



Κόντης Ελευθέριος

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών

kontislefteris@gmail.com

Δικτυακοί τόποι μαθήματος:

ΠΕ: <https://eclass.uowm.gr/courses/HMMY112/>

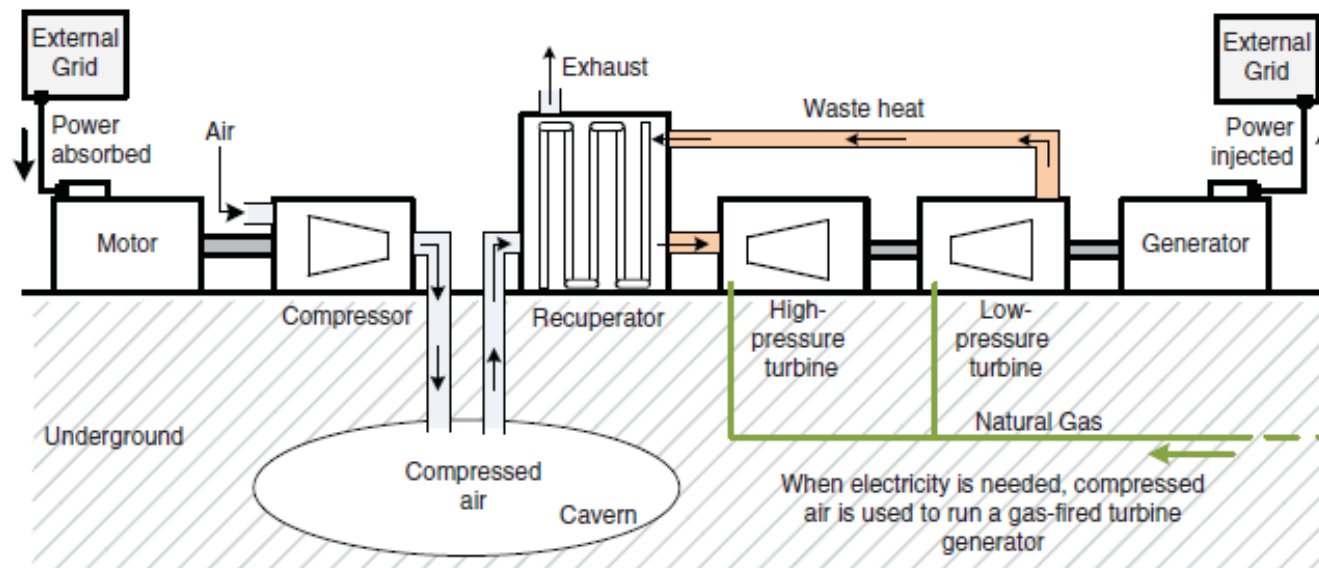
ΤΕ: <https://eclass.teiwm.gr/courses/EE193/>



- ✓ Στα Συστήματα Αποθήκευσης Συμπιεσμένου Αέρα (Compressed Air Energy Storage Systems – CAES) η ενέργεια αποθηκεύεται μέσω της συμπίεσης αέρα
- ✓ Τα CAES μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:
 - Συμβατικά πρώτης γενιάς
 - Συμβατικά δεύτερης γενιάς
 - Αδιαβατικά (advanced adiabatic CAES)
- ✓ 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



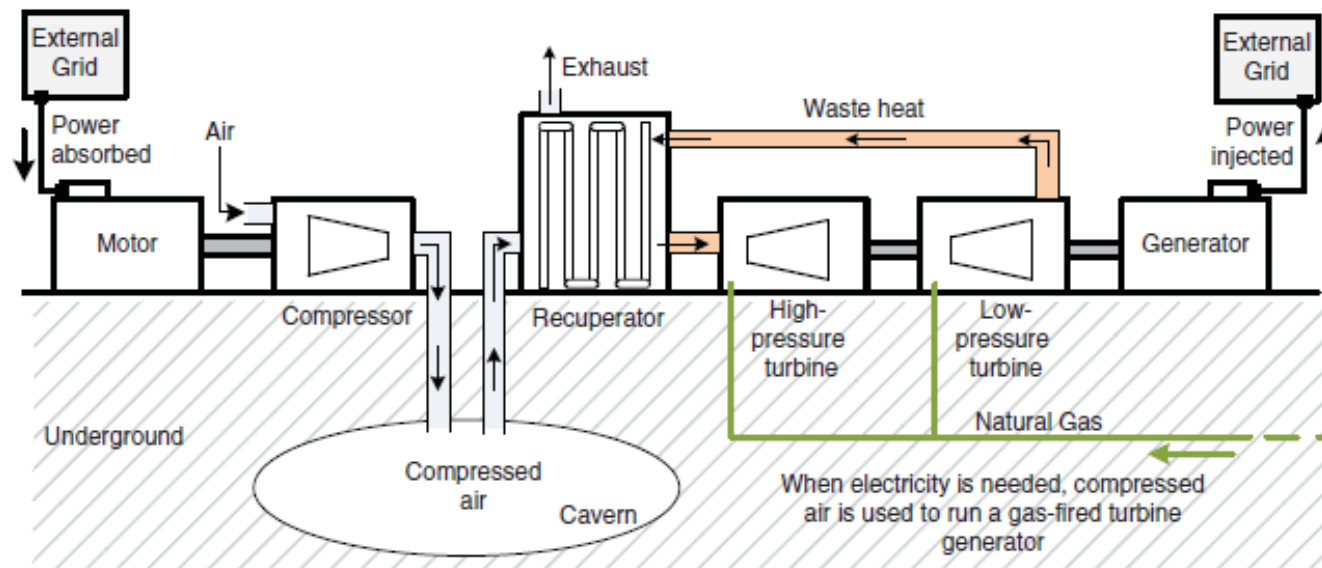
- ✓ Το σύστημά χρησιμοποιεί σαν πηγή ενέργειας την περίσσεια ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ
- ✓ Αποτελείται από:
 - ✓ Σύστημα κινητήρων
 - ✓ Σύστημα συμπιεστών
 - ✓ Αποθηκευτικό χώρο
 - ✓ Αναθερμαντές
 - ✓ Στρόβιλο
 - ✓ Γεννήτρια



Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



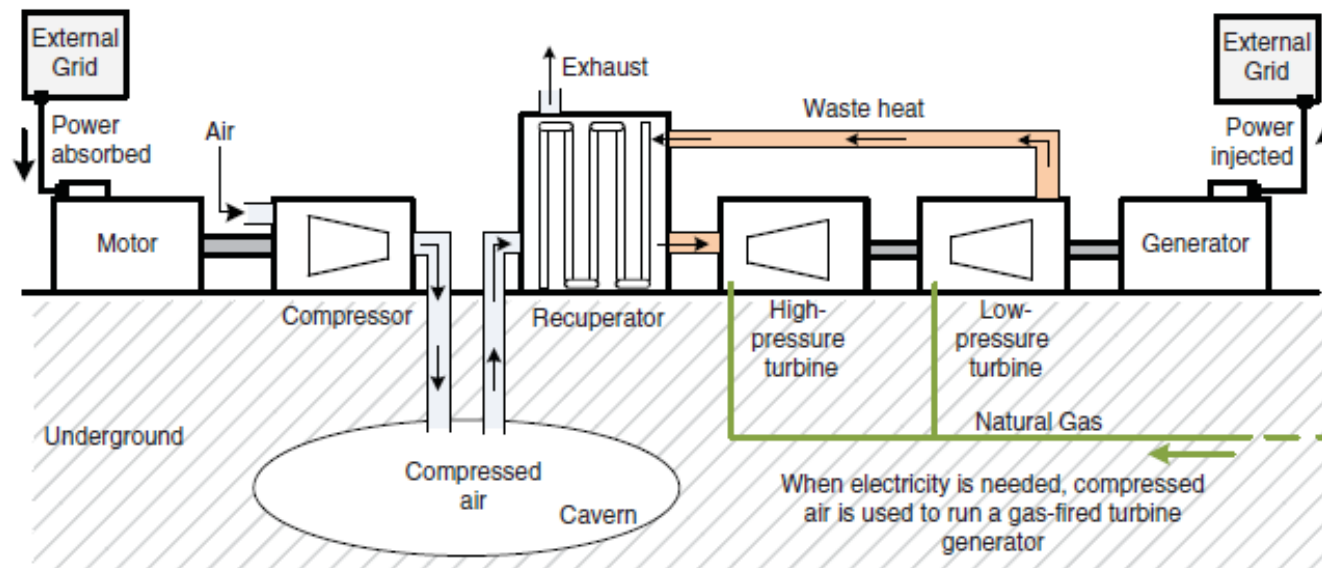
- ✓ Ο ρόλος του κινητήρα είναι να χρησιμοποιεί την περίσσεια ενέργεια των μονάδων ΑΠΕ, έτσι ώστε να κινεί τον συμπιεστή
- ✓ Στη συνέχεια, ο συμπιεστής συμπιέζει τον διερχόμενο αέρα ώστε να αποθηκευτεί με υψηλή πίεση
- ✓ Να σημειωθεί πως από την αποδιδόμενη ισχύ των μονάδων ΑΠΕ θα υφίστανται απώλειες, λόγω του βαθμού απόδοσης του κινητήρα



Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



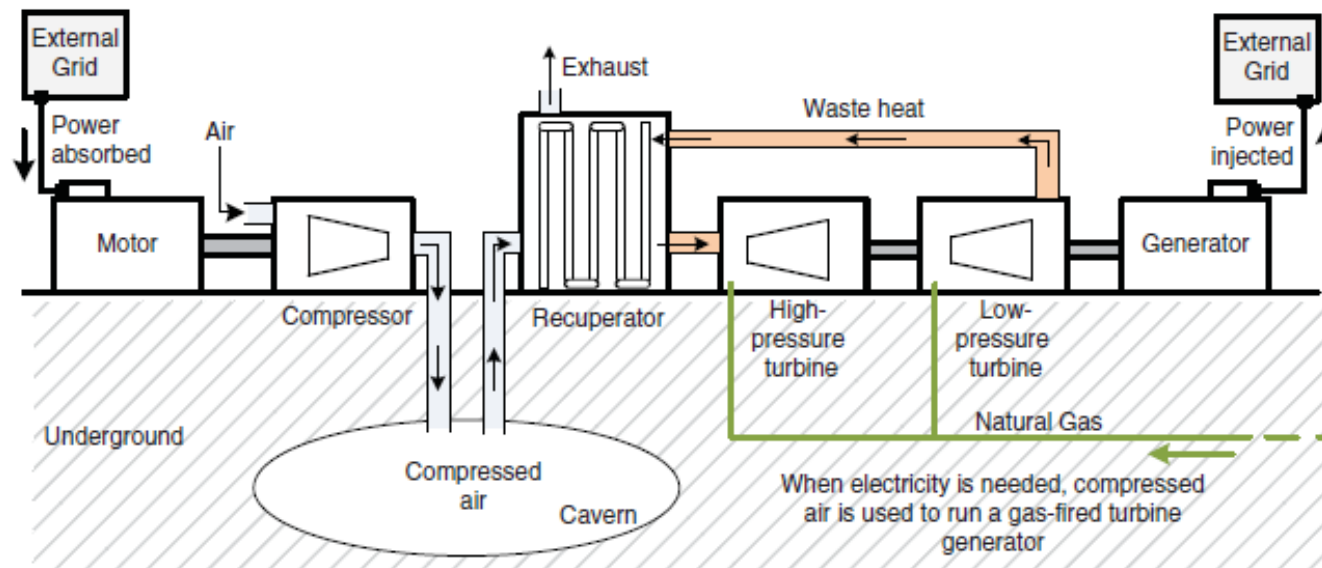
- ✓ Ο αποθηκευτικός χώρος είναι απαραίτητος για την αποθήκευση του συμπιεσμένου αέρα, έτσι ώστε αυτός να αποθηκευτεί χωρίς να χάσει την υψηλή του πίεση, και να χρησιμοποιηθεί την κατάλληλη στιγμή, όταν το δίκτυο έχει ανάγκη παραγωγής ενέργειας
- ✓ Ως αποθηκευτικός χώρος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια φυσική κοιλότητα του εδάφους
- ✓ Σε μια τέτοια περίπτωση απαιτείται γεωλογική έρευνα για να βρεθεί ο κατάλληλος αποθηκευτικός χώρος (γενικά υπάρχουν περιορισμένες πιθανές τοποθεσίες ανά τον κόσμο)
- ✓ Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ειδική δεξαμενή για την αποθήκευση του πεπιεσμένου, αυξάνοντας, όμως, σημαντικά το κόστος κεφαλαίου της εγκατάστασης



Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



- ✓ Ο αναθερμαντήρας ή αναγεννητής, εκμεταλλεύεται την απορριπτόμενη θερμότητα των καυσαερίων της εγκατάστασης, για να προθερμάνει τον πεπιεσμένο αέρα, πριν την είσοδο του στο θάλαμο καύσης
- ✓ Σαν καύσιμο η εγκατάσταση χρησιμοποιεί φυσικό αέριο, το οποίο αναμειγνύεται με τον υπέρθερμο αέρα στον θάλαμο καύσης
- ✓ Στο θάλαμο καύσης πραγματοποιείται η καύση του μείγματος πεπιεσμένου αέρα και φυσικού αερίου. Από την καύση δημιουργούνται καυσαέρια υψηλής πίεσης και θερμοκασίας τα οποία παροχετεύονται στον αεριοστρόβιλο
- ✓ Ο αεριοστρόβιλος κινείται από τα καυσαέρια και παράλληλα κινεί τη γεννήτρια η οποία είναι συμπλεγμένη μαζί του. Η γεννήτρια μετατρέπει την κινητική σε ηλεκτρική ενέργεια



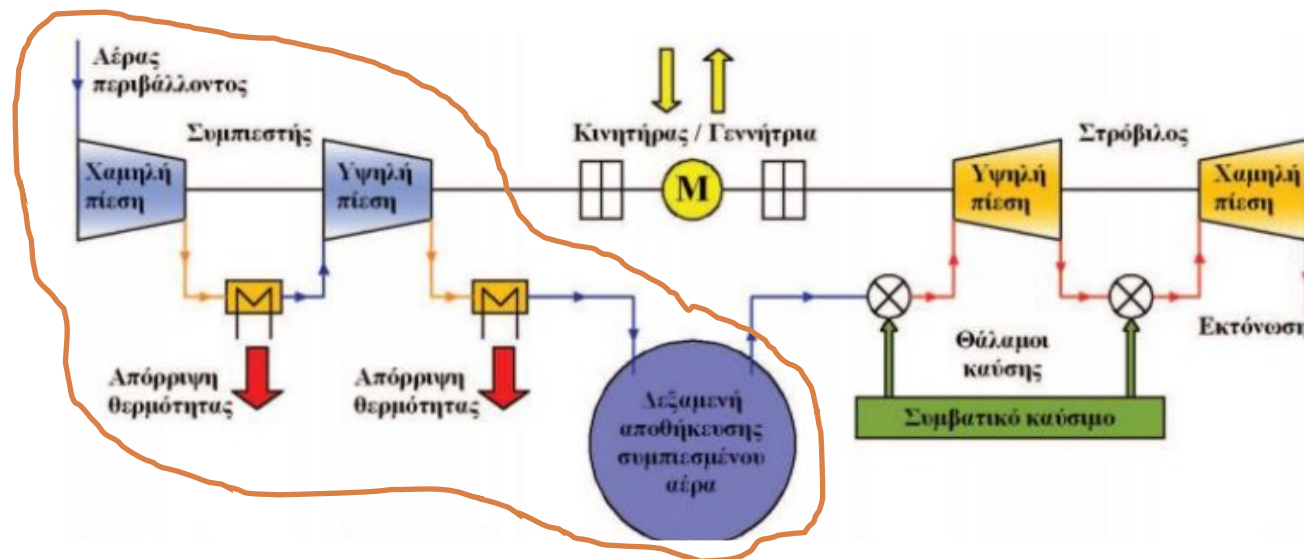
Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



Συστήματα Πεπιεσμένου Αέρα Πρώτης Γενιάς



- ✓ Στην περίπτωση περίσσειας ενέργειας από τις μονάδες ΑΠΕ, αυτή διατίθεται σε ένα συμπιεστή (μοναβάθμιο ή διβάθμιο). Το εργαζόμενο μέσο είναι αέρας περιβάλλοντος, ο οποίος, συμπιέζεται τελικά σε πίεση της τάξης των 30 – 70 bar. Ο συμπιεσμένος αέρας, μετά την έξοδό του από το συμπιεστή, ψύχεται ξανά, με σκοπό τη διατήρηση της θερμοκρασίας του κοντά στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η διατήρηση της θερμοκρασίας του αέρα σε χαμηλές τιμές αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της πυκνότητάς του, συνεπώς και του όγκου του, και στην τελική αποθήκευση κατά το δυνατόν μεγαλύτερης μάζας αέρα στο διαθέσιμο όγκο του χώρου αποθήκευσης. Κατά το τελικό στάδιο αποθήκευσης, ο κρύος και συμπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε μία υπόγεια δεξαμενή



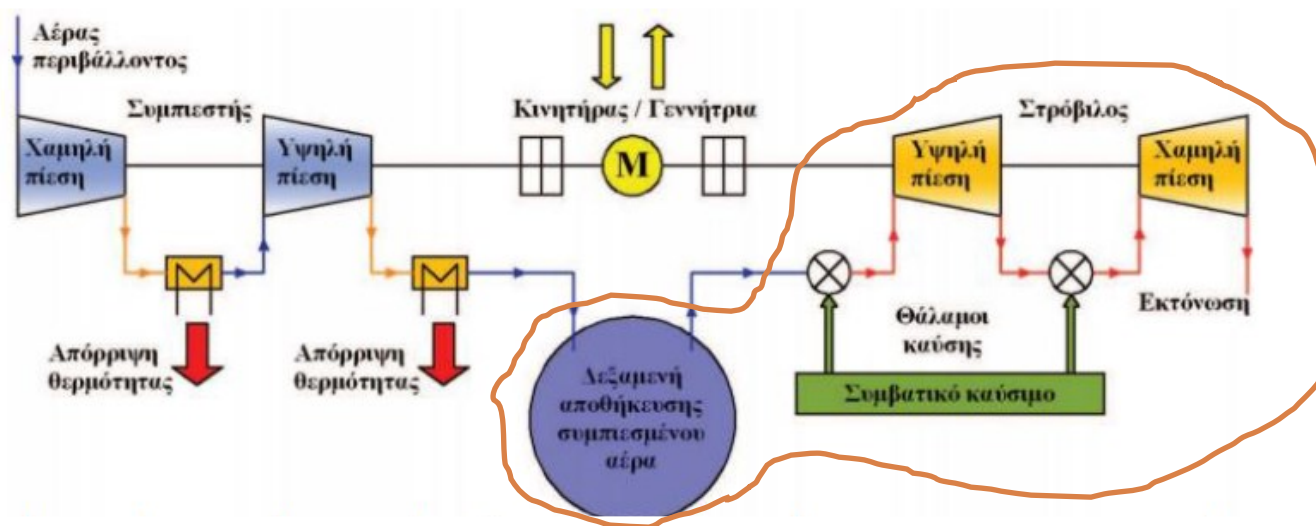
Πηγή: Α. Πολυζάκης, "Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη", Εκδόσεις Πολυζάκης Απόστολος ΣΙΑ ΕΕ, 2020.



Συστήματα Πεπιεσμένου Αέρα Πρώτης Γενιάς



- ✓ Στην περίπτωση που απαιτείται η μονάδα αποθήκευσης να συμπληρώσει την παραγωγή ισχύος για την κάλυψη της ζήτησης, συμπιεσμένος αέρας συγκεκριμένης παροχής, η οποία, προφανώς, εξαρτάται από την απαιτούμενη παραγωγή ισχύος, ελευθερώνεται από τη δεξαμενή αποθήκευσης, θερμαίνεται σε ένα καυστήρα με σκοπό την αύξηση της ειδικής ενθαλπίας του και οδηγείται προς εκτόνωση σε ένα διβάθμιο στρόβιλο, με ενδιάμεση αναθέρμανση του εργαζόμενου μέσου ανάμεσα στις δύο βαθμίδες του. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το φυσικό αέριο



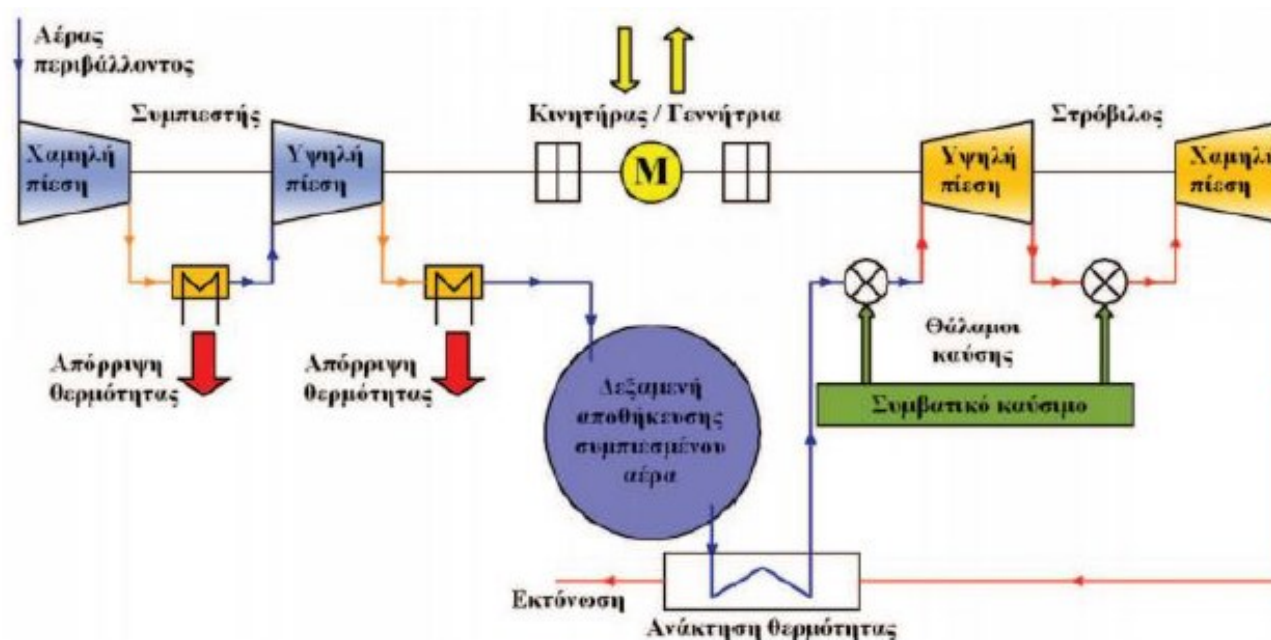
Πηγή: Α. Πολυζάκης, "Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη", Εκδόσεις Πολυζάκης Απόστολος ΣΙΑ ΕΕ, 2020.



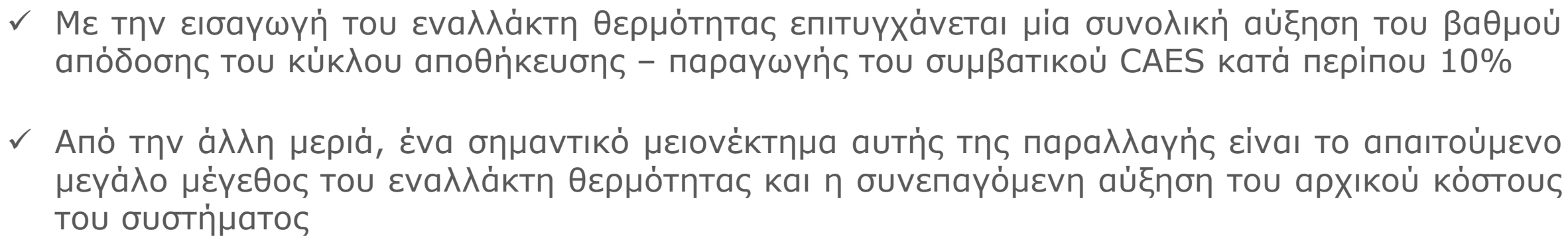
Συστήματα Πεπιεσμένου Αέρα Δεύτερης Γενιάς



- ✓ Σκοπός → εξοικονόμηση του καυσίμου που καταναλώνεται για την αναθέρμανση του εργαζόμενου μέσου πριν την εκτόνωσή του. Σύμφωνα με την παραλλαγή αυτή ο συμπιεσμένος αέρας, μετά την έξοδό του από τη δεξαμενή αποθήκευσης και πριν την εισαγωγή του στο στρόβιλο, προθερμαίνεται σε ένα εναλλάκτη θερμότητας, στον οποίο ανακτάται θερμότητα από τον αέρα που εξέρχεται από τη δεύτερη βαθμίδα του στροβίλου, μετά την εκτόνωσή του



Πηγή: Α. Πολυζάκης, "Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη", Εκδόσεις Πολυζάκης Απόστολος ΣΙΑ ΕΕ, 2020.

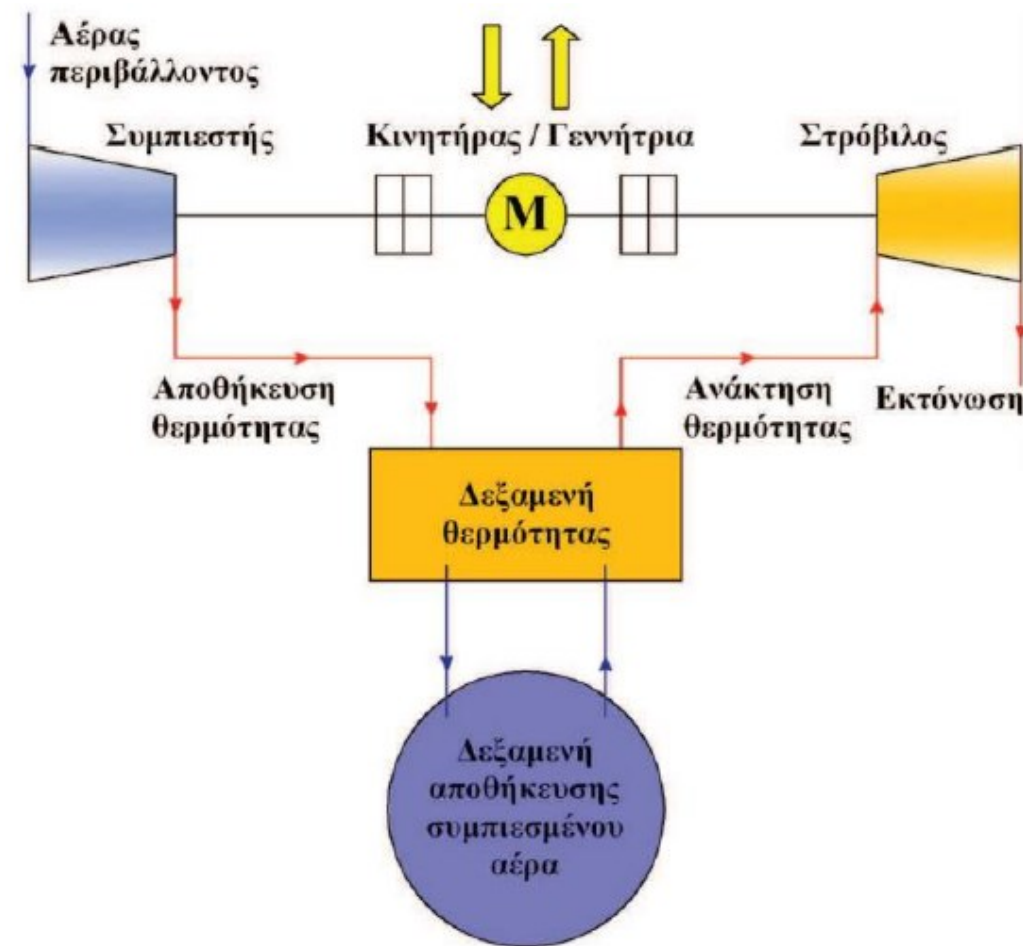




Αδιαβατικά Συστήματα Πεπιεσμένου Αέρα



- ✓ Σε ένα αδιαβατικό σταθμό αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (AA-CAES), η αφαιρούμενη θερμότητα από τον αέρα κατά τη συμπίεσή του, αντί να απορρίπτεται στο περιβάλλον, αποθηκεύεται σε μία ανεξάρτητη δεξαμενή αποθήκευσης θερμότητας
- ✓ Η αλλαγή αυτή στη βασική δομή λειτουργίας αποτελεί τη βασική διαφορά ανάμεσα στα συμβατικά και στα αδιαβατικά CAES
- ✓ Γίνεται αντιληπτό ότι με τα AA-CAES εκμηδενίζεται η κατανάλωση συμβατικών καυσίμων για την αναθέρμανση του αέρα πριν την εκτόνωσή του στις βαθμίδες του στρόβιλου



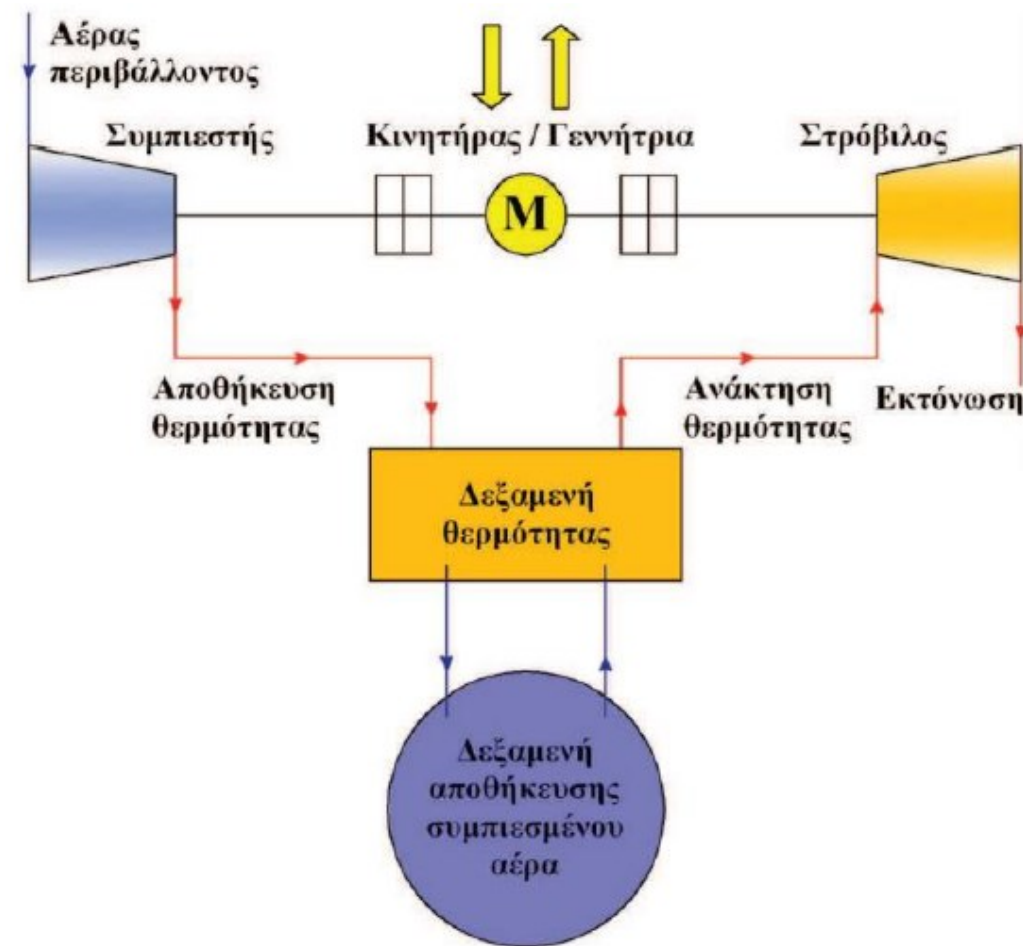
Πηγή: Α. Πολυζάκης, "Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη", Εκδόσεις Πολυζάκης Απόστολος ΣΙΑ ΕΕ, 2020.



Αδιαβατικά Συστήματα Πεπιεσμένου Αέρα



- ✓ Το σημαντικό αυτό όφελος αποτελεί το βασικό λόγο ανάπτυξης των AA-CAES
- ✓ Με τα αδιαβατικά CAES, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του κύκλου αποθήκευσης – παραγωγής μπορεί να ανέλθει σε τιμές της τάξης του 70%, προσεγγίζοντας έτσι τις αντίστοιχες τιμές της απόδοσης που επιτυγχάνεται σε ένα αναστρέψιμο υδροηλεκτρικό εργοστάσιο
- ✓ Επιπλέον, πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η σημαντική μείωση των αέριων ρύπων του συστήματος, καθώς περιορίζεται σημαντικά η κατανάλωση συμβατικών καυσίμων



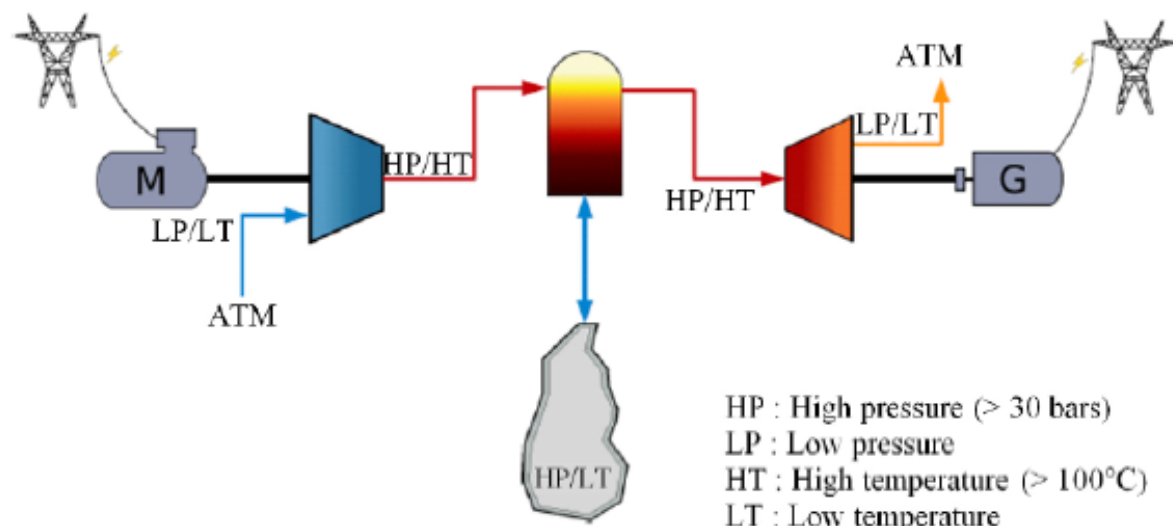
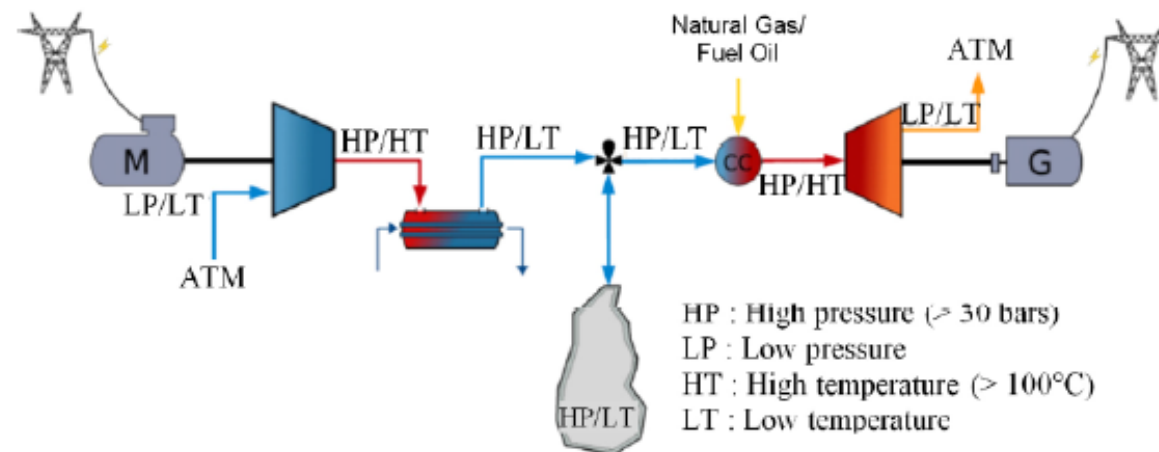
Πηγή: Α. Πολυζάκης, "Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη", Εκδόσεις Πολυζάκης Απόστολος ΣΙΑ ΕΕ, 2020.



Σύγκριση Συμβατικών & Αδιαβατικών CAES



- ✓ Στο δεξιό σχήμα απεικονίζεται ένα συμβατικό μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα
- ✓ Οι τυπικές αποδόσεις αυτών των συστημάτων κυμαίνονται από 48 % - 55%



- ✓ Στο αριστερό σχήμα απεικονίζεται ένα αδιαβατικό μονοβάθμιο σύστημα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα
- ✓ Οι τυπικές αποδόσεις αυτών των συστημάτων κυμαίνονται κοντά στο 70 %



- ✓ Τα κυριότερα **πλεονεκτήματα** των αδιαβατικών CAES είναι:
 - Η εξάλειψη της κατανάλωσης καυσίμου για την αναθέρμανση του αέρα πριν από την εκτόνωσή του στους στροβίλους, η οποία φυσικά συνεπάγεται εξοικονόμηση καυσίμου και περιορισμό των αέριων ρύπων
 - Η διατήρηση υψηλών θερμοκρασιών μετά τη συμπίεση, η οποία συνεπάγεται υψηλά ποσά αποθηκευόμενης θερμότητας στη δεξαμενή αποθήκευσης
 - Η αυξημένη απόδοση του συστήματος αποθήκευσης
- ✓ Ωστόσο, η υλοποίηση αδιαβατικών CAES απαιτεί βελτιώσεις στον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό:
 - Οι απαιτούμενες δεξαμενές αποθήκευσης θερμότητας θα χρειαστούν ειδική σχεδίαση, προκειμένου να επιτευχθούν υψηλοί συντελεστές μεταφοράς θερμότητας κατά την αποθήκευση και την ανάκτηση θερμότητας
 - Ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον, όσο η θερμότητα παραμένει αποθηκευμένη εντός της δεξαμενής



- ✓ Επί του παρόντος, δεν υπάρχουν αδιαβατικά CAES πλήρους κλίμακας σε λειτουργία αλλά διάφορες κοινοπραξίες βρίσκονται στη διαδικασία της ανάπτυξης πρωτοτύπων. Τα βασικά στοιχεία για τα προχωρημένα αδιαβατικά CAES είναι ήδη διαθέσιμα. Ωστόσο, τα απαραίτητα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας βρίσκονται ακόμη υπό ανάπτυξη
- ✓ Τα συστήματα CAES έχουν ορισμένες γεωλογικές απαιτήσεις (π.χ. σπήλαια άλατος) για την εγκατάστασή τους, οι οποίες είναι περιορισμένες παγκοσμίως. Οι πιθανές τοποθεσίες στην Ευρώπη βρίσκονται στην Ολλανδία, στη Β. Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο
- ✓ Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί πολλές ιδέες έχουν κατατεθεί για τις δεξαμενές του αέρα. Υπάρχουν ενδιαφέρουσες προτάσεις για υποβρύχιες δεξαμενές αέρα, π.χ. μπαλόνια αγκυροβολημένα στο πυθμένα της θάλασσας ή συμπαγείς θαλαμίσκους, επίσης, τοποθετημένους στον πυθμένα της θάλασσας
- ✓ Αυτές οι λύσεις παρέχουν ένα πρόσθετο πλεονέκτημα, ότι η πίεση στις δεξαμενές μένει σχετικά σταθερή κατά τη διάρκεια της φόρτισης και εκφόρτισης. Έχουν όμως και αυξημένο κόστος κεφαλαίου, καθώς απαιτείται η κατασκευή των δεξαμενών αποθήκευσης του πεπιεσμένου αέρα



- ✓ Τα συστήματα πεπιεσμένου αέρα δεν αποτελούν “καθαρή” μορφή αποθήκευσης (απαιτείται χρήση συμβατικών καυσίμων -φυσικού αερίου συνήθως- για την παραγωγή της ενέργειας)
- ✓ **Πλεονεκτήματα** συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα:
 - Σχετικά μικρό κόστος αποθήκευσης ενέργειας
 - Μικρό επιφανειακό αποτύπωμα εξαιτίας της υπόγειας αποθήκευσης
 - Μεγάλη διάρκεια ζωής (40 χρόνια)
 - Χαμηλή αυτο-εκφόρτιση συμπιεσμένου αέρα
 - Συναγωνίζονται τους σταθμούς αντλαιοταμείωσης (ως μακροχρόνια συστήματα αποθήκευσης)



- ✓ **Μειονεκτήματα** συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα:
 - Υψηλό κόστος επένδυσης
 - Πολύ αργή απόσβεση (>30 έτη)
 - Μόνο μεγάλες μονάδες είναι οικονομικά συμφέρουσες να συνδεθούν στο δίκτυο μεταφοράς
 - Γεωλογικοί περιορισμοί. Γεωλογικά χαρακτηριστικά που πρέπει να πληρούνται: Σπήλαια με βάθος από 200 m έως 1000 m. Μεγάλο πάχος τοιχωμάτων. Ευστάθεια τοιχωμάτων σπηλαιίου κάτω από συνθήκες υψηλής πίεσης. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ελέγχεται η καταλληλότητα του χώρου και οι επιδράσεις που μπορεί να έχει ο χώρος στον πεπιεσμένο αέρα, αλλά και ο αέρας στο χώρο
 - Η θερμική αποθήκευση για την αδιαβατική αποθήκευση δεν έχει ακόμη επιδειχθεί πλήρως
 - Υψηλή αυτο-εκφόρτιση της θερμικής αποθήκευσης
 - Χαμηλή απόδοση διαβατικού CAES (<55%)



✓ Επενδυτικές **ευκαιρίες**:

- Επιτυχής επίδειξη αδιαβατικών τεχνολογιών και συστημάτων θα μπορούσε να οδηγήσει σε μικρό χρονικό διάστημα σε πλήρη εμπορική αξιοποίηση
- Καλή περιφερειακή συσχέτιση μεταξύ σπηλαίων και περιοχών υψηλής αιολικής ενέργειας στη Γερμανία

✓ Επενδυτικοί **κίνδυνοι**:

- Περιορισμένος αριθμός κατάλληλων τοποθεσιών (τοποθεσιών με κατάλληλα σπήλαια/θύλακες)
- Ανταγωνισμός στη χρήση των θυλάκων (π.χ. αποθήκευση φυσικού αερίου ή πετρελαίου)
- Αυξανόμενος ανταγωνισμός από αποκεντρωμένα συστήματα αποθήκευσης (π.χ. μπαταρίες)
- Η υψηλή ισχύς αυτών των συστημάτων απαιτεί τη σύνδεση τους με το δίκτυο μεταφοράς. Ως εκ τούτου αυτά τα συστήματα δε μπορούν να δώσουν λύσεις σε προβλήματα στα δίκτυα διανομής



- ✓ Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με σφονδύλους (flywheels) αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή κινητικής ενέργειας
- ✓ Η αποθήκευση της κινητικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω της περιστροφικής κίνησης ενός κυλίνδρου ή ενός δίσκου
- ✓ Η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια χρησιμοποιείται σε μελλοντικές χρονικές στιγμές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- ✓ Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα σφόνδυλο είναι ανάλογο των διαστάσεων και της μάζας του, καθώς και του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής με την οποία κινείται. Συνεπώς, η κατάσταση φόρτισής του μπορεί εύκολα να υπολογιστεί εφόσον γνωρίζουμε τη κυκλική του ταχύτητα. Συγκεκριμένα η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί μέσω του τύπου:

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

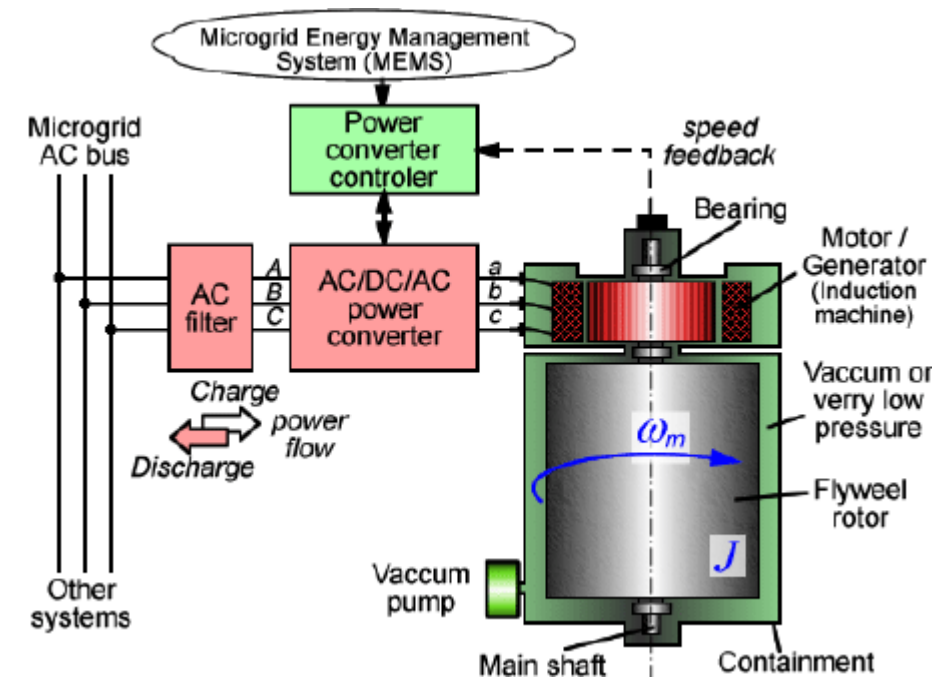
- ✓ J είναι η συνολική αδράνεια (σφονδύλου και κινητήριας μηχανής) σε Kgm^2 και ω είναι η περιστροφική ταχύτητα σε rad/s



Αποθήκευση Ενέργειας σε Σφονδύλους

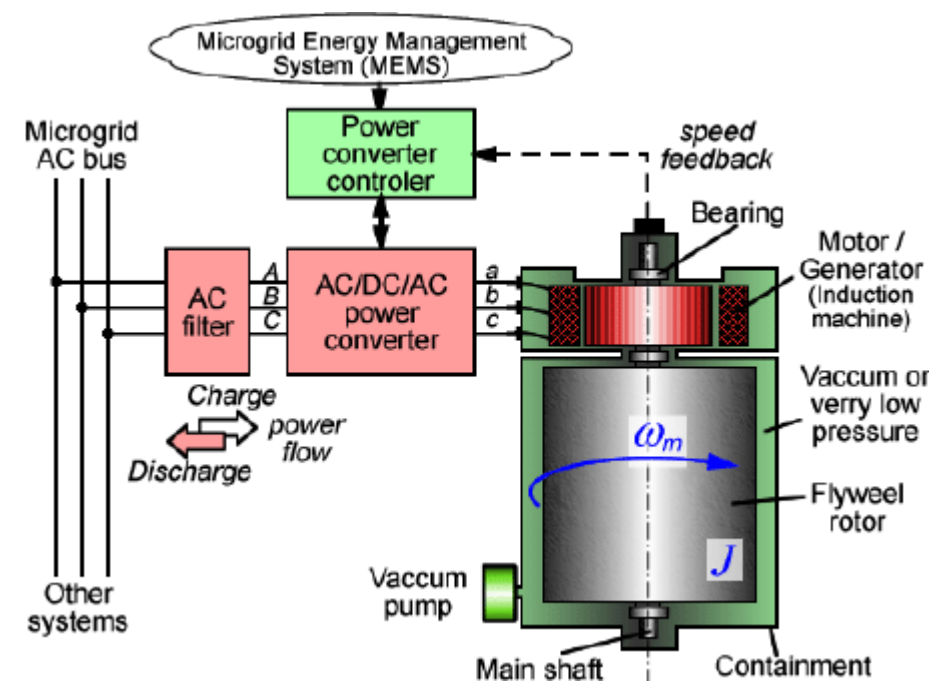


- ✓ Αυτού του είδους τα συστήματα αποθήκευσης αποτελούνται από ένα σφόνδυλο/δρομέα, μια ηλεκτρική μηχανή, και ένα κέλυφος
- ✓ Κατά τη φόρτιση του συστήματος τα τυλίγματα του στάτη της μηχανής τροφοδοτούνται με ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται περιστρέφει το δρομέα/σφόνδυλο. Ο σφόνδυλος επιταχύνεται αποκτώντας κινητική ενέργεια. Έτσι, αποθηκεύεται ενέργεια. Η μηχανή σε αυτή την περίπτωση λειτουργεί ως κινητήρας
- ✓ Κατά την εκφόρτιση ο σφόνδυλος επιβραδύνεται. Η κινητική ενέργεια που χάνει μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της μηχανής, που σ' αυτήν την περίπτωση λειτουργεί ως γεννήτρια. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται προσφέρεται στο δίκτυο





- ✓ Το κέλυφος είναι μία μη περιστρεφόμενη πλατφόρμα, μέσα στην οποία περιστρέφεται ο δρομέας
- ✓ Το κέλυφος είναι σχεδιασμένο για τον περιορισμό των εκσφενδονισμών των τμημάτων του δρομέα σε περίπτωση καταστροφικής βλάβης του
- ✓ Το κέλυφος επίσης μπορεί να περιέχει και κενό αέρος προκειμένου να μειώνονται οι απώλειες κινητικής ενέργειας λόγω τριβών
- ✓ Εναλλακτικά το κέλυφος μπορεί να περιέχει μείγμα αέριου ηλίου ώστε να περιοριστούν οι απώλειες τριβών





Αποθήκευση Ενέργειας σε Σφονδύλους



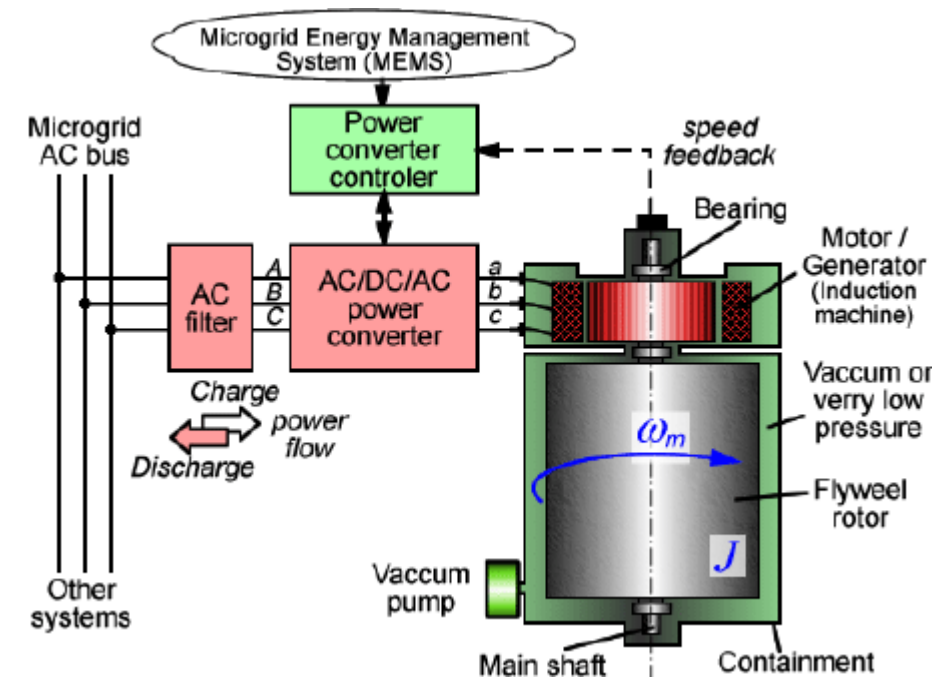


Αποθήκευση Ενέργειας σε Σφονδύλους



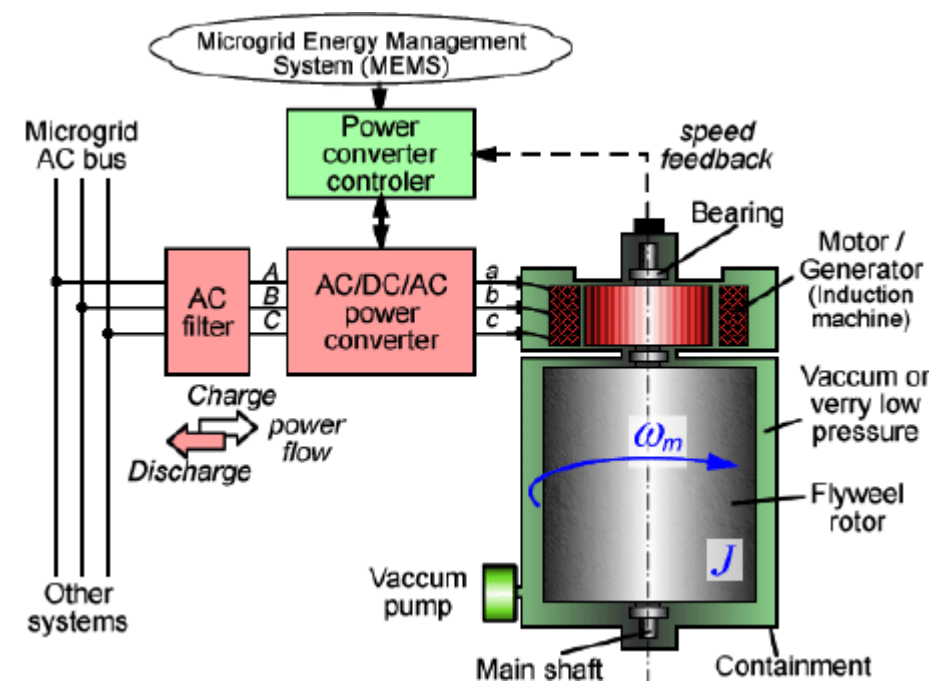


- ✓ Όταν ο σφόνδυλος δε βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης (επιτάχυνσης) ή εκφόρτισης (επιβράδυνσης) συνεχίζει να περιστρέφεται με ταχύτητα ικανοποιητικά σταθερή χωρίς να καταναλώνει αξιόλογη ενέργεια από το δίκτυο
- ✓ Βέβαια, μικρά ποσά ενέργειας απαιτούνται συνεχώς, ώστε να διατηρήσει ο σφόνδυλος την πλήρη φόρτιση του (μέγιστη ταχύτητα περιστροφής), η οποία μειώνεται εξαιτίας των τριβών. Με τον τρόπο αυτό, διατηρείται σταθερή η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια
- ✓ Το είδος της λειτουργίας του σφονδύλου (αν δηλαδή απορροφά ενέργεια από το δίκτυο ή το αν παρέχει) εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο και καθορίζεται από το σύστημα ελέγχου





- ✓ Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί διάφορες παραμέτρους του δικτύου και όταν υπάρχει ανάγκη για ενέργεια δίνει εντολή στο σφόνδυλο να εκφορτιστεί ενώ όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας ο σφόνδυλος καλείται να την απορροφήσει
- ✓ Για παράδειγμα, όταν η συχνότητα του δικτύου μειωθεί κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή, ο σφόνδυλος εκφορτίζεται παρέχοντας ισχύ στο δίκτυο. Όταν η συχνότητα αυξηθεί και ξεπεράσει μια άλλη προκαθορισμένη τιμή, ο σφόνδυλος απορροφά ενέργεια από το δίκτυο. Και στις δύο περιπτώσεις η συχνότητα του δικτύου διατηρείται στα επιθυμητά (επιτρεπτά) όρια

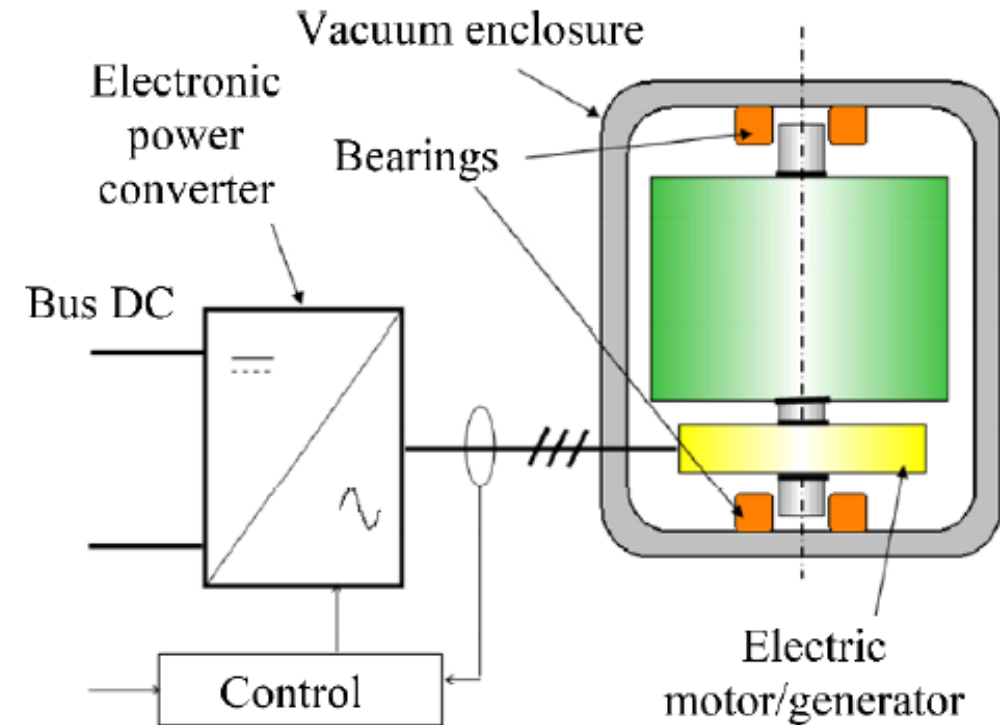




- ✓ Γενικά οι σφόνδυλοι κατηγοριοποιούνται σε σφονδύλους χαμηλής ταχύτητας και σφονδύλους υψηλής ταχύτητας
- ✓ Η ταχύτητα περιστροφής των πρώτων μετριέται σε κάποιες χιλιάδες στροφές το λεπτό ενώ αυτή των τελευταίων σε κάποιες δεκάδες χιλιάδες στροφές
- ✓ Η ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ένας σφόνδυλος είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής του. Με αύξηση δηλαδή της ταχύτητας επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της ενεργειακής του χωρητικότητας
- ✓ Η λειτουργία, όμως, σε υψηλές στροφές ανά λεπτό απαιτεί ιδιαίτερο σχεδιασμό του συστήματος
- ✓ Έτσι, ενώ οι σφόνδυλοι χαμηλής ταχύτητας μπορούν να κατασκευαστούν και από χάλυβα (όπως και γίνεται συνήθως), οι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας κατασκευάζονται αποκλειστικά από συνθετικά τα οποία αντέχουν τις μεγάλες εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε τέτοιες ταχύτητες



- ✓ Επιπλέον οι μεγάλες ταχύτητες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών εξαιτίας των τριβών των ρουλεμάν και του αέρα
- ✓ Για την ελαχιστοποίηση αυτών των απωλειών οι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας έχουν μαγνητικά ρουλεμάν και βρίσκονται σε κενό
- ✓ Όσον αφορά στους σφονδύλους χαμηλής ταχύτητας, κάποιοι χρησιμοποιούν μόνο μηχανικά ρουλεμάν ενώ οι περισσότεροι συνδυασμό μηχανικών και μαγνητικών. Πολλά συστήματα χαμηλής ταχύτητας λειτουργούν σε κενό αέρα για περαιτέρω μείωση απωλειών



Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



- ✓ Τα συστήματα αποθήκευσης σφονδύλων μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα και να την επιστρέψουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα της τάξης των δευτερολέπτων στο ηλεκτρικό δίκτυο
- ✓ Σύγχρονα σύστημα αποθήκευσης σφονδύλων έχουν δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας τέτοια ώστε να μπορούν να επιστρέψουν ηλεκτρική ισχύ από 100 kW έως και 2 MW σε χρονικό διάστημα έως 10 δευτερόλεπτα έως 1 με 2 λεπτά
- ✓ Ιδανικά για εφαρμογές όπως:
 - Διατήρηση ποιότητας και αξιοπιστίας ηλεκτρικής ισχύος (π.χ. ρύθμιση συχνότητας)
 - Σύντομη εφεδρεία σε περιπτώσεις εκκίνησης συμβατικών γεννητριών



- ✓ Συγκρινόμενοι οι σφόνδυλοι με τις μπαταρίες:
 - Έχουν μεγαλύτερο κόστος (οφείλεται στα μαγνητικά ρουλεμάν, τα συνθετικά υλικά που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες, το ειδικό δοχείο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί το κενό)
 - Ωστόσο παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Για την ίδια ισχύ εξόδου καταλαμβάνουν μόλις το 10-20% του χώρου που καταλαμβάνουν οι μπαταρίες
 - Απαιτούν απλούστερη και λιγότερο συχνή συντήρηση και δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα ασφάλειας που σχετίζονται με διαρροή χημικών
 - Η συχνότητα φόρτισης – εκφόρτισης ελάχιστα επηρεάζει τη ζωή του σφονδύλου σε αντίθεση με τις μπαταρίες, η ζωή των οποίων μειώνεται σημαντικά



✓ Υβριδικά συστήματα σφονδύλων - μπαταριών:

- Σημαντικά οφέλη προκύπτουν σε εφαρμογές με τη χρησιμοποίηση συνδυασμού σφονδύλων και μπαταριών ως σύστημα αποθήκευσης
- Κάθε φορά που καλείται το σύστημα αποθήκευσης να επέμβει στο δίκτυο αρχικά αποκρίνεται ο σφόνδυλος και στη συνέχεια, εφόσον χρειαστεί, η μπαταρία
- Αν αναλογιστεί κανείς ότι η πλειοψηφία των διαταραχών ισχύος διαρκούν 5 δευτερόλεπτα ή και λιγότερο, αντιλαμβάνεται ότι τα περισσότερα προβλήματα αντιμετωπίζονται από τον σφόνδυλο η ζωή και η απόδοση του οποίου μένουν ανεπηρέαστες από τη συχνότητα φόρτισης – εκφόρτισης
- Με τον τρόπο αυτό προστατεύεται η μπαταρία και αυξάνεται η διάρκεια ζωής της
- Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα σφονδύλων δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο τους, χωρίς υποστήριξη από μπαταρίες, για εφεδρεία (μεγάλους χρόνους εκφόρτισης) και στις περιπτώσεις που δεν είναι σίγουρο ότι η γεννήτρια θα ανακτήσει την πλήρη ισχύ της σε λίγα δευτερόλεπτα (~10 sec)



- ✓ **Πλεονεκτήματα** συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που στηρίζονται σε σφονδύλους:
 - Απαιτούν εύκολη, φθηνή και όχι συχνή συντήρηση
 - Η ενεργειακή τους χωρητικότητα δε φθίνει με τη συχνότητα φόρτισης εκφόρτισης και το χρόνο
 - Η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία
 - Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (εκατοντάδες χιλιάδες κύκλους)
 - Παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος
 - Έχουν γρήγορη απόκριση και γρήγορη επαναφόρτιση
 - Παρουσιάζουν μεγάλη απόδοση της τάξης του 80 % με 90 %
 - Έχουν προβλέψιμη λειτουργία, αφού γνωρίζοντας την ταχύτητα περιστροφής τους, ξέρουμε πάντα την διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργεια
 - Αποτελούν φιλική για το περιβάλλον τεχνολογία



- ✓ **Μειονεκτήματα** συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που στηρίζονται σε σφονδύλους:
 - Είναι κατάλληλα μόνο για βραχυχρόνιες εφαρμογές (συστήματα αποθήκευσης ισχύος και όχι συστήματα αποθήκευσης ενέργειας)
 - Έχουν υψηλό βαθμό αυτο-εκφόρτισης (της τάξης του 20% ανα ώρα λειτουργίας)
 - Έχουν μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τα συστήματα μπαταριών που οφείλεται στα μαγνητικά ρουλεμάν, τα συνθετικά υλικά που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες, το ειδικό δοχείο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί το κενό (και να εξαλειφθούν οι απώλειες τριβών)
 - Έλλειψη εμπειρίας. Η χρήση τους δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε επίπεδο δικτύου διανομής ή συστήματος μεταφοράς