



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/>



- ✓ **Μπαταρία** ή ηλεκτρικός **συσσωρευτής** ονομάζεται μία συσκευή, η οποία **μετατρέπει χημική ενέργεια σε ηλεκτρική** μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Στην περίπτωση των επαναφορτιζόμενων συστημάτων, η μπαταρία επαναφορτίζεται μέσω της αντιστροφής της αντίδρασης αυτής
- ✓ Οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται ως **πρωτογενείς** (μη επαναφορτιζόμενοι) και ως **δευτερογενείς** (επαναφορτιζόμενοι), ανάλογα με την ικανότητα τους να επαναφορτίζονται ηλεκτρικά
- ✓ 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, καθώς αποτελούν σχετικά ώριμη τεχνολογία. Επιπλέον, οι μπαταρίες είναι κατάλληλες τόσο για μεγάλης κλίμακας όσο και μικρής κλίμακας αποθήκευση ενέργειας



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



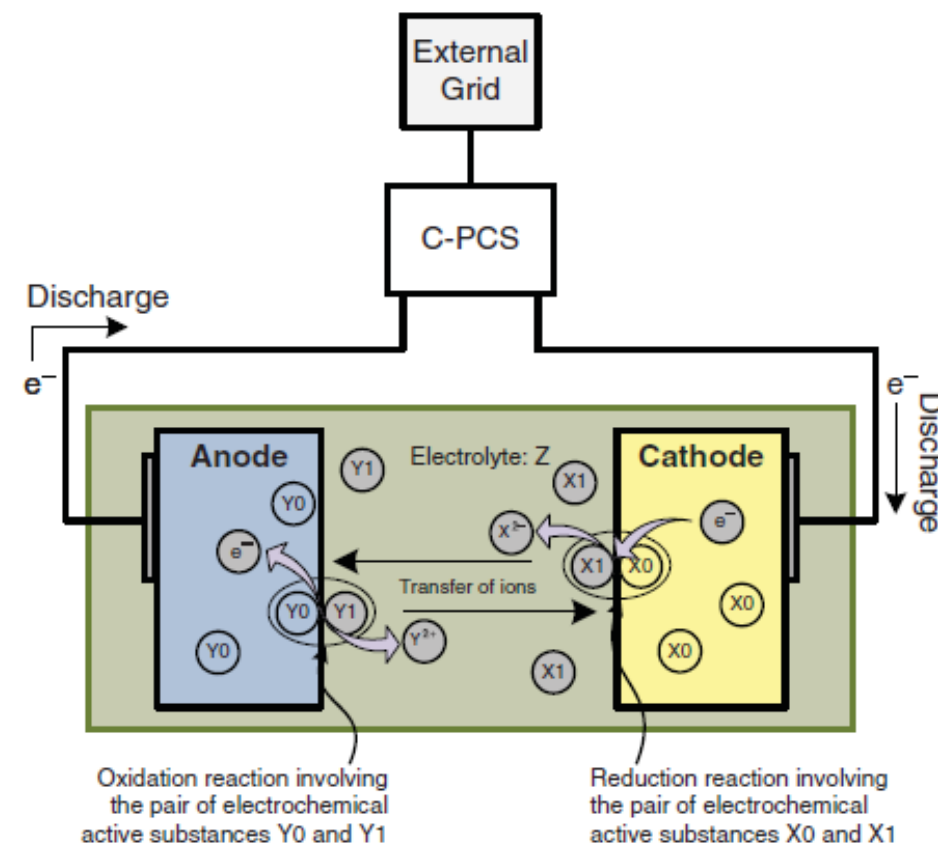
- ✓ Τα συστήματα μπαταριών βασίζονται σε αντιδράσεις αναγωγής (reduction) και οξείδωσης (oxidation). Πρόκειται για χημικές αντιδράσεις ευρύτερα γνωστές ως αντιδράσεις οξειδοαναγωγής (redox reactions)
- ✓ Αντιδράσεις αναγωγής ονομάζονται αυτές που επιτρέπουν στο εμπλεκόμενο συστατικό (χημικό στοιχείο) να αποκτήσει ηλεκτρόνια
- ✓ Αντιδράσεις οξείδωσης ονομάζονται αυτές που επιτρέπουν στο εμπλεκόμενο συστατικό (χημικό στοιχείο) να “χάσει” ηλεκτρόνια
- ✓ Οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής παράγουν νέες ενεργές ηλεκτροχημικά δραστικές ουσίες με μη ουδέτερο ηλεκτρικό φορτίο και ως εκ τούτου **ιόντα**
- ✓ Μια **μπαταρία** είναι απλώς μια συσκευή που **παρέχει τις συνθήκες για να συμβούν αντιδράσεις οξειδοαναγωγής**, δημιουργώντας έτσι μια **ροή ιόντων και ηλεκτρονίων**



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



- ✓ Η ροή ηλεκτρονίων και ιόντων υπάρχει εφόσον υπάρχει ενεργειακή διαφορά μεταξύ των ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών που εμπλέκονται στις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής
- ✓ Για να επιτευχθεί αυτή η ροή ιόντων, η μπαταρία αποτελείται από δύο κυκλώματα. Ένα **εσωτερικό** και ένα **εξωτερικό**
- ✓ Το εσωτερικό κύκλωμα αποτελείται από το ίδιο το στοιχείο της μπαταρίας και παρέχει τη διαδρομή μέσω της οποίας ρέουν τα ιόντα
- ✓ Το ηλεκτρικό κύκλωμα κλείνει προσθέτοντας το εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο ή πηγή), παρέχοντας έτσι τη διαδρομή μέσω της οποίας ρέουν τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής



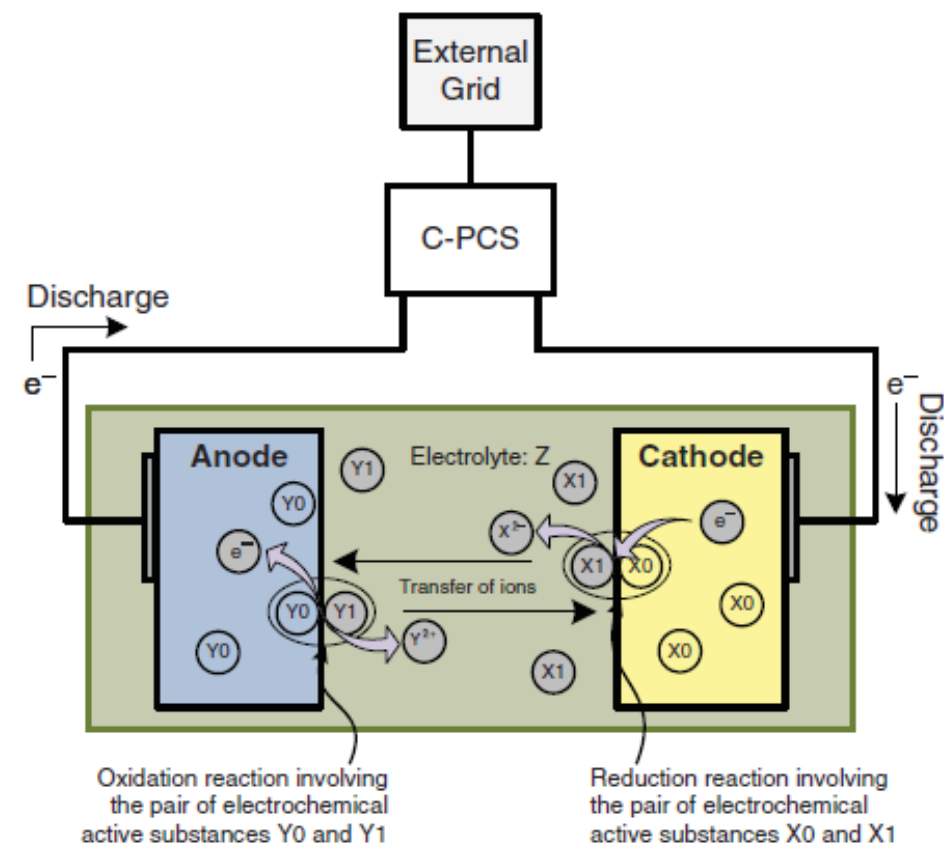
Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



- ✓ Κάθε μπαταρία αποτελείται από κελιά. Κάθε κελί περιέχει τα ακόλουθα εξαρτήματα:
 - Τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου
 - Δύο ζεύγη ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών
 - Τον ηλεκτρολύτη
 - Τον διαχωριστή



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

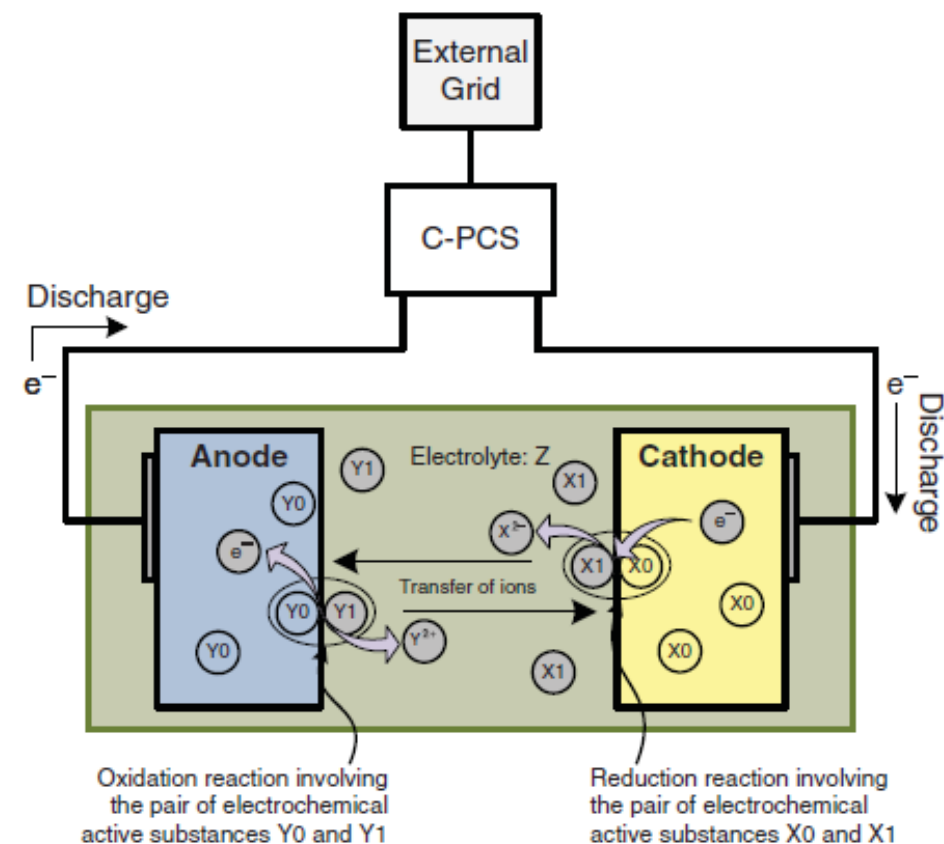


Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



✓ Τα ηλεκτρόδια:

- Κατά την εκφόρτιση, οι αντιδράσεις οξείδωσης συμβαίνουν στην άνοδο της μπαταρίας (το αρνητικό ηλεκτρόδιο), το οποίο είναι το ηλεκτρόδιο που συλλαμβάνει τα ηλεκτρόνια που χάνονται
- Αντίθετα, οι αντιδράσεις αναγωγής συμβαίνουν στην κάθοδο της μπαταρίας (το θετικό ηλεκτρόδιο), το οποίο είναι το ηλεκτρόδιο που παρέχει τα ηλεκτρόνια που αποκτώνται από το μειωμένο συστατικό



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

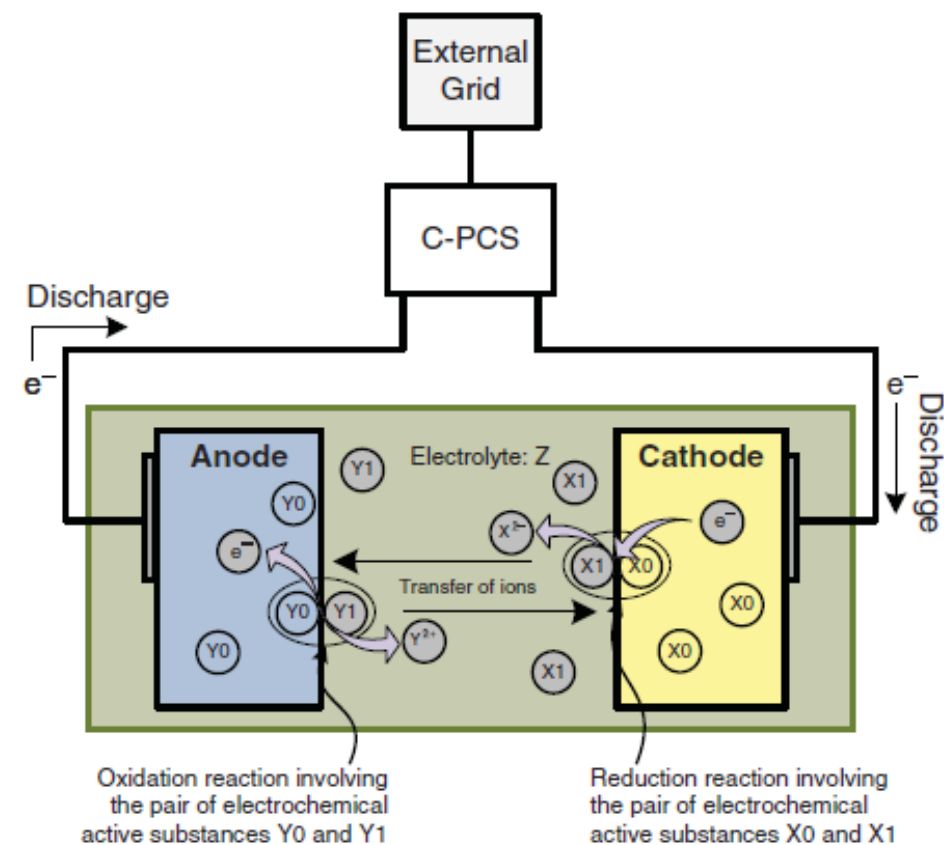


Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



✓ Ζεύγη ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών:

- Ένα για την άνοδο και ένα για την κάθοδο
- **Κατά την εκφόρτιση**, τα χημικά στοιχεία που συνθέτουν το ηλεκτρόδιο της ανόδου θα πρέπει να αντιδράσουν με “οξειδωτικό” τρόπο, προσφέροντας ηλεκτρόνια
- Αντίθετα, τα χημικά στοιχεία της καθόδου θα πρέπει να αντιδράσουν με “αναγωγικό” τρόπο

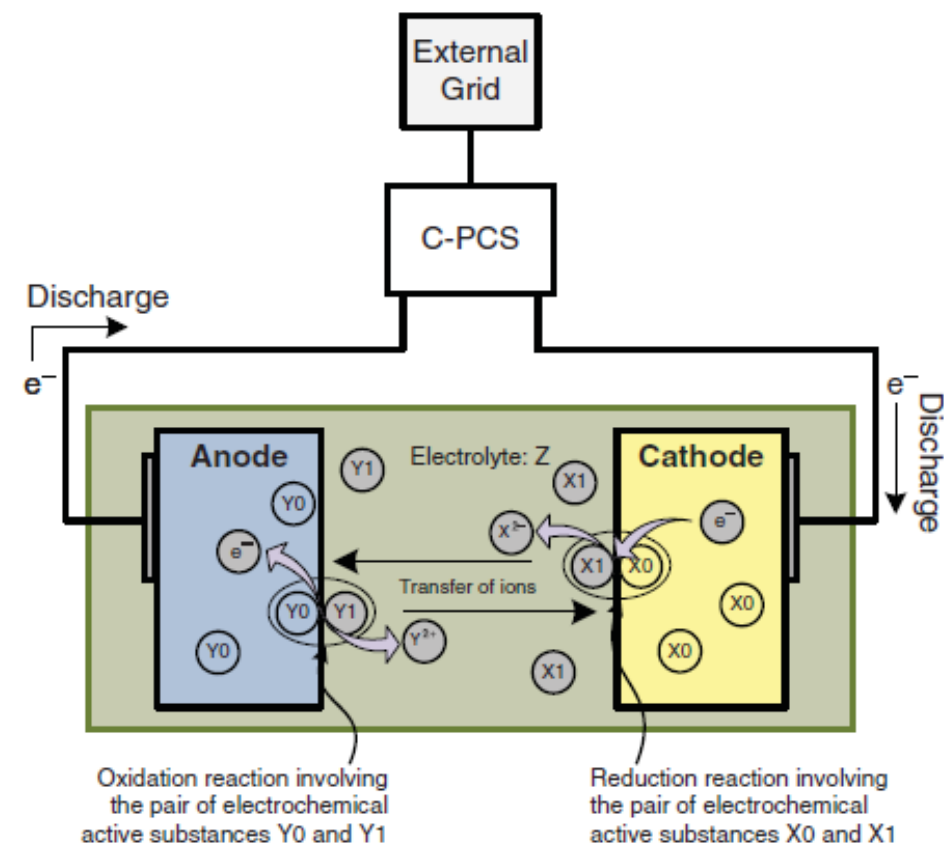


Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, “Energy Storage in Power Systems,” Wiley, 2016.



✓ Ο ηλεκτρολύτης:

- Κατά τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, εκτός από ηλεκτρόνια, παράγονται και ιόντα (σωματίδια με μη ουδέτερο ηλεκτρικό φορτίο)
- Για να εξασφαλιστεί ισορροπία φορτίου ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο, αρνητικά φορτισμένα ιόντα μετακινούνται από την κάθοδο στην άνοδο. Θετικά φορτισμένα ιόντα μετακινούνται από την άνοδο στην κάθοδο
- Αυτή η μεταφορά ιόντων πραγματοποιείται μέσω του ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι μια στερεά ή υγρή ηλεκτρομονωτική ουσία



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

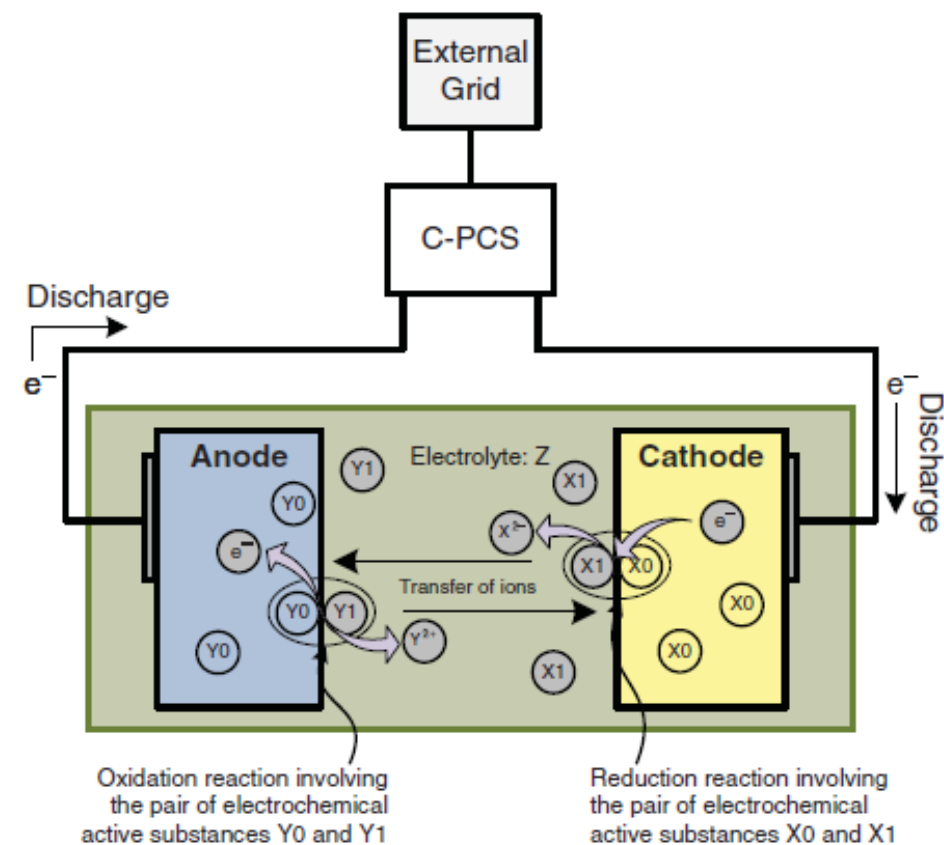


Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



✓ Ο διαχωριστής:

- Ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο υπάρχει μια διαφορά δυναμικού
- Ο διαχωριστής εξασφαλίζει την αποφυγή άμεσης επαφής μεταξύ τους, αποτρέποντας έτσι εσωτερικά βραχυκυκλώματα
- Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια ενός κελιού κυμαίνεται από 1 έως 4 V, ανάλογα με την τεχνολογία της μπαταρίας. Αυτή η διαφορά δυναμικού αναφέρεται ως τάση κελιού (τάση ανοικτού κυκλώματος)



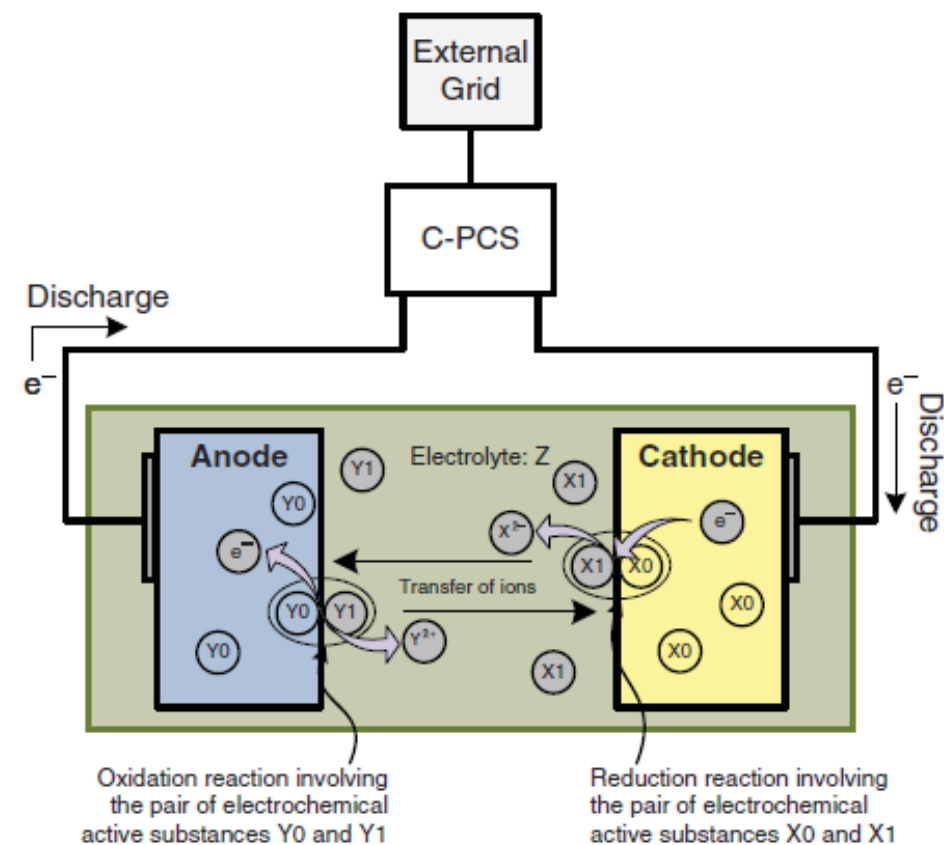
Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



- ✓ Οι μπαταρίες αποτελούνται από πολλά κελιά τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά για την επίτευξη των επιθυμητών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών
- ✓ Επομένως, η ονομαστική τάση μιας μπαταρίας καθορίζεται από τον αριθμό των κελιών που είναι συνδεδεμένα σε σειρά επί την ονομαστική τάση του ενός κελιού.
- ✓ Στο δοχείο της μπαταρίας, όλα τα κελιά συσκευάζονται σε ένα ελεγχόμενο και απομονωμένο περιβάλλον με μόνο ένα σετ ακροδεκτών



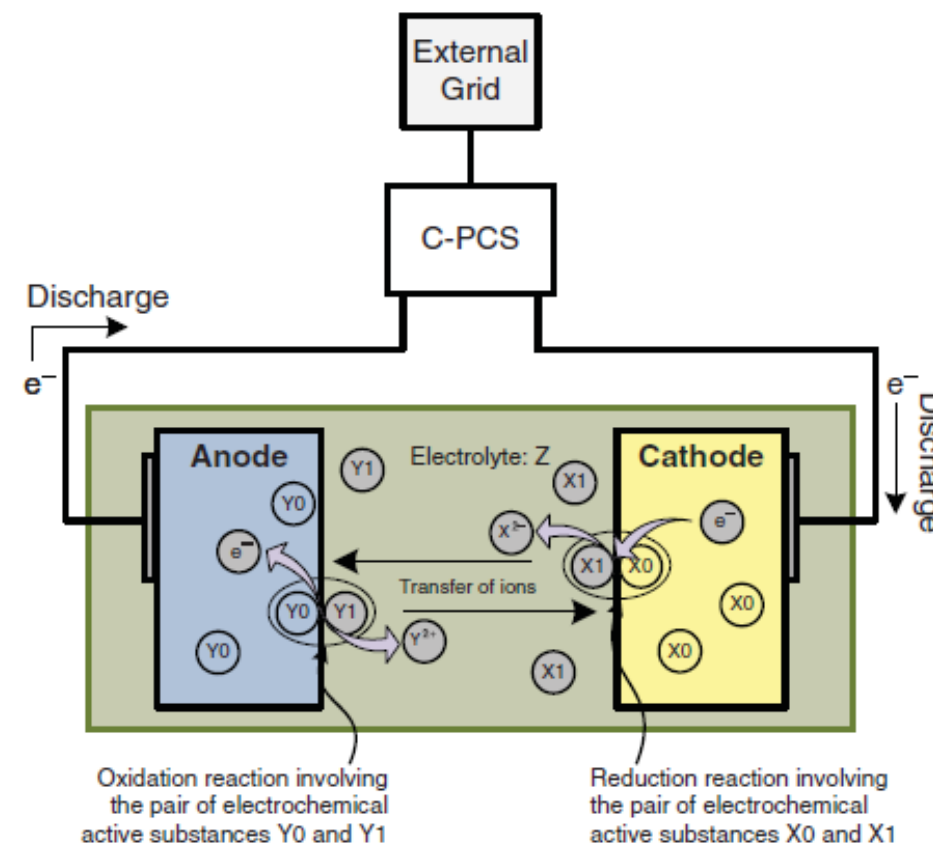
Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



- ✓ Όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, τα ηλεκτρόδια ενός κελιού είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά. Τα υλικά αυτά είναι τα Y0 (για την άνοδο) και X0 (για την κάθοδο). Η άνοδος περιβάλλεται από το στοιχείο Y1 και η κάθοδος περιβάλλεται από το στοιχείο X1
- ✓ Τα ηλεκτρόδια περιβάλλονται από τον ηλεκτρολύτη
- ✓ Τα υλικά X0–X1 και Y0–Y1 ορίζουν δύο ζεύγη ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών



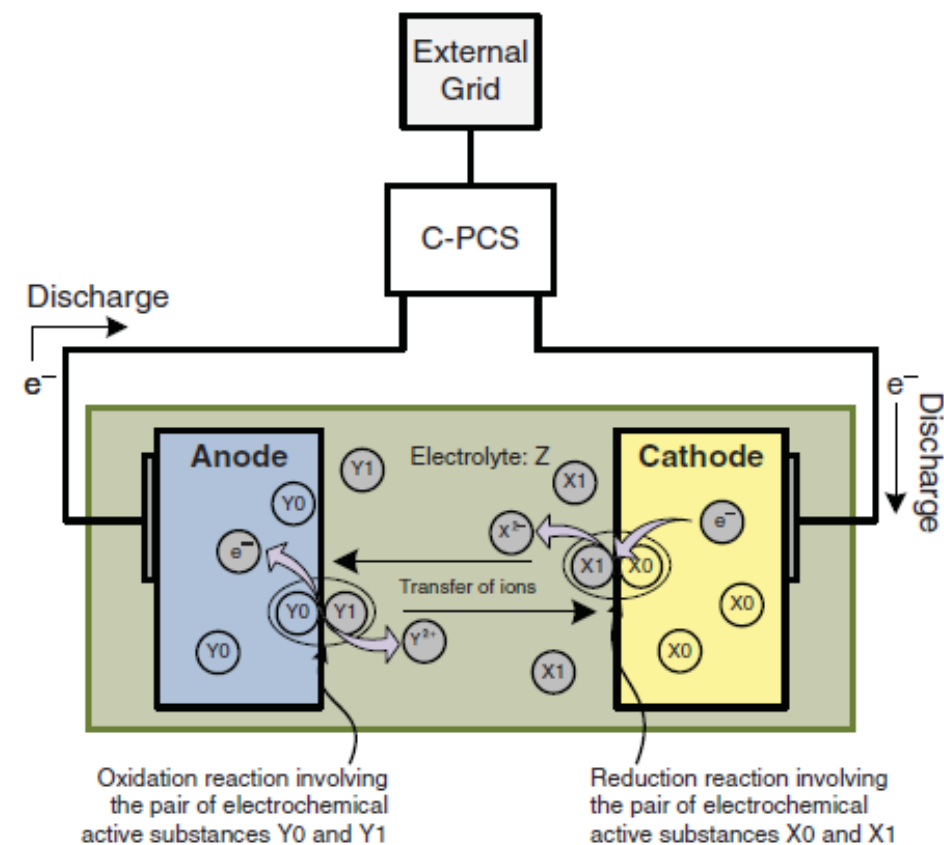
Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



- ✓ Κατά την εκφόρτιση τα ζεύγη των ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών αντιδρούν μεταξύ τους
- ✓ Τα ηλεκτρόνια ρέουν από το αρνητικό ηλεκτρόδιο (την άνοδο) στο θετικό (την κάθοδο)
- ✓ Τα ηλεκτρόνια, και τα θετικά ιόντα Y^{2+} , είναι το αποτέλεσμα της αντίδρασης οξείδωσης μεταξύ των ουσιών Y_0 και Y_1
- ✓ Τα ηλεκτρόνια συλλέγονται από το ηλεκτρόδιο της καθόδου, δίνοντας μια αντίδραση αναγωγής μεταξύ των ουσιών X_0 και X_1 , η οποία με τη σειρά της οδηγεί στο ιόν X^{2-}



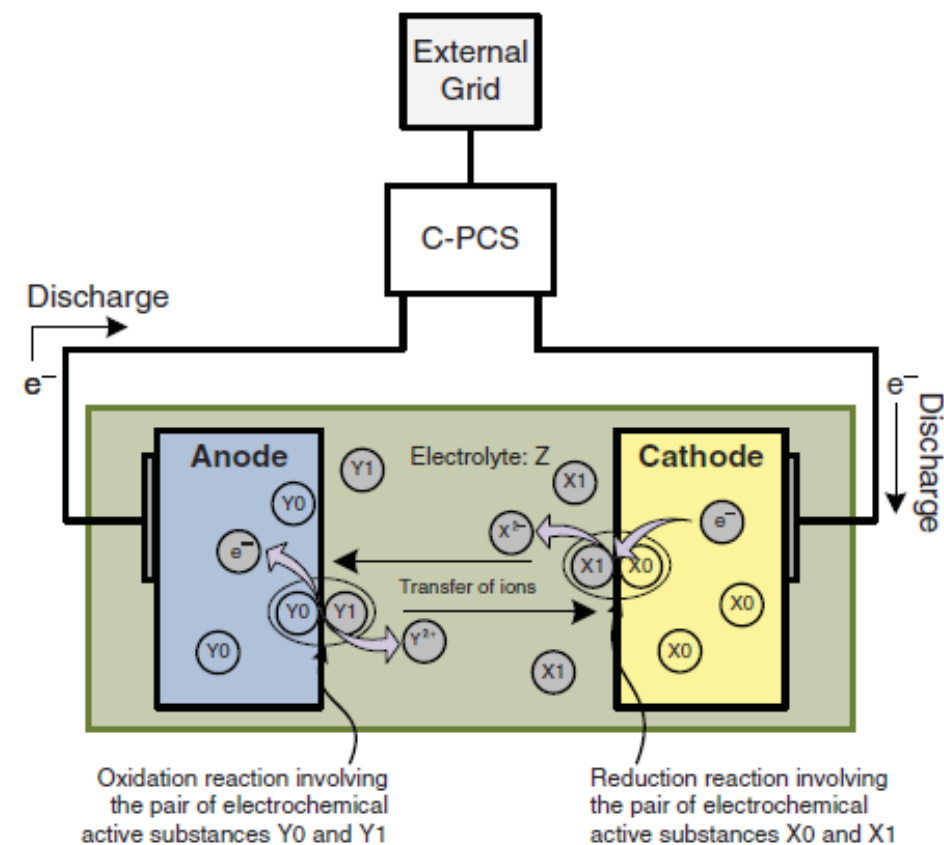
Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



- ✓ Ως αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, καθένα από τα ζεύγη ηλεκτροχημικά ενεργών ουσιών σταδιακά εξασθενεί
- ✓ Ως αποτέλεσμα, το ηλεκτρικό δυναμικό σταδιακά μειώνεται
- ✓ Το ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων μπορεί να αποκατασταθεί με την αντιστροφή της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος και, ως εκ τούτου, με την εφαρμογή μιας εξωτερικής πηγής ενέργειας για τη φόρτιση της μπαταρίας



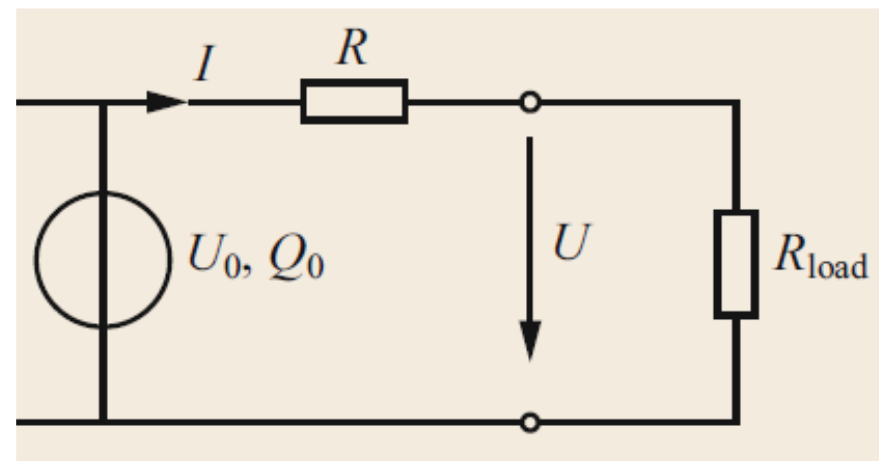
Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



- ✓ Λόγω της εσωτερικής αντίστασης που εμφανίζει κάθε μπαταρία και του ηλεκτρικού ρεύματος που τη διαρρέει, υπάρχει πτώση τάσης
- ✓ Επομένως, η τάση ανοικτού κυκλώματος (πριν την έναρξη της εκφόρτισης) δεν είναι ποτέ ίση με την πραγματική/μετρούμενη τάση
- ✓ Ένα ισοδύναμο κύκλωμα για μια μπαταρία απεικονίζεται στο διπλανό σχήμα. Q_0 είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας. U_0 είναι η τάση που αντιστοιχεί στο Q_0 . R είναι η εσωτερική αντίσταση, R_{load} η αντίσταση του φορτίου και I είναι το ρεύμα του φορτίου



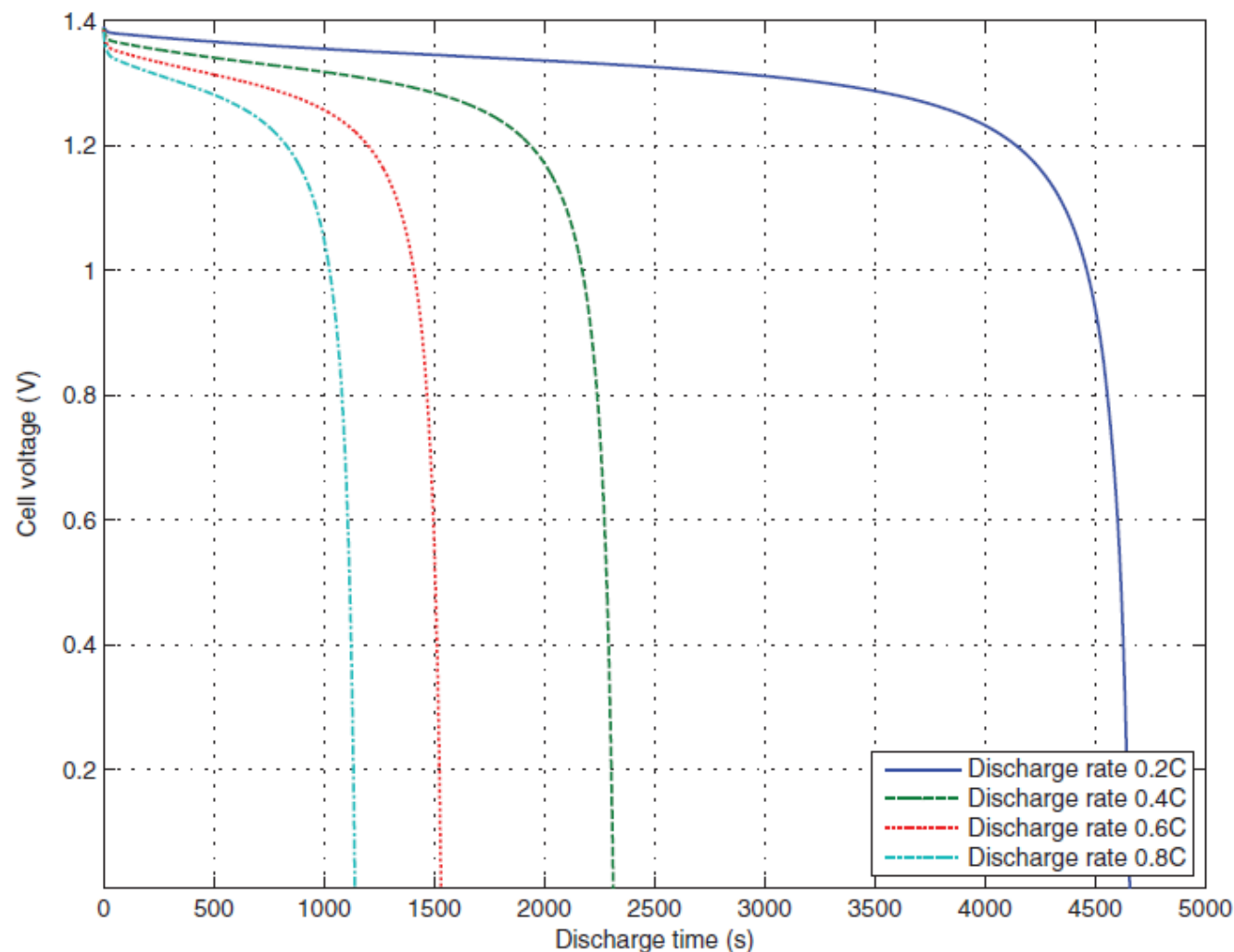
Πηγή: Κ. Ο. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



- ✓ Όσο εκφορτίζεται η μπαταρία, η τάση μειώνεται από μια αρχική μέγιστη τιμή ως τη λεγόμενη τάση αποκοπής (cutoff voltage)
- ✓ Από το σημείο αυτό και μετά (cutoff voltage), η τάση μειώνεται δραματικά περιορίζοντας δραστικά τη χρηστικότητα της μπαταρίας
- ✓ Οι κατασκευαστές συνήθως υποδεικνύουν μια ονομαστική τάση. Αυτή είναι απλώς μια μέση τιμή μεταξύ της μέγιστης τάσης και της τάσης αποκοπής. Αυτή η τάση σε συνδυασμό με το ρεύμα εκφόρτισης χρησιμοποιείται για να υπολογισθεί η ισοδύναμη εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας



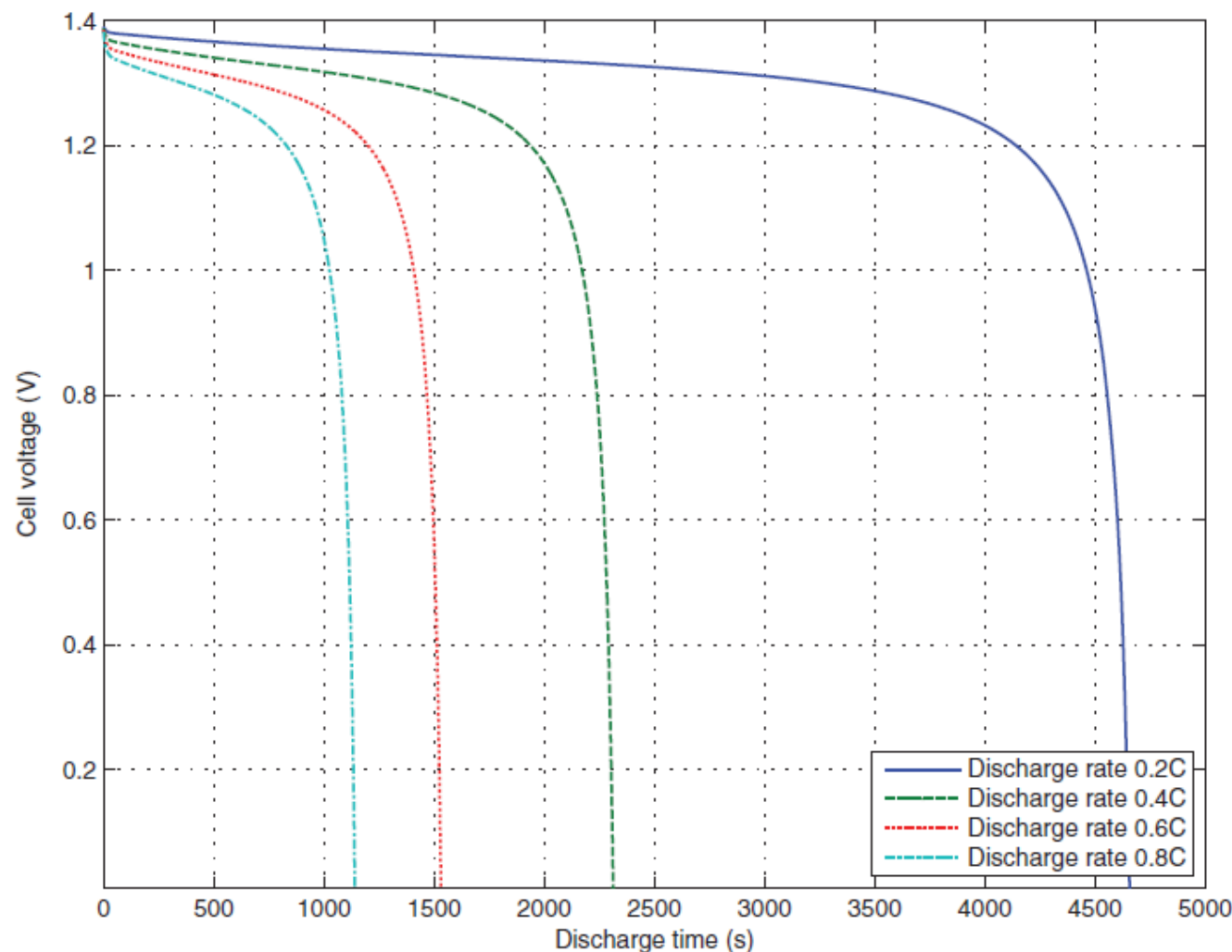
Πηγή: F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



Μπαταρίες – Αρχές Λειτουργίας



- ✓ Το προφίλ της τάσης εκφόρτισης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:
 - Η πίεση
 - Η θερμοκρασία
- ✓ Οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν την απόδοση των χημικών αντιδράσεων!
- ✓ Επιπλέον, η τάση του κάθε κελιού επηρεάζεται από το ρεύμα εκφόρτισης. Όπως φαίνεται και στο διπλανό σχήμα, όσο μεγαλύτερο το ρεύμα εκφόρτισης τόσο μικρότερη είναι η τάση αποκοπής (και η μέγιστη τάση). Έτσι, επηρεάζεται και η χωρητικότητα της μπαταρίας



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



- ✓ Χωρητικότητα C μιας μπαταρίας (από την αγγλική λέξη capacity) ορίζεται το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που μπορούμε να πάρουμε από μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες εκφόρτισης (ρυθμό εκφόρτισης, τάση και θερμοκρασία)
- ✓ Όπως ήδη είδαμε, η χωρητικότητα μιας μπαταρίας μετριέται σε Ah και καθορίζεται από ένα σταθερό ρεύμα εκφόρτισης που εκφορτίζει τη μπαταρία
- ✓ Η ωφέλιμη χωρητικότητα κάθε μπαταρίας ποικίλει για διάφορους ρυθμούς εκφόρτισης
- ✓ **Όσο πιο μεγάλος είναι ο ρυθμός εκφόρτισης, τόσο μικρότερη η ωφέλιμη χωρητικότητα.** Χαμηλότεροι ρυθμοί εκφόρτισης έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη ωφέλιμη χωρητικότητα. Οι κατασκευαστές μπαταριών συνήθως ορίζουν μερικούς ρυθμούς εκφόρτισης (σε αμπέρ) μαζί με τους χρόνους εκφόρτισης που συνδέονται με αυτούς (σε ώρες). Πολλές εμπειρικές σχέσεις παρουσιάστηκαν κατά καιρούς για να απεικονίσουν την εξάρτηση της χωρητικότητας της μπαταρίας από το ρεύμα και το χρόνο. Η σχέση που υπερίσχυσε όμως ήταν η σχέση του Peukert που μας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:



- ✓ Η σχέση που υπερίσχυσε όμως ήταν η σχέση του Peukert που μας δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C = I^n t$$

- ✓ Στον παραπάνω τύπο, C είναι η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας, t είναι ο χρόνος εκφόρτισης, και n είναι ο συντελεστής Peukert
- ✓ Ο συντελεστής n μπορεί να προσδιοριστεί με εφαρμογή δυο διαφορετικών ρυθμών εκφόρτισης στον παραπάνω τύπο
- ✓ Για παράδειγμα, έχουμε για μια μπαταρία:
 - $I_{dis,2}=11.7$ A, για εκφόρτιση 2 ωρών
 - $I_{dis,5}=5$ A, για εκφόρτιση 5 ωρών
- ✓ Εφαρμόζοντας τον τύπο, προκύπτει $n=1,08$



- ✓ Αυτό σημαίνει ότι για την συγκεκριμένη μπαταρία οποιοσδήποτε ρυθμός εκφόρτισης, υψωμένος στον συντελεστή Peukert, επί την χρονική διάρκεια εκφόρτισης θα μας δώσει την χωρητικότητα
- ✓ Αντίθετα, το φορτίο που τελικά εξάγεται από τη μπαταρία θα είναι:
 - Στην πρώτη περίπτωση είναι ίσο με $2 * 11,7 = 23,4$ Ah
 - Στη δεύτερη περίπτωση είναι ίσο με $5 * 5 = 25$ Ah



- ✓ Ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης μια μπαταρίας εκφράζεται συχνότερα ως πολλαπλάσιο της ονομαστικής χωρητικότητας (C-rate)
- ✓ C-rate ίσο με τη μονάδα (1C), υποδηλώνει ότι μια μπαταρία ονομαστικού ρεύματος n A, μπορεί να δώσει n A για 1 h
- ✓ Η επιλογή διαφορετικού C-rate έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικό χρόνο και ρεύμα φόρτισης / εκφόρτισης!
 - Για παράδειγμα C-rate ίσο **5C**, υποδηλώνει ότι η μπαταρία εκφορτίζεται με ρεύμα πενταπλάσιο (**5**) του ονομαστικού. Προφανώς σε αυτή την περίπτωση ο χρόνος εκφόρτισης είναι ίσος με 12 λεπτά ($1/5$ της ώρας)
 - Στον επόμενο πίνακα συνοψίζονται τιμές ρεύματος και χρόνου φόρτισης για διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης. Οι τιμές έχουν προκύψει θεωρώντας ιδεατή μπαταρία (δεν έχουν ληφθεί υπόψη δηλαδή τυχόν απώλειες).



- ✓ Η χωρητικότητα της μπαταρίας είναι ίση με n Ah:

C-rate	Χρόνος (min)	Ρεύμα (A)
5C	12	$5n$
2C	30	$2n$
1C	60	n
0,5C (C/2)	120	$n/2$
0,1C (C/10)	600	$n/10$



C-Rates – Παραδείγματα



- ✓ Μπαταρία ονομαστικής χωρητικότητας 10 Ah (για 2C) → Προσφέρει 20 A για χρόνο 30 min
- ✓ Μπαταρία ονομαστικής χωρητικότητας 10 Ah (για C/5) → Προσφέρει 2 A για χρόνο 5 h
- ✓ Μπαταρία χωρητικότητας 200 Ah (για C/10) → Προσφέρει 20 A για χρόνο 10 h



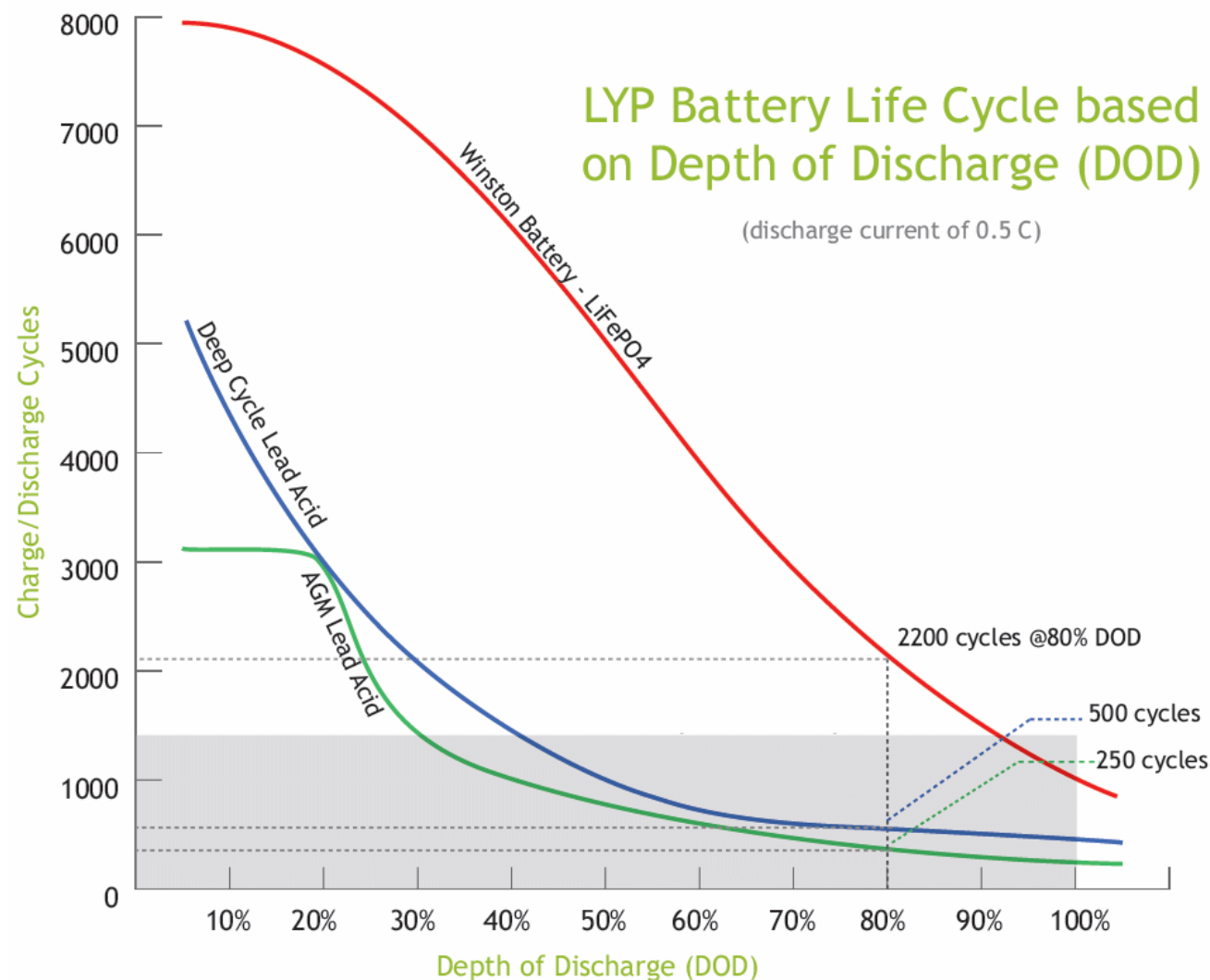
- ✓ Με τον όρο κύκλος, περιγράφουμε την επαναλαμβανόμενη διαδικασία εκφόρτισης και φόρτισης που συμβαίνει σε μια μπαταρία
- ✓ Ένας κύκλος ισοδυναμεί με μια εκφόρτιση που ακολουθείται από μια φόρτιση
- ✓ Ο κύκλος ζωής είναι ένα μέτρο του πόσους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης μπορεί να κάνει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια της χρήσιμης ζωής της
- ✓ Συνήθως αντιστοιχεί στον αριθμό των κύκλων εκφόρτισης (για συγκεκριμένο DoD) που η μπαταρία μπορεί να πραγματοποιήσει πριν η διαθέσιμη χωρητικότητά της μειωθεί σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό (συνήθως 80%) της αρχικής χωρητικότητας
- ✓ Ο κύκλος ζωής εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το βάθος του κάθε κύκλου



Μπαταρίες – Κύκλος Ζωής



- ✓ Ο κύκλος λειτουργίας μιας μπαταρίας, είναι η διαδικασία κατά την οποία διεξάγεται μία πλήρης φόρτιση και μετά μια εκφόρτιση (σε συγκεκριμένο DoD) και σε καθορισμένες συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία)
- ✓ Όσο μεγαλύτερο το ποσοστό εκφόρτισης, τόσο λιγότεροι οι κύκλοι ζωής της μπαταρίας
- ✓ Επίσης όσο συχνότερα εκφορτίζουμε σε μεγάλο ποσοστό βύθισης, τόσο περισσότερο μειώνουμε τη συνολική ζωή της μπαταρίας



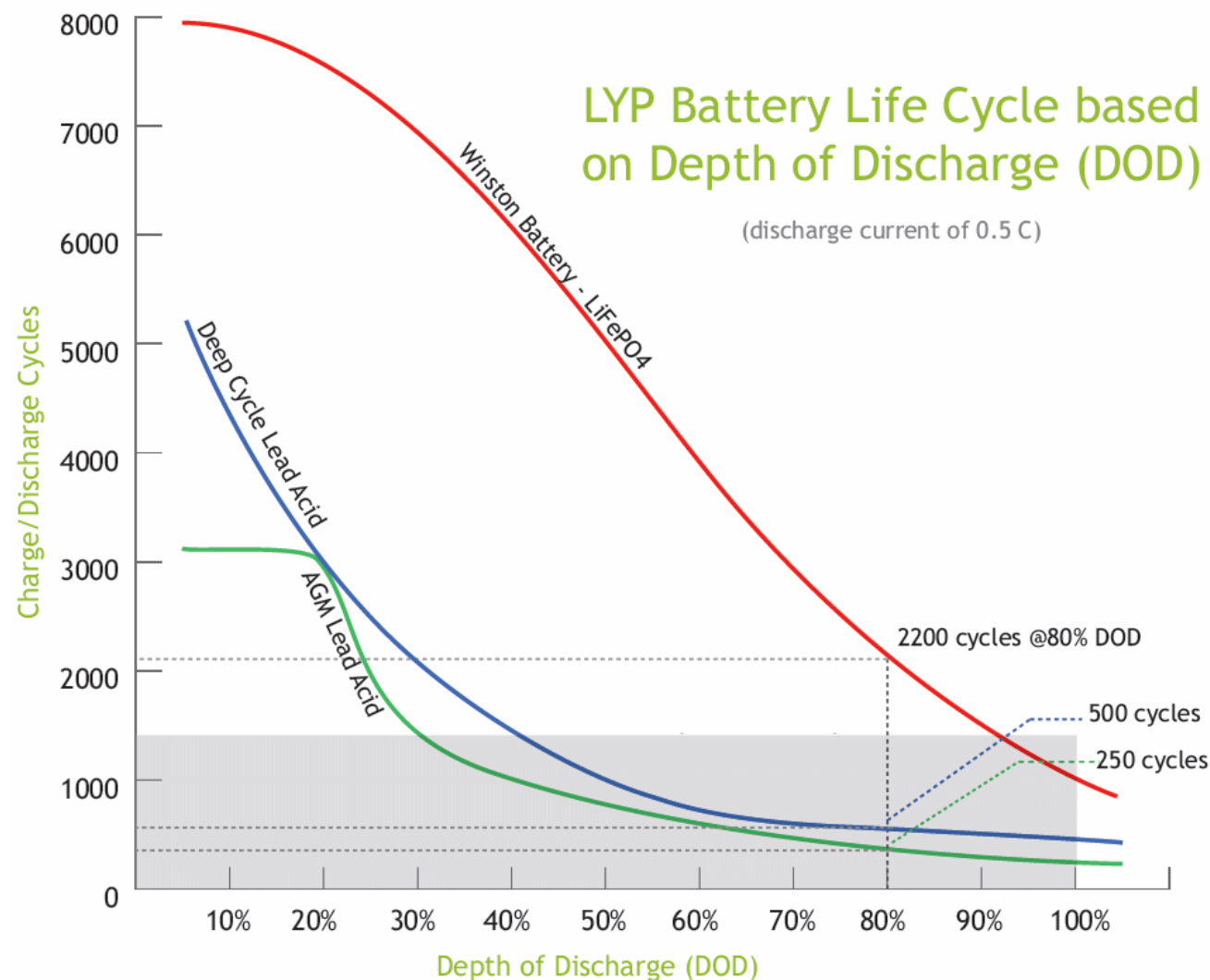
Πηγή: <https://gwl-power.tumblr.com/post/140925159571/the-cycle-life-of-winston-battery-cells-versus>



Μπαταρίες – Κύκλος Ζωής



- ✓ Ο συνολικός αριθμός των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, με συγκεκριμένα κριτήρια και μέχρι το σημείο όπου η μπαταρία θα δυσλειτουργεί, υποδηλώνει την πραγματική διάρκεια της ζωής της
- ✓ Ο συνολικός αριθμός των κύκλων, επηρεάζεται άμεσα από το DoD κατά την εκφόρτιση, καθώς και από άλλες συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία περιβάλλοντος



Πηγή: <https://gwl-power.tumblr.com/post/140925159571/the-cycle-life-of-winston-battery-cells-versus>



Μπαταρίες Μολύβδου Οξέος



- ✓ Στο αριστερό σχήμα απεικονίζεται συστοιχία 24 μπαταριών μολύβδου οξέος (Lead-acid), ονομαστικής ισχύος 10 kW



Πηγή: <https://www.nuvationenergy.com/resources/article/battery-management-large-scale-energy-storage-part4of4>



Πηγή: B. Robyns, B. Francois, G. Delile, C. Saudemont, "Energy Storage in Electric Power Grids," Wiley, 2015.



- ✓ Αποτελούν την παλιότερη και πιο φτηνή τεχνολογία μπαταριών
- ✓ Έχουν χρησιμοποιηθεί ως συστήματα αποθήκευσης σε μικρής κλίμακας εφαρμογές.
Χαρακτηριστικά παραδείγματα:
 - Εκκινητές αυτοκινήτων
 - Βοηθητικά συστήματα σε φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα
 - Συστήματα αποθήκευσης έκτακτης ανάγκης
- ✓ Τυπική διάρκεια ζωής 6 – 15 χρόνια (1500 κύκλοι φόρτισης / εκφόρτισης)



✓ Βασικά **πλεονεκτήματα**:

- **Μικρό κόστος** (οι φθηνότερες μπαταρίες της αγοράς)
- Μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία (απόδοση ανεξάρτητη της θερμοκρασίας περιβάλλοντος)

✓ Βασικά **μειονεκτήματα**:

- Σχετικά μικρή διάρκεια ζωής
- Μικρή πυκνότητα ενέργειας (είναι βαριές και ογκώδεις μπαταρίες)
- Αργή φόρτιση. Έχουν κακή σχέση μέγιστης ισχύος / χωρητικότητας
- Ακατάλληλες για χρήση σε επίπεδο δικτύου διανομής ή συστήματος μεταφοράς
- Ο μόλυβδος είναι τοξικός. Χρειάζεται προσοχή κατά την απόσυρσή τους
- Μικρό βάθος εκφόρτισης και περιορισμένος κύκλος ζωής



- ✓ Στο αριστερό σχήμα απεικονίζονται μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium-ion), ονομαστικής τάσης 48 V, ρεύματος φόρτισης 32 A, συνολικής χωρητικότητας 3,9 kWh



Πηγή: B. Robyns, B. Francois, G. Delile, C. Saudemont, "Energy Storage in Electric Power Grids," Wiley, 2015.



- ✓ Μαζική χρήση από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 σε φορητές συσκευές (π.χ. κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές, κλπ)
- ✓ Συνεχής έρευνα τα τελευταία χρόνια που οδηγεί σε συνεχείς βελτιώσεις
- ✓ Θεωρούνται πολύ καλές επιλογές και αναμένεται στο προσεχές μέλλον να επικρατήσουν σε:
 - εφαρμογές κτηρίων
 - εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ
 - Εφαρμογές ηλεκτροκίνησης



✓ Βασικά **πλεονεκτήματα**:

- Πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας (πέντε φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πυκνότητα ενέργειας των κλασσικών μπαταριών μολύβδου οξέος). Αυτό προφανώς συνεπάγεται μικρό όγκο και μικρή μάζα (φορητότητα)
- Μεγάλη διάρκεια ζωής. Κυμαίνεται από 1000 έως 4000 κύκλους φόρτισης / εκφόρτισης για βάθος εκφόρτισης 80%. Για μικρότερα βάθη εκφόρτισης, η διάρκεια ζωής μπορεί να παραταθεί σημαντικά
- Ευελιξία στο χρόνο εκφόρτισης που μπορεί να είναι από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι μερικές εβδομάδες
- Πολύ υψηλός βαθμός απόδοσης που αγγίζει το 98%

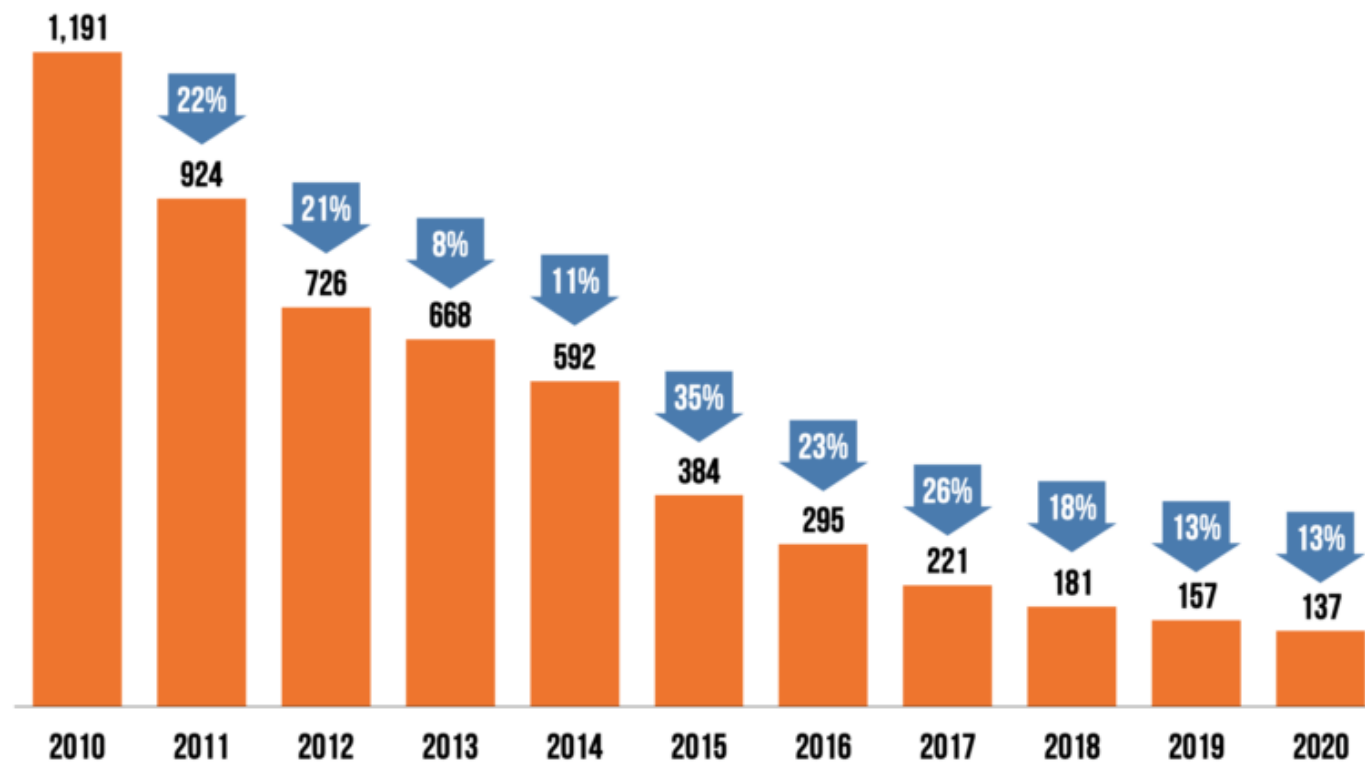


✓ Βασικά **μειονεκτήματα**:

- Απαιτούν ιδιαίτερη συσκευασία και ειδικά συστήματα ασφαλείας και προστασίας από εκρήξεις, λόγω της χημικής σύστασής τους
- Αδυναμία γρήγορης φόρτισης/εκφόρτισης σε θερμοκρασίες $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Υψηλό κόστος. Το κόστος βαίνει μειούμενο. Θεωρούνται το μέλλον στα ΣΑΕ τόσο για μικρής όσο και για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές

PRICE OF A LI-ION BATTERY PACK, VOLUME-WEIGHTED AVERAGE

Real 2020 dollars per kilowatt hour



Source: BloombergNEF





Μπαταρίες Νικελίου - Καδμίου





- ✓ Μέτρια πυκνότητα ενέργειας
- ✓ Μέτριο κόστος σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες μπαταριών. Μέση οικονομική λύση
- ✓ Βασικά **πλεονεκτήματα**:
 - Μεγάλος κύκλος ζωής. Αριθμός κύκλων φόρτισης / εκφόρτισης κοντά στους 3500. Για μικρά βάθη εκφόρτισης (της τάξης του 10%) μπορούν να φτάσουν και τους 50000 κύκλους!
 - Γρήγορη παροχή ισχύος
 - Καλή διάρκεια αποθήκευσης (στο ράφι) σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης
 - Οι μόνες που λειτουργούν σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες έως και $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$



✓ Βασικά **μειονεκτήματα**:

- Το κάδμιο είναι πολύ τοξικό στοιχείο και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας σε ανθρώπους. Η ΕΕ έχει θέσει από το 2003 στόχο να ανακυκλωθεί τουλάχιστον το 75% αυτών των μπαταριών (παλαιότερα ήταν πολύ διαδεδομένες σε φορητές συσκευές, π.χ. τηλεκοντρόλ, κλπ)
- Υποφέρουν από το φαινόμενο μνήμης! Όταν μια μπαταρία Ni-Cd επαναφορτίζεται επανειλημμένα πριν αποφορτιστεί πλήρως, παρατηρείται ξαφνική πτώση τάσης στην κυψέλη, η οποία οδηγεί σε εξασθένιση της χωρητικότητας της μπαταρίας
- Υψηλή αυτό-εκφόρτιση
- Η τάση κελιού είναι μόλις 1,2 V. Απαιτούνται πολλά κελιά για να επιτευχθούν υψηλές τάσεις
- Υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου οξέος



- ✓ Βασικός λόγος ανάπτυξης: Η αντικατάσταση του τοξικού καδμίου
- ✓ Βασικά **πλεονεκτήματα**:
 - Είναι περιβαλλοντικά φιλικές
 - Μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας σε σχέση με τις μπαταρίες νικελίου καδμίου
 - Έχουν επίσης μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και περισσότερους κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης
 - Μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα
 - Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα (έχουν αυξημένη αξιοπιστία)

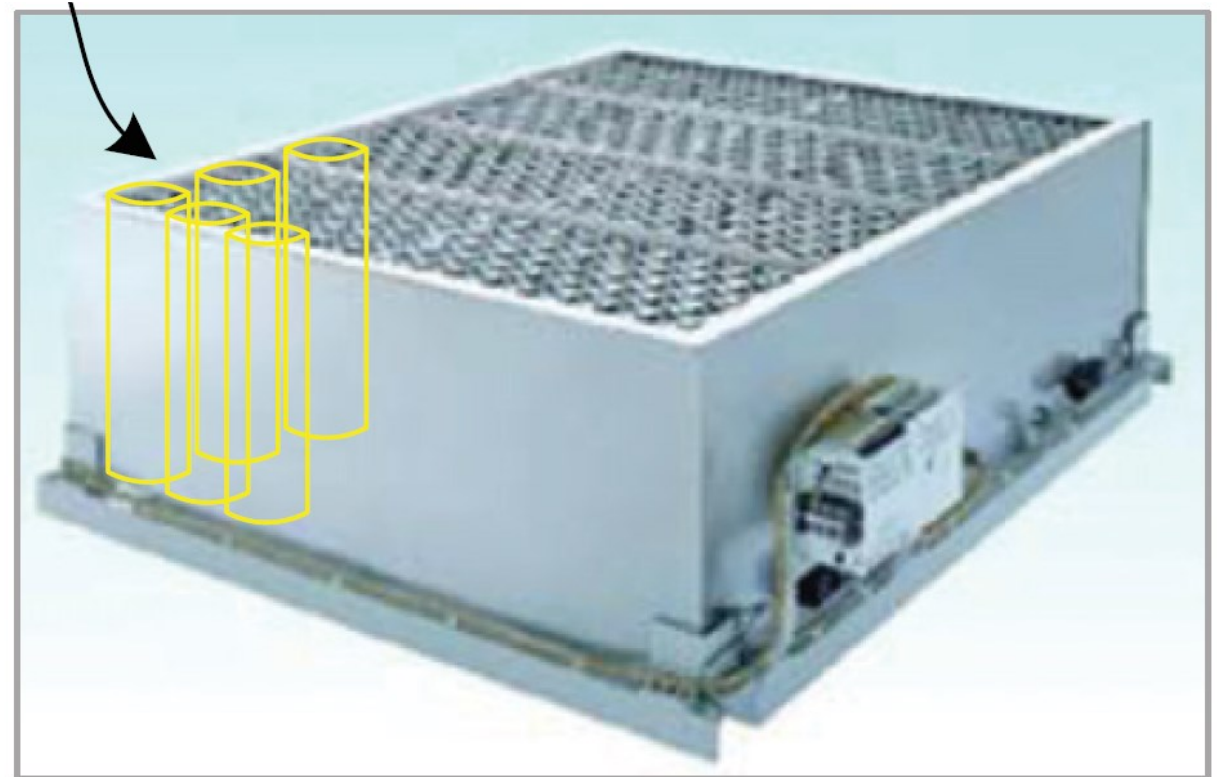
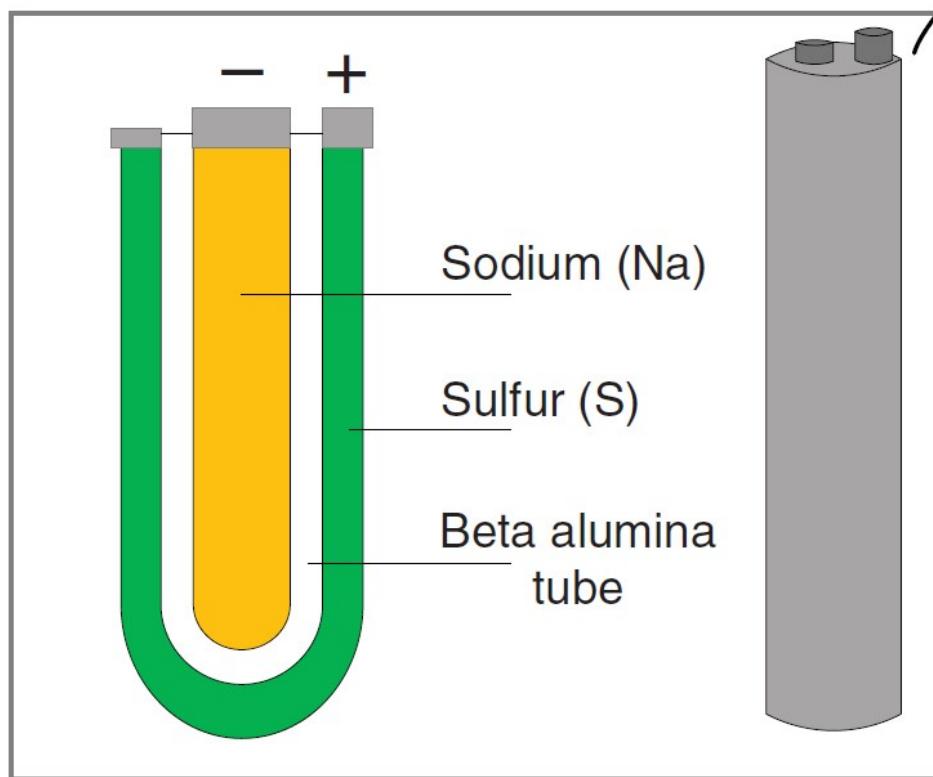


✓ Βασικά **μειονεκτήματα**:

- Υψηλό κόστος (παρεμφερές με το κόστος των μπαταριών ιόντων λιθίου)
- Πολύ υψηλή αυτό-εκφόρτιση (μεγαλύτερη από τις μπαταρίες Νικελίου - Καδμίου)
- Είναι μπαταρίες αργής εκφόρτισης. Επομένως, είναι ακατάλληλες για πολλές εφαρμογές στα ΣΗΕ



Μπαταρίες Θείου - Νατρίου



Πηγή: B. Robyns, B. Francois, G. Delile, C. Saudemont, "Energy Storage in Electric Power Grids," Wiley, 2015.



Μπαταρίες Θείου - Νατρίου



- ✓ Η κατασκευή αυτών των μπαταριών είναι κάπως διαφορετική σε σχέση με όσες παρουσιάστηκαν προηγουμένως
- ✓ Τα ηλεκτρόδια των στοιχείων της μπαταρίας είναι υγρά! Ενώ ο ηλεκτρολύτης (ο οποίος ταυτόχρονα λειτουργεί και ως διαχωριστής) είναι συμπαγής
- ✓ Το αρνητικό ηλεκτρόδιο (υγρό νάτριο) περιβάλλεται από τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος έχει σχήμα σωλήνα
- ✓ Το υλικό του ηλεκτρολύτη είναι κεραμική βήτα-αλουμίνη και το υλικό για το θετικό ηλεκτρόδιο είναι υγρό θείο
- ✓ Για να έρθουν τα ηλεκτρόδια στην υγρή τους κατάσταση, πρέπει να λιώσουν. Για το σκοπό αυτό χρειάζονται θερμοκρασίες της τάξης των 300–400 °C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, ο κεραμικός ηλεκτρολύτης είναι καλός αγωγός των ιόντων που παράγονται από τις χημικές αντιδράσεις. Για να διατηρηθεί αυτή η θερμοκρασία λειτουργίας, απαιτείται μια εξωτερική πηγή θερμότητας ή πάρα πολύ καλά επίπεδα θερμικής μόνωσης, με αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος



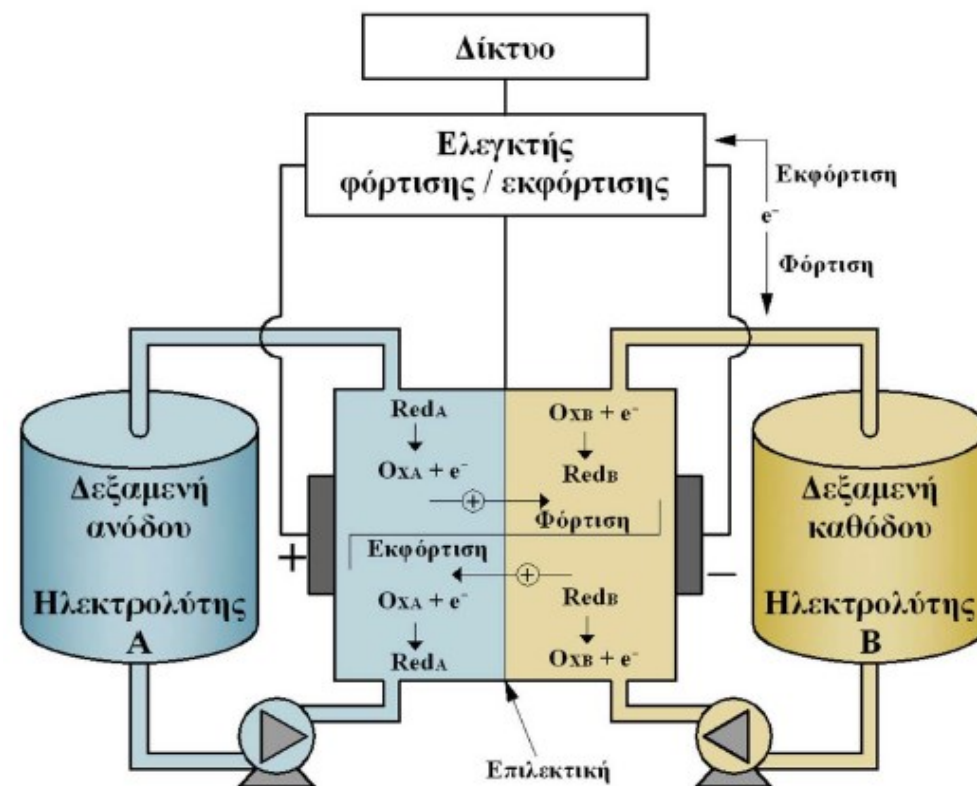
- ✓ Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι χημικές αντιδράσεις είναι εξώθερμες. Έτσι, η ενέργεια που απαιτείται για να διατηρηθεί η υψηλή θερμοκρασία της μπαταρίας είναι σχετικά μικρή. Κατ' επέκταση δεν επηρεάζεται ο βαθμός απόδοσης της μπαταρίας
- ✓ Βασικά **πλεονεκτήματα**:
 - Μεγάλη διάρκεια ζωής με πολλούς κύκλους φόρτισης εκφόρτισης (περίπου 4500)
 - Μικρότερο κόστος από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου
 - Μεγάλη απόδοση (φτάνει το 90%)
 - Γρήγορη απόκρισή τους σε μεταβατικά φαινόμενα. Αυτό της κάνει ιδιαίτερα ελκυστικές για εφαρμογές σε ΣΗΕ (ιδανικές για προσφορά υπηρεσιών ποιότητας ενέργειας, εξάλειψης αιχμών ηλεκτρικού φορτίου και άλλες επικουρικές υπηρεσίες προς το ηλεκτρικό δίκτυο)
 - Έχουν ήδη εγκατασταθεί σε πάνω από 300 ενεργειακές εφαρμογές σε όλο τον κόσμο, σε συνδυασμό με αιολικά πάρκα, υδροηλεκτρικούς, θερμικούς και σταθμούς συνδυασμένου κύκλου



- ✓ Βασικά **μειονεκτήματα**:
 - Ζητήματα διάβρωσης εξαιτίας του θείου
 - Ραγίσματα στον ηλεκτρολύτη εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών
 - Κατασκευάζονται μόνο από μια Ιαπωνική εταιρεία!
- ✓ Για τους παραπάνω λόγους η έρευνα για αυτό το είδος μπαταριών συνεχίζεται με έντονους ρυθμούς και στις μέρες μας

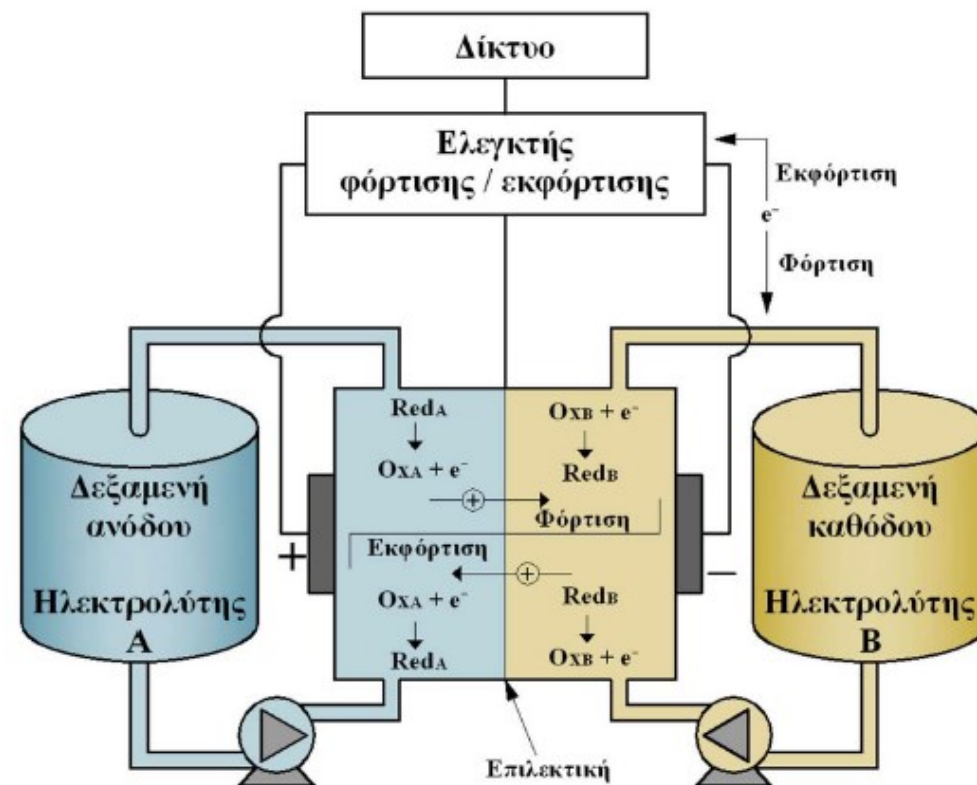


- ✓ Όπως και στην περίπτωση των συμβατικών μπαταριών, η αρχή λειτουργίας των μπαταριών ροής βασίζεται σε ηλεκτροχημικές αντιδράσεις
- ✓ Ωστόσο, οι μπαταρίες ροής διαφέρουν από τις συμβατικές στο γεγονός ότι ο ηλεκτρολύτης δεν αποθηκεύεται μόνιμα στις κυψέλες αλλά, αντίθετα, δύο υδατικά ηλεκτρολυτικά διαλύματα (Α και Β) περιέχονται σε ξεχωριστές δεξαμενές
- ✓ Μια ακόμα βασική τους διαφορά σε σχέση με τις συμβατικές μπαταρίες είναι ότι η ενέργεια αποθηκεύεται στο υγρό του ηλεκτρολύτη (ενώ στις συμβατικές μπαταρίες αποθηκεύεται στα δύο ηλεκτρόδια)





- ✓ Η σχεδίαση, λοιπόν, των συσσωρευτών ροής περιλαμβάνει δύο ανεξάρτητες εξωτερικές δεξαμενές αποθήκευσης ηλεκτρολύτη
- ✓ Τα ηλεκτρολυτικά υγρά χωρίζονται μεταξύ τους με μια μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων
- ✓ Η κυκλοφορία των ηλεκτρολυτών διαμέσου των κυψελών εξασφαλίζεται με τη χρήση αντλιών. (η χρήση των αντλιών επιφέρει κάποιες απώλειες στη διάταξη)
- ✓ Καθώς περνάνε από τη μεμβράνη ο ένας ηλεκτρολύτης οξειδώνεται και ο άλλος ανάγεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ρεύματος. Έτσι, η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική κατά την διαδικασία της εκφόρτισης





Μπαταρίες Ροής



Πηγή: B. Robyns, B. Francois, G. Delile, C. Saudemont, "Energy Storage in Electric Power Grids," Wiley, 2015.



- ✓ Στις μπαταρίες ροής, η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας και η ικανότητα παροχής ισχύος είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους!
- ✓ Αυξάνοντας τον όγκο των δεξαμενών αυξάνεται η αποθηκευόμενη ενέργεια, ενώ αυξάνοντας τον αριθμό των ηλεκτροχημικών στοιχείων αυξάνεται η ισχύς που το σύστημα μπορεί να δώσει
- ✓ Οι μπαταρίες ροής χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν:
 - ηλεκτρολύτη θειικού οξέος οξειδοαναγωγικών ζευγών βαναδίου (vanadium redox couples)
 - ηλεκτρολύτη βρωμιούχου ψευδαργύρου και
 - ηλεκτρολύτη βρωμιδίου του νατρίου/πολυθειούχου νατρίου



- ✓ Οι τρεις κατηγορίες μπαταριών ροής που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη διαφάνεια, παρουσιάζουν κάποια βασικά κοινά χαρακτηριστικά τα οποία είναι:
 - η δυνατότητα παροχής μεγάλων ποσών ισχύος, καθώς και η ικανότητα απόδοσης ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα έως και δέκα ώρες
 - η ευέλικτη διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης δεδομένου ότι η χωρητικότητα και η ικανότητα απόδοσης ισχύος είναι ανεξάρτητα μεγέθη
 - οι μπαταρίες ροής εμφανίζουν γρήγορη απόκριση και μπορούν να μεταβούν από λειτουργία φόρτισης σε λειτουργία εκφόρτισης σε περίπου 1 ms επειδή η διάρκεια των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής γίνεται σχεδόν ακαριαία
 - εύκολη αντικατάσταση ηλεκτρολυτών, και αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος απλά με την προσθήκη μεγαλύτερων δεξαμενών και περισσότερου ηλεκτρολύτη
 - δεν υποφέρουν από αυτοεκφόρτιση αφού οι ηλεκτρολύτες είναι αποθηκευμένοι ξεχωριστά και δε μπορούν να αντιδράσουν



- ✓ Τεχνικά έχουν όλες τις απαιτούμενες προδιαγραφές για υποστήριξη συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας
- ✓ Παρουσιάζουν το πολύ σημαντικό πλεονέκτημα ότι μπορούν να αποφορτίζονται πλήρως, χωρίς την πρόκληση βλάβης
- ✓ Μπορούν, επίσης, να επαναφορτίζονται άμεσα με την αλλαγή του υγρού του ηλεκτρολύτη, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να συλλέγεται ο χρησιμοποιημένος ηλεκτρολύτης και να φορτίζεται ηλεκτρικά εκ νέου
- ✓ Οι μπαταρίες ροής αναπτύσσονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος σε απομονωμένους οικισμούς, ενώ η σχεδιάσή τους τις καθιστά κατάλληλες για συνδυασμένη λειτουργία με μονάδες ΑΠΕ
- ✓ Έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε ΣΗΕ για ρύθμιση τάσης, διατήρηση συχνότητας, υποστήριξη ένταξης μονάδων ΑΠΕ



Συγκριτική Αξιολόγηση Μπαταριών



	Energy density (kW/kg)	Round Trip Efficiency (%)	Life Span (years)	Eco-friendliness
Li-ion 	1st 150–250	1st 95	1st 10–15	1st Yes
NaS 	2nd 125–150	2nd 75–85	2nd 10–15	2nd No
Flow 	3rd 60–80	3rd 70–75	4th 5–10	4th No
Ni-Cd 	4th 40–60	4th 60–80	3rd 10–15	3rd No
Lead Acid 	5th 30–50	5th 60–70	5th 3–6	5th No

Li-ion = lithium-ion, Na-S = sodium-sulfur, Ni-Cd = nickel-cadmium.

Source: Korea Battery Industry Association 2017 “Energy storage system technology and business model”.



Συγκριτική Αξιολόγηση Μπαταριών



	Lead-acid	Li-ion	Ni-MH	Flow	NaS
Εφαρμοζόμενη Ισχύς (kW ή MW)	≤ 10 MW	≤ 10 MW	≥ 10 MW	100 kW – 10 MW	≥ 100 MW
Αυτοεκφόρτιση (%/ημέρα)	0.1-0.3%	0.1-0.3%	0.2-0.6%	0.01%	20%
Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/kg)	75-300	150-315	700-1000	100-150	150-230
Διάρκεια Ζωής (έτη)	3-10	10-15	15-20	10-25	15
Κύκλοι Ζωής (για 80% DoD)	200 έως 300	2000 έως 3000	2000	1500 έως 15000	4000 έως 40000
Βαθμός Απόδοσης	70-90%	85-95%	80-90%	70-85%	80-90%



Συγκριτική Αξιολόγηση Μπαταριών



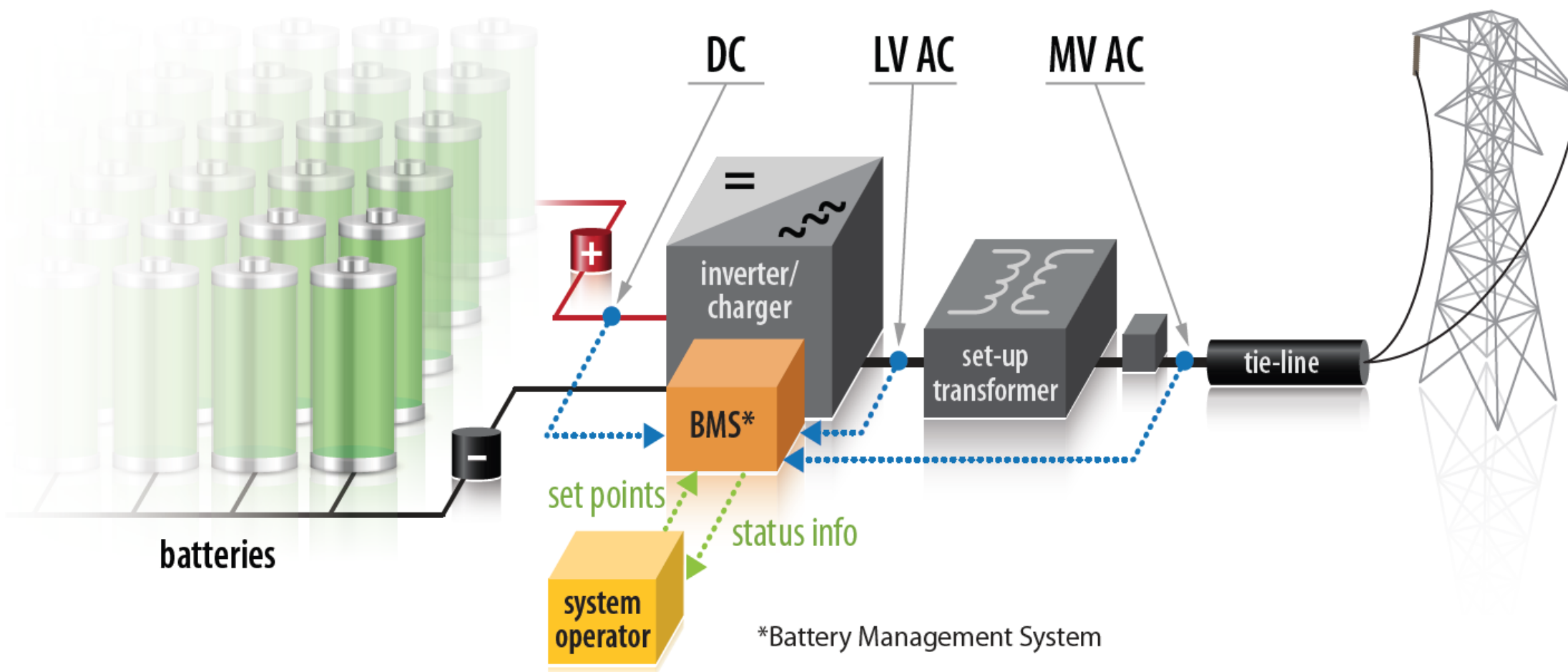
	Lead-acid	Li-ion	Ni-MH	Flow	NaS
Αρχικό Κόστος Κεφαλαίου (€/kW)	250 έως 650	320 έως 800	900 έως 1100	1000 έως 1600	800 έως 1600
Αρχικό Κόστος Κεφαλαίου (€/kWh)	120 έως 400	400 έως 1200	250 έως 500	300 έως 650	100 έως 200
Ετήσιο Κόστος Συντήρησης (€/kWh-έτος)	25	20	10	25	30-65



Συστήματα Μπαταριών και ΣΗΕ

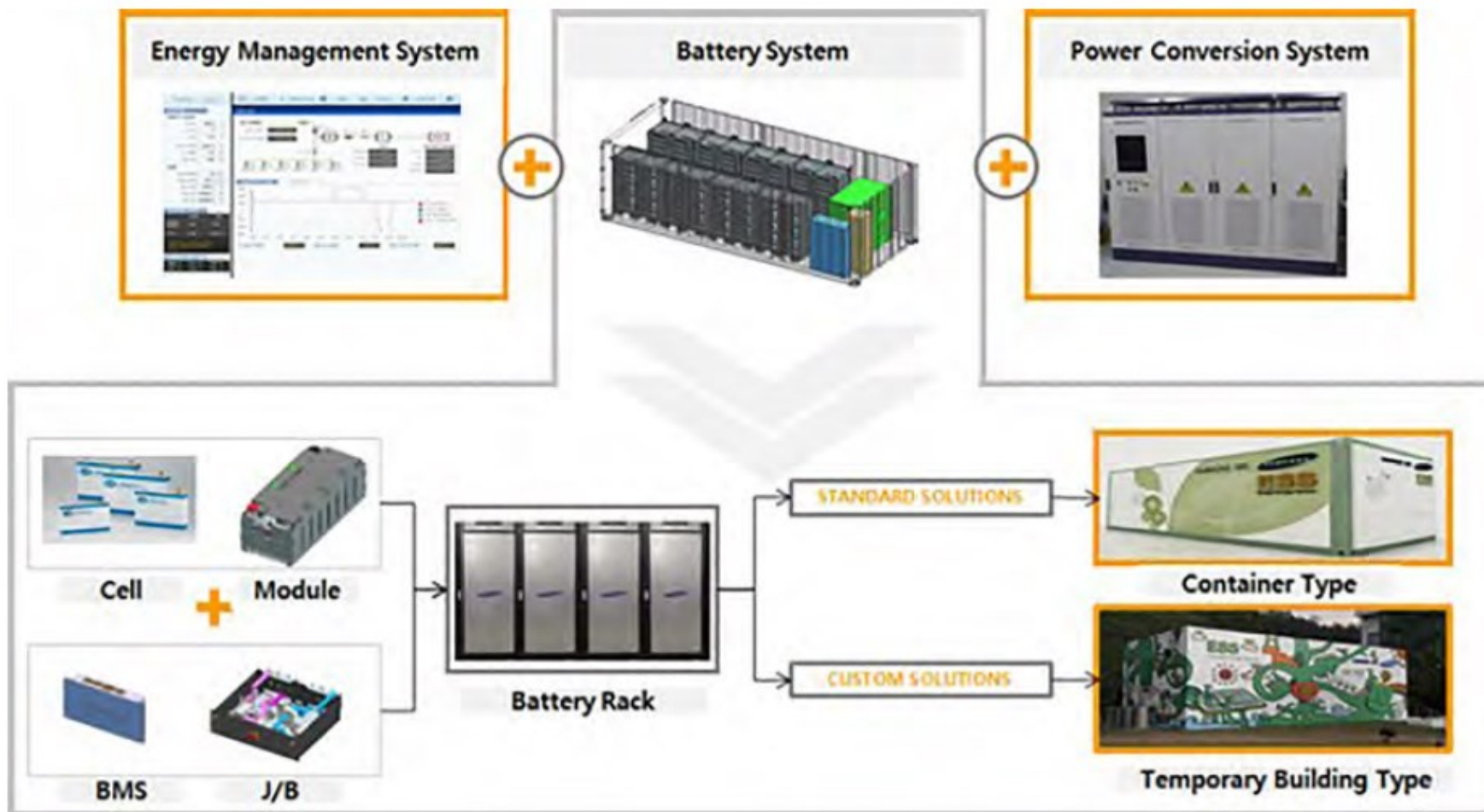


- ✓ Σύστημα αποθήκευσης μπαταριών συνδεδεμένο στη μέση τάση:





Συστήματα Μπαταριών και ΣΗΕ

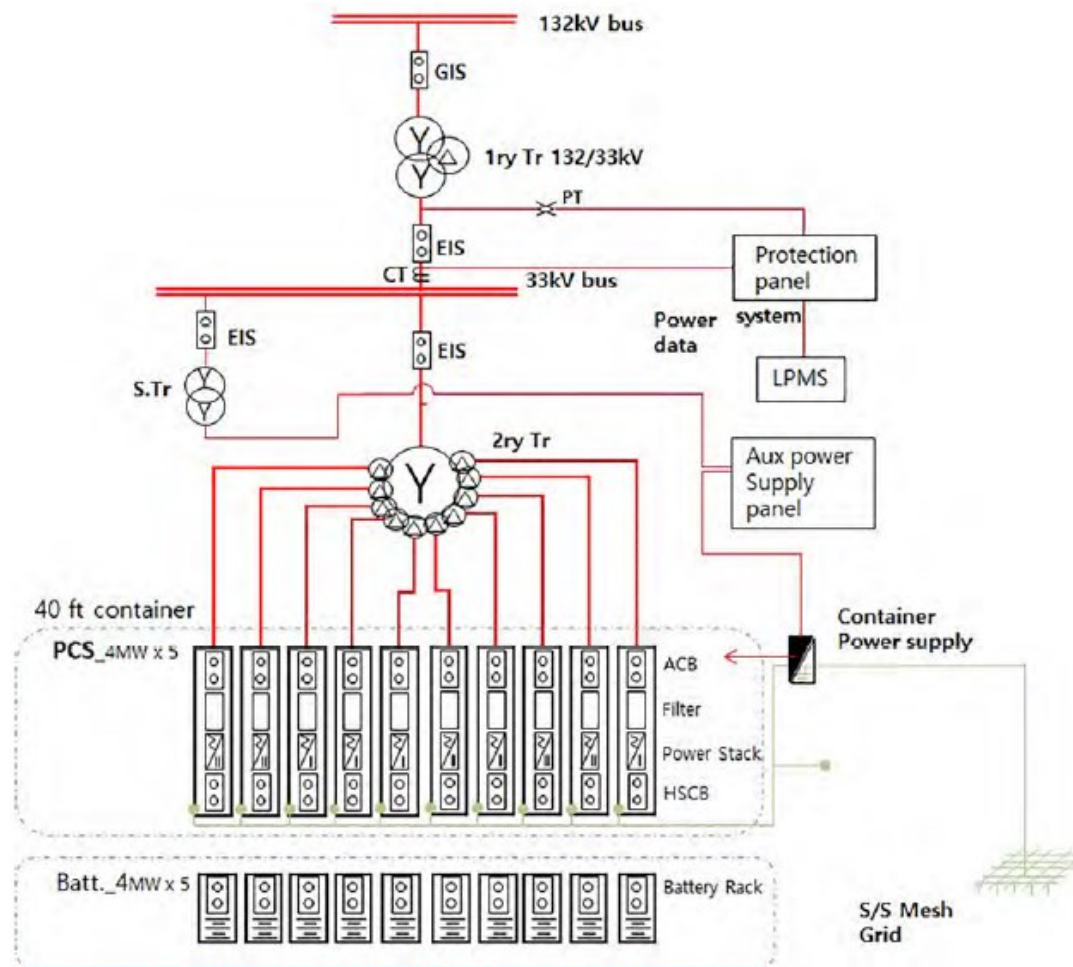


BMS = battery management system, J/B = Junction box.

Source: Korea Battery Industry Association 2017 “Energy storage system technology and business model”.



Συστήματα Μπαταριών και ΣΗΕ



ACB = air circuit breaker, BESS = battery energy storage system, EIS = electric insulation switchgear, GIS = gas insulation switchgear, HSCB = high-speed circuit breaker, kV = kilovolt, LPMS = local power management system, MW = megawatt, PCS = power conversion system, S/S = substation system.

Source: Korea Battery Industry Association 2017 "Energy storage system technology and business model".



- ✓ Σύστημα αποθήκευσης μπαταριών συνδεδεμένο στη μέση τάση, αποτελείται από:
 - Τις μπαταρίες
 - Το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας (battery management system)
 - Το μετατροπέα ισχύος
 - Το μετασχηματιστή ανύψωσης
 - Τα καλώδια διασύνδεσης
 - Τα μέσα προστασίας
- ✓ Ο διαχειριστής του συστήματος μέσω του συστήματος διαχείρισης των μπαταριών μπορεί να επιτηρεί / παρακολουθεί τη λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης και να αποστέλλει σε αυτό εντολές (set points)



- ✓ Το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση και τη σωστή λειτουργία της μπαταρίας. Είναι για παράδειγμα υπεύθυνο για την προστασία της μπαταρίας, την παρακολούθηση της κατάστασης της, καθώς και για τον υπολογισμό μιας σειρά παραμέτρων
- ✓ Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα διαχείρισης παρακολουθεί:
 - Την τάση (τη συνολική τάση της μπαταρίας και την τάση των επι μέρους κελιών)
 - Τη θερμοκρασία (μέση θερμοκρασία και τη θερμοκρασία όλων των επι μέρους κελιών)
 - Το ρεύμα εισόδου και εξόδου της μπαταρίας



- ✓ Το σύστημα διαχείρισης μπαταρίας υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο μια σειρά παραμέτρων:
 - Κατάσταση φόρτισης (state of charge)
 - Βάθος εκφόρτισης (depth of discharge)
 - Την κατάσταση υγείας της μπαταρίας (state of health). Υπολειπόμενη χωρητικότητα της μπαταρίας ως ποσοστό της αρχικής διαθέσιμης χωρητικότητας
 - Τη συνολική ενέργεια που έχει “παραδώσει” η μπαταρία κατά τη διάρκεια της ζωής της
 - Τη συνολική διάρκεια λειτουργία της μπαταρίας σε ώρες (από τη στιγμή της πρώτης εκφόρτισης)
 - Το συνολικό αριθμό κύκλων φόρτισης / εκφόρτισης



- ✓ Γιατί είναι σημαντικό το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας??
 - Προστατεύει τη μπαταρία από:
 - Υπερ-ρεύματα κατά τη φόρτιση ή την εκφόρτιση
 - Υπέρ-τάσεις (κατά τη φόρτιση)
 - Υπό-τάσεις (κατά την εκφόρτιση)
 - Αυξομειώσεις θερμοκρασίας
 - Μεταβολές πίεσης
 - Βραχυκυκλώματα και ρεύματα διαρροής
 - Βάθος εκφόρτισης (depth of discharge)



- ✓ Γιατί είναι σημαντικό το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας??
 - Εμποδίζει τυχόν λειτουργία σε μη ασφαλή όρια με τους εξής τρόπους:
 - Ενεργοποιεί εσωτερικούς διακόπτες που έχουν στόχο να απομονώσουν τη μπαταρία όταν αυτή δεν λειτουργεί σε ασφαλή όρια
 - Ζητώντας από τις συσκευές στις οποίες είναι συνδεδεμένη η μπαταρία να μειώσουν τη χρήση της
 - Ελέγχοντας τη θερμοκρασία της μπαταρίας, χρησιμοποιώντας ανεμιστήρες και μηχανισμούς ψύξης / θέρμανσης