

Ενότητα 7_β

Συστήματα αποθήκευσης – ηλεκτρική ενέργεια



Η αποθήκευση ενέργειας

- **Αποθήκευση ενέργειας:** “Η διαδικασία κατά την οποία ενέργεια, με οποιαδήποτε μορφή και σε οποιοδήποτε σημείο και χρόνο είναι διαθέσιμη, μετατρέπεται σε εκείνη τη μορφή που είναι βολικότερη για την αποθήκευσή της και ξαναμετατρέπεται σε οποιαδήποτε μορφή είναι χρηστικότερη τη χρονική στιγμή που τη χρειαζόμαστε”
 - Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρονική στιγμή η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να είναι ακριβώς ίση με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας
 - Αυτό σημαίνει ότι κάθε αυξομείωση στη ζήτηση ενέργειας πρέπει να αντιμετωπίζεται με **ισόποση και ταυτόχρονη** αυξομείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας



Η αποθήκευση ενέργειας

- Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας υφίστανται σημαντικές αλλαγές που αφορούν τόσο στη δομή τους όσο και στην υποδομή τους
- Υιοθετείται όλο και περισσότερο το μοντέλο της αποκεντρωμένης παραγωγής (ΔΠ και ΑΠΕ) ενώ νέου είδους φορτία (ΗΑ) αλλάζουν σημαντικά τα παραδοσιακά μοτίβα φόρτισης στο δίκτυο
- Η βεβαιότητα σχετικά με την παραγωγή ενέργειας στις ΑΠΕ και η στοχαστικότητα που διέπει τη ζήτηση ενέργειας από τα ΗΑ οδηγεί στην αδυναμία αντιστοίχισης της παραγωγής με τη ζήτηση σε πραγματικό χρόνο
- Δημιουργούνται καταστάσεις που ήταν μέχρι τώρα άγνωστες στη συμβατική μορφή των δικτύων όπως:
 - Αντίστροφη ροή φορτίου
 - Υπερτάσεις – Πτώσεις τάσης
 - Χαμηλή ποιότητα ισχύος



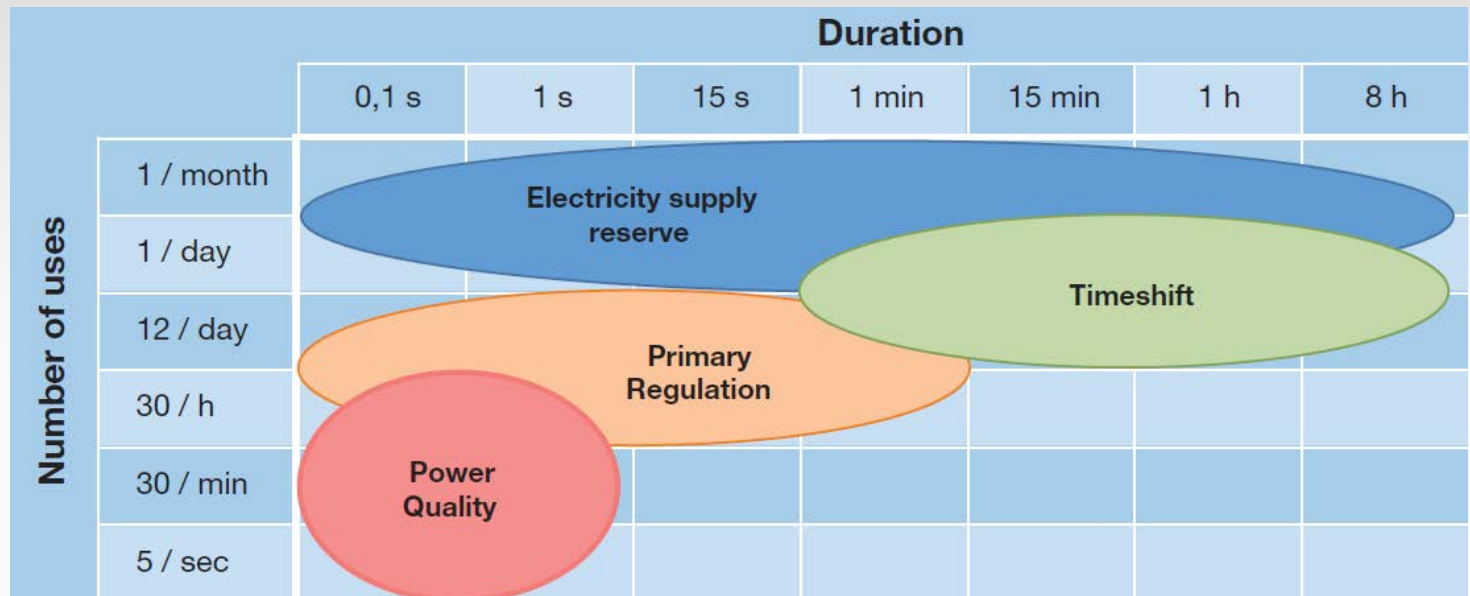
Η αποθήκευση ενέργειας

- Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συμβάλουν στην καλύτερη ενσωμάτωση των συστημάτων ηλεκτρισμού και θερμότητας και μπορεί να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο :
 - Στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της χρήσης των πόρων
 - Στην ενσωμάτωση της υψηλής διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
 - Στην υποστήριξη υλοποίησης αποκεντρωμένου μοντέλου δικτύου
 - Αύξηση της ενεργειακής πρόσβασης
 - Στην κεφαλαιακή επάρκεια των διαχειριστών των δικτύων αναστέλλοντας επενδυτικές παρεμβάσεις σε αυτά
 - Στη βελτίωση της σταθερότητας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, της ευελιξίας, της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητας



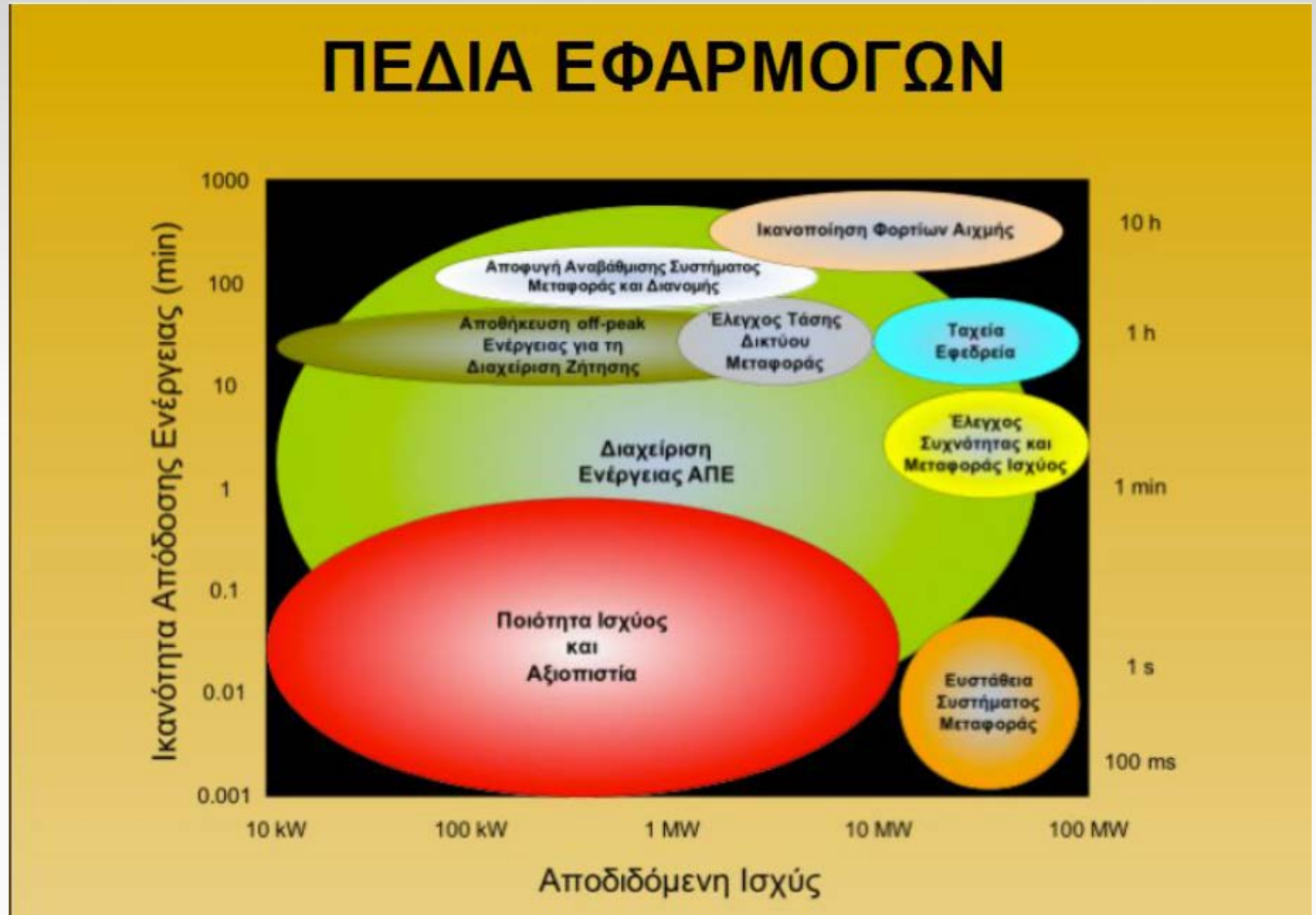
Η αποθήκευση ενέργειας

Ρόλοι ΣΑΗΕ ανάλογα με κύκλους και διάρκεια λειτουργίας τους:



Η αποθήκευση ενέργειας

Ρόλοι ΣΑΗΕ ανάλογα με κύκλους και διάρκεια λειτουργίας τους:



Δυνατότητες ΣΑΗΕ

1. Για την πλευρά του διαχειριστή

- Μετατόπιση ζήτησης (time shifting): μετατόπιση των αιχμών φορτίου και ομαλοποίηση της καμπύλης ζήτησης ισχύος
- Ποιότητα ισχύος: υποστήριξη συχνότητας και τάσης στο δίκτυο
- Πιο αποδοτική χρησιμοποίηση του δικτύου: αποφυγή καταστάσεων συμφόρησης του δικτύου – καθυστέρηση ενίσχυσης των υποδομών του δικτύου μέσα από επενδυτικές παρεμβάσεις
- Απομονωμένα δίκτυα: πιο σταθερή τροφοδοσία των καταναλωτών
- Υποστηρικτή τροφοδοσία φορτίων σε έκτακτες περιπτώσεις: εξυπηρέτηση φορτίων σε περιπτώσεις σφαλμάτων



Η αποθήκευση ενέργειας

2. Για την πλευρά του καταναλωτή

- Μετατόπιση ζήτησης (time shifting): κίνητρα στους καταναλωτές για αλλαγή καταναλωτικής συμπεριφοράς
- Εξασφάλιση αδιάλειπτης τροφοδοσίας: ευαίσθητες ή “κρίσιμες” συσκευές θα απολαμβάνουν αδιάλειπτη τροφοδοσία
- “V2H” (vehicle to home) και “V2G” (vehicle to grid): συνήθως σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά συστήματα και κυψέλες καυσίμου

3. Για την πλευρά του ιδιοκτήτη ΑΠΕ:

- Μετατόπιση ζήτησης (time shifting):
- Ευκολότερη διείσδυση ΑΠΕ: απορρόφηση διακυμάνσεων παραγωγής ισχύος από ΑΠΕ



Η αποθήκευση ενέργειας

Κατηγοριοποίηση με βάση τη μορφή ενέργειας



ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΑ

Αντλησιοταμίευση
PHS

Πεπιεσμένος Αέρας
CAES

Σφόνδυλος
FES

ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΑ

Μπαταρίες (επαναφ.)
L/A, Ni, Li, NaS, M/A

Μπαταρίες (ροής)
VRB, ZnBr

ΧΗΜΙΚΑ

Υδρογόνο
Electrol., FCell, SNG

ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ


Υπερπυκνωτής
SC

Υπεραγώγιμο Πηνίο
SMES

ΘΕΡΜΙΚΑ

Θερμότητα (αισθ. / λανθ.)
Molten Salt, Ice

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

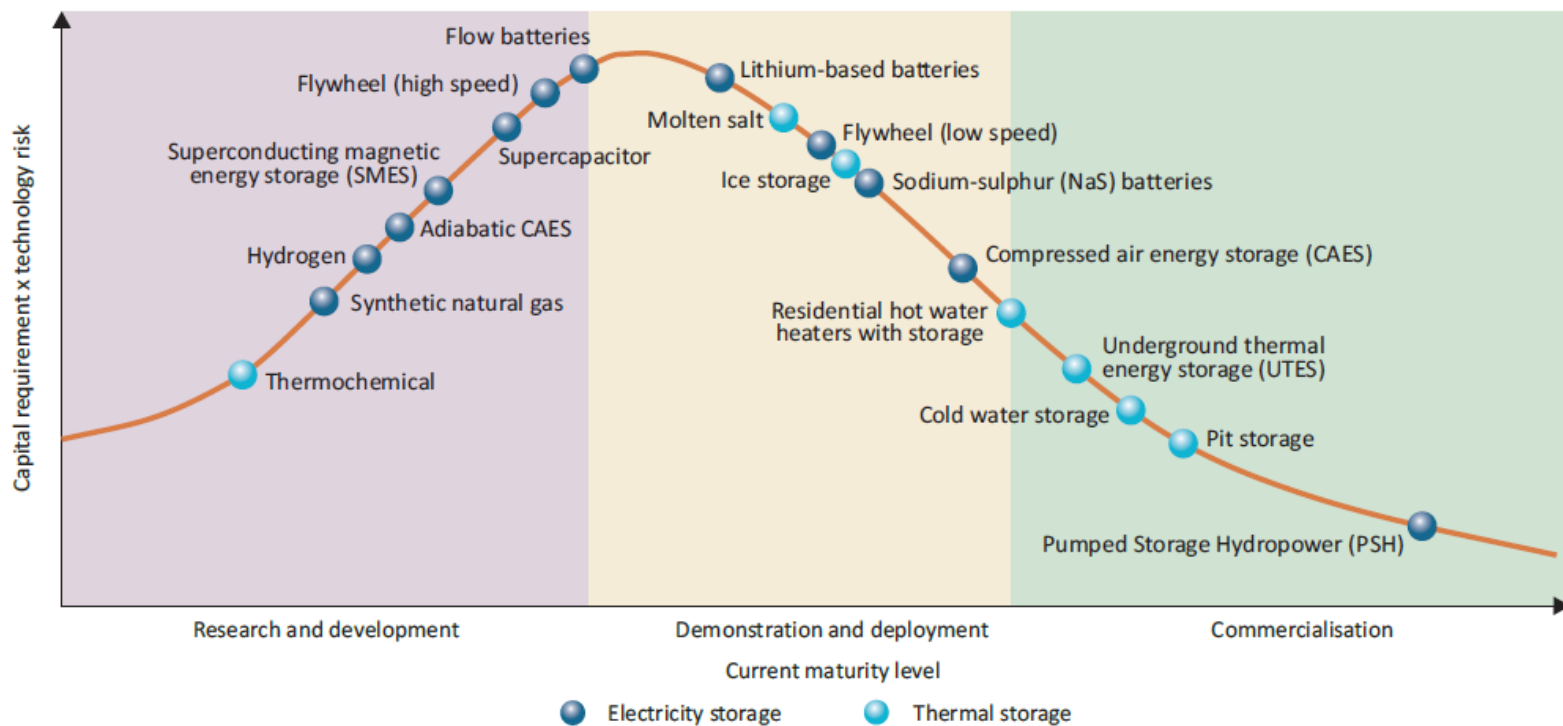
- 
- Η ωριμότητα κάθε τεχνολογίας είναι σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη
 - Οι αβεβαιότητες σχετικά με τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά είναι λιγότερες όταν υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα δεδομένα από την ευρεία εμπορική χρήση αυτών των τεχνολογιών
 - Έτσι σε αυτές τις περιπτώσεις το επίπεδο εμπιστοσύνης για τα υπάρχοντα και διαθέσιμα δεδομένα είναι πιο υψηλό
 - **Το επίπεδο ωριμότητας κάθε τεχνολογίας μπορεί να ενταχθεί σε μία από τις εξής τρεις κατηγορίες:**
 1. Εμπορική χρήση: σημαντική εμπειρία από μονάδες ήδη σε λειτουργία

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης


2. Πιλοτικά προγράμματα: η γενική ιδέα εδώ εξετάζεται στην πράξη με μικρής κλίμακας εγκατάσταση δοκιμαστικής φύσης
3. Έρευνα και ανάπτυξη: η γενική ιδέα αναπτύσσεται μέσα από μετρήσεις, προσομοιώσεις και μελέτες - αρχική ανάπτυξη και δοκιμή εξοπλισμού



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- 
1. Αντλησιοταμίευση - Pumped hydro storage (PHS): πάνω από 120 GW εγκατεστημένης ισχύος – 99% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος ΣΑΗΕ
 - Πρόκειται για μονάδες με γρήγορη ένταξη στο δίκτυο (λίγα λεπτά) – εφεδρεία και εξισορρόπηση ζήτησης σε δίκτυα με πολλές ΑΠΕ
 - Βασικά πλεονεκτήματα είναι:
 - ✓ Μεγάλη διάρκεια ζωής
 - ✓ Μεγάλη χωρητικότητα
 - ✓ Θεωρητικά άπειρος αριθμός κύκλων λειτουργίας
 - ✓ Γρήγορη απόκριση και ικανότητα να παρακολουθούν τις μεταβολές του φορτίου και να καλύπτουν τις αιχμές του ηλεκτρικού συστήματος
 - Βασικά μειονεκτήματα είναι:
 - ✓ Χαμηλός βαθμός απόδοσης (AC/AC) – (Round Trip Efficiency – RTE)
 - ✓ Γεωγραφικοί περιορισμοί

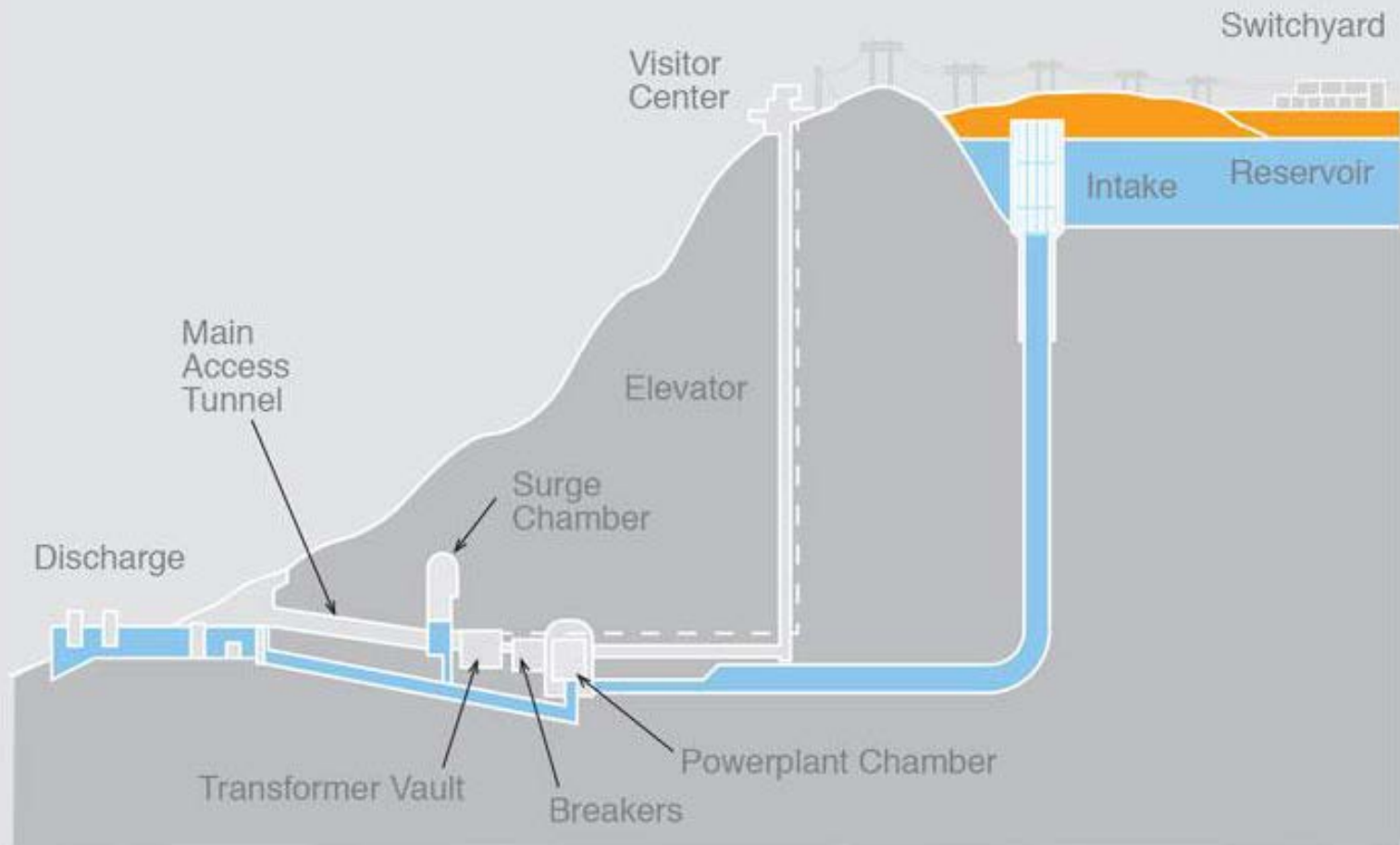
Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Πιο συγκεκριμένα:
 1. Έχουν δυνατότητα αποθήκευσης πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας συγκριτικά με άλλους τρόπους αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας
 2. Είναι ευέλικτα στην εκκίνηση και τον τερματισμό τους
 3. Έχουν γρήγορη απόκριση και ικανότητα να παρακολουθούν τις μεταβολές του φορτίου, ομαλές ή απότομες, και να καλύπτουν τις αιχμές του ηλεκτρικού συστήματος
 4. Έχουν την ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας του συστήματος. Μπορούν επιπλέον να διατηρούν σταθερή την τάση. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μη διασυνδεδεμένα νησιά όπου λειτουργούν ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες δεν έχουν σταθερή παραγωγή και έτσι «επιβαρύνουν» τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου
 5. Η παραγωγή ενέργειας από συστήματα αντλησιοταμίευσης είναι πολύ πιο οικονομική για τους κατοίκους των μη διασυνδεδεμένων νησιών σε σχέση με τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής τους

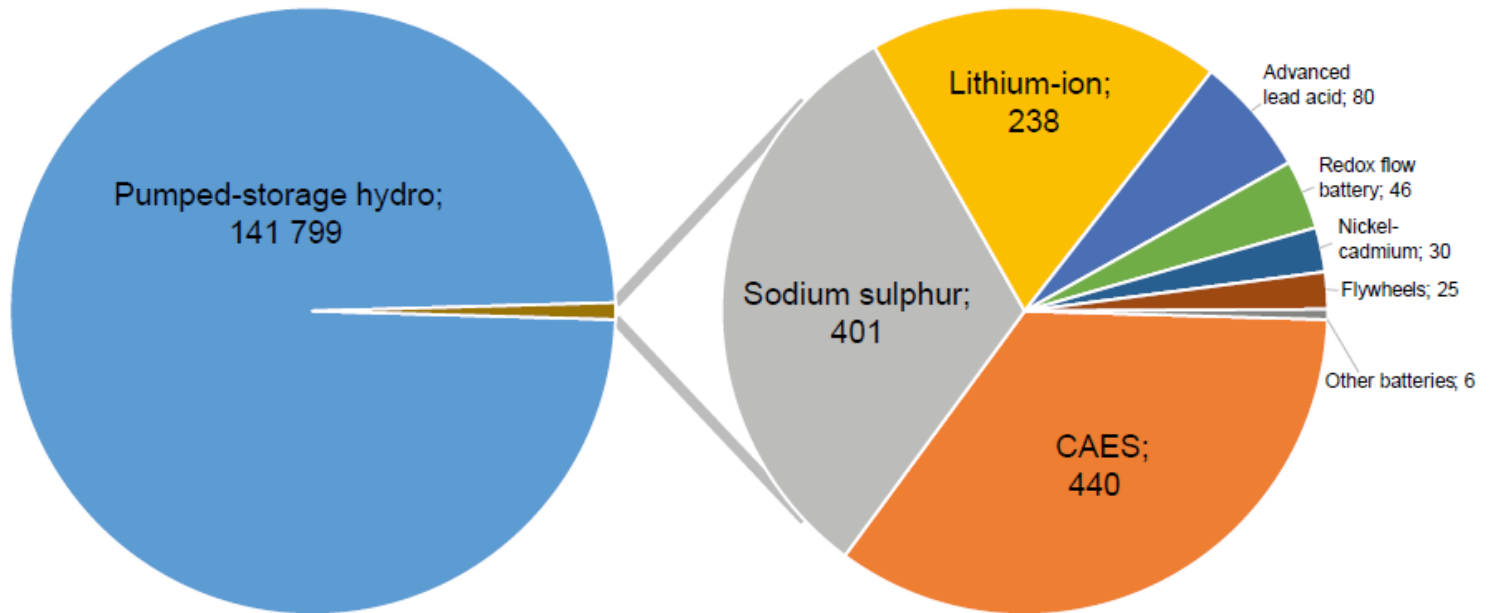


Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

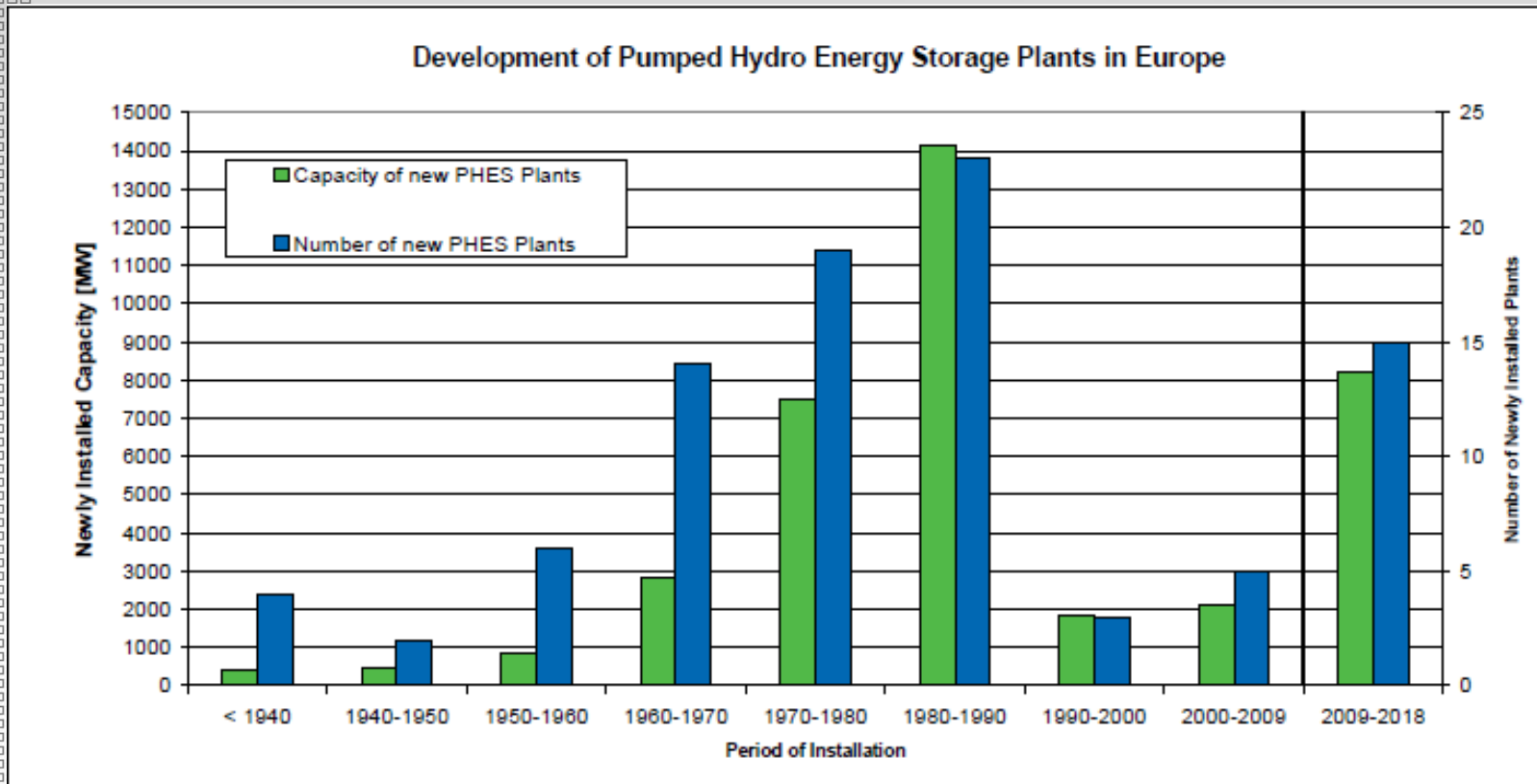
Cross section of a PHEES plant



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Κύρια χαρακτηριστικά των αναστρέψιμων υδροηλεκτρικών έργων

Η υδραυλική ισχύς N_h δίνεται από το γινόμενο: $N_h = (\rho g) \cdot h \cdot Q$

στην οποία συμβολίζονται:

- με $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$ η επιτάχυνση της βαρύτητας
- με ρ η πυκνότητα του νερού ($\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$)
- με Q σε m^3/sec η διακινούμενη παροχή νερού και
- με h σε m η υψομετρική διαφορά μεταξύ κάτω και άνω ταμιευτήρα

Από την προηγούμενη σχέση γίνεται φανερός ο ρόλος της υψομετρικής διαφοράς h μεταξύ κάτω και άνω ταμιευτήρα:

για την αποθήκευση δεδομένης ισχύος N επί κάποιο χρονικό διάστημα δt , άρα ενέργειας:

$$E = N \cdot \delta t$$

όσο μεγαλύτερη είναι η υψομετρική διαφορά h τόσο μικρότερη η αντίστοιχη παροχή Q και η ποσότητα νερού:

$(Q \cdot \delta t)$ που αντιστοιχεί



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Άρα για την αποθήκευση της ίδιας ισχύος και ενέργειας όσο αυξάνεται η υψομετρική διαφορά η μειώνεται η παροχή, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους

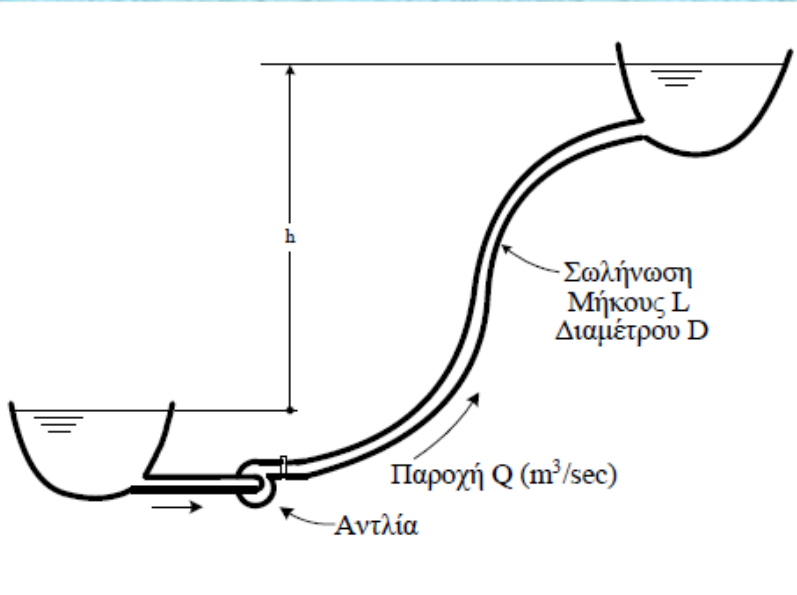
- της σωλήνωσης (μικρότερη διάμετρος)
- των αντλιών
- του ταμιευτήρα λόγω της μικρότερης χωρητικότητας που απαιτείται για την αποθήκευση της ίδιας ποσότητας ενέργειας

Για τον λόγο αυτό τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα θεωρούνται οικονομοτεχνικά αποδοτικά όταν η υδραυλική πτώση είναι υψηλότερη των 150-200 m περίπου



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

α) Φάση της άντλησης



Η ενέργεια H του νερού, την οποία θα πρέπει να δίνει η αντλία, είναι ίση προς:

$$H = h + \delta h_f$$

όπου με δh_f συμβολίζονται οι υδραυλικές απώλειες που αναπτύσσονται

στην σωλήνωση που συνδέει τον κάτω με

τον άνω ταμιευτήρα

Άρα η ισχύς:

$$\delta N_f = (\rho g) \cdot \delta h_f \cdot Q$$

αποτελεί την απώλεια ισχύος που αντιστοιχεί στην ισχύ που χάνεται στις

υδραυλικές απώλειες της σωλήνωσης

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Εάν ληφθούν υπόψη οι ενεργειακές απώλειες του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που παρεμβαίνει (αντλία, ηλεκτροκινητήρας, μετασχηματιστές) μέσω του βαθμού απόδοσης τους, προκύπτει ο συνολικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \eta_P \cdot \eta_M \cdot \eta_{Tr}$$

Άρα εάν υπάρχει ηλεκτρική ισχύς N αυτή μπορεί μέσω άντλησης να μετατραπεί σε υδραυλική ισχύ N_h , προφανώς

$$N_h < N$$

καθώς η διαφορά

$$(N - N_h)$$

αντιστοιχεί στις απώλειες που αναπτύσσονται και αντιστοιχούν σε ενέργεια που δεν αποθηκεύεται



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

β) Φάση επαναπρόσδοσης της υδραυλικής ενέργειας

- Στην φάση αυτή η φορά της ενέργειας και της ροής του νερού είναι η αντίθετη
- Την λειτουργία αυτή εξασφαλίζει ο υδροστρόβιλος και η ηλεκτρική γεννήτρια που στρέφεται από αυτόν
- Η ενέργεια που διατίθεται στον υδροστρόβιλο για να την μετατρέψει σε μηχανική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ίση προς:

$$H=h-\delta hf$$

όπου με δh συμβολίζονται οι υδραυλικές απώλειες που αναπτύσσονται στην σωλήνωση που συνδέει τον κάτω με τον άνω ταμιευτήρα.

- Άρα η ισχύς:

$$\delta N_f = (\rho g) \cdot \delta hf \cdot Q$$

αποτελεί την απώλεια ισχύος και αντιστοιχεί



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Εάν ληφθούν υπόψη οι ενεργειακές απώλειες του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού που παρεμβαίνει (υδροστρόβιλος, ηλεκτρική γεννήτρια, μετασχηματιστές) μέσω του βαθμού απόδοσης τους, προκύπτει ο συνολικός βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{Tr}$$

Άρα από την υδραυλική ισχύ N_h αυτή που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ N_e

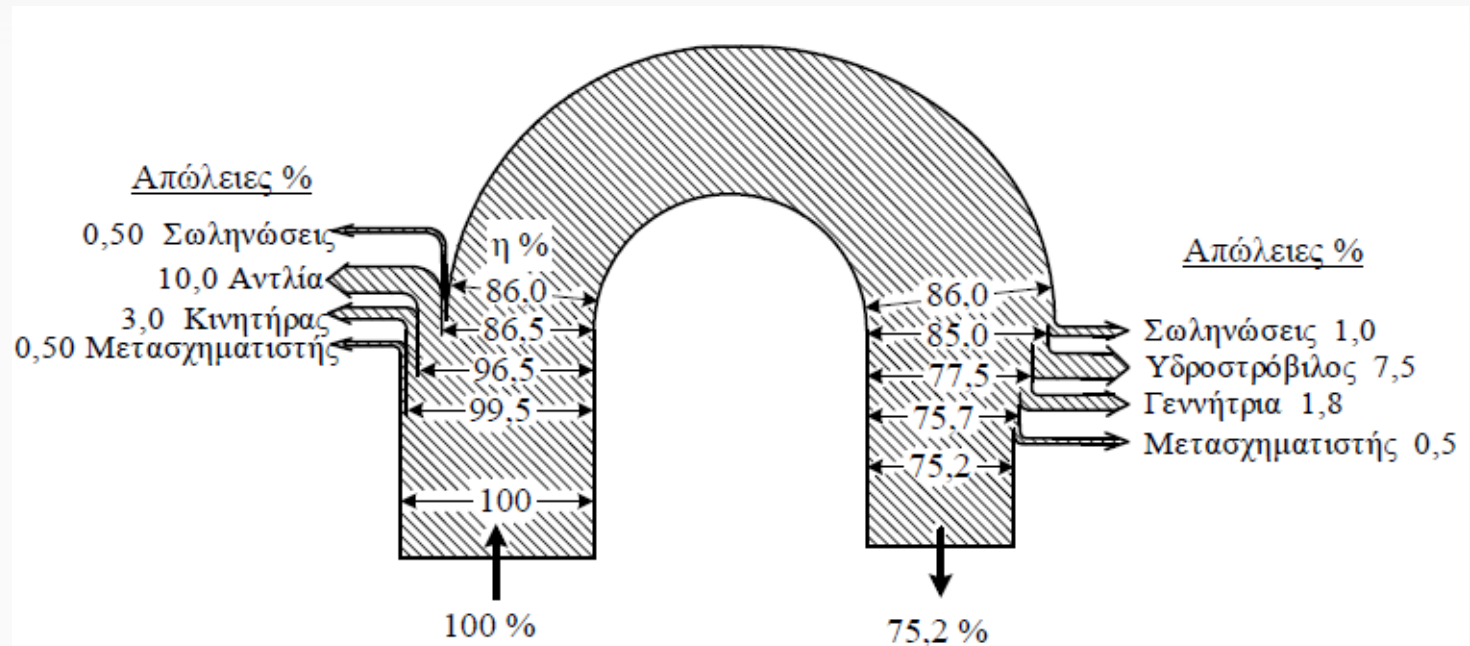
και τροφοδοτεί το ηλεκτρικό δίκτυο είναι μικρότερη κατά τις ολικές απώλειες (σωληνώσεις και ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός), δηλαδή:

$$N_e < N_h$$



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Συνολικά σε ένα πλήρη κύκλο, και ανάλογα με τον εξοπλισμό (αντλίες, υδροστρόβιλοι κλπ) ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι της τάξεως του 65-80% (το υπόλοιπο 35-20% της ενέργειας χάνεται σε απώλειες) ανάλογα με το μέγεθος της μονάδας, την επιλογή του εξοπλισμού της κα.
- Σημειώνεται ότι η τεχνολογία της αποθήκευσης μέσω πεπιεσμένου αέρα φθάνει σε ολικό βαθμό απόδοσης της τάξεως του 75%



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Αποτελεσματικότητα της αντλησιοταμίευσης στην αποθήκευση ενέργειας
- Σύμφωνα με τα προηγούμενα η υδραυλική ενέργεια 1 m³ μεταξύ δύο ταμιευτήρων με υψομετρική διαφορά H (m) προκύπτει ίση προς:
 - 1 m³ → $(9,81/3600) * H$ (KWh)
- Κατά την φάση της άντλησης, για την ανύψωση 1 m³ μεταξύ δύο ταμιευτήρων με υψομετρική διαφορά H (m) απορροφάται ενέργεια
 - 1 m³ → $(9,81/3600 * \eta_p) * H$ (KWh)
- συμβολίζοντας με η_p τον ολικό βαθμό απόδοσης της άντλησης

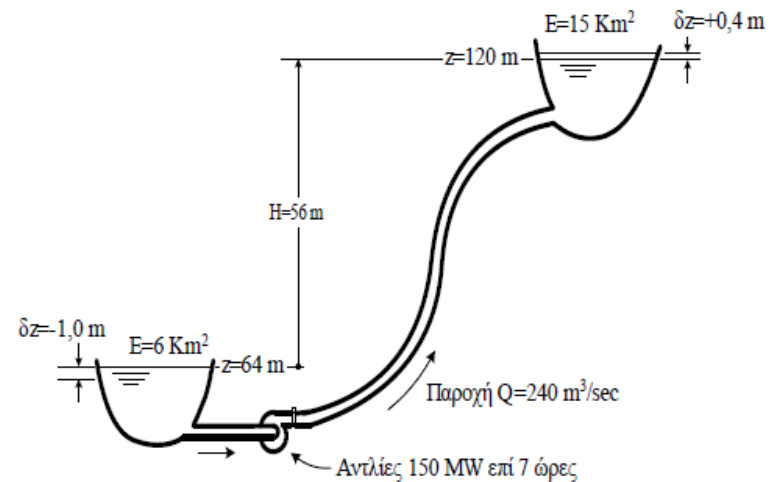


Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Εάν ως ζεύγος ταμιευτήρων θεωρηθούν οι ταμιευτήρες του ΥΗΣ Α (μέσης επιφάνειας 15 Km²) και του ΥΗΣ Β (μέσης επιφάνειας 6 Km²) και αντληθεί νερό από τον κάτω ταμιευτήρα (Β) προς τον πάνω (Α) με H=56 m, τότε για τον κατέβασμα της στάθμης του (Β) κατά 1 m η στάθμη στον ταμιευτήρα (Α) θα ανέβει κατά 0,40 m περίπου και η ποσότητα νερού που αντιστοιχεί είναι:

$$1 \cdot 6 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \rightarrow \frac{9.81}{3600 \cdot \eta_p} H \cdot 6 \cdot 10^6 \approx 1040 \text{ MWh}$$

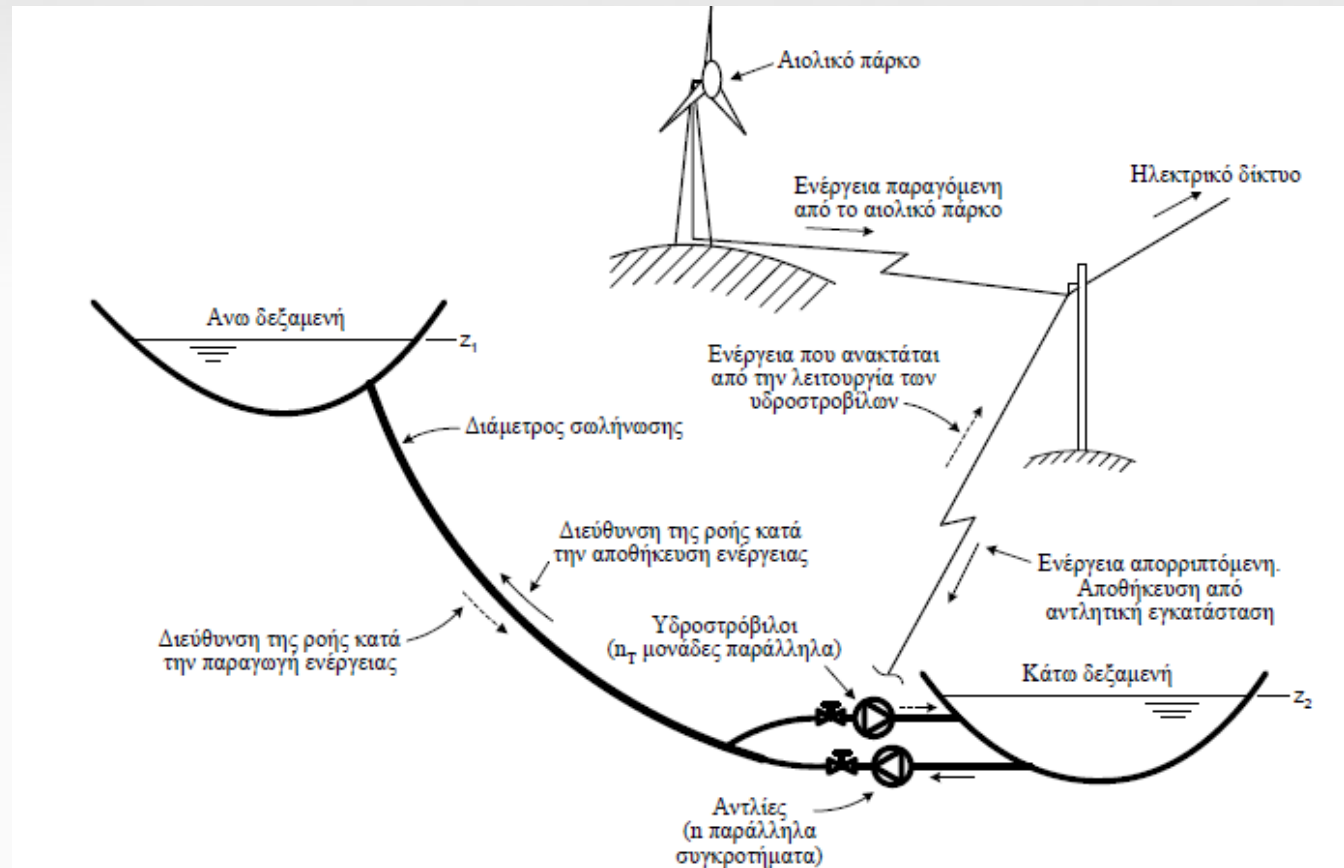
που αντιστοιχεί σε λειτουργία αντλιών ον. ισχύος 150 MW (όση η ονομαστική ισχύς του Β) επί 7 ώρες



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Εφαρμογή της αντλιοσταμείωσης σε υβριδικό σύστημα

Παράδειγμα αιολικού πάρκου σε ένα αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο: για λόγους ευστάθειας του δικτύου η διείδυση των αιολικών πάρκων (λόγω της αστάθειας που παρουσιάζει η παραγωγή της αιολικής ενέργειας) περιορίζεται στο 30%.



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

Ορισμένα από τα νησιά που δεν είναι διασυνδεδεμένα έχουν ήδη κορεσθεί από πλευράς εγκατεστημένων αιολικών πάρκων και σε αυτά η αύξηση της διείσδυσης μπορεί να γίνει μόνο μέσω της εισαγωγής της αντλησιοταμίευσης, δηλ. υβριδικών μονάδων που συνδυάζουν τα αιολικά πάρκα με αντλησιοταμίευση, για παράδειγμα:

- στην Κρήτη υπάρχει ενδιαφέρον για 2 μονάδες, ισχύος 100 και 50 MW
- στην Λέσβο για μονάδα 12 MW
- στο σύστημα της Παροναξίας για μονάδα 8 MW
- στην Ικαρία είναι υπό κατασκευή από την ΔΕΗ υβριδική ισχύος 3 MW περίπου

Λόγω του αναλογικά μικρού μεγέθους του δικτύου στα νησιά η διαστασιολόγηση μίας υβριδικής μονάδας θα πρέπει να προκύψει ως αποτέλεσμα βελτιστοποίησης όλων των παραμέτρων που υπεισέρχονται, προβλέποντας επιπλέον την ζήτηση στα επόμενα χρόνια



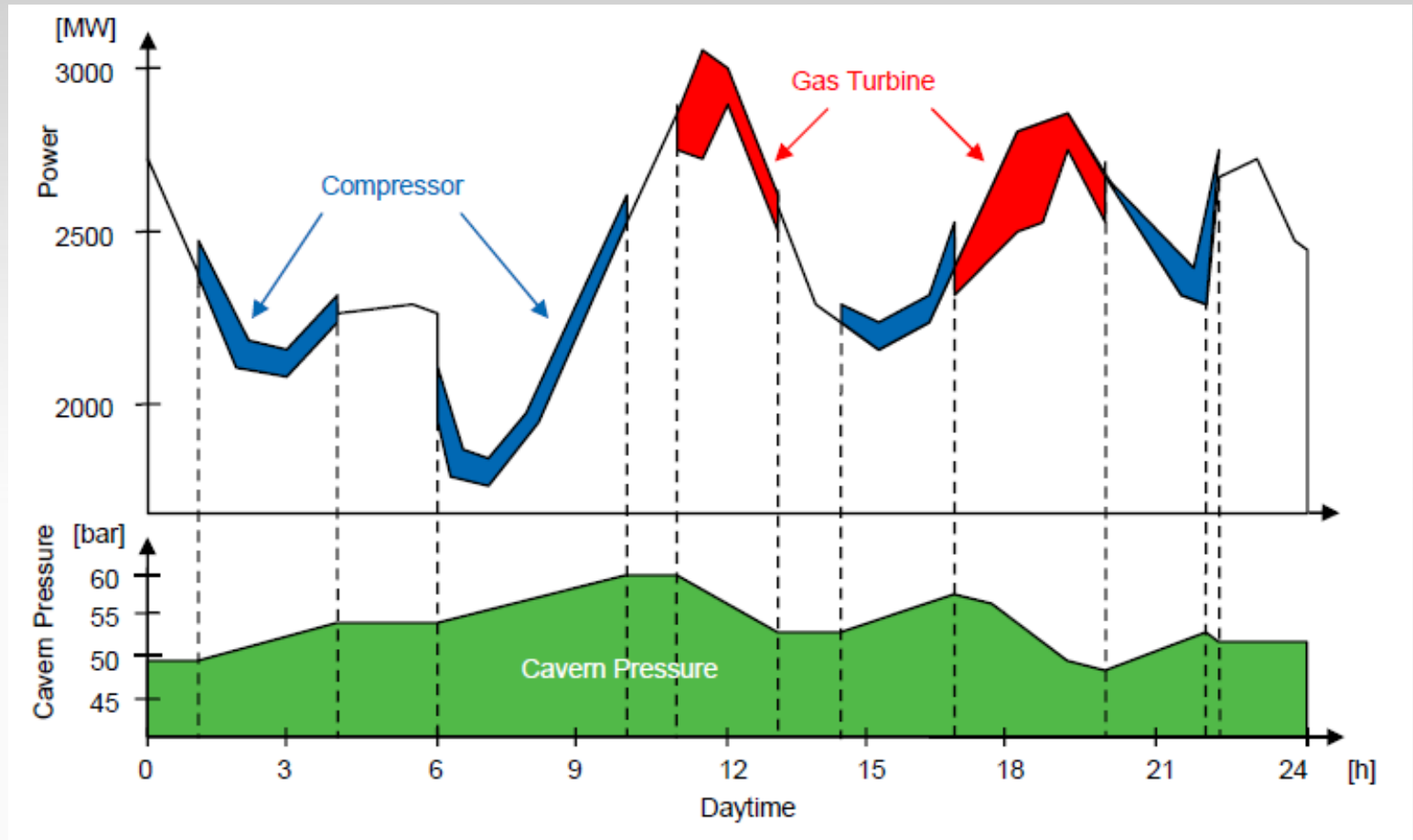
Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

2. ΣΑΗΕ με πεπιεσμένο αέρα:

- Αποθήκευση ενέργειας σε ώρες μη αιχμής φορτίου ή περίσσειας ενέργειας μέσω της συμπίεσης του αέρα σε δεξαμενές αποθήκευσης
- Η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να προέρχεται από ΑΠΕ
- Ο αέρας στη συνέχεια θερμαίνεται και εκτονώνεται μέσω αεριοστροβίλου
- Δυο παράγοντες είναι υπεύθυνοι για την όχι και τόσο καλή απόδοση του συστήματος:
 - ✓ Απαιτείται ενέργεια για να ψύξει τον αέρα καθώς αυτός συμπιέζεται. Κρίσιμη προϋπόθεση.
 - ✓ Απαιτείται ενέργεια (καύσιμο) για να διαστείλει τον αποθηκευμένο ψυχρό αέρα πριν μπει στο στρόβιλο
- Επιθυμητό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού θα ήταν η ανακύκλωση της απορριπτόμενης ενέργειας από το στάδιο της συμπίεσης και της χρήσης της στο στάδιο της εκτόνωσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

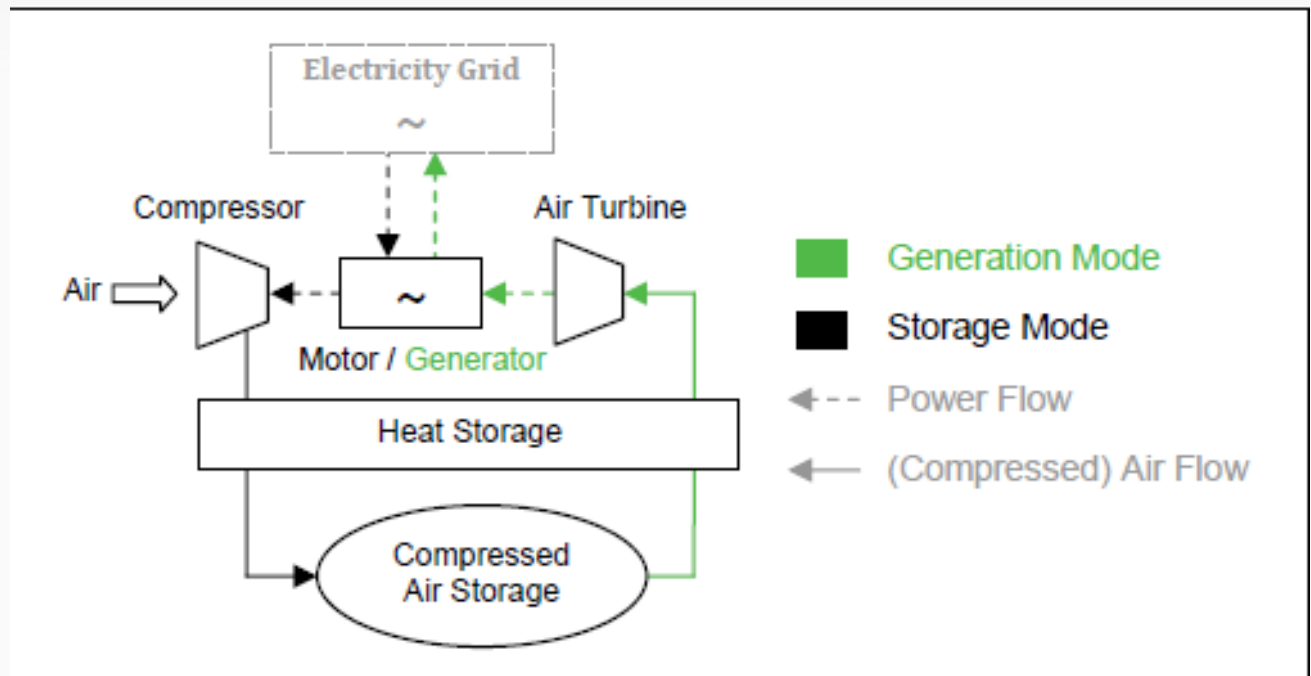
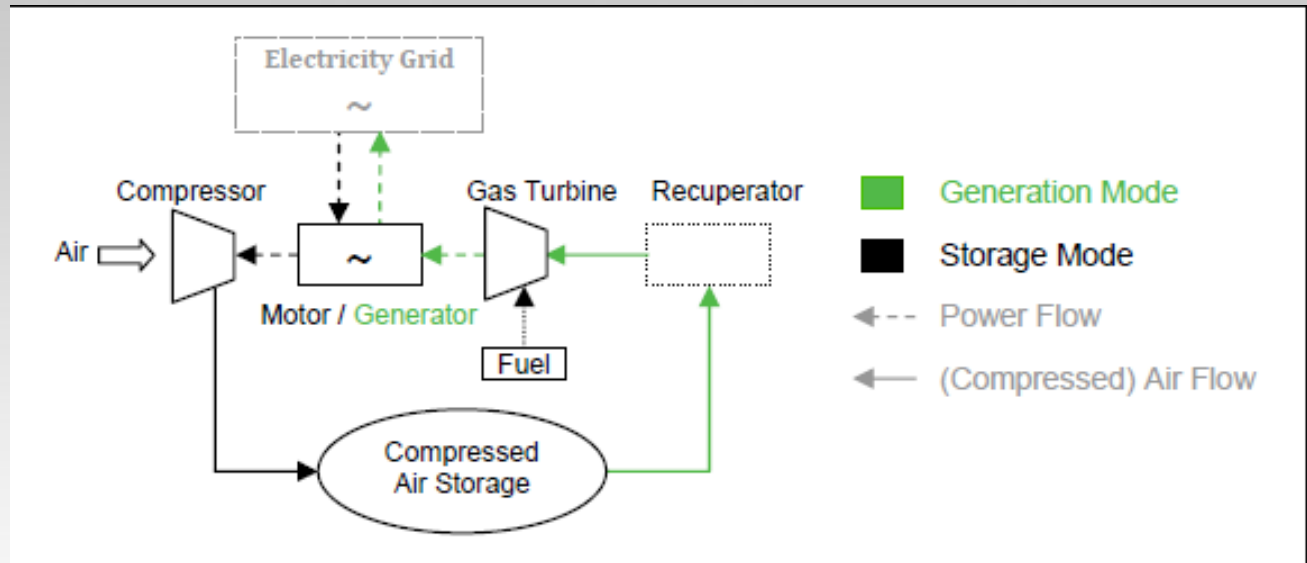


Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα
- Οι διαφορές μεταξύ τους έχουν να κάνουν με:
 - τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η συμπίεση του αέρα
 - τη δυνατότητα αλλά και το ποσοστό εκμετάλλευσης της ενέργειας που εκλύεται κατά τη συμπίεση
 - το μέσο με το οποίο γίνεται η αναθέρμανση του αέρα για την παραγωγή ενέργειας από τον αποθηκευμένο πεπιεσμένο αέρα
- Έτσι, οι τεχνολογικά διαθέσιμοι τύποι συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα είναι:
 1. Διαβατικοί Σταθμοί CAES
 2. Αδιαβατικοί Σταθμοί CAES
 3. Προηγμένοι Αδιαβατικοί Σταθμοί CAES
 4. Ισοθερμικοί Σταθμοί CAES



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Τα πεδία εφαρμογής των σταθμών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα μπορεί να είναι:
 - Energy arbitrage
 - Η εξισορρόπηση ζήτησης – παραγωγής
 - Υψηλότερα ποσοστά χρησιμοποίησης και διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα
 - Βοηθητικές υπηρεσίες όπως ρύθμιση άεργου ισχύος και στρεφόμενη εφεδρεία
 - Υπηρεσίες black-start σε περίπτωση ολικής ή μερικής βλάβης του ηλεκτρικού συστήματος
- Μόνο δύο τέτοιου είδους σταθμοί αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε κλίμακα συστήματος σε όλο τον κόσμο (Huntorf της Γερμανίας, Alabama ΗΠΑ)
- Αποτρεπτικός παράγοντας για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων μπορεί να είναι το κόστος, τόσο κατασκευής όσο και λειτουργίας



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Παράδειγμα: Μονάδα CAES Huntorf
 - Έξοδος: 320 MW_e (2 ώρες)
 - Είσοδος: 60 MW (8 ώρες)
 - 2 σπηλιές χωρητικότητας 150.000 m^3
 - Πίεση 50-70 bar
 - Απόδοση 42 %



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Υπόγεια αποθήκευση (Cavern 1)

Υπόγεια αποθήκευση (Cavern 2)

Αεριοστροβιλικό σταθμός

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Παράδειγμα: Μονάδα CAES McIntosh Alabama
 - Έξοδος: 1000 Wh_e
 - Είσοδος: $690 \text{ Wh}_e + 1170 \text{ Wh}_{th}$ (φυσικό αέριο)
 - Απόδοση 54 %



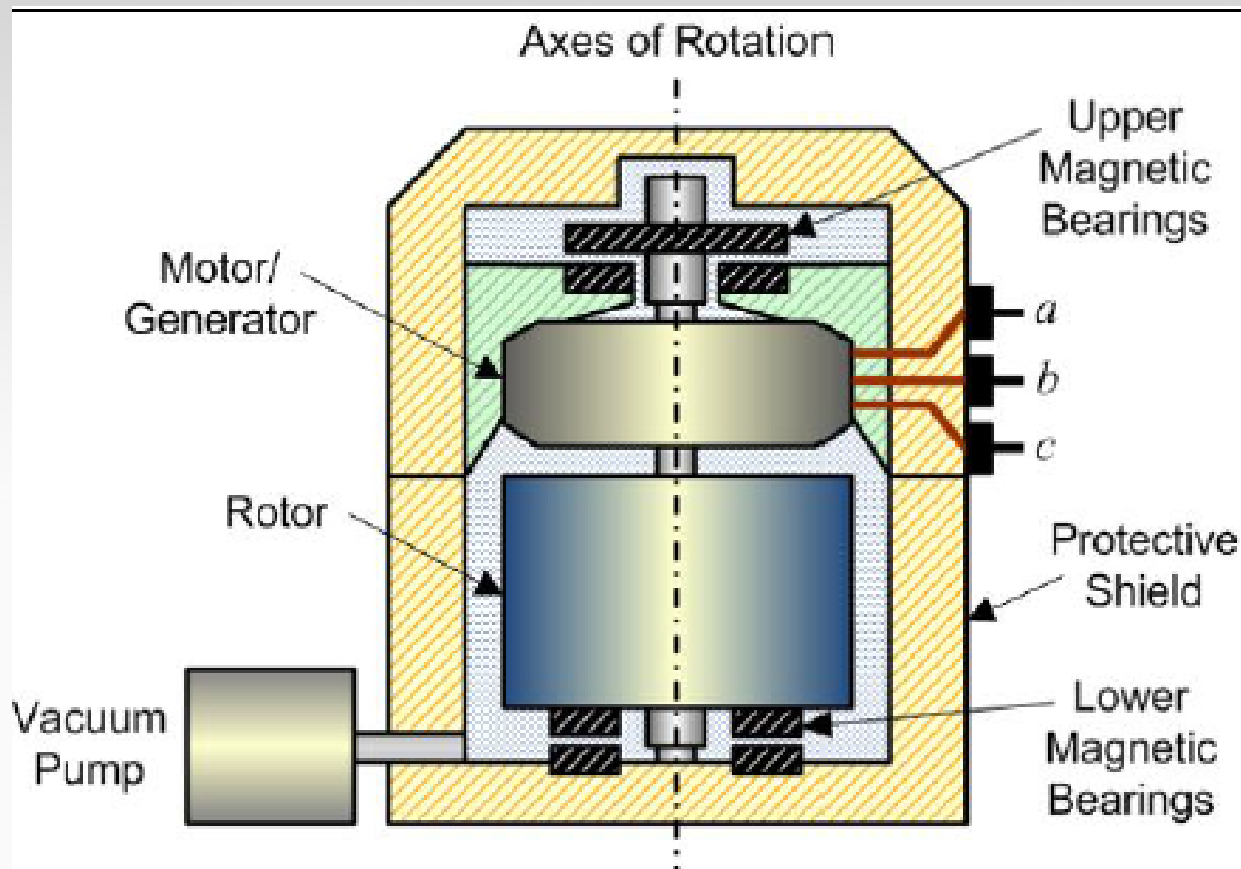
Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

3. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε σφονδύλους (flywheels):

- Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με σφονδύλους αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή κινητικής ενέργειας
- Ένα flywheel περιλαμβάνει ένα δρομέα και μια ηλεκτρική μηχανή
- Όταν η ηλεκτρική ενέργεια εισέρχεται στο flywheel, επιταχύνεται ο δρομέας και ο ενσωματωμένος κινητήρας φτάνει κάποια περιστροφική ταχύτητα
- Όταν χρειάζεται να επιστρέψει την ηλεκτρική ενέργεια η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια
- Τα συστήματα αποθήκευσης με flywheels είναι ιδανικά στην αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και στην τροφοδότηση του ηλεκτρικού συστήματος για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και να την επιστρέψουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα της τάξης των δευτερολέπτων
- Ιδανικά για εφαρμογές όπως:
 - διατήρηση της ποιότητας και της αξιοπιστίας της ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου
 - ταχύτατη ρύθμιση της ποιότητας της συχνότητας του δικτύου μιας περιοχής
 - σύντομη εφεδρεία σε περιπτώσεις εκκίνησης συμβατικών γεννητριών του συστήματος



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης


- Σαν μηχανικά συστήματα έχουν αρκετά πλεονεκτήματα:
 - μηδαμινή ανάγκη συντήρησης
 - η μεγάλη διάρκεια ζωής (μέχρι και 175,000 κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης)
 - αμελητέες περιβαλλοντικές επιπτώσεις

*Ένα σύγχρονο σύστημα αποθήκευσης με flywheels έχει δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας τέτοια ώστε να μπορεί να επιστρέψει ηλεκτρική ισχύ από 100 kW σε μερικά λεπτά έως και 2 MW σε χρονικό διάστημα έως 10 δευτερόλεπτα


- Λόγω της έλλειψης εμπειρίας η χρήση τους δεν είναι διαδεδομένη σε επίπεδο ηλεκτρικού δικτύου ή συστήματος μεταφοράς
- Πολλοί κατασκευαστές υβριδικών και ηλεκτρικών αυτοκινήτων χρησιμοποιούν τα flywheels σαν μέσο αποθήκευσης



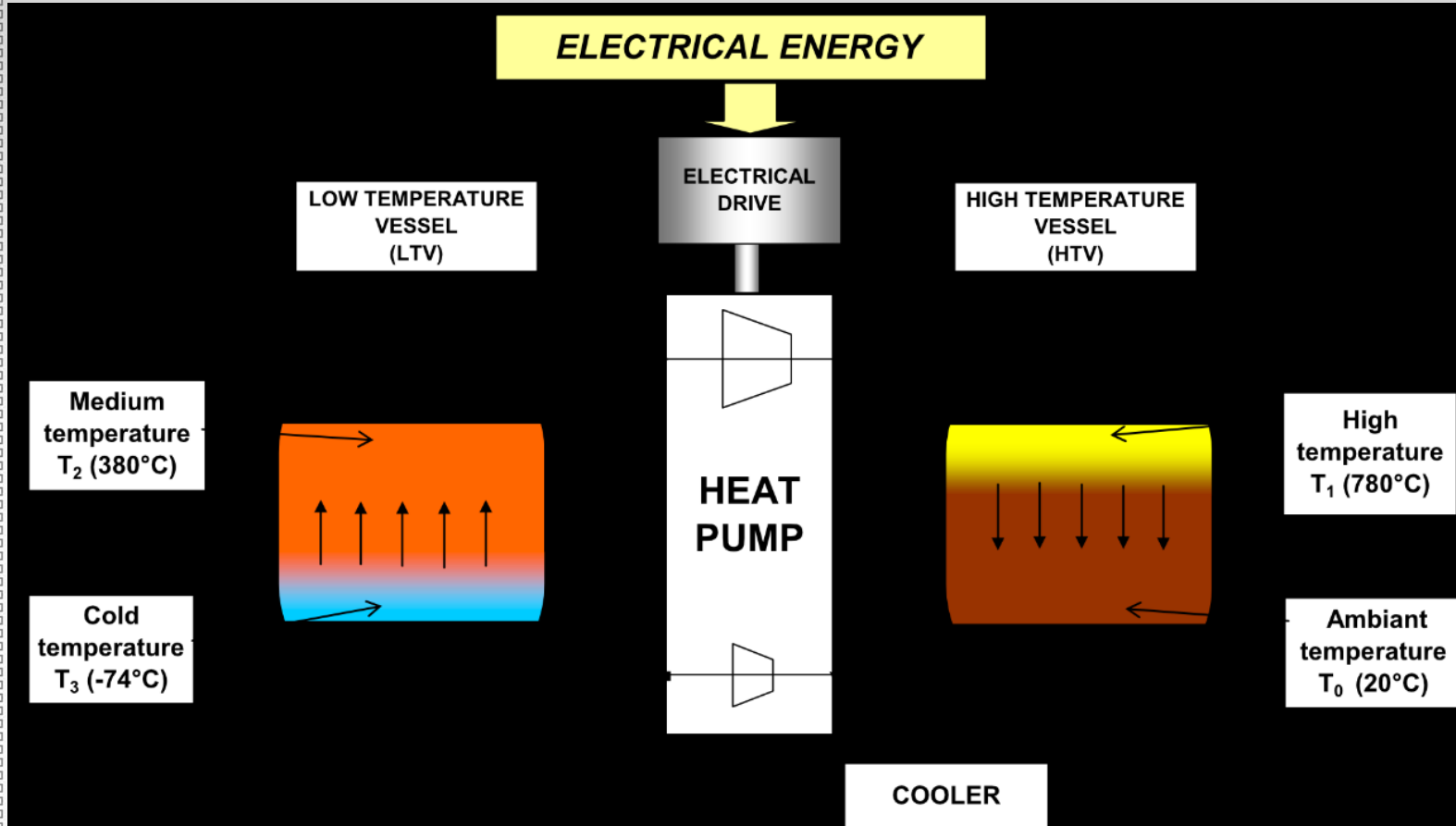
Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- 
4. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με θερμικά μέσα:
 - i. Αποθήκευση ενέργειας με άντληση θερμότητας (pumped heat energy storage)
 - ii. Αποθήκευση ενέργειας με υγροποίηση αέρα ή κρυογενική αποθήκευση ενέργεια
 - iii. Αποθήκευση ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (concentrated solar power)

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- 
- i. Αποθήκευση ενέργειας με άντληση θερμότητας (pumped heat energy storage):
 - Ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει μια μηχανή αποθήκευσης η οποία είναι συνδεδεμένη με δύο μεγάλες θερμικές δεξαμενές
 - Για την αποθήκευση ενέργειας η μηχανή αποθήκευσης λειτουργεί σαν μια αντλία θερμότητας, η οποία αντλεί τη θερμότητα από την ψυχρή στη θερμή δεξαμενή
 - Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αποθηκευμένη θερμική ενέργεια, η μηχανή λειτουργεί σαν μια θερμική μηχανή, η οποία αντλεί θερμότητα από τη θερμή δεξαμενή, δίνει κίνηση στο δρομέα μιας γεννήτριας για την παραγωγή ηλεκτρισμού (μηχανικό έργο) και απορρίπτει την περίσσεια θερμότητας στην ψυχρή δεξαμενή

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης




Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποθήκευσης είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που μπορεί να έχει, λόγω της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική μέσω της αντλίας θερμότητας
- Η έλλειψη εμπειρίας πάνω σε αυτή την τεχνολογία είναι εξίσου ένα μειονέκτημα
- Μέχρι στιγμής δεν υπάρχει κάποια εμπορική εφαρμογή αυτού του είδους, αλλά μόνο πειραματικές εφαρμογές σε ερευνητικό στάδιο
- Το κυριότερο πλεονέκτημα είναι η μεγάλη πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας που έχει η συγκεκριμένη τεχνολογία, η οποία μπορεί να είναι 3 φορές μεγαλύτερη από μια μπαταρία ιόντων – λιθίου
- Δεν απαιτεί κάποια συγκεκριμένη μορφολογία εδάφους για να εγκατασταθεί και η απόδοση μιας τέτοιας εγκατάστασης αυξάνεται με το μέγεθος της εγκατεστημένης χωρητικότητας



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

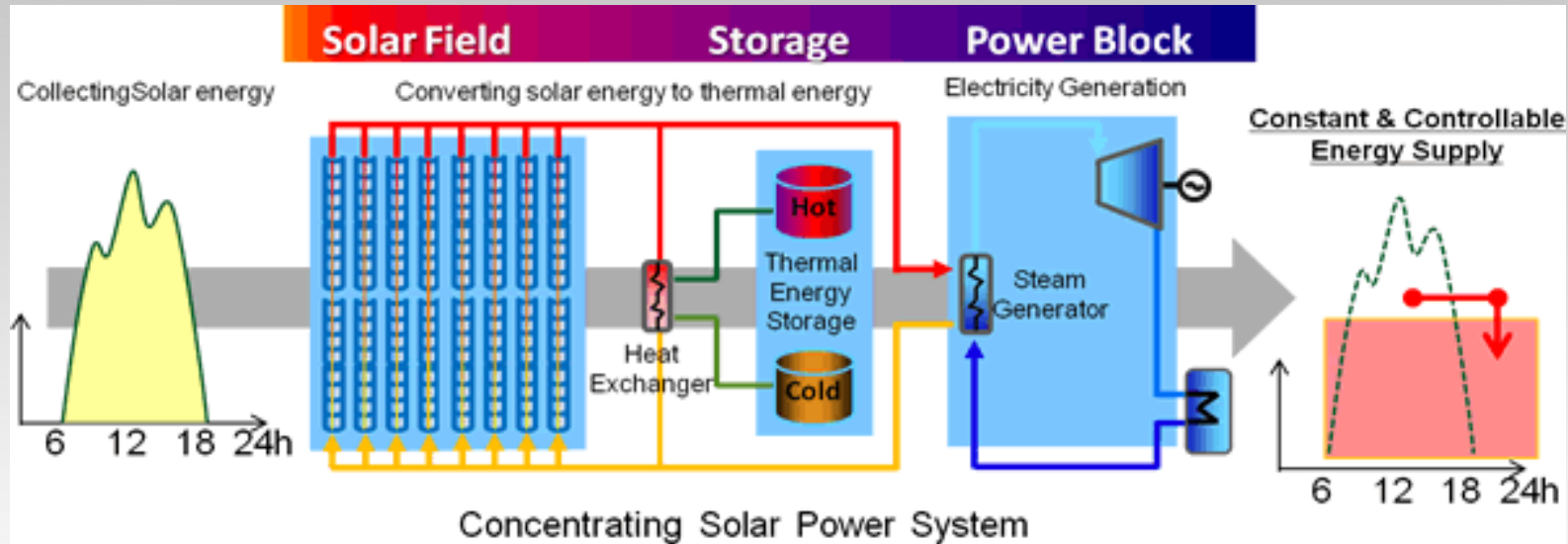
- 
- ii. Αποθήκευση ενέργειας με υγροποίηση αέρα ή κρυογενική αποθήκευση ενέργειας:
 - Η ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου χρησιμοποιείται για την ψύξη του αέρα, μέχρι αυτός να υγροποιηθεί και να αποθηκευτεί σε κατάλληλες δεξαμενές
 - Όταν υπάρχει η ανάγκη για παραγωγή ενέργειας, ο υγροποιημένος αέρας επανέρχεται σε αέρια μορφή με θέρμανση και χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση ενός στροβίλου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας γεννήτριας
 - Έχουν αρκετά καλή πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας
 - Πολύ χαμηλή απόδοση των πρωτότυπων ερευνητικών συσκευών στις οποίες διεξάγονται τα πειράματα

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



- iii. Αποθήκευση ενέργειας από συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (concentrated solar power):
- Τα συστήματα συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για τη θέρμανση κάποιου υγρού μέσου, το οποίο αεριοποιείται και χρησιμοποιείται για την κίνηση μιας θερμικής μηχανής και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
 - Η ηλιακή ενέργεια συγκεντρώνεται μέσω κάποιων κάτοπτρων και θερμαίνει το υγρό μέσο
 - Δεν υπάρχει άμεση αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά αποθήκευση θερμικής ηλιακής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρισμού

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



- Η τεχνολογία των συγκεντρωμένων ηλιακών σταθμών είναι ήδη αρκετά ώριμη, αφού οι σταθμοί που βρίσκονται σε λειτουργία μέχρι τώρα ξεπερνούν τους 100 σε όλο τον κόσμο
- Το 50% από αυτούς εφαρμόζουν σύστημα αποθήκευσης ενέργειας
- Προβλέπεται όμως ότι μελλοντικά θα μπορούν να τροφοδοτήσουν το σύστημα από την αποθηκευμένη τους ενέργεια μέχρι και 4 ώρες

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

5. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χημικά μέσα (H_2 και SNG):
 - Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χημικά μέσα περιλαμβάνει κυρίως την αποθήκευση μέσω υδρογόνου και μέσω συνθετικού φυσικού αερίου
 - Και οι δύο τρόποι περιλαμβάνουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού και διαφορετικής επόμενης χρήσης του κάθε φορά
 - Η απόδοση αυτής της μετατροπής είναι πολύ χαμηλή αλλά τα συγκεκριμένα μέσα αποθήκευσης επιτρέπουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ μεγάλη κλίμακα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους
 - Η πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειάς τους είναι αρκετά υψηλότερη από τις υπόλοιπες μεθόδους αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Μια τυπική μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου και κάποιο μέσο καύσης (κυψέλη καυσίμου) ως πηγή θερμότητας
- Για το συνθετικό φυσικό αέριο (SNG), η διαδικασία αποθήκευσης με αυτό απαιτεί ένα δεύτερο βήμα μετά την ηλεκτρόλυση του νερού
- Μετά την παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση, το υδρογόνο αντιδρά με διοξείδιο του άνθρακα και παράγουν μεθάνιο ή SNG
- Το πλεονέκτημα του SNG είναι ότι μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από το υδρογόνο
- Το ότι υφίσταται επιπλέον διεργασία για την παραγωγή και αποθήκευσή του, καθιστά τη χρησιμοποίησή του λιγότερο αποδοτική

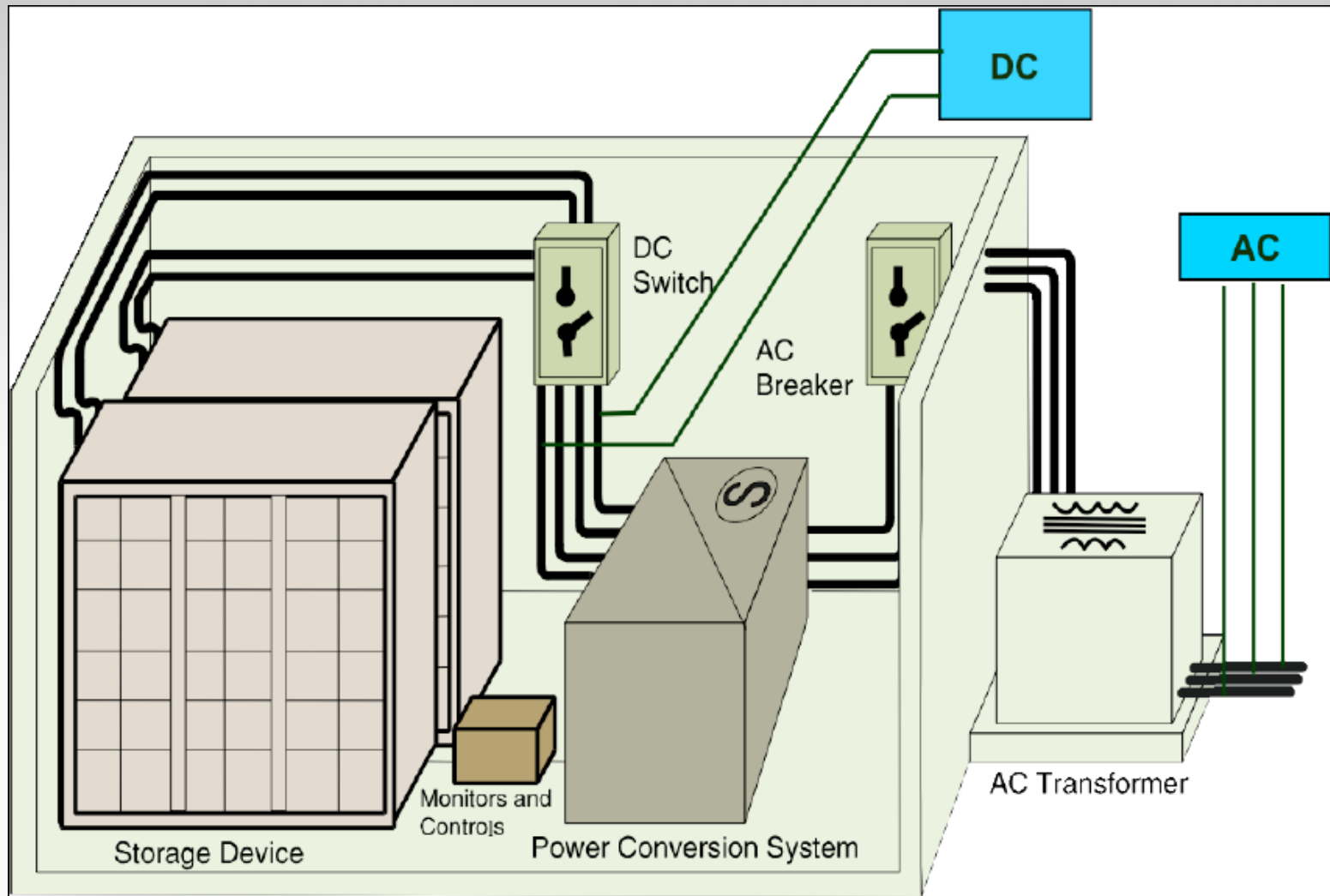


Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



6. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτροχημικά μέσα – συσσωρευτές:
 - Η κατηγορία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτροχημικά μέσα περιλαμβάνει τα συστήματα δευτερογενών συσσωρευτών (secondary batteries) καθώς και τη νέα τεχνολογία των μπαταριών ροής (flow batteries)
 - Παρόλο που το μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αυτή τη στιγμή το έχουν οι σταθμοί αντλησιοταμίευσης, η μείωση του κόστους των διάφορων τύπων μπαταριών και η τεχνολογική εξέλιξη φαίνεται ότι μπορεί να τους δώσει ένα αρκετά μεγάλο μερίδιο στο μέλλον

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



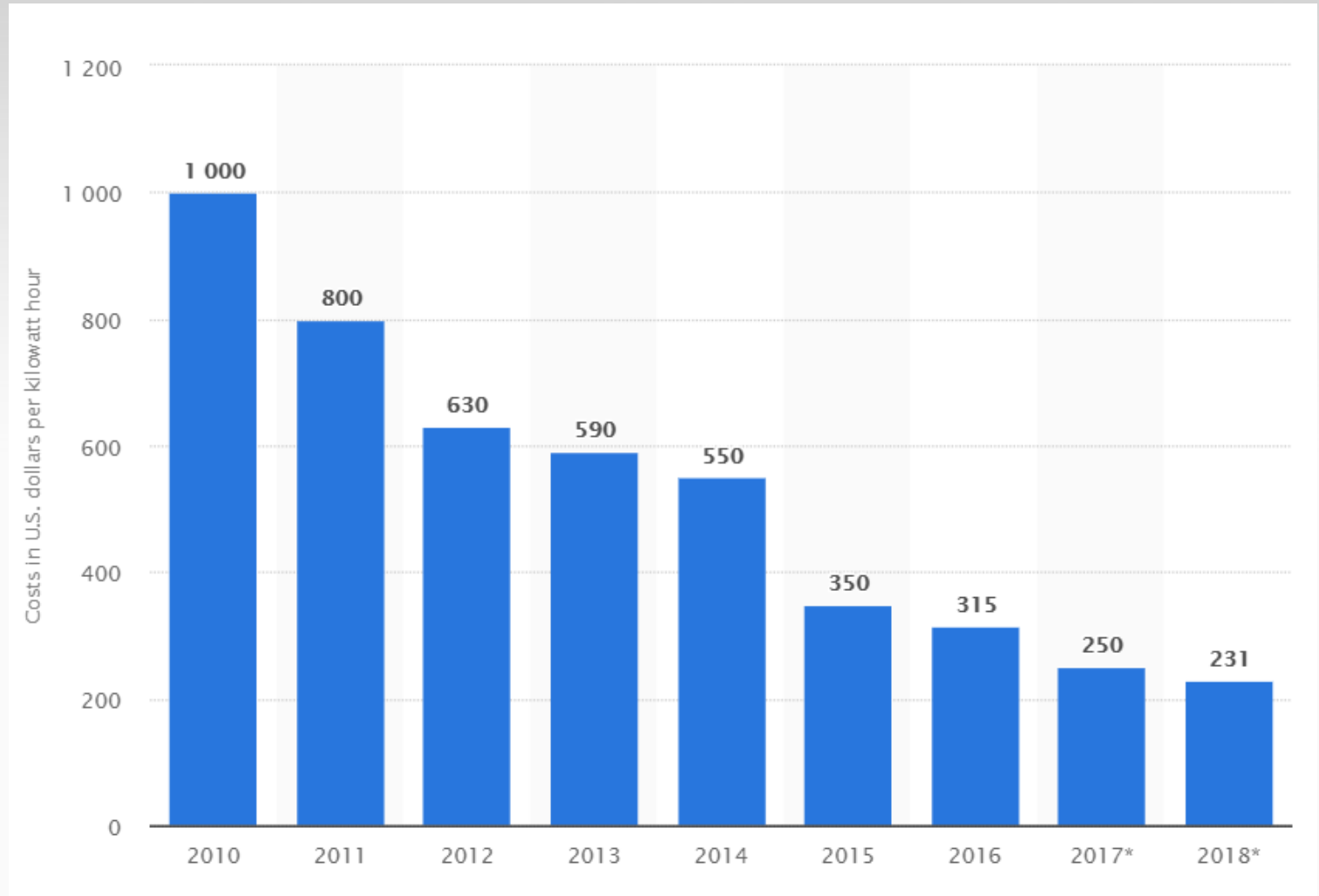
Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Οι μπαταρίες ιόντων – λιθίου είναι μία από τις πιο γρήγορα τεχνολογικά αναπτυσσόμενες κατηγορίες δευτερογενών συσσωρευτών και κατέχουν ένα πολύ μεγάλο μερίδιο στην αγορά συσσωρευτών
- Οι μπαταρίες ιόντων – λιθίου έχουν πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας
- Απαιτούν ιδιαίτερη συσκευασία και ειδικά συστήματα ασφαλείας και προστασίας από εκρήξεις, λόγω της χημικής σύστασής τους
- Πλεονεκτήματα:
 - ο χρόνος εκφόρτισης, που μπορεί να είναι από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικές εβδομάδες
 - η απόδοσή τους που φτάνει το 98%
 - ο πολύ μεγάλος αριθμός των κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Διακύμανση κόστους μπαταριών Li-ion σε \$/kWh



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Υποσταθμός 12 MW με μπαταρίες Li-ion στο Los Andes (Χιλή)



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



- Οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος (Lead – Acid) είναι η πιο φτηνή και πιο παλιά τεχνολογία μπαταριών
- Έχουν χρησιμοποιηθεί σαν συστήματα αποθήκευσης σε μικρής κλίμακας εφαρμογές
- Η διάρκεια ζωής των συγκεκριμένων μπαταριών κυμαίνεται από 6 – 15 χρόνια και έχουν περίπου 1500 κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης
- Το μεγαλύτερό τους πλεονέκτημα είναι το μικρό τους κόστος σε σχέση με τους άλλους τύπους συσσωρευτών
- Η μικρή πυκνότητα ενέργειας που έχουν είναι το σημαντικότερο μειονέκτημα (μεγάλος όγκος και βάρος)

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



- Οι μπαταρίες νικελίου – καδμίου παρόλο που δεν παρουσιάζουν κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα σε σχέση με κάποιον άλλο τύπο συσσωρευτών, έχουν επιβιώσει στην αγορά με επιτυχία
- Έχουν μέτρια πυκνότητα ενέργειας και μέτριο κόστος σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες
- Παράλληλα είναι ο μόνος τύπος μπαταριών που μπορεί και λειτουργεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες έως και $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι η παρουσία του καδμίου το οποίο είναι πολύ τοξικό στοιχείο
- Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής - η εγκατάσταση ενός συστήματος ισχύος 3 MW στο νησί Bonaire της Καραϊβικής, για τη σταθεροποίηση του αιολικού πάρκου του νησιού και την υποστήριξη του ηλεκτρικού του δικτύου

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Αντικατάσταση τους από μπαταρίες νικελίου – μετάλλου υδριδίου
- Οι μπαταρίες NiMH:
 - έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις μπαταρίες με κάδμιο
 - δεν απαιτούν κάποιου είδους συντήρηση
 - έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και περισσότερους κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης
 - μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και είναι περιβαλλοντικά φιλική
- Όμως έχουν πολύ χαμηλή ικανότητα εκφόρτισης με υψηλά ρεύματα και αυτό περιορίζει το πεδίο εφαρμογής τους σε μικρών απαιτήσεων εφαρμογές
- Το κόστος τους είναι περίπου ίδιο με το κόστος των συσσωρευτών ιόντων – λιθίου



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Οι μπαταρίες θείου – νατρίου (NaS) βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε ηλεκτρικά δίκτυα και συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- Πλεονεκτήματα:
 - μεγάλη διάρκεια ζωής με πολλούς κύκλους φόρτισης εκφόρτισης (περίπου 4500)
 - μεγάλη διάρκεια εκφόρτισής τους
 - γρήγορη απόκρισή τους σε μεταβατικά φαινόμενα και η μεγάλη απόδοσή τους που φτάνει το 90%
- Κύριο μειονέκτημά τους είναι η πού υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους που αγγίζει τους 350 οC
- Οι συγκεκριμένες μπαταρίες κατασκευάζονται μόνο από μία κατασκευάστρια εταιρεία στην Ιαπωνία και έχουν εγκατασταθεί σε πάνω από 300 ενεργειακές εγκαταστάσεις σε όλον τον κόσμο



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Υποσταθμός 34 MW με μπαταρίες NaS στην Ιαπωνία

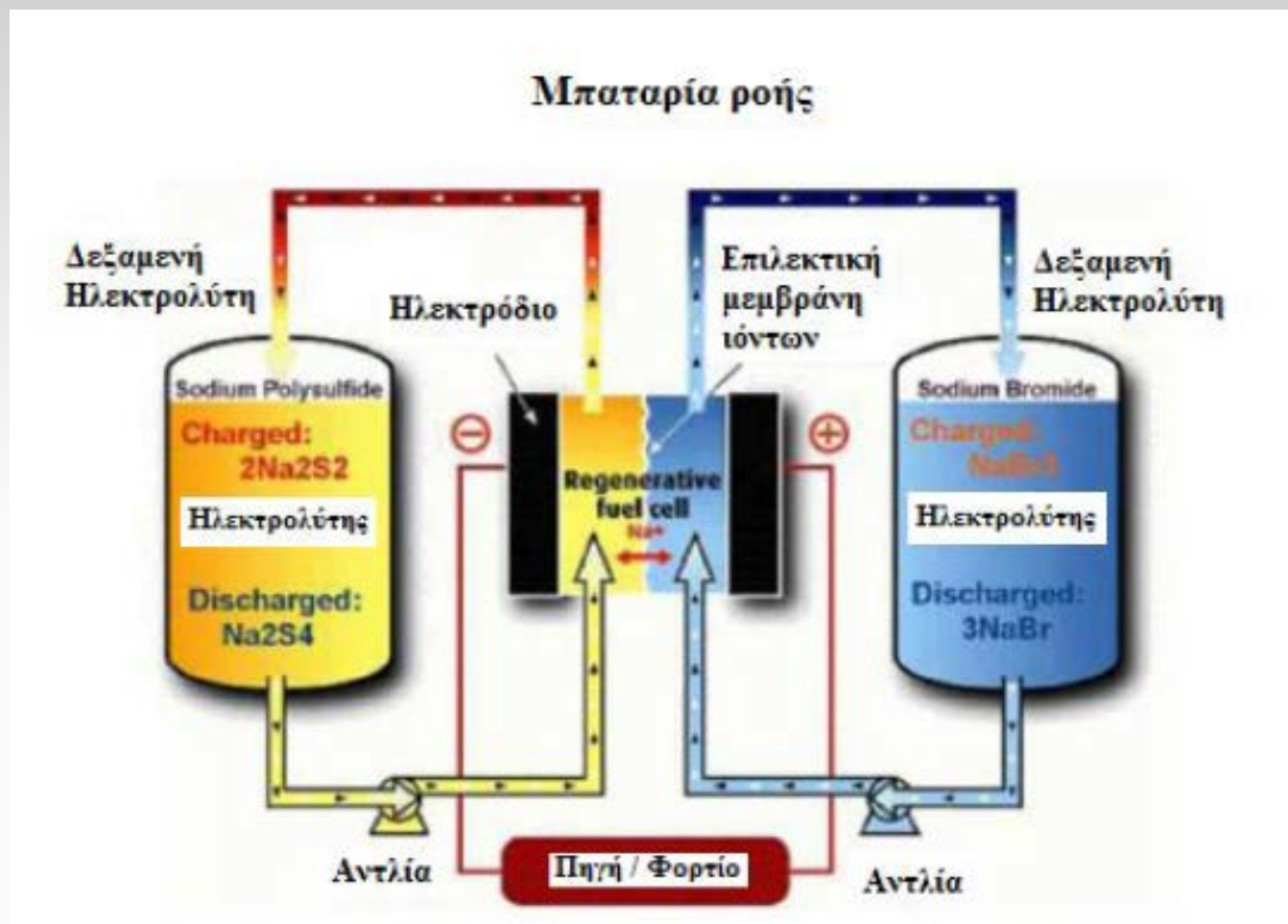


Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Οι μπαταρίες ροής είναι μπαταρίες που μπορούν να επαναφορτίζονται από δύο χημικά υλικά τα οποία είναι διαλυμένα σε υγρά συστατικά
- Το μεγαλύτερό τους πλεονέκτημα είναι ότι μπορούν να επαναφορτίζονται άμεσα με την αλλαγή του υγρού του ηλεκτρολύτη, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να συλλέγεται ο χρησιμοποιημένος ηλεκτρολύτης και να φορτίζεται ηλεκτρικά εκ νέου
- Η βασική τους διαφορά με τους δευτερογενείς συσσωρευτές είναι ότι η ενέργεια αποθηκεύεται στο υγρό του ηλεκτρολύτη, ενώ στις συμβατικές μπαταρίες αποθηκεύεται στα δύο ηλεκτρόδια
- Τα κύρια χημικά συστατικά, με τα οποία κατασκευάζονται οι μπαταρίες ροής, είναι βανάδιο (με οξειδοαναγωγή, Vanadium Redox), ψευδάργυρος με βρώμιο (Zinc Bromine) και βρωμιούχο πολυσουλφίδιο (PSB)



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

- Σημαντικό πλεονέκτημα των μπαταριών ροής είναι ότι μπορούν να εκφορτιστούν με μεγάλο ρεύμα για αρκετό χρόνο, της τάξεως των 10 ωρών
- Η χωρητικότητά τους και η δυνατή ισχύς τους είναι της τάξεως των μερικών MWh και MW αντίστοιχα
- Δεν υφίστανται εσωτερική εκφόρτωση όταν είναι σε κατάσταση αναμονής, όπως στις συμβατικές μπαταρίες, αφού τότε δε συμβαίνει καμία εσωτερική αντίδραση μεταξύ των χημικών συστατικών τους
- Το κόστος των μπαταριών ροής αναλόγως με τα χημικά συστατικά τους μπορεί να είναι μέτριο έως υψηλό σε σχέση με τις άλλες μπαταρίες
- Μειονεκτήματα: η τοξικότητα των χημικών συστατικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους και η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



7. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με ηλεκτρικά μέσα:

- Οι υπερπυκνωτές (supercapacitors) είναι η μοναδική αμιγώς ηλεκτρική μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας
- Είναι σαν τους κλασσικούς πυκνωτές με τη διαφορά ότι έχουν πολύ μεγαλύτερη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας και πολύ μεγαλύτερο χρόνο εκφόρτισης με μεγαλύτερη ισχύ
- Αυτό οφείλεται στο πορώδες μονωτικό υλικό του ηλεκτρολύτη που βρίσκεται ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια του υπερπυκνωτή
- Η πυκνότητα ενέργειας των υπερπυκνωτών είναι συνήθως μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη από αυτή των κλασσικών μπαταριών

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



- Μπορούν να φορτιστούν και να εκφορτιστούν με εξαιρετικά γρήγορους ρυθμούς
- Έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής
- Έχουν όμως πολύ μεγάλους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης, όταν βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής
- Κατά τη διάρκεια εκφόρτισής τους η τάση λειτουργίας του μειώνεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς
- Αναγκαστικά ο έλεγχος της λειτουργίας τους οδηγεί σε αυξημένο κόστος
- Έρευνες για χρήση γραφένιου ως υλικό κατασκευής των υπερπυκνωτών → θα αυξήσει την πυκνότητα ενέργειάς τους και θα μειώσει το κόστος τους

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης




- Χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μπαταρίες – πρώτοι καλύπτουν τις γρήγορες μεταβολές της ζήτησης ισχύος και οι μπαταρίες την απαίτηση για μεγαλύτερα ποσά ενέργειας
- Εφαρμογή βρίσκουν επίσης σε μεγάλα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά πάρκα - μπορούν να καλύψουν μικρά διαστήματα αυξομειώσεων της τάσης και να μετριάσουν την επίδραση του συγκεκριμένου φαινομένου στο ηλεκτρικό δίκτυο

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



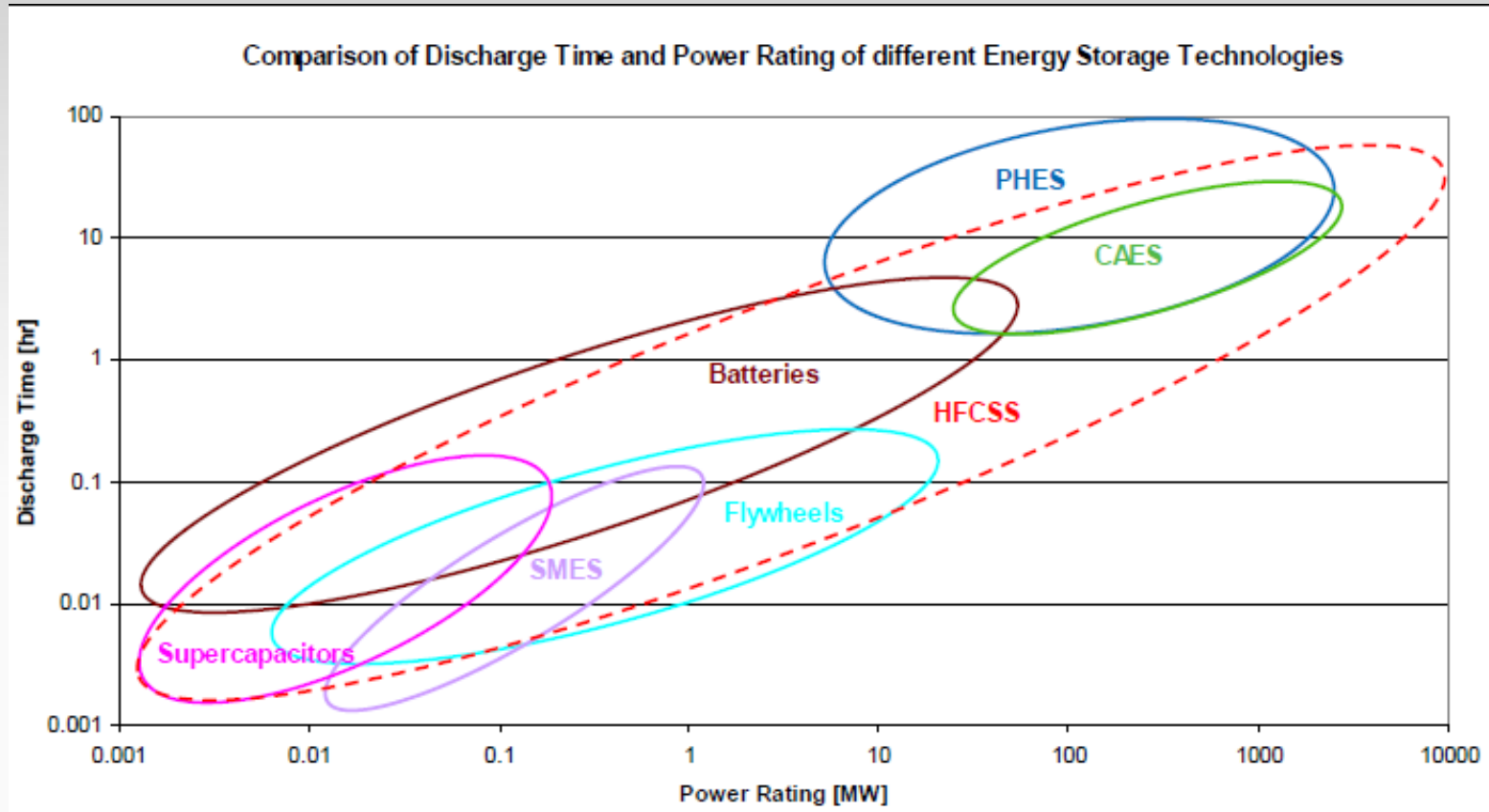
- Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή μαγνητικού πεδίου (Superconducting Magnetic Energy Storage)
- Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο με τη μορφή DC μαγνητικού πεδίου, το οποίο έχει μηδενικές απώλειες
- Ο βαθμός απόδοσης της αποθήκευσης ενέργειας σε αυτά τα συστήματα είναι πάρα πολύ υψηλός
- Η απόκριση τους είναι ταχύτατη, αλλά μπορεί να διαρκέσει πολύ μικρά χρονικά διαστήματα
- Έχουν πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος, αλλά πολύ μικρή πυκνότητα ενέργειας σε σχέση με άλλες μορφές αποθήκευσης, όπως είναι οι μπαταρίες

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



| Technology | Typical Capacity | Response time | Discharge time | Efficiency | Life time | Development stage | Application ¹² |
|--|------------------|---|----------------|------------|-------------|------------------------------|--|
| Pumped hydro energy storage (PHES) | 5 MW – 2 GW | 1 min (if standing still) 10 sec (if spinning) | 4 - 100 h | 55-85% | 50+ years | Mature | Primary ¹³ / secondary / tertiary control, energy arbitrage |
| Compressed air energy storage systems (CAES) | 25 MW – 2.5 GW | 15 min from cold start | 2 - 24 h | 40-70% | 15-40 years | Mature / premature (AA-CAES) | Tertiary control, energy arbitrage |
| Batteries | 1 kW – 50 MW | | 1 min – 3 h | 65-75% | 2-10 years | Premature / mature | Uninterruptible power supply, RES-E fluctuation reduction, primary / secondary control |
| Flywheels | 5 kW – 20 MW | | 4 sec - 15 min | 90-95% | ~20 years | Mature | Primary control, power quality |
| Hydrogen Fuel Cell Storage System (HFCSS) | 1 kW – 10 GW | Depends on fuel cell | 0.01 sec- days | 20-40% | 5-10 years | Prototype | RES-E fluctuation reduction, tertiary reserve |
| Super magnetic energy storage (SMES) | 10 kW – 1 MW | | 5 sec – 5 min | 95% | ~30 years | Premature | Uninterruptible power supply, power quality |
| Supercapacitors | < 150 kW | | 1 sec – 1 min | 85-95% | ~10 years | Premature | Uninterruptible power supply, power quality |

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

| Storage Technique | Output | Power [MW] | Capacity [MWh] | Storage Period [time] | Specific Energy [kWh/ton] | Energy Density [kWh/m ³] | Efficiency [%] | Lifetime [#cycles] | Power Cost [\$/kW] | Energy Cost [\$/kWh] | Maturity |
|-------------------------------|-------------|---------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------------|---|-------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|
| Lithium-ion batteries | Electricity | 0.001-0.1 | 0.25-25 | Day-month | 75-200 | 300 | 85-100 | 1000-4500 | 175-4000 | 500-2500 | Commercialized |
| Sodium-sulfur batteries | Electricity | 1-50 | ≤300 | Day | 150 | 150-250 | 75-90 | 2500 | 1000-3000 | 300-500 | Commercialized |
| Lead-acid batteries | Electricity | 0-40 | 0.25-50 | Day-month | 20 | 70 | 70-90 | 500-1000 | 300-600 | 200-400 | Mature |
| Redox-Flow batteries | Electricity | 0.03-7 | <10 | Day-month | 10-30 | 25-35 | 75-85 | 12000 | 600-1500 | 150-1000 | Demo/early commercialized |
| Compressed-air energy storage | Electricity | 5-300 | ≤250 | Day | 30-60 | 2-6 at 70-200bar | 60-79 | 8000-12000 | 1250 | 50-100 | Demo/early commercialized |
| Pumped Hydro Energy Storage | Electricity | <3100 | Small: ≤5000 Large: ≤140000 | Day-month | 0.28 at 100m | 0.28 at 100m | 65-82% | 10000-30000 | 600-2000 | 80-200 | Mature |
| Hydrogen | Electricity | Varies | Varies | Hours-months | 33330 | 2.7-160 at 1-700bar | 20-50 | | | 6-20 | Developing/demo |
| Methane | Electricity | Varies | Varies | | 10000 | 360-1200 at 200bar | 28-45 | | | | Developing |

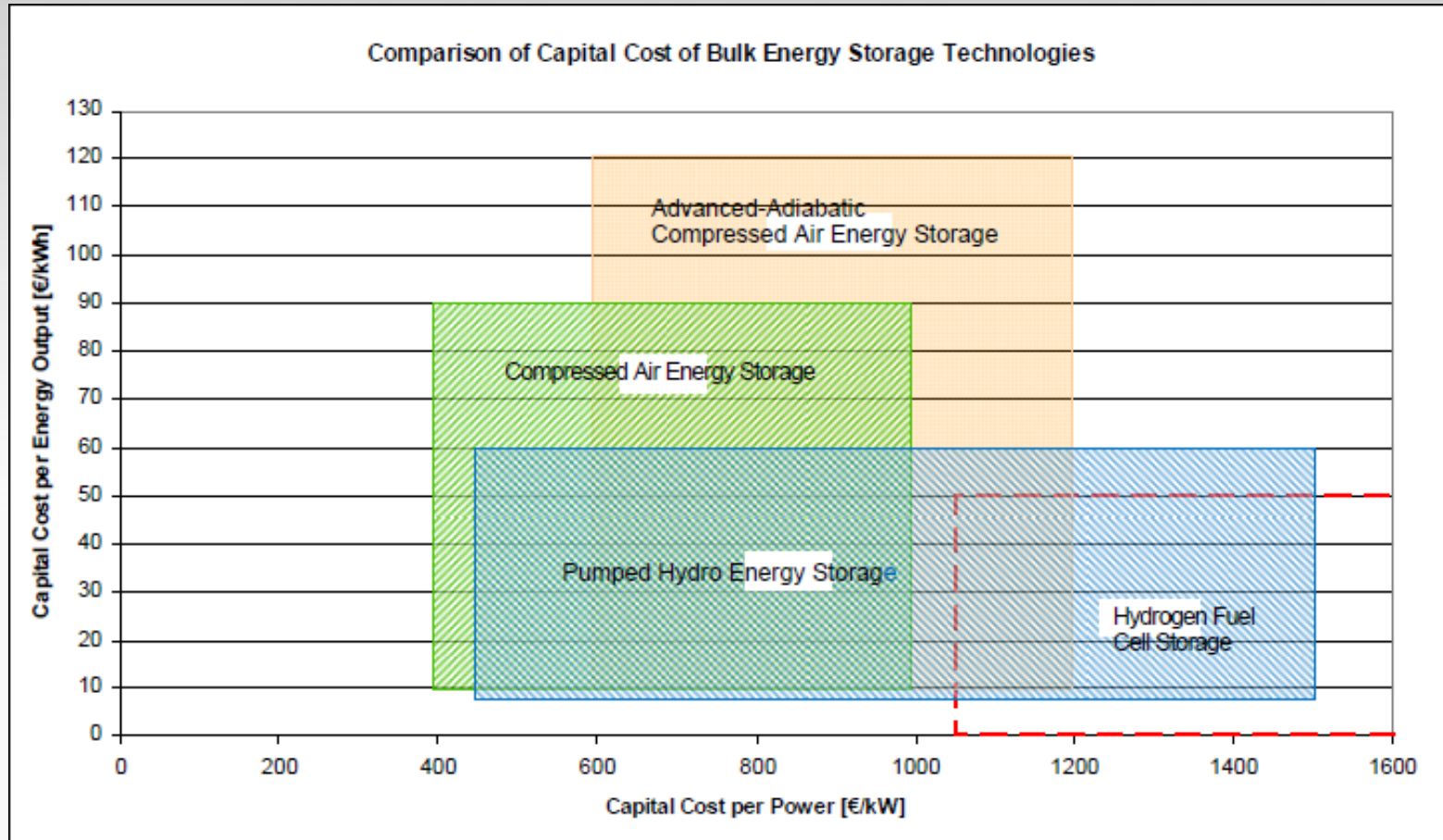


Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

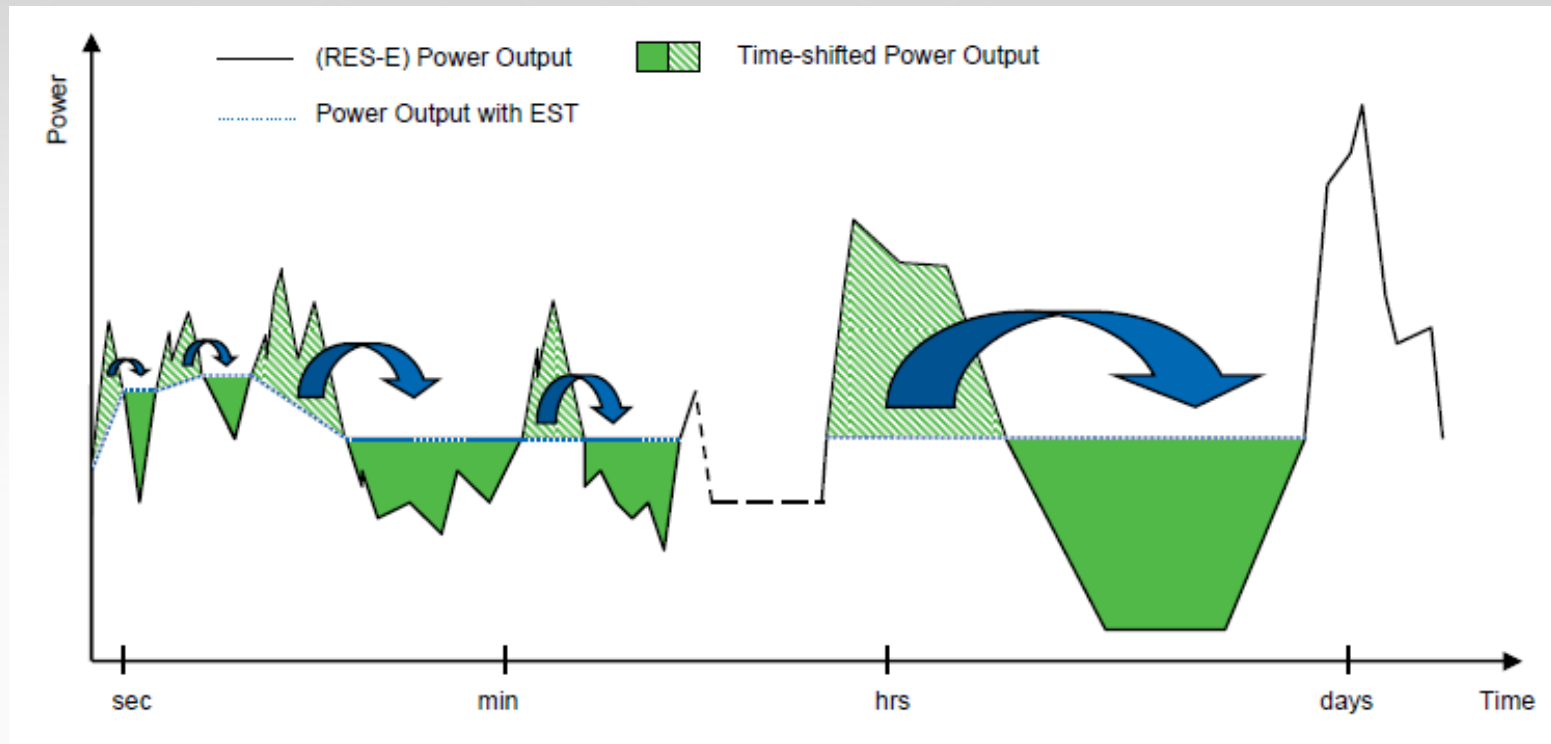
| Technology | Typical Capacity | Response time | Discharge time | Efficiency | Life time | Development stage | Application ¹² |
|---|------------------|---|----------------|------------|-------------|------------------------------|--|
| Pumped hydro energy storage (PHES) | 5 MW – 2 GW | 1 min (if standing still) 10 sec (if spinning) | 4 - 100 h | 55-85% | 50+ years | Mature | Primary ¹³ / secondary / tertiary control, energy arbitrage |
| Compressed air energy systems (CAES) | 25 MW – 2.5 GW | 15 min from cold start | 2 - 24 h | 40-70% | 15-40 years | Mature / premature (AA-CAES) | Tertiary control, energy arbitrage |
| Batteries | 1 kW – 50 MW | | 1 min – 3 h | 65-75% | 2-10 years | Premature / mature | Uninterruptible power supply, RES-E fluctuation reduction, primary / secondary control |
| Flywheels | 5 kW – 20 MW | | 4 sec - 15 min | 90-95% | ~20 years | Mature | Primary control, power quality |
| Hydrogen Fuel Cell Storage System (HFCSS) | 1 kW – 10 GW | Depends on fuel cell | 0.01 sec-days | 20-40% | 5-10 years | Prototype | RES-E fluctuation reduction, tertiary reserve |
| Super magnetic energy storage (SMES) | 10 kW – 1 MW | | 5 sec – 5 min | 95% | ~30 years | Premature | Uninterruptible power supply, power quality |
| Supercapacitors | < 150 kW | | 1 sec – 1 min | 85-95% | ~10 years | Premature | Uninterruptible power supply, power quality |



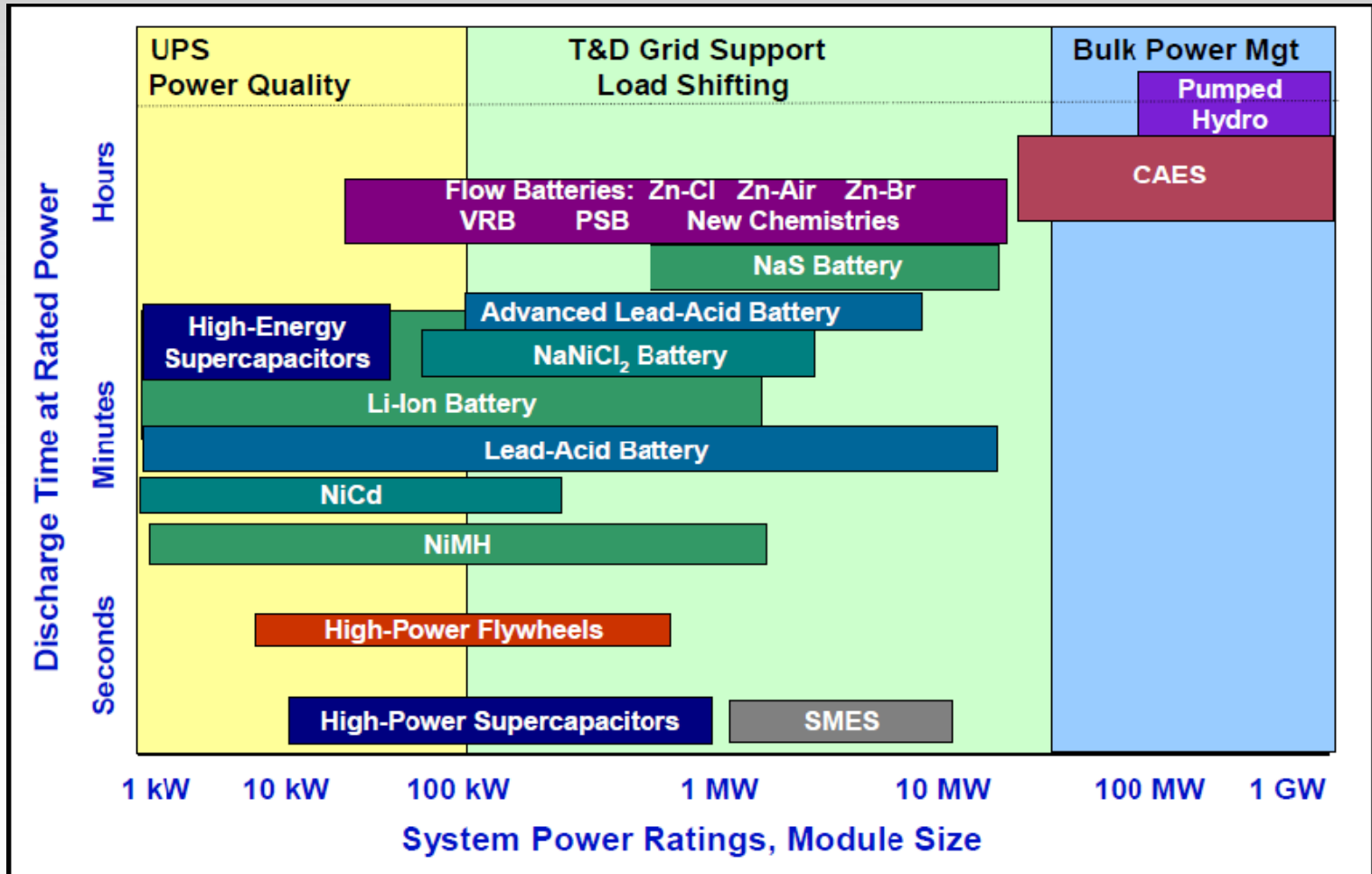
Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης

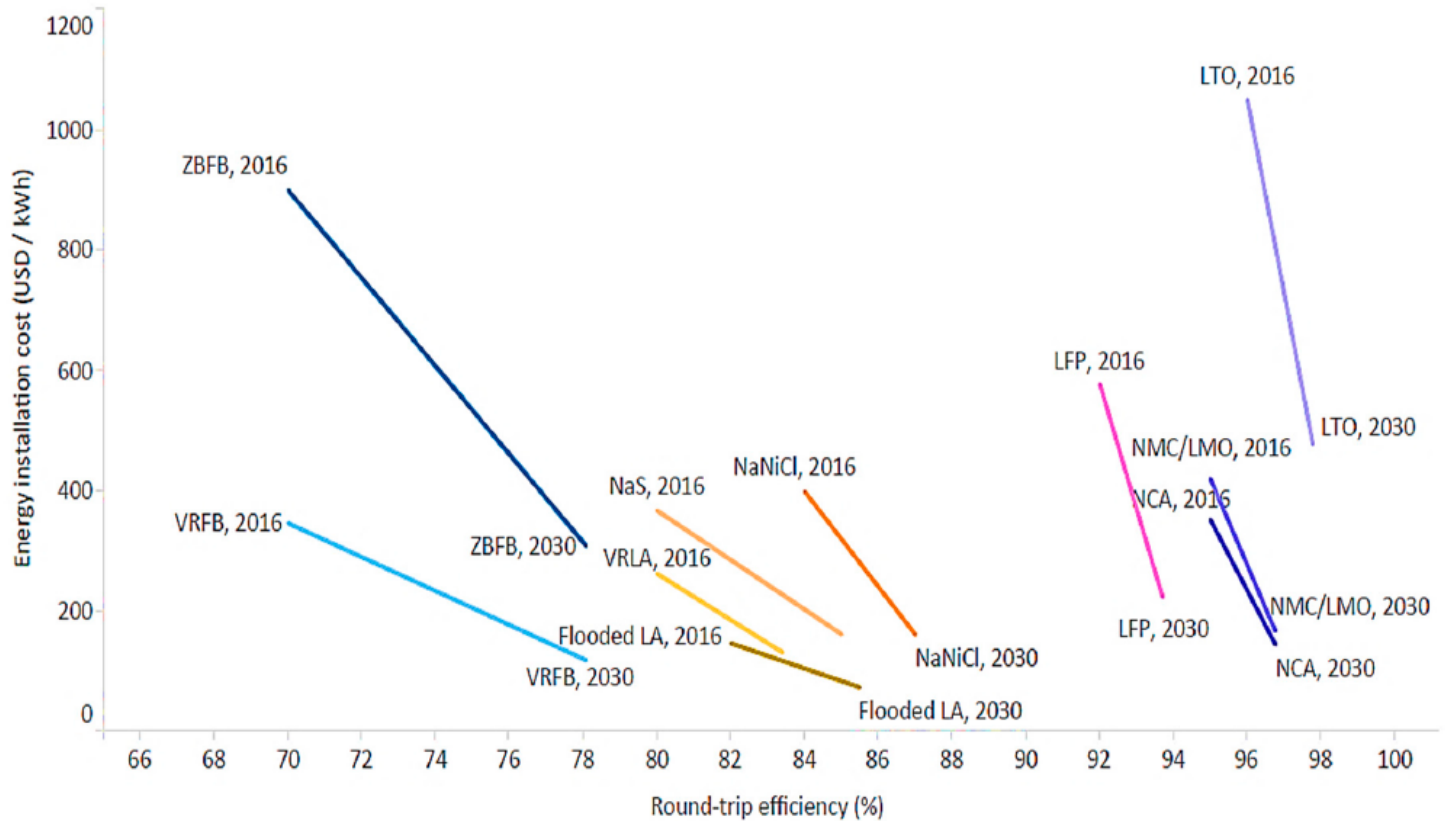
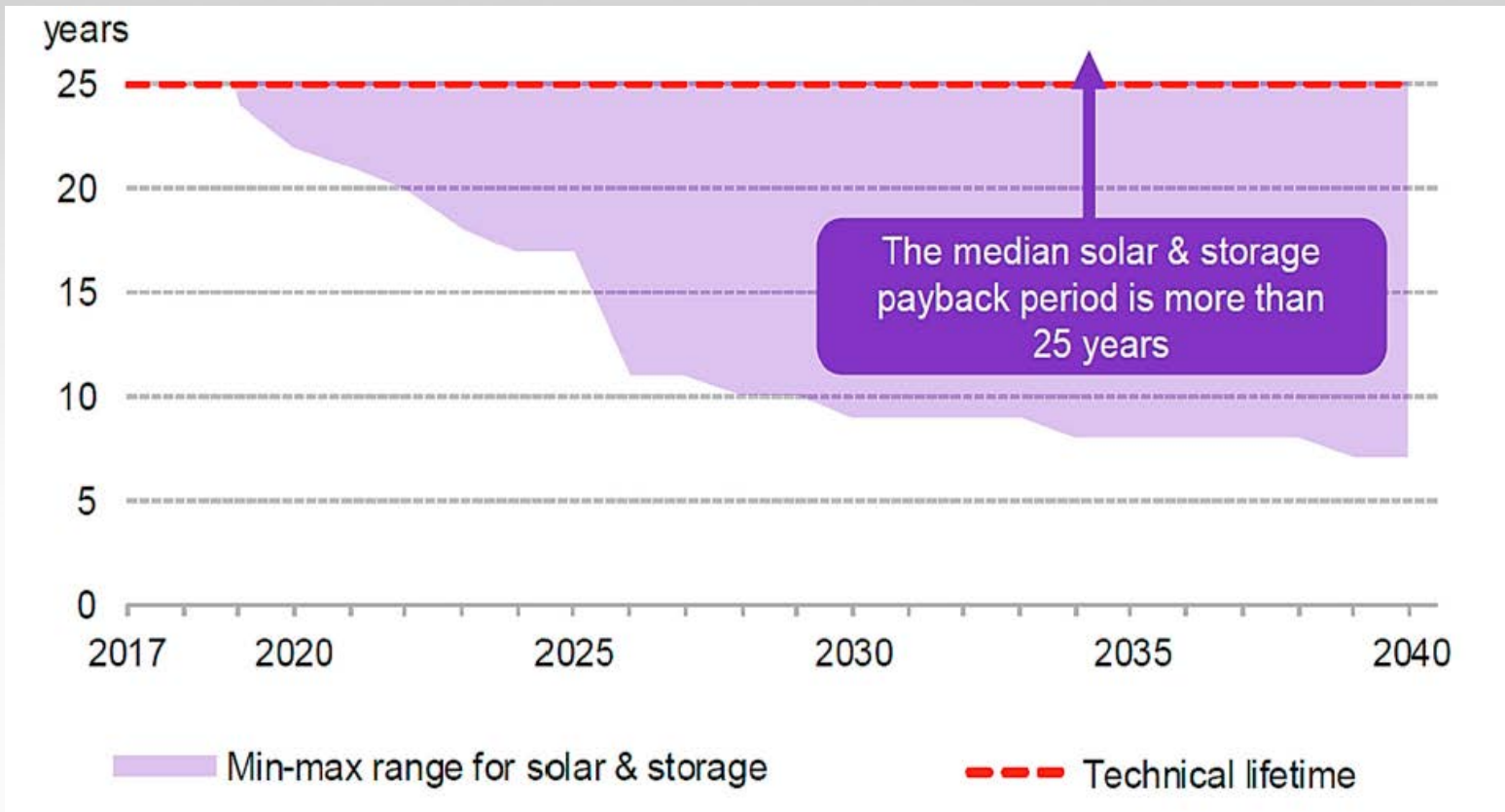
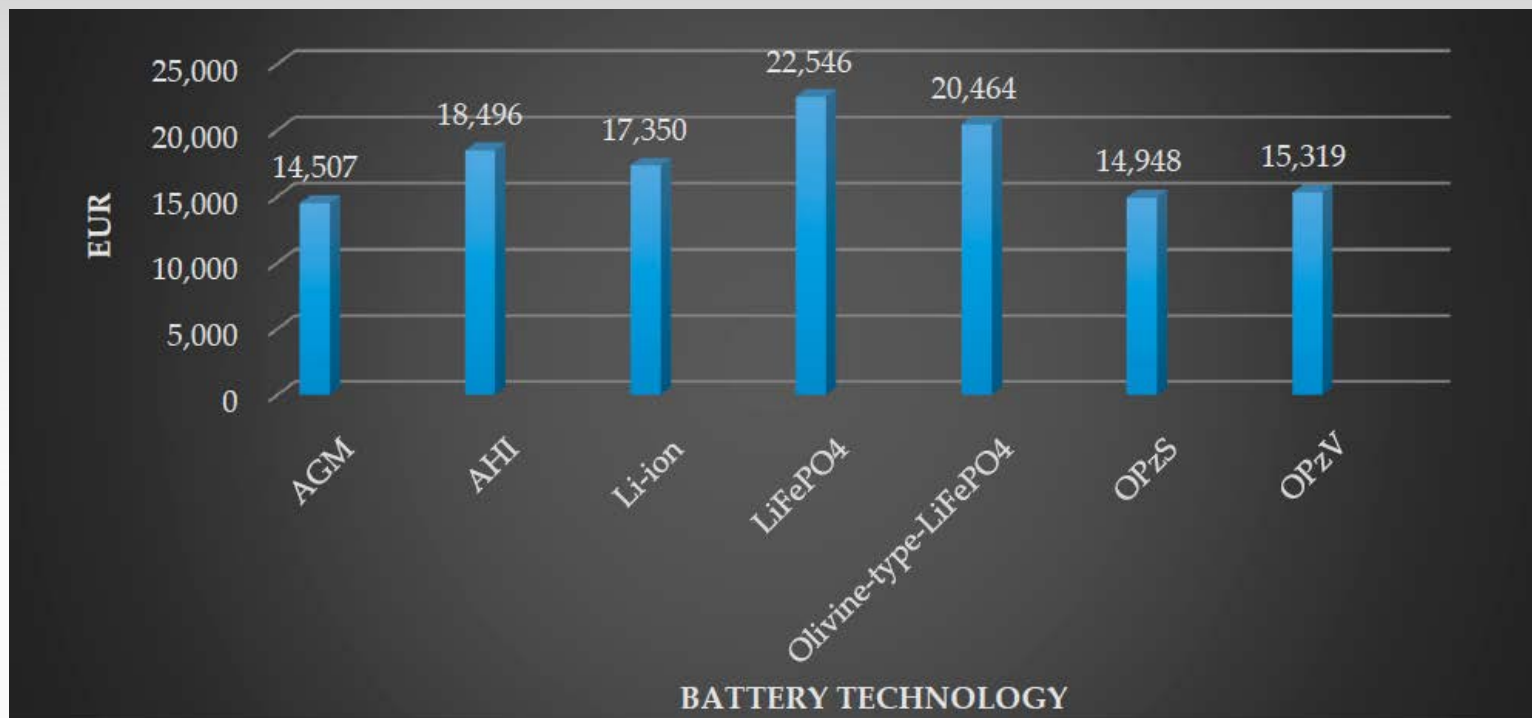


Figure 2. Energy round-trip efficiencies and installation costs of electrochemical technologies, 2016–2030 [27]. Abbreviations: LA = lead-acid; VRLA = valve-regulated lead-acid; NaS = sodium sulphur; NaNiCl = sodium nickel chloride; VRFB = vanadium redox flow battery; ZBFB = zinc bromine flow battery; NCA = nickel cobalt aluminium; NMC/LMO = nickel manganese cobalt oxide/lithium manganese oxide; LFP = lithium iron phosphate; LTO = lithium titanate.

Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Συστήματα και Τεχνολογίες Αποθήκευσης



Total average investment costs for a complete flexible storage PV system by battery technology.