



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής

## **Πτυχιακή Εργασία**

του φοιτητή του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής της Σχολής  
Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος  
Κρήτης

**Ιωάννου Δημήτρη του Παναγιώτη**

**Αριθμός Μητρώου: 2737**

### Θέμα

**«Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας»**

Επιβλέπον Καθηγητής

**Παπαδάκης Νίκος**

**Επίκουρος Καθηγητής**

**Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας:**

Κρήτη, Σεπτέμβριος 2016



## Περίληψη

Το θέμα της παρούσας διατριβής είναι η επισκόπηση των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παρουσίαση των βασικών τους χαρακτηριστικών βάσει των οποίων επιλέγονται για χρήση σε διάφορες εφαρμογές. Η συνεχής ρύπανση της ατμόσφαιρας με συνεπακόλουθα το φαινόμενο του Θερμοκηπίου, την όξινη βροχή, τη τρύπα του όζοντος και τη δημιουργία νέφους στις μεγαλουπόλεις του πλανήτη, δεν αφήνει περιθώρια περαιτέρω χρήσης των ορυκτών καυσίμων για κάλυψη των καθημερινών ενεργειακών αναγκών. Επιπλέον, η έκλειψη των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την αύξηση του πληθυσμού παγκοσμίως, δεν αφήνει άλλες επιλογές από την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού και εξυπηρέτηση της ζήτησης.

Από την άλλη, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εμφανίζονται διαλείπει και απρόβλεπτες με αποτέλεσμα να αδυνατούν να ικανοποιήσουν την ηλεκτρική ζήτηση χωρίς τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης. Έτσι, αναλόγως της εφαρμογής (διαχείριση ενέργειας ή ποιότητα ισχύος), οι διάφορες τεχνολογίες εμφανίζονται κατάλληλες ή ακατάλληλες, βασισμένες στην αρχή λειτουργίας, τον βαθμό απόδοσης, την επίδοση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή και λειτουργία του εξοπλισμού τους, και σε πολλές άλλες παραμέτρους. Ως εκ τούτου, στην Ενότητα 1 γίνεται μια εισαγωγή για τα ενεργειακά ζητήματα που επικρατούν σήμερα και τα πλεονεκτήματα χρήσης του ηλεκτρισμού. Στη Ενότητα 2, γίνεται μια περιγραφή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και αναλύονται με λεπτομέρεια οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού τόσο από συμβατικές όσο και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας και τα βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται στην Ενότητα 3 ενώ η Ενότητα 4 ασχολείται με τις διάφορες εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συμπεράσματα συνοψίζονται στην Ενότητα 5.

## **Abstract**

In this thesis a review of the electrical energy storage systems and their main characteristics based on which are selected for use in various applications is carried out. The continuous air pollution due to fossil-fuels combustion, has imposed the attendant global warming, acid rain, the ozone hole and is responsible for the smog formation in big cities of the world, and as a result, further use of fossil fuels to meet the daily energy needs is limited. Moreover, the depletion of fossil fuels coupled with population growth worldwide, leaves no other options than the use of renewable energy sources for electricity production to serve demand.

On the other hand, renewable energy sources appear intermittent and unpredictable thus unable to meet the power demand without using storage systems. According to the application (energy management or power quality), various technologies appear appropriate or inappropriate, based on the operating principle, the efficiency, the performance of the materials used for the construction and operation of their equipment, and many other parameters. Therefore, the first Section is an introduction indicating energy issues prevailing today and the electricity usage advantages. In the second Section, there is a description of power systems and analyzed in detail the electricity production technologies from both conventional and renewable energy sources. The working principle and the main characteristics of the electricity storage systems are presented in Section 3 and Section 4 deals with the various storage system applications in power systems. The conclusions are summarized in Section 5.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νίκο Παπδάκη για την καθοδήγηση που μου προσέφερε στα πλαίσια της εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας.

Ευχαριστίες θα ήθελα, επίσης, να εκφράσω στο διδακτορικό φοιτητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου Νικολαΐδη Παύλο, για τις σημαντικές διευκρινίσεις και κατευθύνσεις που μου παρείχε, όπως και στη φίλη μου Μαρία Λεωνίδου για τις συντακτικές και γραμματικές διορθώσεις.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ηθική και οικονομική υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.



## *Περιεχόμενα*

<b>Ενότητα 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
<b>Ενότητα 2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού.....</b>	<b>5</b>
2.1.1 Θερμικές μονάδες.....	6
2.1.2 Πυρηνικές μονάδες.....	9
2.1.3 Μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	10
<b>2.2 Δίκτυα μεταφοράς και διανομής.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3 Ιστορική αναδρομή.....</b>	<b>22</b>
<b>Ενότητα 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Αρχή λειτουργίας ΣΑΗΕ.....</b>	<b>25</b>
3.1.1 Αντλησιοταμίευση.....	26
3.1.2 Συστήματα πεπιεσμένου αέρα.....	27
3.1.3 Μπαταρίες.....	28
3.1.4 Μπαταρίες ροής.....	34
3.1.5 Υπερπυκνωτές.....	36
3.1.6 Υπερπηγία.....	37
3.1.7 Σφόνδυλοι.....	38
3.1.8 Κυψέλες υδρογόνου.....	39

<b>3.2 Βασικά χαρακτηριστικά ΣΑΗΕ.....</b>	<b>40</b>
3.2.1 Τεχνολογική ωριμότητα.....	40
3.2.2 Πυκνότητα ενέργειας και ισχύος.....	41
3.2.3 Αυτονομία.....	42
3.2.4 Βαθμό απόδοσης.....	42
3.2.5 Διάρκεια κύκλου ζωής.....	43
3.2.6 Κόστος.....	43
3.2.7 Χρόνος απόκρισης.....	44
3.2.8 Χρόνοι φόρτισης/εκφόρτισης.....	45
3.2.9 Βάθος εκφόρτισης.....	45
3.2.10 Ρυθμός αυτοεκφόρτισης.....	46
3.2.11 Περιβαλλοντικά ζητήματα.....	46
3.2.12 Ζητήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας.....	46
 <b>Ενότητα 4: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....</b>	 <b>48</b>
<b>4.1 Εφαρμογές Παραγωγής.....</b>	<b>50</b>
4.1.1 Αποθήκευση εμπορεύματος.....	50
4.1.2 Υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης.....	50
4.1.3 Έλεγχος περιοχής.....	50
4.1.4 Ρύθμιση συχνότητας.....	50
4.1.5 «Μαύρη» εκκίνηση.....	51



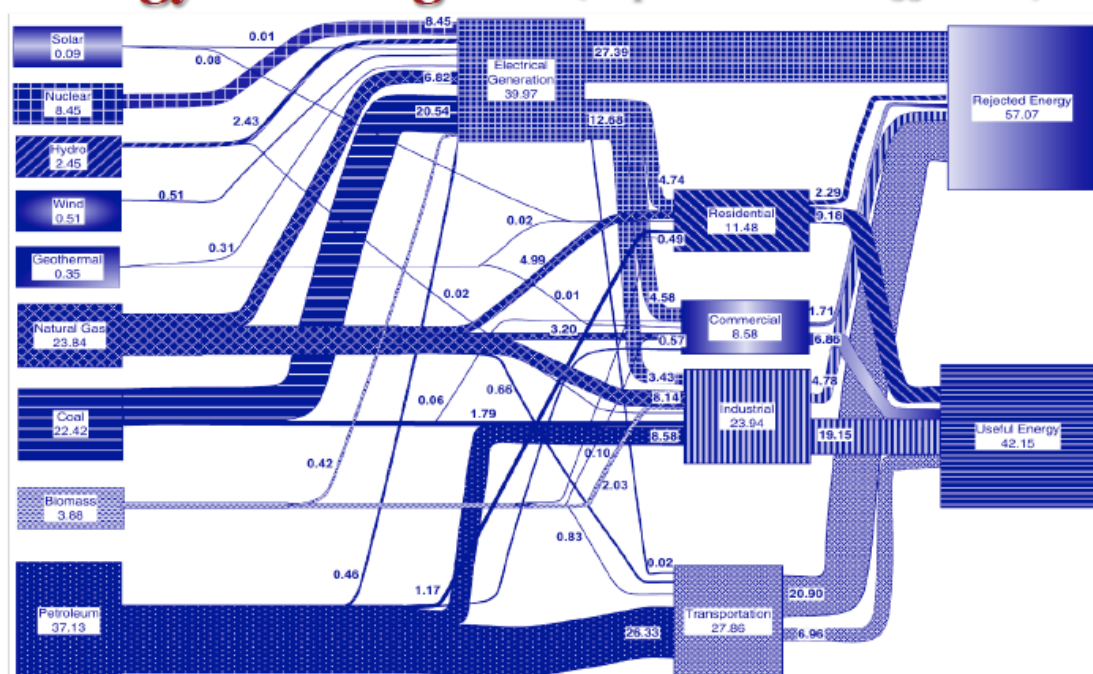
<b>4.2 Εφαρμογές μεταφοράς και διανομής.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.1 Ευστάθεια συστήματος.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.2 Ρύθμιση τάσης.....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.3 Αποφυγή κεφαλαίων.....</b>	<b>51</b>
<b>4.3 Εφαρμογές εξυπηρέτισης ενέργειας.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.1 Διαχείριση ενέργειας.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.2 Ποιότητα ισχύος.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.3 Αξιοπιστία ισχύος.....</b>	<b>52</b>
<b>4.4 Εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.1 Καταστολή διακυμάνσεων.....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.2 Συνέχεια λειτουργίας μετά από πτώση τάσης.....</b>	<b>53</b>
<b>4.4.3 Υποστήριξη ελέγχου τάσης.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4.4 Απόσβεση ταλάντωσης.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4.5 Στρεφόμενη εφεδρεία.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4.6 Ακολουθία φορτίου.....</b>	<b>55</b>
<b>4.4.7 Κάλυψη φορτίου αιχμής.....</b>	<b>55</b>
<b>4.4.8 Εξομάλυνση του φορτίου.....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.9 Περικοπή μετάδοσης.....</b>	<b>57</b>
<b>4.4.10 Χρονική μετατόπιση.....</b>	<b>58</b>
<b>4.4.11 Δέσμευση μονάδας.....</b>	<b>58</b>

4.4.12 Αντιστάθμιση πρόβλεψης κινδύνου.....	58
4.4.13 Εποχιακή αποθήκευση.....	59
4.5 Εφαρμογές αυτοκίνησης.....	59
4.5.1 Συμβατικά οχήματα.....	60
4.5.2 Ηλεκτρικά οχήματα.....	60
4.5.3 Οχήματα κυψελών καυσίμου.....	61
4.5.4 Υβριδικά οχήματα.....	61
<b>Ενότητα 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>63</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>71</b>

# 1. Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια υψηλής ποιότητας μορφή ενέργειας που μπορεί πολύ εύκολα και αποδοτικά να μετατραπεί σε οποιαδήποτε άλλη μορφή και να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της. Αποτελεί έναν από τους βασικότερους τομείς κάθε ενεργειακού συστήματος και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη του βιοτικού επιπέδου κάθε χώρας και στη βελτίωση του τρόπου ζωής των κατοίκων της. Ένα ενεργειακό σύστημα μπορεί να διαχωριστεί στους τρεις βασικότερους τομείς του ηλεκτρισμού, της θέρμανσης/ψύξης και των μεταφορών, και μπορεί πλήρως να περιγραφεί μέσω ενεργειακών διαγραμμάτων ή διαγραμμάτων ροής (sankey diagram). Στα διαγράμματα ροής, φαίνονται ξεκάθαρα όλες οι μετατροπές πρωτογενούς ενέργειας, η κατανομή τους ως τελική μορφή ενέργειας στους τρεις τομείς και τελικά η ωφέλιμη ενέργεια που χρησιμοποιείται για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών, επιτρέποντας έτσι τη συνεχή βελτίωση του βαθμού απόδοσης των επιμέρους τεχνολογιών που απαρτίζουν ένα σύστημα, την ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση ενέργειας.

## Energy use diagram (in quad=10<sup>15</sup>Btu=10.55x10<sup>15</sup>kJ)



Σχήμα 1.1 Παράδειγμα διαγράμματος ροής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται κυρίως σε θερμικές μονάδες με χρήση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κ.α.), μέσω της περιστροφής ατμοστρόβιλων ή αεριοστρόβιλων ή και συνδυασμό τους, αξιοποιώντας τους κύκλους Rankine ή Brayton ή συνδυασμένου κύκλου αντίστοιχα. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK), αν και αποτελούν βασικές μονάδες παραγωγής, στους θερμικούς σταθμούς χρησιμοποιούνται κυρίως ως εφεδρικές για κάλυψη του φορτίου αιχμής. Εντούτοις, η αλόγιστη καύση ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ηλεκτρισμού σε συνδυασμό με την μείωση των φυσικών αποθεμάτων τους, έστρεψε το ενδιαφέρον για αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Ο λόγος είναι οι αέριες εκπομπές ρύπων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, την όξινη βροχή, την τρύπα του όζοντος και τα συνεπακόλουθα των κλιματικών αλλαγών, το λιώσιμο των πάγων στους πόλους και τη δημιουργία νέφους στις μεγαλουπόλεις του πλανήτη.

Η πυρηνική ενέργεια αποτελεί μια εναλλακτική οδό για παραγωγή ηλεκτρισμού χρησιμοποιώντας τη θερμότητα που απελευθερώνεται είτε κατά το σπάσιμο πυρήνων ουρανίου (πυρηνική σχάση) είτε κατά τη δημιουργία πυρήνων ηλίου (πυρηνική σύντηξη), με σκοπό την ατμοποίηση νερού που θα περιστρέψει τον ατμοστρόβιλο. Παρόλα αυτά, το τεράστιο κόστος εγκατάστασης και η έλλειψη μικρής κλίμακας αντιδραστήρων στην αγορά, καθιστά μη συμφέρουσα την επένδυση αυτής της τεχνολογίας για κάποιες χώρες. Επιπλέον, πολλές ανησυχίες γύρω από τα θέματα ασφάλειας των κατοίκων, διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων και ανάπτυξης της τρομοκρατίας, αποτελούν επιπρόσθετο εμπόδιο στην περαιτέρω μελέτη και υλοποίηση τέτοιων μονάδων. Συνεπώς, όσον αφορά τις τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από τα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα το ερευνητικό ενδιαφέρον στράφηκε αποκλειστικά προς τις πλέον φιλικές για το περιβάλλον ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες αποτελούν ανεξάντλητους φυσικούς πόρους, όπως για παράδειγμα ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό, η βιομάζα και η γεωθερμία.

Παρόλα τα αναμφισβήτητα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι ΑΠΕ σε ένα σύστημα, η αυξημένη ενσωμάτωση τους στην παραγωγή εγκυμονεί κινδύνους σχετικά με την αδιάλειπτη και καλής ποιότητας τροφοδοσία λόγω της ελλιπής τους διαθεσιμότητας που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αδύνατο να προβλεφτεί. Η στοχαστική αυτή συμπεριφορά των ΑΠΕ σε συνδυασμό με την ολοένα αυξημένη και μεταβαλλόμενη ζήτηση κατά την διάρκεια της ημέρας και αναλόγως εποχής, καθιστά αναπόφευκτη τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης. Έτσι, η βασική στρατηγική για

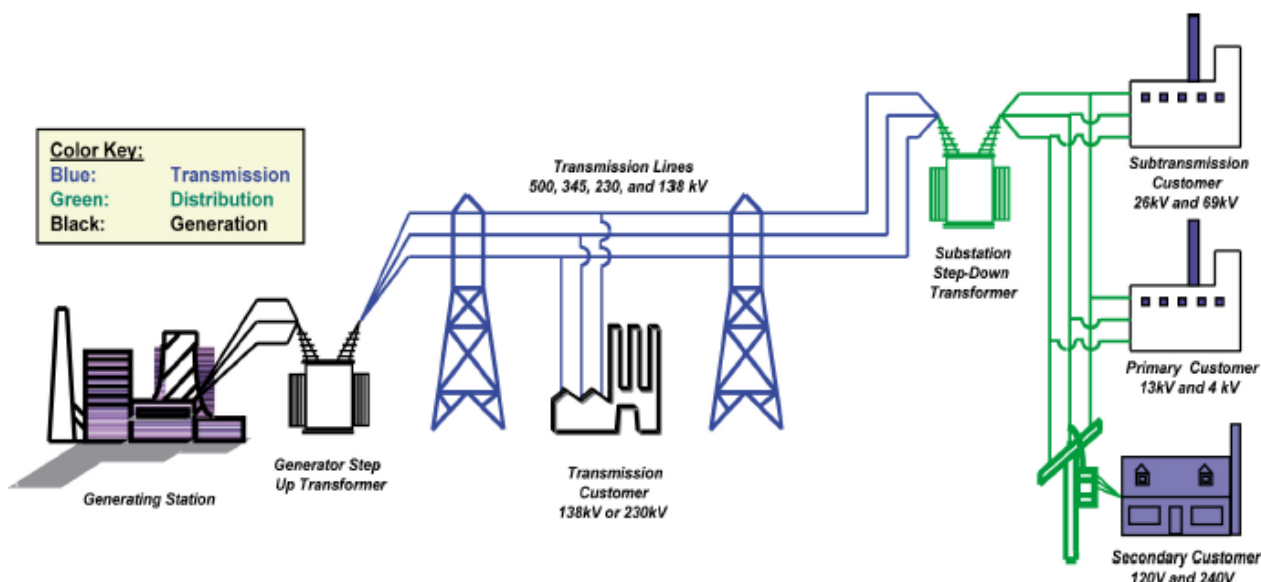
την επίλυση του προβλήματος είναι η εξής: κατά τις ώρες μειωμένης ζήτησης η πλεονάζουσα ενέργεια αποθηκεύεται και αποδίδεται στους καταναλωτές τις ώρες αιχμής. Η πρόκληση, λοιπόν, για τα συστήματα αποθήκευσης είναι να μπορούν να διατηρήσουν αποθηκευμένη την ενέργεια για όσο χρονικό διάστημα απαιτείται και όταν τους ζητηθεί να είναι σε θέση να την αποδώσουν όσο πιο σύντομα γίνεται.

Αποθηκεύοντας και επιστρέφοντας ενέργεια στη ζήτηση, τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΑΗΕ) παρέχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως υψηλή ενεργειακή απόδοση, μεγάλη αξιοπιστία, χαμηλό κόστος, και άλλα. Τα ΣΑΗΕ, κατέχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως για παράδειγμα εξυπηρέτηση έκτακτης ανάγκης, «ψαλιδισμό» μέγιστης ζήτησης για το ηλεκτρικό δίκτυο, ρύθμιση της ενέργειας εξόδου από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), παροχή κίνησης στα ηλεκτρικά οχήματα και ούτω καθ'εξής. Τα σημερινά συστήματα, βασίζονται κυρίως σε ένα μόνο είδος τεχνολογίας αποθήκευσης, αλλά δυστυχώς κανένα στοιχείο αυτού του τύπου τεχνολογίας δεν μπορεί να εκπληρώσει όλα τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, όπως υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, χαμηλό κόστος, υψηλή απόδοση του κύκλου φόρτισης/εκφόρτισης και μεγάλη διάρκεια του κύκλου ζωής.

Τα υβριδικά συστήματα, από την άλλη, αποτελούνται από πολλαπλές, ετερογενείς τεχνολογίες στοιχείων, με στόχο την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων κάθε μιας καλύπτοντας τις αδυναμίες που προκύπτουν από την εφαρμογή τους ξεχωριστά. Αυτή είναι μια πρακτική προσέγγιση για τη βελτίωση της επίδοσης των ΣΑΗΕ με χρήση ήδη διαθέσιμων τεχνολογικών στοιχείων αποθήκευσης. Έτσι, με επιμελημένο σχεδιασμό και έλεγχο, ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης μπορεί να επιτύχει ένα συνδυασμό βαθμών απόδοσης, που είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από εκείνον που θα προέκυπτε από καθεμιά από τις επιμέρους τεχνολογίες ξεχωριστά.

## 2. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα πλήρες σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελείται από τις μονάδες παραγωγής, τις γραμμές μεταφοράς και διανομής, και τις συσκευές μετατροπής ή τους καταναλωτές. Μία τυπική διάταξη ενός ΣΗΕ φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Αποτελεί το μεγαλύτερο και πιο πολύπλοκο ανθρωπογενές σύστημα προσφέροντας ζωτικής σημασίας υπηρεσίες στην κοινωνία. Πρέπει να λειτουργεί με τη μεγαλύτερη δυνατή αξιοπιστία και ασφάλεια, το χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και τις λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Πρέπει, επιπλέον, να παρέχει επαρκή και καλής ποιότητας ενέργεια, ικανή να καλύψει τις ανάγκες του καταναλωτή τόσο σε ισχύ όσο και σε ενέργεια. Τέλος, πρέπει να τροφοδοτεί αδιάλειπτα και απρόσκοπτα, και να παραμένει σε λειτουργία μετά από τυχόν διαταραχές εξασφαλίζοντας την απαίτηση του καταναλωτή «να έχει ηλεκτρική ενέργεια όποτε αυτός το θελήσει».

Οι βασικές απαιτήσεις συνοψίζονται στα έξι **πρέπει** που παρατίθενται πιο κάτω:

- Το δυναμικό παραγωγής **πρέπει** να είναι μεγαλύτερο του φορτίου
- Η μεταφορά **δεν πρέπει** να υπερφορτώνεται

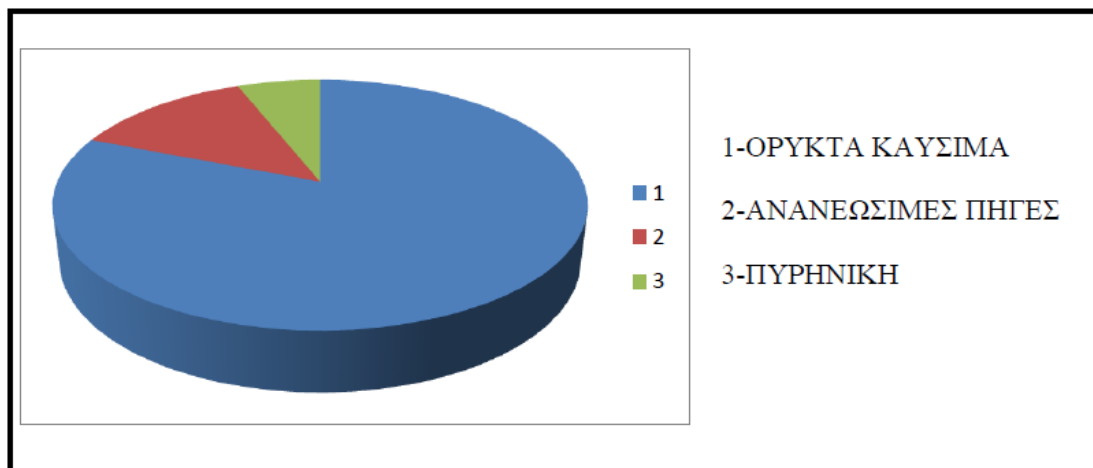
- Οι τάσεις **πρέπει** να παραμένουν εντός των ορίων
- **Πρέπει** να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει σε τυχόν απώλεια γεννήτριας
- **Πρέπει** να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει σε τυχόν απώλεια γραμμής μεταφοράς
- **Πρέπει** να παραμένει σε ευστάθεια σε περίπτωση βραχυκυκλώματος (short-circuit)

## 2.1 Συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού

Οι υπάρχουσες τεχνολογίες για παραγωγή ηλεκτρισμού σήμερα, μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με την πρωτογενή πηγή ενέργειας που αξιοποιούν σε θερμικές μονάδες, πυρηνικές μονάδες και ΑΠΕ. Στις θερμικές μονάδες, οι πρωτογενείς πηγές είναι τα ορυκτά καύσιμα όπως άνθρακας, λιγνίτης, μαζούτ, ντίζελ, φυσικό αέριο κ.α, από την καύση των οποίων απελευθερώνονται αέρια του Θερμοκηπίου με βασικότερα το μονοξείδιο του άνθρακα CO, το διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>, τα οξείδια του αζώτου NO<sub>x</sub> και το μεθάνιο CH<sub>4</sub>. Οι πυρηνικές μονάδες χρησιμοποιούν ως πρωτογενείς πηγές το ουράνιο U, το πλουτόνιο Pl και το ήλιο He χωρίς να ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα με αέρια του Θερμοκηπίου όμως τα πυρηνικά απόβλητα χρήζουν σωστής διαχείρισης. Οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού από ΑΠΕ στηρίζονται στη μετατροπή των ανεξάντλητων φυσικών πόρων (ήλιος, άνεμος, νερό, βιομάζα, γεωθερμία) στη ζητούμενη τελική μορφή ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα, χωρίς να μολύνουν το περιβάλλον και χρησιμοποιώντας πρώτες ύλες που παρέχονται απλόχερα από τη φύση χωρίς κόστος.

Παγκοσμίως τα ορυκτά καύσιμα καταλαμβάνουν το 81% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρισμού. Το 35% προέρχεται από τον άνθρακα, το 25% από το πετρέλαιο και το υπόλοιπο 21% από το φυσικό αέριο. Οι ανανεώσιμες πηγές καλύπτουν το 13% της συνολικής παραγωγής, ενώ το υπόλοιπο 6% προέρχεται από την πυρηνική ενέργεια. Συγκεκριμένα, η υδροηλεκτρική καλύπτει διεθνώς μόλις το 2% της συνολικά απαιτούμενης ενέργειας, ενώ όλες οι άλλες μαζί, αιολική, ηλιακή, γεωθερμία και βιομάζα το υπόλοιπο 11%.

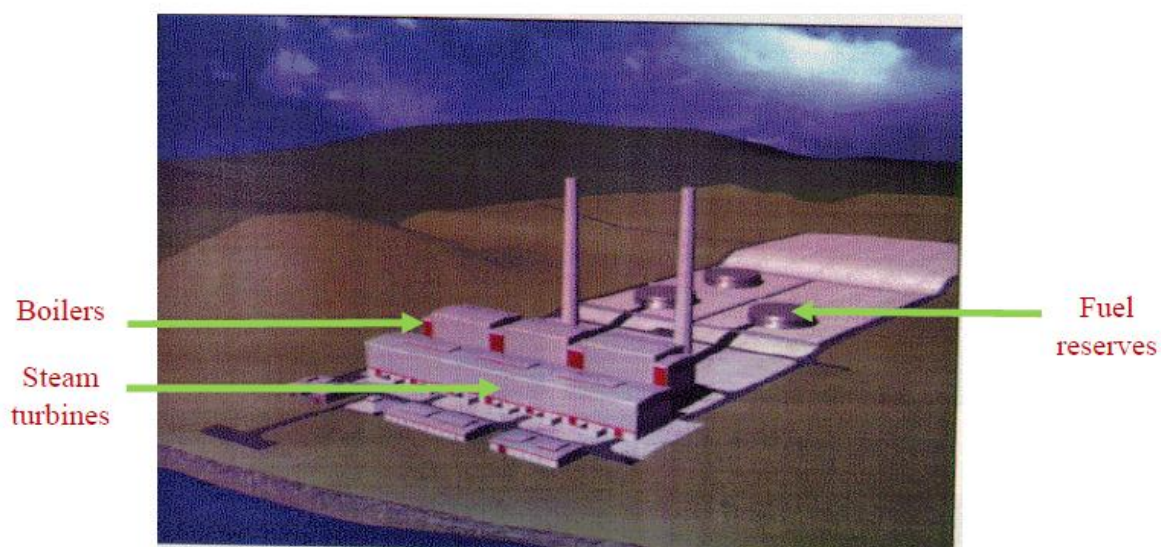




Σχήμα 2.2 Ποσοστιαία κατανομή των πηγών ενέργειας ανά τον κόσμο

### 2.1.1 Θερμικές μονάδες

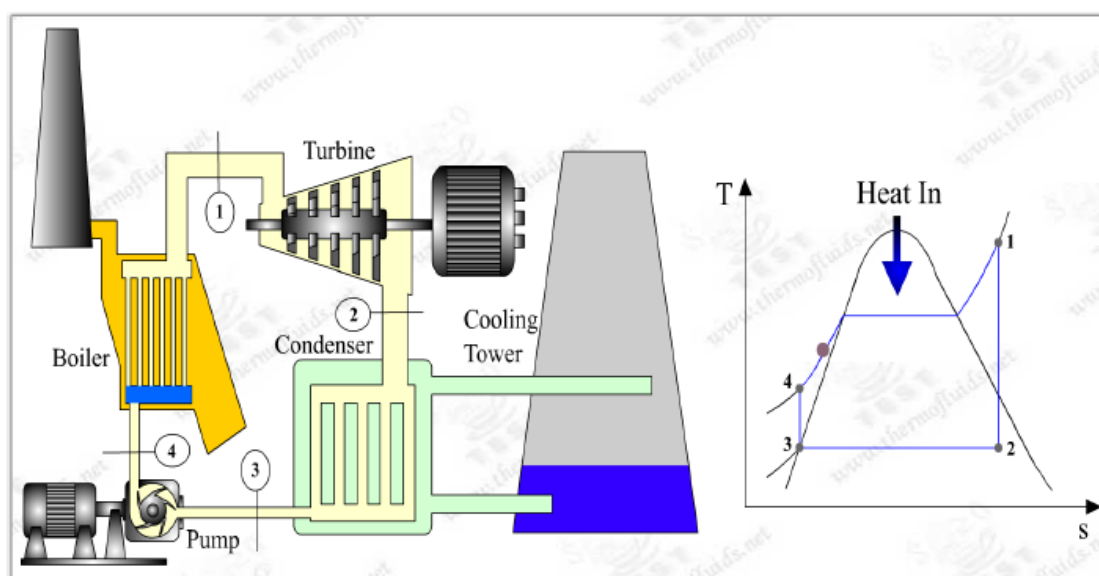
Οι θερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ως σταθμοί βάσης και είναι οι πλέον οικονομικοί για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρισμού. Κάθε θερμική μονάδα του Σχήματος 2.3, μπορεί να πραγματοποιεί παράλληλες λειτουργίες διαφορετικών τεχνολογιών όπως αεριοστρόβιλοι (gas turbines), ατμοστρόβιλοι (steam turbines), συνδυασμένου κύκλου (combined cycle) και μηχανές εσωτερικής καύσης (internal combustion engines).



Σχήμα 2.3 Τυπική διάταξη θερμικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρισμού

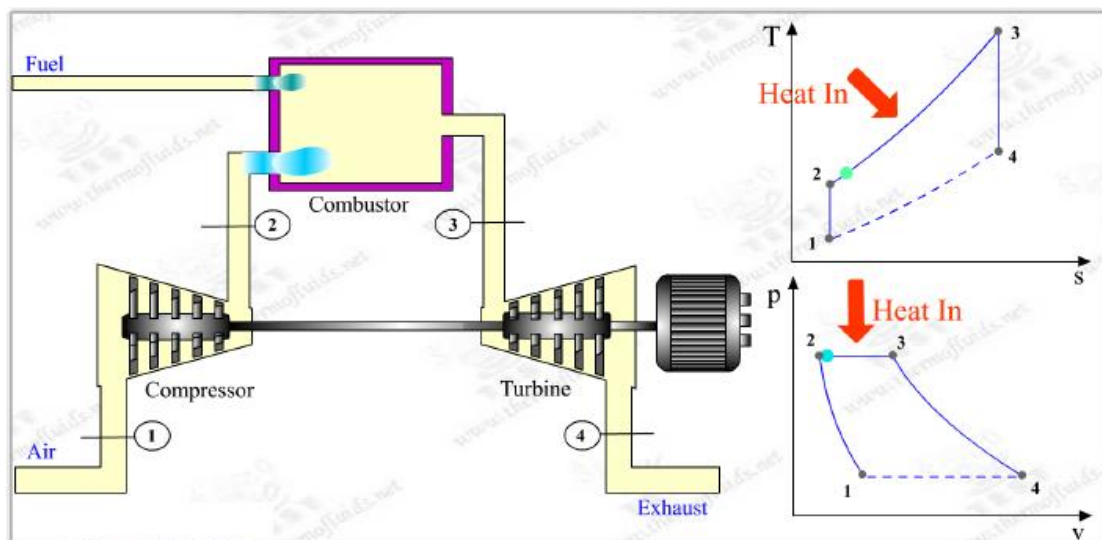


Βασικά στοιχεία των αμοστρόβιλων είναι ο λέβητας όπου γίνεται η καύση με σκοπό τη θέρμανση νερού μέχρι να ατμοποιηθεί, ο στρόβιλος ο οποίος τίθεται σε κίνηση από την εκτόνωση του ατμού που στη συνέχεια υγροποιείται και ο συμπυκνωτής που οδηγεί το ζεστό νερό στο λέβητα για την εκ νέου θέρμανση και ατμοποίηση του. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι η ικανότητα λειτουργίας για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα όμως μειονεκτούν σημαντικά στην επιλογή θέσης αφού πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι προοπτικές επέκτασης σε ενδεχόμενες αυξήσεις ζήτησης (φορτίου), το κόστος μεταφοράς καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί στο λέβητα, η πρόσβαση σε πηγές νερού και οι εκπομπές αερίων του Θερμοκηπίου που επηρεάζουν άμεσα το μικροκλίμα της γύρω περιοχής.



**Σχήμα 2.4** Προσομοίωση αμοστροβλικής μονάδας

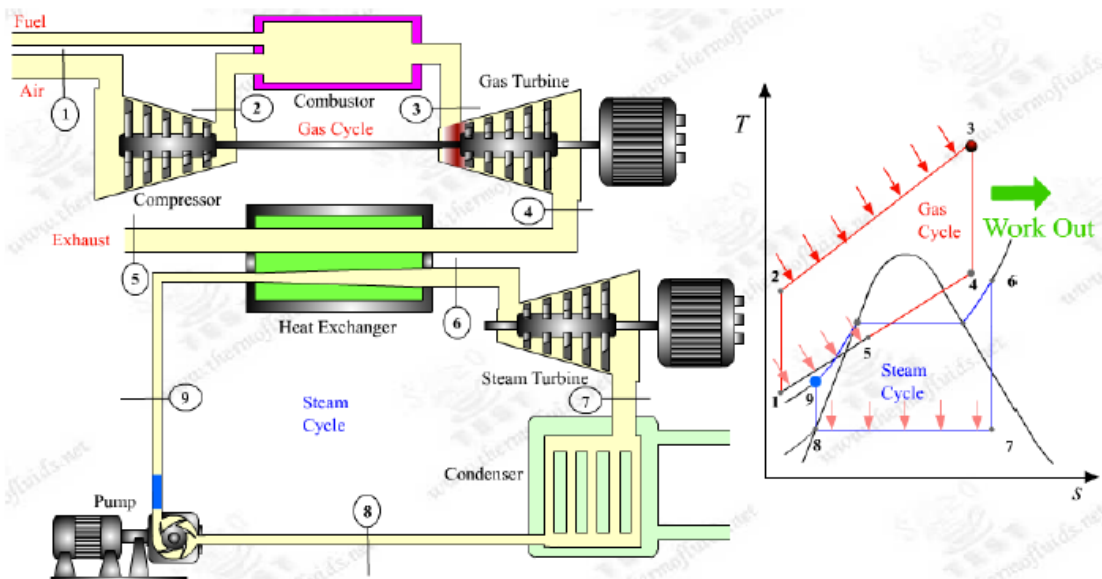
Όσον αφορά τους αεριοστρόβιλους, βασικά στοιχεία αποτελούν ο καυστήρας όπου γίνεται η καύση και τα καυσαέρια οδηγούνται απευθείας στον στρόβιλο, και ο στρόβιλος ο οποίος τίθεται σε κίνηση από την εκτόνωση των καυσαερίων τα οποία στη συνέχεια απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Έχουν παραπλήσιους χρόνους λειτουργίας με τους αμοστρόβιλους και παρουσιάζουν τα ίδια προβλήματα επιλογής της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης.



Σχήμα 2.5 Προσομοίωση αεριοστροβλικής μονάδας

Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου συνδυάζουν εξ' ορισμού τη λειτουργία αεριοστροβίλων και ατμοστροβίλων, οι οποίοι αποτελούν τα βασικά τους στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, αφού εκτονωθούν δίνοντας κίνηση στον αεριοστρόβilo, τα καυσαέρια διέρχονται από εναλλάκτη θερμότητας και ακολούθως ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Στη συνέχεια, η ανάκτηση θερμότητας από τον εναλλάκτη ατμοποιεί το διερχόμενο νερό και οι ατμοί εκτονώνονται δίνοντας κίνηση στον ατμοστρόβilo. Έτσι, γίνεται βέλτιστη χρήση θερμότητας, η θερμοκρασία επιστροφής απωλειών στο περιβάλλον είναι μικρότερη και αυξάνεται ο ολικός βαθμός απόδοσης. Παρόλα αυτά, χρειάζεται πολύ ακριβής σχεδιασμός του εναλλάκτη θερμότητας για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση της μονάδας. Η αρχή λειτουργίας μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6 και τα βασικά σημεία της παρατίθενται πιο κάτω:

1. Είσοδος καυσίμου στο λέβητα
2. Συμπυκνωτής
3. Είσοδος καυσαερίων στον αεριοστρόβilo
4. Διέλευση καυσαερίων προς τον εναλλάκτη θερμότητας
5. Απελευθέρωση καυσαερίων στην ατμόσφαιρα
6. Είσοδος ατμού στον ατμοστρόβilo
7. Διέλευση νερού για συμπύκνωση και οδήγηση του στον εναλλάκτη 8 & 9



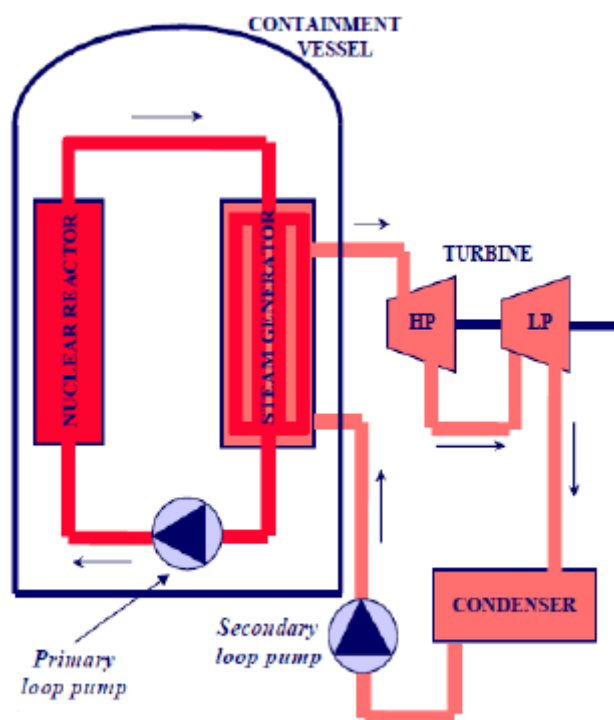
Σχήμα 2.6 Προσομοίωση μονάδας συνδυασμένου κύκλου

Οι ΜΕΚ εγκαθίστανται συνήθως σε περιοχές μειωμένης ζήτησης όπου η εγκατάσταση άλλων τεχνολογιών είναι ασύμφορη, ενώ σε θερμικούς σταθμούς έχουν κυρίως εφεδρικό ρόλο για κάλυψη των φορτίων αιχμής. Με καύση μίγματος καυσίμου ασκούνται πιέσεις σε έμβολα, που με κατάλληλους μηχανισμούς προκαλούν περιστροφή της γεννήτριας. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι ότι τίθενται εύκολα σε λειτουργία και μπορούν να αναλάβουν άμεσα φορτίο, απαιτούν μικρότερες και λιγότερο πολύπλοκες εγκαταστάσεις ενώ σε αντίθεση, παρουσιάζουν περιοδικά βλάβες και απαιτούν συχνά συντήρηση.

### 2.1.2 Πυρηνικές μονάδες

Η πυρηνική ενέργεια μπορεί να οριστεί ως η εγκλωβισμένη στους πυρήνες των ατόμων ενέργεια, η οποία απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων. Οι ράβδοι καυσίμου (π.χ. ουρανίου) μέσα στον πυρηνικό αντιδραστήρα αποδίδουν την παραγόμενη θερμότητα σε διερχόμενο νερό, το οποίο ατμοποιείται και εκτονώνεται δίνοντας κίνηση στη γεννήτρια. Η πυρηνική ενέργεια δεν βρίσκει ευρεία αποδοχή για λόγους ασφάλειας των αντιδραστήρων, διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων και εξάπλωσης των πυρηνικών όπλων. Μια προσομοίωση πυρηνικής

μονάδας η οποία στηρίζει τον κύκλο λειτουργίας της σε ατμοστρόβιλο (κύκλος Rankine) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Προσομοίωση πυρηνικής μονάδας κύκλου Rankine

### 2.1.3 Μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Πέραν του ότι παρέχονται απλόχερα από τη φύση χωρίς να ρυπαίνουν κατά τη μετατροπή τους σε άλλη μορφή ενέργειας, οι ΑΠΕ δεν χρειάζονται επιπλέον διεργασίες εξόρυξης, επεξεργασίας ή μεταφοράς. Αυτό αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα έναντι της χρήσης των ορυκτών καυσίμων, με επιζήμιο την απρόβλεπτη και διαλείπης συμπεριφορά τους και την έλλειψη ευχέρειας επιλογής του τόπου εγκατάστασης των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού μιας και η προσαρμογή τους κοντά στα σημεία όπου παρουσιάζεται το μεγαλύτερο δυναμικό είναι μονόδρομος. Οι μέχρι σήμερα γνωστές και αξιοποιήσιμες πηγές ενέργειας είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η κυματική, η παλιρροιακή, η βιομάζα, η γεωθερμία και η ωκεάνια θερμότητα.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση μέσω ηλιακών συλλεκτών ή για άμεση μετατροπή σε ηλεκτρισμό με φωτοβολταϊκές (Φ/Β) συστοιχίες. Σήμερα, πολλές τεχνολογίες σχετικά με τα Φ/Β έχουν αναπτυχθεί αυξάνοντας την απόδοση και την ενσωμάτωση τους στο σύστημα παραγωγής. Το βασικό πλεονέκτημα των Φ/Β πλαισίων στις οροφές των σπιτιών είναι ότι δεν απαιτούν επιπλέον έκταση γης για την τοποθέτησή τους, ούτε επιπλέον γραμμές μεταφοράς και διανομής αφού είναι ήδη διαθέσιμες και συνδεδεμένες στις αντίστοιχες κατοικίες. Εναλλακτικά, καταλαμβάνοντας μεγάλες εκτάσεις τα Φ/Β πάρκα είναι ικανά να αυξήσουν την απόδοση μιας εγκατάστασης με χρήση συστημάτων παρακολούθησης (tracking) είτε σε έναν είτε και στους δύο άξονες. Μια εναλλακτική τεχνολογία που έχει εκτενώς μελετηθεί είναι τα συγκεντρωτικά Φ/Β (CPV) τα οποία όμως λειτουργούν αξιοποιώντας μόνο την άμεση ακτινοβολία γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα σε περιοχές με μεγάλα διαστήματα ηλιοφάνειας (π.χ. Μεσογειακές χώρες). Τα CPV απαιτούν πολύ μικρότερες εκτάσεις για να επιτύχουν ίδια παραγωγή με τα συμβατικά Φ/Β λόγω του οπτικού συστήματος συγκέντρωσης το οποίο πολλαπλασιάζει την προσπίπτουσα ενέργεια του φωτονίου πάνω στα Φ/Β κύτταρα.



**Σχήμα 2.8** Οικιακά Φ/Β σε στέγες για κάλυψη αναγκών νοικοκυριού

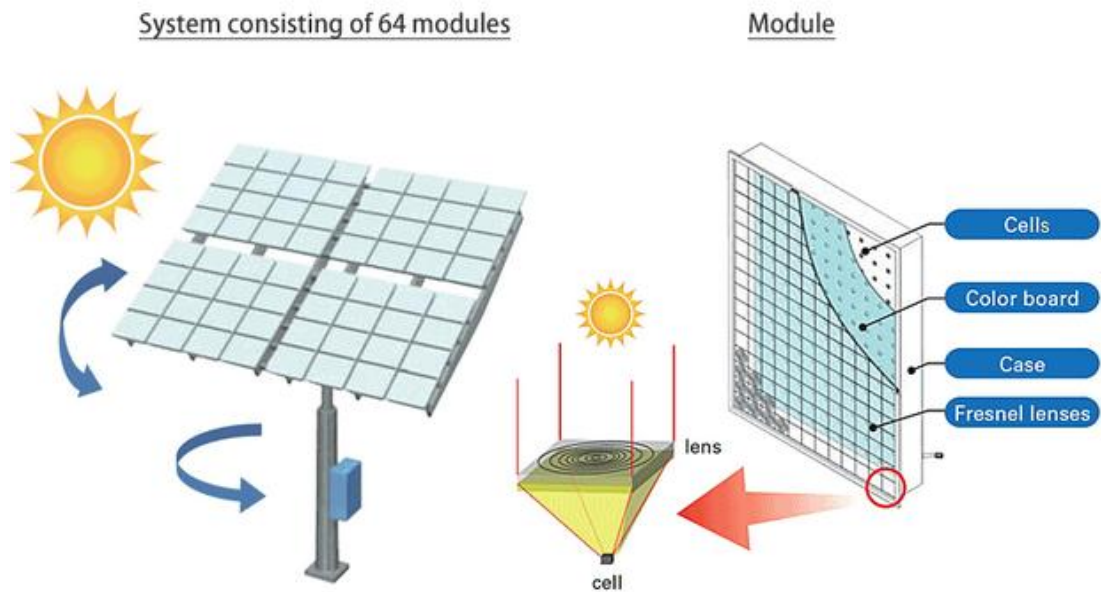




**Σχήμα 2.9** Φ/Β πάρκο προσαρμοσμένο σε σταθερή γωνία διασυνδεδεμένο με το δίκτυο



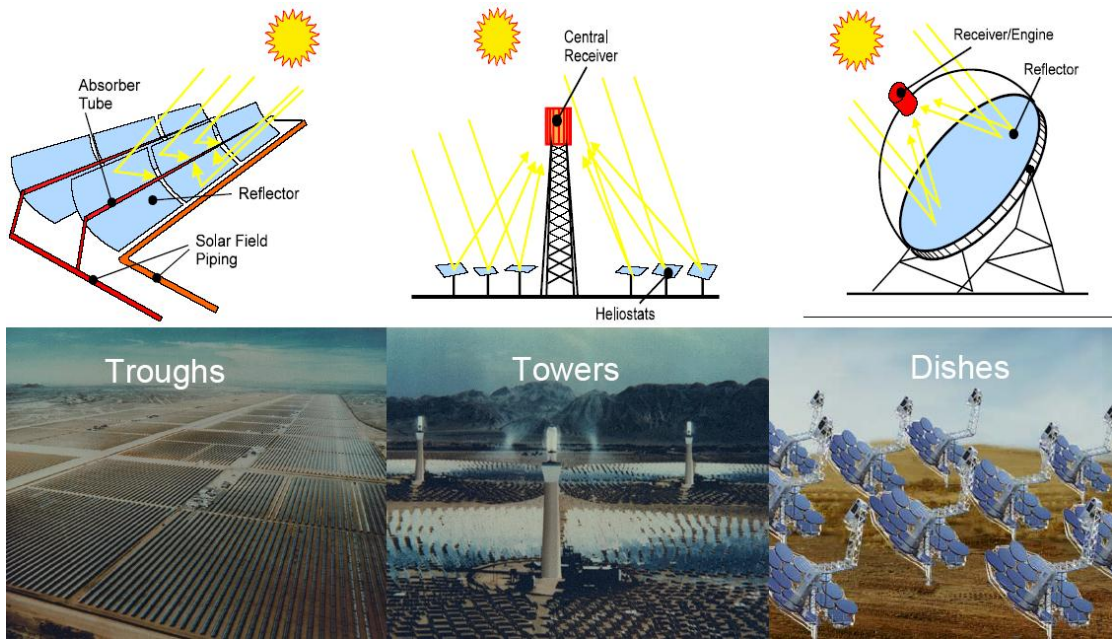
**Σχήμα 2.10** Φ/Β πάρκο με σύστημα tracking σε δύο άξονες διασυνδεδεμένο με το δίκτυο



**Σχήμα 2.11** CPV με σύστημα tracking σε δύο άξονες

Μια διαφορετική τεχνολογία που εμφανίζεται πολλά υποσχόμενη τα τελευταία χρόνια είναι η συγκεντρωτική ηλιακή ισχύς (CSP). Χρησιμοποιώντας πληθώρα τεχνολογιών για να εστιάσουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ρευστά, αυτά τα συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική και τα θερμαινόμενα ρευστά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για παραγωγή ατμού, που με τη σειρά του περιστρέφει αμοστρόβιλο για παραγωγή ηλεκτρισμού. Ένα άλλο πλεονέκτημα των συστημάτων CSP είναι ότι ανάλογα με τα ρευστά που χρησιμοποιούν για μεταφορά ενέργειας, υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της θερμότητας για μεγάλα χρονικά διαστήματα επιτρέποντας την παραγωγή ηλεκτρισμού κατά τις βραδινές ώρες, όταν η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι διαθέσιμη.

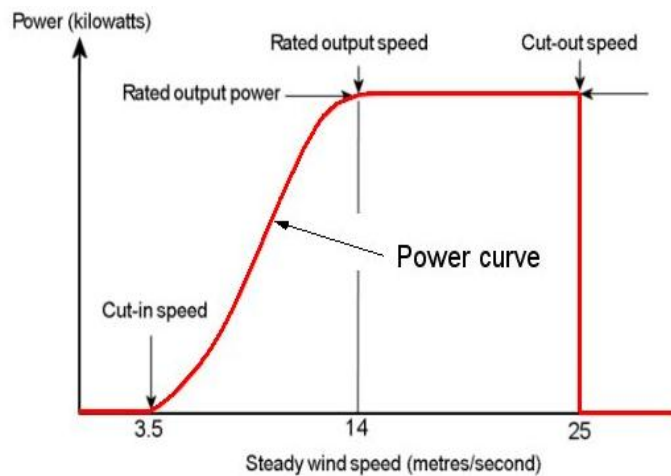
Παρόλο που η ηλιακή ενέργεια θα μπορούσε να καλύψει σχεδόν το 100% της ζήτησης (ιδίως κατά τη διάρκεια ηλιοφάνειας), οι περιοχές που μπορεί πρακτικά να αξιοποιηθεί είναι περιορισμένες και επιπλέον το κόστος εγκατάστασης των τεχνολογιών μετατροπής σε ηλεκτρισμό είναι ακόμα σε ψηλά επίπεδα.



**Σχήμα 2.12** CSP με χρήση α) παραβολικών κατόπτρων β) ηλιακού πύργου γ) ηλιακών πιάτων

Η αιολική ενέργεια μπορεί να χαρακτηριστεί ως διαλείπουσα πηγή που μεταβάλλεται από ώρα σε ώρα και από λεπτό σε λεπτό. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποδοθεί μέσω ανεμογεννήτριας, η ενέργεια εξόδου της οποίας εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και συνεπώς η μελέτη εγκατάστασης της πρέπει πάντα να λαμβάνει υπόψη το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής. Μια τυπική καμπύλη εξόδου σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου δίνεται στο Σχήμα 2.13 που ακολουθεί.

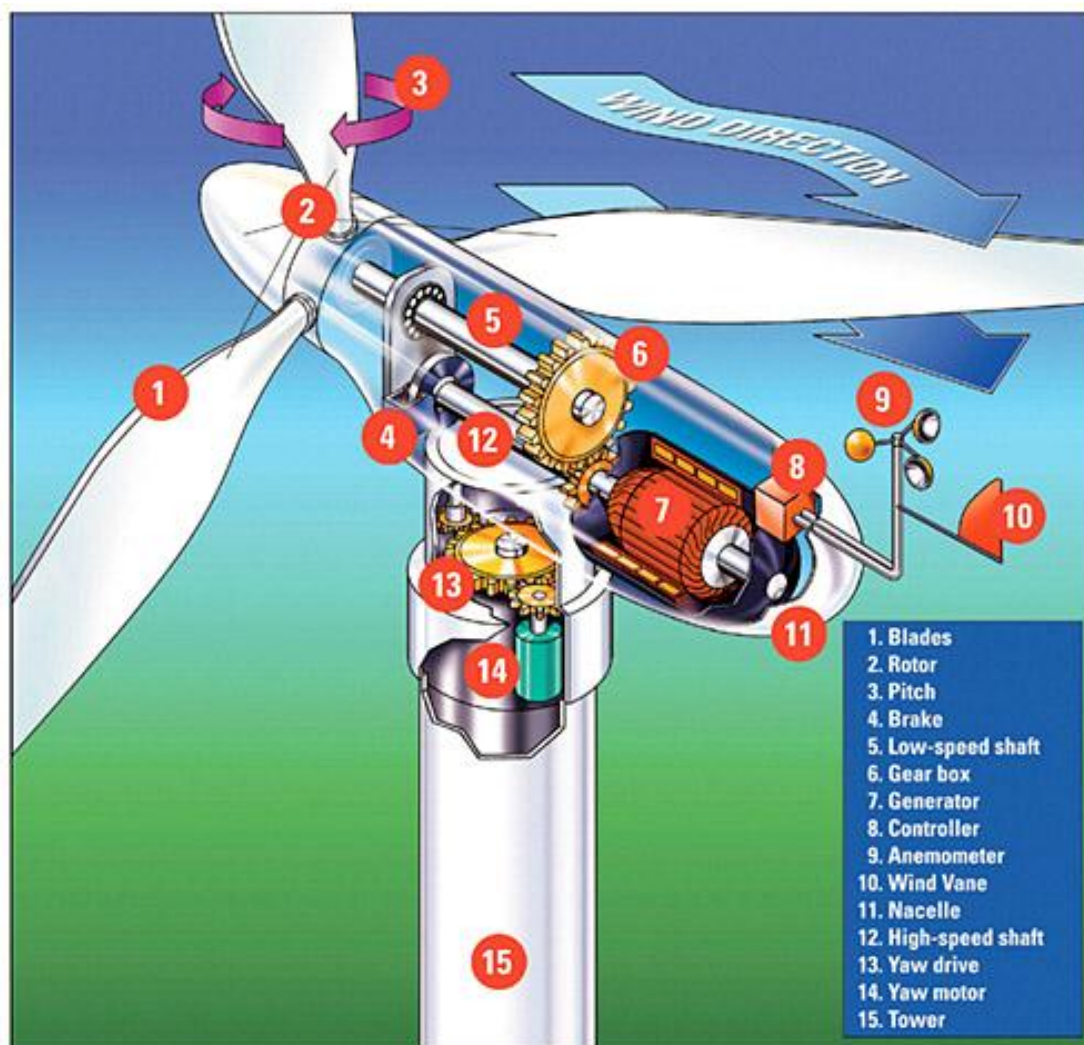
Αναλόγως του μεγέθους της, όταν η ταχύτητα του ανέμου πέφτει κάτω από ένα κατώτατο όριο (cut-in speed) ή αυξηθεί πάνω από ένα μέγιστο (cut-out speed), η τουρμπίνα κλείνει και δεν παράγει ηλεκτρισμό.



**Σχήμα 2.13** Καμπύλη εξόδου ανεμογεννήτριας



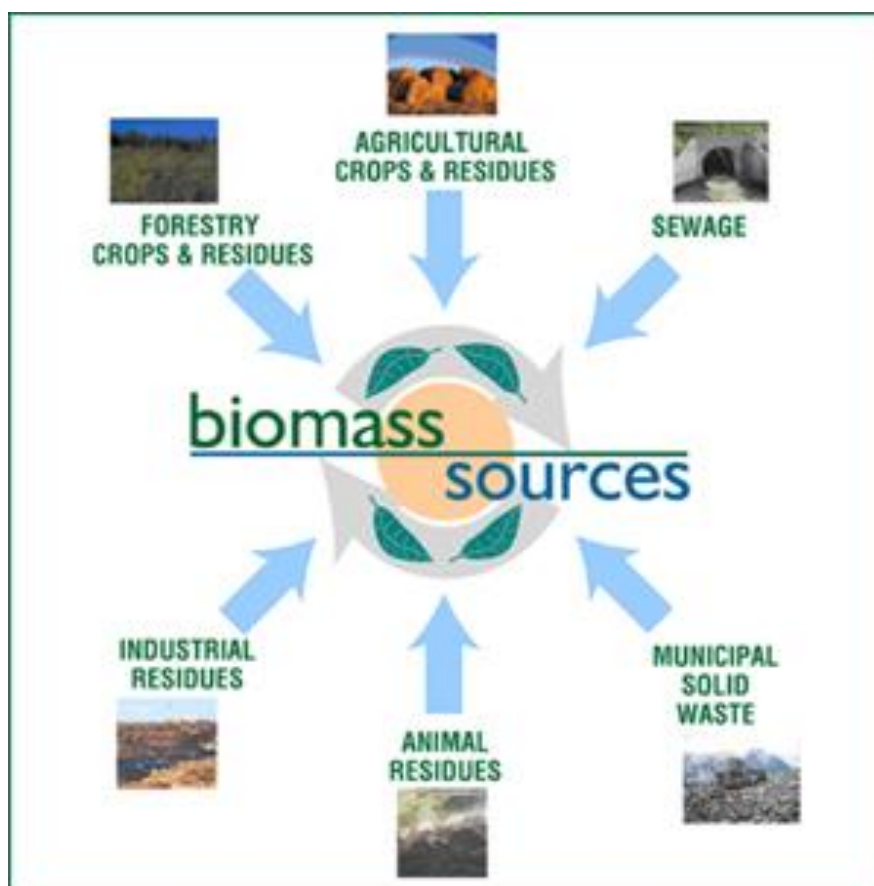
Η αιολική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική καθώς ο άνεμος αναγκάζει τα πτερύγια του ανεμοκινητήρα να περιστραφούν. Η περιστροφή ελέγχεται μέσω συμπλέκτη και η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρισμό στη γεννήτρια. Τα βασικά στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας φαίνονται στο Σχήμα 2.14.



**Σχήμα 2.14** Βασικά στοιχεία ανεμογεννήτριας

Η βιομάζα είναι μια ανανεώσιμη πηγή πρωτογενούς ενέργειας που προέρχεται από τα φυτά και ζωικά απόβλητα. Είναι κυρίως οργανική ύλη στην οποία η ηλιακή ενέργεια έχει αποθηκευτεί σε χημικούς δεσμούς μέσω της φωτοσύνθεσης. Παρόλο που κατά τη μετατροπή της σε άλλη μορφή ενέργειας απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα CO<sub>2</sub>, αυτή η ποσότητα είναι μικρότερη από εκείνη που είχε δεσμευτεί μέσω φωτοσύνθεσης, όταν ο οργανισμός βρισκόταν εν ζωή. Με κατάλληλες μεθόδους όπως

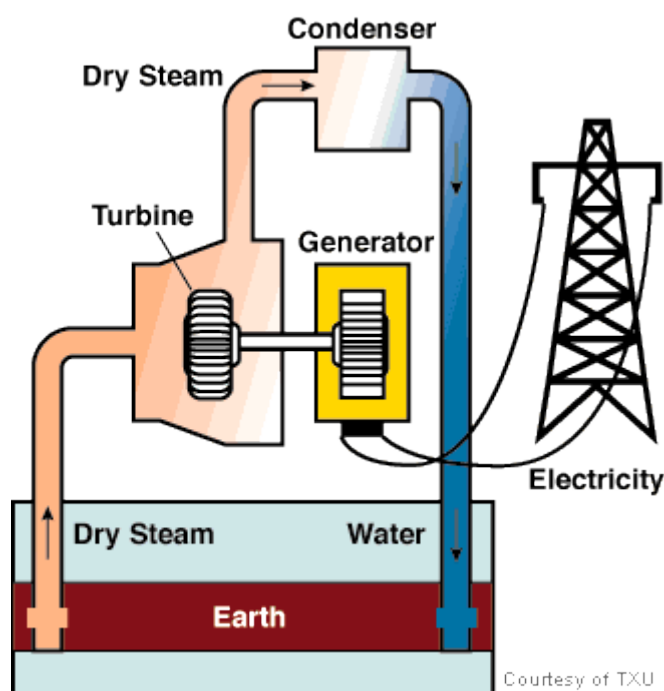
καύση, αεριοποίηση, πυρόλυση, αναερόβια χώνευση, ζύμωση κ.τ.λ., μπορεί να αξιοποιηθεί για να εξυπηρετήσει τους βασικούς τομείς ηλεκτρισμού, θέρμανσης/ψύξης και μεταφορών. Μπορεί, επίσης, να μετατραπεί σε χρήσιμα στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα μέσω φυσικών, χημικών ή βιολογικών τεχνικών, τα οποία σαν δευτερογενείς μορφές ενέργειας χρησιμοποιούνται ευρέως για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών. Οι βασικότερες πηγές βιομάζας απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα.



**Σχήμα 2.15** Βασικές πηγές βιομάζας

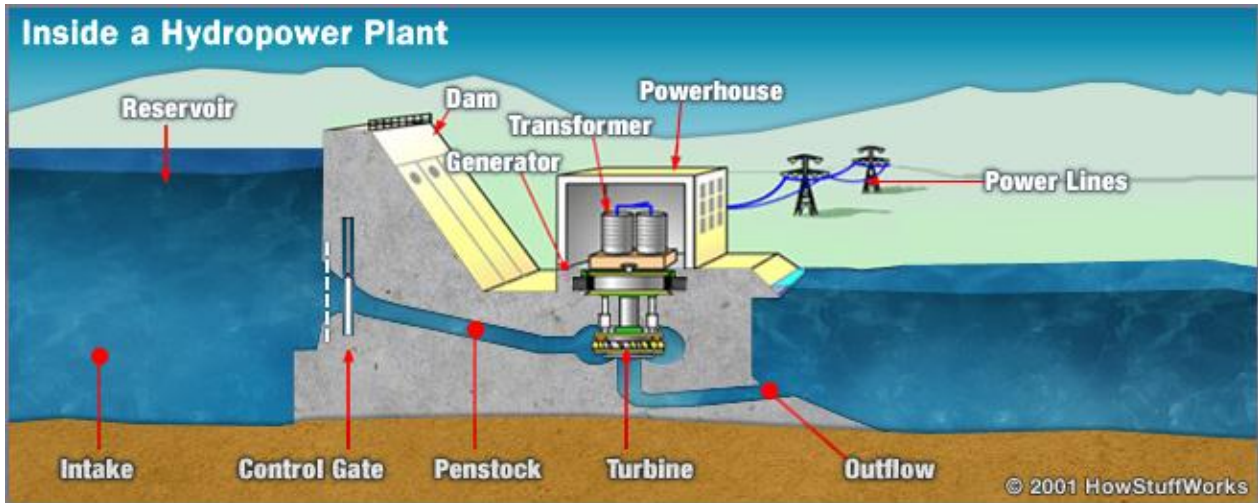
Η γεωθερμία ορίζεται ως η θερμική ενέργεια των πετρωμάτων της γης. Παρόλο όμως που ο πλανήτης φιλοξενεί τεράστια ποσά θερμότητας, αυτή η θερμότητα είναι ανόμοια κατανομημένη και συχνά σε μεγάλα βάθη με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να μπορεί πρακτικά να αξιοποιηθεί. Σε μικρά βάθη μπορεί να συναντηθεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 90 και 150°C ενώ σε μεγαλύτερα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 150°C και γενικά είναι αυτές που αξιοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρισμού. Το

μεγάλο πλεονέκτημα της γεωθερμίας είναι ότι είναι γενικά σταθερή αποτελώντας ίσως τη μοναδική προβλέψιμη μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας μονάδων παραγωγής ηλεκτρισμού από γεωθερμία στηρίζεται στον κύκλο Rankine, δηλαδή το νερό στέλνεται προς την πηγή γεωθερμίας για να ατμοποιηθεί και να περιστρέψει ατμοστρόβιλο και αφού υγροποιηθεί εκ νέου συνεχίζει τον κύκλο του μέσω κλειστού κυκλώματος. Μια απεικόνιση μονάδας παραγωγής ηλεκτρισμού δείχνεται στο Σχήμα 2.16.



**Σχήμα 2.16** Μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού από γεωθερμία

Η υδροηλεκτρική θεωρείται η σημαντικότερη μορφή ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού. Τυπικά, οι υδροστρόβιλοι μετατρέπουν την ενέργεια του προσπίπτοντος νερού σε κινητική ενέργεια περιστροφής, η οποία χρησιμοποιείται με τη σειρά της για να οδηγήσει γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρισμού. Αποδεδειγμένα, σε κάποιες χώρες με υψηλό υδάτινο δυναμικό έχει καταγραφεί μέχρι και 99% κάλυψη σε ημερήσιες απαιτήσεις ενώ κατέχοντας πείρα πέραν των 100 χρόνων, είναι με διαφορά η πιο αποδοτική φτάνοντας σε αποδόσεις μέχρι και 90%. Παρόλο που το δυναμικό σε φράγματα και λίμνες μεταβάλλεται εποχιακά και ετησίως, η διαθεσιμότητα του είναι πλήρως προβλέψιμη και μπορεί άμεσα να αναλάβει φορτίο με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται για κάλυψη φορτίων αιχμής.

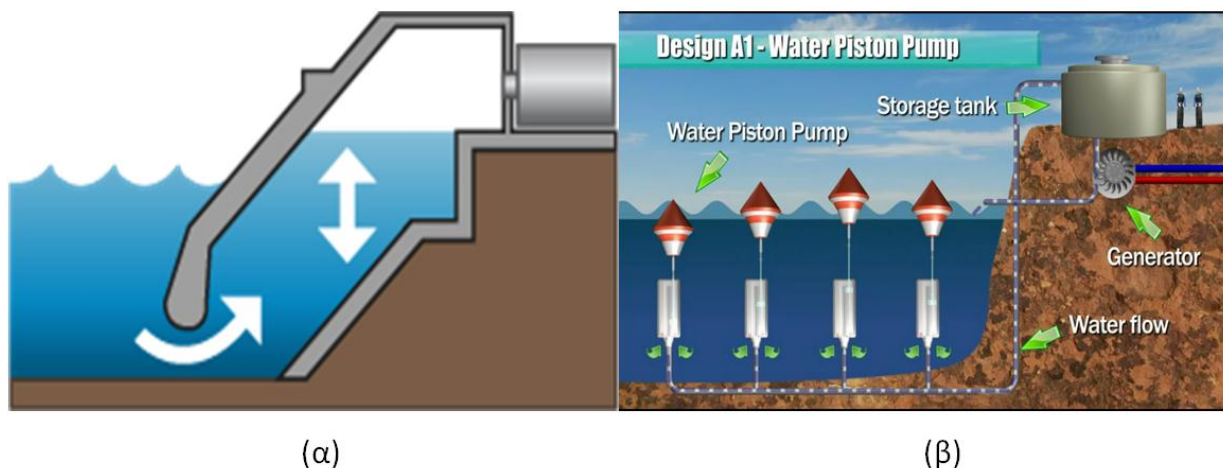


Σχήμα 2.17 Υδροηλεκτρική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού

Η κυματική ενέργεια προέρχεται από τον άνεμο ο οποίος πνέει στους ωκεανούς και μεταδίδει την ενέργεια του στο νερό κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας. Συμπερασματικά, μπορεί να χαρακτηριστεί έντονα απρόβλεπτη πηγή που μεταβάλλεται από κύμα σε κύμα και από μήνα σε μήνα και το μεγαλύτερο δυναμικό της οποίας υπάρχει όπου υπάρχουν ισχυροί άνεμοι. Από την άλλη, η κυματική ενέργεια είναι ίσως η υψηλότερη μεταξύ των ανανεώσιμων και η διαθεσιμότητα της φτάνει πολλές φορές το 90% της χρονικής περιόδου. Υπάρχουν ποικίλοι τρόποι με τους οποίους μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό ανάλογα με τον τρόπο που απορροφάται από τα κύματα, είτε άμεσα από την κίνηση της επιφάνειας του νερού, ή από μεταβολές πιέσεων στον πυθμένα της θάλασσας. Επίσης, αναλόγως του τοπικού βάθους οι συσκευές που χρησιμοποιούνται διαχωρίζονται σε ακτογραμμής, πλησίον της ακτής και υπεράκτιες.

Ενώ θα μπορούσε να καλύψει την παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, το αξιοποιήσιμο δυναμικό της κυματικής ενέργειας περιορίζεται γιατί μπορεί να εκμεταλλευτεί πρακτικά μόνο κοντά στις ακτογραμμές λόγω του κόστους από τη μεταφορά ηλεκτρισμού σε μεγάλες αποστάσεις και σε αυτά τα σημεία εμφανίζεται μειωμένο λόγω της αλληλεπίδρασης του με τον πυθμένα.

Στο Σχήμα 2.18 φαίνεται μια προσομοίωση μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων σε ηλεκτρική (α) με άμεση μετατροπή ή (β) με χρήση εμβολοφόρων αντλιών.

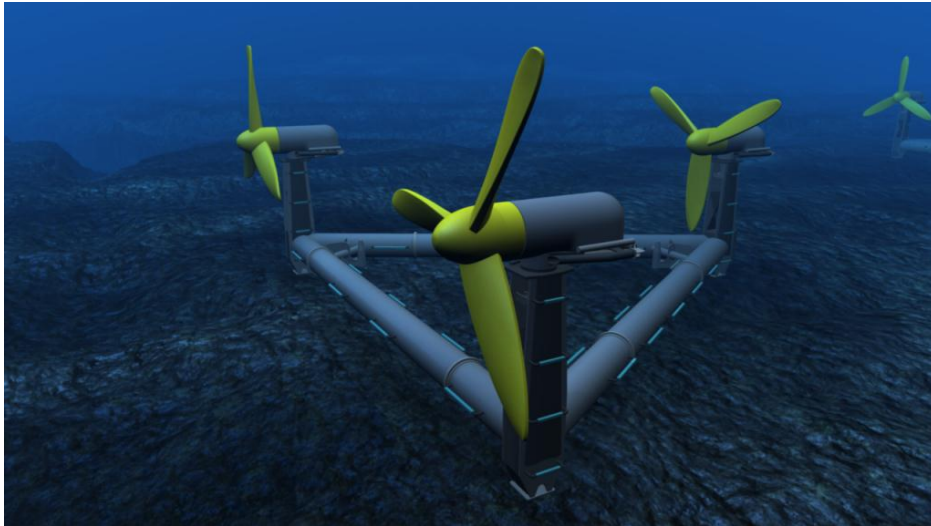


**Σχήμα 2.18** Παραγωγή ηλεκτρισμού (α) άμεσα και (β) μέσω εμβολοφόρων αντλιών

Η παλιρροιακή ενέργεια ορίζεται ως η ενέργεια που προέρχεται από την κίνηση της παλίρροιας λόγω φυγόκεντρων και βαρυτικών δυνάμεων μεταξύ της γης, της σελήνης και του ήλιου. Αυτό το φυσικό φαινόμενο μπορεί να δημιουργήσει τόσο την ύψωση και το πέσιμο της παλίρροιας, όπου εφαρμόζονται ίδιες τεχνικές με αυτές των υδροηλεκτρικών μονάδων και η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική, όσο και ρεύματα λόγω πλημμυρίδας και άμπωτη, όπου όμοια με τις αρχές λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική από την περιστροφή στροβίλων παλιρροιακών ρευμάτων στον πυθμένα της θάλασσας. Τέλος, η παλιρροιακή ενέργεια μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην αύξηση συμμετοχής των ΑΠΕ στο σύστημα αφού είναι απόλυτα προβλέψιμη πηγή.

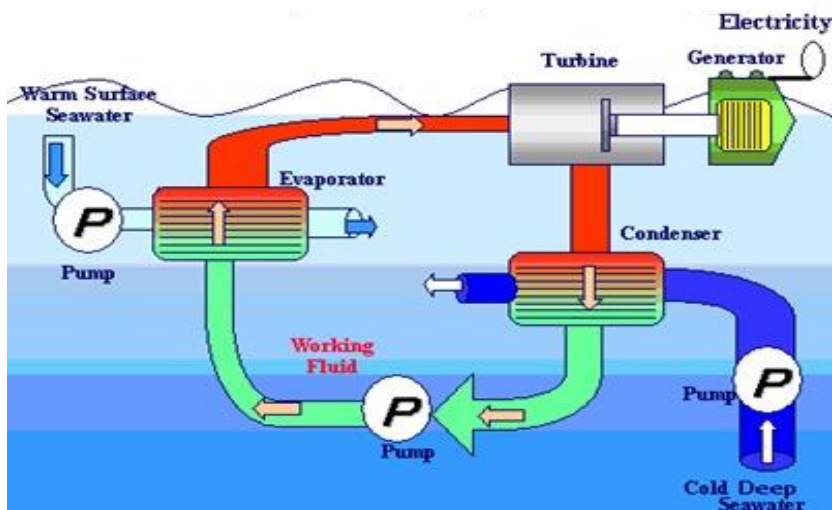
Στο Σχήμα 2.19 απεικονίζεται μια τυπική διάταξη στροβίλων παλιρροιακών ρευμάτων. Όπως και στην περίπτωση εγκατάστασης τεχνολογιών παραγωγής, έπειτα από μετατροπή της κυματικής ενέργειας πρέπει στη μελέτη εγκατάστασης τους να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι απώλειες και το κόστος μεταφοράς του ηλεκτρισμού στα σημεία κατανάλωσης.





**Σχήμα 2.19** Παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω στροβίλων παλιρροιακών ρευμάτων

Η ωκεάνια θερμότητα λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της ζεστής επιφάνειας της θάλασσας και του κρύου πυθμένα της, μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρισμού βασισμένη σε κύκλους είτε κλειστών, ανοικτών ή υβριδικών κυκλωμάτων, όμως λόγω του ότι η διαφορά είναι μικρή το ρευστό που χρησιμοποιείται πρέπει να έχει χαμηλό σημείο βρασμού (ώστε να εξατμίζεται σε μικρότερη θερμοκρασία), και αφού εξατμιστεί εκτονώνεται σε στρόβιλο ο οποίος περιστρέφεται μαζί με μια γεννήτρια. Ο βαθμός απόδοσης αυτής της μετατροπής είναι πολύ χαμηλός γι' αυτό η χρήση της περιορίζεται κυρίως για εφαρμογές θέρμανσης/ψύξης παρά για ηλεκτρισμό.

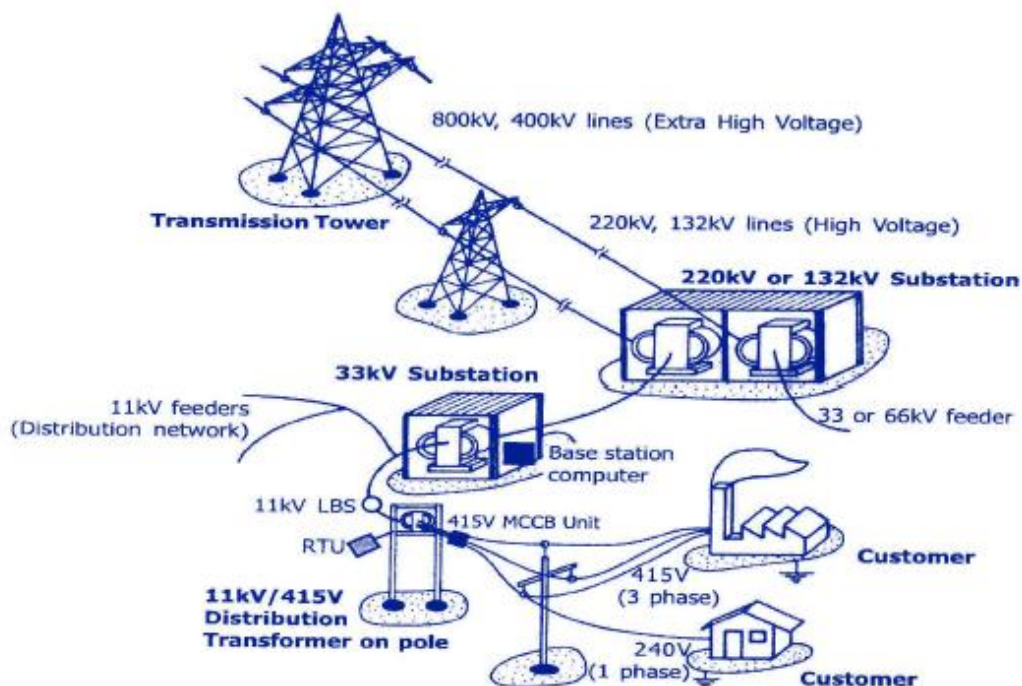


**Σχήμα 2.20** Παραγωγή ηλεκτρισμού μέσω κλειστού κυκλώματος

## 2.2 Δίκτυα μεταφοράς και διανομής

Τα δίκτυα μεταφοράς διασυνδέουν τα σημεία παραγωγής με τα σημεία κατανάλωσης μειώνοντας τις ανάγκες εφεδρείας και το κόστος και αυξάνοντας την αξιοπιστία. Η μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις γίνεται με υψηλή εναλλασσόμενη τάση HVAC ώστε να υπερνικούνται οι πτώσεις τάσης λόγω αντίστασης του καλωδίου. Σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις, αρχίζει να επιδρά και η επαγωγή των καλωδίων και συνεπώς η μεταφορά γίνεται με υψηλή συνεχή τάση HVDC έπειτα από AC σε DC μετατροπή μέσω ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος. Έτσι, εφόσον η συχνότητα είναι μηδέν, η εμπέδηση στα καλώδια λόγω επαγωγής που είναι ανάλογη της συχνότητας είναι επίσης μηδέν.

Τα δίκτυα διανομής, λαμβάνουν την ηλεκτρική ενέργεια από τα επίπεδα μέσης ή υψηλής τάσης στους υποσταθμούς μέσω μετασχηματιστών και είναι υπεύθυνα για την τροφοδοσία των τριφασικών ή μονοφασικών καταναλωτών, μέσης και χαμηλής τάσης. Οι γραμμές μεταφοράς και διανομής ενδέχεται να είναι υπέργειες, επίγειες ή υπόγειες, και μια τυπική διάταξη συστήματος μεταφοράς και διανομής φαίνεται ξεκάθαρα στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.21 Τυπική διάταξη συστήματος μεταφοράς και διανομής

## 2.3 Ιστορική αναδρομή

Στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα η ηλεκτρική ενέργεια ήταν μια νέα εφεύρεση, που είχε να συναγωνιστεί με ατμό, υδραυλικά, άμεση θέρμανση και ψύξη, φως και κυρίως με το φυσικό αέριο. Έπειτα από μεγάλο χρονικό διάστημα, όπου όλη η ενέργεια παραγόταν κοντά στη συσκευή κατανάλωσης, τη δεκαετία του 1920 επιχειρήσεις κοινής οφελείας ενωποιήθηκαν για την ίδρυση ενός ευρύτερου δικτύου. Έτσι, από την ίδρυση της παραγωγής ηλεκτρικού φορτίου στη βιομηχανική εποχή, το ηλεκτρικό δίκτυο είναι η εξέλιξη ενός νησιώτικου συστήματος, το οποίο εξυπηρετούσε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, σε ένα ευρύτερο, επεκτατικό δίκτυο στο οποίο ενσωματώθηκαν πολλές περιοχές. Το 1934 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αναγνωρίστηκε ως δημόσιο αγαθό μαζί με το φυσικό αέριο, το νερό και το τηλέφωνο θέτοντας στις εταιρίες περιορισμούς και ρυθμιστική εποπτεία των δραστηριοτήτων τους.

Η πετρελαϊκή κρίση του 1973 επέφερε αυξήσεις στις τιμές των καυσίμων δίνοντας το έναυσμα για έναρξη συζητήσεων με σκοπό την εύρεση τρόπων για εύλογο περιορισμό της ζήτησης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 το ενδιαφέρον στράφηκε προς τις μεθόδους με τις οποίες θα μπορούσαν οι χώρες να διαφοροποιήσουν την καμπύλη του φορτίου ζήτησης. Σε πρώτο στάδιο θεωρήθηκε ότι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης θα αποτελούσε φθηνότερη επένδυση από την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής. Το αποτέλεσμα ήταν ο ορισμός της διαχείρισης της ενέργειας στην πλευρά ζήτησης (Demand Side Management) με βασικό σκοπό τη μεταβολή της τελικής χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας, την ολίσθηση της ζήτησης από περιόδους αιχμής σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και τη διαχείριση της σε καταστάσεις διακοπτόμενης παραγωγής. Η συνέπεια που προέκυψε ήταν η μείωση των εσόδων των εταιριών με συνεπακόλουθο την υποχρεωτική αύξηση πώλησης του παραγόμενου ηλεκτρισμού μέχρι τα τέλη της δεκαετίας.

Το 1992 η αγορά ηλεκτρισμού απελευθερώθηκε, ενώ λίγο αργότερα (μέσα της δεκαετίας) αυξήθηκε ο ανταγωνισμός μεταξύ των ανεξάρτητων παραγωγών με αποτέλεσμα από κεντρική η παραγωγή να μετατραπεί σε έντονα διεσπαρμένη. Στα τέλη της δεκαετίας και αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα το ενδιαφέρον στρέφεται προς την αύξηση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού, μετατρέποντας τα ηλεκτρικά δίκτυα σε πολύπλοκα συστήματα,



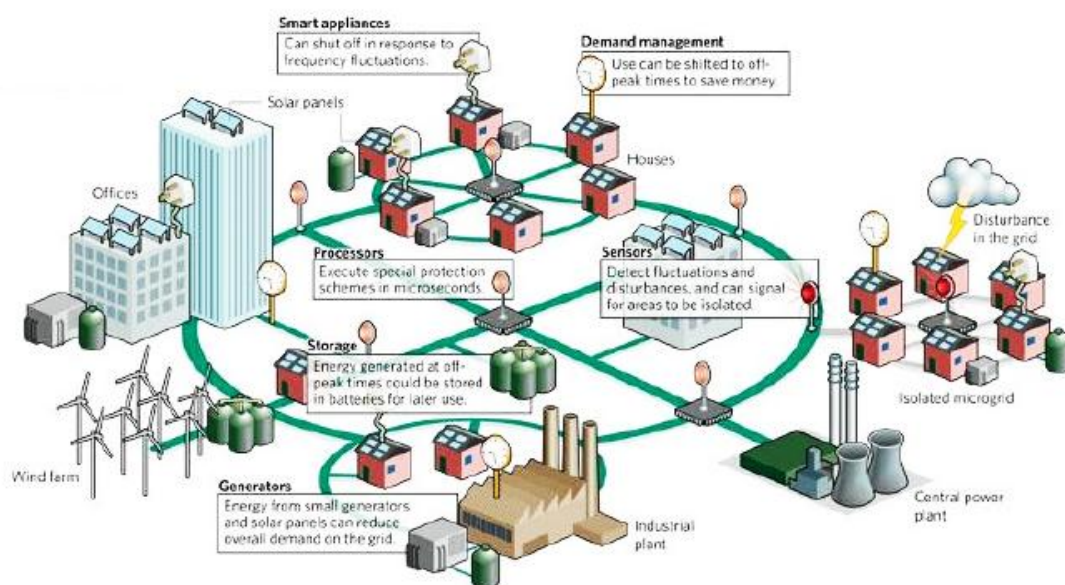
υποχρεωμένα όμως να καλύπτουν τις καθημερινές ανάγκες αδιάλειπτα και απρόσκοπτα. Σήμερα η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης διασφαλίζεται μέσω της διαχείρισης, τόσο στην πλευρά της παραγωγής (Supply Side Management) όσο και στην πλευρά της ζήτησης (Demand Side Management). Στην περίπτωση SSM η παραγωγή διαμορφώνεται, ώστε να καλύψει την αυξανόμενη ζήτηση, η οποία αντιμετωπίζεται είτε με εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής είτε με το βέλτιστο προγραμματισμό των υπαρχόντων. Στην περίπτωση DSM στόχος είναι η εφαρμογή τεχνικών περιορισμού της ζήτησης σε περιόδους που το κόστος παραγωγής είναι υψηλό ή η διαθεσιμότητα του ηλεκτρισμού είναι χαμηλή, δίνοντας τη δυνατότητα ενεργού συμμετοχής των καταναλωτών στην απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μέχρι στιγμής πορεία του ηλεκτρικού συστήματος φανερώνει ξεκάθαρα την μεγάλη ανάγκη χρήσης συστημάτων αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία των σύγχρονων συστημάτων παραγωγής έρχεται συνεχώς αντιμέτωπη με διάφορα προβλήματα όπως η χαμηλή απόδοση μετατροπής της πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική (περίπου 30%), οι αυξημένες απώλειες μεταφοράς της (κοντά στο 8%) και τα υπερμεγέθη των απαιτούμενων μονάδων για κάλυψη των φορτίων αιχμής (που στις περισσότερες περιπτώσεις ξεπερνά το 20%). Επιπλέον, η παραγωγή στηρίζεται στην οικονομία άνθρακα επιβαρύνοντας συνεχώς το περιβάλλον και αφήνοντας εκτεθειμένες τις οικονομίες χωρών που εξαρτώνται αποκλειστικά από την εισαγωγή του. Τόσο η ενσωμάτωση ΑΠΕ στο δίκτυο όσο και η σωστή διαχείριση SSM ή DSM απαιτούν αξιόπιστα και αποδοτικά συστήματα, ικανά να διατηρήσουν αποθηκευμένη την ενέργεια έως ότου χρειαστεί. Ακόμα μεγαλύτερη ανάγκη αποθήκευσης θα απαιτείται από τα μελλοντικά ηλεκτρικά δίκτυα, ονόματι ευφυή δίκτυα (smart grids).

Η επιτακτική αυτή ανάγκη μετατόπισης προς άλλη μορφή δικτύου απαιτεί ψηλά κεφάλαια επένδυσης. Με τη ραγδαία εξέλιξη στον τομέα της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών, τα νέα δίκτυα θα είναι σε θέση να μεταφέρουν και να διανέμουν με βέλτιστο τρόπο την ηλεκτρική ενέργεια από τους παροχείς στους καταναλωτές. Με ψηφιακές πλέον τεχνολογίες, αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης και εκπαίδευσης μέσω νευρωνικών δικτύων, το ευφυές δίκτυο θα μπορεί να παρακολουθεί και να προβλέπει τις μεταβαλλόμενες ανάγκες των καταναλωτών, ώστε να επιτυγχάνει μεταφορά από όλες της πηγές. Με το σωστό συντονισμό των αναγκών φορτίου, των

δυνατοτήτων παραγωγής, των διαχειριστών δικτύου και άλλων οντοτήτων της αγοράς ηλεκτρισμού, το κόστος ηλεκτρισμού και η επίδραση στο περιβάλλον θα ελαχιστοποιηθούν, ενώ η σταθερότητα, η αξιοπιστία και η ασφάλεια του δικτύου θα μεγιστοποιηθούν. Παράλληλα, κάθε ευφυές δίκτυο θα περιέχει όλους τους απαιτούμενους μηχανισμούς αυτο-ίασης, δηλαδή αυτόματης απομόνωσης των σφαλμάτων και επαναφοράς στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Το ευρύτερο πλαίσιο των ευφύων δικτύων περιλαμβάνει δύο άλλες έννοιες δικτύων, τα μικροδίκτυα (Microgrids) και τους εικονικούς σταθμούς παραγωγής (Virtual Power Plants). Τα μικροδίκτυα είναι δίκτυα χαμηλής τάσης που περιλαμβάνουν μονάδες διανεμημένης παραγωγής, αποθηκευτικά μέσα και διατάξεις έλεγχου των φορτίων. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ποικίλει από μερικές εκατοντάδες kW έως μερικά MW. Το χαρακτηριστικό των μικροδικτύων είναι ότι μπορούν να μεταβούν άμεσα σε λειτουργία νησιδοποίησης (islanding), έτσι ώστε να απομονωθούν από τα σφάλματα των συνδεδεμένων με αυτά δικτύων. Οι εικονικοί σταθμοί παραγωγής είναι συστάδες εγκατεστημένης ισχύος που περιλαμβάνουν διανεμημένη παραγωγή (π.χ. συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, μικρά υδροηλεκτρικά, κτλ.) και η οποία ελέγχεται από μια μονάδα κεντρικού έλεγχου. Πλεονεκτεί σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς σε θέματα ευελιξίας αλλά προκύπτουν θέματα βελτιστοποίησης της λειτουργίας και του ελέγχου.



Σχήμα 2.22 Αναπαράσταση ευφούς δικτύου

### **3. Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας**

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, που τα τελευταία χρόνια αυξάνεται ολοένα και περισσότερο, σπάνια μπορεί να ανταποκριθεί άμεσα στη ζήτηση αφού αυτές οι πηγές αδυνατούν να παραδώσουν ρυθμισμένη τροφοδοσία εύκολα προσαρμόσιμη στις απαιτήσεις του καταναλωτή. Η αποκεντρωμένη ή διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρισμού και η εισαγωγή έντονα μεταβαλλόμενων πηγών αυξάνει τη δυσκολία να κρατηθεί το δίκτυο σε ευστάθεια κυρίως λόγω ανισορροπίας μεταξύ παραγωγής-ζήτησης. Ως εκ τούτου, η χρήση συστημάτων αποθήκευσης κρίνεται αναπόφευκτη για τη σωστή διαχείριση της ενέργειας και την παράλληλη προσαρμογή της στη ζήτηση.

Η αποθήκευση ηλεκτρισμού αναφέρεται σε μια διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα δίκτυο ισχύος σε μία μορφή που μπορεί να αποθηκευτεί και να μετατραπεί ξανά στην αρχική όταν απαιτηθεί. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει στον ηλεκτρισμό να παραχθεί σε ώρες χαμηλής ζήτησης, χαμηλού κόστους παραγωγής ή από διαλείπουσες πηγές ενέργειας και να χρησιμοποιηθεί σε ώρες μεγάλης ζήτησης, υψηλού κόστους παραγωγής ή όταν καμιά άλλη μονάδα παραγωγής δεν είναι διαθέσιμη. Γενικά, υπάρχουν δύο κριτήρια κατηγοριοποίησης των ΣΑΗΕ. Το πρώτο βασίζεται στις συναρτήσεις εφαρμογών και διαχωρίζει τις τεχνολογίες που προορίζονται για εφαρμογές μεγάλης ισχύος και για εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Το δεύτερο, ανάλογα με τη μορφή στην οποία αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια, διαχωρίζει τις τεχνολογίες σε ηλεκτρικής, μαγνητικής, μηχανικής και χημικής ενέργειας.

#### **3.1 Αρχή λειτουργίας ΣΑΗΕ**

Οι μέχρι σήμερα γνωστές τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρισμού είναι οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και μπαταρίες ροής, οι πυκνωτές και υπερπυκνωτές, τα υπερπηνία, οι σφόνδυλοι, η αντλησιοταμίευση, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα και οι κυψέλες υδρογόνου. Σύμφωνα με το πρώτο κριτήριο, οι πυκνωτές και οι υπερπυκνωτές, τα υπερπηνία, οι σφόνδυλοι και οι μικρής-κλίμακας μπαταρίες προορίζονται για υψηλής ισχύος εφαρμογές, ενώ η αντλιοσταμίευση, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα, οι μεγάλης-κλίμακας μπαταρίες και οι μπαταρίες ροής, και οι

κυψέλες υδρογόνου προτιμούνται για εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Σύμφωνα με το δεύτερο κριτήριο, οι τεχνολογίες αποθήκευσης κατηγοριοποιούνται ως εξής:

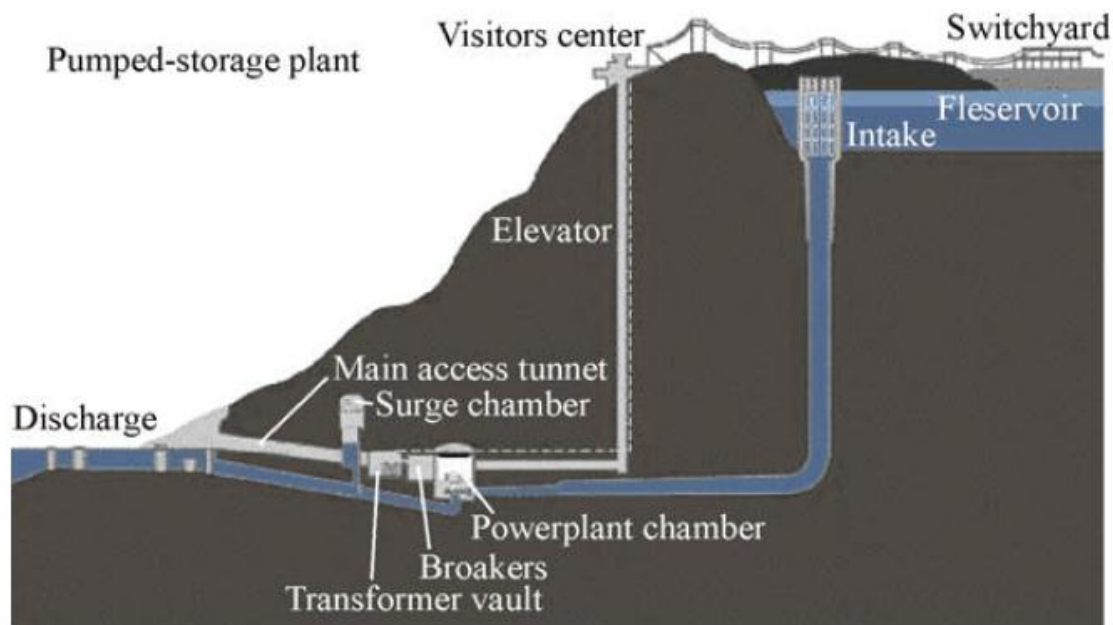
- Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας: πυκνωτές και υπερπυκνωτές
- Αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας: υπερπηνία
- Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας:
  - Κινητικής: σφόνδυλοι
  - Δυναμικής: αντλησιοταμίευση και συστήματα πεπιεσμένου αέρα
- Αποθήκευση χημικής ενέργειας: μπαταρίες, μπαταρίες ροής και κυψέλες υδρογόνου

### **3.1.1 Αντλησιοταμίευση**

Η αντλησιοταμίευση είναι η περισσότερο χρησιμοποιούμενη τεχνολογία αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Όπως ενδείκνυται και σχηματικά στο Σχήμα 3.1, αποτελείται από δύο δεξαμενές τοποθετημένες σε διαφορετικό ύψος, μία αντλία για μεταφορά του νερού στο ψηλότερο σημείο και έναν στρόβιλο που παράγει ηλεκτρισμό κατά την πτώση του νερού στο χαμηλότερο σημείο. Το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας είναι ανάλογο της υψομετρικής διαφοράς μεταξύ των δύο δεξαμενών και του όγκου του αποθηκευμένου νερού. Υπόγεια αντλησιοταμίευση μπορεί ακόμη να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας πλημμυρισμένα ορυχεία καθώς επίσης σε πολλές περιπτώσεις την κάτω δεξαμενή μπορεί να αντικαταστήσει η ανοικτή θάλασσα.

Αφότου χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην Ιταλία και την Ελβετία (το 1890) και ακολούθως (το 1929) στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, σήμερα υπάρχουν πάνω από 200 μονάδες παγκοσμίως παρέχοντας 100 GW εγκατεστημένη ισχύ που κατανέμεται ως: 32 GW στην Ευρώπη, 21 GW στην Ιαπωνία, 19.5 GW στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και το υπόλοιπο στην Ασία και Λατινική Αμερική. Η συνολική της εισφορά στην παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί στο 3%. Το μεγάλο μειονέκτημα της έγκειται στην έλλειψη διαθεσιμότητας περιοχών για εγκατάσταση δύο μεγάλης-κλίμακας δεξαμενών και ενός ή δύο φραγμάτων. Επίσης, ο μεγάλος χρόνος εγκατάστασης και

το υψηλό κόστος σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά θέματα αποψίλωσης δέντρων κ.τ.λ. είναι τα άλλα τρία μειονεκτήματα της.



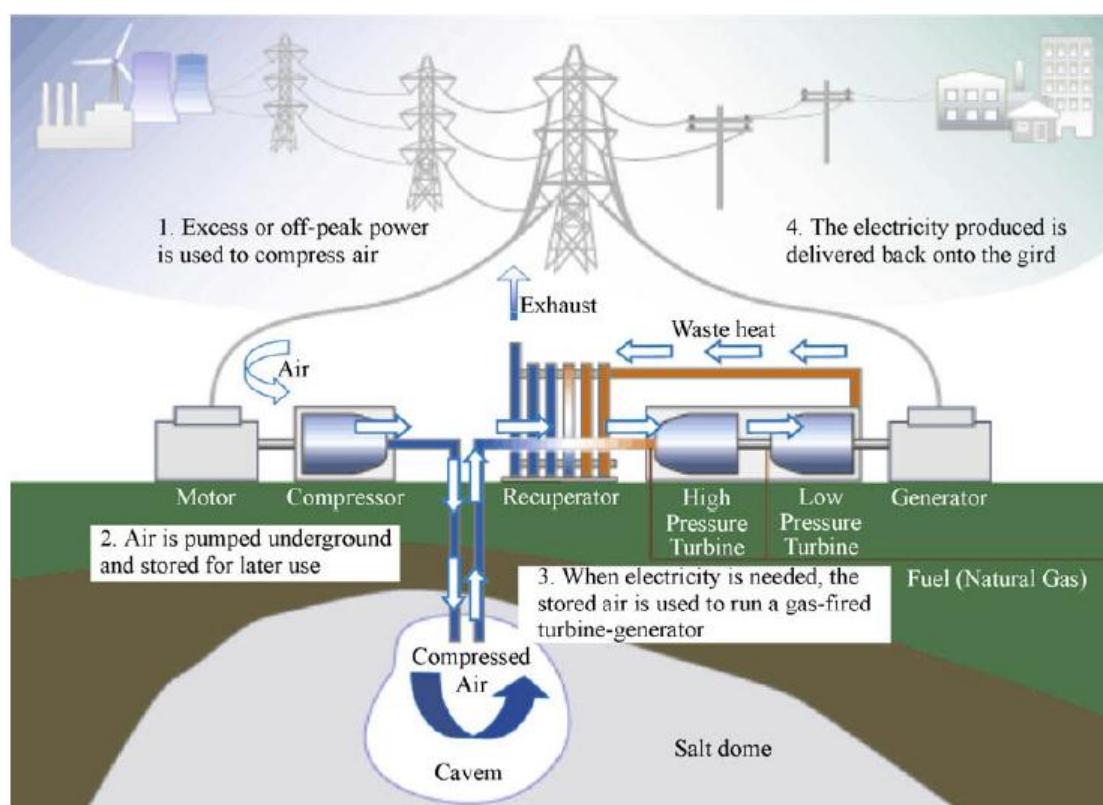
**Σχήμα 3.1** Τυπική διάταξη μονάδας αντλιοσταμείωσης

### 3.1.2 Συστήματα πεπιεσμένου αέρα

Τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα αποτελούν τη δεύτερη διαθέσιμη τεχνολογία που είναι ικανή να αποθηκεύσει μεγάλα ποσά ηλεκτρισμού που σε πολλές περιπτώσεις ξεπερνούν τα 100 MW. Το Σχήμα 3.2 απεικονίζει ένα σύστημα πεπιεσμένου αέρα, το οποίο αποτελείται από έναν κινητήρα/γεννήτρια που περιλαμβάνει συμπλέκτη παρέχοντας εναλλακτικά περιστροφή στο συμπυκνωτή ή τον στρόβιλο, έναν συμπυκνωτή αέρα και την κοιλότητα, όπου καταλήγει ο συμπιεσμένος αέρας για αποθήκευση. Τα εν λόγω συστήματα λειτουργούν στην ίδια βάση μιας συμβατικής αεριοστροβιλικής μονάδας. Κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης, χρησιμοποιούν τον ηλεκτρισμό για να συμπιέσουν και να αποθηκεύσουν αέρα σε πιέσεις μεταξύ 4 και 8 MPa υπό μορφή δυναμικής ενέργειας, ενώ κατά τις ώρες αιχμής ο αέρας αποδεσμεύεται και θερμαίνεται μέσω του στροβίλου υψηλής πίεσης. Ακολούθως, αναμιγνύεται με καύσιμο και τελικά έπειτα από καύση του μίγματος, εκτονώνονται τα καυσαέρια σε στρόβιλο χαμηλής πίεσης σε σειρά με τη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρισμού.



Παγκοσμίως, υπάρχουν δύο συστήματα πεπιεσμένου αέρα. Το πρώτο βρίσκεται στη Γερμανία σε λειτουργία από 1978 με κοιλότητα 310000 m<sup>3</sup>, σε βάθος 600 m, πίεση αέρα στα 10 MPa και ισχύ 290 MW. Το δεύτερο βρίσκεται στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής σε λειτουργία από το 1991 με κοιλότητα 500000 m<sup>3</sup>, σε βάθος 450 m, πίεση αέρα στα 7.5 MPa και ισχύ 110 MW. Όμοια με τις μονάδες αντλιοσταμείωσης, τα κύρια μειονεκτήματα αυτών των συστημάτων είναι οι δυσεύρετες διαθέσιμες κοιλότητες για αποθήκευση και η επένδυση τους είναι οικονομικά συμφέρουσα μόνο για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις κοντά σε αυτές. Το επιπρόσθετο τους μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν για την παραγωγή ηλεκτρισμού και κατανάλωση καυσίμου.



**Σχήμα 3.2** Τυπική διάταξη μονάδας πεπιεσμένου αέρα

### 3.1.2 Μπαταρίες

Οι επαναφορτιζόμενες δευτερογενείς μπαταρίες αποτελούν την παλαιότερη μορφή αποθήκευσης ηλεκτρισμού. Μία μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα κελιά καθένα από τα οποία αποτελείται από έναν υγρό ή στερεό ηλεκτρολύτη, μέσα

στον οποίο είναι βυθισμένες η άνοδος (θετικό ηλεκτρόδιο) και η κάθοδος (αρνητικό ηλεκτρόδιο). Κατά την εκφόρτιση, πραγματοποιούνται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια προκαλώντας ροή των ηλεκτρονίων σε εξωτερικό κύκλωμα. Σε αντίθεση με τις πρωτογενείς, που δεν επιδέχονται επαναφόρτιση, στις δευτερογενείς μπαταρίες οι αντιδράσεις αυτές είναι αμφίδρομες επιτρέποντας τους να φορτίζονται όταν εφαρμοστεί μία τάση στα άκρα των ηλεκτροδίων.

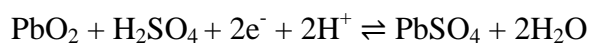
Οι δευτερογενείς μπαταρίες, ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούν ως ηλεκτρόδια και ηλεκτρολύτες, μπορούν να ταξινομηθούν στις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, αλκαλικές, μετάλλου-αέρα, υψηλής θερμοκρασίας και λιθίου.

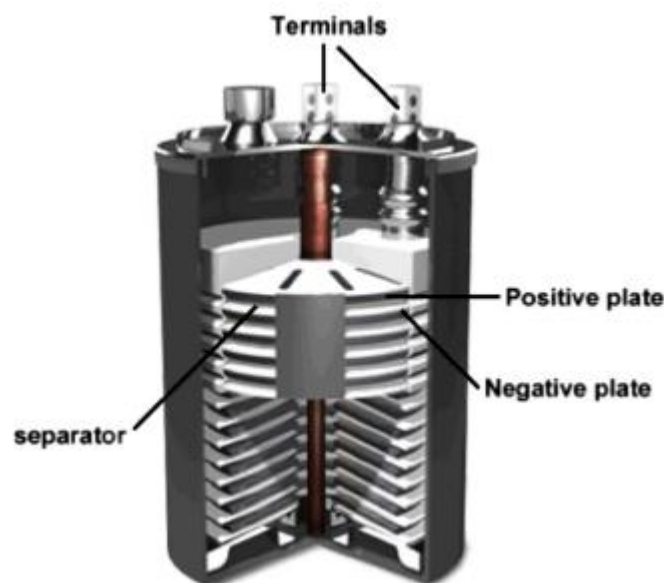
Μολύβδου-οξέος: Ως ο γηραιότερος τύπος δευτερογενούς μπαταρίας, χρησιμοποιείται ευρέως σε αυτοκίνητα και σκάφη για την εκκίνηση και γκάμα άλλων εφαρμογών, αλλά θεωρείται και ως μία από τις καλύτερες επιλογές σε ακίνητες εφαρμογές, αφού μπορεί να παρέχει εξαιρετικής ποιότητας παλμική ισχύ. Παρόλο που κατέχει ωριμότητα πάνω από ένα αιώνα, ο μολύβδος και το θειικό οξύ που χρησιμοποιούνται ως άνοδος και ηλεκτρολύτης αντίστοιχα, είναι τοξικά και απαιτούν επιπλέον περιοδική συντήρηση (συμπλήρωση νερού κυρίως). Πάντως, συστοιχίες μπαταριών αυτού του τύπου μέχρι και 40 MW χρησιμοποιούνται ήδη για παραγωγή ηλεκτρισμού από ανανεώσιμες πηγές στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση αντίστοιχα είναι οι ακόλουθες:

Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:

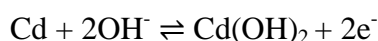




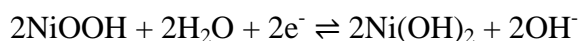
**Σχήμα 3.3** Τυπική δομή μπαταρίας μολύβδου-οξέος

Αλκαλικές μπαταρίες: Οι νικελίου-σιδήρου, νικελίου-καδμίου και νικελίου-μετάλλου-υδριδίου αποτελούν τις αλκαλικές μπαταρίες, των οποίων η κάθοδος αποτελείται από οξείδιο του νικελίου, ενώ για ηλεκτρολύτη χρησιμοποιούν υδροξείδιο του καλίου. Οι νικελίου-καδμίου χρησιμοποιούνται ευρέως, τόσο σε σταθερές όσο και κινητές εφαρμογές, απαιτώντας λιγότερη συντήρηση από τις μπαταρίες μολύβδου οξέως. Όμοια όμως με αυτές, μετά το πέρας του κύκλου ζωής τους, η τοξικότητα του καδμίου δημιουργεί περιβαλλοντικές ανησυχίες και για αυτό εκτοπίζονται σε μεγάλο βαθμό. Το μεγαλύτερο σύστημα μπαταριών Ni-Cd απαντάται στην Αλάσκα των ΗΠΑ, προσφέροντας στρεφόμενη εφεδρεία στα 40 MW. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν μέρος είναι οι ακόλουθες:

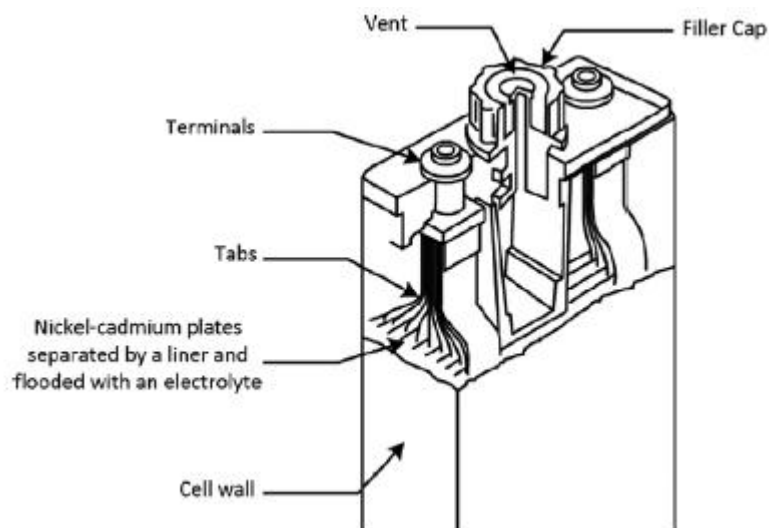
Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:



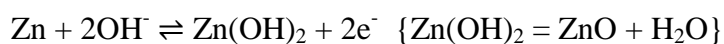




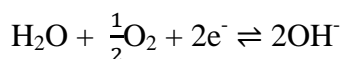
**Σχήμα 3.4** Τυπική δομή μπαταρίας νικελίου-καδμίου

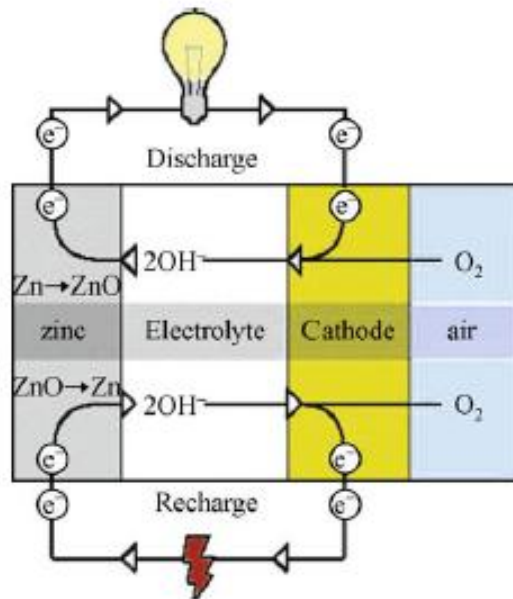
Μετάλλου-αέρα: Αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία αλκαλικών μπαταριών που για άνοδο χρησιμοποιούν κοινώς διαθέσιμα μέταλλα, όπως αλουμίνιο και ψευδάργυρο, ενώ στην κάθοδο ή ηλεκτρόδιο αέρα πορώδες δομή άνθρακα. Για ηλεκτρολύτη χρησιμοποιούν, όπως και οι αλκαλικές, υδροξείδιο του καλίου, που είναι καλός αγωγός ιόντων υδροξυλίων είτε σε υγρή είτε σε στερεά μορφή πολυμερούς μεμβράνης. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι κατέχουν το χαμηλότερο κόστος και είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Παρόλα αυτά επαναφορτίζονται πολύ δύσκολα σύμφωνα με τις χημικές αντιδράσεις στην άνοδο και την κάθοδο που ακολουθούν:

Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:





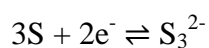
**Σχήμα 3.5** Τυπική δομή μπαταρίας ψευδαργύρου-αέρα

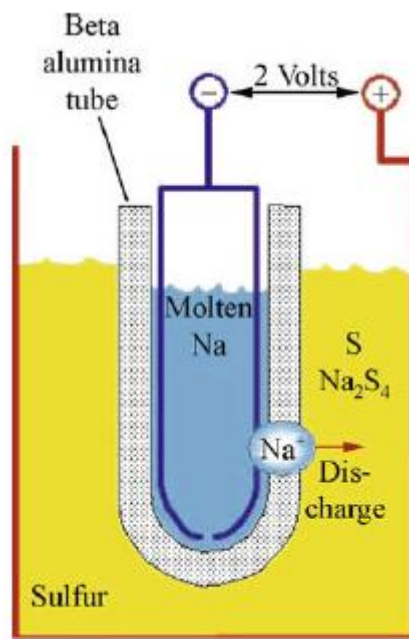
Υψηλής θερμοκρασίας: Οι μπαταρίες υψηλής θερμοκρασίας αποτελούνται από υγρό νάτριο ως υλικό ανόδου, στερεό ηλεκτρολύτη βήτα-αλουμίνα και ανάλογα με το στερεό αντιδρών της καθόδου διαχωρίζονται σε θεικού νατρίου και νατρίου μετάλλου χλωριδίου (ZEBRA). Οι θεικού νατρίου μπαταρίες κατασκευάζονται από φθηνά υλικά και θεωρούνται ελκυστικές για μεγάλης-κλίμακας σταθερές εφαρμογές. Τα βασικά τους μειονεκτήματα είναι η διαβρωτική φύση των υλικών που χρησιμοποιούνται και η απαιτούμενη θερμοκρασία των 300-400°C προκειμένου να εξασφαλιστεί η ρευστή μορφή του ηλεκτρολύτη. Από την άλλη, οι μπαταρίες ZEBRA κατασκευάζονται από μη διαβρωτικά υλικά και αντιμετωπίζουν τα προβλήματα αυτά απαιτώντας χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι μπαταρίες θεικού νατρίου παρουσιάζονται σε πάνω από 30 περιοχές της Ιαπωνίας παρέχοντας περισσότερα από 20 MW ισχύ και αποθηκευμένη ενέργεια για 8 ώρες. Οι εξισώσεις που περιγράφουν έναν κύκλο φόρτισης/εκφόρτισης στην άνοδο και την κάθοδο μιας μπαταρίας θεικού νατρίου δίνονται πιο κάτω:

Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:

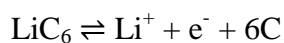




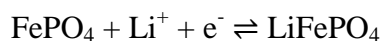
**Σχήμα 3.6** Τυπική δομή μπαταρίας θεικού νατρίου

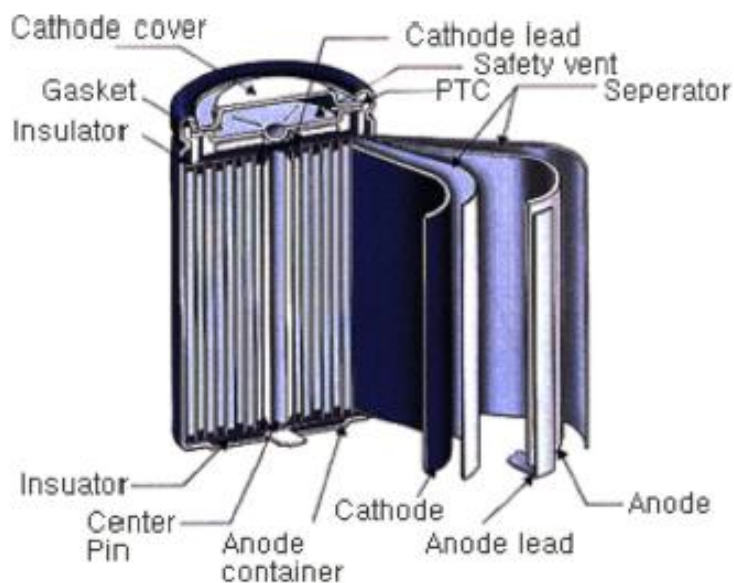
Λιθίου: Η τελευταία μεγάλη τεχνολογία αποθήκευσης μέσω μπαταριών είναι τα συστήματα λιθίου-ιόντος. Τα συστήματα αυτά περιέχουν άνοδο γραφίτη, κάθοδο οξειδίου λιθίου-μετάλλου και ηλεκτρολύτη από άλας λιθίου διαλυμένο σε οργανικό υγρό με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόδια να μπορούν αμφίδρομα να φιλοξενούν ιόντα και ηλεκτρόνια. Το μικρό τους μέγεθος και βάρος καθιστά αυτό τον τύπο μπαταριών κατάλληλο για κινητές εφαρμογές και ηλεκτρικά οχήματα. Παρόλα αυτά, τη χρήση τους σε πολλές εφαρμογές εμποδίζει το μεγάλο τους κόστος και το απαγορευτικό για τον κύκλο ζωής τους μεγάλο βάθος εκφόρτισης. Παρόλο που η εφαρμογή τους σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις είναι ακόμα υπό μελέτη, συστοιχίες μέχρι 3 kW έχουν επιτευχθεί ενώ μεγαλύτερης ισχύος μέχρι 100 kW για μικρά χρονικά διαστήματα (1 λεπτού) εξετάζονται από εταιρείες των ΗΠΑ σε εφαρμογές βελτίωσης της ποιότητας τροφοδοσίας. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στην άνοδο και την κάθοδο μιας μπαταρίας λιθίου είναι οι ακόλουθες:

Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:



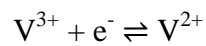


**Σχήμα 3.7** Τυπική δομή μπαταρίας λιθίου-ιόντος

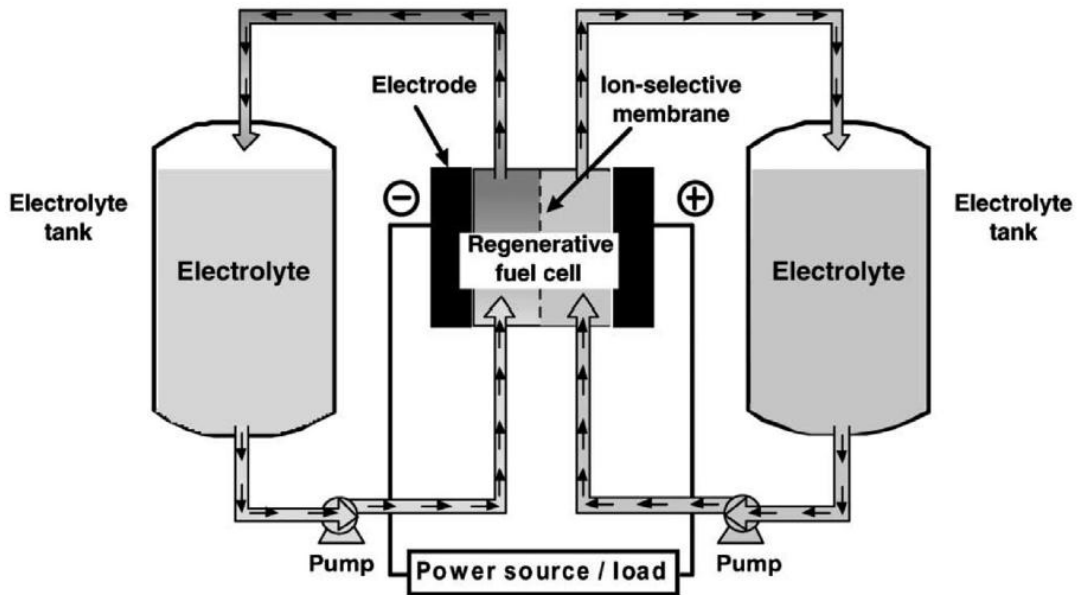
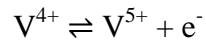
### 3.1.4 Μπαταρίες ροής

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες, οι οποίες αποθηκεύουν ενέργεια σε στερεάς μορφής ηλεκτρόδια, οι μπαταρίες ροής μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημικό δυναμικό, το οποίο αποθηκεύεται σε δύο διαλύματα ηλεκτρολυτών που βρίσκονται σε εξωτερικές δεξαμενές το μέγεθος των οποίων καθορίζει και την πυκνότητα της μπαταρίας. Οι δύο κύριες τεχνολογίες μπαταριών ροής είναι οι οξειδοαναγωγής-βαναδίου στις οποίες το βανάδιο μέσα σε θειικό οξύ χρησιμοποιείται σε αμφοτέρως τις δεξαμενές αλλά με διαφορετικό σθένος και οι βαναδίου-ψευδαργύρου στις οποίες και οι δύο βρόχοι φιλοξενούν ηλεκτρολύτη βαναδίου-ψευδαργύρου. Παρόλο που μπορεί να χρειάζονται εξειδικευμένο εξοπλισμό σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες όπως αισθητήρες ροής και μονάδες ελέγχου, παρέχουν το μεγάλο πλεονέκτημα αύξησης της πυκνότητας ενέργειας τους με αύξηση ή αντικατάσταση των δεξαμενών ηλεκτρολύτη. Αποθηκευτικές μονάδες μέχρι 1 MW και 3 MW για τις τεχνολογίες βαναδίου-ψευδαργύρου και οξειδοαναγωγής-βαναδίου αντίστοιχα, έχουν ήδη εγκατασταθεί και βρίσκονται σε λειτουργία για να εξυπηρετούν εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Οι χημικές εξισώσεις για τις δύο τεχνολογίες φαίνονται πιο κάτω ενώ σχηματικά παρουσιάζονται στα σχήματα 3.8-9.

**VRB:** Στην άνοδο:

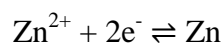


Στην κάθοδο:

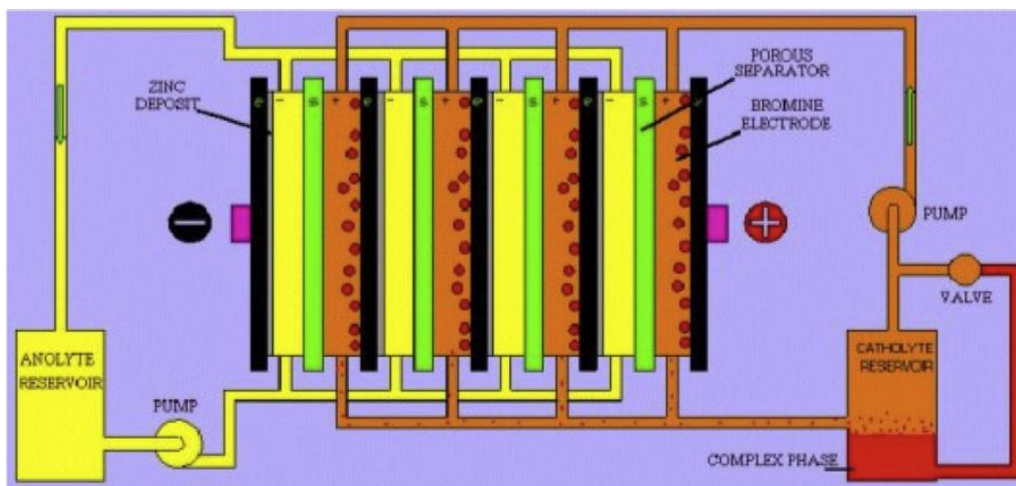
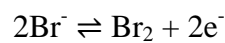


**Σχήμα 3.8** Σχηματική διάταξη μπαταρίας οξειδοαναγωγής-βαναδίου

**Zn-Br:** Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:

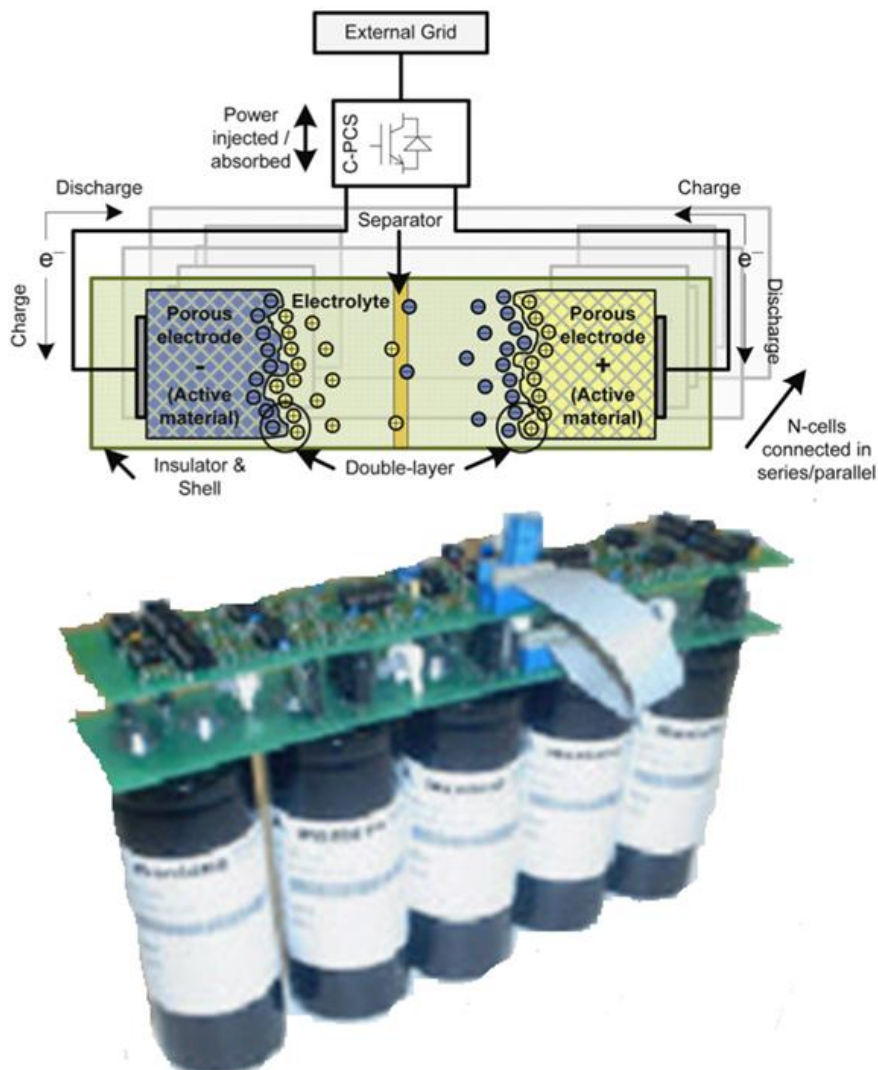


**Σχήμα 3.9** Σχηματική διάταξη μπαταρίας βαναδίου-ψευδαργύρου

### 3.1.5 Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές ή ηλεκτροχημικοί πυκνωτές είναι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας με ειδικά χαρακτηριστικά κάπου μεταξύ των συμβατικών πυκνωτών και των μπαταριών. Η δομή τους περιλαμβάνει δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια με επιφάνεια άνθρακα, διαχωρισμένα από πορώδες μεμβράνη βυθισμένη σε ηλεκτρολύτη που παίζει ταυτόχρονα το ρόλο του μονωτή ηλεκτρονίων και αγωγό ιόντων. Η χωρητικότητα τους είναι 100-1000 φορές μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών πυκνωτών όπως και η ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν αφού είναι ανάλογη προς αυτή σύμφωνα με τη σχέση:

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



Σχήμα 3.10 Σχηματική διάταξη υπερπυκνωτών σε σειρά



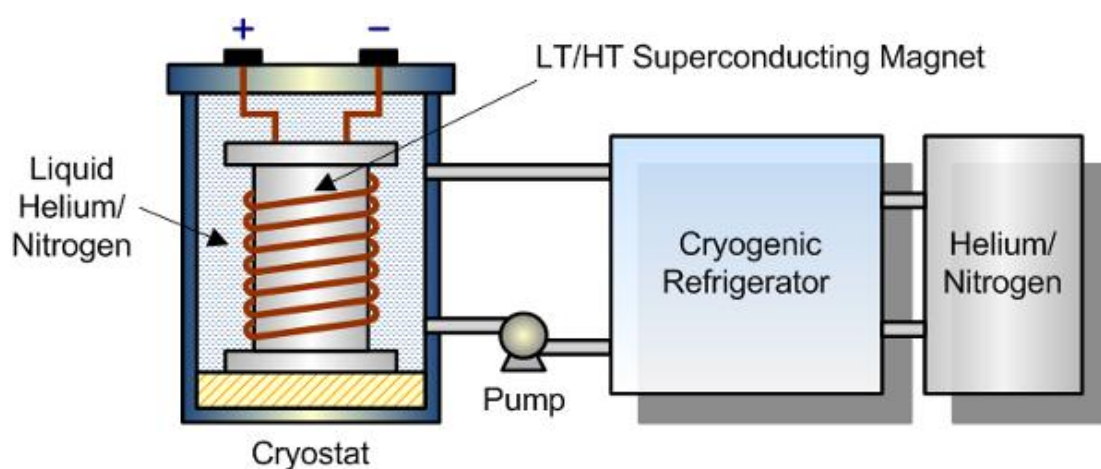
Οι υπερπυκνωτές αποθηκεύουν ιδανικά την ενέργεια στο ηλεκτροστατικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων χωρίς την εμφάνιση χημικών αντιδράσεων. Ως εκ τούτου, το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να αποδώσουν τεράστιο αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης και συνεπώς κατέχουν πολύ μεγαλύτερο κύκλο ζωής συγκριτικά με τις μπαταρίες. Επιπλέον, σε αντίθεση με τους συμβατικούς πυκνωτές, η σύνδεση τους σε σειρά επιβάλλεται για να επιτύχουν τάσεις ικανές για χρήση σε εφαρμογές ισχύος, προσδίδοντας τους την ικανότητα αποθήκευσης 50-100 kW.

### 3.1.6 Υπερπηνία

Τα υπερπηνία, εν ολίγοις, αποτελούνται από ένα υπεραγώγιμο πηνίο, το σύστημα μετατροπής ισχύος και την πολύ χαμηλής θερμοκρασίας ψήκτρα. Τυπικά, η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος στο πηνίο, το οποίο αποτελούν καλώδια νιοβίου-τιτανίου πολύ χαμηλής αντίστασης. Η συσκευή πρέπει να ψύχεται ώστε να διατηρείται σε κατάσταση υπεραγωγής επιτρέποντας στο ρεύμα να διαρρέει μόνιμα τον επαγωγό. Η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να επιστραφεί εκφορτίζοντας το πηνίο όταν απαιτηθεί και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

Λόγω του μεγάλου κόστους του καλωδίου τους και τις αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις ψύξης, οι εφαρμογές τους περιορίζονται για βελτίωση της ποιότητας ισχύος. Ένα σχηματικό διάγραμμα υπερπηνίου απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11.



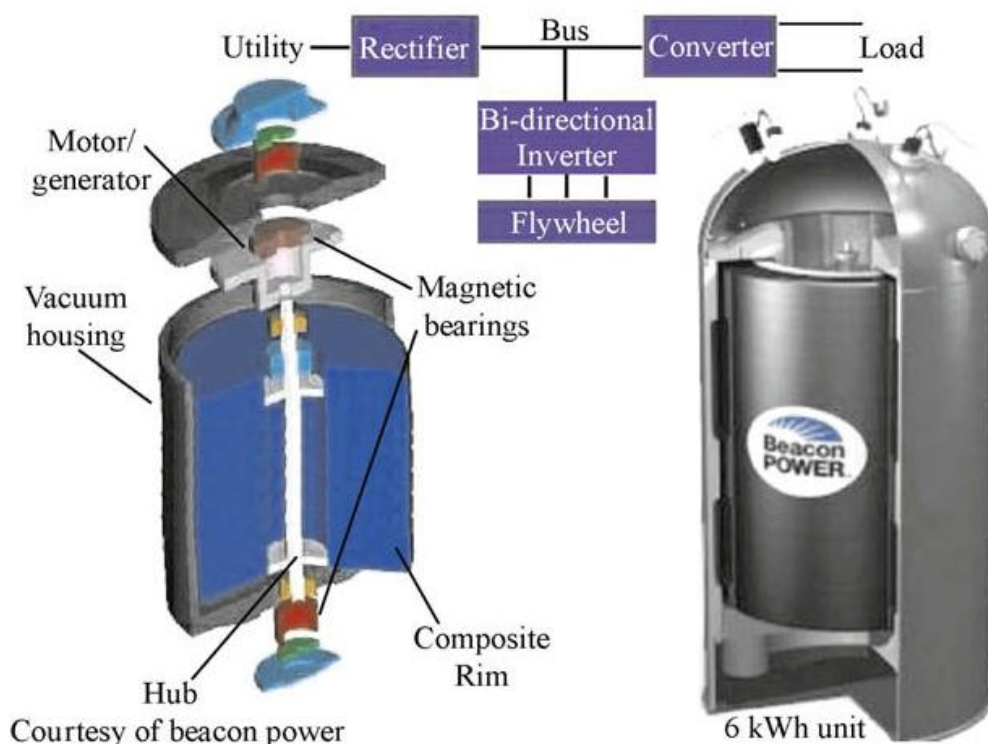
Σχήμα 3.10 Σχηματική διάταξη υπερπηνίου

### 3.1.7 Σφόνδυλοι

Οι σφόνδυλοι αποτελούνται από ένα συμπαγή κύλινδρο εφοδιασμένο με μαγνητικά τυλίγματα μέσα σε κενό, ούτως ώστε να μειώνονται οι απώλειες τριβών και να προστατεύεται το όλο σύστημα από εξωτερικές διαταραχές. Ο ηλεκτρισμός, ουσιαστικά, τροφοδοτεί έναν κινητήρα ο οποίος περιστρέφεται περιστρέφοντας τον σφόνδυλο και μετατρέποντας έτσι την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Όταν βραχυπρόθεσμα απαιτηθεί ισχύς, ο ηλεκτρισμός ανακτάται από τον ίδιο κινητήρα ο οποίος τότε λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας την στροφορμή του σφονδύλου σε ηλεκτρική ενέργεια. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα είναι ότι εξαλείφουν την ανάγκη χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος για ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας στην έξοδο συστημάτων παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Έτσι, συνήθως χρησιμοποιούνται σαν ρυθμιστές τάσης για βραχυπρόθεσμες απαιτήσεις αφού οι μεγάλης κλίμακας σφόνδυλοι παρουσιάζουν απώλειες τριβών απαγορευτικές για χρήση σε μεγαλύτερες εφαρμογές.

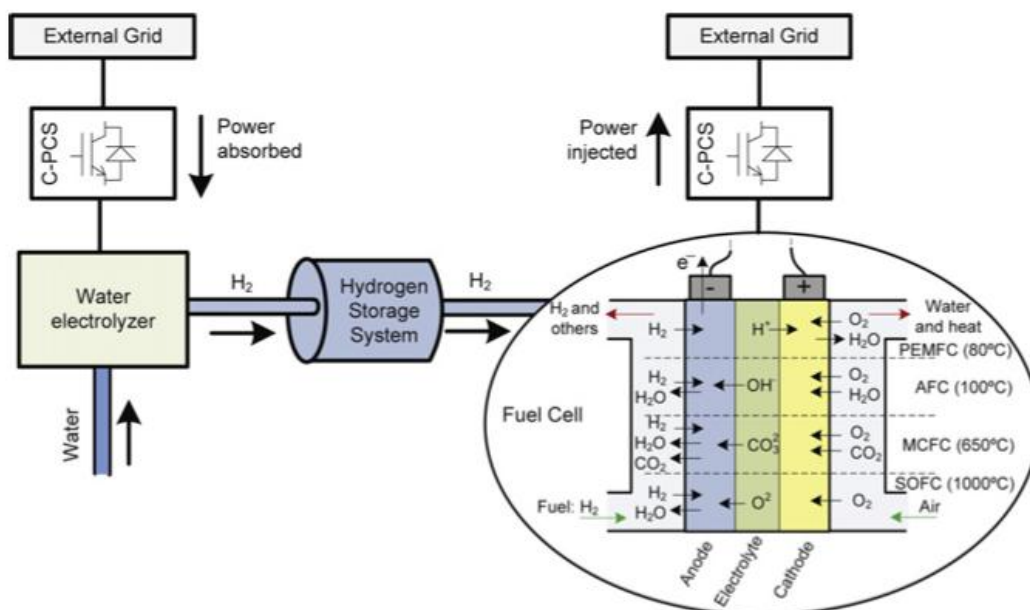


Σχήμα 3.10 Σχηματικό διάγραμμα σφονδύλου

### 3.1.8 Κυψέλες υδρογόνου

Το υδρογόνο κατέχει τη μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη από όλα τα γνωστά καύσιμα και κατά τη χρήση του για παραγωγή ενέργειας παράγει μόνο νερό χωρίς να ρυπαίνει. Από την άλλη, είναι το πιο εκρηκτικό από όλα τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα, είναι άχρωμο και άοσμο (και συνεπώς δύσκολα ανιχνεύεται), και για την αποθήκευση ενός κιλού του σε κανονικές συνθήκες απαιτούνται  $11 \text{ m}^3$ . Συνεπώς, για να αποθηκευτεί στη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε κυλίνδρους ικανούς να το κρατήσουν, πρέπει να συμπιεστεί.

Παρόλα αυτά αποτελεί μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρισμού μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού, μια διαδικασία κατά την οποία ο ηλεκτρισμός διασπά το νερό στα απλούστερα συστατικά του που είναι το υδρογόνο και το οξυγόνο. Οι συσκευές ηλεκτρόλυσης που χρησιμοποιούνται είναι οι ηλεκτρολύτες, ενώ η αμφίδρομη διαδικασία, δηλαδή παραγωγής ηλεκτρισμού από το υδρογόνο, επιτυγχάνεται με τις κυψέλες καυσίμου, όπου το υδρογόνο ενώνεται με το οξυγόνο του αέρα δίνοντας ηλεκτρική ενέργεια και νερό. Ανάλογα της τεχνολογίας το νερό εισάγεται στην άνοδο ή την κάθοδο όπου διασπάται σε κατιόντα υδρογόνου  $\text{H}^+$  και οξυγόνο ή υδρογόνο και υδροξυλιόντα  $\text{OH}^-$  αντίστοιχα, ώστε να παράγεται ή να παραμένει το υδρογόνο πάντα στην κάθοδο. Η αντίστροφη διαδικασία εμφανίζεται στις κυψέλες καυσίμου των αντίστοιχων τεχνολογιών. Στο σχήμα απεικονίζεται μια τοπολογία παραγωγής και χρήσης υδρογόνου ή ηλεκτρόλυσης και παραγωγής ηλεκτρισμού αντίστοιχα.



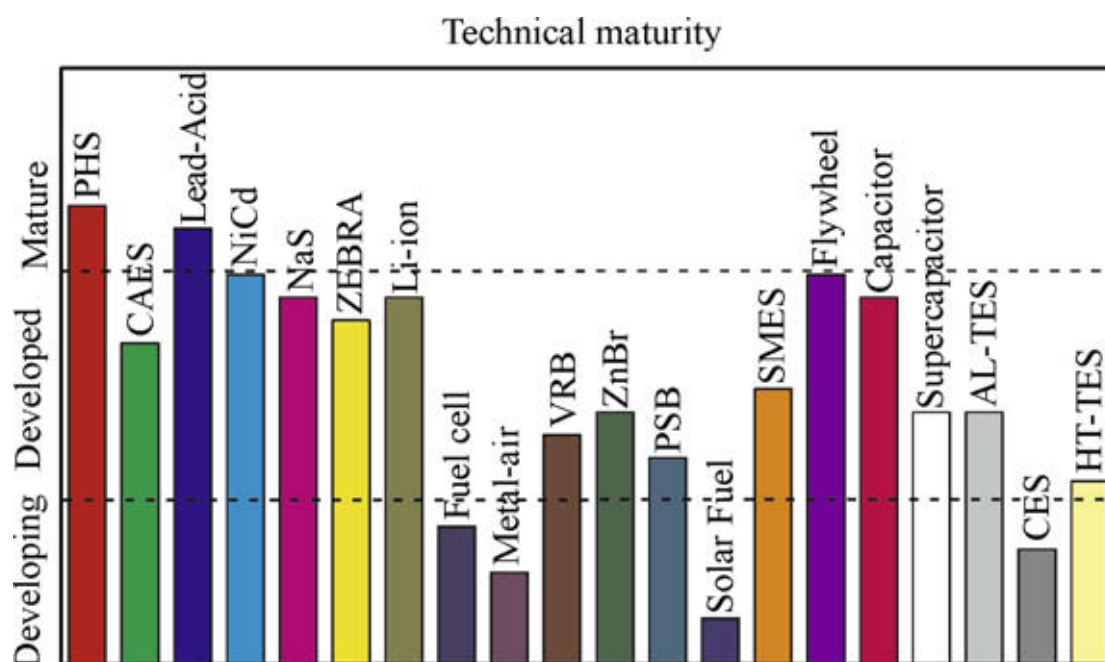
Σχήμα 3.11 Σχηματικό διάγραμμα αποθήκευσης υδρογόνου

## 3.2 Βασικά χαρακτηριστικά ΣΑΗΕ

Ανάλογα με την εφαρμογή που το κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας προορίζεται να χρησιμοποιηθεί, κρίνεται ως κατάλληλο ή ακατάλληλο ως προς κάποια βασικά χαρακτηριστικά επίδοσης. Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η τεχνική ωριμότητα, το μέγεθος, η πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, το κόστος επένδυσης και του όλου κύκλου ζωής, η διάρκεια κύκλου ζωής, οι απαιτήσεις λειτουργίας και συντήρησης, ο βαθμός απόδοσης κύκλου φόρτισης/εκφόρτισης, ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης, ο χρόνος φόρτισης, εκφόρτισης και απόκρισης, τα θέματα ασφάλειας και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες.

### 3.2.1 Τεχνολογική ωριμότητα

Η τεχνική ωριμότητα κάθε τεχνολογίας φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ώριμες, ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες.



Σχήμα 3.12 Τεχνική ωριμότητα ΣΑΗΕ

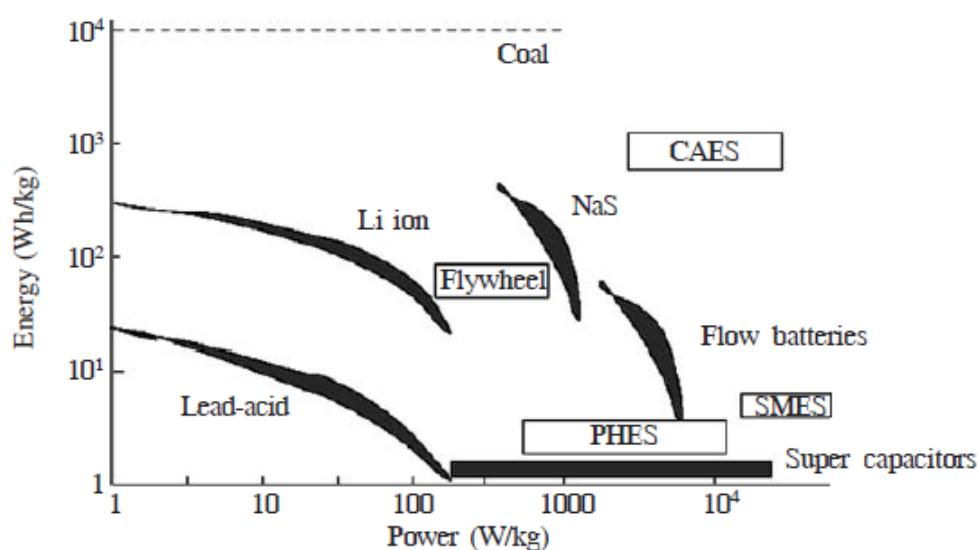
Στην πρώτη κατηγορία των ανεπτυγμένων τεχνολογιών κατατάσσονται η αντλησιοταμίευση και οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, οι οποίες χρησιμοποιούνται πάνω από 100 χρόνια. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου, θειικού νατρίου, ZEBRA, λιθίου-ιόντος, ροής,

τα υπερπηγία, οι σφόνδυλοι, οι πυκνωτές και υπερπυκνωτές. Όλες οι τεχνολογίες αυτής της κατηγορίας είναι αναπτυγμένες και κοινώς διαθέσιμες όμως η χρήση τους σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές δεν είναι ακόμα ευρέως διαδεδομένη. Επιπλέον, η ανταγωνιστικότητα και αξιοπιστία τους χρειάζονται επιβεβαίωση που θα επιτευχθεί εφόσον χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία και βγουν στην αγορά. Η τρίτη κατηγορία φιλοξενεί τις κυψέλες υδρογόνου και τις μπαταρίες μετάλλου-αέρα που βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Δεν είναι εμπορικά ώριμες όμως εμφανίζονται τεχνικά πιθανές παρέχοντας μεγάλο δυναμικό για βιομηχανικές εφαρμογές στο εγγύς μέλλον.

### 3.2.2 Πυκνότητα ενέργειας και ισχύος

Το ποσό ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί είναι μία σημαντική παράμετρος που μπορεί να χαρακτηρίσει μια συσκευή. Μπορεί να μετρηθεί σε Wh/kg, που άμεσα περιγράφουν το βάρος μιας συσκευής αποθήκευσης καθώς και τη χρησιμότητα της σε σταθερές ή κινητές εφαρμογές. Εναλλακτικά μπορεί να μετρηθεί σε Wh/m<sup>3</sup>, υποδηλώνοντας το μέγεθος της συσκευής. Η εναλλακτική μονάδα μέτρησης είναι κρίσιμη για εφαρμογές όπου ο χώρος αποτελεί περιορισμό.

Καθώς η ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας είναι σημαντική, πρέπει να ικανοποιήσει μια τελική ζήτηση. Έχοντας εις γνώση ότι οι καταναλωτές ζητούν ισχύ, η διαθεσιμότητα ισχύος μιας συσκευής αποθήκευσης πρέπει να μετρείται αντίστοιχα σε W/kg ή/και W/m<sup>3</sup>. Επομένως, οι δύο αυτές παράμετροι είναι αλληλοεξαρτούμενες και συνήθως περιγράφονται από γραφικές Rague ως ακολούθως:



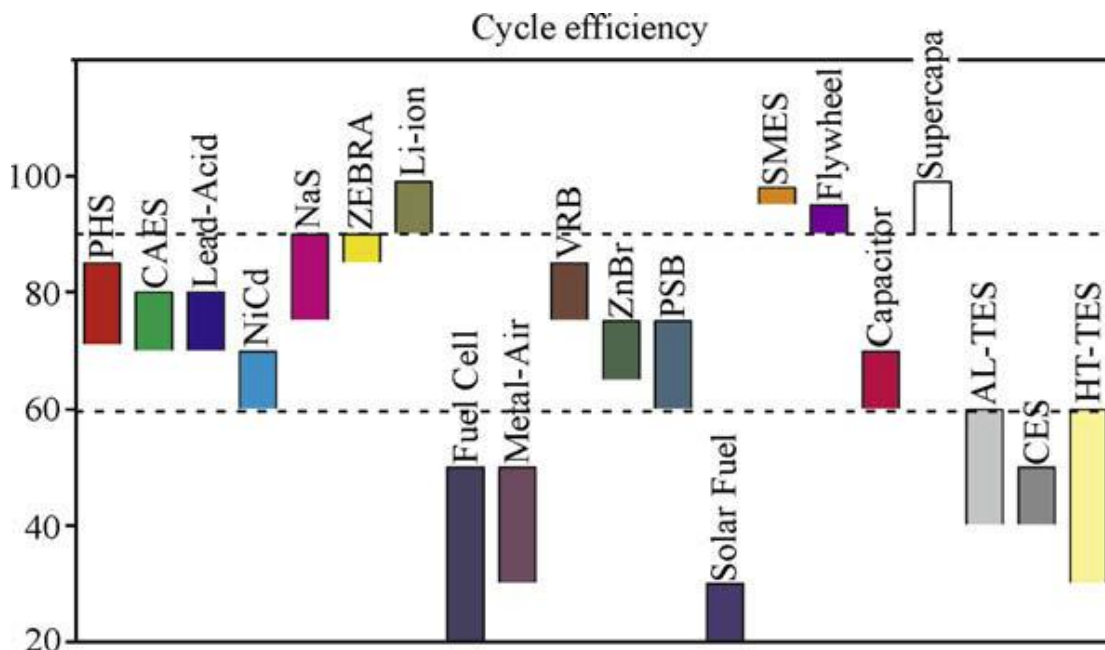
Σχήμα 3.13 Γραφική Rague για διάφορα ΣΑΗΕ

### 3.2.3 Αυτονομία

Η αυτονομία αναφέρεται στο μέγιστο χρονικό διάστημα που μπορεί ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας να δίνει ασταμάτητα ενέργεια. Ορίζεται ως το πηλίκο της πυκνότητας ενέργειας σε Wh/kg δια τη μέγιστη ισχύ εκφόρτισης σε W/kg,  $\alpha = W/P_{\max}$ , και αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα σε απομακρυσμένες και απομονωμένες εφαρμογές που βασίζονται σε διαλείπεις ανανεώσιμες πηγές.

### 3.2.4 Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου φόρτισης/εκφόρτισης των διαφόρων ΣΑΗΕ φαίνεται στο Σχήμα 3.14. Ορίζεται από το λόγο ενέργειας εξόδου προς την ενέργεια εισόδου  $\eta = E_{\text{out}}/E_{\text{in}}$ , χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης κάθε συστήματος. Ως εκ τούτου, οι διάφορες τεχνολογίες διαχωρίζονται σε πολύ υψηλού βαθμού απόδοσης >90% (υπερπηνία, σφόνδυλοι, υπερπυκνωτές και μπαταρίες λιθίου-ιόντος), σε υψηλού βαθμού απόδοσης 60-90% (αντλησιοταμίευση, συστήματα πεπιεσμένου αέρα, όλες οι μπαταρίες εκτός των λιθίου-ιόντος και μετάλλου αέρα) και σε χαμηλού βαθμού απόδοσης 20-50% (κυψέλες υδρογόνου και μπαταρίες μετάλλου-αέρα).

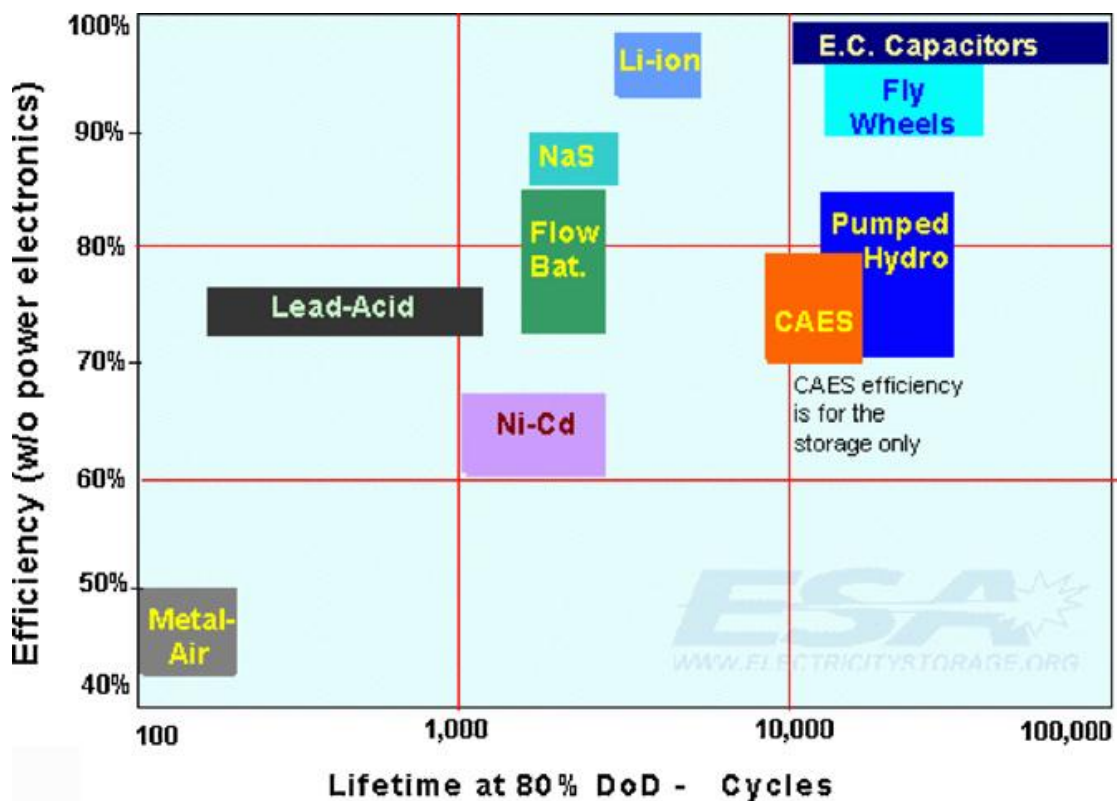


Σχήμα 3.14 Βαθμός απόδοσης για διάφορα ΣΑΗΕ



### 3.2.5 Διάρκεια κύκλου ζωής

Γενικά τα συστήματα που αποθηκεύουν τον ηλεκτρισμό μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (πυκνωτές, υπερπυκνωτές και υπερπηγία) έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής πάνω από 20000 κύκλους (φόρτισης/εκφόρτισης). Τα μηχανικά συστήματα (αντλησιοταμίευση, συστήματα πεπιεσμένου αέρα και σφόνδυλοι) εμφανίζουν μεγάλους κύκλους ζωής (>10000) λόγω κυρίως των μηχανικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους. Σε αντίθεση, ο χρόνος ζωής των μπαταριών και των κυψέλων καυσίμου είναι μικρότερος και περιορισμένος από τα χημικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται ως προϊόντα αντιδράσεων. Ο κύκλος ζωής για τα διάφορα ΣΑΗΕ σε σχέση με το βαθμό απόδοσης τους δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

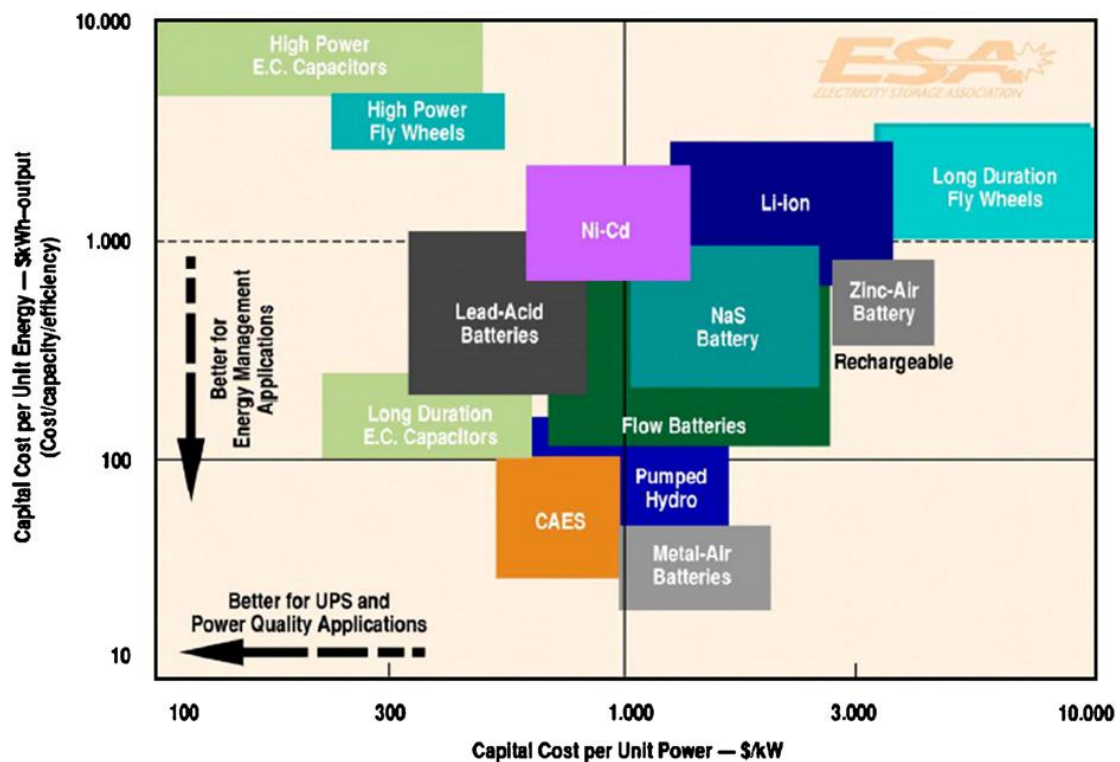


Σχήμα 3.15 Χρόνος ζωής vs Βαθμού απόδοσης για διάφορα ΣΑΗΕ

### 3.2.6 Κόστος

Είναι πολύ δύσκολο να συγκριθούν οι διάφορες τεχνολογίες μεταξύ τους αφού κάποιες κρίνονται κατάλληλες για διαχείριση ενέργειας ενώ άλλες για εφαρμογές

ποιότητας ισχύος. Έτσι, τα ερωτήματα που προκύπτουν είναι αν το κόστος θα είναι εκφρασμένο ανά μονάδες ενέργειας ή μονάδες ισχύος. Συνεπώς, τα διάφορα συστήματα προτιμάται να συγκρίνονται ως προς το κεφαλαιουχικό τους κόστος και το κόστος λειτουργίας τους. Σκόπιμα, λοιπόν, παρουσιάζονται διαγράμματα υποδειχνοντας το κόστος επένδυσης σε μονάδες ενέργειας έναντι της ισχύος. Ένα τέτοιο διάγραμμα είναι διαθέσιμο πιο κάτω επιτρέποντας συγκρίσεις μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης.



Σχήμα 3.17 Διάγραμμα κόστους επένδυσης για διάφορα ΣΑΗΕ

### 3.2.7 Χρόνος απόκρισης

Όταν εμφανιστούν επιπρόσθετες ανάγκες ηλεκτρισμού από τους καταναλωτές, κάθε σύστημα αποθήκευσης πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκριθεί άμεσα. Τα μεγάλα συστήματα που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας χρειάζονται γενικά χρόνο για να ανταποκριθούν. Αντίθετα, τα συστήματα ποιότητας ισχύος που είναι γενικά ηλεκτροχημικά εκ φύσεως, χρησιμοποιούνται παράλληλα με συστήματα ηλεκτρονικού ελέγχου που σχεδιάζονται ώστε να

ανταποκρίνονται άμεσα. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούν τα συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας UPS, που χρησιμοποιούνται γενικά με ηλεκτρονικούς υπολογιστές.

### **3.2.8 Χρόνοι φόρτισης/εκφόρτισης**

Οι κατηγορίες στις οποίες εμπίπτουν οι διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ανάλογα με το χρόνο φόρτισης/εκφόρτισης είναι τρεις. Η πρώτη αφορά τις εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας σε κλίμακες από 10 έως και πάνω από 100 MW με περιόδους ωριαίες ή ημερήσιες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η αντλησιοταμίευση και τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα εκπροσωπώντας τα μεγάλης κλίμακας συστήματα πάνω από 100 MW και οι μεγάλης κλίμακας μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής και οι κυψέλες υδρογόνου που αντιπροσωπεύουν τα μεσαίας κλίμακας συστήματα μεταξύ 10 και 100 MW. Η δεύτερη κατηγορία αφορά εφαρμογές ποιότητας ισχύος φιλοξενώντας τους σφόνδylους, τις μπαταρίες, τα υπερπηνία, τους πυκνωτές και τους υπερπυκνωτές, παρουσιάζοντας πολύ γρήγορες αποκρίσεις της τάξης των χιλιοστών δευτερολέπτου, σε κλίμακες συστημάτων μικρότερες από 1 MW. Τέλος, η τρίτη κατηγορία αφορά εφαρμογές γεφύρωσης ισχύος όπου υπάγονται όλων των τύπων οι μπαταρίες συμπεριλαμβανομένου των μπαταριών ροής και μετάλλου-αέρα και οι κυψέλες υδρογόνου. Οι συσκευές της συγκεκριμένης κατηγορίας εμφανίζουν σχετικά γρήγορες αποκρίσεις κάτω από ένα δευτερόλεπτο και μεγάλους χρόνους εκφόρτισης μερικών ωρών αποτελώντας συστήματα κλίμακας από 100 kW έως 10 MW.

### **3.2.9 Βάθος εκφόρτισης**

Προκειμένου να καταφέρει να φτάσει τον προδιαγραφόμενο κύκλο ζωής της, κάθε τεχνολογία δεν πρέπει να εκφορτίζεται περισσότερο από ένα προκαθορισμένο σημείο. Αυτό το σημείο ορίζεται ως βάθος εκφόρτισης και παίζει σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό συστημάτων αποθήκευσης. Μεγάλη επίδραση του παράγοντα αυτού παρατηρείται κυρίως στις μπαταρίες όπου τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν τα ηλεκτρόδια είναι αναλώσιμα. Συνεπώς, για να εξασφαλιστεί η συνέχεια των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης, πρέπει να παραμένουν σε συγκεκριμένες συγκεντρώσεις μέσα στα κελιά που τα περιβάλλουν.

### **3.2.10 Ρυθμός αυτοεκφόρτισης**

Κάποια συστήματα όπως του πεπιεσμένου αέρα, οι κυψέλες υδρογόνου, οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα και ροής, εμφανίζουν πολύ μικρό ρυθμό αυτοεκφόρτισης και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές αποθήκευσης για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι μπαταρίες θειικού νατρίου, ZEBRA, υπερπηγία, οι πυκνωτές και υπερπυκνωτές εμφανίζουν ψηλότερους ρυθμούς μεταξύ 10-40% ημερησίως. Μπορούν να υλοποιηθούν σε συστήματα που αφορούν μόνο μικρές περιόδους φόρτισης/εκφόρτισης μέχρι το πολύ κάποιες ώρες. Οι σφόνδυλοι παρουσιάζουν αυτοεκφόρτιση 100% για εφαρμογές που απαιτούν αποθήκευση διάρκειας μιας μέρας.

### **3.2.11 Περιβαλλοντικά ζητήματα**

Παρόλο που αυτό το κριτήριο δεν επηρεάζει την απόδοση των τεχνολογιών αποθήκευσης, η ανακύκλωση των υλικών που χρησιμοποιούνται, είτε στην κατασκευή είτε στη λειτουργία κάθε επιμέρους συστήματος, αποτελεί πολύ σημαντικό παράγοντα επιλογής. Οι κάτοικοι των βόρειων χωρών, π.χ. Σουηδία ή Νορβηγία, προτιμούν να ξοδέψουν περισσότερα σε ενέργεια παρά να μολύνουν τη χώρα τους.

### **3.2.12 Ζητήματα ασφάλειας και αξιοπιστίας**

Την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας επηρεάζουν τόσο οι παράγοντες ασφάλειας (αιτίες έκρηξης, επικίνδυνα απόβλητα, κτλ) όσο και οι παράγοντες λειτουργίας (θερμοκρασία, πίεση, κτλ). Οι πληροφορίες για τις παραμέτρους λειτουργίας κάθε συστήματος καθώς επίσης και όλων των επιμέρους χαρακτηριστικών που συζητήθηκαν στην ενότητα αυτή παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

Συστήματα Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας	Ενεργειακή πυκνότητα Wh/kg	Πυκνότητα ισχύος W/kg	Βαθμός απόδοσης %	Κόστος \$/kWh	Ρυθμός αυτο-εκ/σης d-day m-month	Βάθος εκ/σης %	Διάρκεια ζωής y-years c-cycles
Αντλησιοταμίευση	0.3	-	70-85	10-70	~0	95	30-50y
Συστήματα πεπιεσμένου αέρα	10-30	50-300.10 <sup>6</sup>	77-89	10-70	~0	100	30y
Μπαταρίες							
Pb-acid	30-50	180	85-90	50-100	2-5%/m	70-80	200-2000c
Ni-Cd	35-60	140-180	60-90	400-2400	5-20%/m	100	1.5-3.10 <sup>3</sup> c
Metal-air	450-650	-	50	-	~0	-	100c
Na-S	120	150-240	89-92	450	~0	100	1.5-5.10 <sup>3</sup> c
Li-ion	-	500-2000	~100	900-1300	1%/m	80	3-10.10 <sup>3</sup> c
Μπαταρίες ροής							
VRB	30-50	80-150	85	600	~0	100	>16.10 <sup>3</sup>
Zn-Br	75-85	-	75	500	~0	100	2-3.5.10 <sup>3</sup>
Πυκνωτές	0.01-0.1	10 <sup>3</sup>	95	-	14%/m	100	10 <sup>6</sup>
Υπερπυκνωτές	<50	10 <sup>6</sup>	85-98	6-20.10 <sup>3</sup>	14%/m	100	10 <sup>6</sup>
Υπερπηνία	-	222-663	95	-	55-100%/d	100	~∞
Σφόνδυλοι	100	5000	90-95	400-800	55-100%/d	100	20y
Κυψέλες H <sub>2</sub>	200-1200	5-50	30-40	2-15	0.5%/d	100	20y

Πίνακας 3.1 Βασικά χαρακτηριστικά ΣΑΗΕ

## 4. Εφαρμογές τεχνολογιών αποθήκευσης στο δίκτυο

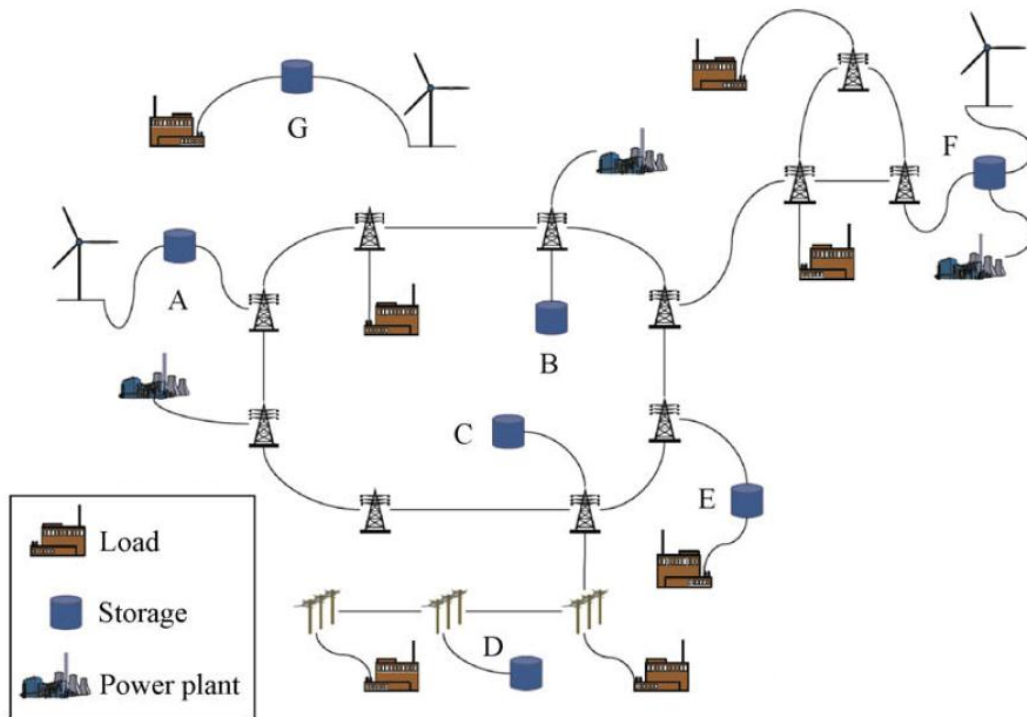
Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ευρέως σε πληθώρα σταθερών και κινητών εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται εκτενώς σε διαφορετικές κλίμακες και σε εφαρμογές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας βοηθώντας τα αφενός να μειώσουν τις μέγιστες απαιτήσεις παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ισχύος και αφετέρου να παρέχουν αδιάλειπτη και καλής ποιότητας τροφοδοσία. Το μέχρι στιγμής παγκόσμιο δυναμικό των ΣΑΗΕ είναι υπολογισμένο στα 125 GW όταν η συνολική παγκόσμια παραγωγή βρίσκεται στα 3900 GW.

Ανάλογα με τη χρονική διάρκεια αποθήκευσης, οι διάφορες εφαρμογές χωρίζονται σε στιγμιαίες (0 μέχρι μερικά δευτερόλεπτα), μικρής διάρκειας (μερικά δευτερόλεπτα μέχρι λεπτά), μέσης διάρκειας (λεπτά μέχρι το πολύ 5 ώρες) και μεγάλης διάρκειας (αρκετές ώρες μέχρι και μέρες). Οι στιγμιαίες εφαρμογές απαιτούνται κυρίως για ταχεία στρεφόμενη εφεδρεία, πρωτογενή έλεγχο της συχνότητας, ικανότητα παραμονής στο σύστημα έπειτα από πτώση της τάσης του δικτύου και βελτίωση της ποιότητας ισχύος. Οι μικρής διάρκειας εφαρμογές επιβάλλονται για δευτερογενή και τριτογενή έλεγχο συχνότητας, εξομάλυνση της ισχύος εξόδου από τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών (π.χ. αιολικά πάρκα), έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος στην πλευρά ζήτησης, αντιστάθμιση αρμονικών, ικανότητα «μαύρης» εκκίνησης (εκκίνηση χωρίς προθέρμανση) και άλλα. Στην κατηγορία εφαρμογών μέσης διάρκειας κατατάσσονται αυτές που εφαρμόζονται λόγω ανισορροπίας της αγοράς στην πλευρά παραγωγής, για εξισορρόπηση φορτίου, κάλυψη του φορτίου αιχμής, βελτίωση της αξιοπιστίας απομονωμένων συστημάτων, μικροδικτύων ή συστημάτων που αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από ΑΠΕ, για υποστήριξη μεταφορών και τροφοδοσίας αυτοκινήτων. Μεγάλης διάρκειας εφαρμογές απαιτούνται για αποφυγή νέων κατασκευών μονάδων παραγωγής και μεταφοράς σε περιπτώσεις αύξησης του μέγιστου φορτίου.

Όσο μικρότερος είναι ο απαιτούμενος χρόνος αποθήκευσης, τόσο μικρότερη είναι η επιθυμητή ενεργειακή πυκνότητα και τόσο μεγαλύτερη η πυκνότητα ισχύος από τις εκάστοτε τεχνολογίες. Έτσι, η πρώτη κατηγορία απαιτεί μεγάλης πυκνότητας ισχύος συστήματα ενώ η δεύτερη μέτριας πυκνότητας ισχύ και ενέργεια. Η τρίτη και η τέταρτη κατηγορία αντίστοιχα, απαιτούν μεγάλης και πολύ μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας τεχνολογίες. Εν συνεχεία, θα αναλυθούν με λεπτομέρεια οι μέχρι σήμερα



γνωστές εφαρμογές συστημάτων αποθήκευσης στο δίκτυο, οι οποίες μπορούν να καταναμηθούν ανά τομείς όπως αναπαρίστανται στο Σχήμα 4.1.



**Σχήμα 4.1** Εφαρμογές τεχνολογιών αποθήκευσης στο δίκτυο

Οι τομείς του δικτύου που εξυπηρετούνται από τις διάφορες εφαρμογές επεξηγούνται παρακάτω:

- A: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- B: Οικονομική πρόκριση προϊόντος
- C: Υποστήριξη μεταφοράς
- D: Αναβολή διανομής
- E: Ποιότητα ισχύος
- F: Υποστήριξη διεσπαρμένης παραγωγής
- G: Υποστήριξη απομονωμένου συστήματος

Έτσι, κρίνεται σκόπιμος ο διαχωρισμός των εφαρμογών στο δίκτυο σε κατηγορίες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, εξυπηρέτησης ενέργειας, εφαρμογές

ανανεώσιμων πηγών και αυτοκίνησης, οι οποίες αναλύονται και επεξηγούνται πιο κάτω.

## **4.1 Εφαρμογές παραγωγής**

Αποτελούν τις εφαρμογές που απαιτούνται στην πλευρά τροφοδοσίας, οι οποίες αφορούν κυρίως την αποθήκευση εμπορεύματος, τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, τον έλεγχο περιοχής, την ρύθμιση συχνότητας και τη «μαύρη εκκίνηση».

### **4.1.1 Αποθήκευση εμπορεύματος**

Αποθηκεύοντας χονδρικά την παραγόμενη ενέργεια κατά τις βραδινές ώρες και χρησιμοποιώντας την για κάλυψη φορτίων αιχμής κατά τη διάρκεια της μέρας, επιτρέπει φθηνότερη λειτουργία και πιο γραμμικό συντελεστή φόρτισης των μονάδων παραγωγής. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί αυξημένες ενεργειακές πυκνότητες και συστήματα ικανά να διατηρούν αποθηκευμένη την ηλεκτρική ενέργεια για ώρες και συνεπώς να χαρακτηρίζονται από χαμηλό ρυθμό αυτό-εκφόρτισης.

### **4.1.2 Υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης**

Αποτελούν υποκατάστατο της στρεφόμενης εφεδρείας στις μονάδες παραγωγής με μειονέκτημα ότι παρέχουν χρόνους απόκρισης μεγαλύτερους των 10 λεπτών έναντι της στρεφόμενης εφεδρείας που είναι άμεσα διαθέσιμη να αναλάβει φορτίο. Συμμετοχή στις εφαρμογές αυτού του τύπου έχουν οι τεχνολογίες υψηλής πυκνότητας ισχύος.

### **4.1.3 Έλεγχος περιοχής**

Αφορά τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο συστήματα, τα οποία ανταλλάζουν ενέργεια πιθανότατα με περισσότερες από μία υπηρεσίες κοινής ωφελείας. Έτσι, εφαρμόζονται για αποφυγή ανταλλαγής ενέργειας από μια υπηρεσία προς άλλη.

### **4.1.4 Ρύθμιση συχνότητας**

Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν υψηλές πυκνότητες ισχύος και τεχνολογίες μεγάλου βαθμού απόδοσης με μεγάλη διάρκεια κύκλου ζωής. Στόχος τους στην πλευρά παραγωγής, είναι να διατηρούν μέσα στα όρια την επιθυμητή τάση κατά τη διάρκεια

μεγάλων και γρήγορων μεταβολών του ηλεκτρικού φορτίου. Σε αντίθετη περίπτωση, η απορρύθμιση της συχνότητας του δικτύου μπορεί να καταστρέψει τις γεννήτριες ή τον εξοπλισμό των καταναλωτών.

#### **4.1.5 «Μαύρη» εκκίνηση**

Αναφέρεται στις μονάδες που είναι ικανές να εκκινήσουν αυτόνομα και χωρίς τη συμβολή άλλων συστημάτων προκειμένου να τροφοδοτήσουν το δίκτυο, υποβοηθώντας άλλες εγκαταστάσεις να εκκινήσουν και να συγχρονιστούν με το δίκτυο.

## **4.2 Εφαρμογές μεταφοράς και διανομής <sup>[17b]</sup>**

Αφορούν όλες τις εφαρμογές που υποβοηθούν και εξυπηρετούν τις γραμμές μεταφοράς και διανομής κάθε συστήματος. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως για ευστάθεια του συστήματος, ρύθμιση της τάσης μεταφοράς ή διανομής και μείωση ή αποφυγή κεφαλαίων για νέες εγκαταστάσεις.

### **4.2.1 Ευστάθεια συστήματος**

Προϋποθέτει συσκευές ικανές να αποκριθούν άμεσα, με ψηλό βαθμό απόδοσης και ικανότητα μεταφοράς ψηλής ισχύος. Ο ρόλος τους στο δίκτυο είναι να διατηρήσουν όλες τις συνιστώσες του συστήματος μεταφοράς λειτουργικά συγχρονισμένες μεταξύ τους προς αποφυγή κατάρρευσης του.

### **4.2.2 Ρύθμιση τάσης**

Στόχος της ρύθμισης της τάσης είναι να διατηρείται και να εξασφαλίζεται σταθερή τάση μεταξύ όλων των γραμμών ισχύος. Όμοια με τις εφαρμογές ευστάθειας συστήματος, απαιτούνται συσκευές ικανές να αποκριθούν άμεσα, με ψηλό βαθμό απόδοσης και ικανότητα μεταφοράς ψηλής ισχύος.

### **4.2.3 Αποφυγή κεφαλαίων**

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες εφαρμογές μεταφοράς και διανομής, εδώ απαιτούνται συστήματα αποθήκευσης μεγάλων ποσών ενέργειας, με μικρό ρυθμό

αυτό-εκφόρτισης και μεγάλο βαθμό απόδοσης. Η εφαρμογή αυτή αποσκοπεί στην αποφυγή επενδύσεων επιπρόσθετων κεφαλαίων για εγκατάσταση γραμμών μεταφοράς οι οποίες θα υπολειτουργούν το μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου.

### **4.3 Εφαρμογές εξυπηρέτησης ενέργειας**

Στο συγκεκριμένο τομέα υπάγονται οι εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας, ποιότητας και αξιοπιστίας ισχύος. Έχοντας να αντιμετωπίσει ζητήματα που αφορούν ευστάθεια και υποστήριξη λειτουργίας του δικτύου, ποιότητα ισχύος λόγω διεσπαρμένης παραγωγής, μετατόπιση φορτίου, κάλυψη φορτίου αιχμής και πολλά άλλα, αποτελεί ίσως το σημαντικότερο τομέα εφαρμογών.

#### **4.3.1 Διαχείριση ενέργειας**

Η διαχείριση ενέργειας επιτρέπει στους καταναλωτές να καλύψουν το φορτίο αιχμής τους μετατοπίζοντας το από μία συγκεκριμένη περίοδο της μέρας σε άλλη, μειώνοντας έτσι τους επιβαρυσμένους λογαριασμούς ηλεκτρισμού. Οι εφαρμογές κατατάσσονται σε μεσαίας διάρκειας και οι συσκευές που απαιτούνται είναι γενικά υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, μεγάλου βάθους εκφόρτισης και κύκλου ζωής, και υψηλού βαθμού απόδοσης.

#### **4.3.2 Ποιότητα ισχύος**

Οι επιθυμητές συσκευές πρέπει να χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ισχύος, άμεση απόκριση και ικανότητα μεγάλου αριθμού κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης ή διάρκεια ζωής. Η ποιότητα ισχύος είναι ουσιαστικά η ηλεκτρική εξυπηρέτηση των καταναλωτών με τροφοδοσία χωρίς δευτερεύον ταλαντώσεις (μόνο η βασική αρμονική του συνημίτονου) ή διαταραχές στην κυματομορφή της τάσης (π.χ. αιχμές).

#### **4.3.3 Αξιοπιστία ισχύος**

Η αξιοπιστία ισχύος προσφέρει ισχύ «γεφύρωσης» στους καταναλωτές ώστε να παραμένουν συνδεδεμένοι και σε συνεχή τροφοδοσία με το δίκτυο σε περιπτώσεις διαταραχών και διακοπών. Σε συνδυασμό με τη διαχείριση ενέργειας, επιτρέπει τη λειτουργία σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση με το δίκτυο δεν είναι εφικτή.

## **4.4 Εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας <sup>[28f]</sup>**

Η μελλοντική ανάπτυξη των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα αναγκάσει το κόστος παραγωγής να μειωθεί. Αυτό αποδεικνύεται ήδη μέσω της χρήσης αιολικών και ηλιακών συστημάτων παραγωγής ισχύος. Παρόλα αυτά, η εκτενής χρήση των πηγών όπως αιολική, ηλιακή, κυματική, κ.τ.λ., αναμφίβολα θα έρθει αντιμέτωπη με τα στοιχειώδη προβλήματα που αφορούν διέλιπες τροφοδοσία και που απαιτούν ευελιξία της ζήτησης (ευέλικτα φορτία), εφεδρικές πηγές ισχύος και αρκετή αποθήκευση ηλεκτρισμού για χρονικά διαστήματα που κυμαίνονται από ώρες σε μέρες ίσως και βδομάδες. Αυτή η κατηγορία εφαρμογών ηλεκτρικής αποθήκευσης είναι η πιο επείγουσα και συνάμα απαιτητική, και ως εκ τούτου θα επεξηγηθεί με λεπτομέρεια.

Στόχος των εφαρμογών στις εγκαταστάσεις μονάδων παραγωγής με αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι βασικά αφενός να διαχειριστούν την έντονη μεταβλητότητα που παρουσιάζουν στην έξοδό τους και αφετέρου να διαχειριστούν την διεσπαρμένη του συμπεριφορά αφού τα μεγαλύτερα δυναμικά δεν εμφανίζονται εκεί όπου μπορούν πάντα να αξιοποιηθούν πρακτικά.

### **4.4.1 Καταστολή διακυμάνσεων**

Οι γρήγορες διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου από μονάδες παραγωγής μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενδέχεται να προκαλέσουν μεταβολές στη συχνότητα και την τάση του δικτύου αλλοιώνοντας την ποιότητα ισχύος. Προκειμένου να μετριαστούν τα φαινόμενα διακυμάνσεων, επιβάλλεται η εφαρμογή τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής πυκνότητας ισχύος και βαθμού απόδοσης φόρτισης/εκφόρτισης. Συνεπώς, τα συστήματα που κρίνονται κατάλληλα στην περίπτωση αυτή είναι όλων των τύπων μπαταρίες εκτός του μολύβδου-οξέος, οι μπαταρίες ροής, οι υπερπυκνωτές, οι σφόνδυλοι και τα υπεραγωγία πηνία.

### **4.4.2 Συνέχεια λειτουργίας έπειτα από πτώση τάσης δικτύου**

Ο έλεγχος στην τάση από μονάδες ανανεώσιμων πηγών στο σημείο σύνδεσης με το εξωτερικό δίκτυο, εφαρμόζεται έτσι ώστε σε περιπτώσεις πτώσης τάσης να μην αποσυνδέονται τα συστήματα με πιθανότητα κατάρρευσης του δικτύου. Στην

περίπτωση που τα συστήματα (π.χ. ανεμογεννήτριες) αδυνατούν να αντέξουν τα ποσοστά πτώσης τάσης που τους επιβάλλονται από τα δίκτυα, υποχρεωτικά πρέπει να εγκαθίστανται συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρισμού. Όπως και στην περίπτωση της καταστολής διακυμάνσεων, τα ικανά συστήματα για αυτή την εφαρμογή πρέπει να παρέχουν υψηλή ισχύ και γρήγορη απόκριση. Τέτοια συστήματα αποτελούν οι μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής, οι υπερπυκνωτές, οι σφόνδυλοι και τα υπεραγωγία πηνία.

#### **4.4.3 Υποστήριξη ελέγχου τάσης**

Κάποιες τεχνολογίες όπως για παράδειγμα οι ανεμογεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού, καταναλώνουν μεγάλα ποσά έργου ισχύος. Ως γνωστό, ο έλεγχος της ροής έργου ισχύος σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι κρίσιμος ώστε να διατηρείται η τάση του συστήματος σε κατάλληλα επίπεδα. Παρόλο που οι περισσότερες τοπολογίες ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται καθιστούν τον έλεγχο στα σημεία σύνδεσης εφικτό, η χρήση μέσων αποθήκευσης βελτιώνει σημαντικά τον έλεγχο της τάσης. Οι διαφόρων τύπου μπαταρίες και μπαταρίες ροής, οι υπερπυκνωτές, οι σφόνδυλοι και τα υπεραγωγία πηνία, αποτελούν και στην περίπτωση αυτή τις βέλτιστες λύσεις.

#### **4.4.4 Απόσβεση ταλάντωσης**

Η ευστάθεια του συστήματος έναντι των παρεμβολών μπορεί να τεθεί σε κίνδυνο με αυξημένες διεισδύσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Έτσι, η απαίτηση από τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο ανανεώσιμα συστήματα, είναι να μετριάζουν αυτές τις ταλαντώσεις και να παραμένουν συνεχώς συγχρονισμένα απορροφώντας ή εισάγοντας έργο ισχύ σε συχνότητες μεταξύ 0.5 και 1 Hz. Η διάρκεια απορρόφησης ή εισαγωγής έργου ισχύος εντοπίζεται κοντά στο 1 λεπτό αλλά παρόλα αυτά τεχνολογίες μεγάλης πυκνότητας ισχύος και άμεσης απόκρισης προτιμούνται. Συνεπώς, οι κυψέλες υδρογόνου, οι μπαταρίες ροής, οι υπερπυκνωτές, οι σφόνδυλοι και τα υπεραγωγία πηνία θεωρούνται πλέον κατάλληλες για αυτή την εφαρμογή.

#### **4.4.5 Στρεφόμενη εφεδρεία**

Η στρεφόμενη εφεδρεία ορίζεται ως η μη χρησιμοποιούμενη πυκνότητα, η οποία μπορεί να ενεργοποιηθεί με απόφαση του διαχειριστή του συστήματος και παρέχεται έπειτα από συντονισμό με τις συσκευές του δικτύου που είναι ικανές να επηρεάσουν



την ενεργό ισχύ του συστήματος. Η εφαρμογή αυτή μπορεί να υποστηριχτεί από πολλές τεχνολογίες, που είναι μεταξύ άλλων οι σφόνδυλοι, τα υπεραγωγία πηνία, οι δαιφόρων τύπων μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής, οι κυψέλες υδρογόνου, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα ακόμα και οι εγκαταστάσεις αντλησιοταμίευσης.

#### **4.4.6 Ακολουθία φορτίου**

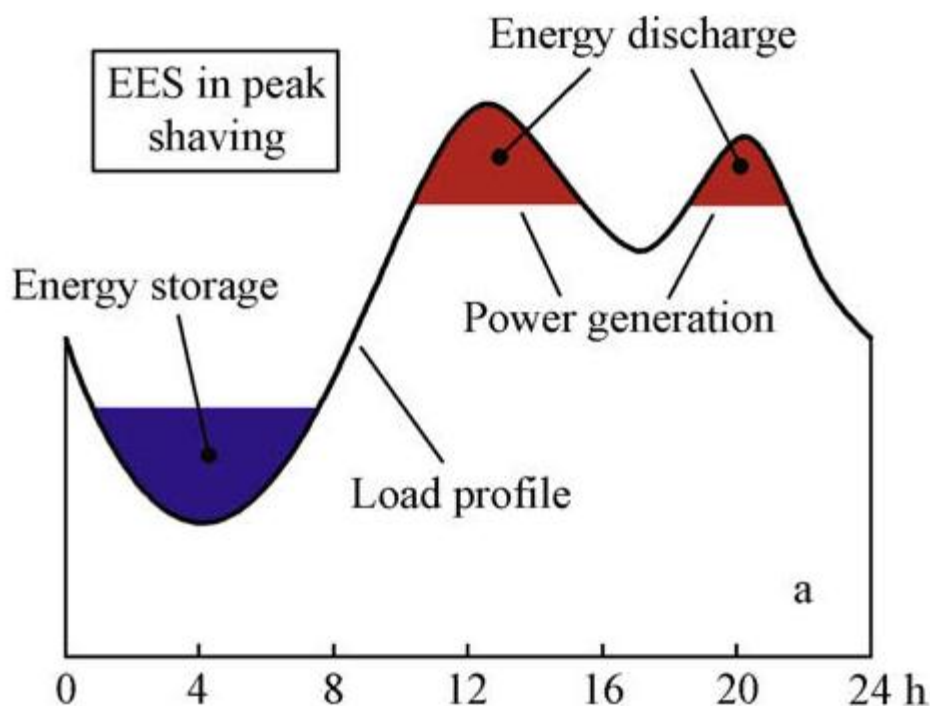
Σε αυτή την υπηρεσία, οι αποθηκευτικές τεχνολογίες απαιτούνται για την παροχή ενέργειας στο χρονικό πλαίσιο των λεπτών μέχρι ωρών. Λόγω της στοχαστικής φύσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ισχύς εξόδου δεν προσαρμόζεται στην ισχύ ζήτησης. Αυτό οδηγεί σε διαφόρων τύπων τεχνικά και οικονομικά προβλήματα που αφορούν τη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Τα τεχνικά ζητήματα όπως οι μεταβολές στην τάση και τη συχνότητα λόγω ανισορροπίας μεταξύ ηλεκτρικής παραγωγής και ζήτησης, περιορίζουν τη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όσον αφορά τα οικονομικά ζητήματα, αξίζει να σημειωθεί ότι τα διάφορα πάρκα ανανεώσιμων πηγών επιβαρύνονται με χρηματικές ποινές εφόσον δεν κατάφεραν να εξυπηρετήσουν προβλεπόμενη ζήτηση λόγω σφάλματος πρόβλεψης του δυναμικού (π.χ. του ανέμου). Αναλόγως της κλίμακας, πολύ ικανές τεχνολογίες για την εφαρμογή αυτή θεωρούνται οι μπαταρίες και μπαταρίες ροής, οι κυψέλες υδρογόνου, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα και η αντλησιοταμίευση.

#### **4.4.7 Κάλυψη φορτίου αιχμής**

Αυτή η υπηρεσία εμπίπτει μέσα στα χρονικά πλαίσια από 1 έως 10 ώρες. Η στρατηγική λειτουργίας που ακολουθούν οι συσκευές αποθήκευσης είναι ουσιαστικά να αποθηκεύσουν φθηνή ενέργεια κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης (βραδινές ώρες) και να την αποδώσουν στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής μεταβάλλοντας την καμπύλη φορτίου σε πιο λεία μορφή. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ακριβώς το αποτέλεσμα που προκύπτει από την εφαρμογή των συγκεκριμένων τεχνολογιών, όπου η αντλησιοταμίευση αποτελεί ίσως τη βέλτιστη λύση σε αυτή. Άλλες τεχνολογίες που κρίνονται επίσης κατάλληλες είναι οι μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα και οι κυψέλες υδρογόνου.

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.2, από τις 01:00 μετά τα μεσάνυκτα η παραγόμενη περίσσεια ενέργειας αποθηκεύεται μέχρι τις 07:00 το πρωί για να χρησιμοποιηθεί από

τις 10:00 π.μ. μέχρι τις 15:00 μ.μ και από τις 19:00 μ.μ μέχρι τις 21:00 μ.μ για κάλυψη των φορτίων αιχμής.

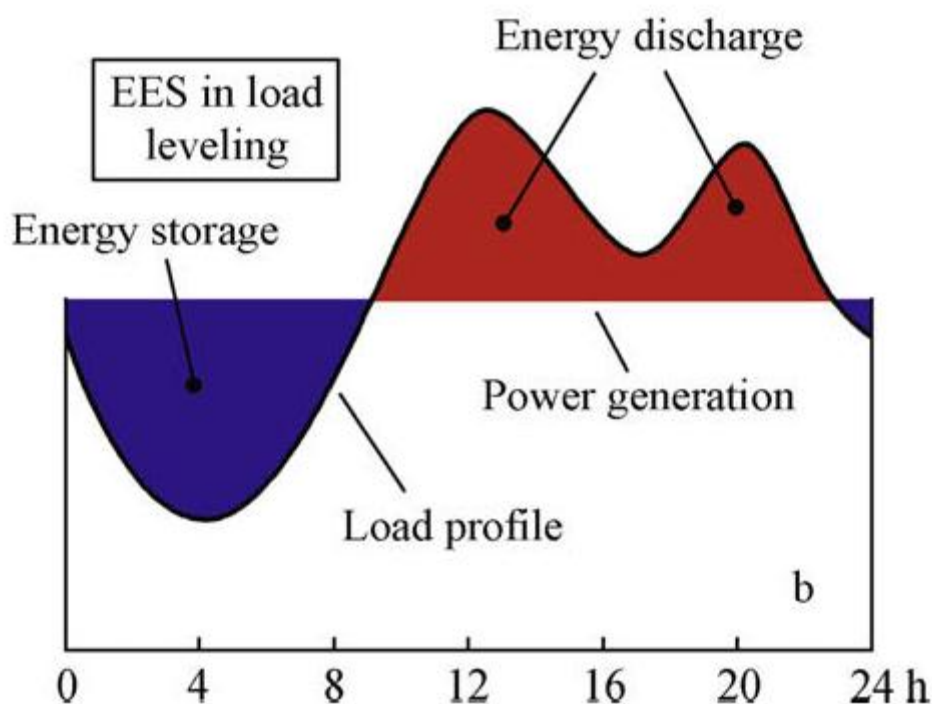


**Σχήμα 4.2** Εφαρμογές τεχνολογιών αποθήκευσης για κάλυψη φορτίου αιχμής

#### 4.4.8 Εξομάλυνση του φορτίου

Αυτή η υπηρεσία εμπίπτει σε χρονικά πλαίσια μεταξύ 5 και 12 ωρών. Η στρατηγική που ακολουθείται είναι παρόμοια με τις τεχνολογίες εφαρμογής για κάλυψη του φορτίου αιχμής, με μόνη ίσως διαφορά στους απαιτούμενους χρόνους αποθήκευσης. Στο Σχήμα 4.3, φαίνεται ένα παράδειγμα εξομάλυνσης του φορτίου όπως επιτυγχάνεται από την αποθήκευση ολόκληρης της ενέργειας κατά τις περιόδους μειωμένης ζήτησης και εισαγωγή της κατά τις ώρες όπου η ζήτηση εμφανίζεται αυξημένη. Η εξομαλυμένη καμπύλη φορτίου είναι η πλέον ιδανική προσφέροντας πάρα πολλά πλεονεκτήματα όπως μειωμένο κόστος παραγωγής, αφού τα λειτουργικά έξοδα των θερμικών μονάδων μειώνονται κατακόρυφα, αναλογική μείωση των αέριων ρύπων του Θερμοκηπίου, βέλτιστη λειτουργία μονάδων με αυξημένο βαθμό απόδοσης, κ.ο.κ. Οι μπαταρίες ροής, η αντλησιοταμίευση, τα

συστήματα πεπιεσμένου αέρα και οι κυψέλες υδρογόνου θεωρούνται ως οι καταλληλότερες τεχνολογίες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.



Σχήμα 4.3 Εφαρμογές τεχνολογιών αποθήκευσης για εξομάλυνση του φορτίου

#### 4.4.9 Περικοπή μετάδοσης

Η περικοπή μετάδοσης εμφανίζεται λόγω των περιορισμών που αφορούν τις γραμμές μεταφοράς (π.χ. μέγιστη ισχύς μεταφοράς). Σε αυτή την εφαρμογή, οι τεχνολογίες αποθήκευσης καλούνται να παρέχουν ενέργεια στα χρονικά πλαίσια μεταξύ 5 και 12 ωρών. Για διάφορους λόγους, όπως εξασφάλιση της ευστάθειας του ηλεκτρικού συστήματος ή αξιοπιστίας σε περίπτωση αστοχίας του εξοπλισμού, οι ανανεώσιμες τεχνολογίες ενδέχεται να αποσυνδεθούν από το δίκτυο. Ως εκ τούτου, ο ρόλος των αποθηκευτικών συστημάτων είναι η ελεγχόμενη έκχυση της ενέργειας στο δίκτυο ανάλογα της χωρητικότητας των γραμμών μεταφοράς, αποφεύγοντας την αποσύνδεση και συνεπώς τη μείωση συμμετοχής των ΑΠΕ στην παραγωγή. Τα κατάλληλα συστήματα για εφαρμογή είναι στην προκειμένη περίπτωση οι μπαταρίες ροής, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα, η αντλησιοταμίευση και οι κυψέλες υδρογόνου.

#### **4.4.10 Χρονική μετατόπιση**

Η στρατηγική αυτής της εφαρμογής στηρίζεται στη μείωση του κόστους της παραγόμενης kWh καθώς επίσης και στη βέλτιστη λειτουργία των μονάδων παραγωγής που χρησιμοποιούν σαν πρώτη ύλη ορυκτά καύσιμα. Οι αποθηκευτικές συσκευές ηλεκτρισμού καλούνται να διατηρήσουν αποθηκευμένη την ενέργεια για περιόδους που πιθανόν να ξεπερνούν τις 10 ώρες. Μόνο οι μπαταρίες ροής, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα, οι κυψέλες υδρογόνου και η αντλιοσταμείωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συγκεκριμένη εφαρμογή μιας και είναι ικανές να αποθηκεύουν για μεγάλα διαστήματα την ηλεκτρική ενέργεια και κατέχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα. Έτσι, δεσμεύοντας και αποθηκεύοντας ολόκληρη την ενέργεια από τις μονάδες ανανεώσιμων πηγών και συμπληρώνοντας ίσως επιπλέον ενέργεια από το δίκτυο, εκχέουν πίσω την ενέργεια σε ώρες αιχμής, όπου η τιμή πώλησης του ηλεκτρισμού είναι υψηλή.

#### **4.4.11 Δέσμευση μονάδας**

Οι υπηρεσίες δέσμευσης μονάδας απαιτούν συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για περιόδους κλίμακας ωρών μέχρι και ημερών. Λόγω αβεβαιοτήτων που προκύπτουν από τις μεσοπρόθεσμες μεταβολές του διαθέσιμου δυναμικού των ανανεώσιμων πηγών, η διαχείριση τους για κάλυψη προβλεπόμενων φορτίων καθ'όλη τη διάρκεια δέσμευσης τους είναι πολύ δύσκολη. Ως αποτέλεσμα, μόνο τα μεγάλης κλίμακας συστήματα αποθήκευσης μπορούν να εκπροσωπίσουν αυτού του είδους την εφαρμογή, που δεν είναι άλλα από τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα και η αντλιοσταμείωση. Αμέσως επόμενη υποψήφια τεχνολογία ίσως είναι οι κυψέλες υδρογόνου. Η εφαρμογή αυτή θεωρείται πολύ σημαντική για την αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ σε ένα σύστημα, αφού αποτελεί πρόβλημα βελτιστοποίησης της συνάρτησης κόστους. Με άλλα λόγια, το πρόβλημα είναι αφενός να ελαχιστοποιηθεί το κόστος λειτουργίας γενικά του ηλεκτρικού δικτύου και αφετέρου να αυξηθούν οι αποδόσεις των επενδύσεων στα ανανεώσιμα συστήματα συμπεριλαμβανομένων και των συστημάτων αποθήκευσης.

#### **4.4.12 Αντιστάθμιση πρόβλεψης κινδύνου**

Εξ'ορισμού, η πρόβλεψη αφορά πάντα καταστάσεις με πιθανότητα εμφάνισης ενώ η αντιστάθμιση ορίζεται ως η αποφυγή μιας οριστικής απόφασης ή δέσμευσης. Στην

περίπτωση αντιστάθμισης πρόβλεψης, εννοούμε την αποφυγή μιας οριστικής πρόβλεψης. Με άλλα λόγια, η συγκεκριμένη εφαρμογή αφορά τη μείωση σφαλμάτων στην προσφορά ενέργειας από τα ανανεώσιμα συστήματα στην αγορά πριν από την απαιτούμενη παράδοση. Έτσι, μειώνεται η αστάθεια των τιμών και μετριάζεται ο κίνδυνος στον οποίο πιθανότατα να εκτεθούν οι καταναλωτές.

#### **4.4.13 Εποχιακή αποθήκευση**

Η τελευταία εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αφορά την εποχιακή αποθήκευση, όπου οι συμμετέχουσες τεχνολογίες καλούνται να αποθηκεύσουν και να εισάγουν ενέργεια στο δίκτυο σε περιόδους και χρονικά πλαίσια μηνών. Αυτή η εφαρμογή είναι χρήσιμη σε συστήματα όπου οι εποχιακές διακυμάνσεις των επιπέδων παραγωγής είναι μεγάλες και συχνές. Είναι ξεκάθαρο ότι μόνο οι τεχνολογίες οι οποίες χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλες ενεργειακές πυκνότητες και μηδενικούς ρυθμούς αυτο-εκφόρτισης μπορούν να εκπροσωπήσουν αυτή την εφαρμογή. Τέτοια συστήματα είναι η μεγάλης κλίμακας αντλησιοταμίευση και οι λύσεις που βασίζονται στις τεχνολογίες υδρογόνου. Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται εποχιακή αποθήκευση, και ειδικά όταν πρόκειται να συνδυαστούν με ηλεκτρόλυση για παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου, οι εγκαταστάσεις ανανεώσιμων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρισμού υπερδιαστασιολογούνται.

### **4.5 Εφαρμογές αυτοκίνησης**

Λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας των υδρογονανθράκων (6 kWh/kg), οι κινητήρες εσωτερικής καύσης αποτελούν σήμερα τη βασική επιλογή για την κίνηση των συμβατικών μέσων μεταφοράς. Το πετρέλαιο αποτελεί το πιο αποδοτικό καύσιμο ακολουθούμενο από τη βενζίνη και τα αέρια καύσιμα δηλαδή το φυσικό αέριο και το υγραέριο. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα τους ως καύσιμα κίνησης είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης της τάξης του 30%, η αστάθεια της τιμής τους και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες, μιας και ο τομέας των μεταφορών είναι υπεύθυνος για μεγάλο ποσοστό απελευθέρωσης αέριων ρύπων του Θερμοκηπίου. Αυτά τα μειονεκτήματα έχουν οδηγήσει το ερευνητικό ενδιαφέρον προς αναζήτηση εναλλακτικών τρόπων, πιο αποδοτικών και με λιγότερες επιδράσεις στο περιβάλλον.

Για να κατανοηθεί πλήρως η συνεισφορά των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρισμού στην κάθε επιμέρους τεχνολογία μεταφορών, τα είδη οχημάτων κίνησης διαχωρίζονται σε συμβατικά οχήματα, ηλεκτρικά οχήματα, οχήματα κυψελών καυσίμου και υβριδικά.

#### **4.5.1 Συμβατικά οχήματα**

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα οχήματα που χρησιμοποιούνται σχεδόν κατά κόρον σήμερα, τα οποία αποτελούνται από τη δεξαμενή καυσίμου (βενζίνης, πετρελαίου ή αερίου), τον ηλεκτρονικά ελεγχόμενο κινητήρα εσωτερικής καύσης και τη μπαταρία η οποία βοηθά στην εκκίνηση του κινητήρα και λοιπές διευκολύνσεις όπως φωτισμό και μουσική. Η εφαρμογή αυτή απαιτεί συνεπώς συσκευές οι οποίες διαδραματίζουν δευτερεύοντα ρόλο απαιτώντας μικρές ενεργειακές και ισχύος πυκνότητες, κανονική διάρκεια ζωής και ρυθμό αυτοεκφόρτισης. Τη φθηνότερη λύση στις μειωμένες απαιτήσεις αυτής της εφαρμογής δίνουν σήμερα οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται ευρέως στα συμβατικά αυτοκίνητα.

#### **4.5.2 Ηλεκτρικά οχήματα**

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποτελούνται από τη μπαταρία, τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος και τον ηλεκτρικό κινητήρα. Εξ'ολοκλήρου η ηλεκτρική ενέργεια στον κινητήρα αποδίδεται από την μπαταρία, απαιτώντας μεγάλες ενεργειακές πυκνότητες και πυκνότητες ισχύος, μικρό βάρος, μεγάλο βαθμό απόδοσης, μικρούς βαθμούς αυτο-εκφόρτισης και μεγάλη διάρκεια ζωής προκειμένου να συναγωνιστούν τα συμβατικά καύσιμα. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις, η πλέον κατάλληλη μπαταρία είναι η λιθίου-ιόντος, η οποία σήμερα αδυνατεί να συναγωνιστεί τα ορυκτά καύσιμα λόγω του υψηλού κόστους. Οι μπαταρίες που προτιμούνται λόγω κόστους είναι οι νικελίου-καδμίου ή νικελίου-μετάλλου-υδριδίου. Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρικά οχήματα ενδέχεται να είναι σε θέση να επιστρέφουν ενέργεια στο δίκτυο, δίνοντας κίνητρο στους καταναλωτές να τα φορτίζουν τις ώρες χαμηλής ζήτησης και να πωλούν ενέργεια τις ώρες αιχμής, όπου η τιμή του ηλεκτρισμού είναι ψηλότερη. Για να επιτευχθεί η εξομάλυνση του φορτίου αιχμής μέσω της προτεινόμενης στρατηγικής, οι μπαταρίες που εφαρμόζονται θα πρέπει να κατέχουν πολύ μεγάλες ενεργειακές πυκνότητες καθιστώντας τις μπαταρίες θειικού νατρίου ως τις πλέον κατάλληλες.

### **4.5.3 Οχήματα κυψελών καυσίμου**

Τα συγκεκριμένα οχήματα αποτελούνται από τις δεξαμενές καυσίμου δηλαδή συμπιεσμένου υδρογόνου ή από μονάδα παραγωγής υδρογόνου “επί του σκάφους” από άλλα καύσιμα (π.χ. βιομάζα), τις κυψέλες υδρογόνου οι οποίες παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια, τον ηλεκτρικό κινητήρα και τη μπαταρία. Η μπαταρία διαδραματίζει και σε αυτή την εφαρμογή δευτερεύοντα ρόλο και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται τυπικά μπαταρία μολύβδου-οξέος.

### **4.5.4 Υβριδικά οχήματα**

Τα υβριδικά οχήματα συνδυάζουν ηλεκτρικά και άλλα συστήματα κίνησης όπως κινητήρες εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλους και κυψέλες καυσίμου. Μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τις μηχανικές τους συνδέσεις, δηλαδή σε σειρά, παράλληλα ή και τα δύο. Στα υβρικά οχήματα σε σειρά, όλη η ισχύς κίνησης παρέχεται από τον ηλεκτρικό κινητήρα και η μηχανή χρησιμοποιείται μόνο για τη φόρτιση των στοιχείων αποθήκευσης. Στα οχήματα σε παράλληλη σύνδεση, η ισχύς κίνησης μπορεί να προσφέρεται τόσο από τον ηλεκτρικό κινητήρα όσο και από τη μηχανή. Ανάλογα προς το βαθμό εξηλεκτρισμού, τα υβριδικά οχήματα μπορούν να χωριστούν σε υποκατηγορίες μεγέθους μικρού, ήπιου, υποβοήθησης και σύνδεσης.

Τα μικρού βαθμού εξηλεκτρισμού οχήματα, συνδυάζουν τη λειτουργία εκκίνησης/παύσης της μηχανής με αναγεννητική πέδηση για να βελτιώσουν την οικονομία καυσίμου του οχήματος. Οι προηγμένες μολύβδου-οξέος μπαταρίες σε τάση 42V θεωρούνται επαρκής για την τροφοδοσία ισχύος της περιορισμένων απαιτήσεων αυτής της εφαρμογής. Τα ήπιου βαθμού εξηλεκτρισμού οχήματα, είναι σε θέση να κινούν το όχημα σε χαμηλές ταχύτητες και να δεσμεύουν περισσότερη αναγεννητική πέδηση, απαιτώντας μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Έτσι, απαιτούν πιο προηγμένες τεχνολογίες μπαταριών όπως είναι τυπικά οι νικελίου-μετάλλου-υδριδίου σε τάση των 110V. Τα οχήματα βαθμού υποβοήθησης, προσφέρουν ουσιώδους συνεισφορά στην ηλεκτρική προώθηση και περισσότερη ηλεκτρική αυτονομία. Συνεπώς, η ηλεκτρική οδήγηση και μπαταρία πρέπει τυπικά να λειτουργούν σε τάσεις μεγαλύτερες των 200V. Τα βαθμού σύνδεσης αποτελούν πλήρως υβριδικά οχήματα τα οποία μπορούν να επαναφορτιστούν μέσω οικιακού δικτύου ισχύος. Είναι ουσιαστικά ηλεκτρικά οχήματα με επί του σκάφους γεννήτρια υπό μορφή μηχανής



εσωτερικής καύσης, προσφέροντας πολύ μεγάλο βαθμό αυτονομίας και μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμου.

Όσο μεγαλώνει ο βαθμός υβριδοποίησης, αυξάνονται σοβαρά και οι απαιτήσεις των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο νέος ορισμός των υβριδικών συσκευών αποθήκευσης ηλεκτρισμού, έρχεται λοιπόν να ταιριάζει τις διάφορες κατηγορίες υβριδικών οχημάτων με τις τεχνολογίες αποθήκευσης. Δύο ή περισσότερες τεχνολογίες μπορούν να συνδυαστούν κατέχοντας το ρόλο τροφοδοσίας της ενέργειας ή/και της ισχύος αντίστοιχα, ενώ κάποιες που έχουν προταθεί, έπειτα από εκτενής έρευνα και μελέτη, παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

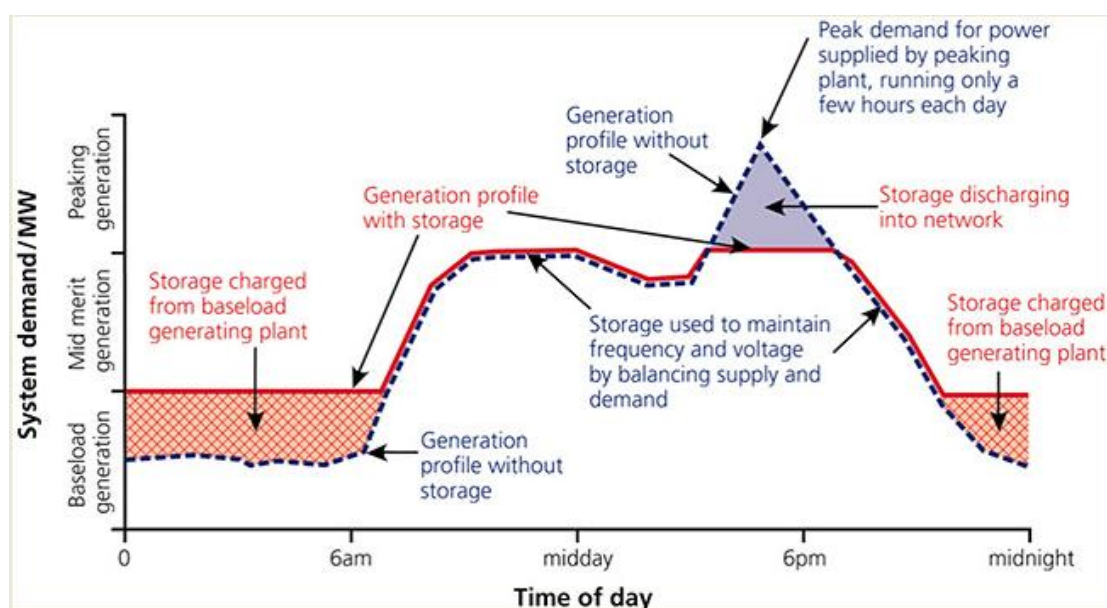
<b>ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b>	<b>ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΙΣΧΥΟΣ</b>
Μπαταρία	Υπερπυκνωτής
Κυψέλες Καυσίμου	Υπερπυκνωτής
Σύστημα πεπιεσμένου σέρα	Υπερπυκνωτής
Μπαταρία	Σφόνδυλος
Μπαταρία	Υπεραγωγίμο πηνίο

**Πίνακας 4.1** Προτεινόμενα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρισμού

## 5. Συμπεράσματα

Η έννοια της αειφόρου ανάπτυξης εμπλέκει μεταξύ άλλων την ορθολογική διαχείριση των φυσικών πόρων με τρόπο ώστε να καλύπτονται αφενός οι καθημερινές ανάγκες και αφετέρου να εξασφαλίζεται η συνέχεια χρήσης τους στο μέλλον. Αυτό ερμηνεύεται ως η ανάπτυξη γύρω από τις τεχνολογίες μετατροπής της ενέργειας, οι οποίες είναι μηδενικού ή μειωμένου άνθρακα (κατά τη χρήση τους δεν απελευθερώνουν ή απελευθερώνουν μειωμένους αέριους ρύπους), η βελτίωση του βαθμού απόδοσης όλων των συσκευών μετατροπής της ενέργειας σε δευτερογενή, τελική και ωφέλιμη μορφή και η προώθηση τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας στην πλευρά ζήτησης.

Για το σκοπό αυτό, στη συγκεκριμένη εργασία αναλύθηκαν λεπτομερώς τόσο οι συμβατικές όσο και οι ανανεώσιμες μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρισμού, προκειμένου να διαμορφωθούν οι σωστές στρατηγικές και κίνητρα προς τους καταναλωτές για τη σταδιακή αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Κλειδί στη μεταπήδηση από τα ορυκτά καύσιμα στις πράσινες τεχνολογίες, αποτελούν τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, και ως εκ τούτου παρουσιάστηκαν εκτενώς και αναλύθηκαν ως προς την αρχή λειτουργίας τους, τα βασικά χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές τους στο δίκτυο. Η βασική ιδέα είναι κατά τις ώρες όπου η ζήτηση είναι μειωμένη, η επιπλέον ενέργεια να αποθηκεύεται με τα καταλληλότερα αναλόγως εφαρμογής συστήματα και να αποδίδεται τις ώρες αιχμής.



### Σχήμα 5.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης και εφαρμογές

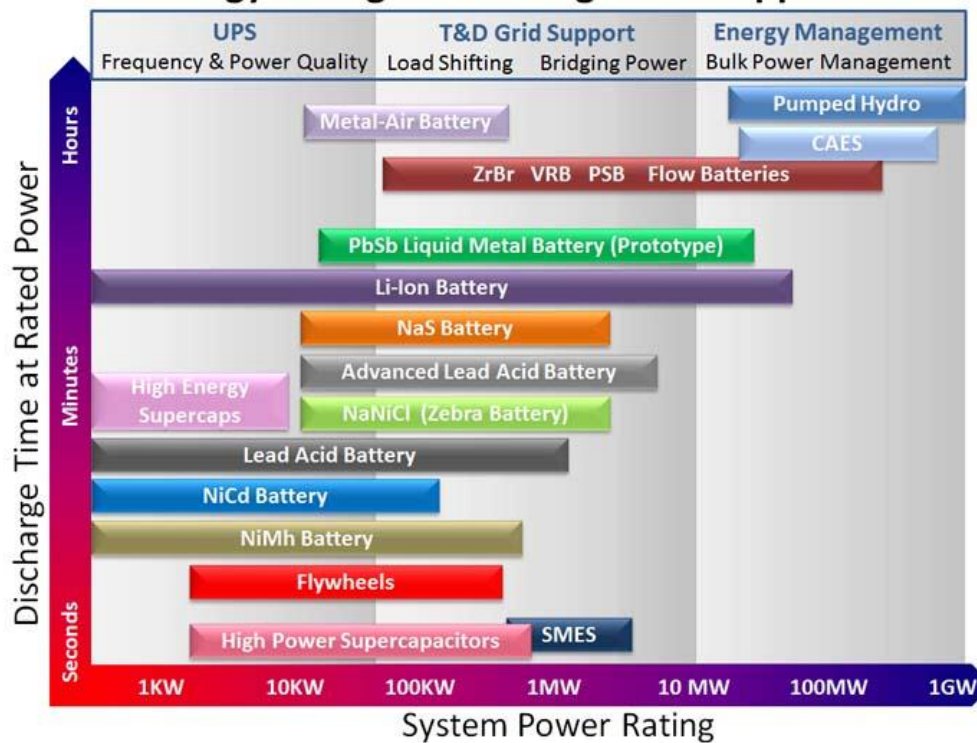
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των χαρακτηριστικών τους είναι ότι κανένα σύστημα δεν μπορεί να ικανοποιήσει από μόνο του ολόκληρο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πολυάριθμες εφαρμογές τους παρόλα αυτά, μπορούν να διαχωριστούν σε εφαρμογές ενέργειας και εφαρμογές ισχύος, όπου οι διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης μπορούν να συνεργαστούν και να συνεισφέρουν από κοινού. Τα κριτήρια ή χαρακτηριστικά που πρέπει να είναι σε θέση να προσφέρουν, παρέχονται στον Πίνακα 5.1.

ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΣΧΥΟΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
Πυκνότητα Ισχύος	+	+
Πυκνότητα Ενέργειας	-	+
Ενεργειακή Απόδοση	+	+
Διάρκεια κύκλου ζωής	+	+
Χρόνος Απόκρισης	++	-
Ρυθμός Αυτο-εκφόρτισης	-	++
++ πολύ σημαντικό + σημαντικό - λιγότερο σημαντικό		

**Πίνακας 5.1** Απαιτήσεις συστημάτων αποθήκευσης ανά κατηγορία

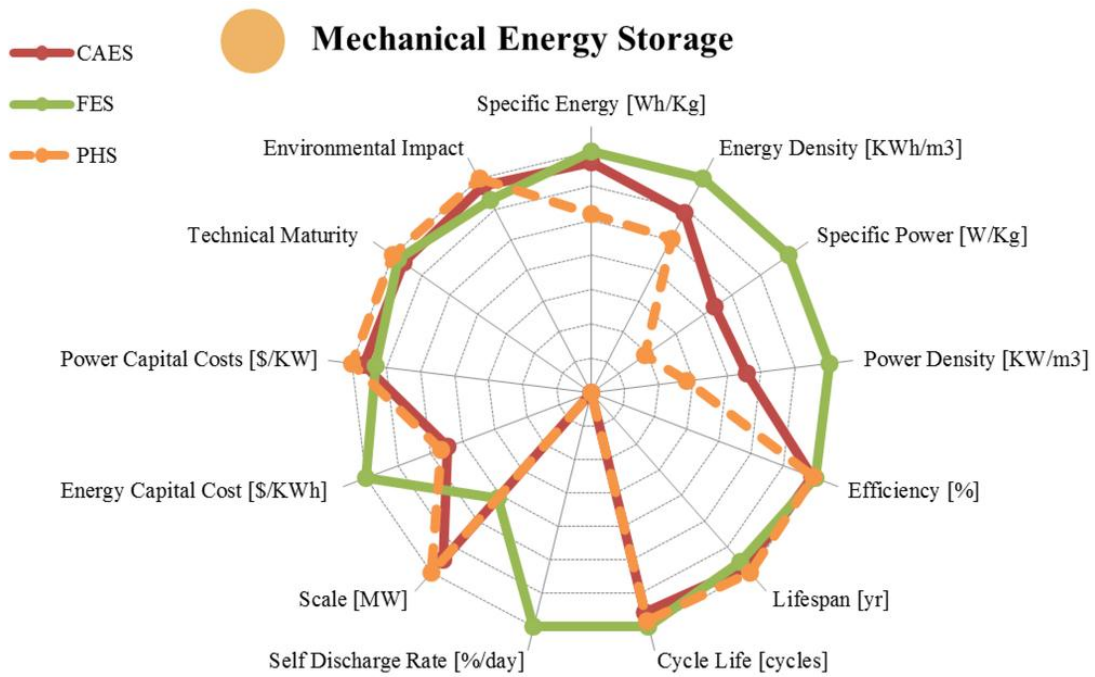
Ακολούθως, ανάλογα με το μέγεθος της εφαρμογής, οι διάφορες τεχνολογίες που προσφέρονται μπορούν να επιλεγούν σύμφωνα με τη γραφική του Σχήματος 5.2, στην οποία φαίνεται ο χρόνος εκφόρτισης και το εύρος ισχύος για το οποίο είναι οικονομικά συμφέρουσες. Όσο πιο ώριμη είναι η τεχνολογία, τόσο μειωμένα είναι τα κεφάλαια εγκατάστασης και λειτουργίας της. Επιπλέον, όσο αυξημένες είναι οι απαιτήσεις (π.χ. συγκεκριμένο εμβαδόν εγκατάστασης, χρόνοι απόκρισης, ζητήματα ασφαλείας), τόσο αυξάνεται και το κόστος. Τέλος, η αυξημένη χρήση των συστημάτων αποθήκευσης στο μέλλον, ενδέχεται να επιφέρει σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Επομένως, η ικανότητα ανακύκλωσης των εμπλεκόμενων χημικών στοιχείων μετά το πέρας του κύκλου ζωής τους είναι επίσης σημαντική.

## Grid Energy Storage Technologies and Applications

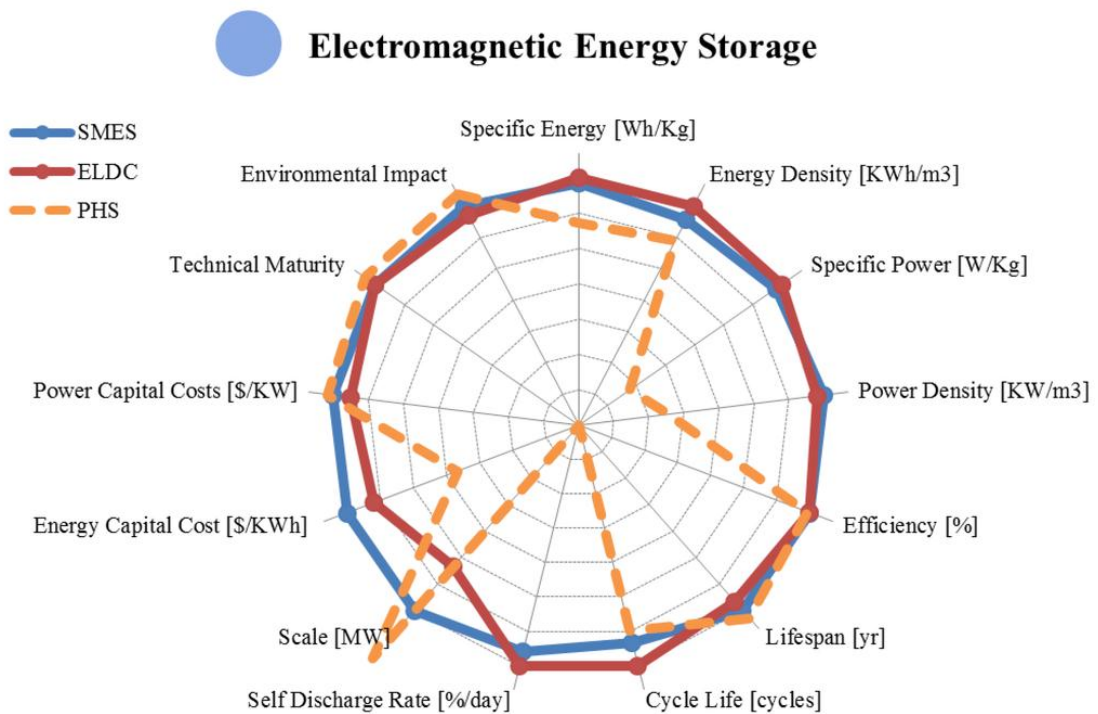


Σχήμα 5.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης και εφαρμογές

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρουν ήδη πολυάριθμες εφαρμογές καλύπτοντας μεγάλο φάσμα που κυμαίνεται από μεγάλης κλίμακας συστήματα παραγωγής και μεταφοράς, μέχρι συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής ακόμα και στην πλευρά ζήτησης. Εντούτοις, κάθε σύστημα είναι κατάλληλο για ένα εύρος εφαρμογών και κανένα σύστημα δεν πληρεί όλες τις προϋποθέσεις υψηλής τεχνολογικής ωριμότητας, μεγάλης διάρκειας ζωής, χαμηλού κόστους, μεγάλης πυκνότητας, υψηλού βαθμού απόδοσης και να είναι συνάμα περιβαλλοντικά φιλικό. Ως εκ τούτου, βάση της μελέτης που έγινε για τις διάφορες εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης στο δίκτυο, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα που δίνονται σε μορφή διαγραμμάτων, επιτρέποντας σε κάθε διαχωρισμό ανά μορφή ενέργειας αποθήκευσης τη σύγκριση με την τεχνολογία αντλησιοταμίευσης:

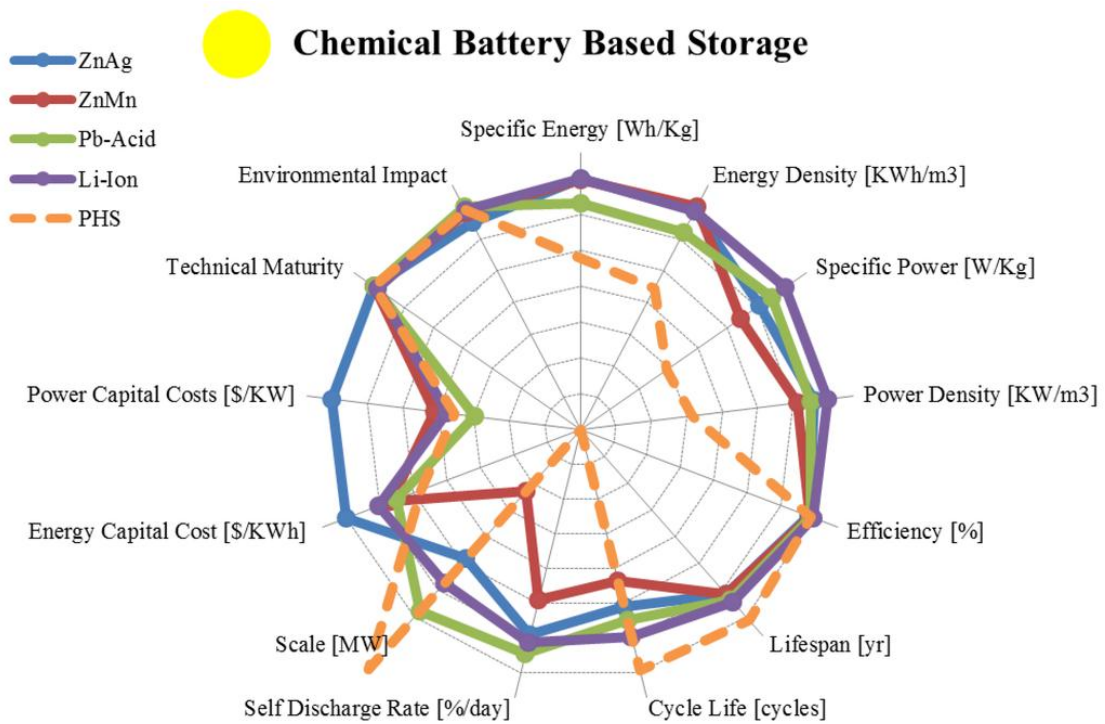


Σχήμα 5.3 Χαρακτηριστικά μηχανικών συστημάτων

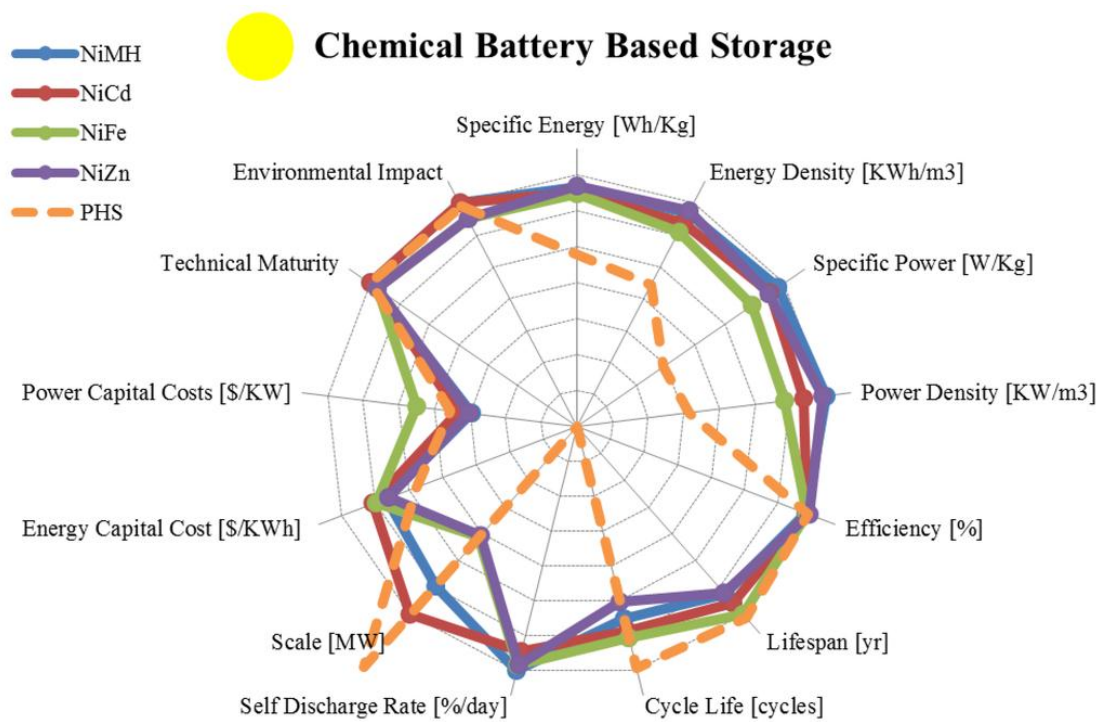


Σχήμα 5.4 Χαρακτηριστικά ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων

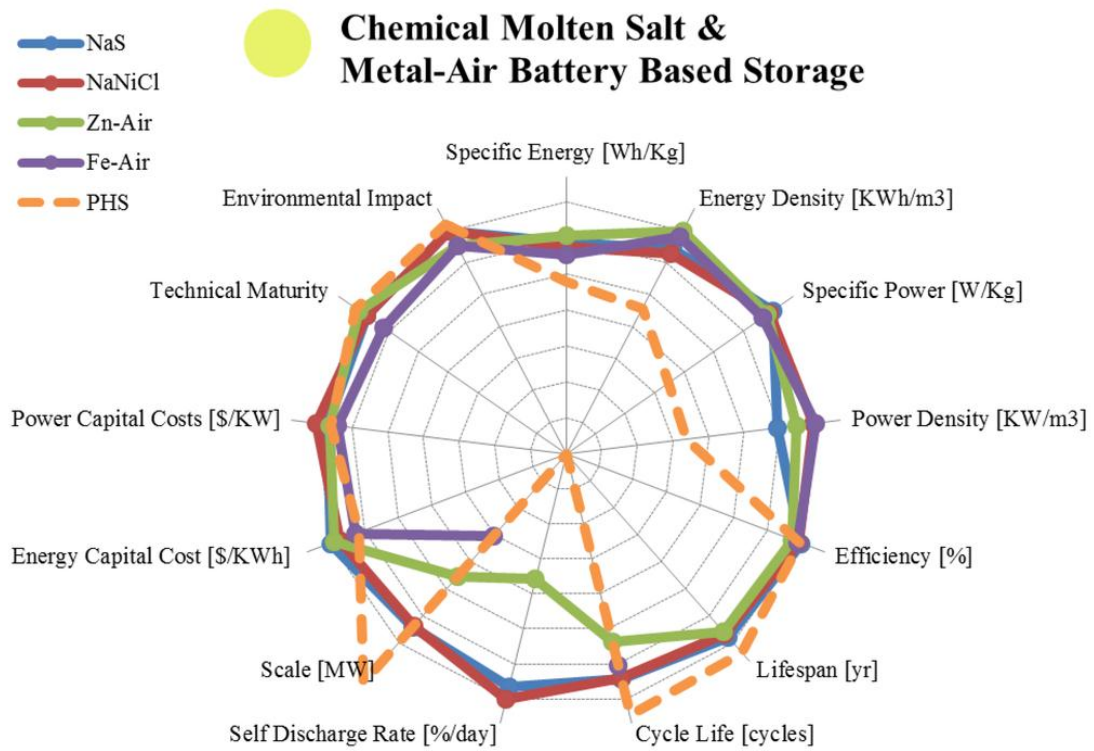




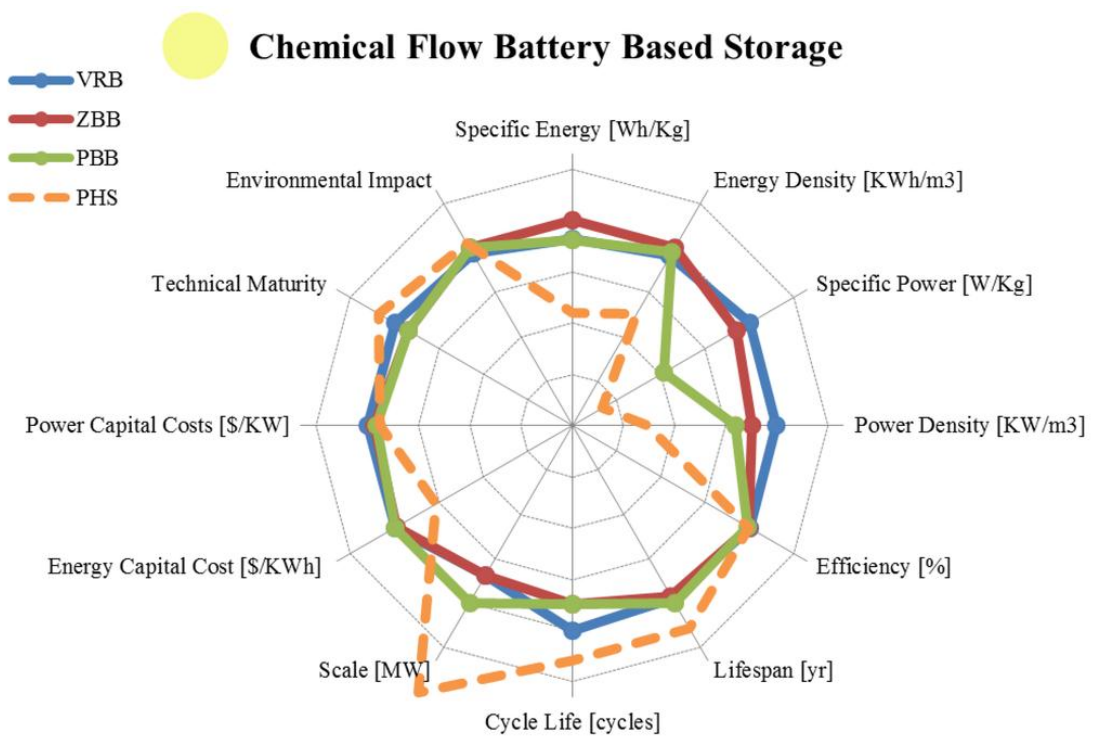
Σχήμα 5.5 Χαρακτηριστικά ηλεκτροχημικών συστημάτων



Σχήμα 5.6 Χαρακτηριστικά ηλεκτροχημικών συστημάτων

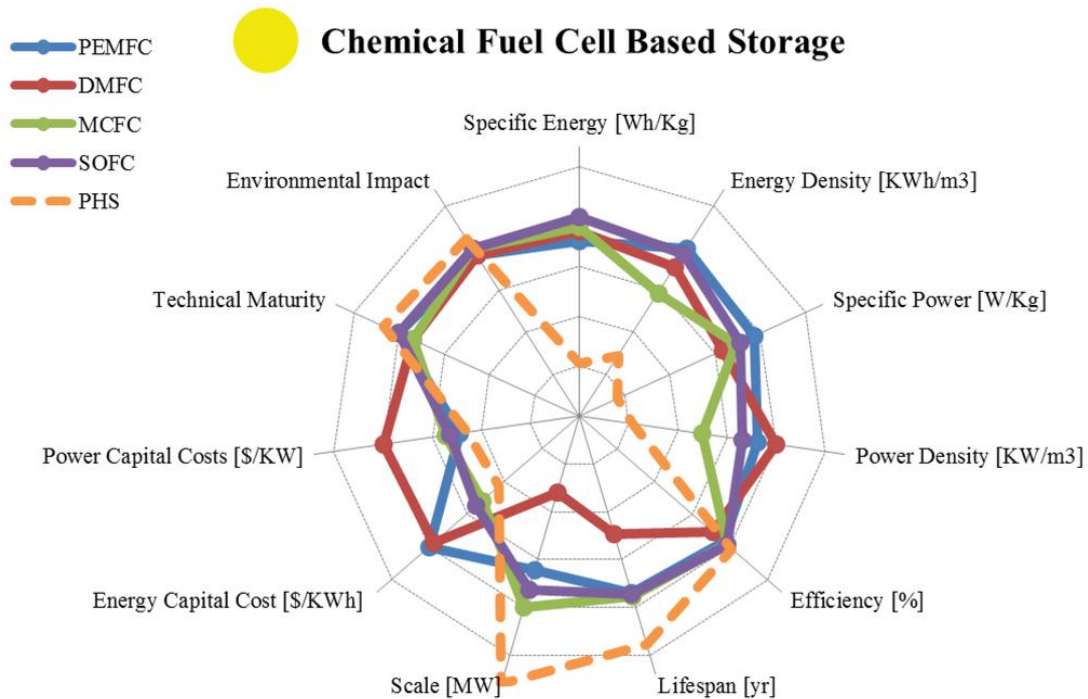


Σχήμα 5.7 Χαρακτηριστικά ηλεκτροχημικών συστημάτων



Σχήμα 5.8 Χαρακτηριστικά ηλεκτροχημικών συστημάτων ροής





**Σχήμα 5.9** Χαρακτηριστικά χημικών συστημάτων

1. Η αντλησιοταμίευση, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα, οι μεγάλης κλίμακας μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής και οι κυψέλες υδρογόνου είναι κατάλληλα συστήματα για εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας. Οι σφόνδυλοι, οι μπαταρίες, οι πυκνωτές και οι υπερπυκνωτές όπως και τα υπεραγωγία πηνία, είναι πιο κατάλληλα συστήματα για εφαρμογές ποιότητας ισχύος.
2. Η αντλησιοταμίευση και οι μπαταρίες μπλύβδου-οξέος, είναι τεχνολογικά ώριμες τεχνολογίες. Τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου, θειικού νατρίου, ZEBRA, λιθίου-ιόντος, ροής, τα υπεραγωγία πηνία, οι σφόνδυλοι, οι πυκνωτές και οι υπερπυκνωτές είναι τεχνολογικά ανεπτυγμένες και εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες. Οι κυψέλες υδρογόνου και οι μπαταρίες μετάλλου αέρα βρίσκονται υπό ανάπτυξη.
3. Η διάρκεια κύκλου ζωής των ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων αποθήκευσης όπως τα υπεραγωγία πηνία, οι πυκνωτές και υπερπυκνωτές είναι πολύ

μεγάλη. Τα μηχανικά συστήματα συμπεριλαμβανομένων της αντλησιοταμίευσης, των συστημάτων πεπιεσμένου αέρα και των σφονδύλων, παρουσιάζουν επίσης αυξημένους κύκλους ζωής. Οι κύκλοι ζωής που προσφέρουν τα ηλεκτροχημικά συστήματα όπως οι μπαταρίες, οι μπαταρίες ροής και οι κυψέλες υδρογόνου είναι λίγοι λόγω των εμπλεκόμενων χημικών αντιδράσεων, με τις μπαταρίες μετάλλου-αέρα να δίνουν τη μικρότερη διάρκεια ζωής.

4. Όσον αφορά το κόστος επένδυσης για τις διάφορες τεχνολογίες, τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα, η αντλησιοταμίευση και οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα αποτελούν τις φθηνότερες. Σήμερα, τη φθηνότερη τεχνολογία παρουσιάζουν τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα όμως οι μπαταρίες μετάλλου-αέρα έχουν προοπτικές να γίνουν οι πιο φθηνές από όλες τις γνωστές τεχνολογίες αποθήκευσης.
5. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου φόρτισης εκφόρτισης των υπερπηνίων, των σφονδύλων, των πυκνωτών και υπερπυκνωτών, της αντλησιοταμίευσης, των συστημάτων πεπιεσμένου αέρα, των μπαταριών και των μπαταριών ροής είναι ψηλός και μεγαλύτερος από 60%. Κοντά στο 50% είναι ο βαθμός απόδοσης των μπαταριών μετάλλου-αέρα και κάτω από 40% των κυψελών υδρογόνου, λόγω αυξημένων απωλειών κατά τη μετατροπή του ηλεκτρισμού στη μορφή ενέργειας αποθήκευσης.
6. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που επιφέρουν οι διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης, είναι κυρίως λόγω αποψύλωσης δασών για κατασκευή υποδομών αντλησιοταμίευσης, οι αέριες εκπομπές ρύπων κατά την καύση ορυκτών καυσίμων για μετατροπή σε ηλεκτρισμό από συμπιεσμένο αέρα, ισχυρά μαγνητικά πεδία από την εφαρμογή υπεραγωγίων πηνίων και τοξικά υπολείμματα στοιχείων που χρησιμοποιούνται στις μπαταρίες όπως ο μόλυβδος και το κάδμιο.

## ***Βιβλιογραφία***

[1] Παρασκευή Θεοφιλακτού, “Το ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης με ιδιαίτερη έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας”, Πτυχιακή εργασία τμήματος φυσικών πόρων και περιβάλλοντος, Χανιά, 2009.

[2] Παύλος Νικολαΐδης, “Αντικεραυνική προστασία φωτοβολταϊκών συστημάτων”, Διπλωματική εργασία τμήματος ηλεκτρολόγων μηχανικών, Πάτρα, 2012.

[3] Στέφανος Αθανασιάδης, “Βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου”, Πτυχιακή εργασία τμήματος μηχανικών πληροφορικής, Ηράκλειο, 2014.

[4] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, “Διαχείριση της ηλεκτρικής ζήτησης: Προκλήσεις και Πλεονεκτήματα”, Θεσσαλονίκη, 2012.

[5] Τερψιχόρη Τζουλιαδάκη, “Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένα σε ΑΠΕ. Συνιστώσες και συνεισφορά στον εξηλεκτρισμό απομονωμένων περιοχών”, Διπλωματική εργασία τμήματος ηλεκτρολογίας, Ηράκλειο, 2012.

[6] Αντώνης Αλυκαρίδης, “Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ με χρήση αιολικών μηχανών”, Διπλωματική εργασία τμήματος Ηλεκτρονικής, Χανιά, 2013.

[7] Μάγκος Σακελλάρης, “Μελέτη αυτόνομων συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας στη νήσο Ψέριμο”, Πτυχιακή εργασία τμήματος Μηχανολογίας, Ηράκλειο, 2014.

[8] Πρέντσε Μπλεριάν, “Τεχνική μελέτη και οικονομική σκοπιμότητα εισαγωγής συστημάτων Α.Π.Ε. για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα του Καστελόριζου”, Πτυχιακή εργασία τμήματος Μηχανολογίας, Ηράκλειο, 2011.

[9] Poullikkas, Andreas. "Implementation of distributed generation technologies in isolated power systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11.1 (2007): 30-56.

[10] Poullikkas, Andreas. "Sustainable options for electric vehicle technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015): 1277-1287.

- [11] Dincer, Ibrahim. "Green methods for hydrogen production." *International journal of hydrogen energy* 37.2 (2012): 1954-1971.
- [12] Sabihuddin, Siraj, Aristides E. Kiprakis, and Markus Mueller. "A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies." *Energies* 8.1 (2014): 172-216.
- [13] Hadjipaschalis, Ioannis, Andreas Poullikkas, and Venizelos Efthimiou. "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications." *Renewable and sustainable energy reviews* 13.6 (2009): 1513-1522.
- [14] Poullikkas, Andreas. "A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27 (2013): 778-788.
- [15] Chen, Haisheng, et al. "Progress in electrical energy storage system: A critical review." *Progress in Natural Science* 19.3 (2009): 291-312.
- [16] Díaz-González, Francisco, et al. "A review of energy storage technologies for wind power applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.4 (2012): 2154-2171.
- [17] Beaudin, Marc, et al. "Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review." *Energy for Sustainable Development* 14.4 (2010): 302-314.
- [18] Carton, J. G., and A. G. Olabi. "Wind/hydrogen hybrid systems: opportunity for Ireland's wind resource to provide consistent sustainable energy supply." *Energy* 35.12 (2010): 4536-4544.
- [19] Lukic, Srdjan M., et al. "Energy storage systems for automotive applications." *Industrial electronics, IEEE Transactions on* 55.6 (2008): 2258-2267.
- [20] Vazquez, Sergio, et al. "Energy storage systems for transport and grid applications." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57.12 (2010): 3881-3895.
- [21] Van Mierlo, Joeri, Gaston Maggetto, and Ph Lataire. "Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles." *Energy Conversion and Management* 47.17 (2006): 2748-2760.