

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΠΕ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ»



Των φοιτητών
Σταύρου Δημήτριος,
Αρ. Μητρώου 516125
Κωνσταντινίδης Ιωάννης,
Αρ. Μητρώου 516067

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο Κιοσκερίδης
Ιορδάνης
Βαθμίδα Καθηγητής

Ημερομηνία 23/01/2026

Τίτλος Δ.Ε. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ
ΑΠΕ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ

Κωδικός Δ.Ε. 25186

Όνοματεπώνυμο φοιτητών Σταύρου Δημήτριος, Ιωάννης Κωνσταντινίδης

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 15/03/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 23/01/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών Σταύρου Δημήτριου και Ιωάννη Κωνσταντινίδη που την εκπόνησαν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη και τη σχεδίαση ενός καινοτόμου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) με χρήση υπερπυκνωτών, στο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της ανάγκης για βιώσιμα ενεργειακά συστήματα. Η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στα ηλεκτρικά δίκτυα δημιουργεί νέες προκλήσεις, καθώς η στοχαστική και διαλείπουσα φύση της παραγωγής απαιτεί τεχνολογίες αποθήκευσης που να ανταποκρίνονται γρήγορα και αποδοτικά στις διακυμάνσεις της προσφερόμενης ισχύος. Σε αυτό το περιβάλλον, οι υπερπυκνωτές αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση, χάρη στη μεγάλη πυκνότητα ισχύος, την εξαιρετικά ταχεία φόρτιση/εκφόρτιση και τη μακροχρόνια διάρκεια ζωής τους.

Η εργασία αναπτύσσει τόσο το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνολογιών αποθήκευσης όσο και τη λεπτομερή ανάλυση της αρχής λειτουργίας των υπερπυκνωτών. Παράλληλα, διερευνάται η εφαρμογή τους σε συστήματα ΑΠΕ μέσω προσομοίωσης σε περιβάλλον Matlab/Simulink, ενώ πραγματοποιείται και πειραματική υλοποίηση σε εργαστηριακή διάταξη. Τέλος, η εργασία παρουσιάζει συγκριτική αξιολόγηση των υπερπυκνωτών έναντι άλλων τεχνολογιών αποθήκευσης και παραθέτει τα συμπεράσματα και τις προτάσεις για μελλοντική ανάπτυξη.

Στόχος της είναι να συμβάλει στην κατανόηση του ρόλου των υπερπυκνωτών στα ενεργειακά συστήματα του μέλλοντος και να αναδείξει τις δυνατότητές τους για την ενίσχυση της αξιοπιστίας και της ευστάθειας των δικτύων με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη και τη σχεδίαση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για εφαρμογές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), βασισμένου στη χρήση υπερπυκνωτών. Η ανάγκη για αποθήκευση προκύπτει από τη διαλείπουσα παραγωγή των ΑΠΕ, η οποία δημιουργεί απότομες μεταβολές ισχύος και διακυμάνσεις στην τάση. Οι υπερπυκνωτές αποτελούν κατάλληλη λύση για την αντιμετώπιση αυτών των μεταβολών, λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος, της ταχύτατης φόρτισης/εκφόρτισης και της μεγάλης διάρκειας ζωής τους.

Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύχθηκε μοντέλο προσομοίωσης σε περιβάλλον Matlab/Simulink, το οποίο περιλαμβάνει φωτοβολταϊκή πηγή, μετατροπέα ισχύος και συστοιχία υπερπυκνωτών. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της δυνατότητας των υπερπυκνωτών να εξομαλύνουν απότομες μεταβολές ισχύος (fast transients), να σταθεροποιούν την τάση του DC-link και να βελτιώνουν τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι υπερπυκνωτές μειώνουν σημαντικά τις διακυμάνσεις της τάσης και μπορούν να απορροφήσουν ή να παρέχουν ισχύ σε πολύ μικρό χρόνο, βελτιώνοντας την απόκριση του συστήματος υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης παραγωγής.

Παράλληλα, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση με άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως μπαταρίες λιθίου, αντλησιοταμίευση, Flywheels και συστήματα CAES. Διαπιστώθηκε ότι, ενώ οι υπερπυκνωτές υπολείπονται σε ενεργειακή πυκνότητα και δεν μπορούν να καλύψουν ανάγκες μακράς διάρκειας, υπερέχουν σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ισχύ, άμεση απόκριση και πολύ μεγάλο αριθμό κύκλων.

Συνολικά, η εργασία καταλήγει ότι οι υπερπυκνωτές αποτελούν ιδανική τεχνολογία για την εξομάλυνση της παραγωγής ΑΠΕ και τη διαχείριση βραχυπρόθεσμων μεταβολών, ενώ μπορούν να ενσωματωθούν σε υβριδικά συστήματα με μπαταρίες για ακόμα καλύτερη απόδοση. Οι προσομοιώσεις επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα της αρχιτεκτονικής και θέτουν τις βάσεις για μελλοντική εργαστηριακή υλοποίηση και βελτιστοποίηση.

«Study and Design of an energy storage system from RES using supercapacitors»

«Stavrou Dimitrios & Konstantinidis Ioannis»

Abstract

This thesis investigates the study and design of an energy storage system for Renewable Energy Sources (RES), based on the use of supercapacitors. The motivation arises from the intermittent and highly fluctuating nature of RES generation, which leads to rapid power variations and voltage instability. Supercapacitors are an attractive solution for addressing these short-term fluctuations due to their high power density, extremely fast charge/discharge capability, and long cycle life.

A complete simulation model was developed in Matlab/Simulink, incorporating a photovoltaic (PV) source, a power converter, and a supercapacitor bank. This model was used to evaluate the ability of supercapacitors to smooth fast transients, stabilize the DC-link voltage, and improve the dynamic behavior of the system under variable solar irradiation and load conditions. The simulation results demonstrated that supercapacitors significantly reduce voltage deviations and can instantaneously absorb or inject power, enhancing system response during abrupt changes in PV output.

Additionally, a comparative analysis was conducted between supercapacitors and other energy storage technologies, including lithium-ion batteries, pumped-hydro storage, flywheels, and CAES systems. While supercapacitors exhibit lower energy density and therefore cannot support long-duration storage, they outperform alternative technologies in applications requiring rapid power support, high cycling frequency, and exceptional responsiveness.

Overall, the thesis concludes that supercapacitors are highly suitable for smoothing the output of RES and managing short-term fluctuations. Their performance can be further enhanced when integrated into hybrid systems combining supercapacitors with batteries, providing an optimal balance between energy and power capabilities. The simulation study confirms the effectiveness of the proposed architecture and provides a solid foundation for future laboratory implementation and system optimization.

Περιεχόμενα

| | |
|---|----|
| Πρόλογος..... | 3 |
| Περίληψη | 4 |
| Abstract | 5 |
| Κατάλογος Σχημάτων | 9 |
| Κατάλογος Πινάκων | 10 |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή..... | 11 |
| 1.1 Παρουσίαση Θέματος | 11 |
| 1.2 Σκοπός και Στόχοι..... | 12 |
| 1.3 Μεθοδολογία..... | 12 |
| 1.4 Δομή της Εργασίας | 13 |
| 1.4.1 Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή..... | 13 |
| 1.4.2 Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο & Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας | 13 |
| 1.4.3 Κεφάλαιο 3: Υπερπυκνωτές – Λειτουργία, Τεχνολογία & Εφαρμογές..... | 13 |
| 1.4.4 Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση Συστήματος Αποθήκευσης με Υπερπυκνωτές..... | 14 |
| 1.4.5 Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση MATLAB/Simulink και Τεκμηρίωση Κώδικα..... | 14 |
| 1.4.6 Κεφάλαιο 6: Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας | 15 |
| 1.4.7 Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Προτάσεις..... | 16 |
| Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο & Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας | 16 |
| 2.1 ΑΠΕ και Αποθήκευση Ενέργειας | 16 |
| 2.2 Τρέχουσα Έρευνα για Υπερπυκνωτές σε ΑΠΕ | 18 |
| 2.3 Βασικές Αρχές Αποθήκευσης: Υπερπυκνωτές έναντι Μπαταριών | 20 |
| Κεφάλαιο 3: Υπερπυκνωτές – Λειτουργία, Τεχνολογία & Εφαρμογές..... | 21 |
| 3. 1 Αρχές λειτουργίας υπερπυκνωτών..... | 21 |
| 3. 2 Δομή και είδη υπερπυκνωτών..... | 23 |
| 3. 3 Χαρακτηριστικά απόδοσης..... | 24 |
| 3. 4 Εφαρμογές υπερπυκνωτών..... | 27 |
| 3. 4. 1 Προηγμένα Υλικά και Τεχνολογίες | 28 |
| 3. 4. 2 Οικονομικά Χαρακτηριστικά & Σύγκριση | 28 |
| Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση Συστήματος Αποθήκευσης με Υπερπυκνωτές..... | 29 |
| 4.1 Περιγραφή συστήματος: Επιλογή “κοινών” προδιαγραφών (βάση σχεδίασης)..... | 29 |
| 4. 2 Διαστασιολόγηση (με αριθμούς)..... | 30 |
| 4. 3 Προτεινόμενο μοντέλο Matlab/Simulink (PV ή Αιολικό)..... | 32 |
| 4. 3. 1 Υποσυστήματα (high-level)..... | 32 |
| 4. 3. 2 Μοντέλο υπερπυκνωτή | 32 |

| | |
|--|----|
| 4. 4 Αποτελέσματα προσομοίωσης (ενδεικτικό αριθμητικό παράδειγμα) και ανάλυση | 34 |
| 4. 4 Ρύθμιση PI ελεγκτών (tuning)..... | 36 |
| 4.1 Ρύθμιση εσωτερικού βρόχου ρεύματος (inner current loop) | 37 |
| 4. 2 Ρύθμιση εξωτερικού βρόχου τάσης (outer DC-link voltage loop)..... | 38 |
| 4.2 Διαδικασία επαλήθευσης και τελικής ρύθμισης στο Simulink..... | 40 |
| 4. 3 Μεθοδολογία Ρύθμισης Ελέγχου (Algorithm box)..... | 40 |
| 4. 4 Προσαρμογή κερδών σε δύο σημεία λειτουργίας ($V_{sc} = 30 \text{ V}$ και $V_{sc} = 48 \text{ V}$) | 41 |
| Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση MATLAB/Simulink - Τεκμηρίωση | 42 |
| 5. 1 Στόχος προσομοίωσης και μετρικές αξιολόγησης | 42 |
| 5. 2 Περιγραφή μοντέλου..... | 44 |
| 5. 2. 1 Μοντέλο υπερπυκνωτή: ισοδύναμο κύκλωμα και δυναμική | 44 |
| 5.2. 2 Μοντέλο φωτοβολταϊκού (PV) ως πηγή ΑΠΕ..... | 45 |
| 5. 2. 3 Μοντέλα μετατροπών: επιλογή επιπέδου πιστότητας..... | 45 |
| 5. 3 Παραμετροποίηση από datasheet (θεωρητική προσαρμογή)..... | 46 |
| 5. 3. 1 Πίνακας βασικών παραμέτρων | 46 |
| 5. 3. 2 Εξαγωγή παραμέτρων από datasheet και προσέγγιση προσαρμογής (fit) χωρίς πειραματικά δεδομένα..... | 47 |
| 5. 4 Υλοποίηση στο Simulink (μοντέλο και σενάρια) | 50 |
| 5. 4. 1 Δομή μοντέλου και ροή ισχύος..... | 50 |
| 5.4. 2 Υλοποίηση ελεγκτών, ορίων και anti-windup | 52 |
| 5. 4. 3 Σενάρια δοκιμών (test cases) | 53 |
| 5. 5 Αυτοματοποίηση με MATLAB: εκτέλεση, logging και εξαγωγή αποτελεσμάτων..... | 53 |
| 5. 5. 1 Στόχος αυτοματοποίησης και αρχιτεκτονική αρχείων..... | 53 |
| 5. 2. 2 Εκτέλεση προσομοιώσεων με sim() και SimulationInput/Output | 54 |
| 5.5. 3 Logging και εξαγωγή δεδομένων (Simulink Data Inspector)..... | 54 |
| 5. 5. 4 Παραγωγή γραφημάτων και εξαγωγή σε εικόνες | 54 |
| 5. 5. 5 Εξαγωγή πινάκων μετρικών σε Excel/CSV | 54 |
| 5. 6 Υπολογισμός RMSE/MAE σε θεωρητικό πλαίσιο | 55 |
| 5. 7 Προτεινόμενη πειραματική επικύρωση (μελλοντική εργασία)..... | 56 |
| 5. 7. 1 Διαδικασία επικύρωσης σε περίπτωση υπαρξης μετρήσεων..... | 56 |
| 5.7. 2 Τι εφαρμόζεται στο παρόν στάδιο (χωρίς πειραματικά δεδομένα)..... | 56 |
| 5. 8 Περιορισμοί και προτάσεις βελτίωσης μοντέλου | 57 |
| Κεφάλαιο 6: Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας | 57 |
| 6.1 Εισαγωγή και ρόλος της αποθήκευσης στα συστήματα ΑΠΕ | 58 |
| 6.2 Χρονικές κλίμακες εφαρμογών και οπτική ισχύος–ενέργειας..... | 58 |

| | |
|--|----|
| 6.3 Κριτήρια σύγκρισης και μεθοδολογική προσέγγιση..... | 59 |
| 6.4 Υπερπυκνωτές: αρχές λειτουργίας και τεχνικές ιδιαιτερότητες | 60 |
| 6.5 Υπερπυκνωτές έναντι μπαταριών ιόντων λιθίου (Li-ion): τεχνικοοικονομική σύγκριση | 61 |
| 6.6 Υπερπυκνωτές έναντι αντλησιοταμίευσης: κλίμακα, γεωγραφία και ρόλος στο σύστημα | 62 |
| 6.7 Άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης: συνοπτική αξιολόγηση | 63 |
| 6.7.1 Συσσωρευτές ροής (Flow batteries)..... | 63 |
| 6.7.2 Σφόνδυλοι (Flywheels) | 63 |
| 6.7.3 Αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα (CAES)..... | 63 |
| 6.7.4 Υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκευση (SMES)..... | 63 |
| 6.8 Πίνακες σύγκρισης και πολυκριτηριακή απεικόνιση..... | 63 |
| 6.8.1 Εμβάθυνση σε επιλεγμένες τεχνολογίες και πρακτικές επιπτώσεις | 66 |
| 6.8.2 Οδηγός επιλογής τεχνολογίας και επιπτώσεις στον σχεδιασμό ελέγχου..... | 67 |
| 6.8.3 Συμπεράσματα κεφαλαίου | 68 |
| Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Προτάσεις..... | 69 |
| 7. 1 Συμπεράσματα | 69 |
| 7. 2 Απάντηση σε ερευνητικά ερωτήματα | 70 |
| 7. 3 Περιορισμοί της παρούσας εργασίας..... | 71 |
| 7. 4 Μελλοντικές προτάσεις..... | 72 |
| 7. 5 Σύνοψη Κεφαλαίου και σύνδεση με τα Παραρτήματα..... | 73 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 73 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1: Δομή υπερπυκνωτή διπλής στρώσης. (Πηγή: Wikipedia) | 22 |
| Σχήμα 2: Διαφορά μεταξύ EDLC 1 | 24 |
| Σχήμα 3: Συνδέσεις Υπερπυκνωτών & Κυκλώματα Εξισορρόπησης. | 28 |
| Σχήμα 4: Ενεργειακή έναντι Ισχύος Πυκνότητας (Ragone plot). | 29 |
| Σχήμα 5: Διάγραμμα μπλοκ συστήματος ΑΠΕ με αποθήκευση σε υπερπυκνωτές..... | 32 |
| Σχήμα 6: Αρχιτεκτονική ελέγχου φόρτισης/εκφόρτισης υπερπυκνωτή (outer Vdc + inner Isc)..... | 33 |
| Σχήμα 7: Προτεινόμενη δομή μοντέλου Matlab/Simulink (υποσυστήματα)..... | 33 |
| Σχήμα 8: Χρονική εξέλιξη της τάσης DC ζυγού Vdc(t) και της αναφοράς Vdc,ref = 48 V..... | 34 |
| Σχήμα 9: Μεταβολές ισχύος παραγωγής ΑΠΕ Ppv(t), ισχύος φορτίου Pload(t) και ισχύος υπερπυκνωτή | 35 |
| Σχήμα 10: Χρονική εξέλιξη της τάσης της συστοιχίας υπερπυκνωτών Vsc(t) | 35 |
| Σχήμα 12: Κατάσταση φόρτισης του υπερπυκνωτή SoC_sc(t) | 39 |
| Σχήμα 13: Ενδεικτικό διάγραμμα κύριου μοντέλου Simulink (top-level)..... | 51 |
| Σχήμα 14: Τυπικές τοπολογίες υβριδικής αποθήκευσης (HESS) μπαταρίας-υπερπυκνωτή | 52 |
| Σχήμα 15: Δομή ελέγχου διπλού βρόχου σε Simulink | 52 |
| Σχήμα 16: Αμφίδρομος DC/DC μετατροπέας με έλεγχο ρεύματος πηνίου..... | 53 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 1: Σύγκριση των βασικών τύπων υπερπυκνωτών ως προς τον μηχανισμό φόρτισης, την τυπική ενεργειακή πυκνότητα και κύκλους ζωής. | 25 |
| Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας..... | 28 |
| Πίνακας 3: Κέρδη PI current loop για δύο σημεία λειτουργίας | 41 |
| Πίνακας 4: Ισοδύναμο κέρδη voltage PI σε μορφή ισχύος (Psc,ref)..... | 42 |
| Πίνακας 5: Ενδεικτικές μετρικές αξιολόγησης προσομοίωσης..... | 43 |
| Πίνακας 6: Ενδεικτικοί παράμετροι κυψέλης και συστοιχίας υπερπυκνωτών..... | 46 |
| Πίνακας 7: Χαρτογράφηση σημάτων, logged variables και μετρικών αξιολόγησης | 47 |
| Πίνακας 8: Χρονικά παράθυρα αξιολόγησης ανά σενάριο | 55 |
| Πίνακας 9: Κριτήρια σύγκρισης τεχνολογιών αποθήκευσης (ορισμοί και σημασία). | 59 |
| Πίνακας 10: Ενδεικτικά τεχνικά χαρακτηριστικά βασικών τεχνολογιών αποθήκευσης. | 63 |
| Πίνακας 11: Ενδεικτική βαθμολόγηση (1–5) για διάγραμμα ραντάρ. | 65 |

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Παρουσίαση Θέματος

Στη σύγχρονη εποχή της ενεργειακής μετάβασης, οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) παίζουν ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, ένα εγγενές χαρακτηριστικό των ΑΠΕ είναι η διαλείπουσα και στοχαστική φύση τους: η ηλιοφάνεια και ο άνεμος μεταβάλλονται διαρκώς, οδηγώντας σε έντονες διακυμάνσεις στην παραγόμενη ισχύ. Αυτή η διαλείπουσα φύση σημαίνει ότι η αποθήκευση ενέργειας είναι απαραίτητη για την εξομάλυνση της παροχής και τη διασφάλιση της σταθερότητας του δικτύου (EnergyMag, 2024). Με άλλα λόγια, χωρίς αποτελεσματικούς τρόπους αποθήκευσης, η υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ θα μπορούσε να προκαλεί ανισορροπίες μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, υπονομεύοντας την αξιοπιστία του ενεργειακού συστήματος. Μάλιστα, όπως έχει χαρακτηριστεί, η ανάπτυξη και ενίσχυση των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας αποτελεί «μονόδρομο» για την αντιμετώπιση του ενεργειακού ελλείμματος και την ασφαλή ενεργειακή μετάβαση (Κυπαρισσούδης, 2018).

Παραδοσιακά, τα ηλεκτρικά δίκτυα σχεδιάζονταν γύρω από μεγάλες μονάδες παραγωγής με δυνατότητα ελέγχου (π.χ. θερμικούς σταθμούς ή υδροηλεκτρικά φράγματα). Η παραγωγή μπορούσε να ρυθμιστεί ανάλογα με τη ζήτηση, με αποτέλεσμα να υπάρχει πάντα μια σχετική ισορροπία χωρίς την ανάγκη εκτεταμένης αποθήκευσης. Η ραγδαία διείσδυση των ΑΠΕ ανατρέπει αυτό το μοντέλο: οι πηγές αυτές εξαρτώνται από τον καιρό και δεν είναι διαθέσιμες on-demand. Σε αυτό το νέο σκηνικό, η αποθήκευση ενέργειας λειτουργεί ως ενδιάμεσος αποσβεστήρας (“buffer”), εξομαλύνοντας τις διαφορές μεταξύ τυχαίας παραγωγής και κατανάλωσης. Με την αποθήκευση, ένα ενεργειακό σύστημα με υψηλό ποσοστό ΑΠΕ μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί αξιόπιστα, ακόμη κι όταν η παραγωγή μεταβάλλεται απότομα ή όταν λείπει τελείως (π.χ. τη νύχτα ή σε άπνοια).

Η αποθήκευση ενέργειας επιτρέπει τη συσσώρευση πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας όταν η παραγωγή από ΑΠΕ υπερβαίνει τη ζήτηση, και την απόδοσή της πίσω στο δίκτυο όταν η παραγωγή υπολείπεται. Έτσι διασφαλίζεται ότι καμία διαθέσιμη πράσινη κιλοβατώρα δεν πάει χαμένη και ότι οι καταναλωτές έχουν ρεύμα ακόμη και όταν «δεν φυσάει» ή «δεν έχει ήλιο». Επιπλέον, η αποθήκευση συμβάλλει στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών, όπως έλεγχο συχνότητας και τάσης, βελτιώνοντας την ευστάθεια και την αξιοπιστία του δικτύου. Στην Ελλάδα αλλά και διεθνώς, γίνεται πλέον σαφές ότι για την επίτευξη των στόχων διείσδυσης των ΑΠΕ απαιτείται παράλληλα ανάπτυξη μεγάλων εγκαταστάσεων αποθήκευσης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας καλούνται να παίξουν κρίσιμο ρόλο ώστε να αυξηθεί η διείσδυση των ΑΠΕ στα ηλεκτρικά δίκτυα του μέλλοντος (Κυρανάς, Κ., 2013).

Μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης, οι υπερπυκνωτές (supercapacitors) αναδεικνύονται ως μια πολλά υποσχόμενη λύση σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Οι υπερπυκνωτές είναι συσκευές που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια ως στατικό ηλεκτρικό φορτίο, αντί να βασίζονται σε αργές χημικές αντιδράσεις όπως οι μπαταρίες. Λόγω αυτής της διαφοράς, μπορούν να φορτίζουν και να εκφορτίζουν εξαιρετικά γρήγορα, παρέχοντας πολύ υψηλή ισχύ εξόδου. Επίσης παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής με εκατοντάδες χιλιάδες κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης χωρίς σημαντική υποβάθμιση της χωρητικότητάς τους (Richie, 2021). Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τους υπερπυκνωτές ιδανικούς για την αντιμετώπιση βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων – μπορούν να απορροφούν ή να παρέχουν ενέργεια σε χρονικό διάστημα δευτερολέπτων ή και χιλιοστών του δευτερολέπτου, “εξομαλύνοντας” τις απότομες μεταβολές ισχύος από μια ανεμογεννήτρια ή ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Παρά τη χαμηλότερη ενεργειακή τους πυκνότητα σε σύγκριση με τις συμβατικές μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές θεωρούνται πλέον ως μια νέα γενιά τεχνολογίας αποθήκευσης που μπορεί να συμπληρώσει και σε ορισμένες περιπτώσεις να υποκαταστήσει τις μπαταρίες σε επιμέρους ρόλους (Mancini et al., 2024). Πρόσφατες μελέτες επισημαίνουν ότι η αξιοποίηση υπερπυκνωτών σε δίκτυα με υψηλή συμμετοχή αιολικών και φωτοβολταϊκών μπορεί να αυξήσει περαιτέρω το μερίδιο των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα, ενισχύοντας την απανθρακοποίηση του τομέα ηλεκτρικής ενέργειας (Mancini et al., 2024). Για τους λόγους αυτούς, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην μελέτη και σχεδίαση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτών, ειδικά προσανατολισμένου για εφαρμογές σε συστήματα ΑΠΕ.

1.2 Σκοπός και Στόχοι

Ο σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας και ο σχεδιασμός ενός καινοτόμου συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για εφαρμογές ΑΠΕ, βασισμένου στη χρήση υπερπυκνωτών. Σε αυτό το πλαίσιο, οι κύριοι στόχοι που τίθενται είναι οι ακόλουθοι:

- **Μελέτη βιβλιογραφίας και θεωρητικό υπόβαθρο:** Να πραγματοποιηθεί ανασκόπηση της διεθνούς και ελληνικής βιβλιογραφίας σχετικά με την αποθήκευση ενέργειας από ΑΠΕ και τις τεχνολογίες υπερπυκνωτών. Θα εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα, οι προκλήσεις και τα κενά γνώσης που αναφέρονται σε προηγούμενες έρευνες.
- **Προσομοίωση συστήματος με υπερπυκνωτές:** Να αναπτυχθεί μοντέλο του προτεινόμενου συστήματος αποθήκευσης σε περιβάλλον λογισμικού (Matlab/Simulink). Μέσω της προσομοίωσης θα αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος στην εξομάλυνση εξόδου ενός στοχαστικού παραγωγού ΑΠΕ (π.χ. φωτοβολταϊκού ή αιολικού πάρκου) και θα διερευνηθούν οι βέλτιστοι παράμετροι σχεδίασης (χωρητικότητα υπερπυκνωτών, ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης κ.λπ.).
- **Σχεδίαση και ανάπτυξη εργαστηριακής διάταξης:** Να υλοποιηθεί σε εργαστηριακό επίπεδο ένα πρωτότυπο σύστημα αποθήκευσης με υπερπυκνωτές. Αυτό περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλης συστοιχίας υπερπυκνωτών και τη σχεδίαση του απαραίτητου ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος (π.χ. μετατροπέα DC/DC) που θα διαχειρίζεται τη φόρτιση και εκφόρτιση.
- **Πειραματική αξιολόγηση:** Να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στο εργαστηριακό πρωτότυπο για την αξιολόγηση της απόδοσής του. Οι πειραματικές δοκιμές θα εστιαστούν στην ικανότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται σε απότομες μεταβολές (π.χ. αιχμές ή βυθίσεις παραγωγής), στη σταθεροποίηση της τάσης/συχνότητας (σε μικροδίκτυο ή απομονωμένο φορτίο), καθώς και στην αποδοτικότητα του συστήματος (απώλειες, θερμικά χαρακτηριστικά).
- **Σύγκριση και ανάλυση αποτελεσμάτων:** Να συγκριθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα πειραματικά δεδομένα, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία του μοντέλου και την αποτελεσματικότητα του σχεδιασμένου συστήματος. Επίσης, να συζητηθούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της λύσης με υπερπυκνωτές σε σύγκριση με άλλες λύσεις αποθήκευσης (όπως οι μπαταρίες) για εφαρμογές ΑΠΕ.

1.3 Μεθοδολογία

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων ακολουθήθηκε μια συνδυαστική μεθοδολογική προσέγγιση. Αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτενής θεωρητική μελέτη (βιβλιογραφική επισκόπηση) των αρχών λειτουργίας των υπερπυκνωτών, των χαρακτηριστικών τους, καθώς και των προκλήσεων αποθήκευσης ενέργειας σε δίκτυα με ΑΠΕ. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε λογισμικό προσομοιώσεων (Matlab/Simulink) για την ανάπτυξη μοντέλου του συστήματος αποθήκευσης: το μοντέλο αυτό

συμπεριέλαβε μια συστοιχία υπερπυκνωτών συνδεδεμένη σε μια πηγή ΑΠΕ μέσω μετατροπέων ισχύος, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος σε διάφορα σενάρια (π.χ. απότομη μεταβολή ηλιακής ακτινοβολίας ή ριπή ανέμου).

Έπειτα, σχεδιάστηκε μια εργαστηριακή διάταξη βασισμένη στα ευρήματα της προσομοίωσης. Πραγματοποιήθηκε επιλογή πραγματικών υπερπυκνωτών και κατασκευάστηκε κύκλωμα ελέγχου και ισχύος (ηλεκτρονικά ισχύος) ώστε να υλοποιηθεί το σύστημα σε μικρή κλίμακα. Τέλος, διενεργήθηκαν πειραματικές μετρήσεις με σκοπό την επαλήθευση των θεωρητικών προβλέψεων και την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος στον πραγματικό κόσμο. Η μεθοδολογία αυτή συνδυάζει θεωρία, προσομοίωση και πρακτική εφαρμογή, διασφαλίζοντας ότι τα αποτελέσματα της εργασίας είναι τόσο επιστημονικά τεκμηριωμένα όσο και πρακτικά εφαρμόσιμα.

1.4 Δομή της Εργασίας

Η εργασία δομείται σε επτά κεφάλαια για την ομαλή παρουσίαση του θέματος.

1.4.1 Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

- **Παρουσίαση θέματος:** Επισκόπηση της ανάγκης αποθήκευσης ενέργειας στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και γιατί επιλέγονται οι υπερπυκνωτές ως λύση.
- **Σκοπός και στόχοι:** Διατύπωση του σκοπού της πτυχιακής (μελέτη και σχεδίαση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για ΑΠΕ με υπερπυκνωτές) και συγκεκριμένοι στόχοι που θα επιτευχθούν.
- **Μεθοδολογία:** Σύντομη περιγραφή της προσέγγισης – θεωρητική έρευνα, προσομοίωση σε Matlab/Simulink..
- **Δομή εργασίας:** Περιγραφή του περιεχομένου κάθε κεφαλαίου για κατάλληλη προετοιμασία, ως προς την ροή της εργασίας.

1.4.2 Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο & Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

- **ΑΠΕ και Αποθήκευση Ενέργειας:** Ανάλυση της διαλείπουσας φύσης των ΑΠΕ (αιολική, ηλιακή κ.λπ.) και της ανάγκης για αποθήκευση ενέργειας. Επισκόπηση των κύριων τεχνολογιών αποθήκευσης (μπαταρίες, αντλησιοταμίευση, θερμική αποθήκευση, κ.ά.) και του ρόλου τους στην ευστάθεια ενεργειακών συστημάτων.
- **Τρέχουσα έρευνα:** Παρουσίαση πρόσφατων μελετών και ερευνητικών εργασιών σχετικά με αποθήκευση ενέργειας από ΑΠΕ με χρήση υπερπυκνωτών. Ανάδειξη κενών γνώσης ή/και πλεονεκτημάτων που εντοπίζονται στη βιβλιογραφία.
- **Βασικές αρχές αποθήκευσης:** Σύγκριση χημικής αποθήκευσης (π.χ. σε μπαταρίες) έναντι αποθήκευσης σε πυκνωτές/υπερπυκνωτές. Έμφαση στην έννοια της ενεργειακής πυκνότητας έναντι της πυκνότητας ισχύος και πώς αυτές διαφοροποιούν τις διαθέσιμες τεχνολογίες.

1.4.3 Κεφάλαιο 3: Υπερπυκνωτές – Λειτουργία, Τεχνολογία & Εφαρμογές

- **Αρχές λειτουργίας υπερπυκνωτών:** Εισαγωγή στους υπερπυκνωτές (Electric Double-Layer Capacitors – EDLC). Σύντομη ιστορική αναδρομή των συμβατικών πυκνωτών και εξέλιξη προς τους υπερπυκνωτές. Επεξήγηση του τρόπου αποθήκευσης ενέργειας ηλεκτροστατικά (χωρίς χημικές αντιδράσεις) και πώς αυτό επιτρέπει σχεδόν απεριόριστους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης.
- **Δομή και είδη υπερπυκνωτών:** Ανάλυση των κύριων τύπων (διπλής στρώσης, ψευδο-χωρητικοί κ.λπ.), των υλικών (ηλεκτρόδια ενεργού άνθρακα, νανοσωματίδια, ηλεκτρολύτες) και

κατασκευαστικών μερών. Παρουσίαση διαγραμμάτων που απεικονίζουν την δομή τους για κατανόηση.

- **Χαρακτηριστικά απόδοσης:** Ονομαστική χωρητικότητα (Farad), τάση λειτουργίας, ενεργειακή πυκνότητα έναντι πυκνότητας ισχύος, χρόνοι φόρτισης/εκφόρτισης, απόδοση, διάρκεια ζωής. Συζήτηση για τα **πλεονεκτήματα** (μεγάλη πυκνότητα ισχύος, ταχύτατη φόρτιση, αντοχή σε πολλούς κύκλους, ευρύ θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας) και **μειονεκτήματα** (χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με συσσωρευτές).
- **Εφαρμογές υπερπυκνωτών:** Παράθεση πραγματικών εφαρμογών όπου οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποθήκευση ενέργειας από ΑΠΕ και άλλες χρήσεις. Π.χ. εξισορρόπηση φορτίου σε φωτοβολταϊκά/αιολικά συστήματα, ανάκτηση ενέργειας πέδησης σε οχήματα, παροδική υποστήριξη τάσης σε δίκτυα. Αυτές οι εφαρμογές καταδεικνύουν τη **διαθεσιμότητα και αξιοπιστία** της τεχνολογίας.

1.4.4 Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση Συστήματος Αποθήκευσης με Υπερπυκνωτές

- **Περιγραφή συστήματος:** Αναλυτική περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος αποθήκευσης. Προδιαγραφές του συστήματος (ισχύς/ενέργεια προς αποθήκευση, επιθυμητός χρόνος απόκρισης, ενσωμάτωση με πηγή ΑΠΕ όπως φωτοβολταϊκά ή ανεμογεννήτρια). Διάγραμμα μπλοκ του συστήματος που δείχνει την πηγή ΑΠΕ, τον μετατροπέα ισχύος και τον υπερπυκνωτή.
- **Μοντελοποίηση σε Matlab/Simulink:** Παρουσίαση του μοντέλου προσομοίωσης. Περιγραφή των χρησιμοποιούμενων μοντέλων υπερπυκνωτών (ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα) και μοντέλων πηγής ΑΠΕ. Εξήγηση των υποσυστημάτων στο Simulink (μετατροπείς DC/DC, ελεγκτές φόρτισης/εκφόρτισης κ.λπ.).
- **Έλεγχος και αλγόριθμοι διαχείρισης ενέργειας:** Περιγραφή της στρατηγικής ελέγχου για τη φόρτιση και εκφόρτιση του υπερπυκνωτή. Π.χ. αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας που αποφασίζει πότε η πλεονάζουσα ενέργεια από την ΑΠΕ θα αποθηκευτεί ή θα αποδοθεί από τον υπερπυκνωτή. Περιγραφή ρυθμιστών (controllers) που χρησιμοποιούνται (π.χ. ελεγκτής τάσης/ρεύματος).
- **Αποτελέσματα προσομοίωσης:** Παρουσίαση βασικών αποτελεσμάτων από το μοντέλο Simulink. Γραφήματα τάσης, ρεύματος, κατάστασης φόρτισης (State of Charge) του υπερπυκνωτή κατά τη λειτουργία του συστήματος. Ανάλυση των αποτελεσμάτων: επιβεβαίωση ότι το σύστημα ικανοποιεί τις προδιαγραφές (π.χ. σταθεροποίηση εξόδου ΑΠΕ, απόκριση σε απότομες μεταβολές φορτίου). Συζήτηση τυχόν βελτιστοποιήσεων στο σχεδιασμό με βάση τα αποτελέσματα προσομοίωσης.

1.4.5 Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση MATLAB/Simulink και Τεκμηρίωση Κώδικα

Στόχος προσομοίωσης και μετρικές αξιολόγησης

- Τι θέλουμε να αποδείξουμε (π.χ. smoothing ισχύος ΑΠΕ, σταθεροποίηση DC bus, ανταπόκριση σε μεταβολές φορτίου).
- Μετρικές: απόκλιση τάσης, peak current, χρόνος αποκατάστασης, ενεργειακή απόδοση, RMSE έναντι πειράματος.

Περιγραφή μοντέλου (θεωρητική βάση)

- Ισοδύναμο κύκλωμα υπερπυκνωτή (π.χ. C + ESR + διαρροή R_leak).
- Βασικές εξισώσεις (τερματική τάση, ενέργεια $E = \frac{1}{2}CV^2$).
- Υποθέσεις (γραμμικότητα, σταθερή ESR/ C ή εξάρτηση από τάση/θερμοκρασία).

Παράμετροι – βαθμονόμηση από datasheet/πειραματικά

- Πίνακας παραμέτρων: C, ESR, R_leak, Vmax, αρχική τάση.
- Πώς προκύπτουν (datasheet + fit από καμπύλες φόρτισης/εκφόρτισης).

Υλοποίηση στο Simulink (μοντέλο και σενάρια)

- Δομή μοντέλου: πηγή ΑΠΕ → μετατροπέας DC/DC → UC bank → φορτίο / DC bus.
- Controllers (PI, limits, anti-windup).
- Test cases:
 - step φορτίου
 - “συννεφιά”/μεταβολή PV
 - κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης

MATLAB scripts: εκτέλεση, αυτοματοποίηση και εξαγωγή αποτελεσμάτων

- Scripts που:
 - φορτώνουν παραμέτρους
 - τρέχουν sim()
 - παράγουν γραφήματα/πίνακες + export σε εικόνες για την εργασία

Περιορισμοί και προτάσεις βελτίωσης μοντέλου

- τι δεν πιάνεται (π.χ. θερμικά, μη γραμμικότητες, ESL)
- τι θα βελτιωθεί σε μελλοντικές εργασίες

1.4.6 Κεφάλαιο 6: Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας

- **Κριτήρια σύγκρισης:** Παρουσίαση των παραμέτρων βάσει των οποίων θα αξιολογηθούν οι τεχνολογίες αποθήκευσης (υπερπυκνωτές έναντι μπαταριών, αντλησιοταμίευσης, κ.λπ.). Τέτοια κριτήρια μπορεί να περιλαμβάνουν ενεργειακή πυκνότητα, πυκνότητα ισχύος, χρόνο απόκρισης, κύκλους ζωής, κόστος ανά kWh, απαιτήσεις συντήρησης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ωριμότητα τεχνολογίας.
- **Υπερπυκνωτές vs. Μπαταρίες:** Συγκριτική παρουσίαση των υπερπυκνωτών με τις παραδοσιακές μπαταρίες (π.χ. λιθίου). **Πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών:** πολύ υψηλή παροχή ισχύος, εξαιρετικά μεγάλος αριθμός κύκλων ζωής, ασφάλεια (χωρίς κίνδυνο θερμικής διαφυγής). **Μειονεκτήματα:** περιορισμένη ενεργειακή χωρητικότητα – οι υπερπυκνωτές αποθηκεύουν λιγότερη ενέργεια ανά κιλό σε σχέση με μια μπαταρία, παρότι αποδίδουν πολύ μεγαλύτερη ισχύ [2]. Συζήτηση σεναρίων όπου προτιμάται η μία ή η άλλη τεχνολογία.
- **Υπερπυκνωτές vs. Αντλησιοταμίευση:** Σύγκριση με αντλησιοταμιευτικά συστήματα (υδροηλεκτρική αποθήκευση). Αναφορά στο ότι η αντλησιοταμίευση είναι ώριμη τεχνολογία μεγάλης κλίμακας (μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύς παγκοσμίως στην αποθήκευση) αλλά απαιτεί κατάλληλη γεωγραφία και έχει μεγάλη χρονική σταθερά απόκρισης. Οι υπερπυκνωτές αντίθετα προσφέρονται για μικρότερη κλίμακα και ταχύτερες εναλλαγές ισχύος.
- **Άλλες τεχνολογίες:** Ενδεχομένως σύντομη σύγκριση και με άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης, όπως συσσωρευτές ροής (flow batteries), υπεραγωγία μαγνητικά συστήματα (SMES) κ.ά., εφόσον σχετίζονται με το θεωρητικό μέρος. Επισημάνση των δυνατών και αδύναμων σημείων κάθε τεχνολογίας σε σχέση με τη συγκεκριμένη εφαρμογή των ΑΠΕ.

- **Συνολική αξιολόγηση:** Ποιοτική και ποσοτική σύνοψη των ευρημάτων σύγκρισης (π.χ. πίνακας ή γράφημα πολλαπλών κριτηρίων). Ανάδειξη των περιπτώσεων όπου οι υπερπυκνωτές υπερτερούν ή υστερούν έναντι άλλων λύσεων. Ο αναγνώστης θα έχει έτσι μια πλήρη εικόνα των εναλλακτικών λύσεων αποθήκευσης και ειδικότερα της θέσης των υπερπυκνωτών στο σύγχρονο ενεργειακό τοπίο.

1.4.7 Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Προτάσεις

- **Συμπεράσματα:** Συνολική παρουσίαση των βασικών συμπερασμάτων της έρευνας και της μελέτης. Επισημάνση στο βαθμό που επιτεύχθηκαν οι στόχοι που τέθηκαν στην Εισαγωγή. Αναφορά στα κύρια ευρήματα: αποτελεσματικότητα του συστήματος υπερπυκνωτών για αποθήκευση ενέργειας από ΑΠΕ, επάρκεια ή περιορισμοί που εντοπίστηκαν, κ.λπ.
- **Απάντηση σε ερευνητικά ερωτήματα:** Ανασκόπηση των ερωτημάτων/υποθέσεων (αν είχαν τεθεί) και πώς τα αποτελέσματα του πειραματικού μέρους και της συγκριτικής ανάλυσης δίνουν απαντήσεις.
- **Μελλοντικές προτάσεις:** Προτάσεις για περαιτέρω εργασία και βελτιώσεις. Π.χ. μελλοντική έρευνα σε υλικά υπερπυκνωτών για υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, συνδυασμός υπερπυκνωτών με μπαταρίες (υβριδικά συστήματα) για βέλτιστη απόδοση, ή επέκταση της πειραματικής διάταξης σε μεγαλύτερη κλίμακα. Επίσης, προτάσεις για το πώς η παρούσα μελέτη θα μπορούσε να αξιοποιηθεί πρακτικά (π.χ. σε ένα πραγματικό ενεργειακό μικροδίκτυο).

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο & Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

2.1 ΑΠΕ και Αποθήκευση Ενέργειας

Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ χαρακτηρίζεται από μεταβλητότητα, καθώς εξαρτάται από φυσικά φαινόμενα που δεν μπορούν να ελεγχθούν: η ένταση του ηλιακού φωτός και του ανέμου μεταβάλλονται με τον καιρό, τη στιγμή της ημέρας και τις καιρικές συνθήκες. Αυτή η διαλείπουσα παραγωγή δημιουργεί προκλήσεις για τα ενεργειακά συστήματα, διότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σπάνια συμβαδίζει χρονικά με την προσφορά από τις ΑΠΕ. Για παράδειγμα, ένα φωτοβολταϊκό πάρκο παράγει το μέγιστο το μεσημέρι όταν ο ήλιος λάμπει έντονα, αλλά η αιχμή κατανάλωσης ρεύματος σε μια οικιστική περιοχή μπορεί να έρχεται το βράδυ. Χωρίς αποθήκευση, η περίσσεια ενέργειας τις ηλιόλουστες ώρες θα χάνεται, ενώ το βράδυ θα χρειάζονται εφεδρικές πηγές (π.χ. συμβατικοί σταθμοί) για να καλύψουν τη ζήτηση.

Η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας επομένως αναδεικνύεται ως κρίσιμη για την ενσωμάτωση υψηλών ποσοστών ΑΠΕ. Με την αποθήκευση μπορούμε να “εξομαλύνουμε” τη ροή ενέργειας, μεταφέροντας την περίσσεια παραγωγή μιας χρονικής στιγμής σε μια μεταγενέστερη στιγμή που υπάρχει ζήτηση (EnergyMag, 2024). Επιπλέον, η ύπαρξη μονάδων αποθήκευσης σε ένα σύστημα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ το καθιστά πιο ευέλικτο και ανθεκτικό: οι μονάδες αυτές μπορούν να παρέχουν άμεσα ισχύ όταν μια ξαφνική πτώση παραγωγής από ΑΠΕ συμβεί, ή αντίστροφα να απορροφήσουν απότομα πλεονάζουσα ισχύ όταν η ζήτηση πέσει. Έτσι αποφεύγονται απότομες μεταβολές που θα μπορούσαν να βλάψουν τη σταθερότητα του δικτύου.

Κύριες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας: Διαχρονικά έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, καθεμιά με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και πεδία εφαρμογής. Οι σημαντικότερες κατηγορίες περιλαμβάνουν:

- Ηλεκτροχημική αποθήκευση – Μπαταρίες:** Οι μπαταρίες (ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές) αποθηκεύουν ενέργεια σε χημική μορφή. Οι πιο διαδεδομένες σύγχρονες είναι οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς τους και της συνεχώς μειούμενης τιμής τους. Σε μεγάλη κλίμακα χρησιμοποιούνται σε σταθμούς αποθήκευσης (Battery Energy Storage Systems – BESS) για ποικίλες εφαρμογές, από την κάλυψη αιχμών ζήτησης μέχρι τη σταθεροποίηση της συχνότητας. Το πλεονέκτημά τους έγκειται στο ότι μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας σε σχετικά μικρό όγκο/βάρος. Ωστόσο, μειονεκτούν σε αριθμό κύκλων ζωής (φθείρονται μετά από μερικές χιλιάδες κύκλους) και ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης είναι πεπερασμένος λόγω των χημικών διεργασιών. Υπάρχουν και άλλοι τύποι μπαταριών (π.χ. μολύβδου-οξέος, ροής vanadium, νατρίου-θείου), που μπορεί να προτιμώνται σε ειδικές εφαρμογές για τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους (π.χ. οι μπαταρίες ροής προσφέρουν ανεξαρτησία χωρητικότητας-ισχύος και μεγάλη διάρκεια ζωής, όμως έχουν χαμηλότερη απόδοση και χρησιμοποιούνται κυρίως σε σταθερές εγκαταστάσεις).
- Μηχανική αποθήκευση – Αντλησιοταμίευση:** Η αντλησιοταμίευση είναι η παλαιότερη και πλέον δοκιμασμένη λύση μεγάλης κλίμακας, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 97% της παγκόσμιας αποθηκευτικής ισχύος (TEPNA ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ, 2022). Περιλαμβάνει δύο δεξαμενές νερού σε διαφορετικό υψόμετρο. Όταν υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας, αντλίες χρησιμοποιούν το πλεόνασμα για να ανεβάσουν νερό στην άνω δεξαμενή (αποθήκευση υπό μορφή δυναμικής ενέργειας). Όταν χρειάζεται ενέργεια, το νερό αφήνεται να κατέβει μέσω υδροστροβίλων παράγοντας ηλεκτρισμό. Η αντλησιοταμίευση μπορεί να προσφέρει τεράστιες ποσότητες ενέργειας (διάρκειας πολλών ωρών ή ημερών) και συμβάλλει αποφασιστικά στην ευστάθεια μεγάλων δικτύων. Μειονεκτεί ως προς την εξάρτηση από τη γεωγραφία (απαιτείται κατάλληλο ανάγλυφο με υψομετρική διαφορά) και έχει υψηλό αρχικό κατασκευαστικό κόστος, όμως η διάρκεια ζωής τέτοιων εγκαταστάσεων είναι πολύ μεγάλη και η τεχνολογία ώριμη. (Στην Ελλάδα υλοποιείται το πρώτο μεγάλο έργο αντλησιοταμίευσης στην Αμφιλοχία, ισχύος ~680 MW, το οποίο αναμένεται να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή επάρκεια και στη σταθερότητα του δικτύου με την περαιτέρω διείσδυση των ΑΠΕ. (TEPNA ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ, 2022).)
- Θερμική αποθήκευση:** Σε αυτή την κατηγορία, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και αποθηκεύεται σε κατάλληλα μέσα. Ένα παράδειγμα είναι η αποθήκευση θερμότητας σε λιωμένο άλας (molten salt) σε ηλιοθερμικούς σταθμούς: κατά τις ώρες ηλιοφάνειας, η περίσσεια θερμική ενέργεια από τους ηλιακούς συλλέκτες αποθηκεύεται στο ρευστό άλας, και τη νύχτα αυτή η θερμότητα χρησιμοποιείται για να παραχθεί ατμός και να κινήσει τουρμπίνα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Άλλες μορφές θερμικής αποθήκευσης περιλαμβάνουν θερμοχημικές μεθόδους, αποθήκευση σε συσσωρευτές θερμότητας (θερμοδοχεία, υλικά αλλαγής φάσης κ.ά.), ή ακόμη και συστήματα ψύξης/πάγου για αξιοποίηση σε κλιματισμό. Η θερμική αποθήκευση αξιοποιείται κυρίως για εξομάλυνση σε ημερήσια βάση και για εφαρμογές όπου η τελική χρήση μπορεί να είναι είτε ηλεκτρική είτε θερμική ενέργεια.
- Χημική αποθήκευση – Υδρογόνο (Power-to-Gas):** Η περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί μέσω ηλεκτρόλυσης σε υδρογόνο, ένα καύσιμο που αποθηκεύεται και επαναμετατρέπεται σε ηλεκτρισμό (π.χ. σε κυψέλες καυσίμου) όταν χρειαστεί. Το λεγόμενο «πράσινο» υδρογόνο παρέχει θεωρητικά απεριόριστη δυνατότητα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης (ακόμη και εποχικής), επιτρέποντας την αποθήκευση ενέργειας από καλοκαιρινή παραγωγή ΑΠΕ για χρήση το χειμώνα. Ωστόσο, η συνολική απόδοση της αλυσίδας Power-to-Gas-to-Power είναι ακόμη σχετικά χαμηλή (της τάξης του 30-40%) και η τεχνολογία βρίσκεται

υπό συνεχή βελτίωση. Παρ' όλα αυτά, το υδρογόνο θεωρείται βασικός άξονας μελλοντικής απανθρακοποίησης, ιδίως για τομείς όπου η άμεση ηλεκτροδότηση είναι δύσκολη.

- **Άλλες τεχνολογίες:** Στην κατηγορία της μηχανικής αποθήκευσης εντάσσονται επίσης η αποθήκευση με πεπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage – CAES), όπου περίσσεια ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για συμπίεση αέρα σε υπόγειες δεξαμενές και αργότερα ο πεπιεσμένος αέρας κινεί αεροστρόβιλους παράγοντας ηλεκτρισμό, και οι σφόνδυλοι (flywheels) που προσφέρουν εξαιρετικά γρήγορη απόκριση, αλλά συνήθως για μικρή διάρκεια (δευτερόλεπτα ή λεπτά). Επιπλέον, υπάρχει η **ηλεκτρική αποθήκευση** μέσω ειδικών τεχνολογιών όπως τα υπεραγώγιμα μαγνητικά πηνία (SMES) και οι υπερπυκνωτές. Τα SMES αποθηκεύουν ενέργεια ως μαγνητικό πεδίο σε υπεραγώγιμο πηνίο και μπορούν να αποδώσουν πολύ γρήγορα ισχύ με υψηλή απόδοση, αλλά έχουν υψηλό κόστος και απαιτούν συνθήκες βαθιάς ψύξης. Οι υπερπυκνωτές (αν και αποτελούν το κύριο αντικείμενο μελέτης μας στο επόμενο μέρος) μπορούν να θεωρηθούν και αυτοί τεχνολογία ηλεκτρικής αποθήκευσης βραχυπρόθεσμης κλίμακας. Συνολικά, οι διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης ποικίλουν σε μέγεθος, απόδοση, διάρκεια και κλίμακα εφαρμογής, και μπορούν να ταξινομηθούν σε βραχυπρόθεσμες, μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες λύσεις ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα κάλυψης (Ο Εγκαταστάτης, 2022). Κάθε τεχνολογία αποθήκευσης προσφέρει πολλαπλά οφέλη στο ενεργειακό σύστημα, όπως βελτίωση της συνολικής απόδοσης και μείωση των απωλειών, μεγαλύτερη αξιοποίηση της παραγόμενης από ΑΠΕ ενέργειας, και εντέλει οικονομικότερα και καθαρότερα συστήματα ηλεκτροδότησης (Κυρανάς, 2013).

2.2 Τρέχουσα Έρευνα για Υπερπυκνωτές σε ΑΠΕ

Η χρήση των υπερπυκνωτών ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας σε εφαρμογές με ΑΠΕ αποτελεί αντικείμενο εντατικής έρευνας τα τελευταία χρόνια. Καθώς η τεχνολογία των υπερπυκνωτών ωριμάζει και το κόστος τους μειώνεται, όλο και περισσότερες μελέτες εξετάζουν πώς μπορούν να ενταχθούν σε συστήματα παραγωγής από αιολική ή ηλιακή ενέργεια για να βελτιώσουν την απόδοσή τους.

Μια βασική ερευνητική περιοχή αφορά τον συνδυασμό υπερπυκνωτών με μπαταρίες σε **υβριδικά συστήματα αποθήκευσης**. Σε αυτές τις αρχιτεκτονικές, οι δύο τεχνολογίες λειτουργούν συμπληρωματικά: οι υπερπυκνωτές διαχειρίζονται τις γρήγορες μεταβατικές απαιτήσεις ισχύος (αιχμές ή απότομες μεταβολές), ενώ οι μπαταρίες φροντίζουν για την παροχή ενέργειας βραδύτερης δυναμικής (μεγαλύτερης διάρκειας). Έτσι επιτυγχάνεται μια αποσύνδεση μεταξύ της απαίτησης υψηλής πυκνότητας ισχύος και υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (Richie, 2021). Με απλά λόγια, το υβριδικό σύστημα εκμεταλλεύεται το καλύτερο από κάθε κόσμο: τους υπερπυκνωτές για δύναμη (power) και τις μπαταρίες για ενέργεια. Πολλές μελέτες επιβεβαιώνουν ότι τέτοια υβριδικά σχήματα μπορούν να επιμηκύνουν τη ζωή των μπαταριών (καθώς τις απαλλάσσουν από τα συχνά απότομα φορτία) και ταυτόχρονα να διατηρούν σταθερότερη την τάση/συχνότητα σε ένα σύστημα με ΑΠΕ (Kalyani et al., 2022).

Παράλληλα, διεξάγεται έρευνα για την απευθείας ενσωμάτωση μεγάλων συστοιχιών υπερπυκνωτών σε δίκτυα διανομής με υψηλή διεύθυνση ανανεώσιμης ενέργειας. Οι Nowrot κ.ά. (2023) έδειξαν ότι η χρήση υπερπυκνωτών μπορεί να αυξήσει το ποσοστό συμμετοχής των ηλιακών και αιολικών σταθμών στο ενεργειακό μίγμα χωρίς την ανάγκη πλήρους υποκατάστασης των συμβατικών μονάδων βάσης από νέες εγκαταστάσεις (π.χ. πυρηνικές) (Mancini et al., 2024). Αυτό υπογραμμίζει ότι οι υπερπυκνωτές θα μπορούσαν να διαδραματίσουν ρόλο-κλειδί στην περαιτέρω απανθρακοποίηση και βιώσιμη ανάπτυξη του τομέα ενέργειας, ειδικά εάν αναπτυχθούν σε μεγάλη κλίμακα επαρκείς εγκαταστάσεις αποθήκευσης.

Στο πρακτικό επίπεδο, έχουν πραγματοποιηθεί πιλοτικές εφαρμογές υπερπυκνωτών σε συνδυασμό με ΑΠΕ. Για παράδειγμα, σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, οι υπερπυκνωτές έχουν χρησιμοποιηθεί για **εξομάλυνση της εξόδου** (power smoothing) των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Μια συστοιχία υπερπυκνωτών φορτίζεται όταν η ηλιοφάνεια είναι έντονη και η παραγωγή υπερβαίνει την κατανάλωση, ενώ εκφορτίζεται ταχύτατα όταν ξαφνικά ένα σύννεφο μειώσει την ηλιακή ισχύ, διατηρώντας έτσι σταθερή την παρεχόμενη ισχύ προς το φορτίο. Αντίστοιχες μελέτες έχουν γίνει και σε ανεμογεννήτριες, όπου οι υπερπυκνωτές μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια κατά τις στιγμιαίες αιχμές ισχύος λόγω ριπών ανέμου και να την αποδίδουν όταν ο άνεμος πέφτει, μειώνοντας τις ταλαντώσεις στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, διερευνάται η χρήση υπερπυκνωτών σε εφαρμογές **υποστήριξης δικτύου** (grid support), όπως παροχή αδρανειακής απόκρισης (virtual inertia) και στιγμιαίας εφεδρείας, μιας και η ικανότητα τους να παρέχουν μεγάλα ρεύματα σε πολύ σύντομο χρόνο τους καθιστά κατάλληλους για τέτοιες απαιτήσεις.

Παρά τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, η ερευνητική βιβλιογραφία επισημαίνει και ορισμένες προκλήσεις/περιορισμούς που παραμένουν. Ένα σημαντικό ζήτημα είναι η **χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα** των υπερπυκνωτών σε σύγκριση με τις μπαταρίες – πρακτικά, για να αποθηκεύσουμε την ίδια ενέργεια με μια μπαταρία Λιθίου θα χρειαζόμασταν πολύ μεγαλύτερη μάζα ή όγκο υπερπυκνωτών. Αυτό σημαίνει ότι προς το παρόν οι υπερπυκνωτές δεν μπορούν να αποτελέσουν τη μόνη λύση για μεγάλης διάρκειας αποθήκευση (π.χ. να αποθηκεύσουν ενέργεια από μέρα σε νύχτα ή από καλοκαίρι σε χειμώνα). Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες τους προτείνουν ως συμπληρωματικούς σε μπαταρίες (για τις βραχυπρόθεσμες ανάγκες ισχύος) ή εξετάζουν τη βελτίωση των υλικών τους ώστε να κλείσει η “ψαλίδα” ενεργειακής πυκνότητας. Πράγματι, σε επίπεδο υλικών, η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη **υβριδικών υπερπυκνωτών** (με στοιχεία μπαταρίας, π.χ. υβριδικοί πυκνωτές ιόντων λιθίου) που προσφέρουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα σε βάρος ελαφρώς μικρότερης ισχύος, καθώς και στη χρήση προηγμένων νανοϋλικών (γραφένιο, νανοσωματίδια άνθρακα κ.ά.) για ηλεκτρόδια με μεγαλύτερη επιφάνεια. Επίσης, ένα άλλο ερευνητικό μέτωπο είναι η μείωση του κόστους και η χρήση φθηνών υλικών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πρόσφατη ανακοίνωση ερευνητών του MIT για κατασκευή υπερπυκνωτή από τσιμέντο, νερό και αιθάλη (άνθρακα) – εξαιρετικά άφθονες και οικονομικές πρώτες ύλες. Ο “τσιμεντο-υπερπυκνωτής” αυτός μπορεί να ενσωματωθεί ακόμα και στα θεμέλια ενός κτιρίου, μετατρέποντάς τα σε μέσα αποθήκευσης που μπορούν να αποθηκεύουν την ημερήσια παραγωγή από φωτοβολταϊκά ή ανεμογεννήτριες και να την αποδίδουν όταν χρειάζεται (Chandler, 2023). Τέτοιες καινοτομίες δείχνουν την κατεύθυνση της έρευνας προς υπερπυκνωτές μεγάλης κλίμακας και χαμηλού κόστους για εφαρμογές δικτύου.

Συνολικά, η τρέχουσα βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι οι υπερπυκνωτές έχουν μοναδικά πλεονεκτήματα για τα μελλοντικά ενεργειακά συστήματα με υψηλή συμμετοχή ΑΠΕ, αλλά και ότι προς το παρόν εξυπηρετούν συγκεκριμένους ρόλους. Η περαιτέρω διείσδυσή τους θα εξαρτηθεί από τις τεχνολογικές εξελίξεις (ιδίως ως προς την ενεργειακή πυκνότητα και το κόστος) καθώς και από το ρυθμιστικό πλαίσιο και τις απαιτήσεις των δικτύων.

Ένα επιπλέον ζήτημα που αναδεικνύεται είναι το **κόστος**: προς το παρόν, το κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας των υπερπυκνωτών παραμένει υψηλότερο σε σύγκριση με εδραιωμένες τεχνολογίες (όπως οι μπαταρίες λιθίου). Ωστόσο, καθώς η τεχνολογία ωριμάζει, η μαζική παραγωγή και η ανάπτυξη νέων υλικών ενδέχεται να μειώσουν σημαντικά το κόστος αυτό, καθιστώντας τους υπερπυκνωτές πιο ανταγωνιστικούς.

Από περιβαλλοντικής πλευράς, οι υπερπυκνωτές έχουν το πλεονέκτημα ότι κατασκευάζονται κυρίως από υλικά όπως άνθρακας, αλουμίνιο και ασφαλείς ηλεκτρολύτες, χωρίς τη μεγάλη χρήση τοξικών βαρέων μετάλλων ή σπανίων γαιών που συναντάται σε ορισμένους τύπους μπαταριών. Αυτό σημαίνει

ότι δυνητικά το αποτύπωμά τους σε όλο τον κύκλο ζωής (κατασκευή, χρήση, ανακύκλωση) μπορεί να είναι μικρότερο, αν και απαιτούνται περισσότερες μελέτες για να ποσοτικοποιηθεί το όφελος αυτό.

Εν κατακλείδι, η τρέχουσα έρευνα εστιάζει στο να υπερκεράσει τα εναπομείναντα εμπόδια (όπως η ενεργειακή πυκνότητα και το κόστος) και να επιβεβαιώσει σε πραγματικές συνθήκες την αξία των υπερπυκνωτών στα ενεργειακά συστήματα. Η εφαρμογή τους σε μεγάλη κλίμακα βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο, γεγονός που καθιστά το πεδίο αυτό ιδιαίτερα δυναμικό για περαιτέρω έρευνα. Τα επόμενα χρόνια αναμένεται να δούμε περισσότερα πιλοτικά έργα και μελέτες που θα αξιολογούν τη βιωσιμότητα της χρήσης υπερπυκνωτών σε δίκτυα υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, καθορίζοντας έτσι τον ρόλο τους στο μελλοντικό καθαρό ενεργειακό μείγμα.

2.3 Βασικές Αρχές Αποθήκευσης: Υπερπυκνωτές έναντι Μπαταριών

Σε αυτή την ενότητα εξετάζονται θεμελιώδεις αρχές που διέπουν την αποθήκευση ενέργειας, με έμφαση στη σύγκριση μεταξύ χημικής αποθήκευσης (μπαταρίες) και αποθήκευσης σε ηλεκτρικούς πυκνωτές/υπερπυκνωτές. Η σύγκριση αυτή είναι καίρια, διότι αναδεικνύει γιατί οι δύο τεχνολογίες έχουν διαφορετικά πεδία εφαρμογής και πώς μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά.

Μηχανισμός αποθήκευσης: Οι μπαταρίες αποθηκεύουν ενέργεια μέσω αναστρέψιμων χημικών αντιδράσεων. Όταν φορτίζεται μια μπαταρία, πραγματοποιούνται χημικές μετατροπές στα υλικά των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη, συσσωρεύοντας ενέργεια στις χημικές δεσμεύσεις. Κατά την εκφόρτιση, οι αντιδράσεις αντιστρέφονται και απελευθερώνεται η αποθηκευμένη ενέργεια ως ηλεκτρικό ρεύμα. Αντίθετα, οι υπερπυκνωτές αποθηκεύουν ενέργεια φυσικά, μέσω συσσώρευσης ηλεκτροστατικού φορτίου. Στους τυπικούς ηλεκτροχημικούς διπλής στιβάδας υπερπυκνωτές, όταν εφαρμόζεται τάση, ιόντα από τον ηλεκτρολύτη προσροφώνται στις επιφάνειες των πορωδών ηλεκτροδίων (άνθρακας υψηλής επιφάνειας), δημιουργώντας δύο αντίθετα φορτισμένα στρώματα – έναν πυκνωτή υψηλής χωρητικότητας. Δεν λαμβάνουν χώρα βραδείες χημικές αντιδράσεις, γι' αυτό και η διαδικασία φόρτισης/εκφόρτισης μπορεί να είναι πολύ ταχεία.

Ενεργειακή έναντι Πυκνότητας Ισχύος: Ένα από τα πιο σημαντικά σημεία διαφοροποίησης είναι η ενεργειακή πυκνότητα (πόση ενέργεια αποθηκεύεται ανά μονάδα μάζας ή όγκου) σε σύγκριση με την πυκνότητα ισχύος (πόση ισχύς – ή ρυθμός παράδοσης ενέργειας – είναι διαθέσιμη ανά μονάδα μάζας/όγκου). Οι μπαταρίες υπερέχουν συντριπτικά σε ενεργειακή πυκνότητα: τυπικά μια μπαταρία Li-Ion αποθηκεύει 100-200 Wh ανά κιλό, ενώ ένας υπερπυκνωτής μόλις ~1-5 Wh/kg. Αυτό σημαίνει ότι οι μπαταρίες μπορούν να τροφοδοτούν ένα φορτίο για πολύ περισσότερο χρόνο προτού εξαντληθούν. Από την άλλη πλευρά, οι υπερπυκνωτές διαθέτουν εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος – μπορούν να παραδώσουν ή να απορροφήσουν ισχύ με ρυθμούς κατά πολύ υψηλότερους των μπαταριών. Ενδεικτικά, η ειδική ισχύς ενός υπερπυκνωτή μπορεί να φτάσει ή να ξεπεράσει τα ~1000 W/kg, όταν για μια μπαταρία Λιθίου είναι της τάξης των μερικών εκατοντάδων W/kg. Η πρακτική συνέπεια είναι ότι ένας υπερπυκνωτής μπορεί να εκφορτιστεί σχεδόν στιγμιαία, αποδίδοντας όλη του την ενέργεια σε έναν πολύ σύντομο παλμό υψηλού ρεύματος, κάτι που οι μπαταρίες δεν μπορούν να κάνουν χωρίς να υποστούν ζημιά ή χωρίς να έχουν υπερδιαστασιοποιηθεί.

Αποδοτικότητα και θέματα λειτουργίας: Οι υπερπυκνωτές γενικά εμφανίζουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση κύκλου (efficiency) σε σχέση με τις περισσότερες μπαταρίες, με μικρότερες απώλειες κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση (συνήα πάνω από 95%). Επίσης, λειτουργούν αποδοτικά σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (π.χ. -40°C έως +70°C για πολλούς υπερπυκνωτές) χωρίς σημαντική επίπτωση στην απόδοσή τους, ενώ οι μπαταρίες ειδικά σε ακραίες θερμοκρασίες παρουσιάζουν σημαντική πτώση απόδοσης ή/και μόνιμη φθορά. Από την άλλη, οι υπερπυκνωτές έχουν υψηλότερο ρυθμό

αυτοεκφόρτισης – χάνουν μέρος της αποθηκευμένης ενέργειας με το χρόνο λόγω εσωτερικών διαρροών ρεύματος, πράγμα που σημαίνει ότι δεν είναι ιδανικοί για διατήρηση φορτίου επί ημέρες ή εβδομάδες χωρίς επαναφόρτιση. Για αντιστάθμιση, συχνά συνδυάζονται με μπαταρίες: οι μπαταρίες κρατούν την ενέργεια για μεγάλο διάστημα, οι υπερπυκνωτές είναι έτοιμοι να δράσουν σε στιγμές που απαιτείται ισχύς αιχμής. Επιπλέον, η τάση ενός υπερπυκνωτή μειώνεται σημαντικά κατά την εκφόρτιση (αντιστρόφως ανάλογα με το φορτίο του), ενώ στις μπαταρίες η τάση παραμένει πιο σταθερή έως την πλήρη αποφόρτιση. Αυτό σημαίνει ότι σε εφαρμογές με υπερπυκνωτές απαιτείται συνήθως ένας μετατροπέας DC/DC (π.χ. ενισχυτής/απομεγαλωτής τάσης) ώστε να διατηρείται σταθερή τάση τροφοδοσίας προς το φορτίο (Richie, 2021).

Διάρκεια ζωής και κύκλοι: Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών είναι η πρακτικά απεριόριστη διάρκεια ζωής τους σε όρους κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης. Ενώ μια καλή μπαταρία Li-Ion μπορεί να αντέξει ~1000-2000 κύκλους (έως να υποχωρήσει στο ~80% της αρχικής της χωρητικότητας), ένας υπερπυκνωτής μπορεί να αντέξει πάνω από 100.000 κύκλους με ελάχιστη υποβάθμιση (Richie, 2021). Αυτό οφείλεται στο ότι δεν φθείρονται υλικά από χημικές αλλαγές – τα μόνα περιοριστικά φαινόμενα είναι ενδεχόμενη διάβρωση ηλεκτροδίων ή απώλεια ηλεκτρολύτη σε βάθος χρόνου, φαινόμενα πολύ πιο αργά συγκριτικά με τις χημικές μεταβολές στις μπαταρίες. Συνακόλουθα, το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης για συστήματα υπερπυκνωτών είναι μικρότερο, αφού δεν απαιτείται συχνή αλλαγή στοιχείων, σε αντίθεση με συστοιχίες μπαταριών που μπορεί να χρειάζονται αντικατάσταση κάθε λίγα χρόνια ανάλογα με τη χρήση.

Συνολική σύγκριση και χρήση σε ΑΠΕ: Συνοψίζοντας, οι μπαταρίες αποτελούν μέσα υψηλής ενεργειακής πυκνότητας – μπορούν να αποθηκεύσουν πολλή ενέργεια και να την αποδίδουν αργά, για ώρες ή μέρες, αλλά δεν μπορούν να δώσουν τεράστια ισχύ σε πολύ σύντομο χρόνο χωρίς ζημία. Οι υπερπυκνωτές είναι μέσα χαμηλότερης ενεργειακής χωρητικότητας αλλά υψηλής ισχύος – ιδανικοί για να δώσουν ή να πάρουν ισχυρούς παλμούς ενέργειας γρήγορα, αλλά δεν μπορούν να τροφοδοτούν ένα φορτίο για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτός είναι και ο λόγος που στην πλειονότητα των εφαρμογών **δεν ανταγωνίζονται άμεσα αλλά συνεργάζονται:** σε ένα μικτό σύστημα, η μπαταρία παρέχει τη “βάση” ενέργειας ενώ ο υπερπυκνωτής φροντίζει τις “γρήγορες λεπτομέρειες” της ισχύος. Ειδικά για τις ΑΠΕ, ένα τέτοιο συνδυαστικό σύστημα μπορεί να εξασφαλίσει ότι π.χ. ένα φωτοβολταϊκό πάρκο θα καλύπτει τη βραδινή ζήτηση (με τη βοήθεια μπαταριών) αλλά και θα αντεπεξέρχεται σε απότομα περάσματα νεφώσεων (με τη βοήθεια υπερπυκνωτών).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι εξελίξεις στην τεχνολογία τόσο των μπαταριών όσο και των υπερπυκνωτών ενδεχομένως στο μέλλον να μην είναι ευδιάκριτα τα όρια μεταξύ τους. Ήδη υπάρχουν “υβριδικοί” ηλεκτροχημικοί πυκνωτές που γεφυρώνουν εν μέρει το χάσμα, και νέες χημικές μπαταρίες που προσπαθούν να βελτιώσουν την απόδοσή τους σε ρυθμούς ισχύος. Προς το παρόν όμως, η διάκριση ενεργειακής έναντι ισχύος πυκνότητας παραμένει το κεντρικό κριτήριο που καθορίζει την επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης σε κάθε εφαρμογή.

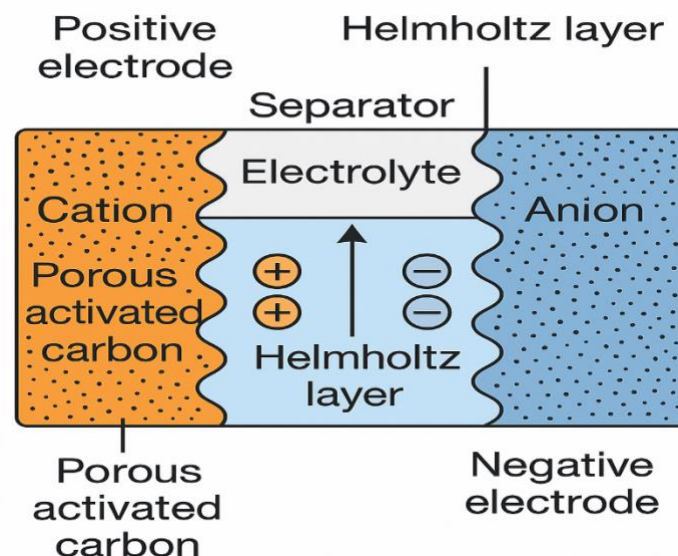
Κεφάλαιο 3: Υπερπυκνωτές – Λειτουργία, Τεχνολογία & Εφαρμογές

3. 1 Αρχές λειτουργίας υπερπυκνωτών

Οι υπερπυκνωτές (ή υπερανθεκτικοί πυκνωτές) είναι ηλεκτρικά στοιχεία μεγάλης χωρητικότητας, που γεφυρώνουν το κενό μεταξύ συμβατικών πυκνωτών και επαναφορτιζόμενων μπαταριών (Wikipedia, 2026). Συγκρατούν ενέργεια ηλεκτροστατικά, σχηματίζοντας διπλά στρώματα ιόντων (electric double

layers) στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων αντί να βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις (Wikipedia, 2026) (TDK, χ.χ.). Κατά τη φόρτιση, τα ιόντα του ηλεκτρολύτη σχηματίζουν στρώματα αντίθετα πολικά προς τα ηλεκτρόδια, δημιουργώντας ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο (βλέπε Σχήμα 1). Αυτή η διαδικασία επιτρέπει εξαιρετικά γρήγορη φόρτιση/εκφόρτιση (δευτερόλεπτα έναντι ωρών σε μια μπαταρία) (TDK, χ.χ.) (Skeleton Technologies, 2023) και πρακτικά απεριόριστους κύκλους ζωής: ενώ μια μπαταρία συνήθως υποβαθμίζεται μετά από μερικές εκατοντάδες κύκλους, ένας τυπικός υπερπυκνωτής αντέχει εύκολα άνω του 1×10^6 κύκλων (TDK, χ.χ.) (Battery University, 2021). Επιπλέον, η ενεργειακή απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης ενός υπερπυκνωτή είναι πολύ υψηλή (πολύ κοντά στο 100%) (U.S. Department of Energy [DOE], 2023), καθώς δεν εμπλέκονται χωρητικές αντιδράσεις που χάνονται σε θερμότητα. Με άλλα λόγια, οι υπερπυκνωτές αποθηκεύουν ενέργεια με τον τρόπο ενός απλού πυκνωτή αλλά σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα, χωρίς τους περιορισμούς των ηλεκτροχημικών συστημάτων (Wikipedia, 2026) (Skeleton Technologies, 2023).

Στο ιστορικό πλαίσιο, οι αρχές των υπερπυκνωτών εντοπίζονται ήδη τη δεκαετία του 1950: το 1957 ερευνητές της General Electric διέταξαν την έννοια της χρήσης πορωδών ενεργού άνθρακα σε πυκνωτές (Battery University, 2021). Το 1966 η Standard Oil (SOHIO) συνειδητοποίησε με «τυχαίο» τρόπο τη σημασία του διπλού ηλεκτρικού στρώματος, και το 1978 η NEC κυκλοφόρησε το πρώτο εμπορικό προϊόν με όνομα “supercapacitor” για τροφοδοσία μνημονικής μνήμης (Battery University, 2021) (Wikipedia, 2026). Τα πρώτα σχέδια χρησιμοποιούσαν δύο φύλλα αλουμινίου καλυμμένα με ενεργό άνθρακα που βυθίζονταν σε ηλεκτρολύτη με διαχωριστή ανάμεσά τους, επιτυγχάνοντας χωρητικότητες της τάξης 1 F (πολύ μεγαλύτερες από τους σύγχρονους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές) (Wikipedia, 2026). Από τότε μέχρι σήμερα οι υπερπυκνωτές εξελίχθηκαν σημαντικά, αλλά η βασική αρχή αποθήκευσης μέσω στοιβάδων φορτίου παρέμεινε ο πυρήνας της τεχνολογίας.



Σχήμα 1: Δομή υπερπυκνωτή διπλής στρώσης. (Πηγή: Wikipedia)

Η εικόνα απεικονίζει έναν υπερπυκνωτή (ή ηλεκτροχημικό πυκνωτή διπλής στρώσης) και τα κύρια συστατικά του:

- **Θετικό ηλεκτρόδιο (Positive electrode):** Κατασκευασμένο από πορώδη ενεργό άνθρακα, όπου συσσωρεύονται τα ανιόντα.
- **Αρνητικό ηλεκτρόδιο (Negative electrode):** Επίσης κατασκευασμένο από πορώδη ενεργό άνθρακα, όπου συσσωρεύονται τα κατιόντα.

- **Ηλεκτρολύτης (Electrolyte):** Το υγρό μέσο που περιέχει τα ιόντα (κατιόντα με θετικό φορτίο και ανιόντα με αρνητικό φορτίο).
- **Διαχωριστής (Separator):** Ένα πορώδες υλικό που επιτρέπει τη διέλευση ιόντων, αλλά εμποδίζει τη φυσική επαφή μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων.
- **Στρώμα Helmholtz (Helmholtz Layer):** Το λεπτό στρώμα ιόντων που σχηματίζεται στη διεπιφάνεια μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη, όπου αποθηκεύεται η ενέργεια.

Δύο πορώδη ενεργού άνθρακα ηλεκτρόδια (θετικό/αρνητικό) διαχωρίζονται από διαχωριστή (separator) και βυθίζονται σε ηλεκτρολύτη. Στα όρια ηλεκτροδίου–ηλεκτρολύτη σχηματίζονται αντίθετα φορτισμένα στρώματα ιόντων, δημιουργώντας δύο ηλεκτρικές διπλοστρώσεις (Helmholtz layer) με ελάχιστο αποθηκευμένο φορτίο μεταξύ τους (Wikipedia, 2026). Η ενεργειακή αποθήκευση γίνεται αποκλειστικά από αυτήν τη *στατική κατανομή των φορτίων*, γι' αυτό και δεν παρατηρούνται χημικές αλλαγές – με συνέπεια τις πολύ μεγάλες αντοχές σε κύκλους (φορηθεί) της χωρητικότητας (Skeleton Technologies, 2023).

3. 2 Δομή και είδη υπερπυκνωτών

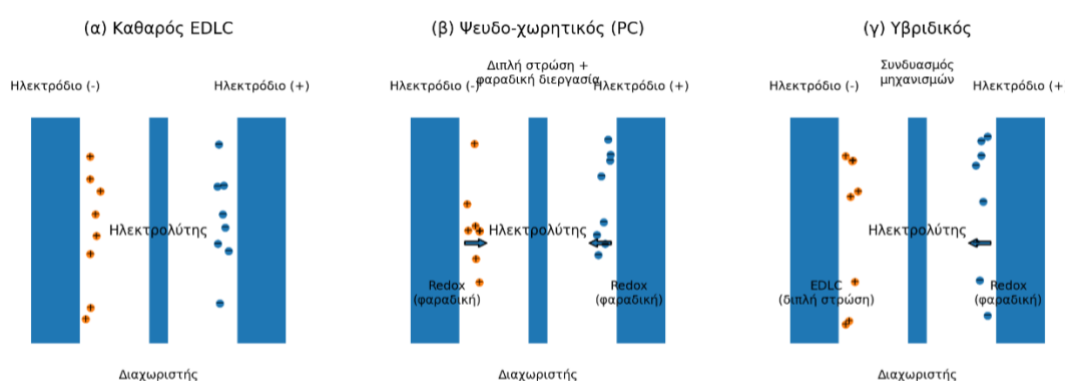
Ένας υπερπυκνωτής αποτελείται κυρίως από δύο ηλεκτρόδια, ένα ηλεκτρολύτη και έναν διαχωριστή. Όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία, **σχήμα 3.1** εμφανίζει ένα τυπικό υπερπυκνωτή: δύο πολωμένα ηλεκτρόδια κατασκευασμένα από πορώδη υλικά (συχνά ενεργό άνθρακα υψηλής ειδικής επιφάνειας (Wikipedia, 2026)) συνδέονται με ένα διαχωριστή που επιτρέπει τη ροή ιόντων αλλά αποτρέπει βραχυκύκλωμα (Wikipedia, 2026).

Ο ηλεκτρολύτης παρέχει τα κινητά ιόντα: σε οργανικά ηλεκτρολύτες (π.χ. τετραεθυλαμμώνιο φθοριούχο άλας) οι κυψέλες φτάνουν ~2,5–2,7 V (μεγαλύτερες τάσεις μειώνουν τη διάρκεια ζωής) (Battery University, 2021), ενώ σε υδατικούς (π.χ. θειικό ή καυστικό κάλιο) είναι περιορισμένες στο ~1 V. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει συνήθως ανοξείδωτο χαλκό ή αλουμίνιο ως συλλέκτες ρεύματος και τύλιγμα ή εσωτερικό περιτύλιγμα (επιτρέπει μεγάλη επιφάνεια) για πρακτική εφαρμογή. Στο Σχήμα 2 απεικονίζονται σχηματικά οι τρεις βασικοί τύποι υπερπυκνωτών: (α) διπλοστρωματικός, (β) ψευδοχωρητικός και (γ) υβριδικός.

- **Διπλοστρωματικοί υπερπυκνωτές (EDLC):** Αποθηκεύουν ενέργεια **μόνο** με φυσικό τρόπο διπλού ηλεκτρικού στρώματος. Εδώ και τα δύο ηλεκτρόδια είναι συνήθως συμβατικά (πορώδη ενεργού άνθρακα) και συμμετέχουν το ίδιο στον σχηματισμό των ιοντικών στιβάδων (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Η επιπλέον χωρητικότητα προέρχεται από τη μεγάλη επιφάνεια και την υψηλή ειδική επιφάνεια των πόρων. Ο μηχανισμός φόρτισης είναι αποκλειστικά απλή διέγερση φορτίου (χωρίς χημικές αντιδράσεις) (U.S. Department of Energy [DOE], 2023), γεγονός που δίνει ταχεία ανταπόκριση φόρτισης/εκφόρτισης και εξαιρετική αντοχή σε κύκλους, αλλά περιορίζει την ενεργειακή πυκνότητα σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.
- **Ψευδοχωρητικοί υπερπυκνωτές (pseudocapacitors):** Χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια με υλικά που επιτρέπουν φαραδικές αναγωγικές-οξειδωτικές αντιδράσεις στα όριά τους (π.χ. μεταλλικά οξείδια όπως RuO₂, MnO₂ ή αγώγιμα πολυμερή) (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Οι αντιδράσεις αυτές επιτρέπουν μεγαλύτερη δεσμευμένη χωρητικότητα (ενέργεια) από τον καθαρό διπλοστρωματικό μηχανισμό, φτάνοντας έως και ~10–100 φορές μεγαλύτερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με τον EDLC (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Ωστόσο οι φαινομενικές αντιδράσεις περιορίζουν τους κύκλους ζωής (~2×10⁵ κύκλοι) καθώς μέρος των φορτίων ανταλλάσσεται χημικά (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Οι ψευδοχωρητικοί υπερπυκνωτές προσφέρουν δηλαδή αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα (σε βάρος

και όγκο), με το κόστος μικρότερης αντοχής σε κύκλους και ελαφρώς χαμηλότερης ισχύος λόγω του εσωτερικού τους αντιστάτη.

- **Υβριδικοί (ασύμμετροι) υπερπυκνωτές:** Συνδυάζουν στοιχεία EDLC και ψευδοχωρητικού. Συνήθως το ένα ηλεκτρόδιο είναι πορώδες ανθρακούχο (όπως στον EDLC) και το άλλο περιέχει ένα υλικό υψηλού δυναμικού (π.χ. προσροφημένος λίθιο-χρώμιο άνθρακας ή οξείδιο μετάλλου) (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Με τον τρόπο αυτόν συνδυάζουν μια καθαρά ηλεκτρική φόρτιση με μία χημική αποθήκευση φόρτισης, αυξάνοντας έτσι συνολικά την ενεργειακή και ισχύς πυκνότητα πάνω από τις τιμές ενός EDLC, χωρίς σημαντική απώλεια κύκλων ζωής (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Αυτοί οι τύποι παρουσιάζουν υψηλότερη τάση κυψέλης (~3,5 V), υψηλότερη ενέργεια (~10–20 Wh/kg) και ακόμη χαμηλότερες εσωτερικές αντιστάσεις, ενώ παραμένουν σχετικά ευσταθείς ως προς τους κύκλους (συνήθως $\sim 5 \times 10^5$) (U.S. Department of Energy [DOE], 2023).



Σχήμα 2: Διαφορά μεταξύ EDLC 1

Στο **σχήμα 2** φαίνεται σχηματικά η διαφορά μεταξύ των τριών τύπων: (α) στον καθαρό EDLC τα φορτία καθορίζονται μόνο από το διπλό ηλεκτρικό στρώμα, (β) στον ψευδοχωρητικό (PC) η επιφάνεια του ηλεκτροδίου επιτρέπει ταχεία αναγωγή/οξείδωση (φαραδική διαδικασία) επιπλέον του διπλού στρώματος (U.S. Department of Energy [DOE], 2023), ενώ (γ) στον υβριδικό συνδυάζονται και οι δύο μηχανισμοί (U.S. Department of Energy [DOE], 2023).

3.3 Χαρακτηριστικά απόδοσης

Οι υπερπυκνωτές μετρώνται σε Farad (F), αφού η χωρητικότητά τους είναι συνήθως δεκάδες έως χιλιάδες Farad. Για παράδειγμα, υλικά EDLC κυψελίδων έχουν χωρητικότητα από μερικά δέκατα Farad έως πάνω από 100 F (TDK, χ.χ.). Η ονομαστική τάση ανά στοιχείο είναι περιορισμένη από τον ηλεκτρολύτη: ένας τυπικός υπερπυκνωτής με οργανικό ηλεκτρολύτη λειτουργεί έως ~2,5–2,7 V (Battery University, 2021). Για υψηλότερα συστήματα, συνδέονται σειρές κυψελών με κυκλώματα εξισορρόπησης ώστε να αποφευχθεί υπερφόρτιση.

- **Ενεργειακή & Πυκνότητα Ισχύος:** Η ειδική ενεργειακή πυκνότητα ενός τυπικού υπερπυκνωτή είναι χαμηλή, με τιμές τάξης μερικών Wh/kg (π.χ. ~5 Wh/kg)[5], πολύ μικρότερη από τις Li-ion μπαταρίες (που φτάνουν 120–240 Wh/kg). Αντίθετα, η πυκνότητα ισχύος τους είναι τεράστια. Όπως παρουσιάζεται σε συγκρίσεις (Πίνακας 1 και [18†L127-L134]), ένας υπερπυκνωτής μπορεί να αποδώσει έως ~10.000 W/kg, συγκριτικά με 1.000–3.000 W/kg των μπαταριών[5]. Η φασματική συμπεριφορά φόρτισης/εκφόρτισης είναι γραμμική (το ρεύμα μειώνεται καθώς γεμίζει ο πυκνωτής) και το ηλεκτρικό δυναμικό πέφτει σχεδόν γραμμικά κατά

τη εκφόρτιση, σε αντίθεση με τις επίπεδες καμπύλες των μπαταριών. Χρειάζεται ειδικός κύκλωμα ή μετατροπέας DC/DC για πλήρη εκμετάλλευση της ενέργειας σε μεγάλες διαφορές τάσης.

- **Χρόνοι Φόρτισης/Εκφόρτισης:** Η φόρτιση ενός υπερπυκνωτή πραγματοποιείται σε λίγα δευτερόλεπτα ως λίγα λεπτά (TDK, χ.χ.) (Battery University, 2021). Πρακτικά, η αρχική φόρτιση γίνεται γρήγορα με υψηλό ρεύμα, το οποίο μειώνεται αυτόματα όταν ο πυκνωτής πληρωθεί. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται ο περιορισμός των ρευμάτων εκκίνησης, αφού ένας αποφορτισμένος πυκνωτής «τραβά» ό,τι ρεύμα μπορεί. Δεν είναι ευαίσθητοι σε υπερφόρτιση, καθώς το ρεύμα απλώς μηδενίζεται όταν φθάσει στην τάση ονομαστικής τιμής.
- **Κύκλοι Ζωής και Διάρκεια:** Οι υπερπυκνωτές αντέχουν **άκρως μεγάλο** πλήθος κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης – συχνά πάνω από 1×10^6 κύκλους (Skeleton Technologies, 2023) (Battery University, 2021). Δεν παρουσιάζουν σημαντική φθορά από τον αριθμό των κύκλων (αντίθετα, π.χ. μια μπαταρία λιθίου χάνει σημαντικό μέρος χωρητικότητας μετά από μερικές εκατοντάδες έως χιλιάδες κύκλους). Επιπλέον, η διατήρηση φορτίου στον χρόνο (αυτοεκφόρτιση) είναι μέτρια: ένας υπερπυκνωτής μπορεί να χάνει ~50% του φορτίου του σε περίπου ένα μήνα (U.S. Department of Energy [DOE], 2023), συνεπώς δεν ενδείκνυται για μακροχρόνια αποθήκευση χωρίς επαναφόρτιση. Τέλος, η αντοχή σε θερμοκρασία είναι πολύ καλή: λειτουργούν αξιόπιστα από περίπου -40°C έως $+65^{\circ}\text{C}$ (Battery University, 2021), ένα πλεονέκτημα σε σύγκριση με πολλές μπαταρίες που περιορίζονται σε στενότερα θερμοκρασιακά όρια.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνοψίζονται ποιοτικά στον παρακάτω πίνακα. Σημειώνεται ότι στις τιμές ορισμένων ποσοτήτων (π.χ. ενεργειακή πυκνότητα) υπάρχουν διακυμάνσεις ανάλογα με το υλικό και τον σχεδιασμό.

Πίνακας 1: Σύγκριση των βασικών τύπων υπερπυκνωτών ως προς τον μηχανισμό φόρτισης, την τυπική ενεργειακή πυκνότητα και κύκλους ζωής.

| Τύπος Υπερπυκνωτή | Μηχανισμός Φόρτισης | Κύρια Ηλεκτρόδια | Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/kg) | Κύκλοι Ζωής (τυπικά) | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα |
|----------------------|---|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--|--|
| Διπλοστανικός (EDLC) | Φυσική αποθήκευση φορτίου σε δύο διπλά στρώματα | Πορώδη ενεργός άνθρακας | ~5 (τυπικά)[5] | $>1 \times 10^6$ [5] | Μεγάλη ισχύς, ταχύτετη φόρτιση, τεράστιος κύκλος ζωής[4] | Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα[2][1] |
| Ψευδοχωρητικός (PC) | Επιφανειακές Faradaic (αναγωγικές) | Μεταλλικά οξείδια, πολυμερή | >10 (υψηλότερη από EDLC)[1][6] | $\sim 2 \times 10^5$ [1][7] | Αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα (χωρητικότητα)[16] | Μικρότερος κύκλος ζωής, υψηλότερο κόστος |

| Τύπος Υπερπυκνωτή | Μηχανισμός Φόρτισης | Κύρια Ηλεκτρόδια | Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/kg) | Κύκλοι Ζωής (τυπικά) | Πλεονεκτήματα | Μειονεκτήματα |
|------------------------|--|--|------------------------------|------------------------------|--|---|
| | αντιδράσεις | | | | | |
| Υβριδικός (ασύμμετρος) | Συνδυασμός ηλεκτρικής & Faradaic αποθήκευσης | Ένα ηλεκτρόδιο άνθρακα + ειδικό φορτίο | ~10–20 (ενδιάμεση) | ~5×10 ⁵ (ανάλογα) | Υψηλότερη ενέργεια/ισχύς χωρίς μεγάλη απώλεια κύκλων[18] | Πολύπλοκος σχεδιασμός, υψηλότερο κόστος |

Οι τιμές ενεργειακής πυκνότητας και κύκλων ζωής είναι ενδεικτικές και βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα (Battery University, 2021) (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Παρατηρούμε ότι ο EDLC προσφέρει τις μεγαλύτερες τάξεις μεγέθους σε κύκλους ζωής και ισχύ (μέσω πολύ χαμηλού ESR), ενώ οι ψευδοχωρητικοί διακρίνονται για την αυξημένη χωρητικότητα που παρέχουν εις βάρος της αντοχής. Τα υβριδικά συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο, αλλά είναι πιο ακριβά.

Συνολικά, τα πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών περιλαμβάνουν:

- **Μεγάλη πυκνότητα ισχύος:** μπορούν να αποδώσουν/απορροφήσουν πολύ υψηλά ρεύματα στιγμιαία.
- **Ταχύτατη φόρτιση/εκφόρτιση:** χρόνοι πλήρωσης μόλις 1–10 s.
- **Τεράστιος κύκλος ζωής:** άνω του 1×10⁶ κύκλων χωρίς σημαντική φθορά.
- Ευρύ φάσμα θερμοκρασίας λειτουργίας: από ~-40°C έως +65°C.
- **Υψηλή απόδοση φορτίου:** ≥90–95% (πολύ χαμηλές απώλειες, σχεδόν 92% στρογγυλής διαδρομής).

Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν:

- **Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα:** συνήθως ~5–15 Wh/kg, πολύ μικρότερη από αυτή των σύγχρονων μπαταριών (Li-ion).
- **Περιορισμένη τάση ανά στοιχείο:** ~2,5–2,7 V. Απαιτούν σειρές κυψελών για υψηλότερα επίπεδα τάσης, με αύξηση του ESR.
- **Υψηλότερο κόστος ανά Wh:** η τιμή ανά μονάδα ενέργειας είναι σημαντικά μεγαλύτερη (π.χ. ~\$10.000/kWh έναντι ~\$250–1.000/kWh στις μπαταρίες).
- **Μεγάλη αυτοεκφόρτιση:** μπορεί να χάσουν ~50% του φορτίου σε ~1 μήνα, άρα δεν είναι κατάλληλοι για πολύ μεγάλης διάρκειας αποθήκευση χωρίς ανατροφοδότηση.

3. 4 Εφαρμογές υπερπυκνωτών

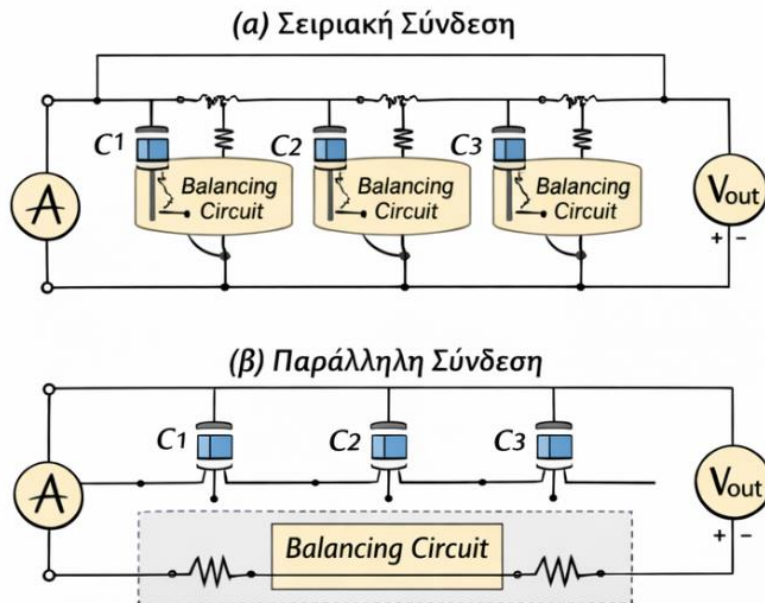
Οι ιδιότητες των υπερπυκνωτών ταιριάζουν σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ισχύς, γρήγορη απόκριση και μεγάλος αριθμός κύκλων. Πολλά πραγματικά συστήματα αξιοποιούν ήδη υπερπυκνωτές ή αναμένεται να τους ενσωματώσουν:

- **Συστήματα ανανεώσιμων (Φ/Β, Αιολικά):** Σε φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες, οι υπερπυκνωτές εξομαλύνουν βραχυχρόνιες διακυμάνσεις ισχύος από μεταβολές ηλιοφάνειας ή ισχύος ανέμου (Wikipedia, 2026). Λειτουργούν ως «ανεβάτες τάσης» (πολλές φορές σε σύμπηξη με μπαταρίες) για γρήγορη απόκριση σε αιχμές φορτίου, καθυστερώντας την ενεργοποίηση πετρελαιοκίνητων γεννητριών. Σε micro-grids, ειδικά με παραγωγή συνεχούς ρεύματος, αποθηκεύουν ενέργεια και στηρίζουν τις απαιτήσεις (για παράδειγμα, ενσωματώνονται με συστήματα flywheel σε αυτόνομα δίκτυα, βελτιώνοντας τον έλεγχο συχνότητας και μειώνοντας τη συντήρηση των μπαταριών) (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Έρευνα έχει δείξει αξιοποίηση υπερπυκνωτών σε συνδυασμό με ηλιακούς σταθμούς (π.χ. πάρκο στον Εθνικό Δρυμό Yellowstone) και μικρά αυτόνομα δίκτυα (U.S. Department of Energy [DOE], 2023).
- **Ανακτιση πέδησης και μεταφορές:** Στα ηλεκτρικά/υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούνται υπερπυκνωτές για ανάκτηση ενέργειας πέδησης και παροχή ισχύος κατά την επιτάχυνση [26]. Για παράδειγμα, υβριδικά συστήματα όπως της Toyota (Yaris-R) και της Lamborghini (Sián) εκμεταλλεύονται υπερπυκνωτές υψηλής πυκνότητας ισχύος για βελτίωση απόκρισης στις φάσεις φρεναρίσματος/επιτάχυνσης (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Στα αστικά τραμ χωρίς εναέρια καλώδια, οι υπερπυκνωτές φορτίζονται σε κάθε στάση και τροφοδοτούν το όχημα, μειώνοντας έως 10–25% την απαιτούμενη ενέργεια και εξαλείφοντας το κόστος γραμμών τροφοδοσίας (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Σε σιδηροδρομικά οχήματα η ενέργεια πέδησης αποθηκεύεται σε υπερπυκνωτές· π.χ. τραίνα που ανακάμπτουν έως ~30% περισσότερη ενέργεια σε σύγκριση με συμβατικά συστήματα φρεναρίσματος (Wikipedia, 2026).
- **Διαχείριση ρυθμού ισχύος στο δίκτυο:** Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται ως σταθμοί προσωρινής παροχής για υποστήριξη τάσης (ride-through) ή σταθεροποίηση ρεύματος. Σε κρίσιμα σημεία ισχύος, μπορούν να «γεφυρώνουν» βραχυπρόθεσμα διακοπές (π.χ. μέχρι να ενεργοποιηθούν γεννήτριες εφεδρείας) (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Σε εφαρμογές FACTS/STATCOM στο ηλεκτρικό δίκτυο, συνεισφέρουν σε έγχυση/αφαίρεση αέργου ισχύος για ρύθμιση συντελεστή ισχύος και σταθερότητας (U.S. Department of Energy [DOE], 2023). Προσφέρουν ακόμη προσωρινή τροφοδοσία UPS ή τροφοδοτικά μνήμης (RAM backup) σε βιομηχανικές και τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις λόγω της ικανότητάς τους να αποδίδουν αιχμές ισχύος στιγμιαία.
- **Εφαρμογές καταναλωτικών ηλεκτρονικών και άλλες:** Σε φορητές συσκευές (Φ/Β φορτιστές, φλας φωτογραφικών μηχανών κ.ά.) οι υπερπυκνωτές εξασφαλίζουν γρήγορη φόρτιση και μεγάλο κύκλο ζωής. Για παράδειγμα, ηλεκτρικά κατσαβίδια με υπερπυκνωτές φορτίζουν πλήρως σε ~90" αλλά διατηρούν 85% φόρτιση για μήνες. Ιατρικά παραδείγματα περιλαμβάνουν απινιδωτές, όπου υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ~500 J ενέργειας που απελευθερώνεται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου ώστε να αποκατασταθεί ο ομαλός καρδιακός ρυθμός (U.S. Department of Energy [DOE], 2023).

Γενικά, τα παραπάνω παραδείγματα αποδεικνύουν τη διαθεσιμότητα και αξιοπιστία της τεχνολογίας υπερπυκνωτών σε πολλούς τομείς. Χάρη στα μοναδικά χαρακτηριστικά τους (υψηλή ισχύς, αντοχή, ασφάλεια), οι υπερπυκνωτές βρίσκουν ρόλο σε συστήματα ΑΠΕ, ηλεκτροκίνηση, βιομηχανικά δίκτυα, ακόμη και σε καθημερινά ηλεκτρονικά – συμπληρώνοντας ή αντικαθιστώντας σε ορισμένες εφαρμογές τους παραδοσιακούς φορτιστές και μπαταρίες (Wikipedia, 2026) (U.S. Department of Energy [DOE], 2023).

3. 4. 1 Προηγμένα Υλικά και Τεχνολογίες

Η εξέλιξη της τεχνολογίας υπερπυκνωτών έχει οδηγήσει στην ενσωμάτωση καινοτόμων υλικών, όπως γραφένιο, νανοσωλήνες άνθρακα και αγωγίμα πολυμερή, τα οποία αυξάνουν σημαντικά την ειδική επιφάνεια και την αγωγιμότητα των ηλεκτροδίων. Το γραφένιο, λόγω της εξαιρετικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μηχανικής αντοχής, θεωρείται από τα πιο υποσχόμενα υλικά για την κατασκευή επόμενης γενιάς EDLC και υβριδικών υπερπυκνωτών. Παρόμοια, η χρήση μεταλλικών οξειδίων (όπως MnO_2 , NiO , RuO_2) ενισχύει τις φαραδικές αντιδράσεις στους ψευδοχωρητικούς πυκνωτές, επιτρέποντας αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας. Παράλληλα, η έρευνα επικεντρώνεται στη μείωση του κόστους αυτών των υλικών ώστε να γίνουν εμπορικά βιώσιμα σε ευρεία κλίμακα.



Σχήμα 3: Συνδέσεις Υπερπυκνωτών & Κυκλώματα Εξισορρόπησης.

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει δύο βασικές μεθόδους συνδεσμολογίας υπερπυκνωτών: (α) σε σειρά, για αύξηση της ολικής τάσης λειτουργίας, και (β) σε παράλληλη διάταξη, για αύξηση της συνολικής χωρητικότητας. Στην περίπτωση σύνδεσης σε σειρά απαιτείται η χρήση κυκλωμάτων εξισορρόπησης (balancing circuits) ώστε να αποτραπεί η υπερφόρτιση επιμέρους κυψελών, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την αξιοπιστία και διάρκεια ζωής του συστήματος. Οι δύο κυριότερες τεχνικές balancing είναι η παθητική (με αντιστάσεις) και η ενεργητική (με DC-DC μετατροπείς).

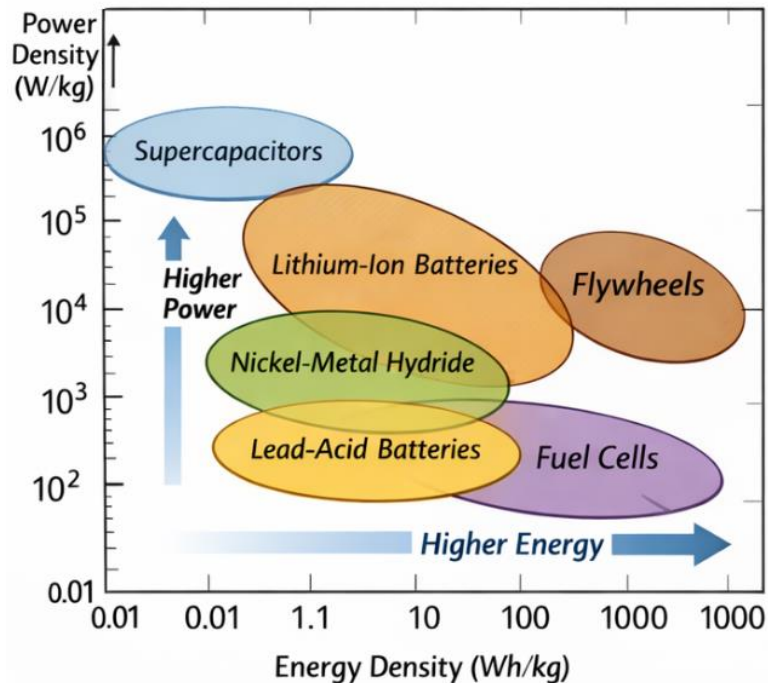
3. 4. 2 Οικονομικά Χαρακτηριστικά & Σύγκριση

Παρακάτω παρουσιάζεται συγκριτικός πίνακας με ενδεικτικές τιμές κόστους ανά μονάδα ενέργειας και κόστους ανά κύκλο, για υπερπυκνωτές και βασικές τεχνολογίες μπαταριών. Οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν υψηλό κόστος ανά Wh, αλλά εξαιρετικά χαμηλό κόστος ανά κύκλο, καθιστώντας τους συμφέρουσα λύση σε εφαρμογές πολλών και ταχέων κύκλων:

Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας

| Τεχνολογία | Κόστος ανά Wh (€) | Μέγιστοι Κύκλοι | Κόστος ανά Κύκλο (€) |
|--------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| Υπερπυκνωτές | 10–20 | 1.000.000+ | < 0.00002 |

| | | | |
|----------------|-----------|-------|----------|
| Li-ion | 0.15–0.25 | 2.000 | ~0.00008 |
| Μολύβδου-Οξέος | 0.10 | 500 | ~0.00020 |



Σχήμα 4: Ενεργειακή έναντι Ισχύος Πυκνότητας (Ragone plot).

Το Σχήμα, παρουσιάζει διαγραμματικά τις περιοχές λειτουργίας (log-log plot) διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης ως προς την ενεργειακή και την πυκνότητα ισχύος. Οι υπερπυκνωτές εντοπίζονται στο πεδίο χαμηλής ενέργειας αλλά εξαιρετικά υψηλής ισχύος, σε αντίθεση με τις μπαταρίες και τα καύσιμα που προσφέρουν μεγάλη αποθηκευμένη ενέργεια αλλά με χαμηλότερους ρυθμούς απόδοσης.

Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση Συστήματος Αποθήκευσης με Υπερπυκνωτές

4.1 Περιγραφή συστήματος: Επιλογή «κοινών» προδιαγραφών

Οι απαιτήσεις της εργασίας, με εργαστηριακή υλοποίηση, όπου, μια **πολύ συνηθισμένη** και ασφαλής επιλογή θεωρείται DC ζυγός **48 V** (χαμηλή τάση, διαθέσιμα υλικά, MOSFETs υψηλής απόδοσης). Για το παράδειγμα:

Πίνακας 4.1 – Βασικές προδιαγραφές σχεδίασης (baseline)

- DC ζυγός: $V_{dc,ref} = 48 \text{ V}$
- Ονομαστική ισχύς ΑΠΕ/φορτίου (εργαστηριακή κλίμακα): $\sim 1.8\text{--}2.0 \text{ kW}$
- Μέγιστη διαφορά ισχύος προς αντιστάθμιση (βραχυχρόνια): $\Delta P_{max} = 1.0 \text{ kW}$
- Χρόνος υποστήριξης (short-term ride-through / smoothing): $\Delta t_{support} = 10 \text{ s}$
- Παράθυρο τάσης συστοιχίας υπερπυκνωτών: $V_{sc,max} = 48.6 \text{ V}$, $V_{sc,min} = 30 \text{ V}$

- Μετατροπέας υπερπυκνωτή: **αμφίδρομος buck–boost**
- Συχνότητα μεταγωγής: **fsw = 20 kHz** (τυπική για low-voltage MOSFET DC/DC)
- Απόδοση κλάδου DC/DC (συντηρητικά): **$\eta \approx 0.95$**

Η αρχιτεκτονική είναι: **Πηγή ΑΠΕ (PV ή ανεμογεννήτρια) → μετατροπέας ισχύος → DC ζυγός (Vdc) → φορτίο/αντιστροφέας**, ενώ παράλληλα στον DC ζυγό συνδέεται **συστοιχία υπερπυκνωτών μέσω αμφίδρομου DC/DC**, η οποία ανταλλάσσει ισχύ ώστε να εξομαλύνει διακυμάνσεις και να στηρίζει την τάση. Για PV, η μοντελοποίηση μπορεί να γίνει με το **PV Array block** (μοντέλο 5 παραμέτρων/διόδου) και μεταβλητές ακτινοβολίας/θερμοκρασίας.

4. 2 Διαστασιολόγηση (με αριθμούς)

Απαιτούμενη ενέργεια “buffer”

Θεωρούμε ότι ο υπερπυκνωτής πρέπει να καλύψει έλλειμμα/πλεόνασμα ισχύος:

$$\Delta P_{\max} = 1.0 \text{ kW για } \Delta t_{\text{support}} = 10 \text{ s}$$

Ενέργεια που πρέπει να ανταλλάξει (με απόδοση κλάδου $\eta=0.95$):

$$E_{\text{req}} \approx (\Delta P_{\max} \times \Delta t_{\text{support}}) / \eta$$

$$E_{\text{req}} \approx (1000 \text{ W} \times 10 \text{ s}) / 0.95 = 10526 \text{ J}$$

$$\Sigma \epsilon \text{ Wh: } 10526 / 3600 = 2.92 \text{ Wh}$$

Υπολογισμός απαιτούμενης ισοδύναμης χωρητικότητας (Ceq)

Η ωφέλιμη ενέργεια συστοιχίας υπερπυκνωτών:

$$E_{\text{usable}} = 0.5 \times C_{\text{eq}} \times (V_{\text{sc,max}}^2 - V_{\text{sc,min}}^2)$$

Άρα:

$$C_{\text{eq}} \geq 2 \times E_{\text{req}} / (V_{\text{sc,max}}^2 - V_{\text{sc,min}}^2)$$

Με $V_{\text{sc,max}}=48.6 \text{ V}$ και $V_{\text{sc,min}}=30 \text{ V}$:

$$V_{\text{sc,max}}^2 = 2361.96$$

$$V_{\text{sc,min}}^2 = 900$$

$$\text{Διαφορά} = 1461.96$$

Οπότε:

$$C_{\text{eq}} \geq 2 \times 10526 / 1461.96 = 14.40 \text{ F}$$

Επιλογή με περιθώριο (ανοχές, γήρανση, σφάλματα ελέγχου): στοχεύουμε **$C_{\text{eq}} \approx 18\text{--}20 \text{ F}$** .

Επιλογή κυψελών και διάταξη σειράς/παράλληλα

Επιλέγουμε “κοινή” κυψέλη EDLC:

2.7 V, 350 F, με τυπικό ESR λίγων mΩ (π.χ. Maxwell BCAP 350F) (Maxwell Technologies, 2020)

Για να φτάσουμε $\sim 48 \text{ V}$:

$$N_s = 18 \text{ κυψέλες σε σειρά} \rightarrow V_{\text{rated}} \approx 18 \times 2.7 = 48.6 \text{ V}$$

Ισοδύναμη χωρητικότητα σειράς:

$$C_{\text{series}} = C_{\text{cell}} / N_s = 350 / 18 = 19.44 \text{ F}$$

Αυτό καλύπτει το C_{eq} που απαιτείται ($19.44 \text{ F} > 14.40 \text{ F}$).

Έλεγχος διαθέσιμης ωφέλιμης ενέργειας (48.6→30 V):

$$E_{\text{usable}} = 0.5 \times 19.44 \times (48.6^2 - 30^2)$$

$$E_{\text{usable}} \approx 14213 \text{ J} = 3.95 \text{ Wh}$$

Δηλαδή, μπορεί να στηρίξει 1 kW για περίπου:

$$t \approx 14213 / 1000 = 14.2 \text{ s (με ιδανικότητα· πρακτικά λίγο λιγότερο λόγω απωλειών)}$$

ESR και ρεύματα

Αν ESR_{cell} ~2.8 mΩ (τυπική τιμή τάξης μεγέθους), τότε:

$$ESR_{\text{total}} \approx N_s \times ESR_{\text{cell}} \approx 18 \times 2.8 \text{ m}\Omega = 50.4 \text{ m}\Omega \text{ (χωρίς παράλληλα strings) (Mouser Electronics, χ.χ.)}$$

Μέγιστο ρεύμα υπερπυκνωτή (στο “χειρότερο” V_{sc,min}):

$$I_{sc,max} \approx \Delta P_{max} / V_{sc,min} = 1000 / 30 = 33.3 \text{ A}$$

Πτώση τάσης σε ESR στο peak:

$$\Delta V_{ESR} \approx I_{sc} \times ESR_{\text{total}} \approx 33.3 \times 0.050 = 1.7 \text{ V (αποδεκτό για buffer ισχύος)}$$

Διαστασιολόγηση μετατροπέα και παθητικών

Επιλέγουμε **αμφίδρομο buck–boost** (2 ή 4 διακόπτες) με f_{sw}=20 kHz. Στο Simulink μπορεί να υλοποιηθεί είτε με switching blocks είτε με “average” blocks/έτοιμα converter blocks. (MathWorks, 2026)

Επαγωγέας L (ρεύμα-κυματισμός)

Στόχος: ρεύμα κυματισμού ~20% του I_{sc,max} → ΔI ≈ 7 A.

Στην πιο δυσμενή λειτουργία (V_{sc}=30 V, V_{dc}=48 V), duty ~0.375. Προσεγγιστικά:

$$L \approx V_{in} \times D / (\Delta I \times f_{sw})$$

$$L \approx 30 \times 0.375 / (7 \times 20000) = 80 \mu\text{H}$$

Επιλογή: L = **100 μH** (με ρεύμα κόρου > 40–50 A).

Πυκνωτής DC link (C_{dc})

Για χαμηλή κυμάτωση στο 48 V bus, μια τυπική εργαστηριακή επιλογή:

$$C_{dc} = \mathbf{10 \text{ mF}}$$
 (π.χ. πολλοί ηλεκτρολυτικοί/πολυμερικοί παράλληλα, χαμηλό ESR)

Στη Simscape/Simulink η μοντελοποίηση ESR/διαρροής μπορεί να γίνει με capacitor blocks με series resistance / parallel conductance. (MathWorks, 2026)

Εξισορρόπηση (balancing) κυψελών

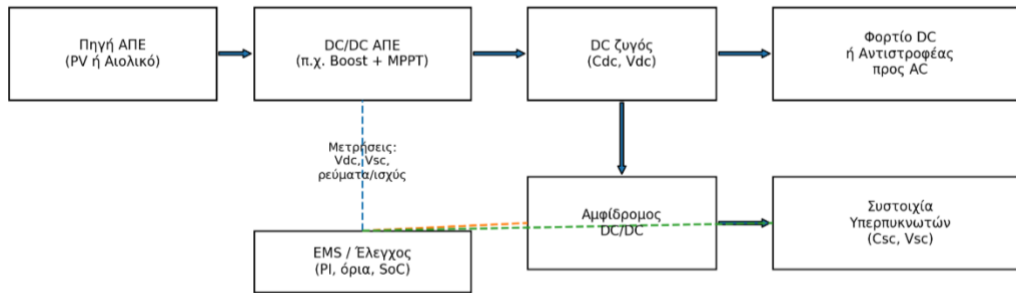
Με 18 στοιχεία σε σειρά, απαιτείται balancing για να αποφεύγεται υπέρταση σε μεμονωμένη κυψέλη λόγω ανοχών/διαρροών. Συνήθεις επιλογές:

- παθητική εξισορρόπηση (αντιστάσεις ανά κυψέλη),
- ενεργή εξισορρόπηση (DC/DC ανά τμήματα) για καλύτερες απώλειες/ακρίβεια.

4.3 Προτεινόμενο μοντέλο Matlab/Simulink (PV ή Αιολικό)

4.3.1 Υποσυστήματα (high-level)

Η προτεινόμενη δομή σε Simulink οργανώνεται σε 5 υποσυστήματα: ΑΠΕ (PV/αιολικό), μετατροπέας ΑΠΕ, DC link, κλάδος υπερπυκνωτή, έλεγχος/EMS και καταγραφή. Για PV, το **PV Array block** είναι κατάλληλο για irradiance/temperature σενάρια. (MathWorks, 2026)



Σχήμα 5: Διάγραμμα μπλοκ συστήματος ΑΠΕ με αποθήκευση σε υπερπυκνωτές

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται η ροή ισχύος από την πηγή ΑΠΕ (φωτοβολταϊκό ή ανεμογεννήτρια) προς τον DC ζυγό μέσω μετατροπέα ισχύος, καθώς και ο κλάδος αποθήκευσης με υπερπυκνωτές που συνδέεται στον DC ζυγό μέσω αμφίδρομου DC/DC μετατροπέα. Η μονάδα ελέγχου/EMS λαμβάνει μετρήσεις (V_{dc} , V_{sc} , ρεύματα/ισχύς) και παράγει εντολές φόρτισης/εκφόρτισης, ώστε να εξομαλύνει διακυμάνσεις ισχύος και να στηρίζει την τάση του ζυγού.

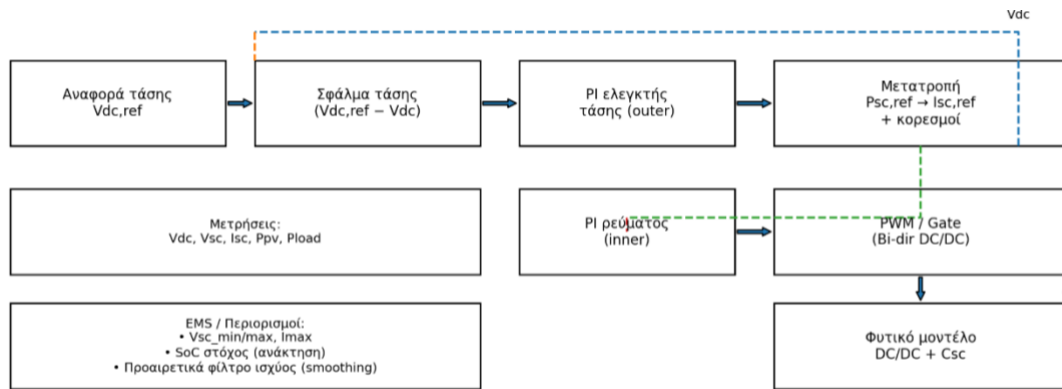
4.3.2 Μοντέλο υπερπυκνωτή

Στη Simulink/Simscape Electrical μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το **Supercapacitor block**, το οποίο βασίζεται σε ισοδύναμο RC δίκτυο (πολλαπλοί κλάδοι + μεταβλητή χωρητικότητα) για ρεαλιστική συμπεριφορά.

Μετατροπείς

- **ΑΠΕ πλευρά (PV):** Boost converter + MPPT (π.χ. P&O) σε Simulink. (MathWorks)
- **Υπερπυκνωτής πλευρά:** Bidirectional DC-DC Converter (ή buck-boost 4-switch) για φόρτιση/εκφόρτιση. (MathWorks, 2026)

Έλεγχος (outer V_{dc} + inner I_{sc})

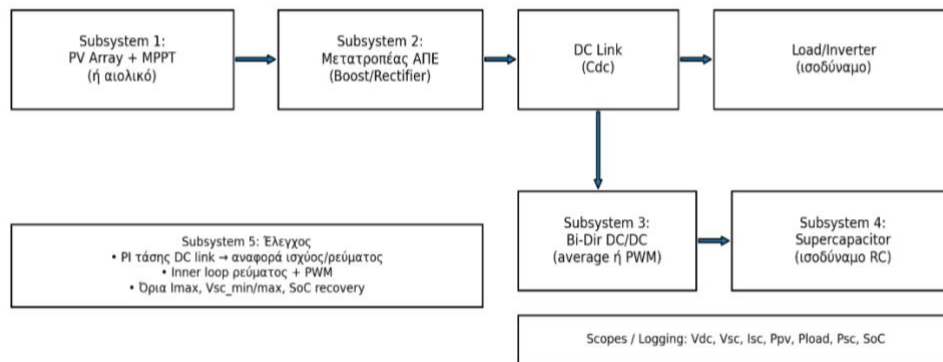


Σχήμα 6: Αρχιτεκτονική ελέγχου φόρτισης/εκφόρτισης υπερπυκνωτή (outer Vdc + inner Isc).

Παραπάνω απεικονίζεται η κλασική δομή cascaded control: ο εξωτερικός βρόχος τάσης (PI) ρυθμίζει τον DC ζυγό παράγοντας αναφορά ισχύος/ρεύματος για τον υπερπυκνωτή, ενώ ο εσωτερικός βρόχος ρεύματος (PI) οδηγεί το PWM του αμφίδρομου DC/DC. Ενσωματώνονται κορεσμοί/όρια (I_{max} , $V_{sc,min/max}$) και στρατηγική SoC recovery ώστε ο υπερπυκνωτής να παραμένει σε λειτουργικό παράθυρο.

Η κλασική προσέγγιση είναι:

- **Outer loop:** PI ελεγκτής τάσης DC link που παράγει αναφορά ισχύος/ρεύματος υπερπυκνωτή.
- **Inner loop:** PI ελεγκτής ρεύματος πηνίου/υπερπυκνωτή που οδηγεί PWM.
- **Saturation/limits:** I_{max} , $V_{sc,min/max}$, SoC recovery.



Σχήμα 7: Προτεινόμενη δομή μοντέλου Matlab/Simulink (υποσυστήματα).

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η οργάνωση του προσομοιωτικού μοντέλου σε υποσυστήματα: (1) μοντέλο ΑΠΕ (PV Array με είσοδο ακτινοβολίας/θερμοκρασίας ή ισοδύναμο αιολικό), (2) μετατροπέας ΑΠΕ (π.χ. boost/ανορθωτής), (3) DC link (πυκνωτής Cdc και μετρήσεις Vdc), (4) κλάδος υπερπυκνωτή (Supercapacitor block/ισοδύναμο RC και αμφίδρομος DC/DC), (5) έλεγχος με cascaded loops και περιορισμούς, καθώς και καταγραφή σημάτων (scopes/logging) για Vdc, Vsc, Isc, Ppv, Pload, Psc και SoC.

Η δομή αυτή (cascaded voltage-current control) είναι τυπική για ενσωμάτωση αποθήκευσης σε DC microgrids. (fer.unizg.hr)

4. 4 Αποτελέσματα προσομοίωσης (ενδεικτικό αριθμητικό παράδειγμα) και ανάλυση

Σενάριο δοκιμής

Χρησιμοποιήθηκε ενδεικτικό σενάριο 20 s (DC bus 48 V):

Βασική ισχύς PV: 1.8 kW

Βασικό φορτίο: 1.8 kW

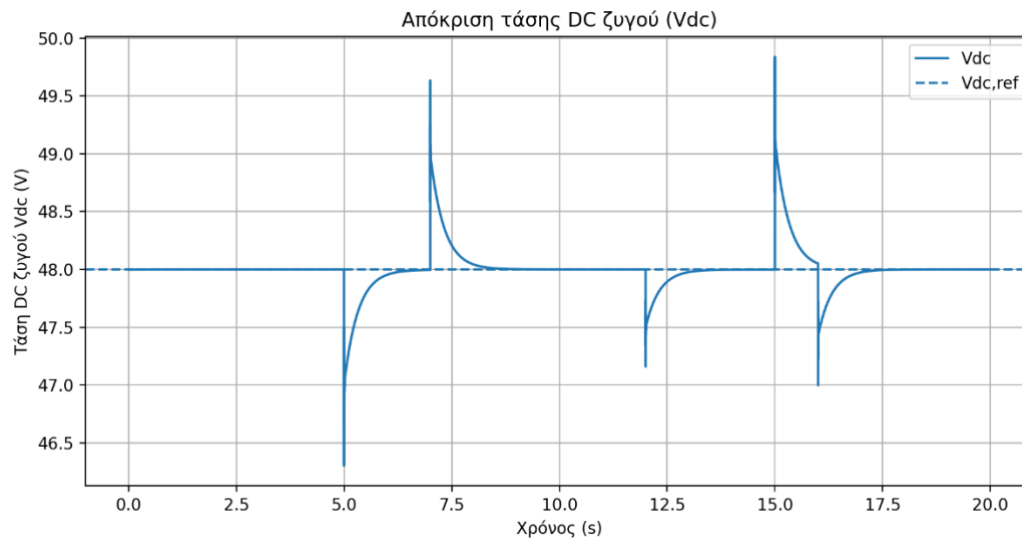
Cloud dip: PV πέφτει σε 1.0 kW από 5–7 s (έλλειμμα 0.8 kW)

Load step: φορτίο ανεβαίνει σε 2.2 kW από 12–15 s (έλλειμμα 0.4 kW)

PV spike: PV ανεβαίνει σε 2.3 kW από 15–16 s (πλεόνασμα 0.5 kW)

Ο υπερπυκνωτής ξεκινά στο $V_{sc0}=42$ V (μέση περιοχή), με παράθυρο 30–48.6 V, και ο μετατροπέας περιορίζεται σε $|P_{sc}| \leq 1.5$ kW.

Συμπεριφορά DC link (Vdc)



Σχήμα 8: Χρονική εξέλιξη της τάσης DC ζυγού $V_{dc}(t)$ και της αναφοράς $V_{dc,ref} = 48$ V

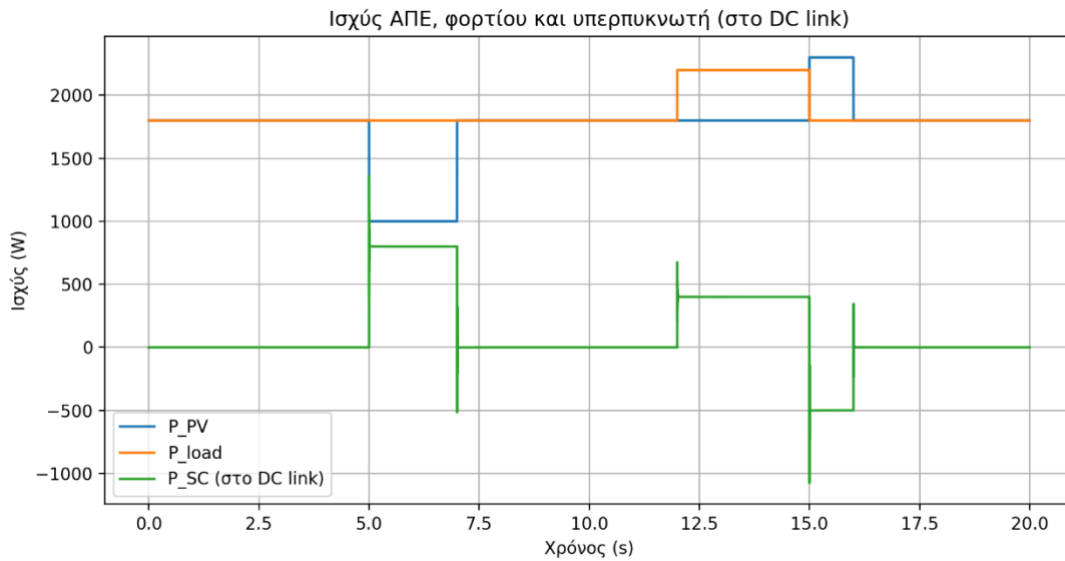
Στο παραπάνω σχήμα αποτυπώνεται η χρονική εξέλιξη της τάσης DC ζυγού $V_{dc}(t)$ και της αναφοράς $V_{dc,ref} = 48$ V κατά τη διάρκεια των σεναρίων μεταβολής παραγωγής ΑΠΕ και/ή φορτίου. Η απόκριση του V_{dc} καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα του καταρρακτωτού ελέγχου (outer voltage loop – inner current loop) σε συνθήκες βραχυχρόνιων διαταραχών.

Στο διάγραμμα V_{dc} παρατηρείται ότι η τάση παραμένει κοντά στα 48 V, με αποκλίσεις:

- $V_{dc,min} \approx 46.30$ V (−3.5%)
- $V_{dc,max} \approx 49.84$ V (+3.8%)

Οι κύριες αποκλίσεις εμφανίζονται κατά τα “μεταβατικά” (5 s και 15 s), όπως αναμενόταν λόγω στιγμιαίας ενεργειακής ανισορροπίας και δράσης κορεσμού/ελέγχου.

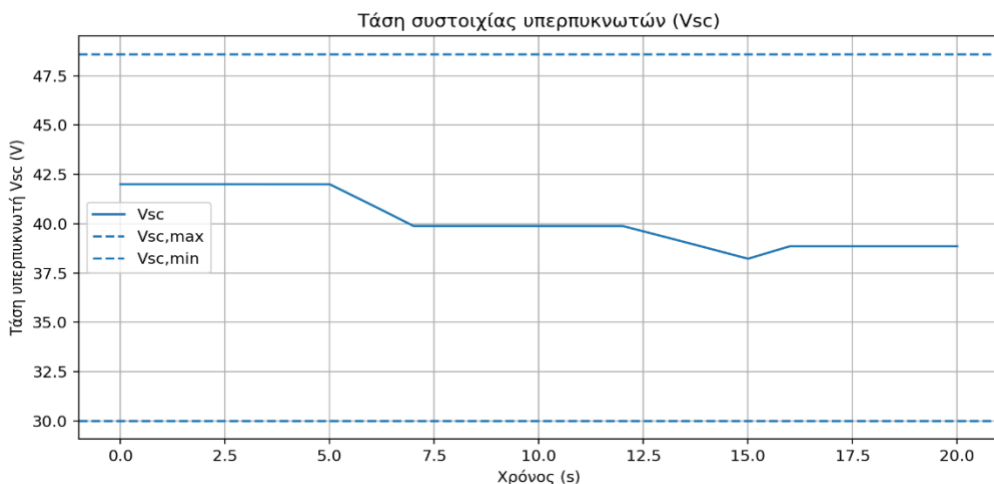
Ροή ισχύος (P_{pv} , P_{load} , P_{sc})



Σχήμα 9: Μεταβολές ισχύος παραγωγής ΑΠΕ $P_{pv}(t)$, ισχύος φορτίου $P_{load}(t)$ και ισχύος υπερπυκνωτή (στο DC link) $P_{sc}(t)$. Στο παραπάνω σχήμα αποτυπώνονται οι μεταβολές ισχύος παραγωγής ΑΠΕ $P_{pv}(t)$, ισχύος φορτίου $P_{load}(t)$ και ισχύος υπερπυκνωτή προς/από τον DC ζυγό $P_{sc}(t)$. Θετικές τιμές P_{sc} αντιστοιχούν σε εκφόρτιση του υπερπυκνωτή (παροχή ισχύος στον ζυγό), ενώ αρνητικές σε φόρτιση (απορρόφηση πλεονάζουσας ισχύος). Το διάγραμμα τεκμηριώνει τη λειτουργία του υπερπυκνωτή ως “buffer” εξομάλυνσης ισχύος.

Το διάγραμμα ισχύος δείχνει καθαρά τον ρόλο του υπερπυκνωτή ως buffer:

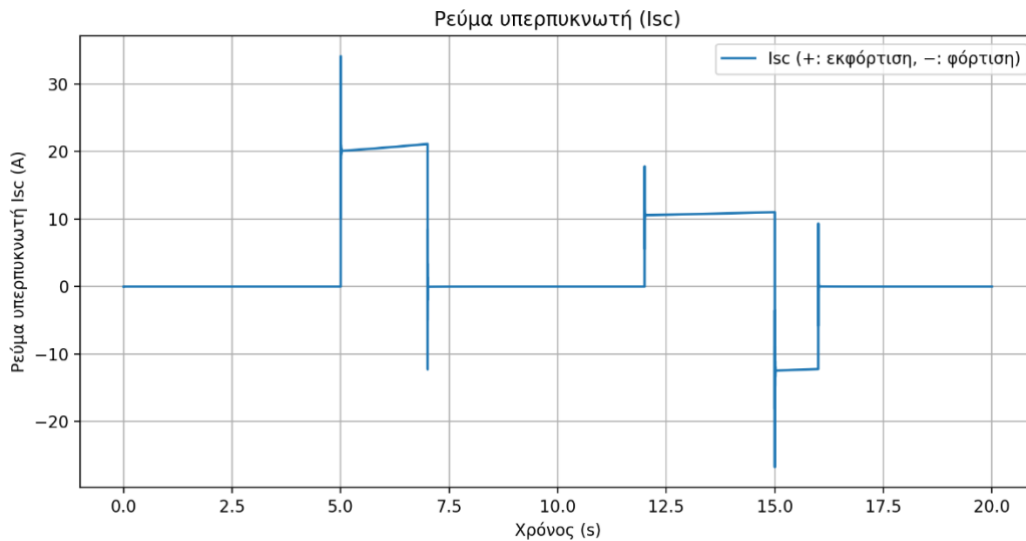
- Στο 5–7 s (πτώση PV), ο υπερπυκνωτής **εκφορτίζεται** και παρέχει έως περίπου **1.36 kW** στο DC link για να καλύψει το έλλειμμα.
- Στο 12–15 s (αύξηση φορτίου), ο υπερπυκνωτής παρέχει ~0.4–0.7 kW.
- Στο 15–16 s (πλεόνασμα PV), ο υπερπυκνωτής **φορτίζεται** (αρνητική P_{sc}), απορροφώντας έως περίπου **-1.08 kW**.



Σχήμα 10: Χρονική εξέλιξη της τάσης της συστοιχίας υπερπυκνωτών $V_{sc}(t)$

Στο παραπάνω σχήμα αποτυπώνεται η χρονική εξέλιξη της τάσης της συστοιχίας υπερπυκνωτών $V_{sc}(t)$ με ένδειξη των ορίων λειτουργίας $V_{sc,min}$ και $V_{sc,max}$. Η μεταβολή της V_{sc} αποτυπώνει την

ανταλλαγή ενέργειας ($E = 0,5 \cdot C \cdot V^2$) και επιβεβαιώνει ότι η λειτουργία παραμένει εντός του καθορισμένου παραθύρου τάσης, χωρίς υπερεκφόρτιση ή υπερφόρτιση.



Σχήμα 11: Ρεύμα υπερπυκνωτή $I_{sc}(t)$ κατά τη φόρτιση/εκφόρτιση.

Στο παραπάνω σχήμα οι θετικές τιμές αντιστοιχούν σε εκφόρτιση (παροχή ισχύος προς τον ζυγό), ενώ αρνητικές σε φόρτιση. Η μορφή του I_{sc} καταδεικνύει την ταχεία δυναμική απόκριση του κλάδου υπερπυκνωτή και επιτρέπει τον έλεγχο συμμόρφωσης με τα όρια ρεύματος (I_{max}), καθώς και την εκτίμηση απωλειών αγωγής ($P \cdot ESR$). Η παραπάνω συμπεριφορά είναι η επιθυμητή σε εφαρμογές ΑΠΕ: ο υπερπυκνωτής “κόβει” τις αιχμές/βυθίσεις και σταθεροποιεί τον ζυγό.

Τάση, ρεύμα και SoC υπερπυκνωτή (V_{sc} , I_{sc} , SoC)

- Η V_{sc} πέφτει από 42 V σε περίπου 38.2 V, παραμένοντας αρκετά πάνω από $V_{sc,min}=30$ V (άρα δεν εξαντλείται το ενεργειακό απόθεμα).
- Τα ρεύματα φτάνουν:
 - $I_{sc,max} \approx +34.1$ A (εκφόρτιση)
 - $I_{sc,min} \approx -26.8$ A (φόρτιση)τιμές συμβατές με χαμηλής τάσης MOSFET σχεδίαση.
- Ο SoC (ορισμός βάσει V_{sc}^2) μετακινείται από ~ 0.59 προς ~ 0.38 , άρα η συστοιχία παραμένει σε λειτουργικό παράθυρο χωρίς “τέρμα” εκφόρτιση.

Ενεργειακά, η καθαρή εκφόρτιση στο 20 s είναι ~ 0.69 Wh (ενδεικτικά), κάτι που συμφωνεί με τη μείωση της V_{sc} και επιβεβαιώνει ότι ο υπερπυκνωτής χρησιμοποιείται κυρίως για **βραχυχρόνια αντιστάθμιση**.

4. 4 Ρύθμιση PI ελεγκτών (tuning)

Η ρύθμιση των PI ελεγκτών στον αμφίδρομο DC/DC (buck–boost) κλάδο του υπερπυκνωτή υλοποιείται τυπικά με **καταρρακτωτή (cascaded) δομή**: ένας **εσωτερικός βρόχος ρεύματος** (γρήγορος) και ένας **εξωτερικός βρόχος τάσης DC ζυγού** (βραδύτερος). Η βασική αρχή είναι ότι ο εσωτερικός βρόχος “κλείνει” τη δυναμική του πηνίου και κάνει τον κλάδο να συμπεριφέρεται σαν **ελεγχόμενη πηγή ρεύματος**, απλοποιώντας δραστικά τον σχεδιασμό του εξωτερικού βρόχου τάσης. (Texas Instruments [TI], 2026)

Μεθοδολογία και κανόνας διαχωρισμού χρόνων (bandwidth separation)

Η ρύθμιση γίνεται με την παρακάτω λογική:

1. **Επιλογή συχνότητας μεταγωγής (fsw)** και ρυθμού δειγματοληψίας ελέγχου.
 - Για εργαστηριακό DC bus 48 V με MOSFET, μια συνηθισμένη τιμή είναι **fsw = 20 kHz**.
 - Ο εσωτερικός βρόχος ρεύματος εκτελείται συνήθως **στη συχνότητα PWM** (ή πολλαπλάσιό της), ενώ ο εξωτερικός βρόχος τάσης μπορεί να εκτελείται **5–10 φορές πιο αργά**.
2. **Εσωτερικός βρόχος ρεύματος:** στόχος μεγάλης ταχύτητας και σταθερότητας.
 - Επιλέγεται **εύρος ζώνης (bandwidth) f_{ci}** συνήθως στην περιοχή **fsw/10 έως fsw/5**, ανάλογα με θόρυβο μετρήσεων, καθυστερήσεις PWM και απαιτήσεις απόκρισης.
3. **Εξωτερικός βρόχος τάσης: στόχος σταθεροποίηση Vdc χωρίς να “ανταγωνίζεται” τον current loop.**
 - Επιλέγεται f_{cn} περίπου (1/5 έως 1/10) του f_{ci} (δηλαδή ο current loop 5–10 φορές ταχύτερος). Αυτός ο κανόνας είναι κλασικός σε καταρρακτωτά συστήματα ελέγχου. (mathworks.com)
4. **Έλεγχος ορίων:** προστίθενται κορεσμοί (Imax, Vsc,min/max) και anti-windup, ώστε να μην “φορτώνουν” οι ολοκληρωτές όταν ο μετατροπέας κορεστεί.
5. **Επαλήθευση:** γίνεται γραμμικοποίηση (linearization) γύρω από σημείο λειτουργίας και έλεγχος περιθωρίων ευστάθειας (phase/gain margin), όπως προτείνεται και από τα εργαλεία MathWorks (Model Linearizer / PID Tuner). (MathWorks, 2026)

Επιλογή σημείου λειτουργίας για tuning (worst-case)

Επειδή ο buck–boost είναι **μη γραμμικός** και τα δυναμικά του μεταβάλλονται με την τάση του υπερπυκνωτή και το φορτίο, το tuning πρέπει να ξεκινά σε “δυσμενές” σημείο λειτουργίας. Για τον κλάδο υπερπυκνωτή–DC bus, ένα πρακτικό worst-case είναι:

- **Vsc ≈ Vsc,min** (π.χ. 30 V): απαιτούνται μεγαλύτερα ρεύματα για την ίδια ισχύ ($P = V \cdot I$).
- **Μέγιστο φορτίο/μεταβολή ισχύος** (ΔP κοντά στο ΔP_{max}).
- **Μικρή διαθέσιμη “στήριξη” από την ΑΠΕ** (π.χ. cloud dip στο PV).

Επιπλέον, σε boost/buck–boost τοπολογίες υπάρχει το φαινόμενο **RHP zero** (right-half-plane zero) σε λειτουργία CCM, που περιορίζει το επιτρεπτό bandwidth του βρόχου τάσης (και γενικότερα την επιθετικότητα της αντιστάθμισης) και επιβαρύνει τη φάση. (Microchip Technology, 2026)

4.1 Ρύθμιση εσωτερικού βρόχου ρεύματος (inner current loop)

(α) Απλοποιημένο μοντέλο για αρχική ρύθμιση

Σε average μοντελοποίηση, η δυναμική του πηνίου μπορεί να θεωρηθεί (σε πρώτη προσέγγιση) ως ολοκληρωτής:

- $dI_L/dt \approx (V_L) / L$

και το V_L εξαρτάται από το duty cycle και τις τάσεις εισόδου/εξόδου. Για **αρχικό tuning**, είναι πρακτικό να θεωρηθεί ότι η επίδραση του duty στο ρεύμα προσεγγίζεται από ένα κέρδος K_i και έναν ολοκληρωτή (K_i / s). Σε αυτή τη φάση, ο στόχος δεν είναι η τέλεια μαθηματική ακρίβεια, αλλά ένα σταθερό σημείο εκκίνησης που θα διορθωθεί με γραμμικοποίηση/Simulink tuning. Η προσέγγιση “classical control + linearization tools” περιγράφεται και σε επίσημο παράδειγμα της MathWorks για PI design σε DC/DC. (MathWorks, 2026)

(β) Επιλογή bandwidth και στόχων ευστάθειας

Για $f_{sw} = 20$ kHz, μια τυπική επιλογή:

- $f_{ci} = 2$ kHz (δηλαδή $f_{sw}/10$)
- στόχος phase margin $\sim 50-70^\circ$ (συντηρητική αλλά καλή συμπεριφορά σε μεταβατικά)

(γ) Επιλογή μηδενικού του PI

Ένας πρακτικός κανόνας:

- το μηδενικό του PI (f_{zi}) να είναι στο $f_{ci}/5$.

Αυτό σημαίνει ότι ο PI λειτουργεί κυρίως ως αναλογικός κοντά στο crossover, ενώ ο ολοκληρωτής “διορθώνει” το DC σφάλμα σε χαμηλές συχνότητες, χωρίς να αποσταθεροποιεί το crossover.

(δ) Αρχικοί υπολογισμοί κερδών (με αριθμούς – baseline παράδειγμα)

Με $L = 100 \mu\text{H}$ και worst-case $V_{sc} = 30$ V, για χονδρική αρχική προσέγγιση το κέρδος από duty σε ρυθμό μεταβολής ρεύματος είναι περίπου:

- $K \approx V_{sc} / L = 30 / 100e-6 = 300000$ A/s ανά μονάδα duty

Για $f_{ci} = 2$ kHz:

- $\omega_{ci} = 2\pi f_{ci} = 12566$ rad/s

Μια πολύ πρακτική πρώτη εκτίμηση:

- $K_{p_i} \approx \omega_{ci} / K = 12566 / 300000 = 0.0419$ (μονάδες: duty ανά Ampere)
- Επιλέγουμε $f_{zi} = f_{ci}/5 = 400$ Hz $\rightarrow \omega_{zi} = 2513$ rad/s
Άρα:

- $K_{i_i} = K_{p_i} \times \omega_{zi} = 0.0419 \times 2513 = 105$ (μονάδες: duty/(A·s))

Σημείωση εφαρμογής: Τα παραπάνω είναι “κανονικοποιημένες” τιμές όταν η έξοδος του PI οδηγεί **direct duty (0...1)**. Αν υπάρχει επιπλέον κλιμάκωση (PWM gain, αισθητήρας ρεύματος, φίλτρα), τα κέρδη πρέπει να προσαρμοστούν αναλόγως.

(ε) Anti-windup και κορεσμοί

Ο current loop πρέπει να περιλαμβάνει:

- κορεσμό duty (0...1 ή -1...1 αναλόγως υλοποίησης),
- κορεσμό ρεύματος I_{max} ,
- anti-windup (π.χ. conditional integration ή back-calculation), ώστε όταν ο duty κορεστεί, ο ολοκληρωτής να μην “φουσκώνει” και να προκαλεί overshoot όταν αποκορεστεί.

4.2 Ρύθμιση εξωτερικού βρόχου τάσης (outer DC-link voltage loop)

(α) Μοντέλο plant όταν ο current loop είναι “γρήγορος”

Όταν ο current loop έχει αρκετό bandwidth, ο μετατροπέας “φαίνεται” στον DC ζυγό σαν ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Τότε η δυναμική του DC link πυκνωτή δίνεται προσεγγιστικά από:

- $C_{dc} \cdot dV_{dc}/dt = I_{net}$

Δηλαδή, από I_{ref} προς V_{dc} έχουμε ολοκληρωτή: $G_v(s) \approx 1 / (C_{dc} \cdot s)$.

Αυτή η απλοποίηση είναι ακριβώς ο λόγος που ο current-mode/cascaded έλεγχος είναι τόσο δημοφιλής: “αφαιρεί” το πηνίο από τον εξωτερικό βρόχο σε χαμηλές συχνότητες και κάνει το σχεδιασμό του voltage loop πιο ευθύ. (Texas Instruments [TI], 2026)

(β) Επιλογή bandwidth με σεβασμό σε RHP zero και fsw

Για boost/buck–boost τοπολογίες, λόγω RHP zero η επιθετική αύξηση bandwidth του voltage loop μπορεί να οδηγήσει σε κακή φασική συμπεριφορά. Γι’ αυτό:

- επιλέγουμε f_{cv} σαφώς μικρότερη από f_{ci}
- και κατά κανόνα κρατάμε το crossover αρκετά κάτω από περιορισμούς που θέτει το RHP zero ή/και ως κλάσμα της fsw. (ww1.microchip.com)

Με $f_{ci} = 2$ kHz, μια τυπική επιλογή:

- $f_{cv} = 200\text{--}400$ Hz (δηλαδή 1/5 έως 1/10 του current loop)

Στο baseline παράδειγμα θα χρησιμοποιήσουμε:

- $f_{cv} = 300$ Hz $\rightarrow \omega_{cv} = 1885$ rad/s

(γ) Επιλογή μηδενικού PI και αρχικά κέρδη (με αριθμούς)

Θέτουμε μηδενικό:

- $f_{zv} = f_{cv}/5 = 60$ Hz $\rightarrow \omega_{zv} = 377$ rad/s

Με $Cdc = 10$ mF = 0.01 F, και plant $1/(Cdc \cdot s)$, μια αρχική εκτίμηση:

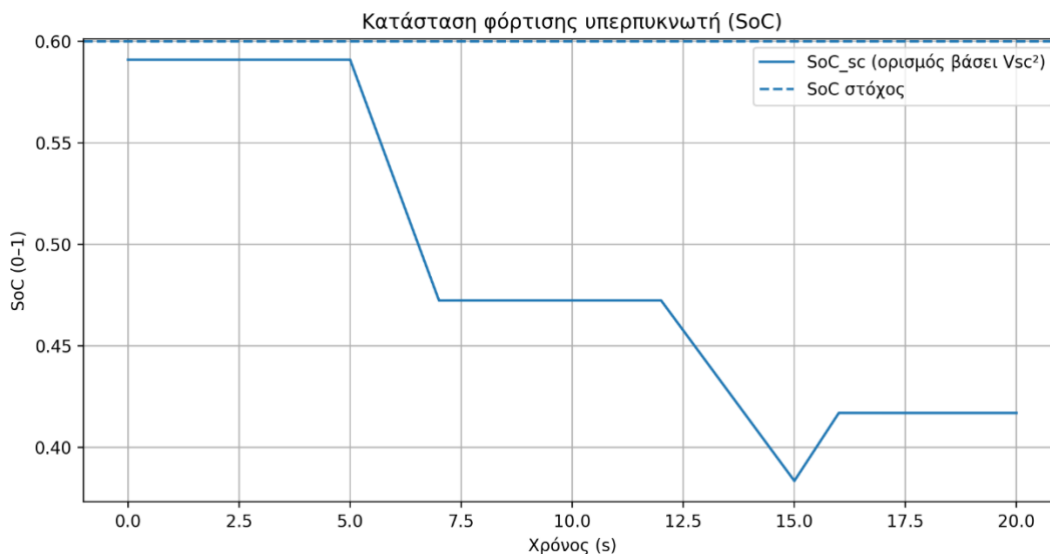
- $Kp_v \approx Cdc \cdot \omega_{cv} = 0.01 \times 1885 = 18.85$ (μονάδες: A/V)
- $Ki_v = Kp_v \times \omega_{zv} = 18.85 \times 377 = 7100$ (μονάδες: A/(V·s))

Η έξοδος του voltage PI είναι $I_{sc,ref}$ (ή $P_{sc,ref}$ που μετατρέπεται σε ρεύμα), και στη συνέχεια εφαρμόζονται όρια:

- $|I_{sc,ref}| \leq I_{max}$
- V_{sc} προστασία: όταν $V_{sc} \leq V_{sc,min}$, περιορίζεται η εκφόρτιση, και όταν $V_{sc} \geq V_{sc,max}$ περιορίζεται η φόρτιση.

(δ) Προσθήκη “SoC recovery”

Σε συστήματα υπερπυκνωτή, είναι συχνά χρήσιμο να προστεθεί αργή ανάκτηση προς ένα SoC στόχο (π.χ. 50–60%), ώστε να μην “κολλά” ο υπερπυκνωτής κοντά στα όρια μετά από διαδοχικά συμβάντα. Αυτό υλοποιείται ως χαμηλής συχνότητας πρόσθετος όρος στο I_{ref} ή P_{ref} και πρέπει να έχει **πολύ μικρό bandwidth** σε σχέση με το voltage loop (ώστε να μην εισάγει ταλαντώσεις).



Σχήμα 11: Κατάσταση φόρτισης του υπερπυκνωτή $SoC_{sc}(t)$

Στο παραπάνω σχήμα αποτυπώνεται η κατάσταση φόρτισης του υπερπυκνωτή $SoC_{sc}(t)$ υπολογισμένη βάσει της τάσης V_{sc} (ενεργειακός ορισμός μέσω V_{sc}^2) και ένδειξη στόχου λειτουργίας (SoC_{target}). Το διάγραμμα χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας (EMS) και για την επιβεβαίωση ότι ο υπερπυκνωτής διατηρείται σε λειτουργική περιοχή, ώστε να είναι διαθέσιμος για επόμενα μεταβατικά γεγονότα.

4.2 Διαδικασία επαλήθευσης και τελικής ρύθμισης στο Simulink

Η πρακτική ροή που προτείνεται (και εναρμονίζεται με τα εργαλεία MathWorks) είναι:

1. **Κλείσιμο μόνο του current loop**, με απλό φορτίο/σταθερό DC bus, και έλεγχος:
 - βηματικής αναφοράς ρεύματος (I_{ref} step),
 - χρόνο αποκατάστασης, overshoot, ταλαντώσεις,
 - επιβεβαίωση ότι f_{ci} επιτυγχάνεται χωρίς υπερβολικό θόρυβο.
2. **Κλείσιμο του voltage loop** πάνω από τον ήδη σταθερό current loop:
 - βήμα στην αναφορά $V_{dc,ref}$ ή βήμα φορτίου (load step),
 - έλεγχος V_{dc} undershoot/overshoot, settling time,
 - έλεγχος κορεσμών και anti-windup (να μην “κολλάει” μετά από saturation).
3. **Γραμμικοποίηση / Bode**:
 - χρησιμοποιείται Model Linearizer / Frequency Response Estimator,
 - στόχος: επαρκές phase margin, απουσία “ύποπτων” συντονισμών.
4. **Επαλήθευση σε switching model** (αν αρχικά έγινε average):
 - επιβεβαίωση ότι οι καθυστερήσεις PWM και το ripple δεν μειώνουν δραστικά τα περιθώρια ευστάθειας.

Επιπλέον, για πιο λεπτομερή αντιστάθμιση/θεωρία loop compensation σε switching converters, είναι χρήσιμα κλασικά application notes μικροσήματος/αντιστάθμισης. (Analog Devices, 2026)

4.3 Μεθοδολογία Ρύθμισης Ελέγχου (Algorithm box)

1. **Ορισμός βάσης σχεδίασης**: καθόρισε f_{sw} , L , C_{dc} , όρια (I_{max} , $V_{sc,min/max}$) και τα σενάρια (cloud dip, load step, PV spike).
2. **Επιλογή δυσμενούς σημείου λειτουργίας (worst-case)**: θέσε $V_{sc} = V_{sc,min}$ (π.χ. 30 V) και μέγιστη απαίτηση ισχύος/ρεύματος ($\Delta P \approx \Delta P_{max}$).
3. **Επιλογή στόχων bandwidth**: όρισε f_{ci} για τον inner current loop (τυπικά $f_{sw}/10$) και f_{cv} για τον outer voltage loop (τυπικά 5–10 φορές μικρότερο από f_{ci}). (fr.mathworks.com)
4. **Απομόνωση/κλείσιμο inner loop**: “άνοιξε” τον outer loop και ρύθμισε μόνο τον current controller ($I_{ref} \rightarrow I_{sc}$).
5. **Αρχικός υπολογισμός PI (current loop)**: τοποθέτησε το μηδενικό του PI γύρω στο $f_{zi} \approx f_{ci}/5$ και υπολόγισε αρχικές τιμές $K_{p,i}$ και $K_{i,i}$ από το (γραμμικοποιημένο) duty→current plant στο worst-case. (mathworks.com)
6. **Anti-windup & κορεσμοί**: πρόσθεσε κορεσμό duty και I_{max} και anti-windup (π.χ. conditional integration) και επανέλεγε βηματική απόκριση ρεύματος.
7. **Κλείσιμο outer loop**: θεώρησε τον current loop “γρήγορο” και ρύθμισε τον voltage PI ($V_{dc,ref} \rightarrow I_{ref}$ ή $P_{sc,ref}$) με f_{cv} και $f_{zv} \approx f_{cv}/5$. (fr.mathworks.com)
8. **Προστασίες V_{sc}/SoC** : ενεργοποίησε περιορισμούς φόρτισης/εκφόρτισης κοντά σε $V_{sc,min/max}$ και προαιρετικά “SoC recovery” αργής δυναμικής.
9. **Έλεγχος περιορισμών RHP zero (όπου εφαρμόζεται)**: για boost/buck–boost σε CCM, επιβεβαίωσε ότι το bandwidth του voltage loop είναι αρκετά κάτω από τη συχνότητα του RHPZ (συντηρητικά $\leq 1/10$ του worst-case RHPZ). (ti.com)

10. **Επαλήθευση και τελική ρύθμιση:** τρέξε όλα τα σενάρια, έλεγξε margins (γραμμικοποίηση/Bode) και αποφάσισε “fixed gains” ή “gain scheduling” ως προς V_{sc} . (mathworks.com)

4.4 Προσαρμογή κερδών σε δύο σημεία λειτουργίας ($V_{sc} = 30\text{ V}$ και $V_{sc} = 48\text{ V}$)

Δεδομένα

- $f_{sw} = 20\text{ kHz}$
- $L = 100\text{ }\mu\text{H}$
- $C_{dc} = 10\text{ mF}$
- Στόχοι: $f_{ci} = 2\text{ kHz}$ (inner current loop), $f_{cv} = 300\text{ Hz}$ (outer voltage loop)
- Επιλογή μηδενικών: $f_{zi} = f_{ci}/5 = 400\text{ Hz}$, $f_{zv} = f_{cv}/5 = 60\text{ Hz}$

1) Inner current loop (PI ρεύματος) – γιατί αλλάζει με το V_{sc}

Σε first-cut σχεδίαση average model, ο “plant gain” από duty προς ρυθμό μεταβολής ρεύματος κλιμακώνεται περίπου με V_{sc}/L . Άρα, όταν το V_{sc} αυξάνεται, ο μετατροπέας μπορεί να αλλάξει το ρεύμα ταχύτερα για το ίδιο duty, και ο βρόχος γίνεται πιο “ισχυρός” (μεγαλύτερο plant gain). Με $f_{ci} = 2\text{ kHz}$ και $f_{zi} = 400\text{ Hz}$, οι αρχικές τιμές PI (όταν η έξοδος του PI οδηγεί απευθείας duty) είναι:

Πίνακας 3: Κέρδη PI current loop για δύο σημεία λειτουργίας

| Σημείο λειτουργίας | V_{sc} (V) | Προσεγγιστικό gain $K \approx V_{sc}/L$ (A/s ανά duty) | $K_{p,i}$ (duty/A) | $K_{i,i}$ (duty/(A·s)) |
|------------------------------------|-----------------|---|-----------------------|---------------------------|
| Worst-case (ελάχιστη τάση) | 30 | 300,000 | 0.0419 | 105.3 |
| Υψηλή τάση (σχεδόν πλήρης φόρτιση) | 48 | 480,000 | 0.0262 | 65.8 |

Ερμηνεία:

- Στα 30 V ο plant gain είναι μικρότερος, άρα χρειάζονται **μεγαλύτερα** $K_{p,i}$ και $K_{i,i}$ για να κρατηθεί το ίδιο bandwidth.
- Στα 48 V ο plant gain αυξάνει κατά $48/30 = 1.6$, άρα τα απαιτούμενα κέρδη για ίδιο f_{ci} μειώνονται αναλογικά.

2) Outer voltage loop (PI τάσης DC ζυγού) – δύο ισοδύναμες υλοποιήσεις

Περίπτωση A: Outer loop παράγει αναφορά ρεύματος ($I_{sc,ref}$)

Αν ο voltage PI δίνει I_{ref} (και ο current loop το ακολουθεί), το plant για το V_{dc} (μέσω C_{dc}) είναι κυρίως $1/(C_{dc} \cdot s)$, άρα τα βασικά κέρδη **δεν εξαρτώνται άμεσα** από το V_{sc} .

Με $f_{cv} = 300\text{ Hz}$ και $f_{zv} = 60\text{ Hz}$:

- $K_{p,v} = C_{dc} \times (2\pi f_{cv}) = 18.85\text{ A/V}$
- $K_{i,v} = K_{p,v} \times (2\pi f_{zv}) = 7106\text{ A/(V}\cdot\text{s)}$

Αυτή είναι η πιο “καθαρή” προσέγγιση γιατί αποσυνδέει τον outer loop από τη μεταβολή του V_{sc} (η εξάρτηση περνά κυρίως στους κορεσμούς/όρια ισχύος).

Περίπτωση Β: Outer loop παράγει αναφορά ισχύος ($P_{sc,ref}$)

Αν ο voltage PI δίνει P_{ref} και μετά γίνεται μετατροπή σε ρεύμα με $I_{ref} = P_{ref} / V_{sc}$, τότε υπάρχει σαφής εξάρτηση από V_{sc} . Για να διατηρείς παρόμοια δυναμική, μπορείς να κάνεις ισοδύναμη κλιμάκωση των κερδών (σε “W/V” αντί “A/V”):

Πίνακας 4: Ισοδύναμα κέρδη voltage PI σε μορφή ισχύος ($P_{sc,ref}$)

| Σημείο λειτουργίας | V_{sc} (V) | $K_{p,P} = V_{sc} \times K_{p,v}$ (W/V) | $K_{i,P} = V_{sc} \times K_{i,v}$ (W/(V·s)) |
|--------------------|--------------|---|---|
| 30 V | 30 | 565.5 | 213,183 |
| 48 V | 48 | 904.8 | 341,094 |

Συμπέρασμα:

- Αν δουλεύεις σε **μορφή ρεύματος**, κρατάς **σταθερά** $K_{p,v}$ και $K_{i,v}$ και η μεταβολή V_{sc} επηρεάζει κυρίως τα όρια/κορεσμούς.
- Αν δουλεύεις σε **μορφή ισχύος**, τότε είναι φυσιολογικό να χρησιμοποιήσεις **gain scheduling** ως προς V_{sc} (ή να ορίσεις $P_{ref} \rightarrow I_{ref}$ με φίλτρο/προστασία) ώστε να μην αλλάζει ο “αποτελεσματικός” βρόχος με την τάση.

«Η επιλογή του $V_{sc} = V_{sc,min}$ ως σημείο ρύθμισης (worst-case tuning) είναι σκόπιμη, διότι σε χαμηλή τάση υπερπυκνωτή απαιτούνται υψηλότερα ρεύματα για την ίδια ισχύ ($P = V \cdot I$) και η δυναμική μεταβολής του ρεύματος ανά μονάδα duty μειώνεται περίπου αναλογικά με το V_{sc} . Επομένως, ρύθμιση στο $V_{sc,min}$ εξασφαλίζει ότι η ελάχιστη επιθυμητή ταχύτητα του inner current loop επιτυγχάνεται σε όλο το εύρος λειτουργίας. Παράλληλα, η ρύθμιση του outer voltage loop επιλέγεται αρκετά πιο αργή (τυπικά 5–10 φορές) ώστε να επιτυγχάνεται αποσύζευξη των βρόχων και να αποφεύγονται ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις, ενώ σε boost/buck–boost τοπολογίες λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμός που εισάγει το right-half-plane zero, επιβάλλοντας συντηρητικό bandwidth στον βρόχο τάσης.» (Texas Instruments [TI], 2026)

Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση MATLAB/Simulink - Τεκμηρίωση

5.1 Στόχος προσομοίωσης και μετρικές αξιολόγησης

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να τεκμηριώσει, με συστηματικό τρόπο, τη διαδικασία προσομοίωσης του προτεινόμενου συστήματος αποθήκευσης με υπερπυκνωτές στο MATLAB/Simulink. Η προσομοίωση επιδιώκει να καταδείξει ότι ο κλάδος υπερπυκνωτή (UC branch), σε συνεργασία με τον αμφίδρομο DC/DC μετατροπέα και τον καταρρακτωτό έλεγχο (outer voltage loop – inner current loop), μπορεί να λειτουργήσει ως “buffer” υψηλής ισχύος για εφαρμογές ΑΠΕ, περιορίζοντας τις βραχυχρόνιες αποκλίσεις τάσης στον DC ζυγό και εξομαλύνοντας τα μεταβατικά φαινόμενα ισχύος.

Οι βασικοί στόχοι προσομοίωσης συνοψίζονται ως εξής:

1. **Εξομάλυνση ισχύος ΑΠΕ (power smoothing):** όταν η ισχύς της ΑΠΕ (π.χ. PV) μεταβάλλεται γρήγορα (σενάρια “συννεφιάς”), ο υπερπυκνωτής αποδίδει/απορροφά ισχύ ώστε η καθαρή ισχύς προς το φορτίο/ζυγό να εμφανίζει μικρότερες αιχμές.
2. **Σταθεροποίηση DC bus:** ο DC ζυγός Vdc διατηρείται κοντά στη τιμή αναφοράς (π.χ. 48 V), με περιορισμό υπερύψωσης/βύθισης και μικρό χρόνο αποκατάστασης.
3. **Γρήγορη δυναμική απόκριση σε μεταβολές φορτίου:** σε απότομη αύξηση/μείωση φορτίου, ο κλάδος UC καλύπτει προσωρινά το ισοζύγιο ισχύος, “αγοράζοντας χρόνο” για τη βραδύτερη δυναμική της ΑΠΕ ή/και του υπόλοιπου συστήματος.
4. **Τήρηση ηλεκτρικών περιορισμών:** ρεύματα, τάσεις και λειτουργικό παράθυρο υπερπυκνωτή (Vsc,min/Vsc,max) δεν παραβιάζονται, ενώ ενσωματώνονται κορεσμοί και anti-windup.

Για την ποσοτική αξιολόγηση, χρησιμοποιούνται μετρικές που αντιστοιχούν άμεσα σε απαιτήσεις λειτουργίας συστημάτων ισχύος. Επειδή δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα, οι μετρικές τύπου “σφάλμα έναντι πειράματος” αντικαθίστανται από: (α) σύγκριση έναντι περίπτωση αναφοράς (baseline) προσομοίωσης χωρίς υπερπυκνωτή, και/ή (β) σύγκριση έναντι ιδανικών αναφορών (π.χ. Vdc,ref σταθερό), και/ή (γ) εσωτερικούς ελέγχους φυσικής συνέπειας.

Πίνακας 5: Ενδεικτικές μετρικές αξιολόγησης προσομοίωσης

| Μετρική | Ορισμός/υπολογισμός | Logged σήματα | Μονάδες | Target/threshold (ενδεικτικό) | Παράθυρο αξιολόγησης |
|---------------------|--|-----------------|---------|--|--|
| $\Delta V_{dc,max}$ | Μέγιστη απόλυτη απόκλιση: $\max(V_{dc} - V_{dc,ref})$ | Vdc(t), Vdc,ref | V | $\leq 0,96 \text{ V } (\pm 2\%)$ ή $\leq 2,40 \text{ V } (\pm 5\%)$ για Vdc,ref=48 V | TC1: 5–9 s; TC2: 12–17 s; TC3: 15–18 s |
| t_settle | Χρόνος μέχρι Vdc να μπει και να παραμείνει στη ζώνη $\pm 2\%$ (ή $\pm 5\%$) | Vdc(t), Vdc,ref | s | TC1: $\leq 0,25 \text{ s}$; TC2: $\leq 0,40 \text{ s}$; TC3: $\leq 0,25 \text{ s}$ (primary) | Από t0 κάθε γεγονός |
| RMSE(Vdc) | $\sqrt{\text{mean}((V_{dc} - V_{dc,ref})^2)}$ | Vdc(t), Vdc,ref | V | Όσο μικρότερο τόσο καλύτερο (π.χ. $< 0,30 \text{ V}$ σε TC1–TC3) | TC1–TC3 |
| Psc,peak | Μέγιστη τιμή Psc κατά το γεγονός | Psc(t)=Vsc·Isc | W | Να καλύπτει το ΔP_{max} χωρίς κορεσμούς | TC1–TC3 |
| Isc,peak | Μέγιστη τιμή Isc κατά το γεγονός | Isc(t) | A | $ Isc \leq I_{max}$ (π.χ. 50 A) | TC1–TC3 |
| Vsc,min / Vsc,max | Ελάχιστη/μέγιστη τάση υπερπυκνωτή στο γεγονός | Vsc(t) | V | Vsc,min=30 V; Vsc,max=48 V (ενδεικτικό) | TC1–TC4 |
| SoC,min / SoC,max | SoC από V_{sc}^2 : $(V_{sc}^2 -$ | Vsc(t) → SoC(t) | - | $0,20 \leq \text{SoC} \leq 0,95$ (ενδεικτικό) | TC4 (1–20 s) |

| | | | | | |
|---------------------|--|--|--------|--|---------|
| | $V_{min}^2)/(V_{max}^2 - V_{min}^2)$ | | | | |
| E_throughput, sc | Ενεργειακή διέλευση: $\int P_{sc}(t) dt$ σε κάθε TC | P _{sc} (t) | J ή Wh | Χρήσιμο για σύγκριση καταπόνησης και απωλειών | TC1–TC3 |
| η _{est} | $1 - (E_{losses}/E_{throughput})$, $E_{losses} \approx \int (I_{sc}^2 \cdot ESR) dt$ + απώλειες μετατροπέα | I _{sc} (t), ESR, P _{conv} , loss | - | Συγκριτική μετρική (όχι absolute χωρίς θερμικό/ημιαγωγικό μοντέλο) | TC1–TC4 |

Σημείωση: Τα thresholds είναι ενδεικτικά και πρέπει να ευθυγραμμιστούν με τις τελικές προδιαγραφές του Κεφαλαίου 4 ($V_{dc,ref}$, I_{max} , $V_{sc,min/max}$, ζώνη αξιολόγησης $\pm 2\%$ ή $\pm 5\%$).

- **$\Delta V_{dc,max} / \Delta V_{dc,min}$** : μέγιστη απόκλιση τάσης ζυγού από την αναφορά (peak deviation).
- **t_settle(V_{dc})**: χρόνος αποκατάστασης μετά από διαταραχή (settling time), με κριτήριο π.χ. $\pm 2\%$ ή $\pm 5\%$.
- **I_{sc,peak}**: μέγιστη τιμή ρεύματος υπερπυκνωτή (θετικό/αρνητικό), ως δείκτης θερμικής/ηλεκτρικής καταπόνησης.
- **E_{UC,used}**: καθαρή μεταβολή ενέργειας στον υπερπυκνωτή και αξιοποίηση διαθέσιμου ενεργειακού παραθύρου.
- **ΔP_smoothing**: μείωση αιχμών ισχύος (π.χ. μετρική peak-to-peak) στην καθαρή ισχύ προς τον ζυγό, σε σχέση με περίπτωση αναφοράς (baseline) χωρίς UC.
- **RMSE(V_{dc})**: root mean squared error της V_{dc} ως προς V_{dc,ref} ή ως προς περίπτωση αναφοράς (baseline) “ιδανικού” (όχι πειραματικό). Στο MATLAB μπορεί να υπολογιστεί με τη συνάρτηση rmse. (mathworks.com)

Με αυτό το πλαίσιο, το ζητούμενο δεν είναι να «αποδειχθεί» ταύτιση με πραγματικές μετρήσεις, αλλά να παρουσιαστεί ένα **εσωτερικά συνεπές**, τεκμηριωμένο και επαναλήψιμο προσομοιωτικό περιβάλλον, που επιτρέπει την αξιολόγηση στρατηγικών ελέγχου και τη συγκριτική μελέτη παραμετρικών επιλογών.

5. 2 Περιγραφή μοντέλου

5. 2. 1 Μοντέλο υπερπυκνωτή: ισοδύναμο κύκλωμα και δυναμική

Για τη θεωρητική προσέγγιση υπερπυκνωτών, συχνά χρησιμοποιούνται ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα (Equivalent Circuit Models – ECM), τα οποία αποτυπώνουν με πεπερασμένο αριθμό στοιχείων (R, C) τα βασικά φαινόμενα: χωρητικότητα, ωμική αντίσταση, διηλεκτρικές/διάχυτες συνιστώσες και διαρροές. Σε απλή μορφή, ένα “ελάχιστο” μοντέλο περιλαμβάνει:

- **C**: ισοδύναμη χωρητικότητα,
- **ESR**: ισοδύναμη σειριακή αντίσταση,
- **R_{leak}**: αντίσταση διαρροής (παράλληλη), που προσομοιώνει αυτοεκφόρτιση.

Η τερματική τάση του υπερπυκνωτή μπορεί να περιγραφεί ως:

- $V_{sc_terminal} = V_c - I_{sc} * ESR$ (με συμβατική φορά ρεύματος που ορίζεται στο μοντέλο) και η δυναμική φόρτισης/εκφόρτισης της χωρητικότητας:
- $dV_c/dt = I_{sc} / C$

Η διαρροή προσεγγίζεται από:

- $I_{leak} = V_c / R_{leak}$

Η αποθηκευμένη ενέργεια δίνεται από τη γνωστή σχέση:

- $E = 0.5 * C * V_c^2$

Στο Simulink/Simscape Electrical, το **Supercapacitor block** υλοποιεί πιο πλούσια δομή (πολλαπλούς κλάδους RC και μεταβλητή χωρητικότητα), επιτρέποντας ρεαλιστικότερη προσομοίωση σε σύντομες αλλά και μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες, όπως αποτυπώνεται και στο ισοδύναμο κύκλωμα που παρουσιάζεται στη τεκμηρίωση του block. (MathWorks, 2026)

Στη βιβλιογραφία, συναντώνται επίσης απλοποιημένα/βελτιωμένα μοντέλα (π.χ. multi-branch ή μοντέλα με εξάρτηση από τάση), τα οποία προσφέρουν καλύτερη προσαρμογή σε δεδομένα φόρτισης/εκφόρτισης χωρίς υπερβολική υπολογιστική επιβάρυνση. (Oukaour et al., 2013)

5.2. 2 Μοντέλο φωτοβολταϊκού (PV) ως πηγή ΑΠΕ

Για το σκέλος ΑΠΕ, μία τυπική επιλογή είναι η χρήση του **PV Array block** (Specialized Power Systems), το οποίο βασίζεται σε μοντέλο “πέντε παραμέτρων” για την I–V χαρακτηριστική (πηγή φωτόρευματος, δίοδος, R_s , R_{sh} κ.λπ.) και επιτρέπει παραμετροποίηση με ακτινοβολία και θερμοκρασία. (MathWorks, 2026)

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας (καθαρά θεωρητική), η PV πηγή λειτουργεί κυρίως ως **γεννήτρια μεταβατικών γεγονότων** (π.χ. βύθιση ισχύος λόγω νέφωσης), ώστε να διερευνηθεί η απόκριση του UC branch και του ελέγχου.

5. 2. 3 Μοντέλα μετατροπέων: επιλογή επιπέδου πιστότητας

Οι μετατροπείς (DC/DC στην πλευρά ΑΠΕ, αμφίδρομος DC/DC στην πλευρά υπερπυκνωτή) μπορούν να μοντελοποιηθούν σε δύο κύριες κλίμακες:

- **Switching model (PWM):** υψηλή πιστότητα, με μεταγωγικά στοιχεία, ripples, και ανάγκη μικρού βήματος ολοκλήρωσης.
- **Average model:** χαμηλότερη υπολογιστική απαίτηση, κατάλληλη για έλεγχο/EMS, tuning PI και γρήγορη διερεύνηση σεναρίων.

Η επιλογή εξαρτάται από τον στόχο: εφόσον στην παρούσα εργασία ζητείται τεκμηρίωση ελέγχου και συμπεριφοράς συστήματος σε κλίμακα δευτερολέπτων, το **average model** αποτελεί συνήθως αποδοτικό και επαρκές πρώτο βήμα, ενώ το switching μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά για έλεγχο ευστάθειας υπό PWM καθυστερήσεις.

5.3 Παραμετροποίηση από datasheet

5.3.1 Πίνακας βασικών παραμέτρων

Οι παράμετροι του υπερπυκνωτή/συστοιχίας προκύπτουν πρωτίστως από datasheets (χωρητικότητα, ESR, leakage) και μετασχηματισμούς σειράς/παράλληλης σύνδεσης. Ως παράδειγμα, χρησιμοποιείται κυψέλη 2.7 V, 350 F, με χαρακτηριστικές τιμές ESRDC και leakage όπως αναφέρονται στο αντίστοιχο datasheet.

Πίνακας 6: Ενδεικτικές παράμετροι κυψέλης και συστοιχίας υπερπυκνωτών

| Παράμετρος | Σύμβολο | Κυψέλη (1x) | Συστοιχία (18S1P) | Μονάδες | Σχόλιο |
|------------------------------|---------------------------|-------------|-------------------|---------|---|
| Ονομαστική τάση κυψέλης | $V_{cell,rated}$ | 2.7 | 48.6 | V | $V_{stack,max} = N_s \cdot V_{cell,rated}$ |
| Χωρητικότητα | C | 350 | 19.44 | F | $C_{eq} = C_{cell} \cdot N_p / N_s$ |
| Ισοδύναμη ESR | ESR | 2.9 | 52.2 | mΩ | $ESR_{eq} = ESR_{cell} \cdot N_s / N_p$ |
| Ενέργεια σε V_{max} | E_{max} | - | 6.38 | Wh | $E = 0,5 \cdot C_{eq} \cdot V_{max}^2$ (ιδανικό) |
| Παράθυρο τάσης λειτουργίας | $V_{sc,min} - V_{sc,max}$ | - | 30 - 48 | V | Ενδεικτικό παράδειγμα συμβατό με Κεφ. 4 |
| Μέγιστο ρεύμα σχεδίασης | I_{max} | - | 50 | A | Θέμα μετατροπέα, θερμικής και ESR (design margin) |
| Αυτοεκφόρτιση/διαρροή (τυπ.) | I_{leak} | ≈0,5 | ≈9,0 | mA | Ενδεικτική τιμή (εξαρτάται από θερμοκρασία/χρόνο) |

A. Παράμετροι κυψέλης (cell-level)

- Rated voltage VR: 2.7 V
- Rated capacitance CR: 350 F (τυπική περιοχή/ανοχές στο datasheet)
- ESRDC: τυπική 2.8 mΩ, μέγιστη 3.2 mΩ (BOL)
- Leakage current (μεθοδολογία 72 h hold): τυπική 0.45 mA, μέγιστη 0.75 mA

B. Παράμετροι συστοιχίας (bank-level, $N_s=18$, $N_p=1$)

- $V_{sc,max} \approx 18 \cdot 2.7 = 48.6$ V
- $C_{bank} = C_{cell} / N_s = 350 / 18 = 19.44$ F
- $ESR_{bank} = N_s \cdot ESR_{cell}$ (σε 1 παράλληλο string) → τυπικά $\approx 18 \cdot 2.8$ mΩ = 50.4 mΩ
- Leakage (κατά προσέγγιση): το leakage σε σειρά εξαρτάται από την κατανομή τάσης/ισορρόπηση· σε θεωρητικό επίπεδο μπορεί να προσεγγιστεί μέσω ισοδύναμων αντιστάσεων και/ή συνολικού leakage current.

5.3.2 Εξαγωγή παραμέτρων από datasheet και προσέγγιση προσαρμογής (fit) χωρίς πειραματικά δεδομένα

Παρότι δεν υπάρχουν πειραματικές μετρήσεις, είναι χρήσιμο να τεκμηριωθεί η “λογική” εξαγωγής παραμέτρων, γιατί η ίδια διαδικασία θα εφαρμοζόταν αυτούσια όταν υπάρχουν δεδομένα:

1. Χωρητικότητα από καμπύλη φόρτισης/εκφόρτισης σταθερού ρεύματος:

Με σταθερό ρεύμα I , η κλίση τάσης δίνει $C = I / (dV/dt)$, αγνοώντας το στιγμιαίο άλμα λόγω ESR. Η Maxwell περιγράφει μέθοδο μέτρησης χωρητικότητας με charge/discharge συγκεκριμένου ρεύματος (mA/F) και hold στο VR.

2. ESR από στιγμιαίο βήμα τάσης:

Σε αλλαγή ρεύματος (ή στην αρχή discharge), η στιγμιαία πτώση τάσης ΔV σχετίζεται με ESR μέσω $ESR = \Delta V / \Delta I$. Η μέθοδος ESRDC στο datasheet ορίζεται μέσω καθορισμένων ρευμάτων/πρωτοκόλλου.

Επιπλέον, σε πιο γενική τεχνική βιβλιογραφία/πρακτική, η ESR μπορεί να εξαχεται με step-load και μέτρηση της πτώσης τάσης μετά από σύντομη καθυστέρηση (ώστε να “κατασταλάξει” το transient). (Maxwell Technologies, 2023)

3. R_leak (διαρροή) από leakage current:

Αν το datasheet δίνει leakage current μετά από καθορισμένο χρόνο hold (π.χ. 72 ώρες), τότε προσεγγιστικά $R_leak \approx V / I_leak$, με επίγνωση ότι η αυτοεκφόρτιση δεν είναι πλήρως γραμμικό φαινόμενο και επηρεάζεται από θερμοκρασία και κατάσταση γήρανσης.

4. Σύνθετα μοντέλα (multi-branch):

Όταν απαιτείται ακρίβεια σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες (ms έως ώρες), χρησιμοποιούνται μοντέλα πολλαπλών κλάδων RC, με παραμέτρους που ταυτοποιούνται μέσω απλών αλλά συστηματικών διαδικασιών (parameter identification). (Hernández, 2022).

Πίνακας 7: Χαρτογράφηση σημάτων, logged variables και μετρικών αξιολόγησης

| ID | Σήμα / Μέγεθος | Πηγή στο μοντέλο (Simulink/Simscape) | Logged variable (όνομα στο μοντέλο) | Μονάδες | Ρυθμός δειγματοληψίας / Logging | Προεπεξεργασία (εφόσον απαιτείται) | Μετρικές που εξάγονται | Ορισμός / Τρόπος υπολογισμού (σε MATLAB) |
|----|----------------|--|-------------------------------------|---------|---------------------------------|------------------------------------|---|---|
| S1 | Τάση DC ζυγού | Voltage Measurement στο DC link (κόμβος Vdc) | Vdc_ts | V | Continuous + log σε Dataset/SI | Προαιρετικό low-pass για αποθορυ | $\Delta V_{dc,max}$, $\Delta V_{dc,min}$, RMSE(V) | $\Delta V_{dc,max} = \max(V_{dc} - V_{dc,ref})$, $\Delta V_{dc,min} = \min(V_{dc} - V_{dc,ref})$ |

| | | | | | | | | |
|--------|--|--|------------|---|---|---|---|---|
| | | | | | | βοποίηση (αν switching model) | dc), t_settle | ref). RMSE = rmse(Vdc,Vref). t_settle: χρόνος εισόδου και παραμονής σε ±x% ζώνη γύρω από Vref |
| S 2 | Αναφορά τάσης DC ζυγού | Constant/Step block (Vdc,ref) | Vdc_ref_ts | V | Log μαζί με Vdc (ίδια time vector) | Καμία | RMSE(V dc), steady- state error | RMSE(Vdc,Vr ef). e_ss = mean(Vdc(t_e nd-T:t_end)- Vref) |
| S 3 | Ρεύμα υπερπυκν ωτή | Current sensor στο κλάδο UC ή ρεύμα πηνίου (inner loop) | Isc_ts | A | Log σε Dataset | Αφαίρε ση DC offset (αν υπάρχει) , ή absolute peak | Isc,peak(+ /-), I_rms, duty stress index | Isc,peak+ = max(Isc), Isc,peak- = min(Isc). I_rms = sqrt(mean(Isc^ 2)) στο παράθυρο ενδιαφέροντος |
| S 4 | Τάση συστοιχία ς υπερπυκν ωτών | Voltage sensor στα άκρα UC bank | Vsc_ts | V | Log σε Dataset | Καμία | Έλεγχος ορίων (Vsc,min/ max), ΔVsc, E_UC | Έλεγχος: any(Vsc<Vsc, min) ή any(Vsc>Vsc, max). E_UC(t)=0.5C eqVsc(t)^2. ΔE=E(end)-E(start) |
| S 5 | Ισχύς υπερπυκν ωτή στο DC link | Υπολογισμός Psc = Vdc * I_conv_out ή VscIsc (ανά convention) | Psc_ts | W | Log σε Dataset | Συμφων ία πρόσημ ου (+: εκφόρτι ση προς ζυγό) | Peak Psc, ενέργεια που ανταλλάχ θηκε, smoothing index | E_sc_exch = ∫ Psc dt (trapz). Peak = max/min. Smoothing: σύγκριση peak-to-peak με baseline |
| S 6 | Ισχύς ΑΠΕ (PV) | Μέτρηση στην έξοδο DC/DC ΑΠΕ (ή PV terminals) | Ppv_ts | W | Log σε Dataset | Προαιρε τικά μέσος όρος σε παράθυρ ο (για | ΔPpv, συμβάντα (cloud dip) | Εντοπισμός χρονικών παραθύρων (t1-t2) όπου αλλάζει |

| | | | | | | | | |
|-----|--------------------------------|--|--|---------|---------------------------------|--|---|--|
| | | | | | | PWM ripple) | | επίπεδο. $\Delta P = P2 - P1$ |
| S7 | Ισχύς φορτίου | $P_{load} = V_{dc} * I_{load}$ (ή power measurement block) | P_{load_ts} | W | Log σε Dataset | Καμία | Load step magnitude, settling/overshoot | ΔP_{load} = επίπεδο μετά-πριν. Χρήση για tagging γεγονότων |
| S8 | Duty cycle / εντολή μετατροπής | Έξοδος PI current → PWM | duty_ts | p.u. | Log σε Dataset | Καμία | Saturation time, control effort | % χρόνου σε κορεσμό: $mean(duty == duty_max \text{ ή } duty_min)$ |
| S9 | SoC υπερπυκνωτική | Υπολογισμός από V_{sc} (SoC = $(V_{sc}^2 - V_{min}^2) / (V_{max}^2 - V_{min}^2)$) | SoC_ts | 0-1 | Log σε Dataset | Clamping 0-1 (προαιρετικό) | SoC_min/max, SoC drift, availability | SoC_min=min(SoC), SoC_max=max(SoC). Drift = SoC(end) - SoC(start) |
| S10 | Σφάλμα τάσης | $e_v = V_{dc_ref} - V_{dc}$ | ev_ts | V | Log σε Dataset | Καμία | Peak error, IAE/ISE | Peak = max |
| S11 | Σφάλμα ρεύματος | $e_i = I_{ref} - I_{sc}$ | ei_ts | A | Log σε Dataset | Καμία | Current tracking quality | RMS(ei), peak(ei) σε transients |
| S12 | Baseline case (χωρίς UC) | Ίδιο μοντέλο με $P_{sc}=0$ ή UC branch off | $V_{dc_base_ts}$, $P_{grid_base_ts}$ κ.ά. | — | Δεύτερο run SDI/Dataset | Ευθυγράμμιση χρονικής βάσης | Δείκτης βελτιώσεων | Improvement(ΔV_{dc}) = $\Delta V_{dc_base} - \Delta V_{dc_UC}$, αντίστοιχα για P ripple |
| ID | Σήμα / Μέγεθος | Πηγή στο μοντέλο (Simulink/Simscape) | Logged variable (όνομα στο μοντέλο) | Μονάδες | Ρυθμός δειγματοληψίας / Logging | Προεπεξεργασία (εφόσον απαιτείται) | Μετρικές που εξάγονται | Ορισμός / Τρόπος υπολογισμού (σε MATLAB) |
| S1 | Τάση DC ζυγού | Voltage Measurement στο DC link (κόμβος Vdc) | Vdc_ts | V | Continuous + log σε Dataset/SDI | Προαιρετικό low-pass για αποθρομβοποίηση (αν | $\Delta V_{dc,max}$, $\Delta V_{dc,min}$, RMSE(Vdc), t_{settle} | $\Delta V_{dc,max} = \max(V_{dc} - V_{dc_ref})$, $\Delta V_{dc,min} = \min(V_{dc} - V_{dc_ref})$. RMSE = $rmse(V_{dc}, V_{ref})$ |

| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|----------------------|--|--|
| | | | | | | switchin g model) | |). t_settle: χρόνος εισόδου και παραμονής σε $\pm x\%$ ζώνη γύρω από Vref |
|--|--|--|--|--|--|----------------------|--|--|

Ο Πίνακας 7 συνοψίζει τη χαρτογράφηση μεταξύ των σημάτων που μετρώνται στο Simulink/Simscape, των μεταβλητών που καταγράφονται (logged variables) και των μετρικών αξιολόγησης που υπολογίζονται στο MATLAB. Η συγκεκριμένη τυποποίηση ονοματοδοσίας και μεθοδολογίας υπολογισμού επιτρέπει την πλήρη αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων, καθώς κάθε μετρική (π.χ. ΔV_{dc} , t_{settle} , RMSE) προκύπτει από σαφώς ορισμένο σήμα/κανόνα προεπεξεργασίας και καθορισμένο χρονικό παράθυρο αξιολόγησης.

5. 4 Υλοποίηση στο Simulink (μοντέλο και σενάρια)

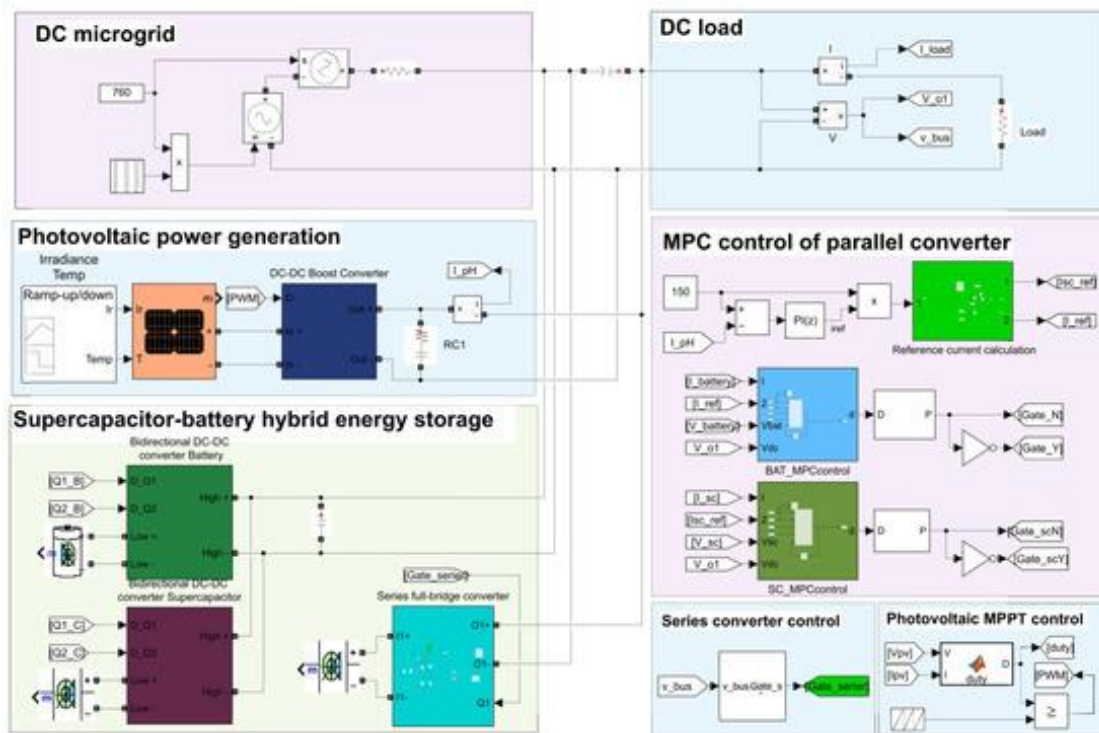
5. 4. 1 Δομή μοντέλου και ροή ισχύος

Το προτεινόμενο μοντέλο ακολουθεί την αλυσίδα:

Πηγή ΑΠΕ (PV Array) → Μετατροπέας ΑΠΕ (π.χ. boost) → DC link (Cdc) → Φορτίο και παράλληλα:

UC bank → Αμφίδρομος DC/DC → DC link

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται ενδεικτικά το top-level διάγραμμα του μοντέλου Simulink, ώστε να αποτυπώνεται άμεσα η συνολική αρχιτεκτονική και η ροή ισχύος.



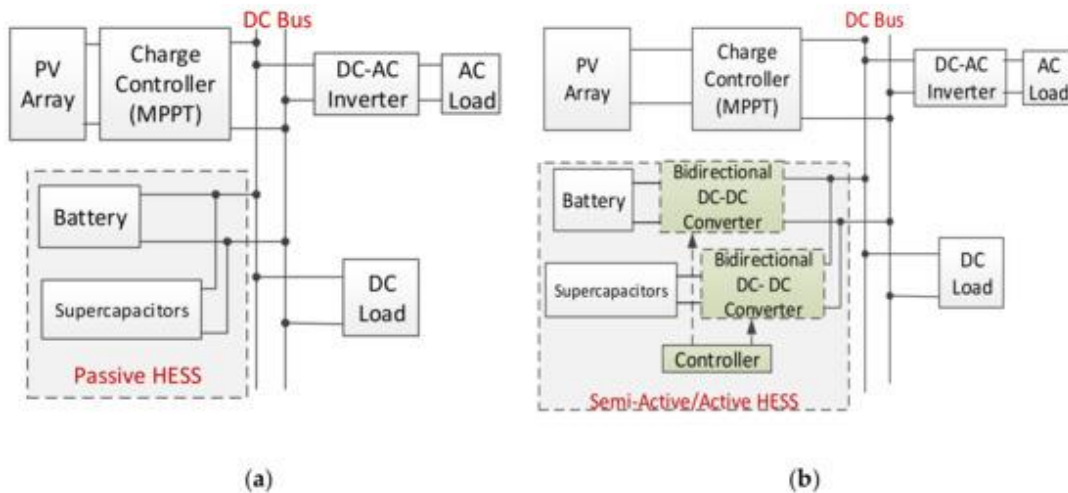
Σχήμα 12: Ενδεικτικό διάγραμμα κύριου μοντέλου Simulink (top-level)

Ενδεικτικό διάγραμμα κύριου μοντέλου Simulink (top-level): PV πηγή, μετατροπέας DC/DC, DC bus (DC link), υβριδική αποθήκευση (μπαταρία–υπερπυκνωτής) με αμφίδρομους μετατροπέες και φορτίο.

Πηγή: προσαρμογή από Wang (2025), Processes 13, 1689, Σχ. 8.

Η οργάνωση σε υποσυστήματα διευκολύνει: (α) τον έλεγχο/παραμετροποίηση, (β) την επαναχρησιμοποίηση σεναρίων, και (γ) την τεκμηρίωση με σαφείς εισόδους/εξόδους. Για τον υπερπυκνωτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε το **Supercapacitor block** (πιο πλούσιο μοντέλο), είτε απλό ECM με $C-ESR-R_{leak}$. (MathWorks, 2026)

Για την καλύτερη κατανόηση της ένταξης του υπερπυκνωτή στο σύστημα, το Σχήμα 14 συνοψίζει τις βασικές τοπολογίες HESS (παθητική έναντι ημι-ενεργής/ενεργής), οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς το πλήθος και τη θέση των αμφίδρομων DC/DC μετατροπέων.



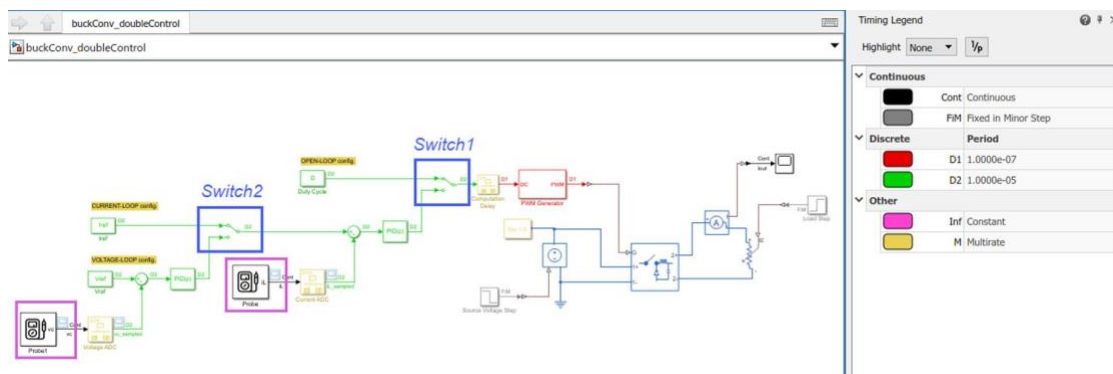
Σχήμα 13: Τυπικές τοπολογίες υβριδικής αποθήκευσης (HES) μπαταρίας–υπερπυκνωτή

Για την PV πλευρά, η χρήση του PV Array block επιτρέπει τη δημιουργία σεναρίων ακτινοβολίας/θερμοκρασίας, άρα και έμμεσων μεταβολών ισχύος προς τον ζυγό. (MathWorks, 2026)

5.4. 2 Υλοποίηση ελεγκτών, ορίων και anti-windup

Η λογική ελέγχου υλοποιείται με:

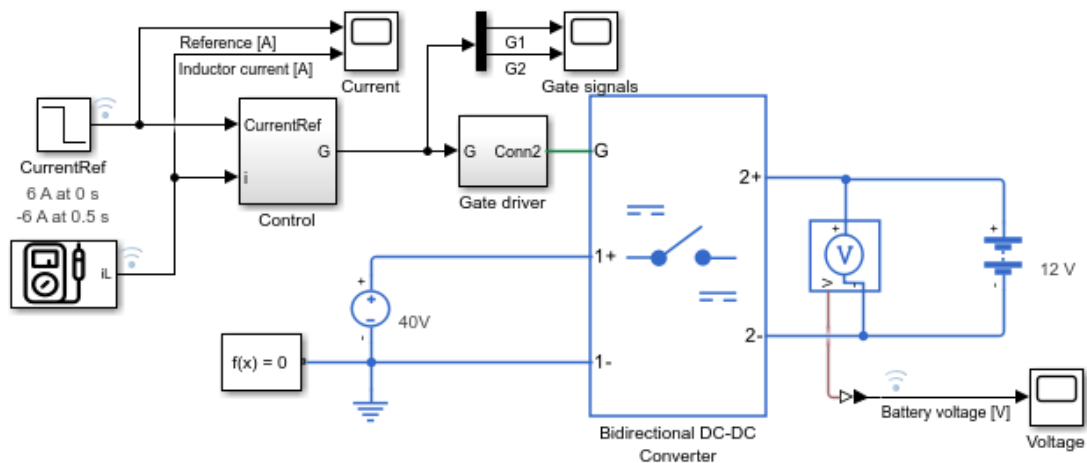
Η υλοποίηση του διπλού βρόχου ελέγχου (outer voltage loop και inner current loop) στο περιβάλλον Simulink, καθώς και τα βασικά σημεία εναλλαγής ρυθμίσεων (Switch1/Switch2) απεικονίζονται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 14: Δομή ελέγχου διπλού βρόχου σε Simulink

- **Outer PI (τάσης):** $e_v = V_{dc,ref} - V_{dc} \rightarrow$ παράγει αναφορά ρεύματος ή ισχύος για τον UC branch.
- **Inner PI (ρεύματος):** $e_i = I_{ref} - I_{sc}$ (ή ρεύμα πηνίου) \rightarrow παράγει duty/PWM εντολή.
- **Κορεσμοί:** $|I_{ref}| \leq I_{max}$, και λογική που περιορίζει φόρτιση/εκφόρτιση όταν V_{sc} πλησιάζει $V_{sc,max}/V_{sc,min}$.
- **Anti-windup:** αποτρέπει “φόρτωμα” ολοκληρωτή σε κορεσμό (π.χ. conditional integration ή back-calculation).

Ως ενδεικτικό παράδειγμα υλοποίησης εσωτερικού βρόχου ρεύματος σε αμφίδρομο DC/DC μετατροπέα (buck/boost λειτουργία), το Σχήμα 5.4 παρουσιάζει την τυπική δομή «Control \rightarrow Gate driver \rightarrow Converter», με μέτρηση ρεύματος πηνίου και τάσης στην πλευρά αποθήκευσης.



Bidirectional DC-DC Converter Current Control

1. Plot current in inductor (see code)
2. Gate control signals
 - i) Modulation waveform ii) Subcycle averaging iii) PWM
3. Modify model parameters
4. Learn more about this example

Copyright 2021-2023 The MathWorks, Inc.

Σχήμα 15: Αμφίδρομος DC/DC μετατροπέας με έλεγχο ρεύματος πηνίου

Σε επίπεδο Simulink υλοποίησης, οι PI μπορούν να υλοποιηθούν είτε με blocks (PID Controller) είτε με MATLAB Function block για πλήρη έλεγχο των anti-windup/limits. (MathWorks, 2026)

Σημειώνεται ότι οι τιμές παραμέτρων των PI (K_p , K_i), τα όρια κορεσμού (I_{max} , $V_{sc,min/max}$), καθώς και η ακριβής υλοποίηση του anti-windup ανά ελεγκτή τεκμηριώνονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α, ώστε το κυρίως κείμενο να παραμένει συνοπτικό χωρίς απώλεια τεχνικής πληρότητας.

5. 4. 3 Σενάρια δοκιμών (test cases)

Τα test cases στοχεύουν να “διεγείρουν” το σύστημα σε καταστάσεις που χαρακτηρίζουν ΑΠΕ:

1. **Βήμα φορτίου (load step):** από $P_{load,1}$ σε $P_{load,2}$ σε γνωστό χρόνο, για έλεγχο $t_{settle}(V_{dc})$ και $I_{sc,peak}$.
2. **Μεταβολή PV (“συννεφιά”):** απότομη πτώση/άνοδος της διαθέσιμης ισχύος PV, ώστε να αξιολογηθεί το smoothing μέσω P_{sc} .
3. **Επαναλαμβανόμενοι κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης:** για έλεγχο της δυναμικής V_{sc} , SoC και της λειτουργίας ορίων ($V_{sc,min/max}$).
4. περίπτωση αναφοράς (baseline) σύγκριση: ίδια σενάρια με UC branch απενεργοποιημένο ή με $P_{sc}=0$, ώστε να μετρηθεί ποσοτικά το όφελος.

5. 5 Αυτοματοποίηση με MATLAB: εκτέλεση, logging και εξαγωγή αποτελεσμάτων

5. 5. 1 Στόχος αυτοματοποίησης και αρχιτεκτονική αρχείων

Η αυτοματοποίηση με MATLAB scripts εξυπηρετεί τρεις σκοπούς:

- **Επαναληψιμότητα:** το ίδιο μοντέλο τρέχει με συγκεκριμένες παραμέτρους και σενάρια χωρίς χειροκίνητη παρέμβαση.
- **Παραμετρική διερεύνηση:** π.χ. αλλαγή C_bank, ESR, I_{max}, PI gains, και καταγραφή επίδρασης σε μετρικές.
- **Παραγωγή υλικού για την εργασία:** αυτόματη παραγωγή γραφημάτων (PNG/PDF) και πινάκων (Excel/CSV) για εισαγωγή στο Word.

Η σύσταση είναι η χρήση ενός κεντρικού “driver script” (π.χ. run_all_cases.m) και επιμέρους αρχείων παραμέτρων (π.χ. params_uc.m, params_control.m) ώστε να διαχωρίζεται η λογική από τα δεδομένα.

5. 2. 2 Εκτέλεση προσομοιώσεων με sim() και SimulationInput/Output

Το MATLAB παρέχει την sim για προγραμματική εκτέλεση προσομοιώσεων Simulink, συμπεριλαμβανομένης της δυνατότητας να περαστούν παράμετροι μέσω αντικειμένων Simulink.SimulationInput. (MathWorks, 2026). Τα αποτελέσματα επιστρέφονται ως Simulink.SimulationOutput, το οποίο επιτρέπει οργανωμένη πρόσβαση σε logged σήματα και datasets. (MathWorks, 2026)

Ενδεικτική ροή:

1. Δημιουργία SimulationInput για κάθε test case.
2. Θέσπιση μεταβλητών (π.χ. C, ESR, gains, σενάριο ακτινοβολίας/φορτίου).
3. Εκτέλεση sim(simin) και συλλογή simout.
4. Ανάκτηση σημάτων (V_{dc}, V_{sc}, I_{sc}, P_{rn}, P_{load}, P_{sc}, SoC) από logs/datasets.

5.5. 3 Logging και εξαγωγή δεδομένων (Simulink Data Inspector)

Για οργάνωση σημάτων, είναι πρακτική η χρήση Simulation Data Inspector (SDI) ή dataset logging, ώστε να παράγονται runs και να γίνεται εξαγωγή σε timeseries ή Simulink.SimulationData.Dataset. Η MathWorks τεκμηριώνει προγραμματική εξαγωγή σημάτων από SDI σε timeseries. (MathWorks, 2026) Αυτό επιτρέπει στη συνέχεια επεξεργασία: φιλτράρισμα, υπολογισμό μετρικών, εξαγωγή πινάκων.

5. 5. 4 Παραγωγή γραφημάτων και εξαγωγή σε εικόνες

Για παραγωγή εικόνων που εισάγονται απευθείας σε Word, συνιστάται η χρήση της συνάρτησης exportgraphics, ώστε να ελέγχεται η ανάλυση και τα περιθώρια του σχήματος. Ενδεικτικά: exportgraphics(gcf, filename, 'Resolution', 300). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σταθερή ποιότητα και ομοιομορφία σε όλα τα εξαγόμενα διαγράμματα. (MathWorks, 2026)

5. 5. 5 Εξαγωγή πινάκων μετρικών σε Excel/CSV

Οι υπολογισμένες μετρικές (ΔV_{dc}, t_{settle}, I_{sc}.peak κ.λπ.) οργανώνονται σε table και εξάγονται με writetable προς Excel ή CSV. Αντίστοιχα, για χρονοσειρές σε timetable μπορεί να χρησιμοποιηθεί writetimetable. (MathWorks, 2026)

5. 6 Υπολογισμός RMSE/MAE σε θεωρητικό πλαίσιο

Παρότι δεν υπάρχει πειραματική αναφορά, ο RMSE μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης “ποιότητας ρύθμισης” έναντι $V_{dc,ref}$ ή έναντι περίπτωση αναφοράς (baseline) χωρίς UC. Στο MATLAB η `rmse` δίνεται ως επίσημη συνάρτηση (R2022b και μετά). ([mathworks.com](https://www.mathworks.com)) Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί `MSE (immse)` ή “χειροκίνητοι” υπολογισμοί σε `vectors/timeseries`. (MathWorks, 2026)

Πίνακας 8: Χρονικά παράθυρα αξιολόγησης ανά σενάριο

| Σενάριο / Γεγονός | Περιγραφή μεταβολής | Χρόνος γεγονότος (t event) | Παράθυρο “ πριν” (baseline) | Παράθυρο μετάνάτας | Παράθυρο “μετά” (αποκ ατάσταση) | Μετρικές που υπολογίζονται (ενδεικτικά) | Σημειώσεις υπολογισμού |
|-------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|---|---|
| TC1 | Cloud dip (πτώση ισχύος PV) | 5 s | 4.0–5.0 s | 5.0 – 7.0 s | 7.0–9.0 s | $\Delta V_{dc,min}$, $I_{sc,peak}(+)$, ΔE_{UC} , $RMSE(V_{dc})$ στο 5–9 s, smoothing index | Baseline επίπεδο P_{pv} από 4–5 s. t_{settle} με έναρξη στο 5 s και έλεγχο εντός ζώνης στο 7–9 s |
| TC2 | Load step (αύξηση φορτίου) | 12 s | 11.0–12.0 s | 12.0–15.0 s | 15.0–17.0 s | $\Delta V_{dc,min}$, $t_{settle}(V_{dc})$, $I_{sc,peak}(+)$, I_{rms} , $RMSE(V_{dc})$ στο 12–17 s | Baseline P_{load} από 11–12 s. t_{settle} : πρώτη είσοδος και παραμονή εντός $\pm x\%$ στο 15–17 s |
| TC3 | PV spike (πλεόνασμα PV) | 15 s | 14.0–15.0 s | 15.0–16.0 s | 16.0–18.0 s | $\Delta V_{dc,max}$, $I_{sc,peak}(-)$, ΔE_{UC} , $RMSE(V_{dc})$ στο 15–18 s, saturation time (duty) | Σημαντικό το πρόσημο: φόρτιση UC $\rightarrow P_{sc}<0, I_{sc}<0$. t_{settle} με έναρξη στο 15 s |
| TC4 | Συνδυαστικό σενάριο (ολόκληρη δοκιμή) | — | 0–1 s (warm-up) | 0–20 s | — | $RMSE_{total}(V_{dc})$ στο 1–20 s, $SoC_{min/max}$, συνολική ανταλλαγή ενέργειας $\int P_{sc} dt, max$ | I_{sc} |
| TC5 (baseline) | Χωρίς υπερπικνωτή / $P_{sc}=0$ | ίδιο με TC1–TC4 | ίδιο | ίδιο | ίδιο | ΔV_{dc_base} , $RMSE_{base}$, P_{ripple_base} | Εκτελείται ως δεύτερο run με ίδια σενάρια, για να υπολογιστεί βελτίωση: $\Delta(\Delta V_{dc}) = \Delta V_{dc_base} - \Delta V_{dc_UC}$ κ.λπ. |

Ορισμοί και συμβάσεις αξιολόγησης

- **Παράθυρο αναφοράς (pre-event):** χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η ονομαστική λειτουργία πριν από το γεγονός (π.χ. P_{rn} ή P_{load}) και να οριστεί η κατάσταση αναφοράς.
- **Παράθυρο γεγονότος (event window):** η χρονική περιοχή όπου επιβάλλεται η μεταβολή (πτώση PV, αύξηση φορτίου, ή αιχμή).
- **Παράθυρο αποκατάστασης (post-event):** χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό χρόνου αποκατάστασης και σφάλματος, καθώς και για τον έλεγχο ότι το σύστημα επιστρέφει εντός της επιλεγμένης ζώνης γύρω από V_{dc,ref}.

Ορισμός του χρόνου αποκατάστασης t_{settle}

- **Ζώνη αποκατάστασης:** Στην παρούσα εργασία υιοθετείται ζώνη ±2% γύρω από V_{dc,ref} ως κύριο κριτήριο, ενώ η ζώνη ±5% χρησιμοποιείται επικουρικά για ευαισθησιακή αξιολόγηση. Η ίδια σύμβαση εφαρμόζεται σε όλα τα σενάρια.
- **Έναρξη μέτρησης: t_{event}** (π.χ. 5 s, 12 s, 15 s).
- **Συνθήκη:** πρώτη χρονική στιγμή που $|V_{dc} - V_{dc,ref}| \leq x\% \cdot V_{dc,ref}$ και παραμένει εντός ζώνης μέχρι το τέλος του “μετά” παραθύρου.

5. 7 Προτεινόμενη πειραματική επικύρωση (μελλοντική εργασία)

Στην αρχική μορφή των προτεινόμενων περιεχομένων, η §5.6 προβλέπει επικύρωση με πραγματικά δεδομένα. Στην παρούσα εργασία, όμως, **δεν υφίστανται πειραματικές μετρήσεις**, συνεπώς η ενότητα διατυπώνεται ως **προτεινόμενο πλαίσιο** για μελλοντική επέκταση, ενώ στο παρόν στάδιο εφαρμόζονται **έλεγχοι θεωρητικής συνέπειας**.

5. 7. 1 Διαδικασία επικύρωσης σε περίπτωση ύπαρξης μετρήσεων

Σε μία μελλοντική εργαστηριακή υλοποίηση, η επικύρωση θα ακολουθούσε τα βήματα:

1. **Ευθυγράμμιση χρονικών σειρών:** συγχρονισμός μετρήσεων και προσομοίωσης ως προς κοινά γεγονότα (load step, cloud dip).
2. Προεπεξεργασία/φιλτράρισμα: χαμηλοπερατό φιλτράρισμα θορύβου, downsampling και απομάκρυνση αιχμές.
3. **Υπολογισμός δεικτών σφάλματος:** RMSE, MAE και μέγιστο απόλυτο σφάλμα για V_{dc}(t), I_{sc}(t), V_{sc}(t).
4. **Ανάλυση αποκλίσεων:** διερεύνηση αν οι αποκλίσεις οφείλονται σε μη γραμμικότητες (C(V), ESR(T)), ESL, θερμικά φαινόμενα ή μη ιδανικότητες μετατροπέα.

5.7. 2 Τι εφαρμόζεται στο παρόν στάδιο (χωρίς πειραματικά δεδομένα)

Αντί πειραματικής επικύρωσης, εφαρμόζονται:

- **Sanity checks φυσικής συνέπειας:**

(α) η μεταβολή ενέργειας στον υπερπυκνωτή συμβαδίζει με ολοκλήρωση ισχύος P_{sc}(t),

(β) η V_{sc} παραμένει εντός $V_{sc,min}/V_{sc,max}$,

(γ) τα ρεύματα δεν υπερβαίνουν I_{max} .

- **Σύγκριση με θεωρητικά αναμενόμενες σχέσεις:**

Για σταθερό ρεύμα, η κλίση dV/dt συμβαδίζει με I/C . για αιχμές ρεύματος, η στιγμιαία ΔV συμφωνεί τάξης μεγέθους με $I_{sc} \cdot ESR$.

- **Σύγκριση με datasheet μεθοδολογίες:**

Επιβεβαίωση ότι η παραμετροποίηση (C , ESR , leakage) εισάγεται με τρόπο που συνάδει με τις μεθόδους μέτρησης/ορισμού του datasheet (π.χ. ESRDC/Leakage μετά από hold).

Με τον τρόπο αυτό, το μοντέλο θεωρείται “εσωτερικά συνεπές” και κατάλληλο για συγκριτική αξιολόγηση στρατηγικών ελέγχου, χωρίς να ισχυρίζεται πειραματική πιστοποίηση.

5. 8 Περιορισμοί και προτάσεις βελτίωσης μοντέλου

Το θεωρητικό μοντέλο, ακόμη και αν είναι προσεγμένο, έχει αναπόφευκτους περιορισμούς:

1. **Θερμικά φαινόμενα:** ESR και leakage μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, επηρεάζοντας απώλειες και δυναμική. (Σε προηγμένη εργασία, ενσωματώνεται θερμικό υπομοντέλο.)
2. **Μη γραμμικότητες υπερπυκνωτή:** η χωρητικότητα μπορεί να εξαρτάται από την τάση και να εμφανίζονται διαφοροποιήσεις σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, κάτι που αποτυπώνεται καλύτερα σε multi-branch ή μοντέλα μεταβλητής χωρητικότητας. (MathWorks, 2026)
3. **ESL και πολύ γρήγορα transients:** η επαγωγική συνιστώσα (ESL) επηρεάζει υψηλές συχνότητες και PWM ripple, άρα ένα “καθαρά average” μοντέλο μπορεί να την αγνοεί.
4. **Μοντελοποίηση balancing:** η εξισορρόπηση (παθητική/ενεργή) σε σειρά στοιχείων επηρεάζει leakage και κατανομή τάσης, και μπορεί να απαιτεί επιπλέον block/λογική.
5. **Γήρανση (aging):** στο τέλος ζωής αυξάνεται ESR και μειώνεται διαθέσιμη χωρητικότητα, κάτι που θα μπορούσε να εισαχθεί ως “σενάριο” EOL για έλεγχο robustness.

Ως μελλοντικές βελτιώσεις προτείνονται:

- ενσωμάτωση multi-branch ECM με διαδικασία ταυτοποίησης παραμέτρων,
- μετάβαση σε switching μοντέλο (PWM) για έλεγχο επιδράσεων μεταγωγής,
- προσθήκη θερμικού υπομοντέλου για ESR(T),
- και, όταν είναι διαθέσιμα δεδομένα, πειραματική επικύρωση με RMSE/MAE.

Κεφάλαιο 6: Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών Αποθήκευσης Ενέργειας

Στο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κριτήρια σύγκρισης, αναλύονται οι βασικές τεχνολογίες αποθήκευσης και καταλήγουμε σε συνοπτική ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση. Η αξιολόγηση υποστηρίζεται από πίνακα σύγκρισης βασικών παραμέτρων και από διάγραμμα ραντάρ που συμπυκνώνει τα κύρια trade-offs.

6.1 Εισαγωγή και ρόλος της αποθήκευσης στα συστήματα ΑΠΕ

Η αποθήκευση ενέργειας είναι κρίσιμο μέσο για την αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική λειτουργία συστημάτων με υψηλή διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η παραγωγή από φωτοβολταϊκά και αιολικά είναι μεταβλητή και δεν συμπίπτει πάντα με το προφίλ ζήτησης. Η διαφορά παραγωγής και κατανάλωσης εμφανίζεται σε χρονικές κλίμακες από δευτερόλεπτα έως ώρες και ημέρες. Χωρίς αποθήκευση, η εξισορρόπηση επιτυγχάνεται με εφεδρείες, περικοπές παραγωγής, ενισχύσεις δικτύου ή αυξημένη λειτουργία ευέλικτων μονάδων. Οι λύσεις αυτές έχουν κόστος, περιορισμούς εκπομπών και, συχνά, μειώνουν τη δυνατότητα αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ.

Η αποθήκευση δεν παρέχει μία μόνο λειτουργία, αλλά ένα σύνολο υπηρεσιών προς το σύστημα. Σε επίπεδο δικτύου, μπορεί να προσφέρει ρύθμιση συχνότητας, επικουρικές υπηρεσίες ισχύος, κάλυψη αιχμών και μετατόπιση ενέργειας (energy shifting). Σε επίπεδο μετατροπέων και τοπικών ζυγών, μπορεί να μειώσει την κυμάτωση, να περιορίσει τις αιχμές ρεύματος και να βελτιώσει την ποιότητα ισχύος. Ο καθορισμός της εφαρμογής γίνεται ουσιαστικά με τρία μεγέθη: την ισχύ, την απαιτούμενη ενέργεια και τον χρόνο απόκρισης. Η ίδια τεχνολογία μπορεί να είναι άριστη στην παροχή ισχύος ταχείας απόκρισης αλλά ανεπαρκής στην αποθήκευση ενέργειας πολλών ωρών.

Στην παρούσα εργασία οι υπερπυκνωτές αντιμετωπίζονται ως αποθηκευτές προσανατολισμένοι στην ισχύ. Συνδέονται σε ζυγό συνεχούς τάσης μέσω αμφίδρομου μετατροπέα DC/DC και δομής ελέγχου διπλού βρόχου, με εξωτερικό βρόχο τάσης και εσωτερικό βρόχο ρεύματος. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει να απορροφώνται γρήγορες αιχμές και να σταθεροποιείται η τάση του DC-link, χωρίς να επιβαρύνεται η κύρια ενεργειακή αποθήκη. Με τον τρόπο αυτό, μειώνονται οι καταπονήσεις σε μπαταρίες και ηλεκτρονικά ισχύος, βελτιώνεται η δυναμική απόκριση και περιορίζονται οι απαιτήσεις υπερδιαστασιολόγησης.

Το υπόλοιπο κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής: αρχικά παρουσιάζονται οι χρονικές κλίμακες εφαρμογών και η έννοια του προσανατολισμού σε ισχύ ή ενέργεια. Στη συνέχεια ορίζονται τα κριτήρια σύγκρισης και ακολουθεί αναλυτική σύγκριση υπερπυκνωτών με μπαταρίες και με αντλησιοταμίευση. Τέλος, συμπεριλαμβάνονται συνοπτικά άλλες τεχνολογίες όπως συσσωρευτές ροής (flow batteries), σφόνδυλοι, CAES και υπεραγωγία μαγνητικά συστήματα (SMES), ώστε να αποδοθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα του διαθέσιμου τεχνολογικού φάσματος.

6.2 Χρονικές κλίμακες εφαρμογών και οπτική ισχύος-ενέργειας

Η καταλληλότητα μιας τεχνολογίας αποθήκευσης προκύπτει από την αντιστοίχιση της εφαρμογής στη χρονική κλίμακα και στο προφίλ ισχύος και ενέργειας. Ένας πρακτικός δείκτης είναι η διάρκεια εκφόρτισης, δηλαδή ο λόγος E/P. Όταν ο λόγος E/P αντιστοιχεί σε δευτερόλεπτα ή λίγα λεπτά, το πρόβλημα είναι προσανατολισμένο στην ισχύ και απαιτεί υψηλή δυναμική απόκριση. Όταν ο λόγος E/P αντιστοιχεί σε ώρες, το πρόβλημα είναι προσανατολισμένο στην ενέργεια και απαιτεί μεγάλη αποθηκευμένη χωρητικότητα με χαμηλό κόστος ανά kWh.

Σε κλίμακες χιλιοστών του δευτερολέπτου έως δευτερολέπτων, κυρίαρχα ζητήματα είναι η ευστάθεια των μετατροπέων, η ποιότητα ισχύος και η διατήρηση της τάσης ή της συχνότητας εντός στενών ορίων. Σε κλίμακες δευτερολέπτων έως λεπτών, ζητείται συνήθως ρύθμιση συχνότητας, περιορισμός ρυθμού μεταβολής ισχύος και απορρόφηση στοχαστικής μεταβλητότητας. Σε κλίμακες λεπτών έως ωρών, εμφανίζεται η ανάγκη για peak shaving, μετατόπιση ενέργειας και μείωση περικοπών ΑΠΕ. Σε κλίμακες πολλών ωρών έως ημερών, η αποθήκευση επηρεάζει πλέον την επάρκεια ισχύος και την οικονομία λειτουργίας, και συνδέεται με long-duration στρατηγικές.

Η κλασική απεικόνιση Ragone (ενεργειακή πυκνότητα έναντι πυκνότητας ισχύος) βοηθά να γίνουν κατανοητά τα εγγενή όρια των τεχνολογιών. Οι υπερπυκνωτές εμφανίζουν εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος, αλλά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, άρα είναι κατάλληλοι για ταχεία ανταλλαγή ισχύος. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου εμφανίζουν υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και επαρκή ισχύ για πολλές εφαρμογές, άρα καλύπτουν ένα ενδιάμεσο φάσμα από λεπτά έως ώρες. Τεχνολογίες μεγάλης κλίμακας όπως η αντλησιοταμίευση και η CAES δεν αξιολογούνται με τον ίδιο τρόπο ως προς την πυκνότητα, επειδή η κλίμακά τους καθορίζεται από υποδομές και γεωγραφικούς πόρους.

Η βασική συνέπεια για τη σχεδίαση συστημάτων ΑΠΕ είναι ότι η «μία τεχνολογία» σπάνια βελτιστοποιεί όλες τις απαιτήσεις. Για αυτό, αναπτύσσονται υβριδικές αρχιτεκτονικές, όπου μια τεχνολογία καλύπτει τις γρήγορες μεταβολές ισχύος και μια άλλη καλύπτει τη μετατόπιση ενέργειας. Στην παρούσα εργασία, οι υπερπυκνωτές καλύπτουν τη γρήγορη δυναμική στον DC ζυγό, ενώ μια μπαταρία ή άλλη λύση μπορεί να καλύπτει την ενεργειακή ισορροπία σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα.

6.3 Κριτήρια σύγκρισης και μεθοδολογική προσέγγιση

Η σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης απαιτεί σαφή κριτήρια, επειδή οι επιδόσεις και τα κόστη εξαρτώνται από το σημείο εφαρμογής, την κλίμακα έργου, τις συνθήκες λειτουργίας και την ωριμότητα της αγοράς. Για τις ανάγκες του κεφαλαίου υιοθετείται ένα σύνολο κριτηρίων που καλύπτει τεχνική επίδοση, οικονομική διάσταση, απαιτήσεις λειτουργίας και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Η επιλογή αντανάκλα τις πρακτικές διαστάσεις ενός έργου αποθήκευσης: τι μπορεί να κάνει τεχνικά, πόσο κοστίζει, πόσο αξιόπιστα λειτουργεί και ποιο είναι το συνολικό αποτύπωμα σε κύκλο ζωής.

Πίνακας 9: Κριτήρια σύγκρισης τεχνολογιών αποθήκευσης (ορισμοί και σημασία).

| Κριτήριο | Τι μετρά | Γιατί είναι κρίσιμο σε ΑΠΕ |
|---------------------------------------|--|--|
| Ενεργειακή πυκνότητα / Διάρκεια (E/P) | Πόση ενέργεια αποθηκεύεται και για πόσο χρόνο μπορεί να αποδοθεί σε συγκεκριμένη ισχύ. | Καθορίζει αν η τεχνολογία καλύπτει λεπτά, ώρες ή long-duration εφαρμογές. |
| Πυκνότητα ισχύος / Χρόνος απόκρισης | Πόσο γρήγορα και με τι μέγεθος ισχύος μπορεί να ανταλλάξει ενέργεια. | Κρίσιμο για εξομάλυνση μεταβλητότητας, ρύθμιση συχνότητας και σταθεροποίηση DC-link. |
| Απόδοση κύκλου (RTE) | Λόγος ενέργειας εκφόρτισης προς ενέργεια φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη απώλειες. | Επηρεάζει απώλειες, θερμική καταπόνηση και οικονομία λειτουργίας. |
| Κύκλοι ζωής / Ημερολογιακή ζωή | Ανθεκτικότητα σε κύκλωση και διάρκεια ζωής σε χρόνια. | Καθορίζει αντικαταστάσεις, διαθεσιμότητα και κόστος κύκλου ζωής. |
| Κόστος ανά kW και ανά kWh | Κεφαλαιουχικό κόστος για ισχύ και για ενέργεια. | Ξεχωρίζει οικονομικά τις τεχνολογίες ισχύος από τις τεχνολογίες ενέργειας. |

| | | | |
|-----------------------------|--|---------------------------------|--|
| Αυτοεκφόρτιση | Ρυθμός αποθηκευμένης χωρίς χρήση. | απώλειας ενέργειας | Επηρεάζει λύσεις που πρέπει να κρατούν ενέργεια για μεγάλο χρόνο. |
| Συντήρηση / Πολυπλοκότητα | Απαιτήσεις συστημάτων κρυογενική υδραυλικά). | βοηθητικών (BMS, ψύξη, υποδομή, | Συνδέεται με OPEX, διαθεσιμότητα και ρίσκο υλοποίησης. |
| Ασφάλεια και περιβάλλον | Κίνδυνοι λειτουργίας, ανακυκλωσιμότητα, αποτύπωμα παραγωγής. | υλικά, | Κρίσιμο για αδειοδοτήσεις, κοινωνική αποδοχή και βιωσιμότητα. |
| Ωριμότητα τεχνολογίας (TRL) | Βαθμός εμπορικής και τεχνικής ωριμότητας, προμηθευτές και εγγυήσεις. | | Μειώνει αβεβαιότητα έργου και αυξάνει τραπεζική χρηματοδοτησιμότητα. |

Για τη συνοπτική ποσοτικοποίηση των συγκρίσεων εφαρμόζεται ενδεικτική βαθμολόγηση 1 έως 5 σε έξι βασικούς άξονες. Οι άξονες είναι: διάρκεια/ενέργεια, χρόνος απόκρισης, ικανότητα ισχύος, απόδοση κύκλου, ανθεκτικότητα σε κύκλους και σχετικό κόστος για την αντίστοιχη υπηρεσία. Η βαθμολόγηση δεν αντικαθιστά πλήρη πολυκριτηριακή ανάλυση (όπως AHP ή TOPSIS), αλλά λειτουργεί ως εργαλείο σύνθεσης που διευκολύνει τη συζήτηση των trade-offs. Σε πραγματική μελέτη, τα βάρη των κριτηρίων καθορίζονται από τον στόχο του έργου και από την αξία των υπηρεσιών που αποζημιώνονται στην αγορά.

6.4 Υπερπυκνωτές: αρχές λειτουργίας και τεχνικές ιδιαιτερότητες

Οι υπερπυκνωτές (supercapacitors ή ultracapacitors) γεφυρώνουν το κενό μεταξύ συμβατικών πυκνωτών και μπαταριών. Η κυρίαρχη κατηγορία για εφαρμογές ισχύος είναι οι πυκνωτές ηλεκτρικού διπλού στρώματος (EDLC), όπου η αποθήκευση γίνεται κυρίως ηλεκτροστατικά στην επιφάνεια πορωδών ηλεκτροδίων. Υπάρχουν επίσης ψευδο-χωρητικοί και υβριδικοί υπερπυκνωτές, στους οποίους συμμετέχουν ταχείς ηλεκτροχημικές διεργασίες, με στόχο αύξηση της ειδικής ενέργειας, συνήθως με συμβιβασμούς στη διάρκεια ζωής ή στη μέγιστη ισχύ.

Η αποθηκευμένη ενέργεια ενός ιδανικού υπερπυκνωτή δίνεται από τη σχέση $E = 1/2 \cdot C \cdot (V_{max}^2 - V_{min}^2)$. Η σχέση δείχνει ότι η τάση μειώνεται σημαντικά κατά την εκφόρτιση, σε αντίθεση με τις μπαταρίες όπου η τάση είναι πιο «επίπεδη» σε μεγάλο μέρος του εύρους SOC. Για αυτό, σε συστήματα με σχεδόν σταθερή τάση ζυγού συνεχούς, η αξιοποίηση υπερπυκνωτών απαιτεί αμφίδρομο μετατροπέα DC/DC που προσαρμόζει την τάση του στοιχείου αποθήκευσης ώστε να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ στον ζυγό. Η απαίτηση αυτή συνδέεται άμεσα με την αρχιτεκτονική που προσομοιώνεται στο Simulink και με τη δομή ελέγχου διπλού βρόχου.

Στην ηλεκτρική ισοδύναμη αναπαράσταση, ο υπερπυκνωτής περιγράφεται με χωρητικότητα C και με ισοδύναμη σειριακή αντίσταση (ESR). Η ESR επηρεάζει τις στιγμιαίες απώλειες μέσω του όρου $P = I^2 \cdot ESR$ και καθορίζει τη θερμική συμπεριφορά σε υψηλά ρεύματα. Η χαμηλή ESR είναι το βασικό πλεονέκτημα των υπερπυκνωτών, επειδή επιτρέπει πολύ υψηλά ρεύματα χωρίς μεγάλες πτώσεις τάσης και χωρίς έντονη υποβάθμιση. Συχνά, προστίθεται και ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση για να αποδοθεί η αυτοεκφόρτιση και οι διαρροές.

Σε επίπεδο διαστασιολόγησης, οι υπερπυκνωτές επιλέγονται με βάση την απαιτούμενη ισχύ και το αποδεκτό εύρος τάσης. Επειδή η ενέργεια εξαρτάται από το τετράγωνο της τάσης, η επιλογή V_{max} και

Vmin επηρεάζει έντονα την ωφέλιμη εκμεταλλεύσιμη ενέργεια. Συνήθως, χρησιμοποιούνται συστοιχίες σε σειρά για επίτευξη υψηλότερης τάσης, κάτι που εισάγει ανάγκη για εξισορρόπηση τάσεων (voltage balancing) ώστε να μην υπερφορτίζονται επιμέρους στοιχεία. Η εξισορρόπηση μπορεί να γίνει παθητικά (με αντιστάσεις) ή ενεργά (με κυκλώματα μεταφοράς ενέργειας), με διαφορετικές συνέπειες σε απώλειες και κόστος.

Στο επιχειρησιακό επίπεδο, οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν πολύ υψηλή ανθεκτικότητα σε κύκλους, ιδίως σε μικροκύκλους υψηλής συχνότητας. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπου ζητείται συνεχής απορρόφηση και απόδοση ισχύος με μικρό βάθος ενέργειας, όπως ο έλεγχος κυμάτωσης σε ΑΠΕ ή η απόσβεση αιχμών στον DC ζυγό. Το κύριο μειονέκτημα είναι η υψηλότερη αυτοεκφόρτιση σε σχέση με τις μπαταρίες και η χαμηλή ειδική ενέργεια, που οδηγεί σε υψηλό κόστος ανά kWh. Συνεπώς, οι υπερπυκνωτές είναι τεχνικά και οικονομικά ελκυστικοί όταν το ζητούμενο είναι η ισχύς και όχι η μακρά διάρκεια αποθήκευσης.

6.5 Υπερπυκνωτές έναντι μπαταριών ιόντων λιθίου (Li-ion): τεχνικοοικονομική σύγκριση

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν την κυρίαρχη τεχνολογία ηλεκτροχημικής αποθήκευσης για εφαρμογές από οικιακά συστήματα έως μεγάλης κλίμακας BESS. Ο συνδυασμός υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, ώριμης εφοδιαστικής αλυσίδας και συνεχούς μείωσης κόστους έχει οδηγήσει σε ευρεία εγκατάσταση. Αντίθετα, οι υπερπυκνωτές τοποθετούνται στην κατηγορία της ισχύος, παρέχοντας γρήγορη ανταλλαγή ενέργειας με μικρό ενεργειακό περιεχόμενο.

Από πλευράς ενεργειακής χωρητικότητας, οι Li-ion επιτρέπουν αποθήκευση από δεκάδες λεπτά έως ώρες με πρακτικά μεγέθη συστήματος. Οι υπερπυκνωτές, λόγω χαμηλής ειδικής ενέργειας, είναι κατάλληλοι κυρίως για δευτερόλεπτα έως λίγα λεπτά. Η διαφορά αυτή αντικατοπτρίζεται στο κόστος ανά kWh, όπου οι υπερπυκνωτές είναι συνήθως μη ανταγωνιστικοί για εφαρμογές μεγάλης διάρκειας. Αντίθετα, σε κόστος ανά kW και σε υπηρεσίες που αμείβουν γρήγορη ισχύ, οι υπερπυκνωτές μπορούν να είναι ανταγωνιστικοί.

Στον χρόνο απόκρισης και στην ικανότητα παροχής ισχύος, οι υπερπυκνωτές υπερέρχονται λόγω χαμηλής ESR και δυνατότητας πολύ υψηλών ρευμάτων. Οι Li-ion μπορούν επίσης να ανταποκριθούν γρήγορα μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, αλλά η συχνή λειτουργία σε υψηλό C-rate αυξάνει τη θερμική καταπόνηση και επιταχύνει μηχανισμούς γήρανσης. Σε συστήματα όπου εμφανίζονται συνεχείς αιχμές ή κυμάτωση υψηλής συχνότητας, η απευθείας ανάθεση της λειτουργίας αυτής σε μπαταρία οδηγεί συχνά σε ταχύτερη υποβάθμιση ή σε ανάγκη υπερδιαστασιολόγησης.

Η διάρκεια ζωής των Li-ion εξαρτάται τόσο από το πλήθος και το βάθος κύκλων (cycle aging) όσο και από τον χρόνο και τη θερμοκρασία (calendar aging). Παράγοντες όπως η λειτουργία σε υψηλό SOC, οι υψηλές θερμοκρασίες και τα μεγάλα ρεύματα φόρτισης μπορούν να μειώσουν την ωφέλιμη ζωή. Οι υπερπυκνωτές έχουν, κατά κανόνα, πολύ μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε κύκλους και είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για επαναλαμβανόμενους μικροκύκλους. Το χαρακτηριστικό αυτό μειώνει το τεχνικό ρίσκο σε εφαρμογές όπου η αποθήκευση λειτουργεί ως «ρυθμιστής» δυναμικής και όχι ως «δεξαμενή» ενέργειας.

Στην απόδοση κύκλου, και οι δύο τεχνολογίες μπορούν να επιτύχουν υψηλές τιμές σε καλά σχεδιασμένα συστήματα. Στους υπερπυκνωτές, το στοιχείο αποθήκευσης έχει χαμηλές απώλειες, αλλά το συνολικό σύστημα επηρεάζεται από τις απώλειες ESR και από την απόδοση του DC/DC μετατροπέα. Στις Li-ion, η απόδοση επηρεάζεται από θερμοκρασία, επίπεδο SOC και ρεύματα, ενώ το BMS μπορεί να επιβάλλει περιορισμούς για ασφάλεια και μακροζωία. Σε εφαρμογές πολύ υψηλής συχνότητας, η διάκριση

«στοιχείο αποθήκευσης» έναντι «σύστημα αποθήκευσης» είναι κρίσιμη για την πραγματική ενεργειακή ισορροπία.

Σε θέματα ασφάλειας, οι Li-ion απαιτούν αυστηρό πλαίσιο προστασιών, παρακολούθησης και θερμικής διαχείρισης, ιδιαίτερα σε μεγάλα συστήματα. Οι υπερπυκνωτές έχουν διαφορετικό προφίλ κινδύνου, αλλά μπορούν να δώσουν πολύ μεγάλα ρεύματα, άρα απαιτούν ισχυρό ηλεκτρολογικό σχεδιασμό, ασφάλειες και προστασίες υπερέντασης. Για συστοιχίες σε σειρά απαιτείται επίσης αξιόπιστη εξισορρόπηση τάσεων ώστε να αποφευχθεί υπέρταση σε επιμέρους στοιχεία.

Συνολικά, η βέλτιστη επιλογή συχνά είναι υβριδική. Ένα υβριδικό σύστημα (HESS) με υπερπυκνωτή και μπαταρία αναθέτει στον υπερπυκνωτή τα γρήγορα και καταπονητικά συμβάντα ισχύος, ενώ η μπαταρία αναλαμβάνει τη μετατόπιση ενέργειας και τις πολυλεπτες ή ωριαίες απαιτήσεις. Η κατανομή αυτή μπορεί να μειώσει τη γήρανση της μπαταρίας, να επιτρέψει μικρότερη διαστασιολόγηση ισχύος της μπαταρίας και να βελτιώσει το συνολικό κόστος κύκλου ζωής.

6.6 Υπερπυκνωτές έναντι αντλησιοταμίευσης: κλίμακα, γεωγραφία και ρόλος στο σύστημα

Η αντλησιοταμίευση (Pumped Storage Hydropower) είναι η πλέον ώριμη τεχνολογία αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας και μεγάλης διάρκειας. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε δυναμική ενέργεια νερού μέσω άντλησης προς ανώτερο ταμιευτήρα και στην ανάκτηση ενέργειας μέσω στροβίλων κατά την εκφόρτιση. Η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για ημερήσια εξισορρόπηση, κάλυψη αιχμών και μείωση περικοπών ΑΠΕ σε επίπεδο συστήματος.

Η σύγκριση με υπερπυκνωτές πρέπει να γίνεται με επίγνωση ότι οι δύο τεχνολογίες υπηρετούν διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Η αντλησιοταμίευση παρέχει ενέργεια για πολλές ώρες και σε μεγάλες ισχύς, ενώ οι υπερπυκνωτές παρέχουν πολύ γρήγορη ισχύ για δευτερόλεπτα ή λεπτά. Συνεπώς, δεν πρόκειται για ανταγωνιστικές λύσεις στο ίδιο πρόβλημα, αλλά για συμπληρωματικούς ρόλους μέσα σε μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική αποθήκευσης.

Σε δυναμικά χαρακτηριστικά, οι υπερπυκνωτές υπερέχουν στην υποδευτερολεπτη απόκριση και στην ταχεία ανταλλαγή ρεύματος σε ζυγούς συνεχούς τάσης. Η αντλησιοταμίευση μπορεί να προσφέρει ευελιξία και να συμμετέχει σε επικουρικές υπηρεσίες, αλλά η φυσική της κλίμακα και η μηχανική αδράνεια δεν στοχεύουν στη σταθεροποίηση ενός τοπικού DC-link. Για εφαρμογές ηλεκτρονικής ισχύος, οι υπερπυκνωτές καλύπτουν ανάγκες που δεν είναι πρακτικό να καλυφθούν από bulk storage τεχνολογίες.

Οι χωροθετικοί και περιβαλλοντικοί περιορισμοί είναι καθοριστικοί για την αντλησιοταμίευση. Απαιτείται κατάλληλη γεωμορφολογία, διαθέσιμοι ταμιευτήρες και σύνθετη αδειοδότηση, ενώ ο χρόνος ωρίμανσης έργου μπορεί να είναι μεγάλος. Οι υπερπυκνωτές, ως αρθρωτή τεχνολογία, εγκαθίστανται κοντά σε υποσταθμούς, φορτία ή σταθμούς ΑΠΕ, χωρίς γεωγραφικούς περιορισμούς, και κλιμακώνονται ευκολότερα σε επίπεδο εγκατάστασης.

Σε ένα σύστημα υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, η αντλησιοταμίευση μπορεί να λειτουργεί ως βασική δεξαμενή ενέργειας μεγάλης διάρκειας, ενώ οι υπερπυκνωτές μπορούν να λειτουργούν ως δυναμικός σταθεροποιητής και αποσβεστήρας αιχμών. Η συνύπαρξη τεχνολογιών διαφορετικών χρονικών κλιμάκων είναι συνήθως η πιο αποτελεσματική στρατηγική, επειδή μειώνει τόσο τις ενεργειακές ανισορροπίες όσο και τα γρήγορα φαινόμενα που επιβαρύνουν τους μετατροπείς.

6.7 Άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης: συνοπτική αξιολόγηση

Πέρα από υπερπυκνωτές, μπαταρίες και αντλησιοταμίευση, υπάρχουν τεχνολογίες που καλύπτουν εξειδικευμένες ανάγκες ή προσφέρουν διαφορετικά trade-offs μεταξύ ισχύος, ενέργειας, κόστους και ωριμότητας. Η συνοπτική παρουσίαση που ακολουθεί δεν αντικαθιστά πλήρη τεχνοοικονομική μελέτη, αλλά δίνει το απαραίτητο πλαίσιο για να τοποθετηθούν οι υπερπυκνωτές μέσα στο ευρύτερο φάσμα.

6.7.1 Συσσωρευτές ροής (Flow batteries)

Οι συσσωρευτές ροής διαχωρίζουν το υποσύστημα ισχύος από το υποσύστημα ενέργειας. Η ισχύς καθορίζεται από το stack (στοίβα κυψελών), ενώ η ενέργεια καθορίζεται από τον όγκο του ηλεκτρολύτη στις δεξαμενές. Η αρχιτεκτονική αυτή είναι ελκυστική για εφαρμογές πολλών ωρών, επειδή η αύξηση της ενέργειας επιτυγχάνεται κυρίως με κλιμάκωση δεξαμενών. Σε επίπεδο κύκλων, οι flow batteries μπορούν να προσφέρουν υψηλή ανθεκτικότητα, όμως έχουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και πιο σύνθετη υποδομή (αντλίες, σωληνώσεις, έλεγχος ηλεκτρολύτη).

6.7.2 Σφόνδυλοι (Flywheels)

Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν ενέργεια ως κινητική ενέργεια περιστροφής. Προσφέρουν πολύ γρήγορη απόκριση και υψηλή ισχύ, με υψηλή ανθεκτικότητα σε συχνή κύκλωση. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε ρύθμιση συχνότητας, απορρόφηση αιχμών και εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Σε σχέση με τους υπερπυκνωτές, μπορούν να δώσουν παρόμοια υπηρεσία ισχύος, αλλά απαιτούν μηχανική υποδομή, έλεγχο περιστροφής και αντιμετώπιση ζητημάτων ασφαλούς λειτουργίας σε περίπτωση μηχανικής αστοχίας.

6.7.3 Αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα (CAES)

Η αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε ενέργεια πίεσης μέσω συμπίεσης αέρα και αποθήκευσής του σε κατάλληλο χώρο. Η τεχνολογία στοχεύει σε εφαρμογές μεγάλης διάρκειας, δηλαδή πολλές ώρες, με μεγάλη κλίμακα ισχύος. Οι κλασικές διατάξεις έχουν χαμηλότερη απόδοση κύκλου, ενώ οι εξελιγμένες παραλλαγές επιδιώκουν βελτίωση μέσω ανάκτησης και αποθήκευσης θερμότητας συμπίεσης. Σημαντικός περιορισμός είναι η ανάγκη κατάλληλης γεωλογίας ή μεγάλης υποδομής, γεγονός που αυξάνει το ρίσκο υλοποίησης σε σχέση με αρθρωτές ηλεκτροχημικές λύσεις.

6.7.4 Υπεραγωγική μαγνητική αποθήκευση (SMES)

Τα συστήματα υπεραγωγικής μαγνητικής αποθήκευσης αποθηκεύουν ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο υπεραγωγίου πηνίου. Παρέχουν εξαιρετικά γρήγορη απόκριση και υψηλή απόδοση κύκλου, γεγονός που τα καθιστά τεχνικά κατάλληλα για κρίσιμες εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Το βασικό μειονέκτημα είναι η ανάγκη κρυογενικής υποδομής, που αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα λειτουργίας. Έτσι, τα SMES χρησιμοποιούνται συνήθως σε ειδικές εφαρμογές όπου η αξία της εξαιρετικά γρήγορης απόκρισης υπερκαλύπτει το αυξημένο κόστος.

6.8 Πίνακες σύγκρισης και πολυκριτηριακή απεικόνιση

Για να συνοψιστούν οι συγκρίσεις, παρατίθενται αρχικά τυπικά εύρη τεχνικών χαρακτηριστικών για βασικές τεχνολογίες. Τα εύρη είναι ενδεικτικά και μπορεί να διαφοροποιούνται ανά κατασκευαστή, σχεδιασμό και κλίμακα έργου. Η παρουσίασή τους, ωστόσο, βοηθά να αποτυπωθεί η θέση κάθε τεχνολογίας στο φάσμα ισχύος-ενέργειας.

Πίνακας 10: Ενδεικτικά τεχνικά χαρακτηριστικά βασικών τεχνολογιών αποθήκευσης.

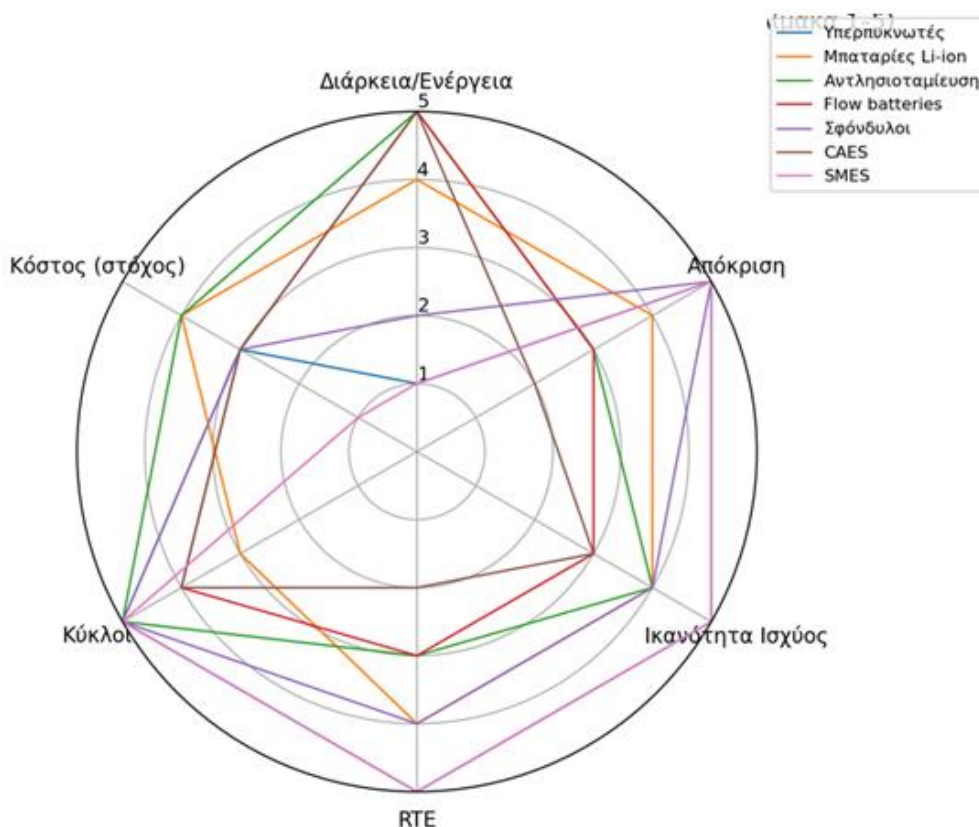
| Τεχνολογία | Χρόνος απόκρισης | Διάρκεια (E/P) | RTE (ενδεικτικά) | Κύκλοι ζωής (ενδεικτικά) | Τυπικές εφαρμογές / Σχόλιο κόστους |
|------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------------------------|---|
| Υπερπυκνωτές | ms-s | δευτερόλεπτα-λεπτά | 90-98% | εκατοντάδες χιλιάδες έως εκατομμύρια | Power quality, smoothing, απορρόφηση αιχμών. Υψηλό κόστος ανά kWh, ανταγωνιστικό για kW. |
| Μπαταρίες Li-ion | ms-s | λεπτά-ώρες | 85-95% | χιλιάδες έως δεκάδες χιλιάδες | BESS 0,5-4+ ώρες, peak shaving, shifting. Καλή οικονομία ανά kWh, απαιτεί BMS/θερμική διαχείριση. |
| Αντλησιοταμίευση | δευτ.-λεπτά | ώρες-ημέρες | 70-85% | πολύ υψηλό (δεκαετίες έργου) | Bulk storage, ημερήσια εξισορρόπηση. Χωροθετικοί περιορισμοί, μεγάλος χρόνος ωρίμανσης. |
| Flow batteries | δευτ.-λεπτά | ώρες (4-12+) | 65-85% | υψηλό (πολλοί κύκλοι) | Longer-duration shifting. Κλιμάκωση ενέργειας με δεξαμενές, σύνθετη υποδομή. |
| Σφόνδυλοι | ms-s | δευτερόλεπτα-λεπτά | 85-95% | πολύ υψηλό | Ρύθμιση συχνότητας, αιχμές ισχύος. Μηχανική υποδομή, περιορισμένη ενέργεια. |

| | | | | | |
|------|-------|--------------|--------------------------------------|---------------------|---|
| CAES | λεπτά | ώρες | 40–70% (εξαρτάται από διάταξη) | υψηλό (υποδομές) | Bulk και long-duration όπου υπάρχει γεωλογία. Σύνθετη υποδομή, χαμηλότερη απόδοση σε κλασικές λύσεις. |
| SMES | ms | δευτερόλεπτα | 95%+ | πολύ υψηλό | Κρίσιμη ποιότητα ισχύος. Πολύ υψηλό κόστος και κρυογενική υποδομή. |

Με βάση τα παραπάνω, είναι σαφές ότι οι υπερπυκνωτές εξειδικεύονται σε ταχεία ισχύ και σε πολύ συχνή κύκλωση, ενώ οι μπαταρίες καλύπτουν κυρίως το ενδιάμεσο φάσμα διάρκειας. Η αντλησιοταμίευση και η CAES καλύπτουν bulk ανάγκες μεγάλης διάρκειας, με περιορισμούς χωροθέτησης και υποδομών. Οι flow batteries στοχεύουν σε πολλαπλές ώρες με ευελιξία κλιμάκωσης ενέργειας, και οι τεχνολογίες ισχύος όπως σφόνδυλοι και SMES καλύπτουν πολύ γρήγορες υπηρεσίες όπου η ενέργεια ανά κύκλο είναι μικρή.

Πίνακας 11: Ενδεικτική βαθμολόγηση (1–5) για διάγραμμα ραντάρ.

| Τεχνολογία | Διάρκεια/Ενέργεια | Απόκριση | Ικανότητα Ισχύος | RT E | Κύκλοι/Ανθεκτικότητα | Σχετικό Κόστος για στόχο |
|------------------|-------------------|----------|------------------|------|----------------------|--------------------------|
| Υπερπυκνωτές | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 |
| Μπαταρίες Li-ion | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 |
| Αντλησιοταμίευση | 5 | 3 | 4 | 3 | 5 | 4 |
| Flow batteries | 5 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| Σφόνδυλοι | 2 | 5 | 4 | 4 | 5 | 3 |
| CAES | 5 | 2 | 3 | 2 | 4 | 3 |
| SMES | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 |



Διάγραμμα 6.1 – Πολυκριτηριακή απεικόνιση (radar chart) ενδεικτικής βαθμολόγησης τεχνολογιών αποθήκευσης (1=χαμηλό, 5=υψηλό).

6.8.1 Εμβάθυνση σε επιλεγμένες τεχνολογίες και πρακτικές επιπτώσεις

Οι συγκρίσεις των Πινάκων 6.2 και 6.3 πρέπει να διαβάζονται ως «προφίλ ικανότητας» και όχι ως απόλυτες επιδόσεις. Για παράδειγμα, οι flow batteries εμφανίζουν υψηλή βαθμολογία στη διάρκεια, επειδή μπορούν να επεκτείνουν την αποθηκευμένη ενέργεια με κλιμάκωση δεξαμενών, αλλά η πραγματική επιλογή εξαρτάται από το αποδεκτό αποτύπωμα χώρου, από τις αντλίες και από τις απώλειες κυκλοφορίας. Σε έργα 4 έως 12 ωρών, το πλεονέκτημα της ανεξάρτητης κλιμάκωσης ενέργειας μπορεί να είναι καθοριστικό, ιδίως όταν οι κύκλοι είναι καθημερινοί και το βάθος εκφόρτισης είναι μεγάλο. Παράλληλα, το προφίλ ασφάλειας είναι συνήθως ευνοϊκό, επειδή δεν υπάρχει το ίδιο είδος θερμικού κινδύνου που συζητείται συχνά στις Li-ion, αν και η τεχνολογία έχει δικές της απαιτήσεις χειρισμού χημικών και συντήρησης.

Οι σφόνδυλοι είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνολογίας ισχύος που ανταγωνίζεται τους υπερπυκνωτές σε ορισμένες υπηρεσίες. Η αποθηκευμένη ενέργεια είναι σχετικά μικρή, όμως η ισχύς και ο ρυθμός μεταβολής ισχύος μπορούν να είναι πολύ υψηλοί. Στην πράξη, οι σφόνδυλοι αποδίδουν ιδιαίτερα σε εφαρμογές ρύθμισης συχνότητας και απόσβεσης αιχμών σε δίκτυα, με μεγάλη ανθεκτικότητα σε κύκλους. Το βασικό επιχειρησιακό μειονέκτημα είναι η αυτοεκφόρτιση, η οποία είναι σημαντική λόγω απωλειών περιστροφής, ακόμη και όταν χρησιμοποιούνται συστήματα κενού και μαγνητικά έδρανα. Επιπλέον, η τεχνολογία απαιτεί μηχανικό σχεδιασμό και προστασίες έναντι αστοχιών, κάτι που διαφοροποιεί το ρίσκο σε σχέση με καθαρά ηλεκτροστατικές λύσεις.

Η CAES και γενικότερα οι τεχνολογίες bulk storage μεγάλης διάρκειας έχουν νόημα όταν το ζητούμενο είναι η μετατόπιση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και η μείωση περικοπών σε επίπεδο συστήματος. Σε κλασικές διατάξεις, η συμπίεση και η εκτόνωση συνοδεύονται από θερμικά φαινόμενα που μειώνουν την απόδοση, ενώ ο σχεδιασμός μπορεί να περιλαμβάνει πρόσθετα συστήματα θερμικής διαχείρισης. Οι πιο εξελιγμένες adiabatic προσεγγίσεις στοχεύουν στην ανάκτηση της θερμότητας συμπίεσης ώστε να βελτιωθεί η απόδοση κύκλου, αλλά αυξάνουν την πολυπλοκότητα. Όπως και στην αντλησιοταμίευση, η ανάγκη κατάλληλων υποδομών και συχνά γεωλογικών χώρων αποθήκευσης αυξάνει το ρίσκο υλοποίησης σε σχέση με αρθρωτές λύσεις.

Τα SMES αποτελούν την τεχνικά ταχύτερη κατηγορία αποθήκευσης ισχύος. Η ενέργεια αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο και περιγράφεται από τη σχέση $E = 1/2 \cdot L \cdot I^2$, γεγονός που υποδεικνύει ότι για μεγάλη ενέργεια απαιτούνται πολύ μεγάλα ρεύματα ή επαγωγές. Η υπεραγωγιμότητα μειώνει τις απώλειες, αλλά προϋποθέτει κρυογενική υποδομή, η οποία εισάγει σημαντικό CAPEX και OPEX. Για αυτό, τα SMES συναντώνται κυρίως σε ειδικές εφαρμογές ποιότητας ισχύος ή σε βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου η αξία της εξαιρετικά γρήγορης απόκρισης και της υψηλής αξιοπιστίας υπερκαλύπτει το κόστος.

Για long-duration απαιτήσεις που υπερβαίνουν τις κλασικές πολυωριαίες δυνατότητες, η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει λύσεις όπως power-to-hydrogen, θερμική αποθήκευση και άλλες μορφές μετατροπής ενέργειας. Οι λύσεις αυτές τείνουν να προσφέρουν μεγάλη διάρκεια με συμβιβασμό στην απόδοση κύκλου και με αυξημένη εξάρτηση από το συνολικό σύστημα μετατροπών. Η αναφορά τους στο παρόν κεφάλαιο είναι χρήσιμη, επειδή δείχνει τη γενική αρχή: όσο αυξάνεται η απαιτούμενη διάρκεια, τόσο μετατοπίζεται η επιλογή από τεχνολογίες υψηλής απόδοσης προς τεχνολογίες που προσφέρουν χαμηλότερο κόστος αποθήκευσης μεγάλης ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα.

6.8.2 Οδηγός επιλογής τεχνολογίας και επιπτώσεις στον σχεδιασμό ελέγχου

Η επιλογή τεχνολογίας αποθήκευσης πρέπει να ξεκινά από την υπηρεσία που ζητείται και από τον τρόπο αποζημίωσής της. Στα συστήματα ΑΠΕ, οι υπηρεσίες μπορούν να αφορούν είτε την ενέργεια (π.χ. μετατόπιση παραγωγής) είτε την ισχύ και τη δυναμική (π.χ. περιορισμός ρυθμού μεταβολής, ρύθμιση συχνότητας, σταθεροποίηση τάσης). Η διάκριση αυτή είναι κρίσιμη, διότι οδηγεί σε διαφορετική τεχνολογία, διαφορετική διαστασιολόγηση και διαφορετική δομή ελέγχου. Ένα σύστημα που έχει σχεδιαστεί για υπηρεσίες ισχύος χρειάζεται έλεγχο υψηλού εύρους ζώνης, γρήγορες μετρήσεις και μετατροπείς με χαμηλές καθυστερήσεις.

Στις αρχιτεκτονικές με υπερπυκνωτές, η μεταβαλλόμενη τάση του στοιχείου αποθήκευσης επιβάλλει αμφίδρομο DC/DC μετατροπέα και σαφή διαχείριση ορίων. Ο εξωτερικός βρόχος τάσης καθορίζει το σήμα αναφοράς ισχύος ή ρεύματος που απαιτείται για να διατηρηθεί ο DC ζυγός εντός ορίων, ενώ ο εσωτερικός βρόχος ρεύματος εξασφαλίζει γρήγορη και σταθερή απόκριση. Ο διαχωρισμός χρόνων (outer slower, inner faster) είναι τυπική πρακτική στην ηλεκτρονική ισχύος και συνδέεται με τη σταθερότητα του συστήματος. Η σωστή παραμετροποίηση (π.χ. εύρος ζώνης, περιοριστές, anti-windup) είναι εξίσου σημαντική με την επιλογή του στοιχείου αποθήκευσης.

Σε υβριδικά σχήματα με μπαταρία και υπερπυκνωτή, ο έλεγχος κατανομής ισχύος μπορεί να υλοποιηθεί με φίλτράρισμα συχνοτήτων. Μια συνηθισμένη προσέγγιση είναι να ανατίθενται τα υψηλής συχνότητας συστατικά ισχύος στον υπερπυκνωτή και τα χαμηλής συχνότητας συστατικά στη μπαταρία. Η προσέγγιση αυτή αντιστοιχεί φυσικά στις δυνατότητες των τεχνολογιών: ο υπερπυκνωτής ανταποκρίνεται γρήγορα και αντέχει μικροκύκλους, ενώ η μπαταρία παρέχει ενέργεια χωρίς έντονη αυτοεκφόρτιση. Έτσι μειώνονται οι αιχμές ρεύματος στη μπαταρία, περιορίζεται η θερμική καταπόνηση και βελτιώνεται η ωφέλιμη ζωή. Το όφελος μεταφράζεται σε καλύτερη αξιοπιστία και σε πιθανή μείωση

του συνολικού κόστους κύκλου ζωής, ακόμη και αν το αρχικό κόστος αυξηθεί λόγω πρόσθετης τεχνολογίας και μετατροπέα.

Ενδεικτικά, ένας πρακτικός κανόνας επιλογής μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

Για υποδευτερολεπτες και δευτερολεπτες ανάγκες (σταθεροποίηση DC-link, power quality, απόσβεση αιχμών): υπερπυκνωτές, σφόνδυλοι ή, σε ειδικές περιπτώσεις, SMES.

Για ανάγκες λεπτών έως λίγων ωρών με εμπορική ωριμότητα: μπαταρίες Li-ion με κατάλληλη διαχείριση κύκλων και θερμικής συμπεριφοράς.

Για 4 έως 12 ώρες με συχνή βαθιά κύκλωση: flow batteries ή συνδυασμός με τεχνολογίες μεγάλης κλίμακας όπου είναι εφικτό.

Για bulk αποθήκευση μεγάλης διάρκειας και υψηλή ισχύ σε επίπεδο συστήματος: αντλησιοταμίευση ή CAES υπό χωροθετικούς περιορισμούς.

Για ταυτόχρονη κάλυψη ισχύος και ενέργειας: υβριδικά συστήματα (HESS) που καταμερίζουν την ισχύ ανά χρονική κλίμακα.

6.8.3 Συμπεράσματα κεφαλαίου

Οι υπερπυκνωτές δεν ανταγωνίζονται άμεσα τις τεχνολογίες μεγάλης διάρκειας ως προς τη μετατόπιση ενέργειας, επειδή η ειδική τους ενέργεια είναι χαμηλή και το κόστος ανά kWh υψηλό. Αντίθετα, προσφέρουν μοναδικά πλεονεκτήματα στην ταχεία ανταλλαγή ισχύος: πολύ μικρούς χρόνους απόκρισης, υψηλή ικανότητα ρεύματος και εξαιρετική ανθεκτικότητα σε συχνή κύκλωση. Σε συστήματα ΑΠΕ με ηλεκτρονική ισχύος και ζυγό συνεχούς τάσης, τα χαρακτηριστικά αυτά μεταφράζονται σε πρακτικά οφέλη όπως σταθεροποίηση DC-link, περιορισμός αιχμών και βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Οι μπαταρίες Li-ion παραμένουν η κύρια επιλογή για εφαρμογές από λεπτά έως ώρες λόγω υψηλότερης ενεργειακής πυκνότητας και καλύτερης οικονομίας ανά kWh. Ωστόσο, η χρήση τους σε συνεχείς αιχμές ή σε υψηλά C-rate μπορεί να επιταχύνει τη γήρανση και να αυξήσει τις απαιτήσεις σε ψύξη και προστασίες. Για αυτό, η υβριδική προσέγγιση με υπερπυκνωτή και μπαταρία παρουσιάζει συχνά καλύτερη συνολική απόδοση και κόστος κύκλου ζωής, ειδικά όταν το προφίλ ισχύος περιλαμβάνει έντονη κυμάτωση ή συχνά transient γεγονότα.

Σε επίπεδο συστήματος, τεχνολογίες όπως η αντλησιοταμίευση και η CAES στοχεύουν στη μετατόπιση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και στην απορρόφηση πλεονάζουσας παραγωγής ΑΠΕ, αλλά υπόκεινται σε γεωγραφικούς και αδειοδοτικούς περιορισμούς. Οι flow batteries προσφέρουν μια ενδιαφέρουσα long-duration εναλλακτική με δυνατότητα ανεξάρτητης κλιμάκωσης ενέργειας, ενώ οι σφόνδυλοι και τα SMES καλύπτουν εξειδικευμένες ανάγκες ταχείας ισχύος με διαφορετική πολυπλοκότητα και κόστος. Η γενική εικόνα είναι ότι τα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα ωφελούνται από πολυτεχνολογικές λύσεις, όπου κάθε τεχνολογία αξιοποιείται στη χρονική κλίμακα που μεγιστοποιεί την αξία της.

Συνεπώς, η χρήση υπερπυκνωτών σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ μπορεί να θεωρηθεί ως στρατηγική βελτιστοποίησης δυναμικής και αξιοπιστίας. Με κατάλληλο μετατροπέα DC/DC και ελεγκτή διπλού βρόχου, ο υπερπυκνωτής μπορεί να λειτουργεί ως «γρήγορο φίλτρο ισχύος», προστατεύοντας την κύρια αποθήκη και βελτιώνοντας τη συμπεριφορά του συστήματος σε

διαταραχές. Το συμπέρασμα αυτό συνδέεται άμεσα με το μοντέλο Simulink της εργασίας και δικαιολογεί τη δομή ελέγχου που υιοθετείται στα προηγούμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα και Προτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Το παρόν Κεφάλαιο συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας με τίτλο «Μελέτη & σχεδίαση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ με χρήση υπερπυκνωτών», και αποτιμά σε ποιο βαθμό επιτεύχθηκαν οι στόχοι που τέθηκαν στην Εισαγωγή. Η μελέτη επικεντρώθηκε σε εφαρμογή εξομάλυνσης μεταβατικών (fast transients) σε σύστημα φωτοβολταϊκής πηγής (PV) με ενδιάμεσο DC ζυγό, όπου ο υπερπυκνωτής λειτουργεί ως αποθήκη υψηλής ισχύος (high power buffer) μέσω μετατροπέα DC/DC.

Κεντρικό συμπέρασμα αποτελεί ότι οι υπερπυκνωτές είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για «γρήγορες» ενεργειακές υπηρεσίες, δηλαδή για απορρόφηση/παροχή ισχύος σε χρονικές κλίμακες από μερικές δεκάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου έως λίγα δευτερόλεπτα, όπου ο στόχος δεν είναι η ωριαία μετατόπιση ενέργειας αλλά η σταθεροποίηση/απόσβεση μεταβατικών στο DC ζυγό. Η βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι οι υπερπυκνωτές χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση κύκλου (round-trip efficiency) και εξαιρετικά μεγάλη αντοχή σε κύκλους σε σύγκριση με χημικές αποθήκες (IEA-ETSAP & IRENA, 2012; IRENA, 2017). Σε επίπεδο συνιστωσών, οι τυπικές τεχνικές προδιαγραφές κυψελών υπερπυκνωτών επιβεβαιώνουν την ικανότητα για εκατοντάδες χιλιάδες έως και εκατομμύρια κύκλους και χαμηλές τιμές ESR, στοιχεία που δικαιολογούν τον ρόλο τους ως «ενισχυτές ισχύος» σε υβριδικές ή αυτόνομες αρχιτεκτονικές (Maxwell Technologies, 2020).

Σε επίπεδο σχεδίασης, η εργασία ανέπτυξε μια συνεπή διαδικασία διαστασιολόγησης που συνδέει ρητά τις απαιτήσεις μεταβατικής υποστήριξης (ΔP_{max} , $\Delta t_{support}$), τα όρια τάσης του υπερπυκνωτή ($V_{sc,max}$ και $V_{sc,min}$), και τις απαιτήσεις ποιότητας τάσης στο DC ζυγό (π.χ. ζώνες $\pm 2\%$ ή $\pm 5\%$ για αξιολόγηση αποκατάστασης/settling). Η διαστασιολόγηση έδειξε ότι, για δεδομένη απαίτηση ισχύος και χρονική διάρκεια υποστήριξης, η επιλογή του εύρους τάσης του υπερπυκνωτή καθορίζει καθοριστικά τη ζητούμενη χωρητικότητα και άρα τον όγκο/μάζα του συστήματος. Η θεμελιώδης σχέση $E = 0,5 \cdot C \cdot (V_{sc,max}^2 - V_{sc,min}^2)$ καθιστά σαφές ότι η αύξηση του $V_{sc,max}$ έχει τετραγωνική επίδραση στη διαθέσιμη ενέργεια, αλλά συνοδεύεται από απαιτήσεις σε αριθμό κυψελών σε σειρά και σε κύκλωμα εξισορρόπησης τάσης.

Ως προς τη μοντελοποίηση, υλοποιήθηκε προτεινόμενη δομή Matlab/Simulink που περιλαμβάνει: (α) μοντέλο PV πηγής, (β) DC ζυγό με φορτίο ή/και ισοδύναμο μετατροπέα προς το δίκτυο, (γ) μετατροπέα DC/DC για αμφίδρομη ροή ισχύος προς/από υπερπυκνωτή και (δ) μοντέλο υπερπυκνωτή με ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα (R-C δίκτυο) για αναπαράσταση δυναμικών και απωλειών. Η επιλογή του ισοδύναμου μοντέλου συμβαδίζει με τυπικές υλοποιήσεις βιβλιοθήκης Simulink/Simscape Electrical (MathWorks, n.d.-a, n.d.-b).

Σε επίπεδο ελέγχου, η εργασία κατέληξε σε κλιμακωτή αρχιτεκτονική (cascaded control) με εσωτερικό βρόχο ρεύματος (inner loop) και εξωτερικό βρόχο τάσης (outer loop) του DC ζυγού, ενώ η διαχείριση ενέργειας ορίζει πότε ο υπερπυκνωτής λειτουργεί ως πηγή/φορτίο ώστε να διατηρείται το V_{dc} εντός των στόχων. Η ρύθμιση των PI ελεγκτών βασίστηκε σε διαχωρισμό χρόνων απόκρισης (timescale separation) και επιλογή εύρους ζώνης (bandwidth) ώστε ο inner loop να είναι σημαντικά ταχύτερος από τον outer loop. Η ανάλυση σε δύο σημεία λειτουργίας (π.χ. $V_{sc} = 30\text{ V}$ και $V_{sc} = 48\text{ V}$) ανέδειξε ότι οι δυναμικές του φυτού μεταβάλλονται με την τάση του υπερπυκνωτή και τεκμηριώθηκε η επιλογή worst-case tuning για διασφάλιση σταθερότητας και επαρκούς απόσβεσης σε όλο το εύρος λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης των σεναρίων (μεταβολές ακτινοβολίας/«cloud dip», βηματικές μεταβολές φορτίου, και μεταβατικά ισχύος) επιβεβαίωσαν ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μπορεί να διατηρεί το V_{dc} εντός των προκαθορισμένων ζωνών αξιολόγησης και να επιτυγχάνει αποκατάσταση εντός του στόχου t_{settle} , ενώ ο υπερπυκνωτής αναλαμβάνει την αιχμιακή ισχύ (P_{sc}) και αποφορτίζεται/φορτίζεται σε ελεγχόμενο εύρος τάσης. Με αυτό τον τρόπο, το σύστημα λειτουργεί ως «φίλτρο ισχύος» που μειώνει τη μεταβλητότητα του PV στο DC ζυγό και διευκολύνει την περαιτέρω επεξεργασία/μετατροπή ισχύος σε downstream στάδια.

Τέλος, η συγκριτική αξιολόγηση (Κεφάλαιο 6) συνέδεσε ποσοτικά τα αποτελέσματα προσομοίωσης με πολυκριτηριακή βαθμολόγηση, ενσωματώνοντας ρητά rubric με target thresholds (π.χ. ζώνες V_{dc} , όρια I_{max} , όρια $V_{sc,min}/V_{sc,max}$, και χρονικά παράθυρα αξιολόγησης). Η ανάλυση κατέδειξε ότι, όταν το ζητούμενο είναι η βέλτιστη συμπεριφορά σε ταχείες διαταραχές, η τεχνολογία υπερπυκνωτών προκύπτει «φυσικά» ευνοϊκή έναντι τεχνολογιών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας αλλά με περιορισμένη ικανότητα συνεχών fast cycles. Παράλληλα, επιβεβαιώθηκε ότι οι υπερπυκνωτές δεν αποτελούν οικονομικά ή ογκομετρικά αποδοτική λύση για υπηρεσίες μεγάλης διάρκειας (minutes to hours), όπου τείνουν να ευνοούνται συσσωρευτές ή τεχνολογίες bulk storage (IRENA, 2017; Lazard, 2025).

Από την οπτική της επίτευξης στόχων, τα βασικά παραδοτέα της εργασίας συνοψίζονται ως εξής: (α) ορίστηκαν ρεαλιστικές προδιαγραφές λειτουργίας για DC ζυγό PV smoothing και μεταφράστηκαν σε απαιτήσεις ισχύος/ενέργειας, (β) αναπτύχθηκε αριθμητική διαστασιολόγηση υπερπυκνωτή και στοιχειοσειράς με σαφή σύνδεση προς $V_{sc,max}/V_{sc,min}$ και I_{max} , (γ) σχεδιάστηκε προτεινόμενη τοπολογία ηλεκτρονικών ισχύος (αμφίδρομος DC/DC) και αρχιτεκτονική ελέγχου, (δ) ορίστηκαν και τεκμηριώθηκαν μετρικές αξιολόγησης (ΔV_{dc} , t_{settle} , RMSE κ.ά.) με σαφή χαρτογράφηση logged signals, και (ε) διαμορφώθηκε rubric με thresholds και βάρη, ώστε η συγκριτική ανάλυση να είναι ποσοτική και αναπαραγώγιμη.

Σε πρακτικό επίπεδο εφαρμογών, το προφίλ PV smoothing είναι αντιπροσωπευτικό για εγκαταστάσεις ΑΠΕ που διασυνδέονται μέσω μετατροπέων ισχύος και απαιτούν σταθερό DC-link. Στο ελληνικό ενεργειακό πλαίσιο, όπου η διείδυση ΑΠΕ αυξάνεται και αναδεικνύονται ανάγκες ευελιξίας και υποστήριξης ποιότητας ισχύος, η αποθήκευση αναγνωρίζεται ως κρίσιμος συντελεστής (Μάντζαρης & Χριστοπούλου, 2020). Η μελέτη δείχνει ότι, ακόμη και όταν ο στόχος δεν είναι η χρονομετατόπιση ενέργειας, μια «μικρής διάρκειας» αποθήκη υψηλής ισχύος μπορεί να βελτιώσει μετρήσιμα δείκτες συμπεριφοράς (banded V_{dc} , χρόνος αποκατάστασης, περιορισμός αιχμών ρεύματος).

Συμπερασματικά, η επιλογή υπερπυκνωτών υπερέχει όταν η εφαρμογή απαιτεί υψηλή ισχύ, υψηλή κυκλικότητα και ελάχιστη υποβάθμιση λόγω fast cycling. Για υπηρεσίες διάρκειας λεπτών έως ωρών, η εργασία καταδεικνύει ότι είναι πιθανότερο να απαιτηθεί είτε εναλλακτική τεχνολογία είτε υβριδική αρχιτεκτονική (π.χ. μπαταρία για ενέργεια και υπερπυκνωτής για ισχύ), σύμφωνα και με τις τάσεις κόστους/αγοράς (IRENA, 2017; Lazard, 2025; Cole et al., 2025).

7. 2 Απάντηση σε ερευνητικά ερωτήματα

Παρότι η εργασία είναι κυρίως σχεδιαστική/μεθοδολογική, μπορεί να διατυπωθεί μια σαφής απάντηση σε ερευνητικά ερωτήματα που προκύπτουν φυσικά από τον σκοπό της:

(E1) Μπορεί ένας υπερπυκνωτής, μέσω κατάλληλου DC/DC μετατροπέα και ελέγχου, να εξομαλύνει ταχείες διαταραχές ισχύος ενός PV συστήματος και να σταθεροποιεί τον DC ζυγό; Η απάντηση, βάσει των σεναρίων προσομοίωσης, είναι θετική: ο υπερπυκνωτής αναλαμβάνει την αιχμιακή ισχύ κατά τις ταχείες μεταβολές (είτε πτώση παραγωγής είτε αύξηση ζήτησης), περιορίζοντας την απόκλιση του V_{dc} και επιταχύνοντας την αποκατάσταση. Η συμπεριφορά αυτή συμφωνεί με το θεωρητικό υπόβαθρο,

όπου οι υπερπυκνωτές συστήνονται για υπηρεσίες fast transients και υποστήριξη τάσης/συχνότητας (IEA-ETSAP & IRENA, 2012).

(E2) Πώς συνδέονται οι απαιτήσεις υπηρεσίας (ΔP_{max} και $\Delta t_{support}$) με τα ηλεκτρικά μεγέθη διαστασιολόγησης (C_{sc} , $V_{sc,max}/V_{sc,min}$, I_{max}); Η εργασία έδειξε ότι η διαστασιολόγηση μπορεί να «κλείσει» με συνεπείς εξισώσεις ενέργειας και ορίων τάσης, ενώ οι απαιτήσεις ρεύματος προκύπτουν από τη σχέση ισχύος και τον μετατροπέα, με τελικό περιορισμό το I_{max} (ηλεκτρονικά ισχύος, θερμική καταπόνηση, ESR, και ασφαλής λειτουργία). Επομένως, τα target thresholds δεν είναι απλώς κριτήρια αξιολόγησης αλλά ενσωματώνονται λειτουργικά στον υπολογισμό της χωρητικότητας/στοιχειοσειράς και στις ρυθμίσεις προστασίας.

(E3) Ποια αρχιτεκτονική ελέγχου και ποια μεθοδολογία ρύθμισης (tuning) εξασφαλίζουν σταθερή λειτουργία σε ευρύ εύρος τάσης υπερπυκνωτή; Το συμπέρασμα είναι ότι ο διαχωρισμός inner/outer loop και η επιλογή bandwidth με worst-case tuning οδηγούν σε στιβαρή απόκριση. Η τεκμηρίωση μέσω δύο σημείων λειτουργίας (χαμηλή και υψηλή τάση υπερπυκνωτή) καθιστά σαφές γιατί ένας σταθερός PI μπορεί να «δουλεύει» παντού, αλλά πρέπει να σχεδιαστεί με κριτήριο το δυσμενέστερο δυναμικό σενάριο (μικρότερο περιθώριο τάσης στον μετατροπέα, υψηλότερο ρεύμα για ίδια ισχύ κ.λπ.).

Συνολικά, τα ερευνητικά ερωτήματα απαντώνται με βάση τις προσομοιώσεις και τη συγκριτική ανάλυση, χωρίς να απαιτείται πειραματική επιβεβαίωση για να τεκμηριωθεί η λογική της μεθοδολογίας. Ωστόσο, η πειραματική επικύρωση παραμένει απαραίτητη για να επαληθευτούν πλήρως οι υποθέσεις μοντελοποίησης και οι πραγματικές απώλειες.

7.3 Περιορισμοί της παρούσας εργασίας

Η παρούσα εργασία στηρίχθηκε σε καθαρά θεωρητική ανάπτυξη και προσομοίωση, χωρίς υλοποίηση εργαστηριακής διάταξης και χωρίς πειραματικά αποτελέσματα. Ο περιορισμός αυτός είναι σημαντικός, διότι οι υπερπυκνωτές και οι μετατροπείς ισχύος παρουσιάζουν φαινόμενα που δύσκολα αποτυπώνονται πλήρως σε απλοποιημένα ηλεκτρικά ισοδύναμα: μεταβολή ESR με θερμοκρασία και κατάσταση φόρτισης, ρεύματα διαρροής και αυτοεκφόρτιση, ανοχές παραμέτρων, καθώς και επιδράσεις ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI). Για παράδειγμα, τα datasheets παρέχουν τυπικές τιμές ESR/διαρροής υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αλλά στην πράξη η κατανομή τιμών και η γήρανση μπορεί να επηρεάσουν αισθητά τη δυναμική (Maxwell Technologies, 2020).

Επιπλέον, το μοντέλο PV και το περιβάλλον λειτουργίας υιοθέτησαν ελεγχόμενες διαταραχές (π.χ. cloud dips, load steps) για να είναι σαφής η αιτιώδης σχέση μεταξύ disturbance και απόκρισης. Σε πραγματικά συστήματα, οι διαταραχές είναι στοχαστικές και συχνά συνδυάζονται (ταυτόχρονη μεταβολή ακτινοβολίας, θερμοκρασίας και φορτίου), ενώ οι απαιτήσεις δικτύου/κωδίκων (grid codes) μπορεί να εισάγουν πρόσθετους περιορισμούς στον τρόπο που επιτρέπεται να ρέει ισχύς προς/από την αποθήκη.

Ακόμη, η οικονομική αποτίμηση της αποθήκευσης περιορίστηκε σε δευτερογενή στοιχεία και συγκριτικές τάσεις (LCOS, κόστος/kW ή κόστος/kWh), καθώς ο πρωτεύων στόχος ήταν η τεχνική σχεδίαση και όχι η πλήρης τεχνοοικονομική βελτιστοποίηση. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η επιλογή τεχνολογίας εξαρτάται έντονα από τη διάρκεια υπηρεσίας και την αξιοποίηση κύκλων, με τα αποτελέσματα LCOS να αλλάζουν σημαντικά ανά χρήση (IRENA, 2017; Lazard, 2025; Cole et al., 2025). Επομένως, για πραγματική υλοποίηση θα απαιτούνταν αναλυτικό business case με στοιχεία κόστους εξοπλισμού, εγκατάστασης, συντήρησης και αντικατάστασης.

Τέλος, αν και στο Κεφάλαιο 6 διατυπώθηκε rubric με target thresholds ώστε η πολυκριτηριακή αξιολόγηση να είναι «κλειστή» και αναπαραγώγιμη, η τελική κατάταξη εξαρτάται αναπόφευκτα από την επιλογή βαρών (weights) που αντανakλούν την εκάστοτε εφαρμογή. Η παρούσα εργασία

χρησιμοποίησε βάρη κατάλληλα για PV smoothing και fast transients. Για εφαρμογές μεγάλης διάρκειας, τα βάρη θα πρέπει να προσαρμοστούν αναλόγως.

7. 4 Μελλοντικές προτάσεις

Με βάση τα παραπάνω, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για περαιτέρω εργασία και βελτιώσεις:

1) Πειραματική επικύρωση και ταυτοποίηση παραμέτρων. Η σημαντικότερη επέκταση είναι η υλοποίηση εργαστηριακού πρωτοτύπου (PV emulator ή πραγματικό PV, DC/DC μετατροπέας, στοιχειοσειρά υπερπυκνωτών και αισθητήρες) ώστε να επαληθευθούν οι δυναμικές και οι απώλειες. Παράλληλα, προτείνεται ταυτοποίηση ισοδύναμου κυκλώματος υπερπυκνωτή μέσω μετρήσεων (π.χ. βηματική διέγερση και προσαρμογή R-C παραμέτρων), ώστε το μοντέλο να αντανακλά συγκεκριμένο δείγμα. Σημειώνεται ότι υπάρχουν και παραδείγματα τεκμηρίωσης/μεθοδολογίας ταυτοποίησης στην επίσημη τεκμηρίωση Simulink (MathWorks, n.d.-d).

2) Ενσωμάτωση μοντέλων θερμικής συμπεριφοράς, γήρανσης και εξισορρόπησης. Σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, η αυτοθέρμανση λόγω ESR μπορεί να γίνει καθοριστικός περιορισμός. Η αξιοπιστία και η διάρκεια ζωής είναι συνάρτηση του θερμικού προφίλ και του duty cycle. Επιπλέον, σε στοιχειοσειρές σε σειρά απαιτείται κύκλωμα εξισορρόπησης τάσης (balancing) και ρεαλιστική μοντελοποίηση ανοχών/διασποράς. Τα datasheets δίνουν ενδείξεις διάρκειας ζωής και επιτρεπτών ρευμάτων υπό συγκεκριμένες συνθήκες (Maxwell Technologies, 2020), αλλά η προσομοίωση μπορεί να εμπλουτιστεί με θερμικό υπομοντέλο και εξάρτηση ESR/διαρροής από θερμοκρασία.

3) Προηγμένος έλεγχος και ενεργειακή διαχείριση. Η κλιμακωτή PI δομή είναι πρακτική και βιομηχανικά διαδεδομένη, όμως μπορούν να διερευνηθούν τεχνικές όπως model predictive control (MPC), adaptive/gain-scheduled έλεγχος ως προς V_{sc} και θερμοκρασία, καθώς και στρατηγικές που ελαχιστοποιούν απώλειες ή καταπόνηση με βάση κριτήρια βελτιστοποίησης.

4) Υβριδικά συστήματα μπαταρίας-υπερπυκνωτή. Για να γεφυρωθεί το μειονέκτημα της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας, προτείνεται η υβριδοποίηση με μπαταρία, όπου ο υπερπυκνωτής αναλαμβάνει fast transients και η μπαταρία υπηρεσίες μεγαλύτερης διάρκειας. Η διεθνής βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι η υβριδοποίηση μπορεί να μειώσει την καταπόνηση της μπαταρίας και να αυξήσει τη συνολική διάρκεια ζωής του συστήματος (Khalid, 2019).

5) Επέκταση σε μικροδίκτυο και AC διασύνδεση. Η παρούσα εργασία εστίασε σε DC ζυγό. Μελλοντικά, η αρχιτεκτονική μπορεί να επεκταθεί σε πλήρες μικροδίκτυο με αντιστροφή προς AC, υποστήριξη τάσης/συχνότητας και παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Η επέκταση αυτή απαιτεί συμβατότητα με grid codes και συνεκτίμηση λειτουργικών σεναρίων (νησιδοποίηση, black start κ.λπ.).

6) Τεχνοοικονομική βελτιστοποίηση και LCOS ανά υπηρεσία. Η μεθοδολογία αξιολόγησης μπορεί να εμπλουτιστεί με ισχυρότερη οικονομοτεχνική διάσταση (LCOS, CAPEX/OPEX, ευαισθησία σε τιμές ενέργειας) και να συγκριθεί με καθιερωμένες αναλύσεις κόστους αποθήκευσης (IRENA, 2017; Lazard, 2025; Cole et al., 2025).

7) Εμπλουτισμός βιβλιογραφικής διερεύνησης σε υλικά και νέες αρχιτεκτονικές υπερπυκνωτών. Η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας μέσω ψευδοχωρητικών ή υβριδικών μηχανισμών αποτελεί ενεργό πεδίο έρευνας. Μια συστηματική χαρτογράφηση υλικών/ηλεκτρολυτών μπορεί να συνδεθεί με τις απαιτήσεις εφαρμογών ΑΠΕ, όπου ζητούμενο είναι η αύξηση της διαθέσιμης ενέργειας χωρίς απώλεια ισχύος (Conway, 1999).

7. 5 Σύνοψη Κεφαλαίου και σύνδεση με τα Παραρτήματα

Συνοψίζοντας, η εργασία τεκμηρίωσε ότι ένα σύστημα αποθήκευσης με υπερπυκνωτές μπορεί να σχεδιαστεί με σαφή, αναπαραγώγιμη μεθοδολογία, η οποία ξεκινά από προδιαγραφές υπηρεσίας (ισχύς, διάρκεια υποστήριξης, όρια τάσης/ρεύματος), προχωρά σε διαστασιολόγηση στοιχειοσειράς και σε επιλογή αρχιτεκτονικής μετατροπής, και ολοκληρώνεται με δομημένο έλεγχο και ποσοτική αξιολόγηση μέσω μετρικών και thresholds. Η επιλογή rubric για τη συγκριτική ανάλυση επέτρεψε να αποφεύγεται η «γενική αίσθηση» και να τεκμηριώνεται η υπεροχή της τεχνολογίας υπερπυκνωτών εκεί όπου ο στόχος είναι η άριστη συμπεριφορά σε ταχείες μεταβατικές καταστάσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cole, W., Ramasamy, V., & Turan, M. (2025). *Cost projections for utility-scale battery storage: 2025 update* (NREL/TP-6A40-93281). National Renewable Energy Laboratory. <https://docs.nrel.gov/docs/fy25osti/93281.pdf>
- Conway, B. E. (1999). *Electrochemical supercapacitors: Scientific fundamentals and technological applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3058-6>
- European Association for Storage of Energy (EASE) & European Energy Research Alliance (EERA). (2017). *European energy storage technology development roadmap: 2017 update*. <https://www.eera-set.eu/component/attachments/?id=312&task=download>
- European Energy Research Alliance (EERA). (2016). *Pumped hydro energy storage (Fact Sheet 1, Nov 2016)*. EERA Joint Programme on Energy Storage. https://www.eera-energystorage.eu/component/attachments/?id=683:EERA_Factsheet_Pumped-Hydro-Energy-Storage&task=download
- IEA-ETSAP & International Renewable Energy Agency (IRENA). (2012). *Electricity storage (Technology Brief E18)*. <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-E18-Electricity-Storage.pdf>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2017). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf
- Khalid, M. (2019). A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids. *Energies*, 12(23), 4559. <https://doi.org/10.3390/en12234559>
- Lazard. (2025). *Lazard's levelized cost of energy analysis (Version 18.0) and levelized cost of storage analysis (Version 10.0)*. https://www.lazard.com/media/5tlbhyla/lazards-lcoeplus-june-2025-_vf.pdf
- MathWorks. (n.d.-a). *Supercapacitor – Electrochemical double-layer capacitor block documentation (Specialized Power Systems)*. Retrieved January 11, 2026, from <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/supercapacitor.html>
- MathWorks. (n.d.-b). *PV Array block documentation (Specialized Power Systems)*. Retrieved January 11, 2026, from <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>
- MathWorks. (n.d.-c). *Visualize and access signal logging data*. Retrieved January 11, 2026, from <https://www.mathworks.com/help/simulink/ug/accessing-signal-logging-data.html>

- MathWorks. (n.d.-d). *Identify supercapacitor parameter*. Retrieved January 11, 2026, from <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/supercapacitor-parameter-identification.html>
- Μάντζαρης, Ν., & Χριστοπούλου, Ι. (2020). *Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας: Προκλήσεις και προοπτικές*. The Green Tank. https://thegreentank.gr/wp-content/uploads/2020/12/202012_StorageTechnologies_GreenTankReport.pdf
- Maxwell Technologies. (2020). *2.7V 350F ultracapacitor cell datasheet: BCAP0350 P270 S18* (Doc. No. 3002974-EN.3). https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/2.7V-350F_ds_3002974-EN.3_20200908.pdf
- BofA. (2024). Το ισχυρό story της αποθήκευσης ενέργειας, τα top picks και τα μαθήματα που πρέπει να πάρουμε από την Tesla και τον Elon Musk. *Energymag*. https://www.energymag.gr/energeia/99320_bofa-ishyro-story-tis-apothikeysis-energeias-ta-top-picks-kai-ta-mathimata-poy
- Energymag. (2024). *Μπαταρίες, το συστατικό που λείπει από τη συνταγή των ΑΠΕ*. https://www.energymag.gr/energeia/250724_bateries-systatiko-apeg/
- Θεοπούλου, Ε. (2013). *Δυνατότητες χρήσης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με προοπτική ηλεκτρικής δικτύωσης σε επίπεδο συνοικίας* [Μη δημοσιευμένη μεταπτυχιακή διατριβή]. Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
- ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή. (2024, Ιανουάριος 31). *Στο μεγαλύτερο έργο παραγωγής και αποθήκευσης καθαρής ενέργειας της χώρας ο Πρωθυπουργός* [Δελτίο Τύπου]. <https://www.terna-energy.com/deltio-tipou/terna-energeiaki-sto-megalytero-ergo/>
- Nowrot, A., & Manowska, A. (2023). Supercapacitors as key enablers of decarbonization and renewable energy expansion in Poland. *Sustainability*, 16(1), 216. <https://doi.org/10.3390/su16010216>
- MIT News. (2023, Ιούλιος 31). *MIT engineers create an energy-storing supercapacitor from ancient materials*. Retrieved from <https://news.mit.edu/2023/mit-engineers-create-supercapacitor-ancient-materials-0731>
- DigiKey Electronics. (n.d.). *Storage alternatives for energy harvesting applications*. Retrieved January 11, 2026, from <https://www.digikey.co.il/articles/storage-alternatives-for-energy-harvesting-applications>
- Σαρρής, Γ. (2020, Σεπτέμβριος). Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη. *Αναλύσεις*, 989.
- Benavides, D. J., Arévalo Cordero, W. P., Tostado-Véliz, M., Vera, D. R., Escamez, A., & Aguado, J. A. (2022). An experimental study of power smoothing methods to reduce renewable source fluctuations using supercapacitors and lithium-ion batteries. *Batteries*, 8(11), 228. <https://doi.org/10.3390/batteries8110228>
- BatteryGuy.com Knowledge Base. (2019). *Supercapacitors versus batteries*. Retrieved January 11, 2026, from <https://batteryguy.com/kb/knowledge-base/supercapacitors-versus-batteries/>
- Wikipedia. (n.d.). *Supercapacitor*. In *Wikipedia*. Retrieved January 11, 2026, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>
- Sumathi, S., Kumar, L. A., & Surekha, P. (2015). Application of MATLAB/SIMULINK in Solar PV Systems. In P. V. Solar (Ed.), *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems* (pp. 59–143). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14941-7_2
- Sahin, M. E. (2021). *Modelling of supercapacitors based on simplified equivalent circuit*. Aalborg University.

https://vbn.aau.dk/files/475850169/Modelling_of_supercapacitors_based_on_simplified_equivalent_circuit.pdf

- Jiya, I. N., Gurusinge, N., & Gouws, R. (2018). Electrical circuit modelling of double layer capacitors for power electronics and energy storage applications: A review. *Electronics*, 7(11), 268. <https://doi.org/10.3390/electronics7110268>
- Car, D., Vasak, I., & Lesic, V. (2017). Control of a buck-boost DC-DC power converter for microgrid applications. *EDPE Conference Proceedings, 2017*.
- Ανδρεάδης, Μ. (2023). *Αποθήκευση ενέργειας μέσω υπερπυκνωτών, συσσωρευτών ροής και τεχνολογιών μαγνητικού πεδίου* [Διπλωματική εργασία]. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α — Παράμετροι μοντέλου και έλεγχοι (MATLAB/Simulink)

Πίνακας Α.1: Τελικές τιμές κερδών PI ελεγκτών βρόχου ρεύματος (VSC-dq).

| Σημείο λειτουργίας | Vsc (V) | Προσεγγιστικό gain $K \approx V_{sc}/L$ (A/s ανά duty) | $K_{p,i}$ (duty/A) | $K_{i,i}$ (duty/(A·s)) |
|------------------------------------|---------|--|--------------------|------------------------|
| Worst-case (ελάχιστη τάση) | 30 | 300,000 | 0.0419 | 105.3 |
| Υψηλή τάση (σχεδόν πλήρης φόρτιση) | 48 | 480,000 | 0.0262 | 65.8 |

Πίνακας Α.2: Ισοδύναμα κέρδη PI (βρόχος ενεργού/άεργου ισχύος).

| Σημείο λειτουργίας | Vsc (V) | $K_{p,P} = V_{sc} \times K_{p,v}$ (W/V) | $K_{i,P} = V_{sc} \times K_{i,v}$ (W/(V·s)) |
|--------------------|---------|---|---|
| 30 V | 30 | 565.5 | 213,183 |
| 48 V | 48 | 904.8 | 341,094 |

Πίνακας Α.3: Παράμετροι υπερπυκνωτών στο ισοδύναμο μοντέλο (R-C).

| Παράμετρος | Σύμβολο | Κυψέλη (1x) | Συστοιχία (18S1P) | Μονάδες | Σχόλιο |
|-------------------------|------------------|-------------|-------------------|---------|--|
| Ονομαστική τάση κυψέλης | $V_{cell,rated}$ | 2.7 | 48.6 | V | $V_{stack,max} = N_s \cdot V_{cell,rated}$ |
| Χωρητικότητα | C | 350 | 19.44 | F | $C_{eq} = C_{cell} \cdot N_p/N_s$ |
| Ισοδύναμη ESR | ESR | 2.9 | 52.2 | mΩ | $ESR_{req} = ESR_{cell} \cdot N_s/N_p$ |
| Ενέργεια σε V_{max} | E_{max} | - | 6.38 | Wh | $E = 0,5 \cdot C_{eq} \cdot V_{max}^2$ (ιδανικό) |

| | | | | | | |
|------------------------------|-------|-----------------------------|---------------|---------------|----|---|
| Παράθυρο λειτουργίας | τάσης | $V_{sc,min}$ - $V_{sc,max}$ | - | 30 - 48 | V | Ενδεικτικό παράδειγμα συμβατό με Κεφ. 4 |
| Μέγιστο σχεδίασης | ρεύμα | I_{max} | - | 50 | A | Θέμα μετατροπέα, θερμικής και ESR (design margin) |
| Αυτοεκφόρτιση/διαρροή (τυπ.) | | I_{peak} | $\approx 0,5$ | $\approx 9,0$ | mA | Ενδεικτική τιμή (εξαρτάται από θερμοκρασία/χρόνο) |

Παράρτημα Β — Μετρικές, σήματα και σενάρια προσομοίωσης

Πίνακας Β.1: Ορισμός μετρικών αξιολόγησης (rise time, settling time, overshoot κ.ά.).

| Μετρική | Ορισμός/υπολογισμός | Logged σήματα | Μονάδες | Target/threshold (ενδεικτικό) | Παράθυρο αξιολόγησης |
|-----------------------------|---|---------------------------------|---------|---|--|
| $\Delta V_{dc,max}$ | Μέγιστη απόλυτη απόκλιση: $\max(V_{dc} - V_{dc,ref})$ | $V_{dc}(t)$, $V_{dc,ref}$ | V | $\leq 0,96$ V ($\pm 2\%$) ή $\leq 2,40$ V ($\pm 5\%$) για $V_{dc,ref}=48$ V | TC1: 5–9 s; TC2: 12–17 s; TC3: 15–18 s |
| t_{settle} | Χρόνος μέχρι V_{dc} να μπει και να παραμείνει στη ζώνη $\pm 2\%$ (ή $\pm 5\%$) | $V_{dc}(t)$, $V_{dc,ref}$ | s | TC1: $\leq 0,25$ s; TC2: $\leq 0,40$ s; TC3: $\leq 0,25$ s (primary) | Από t_0 κάθε γεγονός |
| RMSE(V_{dc}) | $\sqrt{\text{mean}((V_{dc} - V_{dc,ref})^2)}$ | $V_{dc}(t)$, $V_{dc,ref}$ | V | Όσο μικρότερο τόσο καλύτερο (π.χ. $< 0,30$ V σε TC1–TC3) | TC1–TC3 |
| $P_{sc,peak}$ | Μέγιστη τιμή $ P_{sc} $ κατά το γεγονός | $P_{sc}(t)=V_{sc} \cdot I_{sc}$ | W | Να καλύπτει το ΔP_{max} χωρίς κορεσμούς | TC1–TC3 |
| $I_{sc,peak}$ | Μέγιστη τιμή $ I_{sc} $ κατά το γεγονός | $I_{sc}(t)$ | A | $ I_{sc} \leq I_{max}$ (π.χ. 50 A) | TC1–TC3 |
| $V_{sc,min}$ / $V_{sc,max}$ | Ελάχιστη/μέγιστη τάση υπερπυκνωτή στο γεγονός | $V_{sc}(t)$ | V | $V_{sc,min}=30$ V; $V_{sc,max}=48$ V (ενδεικτικό) | TC1–TC4 |
| SoC_{min} / SoC_{max} | SoC από V_{sc}^2 : $(V_{sc}^2 - V_{min}^2)/(V_{max}^2 - V_{min}^2)$ | $V_{sc}(t) \rightarrow SoC(t)$ | - | $0,20 \leq SoC \leq 0,95$ (ενδεικτικό) | TC4 (1–20 s) |

| | | | | | |
|---------------------|---|------------------------------------|--------|--|---------|
| $E_{throughput,sc}$ | Ενεργειακή διέλευση: $\int P_{sc}(t) dt$ σε κάθε TC | $P_{sc}(t)$ | J ή Wh | Χρήσιμο για σύγκριση καταπόνησης και απωλειών | TC1–TC3 |
| η_{est} | $1 - (E_{losses}/E_{throughput})$, $E_{losses} \approx \int (I_{sc}^2 \cdot ESR) dt +$ απώλειες μετατροπεία | $I_{sc}(t)$, ESR, $P_{conv,loss}$ | - | Συγκριτική μετρική (όχι absolute χωρίς θερμικό/ημιαγωγικό μοντέλο) | TC1–TC4 |

Πίνακας Β.2: Χαρτογράφηση σημάτων προσομοίωσης (σήμα → φυσικό μέγεθος).

| ID | Σήμα / Μέγεθος | Πηγή στο μοντέλο (Simulink/Simscape) | Logged variable (όνομα στο μοντέλο) | Μονάδες | Ρυθμός δειγματοληψίας / Logging | Προεπεξεργασία (εφόσον απαιτείται) | Μετρικές που εξάγονται | Ορισμός / Τρόπος υπολογισμού (σε MATLAB) |
|----|------------------------|---|-------------------------------------|---------|------------------------------------|---|---|---|
| S1 | Τάση DC ζυγού | Voltage Measurement στο DC link (κόμβος Vdc) | Vdc_ts | V | Continuous + log σε Dataset /SDI | Προαιρετικό low-pass για αποθρομβοποίηση (αν switching model) | $\Delta V_{dc,max}$, $\Delta V_{dc,min}$, RMSE(Vdc), t_{settle} | $\Delta V_{dc,max} = \max(V_{dc} - V_{dc,ref})$, $\Delta V_{dc,min} = \min(V_{dc} - V_{dc,ref})$. RMSE = $rmse(V_{dc}, V_{ref})$. t_{settle} : χρόνος εισόδου και παραμονής σε $\pm x\%$ ζώνη γύρω από V_{ref} |
| S2 | Αναφορά τάσης DC ζυγού | Constant/Step block ($V_{dc,ref}$) | Vdc_ref_ts | V | Log μαζί με Vdc (ίδια time vector) | Καμία | RMSE(Vdc), steady-state error | RMSE(Vdc, Vref). $e_{ss} = \text{mean}(V_{dc}(t_{end} - T:t_{end}) - V_{ref})$ |
| S3 | Ρεύμα υπερπυκνωτή | Current sensor στο κλάδο UC ή ρεύμα πηνίου (inner loop) | Isc_ts | A | Log σε Dataset | Αφαίρεση DC offset (αν υπάρχει), ή | Isc_peak (+/-), I_rms, duty stress index | Isc_peak+ = $\max(I_{sc})$, Isc_peak- = $\min(I_{sc})$. I_rms = $\sqrt{\text{mean}(I_{sc}^2)}$ |

| | | | | | | | | |
|-----|----------------------------------|---|----------|------|----------------|---|---|--|
| | | | | | | absolute peak | |)) στο παράθυρο ενδιαφέροντος |
| S 4 | Τάση συστοιχίας υπερπυκνωτών | Voltage sensor στα άκρα UC bank | Vsc_ts | V | Log σε Dataset | Καμία | Έλεγχος ορίων (Vsc,min/max), ΔVsc, E_UC | Έλεγχος: any(Vsc<Vsc,min) ή any(Vsc>Vsc,max). E_UC(t)=0.5CeqVsc(t)^2. ΔE=E(end)-E(start) |
| S 5 | Ισχύς υπερπυκνωτή στο DC link | Υπολογισμός Psc = Vdc * I_conv_out ή VscIscn (ανά convention) | Psc_ts | W | Log σε Dataset | Συμφωνία πρόσημου (+: εκφόρτιση προς ζυγό) | Peak ενέργεια που ανταλλάχθηκε, smoothing index | E_sc_exch = ∫ Psc dt (trapz). Peak = max/min. Smoothing: σύγκριση peak-to-peak με baseline |
| S 6 | Ισχύς ΑΠΕ (PV) | Μέτρηση στην έξοδο DC/DC ΑΠΕ (ή PV terminals) | Ppv_ts | W | Log σε Dataset | Προαιρετικά μέσος όρος σε παράθυρο (για PWM ripple) | ΔPpv, συμβάντα (cloud dip) | Εντοπισμός χρονικών παραθύρων (t1-t2) όπου αλλάζει επίπεδο. ΔP = P2-P1 |
| S 7 | Ισχύς φορτίου | Pload = Vdc * Iload (ή power measurement block) | Pload_ts | W | Log σε Dataset | Καμία | Load step magnitude, settling/overshoot | ΔPload = επίπεδο μετά - πριν. Χρήση για tagging γεγονότων |
| S 8 | Duty cycle / εντολή μετατροπείας | Έξοδος current PWM | duty_ts | p.u. | Log σε Dataset | Καμία | Saturation time, control effort | % χρόνου σε κορεσμό: mean(duty==duty_max ή duty_min) |
| S 9 | SoC υπερπυκνωτή | Υπολογισμός από Vsc (SoC = (Vsc^2-Vmin^2)/(| SoC_ts | 0-1 | Log σε Dataset | Clamping 0-1 (προαιρετικό) | SoC_min/max, SoC drift, | SoC_min=min(SoC), SoC_max=max(SoC). Drift = |

| | | | | | | | | |
|-----|--------------------------|--|-------------------------------------|---------|----------------------------------|---|---|---|
| | | $V_{max}^2 - V_{min}^2$) | | | | | availability | SoC(end)–SoC(start) |
| S10 | Σφάλμα τάσης | $e_v = V_{dc_ref} - V_{dc}$ | ev_ts | V | Log σε Dataset | Καμία | Peak error, IAE/ISE | Peak = max |
| S11 | Σφάλμα ρεύματος | $e_i = I_{ref} - I_{sc}$ | ei_ts | A | Log σε Dataset | Καμία | Current tracking quality | RMS(ei), peak(ei) σε σε transients |
| S12 | Baseline case (χωρίς UC) | Τίδιο μοντέλο με Psc=0 ή UC branch off | Vdc_base_ts, Pgrid_base_ts κ.ά. | — | Δεύτερο run SDI/Dataset | Ευθυγράμμιση χρονικής βάσης | Δείκτης βελτίωσης | Improvement(ΔV_{dc}) = $\Delta V_{dc_base} - \Delta V_{dc_UC}$, αντίστοιχα για P ripple |
| ID | Σήμα / Μέγεθος | Πηγή στο μοντέλο (Simulink/Simscape) | Logged variable (όνομα στο μοντέλο) | Μονάδες | Ρυθμός δειγματοληψίας / Logging | Προεπεξεργασία (εφόσον απαιτείται) | Μετρικές που εξάγονται | Ορισμός / Τρόπος υπολογισμού (σε MATLAB) |
| S1 | Τάση DC ζυγού | Voltage Measurement στο DC link (κόμβος Vdc) | Vdc_ts | V | Continuous + log σε Dataset /SDI | Προαιρετικό low-pass για αποθρομβοποίηση (αν switching model) | $\Delta V_{dc,max}$, $\Delta V_{dc,min}$, RMSE(Vdc), t_settle | $\Delta V_{dc,max} = \max(V_{dc} - V_{dc,ref})$, $\Delta V_{dc,min} = \min(V_{dc} - V_{dc,ref})$. RMSE = $rmse(V_{dc}, V_{ref})$. t_settle: χρόνος εισόδου και παραμονής σε $\pm x\%$ ζώνη γύρω από Vref |

Πίνακας Β.3: Ορισμός χρονικών παραθύρων σεναρίων (step μεταβολές παραγωγής/φορτίου).

| Σενάριο / Γεγονός | Περιγραφή μεταβολής | Χρόνος γεγονός (t_event) | Παράθυρο “πριν” (baseline) | Παράθυρο γεγονός | Παράθυρο “μετά” (αποκατάσταση) | Μετρικές που υπολογίζονται (ενδεικτικά) | Σημειώσεις υπολογισμού |
|-------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------------|---|------------------------|
|-------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|------------------|--------------------------------|---|------------------------|

| | | | | | | | |
|----------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|---|---|
| TC1 | Cloud dip (πτώση ισχύος PV) | 5 s | 4.0–5.0 s | 5.0–7.0 s | 7.0–9.0 s | $\Delta V_{dc,min}$, $I_{sc,peak}(+)$, ΔE_{UC} , $RMSE(V_{dc})$ στο 5–9 s, smoothing index | Baseline επίπεδο P_{pv} από 4–5 s. t_{settle} με έναρξη στο 5 s και έλεγχο εντός ζώνης στο 7–9 s |
| TC2 | Load step (αύξηση φορτίου) | 12 s | 11.0–12.0 s | 12.0–15.0 s | 15.0–17.0 s | $\Delta V_{dc,min}$, $t_{settle}(V_{dc})$, $I_{sc,peak}(+)$, I_{rms} , $RMSE(V_{dc})$ στο 12–17 s | Baseline Pload από 11–12 s. t_{settle} : πρώτη είσοδος και παραμονή εντός $\pm x\%$ στο 15–17 s |
| TC3 | PV spike (πλέονισμα PV) | 15 s | 14.0–15.0 s | 15.0–16.0 s | 16.0–18.0 s | $\Delta V_{dc,max}$, $I_{sc,peak}(-)$, ΔE_{UC} , $RMSE(V_{dc})$ στο 15–18 s, saturation time (duty) | Σημαντικό το πρόσημο: φόρτιση UC $\rightarrow P_{sc}<0$, $I_{sc}<0$. t_{settle} με έναρξη στο 15 s |
| TC4 | Συνδυαστικό σενάριο (ολόκληρη δοκιμή) | — | 0–1 s (warm-up) | 0–20 s | — | $RMSE_{total}(V_{dc})$ στο 1–20 s, SoC_{min}/max , συνολική ανταλλαγή ενέργειας $\int P_{sc} dt, max$ | I_{sc} |
| TC5 (baseline) | Χωρίς υπερπικνωτή / $P_{sc}=0$ | ίδιο με TC1–TC4 | ίδιο | ίδιο | ίδιο | ΔV_{dc_base} , $RMSE_{base}$, P_{ripple_base} | Εκτελείται ως δεύτερο run με ίδια σενάρια, για να υπολογιστεί βελτίωση: $\Delta(\Delta V_{dc}) = \Delta V_{dc_base} - \Delta V_{dc_UC}$ κ.λπ. |

Παράρτημα Γ — Τεχνικές πηγές

- Analog Devices (Maxim Integrated) (n.d.). Voltage balancing techniques for series super capacitor connection for MAX38886/MAX38888/MAX38889. <https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-149.html>

- Cole, W., Ramasamy, V., & Turan, M. (2025). Cost projections for utility-scale battery storage: 2025 update (NREL/TP-6A40-93281). National Renewable Energy Laboratory. <https://docs.nrel.gov/docs/fy25osti/93281.pdf>
- MathWorks. (n.d.-a). Supercapacitor - Electrochemical double-layer capacitor block documentation (Specialized Power Systems). Retrieved January 11, 2026, from <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/supercapacitor.html>
- MathWorks. (n.d.-b). PV Array block documentation (Specialized Power Systems). Retrieved January 11, 2026, from <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>
- MathWorks. (n.d.-c). Visualize and access signal logging data. Retrieved January 11, 2026, from <https://www.mathworks.com/help/simulink/ug/accessing-signal-logging-data.html>
- MathWorks. (n.d.-d). Identify supercapacitor parameter. Retrieved January 11, 2026, from <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/supercapacitor-parameter-identification.html>
- Maxwell Technologies. (2020). 2.7V 350F ultracapacitor cell datasheet: BCAP0350 P270 S18 (Document No. 3002974-EN.3). https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/08/2.7V-350F_ds_3002974-EN.3_20200908.pdf.
- U.S. Department of Energy (2023). Technology Strategy Assessment - Supercapacitors. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/Technology%20Strategy%20Assessment%20-%20Supercapacitors.pdf>