



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/>



Υπερπυκνωτές



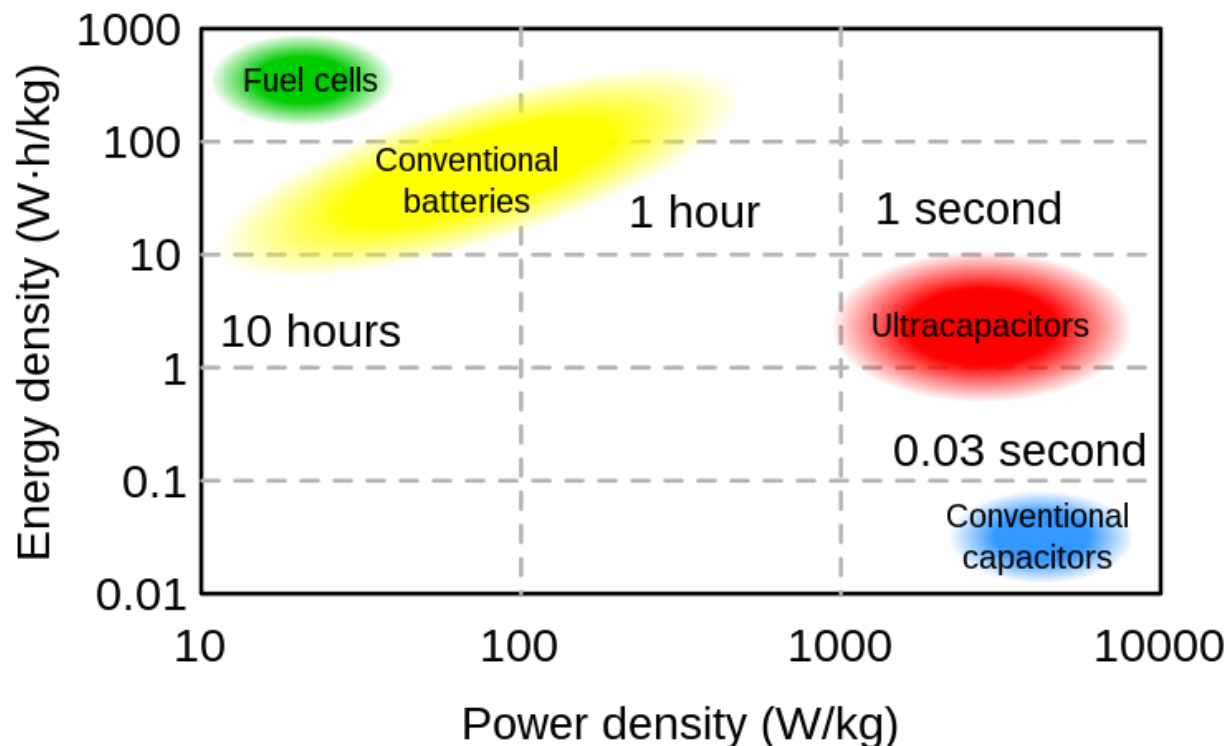
- ✓ Στην αγγλική βιβλιογραφία τους συναντάμε με τις ορολογίες:
 - Supercapacitors
 - Ultracapacitors
 - Double layer capacitors
- ✓ Αποτελούν τη μοναδική αμιγώς ηλεκτρική μέθοδο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας



Πηγή: Κ. Ο. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



- ✓ Οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές και τις μπαταρίες με αποτέλεσμα να έχουν πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς
- ✓ Το μοναδικό χαρακτηριστικό τους που τους κάνει να ξεχωρίζουν από άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι η πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος τους (μπορούν δηλαδή να παρέχουν μεγάλα ποσά ενέργειας σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα)

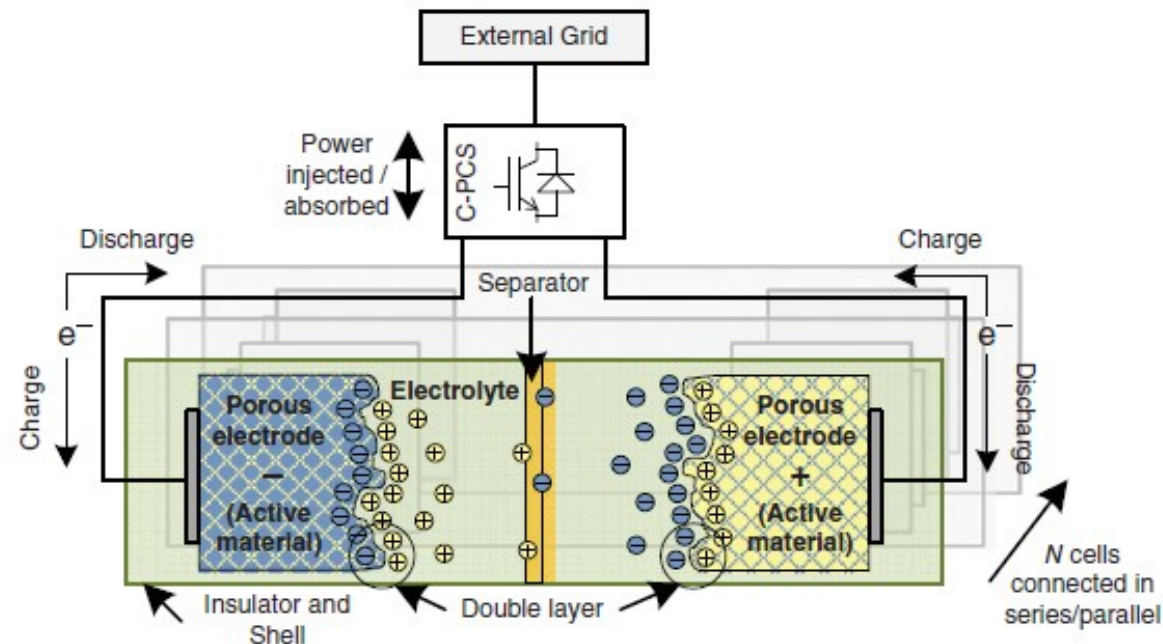




- ✓ Από το διάγραμμα της προηγούμενης διαφάνειας είναι φανερό ότι οι σημερινοί υπερπυκνωτές, παρόλο που έχουν χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας από τις συμβατικές μπαταρίες (οι οποίες όπως είδαμε στηρίζονται σε χημικές διεργασίες), έχουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος
- ✓ Το σημαντικό αυτό πλεονέκτημα των υπερπυκνωτών έναντι των μπαταριών είναι αποτέλεσμα του τρόπου με τον οποίο αποθηκεύουν ενέργεια
- ✓ Οι μπαταρίες είναι κατασκευασμένες να αποθηκεύουν την ενέργεια που τους παρέχεται κατά τη φόρτιση με χημικές αντιδράσεις (χημικό τρόπο). Για να πάρουμε πίσω αυτή την αποθηκευμένη ενέργεια υπό τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος απαιτούνται και πάλι ορισμένες χημικές αντιδράσεις μέσα στη μπαταρία. Αυτός ο χημικός μηχανισμός περιορίζει τη πυκνότητα ισχύος των μπαταριών (οι χημικές αντιδράσεις δε μπορούν να πραγματοποιηθούν άμεσα). Ακόμα, δηλαδή, και αν έχουμε μπαταρίες που έχουν αποθηκευμένα τεράστια ποσά ενέργειας, αυτές δε μπορούν να την αποδώσουν με οσοδήποτε μεγάλο ρυθμό επιθυμούμε



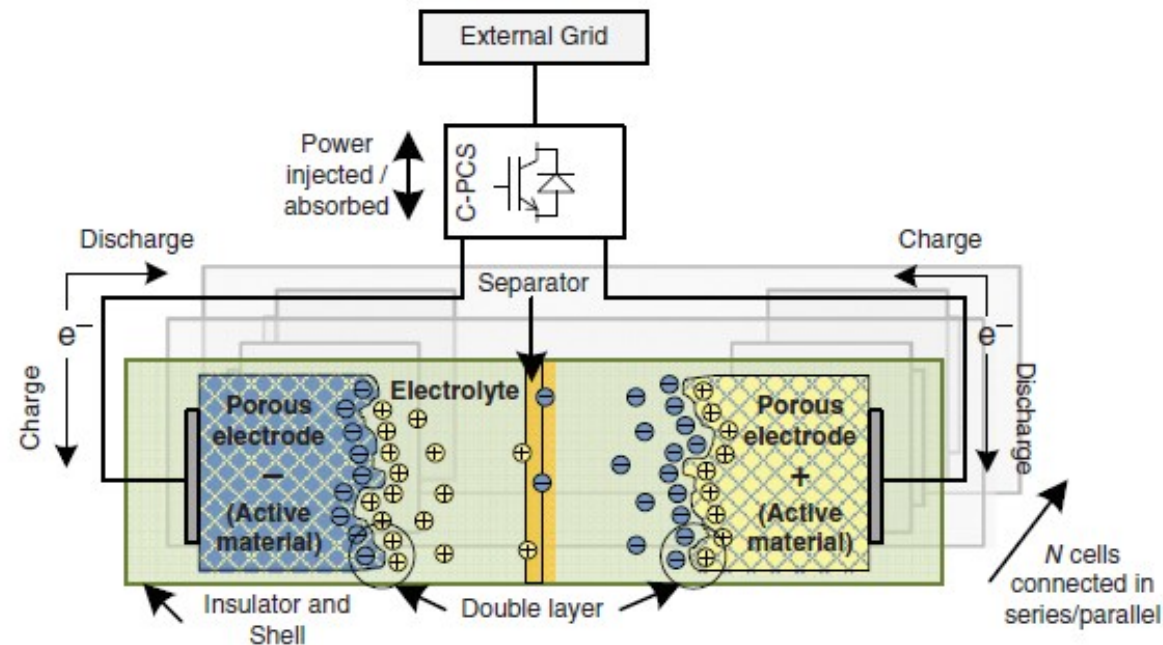
- ✓ Ένας υπερπυκνωτής αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, έναν διαχωριστή και έναν ηλεκτρολύτη
- ✓ Η διάταξη, δηλαδή, είναι παρόμοια με αυτή των ηλεκτροχημικών μπαταριών. Παρουσιάζει, όμως, σημαντικές διαφορές!
- ✓ Η σημαντικότερη διαφορά ανάμεσα στις μπαταρίες και στους υπερπυκνωτές έγκειται στο γεγονός ότι στους υπερπυκνωτές δε συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις. Αντίθετα, η ενέργεια αποθηκεύεται ηλεκτροστατικά



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



- ✓ Στους υπερπυκνωτές, τα ηλεκτρόδια και ο ηλεκτρολύτης είναι ηλεκτρικά φορτισμένα (η κάθοδος είναι θετικά φορτισμένη, η άνοδος είναι αρνητικά φορτισμένη και ο ηλεκτρολύτης περιέχει θετικά και αρνητικά ιόντα)
- ✓ Το συνολικό ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας σε ένα υπερπυκνωτή είναι συνάρτηση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων και του μέτρου της τάσης
- ✓ Η τάση των υπερπυκνωτών κυμαίνεται περίπου στα 2,7 V – 2,85 V. Έτσι, απαιτούνται πολλά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη τάση και χωρητικότητα



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



- ✓ Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από πορώδη υλικά όπως ο ενεργός άνθρακας, ώστε να επιτευχθεί μεγάλη επιφάνεια (και άρα να εξασφαλιστεί αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας)
- ✓ Στις μέρες μας, διεξάγονται έρευνες για την εισαγωγή του γραφένιου ως υλικού κατασκευής υπερπυκνωτών





- ✓ Οι υπερπυκνωτές έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και ισχύ εκφόρτισης σε σχέση με τους κλασσικούς πυκνωτές. Αυτό οφείλεται στο πορώδες υλικό των ηλεκτροδίων
- ✓ Θεωρούνται συστήματα αποθήκευσης ισχύος και όχι συστήματα αποθήκευσης ενέργειας
- ✓ Πράγματι, η πυκνότητα ενέργειας των υπερπυκνωτών είναι συνήθως μια τάξη μεγέθους χαμηλότερη από αυτή των κλασσικών μπαταριών. Ωστόσο, η πυκνότητα της ισχύος εκφόρτισης είναι έως και δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των μπαταριών
- ✓ Η συνολική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα υπερπυκνωτή μπορεί να υπολογιστεί μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

- ✓ Όπου V η τάση του υπερπυκνωτή και C η συνολική χωρητικότητα του



✓ Βασικά **πλεονεκτήματα** υπερπυκνωτών:

- Έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής. Ο μηχανισμός λειτουργίας τους είναι ιδιαίτερα αντιστρεπτός και τους επιτρέπει να έχουν εκατοντάδες χιλιάδες κύκλους φόρτισης / εκφόρτισης με ελάχιστη μείωση της απόδοσης τους (υποστηρίζουν από 500.000 έως 1.000.000 κύκλους φόρτισης / εκφόρτισης). Θα λειτουργούν, δηλαδή, για όλη τη διάρκεια ζωής των περισσότερων συσκευών, πράγμα που τους κάνει φιλικούς στο περιβάλλον. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μπαταρίες, οι κύκλοι φόρτισης / εκφόρτισης των οποίων είναι της τάξης των λίγων χιλιάδων (1000 – 5000 ανάλογα την τεχνολογία και το βάθος εκφόρτισης που λειτουργούν). Επιπλέον, τα χημικά των μπαταριών τις καθιστούν επιβλαβής για το περιβάλλον και πιθανόν επικίνδυνες μετά την απόσυρση τους



✓ Βασικά **πλεονεκτήματα** υπερπυκνωτών:

- Φορτίζουν και εκφορτίζουν με εξαιρετικά γρήγορους ρυθμούς. Φορτίζουν εντός λίγων δευτερολέπτων (0,3 s έως 30 s)
- Έχουν αρκετά καλό βαθμό απόδοσης (ο συνολικός βαθμός απόδοσης τους κυμαίνεται από 80% έως 95%)
- Μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς προβλήματα ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες



✓ Βασικά **μειονεκτήματα** υπερπυκνωτών:

- Έχουν πολύ μεγάλους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης όταν βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής (της τάξης του 20% σε 12 h)
- Δε μπορούν να υποστηρίξουν εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται υψηλά επίπεδα ενέργειας
- Η μικρή τάση που μπορούν να προσφέρουν στα άκρα τους (μόλις 3 V για υπερπυκνωτές της τάξεως των kF) επιβάλλει τη σύνδεση πολλών υπερπυκνωτών σε σειρά για να καλυφθούν οι ανάγκες σε επίπεδα τάσης. Η σύνδεση όμως πυκνωτών σε σειρά προκαλεί πτώση της συνολικής χωρητικότητας και άρα μείωση της αποθηκευμένης ενέργειας. Επομένως, χρειάζονται πολλές μονάδες για να καλυφθούν οι ανάγκες μας, γεγονός απαγορευτικό λόγω κόστους και βάρους
- Το κόστος τους είναι επίσης αυξημένο γιατί πρόκειται για μια νέα τεχνολογία αποθήκευσης χωρίς πολλές εφαρμογές ακόμα. Αναπτύχθηκαν αρχικά το 1957 από την General Electric και άρχισαν να κυκλοφορούν σταδιακά στην αγορά τη δεκαετία του 1980. Η έρευνα που γίνεται στις μέρες μας αναμένεται να αυξήσει περαιτέρω τις δυνατότητες τους και να μειώσει στο άμεσο μέλλον το κόστος τους



- ✓ Οι υπερπυκνωτές δεν έχουν γνωρίσει ακόμα ευρεία χρήση παρά τα αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματά τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός της χαμηλής πυκνότητας ενέργειας αυτών των συστημάτων.
- ✓ Έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα κυρίως σε εφαρμογές σε συνδυασμό με μπαταρίες, έτσι ώστε οι να καλύπτουν τις γρήγορες μεταβολές της ζήτησης ισχύος και οι μπαταρίες την απαίτηση για μεγαλύτερα ποσά ενέργειας
- ✓ Πράγματι, με κατάλληλο συνδυασμό υπερπυκνωτών και μπαταριών οι διαφορές πυκνότητας ισχύος και ενέργειας των δύο συστημάτων μπορούν να γίνουν πλεονέκτημα. Αυτά τα υβριδικά συστήματα μπαταριών-υπερπυκνωτών επιτρέπουν την αποσύνδεση της απαίτησης για υψηλή πυκνότητα ισχύος από την απαίτηση για υψηλή πυκνότητα ενέργειας και μεγάλο κύκλο ζωής. Σε αυτά τα συστήματα η σχεδίαση της μπαταρίας επικεντρώνεται μόνο στην υψηλή πυκνότητα ενέργειας και το μεγάλο κύκλο ζωής. Υψηλά ρεύματα φόρτισης / εκφόρτισης μπορούν να προσφερθούν από τον υπερπυκνωτή αυξάνοντας έτσι τη διαθέσιμη ενέργεια της μπαταρίας και το κύκλο ζωής της



✓ Ενδεικτικές εφαρμογές υπερπυκνωτών:

- Μπορούν να συνδυαστούν με ΑΠΕ, ώστε να ισορροπούν απότομες αυξομειώσεις ισχύος και να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο (υπηρεσίες που απαιτούν απότομες μεταβολές ισχύος, π.χ. παροχή αδρανειακής απόκρισης)
- Στήριξη τάσης κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων στα ΣΗΕ
- Στο μέλλον αναμένεται ότι θα χρησιμοποιηθούν σε συστήματα ηλεκτροκίνησης (π.χ. σταθμούς φόρτισης)
- Σε ανυψωτικά μηχανήματα και γερανούς για να αντικαταστήσουν συστήματα diesel



- ✓ Είναι γνωστά στη διεθνή βιβλιογραφία με το όρο Superconducting Magnetic Energy Storage systems (SMESs)
- ✓ Σε αυτόν τον τύπο ΣΑΕ, η ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από συνεχές ρεύμα που ρέει μέσα από ένα υπεραγώγιμο πηνίο σε κρυογονικές θερμοκρασίες
- ✓ Τα υλικά υπεραγωγών παρουσιάζουν σχεδόν αμελητέα αντίσταση σε κρυογονικές θερμοκρασίες, επομένως το μαγνητικό πεδίο στο πηνίο μπορεί να δημιουργηθεί και να διατηρηθεί με χρησιμοποιώντας μόνο μια πολύ μικρή ποσότητα ρεύματος (το ποσό της ενέργειας που χάνεται εξαιτίας ωμικών απωλειών είναι μικρό)



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

Σημείωση: Στις δεξαμενές αριστερά περιέχεται ήλιο για την ψύξη του συστήματος. Η δεξαμενή στα δεξιά περιέχει το υπεραγώγιμο πηνίο



- ✓ Οι θερμοκρασίες λειτουργίας αυτών των συστημάτων κυμαίνονται από $-268\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $-203\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ✓ Επομένως, μια βασική πτυχή για τη σωστή λειτουργία αυτών των συστημάτων είναι η διατήρηση αυτών των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας
- ✓ Αυτό επιτυγχάνεται, συνήθως, μέσω ψύξης με ψυχρό υγρό ήλιο
- ✓ Ωστόσο, λόγω της πολύ χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος ψύξης, η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων SMES είναι πολύ υψηλή, γύρω στο 90%



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

Σημείωση: Στις δεξαμενές αριστερά περιέχεται ήλιο για την ψύξη του συστήματος. Η δεξαμενή στα δεξιά περιέχει το υπεραγώγιμο πηνίο



Υπεραγώγιμη Αποθήκευση



- ✓ Το σύστημα ψύξης χρειάζεται, όμως, τακτική συντήρηση
- ✓ Επιπλέον, η κατασκευή του απαιτεί μεγάλο κόστος, το οποίο αυξάνει και το συνολικό κόστος του συστήματος αποθήκευσης
- ✓ Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου:

$$E = \frac{1}{2}LI^2$$

- ✓ Όπου I το ρεύμα του πηνίου (σε A) και L η αυτεπαγωγή (σε H)



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

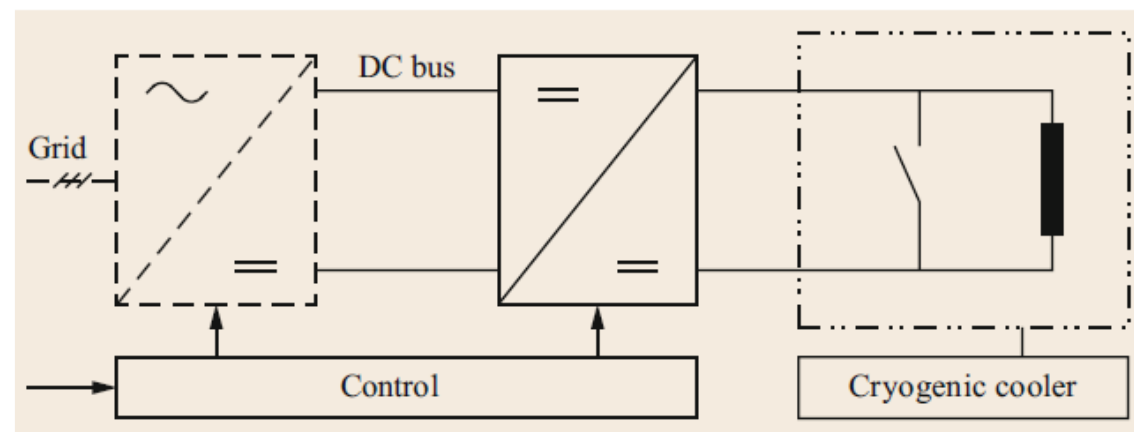
Σημείωση: Στις δεξαμενές αριστερά περιέχεται ήλιο για την ψύξη του συστήματος. Η δεξαμενή στα δεξιά περιέχει το υπεραγώγιμο πηνίο



Υπεραγώγιμη Αποθήκευση



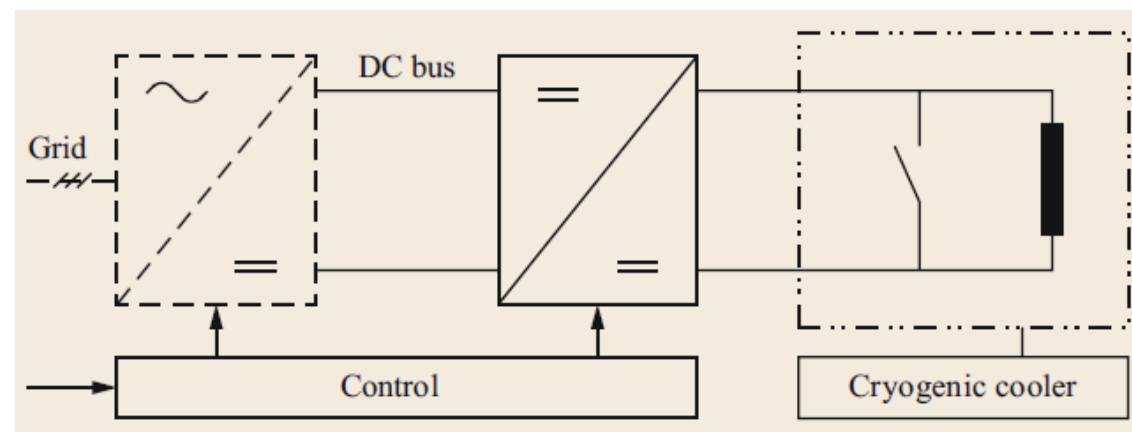
- ✓ Το σύστημα αποθήκευσης συνδέεται στο δίκτυο με τη βοήθεια μετατροπών ισχύος, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα
- ✓ Κατά τη φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης εφαρμόζεται θετική τάση (αύξηση ρεύματος), ενώ κατά την εκφόρτιση εφαρμόζεται αρνητική τάση (μείωση ρεύματος)
- ✓ Σε ένα SMES, το ρεύμα της αυτεπαγωγής θα πρέπει πάντα να ρέει. Ακόμα κι αν δεν υπάρχουν διακυμάνσεις αυτού του ρεύματος (π.χ. κατάσταση αδράνειας), και ακόμη κι αν οι απώλειες αγωγιμότητας στο υπεραγώγιμο πηνίο μπορούν να αμεληθούν, εξακολουθούν να υπάρχουν απώλειες!



Πηγή: K. O. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



- ✓ Αυτές οι απώλειες οφείλονται στις απώλειες των καλωδιώσεων και του μετατροπέα
- ✓ Για να μπορέσει το σύστημα αποθήκευσης να παραμείνει αξιόλογο χρονικό διάστημα σε κατάσταση αδράνειας, θα πρέπει αυτές οι επιπλέον απώλειες να ελαχιστοποιηθούν
- ✓ Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός διακόπτη (όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα)



Πηγή: K. O. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



- ✓ Βασικά **πλεονεκτήματα** υπεραγώγιμης αποθήκευσης:
 - Μεγάλη πυκνότητα ισχύος (μπορούν να απορροφήσουν ή να προσφέρουν πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα). Πρακτικά, θα λέγαμε ότι συναγωνίζονται τους υπερπυκνωτές
 - Πολύ μεγάλος κύκλος ζωής. Της τάξης των 100.000 κύκλων φόρτισης / εκφόρτισης (υποθέτοντας βάθος εκφόρτισης ίσο με 100%)
 - Ταχεία εκφόρτιση
- ✓ Βασικά **μειονεκτήματα**:
 - Πολύ μεγάλος βαθμός αυτό-εκφόρτισης (της τάξης του 10%-15% ανά ώρα)
 - Μεγάλο κόστος



- ✓ Στις μέρες μας, πραγματοποιούνται εκτενείς έρευνες για την περαιτέρω ανάπτυξη αυτών των συστημάτων αποθήκευσης, εστιάζοντας κυρίως στη μείωση του κόστους και στην τεχνική βελτιστοποίηση τους
- ✓ Σε ΣΗΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές παρόμοιες με αυτές που αναφέρθηκαν για τους υπερπυκνωτές