



Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών
& Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

Του Φοιτητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

ΜΠΕΝ ΜΠΡΑΧΙΜ ΑΜΠΝΤ

Αριθμός Μητρώου: 2095633

Θέμα:

«Αποθήκευση Ενέργειας - Μέθοδοι και Εφαρμογές»

Επιβλέπων: Αναγνωστόπουλος Ιωάννης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2014

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κ. Αναγνωστόπουλος Ιωάννης για το σεβασμό, την κατανόηση και την συμπαράσταση που μου παρείχε σε όλο το διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου για τη συνεχή συμπαράσταση, την αγάπη τους, την υπομονή και την κατανόηση τους

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Προσπάθησα σ' αυτή την εργασία να αναπτύξω ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της σημερινής εποχής, την αποθήκευση ενέργειας. Είναι γνωστή σε όλους μας η "πετρελαϊκή κρίση" που ξεκίνησε το 1973 και αφύπνισε την συνείδηση όλων μας μπροστά στον κίνδυνο του ενεργειακού ελλείμματος. Η αποθήκευση ενέργειας λοιπόν είναι ένας σημαντικότερος στόχος σε παγκόσμια κλίμακα, μαζί φυσικά με την ανακάλυψη νέων ενεργειακών πόρων. Η διπλωματική αυτή εργασία έχει ως στόχο να δώσει στον αναγνώστη της μια σαφή εικόνα των μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που υπάρχουν σήμερα. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στους λόγους που επιβάλλουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζοντας εν συντομία όλες τις μεθόδους αποθήκευσης που θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες. Αφού αναφερθούν οι κατηγορίες τους και τα χαρακτηριστικά μεγέθη τους, γίνεται μοντελοποίηση των μπαταριών. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικά η μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με υπεραγωγό πηνία. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται τα συστήματα αποθήκευσης με στρεφόμενες μάζες. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, καθώς και τα χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών. Το πέμπτο κεφάλαιο μελετάει τα συστήματα αντλησιοταμίευσης στην αποθήκευση ενέργειας. Αφού γίνει μια αναφορά στην υδροδυναμική ενέργεια, τα φράγματα και τους υδροστρόβιλους. Στο έκτο κεφάλαιο μελετάται η χρήση των υπέρ-πυκνωτών στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Υπολογίζεται η ισοδύναμη χωρητικότητα συστήματος υπέρ-πυκνωτών καθώς και η απόδοση φόρτισης και εκφόρτισής του. Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των συστημάτων αποθήκευσης με συμπιεσμένο αέρα, Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στην πιθανή μελλοντική χρήση των κυψέλων υδρογόνου για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ενώ στο ένατο κεφαλαίο γίνεται μια σύντομη σύγκριση όλων των προαναφερόμενων διατάξεων αποθήκευσης βάση την ταχύτητα εκφόρτισής τους και βάση του κόστους εγκατάστασης ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας.

Τα συμπεράσματα αυτής της ανάπτυξης παρουσιάζουν ενδιαφέρον, ιδιαίτερα στις μέρες μας, που το πρόβλημα της ενεργειακής κρίσης έχει γίνει συνείδηση σε όλους μας. Ελπίζουμε να συγχωρέσετε τα λάθη που υπάρχουν στη δομή αυτής της εργασίας γιατί η πείρα μου ήταν πολύ μικρή στον τομέα αυτό και το συγγραφικό μου ταλέντο περιορισμένο. Έγινε όμως προσπάθεια να αναπτυχθεί το θέμα σε βάθος με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

ABSTRACT

I tried in this work to develop one of the major problems of nowadays, the energy saving. It is known to us, the "oil crisis", which started in 1973 and awakened our conscience in front of the risk of energy deficit. Saving energy is therefore a very important goal worldwide, with naturally the discovery of new energy sources. This thesis aims to give the reader a clear picture of the electrical energy storage methods that exist today. More specifically: In the first chapter there is a reference to the reasons which the storage of electricity require, showing briefly all storage methods will be discussed in later chapters. The second chapter describes the electric storage battery. After mentioning the categories and the characteristics of their sizes, is modeling the batteries. The third chapter presents the first method of storing electricity superconducting coils. The fourth chapter describes the storage systems with rotating masses and indicates the advantages and disadvantages, and the characteristics of those systems. In the fifth chapter there is the study of systems in pumped storage power, after making a reference to hydraulic energy, dams and water turbines. The sixth chapter describes the use of super-capacitors to store electricity and there is a calculation of the equivalent capacitance of ultra capacitor system and the performance of the charging and discharging. The seventh chapter is a description of the storage systems with compressed air. In the eighth chapter there is a brief reference to the possible future use of hydrogen fuel cells for electricity storage. The ninth chapter is a brief comparison of all of the above storage devices based on the discharge rate and based on installation costs per unit of energy production. The conclusions of this thesis are very interesting, especially nowadays, that the problem of energy crisis has made us all aware. In this paper were being an attempt to develop the topic in depth with the best possible way.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
Περιεχόμενα.....	6
Εισαγωγή	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	12
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
1.1. Μερικοί λόγοι που επιβάλουν την ανάπτυξη μεθόδων αποθήκευσης	12
1.2. Πιθανές εφαρμογές των αποθηκευτικών διατάξεων σε ένα ΣΗΕ	14
1.3. Σύντομη περιγραφή των μεθόδων αποθήκευσης.....	16
1.3.1. Συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες	19
1.3.2. Συστήματα αποθήκευσης με υπέρ-πυκνωτές και υπεραγωγίμα πηνία.....	20
1.3.3. Στρεφόμενες μάζες - Σφόνδυλοι.....	21
1.3.4. Συστήματα αποθήκευσης με συμπιεσμένο αέρα	21
1.3.5. Αντλησιοταμίευση	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	24
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ	
2.1.Εισαγωγή-Κατηγορίες μπαταριών.....	24
2.1.1.Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (Lead-Acid)	25
2.1.2.Μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)	27
2.1.3.Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Ion)	28
2.1.4.Μπαταρίες θειικού νατρίου (NaS).....	29
2.1.5.Μπαταρίες μετάλλου-αέρα	30
2.1.6.Μπαταρίες ροής: Zinc/Bromine (ZnBr) και Vanadium Redox (VRD)	30
2.2.Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών	32
2.3.Μοντελοποίηση μπαταριών.....	33
2.3.1.Επισκόπηση των μοντέλων.....	33
2.3.2. Παρουσίαση προσέγγισης... ..	35
2.3.3. Χωρητικότητα συναρτήσει χρόνου και ρεύματος φόρτισης- εκφόρτισης.....	36

2.3.4. Προσδιορισμός του επιπέδου φόρτισης-εκφόρτισης.....	37
2.3.5. Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης και φόρτισης σε ένα χρονικό διάστημα Δt , ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	43
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΗΜΑ ΠΗΝΙΑ	
3.1.Εισαγωγή - ορισμοί.....	43
3.2.Γενική περιγραφή του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με υπεραγώγιμα πηνία	44
3.2.1. Βασική λειτουργία και δομή ενός τυπικού SMES συστήματος	44
3.3.Παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό του πηνίου.....	47
3.4.Κατασκευή του πηνίου	49
3.5.Σχεδιασμός και σύγκριση υπεραγώγιμων πηνίων για SMES συστήματα.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	57
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΜΑΖΕΣ – ΣΦΟΝΔΥΛΟΥΣ (flywheels)	
4.1. Εισαγωγή.....	57
4.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων flywheels.....	58
4.3. Υπολογισμός της αποθηκευόμενης ενέργειας	59
4.4. Χαρακτηριστικά συστημάτων flywheels	65
4.5. Κατασκευαστές flywheels	66
4.6. Σύγκριση χαλύβδινων σφονδύλων με σφονδύλους κατασκευασμένους από νήματα κραμάτων	70
4.7. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με στρεφόμενους σφονδύλους, για εφαρμογή στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	78
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ	
5.1. Εισαγωγή.....	78
5.2. Υδροδυναμική ενέργεια - Υδατόπτωση	80
5.3. Φράγματα	81
5.4. Απώλειες νερού σε δεξαμενές - λίμνες	83
5.5. Υδροστρόβιλοι	83

5.5.1. Υδροστροβίλος Pelton.....	86
5.5.2. Υδροστροβίλος Banki.....	86
5.5.3. Υδροστροβίλοι Francis.....	86
5.5.4 Υδροστροβίλοι Kaplan.....	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	89
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΥΠΕΡ- ΠΥΚΝΩΤΕΣ	
6.1. Εισαγωγή – ορισμοί.....	89
6.2. Εφαρμογές των πυκνωτών.....	90
6.3. Θεωρία υπέρ-πυκνωτών	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο	93
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟ ΑΕΡΑ	
7.1. Εισαγωγή.....	93
7.2. Κατάλληλα εδάφη για χρήση σαν αποθηκών συμπιεσμένου αέρα	94
7.2.1.Κοιλότητες άλατος.....	95
7.2.2 Εδάφη πορωδών βράχων	95
7.2.3.Εδάφη σκληρών βράχων.....	96
7.3. Λειτουργία της μονάδας CAES	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο	98
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟ (HYDRICITY)	
8.1. Εισαγωγή	98
8.2. Αποθήκευση υδρογόνου.....	99
8.2.1.Υγρή μορφή	100
8.2.2. Αεριώδης μορφή.....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο	102
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ	
9.1. Σύγκριση με βάση την ταχύτητα εκφόρτισης	102
9.2. Σύγκριση με βάση το κόστος εγκατάστασης.....	102
9.3. Σύνοψη.....	106
9.4. Συμπεράσματα εργασίας.....	107
Βιβλιογραφία	109

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποθήκευση ενέργειας με τον ένα ή τον άλλο τρόπο, εμφανίζεται σε όλες τις διεργασίες και της φύσης και του ανθρώπου. Ο άνθρωπος δεν μπορεί να δημιουργήσει ή να καταστρέψει την ενέργεια. Μπορεί όμως να μετατρέψει τη μια μορφή ενέργειας σε μία άλλη με τη βοήθεια μίας διεργασίας που θα οδηγεί στο αποτέλεσμα το οποίο επιθυμεί. Εκτός από την ηλιακή ενέργεια, που η πρωτογενής πηγή της είναι ο ήλιος και που περίπου το 50% της αρχικής ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της γης, γιατί το 30% ανακλάται από τη γήινη ατμόσφαιρα και το 20% απορροφάται από αυτήν, για όλες τις άλλες μορφές ενέργειας η πρωτογενής πηγή ενέργειας είναι πάντοτε το γήινο περιβάλλον όπου γίνεται και η αποθήκευση.

Η αποθήκευση της πρωτογενούς πρώτης ύλης μπορεί να γίνει στην μορφή που ήταν αρχικά διαθέσιμη π.χ ξύλα ή να απαιτεί μετατροπή σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως η αιολική. Κατά την μετατροπή της ενέργειας στους επιλεγμένους σταθμούς αποθήκευσης οι νόμοι της θερμοδυναμικής αποκλείουν 100% απόδοση.

Οι λόγοι που υπαγορεύουν την αποθήκευση είναι: Η ικανοποίηση της ζήτησης, η αποθήκευση ενέργειας που σε άλλες συνθήκες θα χανόταν με στόχο να χρησιμοποιηθεί αργότερα, η συσσώρευση ενέργειας για μία περίοδο στην οποία θα καταναλωθούν μεγάλα ποσά ενέργειας, καθώς και, η μεταφορά ενέργειας όπου αυτή είναι αναγκαία, όταν τα συνεχή συστήματα μεταφοράς δεν αποτελούν πρακτική λύση.

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη συστημάτων αποθήκευσης Ενέργειας, μερικά ικανά να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας και άλλα πολύ μικρές. Μερικά είναι μέρη των διαδικασιών μεταφοράς ενέργειας και άλλα είναι μέρη των συστημάτων μετατροπής. Μία τέτοια ποικιλία από πιθανές εφαρμογές σημαίνει ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετές παράμετροι και ότι αυτές διαφέρουν από τη μία εφαρμογή στην άλλη.

Μία κατάταξη των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τείνει πάντα να είναι αρκετά πολύπλοκη. Στις περισσότερες περιπτώσεις, δύο χαρακτηριστικά των συστημάτων είναι αποφασιστικά. Το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται (πυκνότητα ενέργειας) και η χρονική διάρκεια της αποθήκευσης.

Η πυκνότητα της ενέργειας (χωρητικότητα) και η χρονική διάρκεια αποθήκευσης είναι

οι παράμετροι κλειδιά που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν συζητούμε για συστήματα αποθήκευσης. Στην φύση βρίσκουμε παραδείγματα συστημάτων αποθήκευσης που περιλαμβάνουν και μικρές και μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Οι περίοδοι αποθήκευσης επίσης ποικίλουν πολύ. Σε ένα ταλαντωτή υψηλής συχνότητας, όπου ένα μικρό ποσό ενέργειας μεταφέρεται περιοδικά από ένα μαγνητικό πεδίο σε ένα ηλεκτρικό πεδίο και πίσω ξανά, ο χρόνος αποθήκευσης στο κάθε πεδίο είναι ένα κλάσμα μικροδευτερολέπτου.

Σε μονωμένο δοχεία αποθήκευσης ζεστού νερού για θέρμανση χώρων, από την άλλη πλευρά, το περιεχόμενο ποσό της ενέργειας είναι μεγάλο και ο χρόνος αποθήκευσης μπορεί να είναι και αρκετοί μήνες. Η ενέργεια πρέπει να αποθηκευτεί από το καλοκαίρι μέχρι το χειμώνα, όταν παρουσιάζεται η απαίτηση για θέρμανση. Η μπαταρία για ένα βηματοδότη με συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού μόνο στην περιοχή των Μιλιβάτ, πρέπει να διαρκέσει 5-10 χρόνια. Εδώ έχουμε μικρή πυκνότητα ενέργειας και μεγάλη χρονική διάρκεια.

Το πρόβλημα της αποθήκευσης μπορεί να περιλαμβάνει ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται άμεσα στην ίδια μορφή, όπως αυτή είναι αρχικά διαθέσιμη ή μπορεί να περιλαμβάνει μετατροπή σε άλλες μορφές. Και στις δύο περιπτώσεις, το πρόβλημα το απαιτούμενου χρόνου της αποθήκευσης πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Ιστορικά, το πρόβλημα της αποθήκευσης ενέργειας είχε λυθεί με συσσώρευση καυσόξυλων ή με συγκέντρωση ποσοτήτων νερού για να κινηθεί ένας τροχός. Αργότερα η πιο συγκεντρωμένη μορφή αποθέματος ενέργειας ήταν το κάρβουνο.

Στις μέρες μας είμαστε συνηθισμένοι στις γεμάτες δεξαμενές πετρελαίου σαν την πιο κατάλληλη μορφή αποθήκευσης ενέργειας. Τα καύσιμα που βασίζονται στο πετρέλαιο προσφέρουν ευκολία στη χρήση, διαθεσιμότητα και σχετικά χαμηλή τιμή. Η αποθήκευση πετρελαίου είναι εύκολη και ο χρόνος αποθήκευσης απλά εξαρτάται από το πότε ανοίγει η κάνουλα της δεξαμενής. Η αποθήκευση μπορεί να διατηρηθεί χωρίς καθόλου απώλειες και η πυκνότητα της ενέργειας είναι υψηλή. Το πετρέλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μία πηγή για παραγωγή ισχύος και θερμότητας ως επίσης και για κινητές και για ακίνητες εφαρμογές.

Η παραγωγή και η κατανάλωση του πετρελαίου από την ημέρα που ανακαλύφθηκε αυξηθεί του 1859 στις ΗΠΑ έχει αυξηθεί ραγδαία.

Οι πηγές όμως του πετρελαίου που έχουν ανακαλυφθεί μέχρι σήμερα είναι περιορισμένες. Έτσι, υπάρχει μία άποψη της ενεργειακής κατάστασης, ότι υπάρχει κίνδυνος σε σύντομο χρονικό διάστημα να γυρίσουμε στο ιστορικό επίπεδο.

Η πετρελαϊκή κρίση του 1973 "αφύπνισε" την ανθρωπότητα που για πρώτη φορά άρχισε να διαβλέπει συνέχιση της κρίσης σε μόνιμη βάση πλέον. Τώρα ξέρουμε ότι η εποχή της άφθονης φτηνής «πετρελαιοενέργειας» έχει περάσει χωρίς επιστροφή. Έτσι έχουμε την γρήγορη ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η έρευνα της ενεργειακής αποθήκης, που θα εξομάλυνε, τις διακυμάνσεις στον εφοδιασμό ενός ενεργειακού συστήματος και θα περιείχε αρκετή ενέργεια για να καλύψει τις ανάγκες και τις διακυμάνσεις της κατανάλωσης, έγινε κύριο πρόβλημα

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες για να αποφασίσει κανείς το είδος θερμικής αποθήκης που χρειάζεται στην περίπτωση μίας θερμικής διαδικασίας και το βέλτιστο μέγεθός της. Όπως είπαμε η μείωση των πετρελαιοειδών και το έντονο ενδιαφέρον για την μόλυνση της ατμόσφαιρας κάνουν ουσιαστικό θέμα την αποτελεσματική χρήση της διαθέσιμης ενέργειας, χρησιμοποιώντας συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως:

α) Η εγκατάσταση μονάδων αποθήκευσης ενέργειας στα δίκτυα ηλεκτρικών μονάδων θα επιτρέψει τις μονάδες αυτές να αποθηκεύουν ενέργεια που παράγεται τη νύχτα από σταθμούς βάσης άνθρακα ή πυρηνικούς και να παρέχουν την αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο κατά τη διάρκεια της ημέρας, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη. Αυτό θα μειώσει την α-νάγκη για στροβιλογεννήτριες αερίου ή πετρελαίου

β) Η χρήση σε μεγάλη κλίμακα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ο ήλιος και ο άνεμος, εξαρτάται από τις ευκολίες αποθήκευσης, γιατί αυτές οι πηγές μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του 24ώρου και κατά τη διάρκεια του έτους,

γ) Στις μεταφορές έχει γίνει φανερή η απαίτηση για νέους τρόπους αποθήκευσης ενέργειας. Σε μερικές 10 αιτίες τα ντεπόζιτα των αυτοκινήτων θα πρέπει ν' αντικατασταθούν με άλλες μονάδες αποθήκευσης αν πρέπει να ξεφύγουμε από την σημερινή εξάρτηση από το πετρέλαιο σαν πρωτογενή πηγή ενέργειας.

δ) Αποθήκευση για βιομηχανικές κινητές μονάδες παραγωγής ισχύος για παροχή καλύτερων συνθηκών εργασίας, ειδικά σε περιορισμένες περιοχές, όπως ορυχεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1. Μερικοί λόγοι που επιβάλλουν την ανάπτυξη μεθόδων αποθήκευσης

Ένα μεγάλης σημασίας πρόβλημα που παρουσιάζει η ηλεκτρική ενέργεια, είναι ότι η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων της καθίσταται δύσκολη και αντισυμβατική. Η ενέργεια που παράγεται κάθε στιγμή στους ηλεκτρικούς σταθμούς είναι όση και η εκάστοτε ζήτηση φορτίου, ενώ η επιπλέον παραγωγή της είναι ανώφελη εφόσον δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ή να αποθηκευτεί. Και επειδή η ηλεκτρική ενέργεια γενικά σε ένα ΣΗΕ δεν μπορεί να αποθηκευτεί ηλεκτρικά, γεννάται η ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων μετατροπής της σε μορφές που μπορούν να αποθηκευτούν ευκολότερα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ότι μπορεί να μετατραπεί αποδοτικά σε κάποια άλλη μορφή, η οποία μπορεί με τη σειρά της να αποθηκευτεί πιο εύκολα. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί βασικά να αποθηκευτεί ηλεκτρομαγνητικά, ηλεκτροχημικά και υπό μορφή κινητικής ή δυναμικής ενέργειας.

Λόγω της μεγάλης σημασίας που προσφέρει η δυνατότητα αποθήκευσης της ενέργειας για την ασφαλή και διαρκή τροφοδοσία της αγοράς με οποιοδήποτε αγαθό, η αποθήκευση ηλεκτρισμού μπορεί να επιφέρει σημαντικά οφέλη και στην ασφαλή και οικονομική λειτουργία ενός διασυνδεδεμένου δικτύου και κατ' επέκταση ενός ΣΗΕ. Μερικοί λόγοι που επιβάλλουν την ανάπτυξη μεθόδων αποθήκευσης είναι:

- α) Οικονομική λειτουργία των ΣΗΕ. Η απότομη διακύμανση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας (αιχμές φορτίου) κατά τη διάρκεια μίας ημέρας μπορούν τώρα να καλυφθούν από την αποθηκευμένη ενέργεια ενός σταθμού παραγωγής και όχι να ενεργοποιηθεί ένας σταθμός αιχμής, του οποίου η λειτουργία κοστίζει πολύ
- β) Ότι η παραγωγή των μονάδων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας δε συμπίπτει χρονικά πάντα με τη ζήτηση από την πλευρά των καταναλωτών (άρα η ενέργεια που παράγουν πρέπει να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρξει μεγάλη ζήτηση)
- γ) Αποθήκευση ενέργειας, για αποφυγή παραβίασης τεχνικών ελαχίστων στις θερμικές μονάδες παραγωγής
- δ) Για εκμετάλλευση της διαφοράς κόστους παραγωγής από τις συμβατικές μονάδες είτε χωρίς αλλαγή του προγράμματος ένταξης μονάδων, είτε μεταβάλλοντας κάπως το

πρόγραμμα ένταξης

ε) Η επιπλέον πρόοδος της έρευνας στις αποθηκευτικές διατάξεις και η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος

Συνεπώς, τα συστήματα αποθήκευσης αναμένεται να διεισδύσουν ολοένα και περισσότερο στα δίκτυα διανομής καθώς θα μπορέσουν να συμβάλλουν στην απαραίτητη σύγκλιση παραγωγής και κατανάλωσης καθώς και στην επίτευξη αξιοπιστίας. Επιπλέον, σε αυτή την περίπτωση μπορεί να γίνει καλύτερη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας αφού τώρα πια περιορίζεται η πιθανότητα μη επαρκούς ενέργειας τη στιγμή που θα ζητηθεί, επιτρέποντας τη δημιουργία περισσότερο μακροπρόθεσμων σχεδίων διαχείρισης και αναβάλλοντας κάποιες επενδύσεις επέκτασης δικτύων ή συμφωνίες ανταλλαγής ισχύος.

Για τους παραπάνω λόγους έχουν ενταθεί οι ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα της ανάπτυξης, και της διάδοσης της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ερευνητικές προσπάθειες συνοψίζονται στους εξής τομείς και επιμέρους σημεία, όπως παρουσιάζουν οι μελέτες του συνδέσμου για τις αποθηκευτικές διατάξεις.

α) Κατασκευαστικά:

-Χρήση νέων υλικών για την κατασκευή αποθηκευτικών διατάξεων

-Μείωση του κόστους εγκατάστασης και κατασκευής αυτών των διατάξεων -Μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την χρήση τέτοιων διατάξεων αναφορικά με την ανακύκλωσή τους μετά το πέρας της διάρκειας ζωής τους

-Μείωση των ενεργειακών απωλειών κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κάποια άλλη μορφή και συνεπώς βελτίωση της απόδοσης της διαδικασίας αποθήκευσης και επανέγχυσης της ενέργειας στο δίκτυο

-Μείωση του μεγέθους και του βάρους αυτών των διατάξεων ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούνται σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές

-Τη δημιουργία των μοντέλων πρόβλεψης διάρκειας ζωής και την κατανόηση μηχανισμών γήρανσης τους

-Την αύξηση του χρόνου ζωής τους

β) Λειτουργία και ένταξη στο δίκτυο:

-Τη μοντελοποίηση της λειτουργίας αυτών των διατάξεων

-Τη διαδικασία διαχείρισης αυτών των διατάξεων ώστε να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη για το δίκτυο

-Τη συνεργασία τέτοιων διατάξεων με τις μονάδες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

σχηματίζοντας έτσι Υβριδικά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές του δικτύου

γ) Ρυθμιστικό και νομικό πλαίσιο:

-Την αποτίμηση της αξίας που μπορεί να προσφέρει σε ένα δίκτυο η χρήση και περαιτέρω διάδοση των αποθηκευτικών διατάξεων

-Τις αλλαγές στο ρυθμιστικό πλαίσιο που απαιτούνται, ώστε να προσφέρονται ικανοποιητικά έσοδα για την αποπληρωμή των επενδύσεων σε αποθηκευτικές διατάξεις και να ορίζονται οι όροι λειτουργίας τέτοιων διατάξεων

1.2. Εφαρμογές των αποθηκευτικών διατάξεων σε ένα ΣΗΕ

Οι πιθανές εφαρμογές που μπορούν να έχουν οι αποθηκευτικές διατάξεις σε ένα ΣΗΕ συνοψίζονται παρακάτω:

1. Load Leveling: είναι η αποθήκευση φθηνής πλεονάζουσας ενέργειας που παράγεται από τις μονάδες βάσης κατά τις περιόδους εκτός αιχμής και η χρησιμοποίησή της σε περιόδους αιχμής φορτίου, αντί της χρήσης των ακριβών μονάδων. Η εφαρμογή αυτή αφορά το στάδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2.Transmission Voltage: Regulation: είναι η διατήρηση της τιμής της τάσης μεταφοράς μέσα σε συγκεκριμένα προκαθορισμένα όρια διακύμανσης, τόσο κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και στα σημεία του φορτίου. Αφορά το στάδιο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

3.Power Quality Improvement: Διακρίνεται σε μικρής διάρκειας βελτίωση ποιότητας ισχύος η οποία σχετίζεται με την εξομάλυνση βυθίσεων τάσεως, αιχμών τάσεως και διακοπών ρεύματος για χρονικό διάστημα από μερικά sec μέχρι μερικά min, για απαιτήσεις ισχύος < 1MW και χρόνο μερικών λεπτών και σε μεγάλης διάρκειας βελτίωση ποιότητας η οποία σχετίζεται με ότι και η προηγούμενη, αλλά για απαιτήσεις ισχύος > 1MW για χρονική διάρκεια 1-2 ώρες.

4.Spinning Reserve: ονομάζεται και στρεφόμενη εφεδρεία. Είναι η διατήρηση μέρους της παραγωγής ισχύος από τις μονάδες και η παροχή της σε έκτακτες χρονικές στιγμές (π.χ. λόγω βλάβης μιας γεννήτριας της μονάδας), προκειμένου να συνεχιστεί η αδιάλειπτη παροχής ισχύος στους πελάτες μιας ηλεκτρικής εταιρίας. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί αποθήκευση ισχύος της τάξης των 10-100MW για παροχή χρονικού διαστήματος < 30 min.

5.Black-start error: είναι η ικανότητα ενός εργοστασίου να τεθεί σε λειτουργία μετά από την πλήρη αποκοπή του από το δίκτυο λόγω κάποιου σφάλματος. Αυτό συμβαίνει, διότι μερικές μονάδες παραγωγής (όπως για παράδειγμα οι πυρηνικές μονάδες) απαιτούν μια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας για να επανεκκινηθούν μετά από ένα σφάλμα. Η απαιτούμενη αυτή ενέργεια για την επανεκκίνησή της θα δίνεται τώρα από την αποθηκευόμενη.

6.Transmission & Distribution System Stability: Αφορά την διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος μεταφοράς και διανομής και την αποτροπή της κατάρρευσής του, διατηρώντας όλα τα στοιχεία της γραμμής συγχρονισμένα μεταξύ τους. Για την εφαρμογή αυτή απαιτείται ισχύς >100MW για χρονική διάρκεια μερικών sec.

7.Frequency Control: είναι η διατήρηση της συχνότητας στην ονομαστική της τιμή 50 ή 60 Hz.

8.Generation Capacity Deferral: είναι η ικανότητα μιας μονάδας να αναβάλει την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τροφοδοτώντας τις υπάρχουσες μονάδες από άλλες πηγές. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί 10-100MW για 2-4 ώρες.

9.Transmissions Facility Deferral: είναι η ικανότητα μιας μονάδας να αναβάλει την εγκατάσταση νέων γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών, τροφοδοτώντας τις υπάρχουσες μονάδες από άλλες πηγές.

10.Distribution Facility Deferral: είναι η ικανότητα μιας μονάδας να αναβάλει την εγκατάσταση νέων γραμμών διανομής και μετασχηματιστών, τροφοδοτώντας τις υπάρχουσες μονάδες από άλλες πηγές. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί περίπου 1MW για 1-3 ώρες.

11.Renewable Energy Management

12.Χρήση αποθηκευμένης ενέργειας για κάλυψη της ζήτησης, λόγω έλλειψης ικανότητας παραγωγής των διαθέσιμων μονάδων

13.Απόσβεση ταλαντώσεων στις σύγχρονες γεννήτριες μετά από σφάλμα

14.Περιορισμός απωλειών δικτύου λόγω της παροχής ισχύος σε πολύ τοπικό επίπεδο

15.Αποφυγή ή μετάθεση επενδύσεων ενίσχυσης δικτύου, διανομής ειδικά αν υπάρχει συνδυασμός της διάταξης αποθήκευσης με κάποιας μορφής παραγωγής από μονάδες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

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

α) Διατάξεις Βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης:

Πρόκειται για τις διατάξεις αποθήκευσης που μπορούν να προσφέρουν ή να απορροφήσουν ενέργεια για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (λίγα δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά). Τυπικές εφαρμογές αυτού του είδους είναι η αδιάλειπτη παροχή ισχύος και η ευστάθεια λειτουργίας ενός ΣΗΕ.

β) Διατάξεις Μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης:

Αφορά διατάξεις που χρησιμοποιούνται για χρονικούς ορίζοντες από μερικά λεπτά ως μερικές ώρες. Τέτοιου είδους εφαρμογές είναι η διαχείριση ενέργειας από μονάδες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, η ενίσχυση της παροχής στρεφόμενης εφεδρείας και η διαχείριση παρεχόμενης ισχύος στους καταναλωτές.

γ) Διατάξεις Μακροπρόθεσμης αποθήκευσης:

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

1.3.Συνοπτική περιγραφή των μεθόδων αποθήκευσης

Όπως είπαμε αρχικά, η ηλεκτρική ενέργεια στις περισσότερες περιπτώσεις δεν μπορεί να αποθηκευθεί ως έχει με συνέπεια να μετατρέπεται σε κάποια άλλη μορφής ενέργεια η οποία είναι ευκολότερο να αποθηκευτεί και να μετατραπεί πάλι πίσω σε ηλεκτρική ενέργεια με τις αντίστοιχες απώλειες μετατροπής. Η κυκλική απόδοση αυτής της διαδικασίας, συμβολίζεται με 'ξ'. Η αναγκαία συνθήκη για να είναι οικονομικά βιώσιμη η αποθήκευση ενέργειας για κάποιες από τις παραπάνω εφαρμογές, αγνοώντας το κόστος εγκατάστασής της, είναι η ικανοποίηση της εξίσωσης:

$$\xi > \frac{Cost_high}{Cost_low} \quad (1.1)$$

όπου: Cost_low το κόστος για την αποθήκευση ενέργειας και Cost_high το όφελος από την χρήση της αποθηκευμένης ενέργειας.

Για να είναι πλήρως οικονομικά βιώσιμη η εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας θα πρέπει η ωφέλεια από την αποθήκευση να είναι τέτοια, ώστε να αποπληρώνεται σε

λογικό χρονικό διάστημα η επένδυση για την προμήθεια και συντήρηση της αποθηκευτικής διάταξης.

Αρχικά, παρουσιάζεται σύνοψη των μεθόδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για επαναδιάθεσή της στο δίκτυο διανομής ενώ στα επόμενα κεφάλαια αναπτύσσετε ξεχωριστά η κάθε μέθοδος.

Τα διάφορα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους σε μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική ενέργεια και στη συνέχεια την εκ νέου μετατροπή της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις διάφορες μορφές ενέργειας στις οποίες μπορεί να μετατραπεί η ηλεκτρική ενέργεια προκειμένου να αποθηκευτεί καθώς και χαρακτηριστικά παραδείγματα διάταξης για κάθε μορφή μετατροπής.

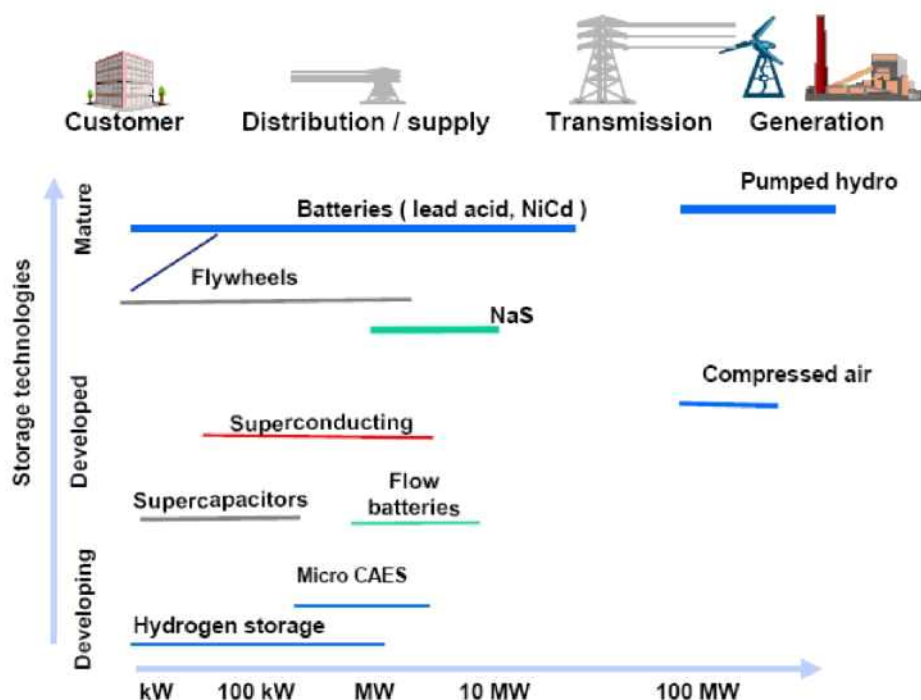
Π Ι Ν Α Κ Α Σ 1	
Μορφή μετατροπής	Αντιπροσωπευτική διάταξη
Ηλεκτρική	Πυκνωτές και υπέρ-πυκνωτές
Μαγνητική	Υπεραγώγιμα πηνία - Superconducting Magnetic Energy Storage systems (SMES)
Χρήση μηχανικής ενέργειας (δυναμική ή περιστροφή)	Αντλησιοταμίευση (PHS)
	Συστήματα με Συμπιεσμένο αέρα (CAES)
	Στρεφόμενοι Σφόνδυλοι (Flywheels)
Χημικές μέθοδοι	Μπαταρίες, μπαταρίες ροής, προχωρημένου τύπου μπαταρίες (BESS)

Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, χρειάζεται και μία αποθηκευτική διάταξη με κατάλληλες ιδιότητες. Προκειμένου να αποφασιστεί ποιο αποθηκευτικό μέσο είναι κατάλληλο για κάθε περίπτωση εφαρμογής, χρειάζεται να εξεταστεί μια ευρεία γκάμα αποθηκευτικών διατάξεων. Ο πίνακας 2 παρακάτω παρουσιάζει συνοπτικά την καταλληλότητα των διαφόρων αποθηκευτικών διατάξεων, όσον αφορά εφαρμογές ισχύος και ενέργειας αλλά και τις συνηθισμένες τους εφαρμογές. Ένα σχετικό διάγραμμα για τα τυπικά μεγέθη των αποθηκευτικών διατάξεων, τις τυπικές εφαρμογές τους και την ωριμότητα τους παρουσιάζεται στο σχήμα 1 παρακάτω, ενώ το σχήμα 2 παρουσιάζει τον χρονικό ορίζοντα χρήσης των διαφόρων αποθηκευτικών διατάξεων.

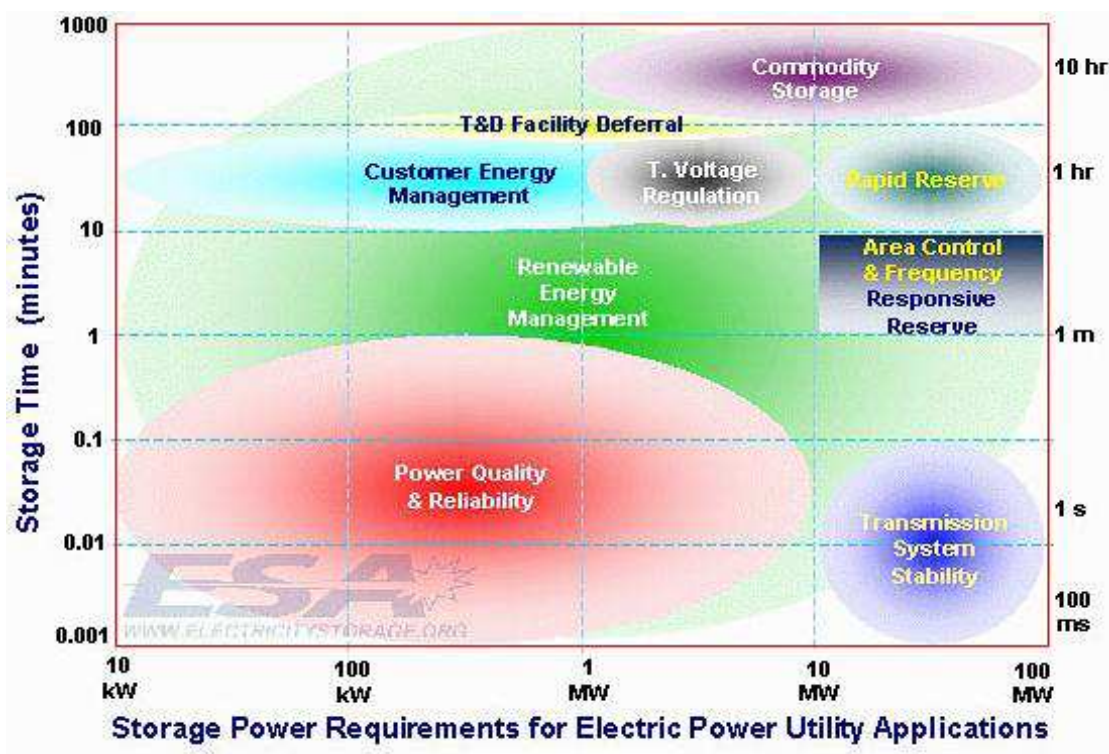
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Σύνοψη εφαρμογών και πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα αποθηκευτικών διατάξεων ηλεκτρικής ενέργειας

Αποθηκευτική Διάταξη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές Ισχύος	Εφαρμογές Ενέργειας	Συνήθης εφαρμογή
Μπαταρίες ροής (flow): PSB, VRBr, ZnBr	Υψηλή χωρητικότητα, ανεξάρτητη εκτίμηση ισχύος - ενέργειας	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας			Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών
Μολύβδου - οξέος	Χαμηλό αρχικό κόστος	Περιορισμένος κύκλος ζωής σε βαθιά εκφόρτιση		-	Εξομάλυνση αιχμών
Ni - Cd	Υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος, απόδοση			/	Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Li - ion	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση	Υψηλό κόστος παραγωγής, απαιτεί ειδικό κύκλωμα φόρτισης		-	Κινητή τηλεφωνία, υποσταθμοί ενέργειας
NaS	Υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, υψηλή απόδοση	Κόστος παραγωγής, μέτρα ασφαλείας (λόγω σχεδιασμού)			Εξομάλυνση ζήτησης λίγων ωρών-λεπτών
Σφόνδουλοι (flywheels)	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας		-	Εξομάλυνση ισχύος για λίγα λεπτά
SMES (Υπεραγωγική Μαγνητική Αποθήκευση)	Υψηλή ισχύς	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλό κόστος παραγωγής			Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
E.C Capacitors	Μεγάλος κύκλος ζωής, υψηλή απόδοση	Χαμηλή πυκνότητα ενέργειας		/	Εφαρμογές ποιότητας ισχύος, διανομή
Αντλησιοταμίευση (pumped storage)	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία			Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα
Ενεργειακή Αποθήκευση Συμπιεσμένου αέρα CAES	Υψηλή χωρητικότητα, χαμηλό κόστος	Απαιτεί ειδική τοποθεσία για τις χρησιμοποιούμενες κοιλότητες			Εξομάλυνση ζήτησης σε μεγάλο χρονικό διάστημα

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



Σχ.1 Μέγεθος, εφαρμογές και τεχνολογική ωριμότητα των διάφορων μεθόδων Αποθήκευσης



Σχ.2 Απαιτήσεις ισχύος και χρονικής διάρκειας αποθήκευσης για διάφορες εφαρμογές των ΣΗΕ

1.3.1. Συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες

Για το ένα τρίτο του πληθυσμού της γης που ακόμη δεν είναι συνδεδεμένο με ένα δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, η μπαταρία παραμένει ο βασικός φορέας ενεργειακής αποθήκευσης. Οι μπαταρίες είναι μια από τις πιο οικονομικές, διαθέσιμες, αποδοτικές και ώριμες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, μιας και είναι η γηραιότερη όλων τους. Βασίζονται στην αποθήκευση της ενέργειας με ηλεκτροχημικό τρόπο. Ένα σύστημα με μπαταρίες αποτελείται από ένα σετ χαμηλής τάσης-ισχύος κυττάρων (μπαταρίες) τα οποία συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα για να πετύχουν τα επιθυμητά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Οι μπαταρίες "φορτίζονται" όταν υφίστανται μια εξωτερική χημική αντίδραση υπό την επίδραση μιας διαφοράς δυναμικού στους ακροδέκτες τους. Αυτές αποδίδουν πίσω την αποθηκευμένη ενέργεια, ή αλλιώς εκφορτίζονται, όταν αντιστραφεί η χημική αυτή αντίδραση. Επειδή οι μπαταρίες

διατηρούν μια dc διαφορά δυναμικού στα άκρα τους, είναι αναγκαία η μετατροπή της σε ac, προκειμένου να επιτευχθεί η επικοινωνία με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στο κεφάλαιο 2 θα δούμε αναλυτικά τα είδη των μπαταριών που χρησιμοποιούνται σήμερα, την αρχή λειτουργίας τους και εφαρμογές τους σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

1.3.2. Συστήματα αποθήκευσης με υπέρ-πυκνωτές και υπεραγώγιμα πηνία

Οι μονάδες υπέρ-πυκνωτών έχουν χωρητικότητα ισχύος και ενέργειας χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών πυκνωτών και είναι ικανοί να παρέχουν ισχύ της τάξης των 100kW, ενώ η ενέργειά τους είναι δυνατό να διοχετευτεί από κλάσματα του δευτερολέπτου έως και ένα λεπτό. Οι διατάξεις υπεραγώγιμων πηνίων, στηρίζουν τη λειτουργία τους στη χρήση της τεχνολογίας των υπεραγώγιμων υλικών γι' αυτό και απαιτούν σημαντικές ποσότητες ψύξης. Αυτές οι διατάξεις μπορούν να διαθέσουν έως και 2MW μέσα σε λίγους κύκλους του εναλλασσόμενου ρεύματος. Και οι δύο τύπου διατάξεις, και ειδικά αυτές των υπεραγώγιμων πηνίων, αποτελούν μια αποτελεσματική λύση σε παροχή ποιότητας ισχύος στα δίκτυα διανομής. Μάλιστα, υπάρχουν εταιρίες στις Η.Π.Α. οι οποίες διαθέτουν τέτοιου είδους μεταφερόμενες μονάδες σε containers για την εφαρμογή τους σε διάφορες περιοχές του δικτύου. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης των υπεραγώγιμων πηνίων είναι τέτοια ώστε να εμφανίζουν σχεδόν μηδενική αντίσταση στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και να οδηγούν τον ηλεκτρισμό, σχεδόν χωρίς απώλειες, σε συστήματα ειδικά σχεδιασμένα ώστε να 'εγκλωβίζουν' αποτελεσματικά την ηλεκτρική ενέργεια μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο. Πρόσφατες παρουσιάσεις εφαρμογών διανομής ενέργειας στις Η.Π.Α και στην Ευρώπη δείχνουν ότι και τα υπεραγώγιμα πηνία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να συμπληρώσουν τις ανανεώσιμες πηγές, ειδικά όπου υπάρχει ήδη κατάλληλη υποδομή ψύξης. Τα πρώιμα υπεραγώγιμα υλικά για να αποδώσουν χρειάζονται κρυογόνο ψύξη η όποια έχει μεγάλο κόστος. Τελευταία εμφανίστηκαν υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγοί (High Temperature Superconductors, HTS) οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες σύμφωνες με τη βιομηχανικά τυποποιημένη ψύξη υγρού αζώτου, περισσότερο συμφέρουσα από την κρυογόνο ψύξη. Λόγω αυτού του γεγονότος αρκετές αμερικανικές επιχειρήσεις έχουν καταφέρει να κυκλοφορήσουν στο εμπόριο υπεραγώγιμα καλώδια και ταινίες.

Στο επόμενο κεφάλαιο μελετούνται πλήρως τα συστήματα υπεραγώγιμων πηνίων, ενώ

στο κεφάλαιο 6 μελετούνται τα συστήματα υπέρ-πυκνωτών.

1.3.3 Στρεφόμενες μάζες - Σφόνδυλοι

Οι στρεφόμενες μάζες ή σφόνδυλοι (flywheels), αναμένεται να έχουν εφαρμογές παροχής ισχύος και ενέργειας για μικρά χρονικά διαστήματα και κυρίως για την παροχή εφεδρείας και όχι τόσο για την παροχή ενέργειας. Η ενέργεια που αποθηκεύεται με την περιστροφή μίας στρεφόμενης μάζας σε υψηλή ταχύτητα, μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια με τη σύνδεση της μάζας σε μια γεννήτρια. Η κινητική ενέργεια μιας μάζας που περιστρέφεται είναι ανάλογη της ροπής αδράνειας και του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητάς του:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

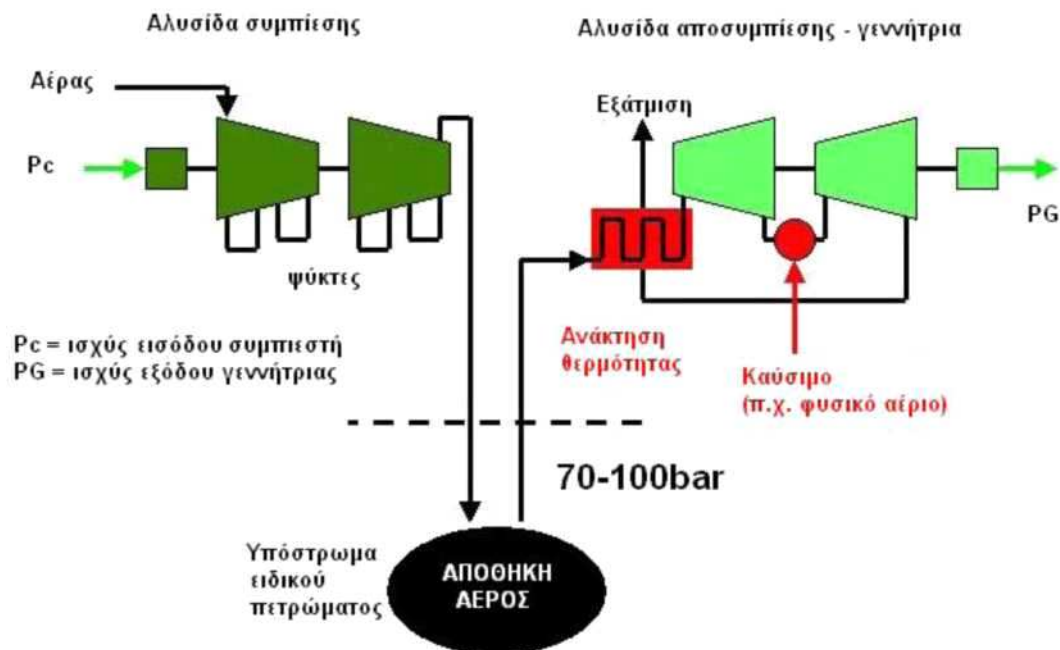
όπου: E_k = κινητική ενέργεια, I = ροπή αδράνειας μάζας στροφέα και ω = γωνιακή ταχύτητα του στροφέα

Τα τελευταία χρόνια, στο σχεδιασμό των στρεφόμενων μαζών η έμφαση έχει μετατοπιστεί από το σχεδιασμό της γεωμετρίας της μάζας στην προσπάθεια να επιτευχθούν υψηλές περιστροφικές ταχύτητες. Ταχύτητες μέχρι 40.000 rpm έχουν ήδη επιτευχθεί, ενώ μέχρι 60.000 rpm προβλέπονται για τις μελλοντικές γενιές. Ο χρόνος εκφόρτισης αυτών των διατάξεων κυμαίνεται μεταξύ λίγων sec και μέχρι 15-30 min, βοηθώντας, περισσότερο από τις μπαταρίες, σε εφαρμογές ισχύος παρά ενέργειας. Αντίθετα από τις μπαταρίες, τα συστήματα στρεφόμενων μαζών δεν είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και η απόδοσή τους μπορεί να φτάσει ως και 80-90% χωρίς ιδιαίτερη πτώση της με το χρόνο ζωής τους, ο οποίος φτάνει τα 15-20 χρόνια (για χρήση σε υψηλές ταχύτητες). Πλεονεκτούν στο ότι απαιτούν μικρό κόστος συντήρησης και εγκατάστασης.

1.3.4 Συστήματα αποθήκευσης με συμπιεσμένο αέρα (CAES)

Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι αέρας μπορεί να συμπιεστεί στα 800 ως 1600psi σε ειδικές γεωλογικές δομές και αφού αποσυμπιεστεί, μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό κινώντας έναν αεριοστρόβιλο. Συμπίεση του αέρα μπορεί να γίνει π.χ. κατά τη διάρκεια

κοιλιάδων φορτίου και αποσυμπιέσει κατά τη διάρκεια των αιχμών του φορτίου. Λόγω της ειδικής γεωλογικής δομής που απαιτείται υπόστρωμα ορυκτού άλατος, μόνο δύο τέτοιες εγκαταστάσεις υπάρχουν παγκοσμίως, η μία στο McIntosh, Alabama της Η.Π.Α (110MW) και η άλλη στη Γερμανία στο Huntorf (290MW). Η αρχή λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζεται σε γενικές γραμμές στο παρακάτω σχήμα. Πρόσφατη είναι και η προσπάθεια μείωσης της απαιτούμενης ισχύος και της πιο ευέλικτης εφαρμογής τέτοιων διατάξεων με τη μορφή Transportable-CAES ή micro-CAES για την εκμετάλλευση αιολικής παραγωγής, ενώ νέες εγκαταστάσεις αυτής της μορφής εγκαθίστανται στις Η.Π.Α.



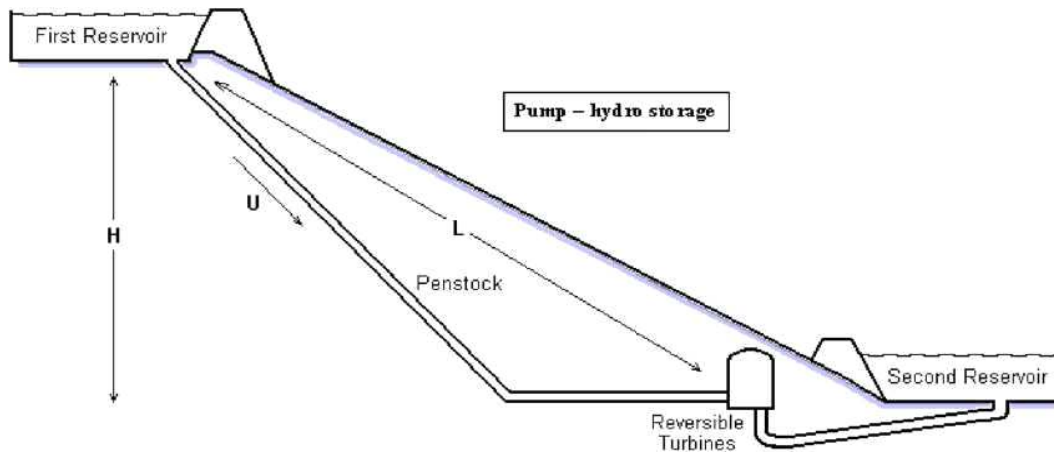
Σχ.3 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας CAES

1.3.5 Αντλησιοταμίευση

Η πιο διαδεδομένη ιδέα για τη μαζική αποθήκευση ενέργειας είναι η χρήση μονάδων αντλησιοταμίευσης. Η γενική ιδέα της αντλησιοταμίευσης είναι η εξής: σε μία δεξαμενή βρίσκεται αποθηκευμένη μία ποσότητα νερού. Όταν ζητηθεί ισχύς το νερό μπορεί να πέσει σε μία χαμηλότερα τοποθετημένη (δεύτερη) δεξαμενή με τη βοήθεια υδροστρόβιλου, ενώ όταν δεν υπάρχει πια ζήτηση ισχύος μπορεί με αντλίες να οδηγηθεί ξανά πίσω στην πρώτη (ψηλότερη) δεξαμενή. Ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται από τα εξής μέρη: μία ανώτερη δεξαμενή (First Reservoir), αγωγοί νερού

(Penstock), αντλία, υδροστρόβιλος, στρόβιλοι αντιστρέψιμης φοράς (Reversible Turbines) και μία κατώτερη, δεύτερη δεξαμενή (Second Reservoir) η οποία μπορεί να είναι ακόμη και η θάλασσα.

Αναπαράσταση του συστήματος αντλησιοταμίευσης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ.4 Σύστημα αντλησιοταμίευσης

Παρόλο όμως που η αντλησιοταμίευση μπορεί να δώσει υψηλή χωρητικότητα ενέργειας σε χαμηλό κόστος δεν χρησιμοποιείται όσο θα ήταν αναμενόμενο. Ο λόγος είναι αφενός μεν η εξειδικευμένη περιοχή που χρειάζεται για να κατασκευαστεί η εγκατάσταση και αφετέρου δε ο χρόνος που χρειάζεται για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία και να απελευθερωθεί η αποθηκευμένη ενέργεια, αφού αν η αντλία δεν λειτουργεί ήδη χρειάζεται χρόνος εκκίνησης. Για αυτό, ως επί το πλείστον χρησιμοποιείται σε εγκαταστάσεις ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Παγκοσμίως είναι διαθέσιμα πάνω από 90GW ισχύος από αντλησιοταμίευση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες (Battery Energy Storage Systems, BESS) έχουν πρόσφατα αναδυθεί σαν μια από τις πιο υποσχόμενες μεσοπρόθεσμες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως σταθεροποίηση τάσης, βελτίωση ποιότητας ισχύος μικρής και μεγάλης διάρκειας, παροχή στρεφόμενης εφεδρείας, και ρύθμιση συχνότητας. Το πλεονέκτημά τους έναντι των άλλων μεθόδων αποθήκευσης είναι ότι προσφέρουν φορητότητα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου η χρήση άλλων μεθόδων αποθήκευσης είναι τεχνικά αδύνατη. Η ενσωμάτωση επίσης ελεγκτών ροής ισχύος στην αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες μπορεί να βελτιώσει τον έλεγχο και την λειτουργία του εκάστοτε συστήματος ισχύος.

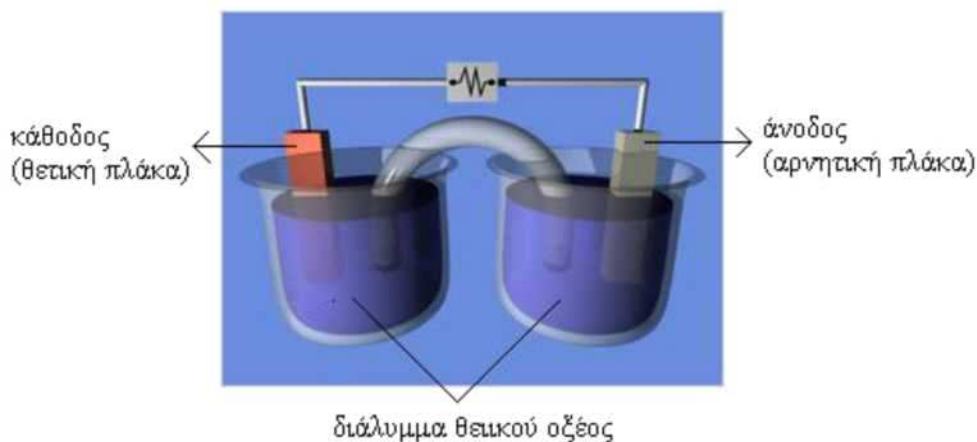
2.1. Εισαγωγή - Κατηγορίες μπαταριών

Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τεχνολογιών κατασκευής μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Μειονέκτημα της αποθήκευσης με μπαταρίες είναι ότι δεν μπορούν να λειτουργούν από μόνες τους σε υψηλά επίπεδα ισχύος για μεγάλες χρονικές περιόδους. Επιπλέον, μια γρήγορη και βαθιά εκφόρτισή τους μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή και αντικατάσταση της μπαταρίας, λόγω της ελάττωσης της διάρκειας ζωής της από την μεγάλη θερμοκρασία που αναπτύσσεται από τον τρόπο αυτό λειτουργίας. Υπάρχουν από την άλλη και διάφοροι περιβαλλοντολογικοί παράγοντες που περιορίζουν την χρήση των μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας λόγω των τοξικών αερίων που παράγονται κατά την φόρτιση-εκφόρτιση από τη μια και λόγω του προβλήματος διάθεσης τους από την άλλη, όταν αυτές αχρηστεύονται.

Η πρόοδος στην τεχνολογία των μπαταριών αφορά στην επίτευξη μεγαλύτερης πυκνότητας ενέργειας, μεγαλύτερης αξιοπιστίας, μεγαλύτερης διάρκειας ζωής και μικρότερου κόστους. Παρακάτω δίνεται μια σύντομη περιγραφή των περισσότερο διαδεδομένων μπαταριών.

2.1.1. Μπαταρίες μολύβδου-οξέος (Lead-Acid)

Οι μπαταρίες αυτές ανακαλύφθηκαν το 1859 από τον Gaston Plante και πρωτοπαρουσιάστηκαν στη Γαλλική Ακαδημία Επιστημών το 1860. Είναι οι πιο διαδεδομένες παγκοσμίως και συνεχίζουν να αποτελούν μια πλήρη αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Αποτελούνται από ένα ηλεκτρόδιο από οξείδιο του μολύβδου (θετική πλάκα - κάθοδος) και ένα ηλεκτρόδιο από μολύβδο (αρνητική πλάκα - άνοδος). Και οι δυο πλάκες στην βρίσκονται σε διάλυμα θειικού οξέος (ηλεκτρολύτης). Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε ένα μοντέλο ενός κυττάρου μπαταρίας (cell) για εκπαιδευτικό σκοπό. Τα δυο ηλεκτρόδια αφού χρησιμοποιούν τον ίδιο ηλεκτρολύτη μπορούν να τοποθετηθούν στο ίδιο δοχείο. Δυο δοχεία χρησιμοποιούνται όταν κάθε ηλεκτρόδιο βρίσκεται σε διαφορετικό ηλεκτρολύτη. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται μια αγώγιμη 'γέφυρα' για τη μετακίνηση των φορτίων χωρίς να αναμιγνύονται τα δυο διαλύματα. Τυπική τάση κυττάρου είναι 2V.



Σχ.5 Μοντέλο κυττάρου (cell) μπαταρίας Lead-Acid

Οι μπαταρίες αυτής της τεχνολογίας είναι κατάλληλες για απευθείας αποθήκευση ή για απαιτήσεις ταχείας εκφόρτισης. Αποτελούν μια χαμηλού κόστους επιλογή για τις περισσότερες εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης έχοντας όμως σαν κύρια μειονεκτήματα την μικρή πυκνότητα ενέργειας, το μεγάλο βάρος και όγκο. Ο περιορισμένος κύκλος ζωής των μπαταριών αυτών (ειδικά σε συνθήκες βαθιάς εκφόρτισης), εξισορροπείται από το χαμηλό κόστους τους, αν και καταβάλλονται σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες για την κατανόηση των μηχανισμών γήρανσής τους και την πρόταση τεχνικών αντιμετώπισής της. Τα συστήματα μπαταριών μολύβδου-οξέος βελτιώνονται σταδιακά και με διάφορους τρόπους. Μια από τις

βελτιώσεις αυτές είναι η χρήση ηλεκτρολυτών σε μορφή gel, αντί για υγρό, η οποία έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν οι μπαταρίες να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε θέση χωρίς να χρειαστεί να ανεφοδιαστούν και να είναι ανθεκτικές σε κραδασμούς. Ένα από τα προβλήματα των μπαταριών αυτών είναι ότι παράγονται αέρια από τις φυσαλίδες οξυγόνου κατά τη φόρτιση και προκαλείται απώλεια του ηλεκτρολύτη. Σε μεγάλα συστήματα μπαταριών μολύβδου - οξέος, η ποσότητα αερίων μπορεί να είναι μεγάλη και σαν συνέπεια αναπτύσσεται ένα εκρηκτικό περιβάλλον στο χώρο τους. Το πρόβλημα αυτό λύνεται από ρυθμιζόμενες από βαλβίδα μπαταρίες μολύβδου-οξέος (Valve Regulated Lead Acid batteries, V.R.L.A.). Στις μπαταρίες αυτές η διαφυγή αερίου ρυθμίζεται από ειδικές ευαίσθητες βαλβίδες πίεσης. Η απόδοση και ο χρόνος ζωής βελτιώνονται από τις καινοτόμες τεχνικές φόρτισης, όπως οι παλμικές μέθοδοι φόρτισης. Μερικά από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι:

- + μπορούν να διαχειριστούν μεγάλες ποσότητες ρεύματος
- + υπάρχει μεγάλο εύρος διαστάσεων και χωρητικότητων
- + χαμηλό κόστος (100\$/KWh και 125-200\$/KWh για τις V.R.L.A.)
- + χαμηλή εσωτερική εμπέδηση
- + ανακυκλώνονται εύκολα
- + απεριόριστη διάρκεια ζωής, αν αποθηκευτούν χωρίς τον ηλεκτρολύτη
- +ανοχή στη κακομεταχείριση και υπερφόρτιση
- βαριά και ογκώδης μπαταρία
- μεγάλος χρόνος φόρτισης
- κίνδυνος υπερθέρμανσης κατά τη φόρτιση
- μικρός κύκλος ζωής (300-500 κύκλοι)
- κίνδυνος έκρηξης από τα παραγόμενα αέρια

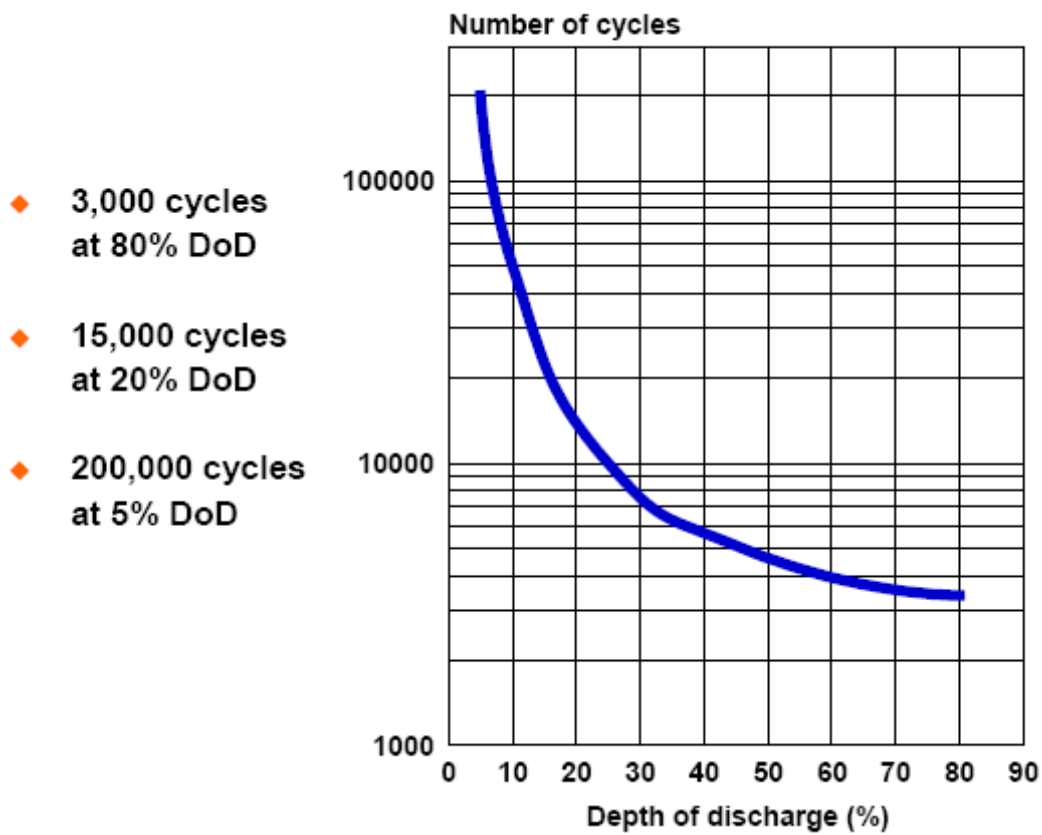
Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται οι χαρακτηριστικές εγκαταστάσεις μπαταριών μολύβδου-οξέος που βρίσκονται σε λειτουργία σήμερα για την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών σε διάφορα δίκτυα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6	
Τοποθεσία	Μέγεθος
Golden Valley Electric Association, Alaska	40MW/14MWh
Puerto Rico Electric Power Company (P.R.E.P.A.)	20 MW/ 14MWh
Vernon, California, USA	5 MW/5 MWh
Metlakatla, Alaska	4 MW/2,5 MWh
ESCAR, San Augustin del Guadalix, Spain	2 MW/4 MWh
Herne – Sodingen, Germany	1,2 MW/1,2 MWh

2.1.2. Μπαταρίες νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)

Οι μπαταρίες αυτές χρησιμοποιούν nickel hydroxide $Ni(OH)_2$ για τη κάθοδο, κάδμιο (Cd) για την άνοδο και KOH για ηλεκτρολύτη. Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου παρόλο που είναι ακριβότερες από τις μπαταρίες μολύβδου- οξέος, έχουν διπλάσιο χρόνο ζωής και επειδή δεν απαιτείται σχεδόν καθόλου παρακολούθηση κατά τη λειτουργία τους μπορούν να τοποθετηθούν σε απομακρυσμένες περιοχές με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες και στην κυριολεξία να ξεχαστούν. Στα μειονεκτήματά τους, εκτός από το κόστος ανήκουν και η μεγάλη διάρκεια ζωής των τοξικών αποβλήτων (ύστερα από τη χρήση της μπαταρίας) καθώς και η πεπερασμένη ποσότητα καδμίου στον πλανήτη. Παρουσιάζουν τάση να καταστρέφονται όταν υπερφορτίζονται. Η τάση κυττάρου μπαταρίας Ni-Cd είναι 1,2V και ο χρόνος ζωής τους κυμαίνεται γύρω στους 500 κύκλους λειτουργίας. Η πιο χαρακτηριστική εγκατάσταση αυτού του είδους μπαταριών είναι στην Αλάσκα για μια τοπική εταιρία και η οποία περιλαμβάνει 1376 μπαταρίες νικελίου-καδμίου και μπορεί να παρέχει 26 MW για 15 λεπτά ή 40MW για 7 μόλις λεπτά, και η οποία κατασκευάστηκε από τη σύμπραξη ABB και SAFT Batteries. Μόνο για το 2006 η συνεισφορά της συγκεκριμένης εγκατάστασης ήταν η αποφυγή συνολικά 82 περιπτώσεων διακοπών ηλεκτρισμού, που αν πραγματοποιούνταν θα επηρέαζαν έως και 310.000 καταναλωτές με συνολική διάρκεια διακοπών 725 λεπτά.

Ως εναλλακτική πρόταση για αυτές τις μπαταρίες είναι οι μπαταρίες Ni-MH (nickel-metal Hybride) οι οποίες έχουν λιγότερο τοξική συμπεριφορά, μεγάλη πυκνότητα ενέργειας και μεγάλο χρόνο ζωής.



Σχ.6 Γραφική παράσταση των κύκλων ζωής μπαταριών Ni-Cd συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης

2.1.3. Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-Ion)

Οι μπαταρίες αυτές έχουν μεγάλη πυκνότητα ενέργειας (300-400 KWh/m³), υψηλότερη απόδοση μετατροπής και μεγάλο κύκλο ζωής (περίπου 3000 κύκλοι). Επειδή το λίθιο είναι το ελαφρύτερο στερεό στοιχείο, οι μπαταρίες που βασίζονται σε αυτό μπορούν να είναι κατά πολύ ελαφρύτερες από τις συνηθισμένες. Γι' αυτό το λόγο και λόγω της μεγάλης απόδοσής τους, βρίσκουν πολλές εφαρμογές στα κινητά τηλέφωνα και στους φορητούς υπολογιστές. Πρόσφατα έχει αρχίσει και η δυνατότητα επέκτασης της χρήσης μπαταριών Li-Ion και σε εφαρμογές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με μία πρώτη εγκατάσταση στη χώρα μας στην πειραματική εγκατάσταση συμπαραγωγής του Ε.Μ.Π και της Ε.Π.Α Αττικής.

ΠΙΝΑΚΑΣ 7 - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ Li-ion	
χαρακτηριστικό	εκτίμηση
Χαμηλό κόστος	Φτωχό - 600\$-1000\$ / KWh
Ικανότητα χωρητικότητας	Πολύ καλή
Βάθος εκφόρτισης	85-95%
κύκλος ζωής	Πολύ καλός (περίπου 3000 κύκλοι)
συντήρηση	Χαμηλή
πυκνότητα ενέργειας	Μεγάλη
ωριμότητα / ρίσκο χρησιμοποίησης	Νέα τεχνολογία / ρίσκο για εφαρμογές χρησιμοποίησης

2.1.4. Μπαταρίες θειικού νατρίου (NaS)

Οι μπαταρίες NaS (Sodium Sulphur) που αρχικά αναπτύχθηκαν από τη Ford Motor Company για αυτοκίνητα, έχουν πολύ μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, 4,2 φορές κατ' όγκο και 5,8 φορές κατά βάρος, από τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος με μικρότερες ανάγκες συντήρησης. Η πιο σημαντική εγκατάσταση τέτοιων μπαταριών αφορά εγκαταστάσεις ενίσχυσης άεργου ισχύος σε υποσταθμούς, παρέχοντας όμως και τη δυνατότητα κυκλικής λειτουργίας. Δυο μονάδες των 6MW/48MWh που χρησιμοποιούν μπαταρίες NaS και βρίσκονται σε λειτουργία σήμερα, βρίσκονται στον υποσταθμό Ohito και στον υποσταθμό Tsunashima στην Ιαπωνία. Τα χαρακτηριστικά των κυττάρων NaS φαίνονται στο παρακάτω πίνακα 8 ενώ στο πίνακα 9 βλέπουμε την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των μπαταριών αυτής της τεχνολογίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 8	
Τάση	2 Volt
Χωρητικότητα Ενέργειας	1220Wh
Διαστάσεις	διάμετρος: 91 mm μήκος: 516mm
Πυκνότητα ενέργειας	367Wh/lit
Βάρος	5,5Kg

ΠΙΝΑΚΑΣ 9	
χαρακτηριστικό	εκτίμηση
Χαμηλό κόστος	Καλό, 350\$ /KWh
Ικανότητα χωρητικότητας	Πολύ καλή
Βάθος εκφόρτισης	Καλό, 70-75%
κύκλος ζωής	Πάρα πολύ καλό (περίπου 10.000 κύκλοι)
συντήρηση	Μεσαία
πυκνότητα ενέργειας	Μικρή σχετικά με αυτή των Li-ion
ωριμότητα / ρίσκο χρησιμοποίησης	Νέα τεχνολογία / ρίσκο για εφαρμογές χρησιμοποίησης

2.1.5. Μπαταρίες μετάλλου-αέρα

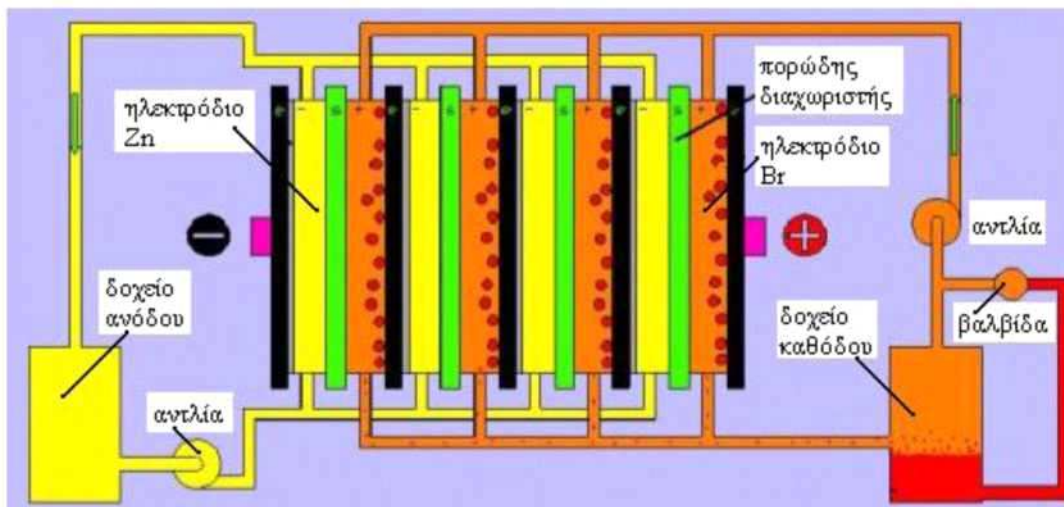
Το γεγονός ότι είναι οι φθηνότερες μπαταρίες, σε συνδυασμό με την υψηλή πυκνότητά τους εξηγεί γιατί τις παράγουν πολλές γνωστές εταιρείες. Ως άνοδος χρησιμοποιούνται συνήθως κατάλληλα μέταλλα π.χ. αλουμίνιο, ψευδάργυρος, μόλυβδος ή ακόμη και σίδηρος, τα οποία τοποθετούνται σε ρευστό ή πολυμερή ενσωματωμένο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

Οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα είναι δομικά ασφαλείς και φιλικές προς το περιβάλλον. Αλλά ενώ η υψηλή ενέργεια, η ελεγχόμενη εκφόρτιση και το χαμηλό κόστος θα μπορούσαν να τις καθιστούν κατάλληλες για πολλές εφαρμογές, ο μικρός κύκλος ζωής τους και η μικρή ικανότητα φόρτισης- εκφόρτισης αποτρέπει τη εκτεταμένη χρήση τους. Μερικοί κατασκευαστές ξεπερνούν τη δυσκολία αυτή προσφέροντας συσκευές που είναι δυνατό να ανεφοδιαστούν έτσι ώστε να αντικατασταθεί το μέταλλο που καταναλώθηκε. Αυτή η λύση όμως έχει συνέπειες στον κύκλο ζωής, το κόστος και την ευκολία Χρήσης.

2.1.6. Μπαταρίες ροής: Zinc/Bromine (ZnBr) και Vanadium Redox (VRD)

Οι μπαταρίες της κατηγορίας αυτής είναι πολύ διαφορετικές στο σχεδιασμό και την αρχή λειτουργίας, σε σχέση με τις κλασικές μπαταρίες (π.χ. μολύβδου- οξέος). Ανήκουν στην κατηγορία μπαταριών ροής, μιας και ο ηλεκτρολύτης ρέει μέσα από τα ηλεκτρόδια διαμέσου δυο ξεχωριστών εξωτερικών δεξαμενών. Η κατασκευή αυτή επιτρέπει η

χωρητικότητά της να μεταβάλλεται κατά περίπτωση. Η λειτουργία της βασίζεται στην αντίδραση δυο πολύ κοινών χημικών στοιχείων. Η άνοδος είναι κατασκευασμένη από ψευδάργυρο (Zn) και η κάθοδος από βρωμίνη (Br) και χωρίζονται μεταξύ τους με έναν μικρό- πορώδη διαχωριστή. Η διαφορά με τις κοινές μπαταρίες είναι ότι τα ηλεκτρόδια δεν λαμβάνουν μέρος στις αντιδράσεις, αλλά εξυπηρετούν σαν ένα υπόστρωμα των αντιδράσεων, με συνέπεια να αυξάνει η μακροβιότητα των μπαταριών αυτών. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το σχέδιο μιας μπαταρίας Zinc/Bromine.



Σχ.7 Σχέδιο μπαταρίας Zinc/Bromine

Οι μπαταρίες αυτές μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως χωρίς κανένα απολύτως πρόβλημα. Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγονται: χαμηλό κόστος, ανακυκλούμενα υλικά και τεχνολογίες κατασκευής που επιτρέπουν τη μαζική παραγωγή με χαμηλό κόστος. Παρουσιάζουν 2-3 φορές μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από ότι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος και έχουν κόστος 250\$/KWh. Τέτοιες μπαταρίες κατασκευάζει η ZBB Energy Corporation (.zbbenergy.com"www.zbbenergy.com) για εφαρμογές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα ΣΗΕ και στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ένας άλλος τύπος μπαταριών ροής είναι οι μπαταρίες VRD (Vanadium Redox). Με τη χωρητικότητα ενέργειας να εξαρτάται από τον όγκο του ηλεκτρολύτη, οι μπαταρίες αυτές κατασκευάζονται με πυκνότητα ενέργειας 20- 30Wh/lit, 30% περίπου μεγαλύτερη από αυτή των κοινών μπαταριών μολύβδου-οξέος. Το μειονέκτημα των μπαταριών αυτών είναι το σχετικά μεγάλο βάρος και ο μεγάλος όγκος τους, ο οποίος τις καθιστά

κατάλληλες μόνο για στατικές εφαρμογές. Περισσότερη έρευνα σε συστήματα τέτοιων μπαταριών κάνει η National Power PLC institute (UK).

2.2. Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μπαταριών είναι:

α) Χωρητικότητα: είναι η τιμή του dc ρεύματος που μπορεί να δίνει σταθερά για μία ώρα. Μετριέται σε Amperehours (Ah). Χωρητικότητα 40Ah σημαίνει ότι η μπαταρία αυτή μπορεί να δίνει σταθερά ρεύμα έντασης 40A για μια ώρα ή 80A για μισή ώρα ή 20A για 2 ώρες

β) Ενεργειακή απόδοση: είναι το πηλίκο της ενέργειας που προσδίδεται κατά την εκφόρτιση προς την ενέργεια που απαιτείται για μια πλήρη φόρτιση. Η ενέργεια απόδοσης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 70% και 80%.

γ) Απόδοση φόρτισης: είναι το πηλίκο των αμπέρ-ωρών (Ah) εκφόρτισης προς τις αμπέρ-ώρες για πλήρη φόρτιση. Κυμαίνεται στο 95 % για μπαταρίες μολύβδου-οξέος και λίγο πιο κάτω για μπαταρίες νικελίου-καδμίου. Ο λόγος που η ενεργειακή απόδοση είναι χαμηλότερη της απόδοσης φόρτισης είναι γιατί οι συσσωρευτές εκφορτίζονται σε χαμηλότερη τάση από ότι όταν φορτίζονται.

δ) Ρυθμός φόρτισης-εκφόρτισης: είναι η χωρητικότητα (Ah) προς το χρόνο φόρτισης ή εκφόρτισης αντίστοιχα. Έτσι όταν δούμε για παράδειγμα την επιγραφή C/10 = X εννοούμε το ρεύμα που αντιστοιχεί στην C χωρητικότητα, η οποία εκφορτίστηκε μέσα σε 10 ώρες.

ε) Επίπεδο (Βάθος) εκφόρτισης (Depth Of Decharge, DOD): είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία.

στ) Επίπεδο φόρτισης (State Of Charge, SOC): είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει απομείνει.

ζ) Cycle Of Life: είναι ένα μέτρο που δείχνει πόσους κύκλους μπορεί μια μπαταρία να αποδώσει κατά την διάρκεια ζωής της, με την έννοια κύκλου να εννοούμε μια εκφόρτιση μέχρι το DOD και μια πλήρης φόρτιση ακολούθως.

2.3. Μοντελοποίηση μπαταριών

2.3.1. Επισκόπηση των μοντέλων

Διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί, προκειμένου να προσεγγίσουν τη συμπεριφορά της μπαταρίας αναφορικά με την εκτιμώμενη αναπτυσσόμενη τάση τους ανάλογα με το χρόνο φόρτισης-εκφόρτισης, το χρησιμοποιούμενο ρεύμα και την τελική τάση φόρτισης-εκφόρτισης. Σε κάποιες περιπτώσεις λαμβάνεται υπ' όψιν και η θερμοκρασία, η αυτοεκφόρτιση αλλά και παράμετροι για τη μοντελοποίηση της γήρανσης. Το βασικό συμπέρασμα από τα μοντέλα αυτά είναι ότι η ποσότητα της αποθηκευόμενης ή χρησιμοποιούμενης ενέργειας σε μία μπαταρία κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος rt , δεν είναι μονοσήμαντα καθοριζόμενη ως το γινόμενο της ισχύος επί τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος rt . Το πλέον αναφερόμενο και λιγότερο απαιτητικό μοντέλο για την εκτίμηση της χωρητικότητας μίας μπαταρίας Lead-Acid είναι εκείνο του Peukert, το οποίο καθορίζει πως μεταβάλλεται η χωρητικότητα μιας τέτοιας μπαταρίας για διαφορετικούς ρυθμούς ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης, και περιγράφεται από μία την παρακάτω συνάρτηση:

$$I^n T_i = \text{σταθ} .$$

όπου 'n' είναι ο συντελεστής Peukert και συνήθως για τέτοιου είδους μπαταρίες λαμβάνει τιμές $n=1 -1,5$ με πιο συνηθισμένο εύρος τιμών 1,2-1,3. Σε αυτήν την περίπτωση το ρεύμα 'I' θεωρείται σταθερό κατά τη διάρκεια της φόρτισης και εκφόρτισης η οποία διαρκεί χρονική περίοδο T_i .

Ένα επίσης αρκετά χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι εκείνο του Shepherd, το οποίο μοντελοποιεί την πολική τάση της μπαταρίας σαν συνάρτηση του χρόνου και του ρεύματος εκφόρτισης προκειμένου να προσομοιώσει την ηλεκτροχημική συμπεριφορά της διάταξης. Το καθολικό μοντέλο των Unnewehr και Nasar είναι παρόμοιο με το μοντέλο του Shepherd με απλοποίηση των σχετικών εξισώσεων με γραμμικοποίηση, προτείνοντας όμως μία γραμμική εξάρτηση για τη θεωρούμενη εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας με το επίπεδο φόρτισης. Ο Ross, παρουσιάζει ένα μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψη του ένα πολύ μεγάλο πλήθος παραμέτρων προκειμένου να συμπεριλάβει πέραν από τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης, τους μηχανισμούς αεριοποίησης αλλά και τους μηχανισμούς γήρανσης στην μακροπρόθεσμη προσομοίωση ενός συστήματος.

Η πιο γνωστή προσέγγιση είναι εκείνη του Kinetic Battery Model (KiBaM) το οποίο αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης και χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα προσομοίωσης Υβριδικών Συστημάτων Hybrid2, για τη μοντελοποίηση των μπαταριών. Αυτό το μοντέλο παρουσιάζει ένα υδροδυναμικό ανάλογο μιας μπαταρίας, σύμφωνα και με την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων. Οι διαφορικές εξισώσεις του μοντέλου προβλέπουν τόσο την ωφέλιμη χωρητικότητα της μπαταρίας όσο και το προφίλ της τάσης κατά τη διαδικασία φόρτισης-εκφόρτισης.

Το μοντέλο BEST (Battery Energy Storage Test facility model), θεωρεί ότι η μπαταρία προσεγγίζεται από μία πηγή τάσης σε σειρά με μία αντίσταση. Η τάση της πηγής μειώνεται με το βάθος εκφόρτισης, το οποίο εξαρτάται από το ρεύμα εκφόρτισης αλλά και την μέχρι στιγμής ιστορία της αποθηκευτικής διάταξης. Οι τέσσερις παράμετροι που χρησιμοποιεί αυτό το μοντέλο προσδιορίζονται με τη βοήθεια συνδυασμού στοιχείων του κατασκευαστή αλλά και με πειραματικές μετρήσεις.

Κάποια μοντέλα λαμβάνουν παραμέτρους θερμοκρασίας για τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Οι μορφή των εξισώσεων οι οποίες περιγράφουν την επίδραση της θερμοκρασίας έχουν τη γενική μορφή της παρακάτω εξίσωσης, όπου θ η θερμοκρασία για την οποία επιθυμούμε τον υπολογισμό της χωρητικότητας C_{θ} θ_{ref} η θερμοκρασία αναφοράς για την οποία έχουν γίνει οι δοκιμές από τον κατασκευαστή και έχει προσδιοριστεί η χωρητικότητα αναφοράς C_{ref} , ενώ η παράμετρος th_{par} είναι της τάξης του 10^{-3} ή 10^{-4} .

$$C_{\theta} = C_{ref} \cdot (1 + th_{par} \cdot (\theta - \theta_{ref})) \quad (2.1)$$

Γενικά, επειδή οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία μπαταρία επιταχύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται και η χωρητικότητα της διάταξης. Λόγω της σχετικά μικρής επίπτωσης αυτού του παράγοντα και της τοποθέτησης των μπαταριών σε εσωτερικό χώρο, μία τέτοια παράμετρος μπορεί να παραλειφθεί, ή να θεωρηθεί ενιαία για όλη την ημέρα ανάλογα, με τη μέση θερμοκρασία της εξεταζόμενης περιοχής. Αντίστοιχα, λόγω της συνεχούς ανταλλαγής ισχύος της μπαταρίας με το συνδεδεμένο δίκτυο η επίδραση της αυτό-εκφόρτισης είναι πολύ μικρή και η μοντελοποίησή της μπορεί και αυτή να παραλειφθεί.

Για τη μοντελοποίηση των μηχανισμών γήρανσης αυτών των αποθηκευτικών διατάξεων η πιο ολοκληρωμένη προσπάθεια παρουσιάστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος της Benchmarking με έμφαση σε εφαρμογές αυτών των διατάξεων σε αυτόνομα συστήματα τροφοδοτούμενα από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ένα βασικό πρόβλημα των παραπάνω μοντέλων είναι το πλήθος των παραμέτρων, τα οποία πρέπει συχνά να προσδιοριστούν πειραματικά αφού δεν είναι εύκολα διαθέσιμα στους τελικούς χρήστες ή είναι διαθέσιμα από πολύ συγκεκριμένους κατασκευαστές. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε βασιζόμενη σε απλοποιήσεις των παραπάνω μοντέλων παρουσιάζεται στη συνέχεια.

2.3.2. Παρουσίαση προσέγγισης

Οι κατασκευαστές μπαταριών Lead-Acid δημοσιεύουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών τους σε πίνακες με τους ρυθμούς φόρτισης- εκφόρτισης για συγκεκριμένο αριθμό ωρών και συγκεκριμένη τελική τάση φόρτισης ή εκφόρτισης. Κάθε μπαταρία χαρακτηρίζεται από ένα ρυθμό C_{nom} ο οποίος αντιστοιχεί στη χωρητικότητα της μπαταρίας σε Ah όταν εκείνη εκφορτίζεται σε nom ώρες με σταθερό ρεύμα $I_{nom} = C_{nom}/nom$. Η συνήθης τιμή των ωρών είναι $nom=10$. Για τιμές ρεύματος μικρότερες από το ρυθμό C_{nom}/nom είναι ασφαλέστερο να θεωρηθεί ότι η μπαταρία δεν μεταβάλλει την ενέργεια που μπορεί να αποδώσει πέραν της ονομαστικής της τιμής, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι γενικές εξισώσεις φόρτισης και εκφόρτισης της παραγράφου 1.4. Στην πραγματικότητα υπάρχει αύξηση της χωρητικότητας της αποθηκευτικής διάταξης αλλά γενικά παρατηρείται ασυνέχεια των μοντελοποιήσεων ειδικά για πολύ μεγάλους χρόνους φόρτισης με μικρές τιμές ρευμάτων.

Αν όμως ο ρυθμός φόρτισης-εκφόρτισης είναι μεταβλητός και ειδικά εάν είναι μεγαλύτερος από τον ονομαστικό ρυθμό, αν θέλουμε να εκτιμήσουμε το περιεχόμενο της υπό εξέταση αποθηκευτικής διάταξης. Σε μία τέτοια περίπτωση η αποθηκευτική διάταξη δεν πρόκειται να χωρέσει το ονομαστικό της περιεχόμενο, ούτε να αποδώσει το πλήρες περιεχόμενό της. Γνωρίζοντας τους ρυθμούς φόρτισης-εκφόρτισης μπαταριών για συγκεκριμένο αριθμό ωρών και συγκεκριμένη τελική τάση φόρτισης ή εκφόρτισης, είναι δυνατόν να κατασκευαστούν διαγράμματα χωρητικότητας-ρεύματος και χωρητικότητας-χρόνου, για τιμές ρεύματος μεγαλύτερες του I_{nom} ή για χρόνους εκφόρτισης μικρότερους από τον nom .

2.3.3. Χωρητικότητα συναρτήσει χρόνου και ρεύματος φόρτισης- εκφόρτισης

Ως άμεση συνέπεια του νόμου του Peukert, για δεδομένη τελική τάση κελιού V και γνωστό το συντελεστή Peukert, 'n', η μέγιστη χωρητικότητα για γνωστό και σταθερό ρεύμα εκφόρτισης I , θα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (2.2). Αντίστοιχα αν είναι γνωστός ο χρόνος εκφόρτισης, T υπό σταθερό ρεύμα, η χωρητικότητα της αποθηκευτικής διάταξης θα δίνεται από την εξίσωση (2.3).

$$\text{MaxCapacit} \quad y(I) = C_{nom} \left(\frac{I_{nom}}{I} \right)^{n-1} \quad (2.2)$$

$$\text{MaxCapacit} \quad y(t) = C_{nom} \left(\frac{t}{t_{nom}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (2.3)$$

Στην περίπτωση που δεν είναι γνωστός αυτός ο συντελεστής, αλλά είναι διαθέσιμη η καμπύλη χωρητικότητας, τότε με τη βοήθεια της προσέγγισης καμπύλης (curve fitting), αν περισσότερα από 2 ζεύγη τιμών είναι διαθέσιμα, μπορεί να προσδιοριστεί η εξίσωση που περιγράφει τη συμπεριφορά της μπαταρίας υπό σταθερό ρεύμα ή γνωρίζοντας τον επιθυμητό χρόνο φόρτισης/εκφόρτισης. Λόγω της εκθετικής μορφής του νόμου Peukert, το μοντέλο προσέγγισης αναμένεται να είναι λογαριθμικό, υπό τη μορφή των εξισώσεων (2.4) και (2.5) με τους συντελεστές να προσδιορίζονται με τη μέθοδο curve fitting.

$$\text{MaxCapacit} \quad y(t) = a \cdot \ln(t) + b \quad (2.4)$$

$$\text{MaxCapacit} \quad y(I) = k \cdot \ln(I) + m \quad (2.5)$$

Επομένως ο χρόνος εκφόρτισης με συγκεκριμένο ρεύμα δεν είναι ποσότητα αντιστρόφως ανάλογη του ρεύματος εκφόρτισης όπως θα περίμενε γενικά κανείς και υπέρ-απλουστευμένα παρουσιάζουν οι εξισώσεις της παραγράφου 1.4, αλλά ακολουθεί μία συνάρτηση της μορφής:

$$CycleTime(I) = g \cdot I^{-h} \text{ (σε ώρες)} \quad (2.6)$$

Το ρεύμα σε Αμπέρ, που απαιτείται για την εκφόρτιση σε ένα δεδομένης διάρκειας χρονικό διάστημα δίνεται από μία σχέση της μορφής:

$$Current(t) = c \cdot t^{-d} \text{ (σε Αμπέρ)} \quad (2.7)$$

2.3.4. Προσδιορισμός του επιπέδου φόρτισης-εκφόρτισης

Για τη διευκόλυνση των εξισώσεων που ακολουθούν, ορίζεται από την παρακάτω σχέση (2.8), η ονομαστική κατάσταση φόρτισης (Nominal State Of Charge, SOC_{nom}) για τη χρονική περίοδο t .

$$SOC_{nom}(t) = \frac{E(t)}{E_{mon}(t)} \quad (2.8)$$

όπου $E(t)$ το ενεργειακό περιεχόμενο της διάταξης σε Wh και $E_{nom}(t)$ η ενέργεια η οποία αντιστοιχεί στην ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας C_{nom} . Αν καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης το ρεύμα παραμένει σταθερό, τότε το τελικό περιεχόμενο, $MaxCapacity(I)$, που μπορεί να αποθηκευτεί θα δίνεται από μία εκ των (2.2) ή (2.5) ανάλογα με το αν δίνεται ο συντελεστής Peukert 'n'. Όμως, το ρεύμα φόρτισης μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διαδικασία της φόρτισης με αποτέλεσμα το περιθώριο για αποθήκευση ενέργειας να μην μπορεί να καθοριστεί άμεσα από τη μια από τις εξισώσεις αυτές. Έτσι το περιεχόμενο το οποίο μπορεί περαιτέρω να αποθηκεύσει η μπαταρία μεταβάλλεται στις διάφορες χρονικές στιγμές ανάλογα με την προηγούμενη διαδικασία φόρτισής της αλλά και τον τρέχοντα ρυθμό φόρτισής της. Για την καλύτερη λοιπόν μοντελοποίηση επιλέγεται να δίνεται κάποιου είδους «ποινή» στο περιθώριο φόρτισης για κάθε χρονική περίοδο t κατά την οποία ο ρυθμός φόρτισης είναι διαφορετικός του ονομαστικού.

Ο αριθμός των ωρών, στον οποίο φορτίζεται μία πλήρης μπαταρία με σταθερό ρεύμα I , θα δίνεται από τη σχέση:

$$h_{\text{rhythm}} = \frac{\text{MaxCapacit} \quad y(I)}{I} \quad (2.9)$$

Με αυτό ως δεδομένο, η «ποινή» για την χωρητικότητα της αποθηκευτικής διάταξης για το χρονικό διάστημα 1 ώρας, θα είναι το ποσοστό $1/h_{\text{rhythm}}$ της μείωσης της χωρητικότητας. Αν το χρονικό διάστημα Δt είναι διαφορετικό από 1 ώρα, θα πρέπει να ληφθεί ως ποινή το ποσοστό της ώρας που αντιστοιχεί στο Δt . Ορίζεται λοιπόν η μεταβλητή $\text{AvailCapacity}(I,t)$ για να περιγράψει τη μέγιστη χωρητικότητα της αποθηκευτικής διάταξης σε Wh για το ρεύμα φόρτισης I και το χρονικό διάστημα t , όπως υπολογίζεται κατά τη φόρτιση με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης (2.10).

$$\text{AvailCapacity} \quad ity (I, t + \Delta t) = \text{AvailCapacity} \quad ity (I, t) - \frac{C^{nom} - \text{MaxCapacit} \quad y(I)}{h_{\text{rhythm}}} \cdot V(t) \cdot \Delta t \quad (2.10)$$

$V(t)$ είναι η μέση τιμή της τάσης για εκείνο το χρονικό διάστημα στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Με τη βοήθεια της (2.10) και με αναδρομική διαδικασία έχει υπολογιστεί η τιμή $\text{AvailCapacity}(I,t)$ για να είμαστε έτοιμοι στην αρχή του επόμενου διαστήματος. Η προκαθορισμένη τιμή εκκίνησης για τη μεταβλητή $\text{AvailCapacity}(I,t)$ είναι η τιμή E_{nom} . Το περιεχόμενο της αποθηκευτικής διάταξης κατά τη φόρτιση θα δίνεται σε μία τέτοια περίπτωση από τη συνάρτηση (1.2), με τη βοήθεια των περιορισμών (1.3) και (1.4). Το τέλος της φόρτισης επέρχεται όταν η ποσότητα $E(t)$ συμπίπτει με την ποσότητα $\text{AvailCapacity}(I,t+\Delta t)$. Για μία αποθηκευτική διάταξη η οποία είναι κατά 50% φορτισμένη, η χρήση της (2.10) επαληθεύει την υπόθεση ότι αν εφαρμόσουμε ρεύμα που τη φορτίζει μέσα σε 2 ώρες, η μπαταρία θα είναι πλήρως φορτισμένη μέσα σε 1 ώρα με μικρότερο όμως περιεχόμενο από ότι αν την φορτίζαμε με ρεύμα ίσο με I_{nom} και σε χρόνο $t_{nom}/2$.

Στην περίπτωση της εκφόρτισης, θα πρέπει να υπάρχει αντίστοιχη «ποινή» στο περιεχόμενο της αποθηκευτικής διάταξης καθώς μειώνεται το περιεχόμενό της αν ο ρυθμός εκφόρτισης είναι μεγαλύτερος του ονομαστικού, ώστε να εκφορτιστεί η διάταξη

πιο γρήγορα. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν ότι αν σε μία μπαταρία που εκφορτίζεται αρχικά με υψηλό ρεύμα εφαρμοστεί στη συνέχεια χαμηλότερο ρεύμα, αυξάνεται ο χρόνος εκφόρτισης και το περιεχόμενο που τελικά αποδίδεται στον τελικό χρήστη για την ίδια θερμοκρασιακή κατάσταση. Το φαινόμενο αυτό είναι ακόμη περισσότερο εμφανές αν αφαιρεθεί η μπαταρία να «ηρεμήσει» μετά από διαδικασία απότομης εκφόρτισης και επαληθεύεται και με πειραματικά δεδομένα από μετρήσεις σε μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων. Με βάση τα παραπάνω το περιεχόμενο της μπαταρίας τη στιγμή $t+\Delta t$ θα περιλαμβάνει αυτόν τον συντελεστή ποιότητας και θα δίνεται από τη συνάρτηση (2.11), η οποία δεν είναι τίποτε άλλο από την (1.5), αφαιρώντας την ποσότητα «ποιότητας» σύμφωνα πάντα με τους περιορισμούς (1.6) και (1.7).

$$E(t + \Delta t) = E(t) - n_{disch} \cdot P_{disch} \cdot \Delta t - \frac{C^{nom} - MaxCapac}{h_{rhythm}} \cdot y(I) \cdot V(t) \cdot \Delta t \quad (2.11)$$

Όταν η μπαταρία εκφορτιστεί πλήρως, $E(t+\Delta t)=0$, θεωρείται ότι ανεξάρτητα από το προηγούμενο επίπεδο φόρτισης, η διαθέσιμη χωρητικότητα για φόρτιση, $AvailCapacity(I,t+\Delta t)$ είναι η ονομαστική E_{nom} . Επομένως, κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, θα πρέπει η ποσότητα $AvailCapacity(I,t+\Delta t)$ να συγκλίνει σταδιακά, ώστε όταν η εκφόρτιση ολοκληρωθεί, η διαθέσιμη χωρητικότητα να γίνει ίση με E_{nom} . Για να επιτευχθεί αυτός ο περιορισμός, θα πρέπει όποτε εκφορτίζεται η μπαταρία να μειώνεται η «ποιότητα» χωρητικότητας που έχει επιβληθεί με την (2.10). Επομένως, η μείωση της ποιότητας και το νέα χωρητικότητα της αποθηκευτικής διάταξης θα δίνεται στην εκφόρτιση από

$$\text{την} \quad (2.12).$$

$$AvailCapacity(I, t + \Delta t) = AvailCapacity(I, t) - \frac{C^{nom} - AvailCapacity(I, t)}{h_{avail}} \cdot V(t) \cdot \Delta t$$

όπου: $h_{avail} = NSOC(t) \cdot h_{rhythm} \quad (2.13)$

Επειδή η αποθηκευτική διάταξη δε θα είναι γεμάτη, ο χρόνος αποκατάστασης της χωρητικότητας σε E_{nom} , αν έχουμε μόνο εκφόρτιση για τις επόμενες ώρες θα δίνεται από τη μεταβλητή h_{avail} , όπως μαθηματικά περιγράφεται από την (2.13). Η μεταβλητή αυτή θα αντιπροσωπεύει το χρόνο εκφόρτισης της αποθηκευτικής διάταξης η οποία βρίσκεται

σε ονομαστικό περιεχόμενο $NSOC(t)$ και εκφορτίζεται με σταθερό ρυθμό, ο οποίος θα εκφορτιζε την πλήρη αποθηκευτική διάταξη σε χρόνο h_{rhythm} . Έτσι π.χ αν μία μπαταρία έχει περιεχόμενο 75 Ah με ονομαστική χωρητικότητα 100 Ah, αυτό σημαίνει ότι θα εκφορτιστεί στο 75%. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η επίδραση μείωσης της «ποινής» χωρητικότητας μειώνεται όσο περισσότερο φορτισμένη είναι η μπαταρία καθώς αυξάνει ο χρόνος h_{avail} . Το γεγονός αυτό αιτιολογείται από την προηγούμενη ιστορία της μπαταρίας, η οποία μείωσε σταδιακά τη διαθέσιμη χωρητικότητα και είναι δυσκολότερο να ξεχαστεί μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα. Αν δεν είναι διαθέσιμες οι παραπάνω πληροφορίες και είναι γνωστός ο συντελεστής Peukert, τότε υπολογίζεται ο λόγος του ρεύματος που ζητείται από την αποθηκευτική διάταξη σύμφωνα με τη σχέση (2.14). Μόνο αν αυτός ο λόγος είναι μεγαλύτερος από το 1, θα πρέπει να υπάρχει η σχετική «ποινή». Η «ποινή» που επιβάλλεται στο φορτίο που περιέχει ή μπορεί να αποθηκεύσει η μπαταρία σε περίπτωση κατά την οποία ο ρυθμός είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα, θα προκύπτει από την (2.3), και θα δίνεται από την (2.15).

$$\lambda(t) = \frac{I(t)}{I^{nom}} \quad (2.14)$$

$$P_{en}(t) = \lambda(t)^n - \lambda(t) \quad (2.15)$$

Με βάσει τις παραπάνω εξισώσεις, ο συντελεστής φόρτισης σε κάθε χρονική στιγμή, $SOC(t)$, θα δίνεται από την (2.16), τόσο για τη φόρτιση όσο και για την εκφόρτιση.

$$SOC(t) = \frac{E(t)}{AvailCapacity(I,t)} \quad (2.16)$$

2.3.5. Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης και φόρτισης σε ένα χρονικό διάστημα Δt , ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης

Η γνώση αυτής της παραμέτρου είναι σημαντική, ώστε για δεδομένη κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας να είναι γνωστό το μέγιστο ρεύμα το οποίο η μπαταρία μπορεί να προσφέρει. Μία τέτοια περίπτωση είναι η απαίτηση της παροχής στρεφόμενης εφεδρείας από την αποθηκευτική διάταξη. Από την άλλη είναι επίσης απαραίτητο, ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, να προσδιοριστεί το μέγιστο ρεύμα με το οποίο μπορούμε να φορτίσουμε την αποθηκευτική διάταξη. Η γνώση αυτή είναι απαραίτητη ειδικά σε περίπτωση συνεργασίας της αποθηκευτικής διάταξης με μονάδες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αποθήκευση της απορριπτόμενης ενέργειας.

Το μέγιστο ρεύμα εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων των μπαταριών, την κατάσταση φόρτισης τους και τη χρονική περίοδο για την οποία επιθυμούμε να προσδιορίσουμε την τιμή του. Αν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και το ρεύμα το οποίο μπορούν να αντέξουν τα ηλεκτρόδια είναι εκ των προτέρων γνωστά, πρέπει να προσδιοριστεί το μέγιστο ρεύμα εξαρτώμενο από τη χρονική διάρκεια εκφόρτισης για δεδομένη θερμοκρασιακή τάση φόρτισης-εκφόρτισης. Αν η αποθηκευτική διάταξη είναι πλήρως φορτισμένη τότε η χρήση της εξίσωσης (2.17) καθορίζει το μέγιστο σταθερό ρεύμα για αυτήν την περίοδο στηριζόμενη στις παρατηρήσεις της (2.4), καθώς το γινόμενο ρεύματος και χρόνου δίνει το φορτίο που μπορεί να αποδοθεί από την αποθηκευτική διάταξη.

$$I_{disc}^{MAX} = (I, \Delta t) \cdot \Delta t = a \cdot \ln(\Delta t) + b \quad (2.17)$$

Όμως, τις περισσότερες φορές κατά τις οποίες θα απαιτηθεί υψηλή τιμή ρεύματος, η αποθηκευτική διάταξη δεν θα είναι πλήρως φορτισμένη. Αν π.ρ περιέχει το 50% της χωρητικότητάς της, τότε αν την εκφορτίσουμε με ρεύμα το οποίο σε 2 ώρες θα εξαντλούσε τη χωρητικότητα της πλήρους φορτισμένης μπαταρίας, σε μία ώρα αυτή θα έχει εκφορτιστεί, όπως παρατηρήθηκε στην περιγραφή της (2.10). Επομένως το ρεύμα I το οποίο μπορεί να εξαντλήσει τη χωρητικότητα της μπαταρίας σε χρόνο Δt Δί /NSOC(t) είναι το μέγιστο το οποίο μπορούμε να ζητήσουμε από μία μπαταρία. Ο υπολογισμός του γίνεται με τη βοήθεια της (2.4) όπως παρουσιάζει η (2.18).

$$I_{disc}^{MAX}(I, \Delta t) = \frac{a \cdot \ln\left(\frac{\Delta t}{NSOC(t)}\right) + b}{\frac{\Delta t}{NSOC(t)}} \quad (2.18)$$

Εύκολα μετά από τον υπολογισμό αυτό του ρεύματος μπορούμε να υπολογίσουμε μετά την μέγιστη ισχύ που η μπαταρία μπορεί να μας προσφέρει για το χρονικό αυτό διάστημα.

Με την ίδια φιλοσοφία για την εκφόρτιση, μας ενδιαφέρει το διαθέσιμο περιθώριο για τη φόρτιση, όπως αυτό εκφράζεται με τη βοήθεια της (2.16). Το αντίστοιχο μέγιστο ρεύμα φόρτισης θα δίνεται από την (2.19), σύμφωνα με την (2.4). Σε αυτήν την περίπτωση η ποσότητα του παρονομαστή είναι $1 - SOC(t)$.

$$I_{disc}^{MAX}(SOC(t), \Delta t) = \frac{a \cdot \ln\left(\frac{\Delta t}{1 - SOC(t)}\right) + b}{\frac{\Delta t}{1 - SOC(t)}} \quad (2.19)$$

Για το χρονικό διάστημα Δt για το οποίο ενδιαφερόμαστε υπάρχουν δύο ενδεχόμενα. Το πρώτο είναι να είναι μικρότερο από εκείνο για το οποίο έχουμε δεδομένα για το ρεύμα που μπορεί να παρέχει η αποθηκευτική διάταξη. Σε μία τέτοια περίπτωση το μέγιστο ρεύμα της πλήρως φορτισμένης μπαταρίας, θα θεωρείται εκείνο που θα αντιστοιχεί στο μικρότερο χρονικό διάστημα για το οποίο έχουμε κάποια πληροφορία. Για παράδειγμα αν γνωρίζουμε το ρεύμα για διάστημα 10 λεπτών και το ζητούμενο διάστημα είναι 5 λεπτά θα χρησιμοποιούμε το ρεύμα που αντιστοιχεί στα 10 λεπτά ώστε να είμαστε στην ασφαλή πλευρά των υποθέσεων μας. Αν το απαιτούμενο χρονικό διάστημα είναι μεγαλύτερο από εκείνο στο οποίο έχουμε κάποια πληροφορία για τη μέγιστη ισχύ της μπαταρίας, τότε θα χρησιμοποιηθούν οι παραπάνω εξισώσεις (2.17) ως (2.19).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΥΠΕΡΑΓΩΓΗΜΑ ΠΗΝΙΑ(Superconducting Magnetic Energy Storage systems, SMES)

Παρά το γεγονός ότι η υπεραγωγιμότητα ανακαλύφθηκε το 1911, μόλις το 1970 τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με υπεραγωγιμα πηνία (Superconducting Magnetic Energy Storage systems, SMES) προτάθηκαν για την αποθήκευση της ενέργειας. Τα SMES έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της ηλεκτρικής βιομηχανίας λόγω της υψηλής απόκρισης (της τάξης των millisecc) και απόδοσής τους (έως και 97%). Η διάρκεια ζωής τους από την άλλη είναι ανεξάρτητη του αριθμού φορτίσεων-εκφορτίσεων. Ορισμένες από τις εφαρμογές των SMES συστημάτων περιλαμβάνουν: αντιστάθμιση φορτίου, σταθεροποίηση τάσης, ρύθμιση συχνότητας, βελτίωση ικανότητας μεταφοράς, με σημαντικότερη αυτή της βελτίωσης ποιότητας ισχύος. Για να είναι συμφέρουσα η ανάπτυξη ενός SMES συστήματος, πρέπει αυτό να διαχειρίζεται μεγάλα ποσά ενέργειας σε πολύ μικρές περιόδους και να συνδυάζει πολλές εφαρμογές ταυτόχρονα.

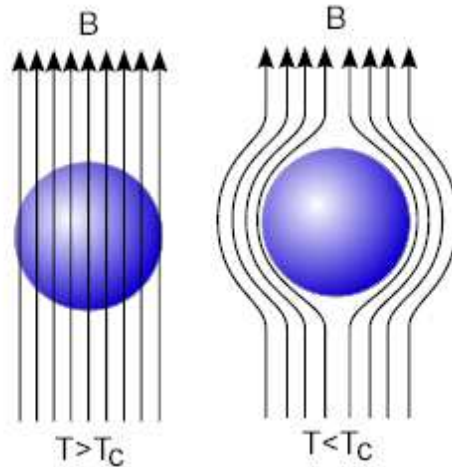
3.1.Εισαγωγή - ορισμοί

Πριν ξεκινήσουμε το κεφάλαιο της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με υπεραγωγιμα πηνία, θα ήταν καλό να δώσουμε τους ορισμούς και τα βασικά χαρακτηριστικά των επιμέρους εννοιών που θα χρησιμοποιήσουμε.

Υπεραγωγιμότητα: είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει σε συγκεκριμένα υλικά, κατά το οποίο τα υλικά αυτά υπό την επίδραση πολύ χαμηλών θερμοκρασιών μηδενίζουν την ωμική τους αντίσταση και παρουσιάζουν το φαινόμενο Meissner.

Η θερμοκρασία που εμφανίζεται το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητα ονομάζεται κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητα T_c .

Κατά το φαινόμενο Meissner, το μαγνητικό πεδίο δεν διαπερνά το υλικό (πράγμα που συμβαίνει πριν τη θερμοκρασία T_c). Συμπεριφέρεται το υλικό δηλαδή τελείως διαμαγνητικά.



Σχ.8 Συμπεριφορά υλικού πριν και μετά την κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας

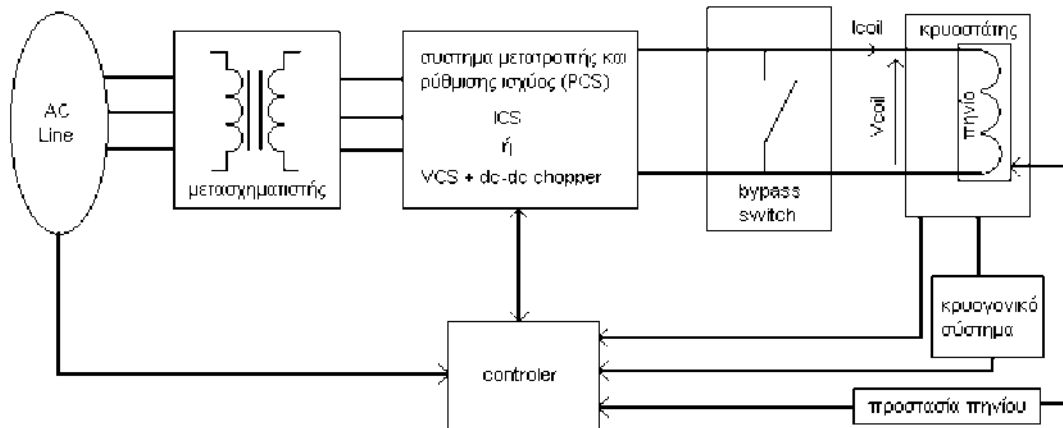
Γενικά, η ωμική αντίσταση ενός μεταλλικού αγωγού μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Σε συνηθισμένους αγωγούς όπως ο χαλκός ή το ασήμι, οι προσμίξεις και λοιπές ατέλειες καθορίζουν ένα κατώτατο όριο αντίστασης. Το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας είναι ένα φαινόμενο που μελετάει η κβαντική μηχανική και δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν μια 'τέλεια αγωγιμότητα' που ορίζει η κλασσική φυσική. Η υπεραγωγιμότητα μπορεί να εμφανιστεί σε απλά υλικά όπως ο κασσίτερος ή το αλουμίνιο καθώς και σε κράματα ή ορισμένους ημιαγωγούς βαθιάς νόθευσης. Δεν εμφανίζεται σε ευγενή μέταλλα όπως ο χρυσός κ.α.

3.2. Γενική περιγραφή του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με υπεραγώγιμα πηνία

3.2.1. Βασική λειτουργία και δομή ενός τυπικού SMES συστήματος

Η βασική ιδέα ενός SMES συστήματος είναι η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή μαγνητικού πεδίου, το οποίο δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο, το οποίο έχει ψυχθεί σε μια θερμοκρασία κάτω από την υπεραγώγιμη κρίσιμη θερμοκρασία του. Εάν το πηνίο αποτελούταν από απλό σύρμα, τότε η ενέργεια θα χανόταν υπό τη μορφή θερμικών απωλειών λόγω της ωμικής αντίστασης του σύρματος. Τώρα που το πηνίο αποτελείται από υπεραγώγιμο σύρμα, δεν υπάρχουν ωμικές απώλειες (θερμότητας) και η ενέργεια αποθηκεύεται μόνιμα υπό

μορφή μαγνητικού πεδίου, μέχρι αυτή να ζητηθεί. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ενός τυπικού SMES συστήματος.



Σχ.9 Γενικό διάγραμμα SMES συστήματος

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, ένα τυπικό SMES σύστημα αποτελείται από αρκετά υποσυστήματα. Το υπεραγώγιμο πηνίο είναι η καρδιά του συστήματος. Βρίσκεται μέσα σε έναν κρυοστάτη, ο οποίος με τη βοήθεια ενός ψύκτη στο κρυογονικό σύστημα βοηθάει το πηνίο στο να συντηρεί τη θερμοκρασία του στην κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγιμότητας. Και αυτό γιατί σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος το πηνίο πρέπει να διατηρείται σε υπεραγώγιμη κατάσταση.

Ένα δεύτερο ζωτικής σημασίας σύστημα είναι το σύστημα μετατροπής και ρύθμισης ισχύος (Power Conversion/Conditioning System, PCS), το οποίο εξυπηρετεί βασικά δυο σκοπούς: ο πρώτος είναι η μετατροπή της ηλ. ενέργειας από dc σε ac μορφή και ο δεύτερος είναι για την φόρτιση και εκφόρτιση του πηνίου. Υπάρχει επίσης ένας μετασχηματιστής ο οποίος παρέχει τη σύνδεση με το δίκτυο και μειώνει την τάση λειτουργίας στα επίπεδα του PCS.

Για ένα τυπικό SMES σύστημα, η μαγνητική ενέργεια που αποθηκεύεται και η ονομαστική ισχύς είναι τα πιο κοινά χαρακτηριστικά του και δίνονται από τις σχέσεις:

$$E = \frac{1}{2} L I_{coil}^2 \quad \text{και} \quad P = \frac{dE}{dt} = V_{coil} I_{coil} \quad (3.1)$$

Όπου: E = αποθηκευόμενη ενέργεια σε (Joules)

P = ισχύς (Watt)

L = αυτεπαγωγή πηνίου (Henry)

I_{coil} = dc ρεύμα πηνίου (Ampere)

V_{coil} = dc τάση στους ακροδέκτες του πηνίου (Volt)

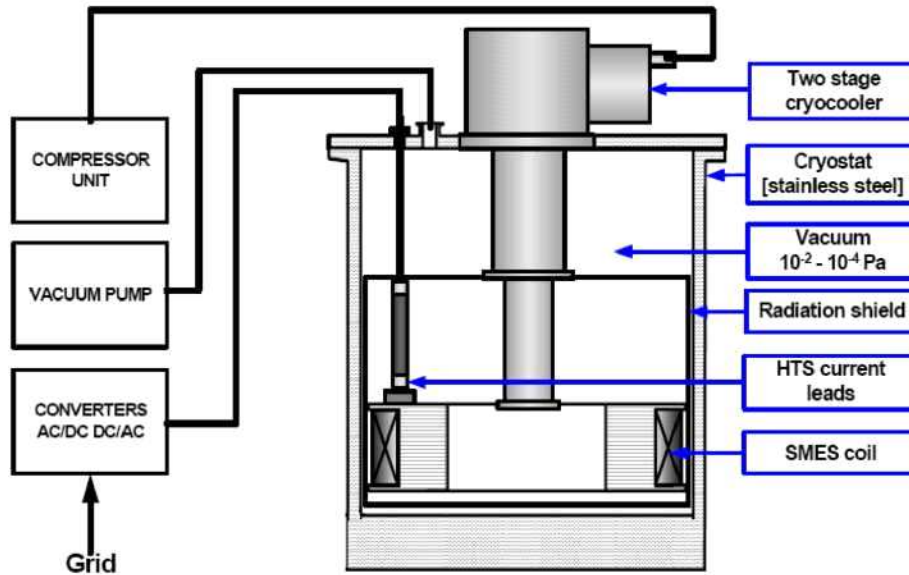
Το PCS σύστημα παρέχει στην ουσία την ηλεκτρονική διεπαφή μεταξύ του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και του υπεραγωγίμου πηνίου. Επιτρέπει στο SMES σύστημα να αποκρίνεται μέσα σε *millisec* στις απαιτήσεις ενέργειας. Η ταχεία αυτή απόκριση στις απαιτήσεις ενέργειας κάνουν τα SMES συστήματα περισσότερο χρήσιμα στη βελτίωση της σταθερότητας του ηλ. συστήματος παρά στην καθεαυτού χρήση τους για αποθήκευση ηλ. ενέργειας. Για τον περιορισμό των αρμονικών στην τάση στα άκρα του πηνίου δεν χρησιμοποιούνται απλοί μετατροπείς, αλλά μετατροπής υψηλής συχνότητας (IGBT). Υπάρχουν δυο τύποι συστημάτων ρύθμισης ισχύος: είναι τα PCS με μετατροπέα πηγής ρεύματος (Current Source Converter, CSC) για την επικοινωνία του SMES με το ac σύστημα και την φόρτιση και εκφόρτιση του πηνίου, και τα PCS με μετατροπέα πηγής τάσης (Voltage Source Converter, VSC) και dc-dc chopper. Ο VSC φροντίζει για την επικοινωνία του SMES με το ac σύστημα και ο dc-dc chopper για την φόρτιση και εκφόρτιση του πηνίου.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης-εκφόρτισης, αναπτύσσονται στους ακροδέκτες του πηνίου μεταβατικά φαινόμενα όπως κυματισμοί τάσης λόγω του chopper.

Υπάρχει τέλος ένας διακόπτης παράκαμψης (bypass switch) που χρησιμοποιείται αφενός για να μειωθούν οι απώλειες ηλ. ενέργειας όταν το πηνίο είναι σε κατάσταση αναμονής και αφετέρου για να προστατεύεται το πηνίο όταν χαθεί η ψύξη.

Οι λειτουργίες φόρτισης-εκφόρτισης επιτυγχάνονται εφαρμόζοντας μια θετική ή αρνητική τάση κατά μήκος του πηνίου. Η λειτουργία της αναμονής επιτυγχάνεται όταν η τιμή της V_{coil} γίνει ίση με μηδέν (το οποίο συνεπάγει ένα σταθερό ρεύμα στο πηνίο).

Το κόστος του PCS είναι σχεδόν όσο το κόστος του SMES συστήματος ολόκληρου και μελέτες έχουν δείξει ότι τα μικρά SMES (< 0,1 MWh) ή μεσαίου μεγέθους (0,1 - 100 MWh) είναι πιο οικονομικά για τη μεταφορά και διανομή της ηλ. ενέργειας. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε ένα γενικό διάγραμμα του συστήματος ψύξης πηνίου ενός SMES συστήματος.



Σχ.10 Γενικό διάγραμμα συστήματος ψύξης πηνίου SMES

3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν το σχεδιασμό του πηνίου

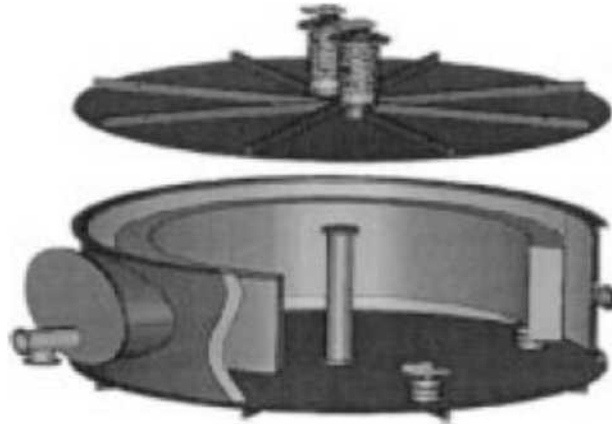
Αρκετοί παράγοντες λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του πηνίου, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση του SMES συστήματος. Η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας, η θερμοκρασία λειτουργία του, ο λόγος ενέργειας-μάζας, η ελάττωση των απωλειών, οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις Lorentz καθώς και άλλοι παράγοντες, λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό του πηνίου, προκειμένου να επιτευχθεί οικονομική, σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία του SMES συστήματος. Όσον αφορά το σχήμα του πηνίου, δυο διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Είναι τα σωληνοειδή και τα τοροειδή πηνία. Τα σωληνοειδή πηνία χρησιμοποιούνται κυρίως λόγω της απλούστερης κατασκευής τους και των οικονομικών ωφελειών που παρέχουν, ενώ τα τοροειδή χρησιμοποιούνται πιο πολύ σε μικρότερες εφαρμογές. Λόγο του υψηλού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου των σωληνοειδών πηνίων, απαιτείται αυτά να βρίσκονται περίπου 100 πόδια μακριά από οποιοδήποτε εξοπλισμό υποσταθμού, ενώ για αστικές εγκαταστάσεις όπου ο χώρος είναι περιορισμένος απαιτούνται πιο ακριβή σωληνοειδή πηνία με μικρότερο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Εκτός από τις φυσικές ιδιότητες του σύρματος που είναι κατασκευασμένο το πηνίο, η επιλογή του σχήματός του εκτός από της ηλεκτρικής, παίζει σημαντικό ρόλο και από μηχανικής πλευράς. Τρεις παράγοντες επηρεάζουν το σχήμα του πηνίου από μηχανικής

πλευράς. Είναι η αντοχή στις εξωτερικές μηχανικές καταπονήσεις, η θερμική συστολή κατά τη διάρκεια της ψύξης και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις Lorentz όταν αυτό διαρρέετε από ρεύμα. Εκτός των άλλων, η ανοχή στις καταπονήσεις είναι πολύ κρίσιμη γιατί καθορίζει πόσο μεγάλη πρέπει να είναι η δομική κατασκευή που θα υποστηρίξει το πηνίο, προκειμένου να αντέχει τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις Lorentz. Η τοροειδής γεωμετρία μπορεί να ελαττώσει τις μαγνητικές δυνάμεις και άρα το μέγεθος της υποστηρικτικής κατασκευής. Επίσης λόγω του μικρού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου τους, τα τοροειδή SMES μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο φορτίο. Στα μεγάλα SMES, η διάμετρος του πηνίου μπορεί να φτάσει τα 100m και η εγκατάστασή τους γίνεται μέσα στην γη.

Όταν η αποθηκευμένη ενέργεια για ένα σύστημα αυξάνει κατά ένα παράγοντα 100, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται για την λειτουργία του συστήματος ψύξης αυξάνεται κατά έναν παράγοντα 20. Από πλευράς θερμοκρασίας λειτουργίας, τα πηνία χωρίζονται σε χαμηλής θερμοκρασίας (Low Temperature Superconductors, LTS) και υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Superconductors, HTS). Τα SMES με υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγούς, εξοικονομούν κόστος σε ψύξη κατά ένα παράγοντα 60-70% μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα συστήματα με χαμηλής θερμοκρασίας υπεραγωγούς. Το πρόβλημα των υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγών είναι ότι τα υλικά τους είναι ορισμένα ευαίσθητα κεραμικά και συνεπώς καθιστούν δύσκολη τη κατασκευή τους. Επιπλέον, η πυκνότητα ρεύματος στους HTS είναι μικρότερη από αυτή των LTS. Η ανάπτυξη των υπεραγωγίμων υλικών παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στο κεφάλαιο των SMES συστημάτων, μιας και μπορούν να περιορίσουν τη χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος και να ελαττώσουν έτσι το συνολικό κόστος κατασκευής ολόκληρου του SMES συστήματος. Μερικά πρότυπα HTS συστήματα λειτουργούν σε θερμοκρασία 30-70°K και βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο, ενώ LTS συστήματα, που είναι και αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα, λειτουργούν σε θερμοκρασία περίπου 4,2oK. Όσο χαμηλότερη είναι θερμοκρασία του υπεραγωγού, τόσο υψηλότερο είναι το ρεύμα λειτουργίας του. Οι κλίμακες ισχύος και ενέργειας στην οποία κατασκευάζονται τα πηνία για εφαρμογές των SMES στη χρησιμοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας, κυμαίνονται από 50 έως 200MW και από 50 έως 3000MJ. Σχεδιάζονται για να λειτουργούν με υψηλό ρεύμα (κυμαίνεται από 4 έως 50KA), αλλά με χαμηλή τάση (< 8KV). Προκειμένου όμως να μειωθεί το κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος του PCS συστήματος, κατασκευάζουμε τα πηνία να λειτουργούν σε υψηλότερη

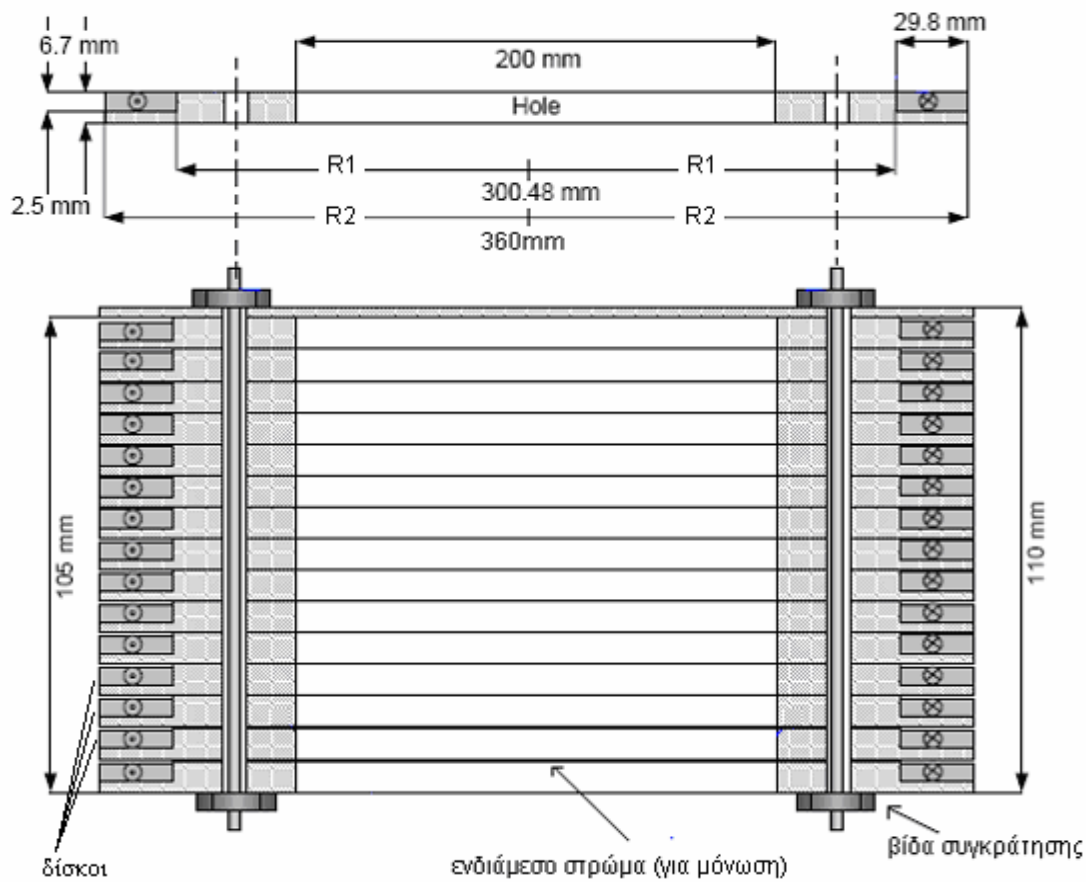
τάση της τάξης των 13 με 24KV. Μολονότι το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα η τάση στα άκρα του πηνίου είναι αμελητέα, κατά τη διάρκεια ανταλλαγής ισχύος με το ac σύστημα, αυτή ενδέχεται να φτάσει στιγμιαία την προαναφερθείσα ονομαστική της τιμή.



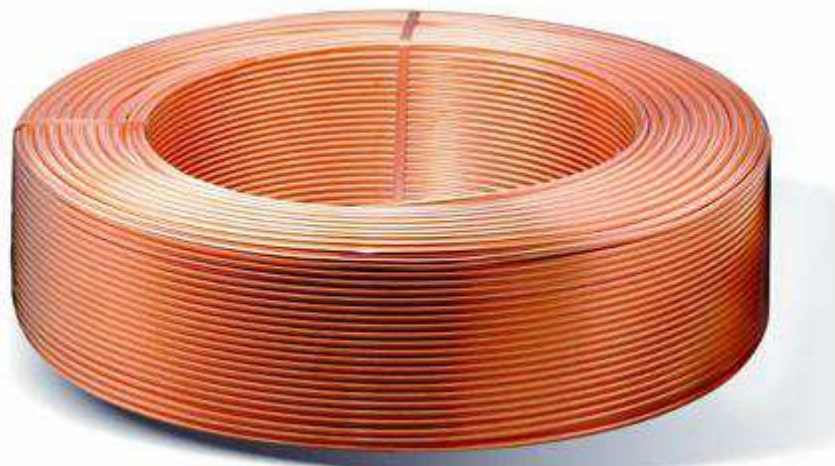
Σχ.11 Παράδειγμα σωληνοειδούς πηνίου για χρήση σε SMES σύστημα

3.4. Κατασκευή του πηνίου

Στην παράγραφο αυτή θα δούμε τη βασική δομή ενός πραγματικού πηνίου, προκειμένου να μας γίνουν αντιληπτά τα επιμέρους τμήματά του. Θεωρούμε αρχικά ότι το πηνίο αποτελείται από ένα πλήθος δίσκων όπου κάθε δίσκος αποτελείται από ένα άλλο πλήθος στρώσεων και κάθε στρώση αποτελείται από έναν αριθμό σπειρών. Κάθε στρώση έχει μια εξωτερική ακτίνα R_2 και μια εσωτερική ακτίνα R_1 και αναφέρεται ως πηνίο τύπου 'πίτα' (pancake coil). Στο επόμενο σχήμα 9(α) βλέπουμε ένα πραγματικό πηνίο ενώ στα 9(β) και 9(γ) βλέπουμε τα επιμέρους τμήματά του. Να σημειώσουμε ότι οι τάσεις μεταξύ γειτονικών σπειρών και γειτονικών στρώσεων είναι πολύ μικρές μεταξύ των τάσεων του πηνίου και της γης. Η επιλογή της μόνωσης των γειτονικών σπειρών και των στρώσεων μεταξύ τους καθορίζεται από θερμικούς και μηχανικούς παράγοντες.



α) (οι διαστάσεις αφορούν το 11ο πηνίο του πίνακα 3 της επόμενης παραγράφου)



β) πραγματικός δίσκος με πολλές στρώσεις



(γ) μεμονωμένες στρώσεις δίσκου (pancake coils) με πολλές σπείρες
Σχ.12 Σχέδιο υπεραγωγίμου πηνίου με τα επιμέρους τμήματα

3.5. Σχεδιασμός και σύγκριση υπεραγωγίμων πηνίων για SMES συστήματα

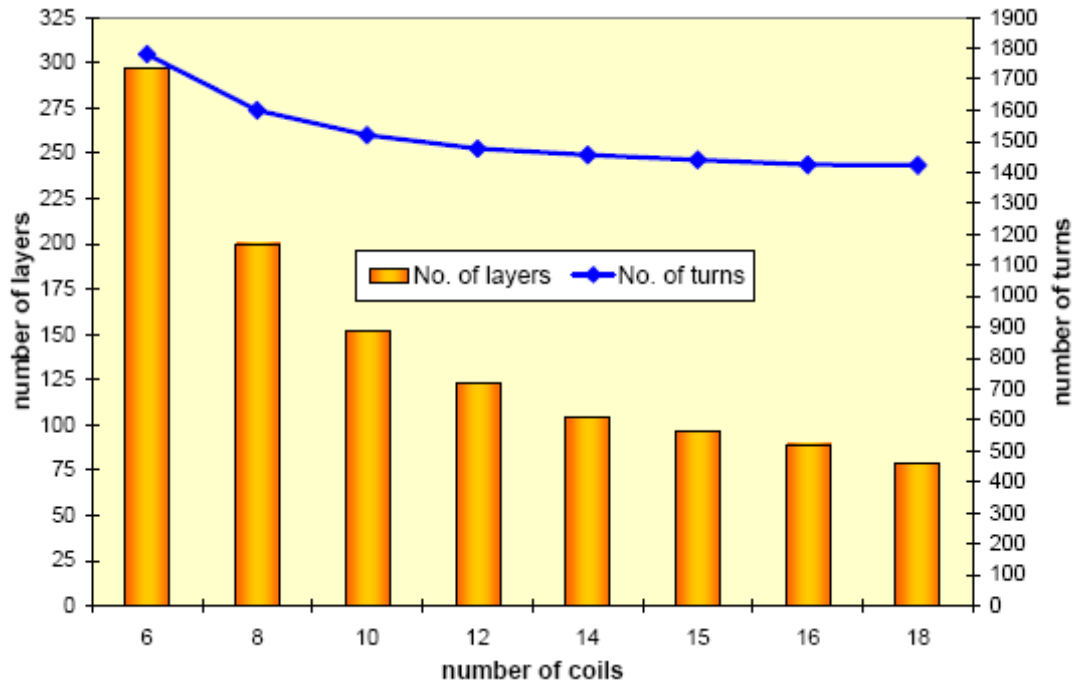
Ένα ερευνητικό πρόγραμμα που εστιάζει στη κατασκευή του πηνίου για ένα πραγματικό SMES σύστημα, πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υπεραγωγίμης Τεχνολογίας. Για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίησή του χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή FLUX 2D για υπολογιστή. Αρχικά κατασκευάστηκε ένα μαθηματικό μοντέλο του πηνίου. Αλλάζοντας τις αρχικές μηχανικές και ηλεκτρικές παραμέτρους του ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, δεκάδες αποτελέσματα υπεραγωγίμων πηνίων παρήχθησαν από τον υπολογιστή. Στο παρακάτω πίνακα, φαίνονται συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά μερικών από των πηνίων που προέκυψαν.

Οι τιμές του ρεύματος λειτουργίας και της αποθηκευόμενης ενέργειας δίνονται στη θερμοκρασία λειτουργίας του υπεραγωγού. Ο πίνακας δείχνει τα χαρακτηριστικά για πηνία με και χωρίς ενδιάμεσο στρώμα ανάμεσα στους δίσκους τους. Το ενδιάμεσο αυτό στρώμα έχει σαν συνέπεια να αυξάνεται το ολικό ύψος του πηνίου (με γκρι φόντο είναι τα πηνία με μεσαίο στρώμα), αλλά παρέχεται μεγαλύτερη μόνωση ανάμεσα στους δίσκους. Σαν βασική αρχή στο σχεδιασμό του πηνίου αποτελεί η αποθήκευση της μέγιστης ποσότητας ενέργειας με τις ελάχιστες δυνατές διαστάσεις του πηνίου.

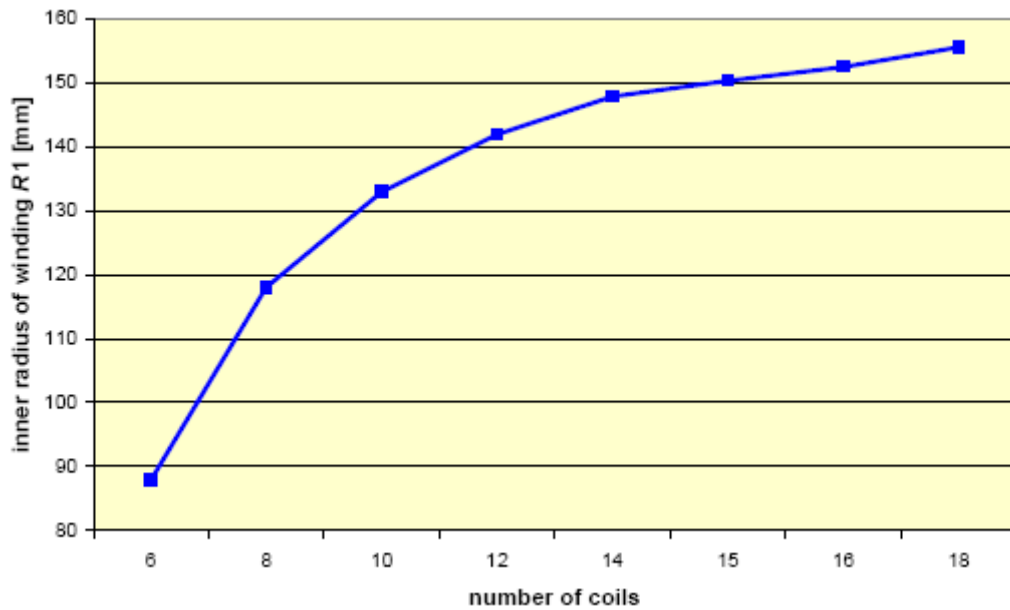
ΠΙΝΑΚΑΣ 3											
No. Coils	No. Layers	No. Turns	R_1	R_2	h	L	$B_{(100 A)}$	$I_{(35 K)}$	$E_{(35 K)}$	$I_{(50 K)}$	$E_{(50 K)}$
			mm	mm	mm	H	T	A	J	A	J
6	297	1782	87.93	180	40.2	0.782717	1.55	122.8669	5908.055	61.7284	1491.230
6	297	1782	87.93	180	25.2	0.859624	1.81	116.6559	5849.136	58.00464	1446.119
8	200	1600	118	180	53.6	0.811486	1.36	127.8409	6631.179	64.76684	1701.988
8	200	1600	118	180	33.6	0.905538	1.62	121.1306	6643.303	60.67961	1667.102
10	152	1520	132.88	180	67	0.801842	1.25	130.9091	6870.659	66.66667	1781.871
10	152	1520	132.88	180	42	0.909265	1.56	122.6158	6835.234	61.57635	1723.806
12	123	1476	141.87	180	80.4	0.781342	1.21	132.0616	6813.409	67.38544	1773.958
12	123	1476	141.87	180	50.4	0.900065	1.45	125.4355	7080.845	63.29114	1802.726
14	104	1456	147.76	180	93.8	0.764142	0.99	138.7818	7358.836	71.63324	1960.529
14	104	1456	147.76	180	58.8	0.892353	1.36	127.8409	7291.996	64.76684	1871.596
15	96	1440	150.24	180	100.5	0.747185	0.95	140.0778	7330.556	72.46377	1961.733
15	96	1440	150.24	180	63.0	0.881627	1.31	129.2175	7360.336	65.61680	1897.951
16	89	1424	152.41	180	107.2	0.727296	0.9	141.7323	7304.976	73.52941	1966.09
18	79	1422	155.51	180	120.6	0.712981	0.86	143.0843	7298.468	74.40476	1973.556

{σημ. η πρώτη στήλη αφορά τον αριθμό των δίσκων που αποτελείται ολόκληρο το πηνίο. Η δεύτερη στήλη αφορά τον αριθμό των στρώσεων (pancake coils) που αποτελείται κάθε δίσκος. Η τρίτη στήλη δεν δείχνει τον αριθμό σπειρών της κάθε στρώσης γιατί κάθε στρώση εδώ είναι μία μόνο σπείρα. Η τρίτη στήλη δείχνει τον ολικό αριθμό σπειρών του πηνίου (πράγματι, για το πρώτο πηνίο: 6 δίσκοι x 297 στρώσεις ανά δίσκο = 1782 στρώσεις x 1 σπείρα ανά στρώση = 1782 σπείρες)}

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης του προηγούμενου πίνακα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



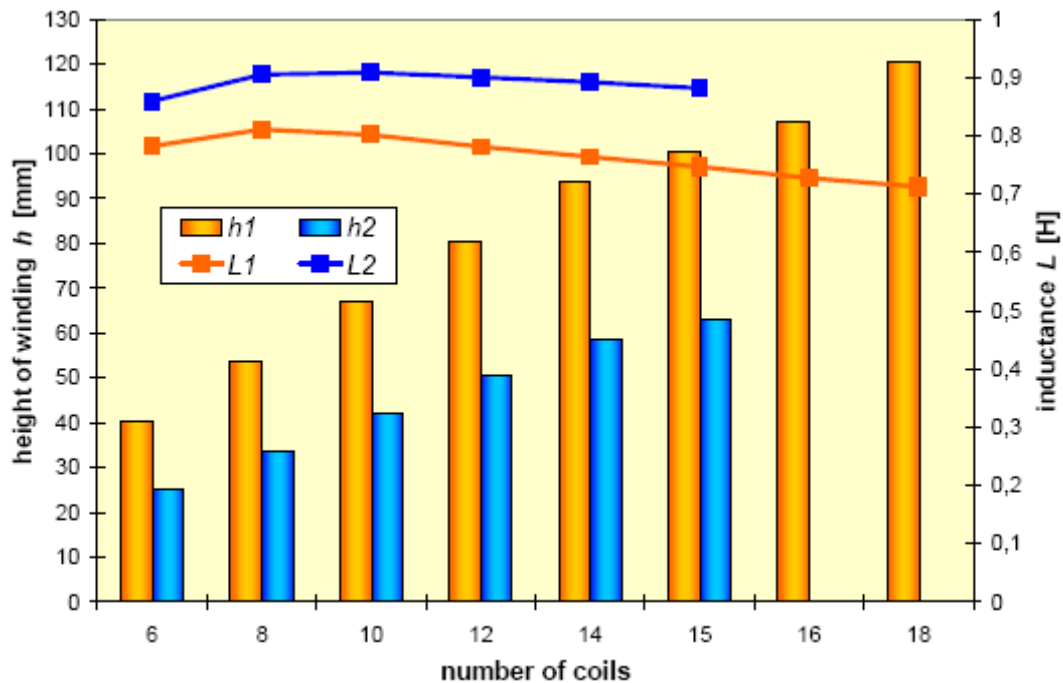
Σχ.13 Αριθμός στρώσεων συναρτήσει του αριθμού σπειρών SMES πηνίου



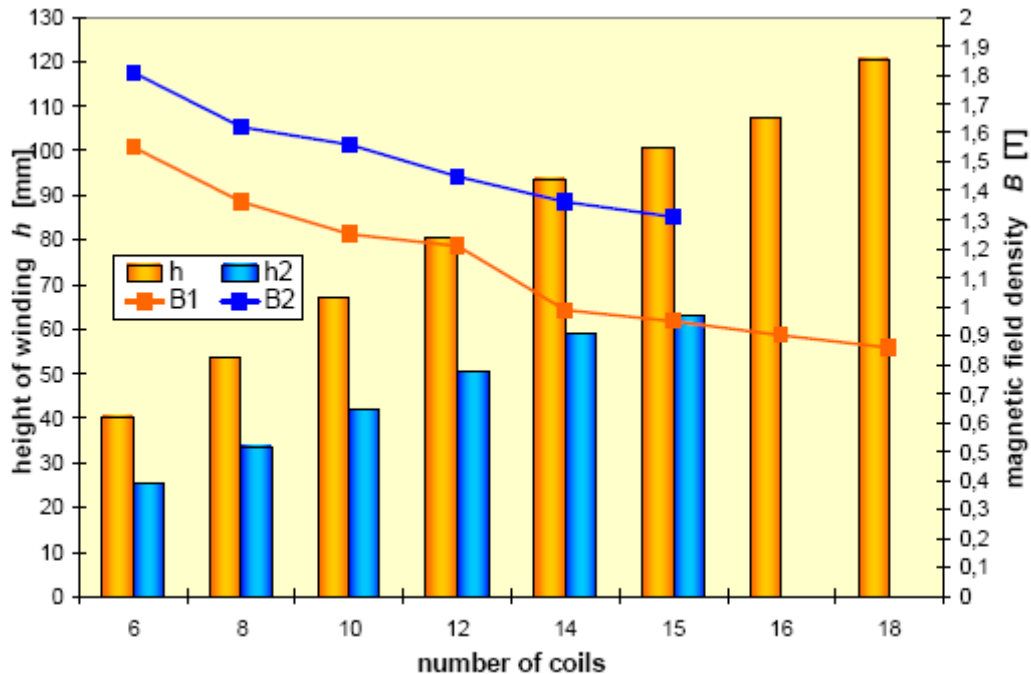
Σχ. 14 Εσωτερική διάμετρος ακτίνας τυλίγματος συναρτήσει του αριθμού των δίσκων του SMES πηνίου

Στο σχήμα 13 βλέπουμε τον αριθμό των στρώσεων και τον αριθμό των σπειρών του

πηνίου σε σχέση με τον αριθμό των δίσκων που αποτελείται. Παρατηρούμε ότι από όσο πιο πολλούς δίσκους αποτελείται το πηνίο, τόσο λιγότερες στρώσεις και σπείρες χρειάζεται. Στο σχήμα 14 βλέπουμε την εσωτερική ακτίνα του τυλίγματος σε σχέση με τον αριθμό των δίσκων που αποτελείται. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνει ο αριθμός των δίσκων, τόσο αυξάνει και η εσωτερική ακτίνα του τυλίγματος. Αυτό σημαίνει ότι για να έχω μικρές διαστάσεις του πηνίου (μικρή ακτίνα R_1) αυτό πρέπει να αποτελείται από λίγους δίσκους. Αυτό με τη σειρά του όμως συνεπάγει ότι για να πετύχω την ίδια επαγωγή θα χρειαστώ περισσότερες στρώσεις, δηλαδή πιο ψηλό πηνίο.

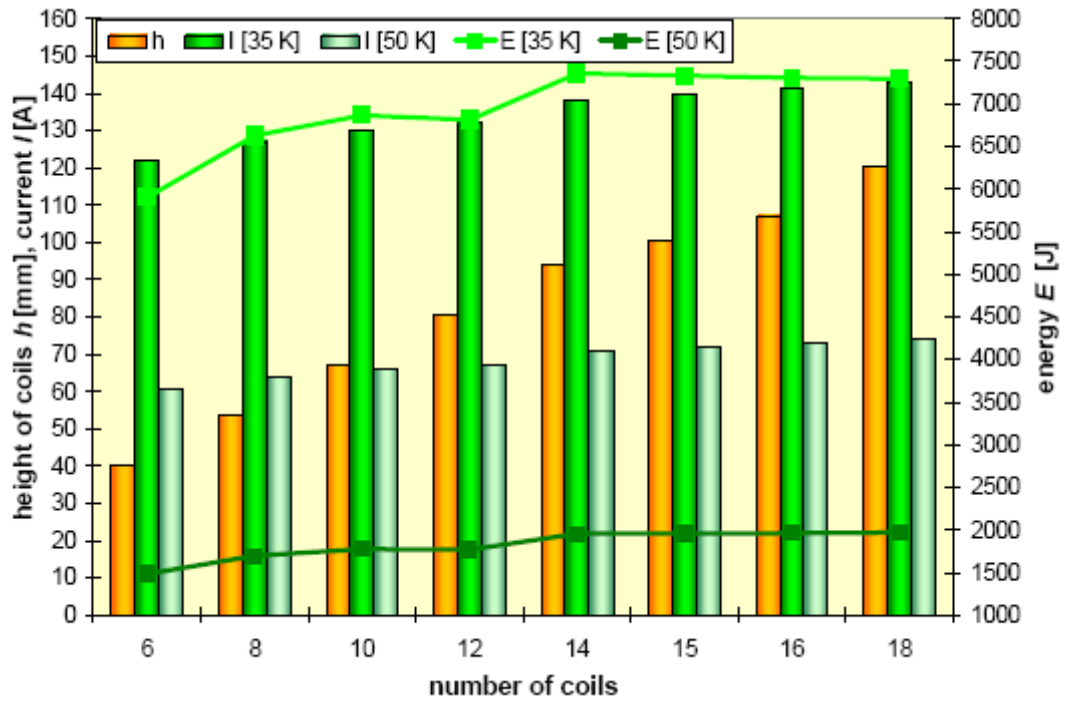


Σχ.15 Σχέση της αυτεπαγωγής L συναρτήσει του αριθμού των δίσκων του SMES πηνίου



Σχ. 16 Σχέση της μαγνητικής επαγωγής B συναρτήσει του αριθμού των δίσκων του SMES πηνίου

Στα σχήματα 15 και 16 βλέπουμε την σχέση της αυτεπαγωγής L και της μαγνητικής επαγωγής B σε σχέση με τον αριθμό των δίσκων του πηνίου και το ολικό του ύψος. Από τα σχήματα αυτά, προκύπτει ότι η αύξηση του αριθμού των δίσκων, που συνεπάγει αύξηση του ολικού ύψους του πηνίου, ενώ η επαγωγή αυξάνει σταδιακά και μετά μειώνεται, η μαγνητική ροή φθίνει απότομα (τα αποτελέσματα δίνονται με και χωρίς μεσαίο στρώμα). Στο επόμενο σχήμα 14, δίνεται η ενέργεια του πηνίου σε σχέση με τον αριθμό των δίσκων του, το ολικό του ύψος και ρεύμα λειτουργίας του.



Σχ.17 Η ενέργεια του πηνίου σε σχέση με τον αριθμό των δίσκων του, το ολικό του ύψος και ρεύμα λειτουργίας του

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΕΣ ΜΑΖΕΣ - ΣΦΟΝΔΥΛΟΥΣ

4.1. Εισαγωγή

Οι στρεφόμενοι σφόνδυλοι (flywheels) είναι οι γηραιότερες και πιο απλές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, αποθηκεύοντας την ενέργεια σε μια περιστρεφόμενη μάζα (ρότορας), με την ποσότητά της (χωρητικότητα ενέργειας) να εξαρτάται από την μάζα και την ταχύτητα περιστροφής της. Τα συστήματα με στρεφόμενους σφονδύλους (Flywheel Energy Storage Systems, FESS) αποτελούνται στην ουσία από το στρεφόμενο σφόνδυλο (flywheel) και μια ηλεκτρική μηχανή η οποία μπορεί να λειτουργεί ως κινητήρας ή ως γεννήτρια και η οποία είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο ισχύος. Και στα συστήματα αυτά υπάρχει μια ηλεκτρονική διεπαφή (PCS) μεταξύ του σφονδύλου και του ηλεκτρικού δικτύου. Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται υπό μορφή κινητικής ενέργειας στο σφόνδυλο, σε περιόδους όπου η αυτή είναι μεγαλύτερη από το φορτίο. Στην περίπτωση αυτή, η απορροφούμενη ηλεκτρική ενέργεια επιταχύνει τη μηχανή, που στη φάση αυτή λειτουργεί σαν κινητήρας ο οποίος περιστρέφει το σφόνδυλο που είναι συνδεδεμένος στον άξονά του. Η αποθηκευμένη αυτή ενέργεια επιστρέφεται πίσω, σε περιπτώσεις όπου το φορτίο είναι μεγαλύτερο της παραγωγής. Στη περίπτωση αυτή ο σφόνδυλος και άρα η μηχανή που λειτουργεί τώρα σαν γεννήτρια επιβραδύνεται, παρέχοντας ισχύ στο δίκτυο που είναι συνδεδεμένη. Η πρόοδος της έρευνας και τεχνολογίας στην επιστήμη των υλικών, θέτει τις βάσεις προκειμένου η μέθοδος αυτή αποθήκευσης να αντικαταστήσει στο μέλλον τα συστήματα με μπαταρίες. Τα συστήματα με flywheels είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν ο λόγος ισχύος προς ενέργειας να είναι από ένα έως δέκα λεπτά, σε αντίθεση με τα συστήματα μπαταριών όπου ο αντίστοιχος λόγος είναι μεγαλύτερος από μια ώρα.

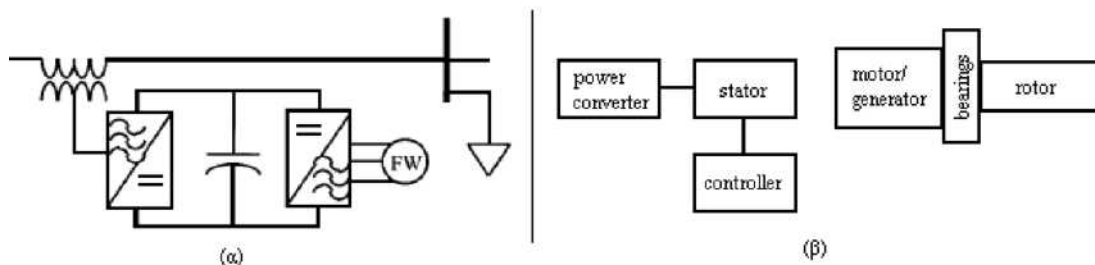
Προκειμένου να βελτιωθεί ο βαθμός απόδοσης τους, τα συστήματα με flywheels λειτουργούν σε κενό αέρος, προκειμένου να μειωθεί η αντίσταση του αέρα. Ειδικά

μαγνητικά ρουλεμάν βοηθάνε στην ομαλότερη περιστροφή του σφονδύλου και ελάττωση των τριβών που παρουσιάζουν τα συμβατικά ρουλεμάν. Σε μερικές περιπτώσεις αντί για κενό αέρος χρησιμοποιείται ήλιο σε πίεση μικρότερη του 1mbar. Ένας ειδικός ελεγκτής, αποτρέπει τη λειτουργία σε ταχύτητες εκτός των ορίων.

Από θέμα κόστους, τα συστήματα flywheels χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Στα συστήματα ενέργειας (energy wheels), όπου κυριαρχεί το κόστος του σφονδύλου και είναι κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο χρόνο εκφόρτισης και στα συστήματα ισχύος (power wheels), όπου κυριαρχεί το κόστος της ηλεκτρικής μηχανής και των ηλεκτρονικών ισχύος και είναι κατάλληλα για εφαρμογές μικρού χρόνου εκφόρτισης. Δυο θεωρήσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη κατασκευή του σφονδύλου είναι:

- α) Ποια είναι η μάζα που θα δημιουργήσει την αναγκαία ροπή αδράνειας, προκειμένου να πετύχουμε την επιθυμητή ποσότητα αποθηκευόμενης ενέργειας
- β) Η γεωμετρία του σφονδύλου πρέπει να ικανοποιεί το γεγονός ότι η απαιτούμενη ροπή αδράνειας παρέχεται από μια διάταξη με τις μικρότερες διαστάσεις και είναι ασφαλής σε περίπτωση σφάλματος στις ταχύτητες λειτουργίας

Στο παρακάτω σχήμα (α) βλέπουμε ένα σύστημα flywheel (FW) να είναι συζευγμένο με ένα δίκτυο ισχύος, ενώ στο (β) βλέπουμε τις δομικές μονάδες του FW.



Σχ.18 Μπλοκ διάγραμμα συστήματος Flywheel

4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα συστημάτων flywheels

Στα πλεονεκτήματα των συστημάτων με στρεφόμενους σφονδύλους συγκαταλέγονται τα παρακάτω:

- Απαιτούν ελάχιστη ή και μηδενική συντήρηση
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (έως και 30 χρόνια) ανάλογα και με την ταχύτητα που λειτουργούν

- Είναι φιλικά με το περιβάλλον μιας και αποτελούνται από αδρανή, μη τοξικά υλικά
- Έχουν σχεδόν απεριόριστο αριθμό κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης
- Μπορούν να αποθηκεύουν και να αποδίδουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε σύντομο χρονικό διάστημα
- Δεν επηρεάζεται η λειτουργία τους από εξωτερικές θερμοκρασίες. Μπορούν να λειτουργήσουν σε περιβάλλον με υψηλή θερμοκρασία, σε αντίθεση με τα συστήματα μπαταριών που λειτουργούν αποδοτικά σε θερμοκρασίες μικρότερες από 40 °C.
- Με μια απλή μέτρηση της ταχύτητας του σφονδύλου, μπορούμε να γνωρίζουμε την ποσότητα της αποθηκευόμενης ενέργειας
- Δεν έχουμε μείωση της ονομαστικής ισχύς με την πάροδο του χρόνου λόγω γήρανσης της συσκευής αποθήκευσης (όπως συμβαίνει για παράδειγμα στις μπαταρίες)

Στα μειονεκτήματα των συστημάτων με στρεφόμενους σφονδύλους συγκαταλέγονται τα παρακάτω:

- Υψηλό κόστος σε σχέση με τα συστήματα μπαταριών
- Τα τρέχων συστήματα flywheels λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα ενέργειας
- Κίνδυνος καταστροφής του σφονδύλου από τις αναπτυσσόμενες φυγόκεντρες δυνάμεις, όταν υπερβεί το σύστημα την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του
- Αυξάνεται το βάρος και ο όγκος του συστήματος, μιας και λόγω του προηγούμενου κινδύνου, απαιτείται ο σφόνδυλος να είναι κλεισμένος σε ειδικά κατασκευασμένο δοχείο, έτσι ώστε σε περίπτωση καταστροφής του τα κομμάτια που θα εκτιναχθούν να μην το τρυπήσουν και προκαλέσουν επιπλέον ζημιές.

4.3. Υπολογισμός της αποθηκευόμενης ενέργειας

Αν θεωρήσουμε ότι σε έναν κύκλο λειτουργίας η γωνιακή ταχύτητα ενός σφονδύλου μεταβάλλεται από ω_{\max} σε ω_{\min} , τότε μπορούμε να ορίσουμε το λόγο της διαφοράς $\Delta\omega$ προς την ονομαστική ταχύτητά του ω ως συντελεστή διακύμανσης ταχύτητας (CF).

$$C_F = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega} \quad (4.1)$$

Ο συντελεστής αυτός είναι μια παράμετρος που μπορεί να καθορίσει ο σχεδιαστής. Όσο πιο μικρός είναι ο συντελεστής αυτός, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο σφόνδυλος και το κόστος του συστήματος. Από την άλλη πλευρά όμως, μικραίνοντας το συντελεστή αυτό, πετυχαίνεται πιο ομαλή λειτουργία του συστήματος, αποφεύγοντας τις μεγάλες διακυμάνσεις ταχύτητας.

Ως μέση ταχύτητα του συστήματος ορίζεται ο λόγος:

$$\omega_{aver} = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2} \quad (4.2)$$

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, η κινητική ενέργεια που αποθηκεύει μια περιστρεφόμενη μάζα δίνεται από τη σχέση:

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (4.3)$$

Η ροπή αδράνειας μιας μάζας είναι συνάρτηση της ίδιας της μάζας και του σχήματός της. Γενικά δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

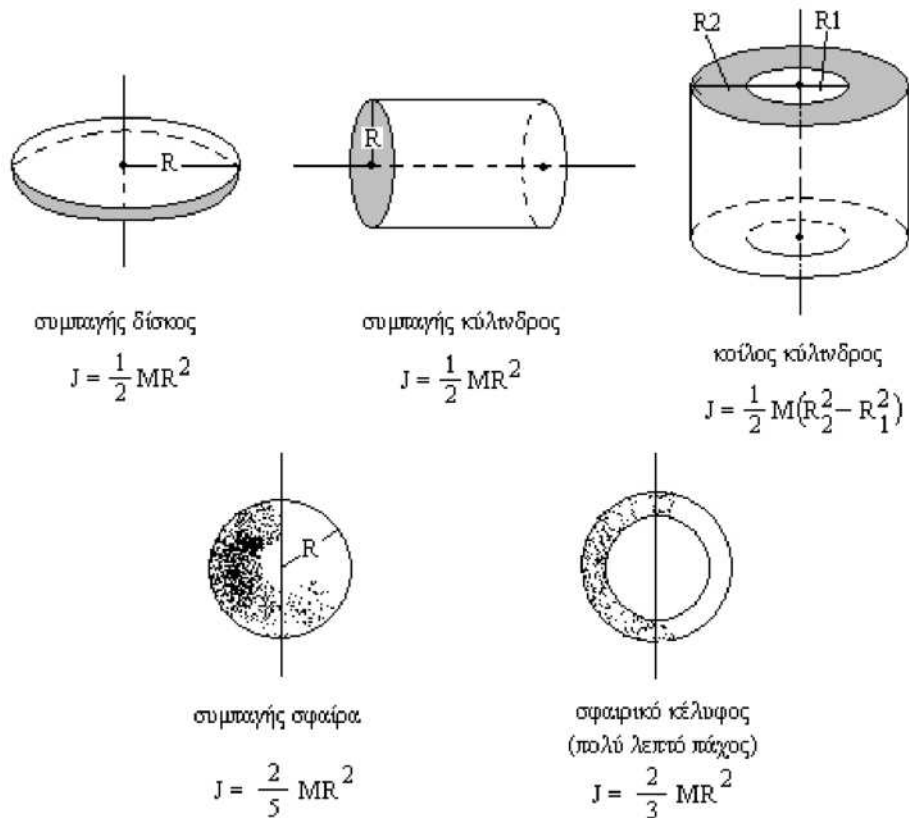
$$J = \int x^2 dm_x \quad (4.4)$$

όπου: x είναι η απόσταση από τον άξονα περιστροφής της στοιχειώδης μάζας dm . Για κυλινδρικές και σφαιρικές μάζες, ακτίνας R η ροπή αδράνειας (ως προς τον άξονα συμμετρίας) έχει την μορφή της (4.5).

$$J = k.M.R^2 \quad (4.5)$$

όπου k είναι σταθερά ανάλογη της γεωμετρίας της μάζας, M είναι η ολική μάζα και R είναι η ακτίνα της σφαίρας ή κυλίνδρου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ροπές αδράνειας βασικών στερεών.



Σχ.19 Ροπές αδράνειας βασικών στερεών

Για έναν κοίλο κύλινδρο μήκους L , εσωτερικής ακτίνας R_1 και εξωτερικής R_2 σε μια τυχαία απόσταση r , όπου $R_1 < r < R_2$, ισχύει από την (4.4) ότι:

$$J = \int r^2 dm \quad (4.6)$$

αλλά:

$$\frac{dm}{M} = \frac{dV}{V} \Rightarrow dm = \frac{M}{V} dV = \frac{M}{\pi (R_2^2 - R_1^2) L} 2\pi r dr L \quad (4.7)$$

και αντικαθιστώντας στην (4.6) έχουμε ότι:

$$J = \frac{1}{2} M (R_2^2 - R_1^2) \quad (4.8)$$

Όταν $R_1 = 0$ και $R_2 = R$ (συμπαγής κύλινδρος) τότε από τη σχέση (4.8) έχουμε ότι:

$$J = \frac{1}{2} MR^2 \quad (4.9)$$

Όταν $R_1 = R_2 = R$ (περίπτωση λεπτού κελύφους) τότε από την (4.4) έχουμε ότι:

$$J = \int r^2 dm = \int R^2 dm = R^2 \int dm = R^2 M \quad (4.10)$$

Τότε από την σχέση (4.3) έχουμε ότι η αποθηκευόμενη ενέργεια στο σφόνδυλο (που στην περίπτωση των flywheels είναι η περίπτωση κυλινδρικού κελύφους) είναι:

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} MR^2 \omega^2 = \frac{1}{2} Mu^2 \quad (4.11)$$

όπου: u είναι η γραμμική ταχύτητα του στροφέα

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

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

$$\sigma_{\max} = \rho^2 R^2 \omega^2 \quad [\text{σε Newton/m}^2] \quad (4.12)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα της μάζας του σφονδύλου.

Αντικαθιστώντας το $R\omega^2$ της (4.11) με σ_{\max}/ρ , βρίσκω ότι η μέγιστη αποθηκευόμενη ενέργεια στο σφόνδυλο είναι:

$$E_{k, \max} = \frac{1}{2} M \frac{\sigma_{\max}}{\rho} \quad (4.13)$$

Από τη σχέση αυτή, βλέπουμε ότι μπορούμε να πετύχουμε μέγιστη αποθηκευόμενη ενέργεια στο σφόνδυλο, όταν αυτός είναι κατασκευασμένος με υλικό με μεγάλο όριο ελαστικότητας και μικρή πυκνότητα.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει ορισμένα υλικά για τη κατασκευή του σφονδύλου καθώς και τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 15			
	Density [kg.m ⁻³]	Strength [MN.m ⁻²]	Theoretical maximum specific energy [Wh.kg ⁻¹]
Steel (AISI 4340)	7800	1800	32
Alloy (AlMnMg)	2700	600	31
Titanium (TiAl6Zr5)	4500	1200	37
GFRP Glass fibre reinforced polymer (60 vol% E-glass)	2000	1600	111
CFRP Carbon fibre reinforced polymer (60 vol% HT Carbon)	1500	2400	222

Η ειδική ενέργεια ανά μονάδα μάζας (E_m) είναι:

$$E_m = \frac{1}{2} R^2 \omega^2 \quad (4.14)$$

Η ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου (ω_{\min}) περιορίζεται κυρίως από τη ροπή της κινούσας μηχανής, μιας και:

$$P = T \cdot \omega \quad (4.15)$$

όπου P είναι η ισχύς της μηχανής και T η ροπή στον άξονά της.

Ωστόσο η ισχύς της μηχανής διατηρείται σταθερή, η ροπή αυξάνει με την μείωση της γωνιακής ταχύτητας. Το όριο στη ροπή και το γεγονός ότι η περισσότερη ενέργεια αποθηκεύεται στις υψηλές συχνότητες, έχουν σαν συνέπεια ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη γωνιακή ταχύτητα (s) να είναι όχι μικρότερος του 0,2. Η χρήσιμη αποθηκευόμενη ενέργεια τότε είναι:

$$E_k = E_{k,max}(1-s^2) \quad (4.16)$$

Όταν $s = 1/3$ η αποθηκευόμενη ενέργεια είναι το 90% της μέγιστης

Δυο στρατηγικές ακολουθούνται για τη κατασκευή flywheels σε πραγματικά συστήματα ισχύος. Η πρώτη, αφορά την αύξηση της ροπής αδράνειας του σφονδύλου, κατασκευάζοντας τη μάζα (ρότορα) από ατσάλι με μεγάλη ακτίνα και πετυχαίνοντας ταχύτητες περιστροφής κοντά στις 10000rpm. Ένας σχετικά κοινός κινητήρας και απλά ηλεκτρονικά ισχύος αποτελούν το σύστημα μετατροπής ισχύος. Συστήματα flywheel αυτής της κατηγορίας έχουν κατασκευαστεί πολλά και λειτουργούν σαν αδιάλειπτοι παροχείς ισχύος για εμπορικούς σκοπούς. Ο σχεδιασμός αυτός οδηγεί σε σχετικά μεγάλα και βαριά συστήματα. Απώλειες ενέργειας κατά τη περιστροφική κίνηση περιορίζουν την ικανότητα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Η δεύτερη κατηγορία συστημάτων flywheel περιλαμβάνει σφονδύλους από ελαφρύτερα υλικά, ικανά να αναπτύσσουν ταχύτητες περιστροφής της τάξης των 100.000rpm. Η κατηγορία αυτή, μπορεί να αντικαταστήσει ένα σύστημα flywheel που αποτελείται από λίγες ογκώδεις μονάδες με ένα σύστημα από πολλές μικρότερες, επιτρέποντας έτσι αρθρωτό σχεδιασμό. Η κατηγορία αυτή περιορίζει την αντίσταση του αέρα (λειτουργία σε κενό αέρος) και τις τριβές με τα ρουλεμάν (χρήση μαγνητικών ρουλεμάν), παράγοντες που οδηγούσαν στην αυτόεκφόρτιση του σφονδύλου. Σαν συνέπεια, η κατηγορία αυτή των συστημάτων είναι κατάλληλη για εφαρμογές μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια πολλές έρευνες στοχεύουν στην κατασκευή υπεραγωγίμων μαγνητικών ρουλεμάν για εφαρμογές σε τέτοια συστήματα. Όσο περισσότερο εξαλείφονται οι απώλειες περιστροφής, τόσο αυξάνεται η ικανότητα φόρτισης - εκφόρτισης. Το επίπεδο μέγιστης μεταφερόμενη ισχύς, καθορίζεται από τον μετατροπέα και την ηλεκτρική μηχανή.

4.4. Χαρακτηριστικά συστημάτων flywheels

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός συστήματος στρεφόμενων σφονδύλων είναι:

- Η dc τάση λειτουργίας του συστήματος μετατροπής ισχύος (PCS)
- Η μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου (σε rpm)
- Η ειδική ενέργεια και ειδική ισχύς. Οι ατσάλινοι σφόνδυλοι έχουν ειδική ενέργεια περίπου 5Wh/Kg, ενώ οι υψηλής ταχύτητας σφόνδυλοι από ελαφρύτερα υλικά πετυχαίνουν ειδική ενέργεια μέχρι και 100Wh/Kg. Οι ειδικές αυτές ενέργειες είναι σαφώς μικρότερες από τις μέγιστες θεωρητικές, για τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Η ειδική ισχύς είναι συνάρτηση κυρίως του κέντρου βάρους του σφονδύλου, της ηλεκτρικής μηχανής και των ηλεκτρονικών ισχύος. Έχουν επιτευχθεί τιμές έως 1600W/Kg. Όταν λαμβάνουμε υπόψη το ολικό βάρος του συστήματος (μαζί με τα ηλεκτρονικά ισχύος, το σύστημα κενού, το δοχείο τοποθέτησης του στροφάλου, κτλ) τόσο η ειδική ενέργεια και ισχύς μειώνονται κατά έναν παράγοντα 10.
- Η διάρκεια ζωής (σε χρόνια) και ο αριθμός κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης
- Η χωρητικότητα ενέργειας (σε KWh) και ισχύς του σφονδύλου. Η χωρητικότητα ενέργειας για έναν απλό σφόνδυλο κυμαίνεται από 0,25KWh έως 6KWh. Σε διατάξεις πολλαπλών σφονδύλων παράλληλα τοποθετημένων σε ένα κοινό dc δίαυλο, η χωρητικότητα αυξάνει ακόμη περισσότερο. Η εταιρία Active Power έχει πετύχει παράλληλα συστήματα με χωρητικότητα έως 7KWh με ισχύ 2MW, ενώ η Urengo έχει κατασκευάσει συστήματα που μπορούν να παρέχουν 25KWh με ισχύ 2,1 MW.
- Η απόδοση ενέργειας. Για ονομαστική ισχύ είναι πάνω από 90%. Για μικρούς χρόνους εκφόρτισης μειώνεται λόγο κυρίως του ότι είναι συνάρτηση της απόδοσης των ηλεκτρονικών ισχύος. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός αυτοεκφόρτισης, τόσο μειώνεται και η απόδοση ενέργειας όταν οι εναλλαγές φόρτισης - εκφόρτισης δεν είναι συνεχείς.
- Οι απώλειες αναμονής (standby losses). Οι απώλειες αυτοεκφόρτισης ενός συστήματος flywheels αναλύονται σε δυο τύπους: ανοιχτού κυκλώματος, όταν σύστημα μετατροπής ισχύος είναι 'off' και οι απώλειες τότε συνδέονται με το σφόνδυλο και τα ρουλεμάν, και αναμονής (standby), όταν το σύστημα μετατροπής είναι 'on' προκειμένου να διατηρήσει

μια συνεχή ταχύτητα. Τα συστήματα flywheels δεν λειτουργούν για μεγάλες περιόδους σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος γι' αυτό και οι κατασκευαστές δίνουν σαν απώλειες αυτοεκφόρτισης τις απώλειες μόνο για κατάσταση αναμονής

- Ο βαθμός αυτοεκφόρτισης. Ο λόγος των απωλειών αυτοεκφόρτισης (δηλαδή των απωλειών αναμονής) προς την ολική χωρητικότητα του σφονδύλου C ανά ώρα, ορίζεται ως βαθμός εκφόρτισης. Ο βαθμός αυτός κυμαίνεται από 1,8 -2% της ονομαστικής χωρητικότητας C ανά ώρα. Αυτό δείχνει ότι τα συστήματα με flywheels δεν είναι κατάλληλα για μακροπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας

- Η θερμοκρασία λειτουργίας. Παρά το γεγονός ότι οι σφόνδυλοι από μόνοι τους μπορούν να λειτουργήσουν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, το σύστημα μετατροπής ισχύος θέτει ένα σοβαρό περιορισμό στο εύρος αυτό. Οι περισσότεροι κατασκευαστές δίνουν ένα εύρος λειτουργία από -20°C έως 40°C. Η θερμοκρασία λειτουργίας εξαρτάται από τον τρόπο εγκατάστασης του σφονδύλου και του συστήματος μετατροπής (αν είναι τοποθετημένα στο ίδιο περίβλημα, ή αν ο σφόνδυλος είναι τοποθετημένος υπόγεια, κτλ).

4.5. Κατασκευαστές flywheels

Οι κυριότεροι κατασκευαστές είναι:

- Active Power (<http://www.activepower.com/>)
- Acumentrics Corporation (<http://www.acumentrics.com/>)
- AFS Trinity Power Corporation (<http://www.afstrinity.com/>)
- Beacon Power (<http://www.beaconpower.com/>)
- Flywheel Energy Systems (<http://www.magma.ca/~fesi/index.html>)
- Optimal Energy Systems Inc. (<http://www.optimalenergysystems.com/>)
- Pentadyne (<http://www.pentadyne.com/>)
- Piller (<http://www.piller-gmbh.de/>)
- Tribology Systems Inc. (<http://www.tribologysystems.com/>)
- Urenco Power Technologies (<http://www.uptenergy.com/>)

Οι περισσότεροι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει flywheels υψηλών ταχυτήτων από νήματα ελαφρά κράματα και νήματα. Παρά το γεγονός ότι το ασάλι στοιχίζει έως και 10 φορές περισσότερο από τα νήματα των κραμάτων, οι σφόνδυλοι από νήματα μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες, με ειδική ενέργεια έως 15 φορές

μεγαλύτερη του ατσαλιού. Όλοι οι κατασκευαστές αποσκοπούν στην ελάττωση του κόστους των συστημάτων flywheel, στη μείωση των ολικών απωλειών και στην αύξηση της διάρκειας ζωής των ρουλεμάν τους. Το Lawrence Livermore Laboratory (<http://www.llnl.gov>) που η αρχική του δουλειά στο τομέα αυτό ξεκίνησε το

1973, συνεχίζει την ανάπτυξη μαγνητικών ρουλεμάν, τα οποία θα έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, δε θα χρειάζονται συντήρηση, λίπανση και θα ελαττώνουν τις τριβές.

Οι σφόνδυλοι με νήματα μπορούν να κατασκευαστούν με δυο τεχνικές. Στη πρώτη μέθοδο, τα νήματα περνάνε αρχικά μέσα από ένα ρητινοειδές διάλυμα για να εμποτιστούν και στη συνέχεια τυλίγονται στον άξονα με τα ρουλεμάν. Με τη τεχνική αυτή παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής σφονδύλων πολλών στρώσεων, με κάθε στρώσει να μπορεί να κατασκευαστεί από νήματα διαφορετικού υλικού. Η δεύτερη τεχνική (resin-transfer moulding process, RTM), αφορά τη τοποθέτηση μπλεγμένων νημάτων σε καλούπι και κάλυψή τους με κολλώδες διάλυμα. Η μέθοδος αυτή αφορά τη μαζική κατασκευή σφονδύλων σαφώς μικρότερης ποιότητας από ότι η πρώτη μέθοδος.

Τόσο το Composites Manufacturing Technology Center όσο και το Pennsylvania State University, ερευνούν την ανάπτυξη χαμηλού κόστους, τυποποιημένων διαδικασιών παραγωγής flywheels από νήματα κραμάτων. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται συγκεντρωμένα τα προϊόντα των δέκα προηγούμενων κατασκευαστών καθώς και τα χαρακτηριστικά και οι εφαρμογές τους.

Π Ι Ν Α Κ Ε Σ 16

	Active Power	Acumentrics	AFS Trinity	Beacon Power	Flywheel Energy Systems
Product status	Commercial product available	Under development, available 2004	Pre-production 2004 Commercial 2005	Commercial product available	Rotors developed. Systems under development
Product names	CleanSource DC CleanSource UPS CleanSource2 Marketed by Caterpillar: Cat UPS GenSTART	Power-Q (PQ100, PQ175, PQ250)	M3A 100kW M4A 200kW	Smart Energy series BHE-6 (2kW) Smart Power series BHP-250 (250kW) (UPT product, for which Beacon has distribution rights)	Series 45 rotors Emerging products for ACES, UPS, PQ/HEV
Rotor type	Solid forged 4340 steel	Composite	Carbon fibre composite	Composite	Composite
Bearing type	Ceramic ball in a steel race, with magnetic lift to increase life		Advanced	BHE: magnetic BHP: see UPT data	Mechanical
Containment vessel	Cast iron, acting as vacuum housing and stator for the electrical system	Stainless steel (weatherproof)		Steel	
Power per rotor	250kW per rotor	80 kW 140 kW 200 kW (6kW typ. recharge)	100 kW 200 kW	BHE: 2 kW BHP: 250 kW	1.5kW (UPS) 50 kW (PQ/HEV)
Capacity per rotor	1kWh approx.	0.44 kWh 0.56 kWh 0.55 kWh	0.42 kWh 2.0 kWh	BHE: 6 kWh BHP: 1.7 kWh min.	1.1kWh (PQ) 1.3kWh (PQ/HEV)
System maximum power and capacity	2000kW 7kWh approx. (8 rotors)	Paralleling possible	Paralleling possible	Paralleling possible Smart Energy matrix is based on 250kW, 25kWh units e.g. 10 units,	

				providing up to: 2500 kW, 250 kWh	
Rotor speed	2500 – 7700 rev/min		40000 rev/min	BHP: see UPT data	15000 – 45000 rev/min (UPS, Series 45 rotor) 17500 – 35000 rev/min (PQ/HEV, Series 39 rotor)
Voltage interface	350 – 550 V d.c. 380/400/415/480 V a.c. @ 50 or 60 Hz	480 V a.c. 3-ph. (option 208V a.c. on PQ100)	350-800 V d.c.	BHE: i/p 480 V a.c. 3-ph.; o/p 36, 48, or 96 V d.c. BHP: 480 V a.c. 3- ph.	3-ph
Applications	UPS	UPS (industrial applications)	UPS Power quality & power management	BHE: Telecomms. UPS BHP: Power quality	Space. UPS Power Quality. HEV
Standby losses	1.5 kW at max speed		700 W (max) <500W typ	BHP: see UPT data	
Self discharge rate	initially 1.5 x capacity per hour		0.35 x capacity per hour		
Efficiency		Full load efficiency >95%			
Temperature: Operating	-20°C to 40°C	-20°C to 45°C	-20°C to 40°C	BHE: -40°C to 46°C BHP: 0°C to 35°C	
Non-operating	-25°C to 70°C	-50°C to 65°C		BHP: -20°C to 70°C	
Lifetime	25+ years standby >10,000 cycles		> 100,000 cycles	BHE: 20 years BHP: see UPT data	Typ 100,000 cycles

					capacity)
Voltage interface		240 V a.c. 3-ph. 400 V d.c.	a.c. alternator		580-900 V d.c. 380 V a.c
Applications	UPS, load levelling, 100 kW to 100 MW Space Pulsed power	UPS Power Quality HEV	Load-levelling in local grids. Efficiency improvements in traction systems	Surge power in HEV	Power quality. Traction. Cyclic loads. Island site generation.
Standby losses		120 W typ. (idle)	10kW		1.2 kW
Self discharge rate		0.18 x capacity per hour	0.46 x capacity per hour		1.67 x capacity per hour
In-out efficiency at rated power			95%		94% (d.c. interface) 91% (a.c. interface)
Temperature: Operating Non-operating		-20°C to 50°C -20°C to 80°C	0 to 40°C -30°C to 40°C		0°C to 40°C 0°C to 70°C
Lifetime: Standby Cycles	200,000		25 years 10,000,000	20 years	20 years 10,000,000 (high cycling system) 500,000 (high capacity system, with lower minimum speed at lower power)

4.6. Σύγκριση χαλύβδινων σφονδύλων με σφονδύλους κατασκευασμένους από νήματα κραμάτων

Το κόστος κατασκευής των σφονδύλων από κράματα (composite rotors), κυριαρχείται πολύ περισσότερο από το κόστος του υλικού, παρά από το κόστος του εξοπλισμού και του χρόνου που απαιτείται για τη κατασκευή του. Οι composite rotors χρησιμοποιούν ανθρακονήματα (CFRP) για τα τμήματα που δέχονται μεγάλες δυνάμεις και νήματα ύαλου (GFRP) για μείωση της μάζας του σφονδύλου και αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του. Το κόστος του χάλυβα είναι 1\$ ανά Kg ενώ το κόστος των composite rotors κυμαίνεται από 10 έως 30\$ ανά Kg, ανάλογα τις προδιαγραφές. Το υψηλό κόστος των υλικών αυτών, αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι οι composite rotors έχουν μικρότερη μάζα και άρα μπορούν να λειτουργήσουν σε πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες, για παράδειγμα σε 29.000rpm αντί 7000rpm. Σαν συνέπεια, μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερη ενέργεια και έτσι το κόστος ανά KWh για δεδομένη χωρητικότητα είναι περίπου ίδιο και στα δυο είδη σφονδύλων (690\$ ≈ 800\$). Ο παρακάτω πίνακας δείχνει συγκριτικά χαρακτηριστικά των δυο κατηγοριών.

ΠΙΝΑΚΑΣ 17		
	Steel Rotor	Composite Rotor
Διάμετρος [m]	0,64	0,46
Ύψος [m]	0,23	0,20
Βάρος [Kg]	555	32
Μέγιστη ταχύτητα [rpm]	7000	29000
Χρήσιμη ενέργεια [KWh]	0.8	0.6
Κόστος υλικού [\$/Kg]	1	15
Κόστος χωρητικότητας [\$/KWh]	690	800

4.7. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με στρεφόμενους σφονδύλους, για εφαρμογή στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου

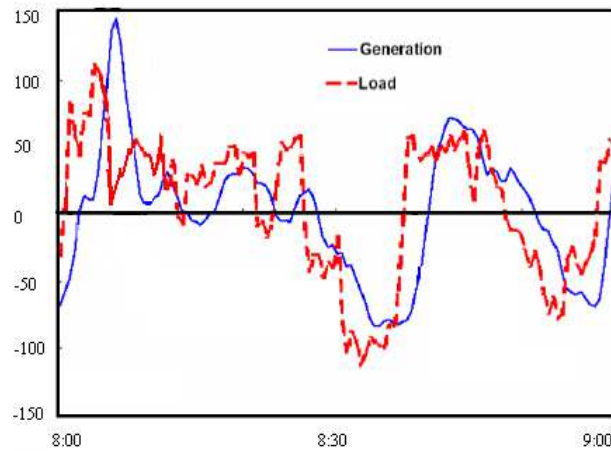
Ως γνωστών, μια από τις βασικότερες συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η σύγχρονη μηχανή. Στη σύγχρονη γεννήτρια, η συχνότητα της παραγόμενης τάσης είναι σταθερά συνδεδεμένη με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής 'n' (σε rpm) και τον αριθμό των πόλων 'p' σύμφωνα με τη σχέση:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \quad \text{σε Hz} \quad (4.17)$$

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

Η σταθερότητα της συχνότητας του δικτύου σχετίζεται άμεσα με την ισορροπία ανάμεσα στο φορτίο του δικτύου και την παραγωγή. Παραδοσιακά, η σταθεροποίηση της συχνότητας γίνεται με ρύθμιση της ισχύς εξόδου των γεννητριών, ρυθμίζοντας την μηχανική ισχύ στην είσοδό τους. Ανάλογα αν η γεννήτρια κινείται από ατμοστρόβιλο, από υδροστρόβιλο ή από πετρελαιοκινητήρα, ρυθμίζουμε τη ροή ατμού, νερού ή πετρελαίου. Αν η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη από το φορτίο, η ταχύτητα ή η συχνότητα της γεννήτριας αυξάνουν, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ελαττώνονται. Οι διακυμάνσεις αυτές από την ονομαστική ταχύτητα ή συχνότητα (με μέγιστη τιμή συνήθως τα + 0,5 Hz) χρησιμοποιούνται σαν σήματα ελέγχου για να προκαλέσουν την αυτόματη και κατάλληλη ρύθμιση της παροχής μηχανικής ισχύος. Ένας ειδικός ελεγκτής ρυθμίζεται για μια συγκεκριμένη συνθήκη λειτουργίας και φροντίζει για τη κάλυψη μικρών μεταβολών του φορτίου. Όταν με τη πάροδο του χρόνου οι μεταβολές του φορτίου γίνονται μεγάλες, απαιτείται επαναρύθμιση του ελεγκτή. Η συσκευή που ελέγχει τη ροή ατμού στον ατμοστρόβιλο ονομάζεται ρυθμιστής ταχύτητας. Ανάλογη συσκευή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής νερού ή τη θέση των πτερυγίων στον υδροστρόβιλο. Η λειτουργία αυτή του συστήματος ελέγχου, βασίζεται σε ένα σήμα ACE (Area Control Error) το οποίο σχετίζεται με τη διαφορά μεταξύ συνολικής παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος. Το σήμα αυτό έχει ισχύ ίση με το 1-2% της ολικής παραγόμενης ισχύς από έναν σταθμό και σαν συνέπεια κάθε μονάδα φροντίζει να φυλάει 1-400MW για σταθεροποίηση συχνότητας. Επειδή το παραγόμενο αυτό σήμα που στέλνεται στους ρυθμιστές είναι πιο αργό από την πραγματική μεταβολή του

φορτίου όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα 58, η ρύθμιση της συχνότητας με την κλασική μέθοδο αποτελεί ένα δύσκολο έργο που πρέπει να πραγματοποιηθεί.



Σχ.20 'Διαφορά φάσης' φορτίου-παραγωγής

Στις επόμενες παραγράφους θα δούμε ότι με τα συστήματα στρεφόμενων σφονδύλων μπορούμε να πετύχουμε σταθεροποίηση συχνότητας, ανακυκλώνοντας την ηλεκτρική ενέργεια και αξιοποιώντας όλα τα σημαντικά πλεονεκτήματα που είδαμε παραπάνω ότι προσφέρουν τα συστήματα αυτά. Αρχικά, απορροφάται ενέργεια όταν αυτή είναι σε αφθονία και στη συνέχεια αποδίδεται πίσω για την επιθυμητή ρύθμιση συχνότητας.

Αποτελέσματα εξομοίωσης που βασίζονται σε πραγματικά τέτοια σήματα, δείχνουν ότι ένα αρθρωτό σύστημα σφονδύλων μπορεί να παρέχει σταθερότητα συχνότητας. Το ελκυστικό κόστος ενός τέτοιου συστήματος σε σχέση με την κλασική μέθοδο ρύθμισης της συχνότητας και το γεγονός ότι τα συστήματα αυτά παρέχουν ταυτόχρονα και ρύθμιση της άεργου ισχύος, επεκτείνουν την ικανότητα των συστημάτων flywheels στην σταθεροποίηση τάσης. Επιπρόσθετα, με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να οδηγήσουν και στην χρήση των συστημάτων αυτών για απόσβεση ταλαντώσεων. Όλες οι παραπάνω λειτουργίες μπορούν να αποτρέψουν μεταβολές στη τάση και συχνότητα του δικτύου, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τα μεγαλύτερα blackouts στην πρόσφατη ιστορία.

Η σχέση ανάμεσα στη συχνότητα και την έλλειψη ή πλεόνασμα ενεργού ισχύος κάθε χρονική στιγμή εκφράζεται από τη σχέση:

$$\sum_i P_{source} - P_{load} = \frac{d}{dt} [K_E] = \frac{d}{dt} \left[\sum_i J_i \omega_i' \right] \quad (4.18)$$

Όπου

P_{source} = ισχύς σύγχρονης γεννήτριας (παραγωγή)

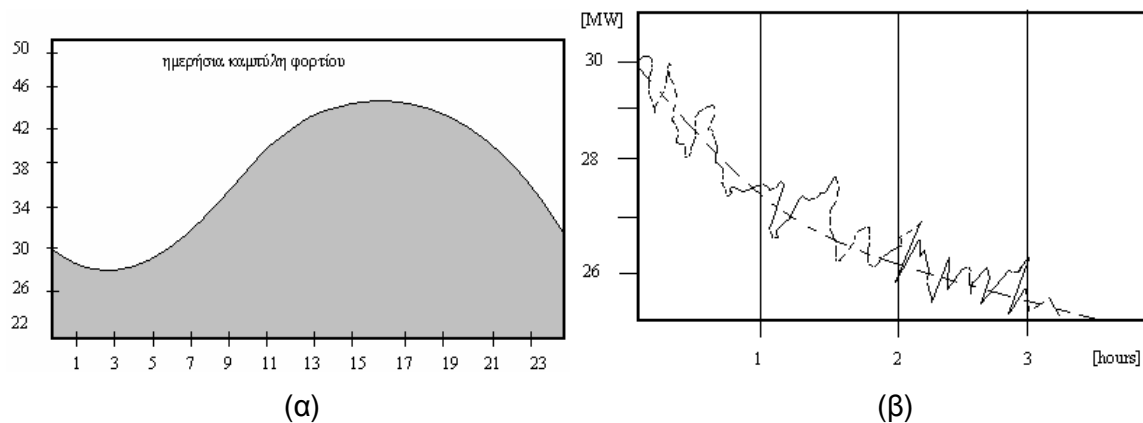
P_{load} = ισχύς φορτίου (ζήτηση)

K_E = κινητική ενέργεια σύγχρονων μηχανών συστήματος

J = ροπή αδράνειας περιστρεφόμενης μάζας

ω = γωνιακή ταχύτητα συστήματος σύγχρονων μηχανών συστήματος

Στο παρακάτω σχήμα (α) βλέπουμε μια ημερήσια καμπύλη φορτίου ενός τυπικού ΣΗΕ. Κοιτάζοντας πιο κοντά το όριο της καμπύλης αυτής, σχήμα (β), βλέπουμε ότι σε διάστημα μιας ώρας αυτό ακολουθεί μια ακανόνιστη - κυματοειδή πορεία και δεν είναι τόσο ομαλό όσο ομαλό φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Ακόμα πιο απότομες μεταβολές της ζήτησης ενέργειας μπορούν να γίνουν και στη διάρκεια ενός λεπτού. Η σταθεροποίηση της συχνότητας αφορά την εποπτεία της πραγματικής ακανόνιστης καμπύλης φορτίου από την παραγόμενη ισχύ. Σκοπός δηλαδή είναι η παραγόμενη ισχύς να ακολουθεί τις μεταβολές φορτίου όσο πιο πιστά και γρήγορα γίνεται.

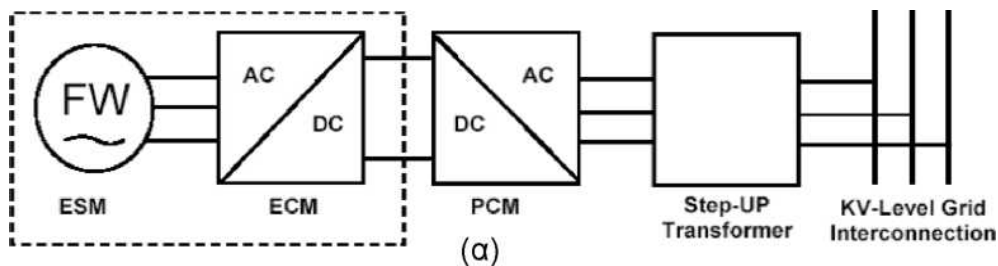


Σχ.21 (α) Ημερήσια καμπύλη φορτίου, (β) κοντινή εστίαση στις πρώτες ώρες

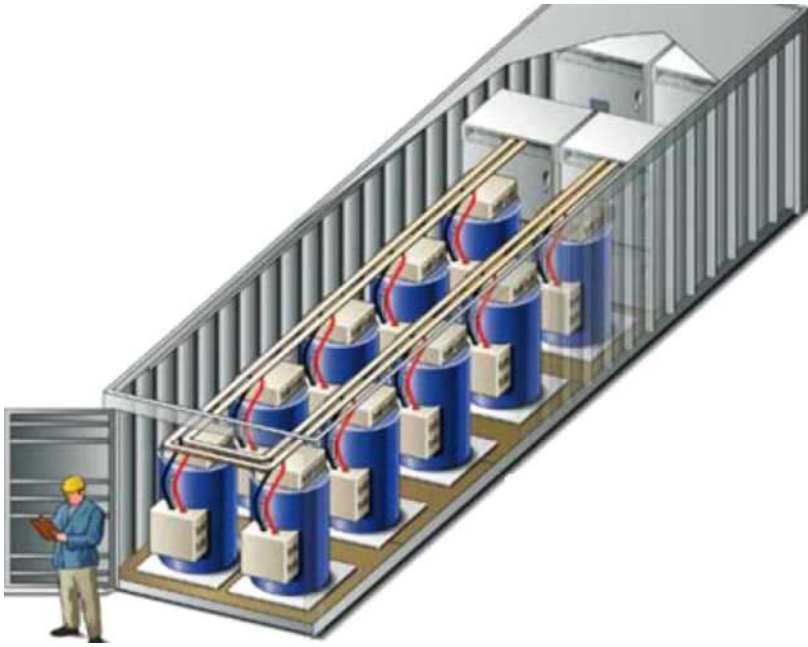
Ένα χαρακτηριστικό σύστημα με στρεφόμενες μάζες έχει αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό η Beacon Power Corporation. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν πίνακα που περιέχει 10 παράλληλα συνδεδεμένα συστήματα flywheel. Το σύστημα μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια έτσι ώστε να είναι ικανό να επιστρέψει 1MW για 15 λεπτά. Η εταιρία σκοπεύει να εμπορευτεί τον πίνακα αυτό με την ονομασία Smart Energy Matrix

(SEM). Κάθε μια από τις 10 μονάδες αποθήκευσης περιέχει μονάδα μετατροπής της τάσης από ac σε dc και συνεπώς το μόνο που χρειάζεται το SEM για την λειτουργία του είναι ένα σύστημα PCM που θα μετατρέψει την dc τάση σε ac για τη σύνδεσή του με το δίκτυο. Ο πίνακας αυτός είναι εύκολος τόσο στην εγκατάσταση όσο και στην μετακόμισή του και έχει σχεδιαστεί για διάρκεια ζωής έως και πάνω από 20 χρόνια. Το σφάλμα σε οποιοδήποτε ηλεκτρικό ή μηχανικό εξάρτημα δεν αποσυνδέει τον υπόλοιπο πίνακα από το δίκτυο, απλά περιορίζει την διάρκεια της αποδιδόμενης ενέργειας, διασφαλίζοντας έτσι αξιοπιστία στη λειτουργία του. Επιπρόσθετα, ο πίνακας είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε η συντήρησή του να γίνεται χωρίς να είμαστε αναγκασμένοι να διακόπτουμε τη λειτουργία του. Κάθε flywheel έχει dc τάση εξόδου 750V. Για επίτευξη μέγιστης πυκνότητας αποθηκευμένης ενέργειας οι σφόνδυλοι περιστρέφονται σε ταχύτητα μεγαλύτερη των 15.000rpm. Στο παρακάτω σχήμα (α) βλέπουμε ένα μπλοκ - διάγραμμα συνδεσμολογίας του SEM με το δίκτυο και στο σχήμα (β) βλέπουμε την πραγματική μορφή του SEM.

Smart Energy Matrix

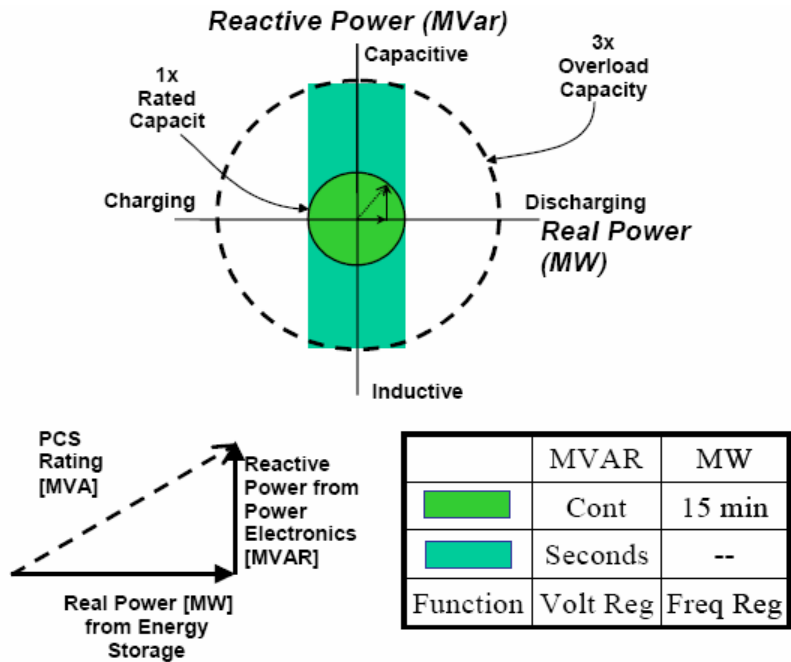


(β) Smart Energy Matrix (SEM) 1



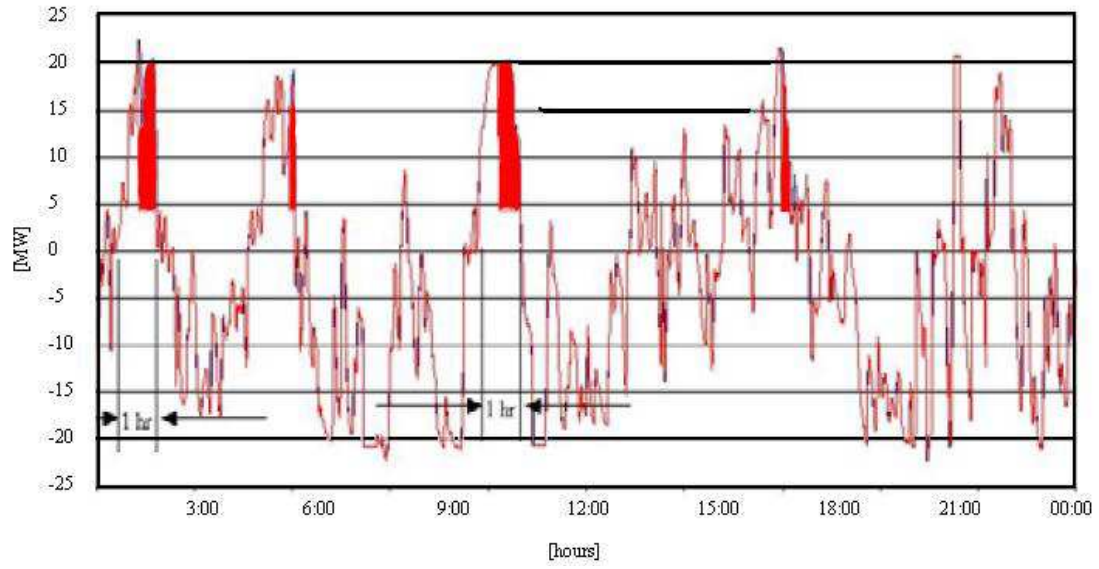
Σχ.22 (β) Μονάδα SEM και (α) σύνδεσή της με το δίκτυο

Τόσο το SEM όσο και το PCM συνεισφέρουν στην ολική φαινόμενη ισχύ με διαφορετικό και ανεξάρτητο τρόπο. Το SEM παρέχει ή απορροφάει πραγματική ισχύ [W], ενώ το PCM διαχειρίζεται την άεργο ισχύ [Var]. Παρόλο που το SEM δεν επιδρά καθόλου στην άεργο ισχύ και το PCM δεν επιδρά στην πραγματική ισχύ, ο συνδυασμός ενός SEM + PCM δίνει τη δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Να θυμίσουμε ότι για σταθεροποίηση συχνότητας απαιτείται μόνο ρύθμιση της πραγματικής ισχύς ενώ η ρύθμιση της άεργου ισχύος αφορά τη σταθεροποίηση τάσης. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τη σχέση πραγματικής και άεργου ισχύος για δυο περιπτώσεις χωρητικότητας: ονομαστική και τριπλάσια υπερφόρτιση.



Σχ.23 Λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων μονάδας SEM+PCM

Η εξομοίωση της λειτουργίας ενός FESS που χρησιμοποιεί μια τέτοια SEM μονάδα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρούμε ότι με τη χρήση μιας μονάδας SEM η παραγωγή 'ακολουθεί' πιστά τις απότομες μεταβολές του φορτίου, όσο σύντομες και αν είναι αυτές (με μαύρο χρώμα είναι η καμπύλη φορτίου και με κόκκινο η απόκριση της παραγωγής). Το μόνο πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί, είναι η περίπτωση που από το SEM θα ζητηθεί ενέργεια για περισσότερο από 30 λεπτά.



Σχ.24 Εξομοίωση συστήματος FES που χρησιμοποιεί μονάδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ

5.1. Εισαγωγή

Η αντλησιοταμίευση προκύπτει από την ανάγκη της αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, όταν αυτά διατίθενται με κάποιο τρόπο μία δεδομένη χρονική στιγμή, κατά την οποία δεν μπορούν να απορροφηθούν. Τα αποθηκευμένα ποσά ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μία άλλη χρονική στιγμή, όταν προκύψει σχετική ανάγκη για παροχή ενέργειας.

Η αντλησιοταμίευση αποτελεί την μεγαλύτερη σε χρήση μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, με την Αμερική να αποθηκεύει με αντλησιοταμίευση συνολικά 19GW ισχύος (το οποίο αποτελεί το 2,7% της παγκόσμιας αποθηκευόμενης με αντλησιοταμίευση ισχύ) και την Ιαπωνία να αποθηκεύει 24GW ισχύος. Υπάρχουν μικρές μονάδες από 30 έως 350MW και εργοστάσια παραγωγής από 300 έως 1800MW. Η απόδοσή τους φτάνει το 60% για τις παλιές μονάδες και το 78% για τις νέες. Είναι συστήματα ψυχρής εκκίνησης με χρόνο εκκίνησης 1 έως 4 λεπτά περίπου και αξιοπιστία εκκίνησης που πλησιάζει το 100% (>99%).

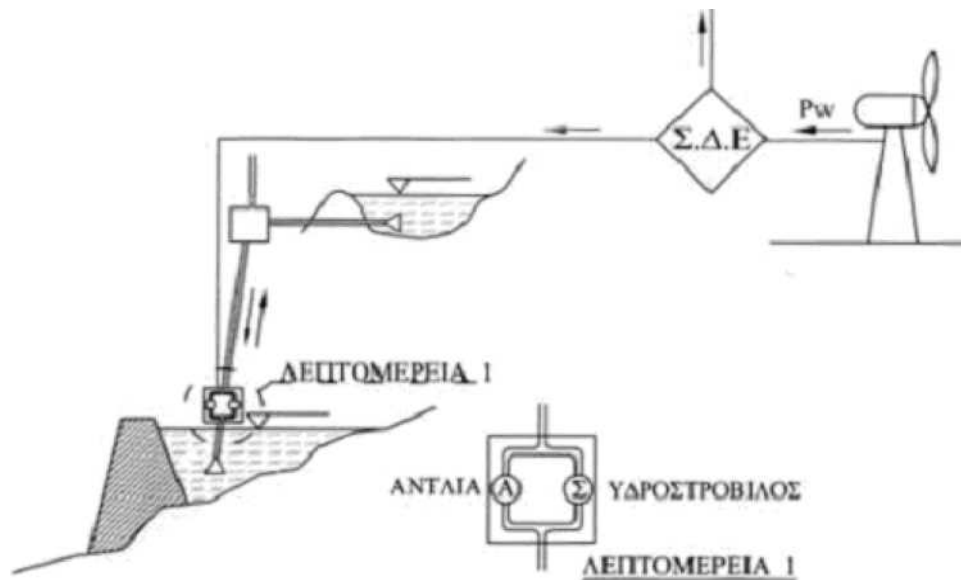
Ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης αποτελείται όπως είπαμε από τα παρακάτω μέρη:

- α) Μία αντλία ή ένα σύνολο παράλληλα συνδεδεμένων αντλιών
- β) Έναν υδροστροβίλο ή ένα σύνολο παράλληλα συνδεδεμένων υδροστροβίλων
- γ) Δύο δεξαμενές νερού οι οποίες βρίσκονται σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους
- δ) Ένα σύνολο σωληνώσεων για την άντληση του νερού από την κάτω δεξαμενή προς την άνω
- ε) Ένα σύνολο σωληνώσεων για την προσαγωγή του νερού από την άνω δεξαμενή προς την κάτω μέσω του υδροστροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η φιλοσοφία λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι απλή. Η περίσσεια ενέργειας τροφοδοτεί τις αντλίες, μέσω των οποίων το εργαζόμενο μέσο

(νερό) ανυψώνεται δια των σωληνώσεων ανόδου από την κάτω δεξαμενή στην άνω, δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Όταν κάποια άλλη χρονική στιγμή χρειαζόμαστε ενέργεια, το νερό από την πάνω δεξαμενή αφήνεται να οδεύσει μέσω των σωληνώσεων καθόδου προς την κάτω δεξαμενή, το οποίο διερχόμενο μέσω των υδροστροβίλων παράγει την επιθυμητή ενέργεια. Οι διαστασιολογήσεις των δύο δεξαμενών είναι τέτοιες που να εξασφαλίζουν ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό από τον όγκο του αποθηκευμένου νερού θα χρησιμοποιηθεί και θα είναι ικανό για τις μετατροπές τις διατιθέμενης ενέργειας σε δυναμική και αντίστροφα, αποκλείοντας το ενδεχόμενο κάποια από τις δύο δεξαμενές να αδειάσει εντελώς.

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να λειτουργήσουν εξαιρετικά, συνδυαζόμενα με αιολικά πάρκα ή θερμικά συστήματα, αποθηκεύοντας πάντα περίσσεια παραγόμενης ενέργειας ή ενέργειας που δεν μπορεί να απορροφηθεί. Σχηματικά, ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης συνδυαζόμενο με αιολικά πάρκα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στην παράγραφο αυτή θα μελετήσουμε τη συνεργασία ενός αιολικού πάρκου με ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης, μιας και όπως θα δούμε στη συνέχεια αυτό μπορεί να βρει άμεση εφαρμογή σε ένα πραγματικό σύστημα στην Ελλάδα. Στο αυτόνομο σύστημα ενέργειας της Κρήτης.



Σχ.25 Συνδυασμός συστήματος αντλησιοταμίευσης με Αιολικά Πάρκα

Η ανεμογεννήτρια παριστάνει το αιολικό πάρκο, από το οποίο προέρχεται όλη η

ενέργεια που παράγει το σύστημα. Το αιολικό πάρκο τροφοδοτεί το σύστημα με ηλεκτρική ισχύ P_{source} . Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Σ.Δ.Ε) ελέγχει αν η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς από το αιολικό πάρκο είναι μεγαλύτερη από τη στιγμιαία ζήτηση P_{load} . Διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

α) Αν $P_{source} > P_{load}$, τότε το αιολικό πάρκο καλύπτει εξ' ολοκλήρου τη στιγμιαία ζήτηση φορτίου και η περίσσεια της παρεχόμενης από αυτό ενέργειας τροφοδοτεί την αντλία του υδροηλεκτρικού συστήματος προκειμένου να αποταμιευτεί μέσω της ανύψωσης του νερού από την κάτω στην άνω δεξαμενή. Αν υποθέσουμε ότι η πάνω δεξαμενή είναι γεμάτη, τότε είτε απορρίπτουμε την περίσσεια της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, είτε την αξιοποιούμε με κάποιο άλλο τρόπο (π.χ. αφαλάτωση), είτε μειώνουμε την παραγόμενη ισχύ από το αιολικό πάρκο.

β) Αν $P_{source} < P_{load}$, τότε όλη η ενέργεια που παράγεται από το αιολικό πάρκο διοχετεύεται στην κατανάλωση, ενώ παράλληλα παράγεται ένα επιπλέον ποσό ενέργειας από τον υδροστρόβιλο για την κάλυψη της ζητούμενης ισχύος.

Ιδιαίτερα ελκυστικά μεγέθη εξάγονται επίσης από το συνδυασμό συστημάτων αντλησιοταμίευσης με θερμικά συστήματα για εξοικονόμησης σε περιπτώσεις λειτουργίας του συστήματος σε ισχύς μεγαλύτερες από τις απαιτούμενες, λόγω τεχνικών ελαχίστων. Αποδεικνύεται ότι με τη χρήση συστήματος αντλησιοταμίευσης, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου και γρήγορη απόσβεση των αρχικών κεφαλαίων επένδυσης.

5.2. Υδροδυναμική ενέργεια - Υδατόπτωση

Την υδροδυναμική ενέργεια που αξιοποιούμε στα συστήματα αντλησιοταμίευσης την παίρνουμε από τις υδατοπτώσεις. Σε αυτές, εκμεταλλευόμαστε την δυναμική ενέργεια του νερού το οποίο βρίσκεται σε ύψος H από το έδαφος, μετατρέποντάς την σε κινητική ενέργεια αρχικά και έπειτα σε ηλεκτρική. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να υπάρχουν αφενός τα απαραίτητα υδροδυναμικά αποθέματα και αφ' ετέρου το ανάλογο ύψος πτώσης. Εδώ πρέπει να παρατηρήσουμε ότι έχουμε δυο διαφορετικά ύψη πτώσης. Το διαθέσιμο ή γεωδαιτικό ύψος H και το ωφέλιμο ύψος h . Το διαθέσιμο ύψος H είναι το κάθετο ύψος από τη στάθμη του νερού στην άνω λίμνη μέχρι

το ακροφύσιο που φτάνει στο στρόβιλο. Λόγο όμως απωλειών, δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε όλο το ύψος αυτό H . Οι απώλειες αυτές είναι:

- α) στο πέρασμα του νερού μέσα από τον υδατοφράχτη
- β) λόγο αντιστάσεων κατά το πέρασμα του νερού στη διάταξη εισαγωγής προς τους αγωγούς πτώσης
- γ) λόγο τριβών μέσα στον αγωγό πτώσης
- δ) πάνω στα ειδικά γωνιακά τμήματα του αγωγού πτώσης
- ε) λόγο αντιστάσεων κατά το πέρασμα στο ροοφράχτη πριν από το στρόβιλο

Αν αφαιρέσουμε από το αρχικό ύψος H όλες τις απώλειες, τότε προκύπτει το ωφέλιμο ύψος h . Προκειμένου όμως να αποφύγουμε τον υπολογισμό όλων αυτών των απωλειών, λαμβάνουμε υπόψη μας έναν βαθμό απόδοσης υδατόπτωσης $\eta_{\text{υδ}}$ περίπου 0,9.

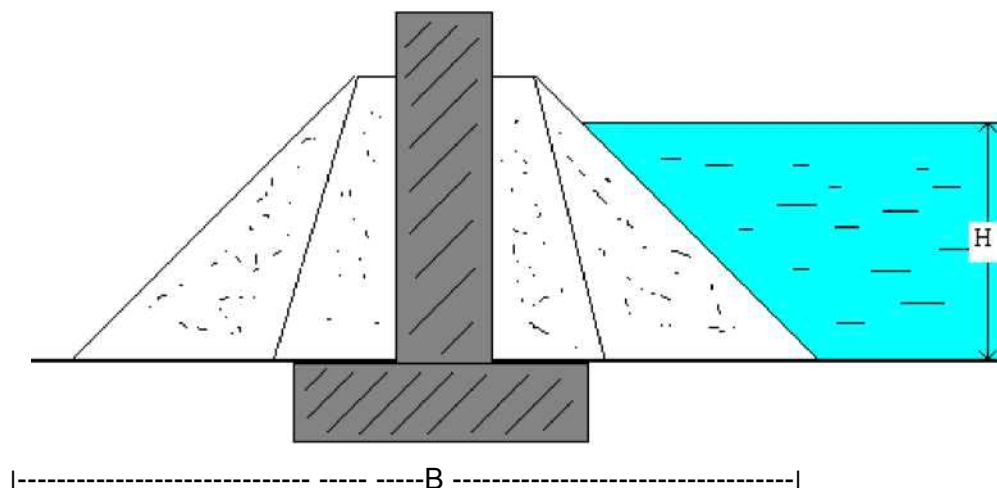
Δυο είναι τα βασικά χαρακτηριστικά μιας υδατόπτωσης: η παροχή Q (m^3/sec) και το ύψος πτώσης H (m). Οι υδατοπτώσεις κατατάσσονται σε υψηλές, όταν το H είναι μεγαλύτερο από 250m, σε μέσες, όταν το H κυμαίνεται από 50m έως 250m και σε χαμηλές, όταν το H είναι μικρότερο από 50m.

5.3. Φράγματα

Για να σχηματίσουμε τις τεχνητές λίμνες κατασκευάζουμε φράγματα. Υπάρχουν διαφόρων ειδών φράγματα, ανάλογα με το υλικό και τον τρόπο που κατασκευάζονται. Διακρίνονται σε:

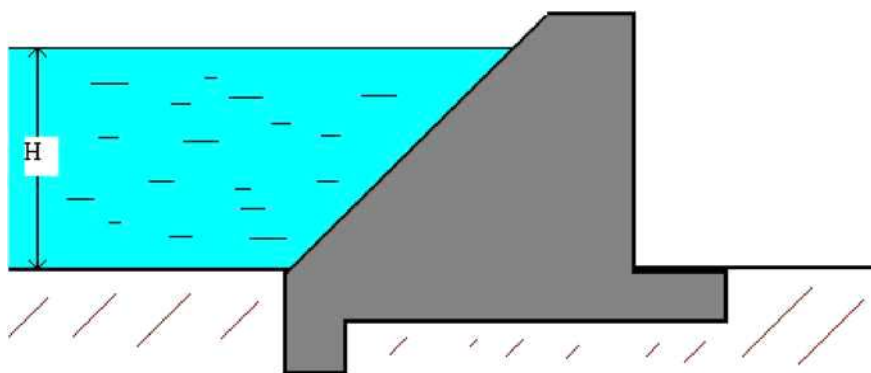
- α) χωμάτινα φράγματα
- β) χτιστά φράγματα (με τοιχοποιία από μπετόν)
- γ) μεταλλικά φράγματα

Στα χωμάτινα φράγματα, το ολικό πλάτος B είναι πολύ μεγαλύτερο από το ύψος H της στάθμης του νερού. Εκτός από τον κύριο πυρήνα ο οποίος αποτελείται από μπετόν, με τα θεμέλιά του να βρίσκονται βαθιά μέσα στο έδαφος, προστίθενται και από τις δυο μεριές του δυο προστατευτικοί όγκοι χώματος με κλίση 45ο, από τους οποίους αυτός που βρίσκεται προς το μέρος του νερού προστατεύεται με ειδική επένδυση.



Σχ.26 Χωμάτινο φράγμα

Τα χτιστά φράγματα χωρίζονται σε βαρύτητας και σε τοξωτά. Τα πρώτα, ονομάζονται έτσι γιατί λόγω του βάρους τους, αναπτύσσεται δύναμη τριβής με το έδαφος με συνέπεια να μην παρασύρονται από την πίεση του νερού. Από την άλλη, λόγω του σχήματός τους αναπτύσσεται τέτοια ροπή η οποία αποτρέπει την ανατροπή του. Για να ελαττώσουμε την επίδραση της πίεσης στο φράγμα, η κεκλιμένη πλευρά του φτιάχνεται έτσι ώστε να βρίσκεται στο νερό. Έτσι, η δύναμη από την πίεση του νερού σε κάθε σημείο αναλύεται σε δυο συνιστώσες, μια κάθετη και μια οριζόντια. Η κατακόρυφη συνιστώσα ενεργεί όπως και το βάρος του φράγματος και προστίθεται σε αυτό.



Σχ.27 Χτιστό φράγμα τύπου βαρύτητας

Στα τοξωτά φράγματα οι πιέσεις του νερού μεταφέρονται στα πλάγια. Τα φράγματα αυτά έχουν μικρότερο όγκο και για να είναι δυνατή η κατασκευή τους πρέπει οι πλαγιές

στις οποίες στηρίζεται να είναι ισχυρές. Τα τοξωτά φράγματα είναι μικρού μήκους Β σε σχέση με τα βαρύτητας. Το πλεονέκτημά τους είναι ότι δεν παρουσιάζουν ρωγμές από τις θερμοκρασιακές μεταβολές.

5.4. Απώλειες νερού σε δεξαμενές - λίμνες

Οι απώλειες νερού που έχουμε σε δεξαμενές και λίμνες οφείλονται σε δύο αιτίες:

α) στην απώλεια στρώματος νερού λόγω εξάτμισης, και η οποία είναι 0,003m- 0,007m μέση τιμή για ολόκληρο το χρόνο και 0,008m-0,020m για το καλοκαίρι

β) στην απώλεια νερού λόγω απορρόφησης του εδάφους και η οποία είναι 0,001 m για αργιλώδη ή πετρώδη εδάφη και 0,020m για αμμώδη εδάφη.

5.5. Υδροστρόβιλοι

Ο υδροστρόβιλος είναι η μηχανή εκείνη η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική. Αποτελεί το βασικότερο μέρος του μηχανολογικού τμήματος του σταθμού. Ο υδροστρόβιλος συνδέεται με τη γεννήτρια, η οποία μετατρέπει την μηχανική ενέργεια από τη περιστροφή του υδροστροβίλου, σε ηλεκτρική. Οι υδροστρόβιλοι διαιρούνται σε δυο κατηγορίες:

α) δράσης

β) αντίδρασης

Οι υδροστρόβιλοι δράσης έχουν τον άξονα περιστροφής τους οριζόντιο και χρησιμοποιούν την ταχύτητα του νερού που φτάνει σε αυτούς με μορφή φυσήματος. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου έχουμε μικρές παροχές μεγάλου ύψους. Στους υδροστρόβιλους αντίδρασης αντίθετα, ενεργεί κυρίως η πίεση του νερού. Έχουν τον άξονά τους κάθετο και μπορούν να λειτουργήσουν έξω από το νερό αλλά μέσα σε ειδικό περίβλημα ή βυθισμένοι μέσα σε αυτό. Είναι κατάλληλοι για περιπτώσεις μεγάλης παροχής και μικρού ύψους πτώσης.

Είναι φυσικά αδύνατο να πάρουμε από έναν υδροστρόβιλο όλη την ενέργεια που απορρόφησε και να τη μετατρέψουμε σε ηλεκτρική. Ένα μέρος της ενέργειας ξοδεύεται για να υπερνικήσουμε τις παθητικές αντιστάσεις, με τρόπο ώστε η ωφέλιμη ενέργεια να είναι πάντα μικρότερη από την απορροφούμενη. Ο λόγος των δυο αυτών ενεργειών ονομάζεται βαθμός απόδοσης του υδροστροβίλου. Στους υδροστρόβιλους έχουμε σαν

δεδομένη την ισχύ P της υδατόπτωσης και η οποία δίδεται από τη παρακάτω σχέση

$$P_{υδ} = 9,81 \cdot Q \cdot h \cdot \eta_{υδ} \quad \text{σε KW} \quad (5.1)$$

Λαμβάνοντας υπόψη έναν βαθμό απόδοσης υδροστροβίλου $\eta_{υδρo}$ ο οποίος κυμαίνεται από 0,75 έως 0,85 έχουμε ότι η αποδιδόμενη ισχύς από αυτόν είναι:

$$P_{υδρo} = 9,81 \cdot Q \cdot h \cdot \eta_{υδρo} \quad \text{σε KW} \quad (5.2)$$

Όπου: Q = παροχή νερού σε m³/sec

h = ωφέλιμο ύψος υδατόπτωσης σε m

$\eta_{υδ}$ = βαθμός απόδοσης υδατόπτωσης (περίπου 0,9)

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των υδροστροβίλων, είναι η ειδική ταχύτητα ή ειδικός αριθμός στροφών n_s . Ορίζεται ως ο αριθμός των στροφών του στροβίλου, ο οποίος σε ύψος h=1m δίνει $P_{υδρo}=1$ hp και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_s = \frac{n \sqrt{P_{υδρo}}}{h^{5/4}} \quad (5.3)$$

Όπου: n = ταχύτητα στροβίλου σε rpm

Η σχέση 5.3 μπορεί να γραφεί και ως:

$$n_s = K \cdot n \cdot \sqrt{P_{υδρo}}$$

όπου

$$K = \frac{1}{h^{5/4}} \quad (5.4)$$

Η ειδική ταχύτητα γνωστών υδροστροβίλων είναι:

Π 1 Ν Α Κ Α Σ 18	
Υδροστρόβιλοι	Ειδική ταχύτητα ns σε rpm
Pelton	5 - 30
Banki	20 - 80
Francis	60 - 350
Kaplan	400 - 1000

Η γραμμική ταχύτητα u του στροφείου (τροχός του υδροστρόβιλου) δίνεται από τη σχέση:

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad \text{σε m/sec} \quad (5.5)$$

Όπου: D = διάμετρος στροφείου σε m Η ταχύτητα εισροής σε σχέση με το ύψος πτώσης H είναι:

$$u_{\text{εισρ}} = c \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad \text{σε m/sec} \quad \text{όπου: } c = [0,95-0,98] \quad (5.6)$$

5.5.1. Υδροστρόβιλος Pelton

Ο υδροστρόβιλος ή τροχός Pelton που είναι υδροστρόβιλος δράσης, είναι περισσότερο κατάλληλος για μικρές ποσότητες νερού με μεγάλη ταχύτητα. Δύο ή περισσότερα ακροφύσια εισροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έναν μόνο τροχό, ή δυο τροχοί μπορούν να ζευχθούν μαζί επάνω στον ίδιο άξονα, καθένας με ένα ή δυο ακροφύσια εισροής. Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής για δεδομένη υδατόπτωση.

Η χρησιμοποίηση δυο ακροφυσίων εισροής τα οποία ενεργούν με μια γωνία το ένα από το άλλο είναι πολύ συνηθισμένη. Η ενέργεια πίεσης του νερού μετασχηματίζεται όλη σε κινητική ενέργεια μέσα στα ακροφύσια. Η ταχύτητα του νερού που εγκαταλείπει

τα περιστρεφόμενα μέρη μειώνεται στο μηδέν και επομένως όλη η κινητική ενέργεια του νερού αποδίδεται στο στρόβιλο. Οι υδροστρόβιλοι Pelton με κατακόρυφο άξονα δε χρησιμοποιούνται, λόγο πιο σύνθετης κατασκευής και συντήρησης. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Κατάλληλος για μεγάλες υδατοπτώσεις ($H = 300 - 1800 \text{ m}$)
- Ισχύς μέχρι 400 MW
- Ιδανικοί για λειτουργία υπό μεταβλητή παροχή
- Δεν είναι κατάλληλοι για λειτουργία με μεταβλητή υδατόπτωση H

Για υψηλότερη απόδοση του στρόβιλου, η γραμμική ταχύτητα στην περιφέρεια του πρέπει να είναι:

$$u = \frac{0,916}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad \text{σε m/sec} \quad (5.7)$$

5.5.2. Υδροστρόβιλος Banki

Ο υδροστρόβιλος Banki αντιπροσωπεύει έναν μεταβατικό τύπο από τους υδροστρόβιλους δράσης στους υδροστρόβιλους αντίδρασης. Όπως στον υδροστρόβιλο Pelton, έτσι και στον υδροστρόβιλο Banki η ενέργεια πίεσης του νερού μετατρέπεται σχεδόν ολόκληρη σε κινητική ενέργεια στον διανομέα και την εισροή (ακροφύσιο).

Οι υδροστρόβιλοι Banki διατάσσονται πάντοτε με τον άξονα οριζόντιο. Στην κατασκευή τους είναι απλοί, ρυθμίζονται με το χέρι ή αυτόματα και θεωρούνται ιδανικοί για μικρές παροχές. Για πτώσεις από ύψος μέχρι 20m οι υδροστρόβιλοι Banki κατασκευάζονται από χυτοσίδηρο, ενώ για πτώσεις από μικρότερο ύψος κατασκευάζονται από σιδερένια ελάσματα συγκολλημένα.

Οι υδροστρόβιλοι Banki διατίθενται σε διάφορα μήκη πτερυγίων και με διάφορες διαμέτρους τύμπανων, ανάλογα με την ισχύ που διατίθεται από τις υδατοπτώσεις.

5.5.3. Υδροστρόβιλοι Francis

Οι υδροστρόβιλοι Francis είναι τύπου αντίδρασης και έχουν μεγάλη εφαρμογή. Διακρίνονται σε:

- α) αργόστροφους με $n_s = 60 - 125$

β) ταχύστροφους με $n_s = 225 - 325$

γ) υπερταχύστροφους με $n_s = 325 - 450$

Κάθε στρόβιλος Francis αποτελείται από δύο κυρίως μέρη: Το διανομέα και το στροφείο (πτερωτή). Ο διανομέας περιλαμβάνει μια σειρά από πτερύγια από χυτοσίδηρο ή χυτοχάλυβα, καθένα από τα οποία κινείται γύρω από άξονα και το σύνολο αυτών μαζί. Από την κίνηση αυτών των πτερυγίων, που γίνεται από τον ρυθμιστή, επιτυγχάνεται η μεταβολή της εισροής του νερού από το μηδέν μέχρι το μέγιστο, άρα έχουμε ανάλογη αυξομείωση του αριθμού των στροφών και της ωφέλιμης ισχύος του υδροστρόβιλου. Το στροφείο αποτελείται από δυο δακτυλίους από χυτοσίδηρο μεταξύ των οποίων είναι προσαρμοσμένα τα πτερύγια από σιδηρέλασμα (για μικρές πτώσεις) ή συμπαγή χυτοσίδηρο (για μεγάλες πτώσεις).

Οι υδροστρόβιλοι Francis τοποθετούνται με τον άξονα περιστροφής κατακόρυφο ή οριζόντιο. Ο κατακόρυφος άξονας παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι η γεννήτρια βρίσκεται πάνω από τον υδροστρόβιλο και συνεπώς είναι προφυλαγμένη από τυχόν ανυψώσεις της στάθμης του νερού σε εποχή μεγάλης ροής. Οι υδροστρόβιλοι Francis κατασκευάζονται είτε ανοικτού είτε κλειστού τύπου. Αν ο υδροστρόβιλος είναι ανοικτού τύπου, τότε αυτός λειτουργεί βυθισμένος εξ ολοκλήρου μέσα στο νερό. Οι υδροστρόβιλοι κλειστού τύπου περιβάλλονται είτε από μεταλλικό κύλινδρο (περίπτωση διπλού υδροστρόβιλου) είτε από σπειροειδές περίβλημα που είναι από χυτοσίδηρο και σπάνια σιδηρά ελάσματα. Αν ονομάσουμε P την ισχύ του στρόβιλου σε [HP], n τον αριθμό των στροφών ανά λεπτό, η οριακή τιμή της υδατόπτωσης H λαμβάνεται από την σχέση:

$$P \cdot n^2 = 4,4 \cdot H^{5/2} \quad (5.8)$$

Τα βασικά χαρακτηριστικά των υδροστρόβιλων Francis είναι:

α) Υδροστρόβιλος Francis αργόστροφος

- Κατάλληλος για αρκετά μεγάλες υδατοπτώσεις ($H = 150 - 750\text{m}$)

- Ισχύς μέχρι 400 MW

- Κατάλληλοι για λειτουργία υπό μεταβαλλόμενη παροχή

- Σχετικά καλοί για λειτουργία με μεταβλητή υδατόπτωση

β) Υδροστρόβιλος Francis ταχύστροφος

- Κατάλληλος για μεσαίες υδατοπτώσεις ($H = 20 - 150\text{m}$)
- Ισχύς μέχρι 800 MW
- Σχετικά καλοί για λειτουργία με μεταβαλλόμενη παροχή
- Κατάλληλοι για λειτουργία με μεταβλητή υδατόπτωση

5.5.4 Υδροστρόβιλοι Kaplan

Ο υδροστρόβιλος Kaplan χρησιμοποιείται για οικονομική εκμετάλλευση μικρών υδατοπτώσεων. Ο υδροστρόβιλος Kaplan στρέφεται πάνω σε οριζόντιο άξονα και διαθέτει τέσσερα ως έξι πτερύγια τύπου έλικα τοποθετημένα στο εσωτερικό κελύφους από χυτοσίδηρο που είναι εφοδιασμένο με θυρίδες όπως οι στρόβιλοι Francis. Τα πτερύγια του στροφείου μπορούν να ρυθμιστούν σε διάφορες γωνιακές θέσεις, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Αυτό επιτρέπει την μεταβολή της περιστροφικής ταχύτητάς τους και έτσι την αύξηση της απόδοσης σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Ο υδροστρόβιλος Kaplan κατασκευάζεται και με πτερύγια σταθερής γωνίας. Δηλαδή τα πτερύγια δεν δέχονται καμία μεταβολή της γωνιακής θέσης τους. Ο τύπος αυτός υδροστρόβιλου Kaplan είναι γνωστός σαν "υδροστρόβιλος με σταθερά πτερύγια". Οι υδροστρόβιλοι Kaplan υπερέρχουν από τους άλλους τύπους υδροστρόβιλων ως προς την ειδική ταχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι για μια δεδομένη υδατόπτωση και εισροή μπορεί να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ταχύτητα. Η μεγάλη ταχύτητα των υδροστρόβιλων Kaplan επιτυγχάνεται με την χρησιμοποίηση όσο το δυνατόν μικρών πτερυγιακών επιφανειών, που δημιουργούν μικρότερες απώλειες λόγω τριβών. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Κατάλληλος για χαμηλές υδατοπτώσεις ($H = 10 - 80\text{m}$)
- Ισχύς μέχρι 200 MW
- Κατάλληλοι για λειτουργία με μεταβαλλόμενη παροχή
- Κατάλληλοι για λειτουργία με μεταβλητή υδατόπτωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΥΠΕΡ- ΠΥΚΝΩΤΕΣ

6.1. Εισαγωγή ορισμοί

Πυκνωτής : είναι μια διάταξη που αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια, συσσωρεύοντας θετικό και αρνητικό φορτίο σε δυο ξεχωριστές πλάκες που καλούνται οπλισμοί, οι οποίες χωρίζονται μεταξύ τους με ένα διηλεκτρικό.

Χωρητικότητα (C) : είναι ο λόγος της ποσότητας αποθηκευμένου φορτίου Q, προς την τάση V ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή.

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εξαρτάται από την απόσταση d των οπλισμών του, από την διηλεκτρική σταθερά ε του διηλεκτρικού και από το εμβαδόν S της επιφάνειας του ενός οπλισμού του. Οι τρεις βασικές σχέσεις που περιγράφουν έναν πυκνωτή είναι:

$$Q = C \cdot V \quad (6.1)$$

$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (\text{για πυκνωτή επίπεδων οπλισμών}) \quad (6.2)$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (6.3)$$

Όπου:

- E η ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ο πυκνωτής Q το φορτίο των οπλισμών του

- V η τάση στους οπλισμούς του.

Από τη σχέση (6.3) βλέπουμε ότι αφού η αποθηκευμένη ενέργεια είναι ανάλογη της χωρητικότητας και του τετραγώνου της τάσης, για να αυξήσουμε την τιμή της πρέπει να αυξήσουμε μια από τις δυο αυτές παραμέτρους. Παρά το γεγονός ότι η αύξηση της

τάσης αυξάνει στο τετράγωνο την αποθηκευόμενη ενέργεια, η τάση διάσπασης του διηλεκτρικού και η οποία σχετίζεται με την απόσταση των οπλισμών του πυκνωτή, καθορίζει το ανώτατο όριο της τάσης αυτής. Η περαιτέρω αύξηση της τάσης διάσπασης έχει σαν συνέπεια την καταστροφή του διηλεκτρικού και βραχυκύκλωση του πυκνωτή. Συνεπώς, οι κύριοι τρόποι αύξησης της αποθηκευμένης ενέργειας αφορούν την αύξηση της χωρητικότητας C , η οποία συνεπάγεται αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς ή αύξηση της επιφάνειας των οπλισμών ή μείωση της μεταξύ τους απόστασης.

Πυκνότητα ενέργειας: είναι η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ο πυκνωτής ανά μονάδα μάζας του (σε Wh/Kg).

Απόδοση φόρτισης η_c : είναι ο λόγος της ενέργειας που τελικά αποθηκεύεται στον πυκνωτή (W_e), προς την ενέργεια που του προσφέρω κατά τη φόρτιση (W_c).

Απόδοση εκφόρτισης η_d : είναι ο λόγος της ενέργειας που αποδίδει ο πυκνωτής κατά την εκφόρτισή του (W_d), προς την ενέργεια που μπορεί να αποδώσει θεωρητικά (W_{td}).

Υπέρ-πυκνωτές: λέγονται και ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλής στρώσεως (Electrochemical Double Layer Capacitors (EDLCs)). Έχουν πολύ μεγάλη πυκνότητα ενέργειας σε σχέση με τους κοινούς πυκνωτές (η οποία είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη). Για παράδειγμα, ένας τυπικός D-cell ηλεκτρολυτικός πυκνωτής έχει χωρητικότητα μερικά mF ενώ ένας αντίστοιχος EDLC των ίδιων διαστάσεων θα είχε χωρητικότητα αρκετών Farad. Σήμερα, κατασκευάζονται υπέρ-πυκνωτές που φτάνουν και τα 5000 Farad με μέγιστη πυκνότητα ενέργειας που φτάνει τις 30Wh/Kg.

6.2. Εφαρμογές των πυκνωτών

Η χρήση των πυκνωτών στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας έχει να κάνει με εφαρμογές που απαιτούν παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, μιας και παρά το γεγονός της ανακάλυψης των υπέρ-πυκνωτών, με τη χωρητικότητά τους να είναι πολλαπλάσια αυτής των συμβατικών πυκνωτών όπως θα δούμε παρακάτω, αυτή να παραμένει περιορισμένη για τη χρησιμοποίησή τους σε συστήματα αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Η κύρια εφαρμογή των πυκνωτών στα συστήματα μεταφοράς και διανομής έχει να κάνει με την αντιμετώπιση των βυθίσεων τάσεως και στιγμιαίων διακοπών.

6.3. Θεωρία υπέρ-πυκνωτών

Λόγο της τεράστιας διαφοράς της χωρητικότητας και πυκνότητας ενέργειας μεταξύ υπέρ-πυκνωτών και συμβατικών πυκνωτών, είναι φανερό ότι οι πρώτοι είναι κατάλληλοι για ένα μεγάλο πλήθος νέων εφαρμογών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με τους πυκνωτές αυτούς, γι'αυτό και θα μελετήσουμε παρακάτω τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Οι υπέρ-πυκνωτές αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια από ενεργό άνθρακα, έναν διαχωριστή και τον ηλεκτρολύτη. Εκτός από την χωρητικότητα, δυο άλλες σημαντικές παράμετροι είναι αντιστάσεις ESR και EPR. Η ισοδύναμη εν σειρά αντίσταση (Equivalent Series Resistance, ESR) περιλαμβάνει την αντίσταση των ηλεκτροδίων, του ηλεκτρολύτη και την αντίσταση επαφών, η οποία είναι υπεύθυνη για τη κατανάλωση ενέργειας λόγω της εσωτερικής θερμότητας κατά τη φάση της φόρτισης και εκφόρτισης. Η αντίσταση αυτή είναι της τάξης των $\mu\Omega$, αλλά επιδρά σημαντικά στην πυκνότητα ενέργειας του πυκνωτή. Όσο περισσότερες στρώσεις έχει το διαχωριστικό, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της. Η EPR είναι μια ισοδύναμη εσωτερική αντίσταση μερικών εκατοντάδων $K\Omega$ και καθορίζει το ρεύμα διαρροής, το ρεύμα εκείνο δηλαδή που διαρρέει τον πυκνωτή όταν αυτός ανενεργός. Προκειμένου να αυξήσουμε την τάση και χωρητικότητα ενέργειας στους υπέρ-πυκνωτές, είναι αναγκαίο να τους συνδέουμε μεταξύ τους σε συνδυασμούς σειράς και παράλληλα. Λόγο της ισοδύναμης εν σειρά αντίστασης ESR η οποία προκαλεί πτώση τάσης και απώλεια ισχύος, είναι ασύμφορο να διοχετεύσουμε την αποθηκευμένη ενέργεια από τους υπερπυκνωτές απευθείας στο φορτίο. Στους πίνακες των παρακάτω σχημάτων βλέπουμε μερικούς κατασκευαστές υπέρ-πυκνωτών καθώς και την εξέλιξη του κόστους ανά Farad.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΕΣ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΠΕΡ-ΠΥΚΝΩΤΩΝ
Power Star China	50 F/2.7V,
Make	300F/2.7V,
(single Unit)	600F/2.7 V, ESR less than 1m Ω .

Panasonic Make (Single Unit)	0.022-70F.2.1-5.5V, ESR 200 mΩ-350 Ω
Maxwell Make (Module)	63F/125V,150A ESR 18 mΩ 94F/75 V,50 A.ESR 15 mΩ
Vinatech Make	10-600F/2.3V,ESR 400 -20 mΩ. 3-350F/2.7.ESR 90-8 mΩ
Nesscap Make (module)	15V/33F , ESR 27 mΩ 340V/51F,ESR 19mΩ

Year	Cost /Farad (\$)	Cost/kJ (\$)
1996	0.75	281.55
1998	0.40	151.23
2000	0.01	32
2002	0.023	7.51
2006	0.010	2.85
2010	0.005	1.28

Σχ.28 Κατασκευαστές υπέρ-πυκνωτών καθώς και την εξέλιξη του κόστους ανά Farad

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟ ΑΕΡΑ

7.1. Εισαγωγή

Η αποθήκευση ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES) αποτελεί μια εμπορική, γενικής χρήσης τεχνολογία, κατάλληλη να παρέχει μακροπρόθεσμη αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται υπό μορφή συμπιεσμένου αέρα σε κατάλληλες δεξαμενές-αποθήκες. Στα συστήματα CAES, η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται οδηγώντας σε αεριοστρόβιλους τα παράγωγα της καύσης του συμπιεσμένου αέρα που ανακτούμε από πηγές στο υπέδαφος, με μικρή ποσότητα φυσικού αερίου. Η τεχνολογία αυτή βρίσκει εφαρμογή στην υποστήριξη φορτίου, με τις μονάδες CAES να είναι της τάξης των εκατοντάδων έως χιλιάδων MW, σε αντίθεση με τα συστήματα flywheels και υπέρ-πυκνωτών που λόγω της μικρής διάρκειας αποθήκευσης περιορίζονται σε εφαρμογές σταθεροποίησης τάσης κυρίως.

Βασικός σκοπός των συστημάτων CAES είναι να αξιοποιούν λίγη χαμηλού κόστους, εκτός αιχμής ηλεκτρική ενέργεια από τις μονάδες βάσης, για την παραγωγή και συμπίεση του αέρα, τον οποίο και θα αποθηκεύουν στη συνέχεια τη νύχτα μέσα σε ειδικές υπόγειες υπόγεια δεξαμενές. Κατά τη διάρκεια της ημέρας και όταν οι απαιτήσεις σε ενέργεια αυξηθούν, η μονάδα θα αντλεί τον συμπιεσμένο αέρα από τη δεξαμενή και αφού τον αναμίξει με φυσικό αέριο θα τροφοδοτεί τους αεριοστρόβιλους με τα παράγωγα της καύσης.

Εκτός από τις δυο σοβαρές μονάδες σε McIntosh (Alabama) και Huntorf (Germany) συνολικής ισχύς 300MW μια νέα μονάδα CAES ισχύς 2700MW στο Norton (Ohio) άρχισε να κατασκευάζεται το 2007. Η ολοκλήρωση της κατασκευής αυτής αυτό θα αποτελεί τη μεγαλύτερη μονάδα CAES παγκοσμίως, ικανή να εξυπηρετεί περίπου 650.000 σπίτια. Ο συνδυασμός συμπιεσμένου αέρα, η παραγωγή ισχύος και οι προχωρημένη τεχνολογία κάτω από το έδαφος θα αποτελέσουν ένα έργο παγκόσμιας σημασίας το οποίο θα ενθαρρύνει επιπλέον την ιδέα της εκμετάλλευσης των συστημάτων συμπιεσμένου αέρα.

7.2. Κατάλληλα εδάφη για χρήση σαν αποθηκών συμπιεσμένου αέρα

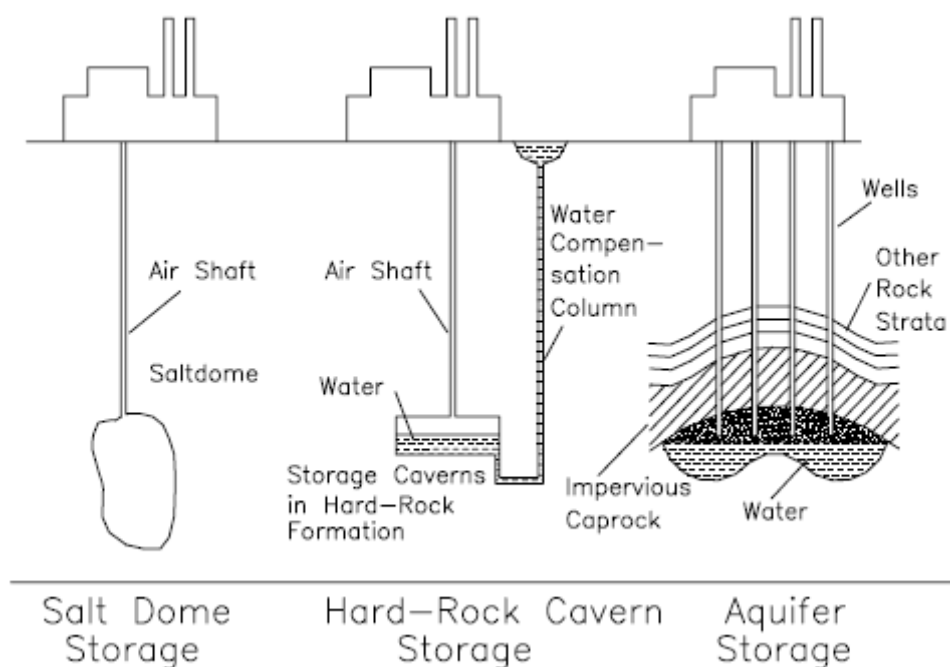
Οι γεωλογικές τοποθεσίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αποθήκες συμπιεσμένο αέρα στα συστήματα CAES χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

α) κοιλότητες άλατος

β) εδάφη πορώδων βράχων

γ) εδάφη σκληρών βράχων

Μελέτες έχουν δείξει ότι το 75% του υπεδάφους της Αμερικής μόνο είναι κατάλληλο χρήση ως δεξαμενών αποθήκευσης σε συστήματα CAES. Οι έρευνες αυτές είναι μακροσκοπικές και δεν επιλέγουν τις περιοχές σύμφωνα με τα λεπτομερή χαρακτηριστικά που είναι αναγκαία για να εκτιμήσουν πλήρως την καταλληλότητά τους. Οι μελέτες αυτές ενθαρρύνουν την περαιτέρω έρευνα και λεπτομερή καταγραφή των ειδικών χαρακτηριστικών των υποψηφίων περιοχών, προκειμένου να αναγνωριστούν οι πραγματικά κατάλληλες γεωλογικές τοποθεσίες



Σχ.29 Τυπικές υπόγειες γεωλογικές τοποθεσίες για αποθήκευση

7.2.1. Κοιλότητες άλατος

Και οι δυο μονάδες CAES που είναι σε λειτουργία σήμερα, χρησιμοποιούν αυτού του είδους υπέδαφος για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το υπέδαφος αυτό είναι κατάλληλο για την εύκολη, άμεση και χαμηλού κόστους κατασκευή και λειτουργία τέτοιων αποθηκών. Το κόστος κατασκευής της φτάνει τα 2\$ ανά παραγόμενης KWh, εφόσον είναι διαθέσιμη άφθονη παροχή νερού και εφόσον η άλμη που εξορύχεται μπορεί να απομακρυνθεί εύκολα. Επιπλέον, λόγω των ελαστο-πλαστικών ιδιοτήτων του άλατος, οι αποθήκες σε τέτοια εδάφη παρουσιάζουν ελάχιστη διαρροή του συμπιεσμένου αέρα. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τα κυριότερα μέρη στην Ευρώπη που διαθέτουν υπέδαφος με κοιλότητες άλατος, κατάλληλες για εκμετάλλευση από συστήματα CAES.



Σχ.30 περιοχές στην Ευρώπη με εδάφη που περιέχουν κοιλότητες άλατος για εκμετάλλευση από μονάδες CAES

7.2.2. Εδάφη πορώδων βράχων

. Οι αποθήκες συμπιεσμένου αέρα σε δεξαμενές τέτοιου εδάφους αποτελούν την πιο

φτηνή επιλογή αποθήκευσης, με κόστος μόλις 0,11\$ ανά παραγόμενη KWh, κατάλληλη για μεγάλα συστήματα CAES. Μεγάλες και ομογενείς τέτοιες περιοχές μπορούν να βρεθούν σε πολλές περιοχές κατά μήκος της κεντρικής Αμερικής. Μια μονάδα των 25MW σε έδαφος πορώδων βράχων δοκιμάστηκε για αρκετά χρόνια στην Sesta της Ιταλίας. Παρά το γεγονός ότι οι δοκιμές στέφθηκαν με επιτυχία, ένα απρόσμενο γεωλογικό γεγονός οδήγησε στην διακοπή της λειτουργίας και το κλείσιμο της μονάδας. Επιπρόσθετα, το Αμερικάνικο Τμήμα Ενέργειας έχει είδη συντάξει δοκιμές σε πορώδεις σχηματισμούς στο Pittsfield (Illinois), για την εξακρίβωση της καταλληλότητάς τους στη χρήση συστημάτων CAES. Η κατασκευή του πρώτου εμπορικού εργοστασίου με δεξαμενή σε εδάφη πορώδων βράχων προγραμματίζεται να ξεκινήσει στο Dallas (Iowa) το 2009.

7.2.3. Εδάφη σκληρών βράχων

Το κόστος διάνοιξης αποθήκης συμπιεσμένου αέρα σε εδάφη σκληρών βράχων είναι αρκετά υψηλό, φτάνοντας τα 30\$ ανά παραγόμενη KWh και μόνο στις περιπτώσεις όπου υπάρχει ήδη έτοιμη κοιλότητα το κόστος για την αξιοποίησή της σαν δεξαμενή φτάνει τα 10\$ ανά παραγόμενη KWh. Η δεύτερη αυτή περίπτωση βρίσκει εφαρμογή στη νέα μονάδα CAES του Norton (Ohio) η οποία αξιοποιεί ένα ανενεργό ορυχείο ασβεστόλιθου. Λεπτομερείς μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί για την αποτίμηση της σταθερότητας των βράχων, των διαρροών συμπιεσμένου αέρα και απωλειών ενέργειας σε μια μονάδα που χρησιμοποιεί δεξαμενή σε εδάφη σκληρών βράχων. Δυο πρόσφατες τέτοιες δοκιμές έγιναν η μια σε ειδική σήραγγα του εγκαταλελειμμένου ανθρακωρυχείου της Sunagaawa και η άλλη σε ειδική σήραγγα του εγκαταλελειμμένου ορυχείου της Kamiooka. Λόγο του υψηλού κόστους κατασκευής και την περιορισμένη διαθεσιμότητα προϋπαρχόντων κοιλοτήτων και εγκαταλελειμμένων ορυχείων, η επιλογή αυτή δεν είναι κατάλληλη για τη κατασκευή μεγάλων μονάδων CAES. Παρόλο που η μελλοντική ανάπτυξη της τεχνολογίας διάνοιξης σηράγγων θα περιορίσει το κόστος εκμετάλλευσης τέτοιων γεωλογικών εδαφών, οι δυο υπόλοιπες επιλογές παρέχουν για την ώρα τις καλύτερες ευκαιρίες για ανάπτυξη συστημάτων CAES.

7.3. Λειτουργία της μονάδας CAES

Μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα λειτουργεί σχεδόν με τον ίδιο τρόπο όπως και μια μονάδα με αεριοστρόβιλους μόνο που οι φάσεις συμπίεσης και εκτόνωσης συμβαίνουν ανεξάρτητα και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς αεριοστρόβιλους που χρησιμοποιούν τα δυο τρίτα της παραγόμενης ισχύς για την κίνηση του συμπιεστή, στις μονάδες CAES όλη η παραγόμενη ισχύς διατίθεται για παραγωγή ηλεκτρισμού.

Κατά τη λειτουργία συμπίεσης του αέρα (φάση αποθήκευσης), χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια (P_c) για να κινήσει μια σειρά συμπιεστών οι οποίοι εγχέουν αέρα σε μια υπόγεια δεξαμενή αποθήκευσης. Κατά τη φάση της συμπίεσης, ειδικοί ψύκτες ελατώνουν την θερμοκρασία του εγχεόμενου αέρα με αποτέλεσμα να αυξάνουν την απόδοση της συμπίεσης, μειώνοντας τον απαιτούμενο όγκο της δεξαμενής αποθήκευσης. Κατά τη λειτουργία εκτόνωσης (παραγωγή ενέργειας) τα παραγόμενα αέρια της καύσης του συμπιεσμένου αέρα με φυσικό αέριο, οδηγούνται στους αεριοστρόβιλους (συνήθως δυο βαθμίδων) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρησιμοποίηση φυσικού αερίου κατά τη φάση της εκτόνωσης γίνεται για αύξηση της απόδοσης των στρόβιλων. Η εκτόνωση του αέρα από τη δεξαμενή αποθήκευσης απευθείας στο στρόβιλο χωρίς καύση, θα απαιτούσε περισσότερη ροή αέρα για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας.

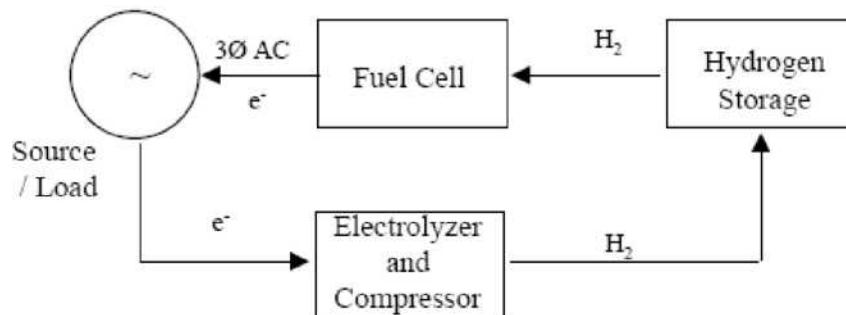
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟ (HYDRICITY)

8.1. Εισαγωγή

Μια άλλη παραλλαγή ηλεκτροχημικής αποθήκευσης είναι η κυψέλη καυσίμων. Γενικά, οι κυψέλες καυσίμων μετατρέπουν την αποθηκευόμενη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αποτελούνται από δυο ηλεκτρόδια, την άνοδο και τη κάθοδο τα οποία χωρίζονται με ηλεκτρολύτη. Η κυψέλη καυσίμων είναι την ουσία είναι μία μπαταρία που μπορεί επίσης να παραγάγει δική της ισχύ αν τροφοδοτηθεί με καύσιμο. Τέτοια καύσιμα είναι το υδρογόνο, είτε με την καθαρή μορφή του είτε σε μορφή υδρογονανθράκων (π.χ. μεθανόλη, φυσικό αέριο ή βενζίνη) από τους οποίους μπορεί αργότερα να εξαχθεί. Το υδρογόνο που παράγεται από τη μετατροπή ενός από τα καύσιμα που προαναφέρθηκαν ή από την ‘ανανεώσιμα τροφοδοτημένη’ ηλεκτρόλυση του νερού, αντιπροσωπεύει μία κατάλληλη αποθήκευση ενέργειας. Αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί είτε να τροφοδοτήσει ένα κύτταρο καυσίμου για την απευθείας μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια είτε να αποθηκευτεί για μετέπειτα χρήση.

Η ηλεκτροχημική ενεργειακή μετατροπή σε ένα κύτταρο καυσίμων είναι περιβαλλοντικά καθαρή. Πρώτον γιατί το κύριο προϊόν αποβλήτων είναι το νερό (το υδρογόνο αντιδρά χημικά με το οξυγόνο του αέρα για να διαμορφώσει νερό, απελευθερώνοντας ιόντα κατά την αντίδραση) και κατά δεύτερον είναι πολύ πιο αποδοτικότερο από το να καίγεται σε μία μηχανή καύσης για να παράγει αρχικά θερμική ενέργεια και ύστερα μηχανική. Το μπλοκ-διάγραμμα μιας μονάδας αποθήκευσης με υδρογόνο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Είναι λίγο πιο πολύπλοκο από τα διαγράμματα των υπόλοιπων αποθηκευτικών διατάξεων μιας και απαιτείται ξεχωριστή διεπαφή για τη φόρτιση και εκφόρτιση. Ο ηλεκτρολύτης που παρέχει το υδρογόνο και η κυψέλη καυσίμου για τη μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια. Παρόλο που είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε αντιστρεπτές κυψέλες για να κάνουν και τις δυο εργασίες, είναι πιο οικονομικό να έχουμε δυο ξεχωριστά υποσυστήματα.



Σχ.31 Μπλοκ-διάγραμμα μονάδας αποθήκευσης με υδρογόνο

8.2. αποθήκευσης υδρογόνου

Σκοπός των συστημάτων αποθήκευσης με υδρογόνο είναι η αξιοποίηση της εκτός αιχμής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση του νερού. Το υδρογόνο στη συνέχεια αποθηκεύεται σε υγρή ή αέρια μορφή, για να χρησιμοποιηθεί αργότερα ως καύσιμο από τις κυψέλες υδρογόνου. Τα συστήματα αυτά έχουν ως στόχο να συνδυαστούν με αιολικά πάρκα για την αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους εκτός αιχμής. Τα συστήματα αυτά μειονεκτούν στη μικρή απόδοσή τους (περίπου 35-40%) και στο ότι δεν έχουν δοκιμαστεί σε εφαρμογές της τάξης των MW (όπως δηλαδή τα συστήματα PHS και CAES).

Η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεσματικά και ακίνδυνα αποτελεί ακόμη αντικείμενο έρευνας. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σαν αέριο, σαν υγρό αν ψυχθεί με κρυοστατικό τρόπο σε θερμοκρασία μικρότερη των 20°K ή, θεωρητικά, σαν στερεό σε θερμοκρασία κάτω των 4.2°K. Μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σε συνδυασμό με άλλα υλικά ως υδρίδιο (ένωση υδρογόνου), σαν υδρογονάνθρακας από τον οποίο μπορεί να παρασκευαστεί, σαν μια άλλη χημική ουσία πλούσια σε υδρογόνο όπως η αμμωνία, ως αέριο που έχει προσροφηθεί πάνω σε ένα στερεό υλικό ή μέσα στα διάκενα ενός υλικού με μικροπόρους. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια δοκιμαστική μονάδα ηλεκτρόλυσης, για την αποθήκευση υδρογόνου κατά τις περιόδους εκτός αιχμής και τη χρησιμοποίησή της για τον ανεφοδιασμό των οχημάτων υδρογόνου του αιολικού πάρκου του Palm Springs της Καλιφόρνιας.



Σχ.32 Εγκατάσταση μονάδας ηλεκτρόλυσης κοντά στο αιολικό πάρκο του Palm Springs (California)

8.2.1 υγρή μορφή

Η υγρή αποθήκευση ως κρυογενές υγρό θα επέφερε υψηλές ενεργειακές πυκνότητες αλλά η διαδικασία ρευστοποίησης και το επόμενο στάδιο της επαναφοράς σε υγρή μορφή πριν από τη χρήση θα πρόσθεταν δαπάνες και θα περιλάμβαναν ενεργειακές απώλειες μέχρι και 30%. Παρόλα αυτά πρωτότυπα οχήματα-δεξαμενές υπάρχουν ήδη, ενώ μεγάλες επιχειρήσεις στο χώρο του αυτοκινήτου συνεργάζονται για να εξετάσουν το πρόβλημα του υγρού υδρογόνου. Ειδικές έρευνες στοχεύουν στο να μειώσουν το βάρος των κρυογονικών δεξαμενών στο ένα τρίτο και τα μέχρι τώρα ποσοστά εξάτμισης στο μισό.

8.2.2. Αεριώδης μορφή

Τελευταία επίσης, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην αποθήκευση υδρογόνου με την κανονική (σε κανονικές συνθήκες) αεριώδη μορφή του, διατηρώντας το υπό πίεση μέσα στις δεξαμενές. Ένα γραμμάριο υδρογόνου καταλαμβάνει όγκο 11 λίτρων κανονικά και

τόσες ατμόσφαιρες πίεσης πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε να επιτευχθεί μία χρήσιμη πυκνότητα ενέργειας. Μέχρι τώρα έχουν χρησιμοποιηθεί πιέσεις μέχρι 5000psi (350 ατμόσφαιρες ή bar) και πρόσφατα οι αυτοκίνητες δεξαμενές 10000psi (700bar) έχουν πετύχει την πιστοποίηση.

Λαμβάνοντας υπόψη το ζήτημα της ασφάλειας, οι δεξαμενές πρέπει να περάσουν μια αυστηρή σειρά από εκρήξεις, δοκιμές πίεσης, θερμοκρασίας, διάβρωσης κ.α. Αρκετοί είναι εκείνοι που θεωρούν την αποθήκευση υδριδίων μετάλλων πιο ελπιδοφόρα από τη ρευστοποίηση ή από τη διατήρηση του υδρογόνου υπό πίεση. Τα υδρίδια παράγονται με την επαφή του αερίου υδρογόνου με το μέταλλο και στη συνέχεια με συμπίεση του αερίου, σε τιμές πίεσης όπου το υδρογόνο συμπυκνώνεται στην στερεά του μορφή, διαμορφώνοντας ένα γνωστό υδρίδιο με το μέταλλο. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας 'φόρτισης' απελευθερώνεται θερμότητα και στη συνέχεια απαιτείται θερμότητα για την εξαγωγή υδρογόνου από το υδρίδιο.

Οι υψηλότερες χωρητικότητες προσφέρονται από μέταλλα που διαμορφώνουν υδρίδια στις υψηλές θερμοκρασίες (250 - 350°C), αλλά παρόμοιες θερμοκρασίες απαιτούνται για να ελευθερώσουν ξανά το υδρογόνο όταν χρειαστεί. Αυτό καθιστά το σύστημα ακατάλληλο για πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένου και του αυτοκινήτου. Γι' αυτό οι ερευνητές επιδιώκουν τη χρήση κραμάτων και άλλων υλικών που προσφέρουν αυξημένα ποσοστά απορρόφησης - απελευθέρωσης σε κανονικότερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Άλλα επιθυμητά χαρακτηριστικά των υλικών είναι η δυνατότητα να ανακυκλώνονται πολλές φορές χωρίς υποβάθμιση, να απορροφούν μόνο το υδρογόνο χωρίς σχετικές ακαθαρσίες και να είναι ελέγξιμα τα ποσοστά απορρόφησης και απελευθέρωσης.

Ορισμένα υδρίδια, όπως αυτά που διαμορφώνονται με σίδηρο - τιτάνιο και λανθάνιο - κράματα νικελίου, προσφέρουν υψηλή ογκομετρική αποδοτικότητα αποθήκευσης αλλά είναι βαριά. Υδρίδια του μαγνησίου, μαγνήσιο - νικέλιο και μαγνήσιο - κράματα τιτανίου είναι πολύ ελαφρύτερα.

Πολλά υποσχόμενη είναι η προσρόφηση αερίου υδρογόνου από στερεό άνθρακα, ένα υλικό που έχει μια πολύ λεπτή ιδιαίτερα πορώδη δομή στην οποία οι μυριάδες των μορίων υδρογόνου μπορούν να 'αποθηκευτούν'. Αν και ικανά να συναγωνιστούν την πυκνότητα αποθήκευσης του υγρού υδρογόνου, τα ενεργοποιημένα συστήματα άνθρακα που ερευνήθηκαν ως τώρα χρειάστηκαν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (υγρού αζώτου) για την αποθήκευση και τη διατήρηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΩΝ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

9.1. Σύγκριση με βάση την ταχύτητα εκφόρτισης

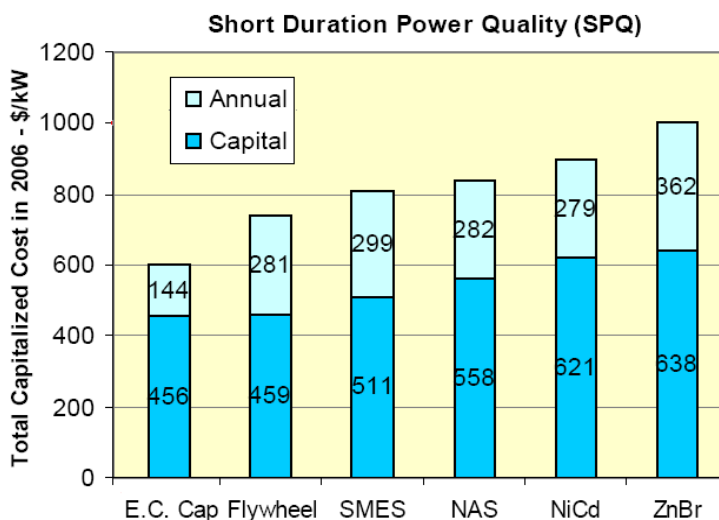
Με κριτήριο την ταχύτητα εκφόρτισης, πρώτα στην κλίμακα είναι τα υπεραγώγιμα πηνία και οι υψηλής ισχύος πυκνωτές με χρόνο εκφόρτισης λίγα δευτερόλεπτα. Η ισχύς των πυκνωτών υψηλής ισχύος κυμαίνεται από 100kW ως 1MW. Με χρόνο εκφόρτισης αρκετά δευτερόλεπτα ως και μερικά λεπτά ακολουθούν οι υψηλής ισχύος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

9.2. Σύγκριση με βάση το κόστος εγκατάστασης ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας

Με κριτήριο το κόστος εγκατάστασης ανά μονάδα ενέργειας (\$/kWh) φθηνότερες είναι οι διατάξεις αντλησιοταμίευσης με 40-100\$/kWh, οι μπαταρίες ροής (flow batteries) με κόστος από 100-1100\$/kWh, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως με κόστος 200-1000\$/kWh, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου, οι λιθίου-ιόντος και οι μακράς διάρκειας στρεφόμενες μάζες με 800-2000\$/kWh και στη συνέχεια οι μακράς διάρκειας στρεφόμενες μάζες και οι υψηλής ισχύος υπέρ-πυκνωτές με κόστος που πλησιάζει τα 10000\$/kWh.

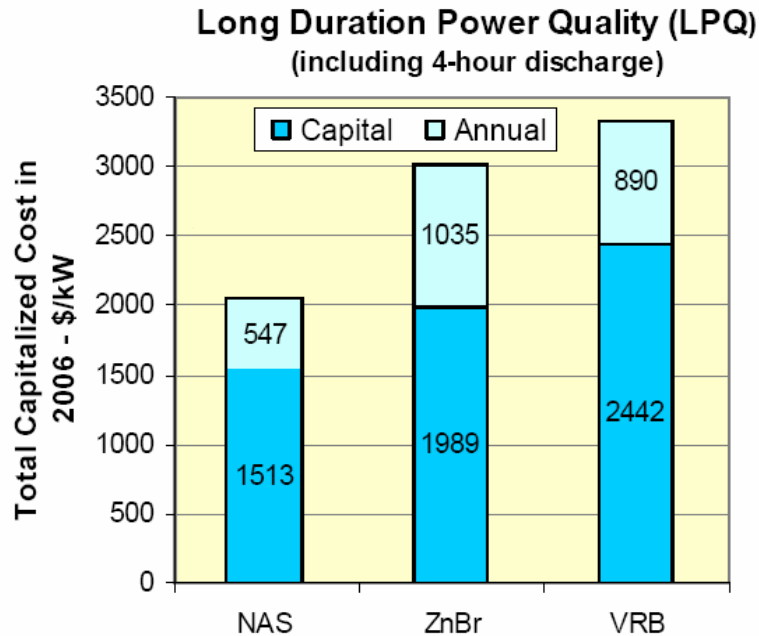
Τα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζουν το κόστος του αρχικού κεφαλαίου καθώς και το ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης των διάφορων συστημάτων αποθήκευσης, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή που αναλαμβάνουν. Αναφέρεται εδώ ότι οι τιμές αυτές αφορούν μονάδα αποθήκευσης των 10MW με τιμή του δολαρίου αυτή του έτους 2003. Οι μέθοδοι αποθήκευσης που αναφέρονται σε κάθε περίπτωση δεν είναι και οι μοναδικές που μπορούν να εφαρμοστούν, αλλά οι οικονομικά πιο συμφέρουσες.

Περίπτωση 1η. Μικρής διάρκειας βελτίωση της ποιότητας ισχύος (Short Duration Power Quality, SPQ): η περίπτωση αυτή αφορά την ανακούφιση των βυθίσεων τάσεως. Σαν αναφορά θεωρούνται οι βυθίσεις τάσης διάρκειας 2 sec που συμβαίνουν το πολύ ανά 1 ώρα, με το πολύ 5 τέτοιες βυθίσεις την ημέρα και μέγιστο αριθμό 100 τον χρόνο. Μικρής διάρκειας βελτίωση ποιότητας ισχύος μπορούν να παρέχουν οικονομικά, κυρίως οι μονάδες υπέρ-πυκνωτών, οι μονάδες flywheels, οι μονάδες υπεραγωγίμων πηνίων και οι μονάδες μπαταριών NaS, NiCd και ZnBr.



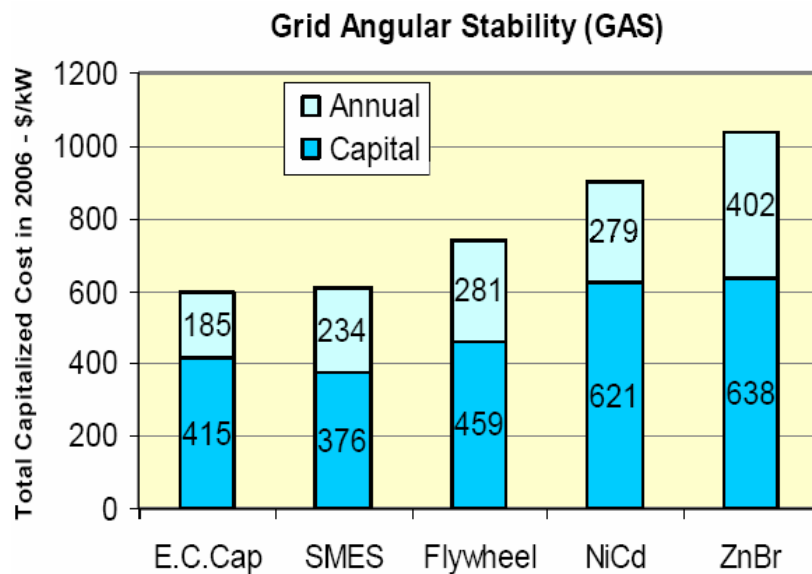
Σχ.33 Ολικό κόστος συγκρινόμενο με τη παροχή βελτίωσης ποιότητας μικρής διάρκειας

Περίπτωση 2η. Μακράς διάρκειας βελτίωση της ποιότητας ισχύος (Long Duration Power Quality, LPQ): η περίπτωση αυτή αφορά την ανακούφιση των βυθίσεων τάσεως μικρής διάρκειας SPQ, καθώς και υποστήριξη φορτίου για 4 ώρες, μια φορά το χρόνο. Μακράς διάρκειας βελτίωση ποιότητας ισχύος μπορούν να παρέχουν οικονομικά, κυρίως οι μονάδες μπαταριών NaS, ZnBr και VRB



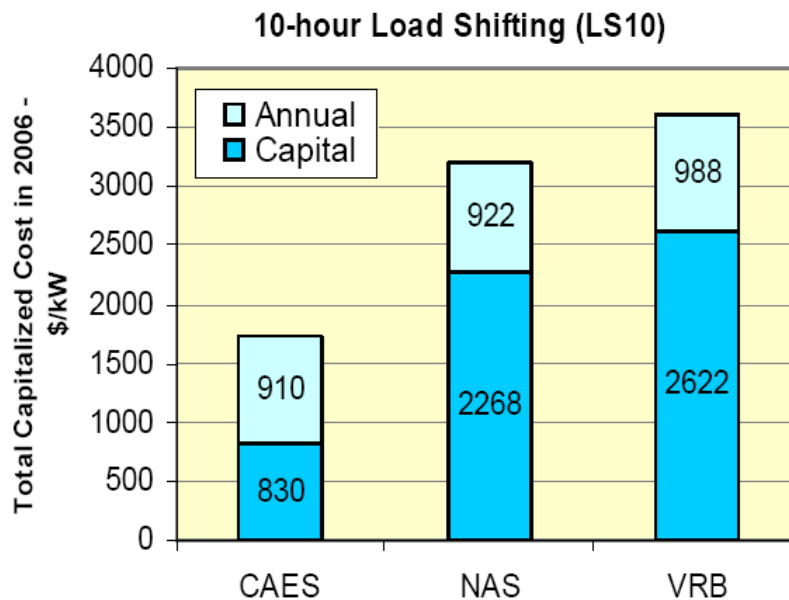
Σχ.34 Ολικό κόστος συγκρινόμενο με τη παροχή βελτίωσης ποιότητας μεγάλης διάρκειας

Περίπτωση 3η. Ευστάθεια ταλαντώσεων ισχύος (Grid Angular Stability GAS): η περίπτωση αυτή αφορά την εξομάλυνση των ταλαντώσεων ισχύος, εγχέοντας ή απορροφώντας ενεργό ισχύ για περίοδο 1-2 sec. Ευστάθεια ταλαντώσεων ισχύος μπορούν να παρέχουν οικονομικά, κυρίως οι μονάδες υπέρ- πυκνωτών, οι μονάδες υπεραγωγίμων πηνίων, οι μονάδες flywheels και οι μονάδες μπαταριών, NiCd και ZnBr.



Σχ.35 Ολικό κόστος συγκρινόμενο με τη παροχή βελτίωσης ευστάθειας ταλαντώσεων

Περίπτωση 4η. 10 ώρες υποστήριξη Φορτίου (10-hr Load Shifting, LS10): η περίπτωση αυτή αφορά την ανάληψη του φορτίου τις ώρες αιχμής, για συνολική διάρκεια 10 ωρών. Σαν αναφορά, θεωρείται ότι το γεγονός αυτό γίνεται μια φορά την ημέρα, 250 φορές το χρόνο. 10 ωρών υποστήριξη φορτίου μπορούν να παρέχουν οικονομικά, κυρίως οι μονάδες υπέρ- πικνωτών, οι μονάδες υπεραγωγίμων πηγίων, οι μονάδες CAES και οι μονάδες μπαταριών, NaS και VRB.



Σχ. 36 Ολικό κόστος συγκρινόμενο με τη παροχή 10 hour Load Shifting

9.3. Σύνοψη εργασίας,

Ως προς αυτές τις κατηγορίες, τα διάφορα αποθηκευτικά μέσα έχουν ταξινομηθεί στους παρακάτω πίνακες:

Π Ι Ν Α Κ Α Σ 19				
Διατάξεις πολύ βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης, κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος				
Σύστημα πολύ βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης	Κόστος ισχύος (€/kW)	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Χωρητικότητα αποθήκευσης (χρόνος)	Απόδοση μετατροπής
SMES	300	72000	Δευτερόλεπτα	0,95
Στρεφόμενες μάζες (χαμηλή ταχύτητα)	280	300	Δευτερόλεπτα	0,9
Μπαταρίες (μολύβδου-οξέος)	175	100 – 200	Δευτερόλεπτα	0,85
Συμπιεσμένος αέρας	400	10 – 20	Δευτερόλεπτα	0,5 – 0,7
Υπέρ-πυκνωτές	300	82000	Δευτερόλεπτα	0,95

Π Ι Ν Α Κ Α Σ 20				
Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης, κατάλληλες για εξομάλυνση των διακυμάνσεων της αιολικής ισχύος				
Σύστημα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης	Κόστος ισχύος (€/kW)	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Χωρητικότητα αποθήκευσης (χρόνος)	Απόδοση μετατροπής
Στρεφόμενες μάζες (ρυθμισμένη ταχύτητα)	100	125	Λίγα λεπτά	0,95
Στρεφόμενες μάζες (υψηλή ταχύτητα)	25000	350	Λίγα λεπτά – μία ώρα	0,93
Μπαταρίες (μολύβδου-οξέος)	175	200	Λίγα λεπτά – μία ώρα	0,85
Συμπιεσμένος αέρας	400	10-20	Λίγα λεπτά – μία ώρα	0,5-0,7

Π Ι Ν Α Κ Α Σ 21				
Διατάξεις μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης, κατάλληλες για εξομάλυνση του φορτίου				
Σύστημα μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης	Κόστος ισχύος (€/kW)	Κόστος ενέργειας (€/kWh)	Χωρητικότητα αποθήκευσης (χρόνος)	Απόδοση μετατροπής
Μπαταρίες (μολύβδου-οξέος)	175	200	Πάνω από 10 ώρες	0,85
Συμπιεσμένος αέρας	575	2	Πάνω από 10 ώρες	0,79

9.4 Συμπεράσματα εργασίας

Τα συμπεράσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Η ενεργειακή αποθήκευση είναι σημαντική για τα ηλεκτρικά συστήματα, δεδομένου ότι επιτρέπει την αυξημένη χρησιμοποίηση του συστήματος και βελτιώνει γενικότερα την ευελιξία, την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα του δικτύου. Παράλληλα, διευκολύνει την ενσωμάτωση σε μεγάλη κλίμακα των διακοπτόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε απομακρυσμένα, μη διασυνδεδεμένα συστήματα, όπως είναι αυτά πολλών ελληνικών νησιών, όπου η ενέργεια παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (π.χ. αιολική ενέργεια), η ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης είναι απαραίτητη. Η ανάγκη αυτή δεν είναι προφανής στα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα, εντούτοις η ενεργειακή αποθήκευση θα είναι αναπόφευκτη στο μέλλον. Πράγματι, με το «άνοιγμα» της ενεργειακής αγοράς, πολλές διαλείπουσες ανανεώσιμες πηγές θα συνδεθούν σε ηλεκτρικά δίκτυα, με αποτέλεσμα την ασταθή λειτουργία των τελευταίων. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, η αποθήκευση της ενέργειας σε συνδυασμό με την ορθολογική διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών αποτελούν τη βέλτιστη λύση.
- Από τις τεχνολογίες μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης και τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα είναι μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις, με ικανότητα να αποθηκεύουν πολύ

- μεγάλες ποσότητες ενέργειας και για μακράς διάρκειας χρονικές περιόδους. Από την άλλη, τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τόσο των διατάξεων αποθήκευσης μπαταριών όσο και των συστημάτων κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, καθιστούν τις τεχνολογίες αυτές ιδανικές για κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής.
- Οι διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι σφόνδυλοι, οι υπερ-πυκνωτές και τα υπεραγωγίμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης χρησιμοποιούνται επίσης σε κατανεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής και είναι κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Για παράδειγμα, οι υπερ-πυκνωτές χρησιμοποιούνται κατάλληλα για την ενίσχυση των ηλεκτρικών συστημάτων μετά από μια μικρής διάρκειας διαταραχής του συστήματος. Από την άλλη, οι σφόνδυλοι, λόγω της υψηλότερης αποθηκευτικής τους ικανότητας, αποτελούν τις πιο κατάλληλες διατάξεις για να διατηρούν σταθερή την τάση, ειδικά σε συστήματα με σημαντική διείσδυση διαλείπουσας ανανεώσιμης ενέργειας, όπως η αιολική. Τέλος, τα υπεραγωγίμα μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης είναι οι πλέον κατάλληλες διατάξεις για εφαρμογές μεταφοράς και διανομής.
 - Η ανάπτυξη των τεχνικών αποθήκευσης απαιτεί συνεχείς βελτιώσεις, καθώς και βελτιστοποίηση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή που να μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί και αντίστροφα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- 1) Ζερβός Α., «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Ε.Μ.Π., 2007
- 2) Μαθιουδάκης Κ., «Λειτουργία Αεριοστροβίλων και Ατμοστροβίλων», Ε.Μ.Π., 2007
- 3) Μπεργελές Γ., «Ανεμοκινητήρες», Εκδόσεις Συμεών, 2005
- 4) Παπαντώνης Δ., «Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα», Εκδόσεις Συμεών, 2007
- 5) Παπαντώνης Δ., «Υδροδυναμικές Μηχανές, Αντλίες - Υδροστρόβιλοι», Εκδόσεις Συμεών, 2004
- 6) Κ.Α.Π.Ε., «Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ», 2001
- 7) Mr. Edberg Oliver, Dr. McCubbin Ian, Dr. Naish Chris, Dr., “Outlook of Energy Storage Technologies”, 2006

Διδακτορικές Διατριβές

- 1) Γιαννέτα Β., «Υβριδικό σύστημα αιολικής ενέργειας παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου και μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια», 2005
- 2) Κάραλης Γ., «Ανάπτυξη και Ανάλυση Συστημάτων Ανεμοκινητήρων και Αντλιοσταμειυτήρων», 2007 Μεταπτυχιακές Εργασίες

Διπλωματικές Εργασίες

- 1) Αγγελική Σαγανη, Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας - Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές. 2009, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- 2) Βαζάκας Ν., «Μεθοδολογία αξιολόγησης ενεργειακών αλυσίδων υδρογόνου», 2007
- 3) Βαλάκας Μ., «Χρήση του υδρογόνου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας», 2007
- 4) Νεσιάδης Α., «Προσομοίωση διαδοχικής εκκίνησης αντλιών», 2007

- 5) Σπύρου Ι., «Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Προσομοίωση και Βέλτιστο Σχεδιασμό
- 6) Αυτόνομου Συστήματος Αφαλάτωσης Τροφοδοτούμενο από Υβριδικό Σύστημα Α.Π.Ε. με Αντλησιοταμίευση», 2009
- 7) Τάσσιου Ι., «Ο ρόλος των αποθηκευτικών διατάξεων σε συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»
- 8) Γ.Νικόλαου. Θέμα: Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και εφαρμογές στην μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, 2009
- 9) Θωμάς Α. Αλεξόπουλος: Μελέτη μοντελοποίηση και προσομοίωση εγκατεστημένου μικροδικτύου, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών - 2008.
- 10) ΤΑΣΣΙΟΥ ΙΩΑΝΝΑ : Ο ρόλος των αποθηκευτικών διατάξεων σε συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Παρουσιάσεις

- 1) Νέες προοπτικές για την Ανάπτυξη της αντλησιοταμίευσης στην Ελλάδα Τεχνολογία και Τεχνολογικοί Περιορισμοί, Δημήτριος Παπαντώνης, ΤΕΕ Ιωάννινα 2009
- 2) Βουρλιωτάκης Γ. - Φούντη Μ., «Οικονομία και Τεχνολογία Υδρογόνου», 2007
- 3) Κ.Α.Π.Ε, «Παραγωγή και Αποθήκευση Υδρογόνου από Αιολική Ενέργεια - Πρώτα Αποτελέσματα», 2005
- 4) Καρύδας Χ., «Τεχνολογία Υδρογόνου», 2007
- 5) Κυριακού Π., «Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Συστήματα Πεπιεσμένου Αέρα - Επιλογή και Εγκατάσταση»
- 6) Τριανταφυλλίδης Γ., «Η Ανάπτυξη του Ελληνικού Υδροδυναμικού και η Τροφοδοσία της ΔΕΗ Α.Ε», 2006
- 7) Energy Storage Council, "The Commercial World of Energy storage: A Review of Operating Facilities", 2003

Δημοσιεύσεις

- 1) Anagnostopoulos I., Papantonis D., «Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant», 2007
- 2) Προδομίδης Π., «Εξυπνα Υδροηλεκτρικά Έργα για να φθάσουμε τα 10.000 MW», 2008
- 3) Χωραφά Μ., "Υδρογόνο, Το καύσιμο του μέλλοντος, 2006
- 4) Chiruvolu M., Nakhamkin M., "Available Compressed Air Energy Storage (CAES) Plant Concepts"
- 5) Ibrahima H., Ilinca A., Perron J., "Energy storage systems - characteristics and comparisons", 2007

Ιστοσελίδες

- 1) www.allaboutenergy.gr
- 2) www.bioenergynews.blogspot.com
- 3) www.cres.gr
- 4) www.dei.gr
- 5) www.energypoint.com
- 6) www.energystoragecouncil.org
- 7) <http://en.wikipedia.org/>
- 8) www.hy2.gr
- 9) <http://www.itia.ntua.gr/dk>
- 10) www.rae.gr/K2/hybrid-principles.pdf
- 11) www.sciencenews.gr
- 12) www.technicalreview.gr
- 13) www.technologywatch.gr
- 14) www.tropical.gr
- 15) <http://www.ypai.gr/>
- 16) www.electricitystorage.org