low Price	Low Price	Nominal Price	High Price
DC SB (\$/kWh)	14%	9%	4.50%	2%
DC SBOS (\$/kWh)	10%	10%	7%	4%
DC-DC converter (\$/kW)	7%	7%	3%	2%
PCS (\$/kW)	7%	7%	3%	2%
C&C (\$/kW)	10%	10%	7%	4%
System Integration (\$/kWh)	6%	6%	4%	2%
EPC (\$/kWh)	6%	6%	4%	2%
Project Development (\$/kWh)	6%	6%	4%	2%
Grid Integration (\$/kW)	6%	6%	4%	2%
O&M (\$/kW-year)	6%	6%	4%	2%

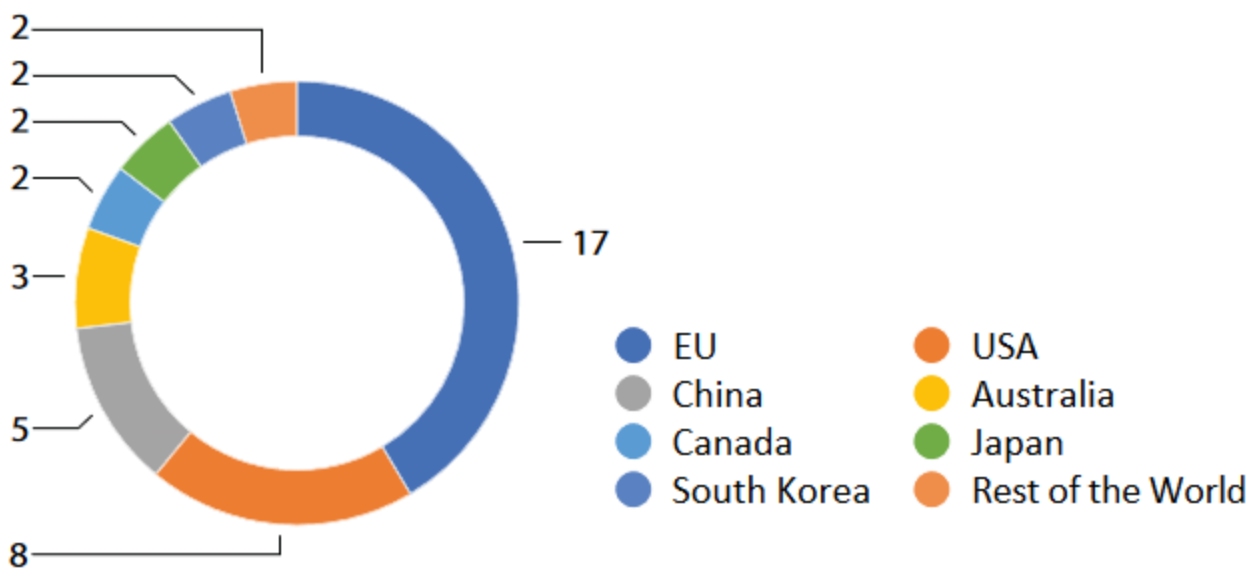
3.9 Μελλοντική εξέλιξη μπαταριών ροής

Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μειώνεται χρόνο με το χρόνο. Επίσης, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναμένεται να εισάγονται όλο και περισσότερο. Σε αυτά τα ηλεκτρικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η ανάγκη για μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί περαιτέρω για τη ρύθμιση των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων διακυμάνσεων της παραγωγής. Οι εφαρμογές είναι ποικίλες, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης σε εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, της εγκατάστασης στις τοποθεσίες των φορέων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της εγκατάστασης στις τοποθεσίες των γενικών πελατών (ανεξάρτητων ή κοινών). Έχουν επίσης διεξαχθεί νέες δοκιμαστικές δοκιμές για την επίτευξη ολοκληρωμένου ελέγχου αυτών των συσσωρευτών αποθήκευσης ενέργειας. Όσον αφορά τις επιδόσεις, η τεχνολογία των RFBs έχει ήδη φτάσει σε επίπεδο εμπορικής λειτουργίας σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι RFB μπορούν να προσφέρουν υψηλή ευελιξία σχεδιασμού κατ' αρχήν και αναμένεται να προσφέρουν ευέλικτες λύσεις για διάφορες ανάγκες στο μέλλον. Η E&A έχει προωθηθεί ενεργά από διάφορες πλευρές σε όλο τον κόσμο. Αναμένεται ότι αυτές οι προσπάθειες ανάπτυξης θα βελτιώσουν περαιτέρω τις επιδόσεις και θα μειώσουν το κόστος των RFBs και θα οδηγήσουν σε ευρεία χρήση των RFBs σε διάφορες εφαρμογές. Αρκετές εταιρείες εμπορεύονται τώρα την οξειδοαναγωγική μπαταρία βαναδίου στην Κίνα, την Ευρώπη και τις ΗΠΑ, ενώ η πρόσφατη αναζωογόνηση της οξειδοαναγωγικής μπαταρίας ροής σιδήρου-χρωμίου οφείλεται στην αστάθεια των τιμών των προϊόντων οξειδίου του βαναδίου το 2007. Αν και αυτό αναμένεται να αμβλυνθεί από τα νέα ορυχεία βαναδίου που θα ανοίξουν τα επόμενα χρόνια στην Αυστραλία, τον Καναδά, την Κίνα, τις ΗΠΑ και τη Μαδαγασκάρη, η μελλοντική ανακύκλωση των αποβλήτων προϊόντων βαναδίου από σκωρίες χάλυβα, χρησιμοποιημένους καταλύτες και ιπτάμενη τέφρα θα προσφέρει ευκαιρίες για περαιτέρω μείωση του κόστους που θα επιτρέψει στην VRB να εισέλθει σε άλλες μορφές

αποθήκευσης ενέργειας σε κλίμακα δικτύου. Παρόλο που η τρέχουσα τεχνολογία VRB είναι ήδη σε θέση να ανταποκριθεί στις επιδόσεις, τη διάρκεια ζωής και τη δομή κόστους για πολλές σταθερές εφαρμογές, η χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα των υφιστάμενων τεχνολογιών μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής περιορίζει τη δυνητική εφαρμογή τους σε ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία διαφορετικά θα μπορούσαν να επωφεληθούν από τις δυνατότητες γρήγορου ανεφοδιασμού αυτών των συστημάτων. Περαιτέρω έρευνα για νέους ηλεκτρολύτες μπαταριών ροής με χρήση οργανικών διαλυτών μπορεί να οδηγήσει σε καινοτομίες όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα, ωστόσο αυτό είναι πιθανό να συνδέεται με υψηλότερη ποινή κόστους. Συνεπώς, ο πιο ελπιδοφόρος τομέας για τη βελτίωση της ενεργειακής πυκνότητας θα είναι η περαιτέρω ανάπτυξη ηλεκτρολυτών μεικτών οξέων για τα συστήματα VRB και τα συστήματα κυψελών καυσίμου οξειδοαναγωγής υψηλής απόδοσης που χρησιμοποιούν έναν μόνο ηλεκτρολύτη (συνήθως στο αρνητικό ημικύτταρο).

3.10 Υπάρχοντα έργα μπαταριών ροής

Επί του παρόντος, οι μπαταρίες ροής επιδεικνύονται σε διάφορα έργα και ανακοινώνονται τα πρώτα εμπορικά έργα. Δίνεται σύντομη περιγραφή για κάθε τύπο μπαταρίας ροής. Καθώς η μπαταρία ροής είναι ιδιαίτερα ελκυστική για χρήση σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, η παρούσα περιγραφή επικεντρώνεται σε αυτές τις εφαρμογές. Για την υποστήριξη σε πραγματικό χρόνο και σε σύντομο χρονικό διάστημα και βελτιστοποίηση, οι εφαρμογές έχουν περιοριστεί σε αντλητικά υδροηλεκτρικά συστήματα και σε ορισμένες συμβατικές μπαταρίες μολύβδου-οξέος ή νικελίου καδμίου, κυρίως λόγω έλλειψης οικονομικά αποδοτικών επιλογών.



Εικόνα 3.10(1)- Τοποθεσία των εταιρειών μπαταριών ροής (πηγή : https://www.sonar-redox.eu/content/dam/scai/sonar-redox/documents/FLORES-Policy-Brief_October-2021.pdf)

Μπαταρία ροής πολυσουλφιδίου οξειδοαναγωγής βρωμίου (PSB)

Η τεχνολογία PSB επιδεικνύεται στο έργο Regenysis για την εξισορρόπηση του φορτίου. Ωστόσο, το έργο αυτό σταμάτησε, οπότε δεν αποδείχθηκε ποτέ η τεχνολογία σε μεγάλη κλίμακα. Μια δεύτερη μονάδα επίδειξης κατασκευάστηκε από την TVA στο Μισισσιπή και επίσης ακυρώθηκε. Πρόκειται για ανακατασκευή της πρώτης μονάδας, για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια των αναγκών αιχμής, τη βελτίωση της ισχύος ποιότητα και την αξιοπιστία και να παρέχει ταχεία ανταπόκριση στη μεταβαλλόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Άλλα πιθανά συστήματα για την αποθήκευση ενέργειας σε τέτοιες ειδικές καταστάσεις, όπως τα PHES και CAES, απαιτούσαν πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις που δεν ήταν διαθέσιμες κοντά στο σημείο ανάγκης και είχαν αρνητικές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Επίσης NaS, V/V και Zn/Br απορρίφθηκαν με βάση το κόστος κύκλου ζωής. Προς το παρόν δεν υπάρχουν έργα επίδειξης μεγάλης κλίμακας.



Εικόνα 3.10(2)- Εγκατάσταση μπαταρίας ροής πολυσουλφιδίου Regenysis (πηγή :

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FRegenysis-polysulfide-flow-battery-installation-Photo-from-wwwregenyscom-and-O_fig2_262417200&psig=AOvVaw3UOTY4BBIEM7SoMbGBv9-a&ust=1667824748145000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRsqFwoTCPDni7_JmfsCFQAAAAAAdAAAAABAE)

Μπαταρία ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου (VRB)

Η τεχνολογία V/V χρησιμοποιείται ήδη σε διάφορες εφαρμογές μικρής κλίμακας. Ένα παράδειγμα μιας μεγαλύτερης εφαρμογής είναι ένα σύστημα 2 MWh στο Castle Valley της Γιούτα για την παροχή ισχύος αιχμής. Πρόκειται για το πρώτο εμπορικό έργο μεγάλης κλίμακας. VRB υπέγραψε πρόσφατα συμφωνία για την προμήθεια ενός συστήματος 1,5 MW/12 MWh για ένα αιολικό πάρκο στην Ιρλανδία. Λόγω της βαθιάς ανακύκλωσης στην αιολική εφαρμογές, οι συμβατικές μπαταρίες δεν είναι κατάλληλες.



Εικόνα 3.10(3)- επιχείρηση μπαταριών ροής οξειδοαναγωγής βαναδίου της TNG (πηγή :

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.pv-magazine.com%2F2020%2F11%2F05%2Ftng-sets-up-vanadium-redox-flow-battery-business%2F&psig=AOvYaw2u7-UxilyZxHF1RirA5r0A&ust=1667824866041000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCPDitffJmfsCFQAAAAAdAAAAABAP>)

Μπαταρίες ροής ψευδαργύρου-βρωμίου(ZnBr)

Με το ZnBr οι εμπειρίες της ZBB είναι όλες μικρής κλίμακας (<0,5 MWh). Λόγω της μικρής κλίμακας αυτών των έργων, η ZBB έχει ήδη αρκετά έργα σε εξέλιξη. Η ZBB προσφέρει αυτά τα συστήματα ως προϊόν "με το κλειδί στο χέρι" και ως εκ τούτου επικεντρώνεται σε εφαρμογές μικρής κλίμακας.



Εικόνα 3.10(4)- Η Redflow προμηθεύει 2MWh μπαταριών ροής ψευδαργύρου-βρωμίου σε μονάδα βιοενέργειας στην Καλιφόρνια (πηγή : <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.energy->

[storage.news%2Ffredflow-supplying-2mwh-of-zinc-bromine-flow-batteries-to-california-bioenergy-plant%2F&psig=AOvVaw1IixuaYrkrnQHfedW8OSYW&ust=1667825080747000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCICL3t3KmfscFQAAAAAdAAAAABAQ](https://www.storage.news%2Ffredflow-supplying-2mwh-of-zinc-bromine-flow-batteries-to-california-bioenergy-plant%2F&psig=AOvVaw1IixuaYrkrnQHfedW8OSYW&ust=1667825080747000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCICL3t3KmfscFQAAAAAdAAAAABAQ)

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (SMES)

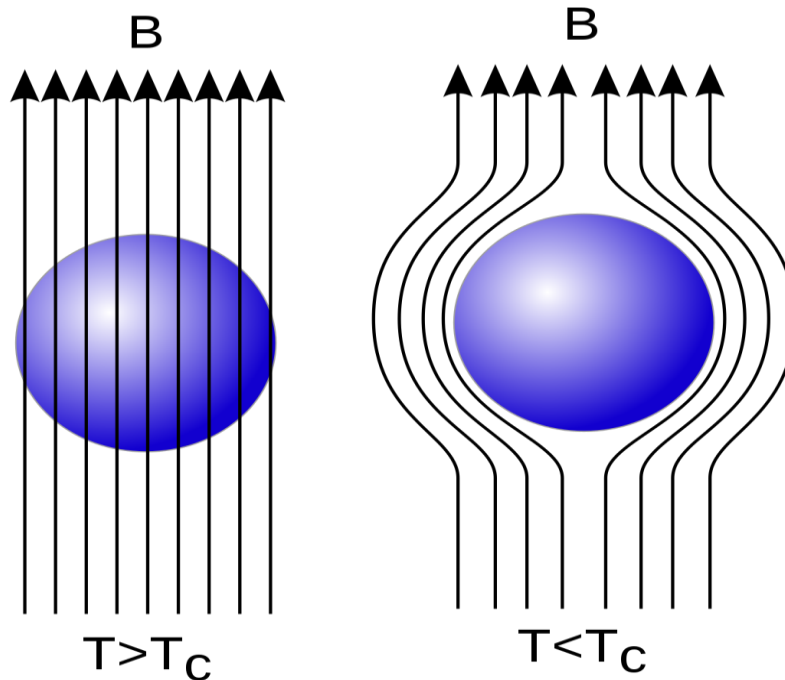
Ο τύπος διάταξης που κατηγοριοποιείται στις μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας μέσω μαγνητικού πεδίου είναι το υπεραγώγιο μαγνητικό σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης ή αλλιώς SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). Το SMES είναι ένα από τα πολύ λίγα συστήματα άμεσης αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενεργειακή του πυκνότητα περιορίζεται λόγω μηχανικών αιτιών σε μία χαμηλή τιμή της τάξης των 10 kJ/kg, αλλά η πυκνότητα ισχύος του μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή. Αυτό το γεγονός καθιστά την SMES ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα διάταξη για εφαρμογές υψηλής ισχύος και μικρού χρόνου (πηγές παλμικής ισχύος). Τα SMES έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον της ηλεκτρικής βιομηχανίας κυρίως λόγω της υψηλής της απόκρισης (της τάξης των ms), καθώς και της απόδοσης τους η οποία φτάνει ποσοστό έως και 97%. Η καρδιά ενός SMES είναι ο υπεραγώγιμος μαγνήτης του, ο οποίος πρέπει να πληρεί απαιτήσεις όπως το χαμηλό αδέσποτο πεδίο και ο μηχανικός σχεδιασμός κατάλληλος για να συγκρατήσει τις μεγάλες δυνάμεις Lorentz. Η λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες μπορεί να αποφέρει πλεονεκτήματα όπως χαμηλότερο κόστος επένδυσης και λειτουργίας για τον κρυοψύκτη και πολύ βελτιωμένη σταθερότητα έναντι των διαταραχών του μαγνήτη. Η αντοχή τους είναι ανεξάρτητη του αριθμού φορτίσεων-εκφορτίσεων.

4.1 Εισαγωγή - Ορισμοί

Προτού ξεκινήσουμε να αναλύουμε αυτή τη μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (με υπεραγώγιμα πηνία), θα ήταν χρήσιμο να εξηγηθούν κάποιες βασικές έννοιες και ορισμοί με στόχο την καλύτερη κατανόηση της συγκεκριμένης μεθόδου.

Υπεραγωγιμότητα: Ως υπεραγωγιμότητα ορίζεται ένα φαινόμενο το οποίο υπάρχει σε συγκεκριμένα υλικά, σύμφωνα με το οποίο τα υλικά αυτά επηρεασμένα από χαμηλής τιμής θερμοκρασιών μηδενίζουν την αντίσταση με αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου Meissner.

Ως κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας T_c θεωρείται η θερμοκρασία η οποία βρίσκεται κατά το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας. Στη διάρκεια του φαινομένου Meissner, δεν διαπερνάται από το μαγνητικό πεδίο, γεγονός που συμβαίνει πριν την κρίσιμη θερμοκρασία. Δηλαδή το υλικό έχει συμπεριφορά τελείως διαμαγνητική.



Εικόνα 4.1-Συμπεριφορά υλικού πριν και μετά την κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας (πηγή : <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b5/EfektMeisnera.svg/1200px-EfektMeisnera.svg.png>)

Γενικότερα, ο κανόνας που ισχύει είναι ότι ωμική αντίσταση σε κάποιο μεταλλικό αγωγό μειώνεται όσο μειώνεται και η θερμοκρασία. Σε αγωγούς όπως είναι ο χαλκός ή και το ασήμι, τίθεται ένα κατώτατο όριο αντίστασης μέσω των προσμίξεων και των λοιπών ατελειών. Το φαινόμενο το οποίο αποκαλείται ως φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας μελετάται μέσω της κβαντικής μηχανικής και δεν είναι δυνατόν να θεωρηθεί σαν μία τέλεια αγωγιμότητα η οποία ορίζεται μέσω της κλασικής φυσικής. Επιπλέον, η υπεραγωγιμότητα είναι δυνατό να εντοπιστεί σε υλικά απλά όπως είναι ο κασσίτερος ή το αλουμίνιο αλλά και σε κράματα η ορισμένους ημιαγωγούς βαθιάς νόθευσης. Τέλος δεν εμφανίζεται σε ευγενή μέταλλα όπως είναι ο χρυσός κλπ.

4.2 Ιστορική αναδρομή των υπεραγωγίων μαγνητικών συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης (SMES)

Η ανάπτυξη των SMES μπορεί να ανιχνευθεί σε μια πρώιμη δημοσίευση Ferrier που εξέτασε ένα μεγάλο πηνίο αποθήκευσης ημερήσιας ενέργειας για τη Γαλλία. Το πηνίο έπρεπε να έχει το σχήμα

ενός δακτύλου, ο οποίος περιέχει ουσιαστικά όλο το πεδίο μέσα στο δακτυλιοειδές κέλυφος που σχηματίζεται από τον υπεραγωγό. Με την κατασκευή μόνο μίας μονάδας το κόστος κεφαλαίου και ανάπτυξης φαινόταν υψηλό, επομένως η ιδέα δεν επιδιώχθηκε. Οι σπουδές για τα SMES στις ΗΠΑ ξεκίνησαν στο Πανεπιστήμιο του Ουισκόνσιν το 1971 υπό τη διεύθυνση των Boom και Peterson. Η θεμελιώδης αλληλεπίδραση μεταξύ μιας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας και ενός ηλεκτρικού συστήματος κοινής ωφέλειας μέσω μιας πολυφασικής γέφυρας μελετήθηκε λεπτομερώς, συμπεριλαμβανομένης μιας αξιολόγησης των σταθεροποιητικών επιπτώσεων της ταχείας απόκρισης του μετατροπέα στις διακυμάνσεις της ηλεκτρικής χρησιμότητας. Το 1972 ζητήθηκε από το επιστημονικό εργαστήριο του Λος Άλαμος από την επιτροπή Ατομικής Ενέργειας των ΗΠΑ να εξετάσει τις SMES και, εάν φαινόταν οικονομικό, να περιγράψει ένα πρόγραμμα ανάπτυξης στο νεοσύστατο τμήμα Εφαρμοσμένης Τεχνολογίας. Δύο βασικοί τομείς αντιμετωπίστηκαν αμέσως. Το πρώτο ήταν να καθοριστεί η σχετική αξία των SMES σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες. Το δεύτερο ήταν να καθοριστούν οι συνθήκες χρησιμότητας στις οποίες θα έπρεπε να λειτουργεί μια τέτοια τεχνολογία. Ακόμη και σε εκείνη την πρώιμη ημερομηνία, η αξιολόγηση αυτής της τεχνολογίας ήταν αρκετά απλή και έδειξε ότι το επίπεδο ανάπτυξης ορισμένων από τα εξαρτήματα ήταν επαρκές για μονάδες μεγάλης κλίμακας. Οι συζητήσεις με εκπροσώπους των ηλεκτρικών επιχειρήσεων κοινής ωφελείας έδειξαν έντονο ενδιαφέρον για τη νέα τεχνολογία, με την πάντα παρούσα επιφύλαξη ότι εάν αναπτυχθεί, οι μονάδες που θα προκύψουν πρέπει να είναι οικονομικά αποδοτικές (φθηνές), αποδοτικές, αξιόπιστες, εύκολα τοποθετημένες και περιβαλλοντικά αποδεκτές. Μια πρώιμη ανάλυση του κόστους που βασίζεται σε τυπικές τεχνικές για την κατασκευή υπεραγωγίων μαγνητών έδειξε ότι, από μόνη της, η δομή που απαιτείται για τον περιορισμό των δυνάμεων Lorentz θα ήταν αρκετά δαπανηρή για να εξαλείψει τις SMES από το ενδεχόμενο εφαρμογής της χρησιμότητας. Αυτό είναι αποτέλεσμα των θεμελιωδών σχέσεων μεταξύ του στρες και της ενέργειας, που μερικές φορές αναφέρεται ως Ιογενές Θεώρημα. Περίπου 16 kg δομής στήριξης από ανοξείδωτο χάλυβα θα χρειαζόταν για κάθε MJ αποθηκευμένης ενέργειας. Αυτή η ποσότητα είναι τόσο μεγάλη που το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας θα ήταν 50 \$/MJ ενώ το κόστος του αντλούμενου υδροηλεκτρικού σταθμού στο Ludington ήταν μόνο 6,9 \$/MJ. Ο Hassenzahl, αναγνώρισε την οικονομική απαίτηση μιας δομής wann όπως ο βράχος "in situ" στη θέση της ψυχρής δομής, όπως αναφέρεται στο άρθρο των Power & Bezler, οι οποίοι είχαν μελετήσει το κόστος των στηρίξεων για υπεραγωγίους μαγνήτες για σύντηξη και διαπίστωσαν ότι η wann υποστήριξη θα είχε μείωση του κόστους των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με βάση τη σύντηξη. Άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας εξετάζονταν εκείνη την εποχή και υπήρχαν πολλές ομοιότητες μεταξύ των εφαρμογών των μπαταριών και των SMES σε ένα σύστημα κοινής ωφέλειας. Και οι δύο απαιτούν μετατροπείς ac-dc και έτσι μπορούν να ανταποκριθούν γρήγορα στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ισχύος. Το κόστος του μετατροπέα

ήταν καλά καθορισμένο από εμπορικές εφαρμογές και εφαρμογές χρησιμότητας και ήταν γνωστό ότι ήταν σχετικά φθηνό με βάση τις εφαρμογές σε γραμμές μεταφοράς συνεχούς ρεύματος. Μέσω σύγκρισης με εκτιμήσεις κόστους για άλλες νέες τεχνολογίες και συζητήσεων με τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, διαπιστώθηκε ότι μια σημαντική πίστωση κόστους θα μπορούσε να εκχωρηθεί στα συστήματα SMES εάν ο μετατροπέας ήταν υπερμεγέθης, επειδή η σχετικά φθηνή, αυξημένη ικανότητα ισχύος που συνοδεύτηκε από πρόσθετη χωρητικότητα μετατροπέα ήταν αρκετά πολύτιμη για την υποδοχή γρήγορων εναλλαγών ισχύος. Έτσι, ο μετατροπέας φαίνεται ότι συνεισφέρει δύο εγγενώς ελκυστικές λειτουργίες σε μια ημερήσια μονάδα αποθήκευσης: πρώτον ο πρώτος χρόνος απόκρισης του μετατροπέα επιτρέπει στη μονάδα SMES να βελτιώσει τη σταθερότητα του συστήματος και δεύτερον το χαμηλό κόστος του μετατροπέα επιτρέπει στη μονάδα SMES να παρέχει το σύστημα με φθηνό απόθεμα περιστροφής, την επιπλέον χωρητικότητα ισχύος που πρέπει να είναι διαθέσιμη σε οποιοδήποτε λειτουργικό σύστημα ισχύος. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το κύριο στοιχείο κόστους σε ένα πολύ μεγάλο πηνίο αγωγιμότητας με όλα τα συστατικά και κρυογονικές θερμοκρασίες θα είναι η ενισχυτική δομή. Υπάρχουν διαμορφώσεις μαγνητικού πεδίου (που χρησιμοποιούνται κυρίως στη φυσική του πλάσματος) στις οποίες τα πεδία και τα ρεύματα μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να είναι απαλλαγμένα από δύναμη. Ο Mawardi και άλλοι έχουν προτείνει ένα σύστημα SMES με αντιστάθμιση δύναμης αποτελούμενο από σπειροειδή και πολοειδή πηνία στα οποία οι δυνάμεις Lorentz ακυρώνουν για το συνδυασμένο σύστημα. Οι συνολικές δομικές απαιτήσεις θα μειωθούν, παρόλο που οι δυνάμεις σε κάθε τύπο πηνίου εμφανίζονται όπως αναμενόταν. Αρκετές μελέτες αυτής της έννοιας έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μια αυστηρή σχέση μεταξύ της αποθηκευμένης ενέργειας και της δομής στήριξης.



Εικόνα 4.2- Φωτογραφίες του κρυοστάτη για το πρωτότυπο SMES 10 MVA/20 MJ (πηγή :

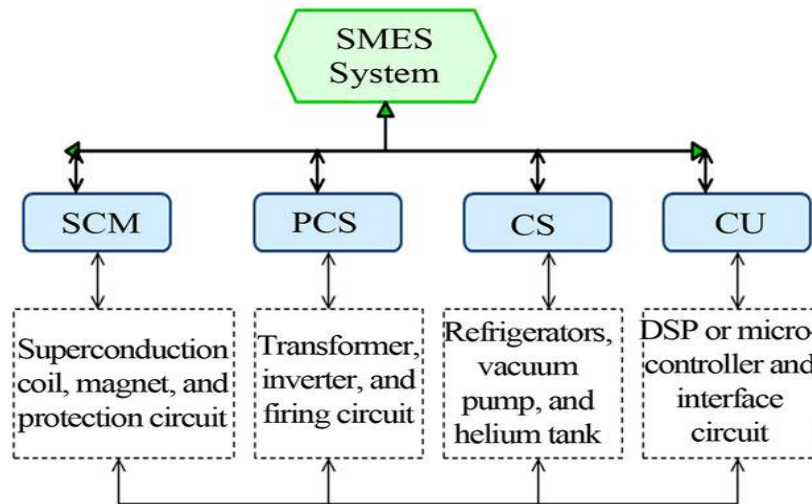
https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fsnf.ieceesc.org%2Fsites%2Fieceesc.org%2Ffiles%2FEUCAS2009-ST162.pdf&psig=AOvVaw1E-8vmLkjk4FrKSMxoeJ4&ust=1667734927922000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCIjk0_H6lvsCFQAAAAAdAAAAABAP

4.3 Γενική περιγραφή του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με υπεραγωγία πηνία

Μια υπεραγωγίμη αποθήκη μαγνητικής ενέργειας είναι μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια σε μαγνητικό πεδίο χωρίς μετατροπή σε χημικές ή μηχανικές μορφές. Στα συστήματα SMES, το πηνίο υπεραγωγίμου σύρματος επιτρέπει σε ένα άμεσο ηλεκτρικό ρεύμα να ρέει μέσα από αυτό χωρίς σχεδόν καμία απώλεια. Αυτό το ρεύμα δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο που αποθηκεύει την ενεργειακή εκφόρτιση, οι διακόπτες χτυπούν το ρεύμα κυκλοφορίας και το αφήνουν για να εξυπηρετήσει ένα φορτίο. Για να παραμείνει υπεραγωγίμο, το λάδι SMES πρέπει να λειτουργεί σε κρυογονικές θερμοκρασίες. Ως εκ τούτου, οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις απαιτούν κρυογονικά ψυγεία και σχετικά υποσυστήματα εκτός από τις συσκευές κλιματισμού στερεάς κατάστασης, τις οθόνες, τα χειριστήρια, τα κλιματιστικά, τον βοηθητικό εξοπλισμό και τον εξοπλισμό διεπαφής χρήστη, τις συσκευές ασφαλείας και τα χαρακτηριστικά μεταφοράς.

Το SMES είναι ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που αποθηκεύει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος περνώντας ρεύμα μέσω του υπεραγωγού και αποθηκεύει την ενέργεια με τη μορφή μαγνητικού πεδίου συνεχούς ρεύματος. Ο αγωγός για τη μεταφορά του ρεύματος λειτουργεί σε κρυογονικές θερμοκρασίες όπου γίνεται υπεραγωγός και επομένως δεν έχει

ουσιαστικά απώλειες αντίστασης καθώς παράγει το μαγνητικό πεδίο. Κατά συνέπεια, η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε μόνιμο τρόπο, μέχρι να χρειαστεί. Γενικά, ένα σύστημα SMES αποτελείται από τέσσερα μέρη, τα οποία είναι το υπεραγώγιμο πηνίο με τον μαγνήτη (SCM), το σύστημα κλιματισμού ισχύος (PCS), το κρυογονικό σύστημα (CS) και η μονάδα ελέγχου (CU), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3-Μπλοκ διάγραμμα ενός συστήματος SMES (πηγή : <https://www.scirp.org/html/15-6401226/220a4e63-a458-4747-b0ec-8cb82b63532c.jpg>)

Ένα SMES χαμηλής θερμοκρασίας απαιτεί υγρό υδρογόνο για τη λειτουργία του, γεγονός που καθιστά δαπανηρή τη λειτουργία του, ιδιαίτερα με CS. Με τη διαθεσιμότητα ενός υπεραγώγιμου πηνίου υψηλής θερμοκρασίας, απαιτείται μόνο υγρό άζωτο, το οποίο είναι άμεσα διαθέσιμο και πολύ φθηνότερο από το υγρό υδρογόνο. Με τις υψηλότερες θερμοκρασίες έρχεται όχι μόνο μειωμένο κόστος ψύξης αλλά και ενισχυμένη αξιοπιστία. Η πρόοδος τόσο στις υπεραγώγιμες τεχνολογίες όσο και στα ηλεκτρονικά ισχύος οδήγησε στα συστήματα SMES να έχουν εξαιρετικές επιδόσεις ιδιαίτερα για χρήση σε συστήματα ισχύος, όπως ταχεία απόκριση (χιλιοστά του δευτερολέπτου), υψηλή ισχύς (πολλαπλών MW), υψηλή απόδοση και έλεγχος τεσσάρων τεταρτημορίων. Κατά συνέπεια, τα συστήματα SMES θα είναι σε θέση να αποθηκεύουν ενέργεια πιο αποτελεσματικά από οποιαδήποτε συμβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι χημικές μπαταρίες, οι σφόνδυλοι ή η αποθήκευση με υδροάντληση. Οι SMES αναμένεται να γίνουν η τεχνολογία επόμενης γενιάς για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα SMES μπορούν να προσφέρουν ευέλικτη, αξιόπιστη και γρήγορη αντιστάθμιση ενεργού και αέργου ισχύος. Επιπλέον, το ολοκληρωμένο σύστημα φαίνεται να είναι εφικτό για ορισμένες εφαρμογές κοινής ωφέλειας με κόστος ανταγωνιστικό με άλλες τεχνολογίες.

ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SMES

Πριν γίνει η εγκατάσταση ενός συστήματος SMES πρέπει να ληφθούν υπ' όψη και να μελετηθούν τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος αυτού .

α) Χωρητικότητα

Η χωρητικότητα ισχύος για ένα σύστημα SMES υπαγορεύεται από την εφαρμογή, π.χ. ποιότητα ισχύος, σταθερότητα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ή εξισορρόπηση φορτίου. Σε γενικές γραμμές, η μέγιστη χωρητικότητα ισχύος είναι η μικρότερη από δύο ποσότητες: είτε η ονομαστική ισχύς του PCS είτε το γινόμενο του ρεύματος αιχμής του πηνίου και της μέγιστης τάσης αντοχής του πηνίου. Η ισχύς των υφιστάμενων μεμονωμένων εγκαταστάσεων micro-SMES κυμαίνεται από 1 MW έως περίπου 3 MW.

β) Η ονομαστική ισχύς της αποθήκευσης ενέργειας

Η αποθηκευμένη ενέργεια στην εγκατάσταση SMES εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Είναι το γινόμενο της ισχύος και της διάρκειας του χρόνου που η εγκατάσταση πρόκειται να παρέχει αυτή την ισχύ.

γ) Φυσικές διαστάσεις

Το φυσικό μέγεθος ενός συστήματος SMES είναι τα συνδυασμένα μεγέθη του πηνίου, του ψυγείου και του PCS. Καθένα από αυτά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Το πηνίο τοποθετημένο σε έναν κρυστάτη είναι συχνά ένα από τα μικρότερα στοιχεία. Ένα σύστημα micro-SMES 3 MJ (πηνίο, PCS, ψυγείο και όλος ο βοηθητικός εξοπλισμός) περιέχεται πλήρως σε ένα ρυμουλκούμενο 40 ποδών.

δ) Αποδοτικότητα του συστήματος

Η συνολική απόδοση μιας εγκατάστασης SMES εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Κατ' αρχήν, μπορεί να φθάσει το 95 % σε πολύ μεγάλα συστήματα. Για μικρά συστήματα ποιότητας ισχύος, από την άλλη πλευρά, η συνολική απόδοση του συστήματος είναι μικρότερη. Ευτυχώς, σε αυτές τις εφαρμογές, η απόδοση δεν αποτελεί συνήθως σημαντικό οικονομικό παράγοντα. Το πηνίο SMES αποθηκεύει ενέργεια χωρίς καμία απώλεια, ενώ το ρεύμα είναι σταθερό. Υπάρχουν, ωστόσο, κάποιες απώλειες που σχετίζονται με την αλλαγή του ρεύματος κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση και την επακόλουθη αλλαγή του μαγνητικού πεδίου. Σε γενικές γραμμές, αυτές οι απώλειες, οι οποίες αναφέρονται ως απώλειες δινορευμάτων και υστέρησης, είναι επίσης μικρές.

Τεχνικά στοιχεία SMES

Ειδική ενέργεια	1-10 W-h/kg
Πυκνότητα ενέργειας	40 kJ/ L
Ειδική ισχύς	~10.000-100.000 kW/kg
Απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης	95%
Ρυθμός αυτοεκφόρτισης	0%
Διάρκεια κύκλου	Απεριόριστοι κύκλοι
Ονομαστική χωρητικότητα ισχύος	0,1-10
Χρόνος αμτίδρασης	χιλιοστά του δευτερολέπτου-8 δευτερόλεπτα
Απόδοση κύκλου	90-97%
Ενεργειακό κόστος	1000-10000\$/kWh
Κόστος ισχύος	200-350 \$/kW
Διάρκεια ζωής	20-30 έτη

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΟΦΕΛΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ SMES

Υπάρχουν διάφορα πλεονεκτήματα της υιοθέτησης της υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας έναντι άλλων τύπων αποθήκευσης ενέργειας. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της SMES είναι η ελάχιστη χρονική καθυστέρηση μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης. Η ισχύς είναι πρακτικά άμεσα διαθέσιμη και μπορεί να παρασχεθεί πολύ υψηλή ισχύς για σύντομο χρονικό διάστημα. Η ενεργειακή μετατροπή της αποθηκευμένης μηχανικής ενέργειας πίσω σε ηλεκτρική ενέργεια σε άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως η αντλητική υδροηλεκτρική ενέργεια ή ο πεπιεσμένος αέρας, απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα.

Το SMES είναι επομένως μια βιώσιμη εναλλακτική λύση εάν η ζήτηση είναι άμεση. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι τα ηλεκτρικά ρεύματα αντιμετωπίζουν σχεδόν μικρή αντίσταση, με αποτέλεσμα λιγότερες απώλειες ισχύος σε σχέση με άλλα συστήματα αποθήκευσης. Επιπλέον, τα κύρια εξαρτήματα ενός SMES είναι σταθερά, με αποτέλεσμα μεγάλη αξιοπιστία.

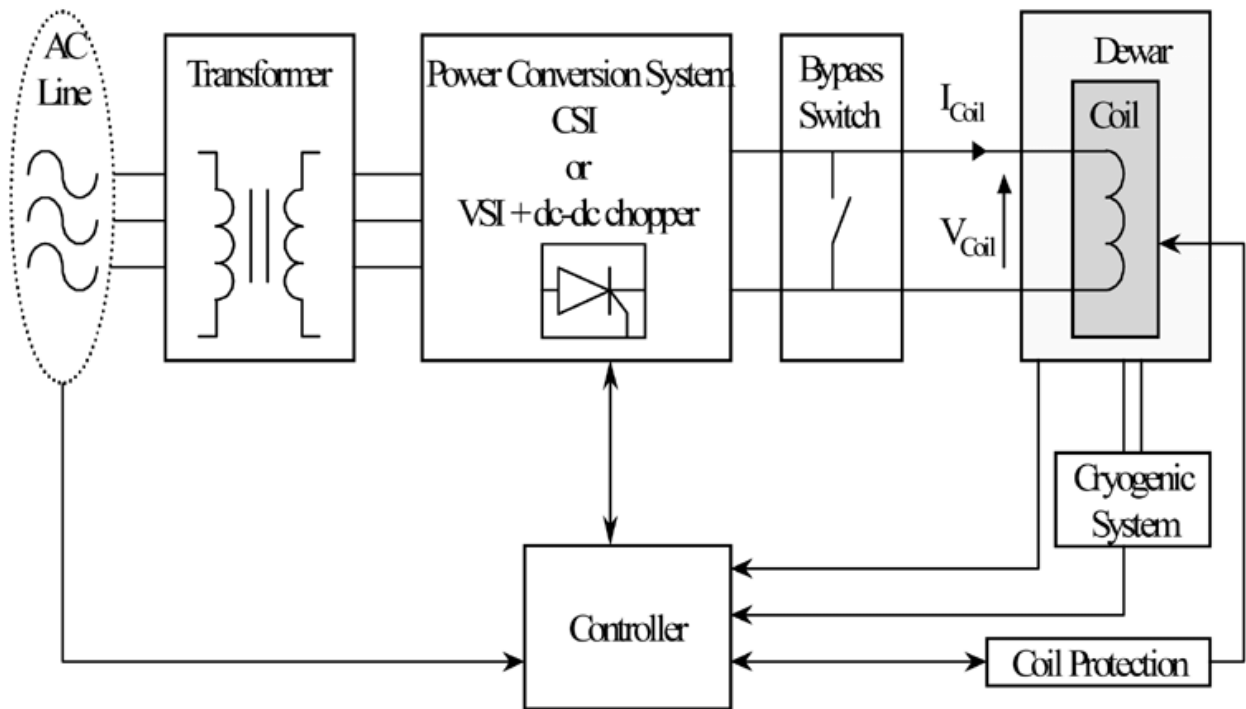
Τα πλεονεκτήματα μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Βελτιώνει την ποιότητα ισχύος για σημαντικά φορτία και προσφέρει ενέργεια μεταφοράς κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος και πτώσης τάσης.

- Βελτιώνεται η εξισορρόπηση του φορτίου μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (αιολική, ηλιακή) και του δικτύου μεταφοράς και διανομής.
- Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, η υπεραγωγιμότητα είναι καλύτερη για το περιβάλλον, επειδή δεν απαιτεί χημική αντίδραση και δεν παράγει ρύπους.
- Το SMES έχει υψηλό δυναμικό εύρος, πρακτικά απεριόριστες δυνατότητες κύκλων και ποσοστό ανάκτησης ενέργειας κοντά στο 100%, γεγονός που βελτιώνει τη χωρητικότητα και την απόδοση των γραμμών μεταφοράς.
- Τα συστήματα μακροχρόνιας αποθήκευσης SMES σε μια συμπαγή συσκευή είναι δυνατά χάρη στην εξαιρετικά υψηλή λειτουργία πεδίου, η οποία εξοικονομεί χρήματα στο κόστος υλικών και συστήματος.

4.3.1 Δομή και λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα, ένα σύστημα SMES που συνδέεται με ένα σύστημα ισχύος αποτελείται από πολλά υποσυστήματα. Τα στοιχεία ενός συστήματος SMES φαίνονται σχηματικά παρακάτω. Η καρδιά του συστήματος είναι το υπεραγώγιμο πηνίο. Οι διαστάσεις του πηνίου καθορίζονται από την επιθυμητή χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας και τον επιλεγμένο σχεδιασμό του πηνίου. Μια μονάδα 5000 MWhr θεωρείται εδώ ως σημείο αναφοράς. Ένα σύνολο πιθανών χαρακτηριστικών παρατίθεται στον πίνακα 4.3.1. Η ακτίνα του πηνίου μπορεί να κυμαίνεται από 150 m έως 500 m, ανάλογα με το πεδίο κορυφής και την αναλογία ύψους προς διάμετρο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εάν το σύστημα πρόκειται να είναι οικονομικό, οι μαγνητικές δυνάμεις που τείνουν να διαστέλλουν το πηνίο πρέπει να μεταδοθούν σε ένα δομικό υλικό όπως το "in situ" βράχο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός δομικού υλικού όπως το ενισχυμένο με υαλοβάμβακα εποξειδικό που έχει υψηλή αντοχή και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα.



Εικόνα 4.3.1-Σχηματική παράσταση μιας μονάδας SMES που δείχνει τα διάφορα συστατικά και τις αλληλεπιδράσεις τους (πηγή :

<https://www.researchgate.net/publication/283842994/figure/fig1/AS:472849589772302@1489747536012/Components-of-a-typical-SMES-system.png>)

Το υπεραγωγίμο πηνίο περιέχεται σε έναν κρυοστάτη ή δοχείο Ντιούαρ (dewar) που αποτελείται από ένα δοχείο κενού σε στενή επαφή με το βράχο και ένα δοχείο ηλίου που περικλείει το υπεραγωγίμο πηνίο και περιέχει το υγρό ήλιο που ψύχει το πηνίο. Είναι δυνατό να θεωρηθεί ένας αγωγός SMES που περιέχει ήλιο. Το πλεονέκτημα είναι η εξάλειψη του δοχείου ηλίου και η μείωση της ποσότητας του ηλίου. Τα μειονεκτήματα είναι η ανάγκη για πολλά σημεία πρόσβασης ηλίου, το ζήτημα της σταθερότητας και πιθανώς οι παρατεταμένοι χρόνοι ψύξης. Η θερμότητα που παράγεται μέσα στο πηνίο ή μεταφέρεται στο ήλιο, είτε κατά μήκος των στηρίξεων είτε των καλωδίων τροφοδοσίας, αφαιρείται από ένα ψυγείο. Το ρεύμα στο υπεραγωγίμο πηνίο περνά από τη θερμοκρασία δωματίου στο πηνίο κατά μήκος ενός σετ ειδικών καλωδίων χαμηλής απώλειας ισχύος. Στο άκρο της θερμοκρασίας δωματίου τα καλώδια συνδέονται με διαύλους που πηγαίνουν στον μετατροπέα. Η θερμότητα που μεταφέρεται από τη θερμοκρασία δωματίου στο πηνίο απορροφάται σε ένα λουτρό ηλίου στους 4,4 K. Η ζήτηση ισχύος, ο χρονισμός των τριών φάσεων στο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος και το ρεύμα στον αγωγό (ή ισοδύναμα η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο) χρησιμοποιούνται από τον ελεγκτή για τον υπολογισμό της γωνίας πυροδότησης για το κύκλωμα πυροδότησης SCR. Αυτό με τη σειρά του ελέγχει την κατεύθυνση και το μέγεθος της ροής ισχύος μέσω του μετατροπέα. Το ρεύμα στο υπεραγωγίμο πηνίο θα είναι της τάξης των 100 kA. Τα συστήματα ισχύος λειτουργούν κανονικά σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα ρεύματος, επομένως χρειάζεται ένας μεταγραφέας για τη μετατροπή της υψηλής τάσης και του

χαμηλού ρεύματος του συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος στη χαμηλή τάση και το υψηλό ρεύμα που απαιτούνται από το πηνίο. Τα μεμονωμένα στοιχεία ημιαγωγών μπορούν να μεταφέρουν μόνο μερικές χιλιάδες αμπέρ, οπότε πολλά πρέπει να χρησιμοποιούνται παράλληλα. Το υπεραγωγίμο πηνίο, όπως φαίνεται μέσα από τον μετατροπέα, εμφανίζεται ως αντιδραστικό φορτίο στο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος. Η άεργος ισχύς που δημιουργείται στο σύστημα ακυρώνεται από το σύστημα αντιστάθμισης άεργου ισχύος που είναι στην ουσία μια μεταβλητή χωρητικότητα. Οι πιο πρόσφατες εξελίξεις των GTO υποδηλώνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί πλήρης έλεγχος άεργου ισχύος. Ωστόσο, οι μετατροπείς που βασίζονται σε GTO ενδέχεται να μην είναι τόσο αποτελεσματικοί όσο αυτοί που χρησιμοποιούν SCR.

Πίνακας 4.3.1- Χαρακτηριστικά μονάδας 5000 MWh SMES (πηγή :

<https://escholarship.org/uc/item/4pq876ns>)

Peak Stored Energy (MWhr)	5250
Peak Power (MW)	1000
Coil Height (m)	19
Coil Diameter (m)	1000
Aspect Ratio	.019
Operating Temperature (K)	1.8
Current (ka)	200
No. of Turns	556
No. of Radial Layers	4
Maximum Wall Pressure (MPa)	1.92
Peak Magnetic Field (T)	6.69
Midplane Magnetic Field (T)	5.18
Strut Spacing (m)	4.75
Cooldown Hoopstress (MPa)	345
Refrigeration Load (MWhr/day)	120
Construction Time (yrs)	7
Land Requirement (acres)	5300

4.3.2 Υπεραγωγός και πηνίο

Ο υπεραγωγός πιθανότατα θα είναι ένα σύνθετο Nb-Ti/χαλκό σταθεροποιημένο από αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας. Ο χαλκός εξυπηρετεί πολλούς σκοπούς. Πρώτον, παρέχει μια μήτρα που στηρίζει μηχανικά και διαχωρίζει τα επιμέρους νήματα του Nb-Ti, τα οποία στον τελικό αγωγό έχουν διάμετρο δεκάδων μικρομέτρων. Δεύτερον, λόγω της υψηλής ειδικής αντίστασης σε σχέση με τον υπεραγωγό, απομονώνει ηλεκτρικά τα νήματα Nb-Ti παρέχοντας ένα ωμικό φράγμα που μειώνει τις απώλειες κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Τρίτον, ο χαλκός μπορεί να σταθεροποιήσει τον υπεραγωγό αγωγώντας ρεύμα κατά τη διάρκεια σύντομων περιόδων όταν ο υπεραγωγός υφίσταται μια μετάβαση στην κανονική κατάσταση. Ο σύνθετος αγωγός αποτελείται από μακριά νήματα αυτού του αγωγού και τον σταθεροποιητή αλουμινίου. Οι μεμονωμένοι κλώνοι μπορούν να συνδεθούν έτσι ώστε η απόδοση του αγωγού και του συστήματος να μην υποβαθμίζεται από πεπερασμένο μήκος αγωγού. Το συνολικό κόστος του αγωγού ελαχιστοποιείται με ταξινόμηση η ποσότητα του υπεραγωγού στο καλώδιο για να λειτουργεί ο υπεραγωγός σε όλα

τα μέρη του μαγνήτη κοντά στο κρίσιμο ρεύμα. Ο συνήθης αγωγός Nb-46,5% Ti μπορεί να αντικατασταθεί από ένα κράμα 50-55% Ti που μπορεί να διατηρήσει υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος σε χαμηλά πεδία και χαμηλές θερμοκρασίες. Το κρίσιμο ρεύμα που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κόστους παρακάτω είναι 7000A/mm² σε 1.8K και 5T. Η βαθμολόγηση ρυθμίζεται έτσι ώστε ο αγωγός να λειτουργεί στο 90% περίπου του κρίσιμου ρεύματος στο τοπικό πεδίο. Οι διατομές αλουμινίου υψηλής καθαρότητας στον αγωγό και το υλικό "ενθαλπίας" που απορροφά θερμότητα καθορίζονται από μια τοπική απαίτηση τάσης και ένα όριο στην αύξηση της θερμοκρασίας σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης εσωτερικής απόρριψης ενέργειας. Το θέμα της ασφάλειας και της προστασίας του πηνίου δεν μπορεί να συζητηθεί λεπτομερώς εδώ. Ωστόσο, κάθε βιώσιμος σχεδιασμός πρέπει να διασφαλίζει την ασφαλή μετατροπή ενέργειας από μαγνητικό πεδίο σε θερμότητα στη δομή. Αυτό απαιτεί την αφαίρεση του ηλίου και την εξάπλωση της μη φυσιολογικής περιοχής. Όπως γνωρίζει οποιοσδήποτε εργάζεται με ηλεκτρικές καλωδιώσεις, το αλουμίνιο και ο χαλκός δεν είναι μεταλλουργικά συμβατά, κάτι που προτείνει να χρησιμοποιηθεί το ένα ή το άλλο αλλά όχι και τα δύο. Ωστόσο, υπάρχει σημαντική πρόσφατη εμπειρία με αγωγούς σταθεροποιημένους από αλουμίνιο. Το αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας έχει ειδική αντίσταση χαμηλής θερμοκρασίας περίπου το ένα δέκατο αυτής του καλού χαλκού, η αντίστασή του επηρεάζεται λιγότερο από το μαγνητικό πεδίο και είναι λιγότερο ακριβό. Έτσι το αλουμίνιο μπορεί να προτιμάται για το μεγαλύτερο μέρος του σταθεροποιητή. Σε περίπτωση σβέσης, η ασφάλεια της μονάδας θα εξαρτηθεί από το να έχει ένα μεγάλο κλάσμα του πηνίου μη συνδεδεμένο σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα για τον περιορισμό των τάσεων και τη μείωση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Η προσθήκη τεράστιων ποσοτήτων σταθεροποιητή και εν ταϊλανδικού υλικού στον αγωγό μειώνει την ταχύτητα διάδοσης της απόσβεσης. Επομένως, γενικά απαιτείται κάποια μέθοδος για να επιταχυνθεί η απόσβεση ή να προκληθούν πολλαπλές φυσιολογικές περιοχές. Στα περισσότερα σχέδια, ο αγωγός και τα στηρίγματα που μεταδίδουν τις δυνάμεις μεταξύ των στροφών και στο τοίχωμα του κρυοστάτη βυθίζονται σε υγρό ήλιο περίπου στο 1.8 K. Αυτό το λουτρό αφαιρεί τη θερμότητα από τον αγωγό και τη μεταφέρει στο ψυγείο μέσω ενός σετ εναλλάκτη θερμότητας. Η επιλογή του 1.8 K ως θερμοκρασίας λειτουργίας βασίζεται σε μια αντιστάθμιση μεταξύ πολλών παραγόντων. Καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, η πυκνότητα ρεύματος αυξάνεται, το κόστος ψύξης-κεφάλαιο και λειτουργίας αυξάνεται, η ενθαλπία στο σημείο λάμδα αυξάνεται και η μεταφορά θερμότητας/θερμική αγωγιμότητα έχει μέγιστο κοντά στους 1,8 K. Το χαμηλό κόστος ψύξης σχετίζεται γενικά με τον υπεραγωγό λειτουργούν στην περιοχή 1,7 έως 2,0 K.

4.3.3 Δοχείο Ντιούαρ και Δομή

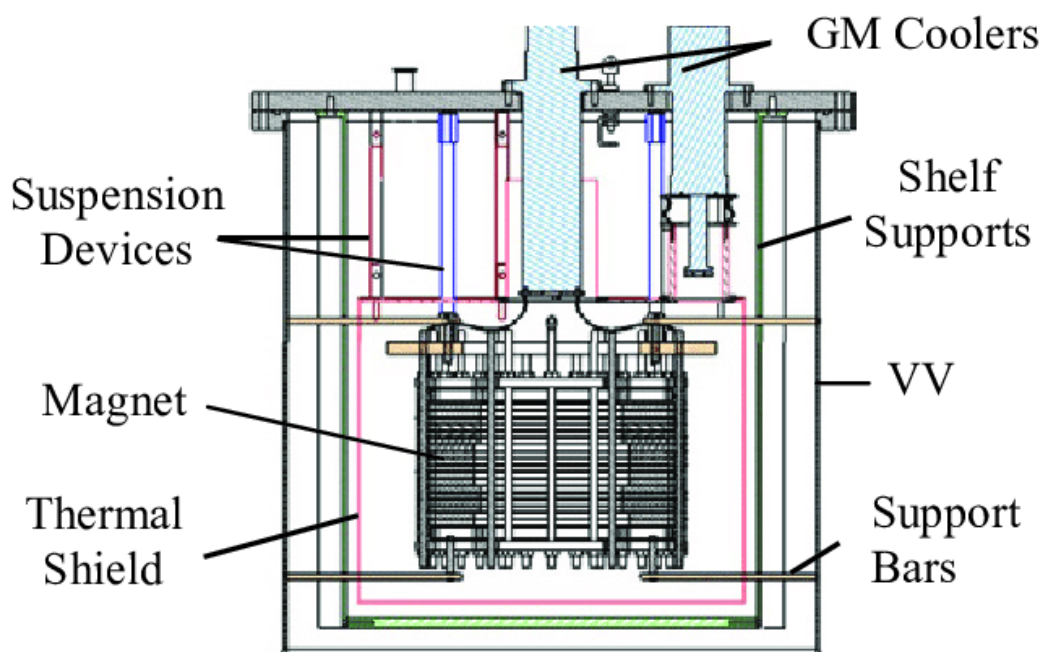
Το δοχείο ντιούαρ και η κατασκευή που υποστηρίζει τις περιελίξεις και μεταδίδει δυνάμεις στο βράχο έχουν σχεδιαστεί μαζί για να σχηματίσουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα στο οποίο τα δομικά

στοιχεία αντέχουν πολλαπλά φορτία. Η δύναμη Lorentz έχει μια καθαρή ακτινική συνιστώσα προς τα έξω και μια αξονική συνιστώσα που είναι συμμετρική ως προς την κατακόρυφη κεντρική γραμμή. Αν και αυτές είναι οι κύριες δυνάμεις, το βάρος του μαγνήτη πρέπει να υποστηρίζεται στο κάτω μέρος με αντηρίδες που μπορούν να φιλοξενήσουν τις θερμικές συστολές της ψύξης. Επιπλέον, υπάρχει η δύναμη της ατμόσφαιρας στο δοχείο κενού και η εσωτερική πίεση του ηλίου στο δοχείο ηλίου. Οι αντηρίδες που προτείνονται αποτελούν ένα κρυογονικής ποιότητας εποξειδικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (G-10CR) και μπορούν να ταξινομηθούν σε πάχος για να επωφεληθούν από την αυξημένη αντοχή σε χαμηλή θερμοκρασία. Γενικά απαιτούνται δύο δοχεία. Πρώτον, ένα εξωτερικό δοχείο κενού, πιθανότατα κατασκευασμένο από ένα συγκολλημένο με ραφή φύλλο αλουμινίου, θα περικλείει το πηνίο, το δοχείο ηλίου και τις δομές στήριξης. Πρέπει να ληφθεί μέριμνα για να διασφαλιστεί ότι οι συγκολλήσεις είναι κεντραρισμένες μεταξύ των στηρίξεων στην πιο προσβάσιμη περιοχή όπου εμφανίζεται η μέγιστη παραμόρφωση. Το υλικό αλουμινίου μπορεί να χρειαστεί να παχυνθεί στις περιοχές συγκόλλησης για να αντισταθμιστεί η μειωμένη αντοχή λόγω της θέρμανσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκόλλησης. Η διαφορά πίεσης στο αλουμίνιο, προκαλεί την εκτροπή του αλουμινίου. Η ποσότητα της επιτρεπόμενης παραμόρφωσης και η απόσταση στήριξης επιλέγονται για να μειωθεί η ποσότητα αλουμινίου που απαιτείται στον τοίχο και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος. Σε μια συσκευή πλήρους κλίμακας με δοχείο ηλίου, η κατασκευή του κρυοστάτη μπορεί να ακολουθήσει τη διαδικασία περιέλιξης του πηνίου. Το δοχείο κενού, οι αντηρίδες στήριξης και το εξωτερικό τοίχωμα του δοχείου ηλίου κατασκευάζονται στη θέση τους στην ανασκαμμένη σήραγγα. Στη συνέχεια, το πηνίο τυλίγεται στο εσωτερικό του εξωτερικού τοιχώματος του δοχείου ηλίου. Αφού ολοκληρωθεί κάθε τμήμα του πηνίου, το εσωτερικό πλευρικό τοίχωμα του δοχείου ηλίου για το τμήμα 1m1 κατασκευάζεται στη θέση του και το δοχείο ηλίου κλιμακώνεται. Λόγω της πιθανότητας εκτεταμένου χρόνου περιέλιξης πολλά τμήματα μπορούν να συναρμολογηθούν ταυτόχρονα. Το τελικό στάδιο συναρμολόγησης είναι η εγκατάσταση αξονικών στηρίξεων μεταξύ του δοχείου ηλίου και του εσωτερικού τοιχώματος του δοχείου κενού. Για ένα πηνίο με καλώδιο σε έναν αγωγό αγωγού δεν υπάρχει δοχείο ηλίου, επομένως η διαδικασία συναρμολόγησης είναι απλούστερη και ταχύτερη, αλλά οι συνδέσεις σωλήνων για υγρό ήλιο και για αφαίρεση θερμότητας και ψύξη μπορεί να είναι περίπλοκες.

4.3.4 Κρυογονικό Σύστημα

Στα περισσότερα συστήματα που προτείνονται το πηνίο λειτουργεί σε λουτρό ηλίου 1,8 K σε ατμοσφαιρική πίεση. Επιλέγεται η λειτουργία Sub 4,2 K επειδή η πυκνότητα ρεύματος που είναι δυνατή στον υπεραγωγό είναι υψηλότερη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Όπως συζητήθηκε παραπάνω, το 1,8K και η ατμοσφαιρική πίεση επιλέγονται λόγω της μέγιστης μεταφοράς θερμότητας και της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτή η κατάσταση διατηρείται μέσω ενός εναλλάκτη

θερμότητας μεταξύ του υπόψυκτου υπερρευστού ηλίου και ενός λουτρού Hell σε τάση ισορροπίας ατμών περίπου 12,5 torr. Επιπλέον, απαιτείται η διαδρομή υγρού υψηλής θερμικής αντίστασης μεταξύ του λουτρού ψυκτικού και ενός λουτρού ηλίου 4,2 K. Αυτή η τεχνική παραγωγής ενός λουτρού ψύξης μη ισορροπίας αναπτύχθηκε από τους Claudet et al και χρησιμοποιείται πλέον ευρέως σε πειραματικές εγκαταστάσεις χαμηλής θερμοκρασίας. Το ρευστό εργασίας σε αυτό το σύστημα είναι το ήλιο, το οποίο είναι πλήρως σφραγισμένο έτσι ώστε να μην εισέρχεται αέρας στο σύστημα και έτσι να χάνεται λίγο ήλιο. Εκτός από τη διατήρηση του πηνίου στους 1,8 K, το κρυογονικό σύστημα παρέχει ψυκτικό υγρό σε αρκετές ενδιάμεσες θερμοκρασίες. Το πρώτο είναι ένα λουτρό στους περίπου 4,5 K που διατηρεί σταθερή πίεση στο λουτρό 1,8 K και παρεμποδίζει οποιαδήποτε ροή θερμότητας μέσω των καλωδίων ισχύος που μεταφέρουν ρεύμα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στο πηνίο. Η επιλογή του ρεύματος έχει σημαντικό αντίκτυπο στο θερμικό φορτίο 4,5 K. Η μείωση του ρεύματος, ιδίως σε μικρές συσκευές μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο εδώ. Επιπλέον, η θερμότητα που ταξιδεύει κατά μήκος των αντηρίδων στήριξης απομακρύνεται σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες από αέριο ήλιο σε υψηλή πίεση. Ο συμπιεστής και άλλα κινούμενα μέρη του κρυογονικού συστήματος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο πηνίο για να βελτιωθεί η απόδοση και να μειωθεί το κόστος. Ταυτόχρονα, αυτός ο εξοπλισμός πρέπει να βρίσκεται σε χαμηλό μαγνητικό πεδίο. Φαίνεται ότι η καλύτερη επιλογή είναι να υπάρχει αυτός ο εξοπλισμός σε πεδία μικρότερα από 200 G, όπου μπορεί να είναι δυνατή η περιορισμένη πρόσβαση προσωπικού, και να θωρακιστεί ο εξοπλισμός εάν είναι απαραίτητο για να λειτουργήσει αποτελεσματικά.



Εικόνα 4.3.4(1)-Γενικό διάγραμμα κρυογονικού συστήματος ενός SMES συστήματος (πηγή :

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FStructure-of-the-SMES-cryogenic>

[system_fig1_28255592&psig=A0vVaw2uL4NMd6r4QdEhd5CsdMbX&ust=1666711926476000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCNjItvSX-foCFOAAAAAdAAAAABAE\)](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.cve.co.kr%2Fen%2Fproject-category%2Fsmes%2F&psig=A0vVaw2-PTMNuTA-9BNATSGqjQyT&ust=1667735371075000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCNjItvSX-foCFOAAAAAdAAAAABAE)



Εικόνα 4.3.4(2)-Γενικό διάγραμμα κρυογονικού συστήματος ενός SMES συστήματος (πηγή :

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.cve.co.kr%2Fen%2Fproject-category%2Fsmes%2F&psig=A0vVaw2-PTMNuTA-9BNATSGqjQyT&ust=1667735371075000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCNjItvSX-foCFOAAAAAdAAAAABAE\)](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.cve.co.kr%2Fen%2Fproject-category%2Fsmes%2F&psig=A0vVaw2-PTMNuTA-9BNATSGqjQyT&ust=1667735371075000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCNjItvSX-foCFOAAAAAdAAAAABAE)

4.3.5 Σύστημα κλιματισμού ισχύος

Η ηλεκτρική διασύνδεση μεταξύ του μαγνήτη υπερσυλλογής και του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένας μετατροπέας, όπως φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα του SMES συστήματος. Ο μετατροπέας είναι ένας ανορθωτής εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές και ένας αντιστροφέας συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, ο οποίος μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα από το δίκτυο κοινής ωφέλειας σε συνεχές ρεύμα που πρέπει να ρέει συνεχώς στο πηνίο. Για τη φόρτιση ή την εκφόρτιση, η τάση στο πηνίο γίνεται θετική ή αρνητική. Όταν η μονάδα βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, ανεξάρτητα από το επίπεδο αποθήκευσης, το ρεύμα είναι σταθερό και η μέση τάση στο αγωγό τύλιγμα είναι μηδέν. Η δυνατότητα ενός διακόπτη μόνιμης λειτουργίας έχει αποκλειστεί, καθώς υπάρχουν απώλειες στον μετατροπέα σε κατάσταση αδράνειας. Ωστόσο, η ανάγκη της κοινής ωφέλειας για ταχεία απόκριση της εγκατάστασης SMES θα είναι πιθανώς πιο σημαντική από τις απώλειες. Η βασική τριφασική γέφυρα αποτελείται από 6 θυρίστορ (SCR) ή 6 ΟΤΟ τα οποία ελέγχονται από ένα κύκλωμα πυροδότησης. Οι παλμοί τάσης από τα κυκλώματα πυροδότησης προκαλούν την αγωγή των SCR. Οι παλμοί τάσης καλούν κάθε SCR να αρχίσει να αγωγιμοποιείται σε καθορισμένο χρόνο και με καθορισμένη σειρά στον κύκλο των 16 ms, ώστε να διατηρείται η επιθυμητή μέση τάση στο πηνίο. Αλλάζοντας τη σχετική φάση,

αυτού του παλμού σε ένα εύρος από 0 έως 180°, η τάση στο πηνίο μπορεί να γίνει να μεταβάλλεται από τη μέγιστη θετική της τιμή στη μέγιστη αρνητική της τιμή. Η μέση τάση δίνεται από τη σχέση

$$V = V_0 \cos \alpha.$$

Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές του α ελέγχονται από τα χαρακτηριστικά των θυρίστορ και το σχεδιασμό του κυκλώματος. Γενικά τα όρια είναι περίπου 5° έως 165°, αντί για 0° έως 180°. Αυτός ο περιορισμός δεν προκαλεί πρακτικό περιορισμό στη φόρτιση και την εκφόρτιση του πηνίου ή στην ισχύ κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση. Η γέφυρα 6 παλμών, η οποία είναι η απλούστερη δυνατή για ένα τριφασικό σύστημα, παράγει αρμονικές στο δίαυλο εναλλασσόμενου ρεύματος και στην τάση εξόδου στο πηνίο και προκαλεί μετατόπιση φάσης του ρεύματος και της τάσης στο δίαυλο εναλλασσόμενου ρεύματος, εισάγοντας έτσι άεργο ισχύ. Ούτε οι αρμονικές ούτε η άεργος ισχύς είναι επιθυμητές. Και οι δύο πρέπει να μειωθούν ή να εξαλειφθούν με την προσθήκη φίλτρων ή με την αύξηση της πολυπλοκότητας του μετατροπέα. Οι αρμονικές που εμφανίζονται κατά μήκος του πηνίου εμφανίζονται επίσης στην ac πλευρά της γέφυρας και θα διαδοθούν στο ac σύστημα εάν δεν παρέχεται απόσβεση. Γενικά, οι μετατροπείς μεγάλης κλίμακας, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σήμερα στις γραμμές μεταφοράς συνεχούς ρεύματος, διαθέτουν φίλτρα στην ac πλευρά που απομακρύνουν ένα μεγάλο μέρος των ανεπιθύμητων αρμονικών. Με τη χρήση GTOs αυτά μπορούν να μειωθούν περαιτέρω, και με τη χρήση δύο ή περισσότερων γεφυρών 6 παλμών που πυροδοτούνται σε διαφορετικές ακολουθίες, η άεργος ισχύς μπορεί να μειωθεί. Επειδή οι συσκευές απενεργοποίησης πύλης είναι πιο περίπλοκα εξαρτήματα ένα δεδομένο μέγεθος πλακιδίου πυριτίου θα μεταφέρει λιγότερο ρεύμα συγκριτικά με το αν ήταν λειτουργία σε ένα SCR. Έτσι, θα απαιτηθούν περισσότερες συσκευές GTO, οι οποίες είναι ακριβότερες ανά μονάδα, από ό,τι SCR. Επιπλέον, το κύκλωμα που απαιτείται για να λειτουργήσει σωστά ένας μετατροπέας GTO επηρεάζει επίσης τη συνολική απόδοση της διαδικασίας μετατροπής ac-dc. Έτσι, μια μονάδα SMES με GTO μπορεί να έχει απόδοση 88%, ενώ μια μονάδα με SCR θα είχε απόδοση 92%, για παράδειγμα. Χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση στον τομέα αυτό. Η απόκριση των κυκλωμάτων ελέγχου και πυροδότησης σε ένα νέο σήμα ζήτησης είναι τόσο γρήγορη που μπορεί να επιλεγεί μια νέα γωνία πυροδότησης για τον επόμενο SCR που θα παλμοδοτηθεί, π.χ. μέσα σε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Αυτή η ταχεία απόκριση σε απαιτήσεις ισχύος που μπορεί να διαφέρουν κατά εκατοντάδες μεγαβάτ είναι μια μοναδική ικανότητα των SMES σε σχέση με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, όπως τα αντλητικά υδροηλεκτρικά και ο πεπιεσμένος αέρας. Αν και μια σχεδόν παρόμοια ικανότητα είναι δυνατή με τις μπαταρίες, αυτές είναι ουσιαστικά συσκευές σταθερής τάσης, ενώ η μονάδα SMES είναι σταθερού ρεύματος. Ο χρόνος απόκρισης του SMES είναι γενικά καλύτερος. Να σημειωθεί επίσης ότι για να αντιστραφεί η ισχύς σε μια μπαταρία πρέπει να αντιστραφεί το ρεύμα. Αυτή η ικανότητα γρήγορης απόκρισης επιτρέπει στη μονάδα

SMES όχι μόνο να λειτουργεί ως μονάδα αποθήκευσης ενέργειας, αλλά και να λειτουργεί ως περιστρεφόμενη εφεδρεία και ακόμη και να παρέχει σταθερότητα σε περίπτωση διαταραχών στο σύστημα κοινής ωφέλειας.

4.4 Εφαρμογές των συστημάτων SMES

Ιστορικά, η πρώτη εφαρμογή των SMES ήταν η καθημερινή εξισορρόπηση του φορτίου στο ηλεκτρικό δίκτυο. Καθώς η απαιτούμενη ενέργεια ήταν εξαιρετικά υψηλή (της τάξης του 1 έως 10 TJ), προβλέφθηκε ως μια πολύ εφαρμογή μεγάλης κλίμακας. Το πηνίο αναμενόταν να είναι ένας δακτύλιος (για να περιοριστεί το αδέσποτο πεδίο) με διάμετρο της τάξης του 1 km, που θα εμφυτευόταν υπόγεια. Η ιδέα ήταν να περιοριστεί η ποσότητα του ψυχρού υλικού με τη μηχανική υποστήριξη του αγωγού από το εξωτερικό με μια "θερμή" δομή, η οποία θα μπορούσε να είναι το ίδιο το έδαφος (η έννοια του "βράχου"). Αργότερα αποδείχθηκε ότι η ιδέα μιας θερμής δομής ήταν μη ρεαλιστική. Εξάλλου, ακόμη και αν μειωθεί το κόστος ψύξης ανά μονάδα ενέργειας όταν αυξάνεται το μέγεθος του συστήματος, το κόστος ψύξης για την εφαρμογή ισοστάθμισης φορτίου εξακολουθεί να είναι απαγορευτικό. Όλες οι εφαρμογές που έχουν διερευνηθεί μέχρι τώρα εκμεταλλεύονται την υψηλή ισχύ ικανότητα των SMES για να καταστήσουν την εφαρμογή τους δυνητικά κερδοφόρα.

Μέχρι τώρα, οι αναφερόμενες εφαρμογές των SMES μπορεί να ταξινομούνται σε δύο είδη, οι οποίες είναι οι εφαρμογές συστημάτων ισχύος και οι εφαρμογές παλμοδότησης. Οι μαγνήτες παλμού των SMES, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξομάλυνση των υφέσεων τάσης και για τον μετριάσμο του τρεμοπαίγματος. Τα τελευταία χρόνια οι περιορισμοί που επιβάλλουν το περιβάλλον, το δικαίωμα διέλευσης και το ενεργειακό κόστος έχουν ως αποτέλεσμα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργούν με σημαντικά μειωμένα περιθώρια ευστάθειας. Κατά συνέπεια, τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από συσκευές σταθεροποίησης για να διατηρήσουν αξιόπιστη και σταθερή λειτουργία. Οι διατάξεις αυτές θα πρέπει να παρέχουν επαρκή απόσβεση στο σύστημα, κατά τη διάρκεια της μεταβατικής περιόδου μετά από μια διαταραχή του συστήματος, όπως η μεταγωγή γραμμής, οι αλλαγές φορτίου και η εκκαθάριση σφάλματος. Για να αποφευχθεί η κατάρρευση του συστήματος λόγω απώλειας συγχρονισμού ή αστάθειας τάσης, έχουν χρησιμοποιηθεί αντίμετρα όπως σταθεροποιητές του συστήματος ισχύος, βέλτιστα συστήματα ελέγχου ρυθμιστή στροβίλου και μετατοπιστές φάσης. Η εφαρμογή του συστήματος SMES σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας προτάθηκε για πρώτη φορά το 1969. Η ιδέα αυτή είναι η φόρτιση του υπεραγωγίμου μαγνήτη με την πλεονάζουσα παραγωγή των βασικών μονάδων φορτίου κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτός αιχμής και η εκφόρτιση στο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος κατά τη διάρκεια του χρόνου αιχμής. Η πρώτη υπεραγωγίμη εφαρμογή δικτύου ισχύος που πέτυχε την πλήρη εμπορική ιδιότητα των SMES ήταν

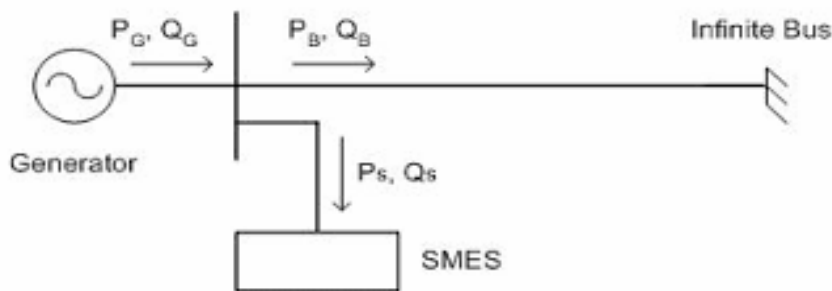
το 1981 και βρισκόταν κατά μήκος του 500 kV Pacific Intertie που διασυνδέει την Καλιφόρνια και τα βορειοδυτικά. Αυτή η πρακτική εφαρμογή του SMES κατέδειξε τη δυνατότητα του SMES να βελτιώσει την ικανότητα μεταφοράς μέσω της απόσβεσης των διατοπικών ταλαντώσεων. Έκτοτε, έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στις εφαρμογές SMES σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Είχαν γίνει πολλές μελέτες και είχαν αναπτυχθεί πρωτότυπα για την εγκατάσταση SMES. Για να δοθεί ώθηση στην ανάπτυξη των εφαρμογών SMES, ορισμένες εργασίες συνόψισαν τις προηγούμενες έρευνες σχετικά με την τεχνολογία SMES και ανέφεραν τις τρέχουσες. Η αναφορά συνόψισε τα αποτελέσματα των μελετών των SMES για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος μεταφοράς. Ο Luongo εξέτασε το ιστορικό της ανάπτυξης των SMES στο ΗΠΑ και συνόψισε τις τρέχουσες εξελίξεις των SMES στις ΗΠΑ, Ευρώπη και την Ιαπωνία. Επιπλέον, η εργασία έδωσε το κόστος εκτίμησης των συστημάτων SMES και συζήτησε τις αγορές των SMES. Αργότερα, οι Karasik et al έδωσαν μια ανασκόπηση των τεχνικών και κοστολογικών για τις εφαρμογές SMES σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Πόρπες et al έδωσαν μια επισκόπηση της ιστορικής προοπτικής και της τεχνολογικής κατάστασης των SMES στον κόσμο και περιέγραψαν πρακτικές εφαρμογές των συστημάτων SMES σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας αριθμός αναφερόμενων μελετών εξερεύνησε και διερεύνησε εφικτά εφαρμογές SMES σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εφαρμογές αυτές μπορούν βασικά ταξινομηθούν σε δύο πτυχές: η μία είναι η σταθερότητα του συστήματος και η άλλη είναι η βελτίωση της ποιότητας ισχύος.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΙΣΧΥΟΣ

4.4.1 Μείωση των ταλαντώσεων του συστήματος

Ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας (0,5-1 Hz) μετά από ένα σύστημα διαταραχής σε ένα δυναμό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό της δυναμικής ευστάθειας. Οι μεταφορές ισχύος συχνά περιορίζονται για να αποφευχθεί η εμφάνιση αυξανόμενων ταλαντώσεων, μετά την απώλεια μιας μεμονωμένης μεγάλης γραμμής μεταφοράς ή γεννήτριας. Η ικανότητα μεταφοράς μπορεί να αυξηθεί με την ενεργό παροχή απόσβεση έναντι αυτών των ταλαντώσεων. Τα SMES μπορούν να μειώσουν ενεργά αυτές τις ταλαντώσεις του συστήματος μέσω της διαμόρφωσης της πραγματικής ισχύος όσο και της άεργου ισχύος και ως εκ τούτου μπορεί να είναι πολύ πιο αποτελεσματικός και μικρότερος σε μέγεθος από άλλες τεχνολογίες. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει ένα σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος μεταφοράς ενέργειας συστήματος με μία μονάδα SMES για τη μείωση των ταλαντώσεων του συστήματος. Το SMES μπορεί να ελέγχει την ενεργό ισχύ P_s από το SMES για την καταστολή των ταλαντώσεων της γωνιακής ταχύτητας α της γεννήτριας ή της ροής ισχύος P_t , και ελέγχει την άεργο ισχύ Q_s για την καταστολή

τις διακυμάνσεις της τάσης γραμμής του διαύλου στον οποίο το SMES συνδέεται. Ο Karasik et al περιέγραψε μία μέθοδο διαμόρφωσης της ενεργού και της άεργου ισχύος της μονάδας SMES σε ένα μοντέλο ισχύος συστήματος μεταφοράς και επαλήθευσαν την επίδραση του συστήματος ισχύος σταθεροποιητικού ελέγχου με τη χρήση SMES. Ο Rabbani et al περιέγραψε μία στρατηγική ασαφούς ελέγχου για τη μονάδα SMES για την απόσβεση κάθε είδους διαταραχής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 4.4.1-Μια τυπική σύνδεση μονάδας SMES της οποίας η ενεργός και η άεργος ισχύς μπορούν να διαμορφωθούν για τη μείωση της ταλάντωσης (πηγή :

<https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQAjZusx-396mHZdHWrNqqfXM7kU0veyx1-vyhJ0TIAr-TF3AE4Ir9lq2JgZe1RUnF3NEE&usqp=CAU>

4.4.2 Αδιάλειπτη παροχή ισχύος

Το SMES έχει αναπτυχθεί για να εγγυάται τη συνέχεια της ισχύος για πολύ ευαίσθητα φορτία, για παράδειγμα στο βιομηχανία μικροηλεκτρονικής ή σε στρατιωτικά συστήματα. Η ιδέα εξακολουθεί να είναι η απόσβεση των διακυμάνσεων σε μια ηλεκτρική γραμμή όπως για την καθημερινή εξισορρόπηση του φορτίου, αλλά σε πολύ μικρότερη χρονική κλίμακα. Οι στόχοι είναι οι ξαφνικές διαταραχές που προκαλούνται από την εμφάνιση ή την εξαφάνιση ενός φορτίου στη γραμμή (κύμα τάσης ή πτώση τάσης), και οι πολύ σύντομες διακοπές ρεύματος. Για τα συστήματα αυτά απαιτείται απόκριση υψηλής ταχύτητας, η οποία απαιτεί ισχύ εξόδου στην περιοχή των MW, αλλά η αποθηκευμένη ενέργεια δεν είναι απαραίτητα υψηλή, καθώς η διάρκεια της διαταραχής είναι συνήθως πολύ σύντομη.

Από τη δεκαετία του '90 δοκιμάζονται UPS με βάση SMES 1 έως 10 MJ, ιδίως από την αεροπορία των ΗΠΑ. Αριθμός πρωτοτύπων στο ίδιο ενεργειακό εύρος έχει αναπτυχθεί πρόσφατα όπως φαίνεται στον πίνακα 4.4.2

Πίνακας 4.4.2 – Πρόσφατη υλοποίηση UPS με βάση το σύστημα SMES (πηγή : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00654844/document>)

Origin	Year	Conductor	Cooling	Energy / Power	Ref
Japan	2005	HTS (BSCCO)	Helium closed cycle (4.2 K)	1 MJ / 1 MW	[SMH+05]
Japan	2006	LTS	Helium bath (4.2 K)	7.3 MJ / 5 MW	[NHM+06]
Japan	2009	LTS	Conduction (4 K)	1 MJ / 1 MW	[MCK+09]
Korea	2006	LTS	Helium bath	3 MJ / 0.75 MW	[KSC+06]
Finland	2003	LTS (Nb ₃ Sn)	Conduction (10 K)	0.2 MJ	[MKK+03]
China	2008	HTS (BSCCO)	Helium bath 4.2 K	1 MJ/0.5 MW	[XWD+08]

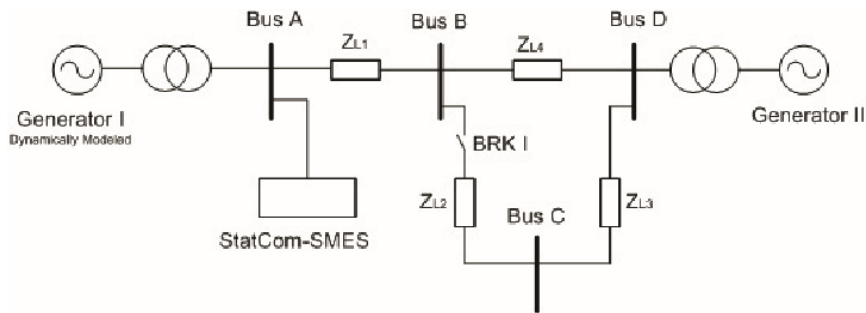
Δεν υπάρχουν εμπορικά προϊόντα για αυτή την εφαρμογή. Οι συσκευές που παρουσιάζονται εδώ είναι μόνο συσκευές επίδειξης. Ωστόσο, ορισμένες από αυτές δοκιμάστηκαν σε πραγματικές συνθήκες και παρουσίασαν ικανοποιητικές συμπεριφορές, όσον αφορά την αποδοτικότητα της αποθήκευσης και την προστασία από την πτώση της τάσης.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

4.4.3 Βελτίωση των επιδόσεων του ευέλικτου συστήματος μεταφοράς εναλλασσομένου ρεύματος

Τα συστήματα SMES μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να προσφέρουν αποθήκευση ενέργειας για συσκευές FACTS (Ευέλικτο σύστημα μετάδοσης AC). Οι μετατροπείς FACTS και τα PCS των συστημάτων SMES διαμορφώνονται με πολύ παρόμοιους τρόπους. Οι συσκευές FACTS, ωστόσο, λειτουργούν με την ενέργεια που διατίθεται από το ηλεκτρικό δίκτυο και συνήθως χρησιμοποιούν πυκνωτή στο DC του μετατροπέα. Τα SMES μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των FACTS παρέχοντας ενεργό ισχύ εκτός από την άεργο ισχύ μέσω του διαύλου DC. Στην αναφορά παρουσιάστηκε ένα σχήμα ελέγχου για τη σταθεροποίηση του συστήματος ισχύος, θεωρώντας ότι ο συνδυασμός ενός SMES και ενός μεταγωγέα φάσης υψηλής ταχύτητας αποτελεί έναν ενοποιημένο ελεγκτή του συστήματος ισχύος. Το πείραμά τους επαλήθευσε ότι η συσκευή που αναπτύχθηκε με το προτεινόμενο σχήμα ελέγχου είναι αποτελεσματική για τη σταθεροποίηση ενός συστήματος μεταφοράς ισχύος χύδην σε μεγάλες αποστάσεις, ακόμη και αν αυτό βρίσκεται μακριά από τη γεννήτρια. Οι Ribeiro et al συζήτησαν τα οφέλη της ποιότητας ισχύος για τα συστήματα μεταφοράς

με την ενσωμάτωση ενός ελεγκτή FACTS με SMES. Ένα πηνίο SMES ενσωματώνεται σε ένα STATCOM που βασίζεται σε μετατροπέα πηγής τάσης για την απόσβεση των δυναμικών ταλαντώσεων στα συστήματα ισχύος. Οι μελέτες τους έδειξαν ότι, ανάλογα με τη θέση του STATCOM που χρησιμοποιεί SMES, ο ταυτόχρονος έλεγχος της πραγματικής και της άεργου ισχύος μπορεί να βελτιώσει τη σταθερότητα του συστήματος και την ποιότητα ισχύος ενός δικτύου μεταφοράς. Επιπλέον, η STATCOM με χρήση SMES που συνδέεται σε διάλυο κοντά στη γεννήτρια (όπως η θέση του διαλύου A που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα) μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική στην απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών μεταβατικών ταλαντώσεων που προκαλούνται από τριφασικό σφάλμα.



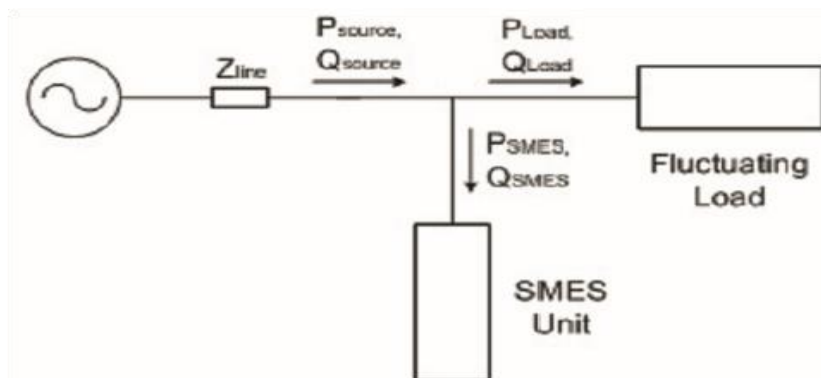
Εικόνα 4.4.3-Διαμόρφωση για τη βελτίωση του FACTS σε ένα ισοδύναμο σύστημα δύο μηχανών (πηγή:

https://www.academia.edu/88402068/Superconducting_magnetic_energy_storage_systems_for_power_system_applications)

4.4.4 Εξισορρόπηση ασταθών φορτίων

Το SMES είναι μια πολλά υποσχόμενη συσκευή για την εξισορρόπηση της κυμαινόμενης ενεργού και άεργου ισχύος από διάφορα φορτία, όπως βιομηχανικά εργοστάσια παραγωγής, σταθμούς πυρηνικής σύντηξης και υποσταθμούς ενός σιδηροδρομικού συστήματος υψηλής ταχύτητας. Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται ένα τυπικό σύστημα ελέγχου SMES για την αντιστάθμιση των κυμαινόμενων φορτίων, που βρίσκεται κοντά στο άκρο του πελάτη. Η πηγή μπορεί να ελεγχθεί ώστε να παρέχει μόνο τις σταθερές συνιστώσες της ισχύος του φορτίου. Το SMES θα ελέγχεται για να παρέχει τις κυμαινόμενες συνιστώσες του φορτίου. Χωρίς αυτό το σύστημα αντιστάθμισης ισχύος, θα υπάρχουν διακυμάνσεις τάσης στην τάση της πηγής. Περαιτέρω, με αυτό το σύστημα, η κυμαινόμενη συνιστώσα της πλευράς της πηγής μπορεί επίσης να αντισταθμιστεί με την απελευθέρωση ή την απορρόφηση ενέργειας του SMES. Τα αποτελέσματα τόσο από την προσομοίωση όσο και από εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι ένα σύστημα SMES εγκατεστημένο κοντά στο άκρο του καταναλωτή ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων της ισχύος του φορτίου με τη χρήση της στρατηγικής ασαφούς ελέγχου. Η αναφορά ανέπτυξε ένα σύστημα SMES για την αντιστάθμιση της ισχύος που απαιτείται

για τον έλεγχο του ασταθούς πλάσματος στο σύστημα του Διεθνούς Θερμοπυρηνικού Πειραματικού Αντιδραστήρα. Οι Ise et al πρότειναν να χρησιμοποιηθεί το σύστημα SMES για την αντιστάθμιση της κυμαινόμενης ισχύος από ένα σύγχροτρον υψηλής έντασης. Μπορεί να απορροφήσει τη διακύμανση της ενεργού και της άεργου ισχύος που προκαλείται από τη φόρτιση και την εκφόρτιση του μαγνήτη του συγχρότρου.



Εικόνα 4.4.4-Ένα τυπικό σύστημα με SMES για εφαρμογή εξισορρόπησης κυμαινόμενου φορτίου

(πηγή : https://www.google.com/search?q=Configuration+to+improve+FACTS+in+an+equivalent+two-machine+system.+&tbm=isch&ved=2ahUKEwj69TZhPH6AhUH4aQKHZBxAuiQ2-cCegQIABAA&oeq=Configuration+to+improve+FACTS+in+an+equivalent+two-machine+system.+&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJ1DBA1jBA2C-CmgAcAB4AIABiQGIAYACkgEDMC4vmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&scient=img&ei=FWpSY62NGYfCkwWQ44mQDg&bih=955&biw=1920&client=firefox-b-d)

4.4.5 Αντιμετώπιση κρίσιμων φορτίων με εφεδρική παροχή ρεύματος

Τα SMES μπορούν να παρέχουν δυνατότητα διέλευσης και εξομάλυνσης των διαταραχών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που διαφορετικά θα διέκοπταν τα ευαίσθητα φορτία των πελατών. Όταν συμβαίνουν στιγμιαίες διαταραχές, όπως αναλαμπές γραμμών μεταφοράς ή κεραυνικά πλήγματα, μπορεί να χαθεί ισχύς εάν η γραμμή μεταφοράς ενεργοποιηθεί ή οι τάσεις να πέσουν. Τα SMES έχουν πολύ γρήγορη απόκριση και μπορούν να εγγέουν πραγματική ισχύ σε λιγότερο από έναν κύκλο ισχύος για να προστατεύσουν σημαντικούς πελάτες από την απώλεια ισχύος. Η αναφορά ανέπτυξε μια επιτυχημένη εμπορική εφαρμογή της τεχνολογίας micro-SMES για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος για κρίσιμα φορτία. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του συστήματος micro-SMES που αναπτύχθηκε είναι η ικανότητά του να τροφοδοτεί πλήρως οποιοδήποτε φορτίο που συνδέεται σε αυτό κατά τη διάρκεια μιας σύντομης διαταραχής του συστήματος, όπως μια πτώση τάσης που προκαλείται από ένα απομακρυσμένο σφάλμα, μια στιγμιαία διακοπή που προκαλείται από φωτισμό ή αναρρίχηση σε δέντρο, ή οποιαδήποτε ασυνέχεια τροφοδοσίας κατά τη μεταφορά φορτίου μεταξύ δύο διαθέσιμων πηγών ισχύος. Οι Kalafala et al πρότειναν ένα σύστημα SMES για την προστασία κρίσιμων βιομηχανικών και στρατιωτικών φορτίων από πτώσεις και διακοπές τάσης, καθώς και για την παροχή συνεχούς

κλιματισμού ισχύος. Στην αναφορά παρουσιάστηκε η διερεύνηση ενός συστήματος SMES για εφαρμογές σε υποσταθμούς 15 kV. Οι μελέτες τους έδειξαν ότι ένα σύστημα SMES με ικανότητα διέλευσης 1 sec μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προστασία όλων των κρίσιμων φορτίων που συνδέονται σε ένα δίαυλο κοινής ωφέλειας τάξης 15 kV και ένα σύστημα SMES με ικανότητα διέλευσης τουλάχιστον 2 sec είναι κατάλληλο για την προστασία κατανεμημένων κρίσιμων φορτίων που συνδέονται στο δίαυλο φορτίου 15 kV του πελάτη. Η προστασία των κατανεμημένων κρίσιμων φορτίων με τη χρήση SMES προτάθηκε επίσης από τους Aware και Sutanto, οι οποίοι πρότειναν επίσης μια λειτουργία δύο σταδίων τάσης συνεχούς ρεύματος διαύλου με τη χρήση του ελέγχου υστέρησης για τη ρύθμιση της φόρτισης του SMES για την επέκταση του χρόνου υποστήριξης των κρίσιμων φορτίων κατά τη διάρκεια μιας βραχυπρόθεσμης διαταραχής στο δίκτυο διανομής. Ο Chu και οι συνεργάτες του διερεύνησαν τις επιδόσεις των συστημάτων SMES ως UPS. Ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο ελέγχου για την εφαρμογή UPS. Αυτά δοκιμάστηκαν με επιτυχία τόσο με προσομοίωση όσο και με πείραμα.

4.4.6 Εξισορρόπηση των ασυμμετριών συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η ασυμμετρία της τάσης είναι πολύ συχνή στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή είναι αναπόφευκτες οι ασύμμετρες βλάβες, το μονοφασικό φορτίο, η άνιση χωρητικότητα μεταξύ γραμμής και γης, τα ασύμμετρα φορτία και η ατελής μεταφορά της γραμμής μεταφοράς. Οι ασύμμετρες τάσεις θα αυξήσουν τις απώλειες του μετασχηματιστή και της γραμμής μεταφοράς, θα μειώσουν την ισχύ εξόδου του μετασχηματιστή, θα μειώσουν την απόδοση των κινητήρων, θα επηρεάσουν τη λειτουργία του κρίσιμου φορτίου και θα θέσουν σε κίνδυνο ακόμη και την ασφάλεια του εξοπλισμού. Επιπλέον, τα μη γραμμικά φορτία και τα μονοφασικά φορτία θα προκαλέσουν αρμονικά και ασύμμετρα ρεύματα, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε περισσότερες απώλειες στα συστήματα διανομής και σε μη κανονική λειτουργία άλλων συσκευών. Τα συστήματα SMES μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξισορρόπηση ασύμμετρων ρευμάτων και τάσεων. Ένα τέτοιο σύστημα SMES παρέχει ημιτονοειδή και ισορροπημένη τάση και εξαλείφει τις αρμονικές ρεύματος και τις ανισορροπίες στις τριφασικές γραμμές του συστήματος διανομής.

4.5 Κόστος του συστήματος SMES

Το κόστος ενός συστήματος SMES μπορεί να διαχωριστεί σε δύο μάλλον ανεξάρτητες συνιστώσες. Το ένα σχετίζεται με τη χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας, το άλλο με τη χωρητικότητα ισχύος. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το κόστος μιας μονάδας SMES εξαρτάται από το

μέγεθος και την χωρητικότητα αποθήκευσης. Χρησιμοποιούμε εδώ μια μονάδα αναφοράς με χωρητικότητα αποθήκευσης 5.000 MWhr και χωρητικότητα ισχύος 1000MW. Αυτό σημαίνει ότι η ονομαστική ονομαστική ισχύς θα είναι 1000MW για 5 ώρες. Το κόστος αυτής της μονάδας αναφοράς έχει προσδιοριστεί από διάφορες ομάδες, μερικές από τις οποίες περισσότερες από μία φορές. Καθένα από τα κύρια στοιχεία που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα έχει σχετικό κόστος. Επειδή η αποθηκευτική ικανότητα της μονάδας και η ισχύς είναι ως ένα βαθμό ανεξάρτητες, το κόστος των στοιχείων αυτών μπορεί να εξεταστεί χωριστά. Το πραγματικό κόστος του συγκροτήματος αγωγών θα εξαρτηθεί από το μοναδιαίο κόστος των υλικών κατά τη στιγμή της κατασκευής και από το κόστος της εργασίας στο εργοτάξιο. Οι τιμές εδώ είναι μερικών ετών και είναι σαφές ότι το κόστος ορισμένων συστατικών έχουν αλλάξει σημαντικά από τότε. Για παράδειγμα, το κόστος του αλουμινίου αυξήθηκε πολύ ταχύτερα από εκείνο του χαλκού ή του κράματος Nb-Ti. Παρ' όλα αυτά, μπορούμε να εξετάσουμε το κόστος κάθε σημαντικού συστατικού. Αυτά συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα, ο οποίος περιλαμβάνει επίσης τις πιθανές επιπτώσεις των υλικών υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας s στις SMES, όπως περιγράφεται παρακάτω. Το συγκρότημα του αγωγού διαθέτει Nb-Ti, Cu, Al υψηλής καθαρότητας και Al υψηλής αντοχής. Πρέπει να συναρμολογηθεί εν μέρει στο εργοστάσιο (γενικά η εργοστασιακή εργασία είναι μικρότερη ακριβότερο και αποδοτικότερο από τις εργασίες πεδίου), και στη συνέχεια να παραδοθεί στην τοποθεσία για την τελική συναρμολόγηση. Αυτό περιλαμβάνει τη συγκόλληση, την εισαγωγή ενός κυματισμού εάν περιλαμβάνεται στο σχέδιο, κ.λ.π. Για να επιτευχθεί αυτό, ένα ειδικό βαγόνι τρένου με εξαρτήματα αγωγού κινείται γύρω από το εργοτάξιο στο επίπεδο του εδάφους και τοποθετεί το καλώδιο μέσα στην τάφρο.

Πίνακας 4.5 – Σύγκριση του κόστους εγκαταστάσεων SMES 5000MWhr για διαφορετικά χαρακτηριστικά και κόστος υπεραγωγών (πηγή : <https://escholarship.org/uc/item/4pq876ns>)

A Comparison of 5000 MWhr SMES Plant Costs for Different Superconductor Characteristics and Costs (Millions of Dollars)

Operating Temperature (K)	1.8 K	77 K	77 K	77 K
Material	Nb-Ti	HTSC	HTSC	HTSC
J_{op} (Base = 7000 A/mm ²)	Base	1000 A/mm ²	Base	Base
Cost (Base = Nb-Ti at 1.8 K)	Base	Base	\$22/kg	Base
Storage Related Costs:				
Conductor	121.0	443.2	75.2	121.0
Coil Structure Components	196.9	196.9	196.9	196.9
Radial and Gravity Supports	14.4	5.0	5.0	5.0
Cryogenic Vessel	2.7	2.0	2.0	2.0
Thermal Shields	12.4	4.7	4.7	4.7
Coil Protective System	16.1	15.0	15.0	15.0
Vacuum Enclosure	21.3	15.5	15.5	15.5
Refrigeration System	16.3	6.3	6.3	6.3
Vacuum Pumping System	1.4	1.4	1.4	1.4
Control Room Equipment	2.0	2.0	2.0	2.0
Other Items	3.1	3.1	3.1	3.1
Subtotal	407.6	695.1	327.1	372.9
Power Related Costs:				
Power Conditioning System	68.3	65.0	65.0	65.0
Switchyard	10.6	10.6	10.6	10.6
Subtotal	78.9	75.6	75.6	75.6
Total Capital	486.5	770.7	402.7	448.5
Construction - Storage Related	93.7	159.8	75.2	85.7
Construction - Power Related	24.4	23.3	23.3	23.3
Indirect - Storage Related	21.2	36.2	17.0	19.4
Indirect - Power Related	7.8	7.5	7.5	7.5
Total Construction	633.6	997.5	525.7	584.4
Facilities and Engineering	38.6	49.7	35.3	37.1
Contingency	156.4	201.1	143.1	150.3
AFUDC	88.0	113.3	80.5	84.6
Other	42.3	27.3	27.3	27.3
Total	958.9	1388.9	811.9	883.7
Relative Cost (%)	100	145	85	92

Το συνολικό άμεσο κόστος κεφαλαίου του αγωγού και των δομικών στοιχείων που σχετίζονται με το πηνίο ανέρχεται σε 315,9 εκατ. δολάρια. Το κόστος για άλλα στοιχεία που σχετίζονται με την αποθήκευση σε αυτόν τον σχεδιασμό ανήλθε μόνο σε 91,7 εκατ. δολάρια. Οι πιο πρόσφατες προσπάθειες σχεδιασμού οδήγησαν σε μείωση του μέρους του συνολικού κόστους που αφορά το πηνίο και τον αγωγό. Το συνολικό άμεσο κόστος κεφαλαίου του συστήματος κλιματισμού ισχύος, συμπεριλαμβανομένου ενός σταθμού μεταγωγής για την εισερχόμενη εναλλασσόμενη ισχύ, ανέρχεται σε 78,9 εκατ. δολάρια. Εάν απαιτηθεί μεγαλύτερη ισχύς για την κάλυψη μιας απαίτησης περιστρεφόμενης εφεδρείας, για παράδειγμα, θα ήταν δυνατόν να αυξηθεί η ισχύς με μικρή ή καθόλου επίπτωση στο κόστος που σχετίζεται με την αποθήκευση. Με την εφεδρεία κ.λ.π, το κόστος που σχετίζεται με την ισχύ είναι περίπου 125 \$/kW. Η αξία της εφεδρείας περιστροφής και άλλων δαπανών θα μπορούσε να φτάσει τα 250 \$/kW. Συνεπώς, η προσθήκη δυναμικότητας ισχύος

θα μπορούσε κάλλιστα να εξεταστεί από κάθε επιχείρηση κοινής ωφέλειας που αγοράζει μια τέτοια συσκευή. Το συνολικό εκτιμώμενο κόστος κατασκευής ανέρχεται σε 633,6 εκατ. δολάρια. Επιπλέον, υπάρχουν έξοδα μηχανικού, απρόβλεπτα έξοδα που αναμένονται αλλά δεν είναι γνωστά με λεπτομέρειες. Οι τόκοι κατά τη διάρκεια της κατασκευής για τα έξοδα που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί και άλλα διάφορα έξοδα. Αυτά αυξάνουν το συνολικό ποσό σε 958,9 εκατ. δολάρια. Το κόστος αυτό είναι μικρότερο από ένα σταθμό ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα της ίδιας δυναμικότητας, αλλά μεγαλύτερο από ένα αντίστοιχο σταθμό αντλησιοταμίευσης. Έχουν γίνει διάφορες συγκρίσεις με άλλα συστήματα και το γενικό αποτέλεσμα είναι ότι το SMES θα είναι οριακά ανταγωνιστικό με το αντλητικό υδροηλεκτρικό σύστημα. Για να καταλήξουμε σε αυτό το συμπέρασμα απαιτείται μια παραδοχή. Είναι ότι υπάρχουν διαθέσιμες περιοχές και για τα δύο. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν λίγες εναπομείνουσες τοποθεσίες όπου μπορεί να εγκατασταθεί αντλητικό υδροηλεκτρικό σύστημα, Επίσης, υπάρχουν ζητήματα χωροθέτησης για τη μονάδα SMES λόγω του αδέσποτου μαγνητικού πεδίου.

4.6 Εμπορική δραστηριότητα και σύγχρονες εγκαταστάσεις SMES

Στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, το σημαντικότερο πρόγραμμα για την αποθήκευση ενέργειας στον κόσμο υλοποιείται από την Babcock and Wilcox (B&W) στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτό το πρόγραμμα ύψους ~50 εκατομμυρίων δολαρίων κατανέμεται από τη βιομηχανία (70%) και την ομοσπονδιακή κυβέρνηση (30%) μέσω της DARPA. Η B&W θα κατασκευάσει και θα εγκαταστήσει ένα SMES 500 kWh κυρίως για να παρέχει εφεδρεία περιστροφής στην εταιρεία κοινής ωφέλειας Anchorage Municipal Light and Power (AML&P). Η εταιρεία κοινής ωφέλειας του Anchorage είναι μέρος του "Alaskan Railbelt System", ενός από τα πιο απομονωμένα δίκτυα κοινής ωφέλειας στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η περιοχή του Anchorage που εξυπηρετείται από την AML&P χρησιμοποιεί σχεδόν το ήμισυ του φορτίου αιχμής του συστήματος rail belt, το οποίο φθάνει περίπου τα 600 MW κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η AML&P υποχρεούται, στο πλαίσιο της συμφωνίας διασύνδεσης της σιδηροδρομικής ζώνης, να ορίσει ~ 30% της παραγωγικής της ικανότητας για περιστρεφόμενη εφεδρεία- μέρος αυτής της εφεδρείας παρέχεται από μια υδροηλεκτρική εγκατάσταση στη λίμνη Bradley. Οι φυσικοί περιορισμοί στη λίμνη Bradley έχουν ως αποτέλεσμα χρόνο κατανομής για την υδροηλεκτρική αυτή ικανότητα περίπου 1 λεπτό ή περισσότερο. Ο χρόνος αυτός είναι πολύ μεγάλος για να αποτραπεί η πρόσθετη αποκοπή φορτίου κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος όπως η διακοπή λειτουργίας μιας γεννήτριας, η οποία θα οδηγούσε σε αστάθεια συχνότητας στο σύστημα, με αποτέλεσμα την προγραμματισμένη αποκοπή φορτίου. Το σχεδιαζόμενο σύστημα SMES θα αποστέλλει άμεσα ~ 30 MW για περίοδο ~ 1 λεπτού, το οποίο θα παρέχει επαρκή χρόνο για την αύξηση της υδροηλεκτρικής ισχύος και τη θέση της σε λειτουργία ώστε να αποτραπεί περαιτέρω αποκοπή φορτίου. Όπως έχει σχεδιαστεί, το SMES θα

αποθηκεύει 1800 MJ σε ένα σωληνοειδές χαμηλής κλίσης διαμέτρου σχεδόν 7 m, χρησιμοποιώντας έναν σταθεροποιημένο με αλουμίνιο αγωγό Nbsingle bondTi που λειτουργεί σε "κρυσταθερή ψύξη" (Huang et al., 1995).

Αρκετές αμερικανικές εταιρείες παράγουν μικρά συστήματα SMES, τα λεγόμενα micro-SMES, κυρίως για να παρέχουν βελτιώσεις στην ποιότητα ισχύος σε επιλεγμένους πελάτες και όχι ως λύσεις δικτύου ή δικτύου. Αυτές οι μονάδες ~ 1 MW με αποθηκευμένη ενέργεια μερικών MJ παράγονται εμπορικά από την Superconducting, Inc. (SI), του Madison, Wisconsin, και από την IGC του Latham, New York. Η SI και η IGC έχουν προμηθεύσει συστήματα micro-SMES στην Πολεμική Αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (USAF) στο πλαίσιο ενός προγράμματος για την παροχή δυνατότητας αδιάλειπτης τροφοδοσίας και κλιματισμού ισχύος, κυρίως για τη σταθεροποίηση της τάσης, σε επιλεγμένα κέντρα ελέγχου της USAF. Επί του παρόντος, αυτή η αγορά "ποιότητας ισχύος" εξυπηρετείται επίσης από συστήματα αποθήκευσης μπαταριών ή σφονδύλων, ιδίως στην Ιαπωνία και τη Γερμανία. Εκτός των Ηνωμένων Πολιτειών δεν υπάρχει ανάλογη δραστηριότητα για την εμπορική αξιοποίηση των micro-SMES.

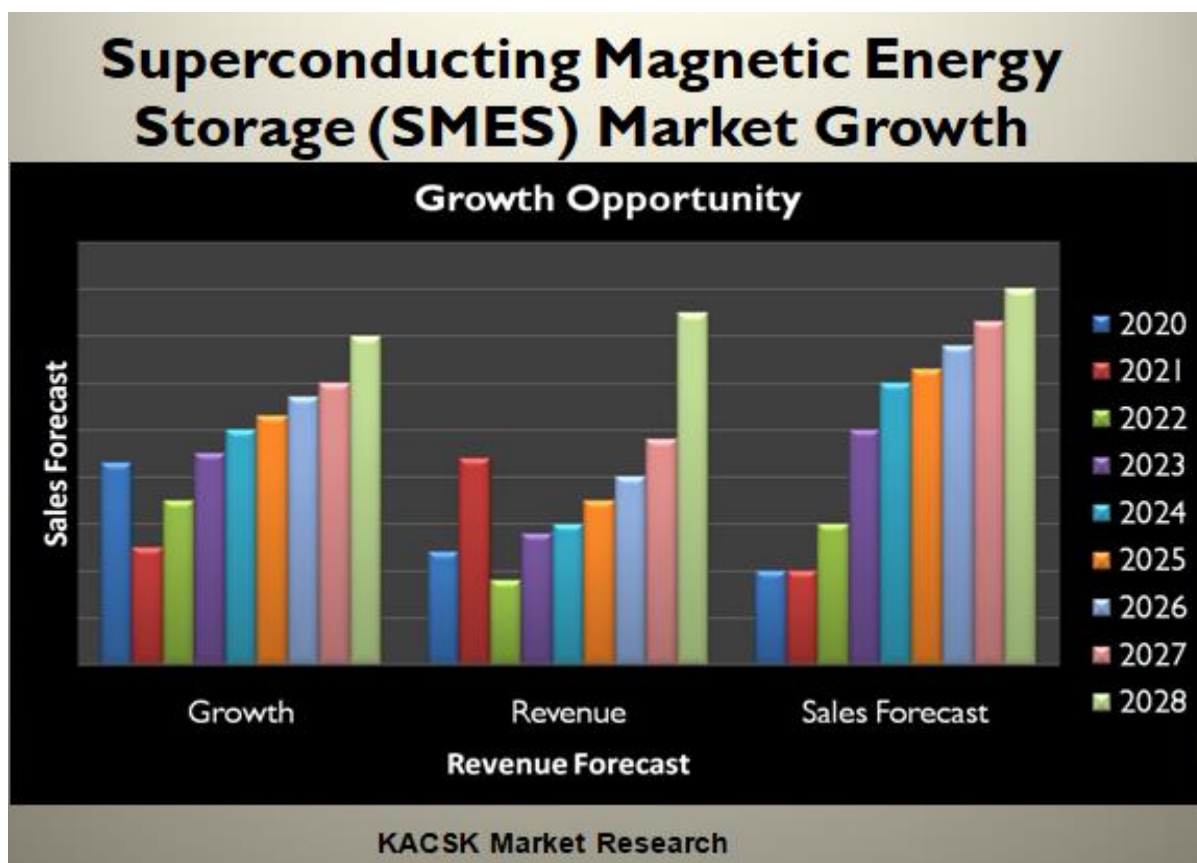
Η πιο ενεργή προσπάθεια για SMES στη Γερμανία πραγματοποιείται στο εργαστήριο Forschungs Zentrum Karlsruhe (FZK). Το FZK κατασκευάζει ένα SMES 250 kJ με τοροειδές πεδίο για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος ποιότητας ισχύος λόγω της συχνής εκκίνησης μεγάλων κινητήρων σε ένα πριονιστήριο. Η ανάλυση δείχνει ότι ένα σύστημα SMES θα ήταν ιδανικό για τη μείωση αυτού του προβλήματος τρεμοπαίγματος, λόγω της ικανότητας ταχείας απόκρισης. Το FZK διερευνά επίσης στο εργαστήριο Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) τη χρήση του SMES ως πηγής παλμικής ισχύος για την παροχή παλμών ~ 10 GW με διάρκεια 1,0 ms σε ρυθμό 10 Hz, προκειμένου να τροφοδοτηθούν τα κλύστρα RF (Jungst, 1995).

Στη Siemens, το ενδιαφέρον για το SMES τα τελευταία χρόνια περιορίζεται κυρίως σε μελέτες σχεδιασμού και αξιολόγησης, χωρίς τρέχοντα σχέδια ανάπτυξης ή κατασκευής. Η Siemens, η RWE (η μεγαλύτερη γερμανική εταιρεία κοινής ωφέλειας) και η Preussen Electra ολοκλήρωσαν την αξιολόγηση και τον εννοιολογικό σχεδιασμό ενός SMES 2 MWh/50 MW για χρήση στην παροχή σταθεροποίησης συχνότητας στο ηλεκτρικό σύστημα. Το SMES συνεχίζει να παρουσιάζει ενδιαφέρον, αλλά πρόσφατες οικονομικές μελέτες της Siemens δείχνουν ότι μπορεί να είναι πολύ ακριβό σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης (Prescher et al., 1995).

Θεωρείται ότι η χρήση των αγωγών ρεύματος υπεραγωγού υψηλής θερμοκρασίας (HTS), οι οποίοι αποτελούν πλέον εμπορική πραγματικότητα και μπορούν να αγοραστούν από διάφορους κατασκευαστές, συμπεριλαμβανομένων των Hoechst και ASC, θα μείωνε τη διαρροή θερμότητας σε ένα σύστημα SMES. Η χρήση των αγωγών HTS για την κατασκευή ενός συστήματος

αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας υψηλού πεδίου και υψηλής πυκνότητας (SMES) προβλέπεται επίσης ως μια ενδιαφέρουσα μελλοντική εφαρμογή. Ένα SMES HTS που λειτουργεί σε 10-20 T θα απαιτούσε έναν "σύνθετο αγωγό" ικανό να μεταφέρει χιλιάδες αμπέρ με χαμηλές απώλειες εναλλασσόμενου ρεύματος για την ελαχιστοποίηση της θέρμανσης για πολλαπλούς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης.

Το Τεχνικό Πανεπιστήμιο του Μονάχου διεξάγει επίσης έρευνα για το SMES και κατασκευάζει σύστημα τοροειδούς πεδίου 1,4 MJ χρησιμοποιώντας αγωγούς υπεραγωγών χαμηλής θερμοκρασίας (LTS) (Lorenzen et al., 1995). Στην ABB στην Ελβετία, η αποθήκευση ενέργειας θεωρείται σημαντικός τομέας- έχει παρακολουθηθεί έντονα στο παρελθόν και έχει κατασκευαστεί ένα SMES LTS για πειραματική αξιολόγηση. Κατά τη διάρκεια της επίσκεψης του WTEC, ένα σημαντικό σύστημα SMES με χρήση αγωγού LTS που βρισκόταν υπό ανάπτυξη για τον ελβετικό σιδηρόδρομο είχε τερματιστεί λόγω της υλοποίησης μιας εναλλακτικής, λιγότερο δαπανηρής λύσης. Η ABB δεν είχε σχέδια για αποθήκευση SC, αλλά σκόπευε να συνεχίσει να αξιολογεί την τεχνολογία.

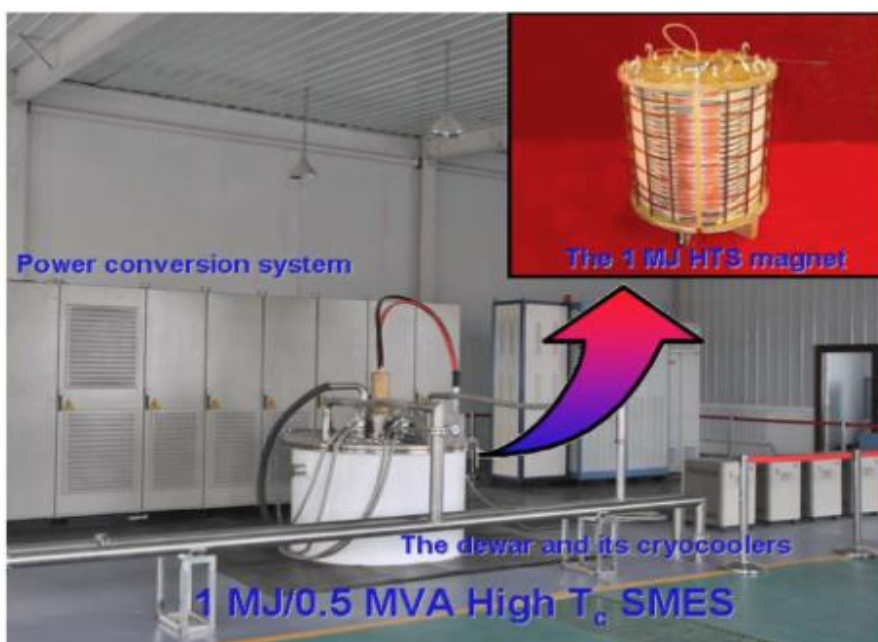


Εικόνα 4.6- Ανάπτυξη της αγοράς υπεραγωγίσιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας (SMES) (πηγή : <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.kacskmarketresearch.com%2Fresearch-report%2Fsuperconducting-magnetic-energy-storage-smes-market%2F&psig=AOvVaw3HLSjKbsNoMtRrwIH7ldiC&ust=1667734131276000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCKjc7X3lvsCFQAAAAAdAAAAABAE>)

Υπάρχοντα έργα συστήματος SMES

Τα συστήματα SMES έχουν αναπτυχθεί σε όλο τον κόσμο και είναι λειτουργικά. Ορισμένα από αυτά αναφέρονται ως εξής:

Τα συστήματα που έχουν κατασκευαστεί σε όλη την Ευρώπη. Ένα σημαντικό έργο για τη βελτίωση της εφαρμογής των SMES σε επίπεδο δικτύου χρηματοδοτείται από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ (DOE), στο πλαίσιο του Οργανισμού Προηγμένων Ερευνητικών Έργων για την Ενέργεια (ARPA-E). Στόχος τους είναι να αναπτύξουν σύστημα SMES εμπορικής κλίμακας 1-2 MWh, το οποίο θα είναι οικονομικά ανταγωνιστικό σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου. Ομάδα: Εθνικό Εργαστήριο Brookhaven, Πανεπιστήμιο του Χιούστον, ABB και SuperPower 5,3 εκατ. δολάρια, εκ των οποίων 4,2 εκατ. δολάρια από το DOE. Μια μονάδα SMES 30 MJ (8,4 kWh) με μετατροπέα 10 MW έχει εγκατασταθεί και τεθεί σε λειτουργία στον υποσταθμό της Bonneville Power Administration (BPA) στην Tacoma της Ουάσιγκτον. Το σύστημα αυτό, το οποίο είναι ικανό να απορροφά και να απελευθερώνει έως και 10 MJ ενέργειας σε συχνότητα 0,35 Hz. Το 2000, προκειμένου να ενισχυθεί η σταθερότητα του δικτύου, η American Superconductor Company εγκατέστησε έξι μονάδες SMES στο δίκτυο στο βόρειο Ουισκόνσιν των ΗΠΑ. Για την παροχή υψηλής ποιότητας ενέργειας για μια πηγή συγχρότρου, εγκαταστάθηκε SMES 1,4 MVA/2,4 MJ στο Εθνικό Εργαστήριο Brookhaven (ΗΠΑ). Στη Βόρεια Καρολίνα, οι γραμμές διέλευσης και παραγωγής της Owens Corning προστατεύονται με SMES από την τάση. Στη Νότια Αφρική, ένα SMES προστάτευσε μια χαρτοβιομηχανία από 72 βυθίσεις τάσης σε 11 μήνες. Στην Ιαπωνία, για την αντιστάθμιση των βυθίσεων τάσης σε ένα υγρό εγκαταστάσεις παραγωγής κρυστάλλων, ένα SMES 5 MW 7 MJ εγκαταστάθηκε το 2003.



Εικόνα 4.6- SMES 1-MJ/0,5-MVA που ενσωματώνει σύρμα Bi-2223.Υποσταθμός Βαϊγαν στην επαρχία Gansu από το 2011(πηγή :

[https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fneaman.org.il%2Fen%2FFiles%2FDr.%2520Shuki%2520Wolfus%2520-%2520Storage%2520of%2520energy%2520in%2520coils%2520on%2520superconductors.pdf&psig=AOvVaw18PGLj3y38ukKRwGOZ6DVi&ust=1667737263732000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxcFwoTCPCZvMuDI_sCFOAAAAAdAAAAABAE\)](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fneaman.org.il%2Fen%2FFiles%2FDr.%2520Shuki%2520Wolfus%2520-%2520Storage%2520of%2520energy%2520in%2520coils%2520on%2520superconductors.pdf&psig=AOvVaw18PGLj3y38ukKRwGOZ6DVi&ust=1667737263732000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxcFwoTCPCZvMuDI_sCFOAAAAAdAAAAABAE)

Πίνακας 4.5 – Εξελίξεις στο σύστημα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας (SMES).
(πηγή :

[https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S277268352200022X?token=B35AAE395C763C339DFC9D2B978D4DE363822FCFD084D10C7A1C5351743267DB6671454CE1737AFF1AB1427B9938B827&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221125162003\)](https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S277268352200022X?token=B35AAE395C763C339DFC9D2B978D4DE363822FCFD084D10C7A1C5351743267DB6671454CE1737AFF1AB1427B9938B827&originRegion=eu-west-1&originCreation=20221125162003)

Country	Company/lab	Year	Energy	Power	Coil material	Temperature (K)
USA	Bonneville Power Administration (BPA)	1982	30 MJ	11.16 MW and 9.80 MW during charge and discharge, respectively	Niobium-titanium	4.2
Germany	Superconductivity, Inc.	1988	1 MJ	730 kW	Niobium-titanium alloy	4.5
	Forschungszentrum Karlsruhe	1995	188 kJ	1 MW	NbTi/CdCuNi	4.2
USA	American Superconductor Corporation (ASC)	1997	5 kJ	-	Silver-sheathed BiPb ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O (BSCCO-2223)	25
Germany	ACCEL Instruments	2003	150 kJ	-	Silver-sheathed BiPb ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O (BSCCO-2223)	20
Israel	Bar-Ilan University	2003	1.2 kJ	20 kW	BSCCO coil	64–77
Korea	Seoul National University	2007	600 kJ	-	BSCCO-2223 wires	20
France	French National Centre for Scientific Research	2008	814 kJ	175 kW	BSCCO 2212 PIT tape	20
China	China Electric Power Research Institute	2011	6 kJ	-	BSCCO and Yttrium Barium Copper Oxide (YBCO) tapes	65–77
UK	University of Bath	2013	60 kJ	10kW	Yttrium Barium Copper Oxide (YBCO) tape	65
Italy	-	2018	500 kJ	200 kW	Cryogen-free magnesium diboride (MgB ₂) test coil	21

4.7 Δυσκολίες των συστημάτων SMES

ΥΨΗΛΟ ΚΟΣΤΟΣ

Το σύστημα SMES που χρησιμοποιεί LTS πρέπει να λειτουργεί σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Αν και η μετατροπή της ενέργειας και τα συναφή ζητήματα είναι ικανοποιητικά, αλλά η διατήρηση της συστήματος ψύξης σε αυτή τη θερμοκρασία απαιτεί τεράστιες επενδύσεις. Προκειμένου να αυξηθεί η θερμοκρασία ψύξης τα υπεραγωγίμα υλικά HTS αναπτύχθηκαν. Οι μαγνήτες HTS προσφέρουν τη δυνατότητα λειτουργίας σε σχετικά υψηλότερες θερμοκρασίες (50-70K), γεγονός που θα μείωνε το κόστος λειτουργίας του κρυογονικού ψυγείου. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας καθιστούν επίσης το σύστημα σταθερό και βιώσιμο. Για το ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται σήμερα υγρό άζωτο, το οποίο είναι επίσης λιγότερο ακριβό από το υγρό ήλιο. Αλλά όπως μπορούμε να

δούμε ότι η διαδικασία ψύξης είναι μόνο ένα μέρος του συνόλου διάταξης και στην περίπτωση μεγάλων συστημάτων, το κόστος δεν μειώνεται σημαντικά.

ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον υπεραγώγιμο μαγνήτη μπορεί να απελευθερωθεί σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Η ισχύς ανά μονάδα μάζας δεν έχει θεωρητικό όριο και μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή (100 MW/kg), οπότε το σύστημα πρέπει να περιέχεται σε μια άριστη ηλεκτρική απομόνωση. Και πάλι, σε περίπτωση αστοχίας του πηνίου, η ενέργεια πρέπει να απελευθερωθεί διαφορετικά το πηνίο θα καταστραφεί. Λόγω της απελευθέρωσης, το σύστημα μετατροπής και ολόκληρη η διάταξη μπορεί επίσης να υποστεί αστοχία συστήματος. Ορισμένα εννοιολογικά σχέδια του συστήματος SMES προτείνουν την απορρόφηση της ενέργειας από το υπεραγώγιμο καλώδιο και τη δομή στήριξης σε περίπτωση αστοχίας του συστήματος.

ΜΕΓΑΛΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΠΡΟΨΥΞΗΣ

Καθώς η θερμοκρασία λειτουργίας ενός συστήματος SMES είναι πολύ χαμηλή, χρειάζονται περίπου τέσσερις μήνες για να ψύξη του υπεραγώγιμου μαγνήτη από τη θερμοκρασία δωματίου στη θερμοκρασία λειτουργίας. Στην περίπτωση του βλάβης του πηνίου ή απελευθέρωσης ενέργειας έκτακτης ανάγκης, απαιτείται ο ίδιος χρόνος για την ανάκτηση.

4.8 Απόδοση των συστημάτων SMES

Η συνολική απόδοση μιας μονάδας SMES εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Κατ' αρχήν, μπορεί να φθάσει το 95 % σε πολύ μεγάλους συστήματα. Για μικρά συστήματα ποιότητας ισχύος, από την άλλη από την άλλη πλευρά, η συνολική απόδοση του συστήματος είναι μικρότερη. Ευτυχώς, σε αυτές τις εφαρμογές, η απόδοση δεν αποτελεί συνήθως σημαντικό οικονομικό παράγοντα. Το πηνίο SMES αποθηκεύει ενέργεια με χωρίς καμία απολύτως απώλεια, ενώ το ρεύμα είναι σταθερό. Υπάρχουν, ωστόσο, κάποιες απώλειες που συνδέονται με την αλλαγή του ρεύματος κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση και την επακόλουθη αλλαγή του μαγνητικού πεδίου. Γενικά, οι απώλειες αυτές, οι οποίες είναι αναφέρονται ως απώλειες δινορρευμάτων και υστέρησης, είναι επίσης μικρές. Δυστυχώς, άλλα μέρη του συστήματος SMES μπορεί να μην είναι όσο το ίδιο το πηνίο. Συγκεκριμένα, υπάρχουν δύο δυνητικά σημαντικές, συνεχείς απώλειες ενέργειας, οι οποίες είναι ειδικές για την εφαρμογή:

1) Η πρώτη σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα SMES αποθηκεύουν την ενέργεια. Το ρεύμα στο πηνίο πρέπει να ρέει συνεχώς, και κυκλοφορεί μέσω του PCS. Τόσο οι διασυνδεδετικοί αγωγοί όσο και τα εξαρτήματα του PCS με βάση το πυρίτιο είναι αντιστατικά. Συνεπώς, υπάρχουν συνεχείς απώλειες αντίστασης στο PCS. Αυτό διαφέρει από τις μπαταρίες, για παράδειγμα, όπου υπάρχει ρεύμα στο PCS μόνο κατά τη διάρκεια της φόρτισης και εκφόρτισης.

2) Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του ψυγείου που απομακρύνει τη θερμότητα που ρέει στο πηνίο από το δωμάτιο θερμοκρασία μέσω: α) της αγωγιμότητας κατά μήκος του μηχανικού στηρίξεων, β) ακτινοβολία μέσω του κενού συγκράτησης δοχείο, και γ) κατά μήκος των αγωγών ρεύματος που εκτείνονται από το θερμοκρασία περιβάλλοντος έως τη θερμοκρασία λειτουργίας του πηνίου. Η συνολική απόδοση μιας εγκατάστασης SMES εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι ημερήσιες (ισοστάθμιση φορτίου) μονάδες SMES που έχουν σχεδιαστεί πριν από 20 χρόνια υπολογίζονταν ότι είχαν αποδοτικότητα 90 έως 92%. Οι εφαρμογές ποιότητας ισχύος και σταθερότητας του συστήματος δεν απαιτούν υψηλή απόδοση, επειδή το κόστος συντήρησης ισχύος είναι πολύ μικρότερο από τις πιθανές απώλειες για τον χρήστη λόγω μίας διακοπής ρεύματος. Οι προγραμματιστές σπάνια αναφέρουν αποδόσεις για τέτοια συστήματα, αν και οι απαιτήσεις ψύξης συνήθως καθορίζονται από πριν.

4.9 Προτάσεις για μελλοντική ανάπτυξη της τεχνολογίας των SMES

Το SMES είναι η μόνη τεχνολογία που βασίζεται στην υπεραγωγιμότητα, η οποία είναι εφαρμόσιμη στις ηλεκτρικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και είναι εμπορικά διαθέσιμη σήμερα. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου κόστους και της μεγάλης επένδυσης των συστημάτων SMES, οι περισσότερες από τις αναφερόμενες μελέτες υλοποιούνται μέσω προσομοιώσεων σε υπολογιστές ή σε εργαστήρια. Υπάρχουν μόνο λίγες περιπτώσεις πρακτικής εφαρμογής. Ως εκ τούτου, με την πρόοδο της τεχνολογίας και τη μείωση του κόστους των υπεραγωγιμότητας και των στοιχείων ισχύος, προτείνεται ότι πρέπει να ξεκινήσουν περισσότερες προσπάθειες για την πρακτική εφαρμογές των SMES σε συστήματα ισχύος. Γενικά, οι μικρές ονομαστικές τιμές των συστημάτων SMES εφαρμόζονται σε για την αντιστάθμιση των κυμαινόμενων φορτίων, για την παροχή προστασίας των κρίσιμων φορτίων, για την παροχή εφεδρικής τροφοδοσίας, για την αντιστάθμιση ασυμμετρίας των ρευμάτων και των τάσεων από τα φορτία, και για να βελτίωση των επιδόσεων των FACTS. Ενώ, οι μεγάλες ονομαστικές τιμές των SMES χρησιμοποιούνται για την απόσβεση των ταλαντώσεων του συστήματος, για την για τη βελτίωση της σταθερότητας της τάσης, τη μείωση της ACE, την παροχή φορτίου ισοστάθμιση του φορτίου και παροχή εφεδρείας περιστροφής.

Με βάση την τρέχουσα τεχνολογία, τα συστήματα SMES είναι μικρές ονομαστικές τιμές του ενός. Ως εκ τούτου, προτείνεται η ανάπτυξη αποδοτικών στρατηγικών ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τη λογική διεύθυνση μικρών ονομαστικές τιμές των συστημάτων SMES σε διάφορες τοποθεσίες ή

για τη βελτιστοποίηση κατανομές αυτών των μικρών διαβαθμίσεων των συστημάτων SMES, ώστε να ενισχυθεί η σταθερότητα ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και να βελτιωθεί η ισχύς ποιότητας ολόκληρου του συστήματος. Επιπλέον, οι μεγάλες ονομαστικές τιμές και οι χαμηλές αρμονικές των συστημάτων PCS θα πρέπει να αναπτυχθούν μέσω της αλλαγής των τοπολογιών των κυκλωμάτων και των μεθόδων ελέγχου του PCS για μεγάλες ονομαστικές τιμές των SMES συστημάτων, σε περαιτέρω μελέτες. Προτείνεται επίσης η ανάπτυξη συστημάτων SMES με πολλούς σκοπούς στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της ενσωμάτωσης διαφόρων στρατηγικών ελέγχου και της βελτιστοποίησης των διαμορφώσεων PCS. Αυτό θα βελτιώσει την αναλογία των επιδόσεων έναντι του κόστους για συστήματα SMES, κατά συνέπεια, θα επιταχύνει την πρακτική εφαρμογές των SMES στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των επιδόσεων των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης στις κατηγορίες που επιλέχθηκαν, πρέπει αρχικά να αναλυθεί ένας κατάλογος κριτηρίων σύμφωνα με τα οποία θα γίνει η σύγκριση των μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και να καταλήξουμε στα αποτελέσματα.

5.1 Χαρακτηριστικά των τεχνικών αποθήκευσης ενέργειας

Οι τεχνικές αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με αυτά τα κριτήρια:

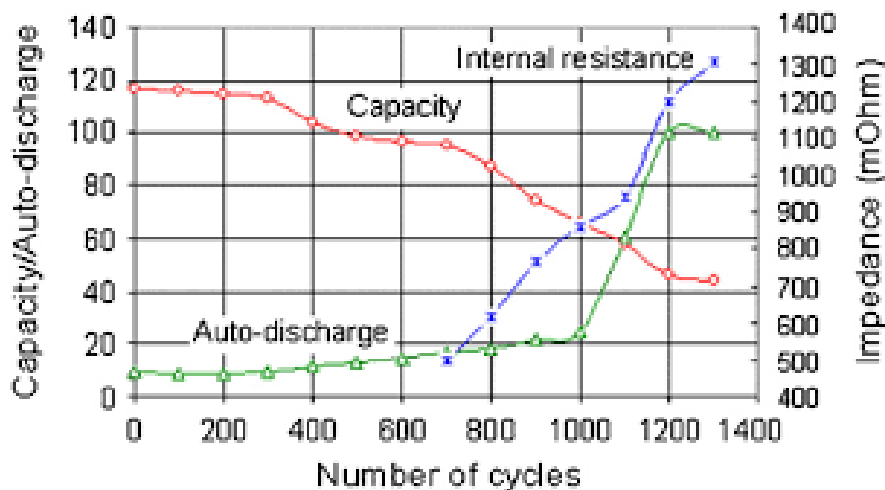
- Το είδος της εφαρμογής: μόνιμη ή φορητή.
- Διάρκεια αποθήκευσης: βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη.
- Το είδος της παραγωγής: μέγιστη απαιτούμενη ισχύς.

Είναι επομένως απαραίτητο να αναλυθούν τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά (τεχνικά και οικονομικά) των συστημάτων αποθήκευσης προκειμένου να καθοριστούν τα κριτήρια σύγκρισης για την επιλογή της καλύτερης τεχνολογίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης στα οποία βασίζονται τα κριτήρια επιλογής είναι τα ακόλουθα.

Χωρητικότητα αποθήκευσης

Είναι η ποσότητα της διαθέσιμης ενέργειας στο σύστημα αποθήκευσης μετά τη φόρτιση. Η εκφόρτιση είναι συχνά ατελής. Για το λόγο αυτό, ορίζεται με βάση τη συνολική αποθηκευμένη ενέργεια, W_{st} (Wh), η οποία είναι ανώτερη από εκείνη που ανακτάται πραγματικά (λειτουργικά), σημειωμένη W_{ut} (Wh). Η ωφέλιμη ενέργεια, που περιορίζεται από το βάθος εκφόρτισης, αντιπροσωπεύει το όριο του βάθους εκφόρτισης (κατάσταση ελάχιστης φόρτισης). Σε συνθήκες

ταχείας φόρτισης ή εκφόρτισης, η απόδοση επιδεινώνεται και η ανακτήσιμη ενέργεια μπορεί να είναι πολύ χαμηλότερη από τη χωρητικότητα αποθήκευσης. Από την άλλη πλευρά, η αυτοεκφόρτιση είναι ο εξασθενητικός παράγοντας υπό καθεστώς πολύ αργής λειτουργίας. Αυτά φαίνονται και στο ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 5.1(1)-Μεταβολή της ενεργειακής χωρητικότητας, της αυτοεκφόρτισης και της εσωτερικής αντίστασης μιας μπαταρίας υδριδίου νικελίου-μετάλλου (6V, 950 mA) με τον αριθμό των κύκλων (πηγή : https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcOHYZIINmG7i420q0r8YW0G28Gqh_mvFaYzOg&usqp=CAU)

Χρόνος εκφόρτισης

Πρόκειται για τη διάρκεια εκφόρτισης μέγιστης ισχύος, $t(s) \approx \frac{1}{4} \frac{W_{st}}{P_{max}}$. Εξαρτάται από το βάθος της εκφόρτισης και τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, σταθερής ισχύος ή όχι. Είναι ένα χαρακτηριστικό της επάρκειας του συστήματος για ορισμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, για ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης, η αποθηκευτική ικανότητα εξαρτάται από την μάζα του νερού και το ύψος του καταρράκτη, ενώ η μέγιστη ισχύς καθορίζεται από την το μέγεθος των αγωγών και την ισχύ των αναστρέψιμων μονάδων στροβίλου-ηλεκτρικής μηχανής. Η δυσκολία διαχωρισμού των διαστάσεων ισχύος και ενέργειας του συστήματος το καθιστά δύσκολο στην επιλογή της βέλτιστης σταθεράς χρόνου για τις περισσότερες τεχνολογίες αποθήκευσης.

Απόδοση

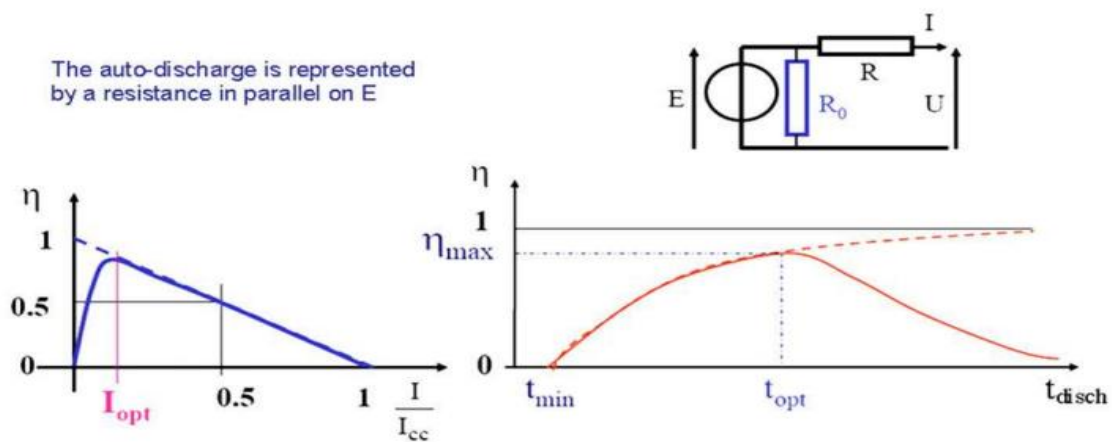
Είναι ο λόγος μεταξύ της απελευθερούμενης ενέργειας και της αποθηκευμένης ενέργειας, $Z \approx \frac{1}{4} \frac{W_{ut}}{W_{st}}$. Αυτός ο ορισμός είναι συχνά υπεραπλουστευμένος επειδή βασίζεται σε ένα μόνο σημείο λειτουργίας. Ωστόσο, τα συστήματα έχουν απώλειες φόρτισης, χωρίς φορτίο αυτοεκφόρτισης. Ο ορισμός της απόδοσης πρέπει επομένως να βασίζεται σε έναν ή περισσότερους ρεαλιστικούς κύκλους για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Στιγμιαία ισχύς είναι καθοριστικός παράγοντας της

απόδοσης. Για να είναι το σύστημα αποθήκευσης πραγματικά ανταγωνιστικό, πρέπει να έχει καλή συνολική απόδοση. Αυτό σημαίνει ότι, για βέλτιστη λειτουργία, η αλυσίδα μεταφοράς ενέργειας πρέπει να έχει περιορισμένες απώλειες όσον αφορά τη μεταφορά ενέργειας και την αυτοεκφόρτιση. Αυτό το μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας αποτελεί ουσιαστικό στοιχείο για την καθημερινή εξισορρόπηση του φορτίου του δικτύου εφαρμογές (Σχ. 5.1(1)).

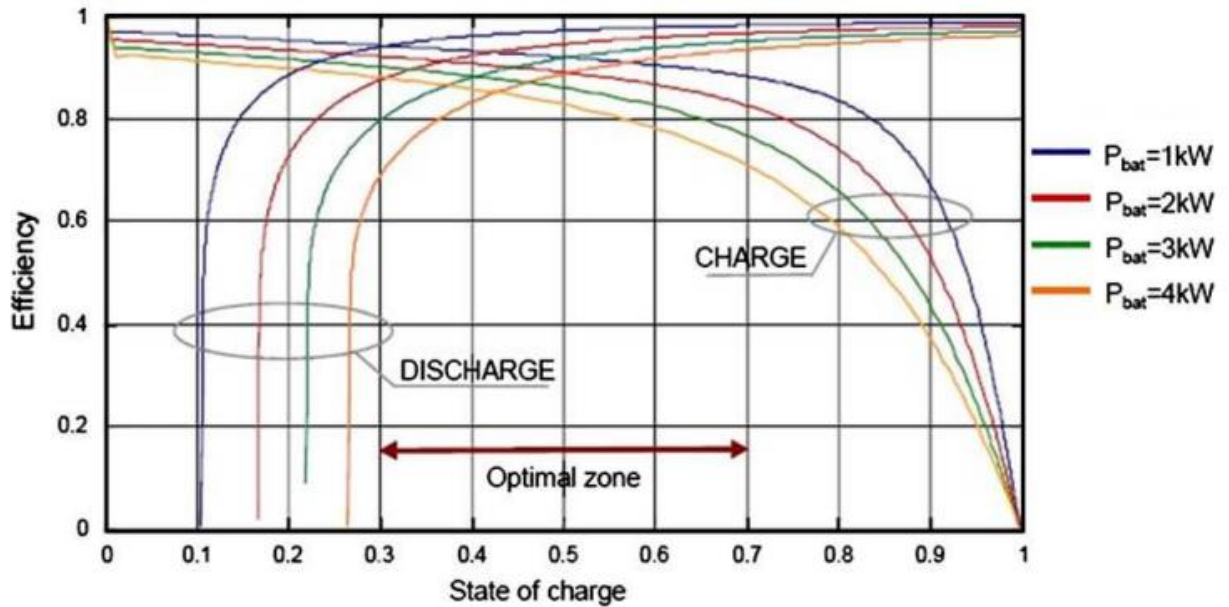
Το Σχ. 5.1(2) απεικονίζει με απλοποιημένο τρόπο την ύπαρξη βέλτιστου χρόνου εκφόρτισης και μέγιστης απόδοσης. Για τα πραγματικά συστήματα αποθήκευσης, τα αποτελέσματα αυτά είναι πιο σύνθετα, δεδομένου ότι τα στοιχεία του απεικόνισης ποικίλλουν ανάλογα με το σημείο λειτουργίας και κυρίως με την κατάσταση φόρτισης (Σχ. 5.1(3)).

Αντοχή (ικανότητα ανακύκλωσης)

Αυτή η ενότητα αναφέρεται στον αριθμό των φορών που η μονάδα αποθήκευσης μπορεί να απελευθερώσει το ενεργειακό επίπεδο για το οποίο σχεδιάστηκε μετά από κάθε επαναφόρτιση, εκφρασμένο ως μέγιστος αριθμός κύκλων N (ένας κύκλος αντιστοιχεί σε μία φόρτιση και μία εκφόρτιση).



Εικόνα 5.1(2)-Διαγράμματα που αναπαριστούν την επίδραση του ρεύματος ή του χρόνου εκφόρτισης, καθώς και την επίδραση της αυτοεκφόρτισης σε στην απόδοση του ηλεκτροχημικού συσσωρευτή. {Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν σε ένα μοντέλο χωρίς αυτοεκφόρτιση. Αντίσταση} (I: πηγή ρεύματος, ICC: ρεύμα βραχυκύκλωσης) (πηγή : [Energy storage systems Characteristics a.pdf](#))

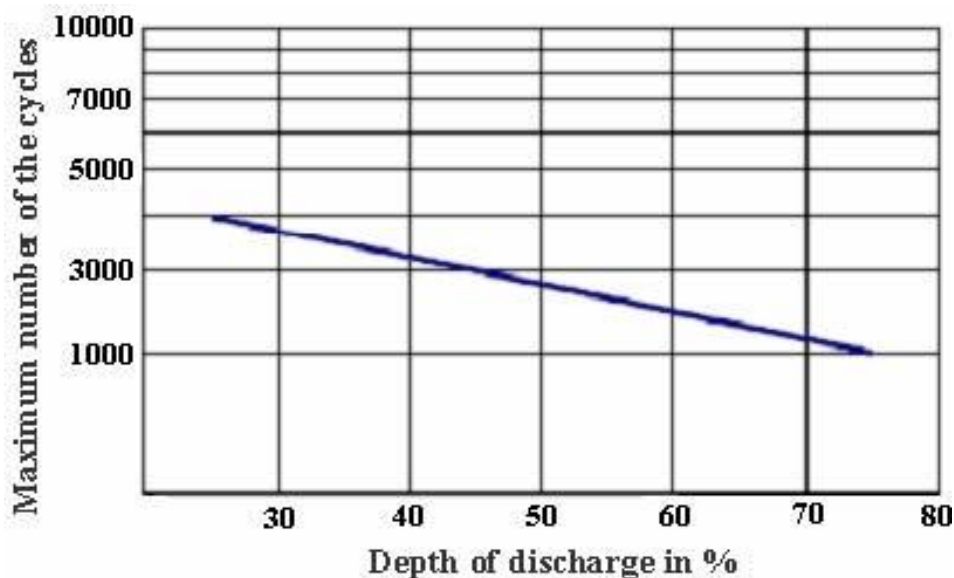


Εικόνα 5.1(3)-Απόδοση ισχύος μιας μπαταρίας μολύβδου {48 V-310 Ah (15 kWh/10 h εκφόρτισης)} (πηγή : [Energy storage systems Characteristics a.pdf](#))

Όλα τα συστήματα αποθήκευσης υπόκεινται σε κόπωση ή φθορά λόγω χρήσης. Αυτή είναι συνήθως η κύρια αιτία γήρανσης, πριν από τη θερμική υποβάθμιση. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος αποθήκευσης που λαμβάνει υπόψη την αντοχή της μονάδας σε όρους κύκλων θα πρέπει να έχει πρωταρχική σημασία κατά την επιλογή ενός συστήματος. Ωστόσο, οι πραγματικές διαδικασίες κόπωσης είναι συχνά πολύπλοκες και η ικανότητα κύκλων δεν είναι πάντα καλά καθορισμένη. Σε όλες τις περιπτώσεις, συνδέεται στενά με το εύρος των κύκλων (Σχ. 5.1(4)) και/ή με τη μέση κατάσταση φόρτισης. Επίσης, οι κύκλοι γενικά ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό, πράγμα που σημαίνει ότι η ποσοτικοποίηση του N είναι λεπτή και οι τιμές που δίνονται αντιπροσωπεύουν τάξεις μεγέθους.

Αυτονομία

Αναφέρεται στο μέγιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το σύστημα μπορεί να απελευθερώνει συνεχώς ενέργεια. Ορίζεται από τον λόγο μεταξύ της ενεργειακής χωρητικότητας (αποκαταστάσιμη ενέργεια) και της μέγιστης ισχύος εκφόρτισης, $\alpha = W_{ut}/P_d$. Η αυτονομία ενός συστήματος εξαρτάται από τον τύπο της αποθήκευσης και το είδος της εφαρμογής. Για μικρά συστήματα (μερικών kWh) σε απομονωμένη περιοχή που βασίζονται σε διαλείπουσα ανανεώσιμη ενέργεια, η αυτονομία αποτελεί κρίσιμο κριτήριο.



Εικόνα 5.1(4)-Εξέλιξη της ικανότητας ανακύκλωσης ως συνάρτηση του βάθους εκφόρτισης για μια μπαταρία μολύβδου-οξέος (πηγή : <https://api.intechopen.com/media/chapter/42273/media/image9.jpeg>)

Κόστη

Όπως κάθε άλλη επένδυση, ένα σύστημα αποθήκευσης είναι ένα ενδιαφέρον εγχείρημα όταν τα συνολικά κέρδη υπερβαίνουν τα συνολικά έξοδα. Το επενδεδυμένο κεφάλαιο και τα λειτουργικά έξοδα (συντήρηση, απώλεια ενέργειας κατά τη διάρκεια κύκλων, γήρανση) είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για όλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Τα συστήματα χαμηλής απόδοσης με χαμηλή ικανότητα ανακύκλωσης απαιτούν γενικά την χαμηλότερη αρχική επένδυση. Επομένως, είναι ζωτικής σημασίας να πραγματοποιηθεί ανάλυση της εκτιμώμενης διάρκειας ζωής ολόκληρου του συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της μονάδας αποθήκευσης. Όσον αφορά τη βιώσιμη ανάπτυξη, το συνολικό κόστος καθόλη τη διάρκεια ζωής του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των υλικών, της ενέργειας και άλλων περιβαλλοντικό κόστος από την κατασκευή έως την ανακύκλωση, πρέπει να ληφθεί υπόψη. Γενικά, το κόστος επένδυσης της αποθήκευσης υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο: $C = C_1 W_{ut} + C_2 P_d$. Το λειτουργικό κόστος, κατανεμημένο στη διάρκεια ζωής του συστήματος, είναι υποτίθεται ανάλογο με το κόστος επένδυσης (της τάξης του 40% της επένδυσης). Για 20 έτη για συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για ένα συνολικό κόστος $C_t = (aC_1 + C_2)P_d$. Εδώ a είναι η αυτονομία.

Σκοπιμότητα και προσαρμογή στην πηγή παραγωγής.

Για να είναι ιδιαίτερα αποδοτικό, ένα σύστημα αποθήκευσης πρέπει να είναι στενά προσαρμοσμένο στον τύπο της εφαρμογής (χαμηλή έως μεσαία ισχύς σε απομονωμένες περιοχές, σύνδεση με δίκτυο κ.λπ.) και στον τύπο παραγωγής (μόνιμη, φορητή, ανανεώσιμη κ.λπ.) (Σχήμα 5.1(5)) που πρόκειται να υποστηρίξει. Επιπλέον πρέπει να εναρμονίζεται με το δίκτυο.

Αυτοεκφόρτιση

Πρόκειται για το τμήμα της ενέργειας που είχε αρχικά αποθηκευτεί και το οποίο έχει διαλυθεί κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου χρονικού διαστήματος μη χρήσης.

Πυκνότητες μάζας και όγκου της ενέργειας

Αντιπροσωπεύουν τα μέγιστα ποσά ενέργειας που συσσωρεύονται ανά μονάδα μάζας ή όγκου της μονάδας αποθήκευσης και καταδεικνύουν τη σημασία της μάζας και του όγκου για την ορισμένες εφαρμογές (ιδίως για την πυκνότητα μάζας της ενέργειας σε φορητές εφαρμογές, αλλά λιγότερο για μόνιμες εφαρμογές).

Εξοπλισμός παρακολούθησης και ελέγχου

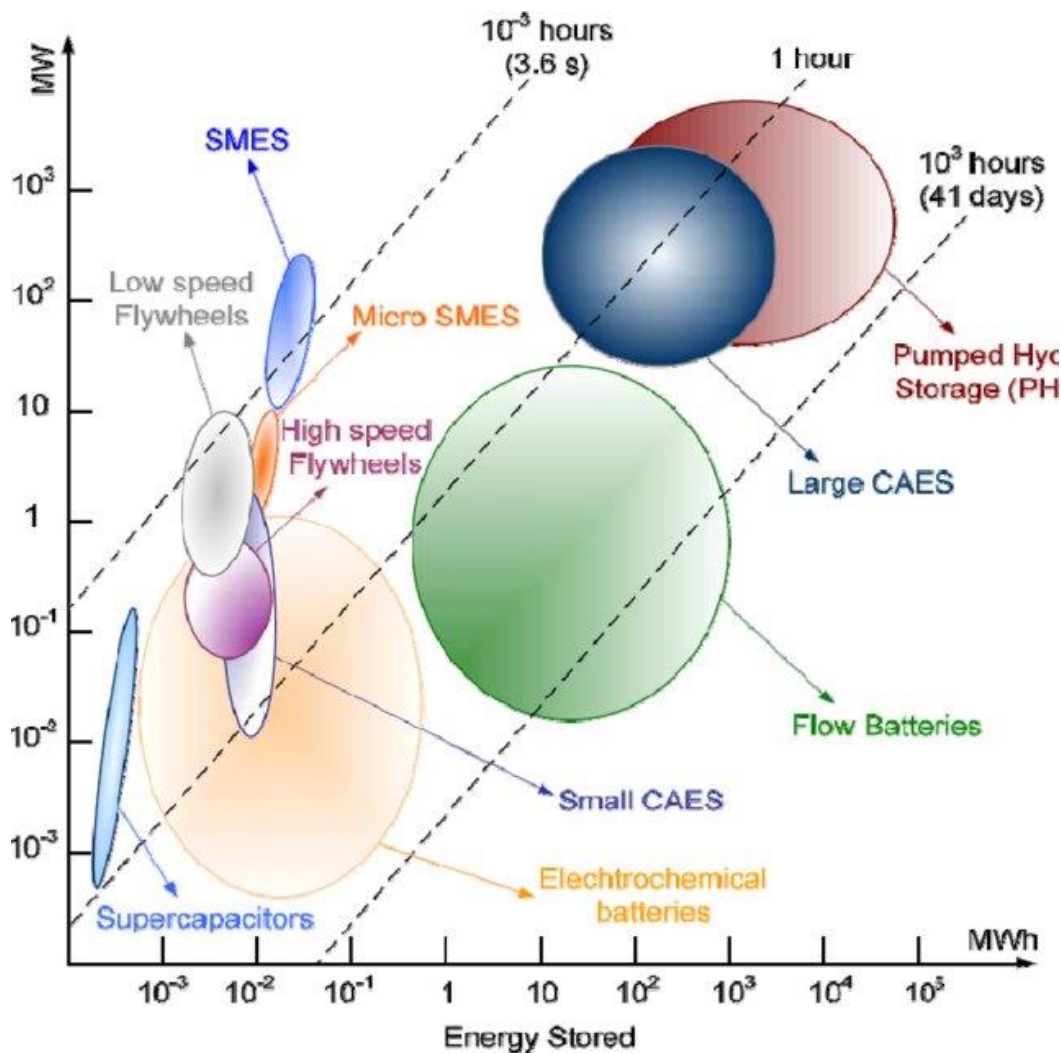
Ο εξοπλισμός αυτός, τόσο για την ποιότητα όσο και για την ασφάλεια των επιπέδων αποθήκευσης, έχει επιπτώσεις στην προσβασιμότητα και τη διαθεσιμότητα της αποθηκευμένης ενέργειας.

Λειτουργικοί περιορισμοί

Ειδικά σε σχέση με την ασφάλεια (εκρήξεις, απόβλητα, έκρηξη σφονδύλου κ.λπ.) ή άλλες συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία, πίεση κ.λπ.), μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή μίας τεχνολογίας αποθήκευσης σε συνάρτηση με τις ενεργειακές ανάγκες.

Αξιοπιστία

Η αξιοπιστία του συστήματος αποθήκευσης είναι πάντα σημαντικός παράγοντας, διότι αποτελεί εγγύηση για την εξυπηρέτηση κατά ζήτηση.



Εικόνα 5.1(5)-Πεδία εφαρμογής των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης ανάλογα με την αποθηκευμένη ενέργεια και την παραγόμενη ισχύ (πηγή :

https://www.researchgate.net/publication/272647807/figure/fig1/AS:398426803064833@1472003760376/Energy-storage-systems-with-different-storage-capacity-9_Q640.jpg)

Περιβαλλοντική διάσταση

Αν και η παράμετρος αυτή δεν αποτελεί κριτήριο της χωρητικότητας του συστήματος αποθήκευσης, η περιβαλλοντική πτυχή του προϊόντος (ανακυκλώσιμα υλικά) αποτελεί ισχυρό επιχειρήμα πώλησης. Για παράδειγμα, στις Σκανδιναβικές χώρες (Σουηδία, Νορβηγία), ένα σαφές περιθώριο του πληθυσμού προτιμά να πληρώνει περισσότερα για ενέργεια παρά να συνεχίσει να ρυπαίνει τη χώρα. Αυτή είναι μια διάσταση που δεν πρέπει να αγνοηθεί.

Άλλα χαρακτηριστικά

Η ευκολία συντήρησης, ο απλός σχεδιασμός, η λειτουργική ευελιξία (αυτό είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την επιχείρηση κοινής ωφέλειας), γρήγορος χρόνος απόκρισης για την απελευθέρωση της αποθηκευμένης ενέργειας, κ.λπ. Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα

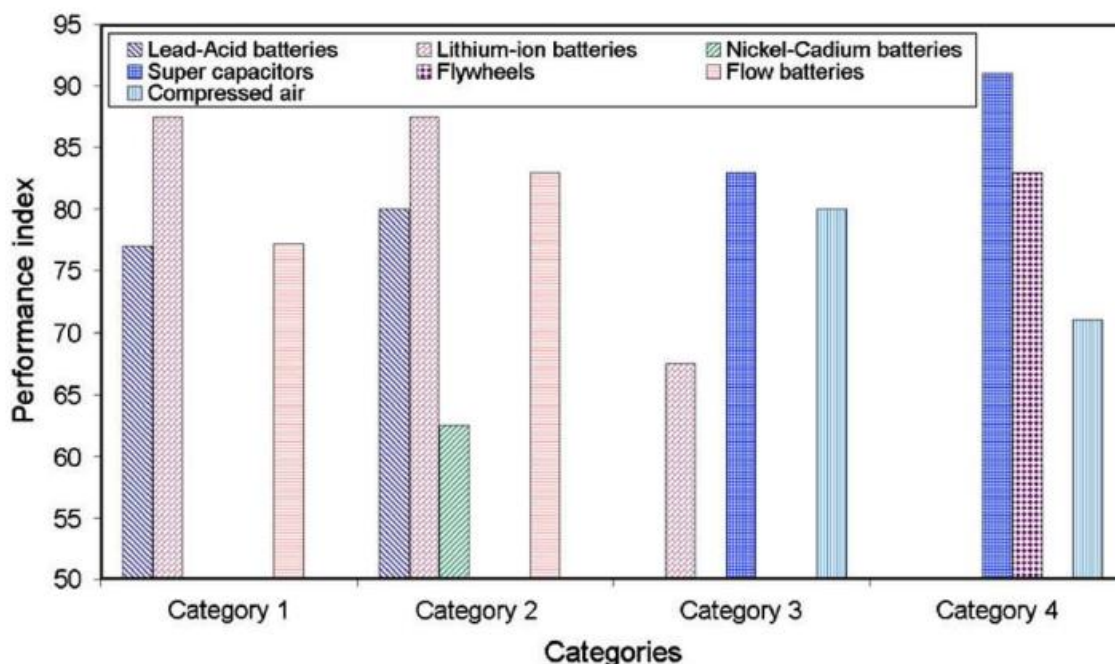
χαρακτηριστικά αυτά ισχύουν για τη συνολική αποθήκευση σύστημα: τόσο για τις μονάδες αποθήκευσης όσο και για τους μετατροπείς ισχύος.

5.2 Σύγκριση Μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των επιδόσεων των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης στις κατηγορίες που επιλέχθηκαν, αναλύθηκε προηγουμένως ένας κατάλογος κριτηρίων, όπως το κόστος, η πυκνότητα της ενέργειας, η ειδική ισχύς, η ανακυκλωσιμότητα, η ανθεκτικότητα, η ενεργειακή απόδοση κ.λπ. Τα κριτήρια αυτά μαζί επιτρέπουν τον καθορισμό ενός "δείκτη επιδόσεων" για τις τέσσερις κατηγορίες εφαρμογών:

- 1) Εφαρμογή χαμηλής ισχύος σε απομονωμένες περιοχές, ουσιαστικά για την τροφοδοσία μετατροπέων και έκτακτης ανάγκης τερματικά.
- 2) Εφαρμογή μέσης ισχύος σε απομονωμένες περιοχές (μεμονωμένα ηλεκτρικά συστήματα, πόλη τροφοδοσία).
- 3) Εφαρμογή σύνδεσης δικτύου με ισοστάθμιση αιχμής.
- 4) Εφαρμογές ελέγχου ποιότητας ισχύος.

Για τη σύγκριση των συστημάτων αποθήκευσης, το διάγραμμα του Ragone χρησιμοποιείται γενικά για την αναπαράσταση απόδοσης ως προς τον λόγο της μάζας προς την ενέργεια και την ισχύ. Αυτός ο τύπος σύγκρισης είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον για φορητές μονάδες, για τις οποίες η μάζα είναι κρίσιμη πτυχή, αλλά για τις μόνιμες μονάδες, στο πλαίσιο της επεξεργασίας ηλεκτρικής ενέργειας, το προσδόκιμο ζωής και το συνολικό κόστος (επένδυση, απώλειες ενέργειας και κόπωση κατά την κυκλοφορία) είναι τα πιο σημαντικά κριτήρια.



Εικόνα 5.2-Δείκτης απόδοσης για τις εννέα τεχνολογίες αποθήκευσης (εκτός των υδραυλικών και θερμικών) για τις τέσσερις κατηγορίες εφαρμογών (πηγή : https://www.uqar.ca/uqar/uqar-info/2016/05-mai/energy_storage_system.pdf)

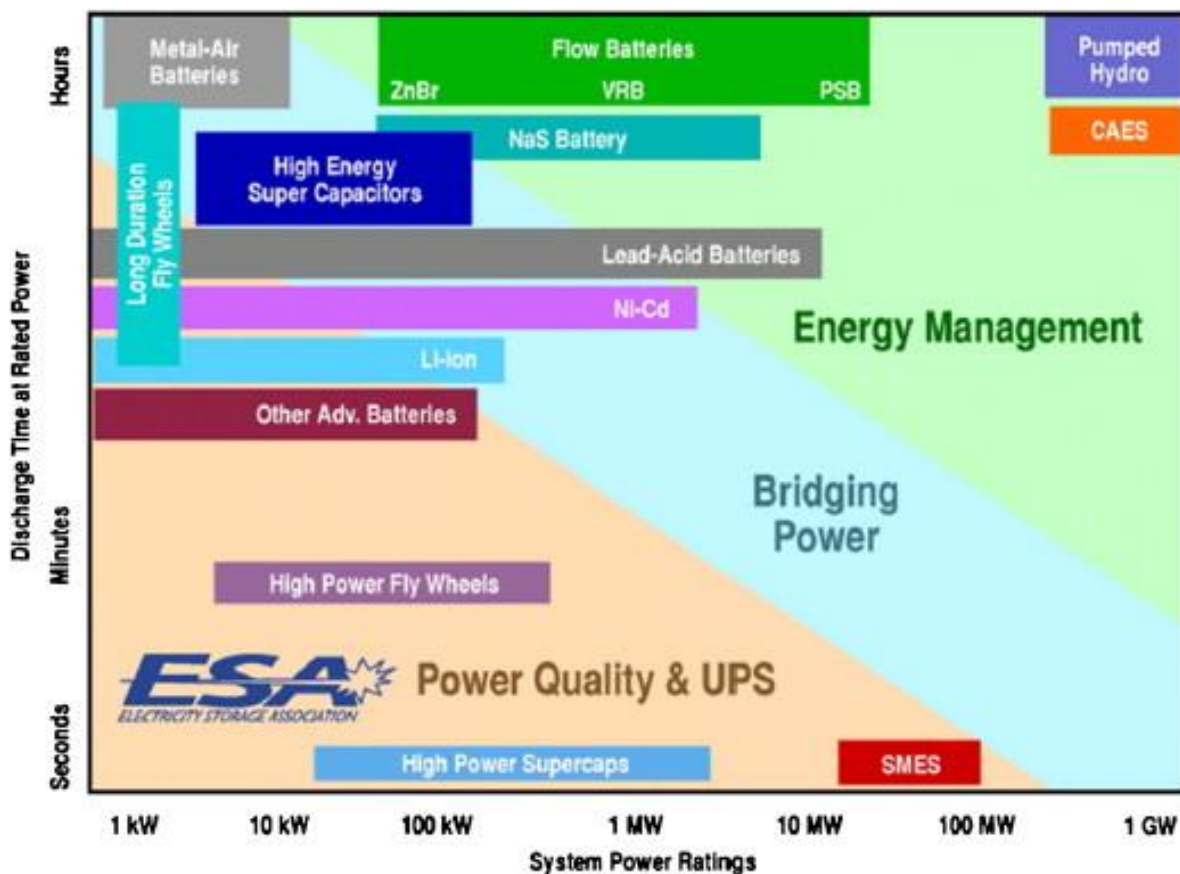
Οι παράμετροι απόδοσης των συστημάτων αποθήκευσης συχνά εκφράζονται για μια μεγάλη ποικιλία τύπων και εφαρμογών. Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν μια κατανοητή σύγκριση των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης. Η σύγκριση βασίζεται στον "δείκτη απόδοσης" που ορίζεται ως η δυνατότητα εφαρμογής της τεχνικής αποθήκευσης στη συγκεκριμένη εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στην ενότητα 5. Τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν τα τυπικά συστήματα κάθε κατηγορίας, αλλά ενδέχεται να μην καλύπτουν όλα τα διαθέσιμα προϊόντα (βλέπε Σχήμα 5.1(6)).

5.2.1 Σύγκριση ισχύος σε συνάρτηση με το πεδίο εφαρμογής

Οι εφαρμογές μόνιμης αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις βασικές λειτουργικές κατηγορίες (Σχήμα 5.2.1):

- Απαιτείται ποιότητα ισχύος: Η αποθηκευμένη ενέργεια, σε αυτές τις εφαρμογές, χρησιμοποιείται μόνο για λίγα δευτερόλεπτα ή λιγότερο για να διασφαλιστεί η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος.
- Αποθήκευση ενδιάμεσης και έκτακτης ανάγκης: Η αποθηκευμένη ενέργεια, σε αυτές τις εφαρμογές, χρησιμοποιείται για δευτερόλεπτα έως λεπτά για να εξασφαλιστεί η συνέχεια της υπηρεσίας κατά τη μετάβαση από μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια άλλη.

- Διαχείριση δικτύου: Τα συστήματα αποθήκευσης, σε αυτές τις εφαρμογές, χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση συγχρονισμού μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Μια τυπική εφαρμογή είναι η εξισορρόπηση φορτίου, η οποία συνεπάγεται την αποθήκευση ενέργειας κατά τις ώρες εκτός αιχμής (χαμηλό ενεργειακό κόστος) και τη χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής (υψηλό ενεργειακό κόστος).

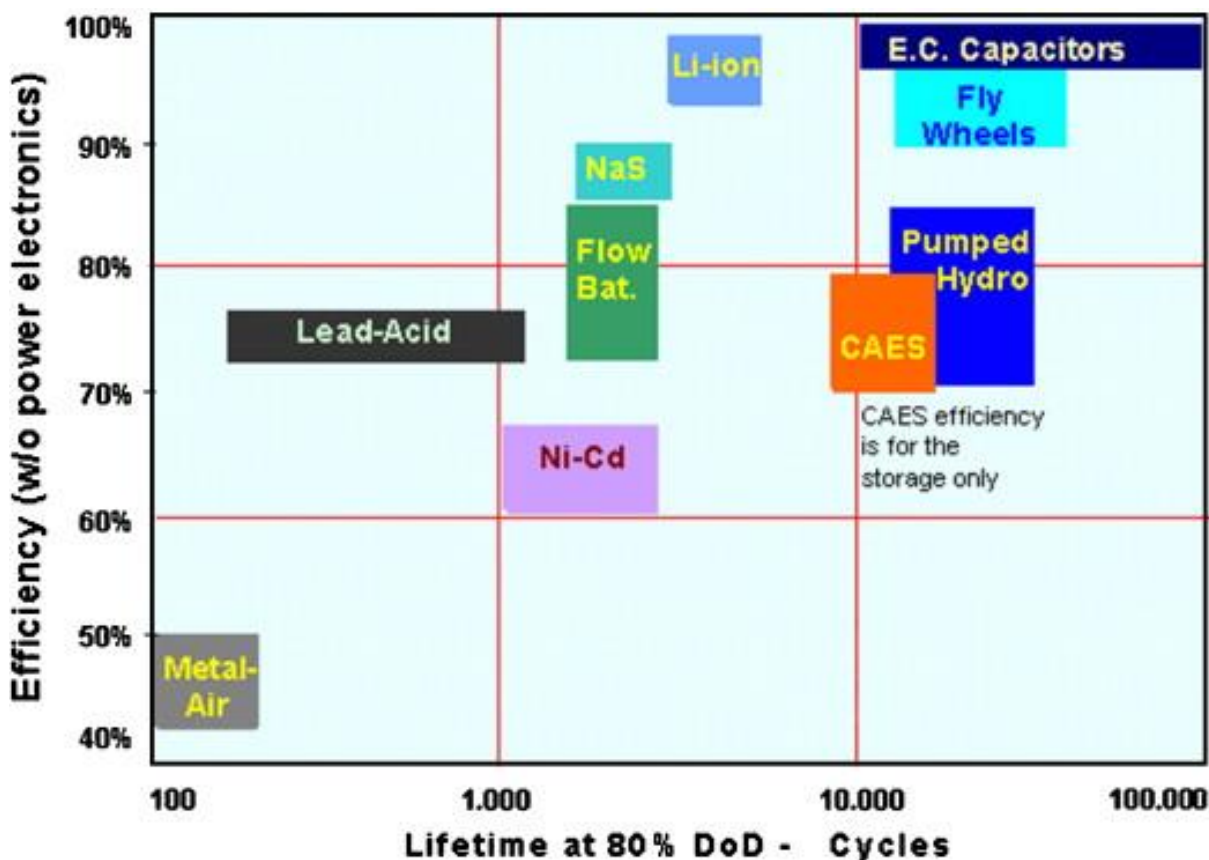


Εικόνα 5.2.1-Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με το πεδίο εφαρμογής τους (πηγή : <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032107000238-gr22.jpg>)

5.2.2 Σύγκριση της ενεργειακής απόδοσης (ανά κύκλο) των συστημάτων αποθήκευσης

Η ενεργειακή απόδοση και το προσδόκιμο ζωής (μέγιστος αριθμός κύκλων) είναι δύο σημαντικές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη, μεταξύ άλλων, πριν από την επιλογή μιας τεχνολογίας αποθήκευσης, καθώς επηρεάζουν το συνολικό κόστος αποθήκευσης. Η χαμηλή απόδοση αυξάνει το πραγματικό ενεργειακό κόστος, δεδομένου ότι μόνο ένα κλάσμα της αποθηκευμένης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η μικρή διάρκεια ζωής αυξάνει επίσης το μακροπρόθεσμο κόστος, καθώς η μονάδα αποθήκευσης πρέπει να αντικαθίσταται συχνότερα. Οι πραγματικές δαπάνες πρέπει να περιλαμβάνουν τις οικονομικές αμοιβές και τα λειτουργικά έξοδα, προκειμένου να

αναπτυχθεί μια καλύτερη ιδέα όλων των οικονομικών χαρακτηριστικών μιας τεχνικής αποθήκευσης. Στο Σχήμα 5.2.2 απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης όσον αφορά την αποδοτικότητα και τη διάρκεια ζωής.

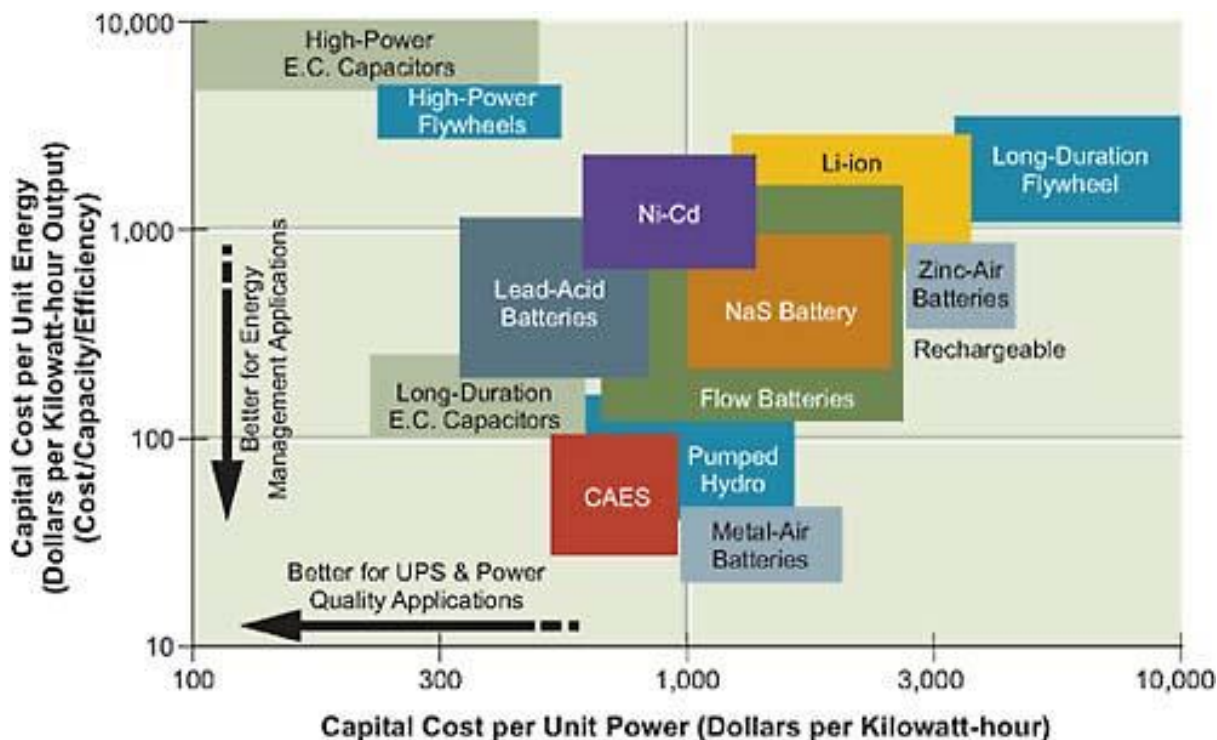


Εικόνα 5.2.2- Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με την ενεργειακή απόδοση και το προσδόκιμο ζωής (πηγή : <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032107000238-gr23.jpg>)

5.2.3 Σύγκριση του κόστους επένδυσης

Το κόστος επένδυσης που συνδέεται με έναν τύπο αποθήκευσης είναι ένα σημαντικό οικονομικό στοιχείο και παράμετρος που επηρεάζει το συνολικό κόστος παραγωγής ενέργειας. Έτσι, ορισμένοι τύποι αποθήκευσης συστημάτων μπορούν να καταστούν κερδοφόροι μόνο εάν παρέχεται ένα ορισμένο ελάχιστο ποσό ενέργειας. Το συνολικό κόστος του συστήματος πρέπει τότε να ληφθεί υπόψη (συμπεριλαμβανομένης της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού και του κόστους της έρευνας) προκειμένου να επιτευχθεί μια πλήρης ανάλυση κόστους. Για παράδειγμα, παρά το γεγονός ότι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι σχετικά φθηνές, δεν είναι απαραίτητα η φθηνότερη επιλογή για τη διαχείριση της ενέργειας, λόγω των σχετικά χαμηλής ανθεκτικότητας. Το κόστος των μπαταριών στο σχήμα 5.2.3 προσαρμόστηκε ώστε να μην περιλαμβάνεται το κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος μετατροπής. Το κόστος της ενέργειας διαιρέθηκε επίσης με την απόδοση της αποθήκευσης για να προκύψει το κόστος ανά μονάδα ωφέλιμης ενέργειας. Το κόστος εγκατάστασης ποικίλλει επίσης

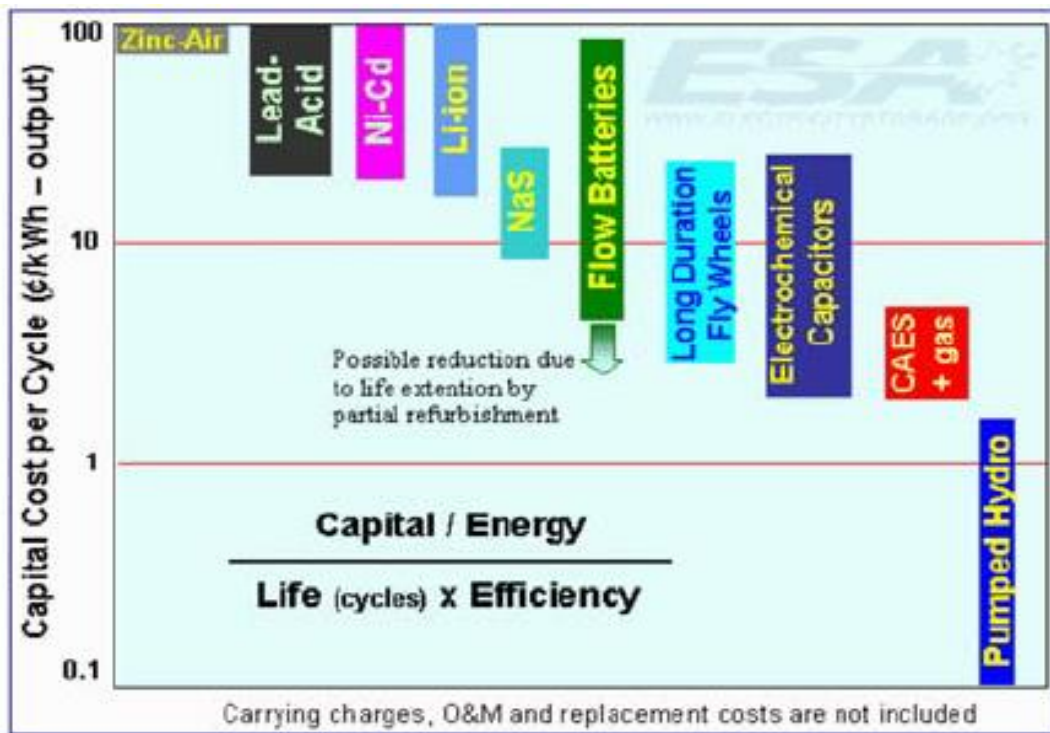
ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος της συστήματος. Τέλος, φαίνεται προφανές ότι οι διάφορες λειτουργίες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό μιας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας συστήματος πρέπει να ενσωματωθούν σε ένα συνεκτικό σύνολο, προσαρμοσμένο στις προδιαγραφές, ώστε να μειωθεί το κόστος ολοκλήρωσης. Το κριτήριο αυτό αποτελεί το κύριο ζήτημα όσον αφορά τη διείσδυση του συστήματος στην αγορά αποθήκευσης ενέργειας.



Εικόνα 5.2.3-Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με το κόστος επένδυσης ανά μονάδα ισχύος ή ανά μονάδα ενέργειας (πηγή : <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1364032107000238-gr23.jpg>)

5.2.4 Σύγκριση του κόστους επένδυσης ανά κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης

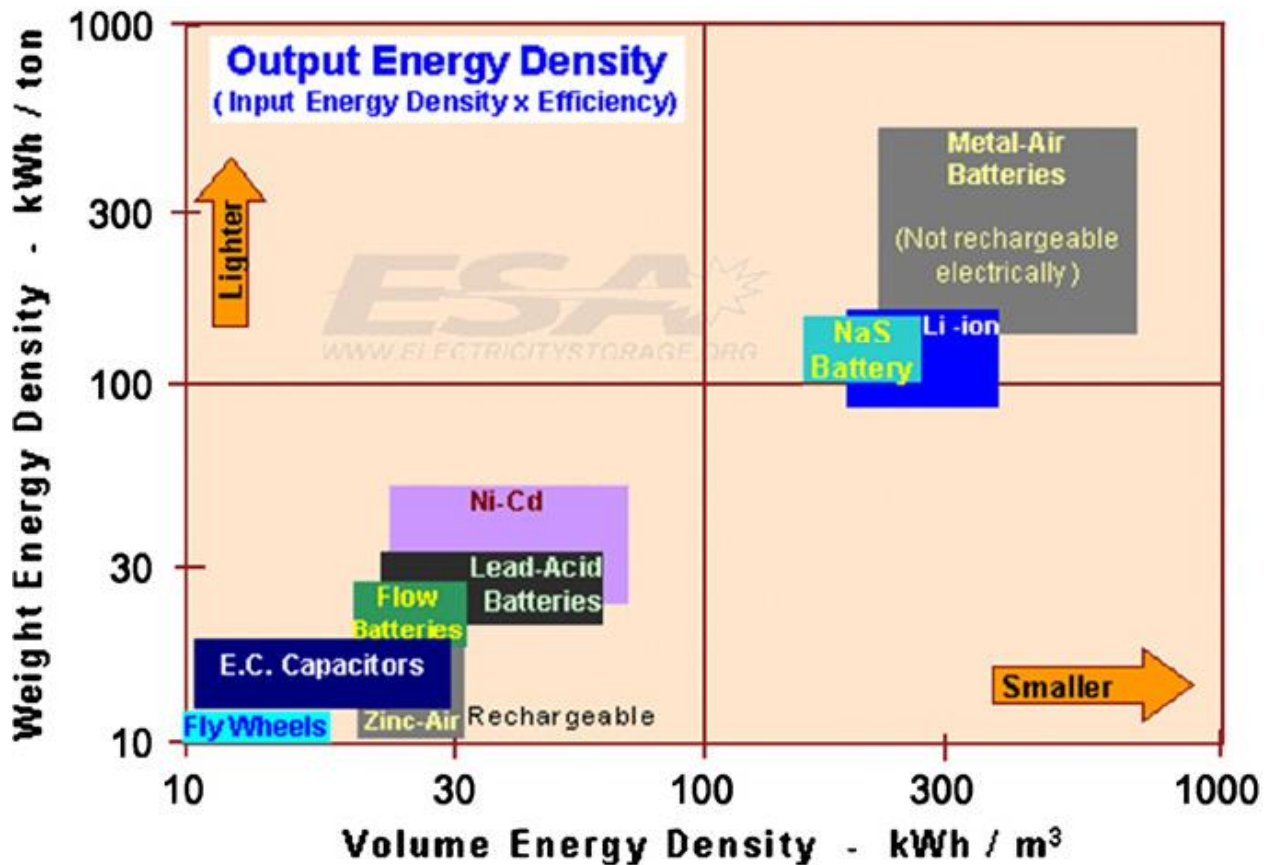
Το κόστος ανά κύκλο θα μπορούσε να είναι ο καλύτερος τρόπος αξιολόγησης του κόστους ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σχεδιασμένο για εφαρμογές συχνής φόρτισης-εκφόρτισης. Στο σχήμα 5.2.4 παρουσιάζεται η κύρια συνιστώσα αυτού του κόστους, λαμβάνοντας υπόψη την ανθεκτικότητα και την αποδοτικότητα. Για ένα πληρέστερο κόστος ανά κύκλο, οι δαπάνες έρευνας καθώς και το κόστος αντικατάστασης και άλλα κόστη, που παραμένουν άγνωστα για τις αναδυόμενες τεχνολογίες, πρέπει να ληφθούν υπόψη. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος ανά κύκλο δεν αποτελεί κατάλληλο κριτήριο για την ισοστάθμιση φορτίου ή την ενεργειακή διαιτησία, όπου η αποθήκευση είναι λιγότερο συχνή και το ενεργειακό κόστος είναι υψηλό και ασταθές.



Εικόνα 5.2.4 - Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με το κόστος επένδυσης που υπολογίζεται ανά κύκλο φόρτισης-εκφόρτισης (πηγή : <https://www.researchgate.net/profile/Bob-Bartolo/publication/235216367/figure/fig14/AS:299800957341727@1448489526712/Energy-delivery-efficiency-vs-lifetime-for-80-Depth-of-Discharge-Battery.png>)

5.2.5 Σύγκριση με βάση την πυκνότητα μάζας η όγκου

Οι διάφορες τεχνικές αποθήκευσης μπορούν να ταξινομηθούν σε συνάρτηση με τη διαθεσιμότητα της ενέργειας και της μέγιστης ισχύος ανά λίτρο (πυκνότητα όγκου) ή ανά χιλιόγραμμα (πυκνότητα μάζας). Αυτή η σύγκριση είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη βιομηχανία μετάδοσης, τις φορητές εφαρμογές, και τις απομονωμένες τοποθεσίες (Σχήμα 5.2.5). Η μάζα είναι σημαντική παράμετρος για τις μόνιμες εφαρμογές όσον αφορά το κόστος των υλικών. Θα μπορούσε επομένως να επιλέξει κανείς, για μια ηλεκτρική εγκατάσταση, ένα υλικό με ειδική ενέργεια, αλλά μακριά από τη μέγιστη διαθέσιμη (που σημαίνει ότι θα χρειαστεί περισσότερο υλικό), σε μια μονάδα κόστος που μειώνει το συνολικό κόστος του συστήματος αποθήκευσης. Στην περίπτωση αυτή, πρόκειται για την τιμή ανά kWh και όχι τα κιλά ανά kWh. Ο όγκος ενός συστήματος αποθήκευσης μπορεί να είναι σημαντικός, πρώτα απ' όλα εάν πρέπει να εγκατασταθεί σε ένα περιορισμένο ή δαπανηρό χώρο, για παράδειγμα σε αστικές περιοχές. Μια άλλη πτυχή του όγκου είναι η επίπτωσή του στα μέσα και το κόστος συγκράτησης και συντήρησης του κενού (σφόνδυλοι για παράδειγμα) ή τα συστήματα ψύξης και θερμομόνωσης. Με την αύξηση του όγκου, περισσότερο υλικό και μεγαλύτερο εργοτάξιο, αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος του συστήματος.



Εικόνα 5.2.5- Κατανομή των τεχνικών αποθήκευσης σε συνάρτηση με τις πυκνότητες μάζας και όγκου της αποθηκευμένης ενέργειας για εφαρμογές μικρής κλίμακας (πηγή :

<https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/233b03bf701a0c8637ee052d9a229315d4ca9251/27-Figure26-1.png>)

5.2.6 Σύγκριση με βάση τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Καμία μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας δεν έρχεται χωρίς περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ακόμη και αν η μέθοδος δεν επηρεάζει το περιβάλλον, ενώ οι χημικές ουσίες και τα εξαρτήματα λειτουργίας πρέπει πάντα να παράγονται και να ανακυκλώνονται με κάποιο περιβαλλοντικό κόστος είτε ως πρώτες ύλες είτε ως ρύπανση από την παραγωγή. Πιο αξιοσημείωτες είναι εκείνες που επηρεάζουν άμεσα το περιβάλλον κατά τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη αποθήκευση ενέργειας στη Σουηδία, η PHES, καταλαμβάνει μεγάλα τμήματα της γύρω περιοχής, διαταράσσοντας την άγρια ζωή και τα συνδεδεμένα οικοσυστήματα. Στη Σουηδία έχουν κατασκευαστεί υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας σε βαθμό που τα ρέματα που είναι κατάλληλα για εγκαταστάσεις PHES που παραμένουν ακόμη με μεγάλη χωρητικότητα προστατεύονται ως φυσικά αποθέματα και λόγω κοινωνικών διαμαρτυριών. Ως εκ τούτου, πιστεύεται ότι η βελτίωση της απόδοσης θα έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στη Σουηδική PHES από την περαιτέρω επέκταση. Παρόμοια στην κατάληψη μεγάλων εκτάσεων είναι οι CAES. Σε αντίθεση με το PHES η μέθοδος χρησιμοποιεί ήδη υπάρχουσες υπόγειες σπηλιές, μειώνοντας τον

ορατό αντίκτυπο. Για λόγους αποδοτικότητας, η CAES απαιτεί τη χρήση καυσίμων που αναμειγνύονται με τον αέρα, απελευθερώνοντας αναθυμιάσεις που συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Για ένα πιο φιλικό προς το περιβάλλον σύστημα CAES, τα ορυκτά καύσιμα θα μπορούσαν να αντικατασταθούν από βιοκαύσιμα κάποιου είδους, ελπίζοντας ότι θα μειωθούν οι ποσότητες ρύπων που εκλύονται. Τα συστήματα θα μπορούσαν επίσης να προστεθούν για την καλύτερη αξιοποίηση της θερμότητας από το καύσιμο που καίγεται, η οποία διαφορετικά θα χαθεί. Ένα χαρακτηριστικό που μοιράζονται διάφοροι τύποι αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες είναι τα ζητήματα διάθεσης χημικών ουσιών καθώς όλα βασίζονται σε χημικά συστατικά για να αντιδράσουν. Οι εξαιρέσεις αυτού είναι κυρίως οι Na-S μπαταρίες, καθώς αυτές είναι κατασκευασμένες από μη τοξικά υλικά που ανακυκλώνονται εύκολα. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος μπορούν να θεωρηθούν ως ένα βαθμό εύκολα ανακυκλώσιμες, αλλά ο μόλυβδος που περιέχουν αποτελεί απειλή για τα οικοσυστήματα κατά τις διαρροές και την τελική διάθεση. Ανάλογα με το θερμικό μέσο που επιλέγεται, όλες οι τεχνολογίες TES μπορεί να έχουν ή να μην έχουν αντίκτυπο το περιβάλλον. Αρκετά θερμικά μέσα αφήνουν ελάχιστες έως μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις εάν όπως το νερό που μπορεί να απελευθερωθεί αν χρειαστεί μετά την ψύξη ή το υγρό αλάτι και στερεά όπως το σκυρόδεμα που ανακυκλώνονται εύκολα.

5.2.7 Σύγκριση με βάση τις κοινωνικές επιπτώσεις

Όλα τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας θα γίνουν με κάποιο τρόπο αντιληπτά από το κοινό. Η τιμή για την αποθήκευση της ενέργειας διαφέρει μεταξύ των τεχνολογιών, επηρεάζοντας την τιμή που πρέπει να πληρώσει ο καταναλωτής για την ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια. Αν και τα περισσότερα μπορούν να κρυφτούν σε βιομηχανικές περιοχές στα περίχωρα των πόλεων, ορισμένες τραβούν μεγαλύτερη προσοχή. Η πιο αξιοσημείωτη είναι η PHES, η οποία παρεμποδίζεται από κοινωνικές διαμαρτυρίες λόγω των μεγάλων κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεών της στην τοπική περιοχή. Μια άλλη εξαίρεση είναι η CAES, η οποία τείνει να χρησιμοποιεί σπήλαια και ορυχεία στο ύπαιθρο. Καθώς το έδαφος χρησιμεύει ως μονωτής, οι TES με SHS μπορούν να επωφεληθούν σε μεγάλο βαθμό από την ταφή, καθιστώντας τις αποθήκες θερμικής ενέργειας φυσικά κρυμμένες. Η υψηλή θερμοκρασία SHS αποτελεί ωστόσο ένα κίνδυνο σε περίπτωση ατυχήματος, καθώς ορισμένα υλικά θερμαίνονται πάνω από 1000 °C. Η διαρροή θα μπορούσε δυνητικά να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στους εργαζόμενους και στη γύρω περιοχή, καθώς και στο περιβάλλον. Ορισμένες μπαταρίες, όπως Li-Ion και Na-S, περιλαμβάνουν αντιδρώντα που μπορεί να συμπεριφέρονται βίαια. Οι περισσότερες σύγχρονες κυψέλες Li-Ion διατηρούν το λίθιο δεσμευμένο ανά πάσα στιγμή και το εμποδίζουν να αναφλεγεί. Στην Ιαπωνία, το

2012, μια πυρκαγιά φέρεται να προκλήθηκε από μια μπαταρία Na-S. Εκτός από τη φυσική μορφή της αποθήκευσης ενέργειας, ο παράγοντας με τη μεγαλύτερη επίδραση στο κοινό είναι το κόστος της αποθηκευμένης ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε στην παραπάνω ενότητα, τεχνικές πτυχές, η τιμή της αποθηκευμένης ενέργειας καθορίζεται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες. Ο πίνακας 5.2.7 απαριθμεί τις τεχνολογίες από τις δυνητικά φθηνότερες προς τις ακριβότερες.

Πίνακας 5.2.7 - Κόστος της αποθηκευμένης ενέργειας σε SEK/kWh(πηγή : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:953027/FULLTEXT01.pdf>)

	Technology	Cost [SEK/kWh]
1	Sensible Heat Storage (SHS)	1
2	Power-to-Gas	19 - 142
3	Compressed Air Energy Storage (CAES)	19 – 1,325
4	Thermo-Chemical Storage (TCS)	76 - 944
5	Pumped Hydro Energy Storage (PHES)	95 - 662
6	Lead-Acid	944 - 1,700
7	Flow batteries	1,039 - 9,443
8	Lithium-Ion batteries (Li-Ion)	1,680 - 18,886
9	Nickel-based batteries	4,249 - 16,997
10	Sodium-Sulphur batteries (Na-S)	4,800
11	Supercapacitors	45,394
12	Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)	596,119 - 7,096,650
13	Flywheel energy storage (FES)	946,220 - 3,784,880

{ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : 1 Swedish krona / kilowatt hour = 0.093174 US\$ / kilowatt hour}

Μελετώντας τον πίνακα 5.2.7, γίνεται σαφές ότι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα αποδοτική από πλευράς κόστους, δυστυχώς όμως δεν βρέθηκαν λεπτομέρειες σχετικά με την τιμή της LHS. Μπορεί επίσης να δει κανείς ότι είναι φθηνότερη η αποθήκευση ενέργειας με τη χρήση μακροπρόθεσμων επιλογών, όπως η CAES και η PHES, με την εξαίρεση αυτή είναι το Power-to-gas που έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης φυσικού αερίου με πολύ χαμηλό κόστος παρά το γεγονός ότι δεν είναι τόσο ώριμες όσο αρκετές άλλες τεχνικές στον κατάλογο. Η μεσαία κατηγορία τιμών στον πίνακα 5.2.7 καταλαμβάνεται από ηλεκτροχημικές επιλογές, με SMES και FES είναι οι πιο ακριβές με κάποια διαφορά.

5.2.8 Σύγκριση με βάση την τεχνολογική ωριμότητα

Οι περισσότερες από τις τεχνολογίες που παρατίθενται είναι σε κάποιο βαθμό υπό ανάπτυξη. Παρακάτω στον πίνακα 5.2.8 παρατίθεται μια γενική καταγραφή των πιο υποσχόμενων τεχνολογιών όσον αφορά την τεχνολογική ωριμότητα. Η PHES είναι η πιο συνήθως χρησιμοποιούμενη καθώς και η πιο ώριμη τεχνική.

Πίνακας 5.2.8 - Κατάλογος επιπέδων τεχνολογικής ωριμότητας(πηγή : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:953027/FULLTEXT01.pdf>)

	<u>Τεχνολογική ωριμότητα</u>
1	Αποθήκευση ενέργειας με αντλησιοταμίευση (PHES)
2	Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Ion)
3	Μπαταρίες μολύβδου-οξέος
4	Αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα (CAES)
5	Μπαταρίες θείου νατρίου (Na-S)
6	Αποθήκευση ενέργειας με σφονδύλους (FES)
7	Μπαταρίες ροής
8	Υπερπυκνωτές
9	Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES)
10	Power-to-Gas

Παρόμοιο με το PHES, αλλά όχι τόσο ώριμο, είναι το CAES. Παρόλο που τα CAES λειτουργούν στην αγορά από το 1978, υπάρχουν πολύ λίγες εγκαταστάσεις CAES που λειτουργούν στον κόσμο. Παρά την αξιοπιστία σε ικανοποιητικό επίπεδο, καλύπτει παρόμοιο ρόλο στην αποθήκευση ενέργειας με τον πιο ευνοημένο PHES. Οι PHES θεωρούνταν από καιρό η ευκολότερη μέθοδος σε σύγκριση με τις CAES, γεγονός που μπορεί να είναι ένας λόγος για την ταπεινή χρήση των CAES μέχρι σήμερα. Όσον αφορά τις μπαταρίες, οι πιο ώριμες επιλογές για εφαρμογές UPS είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, οι μπαταρίες NaS και οι μπαταρίες Li-Ion. Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος είναι δημοφιλείς για χρήση μαζί με μικρές παραγωγές ενέργειας μικρής κλίμακας, όπως η οικιακή ηλιακή ή αιολική ενέργεια. Λόγω της αναξιόπιστης φύσης τους, μικρής διάρκειας ζωής και μικρού βάθους εκφόρτισης, δεν είναι ακόμη βέλτιστες για UPS. Οι Li-Ion μπαταρίες είναι δημοφιλείς λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς τους και της αποδοτικότητας της περιοχής τους, καθώς λόγω της μεγάλης αποθήκευσης χωρητικότητας μπορούν να διατηρηθούν σε

μικρότερες εγκαταστάσεις. Η τεχνική έχει κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών εισαχθεί στην αγορά, ένα κοντινό παράδειγμα είναι μια εγκατάσταση στα νησιά Okney του Ηνωμένου Βασιλείου, έξω από το την Σκωτία, όπου έχει εγκατασταθεί μια μπαταρία Li-Ion ισχύος 2 MW και τέθηκε σε λειτουργία το 2013. Υπάρχει επίσης μια μικρότερη εγκατάσταση που έχει ήδη εγκατασταθεί στη Σουηδία, στο Falköping, μια μπαταρία Li-Ion ισχύος 75 kW χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της τοπικά παραγόμενης ενέργειας από ανεμογεννήτριες. Το Na-S προσφέρει παρόμοιες ιδιότητες με το Li-Ion, αν και δεν είναι τόσο ώριμο και ως εκ τούτου τείνει να υπολείπεται σε σχέση με το Li-Ion σε αρκετές κατηγορίες. Η τεχνική έχει σε κάποιο βαθμό εμπορευματοποιηθεί στην Ασία, αλλά η περαιτέρω ανάπτυξη μπορεί να βελτιώσει την ασφάλεια. Ένας μηχανικός ανταγωνιστής των διαφόρων μπαταριών είναι η FES, μια υπό ανάπτυξη βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας που προσφέρει παρόμοιες ιδιότητες, όπως ο σύντομος χρόνος αντίδρασης και η υψηλή πυκνότητα ενέργειας, η οποία είναι ιδανική για την εξοικονόμηση αιχμής. Η τεχνική αυτή έχει ως ένα βαθμό εισαχθεί στην αγορά με αρκετές εγκαταστάσεις που λειτουργούν τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και η καλή απόδοση είναι τα κυριότερα χαρακτηριστικά της μεθόδου, αλλά το υψηλό κόστος αποθήκευσης καθιστά την τεχνική αρκετά ακριβή. Όσον αφορά την αποθήκευση θερμικής ενέργειας, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η θερμική SHS με την Ισπανία και τις Η.Π.Α. να είναι οι δύο κύριοι χρήστες. Η SHS συνδυάζεται συνήθως με θερμικές ηλιακές μονάδες, το κλίμα στη Σουηδία δεν ευνοεί, ωστόσο, αυτή τη μέθοδο για την UPS. Μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, όπως βιομηχανίες και κατοικημένες περιοχές, μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν το SHS ως εποχιακή θερμική αποθήκευση, εξοικονομώντας θερμότητα το καλοκαίρι για να την απελευθερώσουν το χειμώνα και το αντίστροφο. Αξιοσημείωτοι χρήστες που λειτουργούν ήδη στη Σουηδία είναι το αεροδρόμιο Arlanda της Στοκχόλμης και η οικιστική περιοχή Anneberg. Ομοίως, η LHS επίσης χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις όπως τα νοσοκομεία και για αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Ωστόσο, η θερμική αποθήκευση στη Σουηδία δεν φαίνεται να είναι κατάλληλη για εφαρμογές UPS και θα πρέπει να διατηρούνται ως αποθήκες για ψύξη ή θέρμανση.

5.2.9 Σύγκριση με βάση την προσέγγιση

Καθώς τόσο η PHES όσο και η CAES επηρεάζουν την άμεση περιοχή που τις περιβάλλει και καθώς δεν φαίνεται να πληρούνται οι βέλτιστες προϋποθέσεις για αυτές τις τεχνολογίες, καμία από αυτές δεν πρέπει να εξεταστεί ως επιλογή για την αποθήκευση ενέργειας του αιολικού πάρκου. Όπως αναφέρεται πάνω, η τεχνολογική ωριμότητα, οι βιώσιμες επιλογές που απομένουν είναι οι μπαταρίες Li-Ion, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, οι μπαταρίες Na-S και οι FES. Παρακάτω στον πίνακα 5.2.9 φαίνονται οι πληροφορίες σχετικά με τις εν λόγω τεχνολογίες.

Πίνακας 5.2.9- Μελέτη περίπτωσης επιλογών αποθήκευσης ενέργειας(πηγή : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:953027/FULLTEXT01.pdf>)

	<u>Li-Ion</u>	<u>Lead-acid</u>	<u>Na-S</u>	<u>FES</u>
Power [MW]	0.001 - 0.1	-	0.05	0.002 - 20
Capacity [MWh]	-	-	0.4	0.001 - 0.1
Storage period	Days	-	-	Hours
Storage density	80 - 200 Wh/kg, 200 - 500 kWh/m ³	30 Wh/kg, 50 - 80 kWh/m ³	60 Wh/kg, 156 - 255 kWh/m ³	100 - 200 Wh/kg, 20 -80 kWh/m ³
Efficiency [%]	80 - 95	75 - 90	80 - 85	90 - 95
Response time	-	-	Milliseconds	Seconds
Life span	200 - 250,000 cycles	5 - 17 years, 1,200 - 2,700 cycles	15 years, 4500 cycles	20 years
Cost [SEK/kWh]	1,680 - 18,886	944 - 1'700	4,800	946,220 - 3,784,880
Environmental impact	Chemical disposal issues	Chemical disposal issues	Light impact if recycled properly	Light impact

5.3 Συνολική ανάλυση των συγκρίσεων των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας

Όσον αφορά τις μόνιμες εφαρμογές χαμηλής ισχύος, το βασικό στοιχείο είναι η χαμηλότερη δυνατή αυτοεκφόρτιση. Με βάση τα τεχνικά κριτήρια και μόνο, η μονάδα ιόντων λιθίου είναι η καλύτερη υποψήφια. Όσον αφορά τα μικρά συστήματα (λίγων kWh) σε απομονωμένες περιοχές που βασίζονται σε διακοπτόμενη ανανεώσιμη ενέργεια, το βασικό στοιχείο είναι η αυτονομία. Η μπαταρία μολύβδου παραμένει ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ επιδόσεων και κόστους. Η μπαταρία ιόντων λιθίου έχει καλύτερες επιδόσεις αλλά εξακολουθεί να είναι πολύ ακριβή. Για μεγαλύτερα συστήματα (μερικά 100 kWh), ο μολύβδος εξακολουθεί να προτιμάται, μπροστά από το λίθιο, και οι εναλλακτικές λύσεις είναι είτε λιγότερο αποδοτικές είτε πολύ ακριβές: πεπιεσμένος αέρας (αυτοεκφόρτιση προβλήματα), οι κυψέλες καυσίμου (ακριβές και χαμηλή ενεργειακή απόδοση) και οι μπαταρίες ροής (υψηλή κόστος συντήρησης). Στην τρίτη κατηγορία, όσον αφορά την εξισορρόπηση του φορτίου σε ώρες αιχμής που απαιτεί αποθήκευση υψηλής ενέργειας (πολλές MWh), ο πεπιεσμένος αέρας και οι μπαταρίες ροής είναι οι καλύτερες επιλογές, με συγκεκριμένο κόστος πλεονέκτημα για την πρώτη από τις δύο. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές δεν έχουν ακόμη δοκιμαστεί στο πεδίο. Για την τέταρτη κατηγορία, που αφορά την ποιότητα της ισχύος, τα βασικά κριτήρια είναι η ικανότητα απελευθέρωσης ενέργειας και η ικανότητα ανακύκλωσης. Εδώ, οι σφόνδυλοι και οι υπερπυκνωτές είναι καλύτερα προσαρμοσμένοι από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Μεταξύ των επιλογών, οι μπαταρίες μολύβδου πληρούν τα τεχνικά κριτήρια όλων των κατηγοριών,

αλλά έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής και είναι αναξιόπιστες. Οι μπαταρίες με βάση το νικέλιο και οι μπαταρίες μεταλλικού αέρα δεν πληρούν κανένα από τα κριτήρια που επιλέχθηκαν (χαμηλή απόδοση, υψηλό κόστος). Οι κυψέλες καυσίμου είναι από την πλευρά τους ακόμη μια νέα τεχνολογία. Τέλος, ορισμένες τεχνολογίες είναι σε θέση να καλύψουν τις ανάγκες αποθήκευσης για διακοπτόμενες πηγές ενέργειας: υδραυλική και θερμική αποθήκευση για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση ενέργειας (SMES) για εφαρμογές μικρής κλίμακας. εφαρμογές. Για να ανταποκριθεί στις μελλοντικές ανάγκες της αποσπασματικής παραγωγής, η αποθήκευση ενέργειας θα πρέπει να είναι τεχνολογικά βελτιωθεί βραχυπρόθεσμα έως μεσοπρόθεσμα. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι πολύ αποδοτικές, αλλά είναι πολύ ακριβές για εφαρμογή σε συστήματα σε απομακρυσμένες περιοχές. Η ανακύκλωση και η διαχείριση των αποβλήτων αυτών των μπαταριών χρειάζονται ακόμη έρευνα και ανάπτυξη. Οι μπαταρίες μολύβδου είναι εξακολουθούν να αποτελούν τον καλύτερο συμβιβασμό κόστους-απόδοσης, αλλά είναι ο αδύναμος κρίκος σε ένα απομονωμένο σύστημα, Το προσδόκιμο ζωής τους πρέπει να βελτιωθεί, αν πρόκειται να ανταποκριθούν καλύτερα στις ανάγκες.

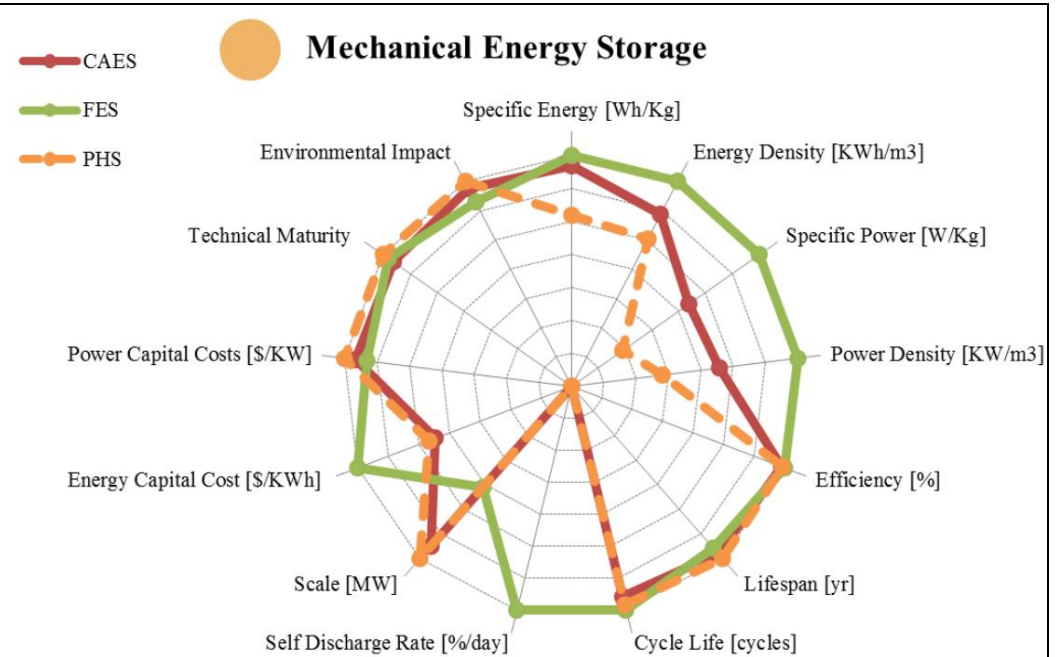
Ακολουθούν οι παρακάτω πίνακες και φωτογραφίες με μια ολοκληρωμένη συλλογή των τεχνικών δεδομένων που έχουν συγκεντρωθεί για τις μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας. Τα χαρακτηριστικά επιλέχθηκαν ώστε να αντικατοπτρίζουν τις διάφορες ανάγκες της αγοράς, από τεχνικές λεπτομέρειες όπως η ισχύς, η χωρητικότητα και η αποδοτικότητα, έως κοινωνικές συνέπειες όπως το κόστος της ενέργειας. αποθηκευμένη ενέργεια και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

{ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ:(σ), ο μέσος όρος (μ), η διάμεσος (\tilde{x}) και οι τιμές του μεγέθους του δείγματος (n)}

Metric		Pumped Hydro.	Compressed Air	Flywheel
		range $\sigma/\mu/\tilde{x}/n$	range $\sigma/\mu/\tilde{x}/n$	range $\sigma/\mu/\tilde{x}/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	0.30–1.33	3.20–60.00	5.00–200.00
		0.48/0.87/0.78/6	19.89/28.50/30.00/11	56.94/58.16/30.00/19
Energy Density	[KWh/m ³]	0.50–1.33	0.40–20.00	0.25–424.00
		0.45/1.07/1.15/6	6.65/7.19/5.00/9	137.36/95.16/20.00/12
Specific Power	[W/Kg]	0.01–0.12	2.20–24.0	400.00–30,000.00
		0.05/0.05/0.04/4	12.10/16.13/22.20/3	8,631/6,592/3,250/12
Power Density	[KW/m ³]	0.01–0.12	0.04–10.00	40.00–2,000.00
		0.05/0.05/0.04/4	3.81/3.03/1.90/7	814.40/816.29/707.00/7
Efficiency	[%]	65.00–87.00	57.00–89.00	70.00–96.00
		7.13/76.59/80.00/17	12.28/68.30/70.00/23	6.31/89.36/90.00/22
Lifespan	[yr]	20.00–80.00	20.00–40.00	15.00–20.00
		23.14/49.20/45.00/12	8.66/30.00/30.00/9	2.89/17.50/17.50/4
Cycle Life	[cycles]	10,000–60,000	8,000–30,000	10,000–100,000
		19,070/29,000/20,000/7	9,712/16,000/12,000/7	35,667/41,100/20,500/10
Self-Discharge Rate	[%/day]	0.00	0.00	24.00–100.00
		0.00/0.00/0.00/5	0.00/0.00/0.00/4	39.92/64.61/72.00/7
Scale	[MW]	10.00–8,000.00	0.01–3,000.00	0.001–10.00
		1,998/1,542/800/28	792.14/467.72/150/33	4.62/1.96/0.20/25
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	1.00–291.20	1.00–140.00	200.00–150,000.00
		66.51/57.94/33.00/19	41.41/35.67/11.88/18	31,071/12,454/900/26
Power Capital Cost	[US\$/KW]	300.00–5,288.00	400.00–2,250.00	30.28–700.00
		1,133/1,414/1,000/25	412.19/649.55/500/21	149.29/296.14/290.0/16
Application		Very Large Scale Energy Management	Very Large Scale Energy Management	Medium Scale Power Quality
Technical Maturity		Very Mature/ Fully Commercialized	Proven/Commercializing	Mature/Commercializing
Environmental Impact		High/Medium	Medium/Low	Very Low

Πίνακας 5.3(1)- Πίνακας σύγκρισης Τεχνολογιών μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας (πηγή : <https://www.researchgate.net/publication/3218707> A Hybrid Energy Storage System - Based on Compressed Air and Supercapacitors With Maximum Efficiency Point Tracking MEPT),



Εικόνα 5.3(1)- Σύγκριση Τεχνολογιών μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας (πηγή : <https://www.researchgate.net/publication/3218707> A Hybrid Energy Storage - System Based on Compressed Air and Supercapacitors With Maximum Efficiency Point Tracking MEPT)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι ανησυχίες για τη μείωση της διαθεσιμότητας των χώρων, την αβέβαιη κερδοφορία, το υψηλό κόστος κεφαλαίου, τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τις χαμηλές πυκνότητες ενέργειας και ισχύος υποδηλώνουν όλο και περισσότερο την ανάγκη μετάβασης από το PHS σε άλλη λύση αποθήκευσης ενέργειας. Η CAES παρουσιάζει μεγαλύτερες πυκνότητες ενέργειας και ισχύος και χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς και μεγαλύτερη διαθεσιμότητα χώρων. Δυστυχώς, αυτές οι βελτιώσεις έχουν κόστος καυσίμου και η εμπορική βιωσιμότητα δεν έχει ακόμη δοκιμαστεί. Τα συστήματα σφονδύλων, σε σύγκριση με CAES, είναι αρκετά ώριμα και εμπορικά δοκιμασμένα. Παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των λύσεων PHS και CAES. Τα ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με αυτά τα συστήματα μπορούν να μετριαστούν, αλλά με υψηλό κόστος. Τόσο η πυκνότητα ενέργειας όσο και η πυκνότητα ισχύος είναι, κατά μέσο όρο, υψηλότερες από τις PHS και CAES και υπόσχονται ακόμη μεγαλύτερες βελτιώσεις με την έλευση πρόσφατων ανακαλύψεων. Ωστόσο, η FES εξακολουθεί να λειτουργεί σε σχετικά μικρή κλίμακα και για πολύ μικρή διάρκεια. Το κατά πόσον οι βελτιώσεις θα είναι αρκετά καλές ώστε να επεκταθεί η εφαρμοσιμότητα σε μεγαλύτερης κλίμακας μεσοπρόθεσμες λύσεις, μένει να φανεί. Λόγω της μικρής τους κλίμακας, τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι πιο σημαντικά για την ανάπτυξη υποδομών κατανεμημένων δικτύων. Τα συστήματα σφονδύλων έχουν επίσης εφαρμοστεί τόσο σε εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως συστήματα αδιάλειπτης παροχής ενέργειας όσο και ως υβριδικές λύσεις εξομάλυνσης της ισχύος από ανανεώσιμες πηγές.

ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

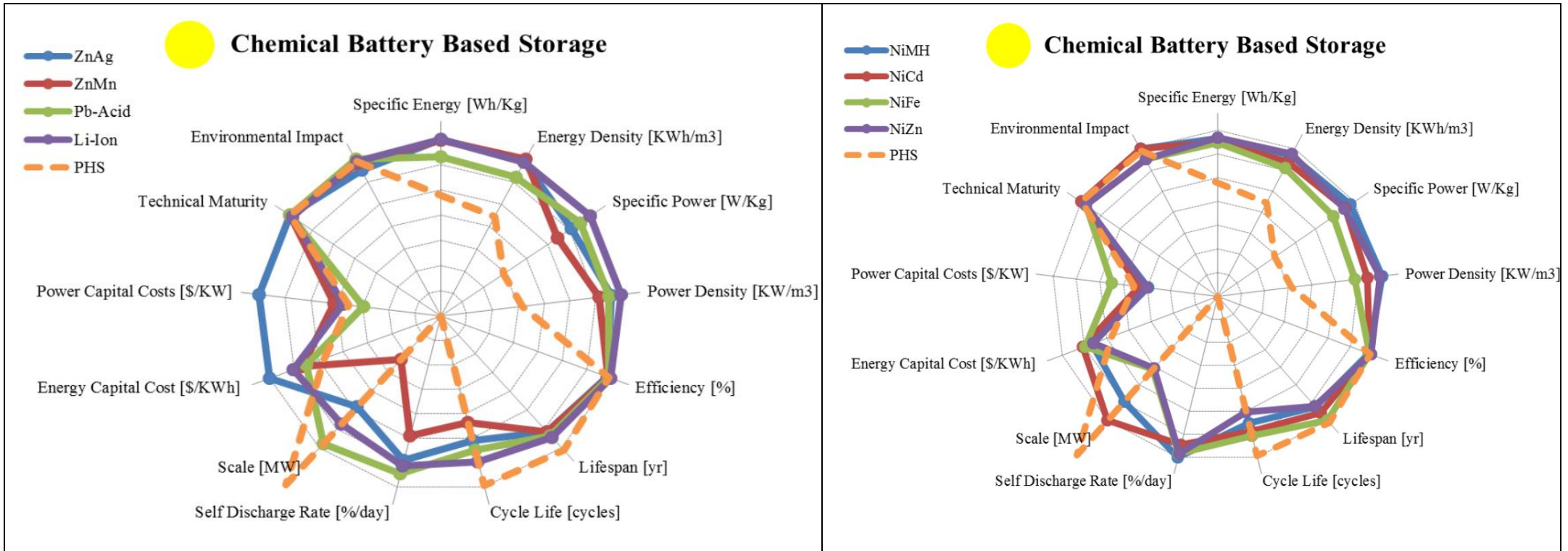
{ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ:(σ), ο μέσος όρος (μ), η διάμεσος (\tilde{x}) και οι τιμές του μεγέθους του δείγματος (n)}

Πίνακας 5.3(2),(3)- Πίνακας σύγκρισης τεχνολογιών χημικής αποθήκευσης ενέργειας συμβατικών μπαταριών(πηγή :

https://www.researchgate.net/publication/3218707_A_Hybrid_Energy_Storage_System_Based_on_Compressed_Air_and_Supercapacitors_With_Maximum_Efficiency_Point_Tracking_MEPT)

ΣΥΜΒΑΤΙΚΕΣ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Metric		Nickel Metal Hydride	Nickel Cadmium	Nickel Iron	Nickel Zinc	Metric		Zinc Silver Oxide	Alkaline	Lead Acid	Lithium Ion
		range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$			range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$	range $\sigma/\mu/\bar{x}/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	30.00–90.00	10.00–80.00	27.00–60.00	15.00–110.00	Specific Energy	[Wh/Kg]	81.00–276.00	80.0–175.00	10.00–50.00	30.00–300.00
		20.2/66.5/73/14	20.5/45.3/45.0/16	14.3/43.1/45.0/7	29.7 /69.6/72.5/12			73.45/146.13/115/8	37.33/137/145/5	11.7/29.8/30.0/13	65.2/143.9/150/29
Energy Density	[KWh/m ³]	38.90–300.00	15.00–150.00	25.00–80.00	80.00–400.00	Energy Density	[KWh/m ³]	4.20–957.00	360.00–400.00	25.00–90.00	94.00–500.00
		96.8/185/180/10	53.7/95.5/100/10	22.6/50.0/55.0/5	109.3/236/245/8			322.93/308.51/179/8	22.54/386/398/3	19.7/59.6/55.0/11	137/290/250/17
Specific Power	[W/Kg]	6.02–1,100.00	50.00–1,000.00	20.57–110.00	50.00–900.00	Specific Power	[W/Kg]	0.09–330.00	4.35–35.0	25.00–415.00	8.00–2,000.00
		378/408/235/12	244/222/150/13	45.8/54.9/25.0/5	287/201/95/8			131.31/76.37/9.00/6	14.9/17.2/14.6/4	119.7/195/190/10	612.4/606/365/22
Power Density	[KW/m ³]	7.80–588.00	37.66–141.05	12.68–35.18	121.38–608.00	Power Density	[KW/m ³]	0.36–610.00	12.35–101.70	10.00–400.00	56.80–800.00
		259.4/383/467/4	43.0/89.5/89.6/4	11.5/25.4/28.4/3	195.6/309/218/5			243.14/151.88/28/6	43.7/49.3/41.6/4	185.8/123/41.9/4	321.4/366.4/304/4
Efficiency	[%]	50.00–80.00	59.00–90.00	65.00–80.00	80.00–89.00	Efficiency	[%]	20.00–100.00	36.00–94.00	63.00–90.00	70.00–100.00
		9.72/65.8/65.5/6	11.2/69.8/67.5/14	10.6/72.5/72.5/2	6.36/84.5/84.5/2			34.25/68.75/77.50/4	25.5/73.0/81.0/4	8.56/76.9/76.0/15	8.5/89.8/90.0/17
Lifespan	[yr]	2.00–15.00	2.00–20.0	8.00–100	1.00–10.00	Lifespan	[yr]	2.00–10.00	2.50–10.00	3.00–20.00	2.00–20.00
		4.72/6.33/5.00/6	6.6/13.6/14.0/12	26.4/37.0/30.0/9	6.36/5.50/5.50/2			2.76/5.00/5.00/6	2.97/5.10/5.00/5	5.58/8.33/5.50/12	6.88/10.13/10.0/8
Cycle Life	[cycles]	300–3,000	300–10,000	1,000–8,500	100–500	Cycle Life	[cycles]	1–1,500	1–200	100–2,000	250–10,000
		916/1,129/1,000/7	2,251/2,561/2,000/18	3,326/3,875 /3,000/ 4	191.5/350/400/4			593.51/408.50/100/6	109.82/73.7/20/3	736/1,053/1,100/18	3,036/1,018/1,500/19
Self-Discharge Rate	[%/day]	0.30–4.00	0.07–0.71	0.36–1.43	0.60–1.07	Self-Discharge Rate	[%/day]	0.01–0.25	0.008–0.011	0.033–1.10	0.03–0.33
		1.27/1.16/0.83/7	0.23/0.34/0.25/12	0.39/0.80/0.71/6	0.25/0.79/0.71/3			0.11/0.09/0.02/5	0.001/0.009/0.009/4	0.36/0.33/0.22/8	0.11/0.158/0.166/9
Scale	[MW]	0.01–3.00	0.00–50.00	0–0.05	0.001–0.05	Scale	[MW]	0.00–0.25	0.00–0.001	0.00–50.00	0.00–3.00
		2.11/1.51/1.51/2	20.2/17.1/5.0/14	0.02/0.02/ 0.019/6	0.026/0.02/0.006/2			0.13/0.12/0.10/3	0.0005/0.0003/0/3	14.18/10.34/8/12	1.20/0.93/0.15/8
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	200.00–729.00	330.00–3,500.0	444.27–1,316	250.00–660.00	Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	3,167.00–20,000.0	100.00–1,000.0	50.00–1,100.00	200.00–4,000.00
		186.6/451/407/8	900/1,132/800/17	392/962 /1,044/4	153.3/398/340/6			6,732/9,795/6,686/7	407.9/463/283/5	231.4/303/250/24	1,076/1,110/600/15
Power Capital Cost	[US\$/KW]	270.00–530.00	270.00–1,500.0	8,167–16,312	270.00–530.00	Power Capital Cost	[US\$/KW]	7,140,620–741,935	1,000–11,900	175.00–900.00	175.00–4,000.00
		145.7/362/286/3	494/867/600/9	4,107/12.5K/13.1K/1	183.9/400/400/2			4,524 K/3,941 K/ 3,941 K/2	5,994/5,008/2,125/3	209.1/383/300/15	1,446/2,325/1,950/9
Application		Small Scale Energy Management	Small/Medium Scale Energy Management	Small/Medium Scale Energy Management	Very Small Scale Energy Management	Application		Very Small Scale Energy Management	Very Small Scale Energy Management	Small/Medium Scale Energy Management	Small/Medium Scale Energy Management
Technical Maturity		Very Mature/Fully Commercialized	Very Mature/Fully Commercialized	Mature/Limited Development	Mature/Limited Development	Technical Maturity		Very Mature/Fully Commercialized	Very Mature/Fully Commercialized	Very Mature/Fully Commercialized	Mature/ Commercialized
Environmental Impact		High	High	Low	Low	Environmental Impact		Low	Medium	High	High/Medium



Εικόνες 5.3(2),(3)- Σύγκριση τεχνολογιών χημικής αποθήκευσης ενέργειας συμβατικών μπαταριών (πηγή :

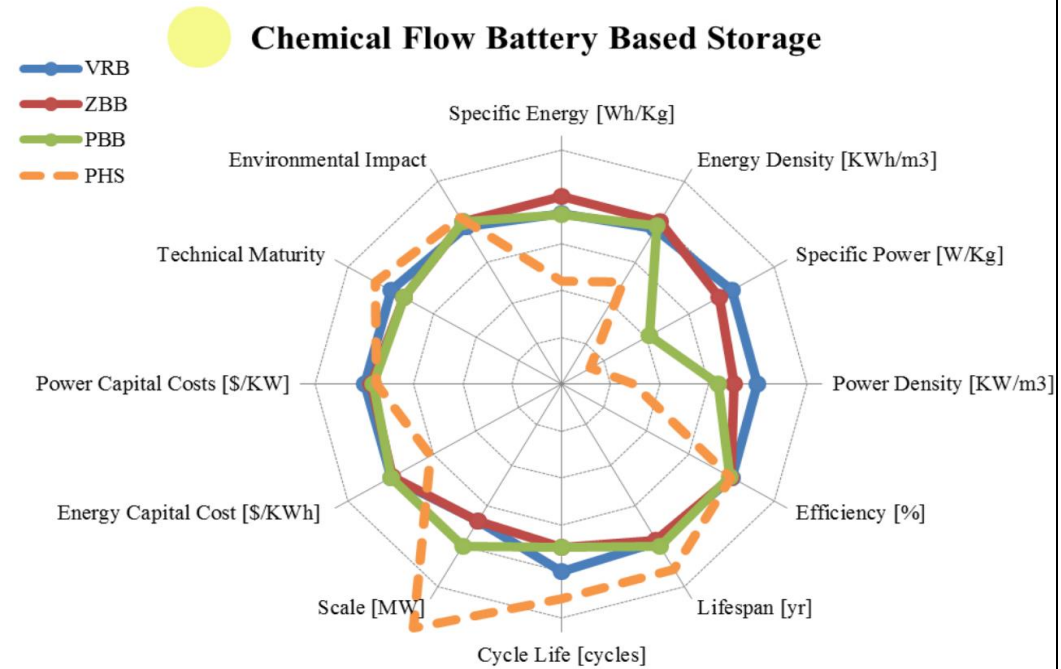
<https://www.researchgate.net/publication/3218707> A Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Supercapacitors With Maximum Efficiency Point Tracking MEPT)

ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΡΟΗΣ

Metric		Vanadium Redox	Zinc Bromine	Polysulphide Bromine
		range $\sigma/\mu/\xi/n$	range $\sigma/\mu/\xi/n$	range $\sigma/\mu/\xi/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	10.00–50.00	11.10–90.00	10.00–50.00
		11.15/24.43/24.00/14	23.3/55.9/60.0/19	12.46/22.67/20.00/9
Energy Density	[KWh/m ³]	10.00–33.00	5.17–70.00	10.80–60.00
		8.17/21.70/20.00/10	19.9/32.6/30.0/16	15.78/25.60/20.00/8
Specific Power	[W/Kg]	31.30–166.00	5.50–110.00	Unknown
		54.89/110.46/125.00/5	37.2/56.9/60.0/9	
Power Density	[KW/m ³]	2.50–33.42	2.58–8.50	1.35–4.16
		21.86/17.96/17.96/2	2.60/5.87/6.00/5	1.99/2.76/2.76/2
Efficiency	[%]	60.00–88.00	60.00–85.00	57.00–83.00
		7.28/76.96/78.30/19	7.21/73.3/73.0/17	8.65/71.45/75.00/11
Lifespan	[yr]	2.00–20.00	5.00–20.00	10.00–15.00
		5.93/10.50/10.00/8	4.78/9.38/9.00/8	2.86/13.33/15.00/3
Cycle Life	[cycles]	800–16,000	800–5,000	800–4,000
		5,250/7,759/7,500/16	1,225/2,368/2,000/11	1,203/2,360/2,000/5
Scale	[MW]	0.00–20.00	0.001–20.00	0.001–100.00
		5.59/3.58/0.73/18	5.91/3.55/1.00/19	25.54/14.87/12.00/15
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	100.00–2,000.00	110.00–2,000.0	110.00–2,000.00
		542.4/488.1/200.0/15	525.6/447/225/13	559.05/494.08/187.50/16
Power Capital Cost	[US\$/KW]	175.00–9,444.00	175.00–4,500.0	330.00–4,500.00
		2,355/2,461/1,545/15	1,365/1,788/1,300/12	1,208/1,643/1,098/12
Application		Medium/Large Scale Energy Management	Large Scale Energy Management	Large Scale Energy Management
Technical Maturity		Proven/Commercializing	Proven/Developing	Proven/Developing
Environmental Impact		Medium/Low	Medium	Medium

Πίνακας 5.3.2(4)- Πίνακας σύγκρισης Τεχνολογιών χημικής αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών ροής (πηγή :

https://www.researchgate.net/publication/3218707_A_Hybrid_Energy_Storage_System_Based_on_Compressed_Air_and_Supercapacitors_With_Maximum_Efficiency_Point_Tracking_MEPT)



Εικόνα 5.3.2(4)- Σύγκριση Τεχνολογιών χημικής αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών ροής (πηγή :

https://www.researchgate.net/publication/3218707_A_Hybrid_Energy_Storage_System_Based_on_Compressed_Air_and_Supercapacitors_With_Maximum_Efficiency_Point_Tracking_MEPT)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο τοπίο της αποθήκευσης ενέργειας (δηλ. μηχανική, χημική, ηλεκτρομαγνητική και θερμική), οι τεχνικές χημικής αποθήκευσης παραμένουν ο πιο καλά ερευνημένος και ανεπτυγμένος τομέας. Τα περισσότερα παραδοσιακά συστήματα χημικών μπαταριών έχουν εξαιρετικές επιδόσεις από τη μία ή την άλλη άποψη και έχουν επιδείξει μεγάλη καταλληλότητα για συγκεκριμένες εφαρμογές μικρής κλίμακας. Ωστόσο, πάσχουν από σοβαρές ελλείψεις για αποθήκευση μεγάλης κλίμακας. Οι μπαταρίες ZnAg έχουν εξαιρετική πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, αλλά υποφέρουν από μικρή διάρκεια ζωής και πολύ υψηλό κόστος και έτσι είναι κατάλληλες μόνο για εφαρμογές πολύ μικρής κλίμακας. Τα συστήματα ZnMn έχουν επίσης σχετικά μικρή διάρκεια ζωής, αλλά τα πάνε καλύτερα από άποψη κόστους. Το κόστος αυτό γίνεται υψηλό όταν επιχειρείται η παροχή υψηλής ισχύος και έτσι η κλίμακα είναι περιορισμένη. Για εφαρμογές μεσαίας κλίμακας, οι μπαταρίες Pb-Acid έχουν βρει μια θέση. Αυτές οι μπαταρίες Pb-Acid είναι φτηνές και παρέχουν υψηλή ισχύ, ωστόσο, έχουν επίσης σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η ενεργειακή απόδοση υπολείπεται κατά πολύ αυτής των χημικών συστημάτων ZnAg και ZnMn. Σε παρόμοια κλίμακα με την Pb-Acid, οι χημικές ενώσεις Li-Ion έχουν δείξει όχι μόνο εξαιρετική ενέργεια και απόδοση ισχύος, αλλά και εξαιρετική διάρκεια ζωής. Σχετικά με τις μπαταρίες ροής παρατηρείται ότι ανάμεσα τους ξεχωρίζουν οι μπαταρίες βαναδίου ως προς την τεχνολογική τους ωριμότητα, τους κύκλους ζωής, την ειδική ισχύ και την πυκνότητα ισχύος.

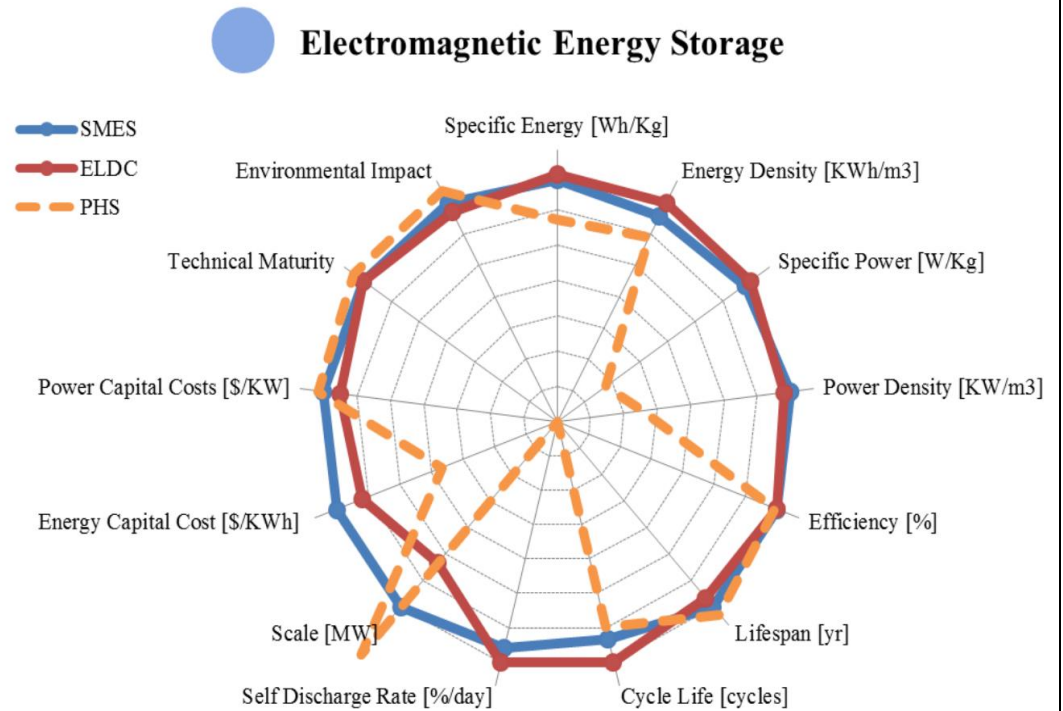
Επομένως μια σειρά κατάταξης των τριών ειδών μπαταριών ροής ως προς την ποιότητα θα ήταν η εξής:

- 1) Μπαταρίες ροής οξειδοαναγωγής-βαναδίου
- 2) Μπαταρίες ροής βρωμίου-ψευδαργύρου
- 3) Μπαταρίες ροής βρωμίου-πολυθειφιδίου

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΉ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Πίνακας 5.3.2(5)- Πίνακας σύγκρισης Τεχνολογιών ηλεκτρομαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας (πηγή: https://www.researchgate.net/publication/3218707_A_Hybrid_Energy_Storage_System_Based_on_Compressed_Air_and_Supercapacitors_With_Maximum_Efficiency_Point_Tracking_MEPT)

Metric		Superconducting	Supercapacitor
		range $\sigma/\mu/\chi/n$	range $\sigma/\mu/\chi/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	0.27–75.00	0.07–85.60
		21.43/11.79/5.00/11	20.62/16.36/10.00/25
Energy Density	[KWh/m ³]	0.20–13.80	1.00–35.00
		4.45/4.99/3.85/12	11.81/13.77/10.00/9
Specific Power	[W/Kg]	500.00–15,000.00	5.44–100,000.00
		6,570.77/5,600.00/2,000.00/5	20,154.00/8,930.44/3,500.00/24
Power Density	[KW/m ³]	300.00–4,000.00	15.00–4,500.00
		1,719.85/1,457.50/765.00/4	2,000.74/921.00/30.00/5
Efficiency	[%]	80.00–99.00	65.00–99.00
		5.72/92.45/95.00/11	9.63/91.33/95.00/12
Lifespan	[yr]	20.00–30.00	5.00–20.00
		5.77/25.00/25.00/4	5.35/11.43/10.00/7
Cycle Life	[cycles]	10,000–100,000	10,000–1,000,000
		40,865.63/68,000.00/90,000.00/5	364,649/302,308/100,000/13
Self-Discharge Rate	[%/day]	1.00–15.00	0.46–40.00
		6.25/7.50/7.00/3	16.43/18.64/20.00/7
Scale	[MW]	0.01–200.00	0.00–5.00
		48.55/23.56/8.00/22	1.29/0.52/0.02/23
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	500.00–1,080,000.00	100.00–94,000.00
		336,835/125,488/2,755/10	28,160/19,866/9,750/16
Power Capital Cost	[US\$/KW]	196.00–10,000.00	100.00–800.00
		2,412.70/981.56/325.00/16	226.46/321.00/300.00/10
Application		Medium/Large Scale	Small/Medium Scale
		Power Quality	Power Quality
Technical Maturity		Proven/Commercializing	Proven/Commercializing
Environmental Impact		Low	Very Low



Εικόνα 5.3.2(5)- Σύγκριση Τεχνολογιών ηλεκτρομαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας (π

ηγή: https://www.researchgate.net/publication/3218707_A_Hybrid_Energy_Storage_System_Based_on_Compressed_Air_and_Supercapacitors_With_Maximum_Efficiency_Point_Tracking_MEPT)

ηγή: https://www.researchgate.net/publication/3218707_A_Hybrid_Energy_Storage_System_Based_on_Compressed_Air_and_Supercapacitors_With_Maximum_Efficiency_Point_Tracking_MEPT)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

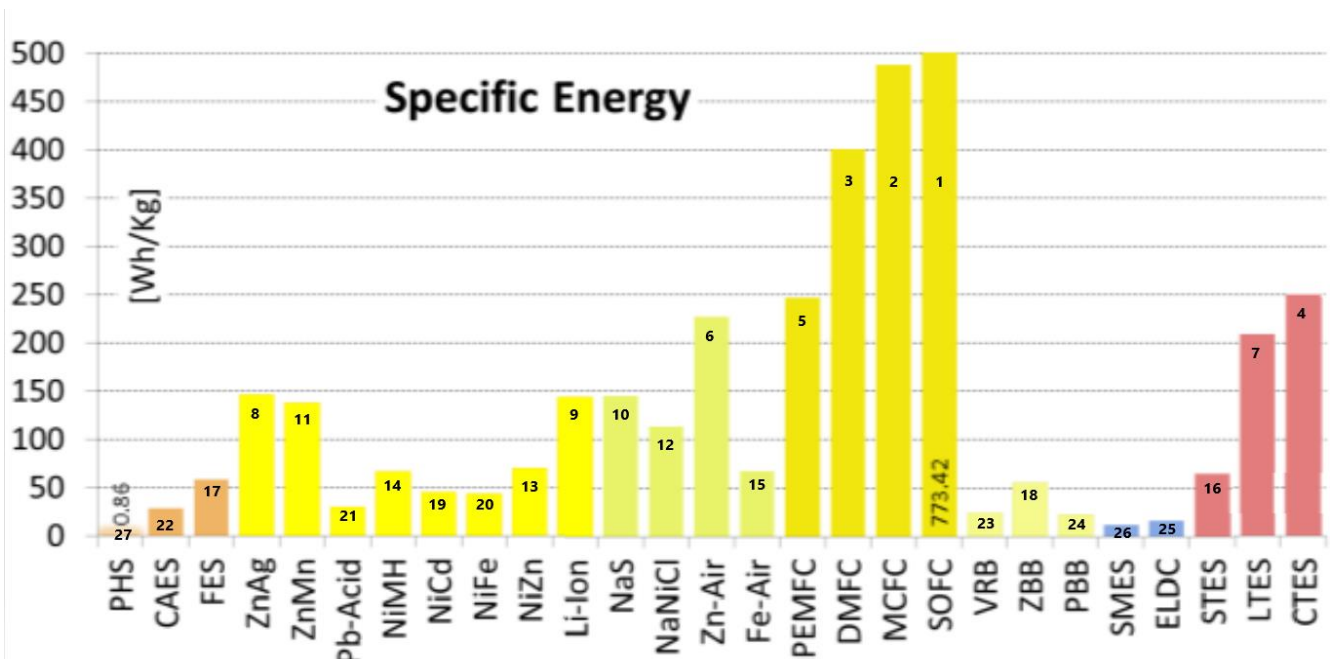
Τόσο οι λύσεις SMES όσο και οι λύσεις ELDC υπόσχονται εξαιρετικές προοπτικές σε εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Αυτές οι λύσεις, δυστυχώς, έχουν και οι δύο χαμηλή ενεργειακή απόδοση. Η ανάπτυξη των ναυσοωλήνων και των ναυσοωματιδίων παρέχουν συνεχείς βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση του ELDC. Τόσο οι SMES όσο και οι ELDC εμπίπτουν στο ίδιο πεδίο εφαρμογής με τα συστήματα FES, με τα συστήματα FES να συνεχίζουν να προσφέρουν καλύτερη ενέργεια από την ELDC και την SMES.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης έχουν συγκριθεί αριθμητικά και ποιοτικά βάσει δεκατεσσάρων παραμέτρων, ήτοι: ειδική ενέργεια, πυκνότητα ενέργειας, ειδική ισχύς, πυκνότητα ισχύος, απόδοση, διάρκεια ζωής, κύκλος ζωής, ρυθμός αυτοεκφόρτισης, κλίμακα, κόστος κεφαλαίου ενέργειας, κόστος κεφαλαίου ισχύος, εφαρμογή, τεχνική ωριμότητα και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Έτσι λοιπόν, έχουμε τα εξής αποτελέσματα :

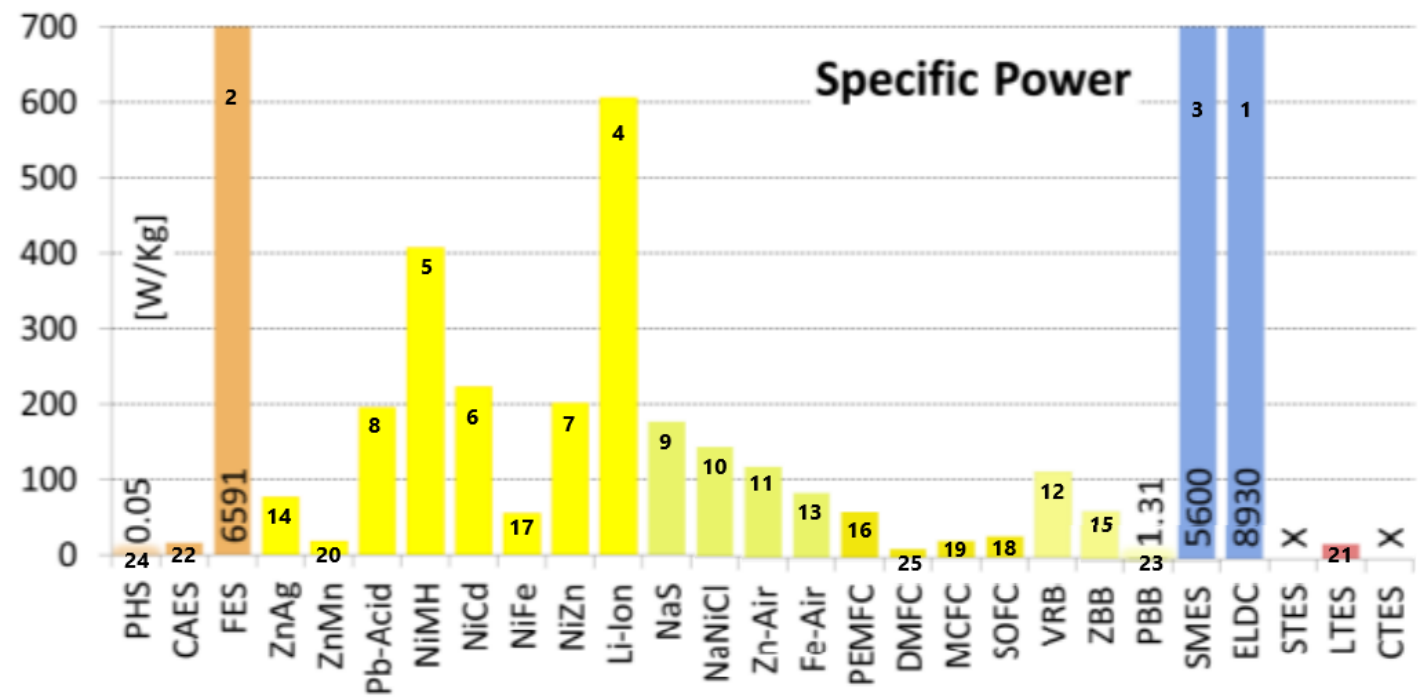
Έχοντας κατατάξει τις 27 τεχνολογίες απο την καλύτερη προς την χειρότερη όσον αναφορά το κριτήριο αξιολόγησης(πηγή :

https://www.researchgate.net/publication/3218707_A_Hybrid_Energy_Storage_System_Based_on_Compressed_Air_and_Supercapacitors_With_Maximum_Efficiency_Point_Tracking_MEPT

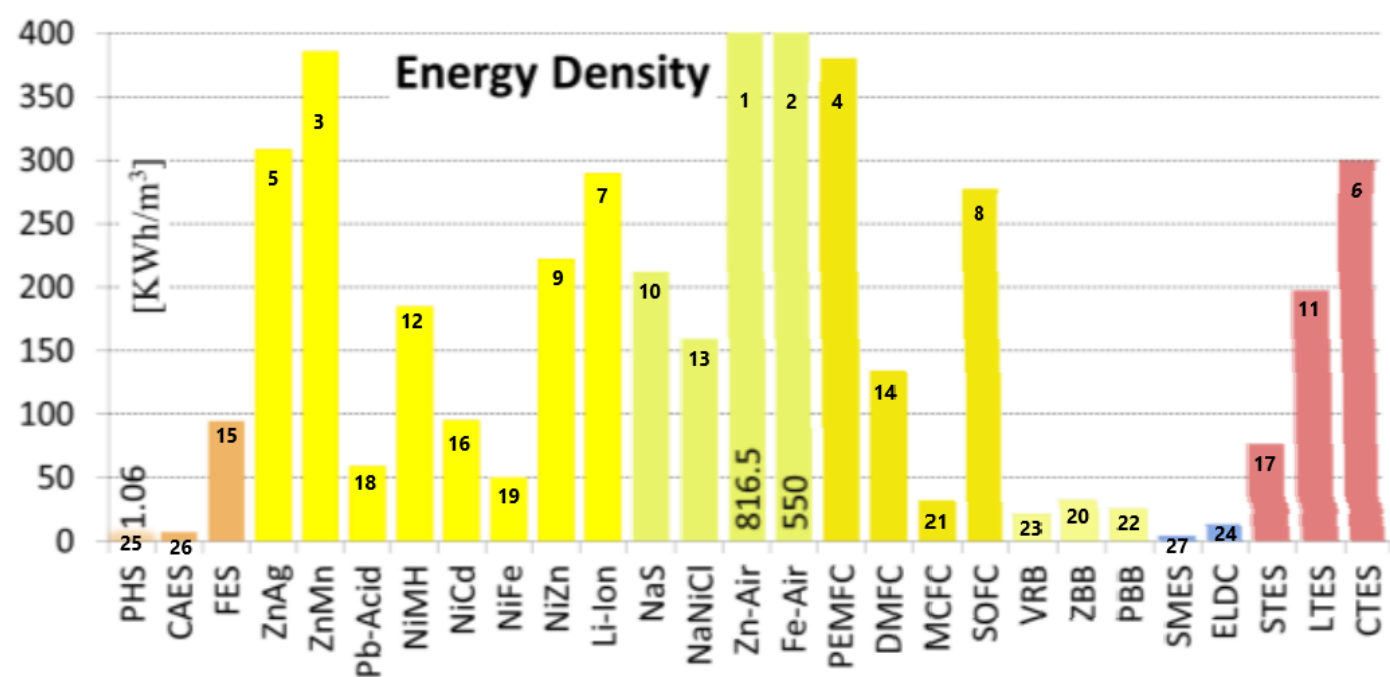
Ειδική Ενέργεια



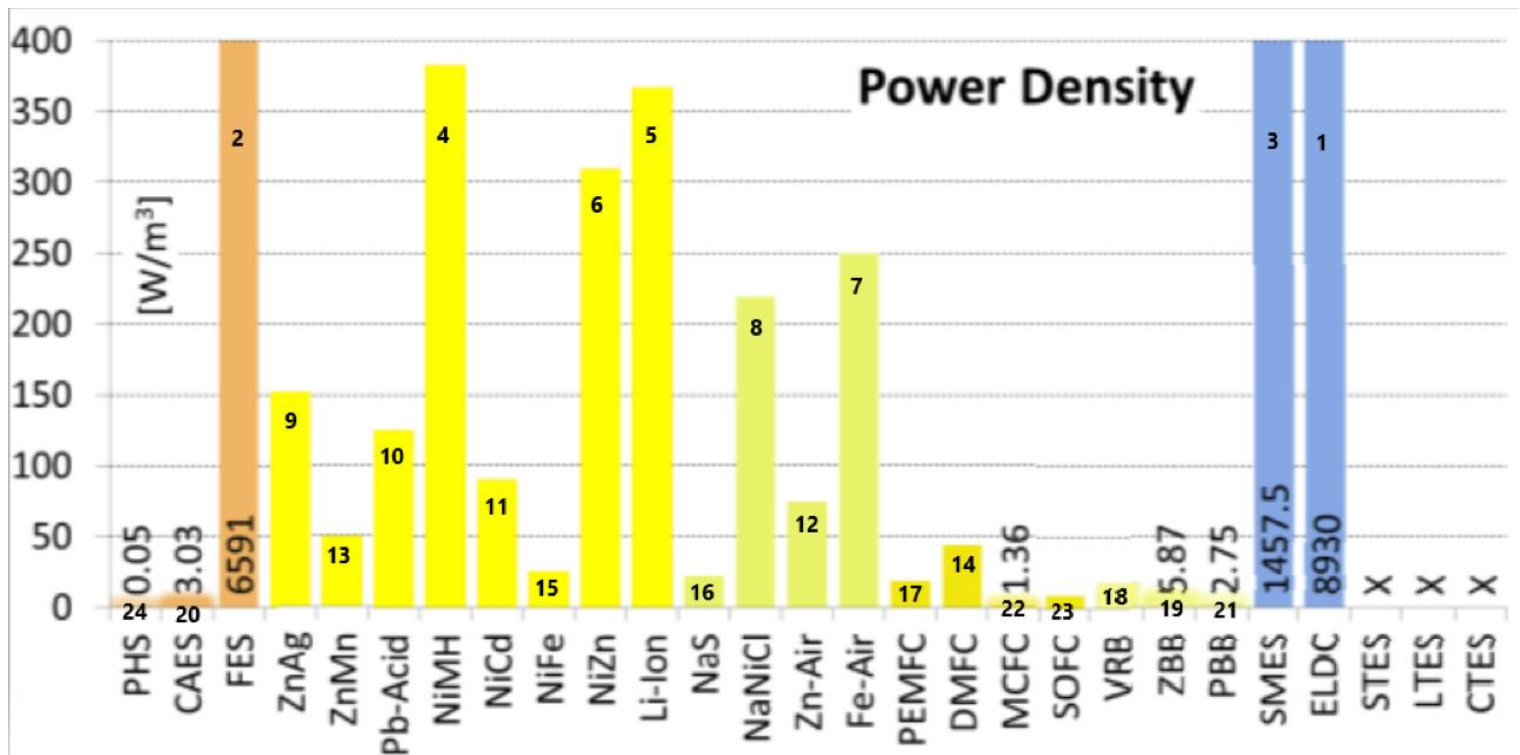
Ειδική Ισχύς



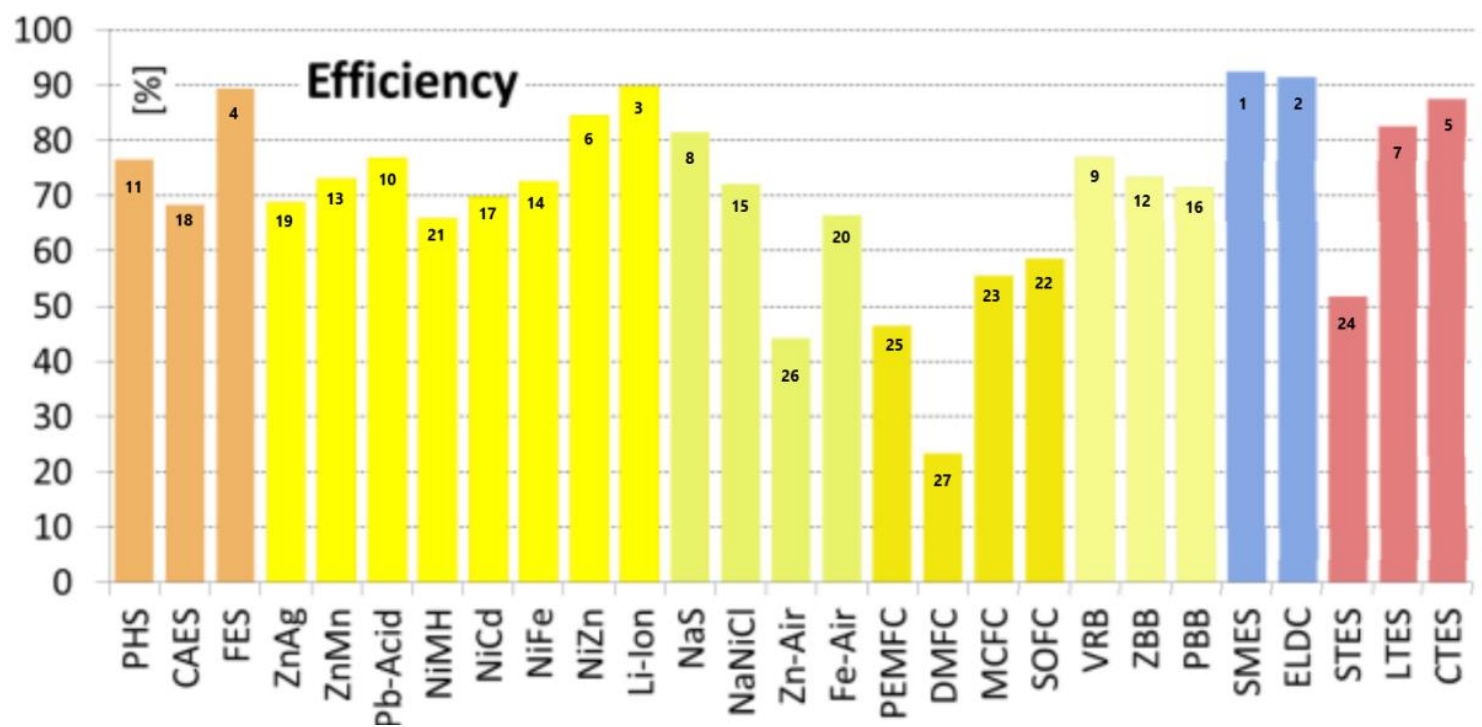
Ενεργειακή Πυκνότητα



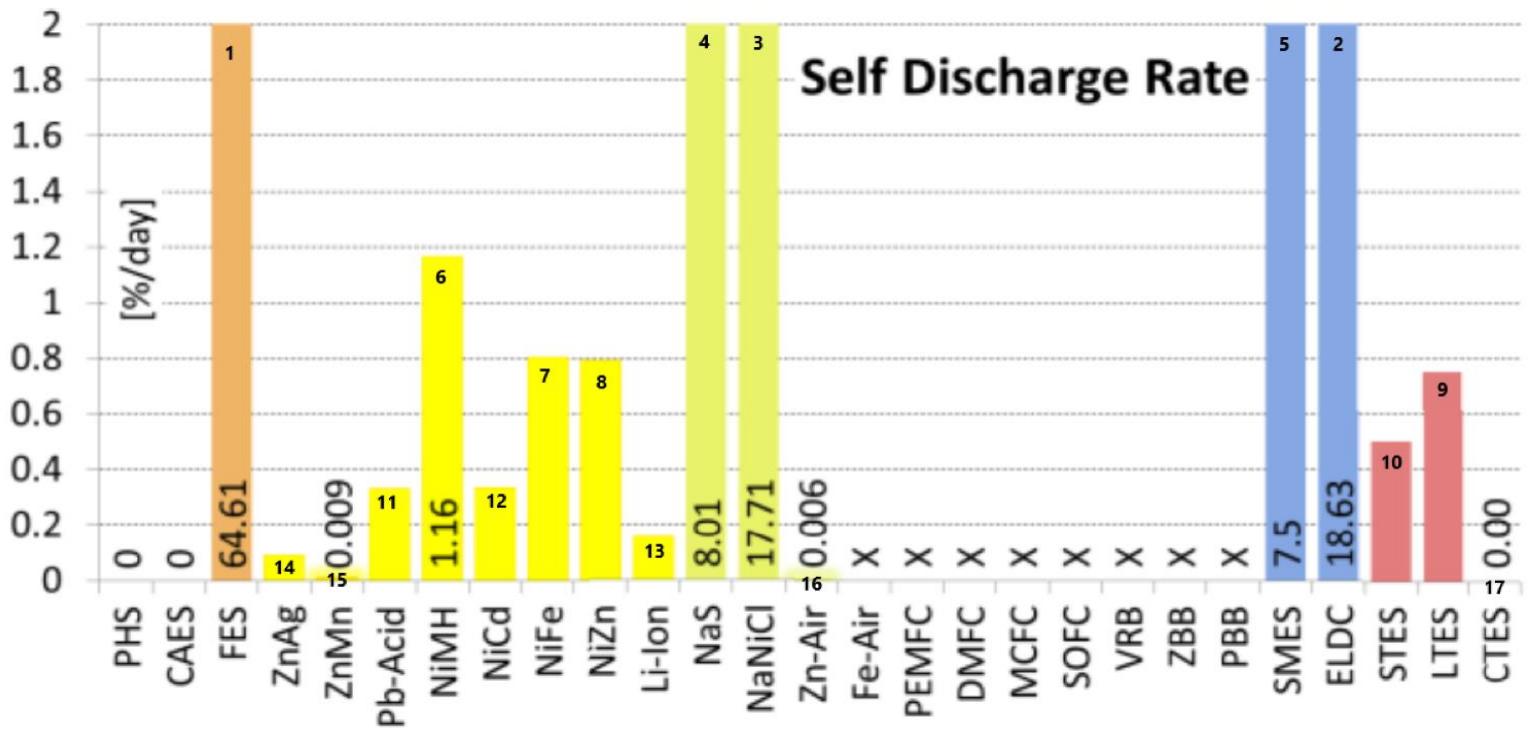
Πυκνότητα Ισχύος



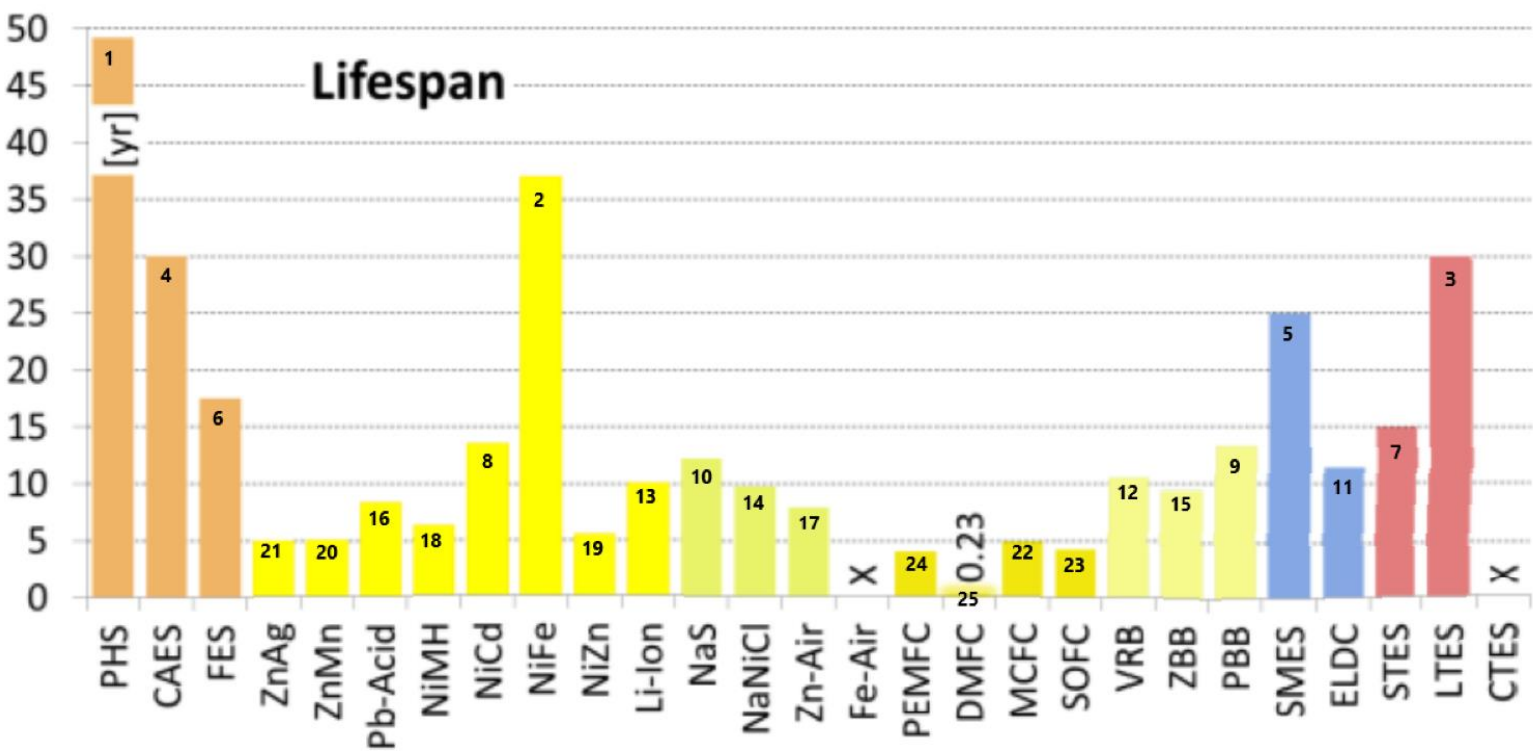
Απόδοση



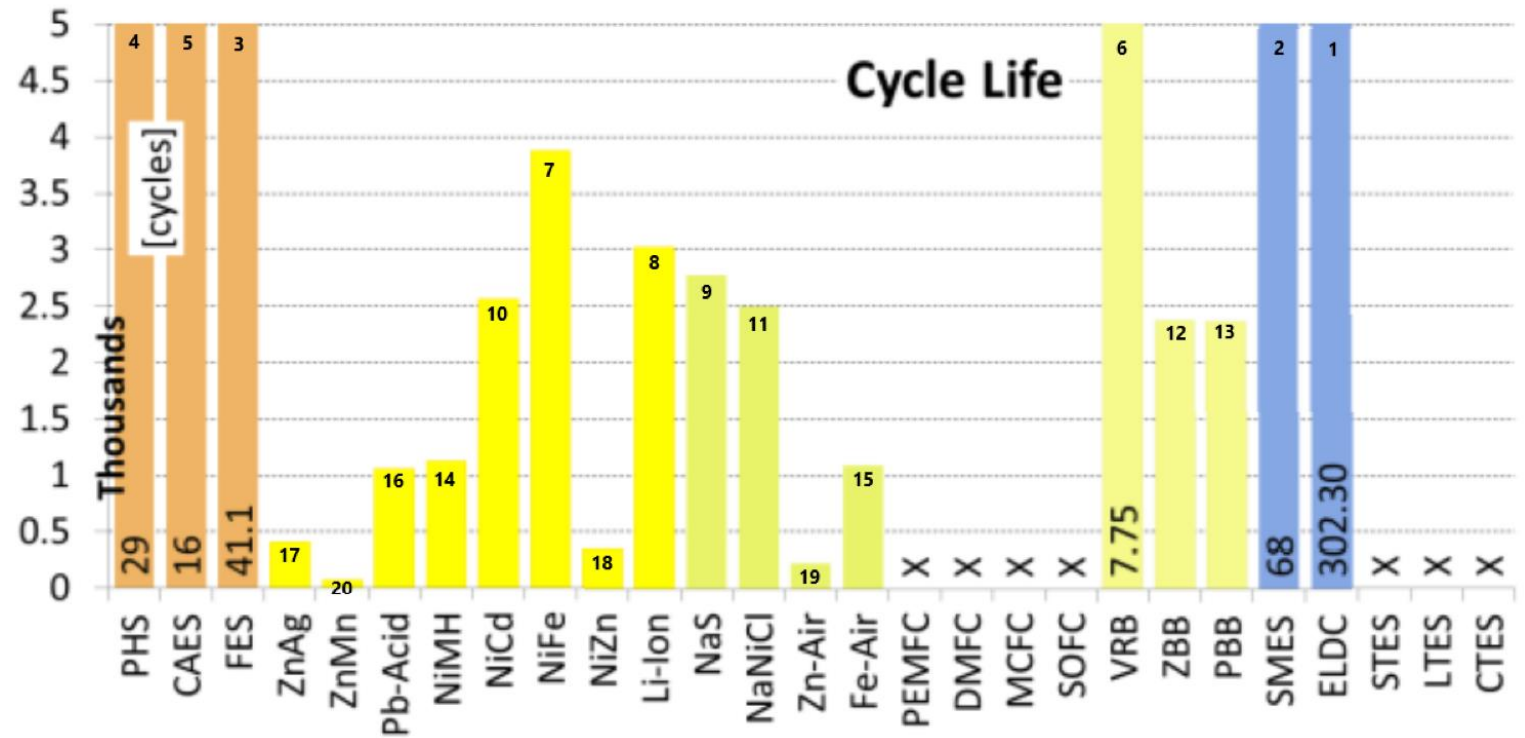
Ρυθμός Αυτοεκφόρτισης



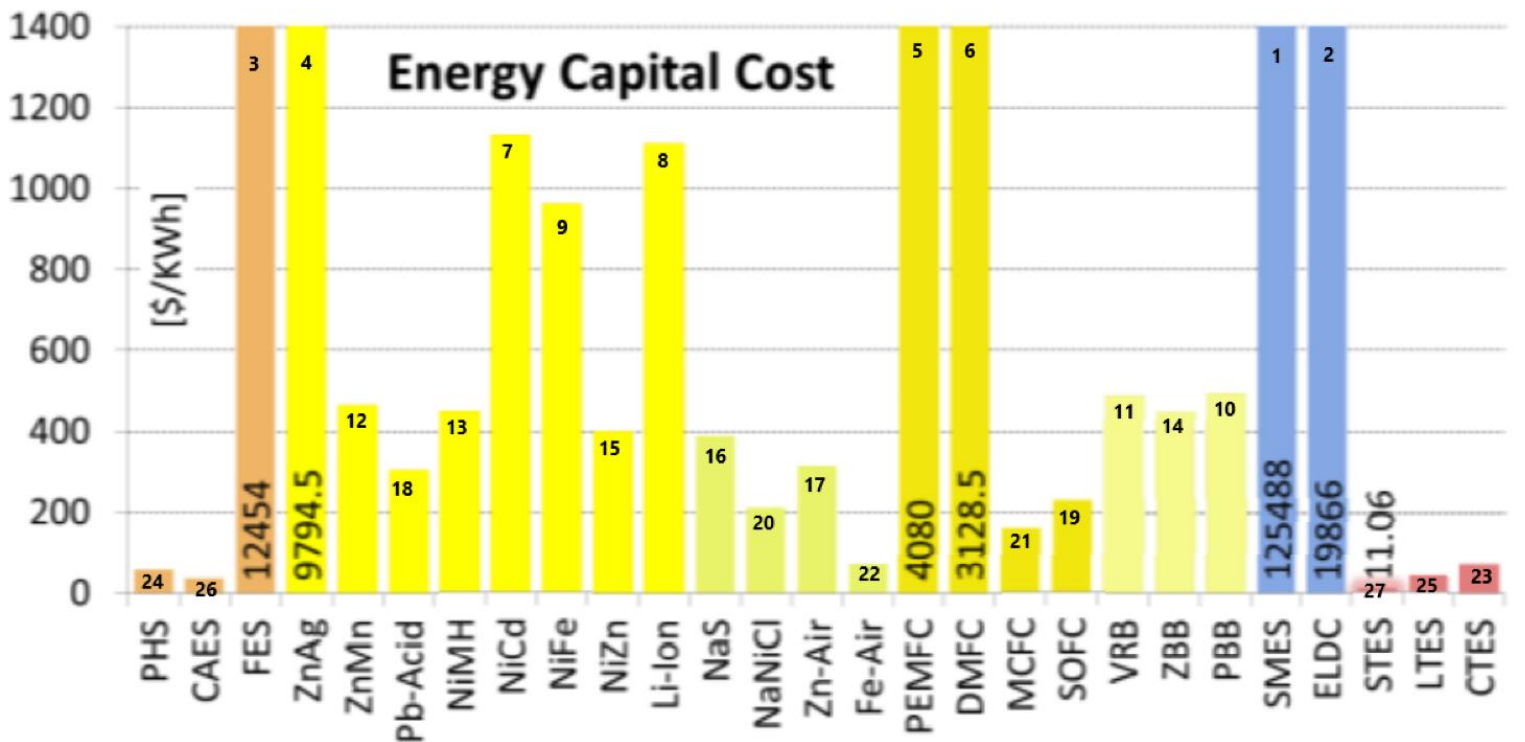
Διάρκεια Ζωής



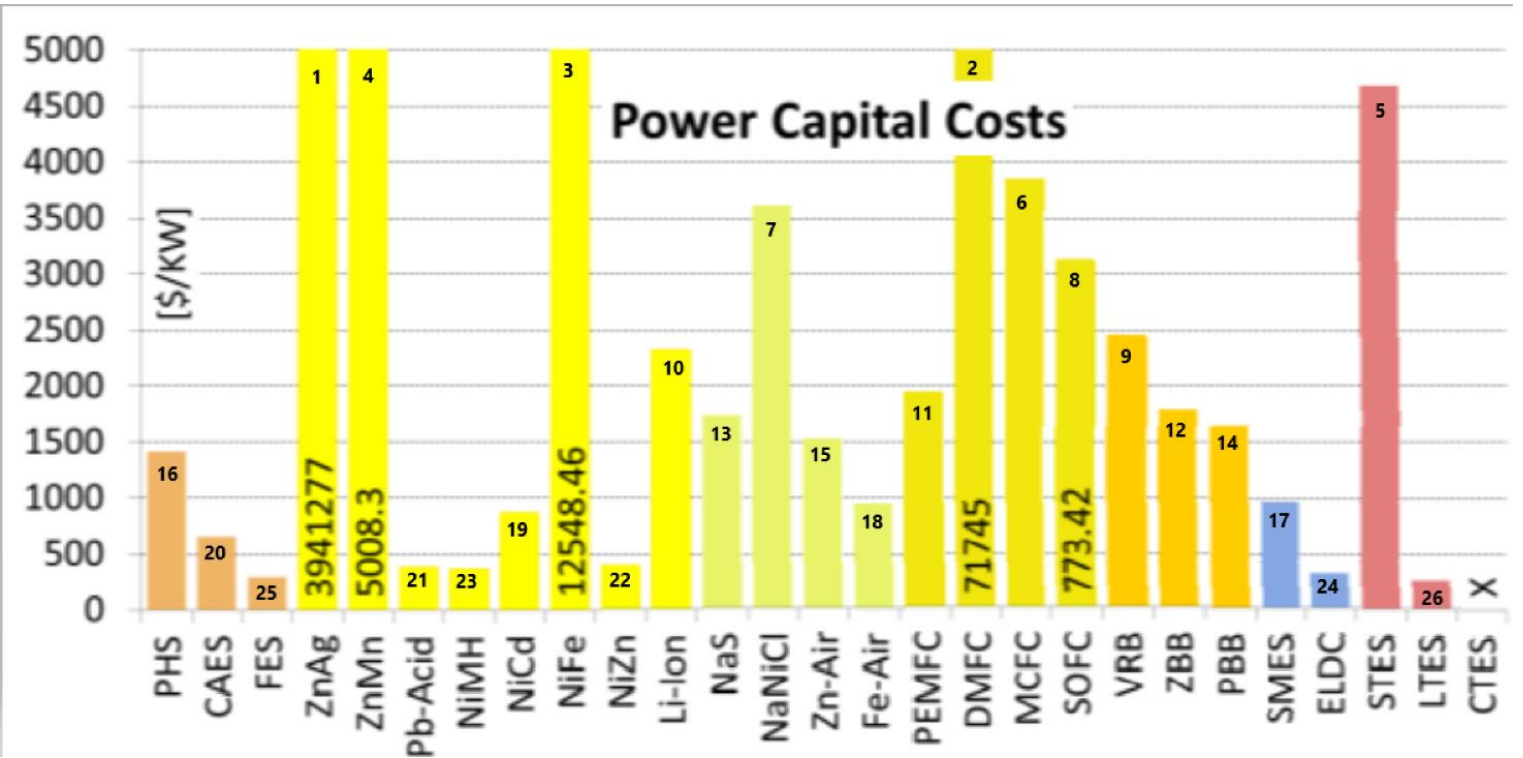
Διάρκεια Ζωής Κύκλου



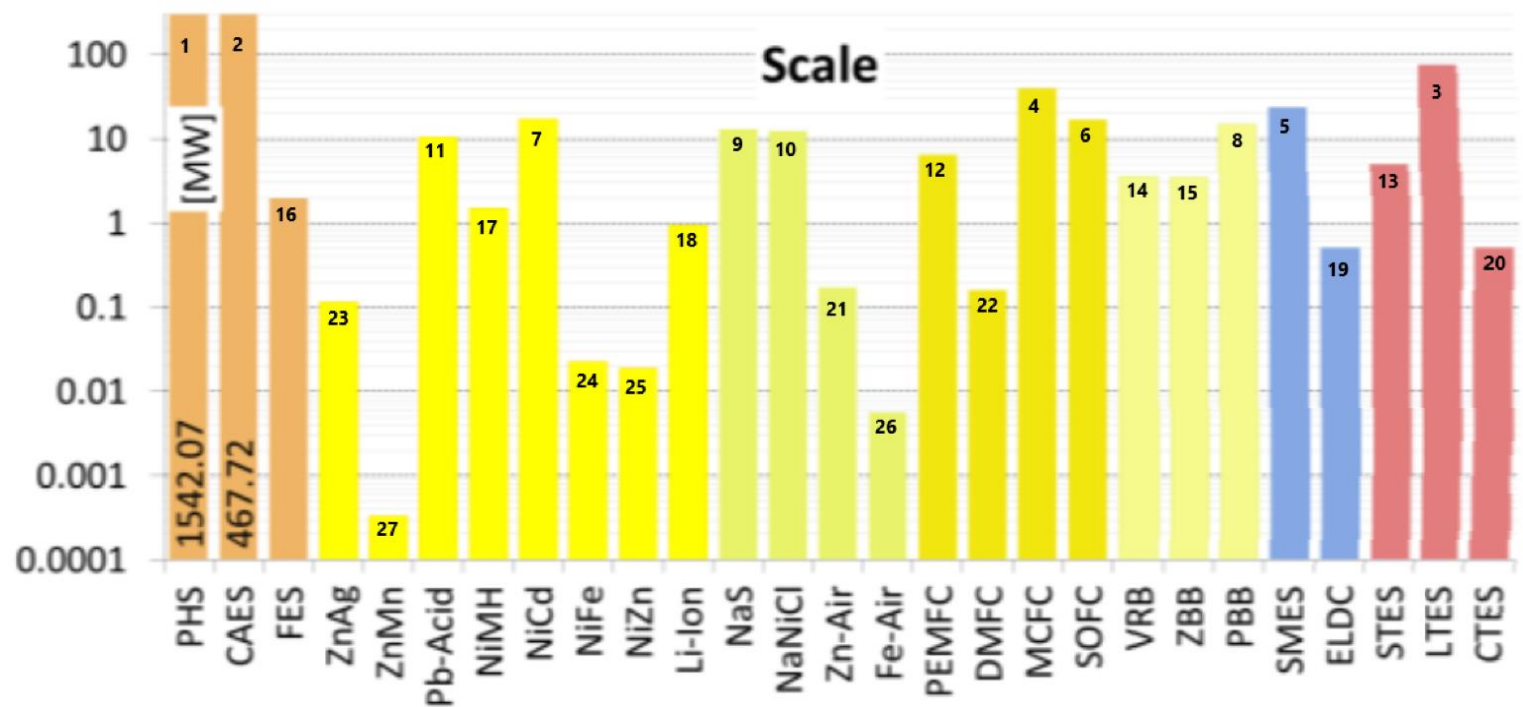
Κόστος Κεφαλαίου Ενέργειας



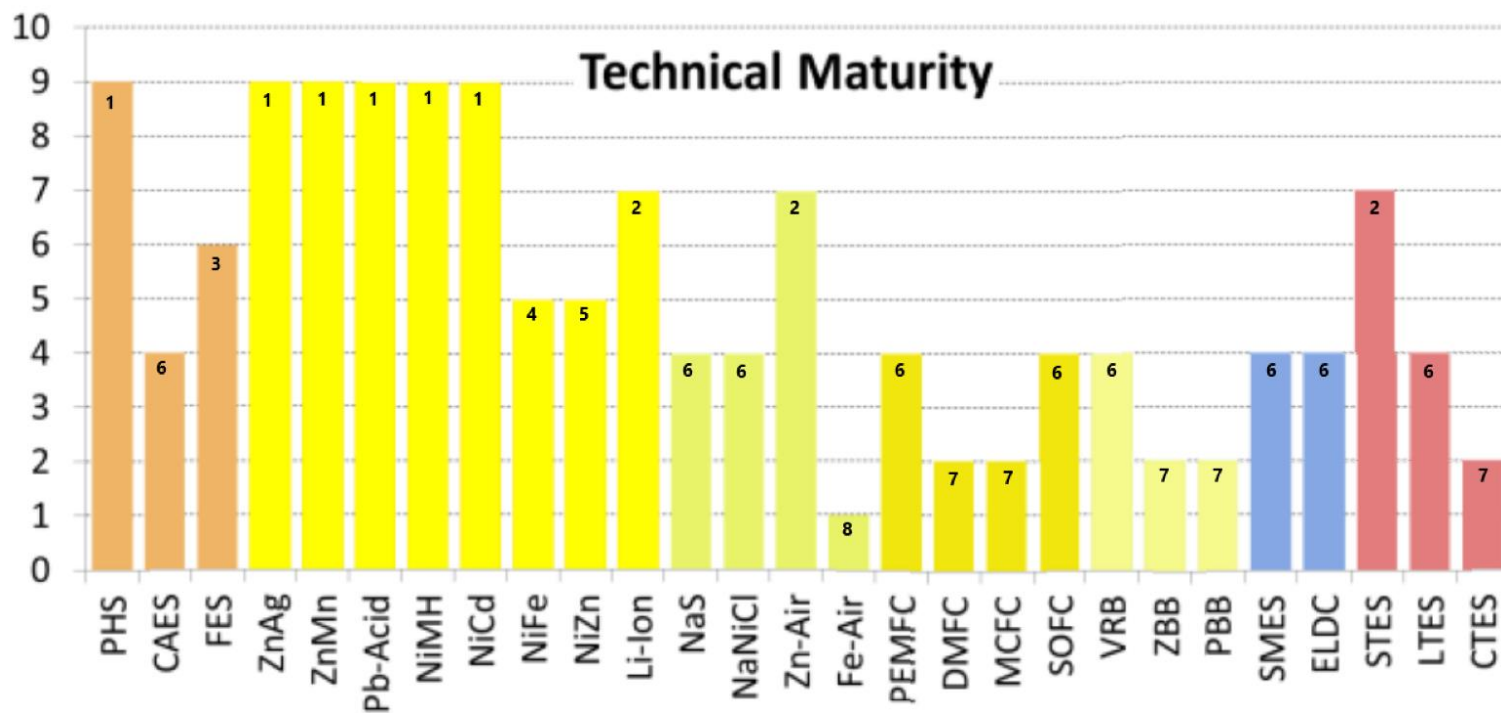
Κόστος Κεφαλαίου Ισχύος



Κλίμακα

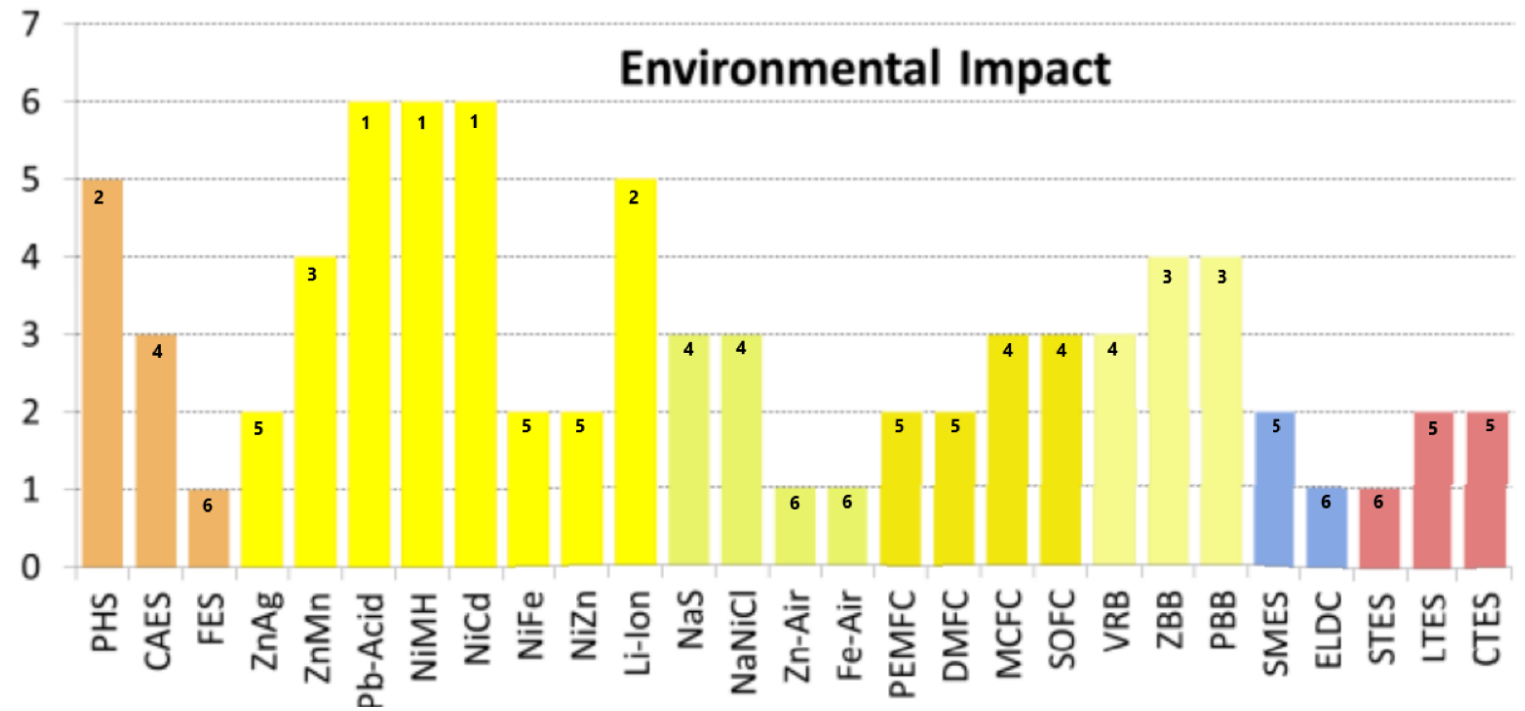


Τεχνολογική Ωριμότητα



Technical Maturity Scale Conversion		
Very Mature	Fully Commercialized	9
Very Mature	Commercialized	8
Mature	Commercialized	7
Mature	Commercializing	6
Mature	Limited Development	5
Proven	Commercializing	4
Proven	Limited Development	3
Proven	Developing	2
Research	Developing	1

Περιβαλλοντικός Αντίκτυπος



Environmental Impact Scale Conversion	
Very Very High	8
Very High	7
High	6
High / Medium	5
Medium	4
Medium / Low	3
Low	2
Very Low	1

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και υπάρχουν πολλές τεχνικές διαφορές μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης, δεν είναι πάντα ο πιο σημαντικός παράγοντας όταν αποφασίζει κανείς για μια επιλογή αποθήκευσης ενέργειας. Μερικές φορές, οι τεχνικές πτυχές έχουν μικρή σημασία από μόνες τους, αλλά μπορούν να επηρεάσουν για παράδειγμα την τιμή της αποθηκευμένης ενέργειας. Η ενεργειακή απόδοση των κυψελών καυσίμου υπερβαίνει κατά πολύ τις PHS, CAES και μπαταρίες ροής. Αυτό σημαίνει σημαντική μείωση της χρήσης γης. Μεταξύ των κυψελών καυσίμου οι πιο υποσχόμενες φαίνεται να είναι οι συσκευές τύπου SOFC. α συστήματα λιωμένου άλατος, NaS και NaNiCl έχουν εφαρμοστεί σε ηλεκτρικά οχήματα και παρουσιάζουν λογικές επιδόσεις ισχύος και ενέργειας καθώς και μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι συσκευές αυτές είναι εύκολα ανακυκλώσιμες, ανθεκτικές και είναι κατάλληλες για βαριά και ελαφριά φορτίσεις/εκφορτίσεις. Είναι επίσης πολλά υποσχόμενες για μεγαλύτερες κλίμακας και μπορεί να είναι καταλληλότερες (λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής) από τις κυψέλες καυσίμου για την κάλυψη αυτού του στόχου. πρόκληση. Ωστόσο, πρόκειται για συσκευές υψηλών θερμοκρασιών που απαιτούν θερμική διαχείριση και παρουσιάζουν σχετικές παρασιτικές απώλειες. Οι μπαταρίες Li-Ion έχουν σημειώσει αξιοσημείωτη επιτυχία και έχουν εκτοπίσει ή εκτοπίζουν τις μπαταρίες NiCd και NiMH στον τομέα αυτό. Ομοίως, οι χημικές ενώσεις NiZn που χρησιμοποιούνται παραδοσιακά στα ηλεκτρικά σκούτερ έχουν επίσης υποστεί παρόμοιο εκτοπισμό κυρίως λόγω της μικρής διάρκειας ζωής τους. Επιπλέον, στο πλαίσιο της διαχείρισης και της ρύθμισης της ποιότητας ισχύος του δικτύου, τα συστήματα FES, ELDC και SMES έχουν βρει θέση. Η παροχή ισχύος αυτών των τριών τεχνολογιών είναι ασύγκριτη με οποιοδήποτε άλλο σύστημα και είναι πιθανό ότι και οι τρεις θα συνεχίσουν να βελτιώνονται παράλληλα με άλλες λύσεις αποθήκευσης που επικεντρώνονται στη "διαχείριση της ενέργειας". Περισσότερα σημαντικότερη σε αυτό το σημείο είναι η πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας της τεχνολογίας, καθώς περιγράφει πόσο ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε δεδομένο όγκο (ή μάζα). Οι σύγχρονες μπαταρίες, όπως οι μπαταρίες Li-Ion και Na-S, έχουν εξαιρετική ενεργειακή πυκνότητα, η οποία ανοίγει τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας πιο κοντά στο καταναλωτή, γεγονός που μπορεί να είναι επωφελές. Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σημαίνει επίσης ότι οι μικρότερες εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με θετικό αντίκτυπο στην τιμή της ενέργειας ως τελικό προϊόν.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΛΥΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ

Πίνακας 5.3.2(6)- Πίνακας σύγκρισης των τριών τεχνολογιών που αναλύθηκαν (πηγή:

https://www.researchgate.net/publication/3218707_A_Hybrid_Energy_Storage_System_Based_on_Compressed_Air_and_Supercapacitors_With_Maximum_Efficiency_Point_Tracking_MEPT)

Metric		Superconducting	Supercapacitor
		range $\sigma/\mu\tilde{x}/n$	range $\sigma/\mu\tilde{x}/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	0.27–75.00	0.07–85.60
		21.43/11.79/5.00/11	20.62/16.36/10.00/25
Energy Density	[KWh/m ³]	0.20–13.80	1.00–35.00
		4.45/4.99/3.85/12	11.81/13.77/10.00/9
Specific Power	[W/Kg]	500.00–15,000.00	5.44–100,000.00
		6,570.77/5,600.00/2,000.00/5	20,154.00/8,930.44/3,500.00/24
Power Density	[KW/m ³]	300.00–4,000.00	15.00–4,500.00
		1,719.85/1,457.50/765.00/4	2,000.74/921.00/30.00/5
Efficiency	[%]	80.00–99.00	65.00–99.00
		5.72/92.45/95.00/11	9.63/91.33/95.00/12
Lifespan	[yr]	20.00–30.00	5.00–20.00
		5.77/25.00/25.00/4	5.35/11.43/10.00/7
Cycle Life	[cycles]	10,000–100,000	10,000–1,000,000
		40,865.63/68,000.00/90,000.00/5	364,649/302,308/100,000/13
Self-Discharge Rate	[%/day]	1.00–15.00	0.46–40.00
		6.25/7.50/7.00/3	16.43/18.64/20.00/7
Scale	[MW]	0.01–200.00	0.00–5.00
		48.55/23.56/8.00/22	1.29/0.52/0.02/23
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	500.00–1,080,000.00	100.00–94,000.00
		336,835/125,488/2,755/10	28,160/19,866/9,750/16
Power Capital Cost	[US\$/KW]	196.00–10,000.00	100.00–800.00
		2,412.70/981.56/325.00/16	226.46/321.00/300.00/10
Application		Medium/Large Scale Power Quality	Small/Medium Scale Power Quality
Technical Maturity		Proven/Commercializing	Proven/Commercializing
Environmental Impact		Low	Very Low

Metric		Vanadium Redox	Zinc Bromine	Polysulphide Bromine
		range $\sigma/\mu\tilde{x}/n$	range $\sigma/\mu\tilde{x}/n$	range $\sigma/\mu\tilde{x}/n$
Specific Energy	[Wh/Kg]	10.00–50.00	11.10–90.00	10.00–50.00
		11.15/24.43/24.00/14	23.3/55.9/60.0/19	12.46/22.67/20.00/9
Energy Density	[KWh/m ³]	10.00–33.00	5.17–70.00	10.80–60.00
		8.17/21.70/20.00/10	19.9/32.6/30.0/16	15.78/25.60/20.00/8
Specific Power	[W/Kg]	31.30–166.00	5.50–110.00	Unknown
		54.89/110.46/125.00/5	37.2/56.9/60.0/9	
Power Density	[KW/m ³]	2.50–33.42	2.58–8.50	1.35–4.16
		21.86/17.96/17.96/2	2.60/5.87/6.00/5	1.99/2.76/2.76/2
Efficiency	[%]	60.00–88.00	60.00–85.00	57.00–83.00
		7.28/76.96/78.30/19	7.21/73.3/73.0/17	8.65/71.45/75.00/11
Lifespan	[yr]	2.00–20.00	5.00–20.00	10.00–15.00
		5.93/10.50/10.00/8	4.78/9.38/9.00/8	2.86/13.33/15.00/3
Cycle Life	[cycles]	800–16,000	800–5,000	800–4,000
		5,250/7,759/7,500/16	1,225/2,368/2,000/11	1,203/2,360/2,000/5
Scale	[MW]	0.00–20.00	0.001–20.00	0.001–100.00
		5.59/3.58/0.73/18	5.91/3.55/1.00/19	25.54/14.87/12.00/15
Energy Capital Cost	[US\$/KWh]	100.00–2,000.00	110.00–2,000.0	110.00–2,000.00
		542.4/488.1/200.0/15	525.6/447/225/13	559.05/494.08/187.50/16
Power Capital Cost	[US\$/KW]	175.00–9,444.00	175.00–4,500.0	330.00–4,500.00
		2,355/2,461/1,545/15	1,365/1,788/1,300/12	1,208/1,643/1,098/12
Application		Medium/Large Scale Energy Management	Large Scale Energy Management	Large Scale Energy Management
Technical Maturity		Proven/Commercializing	Proven/Developing	Proven/Developing
Environmental Impact		Medium/Low	Medium	Medium

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ

Παρατηρώντας με τη σειρά τα διαγράμματα και τον πίνακα (πίνακας 5.3.2(6)) συγκρίνοντας τις τρεις αυτές εφαρμογές αμέσως καταλαβαίνουμε πως οι μπαταρίες ροής συγκριτικά με τις άλλες δύο μεθόδους είναι αρκετά πίσω και σε ερευνητικό επίπεδο και σε τεχνικό. Δηλαδή φαίνεται οτι στην ειδική ισχύ, ενέργεια, απόδοση, διάρκεια ζωής, κύκλους ζωής και σχεδόν όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά οι μπαταρίες ροής είναι πιο κάτω απο τις άλλες δύο εφαρμογές. Αυτό είναι λογικό καθώς οι μπαταρίες ροής βρίσκονται σε ένα στάδιο όπου έχουν πολλά περιθώρια εξέλιξης και βελτίωσης. Επομένως προς το παρόν οι μπαταρίες ροής παρόλο που έχουν πλεονεκτήματα ως προς την απλότητα λειτουργίας τους και την ανεκτικότητα τους στις ακραίες καιρικές συνθήκες δεν αποτελούν την παρούσα χρονική περίοδο την βέλτιστη λύση για την αποθήκευση ενέργειας. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μεγάλων απαιτήσεων όπου σε αυτές τις εφαρμογές λόγω την εξελιγμένης τους κατάστασης θα ήταν πιο αποδοτικό να χρησιμοποιηθούν συστήματα SMES παρόλο που έχουν και αυτά τα συστήματα την αρνητική τους πλευρά. Τα συστήματα SMES παρόλο που έχουν εξαιρετική απόδοση στις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται, έχουν προβλήματα με το κόστος και την συντήρηση. Οι υπερπυκνωτές απο την άλλη, είναι συσκευές οι οποίες έχουν μελετηθεί και αναπτυχθεί σε ένα πολύ καλό επίπεδο με πολλά πλεονεκτήματα παρόλο που προορίζονται για εφαρμογές όχι μεγάλων απαιτήσεων. Συμπερασματικά το ιδανικό σενάριο θα ήταν να αναπτυχθούν περαιτέρω οι μπαταρίες ροής με σκοπό να συνδυαστούν με τους υπερπυκνωτές έτσι ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Επιπλέον, λόγω της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται και η συνεχώς ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και την αποθήκευση της. Οι μπαταρίες ροής λόγω της ευαισθησίας τους σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, της περιορισμένης διάρκειας ζωής τους και της χαμηλής ενεργειακής τους πυκνότητας θα ήταν μια κακή επιλογή για συνεργασία με ΑΠΕ. Επομένως οι δύο καλύτερες επιλογές σε αυτή την περίπτωση θα ήταν τα συστήματα SMES και οι υπερπυκνωτές. Οι υπερπυκνωτές προσφέρουν μεν μεγάλη διάρκεια ζωής παρόλα αυτά απαιτούν υψηλό κόστος για τέτοιες εφαρμογές άρα η καλύτερη λύση θα ήταν τα συστήματα SMES.

6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Είναι προφανές ότι η αποθήκευση ενέργειας συνεπάγεται κόστος, αλλά είδαμε ότι, σε πολλές περιπτώσεις, η αποθήκευση είναι ήδη οικονομικά αποδοτική. Θα προκύψουν όλο και περισσότερες δυνατότητες εφαρμογής καθώς γίνεται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα. Η αποθήκευση αποτελεί μείζον ζήτημα με την αύξηση των ανανεώσιμων αλλά αποκεντρωμένων πηγών ενέργειας που διεισδύουν στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Δεν είναι μόνο μια τεχνική λύση για το δίκτυο διαχείρισης, εξασφαλίζοντας την εξισορρόπηση του φορτίου σε πραγματικό χρόνο, αλλά είναι επίσης ένα μέσο για την καλύτερη αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών, αποφεύγοντας την αποκοπή φορτίου σε περιόδους υπερπαραγωγής. Συνδεδεμένη με την τοπική παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, η αποκεντρωμένη αποθήκευση θα μπορούσε επίσης να βελτιώσει την ευρωστία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός δικτύου ενεργειακών πάρκων που τροφοδοτούν μια συγκεκριμένη ζώνη. Πολλές λύσεις είναι διαθέσιμες για την αύξηση της ασφάλειας του συστήματος, αλλά είναι τόσο διαφορετικές σε από πλευράς προδιαγραφών που είναι δύσκολο να συγκριθούν. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο προσπαθήσαμε να αναδείξουμε μια ομάδα τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στη βελτίωση της απόδοσης και τις εκτιμήσεις κόστους για τα συστήματα αποθήκευσης. Εκτός από τις ερευνητικές εργασίες για το σχεδιασμό και τη βελτίωση των συστημάτων αποθήκευσης που είναι καλά προσαρμοσμένα στις ανάγκες, είναι επίσης απαραίτητο να βελτιωθούν τα μοντέλα αξιολόγησης του προσδόκιμου ζωής όσον αφορά την ικανότητα ανακύκλωσης, και, μερικές φορές, τα μοντέλα απόδοσης, όπως στην περίπτωση των ηλεκτροχημικών συσσωρευτών. Με βάση το περιεχόμενο αυτής της μελέτης και την προσεκτική μέτρηση των διακυβευμάτων, διαπιστώνουμε ότι:

- Η ανάπτυξη των τεχνικών αποθήκευσης απαιτεί τη βελτίωση και τη βελτιστοποίηση των ηλεκτρονικών ισχύος, που χρησιμοποιούνται συχνά στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε αποθηκεύσιμη ενέργεια, και αντίστροφα.
- Η μελέτη ολοκληρωμένων συστημάτων (αποθήκευση, συναφής μετασχηματισμός της ηλεκτρικής ενέργειας, ηλεκτρονικά ισχύος, συστήματα ελέγχου, κ.λπ.) θα οδηγήσει στη βελτιστοποίηση των τεχνικών όσον αφορά το κόστος, την αποδοτικότητα, την αξιοπιστία, τη συντήρηση, τις κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κ.λπ.
- Είναι σημαντικό να εκτιμηθεί το εθνικό ενδιαφέρον για τις τεχνικές αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου.
- Επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη σχετικά με τη δυνατότητα συνδυασμού διαφόρων αποθηκευτικών μεθόδων με μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας θα οδηγήσει στη βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος και στη μείωση των αερίων του

θερμοκηπίου που δημιουργούνται από τις συμβατικές καύση αερίου από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

- Αξιολόγηση του ενδιαφέροντος για τα συστήματα θερμικής αποθήκευσης υψηλής θερμοκρασίας, τα οποία έχουν τεράστια πλεονέκτημα όσον αφορά την παροχή ενέργειας, θα οδηγήσει στη δυνατότητα ασφαλούς εγκατάστασής τους κοντά σε περιοχές κατανάλωσης ενέργειας.
- Η ανάπτυξη των υπερπυκνωτών θα οδηγήσει στην ενσωμάτωσή τους στους διάφορους τύπους χρήσης.
- Η ανάπτυξη και εξέλιξη των συσσωρευτών ροής θα ανοίξει νέους ορίζοντες στο κομμάτι της ενεργειακής αποθήκευσης δίνοντας συνεργασίες με άλλες τεχνολογίες πετυχαίνοντας τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Τέλος, παρά το γεγονός ότι δεν περιγράφηκαν λεπτομερώς όλα τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τεχνικών αποθήκευσης, τονίστηκε ότι υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, όποτε και όπου χρειάζεται και σε οποιαδήποτε ποσότητα.

Η αποθήκευση είναι ο πιο αδύναμος κρίκος του ενεργειακού τομέα, αλλά αποτελεί βασικό στοιχείο για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όταν η πηγή ενέργειας είναι διαλείπουσα και βρίσκεται σε απομονωμένη περιοχή που δεν μπορεί να συνδεθεί με το δίκτυο διανομής, η αποθήκευση αποκτά ζωτική σημασία. Η ανάγκη αυτή δεν είναι τόσο προφανής όταν η πηγή ενέργειας είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο όπως συμβαίνει με τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα στις βιομηχανικές χώρες, αλλά η αποθήκευση θα μπορούσε να καταστεί αναπόφευκτη στο μέλλον. Πράγματι, με το άνοιγμα της αγοράς ενέργειας, πολλές αποκεντρωμένες πηγές, συνήθως διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές, θα συνδεθούν στο δίκτυο, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αποσταθεροποίηση. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, η αποθήκευση και η ορθή διαχείριση αυτών των πηγών είναι οι καλύτερες λύσεις.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

Βιβλία

- 1) V.S. BAGOTSKY, A.M. SKUNDIN, Y.M. VOLDKOVICH (2020). Ηλεκτροχημικές Πηγές Ενέργειας : Συσσωρευτές, Κελιά Καυσίμου & Υπερπυκνωτές. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ
- 2) BURHEIM ODNE STOKKE, Μηχανική Διεργασιών Αποθήκευσης Ενέργειας, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ
- 3) Mr. Edberg Oliver, Dr. McCubbin Ian, Dr. Naish Chris, Dr., “Outlook of Energy Storage Technologies”, 2006
- 4) David Linden, Thomas B. Reddy, “Handbook of Batteries”, McGraw-Hill, 3rd ed., New York, 2002
- 5) T. Zhang, “The Economic Benefits of Battery Energy Storage System in Electric Distribution System,” 2013.
- 6) K.C. DIVYA, JACOB OSTERGAARD, Battery energy storage technology for power systems – An overview, Electric Power Systems Research, Vol. 79 (2009):511-520.
- 7) ANDREAS JOSSEN, DIRK UWE SAUER, Advances in redox-flow batteries, First International Renewable Energy Storage Conference, Gelsenkirchen, Germany, October 2006.
- 8) JUSTIN DAWE, Flow battery storage applications with wind power, IEEE PES GM (2005).
- 9) H. Kaneko, A. Negishi, K. Nozaki, K. Sato και M. Nakajima, Μπαταρία οξειδοαναγωγής, US Patent 5318865, 1992.
- 10) I. HADJIPASCHALIS, A. POULIKKAS, V. EFTHIMIOU, Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13 (2009)
- 11) https://www.researchgate.net/publication/229736889_Recent_advances_with_UNSW_vanadium-based_redox_flow_batteries

- 12) C. S. Hsu and W. J. Lee, “Superconducting magnetic energy storage for power system applications,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 29, pp. 990–996, 1992.
- 13) W. V. Torre and S. Eckroad, “Improving power delivery through the application of superconducting magnetic energy storage (SMES),” Proc. 2001 IEEE PES Winter Meeting, vols. 1–3, pp. 81–87, 2001.
- 14) J. Yu, X. Duan, Y. Tang, and P. Yuan, “Control scheme studies of voltage source type superconducting magnetic energy storage (SMES) under asymmetrical voltage,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 12, pp. 750–753, 2002.
- 15) https://www.researchgate.net/publication/229736889_Recent_advances_with_UNSW_vanadium-based_redox_flow_batteries
- 16) https://www.researchgate.net/publication/229211224_Multi-physic_3D_dynamic_modelling_of_polymer_membranes_with_a_proper_generalized_decomposition_model_reduction_approach?el=1_x_8&enrichId=rgreq-3eaf33df26a7d88c30cce5fcb720db8-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2MTI3MzkxNTtBUzoxMDI1Nzk1OTM4MDk5MjlAMTQwMTQ2ODI5MDAzMA==
- 17) Molly Scott Cato., «Πράσινη Οικονομία», Εκδόσεις Ι.Σιδερης, 2012

Διπλωματικές Εργασίες

- 1) Αλέξανδρος Σοφοκλέους. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενεργείας-εφαρμογές στην Κύπρο, ΧΑΝΙΑ (2019). Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος.
- 2) Προυσάλης Βασίλειος, Σταματερή Δέσποινα. Εφαρμογές Μέσων Αποθήκευσης σε Ενεργειακές Υπηρεσίες Στα Συστήματα Του PJM Και Της CALIFORNIA. Θεσσαλονίκη, Μάρτιος (2017). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκη, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- 3) Γεραλής Νικόλαος. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και εφαρμογές στην μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Πάτρα 12/10/2009. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών, Πολυτεχνικής σχολής Πατρών.
- 4) Θεοδωρίδης Γρηγόριος, Κυνατίδης Οδυσσέας. Αντικατάσταση Μπαταρίας Αυτοκινήτου Με Υπερπυκνωτές. Σίνδος 2018. Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανολόγων Οχημάτων Τ.Ε.

- 5) Αγγελική Σαγάνη. Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας – Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές. Αθήνα 2009. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών.
- 6) Λεωνίδας Αναστασόπουλος. Παραγωγή Και Αποθήκευση Ενέργειας Με Τη Μέθοδο Αντλησιοταμίευσης - Σύστημα Αντλησιοταμίευσης Αμφιλοχίας. Βόλος 2020. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών.
- 7) Γεροκωστοπούλου Άννα. Συγκριτική Μελέτη Διατάξεων Εξισορρόπησης Τάσεων Σε Συστοιχία Υπερπυκνωτών. Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2016. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- 8) Θεοφάνη – Χρήστου Χριστακόπουλου. Ανάλυση Συστημάτων Αποθήκευσης Απορριπτόμενης Ενέργειας Απο Αιολικές Εγκαταστάσεις Στην Κρήτη. Αθήνα, Ιούλιος 2017. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών.
- 9) Γίδας Παναγιώτης, Δελιγιάννης Ιωάννης. Χρήση Μπαταριών για αύξηση Φ/Β Διείσδυσης σε δίκτυο ΧΤ. Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2018. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- 10) Κατσαμάγκος Παναγιώτης-Νικόλαος. Βέλτιση Επιλογή Συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας Σε Μικρές Υβριδικές Μονάδες. Αθήνα, 2021. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών.
- 11) Καραδήμος Δημήτριος, Καραφουλίδης Αλέξανδρος-Στυλιανός. Τεχνοοικονομική Ανάλυση Διασυνδεδεμένων Συστημάτων Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας. Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2017. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- 12) Παναγιωταράκος Διαμαντής. Ανάλυση Συστήματος Ανάκτησης Ενέργειας, Σκεδιασμός Και Κατασκευή Μοντέλου. Πάτρα 2015. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδος, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.
- 13) Μπίτος Μιχαήλ. Έλεγχος Συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας Με Στρεφόμενη Μάζα. Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2013. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέα Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Μεταπτυχιακές Εργασίες

- 1) Θεοπούλου Ελένη. Δυνατότητες Χρήσης Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας με Προοπτική Ηλεκτρικής Δικτύωσης σε Επίπεδο Συνοικίας. ΑΘΗΝΑ 2012. ΕΜΠ, τμήμα χημικών μηχανικών, Πανεπιστήμιο πειραιώς, Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας .

Διαδικτυακή Εγκυκλοπαίδεια

- 1) Βικιπαίδεια. (χ.χ.). Εγκυκλοπαίδεια Βικιπαίδεια. Ανακτήθηκε 8 Σεπτεμβρίου, 2021, από

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CF%8D%CE%BB%CE%B7:%CE%9A%CF%8D%CF%81%CE%B9%CE%B1>

Διαδικτυακά Λεξικά

- 1) Βικιλεξικό. (χ.χ.). Λεξικό Βικιλεξικό. Ανακτήθηκε 8 Σεπτεμβρίου, 2021, από

https://el.wiktionary.org/wiki/%CE%92%CE%B9%CE%BA%CE%B9%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B9%CE%BA%CF%8C:%CE%9A%CF%8D%CF%81%CE%B9%CE%B1_%CE%A3%CE%B5%CE%BB%CE%AF%CE%B4%CE%B1

- 2) Melobytes.gr

<https://melobytes.gr/el/app/synonyma>

- 3) Λεξισκόπιο - Neurolingo

http://www.neurolingo.gr/el/online_tools/lexiscope.htm

Διαδικτυακές Πηγές

- 1) <http://www.allaboutenergy.gr/>
- 2) <https://www.sciencenews.gr/>
- 3) <https://energystorage.org/>
- 4) <https://energypress.gr/news/apothikeysi-energeias>
- 5) <https://www.clarke-energy.com/el/energy-storage/>
- 6) <https://epixeireite.duth.gr/?q=node/9385>

- 7) <https://rawmathub.gr/%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B7%CE%BC%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AC-%CE%BD%CE%AD%CE%B1%CE%BF%CE%BE%CE%B5%CE%B9%CE%B4%CE%BF%CE%B1%CE%BD%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82-%CE%BC%CF%80%CE%B1%CF%84%CE%B1%CF%81%CE%AF%CE%B5%CF%82-%CF%81%CE%BF%CE%AE%CF%82-%CF%87%CF%81%CE%B7%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%BF%CF%80%CE%BF%CE%B9%CE%BF%CF%8D%CE%BD-%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BB%CF%8D%CF%84%CE%B5%CF%82-%CF%80%CE%BF%CF%85-%CE%B2%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B6%CE%BF%CE%BD%CF%84%CE%B1%CE%B9-%CF%83%CE%B5-%CF%80%CE%B5%CF%80%CF%84%CE%AF%CE%B4%CE%B9%CE%B1>
- 8) <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/supercapacitors>
- 9) <https://batteryuniversity.com/article/bu-209-how-does-a-supercapacitor-work>
- 10) <https://www.linquip.com/blog/superconducting-magnetic-energy-storage/>
- 11) https://energyeducation.ca/encyclopedia/Superconducting_magnetic_energy_storage
- 12) <https://www.capacitechenergy.com/blog/batteries-vs-supercapacitors-the-answer-is-both>

Εικόνα Εξωφύλλου

CELESTICA HELPS SMART ENERGY INDUSTRY OEMS ACCELERATE THEIR ENERGY STORAGE ROADMAP

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.celestica.com%2Fblog%2Flist%2Ftag%2Fstorage&psig=AOvVaw1xpsnOIhXw81A82DzyHbWm&ust=1667042941726000&source=images&cd=vfe&ved=0CA0QjRxqFwoTCLiW0oTpgvsCFQAAAAAdAAAAABAE>