



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/>



- ✓ Στην Οδηγία 2019/944 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, **ως αποθήκευση ενέργειας** στο περιβάλλον των ΣΗΕ **ορίζεται**: «η αναβολή της τελικής χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε χρονική στιγμή μεταγενέστερη από αυτή της παραγωγής της ή η μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί, η αποθήκευση της εν λόγω ενέργειας, και η μεταγενέστερη εκ νέου μετατροπή της εν λόγω ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια ή η χρήση σε διαφορετικό φορέα ενέργειας»
- ✓ Η αποθήκευσης ενέργειας για την επίτευξη των στόχων απανθρακοποίησης των ΣΗΕ αποτελεί αναγκαιότητα
- ✓ Δεν πρόκειται απλώς για μια ακόμα πηγή ευελιξίας, μαζί με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, την απόκριση της ζήτησης και τις διασυννοριακές διασυνδέσεις, αλλά για τον **μοναδικό εγχώριο πόρο** ο οποίος μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά καταστάσεις συστηματικής υπερπαραγωγής από ΑΠΕ και ετεροχρονισμού της ως προς τη ζήτηση, οι οποίες χαρακτηρίζουν τα συστήματα υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ. Είναι επίσης βασική προϋπόθεση ώστε η παραγωγή ΑΠΕ να καλύψει τις απαιτήσεις επάρκειας ισχύος των αυριανών πλήρως απανθρακοποιημένων συστημάτων



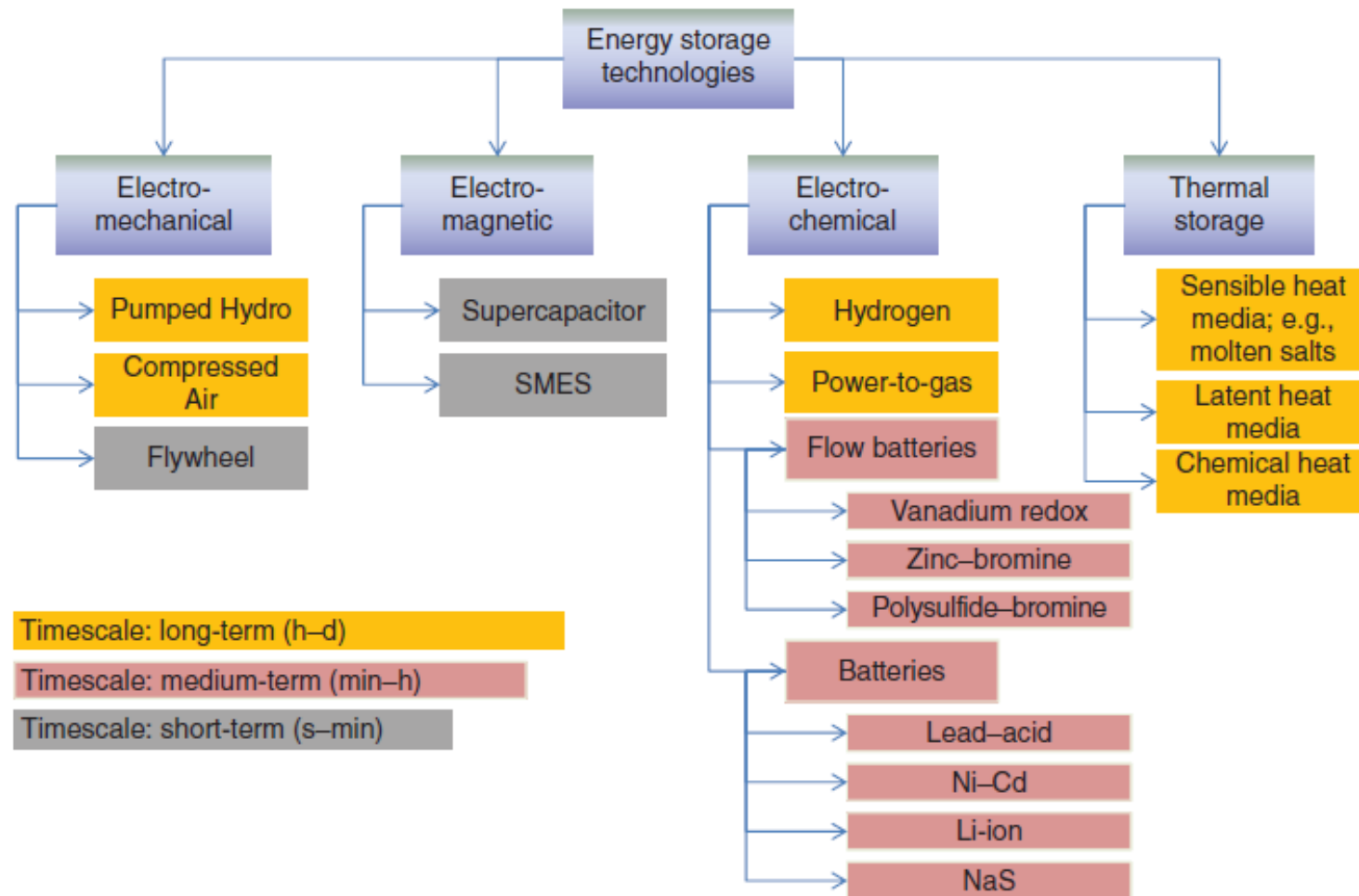
- ✓ Η αποθήκευση αναδεικνύεται σε σημαντικό εργαλείο διαχείρισης της λειτουργίας των σύγχρονων ΣΗΕ
- ✓ Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται διεθνώς ένα διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων αποθήκευσης ενέργειας
- ✓ Το ενδιαφέρον αυτό σχετίζεται άμεσα με τη μεγάλη ανάπτυξη των ΑΠΕ και τις ανάγκες αντιστάθμισης της μεταβλητότητάς τους



Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας



- ✓ Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση για την ταξινόμηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ΣΑΕ) είναι ο προσδιορισμός ανάλογα με τη μορφή της χρησιμοποιούμενης ενέργειας
- ✓ Στο διπλανό σχήμα, τα ΣΑΕ ταξινομούνται σε συστήματα ηλεκτρομηχανικής, ηλεκτρομαγνητικής, ηλεκτροχημικής και θερμικής αποθήκευσης



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

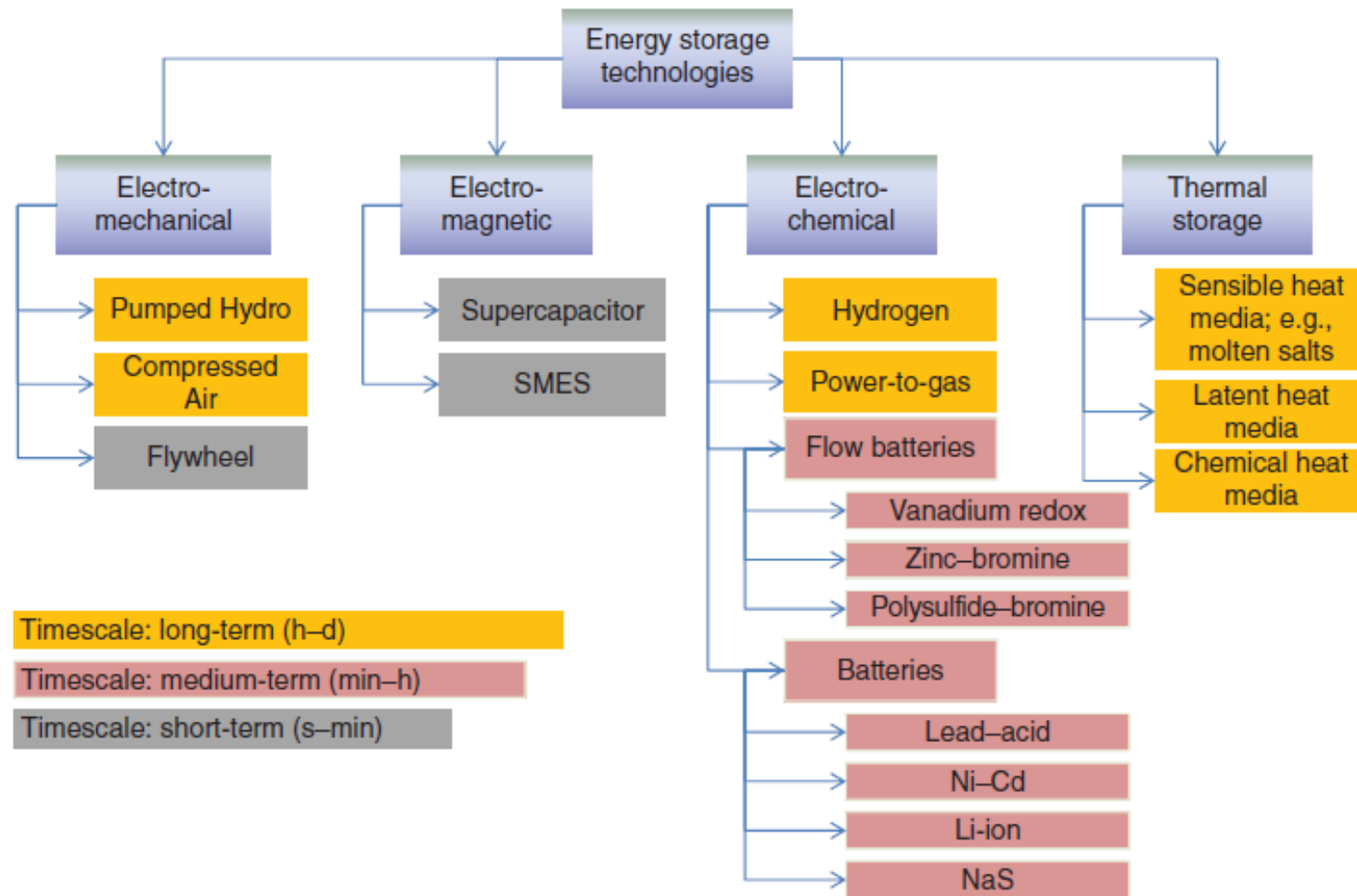


Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας



✓ Κάθε ΣΑΕ έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά:

- Κόστους
- Τεχνολογικής ωρίμανσης
- Αυτονομίας
- Πυκνότητας ενέργειας
- Πυκνότητας ισχύος
- Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά καθορίζουν τα όρια εφαρμογών κάθε ΣΑΕ



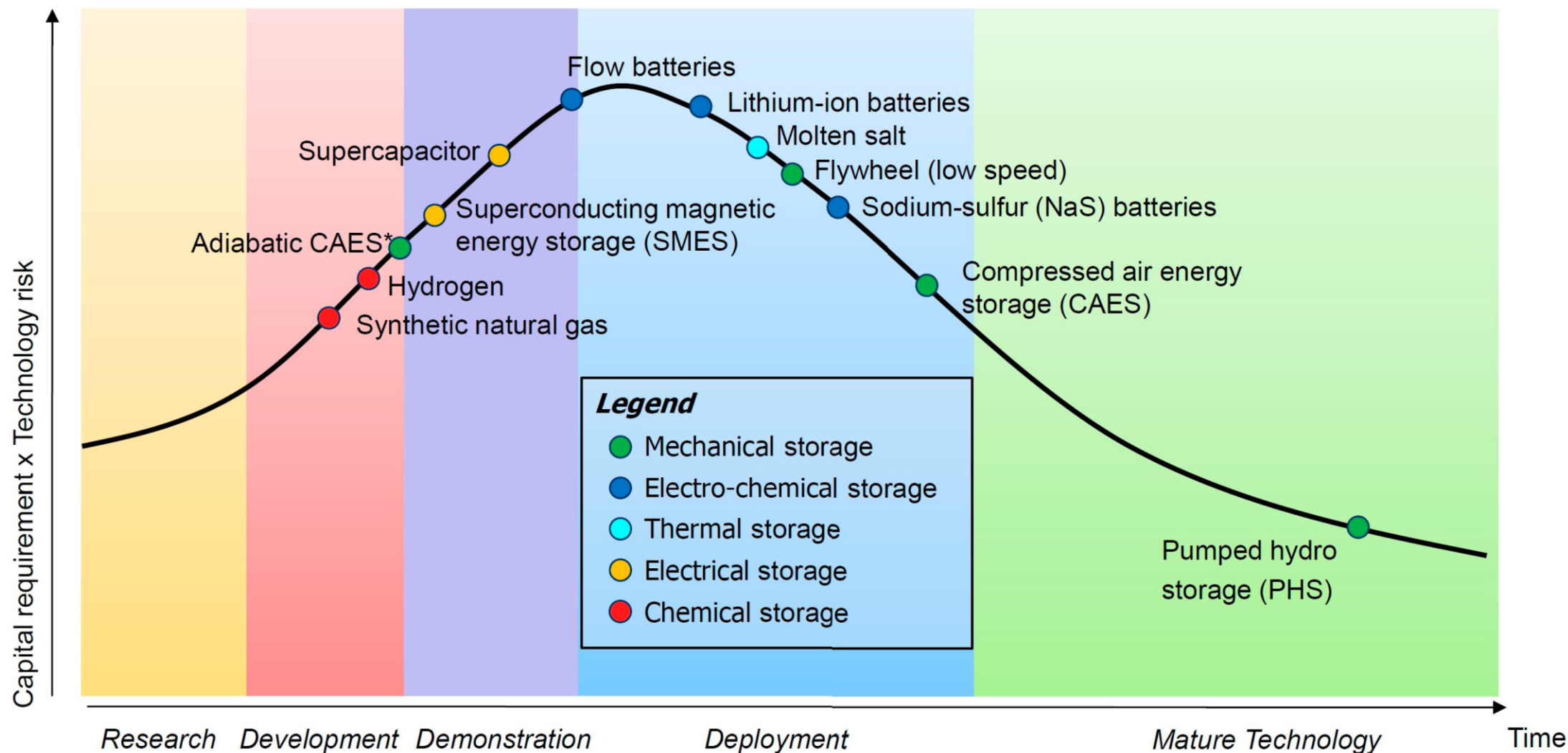
Πηγή: F. Diaz- Gonzalez, A. Sumper, and O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in Power Systems," Wiley, 2016.



- ✓ 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 κάποιας τεχνολογίας (σε τέτοιες περιπτώσεις το επίπεδο εμπιστοσύνης για τα διαθέσιμα δεδομένα είναι υψηλό)
- ✓ Το επίπεδο ωριμότητας κάθε τεχνολογίας μπορεί να ενταχθεί σε μία από τις εξής τρεις κατηγορίες:
 - **Εμπορική χρήση:** σημαντική εμπειρία από μονάδες ήδη σε λειτουργία
 - **Πιλοτικές εφαρμογές:** η γενική ιδέα εξετάζεται στην πράξη σε εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας (δοκιμαστικής φύσης)
 - **Έρευνα και ανάπτυξη:** η γενική ιδέα ακόμα αναπτύσσεται και δοκιμάζεται ο σχετικός εξοπλισμός μέσα από μετρήσεις, προσομοιώσεις και μελέτες



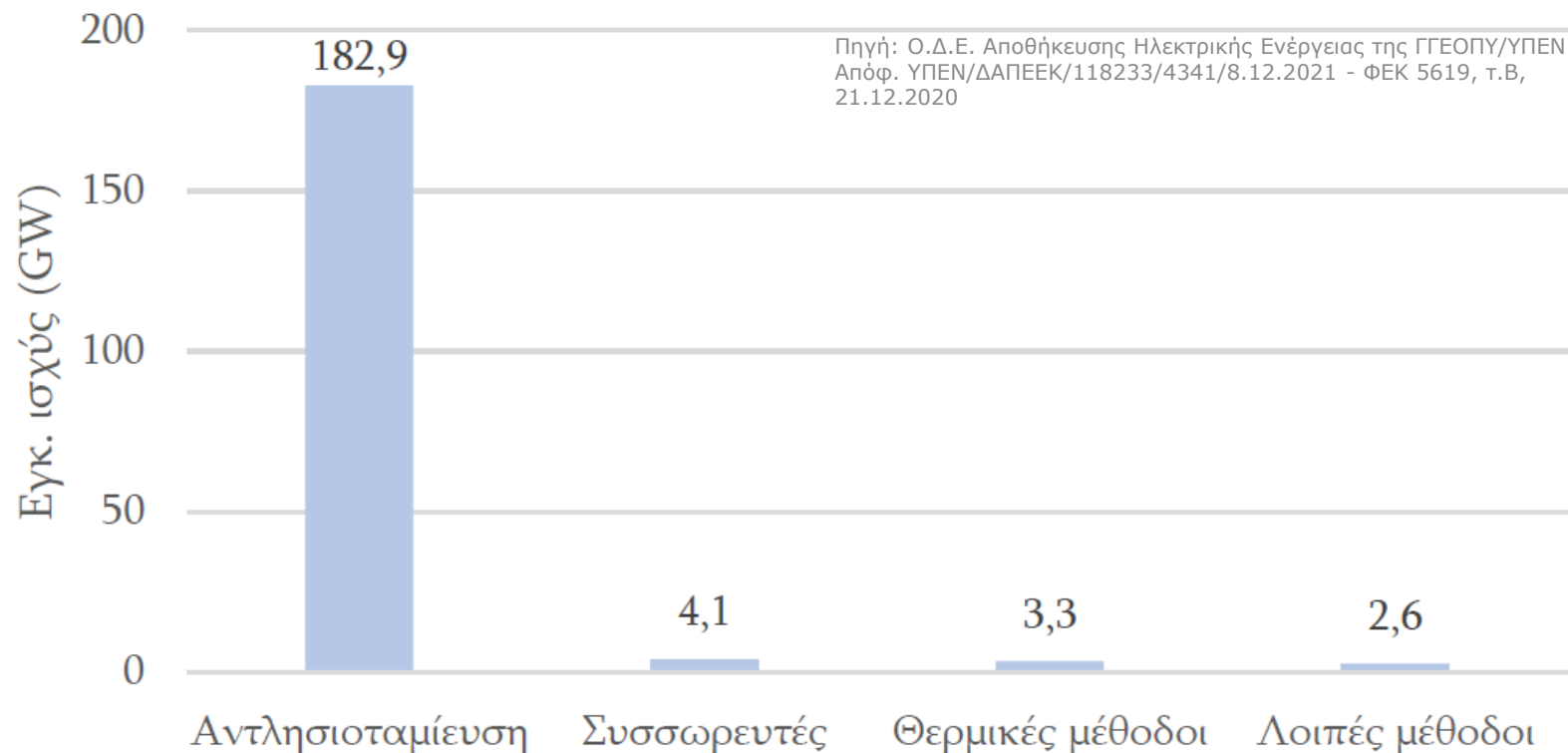
Ωριμότητα Τεχνολογιών ΣΑΕ



Πηγή: J. Moore and B. Shabani, "A Critical Study of Stationary Energy Storage Policies in Australia in an International Context: The Role of Hydrogen and Battery Technologies," *Energies*, 9 (9), 674, 2016.



- ✓ Κυρίαρχη τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι και σήμερα είναι η αντλησιοταμίευση, με **εγκατεστημένη ισχύ παγκοσμίως** περί τα 183 GW, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα που αποτυπώνεται η εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία αποθήκευσης (στοιχεία Νοεμβρίου 2020)

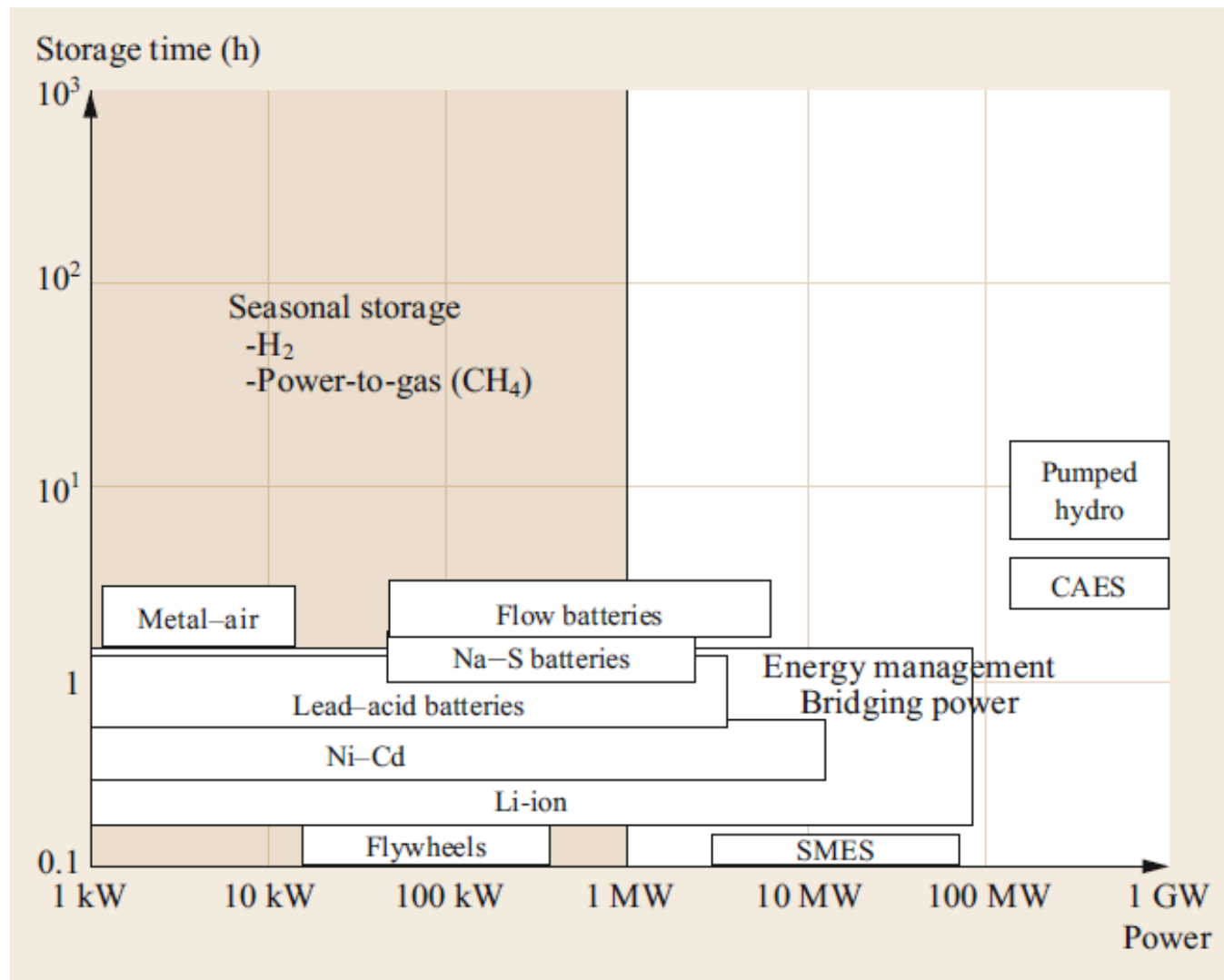




Τυπικά Μεγέθη ΣΑΕ



- ✓ Για να επιλεγεί το σωστό ΣΑΕ (η ενδεδειγμένη λύση για μια δεδομένη εφαρμογή), είναι σημαντικό να υπάρχει μια συγκριτική αξιολόγηση της χωρητικότητας και της απόδοσης των υφιστάμενων τεχνολογιών
- ✓ Αρχικά, πρέπει να καθοριστεί το εύρος ισχύος
- ✓ Στη συνέχεια, θα πρέπει να οριστεί η ενεργειακή χωρητικότητα με βάση την αναμενόμενη/επιθυμητή χρονική αυτονομία



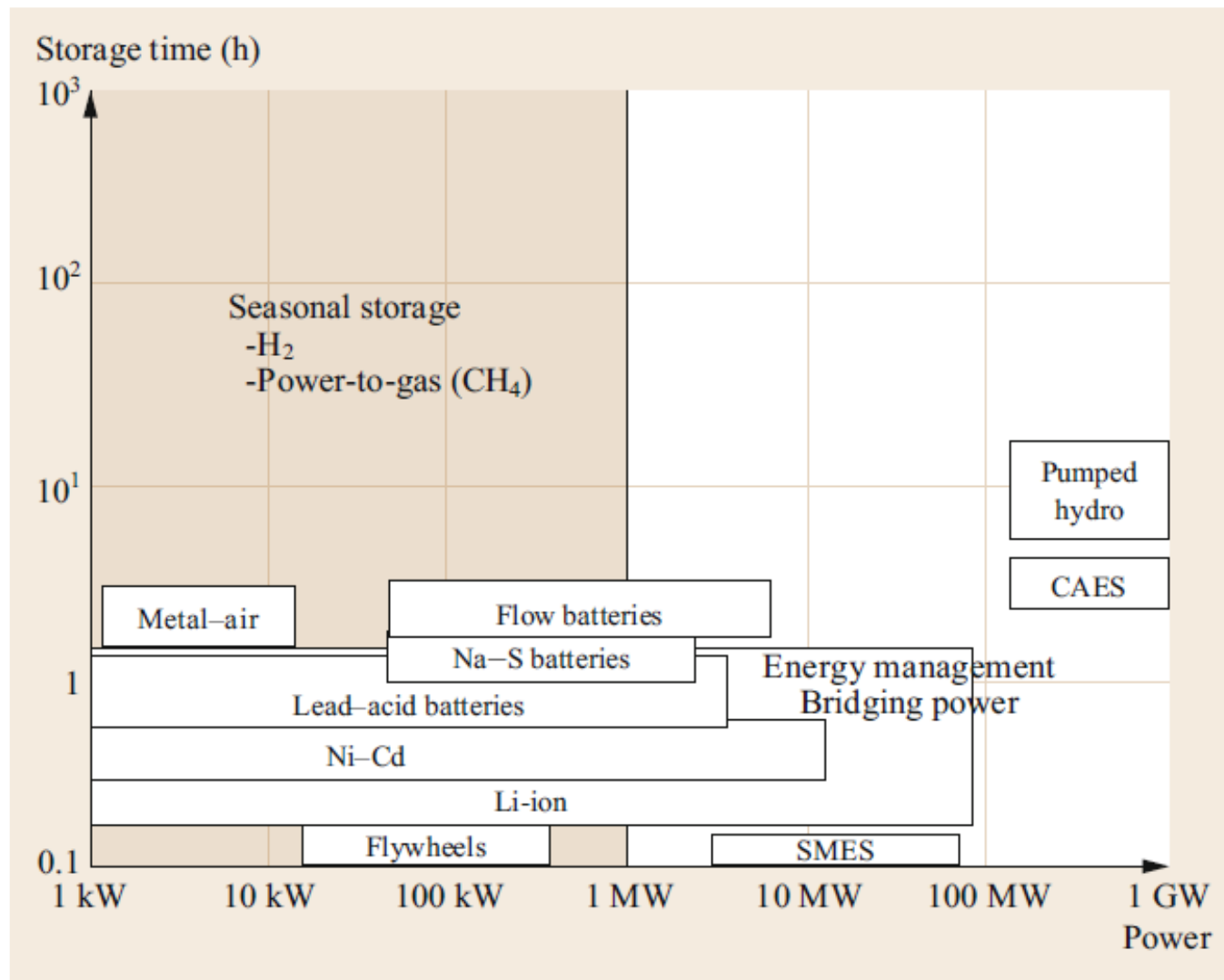
Πηγή: Κ. Ο. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



Τυπικά Μεγέθη ΣΑΕ



- ✓ Στο διπλανό σχήμα παρουσιάζεται η ενέργεια και ισχύς ενός μεγάλου εύρους τεχνολογιών ΣΑΕ. Συγκεκριμένα, εξετάζονται μπαταρίες, συστήματα αντλησιοταμίευσης (Pumped Hydro), συστήματα αποθήκευσης πεπιεσμένου αέρα (CAES), συστήματα υπερ-αγώγιμης αποθήκευσης (SMES), σφόνδυλοι (flywheels), συστήματα παραγωγής υδρογόνου, κλπ



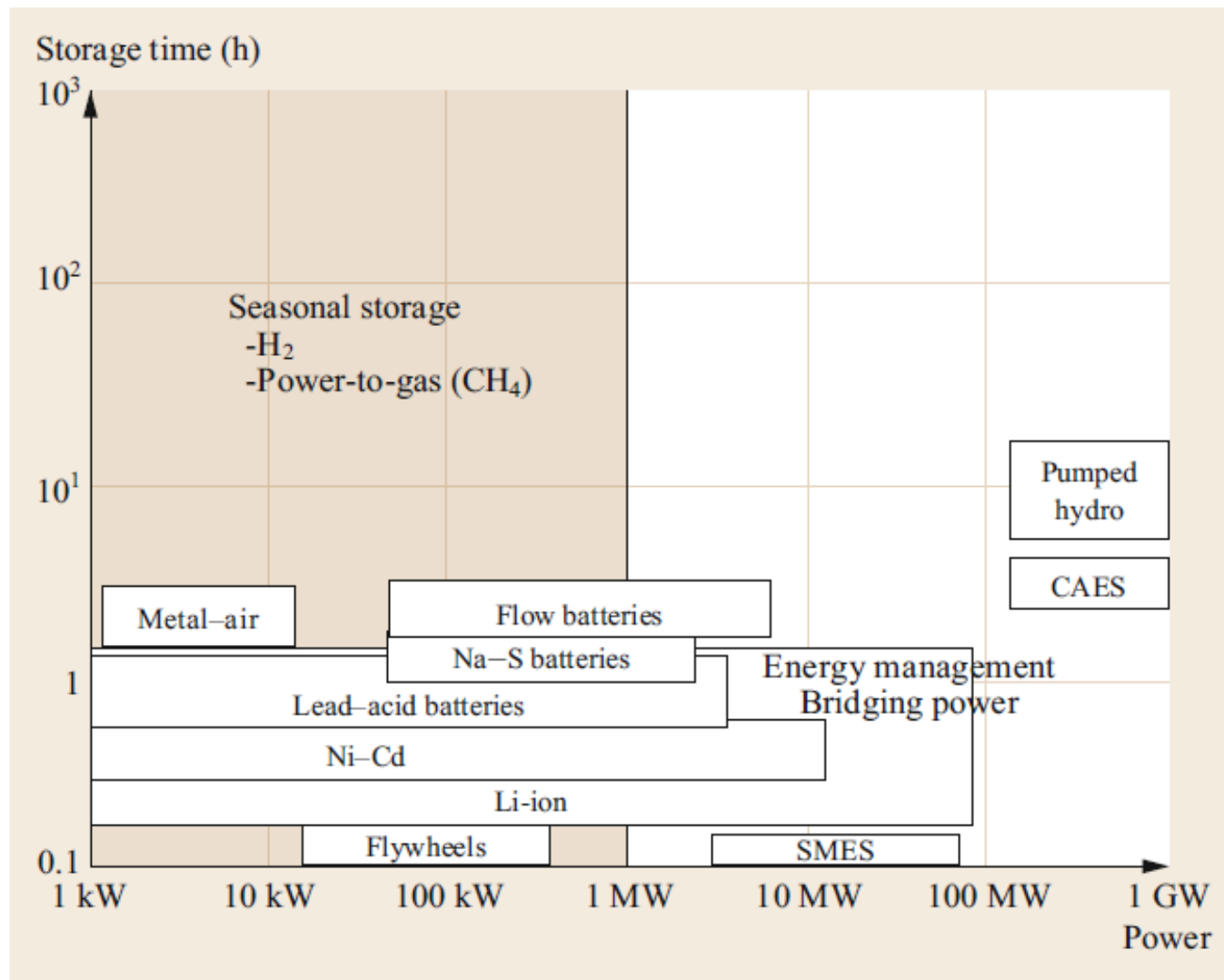
Πηγή: Κ. Ο. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



Τυπικά Μεγέθη ΣΑΕ



- ✓ Για τις μπαταρίες, οι τιμές που παρουσιάζονται στο διπλανό σχήμα αντικατοπτρίζουν μερικές από τις πιο διαδεδομένες υλοποιήσεις που υπάρχουν διαθέσιμες στις μέρες μας
- ✓ Οι τεχνολογίες των μπαταριών αναμένεται να βελτιωθούν περαιτέρω τα επόμενα χρόνια, οδηγώντας σε υψηλότερες αποδόσεις και μεγαλύτερες χωρητικότητες (και μικρότερο κόστος σε σχέση με σήμερα)



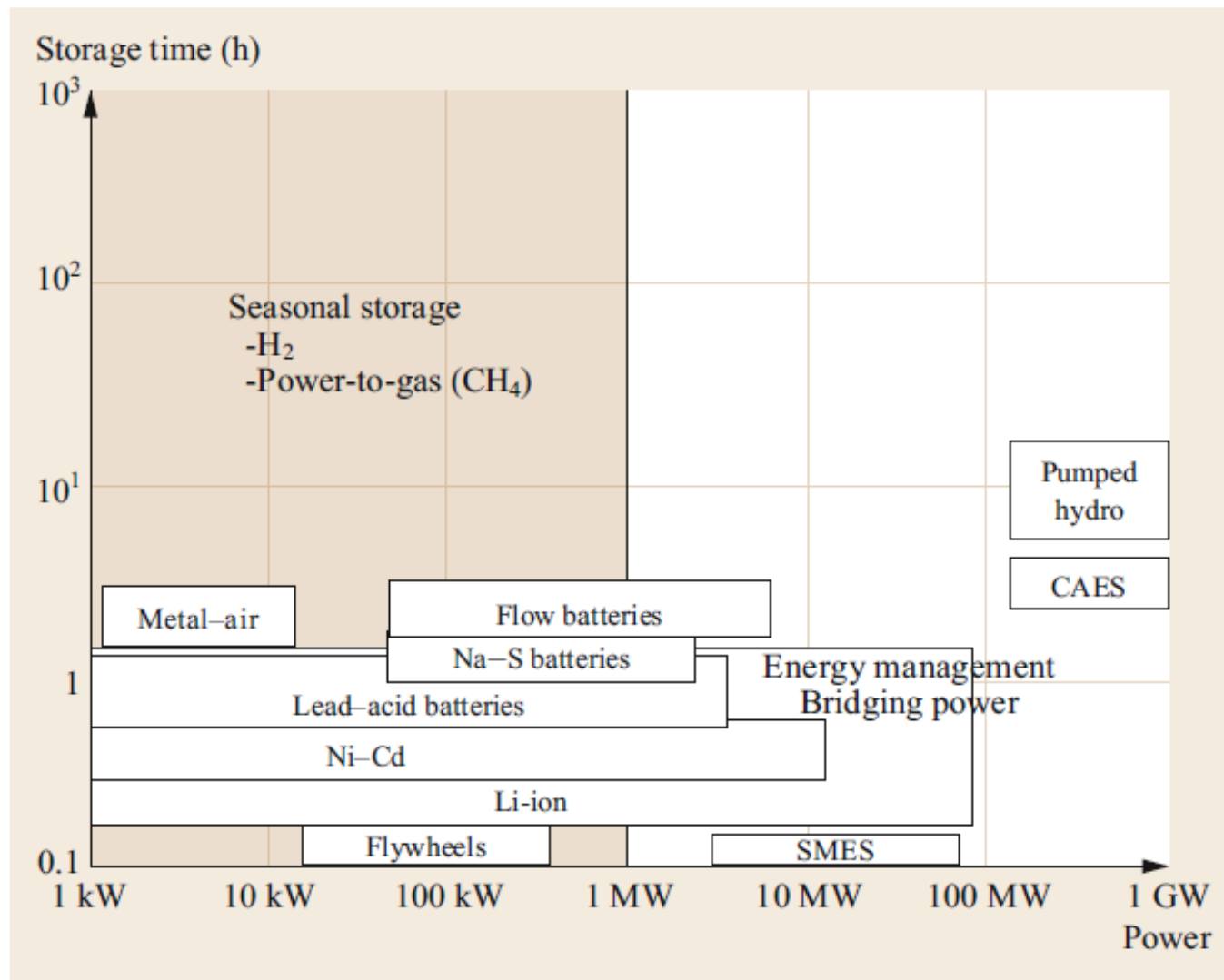
Πηγή: Κ. Ο. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



Τυπικά Μεγέθη ΣΑΕ



- ✓ Ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αυτονομία κάθε συστήματος σε ώρες
- ✓ Ο οριζόντιος άξονας απεικονίζει την ισχύ κάθε συστήματος. Η ισχύς των ΣΑΕ που εξετάζονται κυμαίνεται από 1 kW έως 1 GW
- ✓ Το γινόμενο της ισχύος με το χρόνο δίνει την ενέργεια που αποθηκεύεται σε κάθε ΣΑΕ
- ✓ Η ενέργεια πρακτικά αντιστοιχεί στην επιφάνεια που ορίζεται από τις οριζόντιες και κατακόρυφες γραμμές του διαγράμματος



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

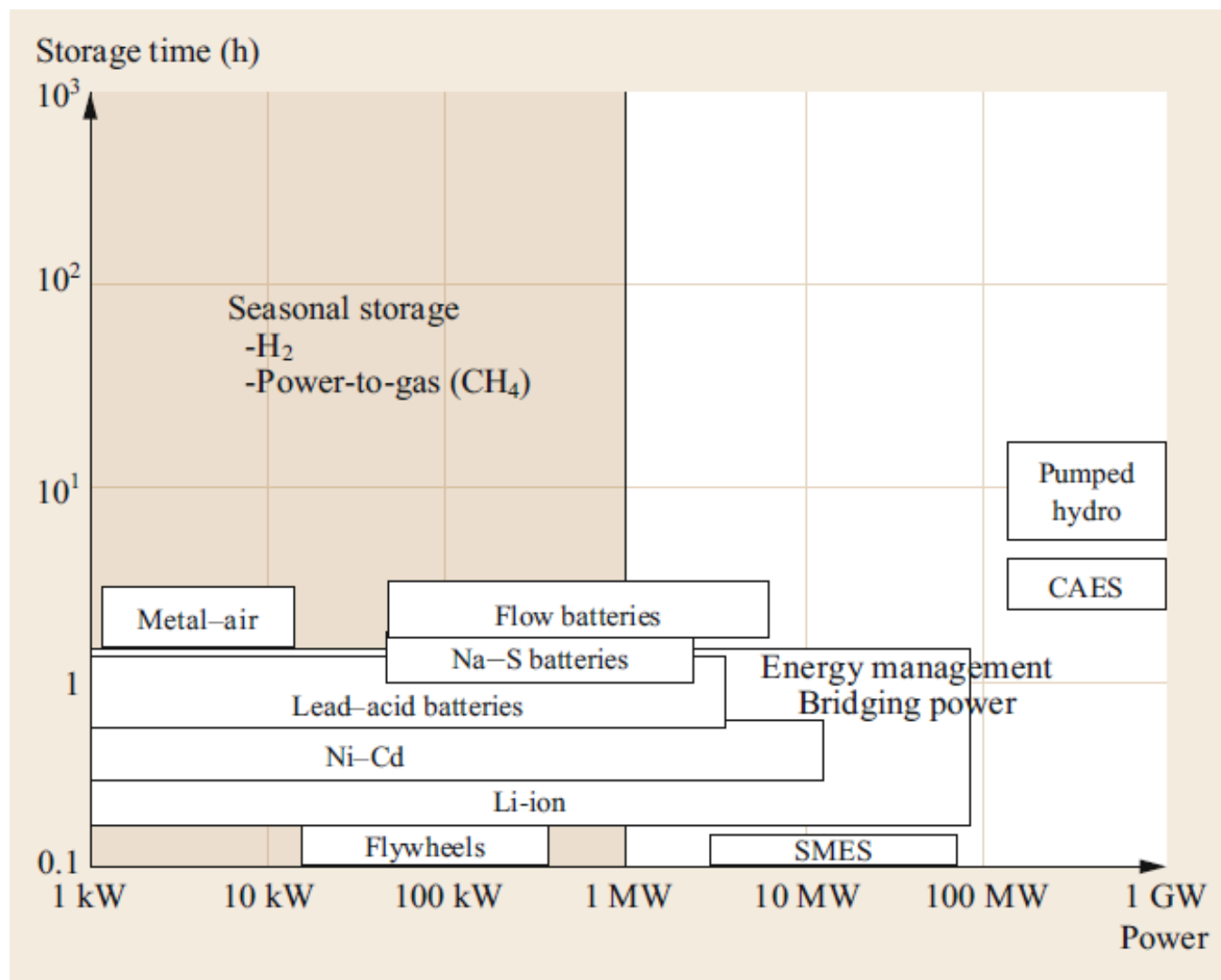


Τυπικά Μεγέθη ΣΑΕ



$$P(t) = \frac{dE}{dt}$$

- ✓ P η ισχύς σε W
- ✓ E η ενέργεια σε kWh
- ✓ t ο χρόνος σε h



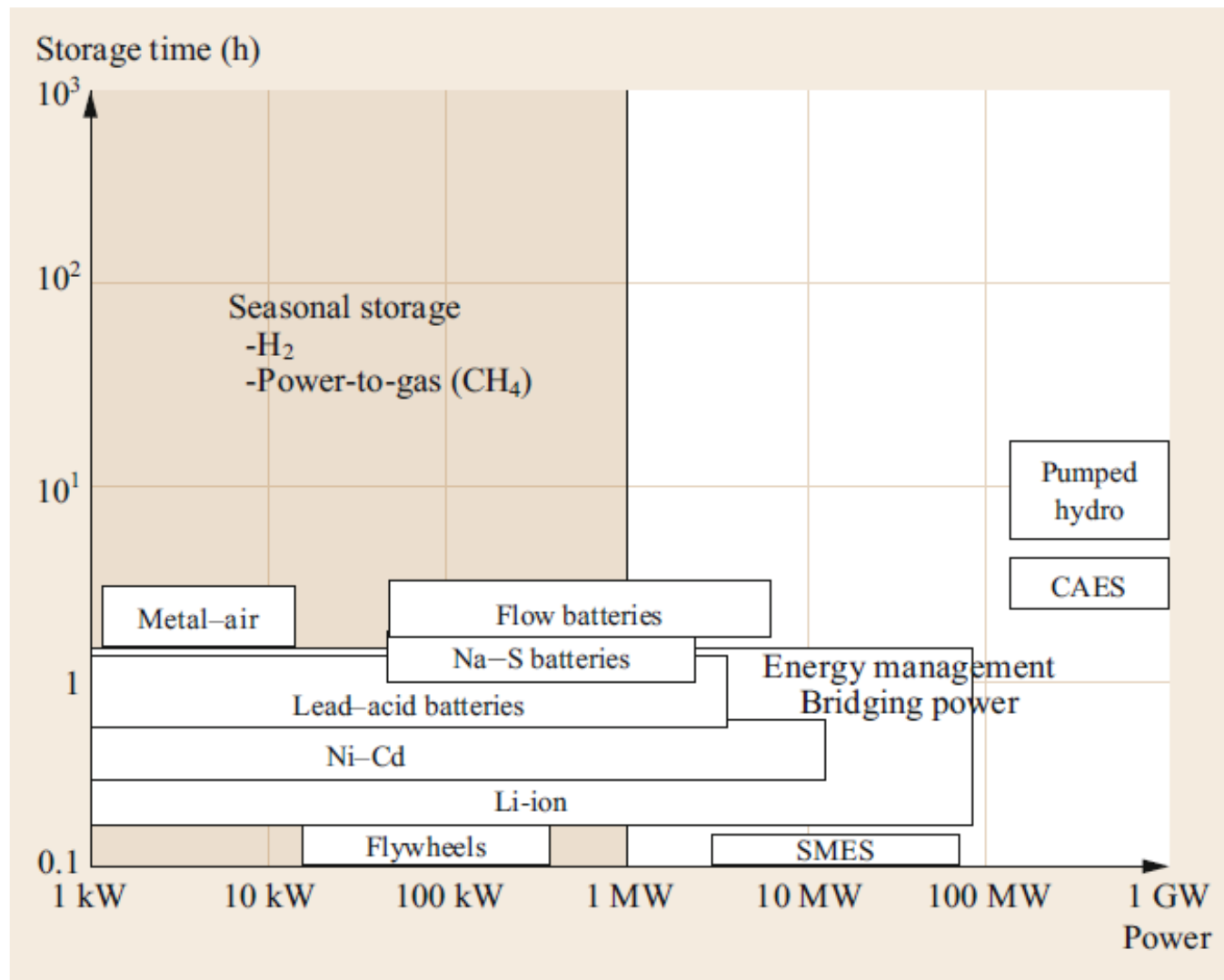
Πηγή: Κ. Ο. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



Τυπικά Μεγέθη ΣΑΕ



- ✓ Σχετικά με την αυτονομία, σε πρακτικές εφαρμογές ενδιαφερόμαστε για ΣΑΕ που μπορούν να καλύψουν ένα φορτίο για μερικές δεκάδες ώρες
- ✓ Για μεγαλύτερους χρόνους αυτονομίας θα πρέπει να καταφύγουμε σε λύσεις «εποχιακής αποθήκευσης». Π.χ. παραγωγής υδρογόνου μέσω της αξιοποίησης ενέργεια από ΑΠΕ



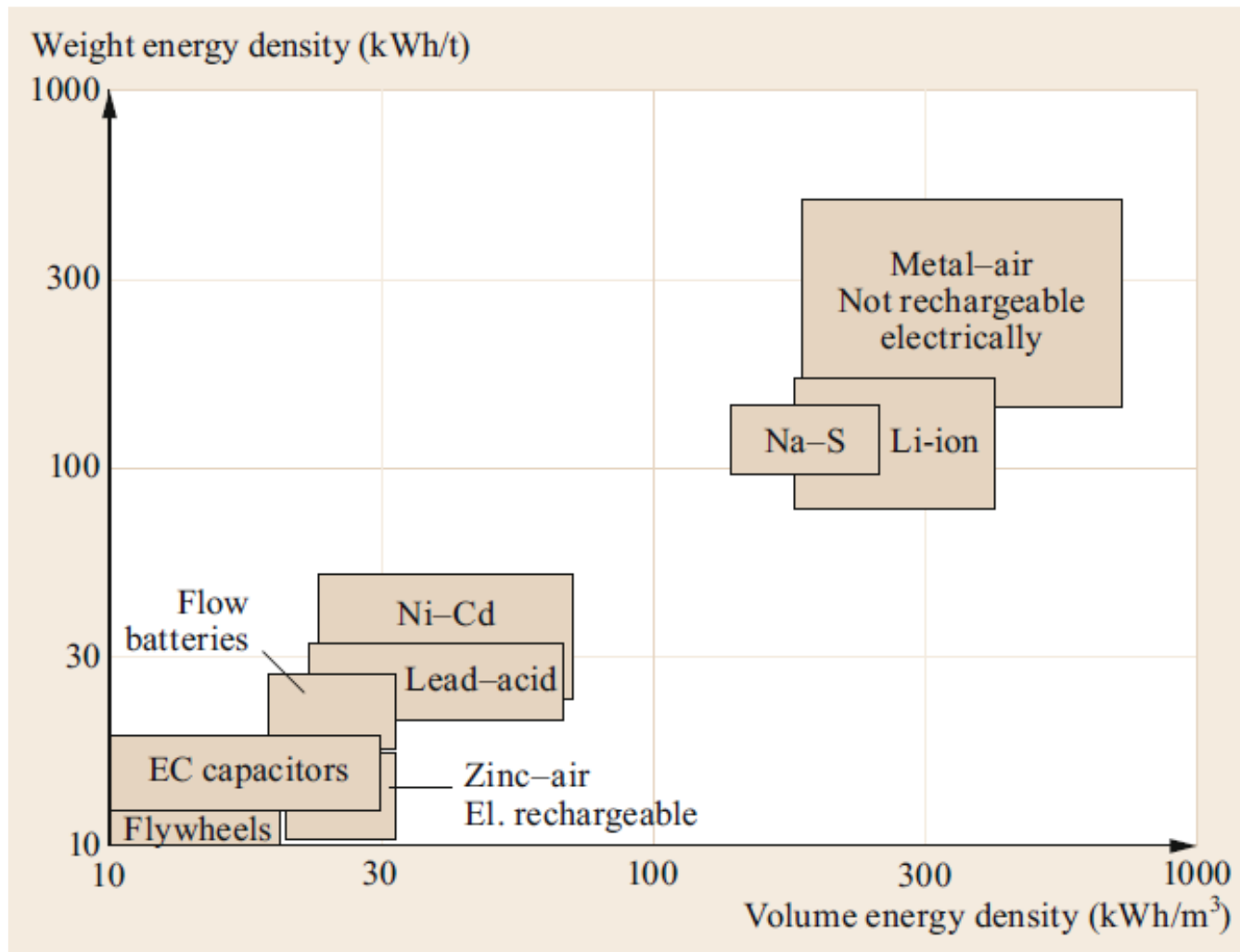
Πηγή: Κ. Ο. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



Ενεργειακή Πυκνότητα



- ✓ Μια σημαντική παράμετρος που αφορά κάθε τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας είναι η **ενεργειακή πυκνότητα**
- ✓ Στον κατακόρυφο άξονα, υποδεικνύεται η ενεργειακή πυκνότητα κατά βάρος (*weight energy density*) διαφορετικών ΣΑΕ
- ✓ Στον οριζόντιο άξονα, παρουσιάζεται η ενεργειακή πυκνότητα κατά όγκο (*volume energy density*) διαφορετικών ΣΑΕ



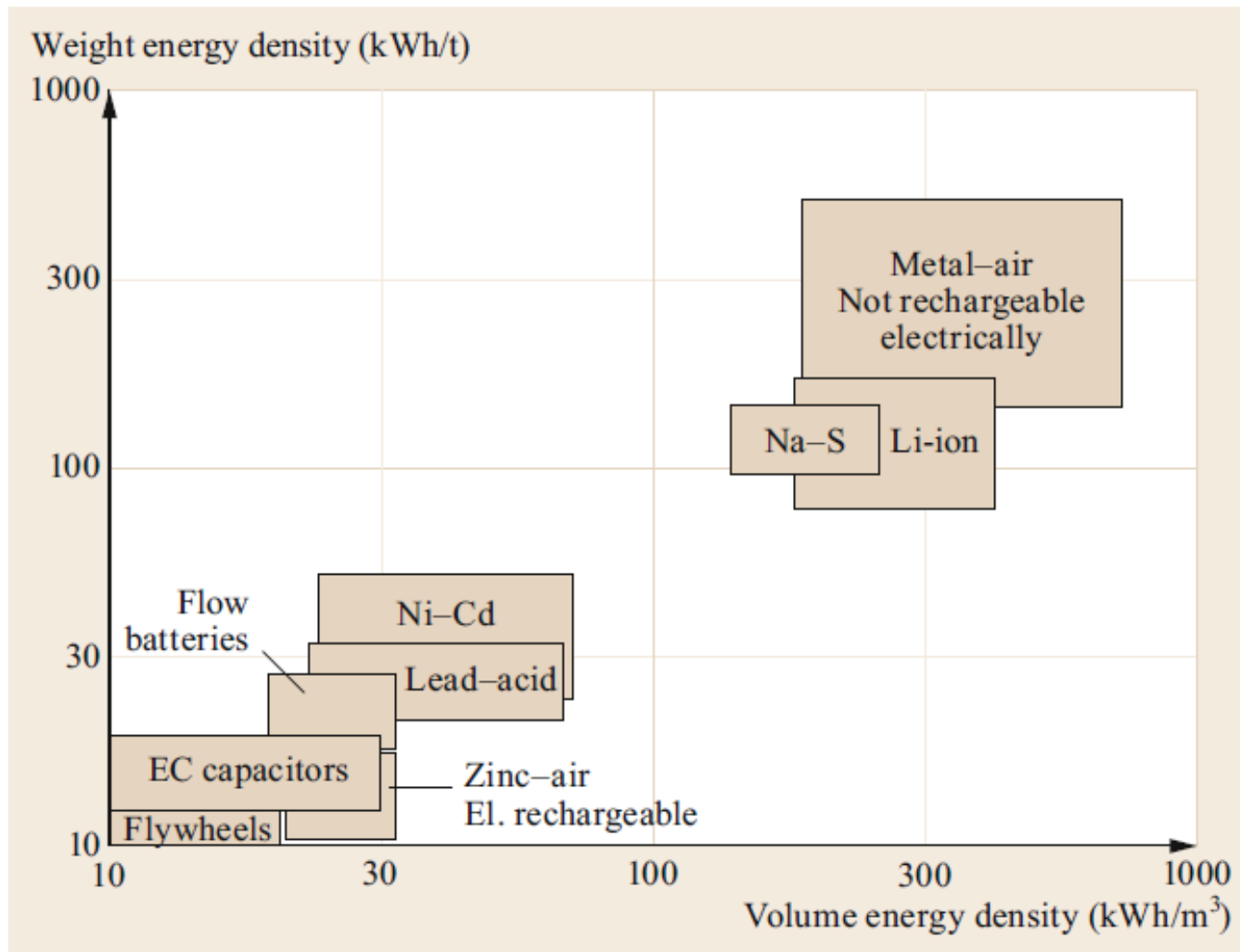
Πηγή: K. O. Papailiou, "Springer Handbook of Power Systems," Springer, 2021.



Ενεργειακή Πυκνότητα



- ✓ Η ενεργειακή πυκνότητα κατά βάρος μας δείχνει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα ΣΑΕ ανά μονάδα βάρους. Μετριέται σε Wh/kg ή kWh/t
- ✓ Η ενεργειακή πυκνότητα κατά όγκο υποδεικνύει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα ΣΑΕ ανά μονάδα όγκου. Μετριέται σε Wh/dm³ ή kWh/m³



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



Πυκνότητα Ισχύος



- ✓ Μια δεύτερη δυνατότητα σύγκρισης συστημάτων αποθήκευσης είναι να ποσοτικοποιηθεί η ικανότητα ισχύος τους
- ✓ Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας την πυκνότητα ισχύος
- ✓ Η πυκνότητα ισχύος είναι ένα μέτρο της ισχύος εξόδου ανά μονάδα όγκου. Αν και δεν χρησιμοποιείται τόσο συχνά όσο η ενεργειακή πυκνότητα, εξακολουθεί να είναι ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος





Πυκνότητα Ισχύος



- ✓ Η πυκνότητα ισχύος είναι η ποσότητα ισχύος (ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας) ανά μονάδα όγκου
- ✓ Μετριέται σε W/dm^3 ή W/m^3
- ✓ Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με υψηλή πυκνότητα ισχύος, μπορεί να παρέχει μεγάλες ποσότητες ενέργειας με βάση τον όγκο του

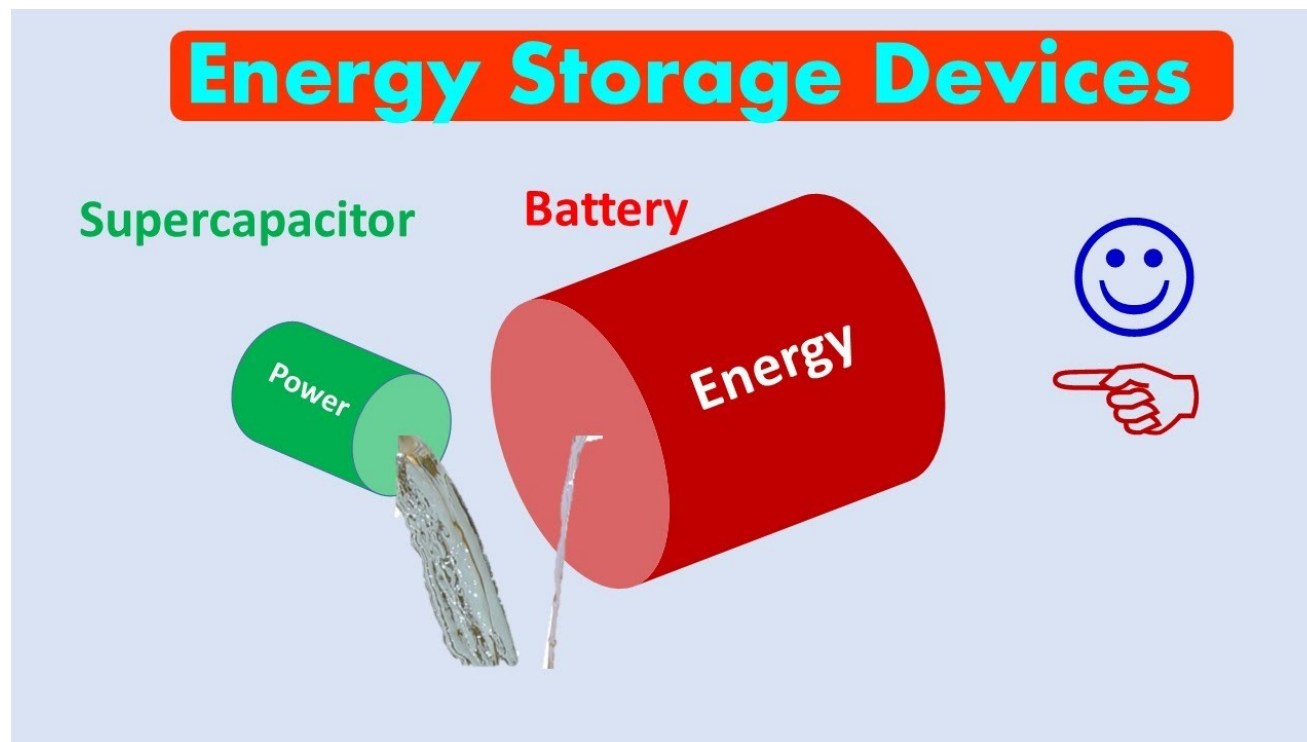




- ✓ Ας σκεφτούμε το παράδειγμα ενός αυτοκινήτου ... :
 - Η ενεργειακή πυκνότητα καθορίζει το πόσο μακριά μπορεί να ταξιδέψει το αυτοκίνητο
 - Η πυκνότητα ισχύος καθορίζει τη μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να πετύχει το αυτοκίνητο
- ✓ Ας σκεφτούμε το παράδειγμα ενός δρομέα ... :
 - Ένας δρομέας μαραθωνίου πρέπει να τρέξει περίπου 42 km. Σε όλη τη διαδρομή πρέπει να διατηρήσει μια σχεδόν σταθερή ταχύτητα (μικρή ταχύτητα). Χρειάζεται «υψηλή ενεργειακή πυκνότητα»
 - Ένας δρομέας σε αγώνα δρόμου 100 m, πρέπει να επιταχύνει άμεσα και να επιτύχει μέγιστη ταχύτητα σε ελάχιστα δευτερόλεπτα, την οποία θα διατηρήσει για περίπου 9 s. Χρειάζεται «υψηλή πυκνότητα ισχύος»



- ✓ Ένας μικροσκοπικός πυκνωτής μπορεί να έχει την ίδια ισχύ εξόδου με μια μεγάλη μπαταρία
- ✓ Επειδή ο πυκνωτής είναι πολύ μικρότερος, έχει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος
- ✓ Δεδομένου ότι απελευθερώνουν την ενέργειά τους γρήγορα, τα συστήματα υψηλής πυκνότητας ισχύος μπορούν επίσης να επαναφορτιστούν γρήγορα





- ✓ Η **ενεργειακή πυκνότητα** μας δείχνει πόση ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα ΣΑΕ ανά μονάδα όγκου ή βάρους
 - Για παράδειγμα, ένα ΣΑΕ με υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα μπορεί να παρέχει ρεύμα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε σχέση με ένα ΣΑΕ με χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα (για την ίδια μάζα ή όγκο)
- ✓ Η **πυκνότητα ισχύος** μας δείχνει πόσο γρήγορα μπορεί ένα ΣΑΕ να παρέχει ενέργεια
 - Πρακτικά, μας δείχνει το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να προσφέρει ένα ΣΑΕ συγκεκριμένης μάζας και όγκου



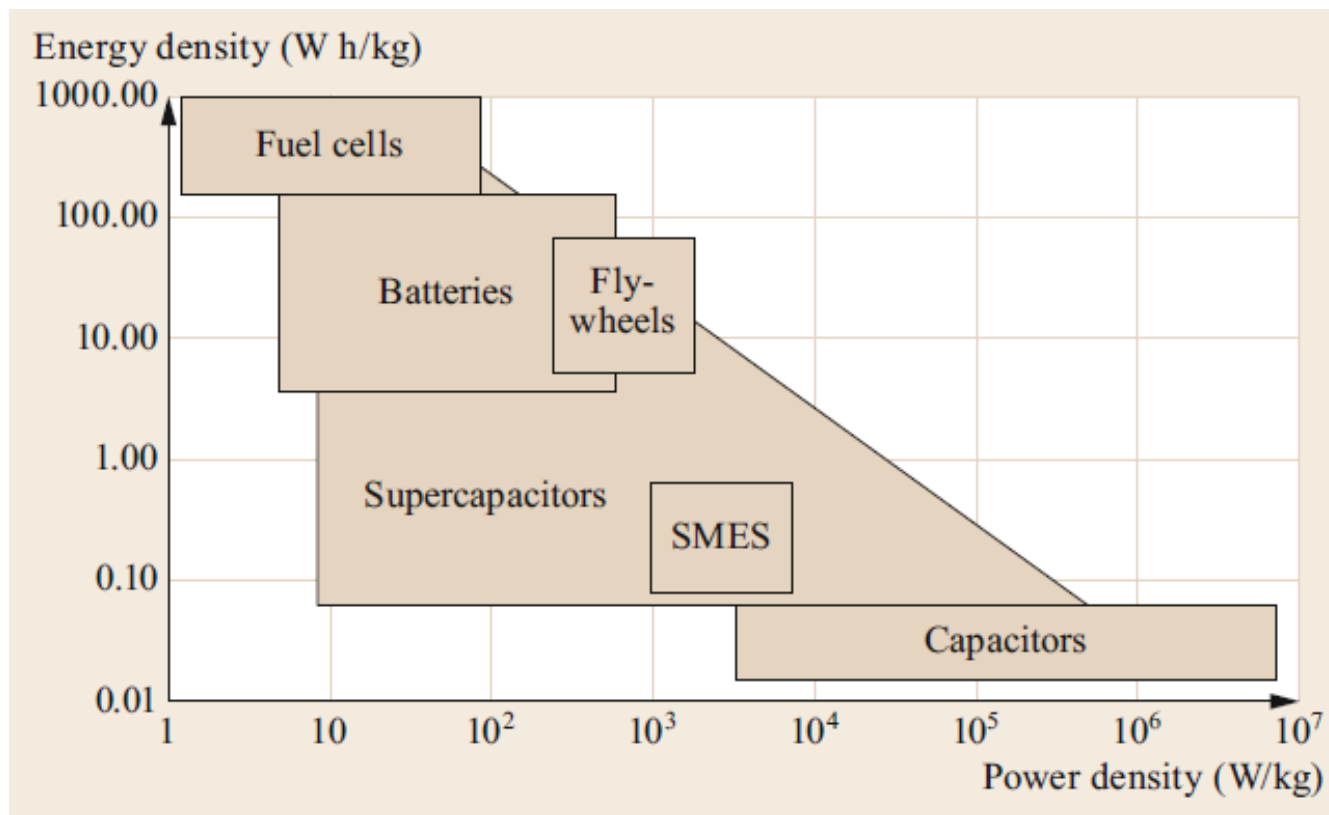
- ✓ Πολλές φορές αντί της πυκνότητας ισχύος χρησιμοποιείται ο λόγος της ισχύος που αποδίδει το ΣΑΕ προς το βάρος του ΣΑΕ (power-to-weight ratio)
- ✓ Ο λόγος αυτός φανερώνει ουσιαστικά την ισχύ που αποδίδεται από το ΣΑΕ ανά μονάδα μάζας
- ✓ Μετριέται σε W/Kg ή kW/t
- ✓ Για ΣΑΕ όπως οι υπερ-πυκνωτές και οι σφόνδυλοι ο λόγος ισχύος/βάρους μετριέται σε kW/kg



Διαγράμματα Ragone



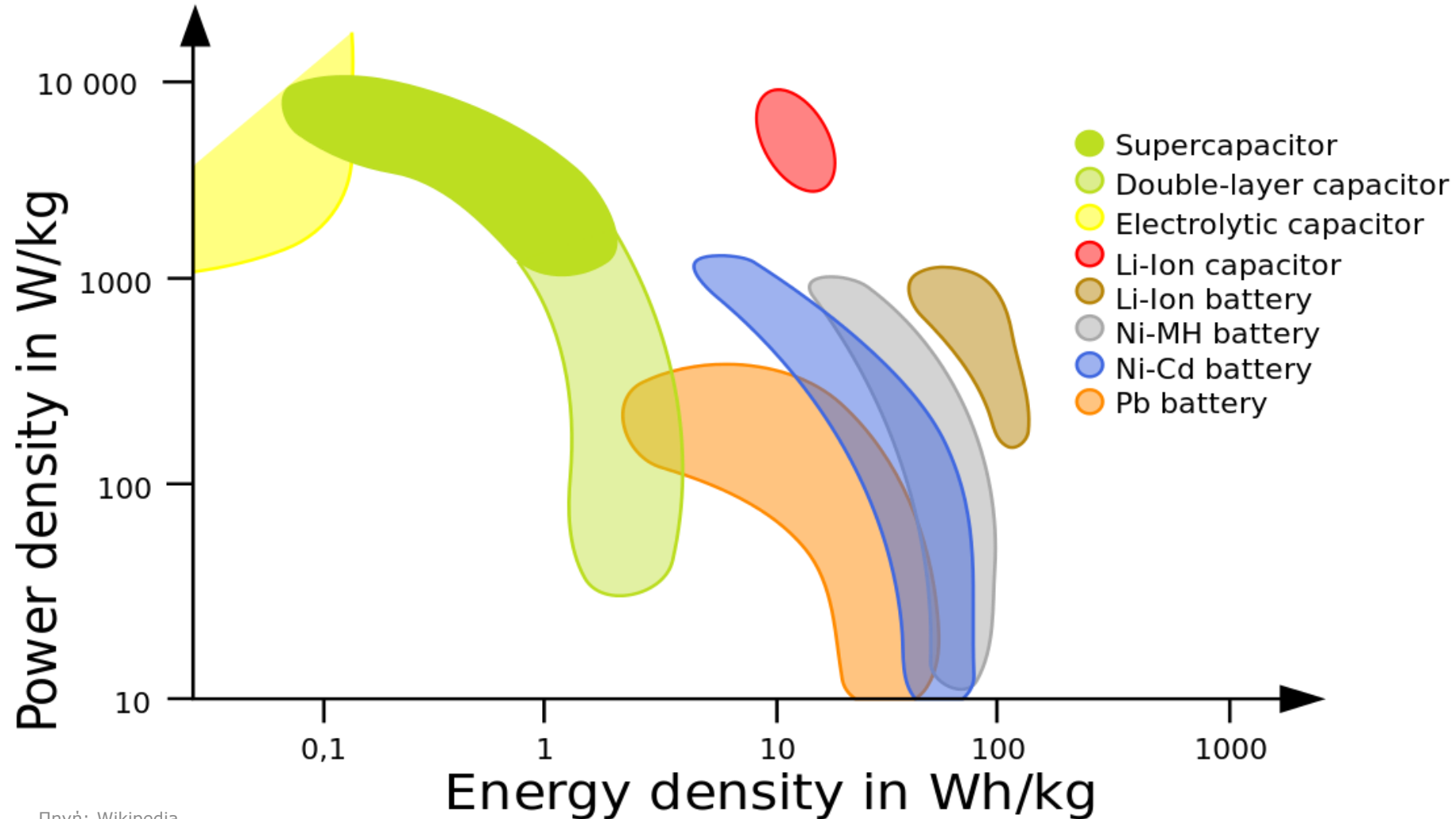
- ✓ Τα διαγράμματα Ragone χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών ΣΑΕ
- ✓ Τα μεγέθη που αναπαρίστανται στα διαγράμματα Ragone είναι η ενεργειακή πυκνότητα και ο λόγος ισχύος/βάρους
- ✓ Οι άξονες των διαγραμμάτων Ragone είναι λογαριθμικοί, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την εύκολη σύγκριση πολύ διαφορετικών ΣΑΕ



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



Διαγράμματα Ragone





- ✓ Άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή ενός ΣΑΕ είναι:
 - Η χωρητικότητα
 - Οι απώλειες & ο βαθμός απόδοσης
 - Η γήρανση
 - Η μέγιστη ισχύς εκφόρτισης και η σταθερά χρόνου
 - Το κόστος



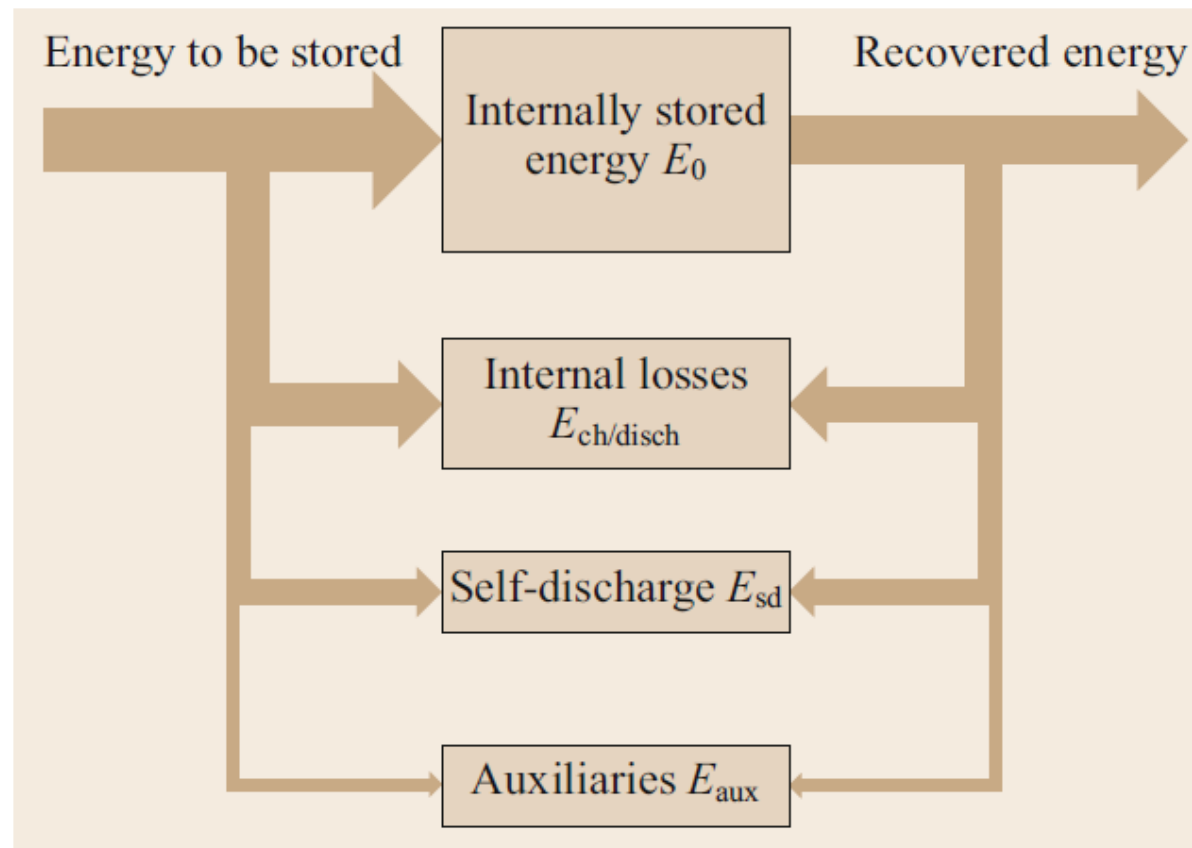
- ✓ Ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά ενός ΣΑΕ είναι η **χωρητικότητα** του
- ✓ Εκφράζει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί από το ΣΑΕ
- ✓ Μετριέται σε Joules ή kWh ή σε Ah
- ✓ Όσο αφορά τις **μπαταρίες**, η χωρητικότητα ορίζεται συνήθως σε **Ah**. Τα Ah μας δείχνουν τον αριθμό των ωρών που μια μπαταρία μπορεί να παρέχει ρεύμα ίσο με το ονομαστικό της
- ✓ Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας μπορεί να εκφραστεί σε Wh πολλαπλασιάζοντας την χωρητικότητα σε Ah με την ονομαστική τάση της μπαταρίας
- ✓ Μαθηματικά, η χωρητικότητα μπορεί να υπολογισθεί σε Ah ως:

$$C = \int_0^t i(t) dt$$



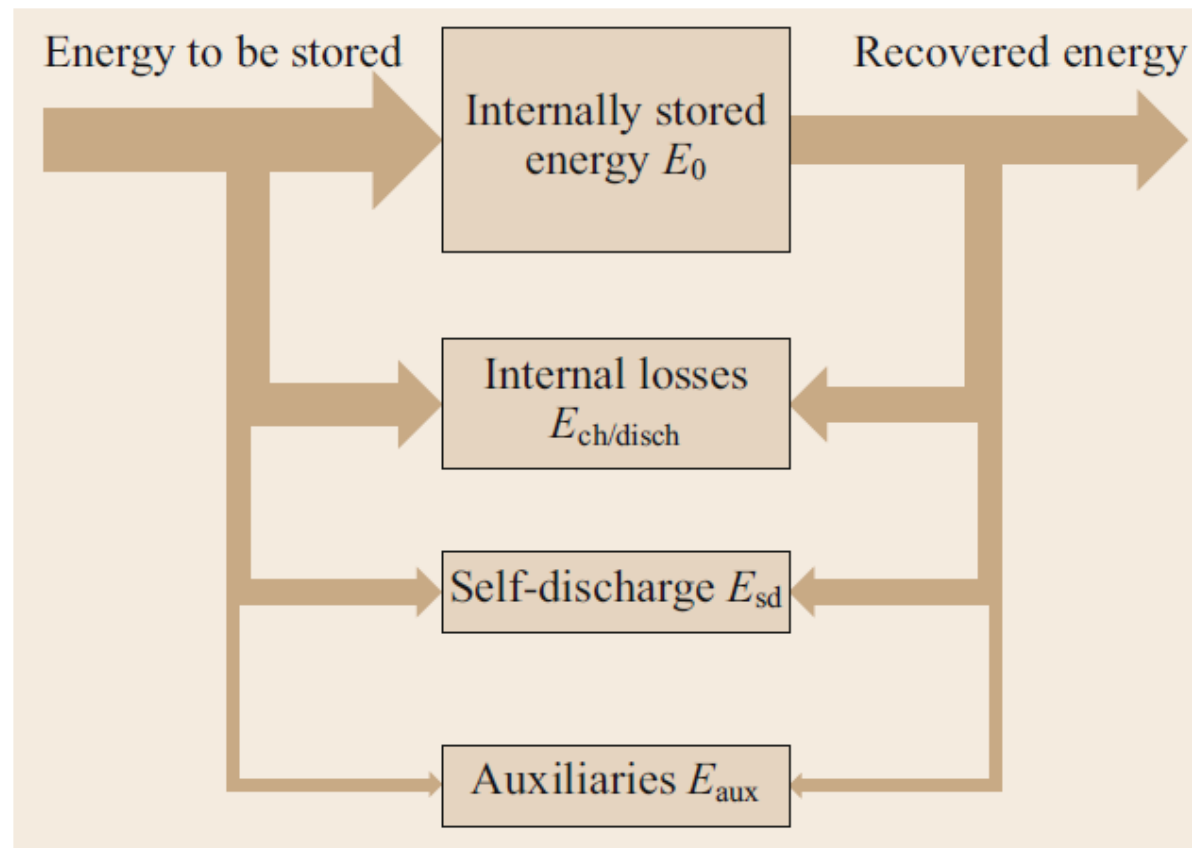
✓ Η ποσότητα ενέργειας, όμως, που είναι πραγματικά διαθέσιμη/εκμεταλλεύσιμη εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων, όπως:

- Οι απώλειες
- Η κατάσταση ενέργειας (state of energy) ή αλλιώς η κατάσταση φόρτισης (state of charge)
- Το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης (depth of discharge)





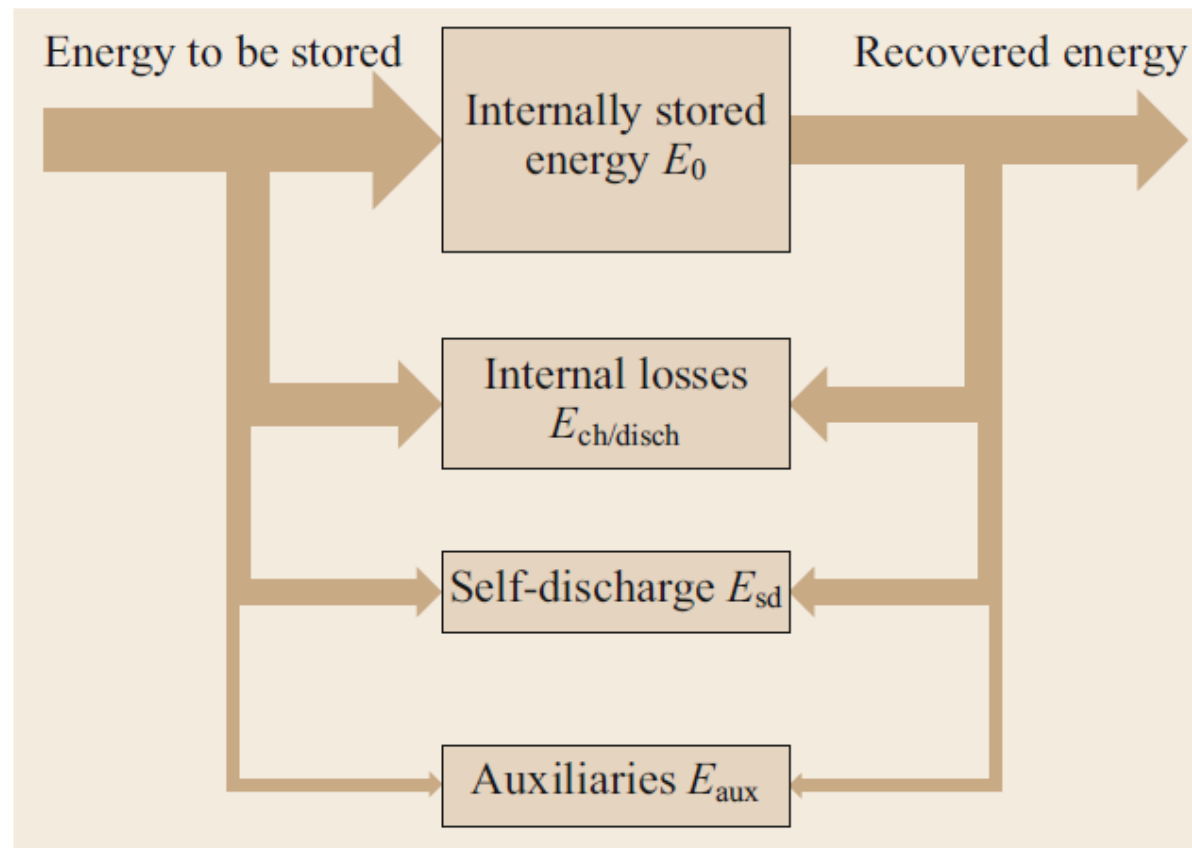
- ✓ Οι διάφοροι μετασχηματισμοί ενέργειας που συμβαίνουν κατά τη διαδικασία αποθήκευσης ενέργειας συνοδεύονται αναπόφευκτα από απώλειες.
- ✓ Οι απώλειες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την εξεταζόμενη τεχνολογία αποθήκευσης
- ✓ Μπορούν, όμως, να ομαδοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:





✓ Κατηγορίες απωλειών:

- Φόρτισης/εκφόρτισης. Με καλή προσέγγιση μπορούν να θεωρηθούν ανάλογες του τετραγώνου της ισχύος
- Απώλειες βοηθητικών συστημάτων
- Απώλειες αυτό-εκφόρτισης. Απώλειες που εμφανίζονται ακόμα και όταν δεν υπάρχει φορτίο. Εξαρτώνται από την κατάσταση φόρτισης του εξεταζόμενου ΣΑΕ και από την τεχνολογία ΣΑΕ (π.χ. σφόνδυλοι)





- ✓ Η κατάσταση ενέργειας (state of energy - SoE) μας δείχνει την ενέργεια που παραμένει αποθηκευμένη (και άρα διαθέσιμη) σε ένα ΣΑΕ
- ✓ Στη γενική περίπτωση μπορεί να ορισθεί ως:

$$SoE = \frac{E}{E_{sto}}$$

- ✓ E είναι η αποθηκευμένη ενέργεια σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αντιστοιχεί στην ενέργεια που θα ήταν διαθέσιμη αν δεν υπήρχαν καθόλου απώλειες
- ✓ E_{sto} είναι η χωρητικότητα του ΣΑΕ

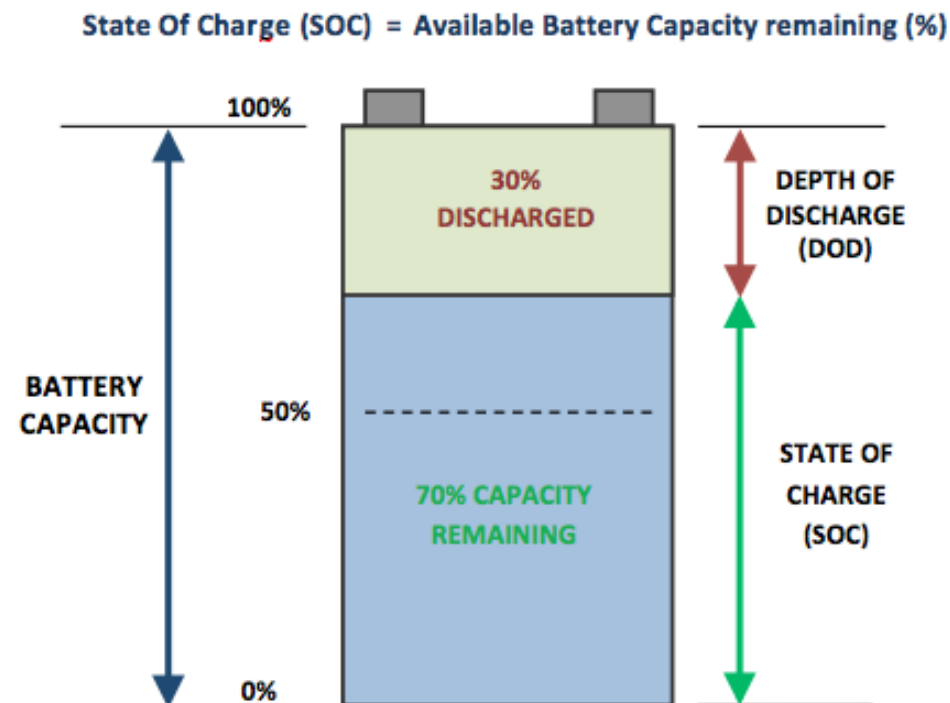


- ✓ Ο προηγούμενος τύπος φυσικά και ισχύει (**είναι γενικής φύσεως**)
- ✓ Όμως, σε ΣΑΕ μπαταριών, έχει επικρατήσει η χρήση του όρου κατάσταση φόρτισης (state of charge - SoC). Μπορεί να υπολογισθεί/ορισθεί ως:

$$SoC = \frac{C - \int_0^t i_{dis}(t)dt}{C}$$

- ✓ Η κατάσταση φόρτισης συνδέεται με το βάθος εκφόρτισης (depth of discharge - DoD) μέσω της σχέσης:

$$DoD = 1 - SoC$$

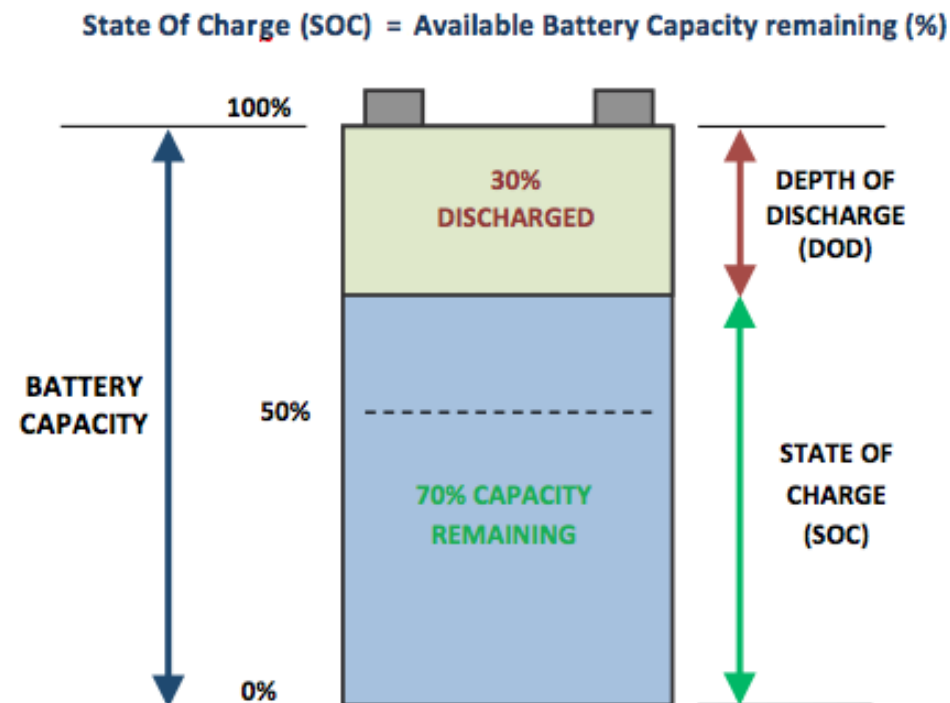




Κατάσταση Ενέργειας/Φόρτισης



- ✓ Μια κατάσταση φόρτισης ίσης με 100% υποδηλώνει ότι η μπαταρία (στη γενική περίπτωση το ΣΑΕ) είναι πλήρως φορτισμένη
- ✓ Κατάσταση φόρτισης 0% (βάθος εκφόρτισης, δηλαδή, ίσο με 100%) υποδηλώνει μια κατάσταση κατά την οποία δεν υπάρχει καθόλου αποθηκευμένη ενέργεια στο ΣΑΕ
- ✓ Τα περισσότερα ΣΑΕ δεν τα λειτουργούμε σε βάθη εκφόρτισης ίσα με το 100%, για να αποφύγουμε προβλήματα **υπερβολικής γήρανσης**





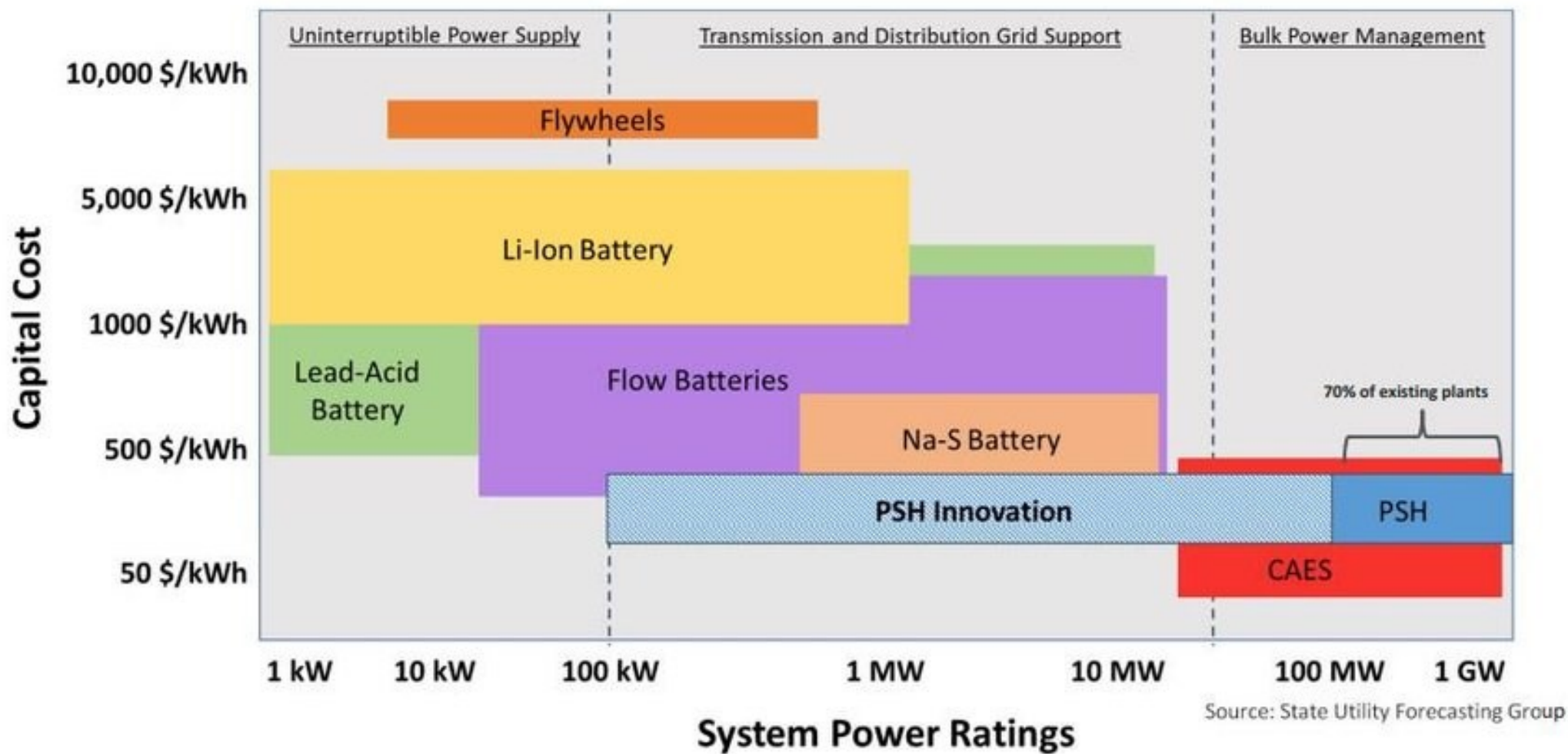
- ✓ Η εκτίμηση της κατάσταση ενέργειας ενός ΣΑΕ πραγματοποιείται μέσω της παρατήρησης και ανάλυσης των φυσικών ή χημικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα
- ✓ Για παράδειγμα για να υπολογίσουμε την εναπομένουσα ενέργεια ενός σφονδύλου αρκεί να μετρήσουμε την ταχύτητα περιστροφής του
- ✓ Σε ένα υπέρ-πυκνωτή, να μετρήσουμε την τάση του και σε ένα υπέρ-αγώγιμο πηνίο το ρεύμα του
- ✓ Σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας να μετρήσουμε την πίεση του αέρα
- ✓ Σε ένα εργοστάσιο αντλησιοταμίευσης το επίπεδο της στάθμης του νερού



- ✓ Τα ΣΑΕ, όπως και όλα τα συστήματα που υπόκεινται σε καταπονήσεις, γερνούν/αλλοιώνονται
- ✓ Προφανώς, τα διαφορετικά ΣΑΕ (διαφορετικές τεχνολογίες) υπόκεινται σε διαφορετικού είδους καταπονήσεις. Οι πιο συνηθισμένες είναι:
 - Θερμικές (λόγω μεταβολής θερμοκρασίας)
 - Μηχανικές (λόγω άσκησης μηχανικών δυνάμεων)
- ✓ Λόγω της γήρανσης μειώνεται η ενεργειακή απόδοση των ΣΑΕ και αυξάνονται οι απώλειες
- ✓ Η γήρανση επιταχύνεται λόγω μεγάλης χρήσης (συχνότητα λειτουργίας του ΣΑΕ, αυξημένου βάθους εκφόρτισης, κλπ)



- ✓ Η μέγιστη ισχύς φόρτισης ή εκφόρτισης (που μερικές φορές είναι ασύμμετρες) αντιπροσωπεύει ένα ακόμα χαρακτηριστικό με ισχυρό αντίκτυπο στη διαστασιολόγηση του ΣΑΕ
- ✓ Τα ΣΑΕ μπορούν επίσης να χαρακτηριστούν από την αναλογία της ενεργειακής χωρητικότητας προς τη μέγιστη ισχύ
- ✓ Αυτή η αναλογία μερικές φορές ονομάζεται και σταθερά χρόνου ή ελάχιστος χρόνος φόρτισης/εκφόρτισης.
- ✓ Έτσι αναφερόμαστε σε συστήματα αποθήκευσης ισχύος όταν η σταθερά χρόνου είναι μικρή (π.χ. μικρότερη από 1 ώρα) και σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όταν η σταθερά χρόνου είναι μεγάλη.
- ✓ Τα πρώτα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που θέλουμε άμεση παροχή ισχύος στο ΣΗΕ, ενώ τα δεύτερα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν διαχείριση ενέργειας





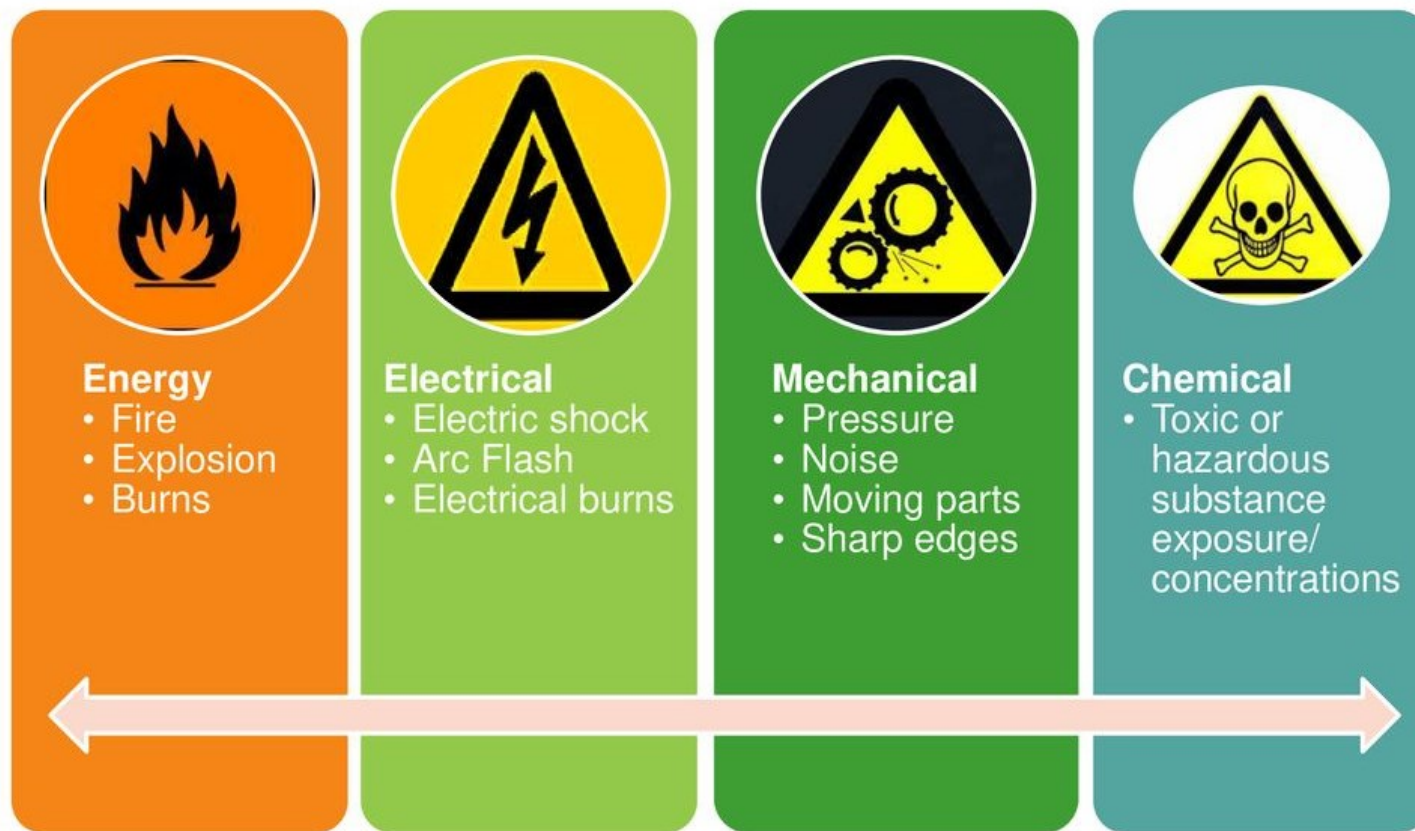
- ✓ Το κόστος ποικίλει ανάλογα με την τεχνολογία
- ✓ Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι τα συστήματα με το χαμηλότερο επενδυτικό κόστος είναι και αυτά που υποβαθμίζονται ταχύτερα (μειώνεται η απόδοση τους, έχουν περιορισμένο αριθμό κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης)
- ✓ Το κόστος επένδυσής είναι το κυρίαρχο
- ✓ Δε θα πρέπει όμως να παραγνωρίζονται κόστη που αφορούν:
 - τη λειτουργία του ΣΑΕ,
 - τη συντήρηση του,
 - καθώς και κόστη που σχετίζονται με τις απώλειες ενέργειας



Άλλα Χαρακτηριστικά



- ✓ Παράδειγμα, χαρακτηριστικά που έχουν να κάνουν με την ασφάλεια
- ✓ Οποιοδήποτε ΣΑΕ έχει τον δυνητικό κίνδυνο της απώλειας ελέγχου
- ✓ Κάθε τεχνολογία έχει τους δικούς της κινδύνους

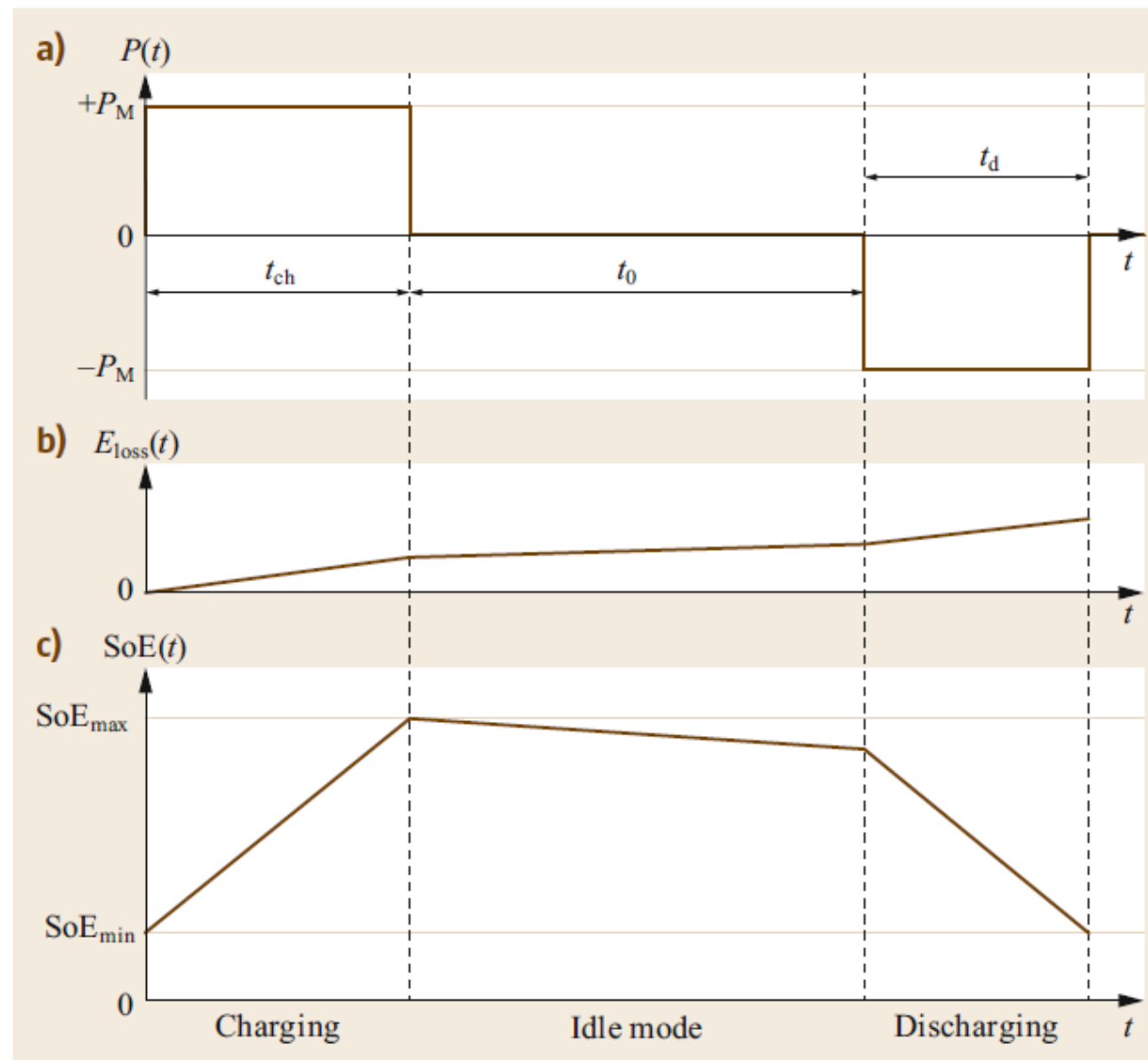




Βαθμός Απόδοσης



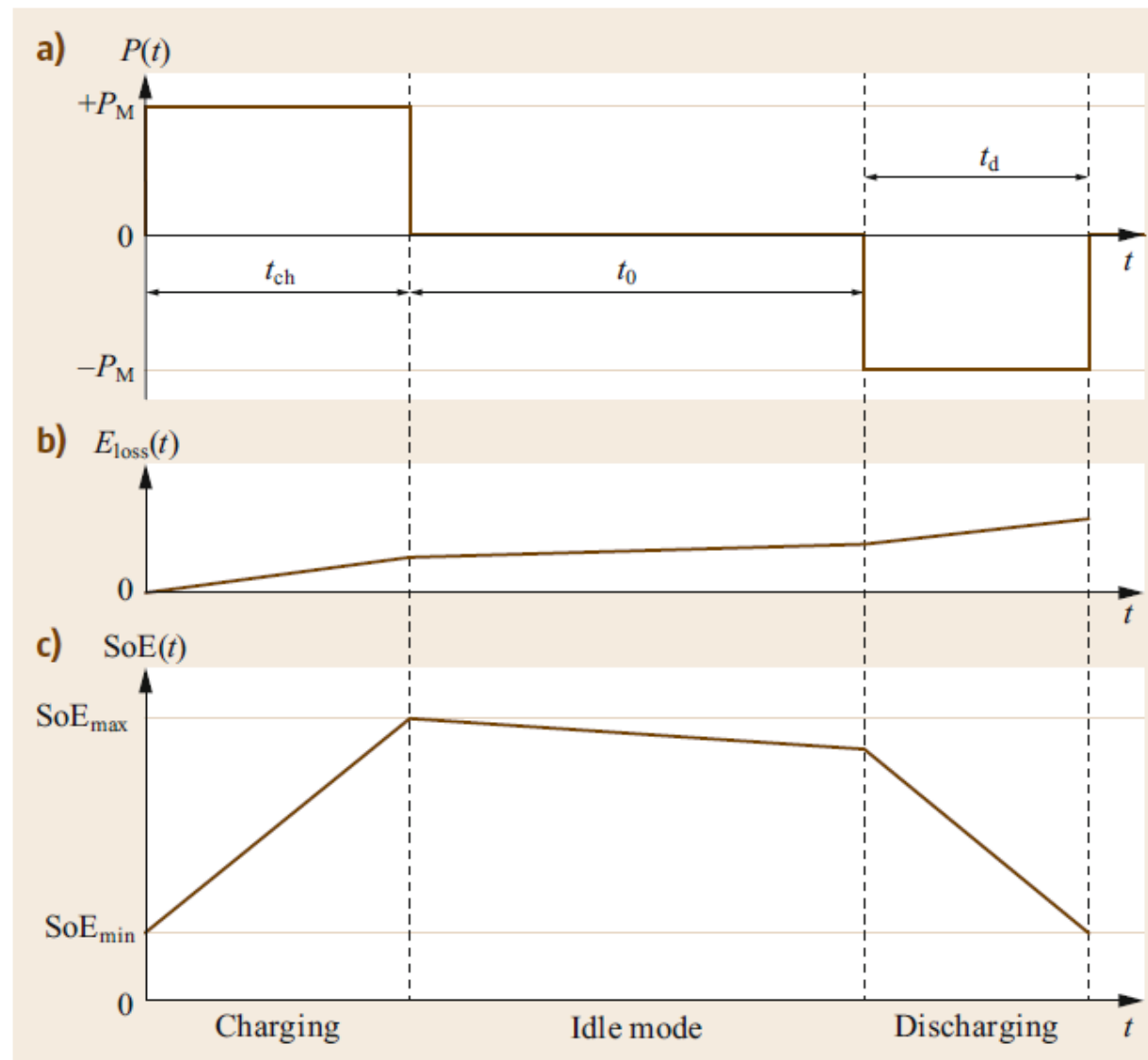
- ✓ Σε κάθε ΣΑΕ είναι σημαντικό να υπολογίσουμε με ακρίβεια το βαθμό απόδοσης του
- ✓ Σε κάθε κύκλο αποθήκευσης ενέργειας αντιστοιχούν μια σειρά από φορτίσεις, εκφορτίσεις και χρονικές στιγμές αδράνειας (χρονικές στιγμές, δηλαδή, που το σύστημα ούτε εκφορτίζεται αλλά ούτε και φορτίζεται - idle modes)
- ✓ Για να ορίσουμε σωστά το συνολικό βαθμό απόδοσης ενός ΣΑΕ θα πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι έχουμε τις ίδιες καταστάσεις ενέργειας στην αρχή και στο τέλος κάθε κύκλου





- ✓ Σε όλα τα ΣΑΕ, παρά τις διαφορετικές τεχνολογίες και τα εν γένει διαφορετικά χαρακτηριστικά τους, οι απώλειες ενέργειας μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- ✓ **Απώλειες λόγω μεταφοράς ισχύος.** Οι απώλειες αυτές εμφανίζονται όταν έχουμε μεταφορά ισχύος από ή προς το ΣΑΕ. Άρα, εμφανίζονται κατά τη φόρτιση ή την εκφόρτιση του ΣΑΕ
- ✓ **Απώλειες αυτό-εκφόρτισης.** Απώλειες, δηλαδή, που εμφανίζονται ακόμα και όταν δεν υπάρχει μεταφορά ισχύος

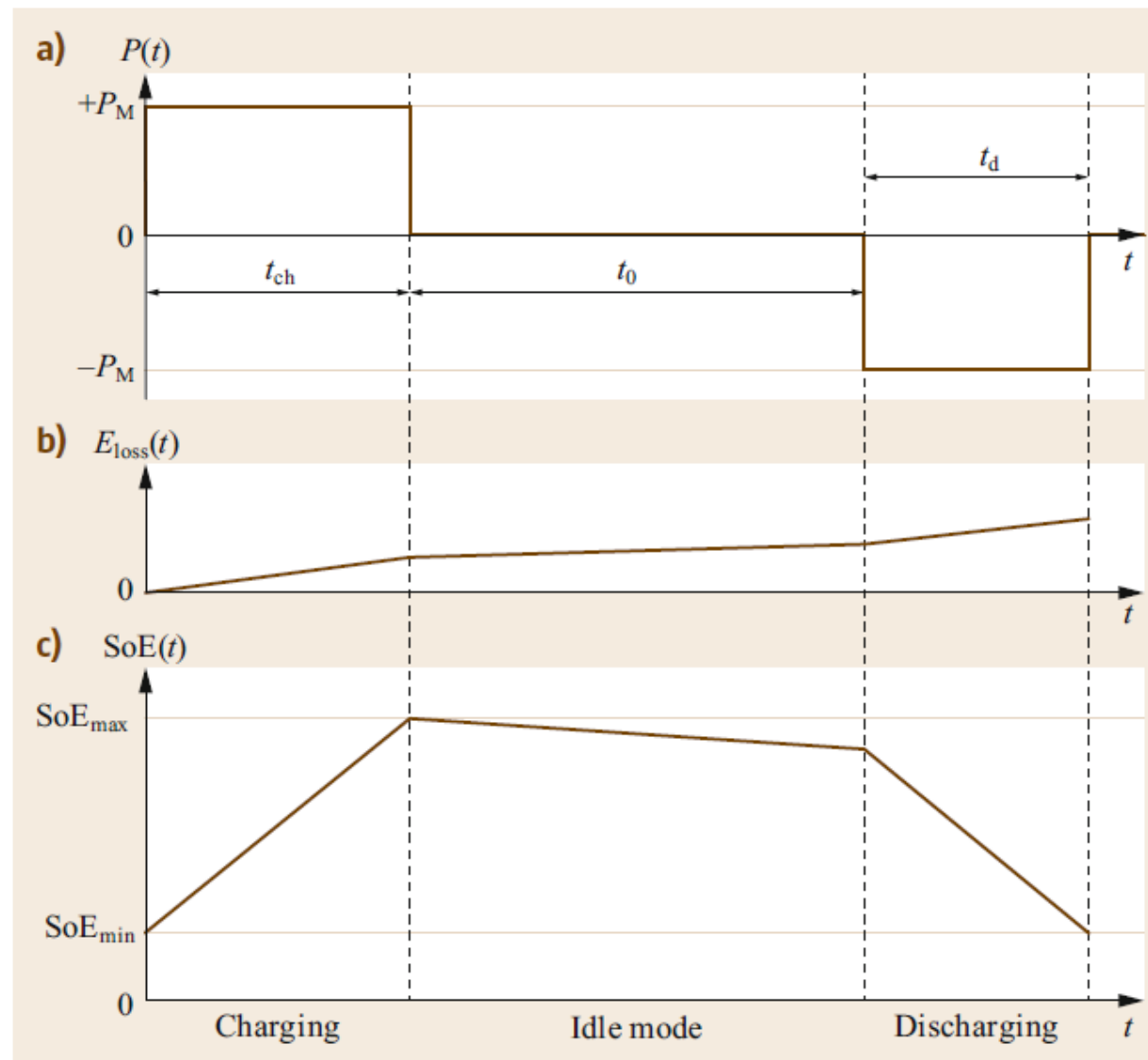




Βαθμός Απόδοσης



- ✓ Οι απώλειες λόγω μεταφοράς ισχύος είναι ανάλογες της ισχύος που μεταφέρεται: $P_{ch,dis} \approx aP^2$
 - Ο συντελεστής a εκφράζει τις εσωτερικές αντιστάσεις του ΣΑΕ
- ✓ Οι απώλειες αυτό-εκφόρτισης εξαρτώνται από την κατάσταση φόρτισης/ενέργειας (SoE) του ΣΑΕ. Συμβολίζονται ως P_0
 - Γενικά, όσο αυξάνεται το SoE τόσο μεγαλύτερες γίνονται οι απώλειες αυτό-εκφόρτισης

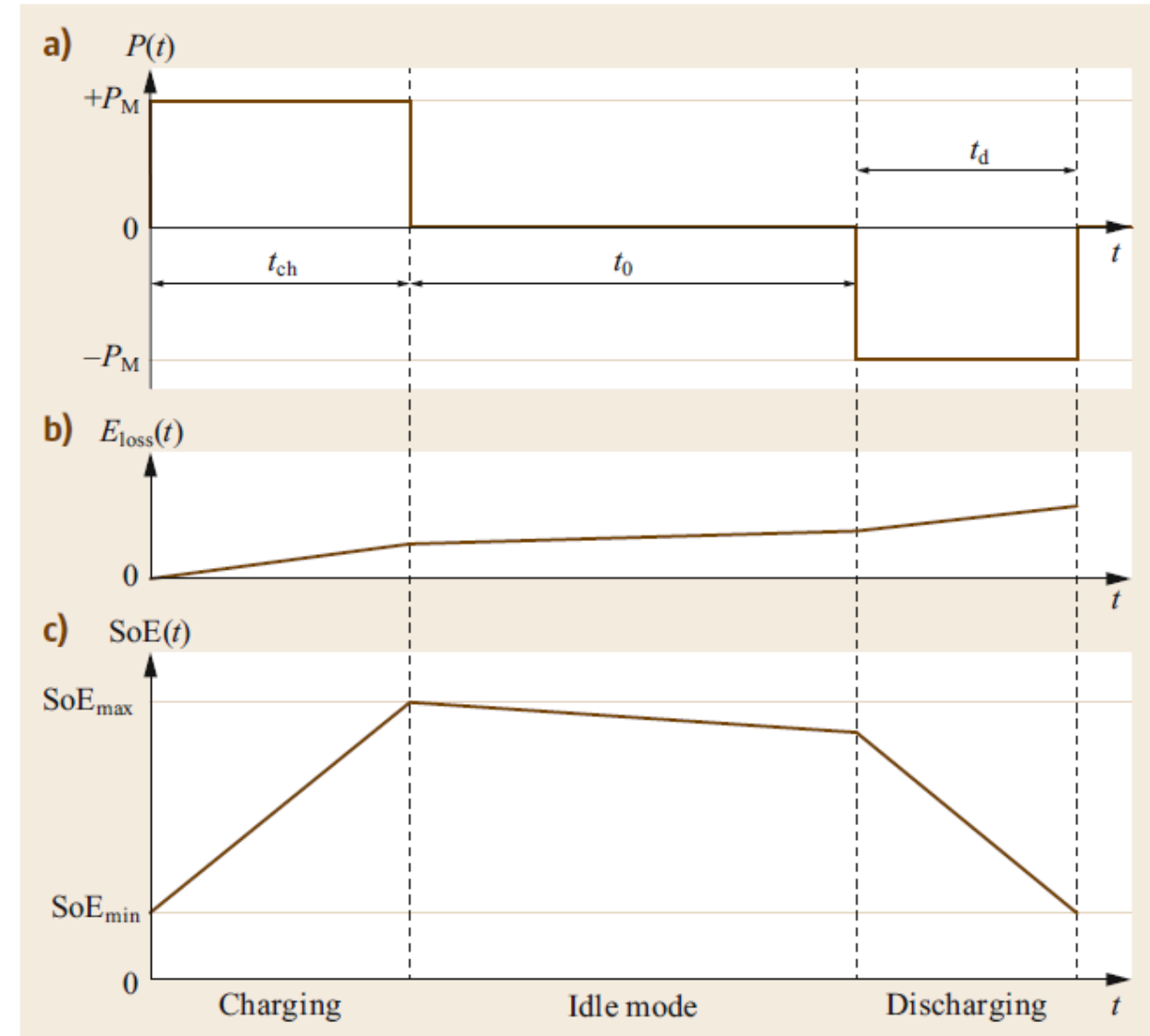




- ✓ Οι **συνολικές απώλειες ισχύος** ενός ΣΑΕ προκύπτουν με την άθροιση των απωλειών φόρτισης/εκφόρτισης και των απωλειών αυτό-εκφόρτισης

$$P_{loss} = aP^2(t) + P_0[SoE(t)]$$

- ✓ Στην παραπάνω σχέση, $P(t)$ είναι το προφίλ της ισχύος που χαρακτηρίζει το ΣΑΕ και $SoE(t)$ είναι η κατάσταση της ενέργειας

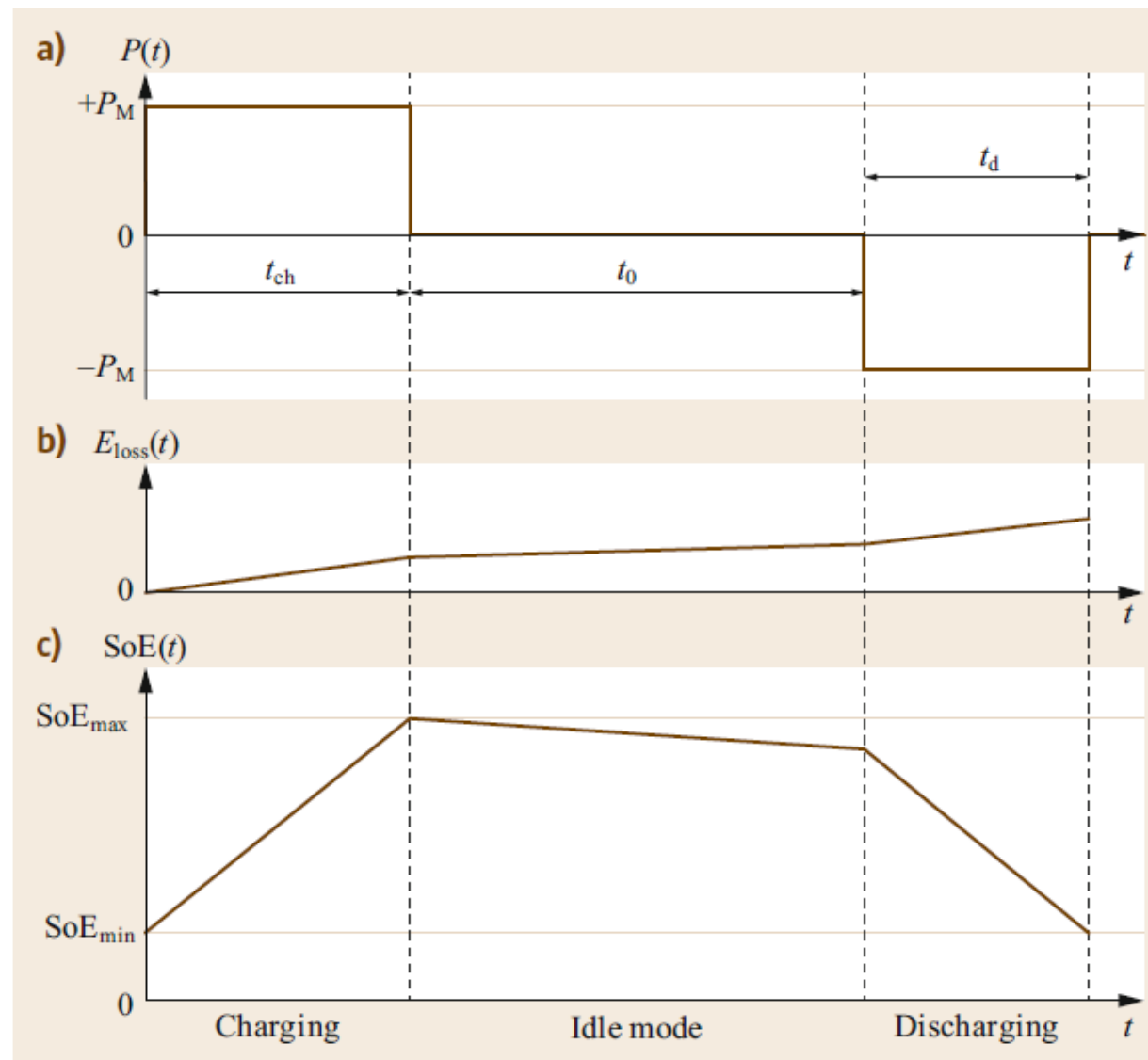




- ✓ Οι **συνολικές απώλειες ενέργειας** ενός ΣΑΕ κατά τη διάρκεια ενός πλήρη κύκλου φόρτισης – εκφόρτισης μπορούν εύκολα να υπολογιστούν ως:

$$E_{loss,cyc} = \int_0^{t_{cyc}} \{aP^2(t) + P_0[SoE(t)]\}dt$$

- ✓ Στην παραπάνω σχέση, t_{cyc} είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ένα πλήρης κύκλος φόρτισης – εκφόρτισης



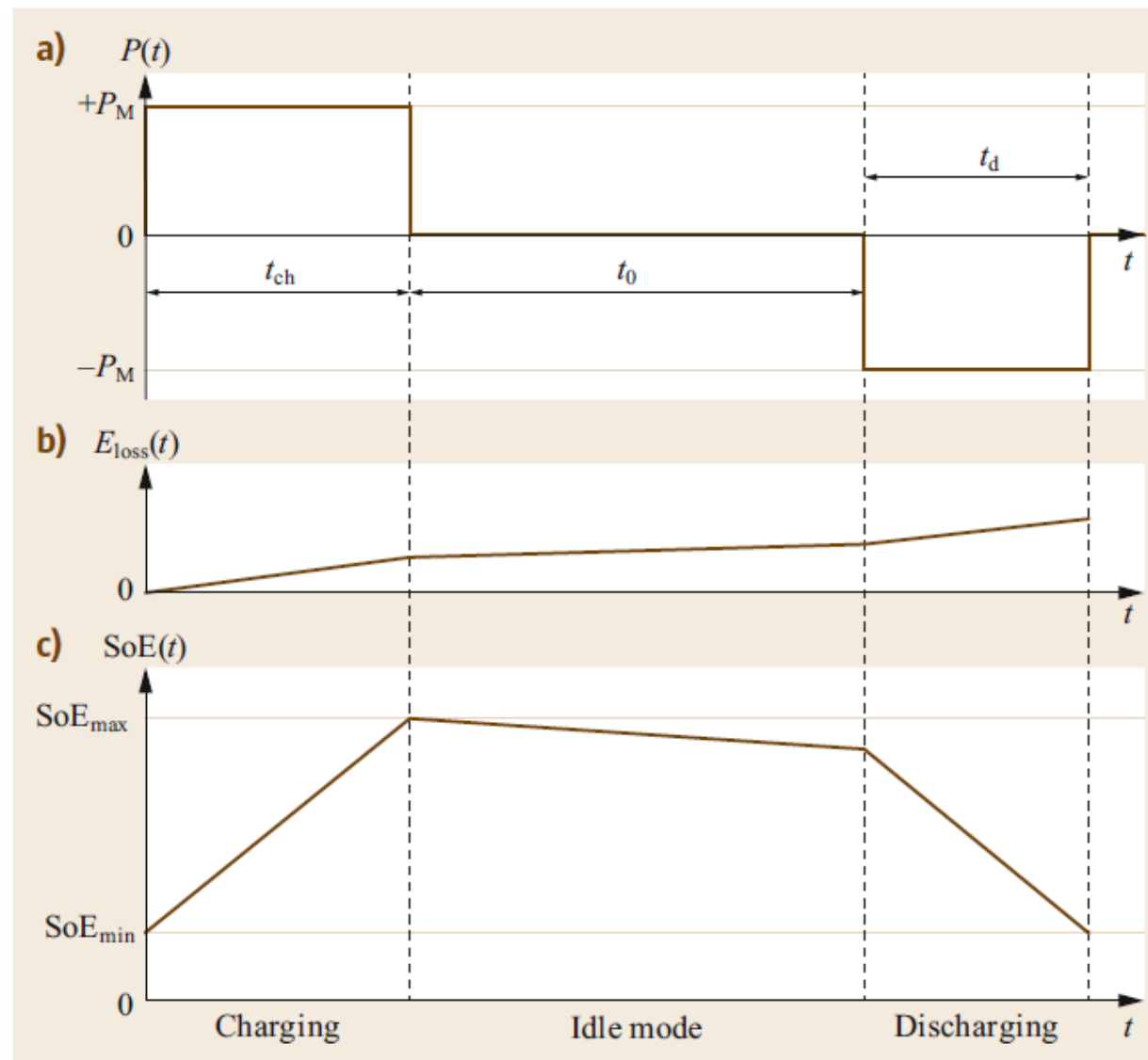


Βαθμός Απόδοσης



- ✓ Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να διευκρινίσουμε τα πρόσημα της ισχύος
- ✓ Το συνηθέστερο είναι να θεωρούμε θετική την ισχύ που απορροφά το ΣΑΕ κατά τη διάρκεια της φόρτισης του και αρνητική την ισχύ εκφόρτισης
- ✓ Οι ισχείς φόρτισης και εκφόρτισης μπορούν να είναι ίδιες αλλά στη γενική περίπτωση μπορεί και να διαφέρουν
- ✓ Η κατάσταση ενέργειας ενός ΣΑΕ μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$SoE(t) = SoE(t_0) + \frac{\int [P(t) - P_{loss}(t)] dt}{E_{sto}}$$

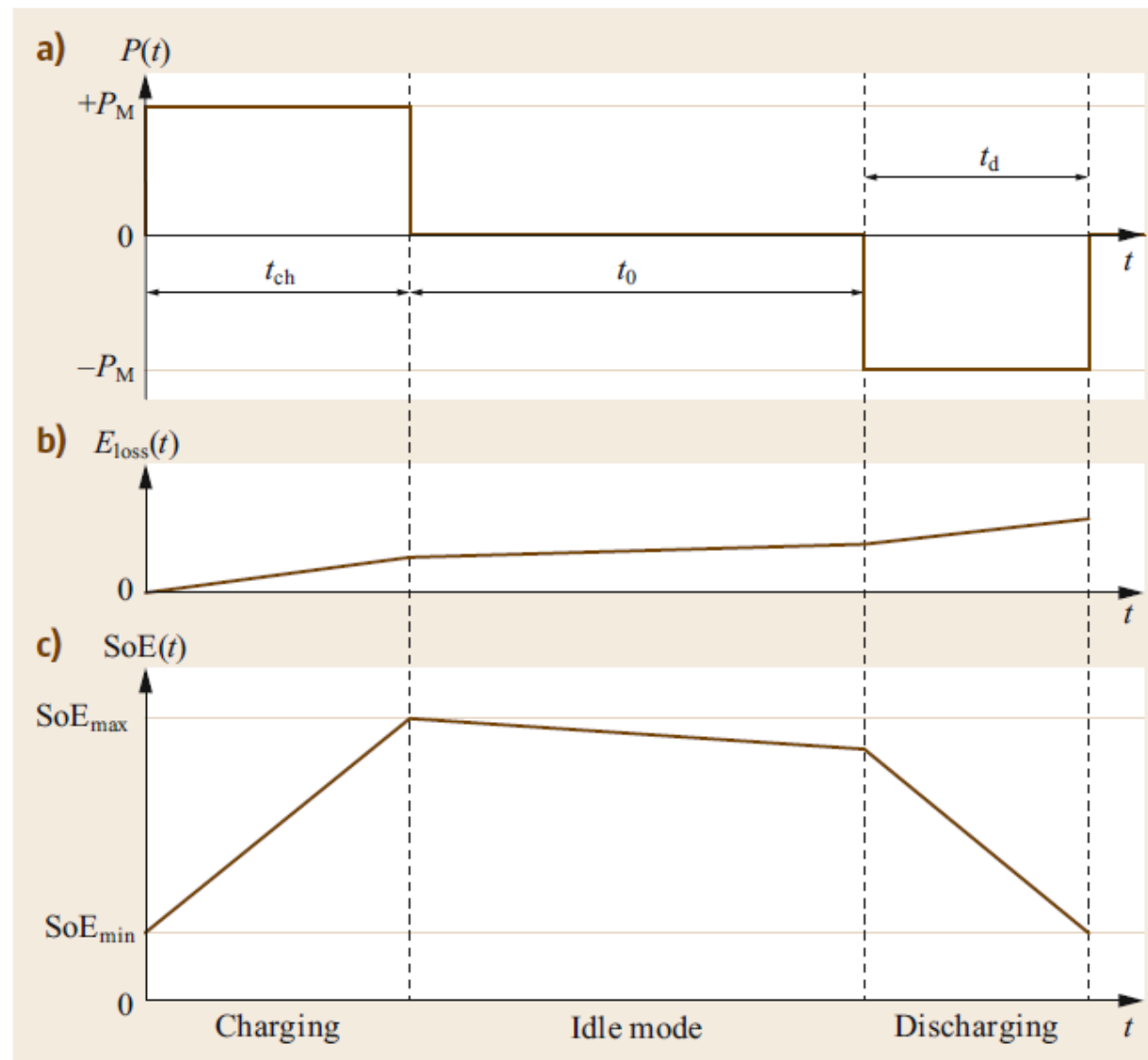




Βαθμός Απόδοσης



- ✓ Και σιγά-σιγά ερχόμαστε στο ζητούμενο ... πως μπορούμε, δηλαδή, να υπολογίσουμε το συνολικό βαθμό απόδοσης ενός ΣΑΕ
- ✓ Αυτό θα το κάνουμε χρησιμοποιώντας ως βοήθεια το διπλανό σχήμα
- ✓ Συγκεκριμένα, το διπλανό σχήμα αναπαριστά ένα προφίλ φόρτισης - εκφόρτισης (ή καλύτερα ένα πλήρη κύκλο φόρτισης - εκφόρτισης)
- ✓ Διακρίνονται τρεις διαδοχικές φάσεις

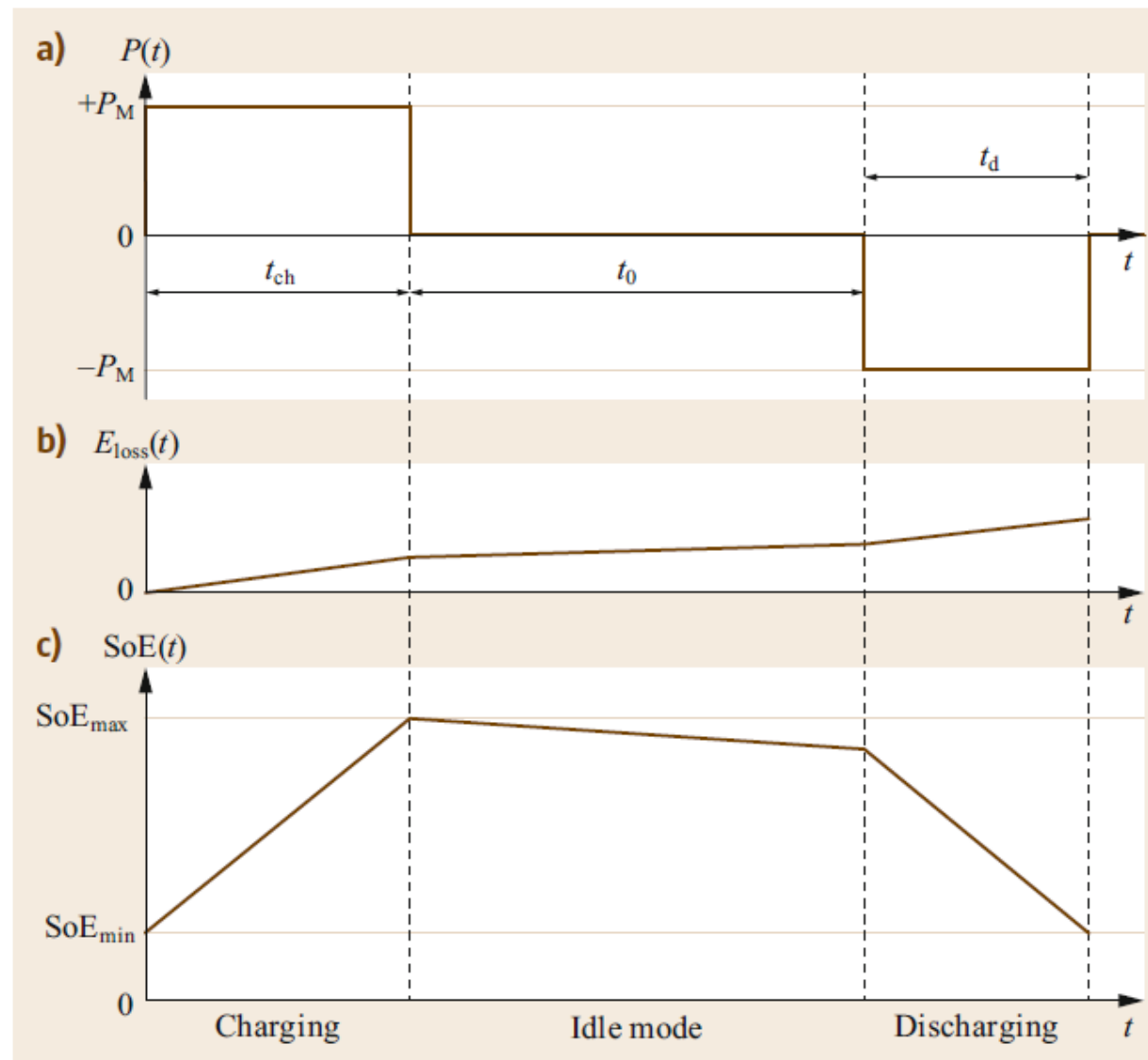




Βαθμός Απόδοσης



- ✓ Αρχικά, έχουμε τη φάση της φόρτισης. Αυτή πραγματοποιείται υπό σταθερή ισχύ (P_M) και για χρόνο ίσο με t_{ch}
- ✓ Ακολουθεί μια φάση αδράνειας. Το ΣΑΕ κατά τη φάση αυτή ούτε εκφορτίζεται, αλλά ούτε και φορτίζεται. Η φάση αυτή διαρκεί χρονικό διάστημα t_0 . Χαρακτηρίζεται από ένα χαμηλό βαθμό αυτό-εκφόρτισης
- ✓ Τέλος, έχουμε τη φάση της εκφόρτισης. Αυτή πραγματοποιείται σε χρόνο t_d . Η ισχύς εκφόρτισης είναι ίση με $-P_M$
- ✓ Προφανώς, ισχύει $t_d < t_{ch}$ (γιατί???)

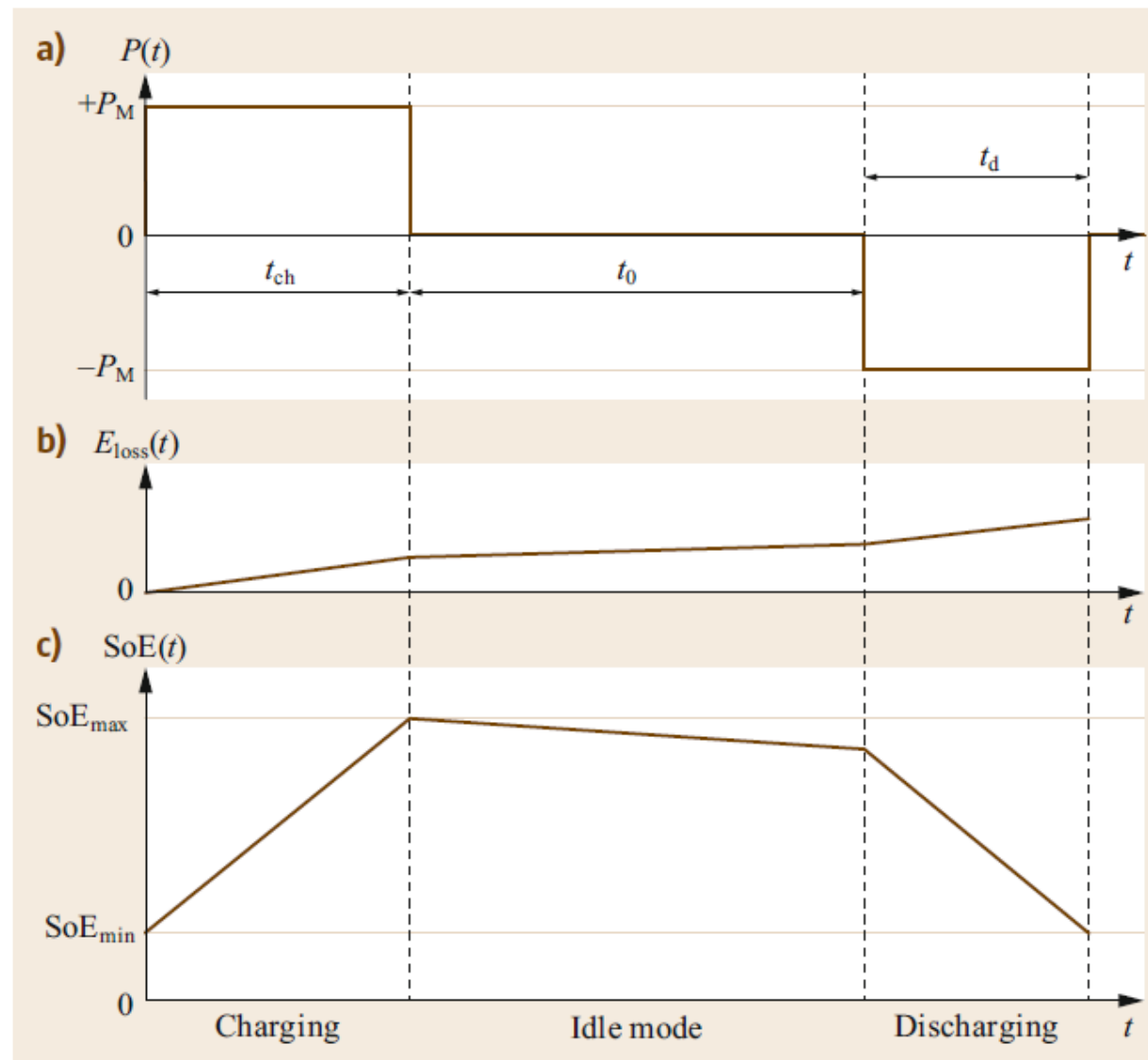




- ✓ Ο συνολικός βαθμός απόδοσης μπορεί να ορισθεί ως ο λόγος της ενέργειας που ανακτάται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης (E_d) προς την ενέργεια που δαπανήθηκε για τη φόρτιση (E_{ch}).

$$\eta = \frac{E_d}{E_{ch}} = \frac{P_M t_d}{P_M t_{ch}} = \frac{t_d}{t_{ch}}$$

- ✓ Υπενθύμιση: Για να υπολογισθεί σωστά ο βαθμός απόδοσης, θα πρέπει στον κύκλο που τον υπολογίζουμε να ισχύει ότι η κατάσταση της ενέργειας αμέσως μετά την εκφόρτιση είναι ίση με την κατάσταση της ενέργειας αμέσως πριν ξεκινήσει η φόρτιση



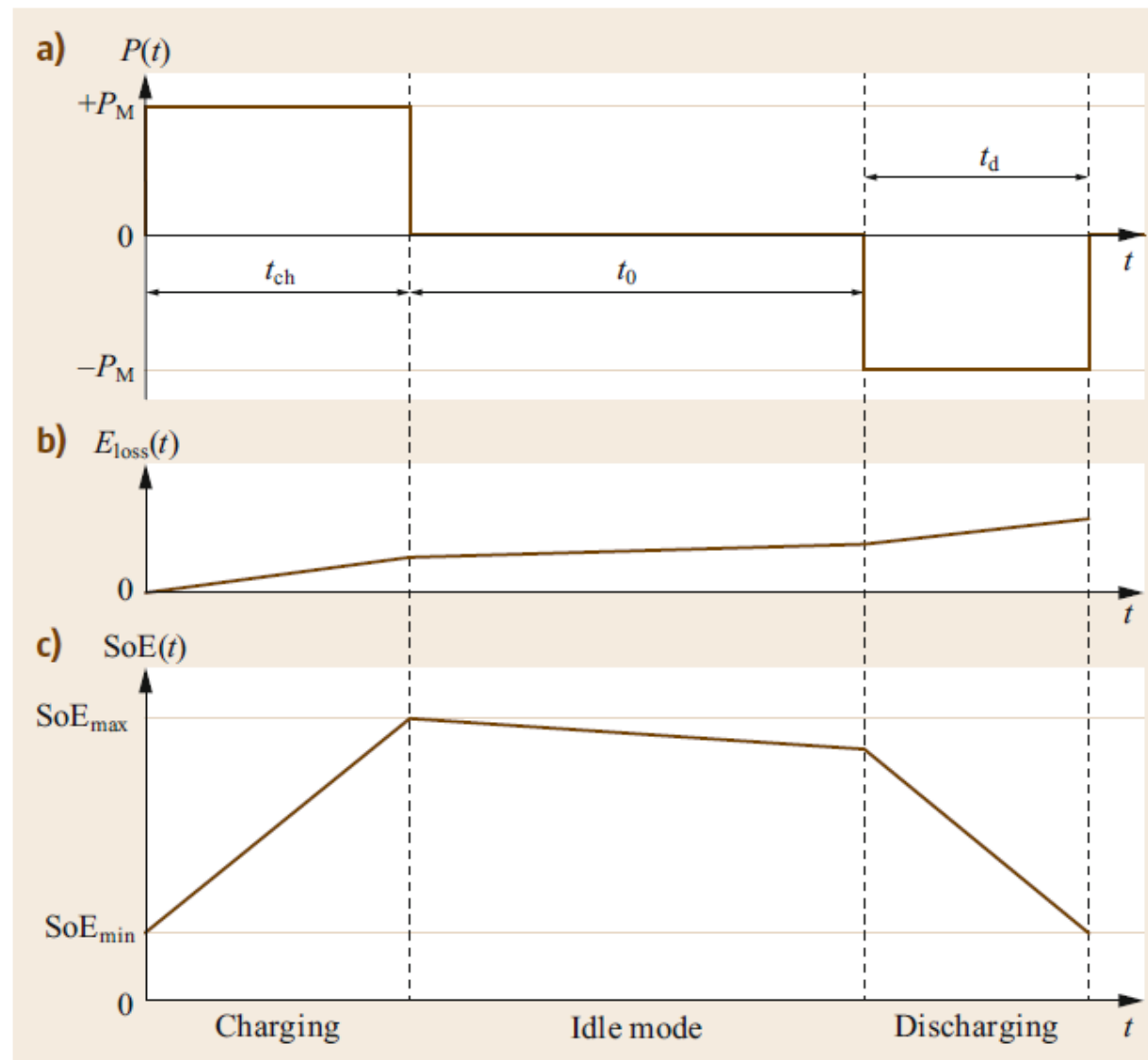


- ✓ **Συσχέτιση συνολικού βαθμού απόδοσης και επι μέρους βαθμών απόδοσης** (βαθμός απόδοσης φόρτισης, βαθμός απόδοσης εκφόρτισης, συντελεστής αυτό-εκφόρτισης)

$$\eta = \frac{E_{ch} - E_{loss}}{E_{ch}}$$
$$= \frac{P_M t_{ch} - a P_M^2 (t_{ch} + t_d) - \int P_0[SoE(t)] dt}{P_M t_{ch}}$$

- ✓ Που με λίγες “απλές” πράξεις μπορεί να γραφεί:

$$n = \frac{1 - a P_M}{1 + a P_M} - \frac{\int P_0[SoE(t)] dt}{P_M t_{ch} (1 + a P_M)}$$





Βαθμός Απόδοσης



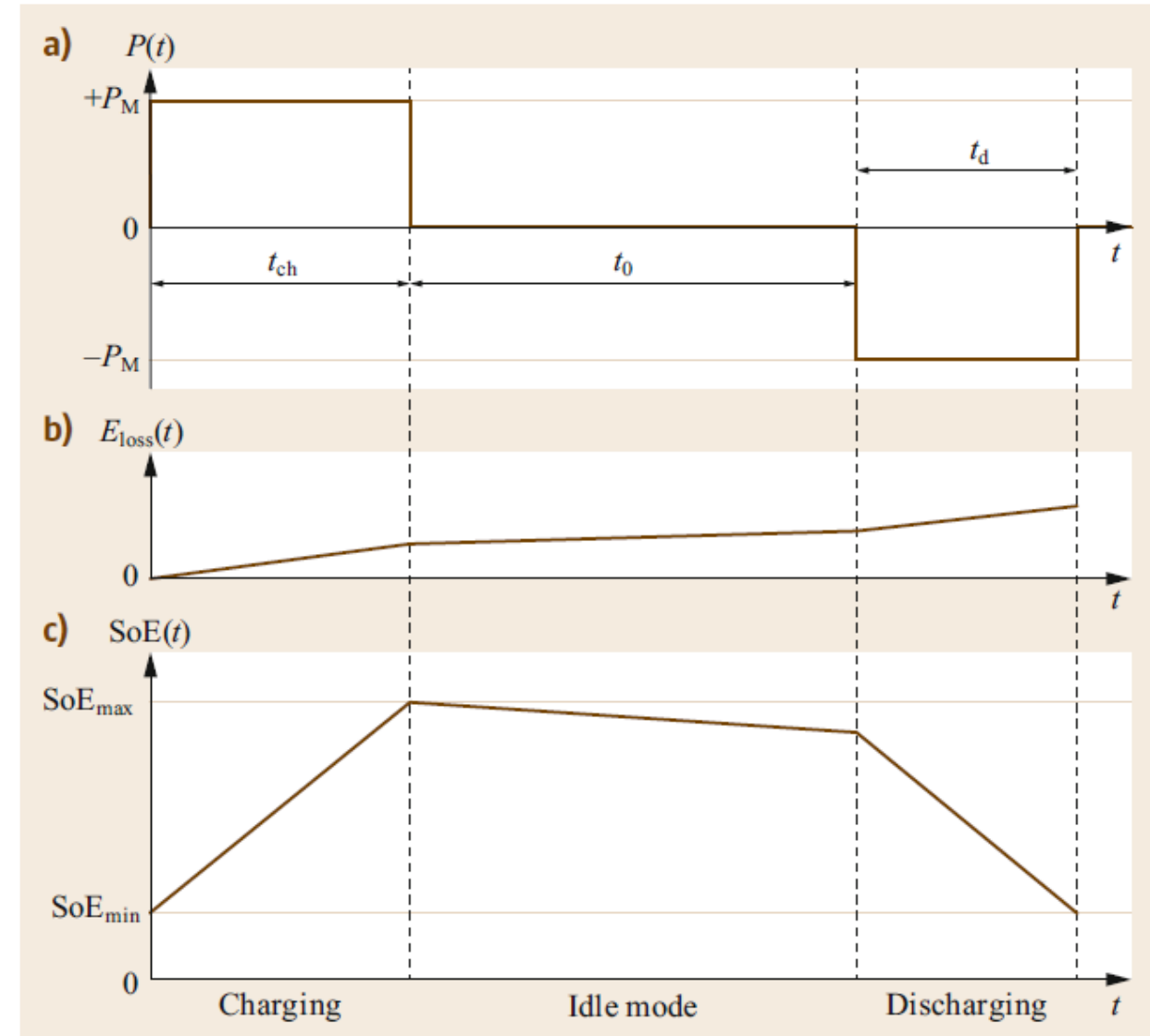
- ✓ Αν θεωρήσουμε τους στιγμιαίους βαθμούς απόδοσης κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση θα έχουμε:

$$\eta_{ch} = \frac{P_M - aP_M^2}{P_M} = 1 - aP_M$$

$$\eta_d = \frac{P_M}{P_M + aP_M^2} = \frac{1}{1 + aP_M}$$

- ✓ Επίσης, για το συντελεστή αυτό-εκφόρτισης θα ισχύει:

$$\eta_0 = \frac{\int P_0[SoE(t)]dt}{P_M t_{ch}}$$





- ✓ Επομένως, με βάση τα προηγούμενα η σχέση:

$$n = \frac{1 - aP_M}{1 + aP_M} - \frac{\int P_0[SoE(t)]dt}{P_M t_{ch}(1 + aP_M)}$$

- ✓ Μετασχηματίζεται στην:

$$\eta = n_d(n_{ch} - n_0)$$

- ✓ Η παραπάνω σχέση φανερώνει την επίδραση των επί μέρους βαθμών απόδοσης στο συνολικό βαθμό απόδοσης του ΣΑΕ. Πρέπει να τονιστεί ότι ακριβώς η ίδια σχέση ισχύει για οπουδήποτε προφίλ της ισχύος φόρτισης και της ισχύος εκφόρτισης

