



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ Η.Μ.Μ.Υ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΟ
ΔΙΚΤΥΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ**

Γούλας Δ. Θεόδωρος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ Η.Μ.Μ.Υ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΡΟ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ**

Γούλας Δ. Θεόδωρος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Μαρτίου 2017

.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στ. Παπαθανασίου
Αναπ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Γεωργιλάκης
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2017

.....
Γούλας Δ. Θεόδωρος

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Copyright © Γούλας Δ. Θεόδωρος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	7
Ευχαριστίες.....	9
Κεφάλαιο 1^ο – Αστικές Δημόσιες Μεταφορές.....	10
1.1 Δημόσιες Σιδηροδρομικές Μεταφορές.....	12
1.2 Ορισμός και Κατηγοριοποίηση Δημόσιων Μεταφορών.....	14
1.3 Δίκτυο Μετρό.....	15
1.4 Περιβαλλοντικά Φιλικές Μεταφορές.....	16
1.5 Η Έννοια της Ενεργειακής Απόδοσης στη Σιδηροδρομικά Δίκτυα.....	17
1.6 Κατανάλωση Ενέργειας των Τρένων.....	18
1.7 Αποτελεσματικότερη Χρησιμοποίηση της Ανατροφοδοτούμενης Ενέργειας Πέδησης.....	19
1.8 Βιβλιογραφία 1 ^{ου} Κεφαλαίου.....	24
Κεφάλαιο 2^ο – Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας.....	28
2.1 Ηλεκτροχημικές Μπαταρίες.....	32
2.2 Συσκευές Αποθήκευσης Ενέργειας με Περιστρεφόμενα Μέλη (Flywheels)	33
2.3 Υπερπυκνωτές.....	35
2.4 Υπεραγώγιμη Συσκευή Αποθήκευσης Ενέργειας.....	36
2.5 Χαρακτηριστικά του Αστικού Σιδηροδρομικού «Φορτίου».....	37
2.6 Συγκριτική ανάλυση των διαφόρων τύπων συσκευών αποθήκευσης στις αστικές σιδηροδρομικές συγκοινωνίες.....	38
2.7 Χαρακτηριστικά της κινητής συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στους αστικούς σιδηροδρόμους.....	42
2.8 Χαρακτηριστικά των εγκατεστημένων στους σταθμούς συσκευών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στους αστικούς σιδηροδρόμους.....	43
2.9 Βιβλιογραφία 2 ^{ου} Κεφαλαίου.....	44
Κεφάλαιο 3^ο – Επισκόπηση στους Υπερπυκνωτές.....	47
3.1 Διάκριση με βάση το υλικό των ηλεκτροδίων.....	49
3.2 Διάκριση με βάση τον τύπο του ηλεκτρολύτη.....	50
3.3 Διάκριση με βάση τη σχεδίαση των ηλεκτροδίων.....	51
3.4 Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες.....	51
3.5 Μοντέλα Ηλεκτρικών Πυκνωτών Διπλής Βαθμίδας.....	58
3.5.1 Μοντέλο Απλής RC αντίδρασης.....	59
3.5.2 Μοντέλο Παράλληλου Κλάδου.....	60
3.5.3 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς.....	62
3.5.4 Μοντέλο Σειράς βασισμένο στην Ανάλυση Συχνότητας του Υπερπυκνωτή.....	62
3.5.5 Μοντέλο Πλήρους Εύρους Συχνότητων.....	65
3.5.6 Μοντέλο Υπερπυκνωτή κατάλληλο για σιδηροδρομικές εφαρμογές.....	69
3.6 Βιβλιογραφία 3 ^{ου} Κεφαλαίου.....	70

Κεφάλαιο 4^ο – Μοντέλο Προσομοίωσης.....	72
4.1 Υπομοντέλο Δικτύου.....	73
4.1.1 Εξισώσεις Κόμβου Υποσταθμού.....	74
4.1.2 Εξισώσεις Κόμβου Οχήματος.....	74
4.2 Υπομοντέλο Οχήματος.....	75
4.3 Υπομοντέλο Στατικής Συσκευής Αποθήκευσης.....	76
4.4 Επικοινωνία Υπομοντέλων.....	76
4.5 Βιβλιογραφία 4 ^{ου} Κεφαλαίου.....	78
Κεφάλαιο 5^ο – Πειραματική Διαδικασία.....	79
5.1 Παραδοχές.....	79
5.2 Περιγραφή Λειτουργίας Στατικών Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας.....	80
5.3 Στρατηγική Ελέγχου των Συσκευών Αποθήκευσης.....	81
5.4 Πειραματική Εξακρίβωση Ορθότητας Αλγορίθμου Ελέγχου.....	85
5.5 Διάταξη Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας.....	86
5.6 Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	87
5.7 Συμπεράσματα.....	115
5.8 Βιβλιογραφία 5 ^{ου} Κεφαλαίου.....	115
Κεφάλαιο 6^ο – Συμπεράσματα.....	116

Περίληψη

Στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε με την εισαγωγή συσκευών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα αστικό σιδηροδρομικό δίκτυο (μετρό), οι οποίες εκμεταλλευόμενες την ενέργεια που παράγεται κατά την πέδηση των αμαξοστοιχιών, θα στοχεύουν στην εξοικονόμηση ενέργειας παράλληλα με τη σταθεροποίηση της τάσης των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Αρχικά, θα εξετάσουμε τις μεθόδους εισαγωγής των συσκευών αποθήκευσης στο υπάρχον δίκτυο και στη συνέχεια θα συγκρίνουμε τις διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης, ώστε με γνώμονα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός τυπικού αστικού δικτύου μετρό να καταλήξουμε στην αποδοτικότερη επιλογή.

Στη συνέχεια, θα προτείνουμε έναν αλγόριθμο ελέγχου της ροής ισχύος της συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος θα εξυπηρετεί τους παραπάνω βασικούς στόχους που έχουμε θέσει. Προκειμένου να ελέγξουμε σε πρώτο στάδιο την ορθότητα του συγκεκριμένου αλγορίθμου, θα μοντελοποιήσουμε την συσκευή αποθήκευσης ενέργειας σε περιβάλλον Matlab/Simulink και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της λειτουργίας της, με αυτά μίας πραγματικής συσκευής αποθήκευσης με τα ίδια χαρακτηριστικά, την οποία θα συγκροτήσουμε και θα μελετήσουμε με τη βοήθεια της εφαρμογής Triphase.

Για τον έλεγχο της ενεργειακής αποδοτικότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου, θα μοντελοποιήσουμε σε περιβάλλον Matlab/Simulink τμήμα ενός τυπικού αστικού σιδηροδρομικού δικτύου και θα μελετήσουμε τα αποτελέσματα της λειτουργίας των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας με το συγκεκριμένο αλγόριθμο ελέγχου.

Τέλος, για λόγους πληρότητας και εγκυρότητας των αποτελεσμάτων θα εξετάσουμε μία σειρά από διαφορετικά σενάρια, στα οποία θα μεταβάλλουμε το πλήθος, τη χωρητικότητα, τη θέση εγκατάστασης των συσκευών αποθήκευσης αλλά και τη συχνότητα των δρομολογίων, ώστε να καταλήξουμε στη βέλτιστη περίπτωση.

Λέξεις-κλειδιά: Συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, υπερπυκνωτές, μετρό, προσομοίωση, Matlab/Simulink, Triphase, σταθεροποίηση τάσης, εξοικονόμηση ενέργειας, στρατηγική ελέγχου ροής ισχύος, ανατροφοδοτούμενη ενέργεια πέδησης.

Abstract

This diploma thesis analyzes the introduction of energy storage systems in an urban metro network, which deploy the regenerative braking energy of a railway vehicle. The main purpose is to optimize the energy efficiency of the system and improve voltage stability of the whole network.

Initially, the installation method of energy storage systems will be analyzed in the existing network. Then, a comparative analysis will be conducted upon the available energy storage technologies, so as to determine the most efficient one, in terms of the special features of a typical urban metro system.

Afterwards, a power flow control algorithm of the energy storage system will be proposed. The energy storage system will be modelled in Matlab/Simulink in order to examine the correctness of the proposed algorithm. This will be achieved by comparing Matlab/Simulink simulation results with the respective results of an actual energy storage system, by utilizing the Triphase application.

In order to verify the energy efficiency of the proposed algorithm a specific part of a typical urban railway system will be developed in Matlab/Simulink and then the simulation results will be elaborately examined.

Finally, several scenarios will be examined, to validate further the experimental results. Specifically, the effect of number, capacity, and position of energy storage systems, as well as the traffic conditions of the metro network will be investigated, so as to conclude to the optimal combination of these parameters.

Key-words: Energy storage system, supercapacitor, metro network, Matlab/Simulink, Triphase, voltage stability, energy saving, power flow control strategy, regenerative braking energy.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλειο Κλεφτάκη για τη βοήθεια και την καθοδήγησή του, καθώς και για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Φυσικά, δεν θα παραλείψω να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να αναλάβω την παρούσα διπλωματική εργασία και να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου αλλά και τη Μπουμπού μου για την τεράστια υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Την παρούσα εργασία θέλω να την αφιερώσω στη μνήμη της γιαγιάς μου, Ευαγγελίας Γούλα.

Κεφάλαιο 1^ο

Ανασκόπηση στις Αστικές Σιδηροδρομικές Μεταφορές και στις Οικονομικά και Ενεργειακά Βιώσιμες Μετακινήσεις

Στις μεταφορές οφείλονται περίπου το ένα τέταρτο των ευρωπαϊκών εκπομπών αέριων ρύπων, εκ του οποίου το 12,7% παράγεται από την πολιτική αεροπορία, το 13,5% από τις θαλάσσιες μεταφορές, το 0,6% από τις σιδηροδρομικές μεταφορές, το 1,7% από τις ενδοχώριες μεταφορές και το 70,8% οφείλεται στις οδικές μεταφορές [1].

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που έχουν οι σιδηροδρομικές συγκοινωνίες, είναι το γεγονός ότι έχουν τη δυνατότητα να καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, που συνεπάγεται ότι σιδηροδρομικά ταξίδια όπως Λονδίνο-Βρυξέλες, παράγουν μόνο το 10% περίπου των μέσων ρύπων ανά επιβάτη του αντίστοιχου αεροπορικού ταξιδιού. Σύμφωνα τον “Οδικό Χάρτη των Ευρωπαϊκών Μεταφορών” της Ευρωπαϊκής Επιτροπής του 2011, έχει τεθεί σαν στόχος η μείωση κατά 60% των εκπομπών αέριων ρύπων που οφείλονται στις μεταφορές μέχρι το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα ρύπων όπως καταμετρήθηκαν το 1990. Έτσι οι σιδηροδρομικές μεταφορές, αποτελώντας ένα μέσο μετακίνησης με τουλάχιστον 3 με 4 φορές μικρότερη εκπομπή ρύπων σε σχέση με τις οδικές ή εναέριες μεταφορές, είναι προφανές ότι μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη του στόχου του 2050, ιδιαίτερα μέσω μίας αισθητής μετατόπισης του όγκου των μετακινήσεων προϊόντων από τις οδικές στις σιδηροδρομικές μεταφορές [1].

Ο σιδηρόδρομος επίσης είναι ένα ζωτικής σημασίας τμήμα των δημόσιων μεταφορών, που καταναλώνει 3,7 φορές λιγότερη ενέργεια ανά επιβάτη στην Ευρώπη σε σχέση με το συμβατικό αυτοκίνητο. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του σιδηροδρόμου είναι η πολύ μικρή «κατανάλωση» αστικού χώρου και εδάφους.

Όλες οι μεγάλες ευρωπαϊκές πόλεις ωφελούνται σημαντικά από το δίκτυο αστικού σιδηροδρόμου, που αποτελεί ραχοκοκαλιά του αστικού δικτύου μεταφοράς, σε συνδυασμό με τα αστικά λεωφορεία που παρέχουν πρόσβαση στους σιδηροδρομικούς σταθμούς. Τα δίκτυα αυτά συνδέονται με υπεραστικές και ηπειρωτικές συμβατικές σιδηροδρομικές γραμμές καθώς και με μετρό, τραμ, και τρόλεϊ. Γενικά, τα αστικά μέσα μαζικής μεταφοράς συνδυάζονται με ολοκληρωμένα συστήματα πληροφοριών και εισιτηρίων που διασφαλίζουν την απρόσκοπτη και βέλτιστη χρήση των αστικών μέσων μαζικής μεταφοράς.

Η δημόσια συγκοινωνία στις αστικές περιοχές αντιπροσωπεύει το 21% των μηχανοκίνητων μεταφορών και είναι υπεύθυνη μόλις για το 10% των αέριων ρύπων που οφείλονται στις μεταφορές. Με τον τρόπο αυτό βοηθούν ήδη τις πόλεις να χειριστούν την κατανάλωση ενέργειας και τη μόλυνση λόγω των μεταφορών. Σήμερα, μεταξύ του 40% και του 50% των δημόσιων μεταφορών τροφοδοτούνται με ηλεκτρισμό. Έτσι, οι δημόσιες συγκοινωνίες αποτελούν ήδη ένα κατά κύριο λόγο μέσο ηλεκτροκίνητης μεταφοράς εδώ και δεκαετίες και μάλιστα είναι ικανές να μειώσουν περαιτέρω την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα στο μέλλον [1].

Οι σιδηροδρομικές μεταφορές στις αστικές περιοχές λειτουργούν σχεδόν εξ ολοκλήρου με ηλεκτρική ενέργεια. Τα τελευταία δέκα χρόνια, η μέση κατανάλωση ανά επιβάτη σιδηροδρομικού μέσου μεταφοράς μειώθηκε κατά 22% [1].

Η αύξηση της χρήσης των δημοσίων μεταφορών και ιδιαίτερα όσον αφορά τα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα, αποτελεί βασική προτεραιότητα των πόλεων παγκοσμίως. Η χρήση των αστικών σιδηροδρόμων δεν αποτελεί μόνο το βασικό πόρο χρηματοδότησης για τη βελτίωση του μέσου αυτού, αλλά παράλληλα δημιουργεί και μία κοινωνική στάση η οποία μεταφέρεται

από γενιά σε γενιά. Γι' αυτό το μετρώ αλλά και τα μέσα μεταφοράς μη σταθερής γραμμής έχουν αναγνωριστεί σαν βασικός μοχλός δημιουργίας μιας νέας αστικής ανάπτυξης και παράδειγμα οικονομικά αποδοτικής μεταφοράς.

Προφανώς, όσον αφορά τα παραπάνω, η λελογισμένη χρήση των πόρων μέσω της αποδοτικής χρήσης της ενέργειας, τόσο για το κάθε όχημα όσο και για το σύστημα στο σύνολό του, είναι το σημείο-κλειδί. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να δίνεται μεγαλύτερη προσοχή σε θέματα που σχετίζονται με τον εξορθολογισμό της ηλεκτρικής κατανάλωσης και την εξοικονόμηση ενέργειας μέσα από τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης ολόκληρου του ηλεκτρικού δικτύου μεταφορών. Στην πραγματικότητα, η αύξηση της ζήτησης ενέργειας εξ' αιτίας της αύξησης του αριθμού και του χρόνου λειτουργίας των οχημάτων απαιτούν ακραίες συνθήκες λειτουργίας του υπάρχοντος ηλεκτρικού δικτύου, με συνέπεια την αύξηση των απωλειών ενέργειας και τη σημαντική πτώση τάση στις γραμμές. Επειδή η ενεργειακή αποδοτικότητα ενός ηλεκτροφόρου συστήματος μεταφοράς προσδιορίζεται από τις συνολικές απώλειες στους υποσταθμούς του, υπάρχει μία εμφανής ανάγκη για νέες τεχνολογικές βελτιώσεις οι οποίες επιτρέπουν όχι μόνο την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των υποσταθμών, αλλά ταυτόχρονα συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της ροής ισχύος μεταξύ των οχημάτων και του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτό γίνεται καλύτερα αντιληπτό αν συλλογιστεί κανείς το γεγονός ότι η κατανάλωση ενέργειας στα ηλεκτροκίνητα σιδηροδρομικά δίκτυα είναι ιδιαίτερα σημαντική και αναπαριστά ένα μεγάλο ποσοστό του συνολικού κόστους λειτουργίας.

Κατά συνέπεια, αναζητούνται καινοτόμες ιδέες που αφορούν τη αξιοποίηση της ανατροφοδοτούμενης ενέργειας πέδησης των οχημάτων τα τελευταία χρόνια. Προς το παρόν, στον επιστημονικό και επιχειρησιακό κόσμο, υπάρχει μία ισχυρή πεποίθηση ότι η χρήση συστημάτων αποθήκευσης μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη τεχνολογική λύση για την αντιστάθμιση της διαφοράς μεταξύ της διαθέσιμης ενέργειας και της ζητούμενης ενέργειας από τα φορτία, συνεισφέροντας αποφασιστικά στη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος και στον εξορθολογισμό της κατανάλωσης διαμέσου της αύξησης της ανατροφοδοτούμενης ενέργειας.

Από την πλευρά των ηλεκτροκίνητων σιδηροδρομικών μεταφορών, η χρήση υπερπυκνωτών σαν συσκευές αποθήκευσης, που μπορεί να είναι ενσωματωμένες στα οχήματα, τοποθετημένες στους υποσταθμούς ή καταναμημένες στο σιδηροδρομικό δίκτυο, φαίνεται να αποτελεί μία ισχυρή λύση για αποτελεσματική και έγκαιρη αποθήκευση ενέργειας, για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της χρησιμοποιούμενης ενέργειας, για τη σταθεροποίηση της τάσης των γραμμών, και για την κανονικοποίηση των αιχμών. Πιο συγκεκριμένα, οι συσκευές αποθήκευσης, κατάλληλα ελεγχόμενες από σύγχρονους μετατροπείς ισχύος, μπορούν να διαδραματίσουν πολύ σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση της πρόκλησης για την αύξηση της παγκόσμιας εξοικονόμησης ενέργειας, καθώς συνιστούν μία από τις πιο υποσχόμενες εναλλακτικές για την εξασφάλιση καλύτερων αποτελεσμάτων όσον αφορά την ποιότητα της ενέργειας αλλά και την αξιοπιστία του συστήματος. Τα οφέλη αυτά έχουν πείσει τους σχεδιαστές και τους ερευνητές να αναβαθμίσουν τα ηλεκτρικά συστήματα, καθώς το οικονομικό κόστος της επένδυσης αυτής αντισταθμίζεται από τη μικρή περίοδο οικονομικής απόσβεσης μιας τέτοιας επένδυσης.

Τα οφέλη που σχετίζονται με την εισαγωγή και τη λειτουργία συστημάτων αποθήκευσης που στηρίζονται στη χρήση υπερπυκνωτών, ωστόσο, εξαρτώνται τόσο από ατομική δράση της κάθε μονάδας αποθήκευσης όσο και από τη συνεργατική δράση των μονάδων αυτών. Συγκεκριμένα, η ροή ισχύος στο σύστημα (από και προς την κάθε συσκευή) πρέπει να σχεδιάζεται με προσοχή και να ελέγχεται σε ακολουθία με μία ευρεία πολιτική διαχείρισης και αρχιτεκτονικές αποδοτικού ελέγχου. Ο κοινός στόχος που απαιτείται από τους αλγόριθμους ελέγχου, είναι να προσαρμόσουν τις ενέργειές τους ώστε να ανταποκρίνονται

επαρκώς στις πολλαπλές μεταβλητές και στις κρίσιμες συνθήκες (χαμηλά επίπεδα φόρτισης, υψηλά ρεύματα, υπερτάσεις) με μία προκαθορισμένη σειρά προτεραιότητας.

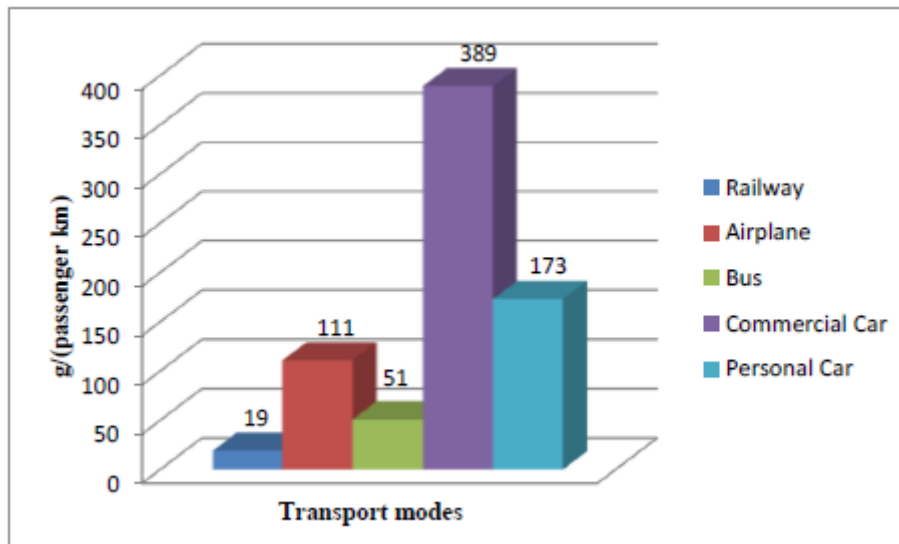
Εξαιτίας της εμπιστευτικότητας που αφορά τη σχεδίαση του προϊόντος, όλες οι δημοσιεύσεις και οι διαφημίσεις που σχετίζονται με τα προϊόντα ενεργειακής αποθήκευσης που διατίθενται από τις διάφορες εταιρίες που ασχολούνται με τον συγκεκριμένο τομέα μεταφορών, παρουσιάζουν κατά κύριο λόγο τα πλεονεκτήματα ενώ καταδεικνύουν λιγιστά μόνο μειονεκτήματα. Επίσης δεν αναφέρουν λεπτομερειακά τις τεχνικές σχεδίασης, ελέγχου και σύνδεσης των συσκευών αυτών, ή ποια πλατφόρμα ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής ισχύος με τις ηλεκτροφόρες σιδηροδρομικές γραμμές. Από την άλλη πλευρά, πολλά άρθρα που έχουν δημοσιευτεί πρόσφατα από ανεξάρτητες ερευνητικές ομάδες, που δεν συνεργάζονται απευθείας με τους κατασκευαστές, έχουν τονίσει θέματα που αφορούν τόσο τις στρατηγικές σχεδιασμού και ελέγχου των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας για αστικές σιδηροδρομικές εφαρμογές. Ωστόσο, παρόλο τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών προτείνουν μία ευρεία γκάμα τεχνολογικών λύσεων και διαφορετικών τύπων ελέγχου, κάποιες από τις οποίες χρησιμοποιούνται σε πρωτότυπες εφαρμογές, δεν έχουν αξιοποιηθεί με έναν ολοκληρωμένο, εμπειριστατωμένο και οργανικό τρόπο για την εισαγωγή τέτοιων συστημάτων αποθήκευσης στο κεντρικό αστικό δίκτυο. Πάνω από όλα όμως, το σημαντικότερο πρόβλημα είναι ότι οι περισσότερες στρατηγικές ελέγχου δεν έχουν επαληθευτεί και πιστοποιηθεί από μία ενδεδειγμένη σειρά πειραματικών ελέγχου.

1.1 Δημόσιες Σιδηροδρομικές Μεταφορές

Η χρήση σιδηροδρομικών μέσων μεταφοράς αποτελεί μία πολύ παλιά ιδέα. Όταν η ιδέα αυτή άρχισε να υλοποιείται, οι σιδηρόδρομοι χρησιμοποιούνταν κυρίως στα ορυχεία της κεντρικής Ευρώπης, όπου είχαν αρχίσει να εφαρμόζονται διαφορετικά μέσα σταθερής τροχιάς. Η χρήση τους ήταν περιορισμένη μέχρι και την ανακάλυψη του ατμοκινητήρα. Μέχρι και τον 18^ο αιώνα, η ανάπτυξη του σιδηροδρόμου είχε επιταχυνθεί σημαντικά και μέχρι σήμερα, τον 21^ο αιώνα, έχει καταστεί το πιο αποτελεσματικό μέσο μεταφοράς για μεσαίες αποστάσεις, λόγω της σημαντικής αναβάθμισης της υψηλής ταχύτητας μετακίνησης που προσφέρει.

Οι σιδηρόδρομοι έχουν συντελέσει ένα σημαντικό κοινωνικό ρόλο στις δημόσιες μαζικές συγκοινωνίες. Παρόλη τη μεγάλη κοινωνική προσφορά του τομέα των μηχανοκίνητων μεταφορικών μέσων στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, τα ηλεκτροφόρα σιδηροδρομικά δίκτυα άρχισαν εκ νέου να αναπτύσσονται σημαντικά σαν αποτέλεσμα της σύγχρονης τάσης για εξοικονόμηση ενέργειας περιβαλλοντικά βιώσιμες μεταφορές.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των ηλεκτροκίνητων σιδηροδρόμων σε σχέση με άλλα μέσα μεταφοράς είναι η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτρέπει την αξιοποίηση μιας μεγάλης ποικιλίας πρωτογενών ενεργειακών πόρων. Αυτός είναι επίσης ο βασικός λόγος για την πρόσφατη ραγδαία τεχνολογική πρόοδο των ηλεκτρικών οχημάτων στις αυτοκινητοβιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένου υβριδικών και βασισμένων σε τεχνολογίες fuel-cell οχημάτων. Η αύξηση του ποσοστού των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα μηχανοκίνητα ή πετρελαιοκίνητα εκτιμάται ότι θα επιφέρει μία σημαντική μείωση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα λόγω των μεταφορών όπως φαίνεται στο γράφημα 1.1



Γράφημα 1.1 – Εκπομπές CO₂ από τα διαφορετικά μέσα μεταφοράς [18]

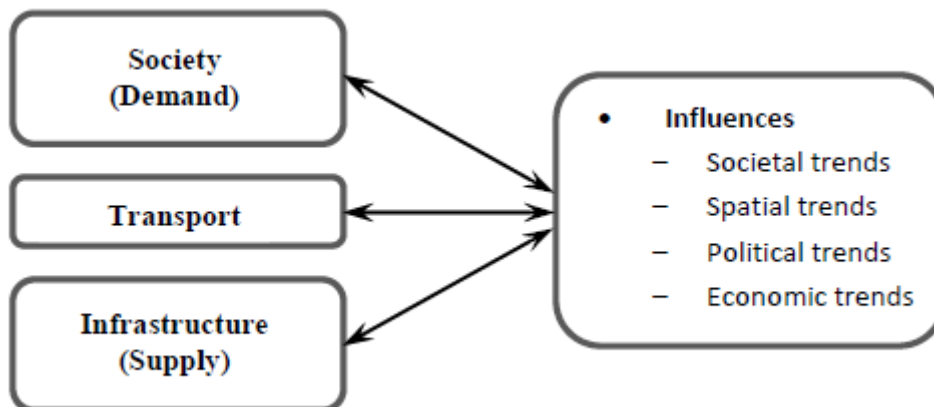
Από την οπτική αυτή, οι προοπτικές που προσφέρουν οι δημόσιες μεταφορές καθίστανται ζωτικής σημασίας. Οι δημόσιες μεταφορές είναι, και πρέπει να είναι, η καρδιά της κάθε πόλης σήμερα. Για δεκαετίες, οι άνθρωποι παγκοσμίως απολάμβαναν υπηρεσίες αξιόπιστης και έγκαιρης δημόσιας μεταφοράς προς ποικίλους προορισμούς στις αστικές περιοχές. Χωρίς αυτές, πόλεις όπως η Ρώμη, η Νέα Υόρκη, το Πεκίνο και το Άμστερνταμ δεν θα μπορούσαν να είναι λειτουργικές. Μία κοινή παρεξήγηση όσον αφορά τις δημόσιες συγκοινωνίες είναι ο χρόνος άφιξης σε ένα προορισμό σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο που απαιτείται χρησιμοποιώντας ένα Ι.Χ. Όταν λειτουργεί αποτελεσματικά, οι δημόσιες συγκοινωνίες μπορούν να είναι ταχύτερες και πιο αξιόπιστες. Επίσης οι δημόσιες συγκοινωνίες εξ' ορισμού μπορούν να εξυπηρετούν περισσότερους επιβάτες σε μικρότερο χρονικό διάστημα εξ' αιτίας της μεταφορικής ζήτησης του συστήματος. Αυτό μπορεί να επιλύσει πολλά κυκλοφοριακά προβλήματα (περιβαλλοντικές συνέπειες, κίνηση, φωτοχημικό φαινόμενο κτλ.). Η πρόκληση που οι περισσότερες πόλεις αντιμετωπίζουν σήμερα είναι να αυξήσουν το πλήθος των πολιτών που χρησιμοποιούν τις δημόσιες συγκοινωνίες για τις μετακινήσεις τους. Εστιάζοντας σε ένα μεγάλο κομμάτι της αγοράς των δημόσιων μεταφορών, ο αστικός σιδηρόδρομος αποτελεί την καρδιά κάθε δημόσιου συγκοινωνιακού συστήματος των μεγάλων πόλεων, τη στιγμή που τα λεωφορεία, ακόμα και τα ποδήλατα, καθιστούν τα «αγγεία» του συστήματος εξαιτίας της ευελιξίας που μπορούν να παρέχουν στους επιβάτες.

Πόλεις σε όλο τον κόσμο έρχονται αντιμέτωπες με το μεγάλο κόστος των δημόσιων υποδομών και αναζητούν απαντήσεις σχετικά με το πώς θα εξασφαλίσουν τα κεφάλαια για την παροχή τέτοιων υπηρεσιών ή πως θα βρουν καλύτερες εναλλακτικές. Αντίστοιχα, οι κυβερνήσεις παγκοσμίως κατανοούν ότι απαιτούνται συγκεκριμένες πολιτικές και μέτρα, αλλά το ερώτημα που τίθεται είναι σε ποια κλίμακα και σε ποιο εύρος; Παράλληλα όλο και περισσότεροι επιβάτες χρησιμοποιούν τη δημόσια συγκοινωνία για τη μετάβασή τους από και προς το χώρο εργασίας τους, η αύξηση των επιβατών των αστικών σιδηροδρομικών μέσων μεταφοράς λειτουργεί σαν μέσο αποσυμφόρησης του κυκλοφοριακού προβλήματος και κατ' επέκταση περιορίζει την επιβάρυνση του περιβάλλοντος και συγχρόνως ενεργοποιεί για τις πόλεις ένα μηχανισμό ανεύρεσης κεφαλαίων για την αναβάθμιση του αστικού δικτύου συγκοινωνίας.

1.2 Ορισμός και Κατηγοριοποίηση των Δημόσιων Μεταφορών

Όπως ορίζεται ευρέως, μεταφορά είναι η μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών από ένα μέρος σε ένα άλλο [2]. Η εξέλιξη από την πεζοπορία στου ανθρώπου σε υψηλής ταχύτητας σιδηροδρόμους, η μεταφορές, τόσο τα μέσα όσο και οι υποδομές, έχει αλλάξει τον τρόπο που οι κοινωνία αντιδρά στις μετακινήσεις. Αυτή η καινοτομία στην τεχνολογία δημιουργεί πρότυπα κατεύθυνσης που επηρεάζουν τον τρόπο που η κοινωνία μετακινείται από το σημείο Α στο σημείο Β. Κατά συνέπεια, η υπερβολική χρήση από τους ανθρώπους σε συνδυασμό με τα μέσα και τις υποδομές δημιουργούν κυκλοφοριακή συμφόρηση. Ο ερευνητής Ennio Cascetta πρότεινε ένα βασικό μοντέλο που περιγράφει πως οι μεταφορές επιδρούν και διαμορφώνουν συγκεκριμένες τάσεις (Γράφημα 1.2) [2]:

- **Ζήτηση:** Η ανάγκη για μεταφορά εξαρτάται από το μέγεθος του πληθυσμού μίας πόλης και το περιβάλλον της αγοράς, το οποίο επηρεάζει την έκταση και την ένταση των ενδιαφερόμενων. Η επιλογή του μεταφορικού μέσου είναι μία βαρυσήμαντη επιλογή.
- **Μεταφορά:** Μπορεί να συμπεριλάβει ποικίλες επιλογές όσον αφορά το μεταφορικό μέσο προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα σε ένα σύστημα. Το σύστημα εξ ολοκλήρου έχει την ευθύνη για τη μεταφορά εμπορευμάτων και ανθρώπων σε αέρα, ξηρά και θάλασσα.
- **Υποδομές:** Συμπεριλαμβάνουν όλα τα συγκοινωνιακά δίκτυα (δρόμους, σιδηροδρόμους, κανάλια, αεροδιαδρόμους κτλ.) καθώς και τερματικούς κόμβους (λιμάνια, σιδηροδρομικούς σταθμούς, αεροδρόμια κτλ.).



Γράφημα 1.2 – Μοντέλο επιρροής Μεταφορών [2]

«Οι δημόσιες μεταφορές (που επίσης ονομάζονται και συγκοινωνίες, δημόσιες συγκοινωνίες ή και μαζικές συγκοινωνίες) είναι οι μεταφορές με ένα όχημα που παρέχει ομαλή και συνεχή μεταφορά γενικού ή ειδικού σκοπού στο ευρύ κοινό, αλλά δεν περιλαμβάνει σχολικά λεωφορεία, πτήσεις charter ή αμιγώς τουριστικές υπηρεσίες» [3]. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι δημόσιες αστικές σιδηροδρομικές συγκοινωνίες.

Οι ποικίλες σιδηροδρομικές υποδομές παρουσιάζουν διαφορές που εξαρτώνται από παραμέτρους, όπως η ελάχιστη συχνότητα, η μέση και η μέγιστη ταχύτητα, η απόσταση, και η συνολική ταχύτητα του ταξιδιού (βλ. Πίνακα 1.1) [4]:

Σιδηρόδρομος: το μεταφορικό δίκτυο για ανθρώπους και/ή αγαθά, ακόμα και για μεγάλες αποστάσεις καθώς και υψηλής συχνότητας κίνησης, δεσμευόμενο και καθοδηγούμενο σε έναν αυστηρά ατομικό και προκαθορισμένο δρόμο, όπου η κυκλοφορία ελέγχεται με σήματα.

Αστικές ή προαστιακές σιδηροδρομικές υπηρεσίες: το μεταφορικό δίκτυο που χρησιμοποιεί δρομολόγια αστικών αλλά και προαστιακών σιδηροδρομικών γραμμών όπως ένα μητροπολιτικό τραμ, το οποίο εξυπηρετεί μία ακτίνα έως και 50 km από το κέντρο της πόλης.

Υπεραστικές σιδηροδρομικές υπηρεσίες: το μεταφορικό δίκτυο το οποίο χρησιμοποιεί αστικούς, περιαστικούς ή υπεραστικούς σιδηροδρομικούς συρμούς με τακτικά δρομολόγια και ηπειρωτική προέκταση. Για τη μείωση του χρόνου ταξιδιού, συχνά οι στάσεις που χαρακτηρίζονται ως «αστικές» προσπερνιούνται, ενώ οι «σταθμοί-κόμβοι» χρησιμοποιούνται για ανταλλαγές επιβατών και εμπορευμάτων με προαστιακά σιδηροδρομικά δίκτυα και με άλλα τοπικά δημόσια μέσα μεταφοράς. Το δίκτυο αυτό εξυπηρετεί περιοχές που εκτείνονται έως και 150 km από τα αστικά κέντρα.

Μετρό: το μεταφορικό δίκτυο που αφορά αποκλειστικά τις μετακινήσεις ανθρώπων, έχει μεγάλης κίνησης και υψηλής συχνότητας δρομολόγια και αποτελείται από αμαξοστοιχίες που ακολουθούν αυστηρώς καθορισμένες τροχιές, η κίνησή τους σε αυτές ελέγχεται από σήματα και είναι τελείως ανεξάρτητη από οποιαδήποτε άλλη κυκλοφορία οχημάτων.

Τραμ: το μεταφορικό δίκτυο που αφορά τόσο ανθρώπους όσο και προϊόντα σε αστικές και/ή μητροπολιτικές περιοχές, αποτελείται από συρμούς που ακολουθούν προκαθορισμένες τροχιές και συνήθως κυκλοφορούν σε κανονικούς δρόμους με αποτέλεσμα να ακολουθούν τον κλασικό κυκλοφοριακό κώδικα.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τη μελέτη του δικτύου του Μετρό.

Transportation System	Freq. min. (min)	Freq. max. (min)	Freq. avg. (min)	Distance stop/station (m)	Revenue Speed (km/h)	Carrying capacity min. (phpd)	Carrying capacity max. (phpd)	Carrying capacity avg. (phpd)	Convoy capacity (seats)	Convoy length (m)
Regional Rail serv.	22,5	30,0	15,0	1500 ÷ 4000	50 ÷ 85	3000	6000	4000	1500	200
Suburban Rail serv.	10,0	15,0	5,0	700 ÷ 2000	35 ÷ 50	6000	18000	9000	1500	200
Metro	4,0	5,0	3,0	600 ÷ 1000	25 ÷ 30	14400	24000	18000	1200	150
Light Metro	3,0	5,0	1,0	500 ÷ 800	25 ÷ 30	4800	24000	8000	400	80
Fast Tramway	4,0	5,0	3,0	350 ÷ 500	20 ÷ 25	2000	3600	2700	180	60
Tramway	7,5	10,0	5,0	200 ÷ 350	15 ÷ 20	1000	2200	1400	180	40

phpd: passengers per hour and per direction

Πίνακας 1.1 – Βασικά χαρακτηριστικά των αστικών μεταφορικών δικτύων

1.3 Δίκτυο Μετρό

Όπως διατυπώθηκε και παραπάνω, σαν μετρό μπορεί να οριστεί ένα δίκτυο μαζικής συγκοινωνίας υψηλής χωρητικότητας και συχνότητας, που αποτελείται από μηχανοκίνητα βαγόνια ή/και αμαξοστοιχίες που κινούνται σε σιδηροτροχιές, οι πορείες των οποίων είναι εντελώς διαχωρισμένες από την κυκλοφορία οποιουδήποτε άλλου οχήματος και η λειτουργία του δικτύου αυτού ελέγχεται από σήματα [4].

Η Παγκόσμια Ένωση Δημόσιων Μεταφορών (UITP) καθορίζει ότι μετρό είναι «ένα τοπικό σιδηροδρομικό ηλεκτροκίνητο μέσο μεταφοράς που έχει μια ολοκληρωμένη και συνεχή πορεία αυστηρώς ατομική (με υπόγεια ή επιφανειακά τμήματα)» [5]. Τα μετρό είναι απόλυτα

απομονωμένα από τα υπόλοιπα κυκλοφοριακά συστήματα, τους δρόμους και τους πεζούς. Η διαδρομές που ακολουθούν μπορεί να περιέχουν τούνελ, κοιλαδογέφυρες ή ακόμα και επιφανειακά τμήματα, τα οποία όμως είναι μη προσεγγίσιμα από εξωτερικά οχήματα ή ανθρώπους. Ο μητροπολιτικός σιδηρόδρομος αποτελεί το βέλτιστο δημόσιο μεταφορικό μέσο που προσφέρει υψηλής χωρητικότητας μεταφορικά δίκτυα. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι το μετρό, όντας ένα απολύτως αυτόνομο σύστημα, μπορεί να έχει μεγάλη ελευθερία επιλογής σχετικά με το μήκος και το πλάτος του οχήματος και κατά συνέπεια μπορεί να έχει μεγάλη χωρητικότητα (πάνω από 30.000 επιβάτες ανά ώρα και ανά κατεύθυνση), όπως χαρακτηριστικά σημειώνει και η UITP. Οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών συνήθως κυμαίνονται πάνω από 1 km και καθώς δεν απαιτείται καμία ευθυγράμμιση με τους υπάρχοντες δρόμους, το τόξο των εκάστοτε στροφών όπως και η κλίση της διαδρομής μπορούν να σχεδιαστούν χωρίς περιορισμούς, ώστε να καθίσταται εφικτή η επίτευξη υψηλότερης ταχύτητας [6].

Το πλήθος των επιβατών που μπορεί να εξυπηρετήσει ένα δίκτυο μετρό συχνά είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τον αριθμό των επιβατών των υπόλοιπων μέσων δημόσιας συγκοινωνίας. Για το λόγο αυτό θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι δημόσιες μεταφορές στηρίζονται στην εύρυθμη λειτουργία του δικτύου μετρό, καθώς οποιαδήποτε διακοπή στο μετρό θα μπορούσε να οδηγήσει ακόμα και σε κατάρρευση το σύνολο του συγκοινωνιακού δίκτυο μιας πόλης.

1.4 Περιβαλλοντικά Φιλικές Μετακινήσεις

Σήμερα, δίνεται όλο και μεγαλύτερη έμφαση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όλων των δημοσίων πλάνων και αποφάσεων. Ωστόσο, η αύξηση της γνώσης σχετικά με τις κλιματικές αλλαγές και την μόλυνση του πλανήτη καθιστούν την περιβαλλοντικά βιώσιμη ή αλλιώς πράσινη ανάπτυξη ακόμα σημαντικότερη σε όλους τους τεχνολογικούς κλάδους.

Για τον ορισμό της πράσινης ανάπτυξης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον ορισμό της έκθεσης της επιτροπής Brundtland του 1987 σαν «την ανάπτυξη που ικανοποιεί τις παρούσες ανάγκες χωρίς ταυτόχρονα να περιορίζει την δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους». Στηριζόμενος στον ορισμό αυτό ο Munsasinghe δημιούργησε μία από τις πιο διάσημες και ευρέως αναγνωρίσιμες εικόνες που αφορούν την περιβαλλοντικά βιώσιμη ανάπτυξη: «Το Τρίγωνο της Πράσινης Ανάπτυξης» [7]. Ο Ralph P. Hall, δημιούργησε ένα υπομοντέλο (γράφημα 1.3), όπου απεικονίζεται το τι μπορεί να κάνει η κοινωνία προκειμένου να επιτύχει αυτούς τους στόχους. Στο σημείο αυτό, η πράσινη ανάπτυξη κατακεραματίζεται σε τρία επιμέρους συστατικά μέρη: περιβαλλοντική προστασία, οικονομική βιωσιμότητα, κοινωνική δικαιοσύνη [8].

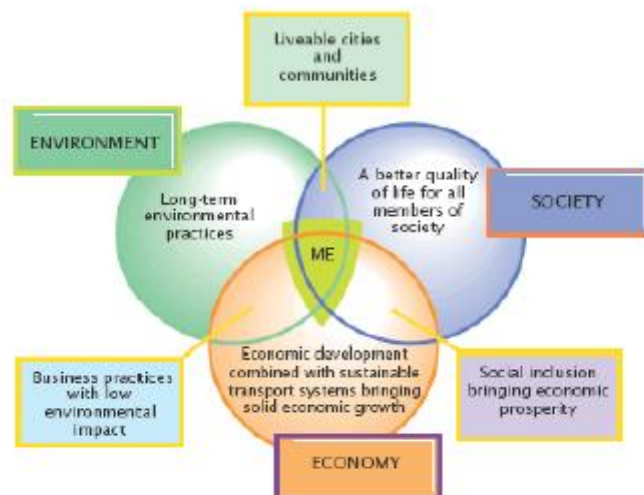
Ο πυρήνας της θεωρίας περί πράσινης ανάπτυξης στηρίζεται στην συνειδητοποίηση της ανάγκης για αύξηση της κοινωνικής ευημερίας μαζί με την ταυτόχρονη μείωση των απαιτούμενων πόρων για την επίτευξή της. Η βασική ανησυχία έγκυται στην περιβαλλοντική υποβάθμιση λόγω της παραγωγής και κατανάλωσης που δημιουργεί η προσπάθεια για ικανοποίηση των ανθρώπινων αναγκών. Συνοψίζοντας, η πράσινη ανάπτυξη αποτελεί τη μόνη προσέγγιση όπου οι άνθρωποι μπορούν να ακολουθήσουν για την εξασφάλιση των μελλοντικών γενεών. Χωρίς αυτήν, θα εξαντληθούν όλοι οι φυσικοί πόροι της Γης, με αποτέλεσμα τα συνθετικά υλικά να είναι οι μόνες διαθέσιμες πρώτες ύλες.

Η πράσινη ανάπτυξη, λοιπόν, διαδραματίζει ένα ζωτικής σημασίας ρόλο στις σιδηροδρομικές συγκοινωνίες. Καθώς μελλοντικός στόχος των περισσότερων κρατών αποτελεί η περιβαλλοντικά φιλική μετακίνηση, τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα παρέχουν ένα μέσο μεταφοράς το οποίο χρησιμοποιεί και θα συνεχίσει να το χρησιμοποιεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Μελέτες έχουν δείξει ο σιδηρόδρομος είναι εξ ορισμού ένα πιο αποδοτικό μέσο

μεταφοράς σε σχέση με τα οδικά μέσα και σε συνδυασμό με τη χρήση ανανεώσιμης ενέργειας, μπορεί να αποτελέσει ένα ανεξάντλητο μέσο μεταφοράς για τις επόμενες γενιές, μειώνοντας παράλληλα τα επίπεδα των αερίων ρύπων.

Συναντώνται, ωστόσο, αρκετές δυσκολίες όσον αφορά την εφαρμογή στην πράξη πλάνων φιλικών προς το περιβάλλον συγκοινωνιών. Καθώς ο πληθυσμός αυξάνεται, οι απαιτήσεις προς τις κυβερνήσεις αυξάνονται. Βασικά, η ισορροπία μεταξύ κοινωνίας και κυβέρνησης για τη δημιουργία και την επένδυση στο τομέα των πράσινων μεταφορών μπορεί να αποδειχθεί το ο απαραίτητος εξισορροπητικός παράγοντας. Με βάση αυτό, οι κυβερνήσεις πρέπει να ενεργοποιηθούν προς την κατεύθυνση της λήψης μέτρων προκειμένου να αυξήσουν το πλήθος των επιβατών που χρησιμοποιούν φιλικά προς το περιβάλλον μέσα μεταφοράς.

Κλείνοντας, καθίσταται σαφές ότι οι αστικές σιδηροδρομικές συγκοινωνίες διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στην πράσινη ανάπτυξη στις μητροπολιτικές περιοχές για πολλούς λόγους, αλλά κυρίως εξαιτίας της μικρής κατανάλωσης ενέργειας ανά επιβάτη. Επιπλέον, προκειμένου να διατηρήσουν τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς, σε ένα κλίμα που χαρακτηρίζεται από αυξανόμενες ανάγκες χωρητικότητας και ενεργειακού κόστους, είναι απαραίτητη η επιπλέον βελτίωση της ενεργειακής τους αποδοτικότητας.



Γράφημα 1.3 – Τρίγωνο Πράσινης Ανάπτυξης

1.5 Η έννοια της Ενεργειακής Απόδοσης στα Σιδηροδρομικά Δίκτυα

Η Ενεργειακή Απόδοση αποτελεί ένα θέμα με συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις σιδηροδρομικές εταιρίες, προκειμένου να αυξήσουν την ανταγωνιστικότητά τους. Σε περίπτωση που η φήμη του σιδηροδρόμου σαν το πλέον περιβαλλοντικά φιλικό μέσο μεταφοράς, κλυδωνιστεί στο μέλλον, αυτό μπορεί να επιφέρει σημαντική πτώση στο μερίδιο της αγοράς των μεταφορών που κατέχουν οι σιδηρόδρομοι. Επιπλέον, οι διαδικασίες απελευθέρωσης της αγοράς και ιδιωτικοποίησης των δημόσιων συγκοινωνιών ασκούν πιέσεις στις σιδηροδρομικές εταιρίες προκειμένου να είναι όσο το δυνατό περισσότερο οικονομικά αποτελεσματικές και ανταγωνιστικές.

Υπάρχει μία ευρέως αποδεκτή άποψη μεταξύ των ειδικών του χώρου, ότι η προοπτική περαιτέρω εξοικονόμησης ενέργειας στους σιδηροδρόμους είναι μεγάλη. Οι περισσότεροι επενδυτές του κλάδου έχουν εκκινήσει πρωτοβουλίες για να εκμεταλλευτούν τη συγκεκριμένη

προοπτική. Οι συστηματικές προσεγγίσεις είναι σπάνιες, καθώς η ανταλλαγή πληροφοριών και τεχνολογικών γνώσεων σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα είναι περιορισμένη αφού δεν υπάρχουν αρκετές πραγματικές μετρήσεις.

Υπάρχει μία γενική σύγκλιση απόψεων όσον αφορά το γεγονός ανοίγονται αξιοσημείωτα περιθώρια για εξοικονόμηση ενέργειας στις σιδηροδρομικές συγκοινωνίες, τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Παρόλο που οι τεχνολογικές βελτιώσεις στα σιδηροδρομικά οχήματα απαιτούν σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα ώστε να διαδοθούν και να εφαρμοστούν, υπάρχουν αρκετές πολλά υποσχόμενες τόσο βραχυπρόθεσμες όσο και μεσοπρόθεσμες στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας που αφορούν κυρίως τον βέλτιστο έλεγχο και στην αποτελεσματικότερη χρήση των υπάρχουσών τεχνολογιών ή ακόμα και μικρές βελτιώσεις τους. Οι περισσότερες από αυτές απαιτούν μόνο μικρής κλίμακας επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες που συχνά μπορούν να δοκιμαστούν σε χαμηλού ρίσκου συστήματα, όπως εκπαιδευτικά προγράμματα. Η αυξανόμενη χρήση στρατηγικών αποδοτικής οδήγησης καθώς και η αξιοποίηση της ανατροφοδοτούμενης ενέργειας πέδησης είναι τα πιο αποδοτικά μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας. Από μία πιο μακροπρόθεσμη θεώρηση, η εισαγωγή καινοτόμων τεχνολογιών στους συρμούς, η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των οχημάτων και η βελτιστοποίηση των σιδηροδρόμων σαν σύστημα θα πυροδοτήσουν μια περαιτέρω πρόοδο προς ενεργειακή και οικονομική αποτελεσματικότητα των σιδηροδρομικών υπηρεσιών.

Η δημιουργία κατάλληλων συνθηκών αποδεικνύεται εξίσου σημαντικός παράγοντας με την ερευνητική πρόοδο. Οι συνθήκες αυτές περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό συγκεκριμένων στρατηγικών, και αυστηρά καθορισμένων οικονομικών σχέσεων μεταξύ των λειτουργικών τμημάτων των σιδηροδρομικών εταιριών. Η ανταποδοτικότητα και η κερδοφορία, βέβαια, των εταιριών αυτών εξαρτάται άμεσα με επιπτώσεις και εξωγενών παραγόντων της σιδηροδρομικής αγοράς, όπως η διακύμανση των τιμών της ενέργειας.

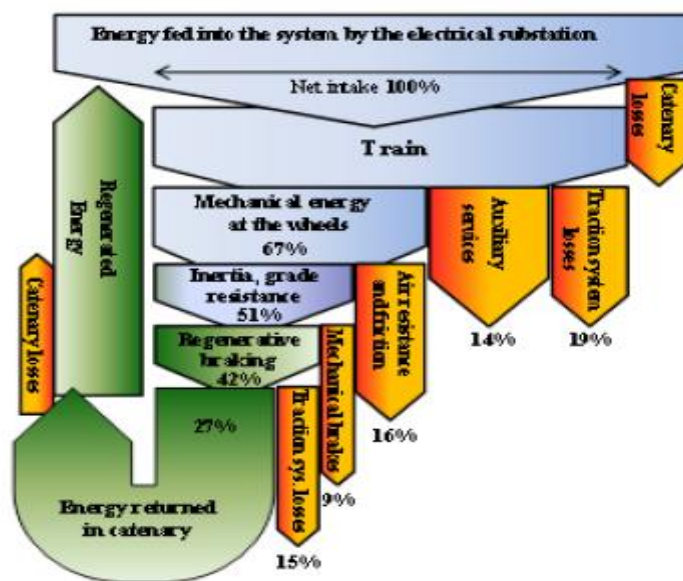
1.6 Κατανάλωση Ενέργειας των Τρένων

Οι ενεργειακές απαιτήσεις ενός σιδηροδρομικού οχήματος μπορεί να κατανεμηθεί σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, χρησιμοποιώντας ως κριτήριο το είδος των απωλειών:

- **Μηχανικές απώλειες:** Η μηχανική ισχύς στους τροχούς πρέπει να ξεπεράσει μία σειρά από αντιστάσεις που παρατίθενται από το τρένο (τριβή, αδράνεια και αντίσταση κίνησης).
- **Απώλειες συστημάτων κίνησης:** Η μηχανική ισχύς που παρέχεται από τους διάφορους μηχανισμούς πέδησης των συρμών, προκαλώντας ένα σημαντικό ποσό θερμικών απωλειών.
- **Απώλειες βοηθητικών υπηρεσιών:** Αυτές περιλαμβάνουν βοηθητικές λειτουργίες, όπως ο εξαερισμός των βαγονιών. Επιπλέον, ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης οφείλεται στην εξασφάλιση συγκεκριμένων ανέσεων για τους επιβάτες (θέρμανση, φωτισμός, τουαλέτες κτλ.).
- **Απώλειες γραμμών μεταφοράς:** Στην περίπτωση ηλεκτροκίνητων συρμών, ένα μέρος της τροφοδοτούμενης ενέργειας δεν φτάνει ποτέ στα οχήματα, αλλά χάνεται στην πορεία από τους υποσταθμούς στο τρένο εξαιτίας των αντιστάσεων της γραμμής μεταφοράς του ηλεκτρικού δικτύου.

Το γράφημα 1.4 αναπαριστά την ροή ενέργειας στη γενική περίπτωση ενός αστικού ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου συνεχούς ρεύματος, όπου τα τρένα παράγουν

συγκεκριμένα ποσά ενέργειας κατά τη διάρκεια της πέδησης (ανατροφοδοτούμενη ενέργεια πέδησης). Η ενέργεια αυτή επιστρέφει πίσω στο σύστημα και επαναχρησιμοποιείται από το ίδιο το τρένο που την παράγει κατά την επιβράδυνσή του για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του βοηθητικού εξοπλισμού του ή από άλλα τρένα. Το μπλε βέλος «Αδράνεια και Τριβή» (“Inertia, grade resistance”) χωρίζεται σε τρία βέλη, ένα για την ενέργεια που παράγεται κατά την πέδηση, ένα για τις θερμικές απώλειες στους συρμούς και ένα για το ποσό της ενέργειας το οποίο εξαιτίας τεχνικών και λειτουργικών λόγων δεν μπορεί να αξιοποιηθεί. Αν τα τρένα δεν έχουν τη δυνατότητα να παράξουν ενέργεια κατά την πέδησή τους, τότε το πράσινο βέλος που εκφράζει την ανατροφοδότηση της ενέργειας (“Energy returned in catenary”) αγνοείται. Το σύνολο της ενέργειας που καταναλώνεται από τα τρένα παρέχεται από τους υποσταθμούς και επιπλέον τα ποσά της ενέργειας που χρησιμοποιείται για να ξεπεραστεί η αδράνεια και η τριβή κατά την εκκίνηση μετατρέπεται σε θερμότητα. Στο γράφημα 1.4 παρουσιάζεται η περίπτωση ενός τρένου που μπορεί να παράγει ενέργεια κατά την πέδηση.

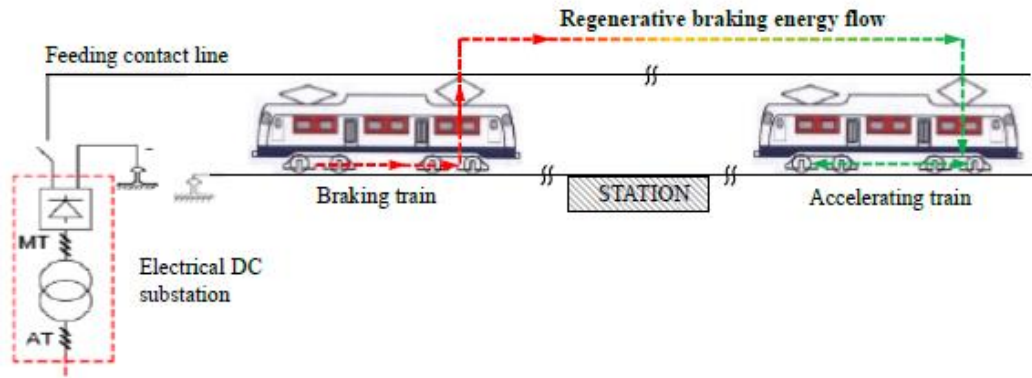


Γράφημα 1.4 – Ροή ενέργειας σε ένα τυπικό αστικό σιδηροδρομικό όχημα

1.7 Αποτελεσματικότερη χρήση της Ανατροφοδοτούμενης Ενέργειας Πέδησης

Εκτός από αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα για τη βελτίωση της εξοικονόμησης ενέργειας, οι σύγχρονες τεχνολογίες καθιστούν τη χρήση ανατροφοδοτούμενης ενέργειας πέδησης μία πολλά υποσχόμενη λύση στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ηλεκτρικών αστικών μεταφορικών δικτύων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.5.

Σε γενικές γραμμές, η χρήση ηλεκτρικών φρένων, που συνήθως αναφέρεται και ως δυναμική πέδηση, επιτρέπει σε συνηθισμένες συνθήκες λειτουργίας, τον περιορισμό της χρήσης κλασικών μηχανισμών πέδησης (δισκόφρενα), οι οποίοι από τη φύση τους έχουν και σημαντικό κόστος συντήρησης.



Εικόνα 1.5 – Αναπαράσταση της ανταλλαγής ανατροφοδοτούμενης ενέργειας σε ένα αστικό σιδηροδρομικό δίκτυο [9]

Αυτό επιτρέπει έναν τεχνικά αποδοτικό τρόπο επίλυσης του προβλήματος πέδησης κατά τη διάρκεια κατηφορικών διαδρομών ή μικρής μείωσης της ταχύτητας, χωρίς τη δημιουργία σκόνης, θορύβου, θερμότητας ή οσμής. Η χρησιμοποίηση των ηλεκτρικών κινητήρων για την πέδηση, είναι επίσης μία προτιμητέα λύση τόσο στις αστικές όσο και στις προαστιακές γραμμές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές αποστάσεις μεταξύ των σταθμών και κατά συνέπεια πολύ συχνές επιβραδύνσεις.

Συνήθως κατά ανατροφοδοτική πέδηση, η παραγόμενη ενέργεια αρχικά χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση των βοηθητικών λειτουργιών του ίδιου του οχήματος.

Ωστόσο, στα συνεχούς ρεύματος ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα, που συνήθως χρησιμοποιούνται στις αστικές σιδηροδρομικές συγκοινωνίες, η ανατροφοδοτούμενη ενέργεια δεν γίνεται πάντα αποδεκτή από το σύστημα, αν οι υποσταθμοί λειτουργούν σε ένα και μόνο συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος, και κατά συνέπεια καταναλώνεται σε ειδικού σκοπού αντιστάσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύστημα, όπως συνηθίζουμε να λέμε, είναι παθητικό ή «μη δεκτικό». Στην πραγματικότητα, η δεκτικότητα του δικτύου μπορεί να οριστεί σαν το ποσοστό της συνολικής ενέργειας που επιστρέφει πίσω στις γραμμές σε σχέση με το δυνητικό ποσό της ενέργειας που θα μπορούσε να παραχθεί κατά τη διαδικασία της πέδησης.

Μια σειρά από μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή ανατροφοδοτικής πέδησης στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα, μπορεί δυνητικά να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας από 10%-42%, με το ποσοστό αυτό να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του δικτύου (να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η κλίση των διαδρομών επηρεάζει σημαντικά το ποσό της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί) [9-12,13-28]. Παρόλο που οι μελέτες αυτές έχουν δείξει ότι το μεγαλύτερο μέρος της καταναλισκόμενης ενέργειας μπορεί να επιστρέψει στο δίκτυο, μετρήσεις καταδεικνύουν ότι μόνο το 19% της παραχθείσας ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί. Στην πραγματικότητα, η δυνατότητα του δικτύου παροχής ενέργειας να αποδέχεται την ανακτηθείσα ενέργεια δεν μπορεί να προσδιοριστεί με σαφήνεια, κυρίως της τυχαιότητας και πολυπλοκότητας των σχετικών παραμέτρων: το ποσό της ενέργειας που παράγεται από τη δυναμική πέδηση εξαρτάται από τη συχνότητα των δρομολογίων, το ενεργειακό προφίλ των τρένων, τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού δικτύου, την τάση των γραμμών, τη μορφολογία των διαδρομών, την απόσταση των υποσταθμών και την κατανάλωση ενέργειας των βοηθητικών εξοπλισμών του τρένου.

Αν αναλογιστούμε ότι η ενέργεια που ανακτάται στην ιδανική περίπτωση, εξαρτάται άμεσα από τη μορφολογία του σιδηροδρομικού δικτύου (κυρίως από την κλίση των διαδρομών) και τη συχνότητα των στάσεων και επομένως είναι διαφορετική για κάθε δίκτυο, μια προσεγγιστική μέθοδος για τη βελτίωση της δεκτικότητας του συστήματος είναι η αύξηση του

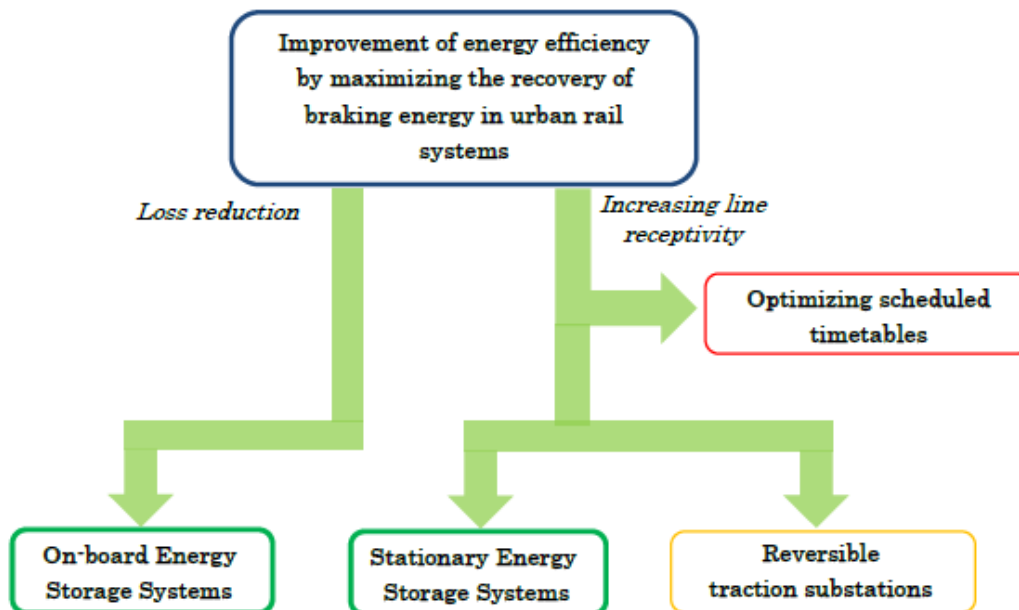
αριθμού των τρένων που επιταχύνουν και επιβραδύνουν ταυτόχρονα. Αυτό, βέβαια, προϋποθέτει ότι η παραγόμενη ενέργεια παρέχεται σε ένα κοντινό όχημα, που βρίσκεται στον ίδιο ενεργειακό τομέα (τροφοδοτείται από τον ίδιο υποσταθμό), και αυτό συμβαίνει μόνο στην περίπτωση που το όχημα αυτό επιταχύνεται. Επειδή υπάρχουν περιορισμοί στην αύξηση της συχνότητας του πλήθους των τρένων που λειτουργούν την ίδια στιγμή στο δίκτυο, που σχετίζεται με τη χρονική διαφορά που θα πρέπει να έχουν μεταξύ τους, παρατηρείται έλλειψη συγχρονισμού με αποτέλεσμα η περίσσεια ενέργεια να καταναλώνεται σε ροοστάτες ή να χρησιμοποιείται μηχανική πέδηση.

Έχουν προταθεί μία σειρά από τεχνικές προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αξιοποίηση της ανατροφοδοτούμενης ενέργειας πέδησης και ταυτόχρονα να περιοριστεί η χρήση των αντιστάσεων πέδησης. Βασικός στόχος τους είναι η βελτίωση της δεκτικότητας του συστήματος, καθιστώντας την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των οχημάτων ευκολότερη (π.χ. ζητώντας ενέργεια ακριβώς τη στιγμή που κάποιο τρένο επιβραδύνει) είτε επιστρέφοντας την παραγόμενη ενέργεια στο δίκτυο παροχής, είτε αποθηκεύοντας την σε κατάλληλα σχεδιασμένες συσκευές για μετέπειτα χρήση.

Μία πρώτη προσέγγιση, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σχετίζεται με τη λειτουργία του συστήματος και βασίζεται στον έλεγχο της κυκλοφορίας, τόσο σε επίπεδο κάθε τρένου ξεχωριστά (π.χ. ο έλεγχος της επίδοσης του τρένου όσον αφορά την ταχύτητα και την επιτάχυνση καθώς και την εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών οδήγησης) όσο και σε συνολικό επίπεδο (βελτιστοποιημένα δρομολόγια) με μια κεντρικά ελεγχόμενη ρύθμιση της κυκλοφορίας [29-33].

Μία δεύτερη επιλογή συνίσταται στον εξοπλισμό των υποσταθμών με DC/AC μετατροπείς με σκοπό την διοχέτευση της παραγόμενης ενέργειας απευθείας στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο (AC) [34-39]. Ένας αμφίδρομος υποσταθμός μπορεί είτε να χρησιμοποιεί ανορθωτές με θυρίστορ ή τριφασική γέφυρα πλήρους ανόρθωσης, οι οποίες έχουν το επιπλέον χαρακτηριστικό να αποκόπτουν τις αρμονικές υψηλής τάξης του δικτύου. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της επιλογής αυτής είναι ότι το κεντρικό AC ηλεκτρικό δίκτυο είναι εκ φύσεως δεκτικό, και κατά συνέπεια το σύνολο της παραγόμενης ενέργειας από την πέδηση να μπορεί δυνητικά να εκμεταλλευτεί. Από την άλλη πλευρά, το σημαντικότερο μειονέκτημα είναι ότι απαιτεί σημαντικό κόστος επένδυσης σε νέο εξοπλισμό και ταυτόχρονα επηρεάζει την διάταξη των υπάρχοντων υποσταθμών. Επιπλέον, το οικονομικό όφελος μίας τέτοιας επένδυσης συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητα πώλησης της ενέργειας στις δημόσιες εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας τη στιγμή που τόσο η τιμή όσο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ισχύος (συντελεστής ισχύος) καθορίζονται από αυτές.

Με βάση την παραπάνω προσέγγιση, η χρήση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας (ESS) θεωρείται το κυριότερο μέσο για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στις αστικές σιδηροδρομικές συγκοινωνίες. Η εγκατάσταση των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας είτε αυτές βρίσκονται πάνω στα τρένα, είτε στους υποσταθμούς ή καταναμημένες κατά μήκος του σιδηροδρομικού δικτύου, έχει σαν αποτέλεσμα το σύστημα τροφοδοσίας να λειτουργεί καλύτερα συνδυάζοντας τις απαιτήσεις για εξοικονόμηση ενέργειας και παροχή ανέσεων στους επιβάτες. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης καθώς και το πλάνο ελέγχου των ESS συνεχώς βελτιώνονται κάτω από την επίδραση υβριδικών αλλά και αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων, που δημιουργούν νέες δυνατότητες στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών. Επιπρόσθετα, η ταχύτερη πρόοδος των ηλεκτρονικών ισχύος επιτρέπει στις ESS να γίνουν η βέλτιστη εναλλακτική για την αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από την πέδηση στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα. Στην πραγματικότητα, οι ESS εξασφαλίζουν υψηλότερα ποσά ισχύος και ενέργειας, μεγαλύτερο χρόνο ζωής, μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση και καλύτερες δυναμικές επιδόσεις.

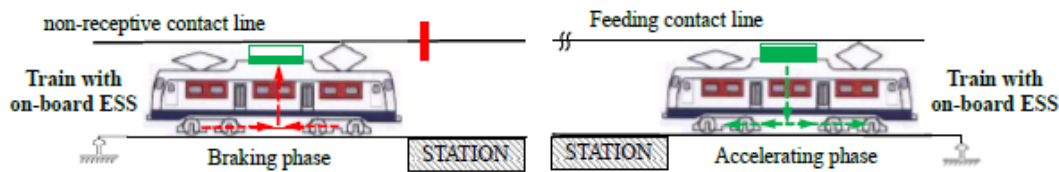


Γράφημα 1.6 – Συνοπτικό διάγραμμα των στρατηγικών μεγιστοποίησης της ανατροφοδοτούμενης ενέργειας πέδησης

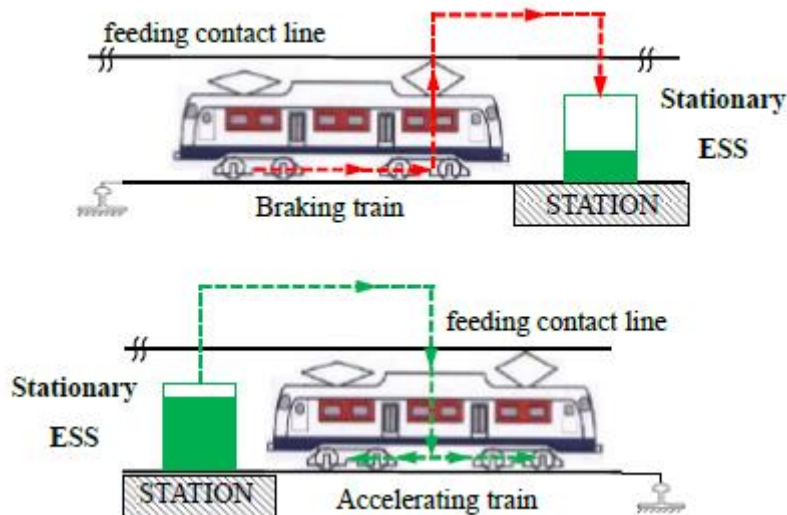
Τα οφέλη, από την εφαρμογή της οποιασδήποτε τεχνολογικής λύσης, δεν είναι μόνο οι μειώσεις στη συνολική κατανάλωση ενέργειας, στις αιχμές ισχύος και στη ζήτηση, αλλά και η σταθεροποίηση της τάσης, ο περιορισμός της ισχύος και της τάσης και η δυνατότητα μικρής αυτονομίας των σιδηροδρομικών οχημάτων, χωρίς εξωτερική τροφοδοσία. Κάποιες τοποθεσίες του σιδηροδρομικού δικτύου δεν μπορούν να ηλεκτροδοτηθούν για αισθητικούς λόγους, όπως το κέντρο της πόλης, πλατείες, ιστορικά κτήρια ή οπουδήποτε είναι δύσκολο να εγκατασταθούν υπέργεια καλώδια, όπως γέφυρες, υπόγεια τμήματα και τούνελ. Τέλος, είναι απαραίτητο να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι η μείωση της παραγόμενης θερμότητας σε ένα υπόγειο περιβάλλον σχετίζεται με τη μικρότερη χρήση του ροοστάτη πέδησης, ο οποίος κατά τη λειτουργία του παράγει μικρά ποσά θερμότητας σε τούνελ και σταθμούς. Το συνοπτικό διάγραμμα του γραφήματος 1.6, δίνει μία γενική ιδέα των στρατηγικών που περιγράφηκαν.

Όσον αφορά το σημείο της εγκατάστασης της συσκευής αποθήκευσης, διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες:

- I. **Κινητή** συσκευή αποθήκευσης ενέργειας (**on-board ESS**), η οποία είναι μία μονάδα αποθήκευσης που τοποθετείται συνήθως στην οροφή του οχήματος. Κάθε τέτοια συσκευή λειτουργεί αυτόνομα, και η παραγόμενη ενέργεια από την επιβράδυνση του οχήματος αποθηκεύεται απευθείας στην συσκευή αποθήκευσης που βρίσκεται στο ίδιο το όχημα. Όταν το όχημα επιταχύνεται, η ενέργεια από τη συσκευή χρησιμοποιείται κατά προτεραιότητα για την κίνηση του οχήματος [40-51]. Αυτή η αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στην εικόνα 1.7,
- II. **Σταθερή** συσκευή αποθήκευσης ενέργειας (**stationary ESS**), που αποτελείται από μία ή περισσότερες συσκευές αποθήκευσης που είναι τοποθετημένες είτε στους υποσταθμούς τροφοδοσίας ή κατανεμημένες κατά μήκος των σιδηροδρομικών γραμμών. Οι συσκευές αυτές αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργεια όταν κανένα άλλο όχημα δεν μπορεί να απορροφήσει [52-57]. Η αρχή λειτουργίας της σταθερής συσκευής αποθήκευσης ενέργειας αναπαρίσταται στην εικόνα 1.8.



Εικόνα 1.7 – Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας της κινητής συσκευής αποθήκευσης ενέργειας σε αστικά σιδηροδρομικά οχήματα [9]



Εικόνα 1.8 - Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας της σταθερής συσκευής αποθήκευσης ενέργειας σε αστικά σιδηροδρομικά οχήματα [9]

Προκειμένου να έχουμε ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση της ενέργειας που παράγεται από την πέδηση των σιδηροδρομικών οχημάτων, έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας τα τελευταία χρόνια, και συγκεκριμένα οι προηγμένες ηλεκτροχημικές μπαταρίες, τα flywheels και οι υπερπυκνωτές. Όλες αυτές οι συσκευές έχουν διαφορετικές επιδόσεις και κόστη λειτουργίας. Στις αστικές σιδηροδρομικές εφαρμογές, η πυκνότητα της ισχύος και ο αριθμός φορτίσεων-εκφορτίσεων αποτελούν τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. Παρά το γεγονός ότι η μπαταρίες διαθέτουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, έχουν περιορισμένο αριθμό δυνατών φορτίσεων-εκφορτίσεων. Για το λόγο αυτό, τα flywheel και οι υπερπυκνωτές (SC) αποτελούν τις καταλληλότερες επιλογές, γιατί αφενός διαθέτουν την απαιτούμενη πυκνότητα ισχύος (πάνω από 5 kW/kg), αλλά επίσης έχουν και 10^6 κύκλους φορτίσεων-εκφορτίσεων. Επιπλέον, είναι εύκολο να παράξουν διαφορετικές τιμές τάσης, συνδυαζόμενα σε σειρά ή παράλληλα. Στην παρούσα φάση, αιχμή των τεχνολογικών εξελίξεων αποτελούν οι εφαρμογές στατικών ή κινητών συσκευών αποθήκευσης ενέργειας στον τομέα των δημοσίων μεταφορών που αφορούν τόσο τις σιδηροδρομικές εταιρίες για επενδυτικούς λόγους, όσο και τους επιστήμονες για ερευνητικούς λόγους. Πολλά από τα άρθρα της σχετικής βιβλιογραφίας τονίζουν την εγγενή δυνατότητα των συσκευών αυτών να αποθηκεύουν την ανατροφοδοτούμενη ενέργεια πέδησης, με σπουδαίες προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας για το δίκτυο.

Για την περίπτωση της σταθερής συσκευής αποθήκευσης δεν απαιτούνται ουσιώδεις αλλαγές ούτε στους υποσταθμούς παροχής ενέργειας αλλά ούτε και στο σιδηροδρομικό δίκτυο.

Το μόνο που χρειάζεται είναι η ενεργειακή διαχείριση να επεκταθεί συνολικά στο δίκτυο. Το βασικό μειονέκτημα της λύσης αυτής είναι ότι επειδή η συσκευή είναι σταθερές, η ενέργεια από και προς το δίκτυο θα πρέπει να μεταφέρεται μέσω των γραμμών για σημαντικές αποστάσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της αποτελεσματικότητας λόγω απωλειών στις γραμμές.

Από την άλλη πλευρά, η επιλογή κινητών συσκευών αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να ξεπερνά τα παραπάνω προβλήματα εντούτοις απαιτεί επανασχεδιασμό των βαγονιών, ώστε να ενσωματώσουν τις συσκευές αυτές. Στην περίπτωση αυτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά υπερπυκνωτές καθώς τα flywheels έχουν το δομικό περιορισμό να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κινούμενες εφαρμογές.

Σε κάθε περίπτωση, επειδή πρόκειται για καινούρια τεχνολογία, παρόλα τα πλεονεκτήματα της ανατροφοδοτικής πέδησης που αναφέρθηκαν παραπάνω, το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται στους ροοστάτες πέδησης και μόνο ένα μικρό μέρος της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση των βοηθητικών λειτουργιών του οχήματος ή να επιστρέψει στο δίκτυο. Η έλλειψη εμπειρίας στον τομέα αυτό μπορεί να οδηγήσει τους επενδυτές ή το κράτος να χάσουν την ευκαιρία να επενδύσουν σε τέτοιες συσκευές αποθήκευσης, σαν ένα μέσο για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στους αστικούς σιδηροδρόμους.

Προκειμένου να διερευνηθούν η ταχεία και συνεχής ανάπτυξη των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας τόσο για στατικές όσο και για κινούμενες εφαρμογές και να επισημανθούν τα πιθανά οφέλη τους, στο επόμενο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την παρουσίαση και τη σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης κατάλληλες για τις αστικές δημόσιες συγκοινωνίες.

1.8 Βιβλιογραφία

- [1] ERRAC, The European Rail Research Advisory Council Rail route 2050: The Sustainable Backbone of the Single European Transport Area. Available on-line: <http://www.errac.org/wp-content/uploads/2013/11/D9-SRRA-RAILROUTE2050.pdf>, (accessed 2014).
- [2] Cascetta, E. Modelli per i sistemi di trasporto. Teoria e applicazioni. *UTET Università*, 2006.
- [3] APTA, Resource Library: Fact Book Glossary, (Online). Available: <http://www.apta.com/resources/statistics/Pages/glossary.aspx>, (accessed 2013).
- [4] UNI 8379. Sistemi di trasporto a guida vincolata (ferrovia, metropolitana, metropolitana leggera, tranvia veloce e tranvia) - Termini e definizioni. 2000.
- [5] UITP, International Association of Public Transport. Metro. <http://www.uitp.org/Public-Transport/metro/index.cfm>, (accessed 2013).
- [6] ERRAC, The European Rail Research Advisory Council. Light Rail and Metro Systems in Europe – Current market, perspectives and research implication, Brussels, April 2004. Available: <http://www.vialibre-ffe.com/PDF/errac%20metro%20γ%20fcligero%2004.pdf>, (accessed 2013).
- [7] Munasinghe, M. Environmental Economics and Sustainable Development, *World Bank, Washington D.C.*, 1997.
- [8] UITP, International Association of Public Transport. Sustainable development. <http://www.uitp.org/Public-Transport/sustainabledevelopment/>, (accessed 2013).
- [9] González-Gil, A.; Palacin, R., Batty, P. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management*, vol. 75, 2013, pp. 374-388.

- [10] López-López T.J.; Pecharromás R.R.; Fernández-Cardador A.; Cucala A.P. Assessment of energy-saving techniques in direct-current-electrified mass transit systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 38, Jan. 2014, pp. 85-100.
- [11] Günselmann W. Technologies for increased energy efficiency in railway systems. *Proc. 11th Eur. Conf. Power Electron. and Appl. EPE2005*, Dresden, Germany, 11-14 Sept. 2005.
- [12] Falvo, M.C.; Lamedica, R.; Bartoni, R.; Maranzano, G. Energy management in metro-transit systems: an innovative proposal toward an integrated and sustainable urban mobility system including plug-in electric vehicles. *Electric Power Systems Research*, vol. 81 (12), Dec. 2011, pp. 2127–2138.
- [13] Adinolfi, A., Lamedica, R.; Modesto, C.; Prudenzi, A.; Vimercati S. Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13 (4), Oct. 1998, pp. 1536-1542.
- [14] Bae, C.; Jang, D.; Kim, Y.; Chang, S.; Mok, J. Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations. *Proc. 7th Int. Conf. Power Electronics ICPE 2007*, Daegu, South Korea, 22-26 Oct. 2007, pp. 801-805.
- [15] Foiadelli, F.; Roscia, M., Zaninelli, D. Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems. *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting PES 2006*, Montreal, QC, Canada, 18-22 June 2006.
- [16] Lee, C.K., Kim, D.H.; Jun, W.S. Study on the energy saving running technology and its CO2 reduction effect of railway vehicle. *Proc. 9th World Congress on Railway Research WCRR 2011*, Lille, France, 22-26 May 2011.
- [17] Ticket to Kyoto. Overview of braking energy recovery technologies in the public transport field. WP2B Deliv. 1, March 2011 http://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/download/file/T2K_WP2B_deliverable1_20110520.pdf, (accessed November 2012).
- [18] Borrelli, A.; Ciccarelli, F.; Fusco, L. The new electric trains of the Circumvesuviana srl. *Ingegneria Ferroviaria*, vol. 66 (2), Feb. 2011, pp.141-163.
- [19] Albrecht, T. Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control. *Proc. 9th Int. Conf. Computers in Railways IX COMPRAIL IX*, vol.15, Dresden, Germany, 17-19 May 2004, pp. 885–894.
- [20] Chen, J.F., Lin, R.L.; Liu, Y.C. Optimization of an MRT train schedule – reducing maximum traction power by using genetic algorithms. *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20 (3), Aug. 2005, pp. 1366–1372.
- [21] Nasri, A.; Fekri Moghadam, M.; Mokhtari, H. Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems. *Proc. 21st Int. Symp. Power Electron., Elect. Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2012*, Pisa, Italy, 14-16 June 2010, pp. 1218-1221.
- [22] Peña-Alcaraz, M.; Fernández, A.; Cucala, A.P.; Ramos, A.; Pecharromás, R.R. Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy. *Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. F: J Rail Rapid Transit*, vol. 226 (4), July 2012, pp. 397-408.
- [23] Yang, X.; Ning, B., Li, X.; Tang, T.; Song, X.A. Subway timetable optimization model for maximizing the utilization of recovery energy. *Proc. Joint Rail Conference JRC 2013*, Knoxville, TN, USA, 15-18 April 2013.
- [24] Ortega, J.M., Ibaiondo, H. Kinetic energy recovery on railway systems with feedback to the grid. *Proc. 14th Int. Conf. Power Electronics and Motion Control EPE-PEMC 2010*, Ohrid, Macedonia, 6-8 Sept. 2010, pp. T9-94-T9-97.

- [25] Gelman, V. Braking energy recuperation. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 4 (3), Sept. 2009, pp. 82-89.
- [26] Mellitt, B., Mouneimne, Z.S., Goodman, C.J. Simulation study of DC transit systems with inverting substations. *IEE Proc. B Electric Power Applications*, vol. 131 (2), Mar. 1984, pp.38-50.
- [27] Yii-Shen, T.; Ruay-Nan, W.; Nanming, C. Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 47 (4), Nov 1998, pp.1405-1412.
- [28] Cornic, D. Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation. *Proc. Int. Conf. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion ESARS 2010*, Bologna, Italy, 19-21 Oct. 2010.
- [29] Takagi, R. Energy saving techniques for the power feeding network of electric railways. *IEEE Trans. Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5 (3), May 2010, pp. 312-316.
- [30] Steiner, M.; Scholten, J. Energy storage on board of railway vehicles. *Proc. 11th Eur. Conf. Power Electron. and Applicat. EPE 2005*, Dresden, Germany, 11-14 Sept. 2005.
- [31] Steiner, M., Klohr, M.; Pagiela, S. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles. *Proc. 12th Eur. Conf. Power Electron. and Applicat. EPE 2007*, Aalborg, Denmark, 2-5 Sept. 2007.
- [32] Barrero, R.; Tackoen, X.; Van Mierlo, J. Energy saving in public transport: enhanced energy storage systems for improved on-board light rail vehicle efficiency, *IEEE Vehicular Tech. Magazine*, vol. 3 (3), Sept. 2008, pp. 26-36.
- [33] Allègre, A.L., Bouscayrol, A.; Delarue, P.; Barrade, P.; Chattot, E.; El-Fassi, S. Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57 (12), Dec. 2010, pp. 4001-4012.
- [34] Iannuzzi D. Improvement of the energy recovery of traction electrical drives using supercapacitors. *Proc. 13th Int. Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008*, Poznan, Poland, 1-3 Sept. 2008, pp. 1469-1474.
- [35] Iannuzzi, D., Tricoli, P. Metro trains equipped onboard with supercapacitors: a control technique for energy saving. *Proc. 20th Int. Symp. Power Electron., Elect. Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2010*, Pisa, Italy, June 14-16, 2010, pp. 750-756.
- [36] Iannuzzi, D.; Tricoli, P. Optimal control strategy of onboard supercapacitor storage system for light railway vehicles. *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics ISIE 2010*, Bari, Italy, 4-7 July 2010, pp.280-285.
- [37] Iannuzzi, D.; Tricoli, P. Supercapacitor state of charge control based on changeover finite state controller for metro-train applications. *Proc. 3rd Int. Conf. on Clean Electrical Power ICCEP 2011*, Ischia, Italy, 14-16 June 2011, pp. 550-556.
- [38] Iannuzzi, D.; Tricoli, P. Speed-based State of Charge Tracking Control for Metro-Trains with Onboard Supercapacitors. *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27 (4), Apr. 2012, pp. 2129-2140.
- [39] Ciccarelli, F.; Iannuzzi, D.; Tricoli, P. Speed-based supercapacitor state of charge tracker for light railway vehicles. *Proc. 14th Eur. Conf. Power Electronics and Applications EPE 2011*, Birmingham, UK, Aug. 30 – Sept. 1, 2011.
- [40] Ciccarelli, F., Iannuzzi, D.; Tricoli, P. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 24, Oct. 2012, pp. 36-49.
- [41] Iannuzzi, D.; Pagano, E.; Tricoli, P.. The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines. *Energies*, vol. 6 (4), Apr. 2013, pp. 1802-1820.
- [42] Rufer, A.; Hotellier, D.; Barrade, P. A Supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19 (2), Feb. 2004, pp. 629-636.

- [43] Brenna, M.; Foadelli, F.; Tironi, E.; Zaninelli, D. Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems. *Proc. Int. Conf. Clean Electrical Power ICCEP 2007*, Capri, Italy, 21-23 May 2007, pp. 69-73.
- [44] Morita, G.; Konishi, T.; Hase, S.; Nakamichi, Y.; Nara, H.; Uemura, T. Verification tests of electric double layer capacitors for static energy storage system in DC electrified railway. *Proc. 19th Int. Symp. Power Electron. Elect. Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2008*, Ischia, Italy, 11-13 June 2008, pp. 1017-1022.
- [45] Barrero, R.; Tackoen, X.; Van Mierlo, J. Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro-network. *Proc. Vehicle Power Propulsion Conf. VPPC 2008*, Harbin, China, 3-5 Sept. 2008.
- [46] López-López, A.J.; Pecharrómán, R.R., García-Matos, J.A.; Fernández-Cardador, A.; Cucala, A.P. Optimal deployment of energy storage systems in a dc-electrified railway system. *WIT transactions on the built environment*, vol. 127, 2012, pp. 603-614.
- [47] Ciccarelli, F.; Iannuzzi, D.; Lauria, D.; Supercapacitors-based energy storage for urban mass transit systems. *Proc. 14th Eur. Conf. Power Electronics and Applications EPE 2011*, Birmingham, UK, 30 Aug. – 1 Sept. 2011.
- [48] Iannuzzi, D.; Pighetti, P.; Tricoli, P. A study on stationary supercapacitor sets for voltage droops compensation of streetcar feeder lines. *Proc. Int. Conf. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion ESARS 2010*, Bologna, Italy, 19-21 Oct. 2010.
- [49] D'Avanzo, S.; Iannuzzi, D.; Murolo, F.; Rizzo, R.; Tricoli, P. A sample application of supercapacitor storage systems for suburban transit. *Proc. Int. Conf. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion ESARS 2010*, Bologna, Italy, October 19-21, 2010.
- [50] Ciccarelli, F.; Iannuzzi, D.; Lauria, D. Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 21 (1), Jan. 2012, pp. 321-337.
- [51] Battistelli, L.; Ciccarelli, F.; Lauria, D.; Proto, D. Optimal design of DC electrified railway Stationary Storage System. *Proc. 2nd Int. Conf. Clean Electrical Power ICCEP 2009*, Capri, Italy, June 9-11, 2009, pp. 739-745.
- [52] Iannuzzi, D.; Lauria, D.; Tricoli, P. Optimal Design of Stationary Supercapacitors Storage Devices for Light Electrical Transportation Systems. *Journal of Optimization and Engineering*, vol. 13 (4), Dec. 2012, pp. 689-704.
- [53] Battistelli, L.; Fantauzzi, M.; Iannuzzi, D.; Lauria, D. Energy management of electrified mass transit systems with Energy Storage devices. *Proc. 21st Int. Symp. Power Electron., Elect. Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2012*, Sorrento, Italy, 20-22 June 2012, pp. 1172-1177.
- [54] Battistelli, L.; Fantauzzi, M.; Iannuzzi, D.; Lauria, D. Generalized approach to design supercapacitor-based storage devices integrated into urban mass transit systems. *Proc. 3rd Int. Conf. on Clean Electrical Power ICCEP 2011*, Ischia, Italy, 14-16 June 2011, pp. 530-534.
- [55] Ciccarelli, F.; Iannuzzi, D. A Novel energy management control of wayside Li-Ion capacitors-based energy storage for urban mass transit systems. *Proc. 21st Int. Symp. Power Electron., Elect. Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2012*, Sorrento, Italy, 20-22 June 2012, pp. 773-779.
- [56] Ciccarelli, F.; Clemente, G.; Iannuzzi, D.; Lauria, D. An analytical solution for optimal design of stationary lithium-ion capacitor storage device in light electrical transportation networks. *International Review of Electrical Engineering*, vol. 8 (3), June 2013, pp. 989-999.
- [57] Ciccarelli, F.; Del Pizzo, A.; Iannuzzi, D. Improvement of energy efficiency in light railway vehicles based on power management control of wayside lithium-ion capacitor storage. *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 29 (1), Jan. 2014, pp. 275-286.
- [58] Flavio Ciccarelli; Diego Iannuzzi; Claudio Serpico; Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems, Mar. 2017.

Κεφάλαιο 2^ο

Τεχνολογίες Αποθήκευσης Ενέργειας

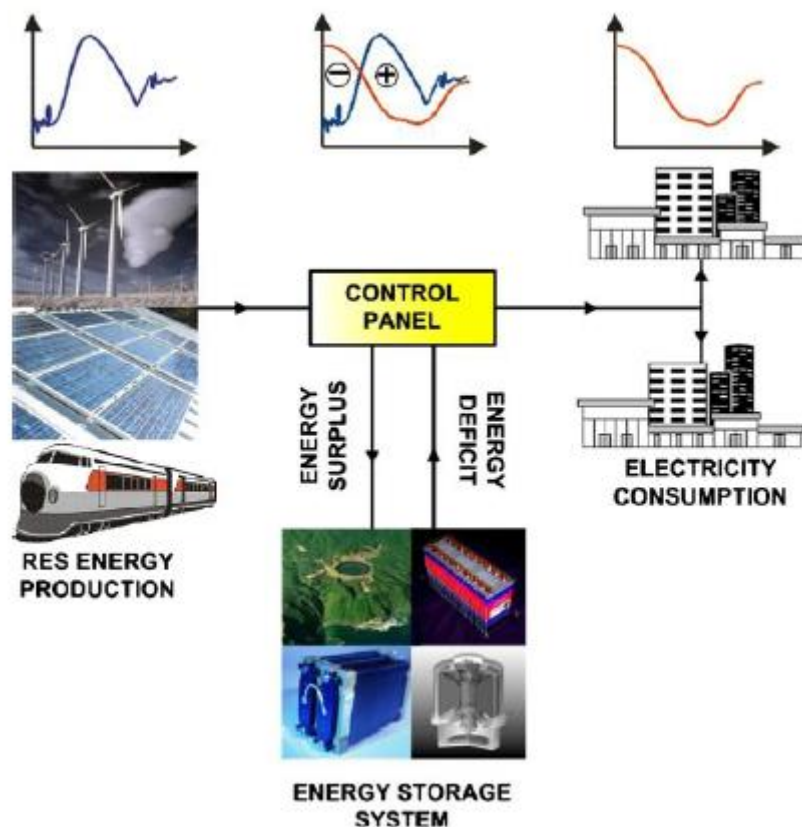
Η ηλεκτρική ενέργεια σε ένα σύστημα ισχύος δεν μπορεί να αποθηκευτεί ηλεκτρικά, αλλά πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε πρωτογενή μορφή ενέργειας και στη συνέχεια να αποθηκευτεί ηλεκτρομαγνητικά, ηλεκτροχημικά, κινητικά ή σαν δυναμική ενέργεια. Οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (ESS) είναι ένα όργανο μεγάλου ενδιαφέροντος, καθώς μπορεί να διαδραματίσει ζωτικής σημασίας ρόλο στη βελτίωση της ευελιξίας και της αποτελεσματικότητας των ενεργειακών συστημάτων και στη διαθεσιμότητα διαφορετικών πηγών ενέργειας. Η προοπτική χρήσης των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας σε όλα τα επίπεδα του δικτύου διανομής της ενέργειας, έχει κινητοποιήσει πολλούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας και περιλαμβάνει έναν αριθμό μεθόδων, υλικών και συστημάτων προκειμένου να καταστήσουν πιο αποτελεσματική, οικονομική και περιβαλλοντικά φιλική την διαδικασία της διανομής και αποθήκευσης ενέργειας.

Σήμερα υπάρχουν πολλές τεχνολογίες που αφορούν την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο όρος «αποθήκη ενέργειας» παραδοσιακά οδηγεί συνειρμικά στις μπαταρίες που επίσης ονομάζονται και ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, καθώς αποτέλεσαν την πρώτη συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι αποτελούν την πρώτη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, εντούτοις δεν είναι και η μόνη. Οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας για εμπορική χρήση μπορούν σήμερα να κατανεμηθούν σε πέντε κατηγορίες: μηχανικές, ηλεκτρικές, χημικές, βιολογικές και θερμικές. Συγκεκριμένα, οι συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αφορούν τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται από το δίκτυο σε μία μορφή που μπορεί να αποθηκευτεί και στη συνέχεια να μετατραπεί εκ νέου σε ηλεκτρική ενέργεια, όταν αυτό ζητηθεί. [1,2]. Οι βασικοί λόγοι που δικαιολογούν την αναγκαιότητα της εισαγωγής μιας συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα δίκτυο είναι οι ακόλουθες:

- Είναι απαραίτητο να καλύπτουν τη ζήτηση ηλεκτρικών φορτίων, όταν το κυρίως δίκτυο παροχής δεν είναι διαθέσιμο εξαιτίας σφαλμάτων ή επισκευής.
- Η απαίτηση για άμεση (πλήρη ή συνήθως και μερική) τροφοδότηση ενέργειας στα ηλεκτροκίνητα οχήματα.
- Υπάρχει επείγουσα ανάγκη για πρώιμη διαθεσιμότητα επιπλέον ενέργειας, η οποία δεν μπορεί να τροφοδοτηθεί από τις υπάρχουσες υποδομές.
- Υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια σε αξιοποιήσιμη μορφή, αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα φάση, γιατί δεν υπάρχει ζήτηση.

Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν μία συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ακόλουθοι:

- **Χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας**, η οποία καθορίζεται από το μέγεθος και την πυκνότητα της ενέργειας της τεχνολογίας αποθήκευσης.
- **Ποιότητα ενέργειας**, η οποία σχετίζεται άμεσα με το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαρρεύσει από το δίκτυο στη συσκευή αποθήκευσης.
- **Συχνότητα λειτουργίας**, δηλαδή πόσους κύκλους φορτίσεων-εκφορτίσεων μπορεί να αφομοιώσει η συσκευή αποθήκευσης κατά τη διάρκεια της ζωής της.



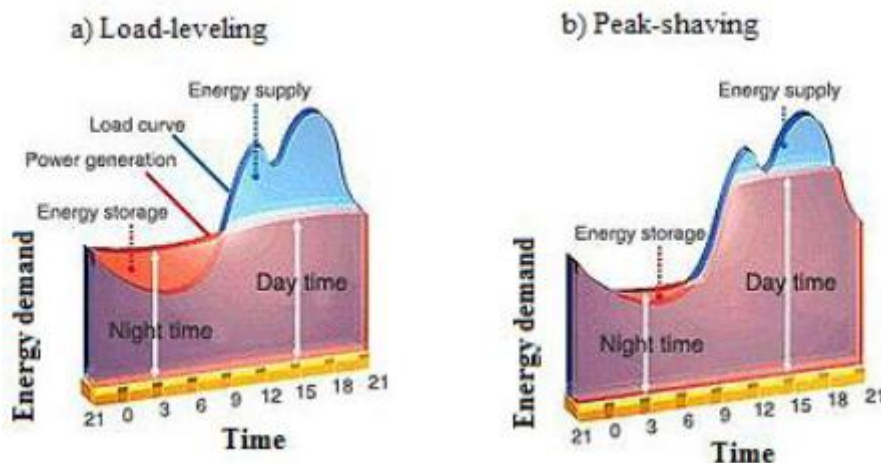
Εικόνα 2.1 – Τυπική διάταξη μίας συσκευής αποθήκευσης ηλ. ενέργειας

Οι συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας έχουν πληθώρα εφαρμογών σε φορητές συσκευές, οχήματα μεταφοράς και στατικές πηγές ενέργειας [3-5]. Στην πραγματικότητα, οι εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος έχουν απασχολήσει τους ερευνητές που ασχολούνται με τις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας εξαιτίας των δυνατοτήτων που παρέχουν για υποστήριξη της λειτουργίας του δικτύου. Ιστορικά, μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας, είναι η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, με σκοπό η ενέργεια αυτή να επιστρέφει στο δίκτυο σε περιόδους υψηλής ζήτησης, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό τον περιορισμό της χρήσης μονάδων παραγωγής υψηλού κόστους. Με παρόμοιο τρόπο, η εφαρμογή αυτή έχει επεκταθεί προκειμένου να υποστηρίξει την παραγωγή «ανανεώσιμης» ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επιστρέφοντας την αποθηκευμένη ενέργεια, συμβάλλει στην αφομοίωση των ξαφνικών αιχμών ισχύος του δικτύου. Προσφάτως, έχουν αναπτυχθεί εφαρμογές που προσπαθούν να εκμεταλλευτούν το γεγονός ότι οι αποθήκες ενέργειας μπορούν να αποτελέσουν έναν τρόπο μερικής «αυτό-επέκτασης» του δικτύου, καθώς η χρήση τους μπορεί να βελτιστοποιήσει την χρήση των ήδη υπάρχοντων υποδομών του δικτύου και με τον τρόπο αυτό να αποφευχθεί η εγκατάσταση νέων γραμμών. Ένα άλλο σπουδαίο χαρακτηριστικό των συσκευών αποθήκευσης είναι ότι προσφέρουν και τεχνικές υπηρεσίες, τις λεγόμενες «επικουρικές λειτουργίες», που είναι απαραίτητες για την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Καθώς οι μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να συνδέεται με την παροχή, να ανατροφοδοτείται ή να πουλάει την περίσσεια ενέργεια, μπορούν να προσφέρουν σημαντικά οφέλη, τα οποία έχουμε τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε με τη χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας, εφαρμόζοντας πολιτικές καταμερισμού του φορτίου και περιορισμού των αιχμών φορτίου. Για μία ακόμα φορά τα στοιχεία συγκλίνουν στο γεγονός ότι η χρήση μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

μπορεί να εξισορροπήσει την παροχή ενέργειας που τροφοδοτείται από το κυρίως δίκτυο (καταμερισμός φορτίου) ή ακόμα να εξασφαλίσει την τροφοδότηση του φορτίου κατά την περίοδο της αιχμής.

Ο όρος καταμερισμός του φορτίου αναφέρεται στην μη κανονική κατανομή των φορτίων σε ένα δίκτυο ισχύος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Μία συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να φέρει εις πέρας τη βελτιστοποίηση μεταξύ της παραγωγής και της διανομής με το φορτίο-ζήτηση, γεγονός που πιθανώς θα μπορούσε να αναβάλλει την ανάγκη για επέκταση ή/και αναβάθμιση του υπάρχοντος δικτύου. Ένα παράδειγμα του αποτελέσματος του καταμερισμού του φορτίου φαίνεται στο Γράφημα 2.2α.

Αντίστοιχα, ο όρος περιορισμός των αιχμών σχετίζεται άμεσα με την ανομοιόμορφη ζήτηση ισχύος από το κυρίως δίκτυο. Μία μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, κατάλληλα διαμορφωμένη, μπορεί να επιτύχει ομαλοποίηση των στιγμιαίων αιχμών φορτίου με σκοπό την καλύτερη αξιοποίηση της ισχύος, όπως φαίνεται στο γράφημα 2.2β.



Γράφημα 2.2 – Σχηματική απεικόνιση του καταμερισμού του φορτίου (α) και του περιορισμού των αιχμών (β)

Με βάση όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, όσον αφορά τις αστικές σιδηροδρομικές συγκοινωνίες, τα χαμηλά επίπεδα τάσης τροφοδοσίας των δικτύων τραμ και μετρό, σε συνδυασμό με άλλους σχετικούς παράγοντες, όπως η υψηλή πυκνότητα ενέργειας των σιδηροδρομικών οχημάτων (< 1 MW ανά όχημα), η μεγάλη έκταση των αστικών και υπεραστικών σιδηροδρομικών DC γραμμών, καθώς και οι τυπικές συνθήκες λειτουργίας των οχημάτων που κινούνται σε αυτές (επαναλαμβανόμενες εκκινήσεις, συχνές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις), σε συνδυασμό με τις συνθήκες κίνησης, έχουν προφανώς οξύνει τα προβλήματα που σχετίζονται με τη μείωση της συνολικής αποδοτικότητας του ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου, όπως για παράδειγμα το πρόβλημα της πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη ραγδαία αύξηση των απωλειών εξαιτίας του φαινομένου τζάουλ στις γραμμές τροφοδοσίας, καθώς και στους κινητήρες των ηλεκτρικών οχημάτων, που με τη σειρά τους οδηγούν στην μείωση της μέγιστης δυνατής παρεχόμενης ενέργειας.

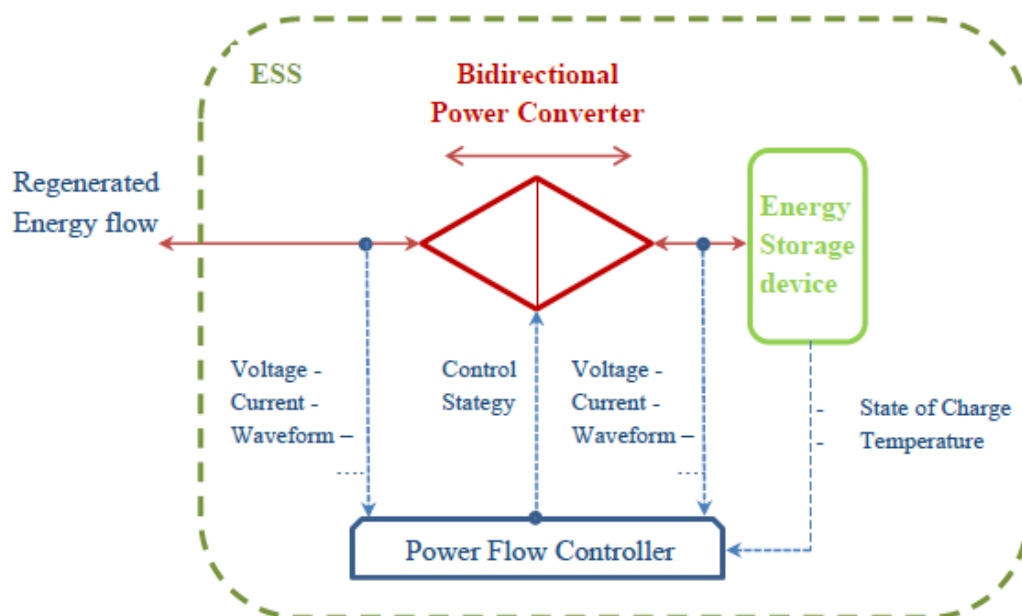
Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο κοντά σε δίκτυα περιοχών με υψηλή πυκνότητα κίνησης (όπου η πλειοψηφία των οχημάτων επιταχύνουν ή εκκινούν ταυτόχρονα), καθώς και σε απομακρυσμένα σημεία μακριά από τον υποσταθμό τροφοδοσίας. Κάτω από κάποιες ακραίες συνθήκες λειτουργίας του δικτύου παροχής ενέργειας, είναι δυνατόν η τάση των γραμμών να μειωθεί πάνω από το 50% της τάσης στην εκκίνηση της γραμμής.

Συμπερασματικά, η αύξηση της ισχύος και της ενέργειας που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση των αυξανόμενων αναγκών των αστικών σιδηροδρομικών δικτύων, καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή των δύο προαναφερθέντων πολιτικών.

Για μία ακόμα φορά, η προαναφερθείσα προοπτική της καλύτερης αξιοποίησης της ανατροφοδοτούμενης ενέργειας πέδησης, αναδεικνύει και τονίζει το γεγονός ότι οι μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να θεωρηθούν σαν μία βιώσιμη λύση για την αύξηση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας των αστικών σιδηροδρομικών δικτύων.

Η ύπαρξη ενός μεγάλου φάσματος τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστά απαραίτητο να έχουμε μία γενική ιδέα των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων των συσκευών αυτών, όπως επίσης και των ενεργειακών απαιτήσεων που χαρακτηρίζουν τα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα. Προκειμένου να αποσαφηνιστεί το ζήτημα αυτό, η επόμενη ενότητα παρουσιάζει και συγκρίνει τις διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης που είναι κατάλληλες για τα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα.

Ως επί το πλείστον, τόσο στην βιβλιογραφία όσο και στις τεχνικές εφαρμογές, ο όρος ηλεκτρική συσκευή αποθήκευσης, αποδίδεται σε ένα σύνολο τριών επιμέρους μερών που εκτελούν πολλές λειτουργίες (Γράφημα 2.3): της ίδιας της συσκευής αποθήκευσης, του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος που εγγυάται τη σωστή λειτουργία της εισόδου και εξόδου της ηλεκτρικής ροής ισχύος, και της μονάδας ελέγχου, η οποία έχει τη δυνατότητα να ελέγχει ορθά και αποτελεσματικά την φόρτιση και την εκφόρτιση της συσκευής. Συγκεκριμένα, οι μετατροπείς ισχύος πρέπει να επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ενέργειας και να προσαρμόζουν τις διαφορές ηλεκτρικές συνθήκες του δικτύου, στις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας των συσκευών αποθήκευσης (τάση, ρεύμα και συχνότητα), λειτουργώντας επί της ουσίας σαν μία διεπαφή εξισορρόπησης ανάμεσα στη συσκευή και το κεντρικό δίκτυο τροφοδοσίας.

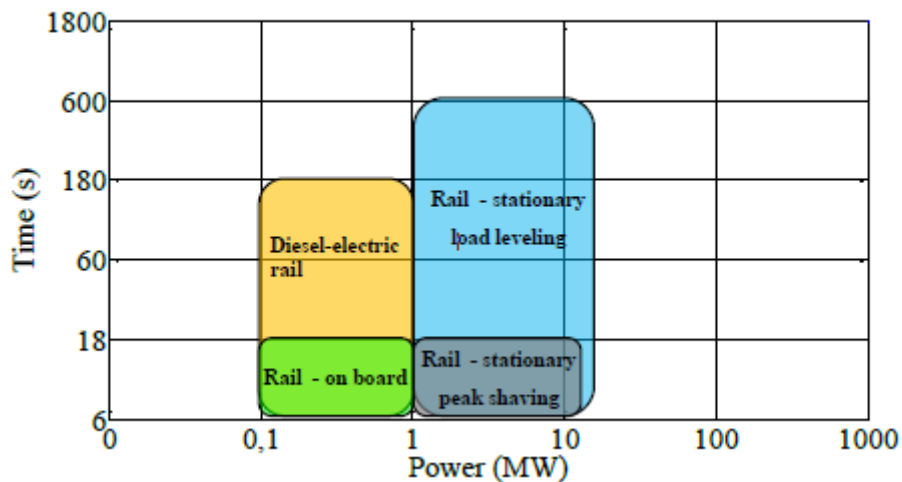


Γράφημα 2.3 – Βασικά μέρη μία Συσκευής Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας αστικών σιδηροδρομικών δικτύων

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της κάθε εφαρμογής. Επιπλέον, για τον καθορισμό των βασικών στρατηγικών ελέγχου της ροής ισχύος των σιδηροδρομικών οχημάτων είναι απαραίτητη μία γενική γνώση των διαφόρων οικογενειών

συσκευών αποθήκευσης. Για την περίπτωση των ηλεκτροδοτούμενων μεταφορών, η κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει μεγάλες ανωμαλίες, και γι' αυτό μπορούν να υπάρξουν πολλαπλά οφέλη από τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών αποθήκευσης, οι οποίες δύνανται να εξομαλύνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις των οχημάτων, ανεξαρτήτως του τρόπου εγκατάστασής τους, λειτουργώντας σαν μονάδες περιορισμού των αιχμών και εξορθολογισμού της ζήτησης [4].

Όπως φαίνεται και στο Γράφημα 2.4, οι περιορισμοί της ισχύος και της διάρκειας, επηρεάζουν σημαντικά τις απαιτήσεις συσκευών αποθήκευσης.



Γράφημα 2.4 – Επίπεδα ισχύος και χρονικοί περιορισμοί μίας τυπικής συσκευής αποθήκευσης ενέργειας για τα διάφορα μεταφορικά μέσα

Για το λόγο αυτό, όσον αφορά τα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα, μπορούμε να θεωρήσουμε σαν θεμελιώδεις τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- ο τυπικός κύκλος λειτουργίας κυμαίνεται από δευτερόλεπτα έως λεπτά,
- οι αιχμές της ισχύος εκφόρτισης ή φόρτισης, συνήθως κυμαίνονται από 0,1 έως 10 MW,
- το πλήθος των κύκλων λειτουργίας συνήθως κυμαίνεται από 100.000 έως 300.000 το χρόνο,
- μεσαίες τιμές χωρητικότητες ενέργειας σε συνδυασμό με περιορισμένο βάρος και όγκο.

Παρόλα αυτά, η φορητότητα, η επεκτασιμότητα και η πυκνότητα ενέργειας και ισχύος είναι αναμφισβήτητα τα σημαντικότερα κριτήρια επίδοσης για τις συσκευές αποθήκευσης ενέργειας.

Στο σημείο αυτό, είναι αναγκαίο να γίνει μία ακριβής ανάλυση προκειμένου να γίνει κατανοητό ποιος τύπος συσκευής έχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά για τις συγκεκριμένες εφαρμογές.

2.1 Ηλεκτροχημικές μπαταρίες

Οι μπαταρίες είναι οι πιο γνωστές συσκευές αποθήκευσης. Η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στη συλλογή και μετάδοση ενέργειας που παράγεται ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών (ηλεκτρόδια) και τα οποία διατηρούνται μέσα σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη. Οι αντιδράσεις αυτές συμβαίνουν μεταξύ των

στοιχειωδών σωματιδίων, τα οποία αποτελούν τις βασικές συστατικές μονάδες μιας μπαταρίας. Έχοντας γνώση των βασικών αρχών της χημείας, μπορούμε να πούμε ότι οι μπαταρίες έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα λειτουργικών χαρακτηριστικών. Οι πιο συνηθισμένες και αποδοτικές μορφές μπαταρίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν συσκευές αποθήκευσης ενέργειας σε αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα είναι:

- α) Μπαταρίες Μολύβδου,
- β) Μπαταρίες Λιθίου,
- γ) Μπαταρίες Νικελίου και
- δ) Μπαταρίες Σοδίου.

2.2 Συσκευές αποθήκευσης ενέργειας με περιστρεφόμενα μέρη (Flywheels)

Οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας με κινητά μέρη αποθηκεύουν κινητική ενέργεια μέσα από την περιστροφική κίνηση ενός κυλίνδρου ή δίσκου, και στη συνέχεια χρησιμοποιούν αυτήν την κινητική ενέργεια για να παράγουν ηλεκτρισμό κάποια στιγμή στο μέλλον.

Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα flywheel είναι ανάλογο των διαστάσεων και της μάζας του, καθώς και του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής με την οποίαν κινείται. Κατά συνέπεια, η κατάσταση φόρτισής του μπορεί εύκολα να υπολογιστεί σαν μία συνάρτηση της κυκλικής του ταχύτητας.

Οι συσκευές αυτές αποτελούνται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος περιστρέφει έναν κυλινδρικό δρομέα σε πολύ μεγάλη ταχύτητα. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι μία συσκευή flywheel αποτελείται από έναν ή περισσότερους περιστρεφόμενους δρομείς, συλλέκτες, έναν κινητήρα/γεννήτρια, ηλεκτρονικά ισχύος και το κέλυφος (εικόνα 2.5). Οι συλλέκτες μπορούν να είναι δύο ειδών: μηχανικοί συλλέκτες, οι οποίοι ενώνουν φυσικά το δρομέα με το κέλυφος, ή μαγνητικοί συλλέκτες, οι οποίοι προκαλούν την αιώρηση του δρομέα στο εσωτερικό του κελύφους, μειώνοντας με τον τρόπο αυτό τις απώλειες περιστροφής [6]. Προκειμένου να αυξήσουμε την ταχύτητα περιστροφής χρησιμοποιούμε υλικά χαμηλής πυκνότητας, καθώς αυτά προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή παραμόρφωσης. Ο κινητήρας/γεννήτρια μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική ενέργεια περιστροφής και στη συνέχεια ξαναμετατρέπει την ενέργεια από την περιστροφή του δρομέα σε ηλεκτρική, όποτε αυτό ζητηθεί. Το κέλυφος είναι μία μη περιστρεφόμενη πλατφόρμα, μέσα στην οποία περιστρέφεται ο δρομέας, σχεδιασμένη για τον περιορισμό τον εξφενδονισμό των τμημάτων του δρομέα σε περίπτωση καταστροφικής βλάβης του. Το κέλυφος επίσης μπορεί να περιέχει και κενό αέρος προκειμένου να περιορίζεται η εισαγωγή αέρος στο δρομέα και να αυξάνονται με τον τρόπο αυτό οι απώλειες ενέργειας. Για αυτά τα συστήματα κενού αέρος, έχουν προταθεί καινοτόμες εναλλακτικές που περιλαμβάνουν τη χρήση ενός μίγματος αέριου ηλίου ώστε να περιοριστούν επιπλέον οι απώλειες εξαιτίας διαρροής αέρα [7].



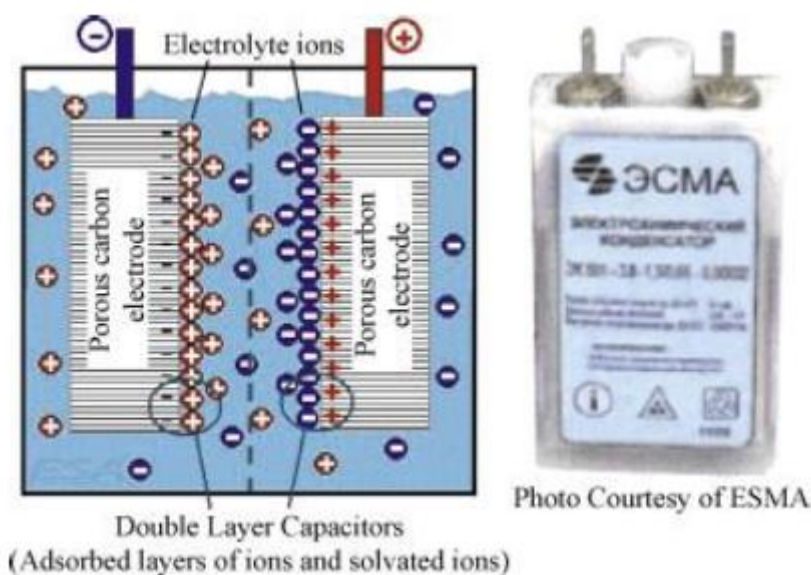
Εικόνα 2.5 – Σχηματική απεικόνιση ενός Flywheel

Συσκευές αποθήκευσης ενέργειας που στηρίζονται σε flywheels μπορούν να σχεδιαστούν για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών με ποικίλες απαιτήσεις ενέργειας και ισχύος. Στην πραγματικότητα τέτοιες συσκευές αποθήκευσης έχουν μακρά διάρκεια ζωής, υψηλή πυκνότητα ενέργειας, ενώ παράλληλα μπορούν να δώσουν μεγάλα ποσά ενέργειας στην έξοδό τους. Η ενεργειακή αποδοτικότητα των flywheels αγγίζει το 90%. Τέτοιες συσκευές επιτρέπουν ταχύτερες διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης για έναν αρκετά μεγάλο αριθμό κύκλων λειτουργίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας είναι αρκετά μεγάλο και χρησιμοποιώντας φιλικά προς το περιβάλλον υλικά, μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούν flywheels αποτελούν μία εξαιρετικά συμφέρουσα λύση για εφαρμογές που σχετίζονται με τον τομέα των μεταφορών [8-10].

Από την άλλη πλευρά όμως η χρήση των flywheels δημιουργεί μία σειρά από σημαντικά προβλήματα. Αρχικά η αύξηση της μάζας και της διαμέτρου δεν είναι εφικτή μετά από κάποιο συγκεκριμένο σημείο όσον αφορά τις σιδηροδρομικές εφαρμογές. Επιπλέον οι συνεχείς περιστροφική κίνηση που απαιτεί η λειτουργία τους προκαλεί φυσικές φθορές στη συσκευή με αποτέλεσμα να παρατηρούνται φαινόμενα αυτό-εκφόρτισης με την πάροδο του χρόνου. Ένα επίσης σημαντικό πρόβλημα είναι η έλλειψη ασφάλειας, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος ατυχήματος με τη θραύση του προστατευτικού περιβλήματος της συσκευής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία έκρηξης σε περίπτωση υπερφόρτωσης. Συνοψίζοντας λοιπόν, με δεδομένο ότι η ασφάλεια αποτελεί κυρίαρχη προτεραιότητα στις δημόσιες συγκοινωνίες, γίνεται αντιληπτό ότι οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας με τη χρήση flywheels αποτελούν μη προτιμητέα λύση στον τομέα των δημόσιων μεταφορών.

2.3 Υπερπυκνωτές

Οι ηλεκτροχημικοί διπλής επίστρωσης πυκνωτές (EDLC), γνωστοί επίσης και ως υπερπυκνωτές (UC ή SC), αποθηκεύουν ενέργεια μέσω ενός ηλεκτροστατικού πεδίου. Η ενέργεια αποθηκεύεται με τη μεταφορά φορτίου μεταξύ των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη. Υπέρ πυκνωτής αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, έναν διαχωριστή και έναν ηλεκτρολύτη. Τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από σωματίδια ενεργού άνθρακα υψηλής συγκέντρωσης, που σχηματίζουν μία διαχωριστική επιφάνεια υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, που συμπεριφέρεται σαν πολυμέσα ηλεκτρόδιο [11]. Τα δύο ηλεκτρόδια διαχωρίζονται με μία μεμβράνη, η οποία όμως επιτρέπει τη μεταφορά μόνο φορτισμένων ιόντων, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει ηλεκτρική μόνωση (Εικόνα 2.6). Το συνολικό ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας είναι συνάρτηση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων, το πλήθους των ιόντων και του ύψους της τάσης ρήξης του ηλεκτρολύτη.

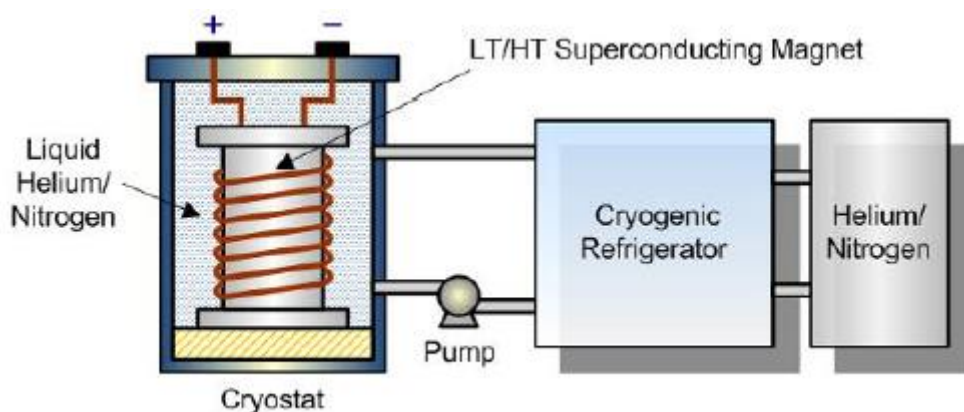


Εικόνα 2.6 – Αρχές και σχηματική απεικόνιση μίας συσκευής Υπερπυκνωτή

Χάρη στην τεχνολογία αυτή, οι συσκευές αυτές παρουσιάζουν σχετικά μικρές πυκνότητες ενέργειας (6 Wh/kg), αλλά υψηλές πυκνότητες ισχύος (kW/kg), χρόνο εκφόρτισης που κυμαίνεται από δέκατα του δευτερολέπτου έως λεπτά, υψηλή αποδοτικότητα που αγγίζει το 95%, υψηλότερη αντοχή σε ρεύματα φόρτισης εκφόρτισης, μεγάλη διάρκεια ζωής (έως και 10^6 κύκλους λειτουργίας) και μικρές θερμικές απώλειες. Σε συνδυασμό με την μεγάλη διάρκεια ζωής, οι συσκευές αυτές παρουσιάζουν και μικρή αλλοίωση με το χρόνο, γεγονός που καθιστά τους υπέρ πυκνωτές μία φιλική προς το περιβάλλον, υψηλής ασφάλειας και με απλές διαδικασίες φόρτισης εκφόρτισης συσκευή. Από την άλλη πλευρά όμως, τα βασικά μειονεκτήματα είναι ότι παρουσιάζουν σημαντική αυτό-αποφόρτιση, χαμηλά μέγιστα τάσης (καθώς απαιτούνται η σύνδεσή τους σε σειρά προκειμένου να επιτύχουμε υψηλότερες τάσεις στην έξοδό τους), ταχεία πτώση τάσης και κίνδυνος δημιουργίας σπινθήρα, σε περίπτωση σφάλματος. Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι συσκευές αυτές είναι κατάλληλες για την κάλυψη αιχμών ισχύος, αποθήκευση ενέργειας και περιορισμό της διακύμανσης της τάσης. Κατά συνέπεια, οι υπερπυκνωτές είναι μία εξαιρετικά συμφέρουσα επιλογή για αποθήκες ενέργειας τόσο σε σιδηροδρομικά δίκτυα όσο και σε εφαρμογές ισχύος.

2.4 Υπεραγώγιμη μαγνητική συσκευή αποθήκευσης ενέργειας

Η υπεραγώγιμη μαγνητική συσκευή αποθήκευσης (SMES) αποθηκεύει ενέργεια με τη μορφή ενός μαγνητικού πεδίου. Εφαρμόζοντας ένα DC ρεύμα σε ένα πηνίο, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο, αποθηκεύοντας με τον τρόπο αυτό μαγνητική ενέργεια (Εικόνα 2.7). Όταν αφαιρέσουμε την πηγή του DC ρεύματος, η ενέργεια απελευθερώνεται. Χρησιμοποιώντας υπεραγώγιμα καλώδια επιτρέπουμε στις συσκευές αυτές να επιτύχουν πολύ υψηλές αποδοτικότητας. Τα υπεραγώγιμα υλικά κατηγοριοποιούνται από την θερμοκρασία που απαιτείται για να έρθουν σε υπεραγωγιμότητα και διακρίνονται σε χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλής θερμοκρασίας. Τα χαμηλής θερμοκρασίας υπεραγώγιμα υλικά, τα οποία απαιτούν υψηλό κόστους ρευστό ήλιο, είναι και αυτά που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες SMES συσκευές. στην παρούσα φάση οι έρευνες εστιάζουν στην ανάπτυξη SMES συσκευών που χρησιμοποιούν υψηλής θερμοκρασίας υπεραγώγιμα καλώδια, καθώς αυτές μπορούν να χρησιμοποιήσουν ρευστό άζωτο το οποίο κοστίζει αρκετά λιγότερο από το ρευστό ήλιο και κατά συνέπεια το συνολικό κόστος της συσκευής μειώνεται κατά πολύ.



Εικόνα 2.7 – Σχηματική αναπαράσταση μίας υπεραγώγιμης μαγνητικής συσκευής αποθήκευσης ενέργειας

Τα βασικά πλεονεκτήματα των υπεραγώγιμων μαγνητικών συσκευών αποθήκευσης είναι η υψηλή αποδοτικότητα τους καθώς και ο πολύ μικρός χρόνος απόκρισης που παρουσιάζουν. Επιπλέον, μπορούν να αποφορτιστούν πλήρως και παρουσιάζουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Τα βασικά μειονεκτήματά τους, από την άλλη πλευρά, είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας εξαιτίας κυρίως των συστημάτων ψύξης που απαιτούν.

Προς το παρόν, οι SMES συσκευές έχουν χρησιμοποιηθεί σε ταχείας απόκρισης και σχετικά μικρής χωρητικότητας εφαρμογές, κυρίως για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος ηλεκτρικών δικτύων καθώς και σε εφαρμογές σταθεροποίησης δικτύων [12,13]. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά τους αυτά, τις καθιστούν κατάλληλες για σιδηροδρομικά δίκτυα, ιδιαίτερα για την περίπτωση στατικών συσκευών αποθήκευσης που είναι εγκατεστημένες στους σταθμούς [14,15].

2.5 Χαρακτηριστικά του αστικού σιδηροδρομικού "φορτίου"

Όπως είναι γνωστό, ένας τυπικός κύκλος λειτουργίας ενός σιδηροδρομικού οχήματος περιλαμβάνει την φάση εκκίνησης, σταθερής πορείας και πέδησης. Αυτός ο κύκλος οδήγησης περιλαμβάνει πρακτικά τρεις διαφορετικές κινητικές καταστάσεις: επιτάχυνση, πορεία με σταθερή ταχύτητα, επιβράδυνση και στάση.

Στην περίπτωση των ηλεκτροδοτούμενων σιδηροδρομικών δικτύων, η ενέργεια κατά την φάση της επιτάχυνσης παρέχεται από το κυρίως δίκτυο τροφοδοσίας. Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται μερικώς σαν κινητική ενέργεια της συνολικής μάζας του οχήματος.

Κατά τη διάρκεια της πορείας με σταθερή ταχύτητα, η ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο μειώνεται και πλέον δεν αποθηκεύεται σαν κινητική ενέργεια. Η φάση αυτή είναι μεγάλη σε τρένα που καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις και πολύ μικρή στα αστικά και υπεραστικά τρένα.

Κατά τη φάση της ηλεκτρικής πέδησης, χωρίς ανατροφοδότηση, ηλεκτρικοί κινητήρες λειτουργούν σαν γεννήτριες και η ενέργεια που παράγεται κατά την πέδηση καταναλώνεται σε ειδικούς ροοστάτες πέδησης και αυτό συνοδεύεται με υψηλές απώλειες ενέργειας εξαιτίας του ύψους της ενέργειας πέδησης. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η κινητική ενέργεια του οχήματος αποσβένεται και με τη χρήση μηχανικού φρεναρίσματος, το οποίο όμως επιστρατεύεται πάντοτε για σχετικά μικρές ταχύτητες (της τάξης των 10 km/h), προκειμένου να αναπληρώσει την ανεπάρκεια του ηλεκτρικού φρεναρίσματος σε μικρές ταχύτητες. Σε κάθε περίπτωση το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας την οποία παράγει το όχημα κατά την πέδηση χάνεται.

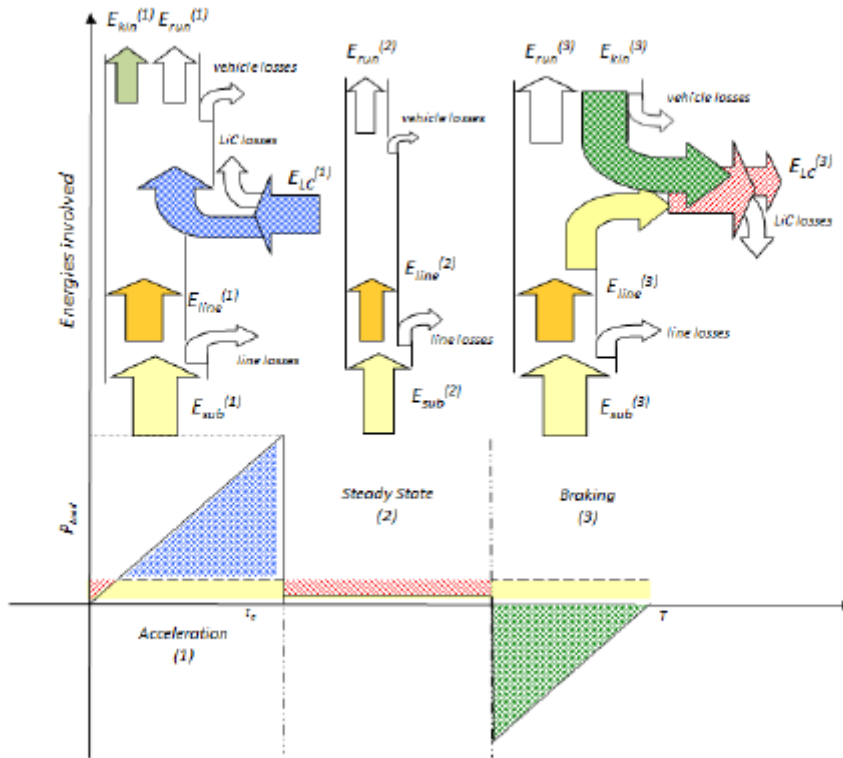
Η εγκατάσταση μιας μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπει την παροχή της ενέργειας που απαιτείται από το όχημα κατά την επιτάχυνσή του να γίνεται κατά ένα από τη συσκευή αυτή, η οποία κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής να εκφορτίζεται, και κατά το υπόλοιπο μέρος από το δίκτυο παροχής ενέργειας. Όσον αφορά τώρα την πέδηση, η συσκευή αποθήκευσης φορτίζεται μέχρι να φτάσει στην αρχική κατάσταση φόρτισης από την ενέργεια που έρχεται από τον κινητήρα του τρένου που λειτουργεί σαν ηλεκτρική γεννήτρια. Το σύστημα ελέγχου της συσκευής αποθήκευσης θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε η κεντρική τροφοδοσία ενέργειας να μην χρειάζεται ποτέ να στείλει όλο το ποσό της ισχύος επιτάχυνσης. Επιπλέον, όταν ο συρμός κινείται με τη μέγιστη ταχύτητα η συσκευή αποθήκευσης θα πρέπει να είναι εντελώς εκφορτισμένη.

Το γράφημα 2.8 παρουσιάζει έναν τυπικό κύκλο οδήγησης τονίζοντας την ταχύτητα τη ροπή του κινητήρα και τη μηχανική ισχύ εν παραλλήλω με την λειτουργία της συσκευής αποθήκευσης.

Είναι προφανές ότι θα ήταν προς όφελός μας να αποθηκεύουν την κινητική ενέργεια του οχήματος κατά τη φάση της πέδησης και να την επαναχρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της επόμενης φάσης επιτάχυνσης για οχήματα με συχνές εκκίνησης και στάσεις.

Το μέγεθος της συσκευής αποθήκευσης καθορίζεται από τη μάζα και τη μέγιστη ταχύτητα καθώς και από τη συχνότητα των επιταχύνσεων και των επιβραδύνσεων. Οι παράμετροι αυτοί καθορίζουν το ποσό της ενέργειας που θα πρέπει να αποθηκευτεί καθώς και την απαιτούμενη αποδοτικότητα ισχύος της συσκευής.

Η ενέργεια και ισχύς πέδησης προσδιορίζουν και το χρόνο της πέδησης, ο οποίος συνδέεται άμεσα με τον απαιτούμενο χρόνο φόρτισης της συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.



Γράφημα 2.8 – Κύκλος οδήγησης σε αντιδιαστολή με τον κύκλο αποθήκευσης ενέργειας για ένα τυπικό σιδηροδρομικό δίκτυο

Η επιλογή της κατάλληλης συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για ένα σιδηροδρομικό δίκτυο εξαρτάται άμεσα από το είδος των οχημάτων και των παρεχόμενων υπηρεσιών. Ο ακόλουθος πίνακας 2.1 παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο ώστε να καθορίσουμε τις παραμέτρους της συσκευής αποθήκευσης.

Characteristics of rail application context	Corresponding parameter of energy storage device
<i>Braking time</i>	↔ <i>Charging time / power density</i>
<i>Braking energy</i>	↔ <i>Energy density</i>
<i>Drive cycles in lifetime</i>	↔ <i>Product life / reliability</i>

Πίνακας 2.1 – Τα βασικά χαρακτηριστικά των σιδηροδρομικών δικτύων που καθορίζουν τις προδιαγραφές των συσκευών αποθήκευσης

Ωστόσο, εκτός από αυτές τις βασικές προϋποθέσεις, είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη μας και το οικονομικό αντίκτυπο που θα έχει η εγκατάσταση της νέας αυτής τεχνολογίας σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο για τον επενδυτή.

Αρχικά, η εγκατάσταση της συσκευής αποθήκευσης καταλαμβάνει έναν σημαντικό όγκο την ίδια στιγμή που το συνολικό βάρος του οχήματος αυξάνεται σημαντικά. Συνεπώς απαιτείται

μία ακριβής ανάλυση προκειμένου να βρούμε τη σχέση αυτή μεταξύ όγκου, βάρους, κόστους και τεχνικών χαρακτηριστικών.

Επιπρόσθετα, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τόσο των σιδηροδρομικών οχημάτων όσο και των παρεχόμενων υπηρεσιών, προκειμένου να καταλήξουμε στην τελική επιλογή και στη σωστή εφαρμογή της συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, τα γενικά χαρακτηριστικά για τα οχήματα που καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις, όπως οι ταχείες αμαξοστοιχίες και τα intercity τρένα, παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα αστικά και υπεραστικά σιδηροδρομικά οχήματα. Κατά συνέπεια υπάρχουν πολλοί τεχνικοί παράγοντες που καθορίζουν τον τύπο της κατάλληλης συσκευής αποθήκευσης για κάθε περίπτωση. Ο πίνακας 22 παρουσιάζει τα σχετικά αυτά χαρακτηριστικά για κάποια τρένα.

Τέλος, ο οικονομικός απολογισμός της επένδυσης της νέας αυτής τεχνολογίας φαίνεται ότι παρουσιάζει μεγαλύτερα κέρδη για οχήματα που κινούνται σε σχετικά χαμηλή ταχύτητα, έχουν υψηλά ποσοστά επιταχύνσεων/επιβραδύνσεων και κινούνται σε μικρές διαδρομές. Αξίζει να παρατηρήσουμε την ισχύ που παράγεται κατά την πέδηση σε σχέση με την μέγιστη δύναμη κίνησης για κάθε τύπο οχήματος και κύκλου οδήγησης, χωρίς όμως να ξεχνάμε και τη διάρκεια ζωής.

Με βάση τον πίνακα 2.2 μπορεί να γίνει αντιληπτό πως η χρήση της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας είναι πολύ πιο αποδοτική στα αστικά παρά στα υπεραστικά και ταχεία σιδηροδρομικά δίκτυα.

Characteristics of vehicle and service	Regional Multiple Unit	Suburban EMU	Metro / Light Rail Vehicles
Total convoy mass	250 Ton	160 Ton	100 / 39 Ton
Top speed	160 km/h	100 km/h	80 / 70 km/h
Traction drive power	4000 kW	1200 kW	600 / 300 kW
Maximum tractive effort	250 kN	180 kN	150 / 60 kN
Braking power	4800 kW	3000 kW	1200 / 900 kW
Maximum braking effort	270 kN	200 kN	160 / 100 kN
Storable kinetic energy	70 kWh	16 kWh	8 / 2 kWh
Braking time	50 s	15 s	12 / 9 s
Drive cycles per year	40000	100000	300000
Drive cycles in lifetime (10^6)	0.8	2	6

Πίνακας 2.2 – Χαρακτηριστικά λειτουργίας κάποιων σιδηροδρομικών οχημάτων ανάλογα με τη χρήση τους

2.6 Συγκριτική ανάλυση των διαφόρων τύπων συσκευών αποθήκευσης στις αστικές σιδηροδρομικές συγκοινωνίες

Προκειμένου να συγκρίνουμε και να αξιολογήσουμε την καταλληλότητα των παραπάνω τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα, το βασικό κριτήριο που θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας είναι η αποδοτικότητα ισχύος και ενέργειας.

Ο πίνακας 2.3 μας παρουσιάζει ενδεικτικά μεγέθη της πυκνότητας ισχύος και ενέργειας, καθώς και της τυπικής αποδοτικότητας, αλλά και του χρόνου εκφόρτισης της κάθε τεχνολογίας συσκευής αποθήκευσης. Παράλληλα μας δίνει στοιχεία που σχετίζονται με το ποσοστό της ημερησίας αποφόρτισης της κάθε συσκευής, τη διάρκεια ζωής, του κόστους ισχύος και ενέργειας και τέλος τις επιδράσεις στο περιβάλλον που έχει η κάθε τεχνολογία.

ESS technology	Energy and Power density			Typical Efficiency (%)	Discharge time (s)
	(Wh/kg)	(kW/kg)	(kWh/m ³)		
Lead-acid Batteries	20 ÷ 50	0.025 ÷ 0.3	50 ÷ 80	70 ÷ 90	1 ÷ 3600
NiCd Batteries	30 ÷ 75	0.05 ÷ 0.3	60 ÷ 150	60 ÷ 80	1 ÷ 3600
NiMH Batteries	60 ÷ 80	0.2 ÷ 0.25	100 ÷ 150	65 ÷ 70	1 ÷ 3600
Li-ion Batteries	75 ÷ 200	0.1 ÷ 0.35	150 ÷ 500	90 ÷ 95	1 ÷ 3600
Li-poly Batteries	100 ÷ 200	0.15 ÷ 0.35	150 ÷ 200	90 ÷ 95	1 ÷ 3600
NaS Batteries	120 ÷ 240	0.12 ÷ 0.23	110 ÷ 250	70 ÷ 90	1 ÷ 3600
ZEBRA Batteries	100 ÷ 200	0.15 ÷ 0.2	120 ÷ 180	85 ÷ 90	1 ÷ 3600
Flywheel	5 ÷ 100	1 ÷ 5	20 ÷ 80	90 ÷ 95	0.1 ÷ 60
EDLC	1 ÷ 6	0.5 ÷ 5	1 ÷ 14	90 ÷ 95	0.1 ÷ 60
Li-ion Capacitors	10 ÷ 15	0.5 ÷ 5	15 ÷ 30	90 ÷ 97	0.1 ÷ 10 ³
SMES	0.5 ÷ 5	0.5 ÷ 2	0.2 ÷ 2.5	95 ÷ 98	0.1 ÷ 1
ESS technology	Self-discharge (daily % of rated capacity) (%)	Lifetime (number of cycles) (-)	Capital cost (per energy) (€/kWh)	Capital cost (per power) (€/kW)	Environmental impact
Lead-acid Batteries	0.05 ÷ 0.3	200 ÷ 2000	35 ÷ 300	220 ÷ 440	negative
NiCd Batteries	0.2 ÷ 0.6	1500 ÷ 3000	300 ÷ 1800	350 ÷ 1000	negative
NiMH Batteries	1 ÷ 2	1500 ÷ 3000	300 ÷ 1800	350 ÷ 1000	negative
Li-ion Batteries	0.1 ÷ 0.3	10 ³ ÷ 10 ⁵	350 ÷ 1850	900 ÷ 3000	small
Li-poly Batteries	0.15	600 ÷ 1500	650 ÷ 1000	900 ÷ 3000	small
NaS Batteries	20	2000 ÷ 3000	220 ÷ 370	750 ÷ 2200	negative
ZEBRA Batteries	15	>2500	75 ÷ 150	100 ÷ 200	negative
Flywheel	100	<10 ⁷	750 ÷ 3700	190 ÷ 260	almost none
EDLC	20 ÷ 40	<10 ⁶	200 ÷ 1400	90 ÷ 200	moderate
Li-ion Capacitors	0.1 ÷ 0.2	<10 ⁶	5000=10000	n.a.	moderate
SMES	10 ÷ 15	>10 ⁵	750 ÷ 7500	180 ÷ 200	negative

Πίνακας 2.3 – Σύγκριση των τεχνικών χαρακτηριστικών των διαφορετικών τεχνολογιών συσκευών αποθήκευσης ενέργειας για αστικές σιδηροδρομικές εφαρμογές

Με βάση τον πίνακα αυτό λοιπόν καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

Οι **μπαταρίες** έχουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας αλλά χαμηλή πυκνότητα ισχύος, γεγονός που καθιστά τον χρόνο φόρτισης τους αρκετά μεγάλο. Οι μπαταρίες λιθίου έχουν βέβαια αποδεκτές πυκνότητες ισχύος, αλλά δεν ικανοποιούν το κριτήριο της διάρκειας ζωής. Για το λόγο αυτό οι μπαταρίες στην παρούσα φάση δεν αποτελούν την πρώτη επιλογή για συσκευή αποθήκευσης ενέργειας στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα.

Οι **συσσκευές αποθήκευσης με κινητά μέρη (flywheels)** διαθέτουν υψηλές πυκνότητες ισχύος και ενέργειας και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλες για τις περισσότερες περιπτώσεις, ιδιαίτερα για υπεραστικά τρένα.

Οι **υπερπυκνωτές**, οι οποίοι παρουσιάζουν σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να αποτελούν αρκετά δελεαστική λύση για σιδηροδρομικά δίκτυα και ιδιαίτερα μέτρο και τραμ.

Αναμφισβήτητο, οι υπερπυκνωτές αποτελούν μέχρι στιγμής την καλύτερη επιλογή για συσκευές αποθήκευσης προσαρμοσμένες πάνω στα σιδηροδρομικά οχήματα (κινητές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας), εξαιτίας της ταχείας απόκρισης, υψηλής πυκνότητας ισχύος και σχετικά χαμηλού κόστους, παρόλο που δεν είναι ικανές να προσφέρουν αυτονομία κινήσεις στα οχήματα εξαιτίας της μικρής χωρητικότητας ενέργειας που διαθέτουν. Το κενό αυτό μπορεί να καλυφθεί με τη χρήση Li-ion μπαταριών, ιδιαίτερα μάλιστα αν καταφέρουμε να επιτύχουμε τέτοιες μπαταρίες με ακόμα υψηλότερη πυκνότητα ισχύος και μικρότερο κόστος παραγωγής στο κοντινό μέλλον, όπως αναμένεται.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ένας υβριδικός συνδυασμός των συσκευών αποθήκευσης αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη επιλογή για κινητές συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που προορίζονται για αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα. Η βασική ιδέα πίσω από αυτή την προοπτική είναι η συνεργασία των υπερπυκνωτών με τις μπαταρίες προκειμένου να πάρουμε την ίδια στιγμή υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος. Υβριδική αυτή η συσκευή θα έχει ασφαλώς καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με τις απλές συσκευές αποθήκευσης, ιδιαίτερα στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας. Υβριδική συσκευή αποθήκευσης ενέργειας είναι ικανή να επαναφορτίζεται τόσο από την ανατροφοδοτούμενη ενέργεια πέδησης όσο και από μία ειδικά σχεδιασμένη μονάδα ταχείας φόρτισης στους υποσταθμούς. Από την άλλη πλευρά, οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας με κινητά μέρη όπως και οι υπεραγωγίμες μαγνητικές συσκευές δεν αποτελούν προτεινόμενες λύσεις για κινητά συστήματα εξαιτίας των θεμάτων ασφάλειας.

Όσον αφορά τις συσκευές αποθήκευσης ενέργειας που είναι εγκατεστημένες στους σταθμούς (στατικές συσκευές αποθήκευσης), με δεδομένο ότι έχουμε πολύ λιγότερους περιορισμούς που αφορούν το βάρος και τον όγκο των συσκευών αυτών σε σχέση με τα κινητά συστήματα, το εύρος των τεχνολογιών αποθήκευσης που είναι κατάλληλες για την περίπτωση αυτή είναι πολύ μεγαλύτερο. Οι υπερπυκνωτές διαθέτουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά όταν χρησιμοποιούνται σε συσκευές εξομάλυνσης των αιχμών ισχύος και σταθεροποίησης της τάσης, αλλά όπως και στις κινητές συσκευές αποθήκευσης, η σχετικά μικρή χωρητικότητα ενέργειας μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους με δεδομένο πάντα τις συγκεκριμένες απαιτήσεις που έχει το κάθε σύστημα. Από την άλλη πλευρά οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας με κινητά μέρη (flywheels) μπορούν να εξασφαλίσουν παρόμοιες χωρητικότητες ισχύος αλλά με ελαφρώς υψηλότερες πυκνότητες ενέργειας. Τα θέματα ασφάλειας που σχετίζονται με τα flywheels είναι προφανώς λιγότερο περιοριστικά στην περίπτωση των εγκατεστημένων στους υποσταθμούς συσκευών, καθώς μπορούν με άνεση να τοποθετηθούν σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο. Τέλος οι υπεραγωγοί με μαγνητικές συσκευές αποθήκευσης αποτελούν μία εξίσου καλή εναλλακτική για τις στατικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας εξαιτίας της ταχύτατης

απόκρισής τους, αλλά το υψηλό τους κόστος σε συνδυασμό με τη μεγάλη πολυπλοκότητα που σχετίζεται με τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, εμποδίζουν την ευρεία χρήση τους.

Σε κάθε περίπτωση, προκειμένου να συγκρίνουμε την αποδοτικότητα των δύο διαφορετικών τύπων συσκευών αποθήκευσης θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το κόστος των συσκευών και των απαραίτητων υποδομών που χρειάζονται για τη σωστή λειτουργία τους, το κόστος συντήρησης, το ενεργειακό κόστος καθώς και το χρόνο απόσβεσης της επένδυσης. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη μια οικονομική αποτίμηση της επένδυσης για τη βελτιστοποίηση του κόστους. Γενικά η καλύτερη μέθοδος εγκατάστασης της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται άμεσα από τις αρχές και το σκοπό λειτουργίας της.

2.7 Χαρακτηριστικά της κινητής συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στους αστικούς σιδηροδρόμους

Οι κινητές συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην εξοικονόμηση της ενέργειας στα αστικά δίκτυα μεταφοράς. Κάθε σύστημα λειτουργεί ανεξάρτητα και η ανακλώμενη ενέργεια διοχετεύεται άμεσα στη συσκευή αποθήκευσης που είναι τοποθετημένη πάνω στο όχημα, συνήθως στην οροφή του. Όταν το όχημα επιταχύνει η ενέργεια που χρησιμοποιείται κατά προτεραιότητα προέρχεται από τη συσκευή αποθήκευσης (Εικόνα 1.7).

Καθώς η συσκευή αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι τοποθετημένη απευθείας πάνω στο όχημα, μπορούμε να έχουμε τα εξής πιθανά οφέλη:

- Αποκοπή των αιχμών ισχύος, κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης των οχημάτων η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους ενέργειας και την υψηλότερη αποδοτικότητα εξαιτίας του περιορισμού των απωλειών στις αντιστάσεις των γραμμών.
- Σταθεροποίηση της τάσης περιορίζοντας της πτώσης τάσης του συστήματος διανομής της ενέργειας γεγονός το οποίο πιθανόν να επιτρέπει υψηλότερη κυκλοφοριακή πυκνότητα χωρίς περαιτέρω τροποποίηση των ήδη υπαρχόντων υποδομών παροχής ενέργειας.
- Πιθανότητα για αυτόνομη λειτουργία των οχημάτων σε συγκεκριμένα σημεία της διαδρομής.
- Δυνατότητα αφαίρεσης των ενσωματωμένων αντιστάσεων πέδησης.
- Απλούστερη διαχείριση της αναρτώμενης ενέργειας καθώς ο έλεγχος είναι ανεξάρτητος από τις κυκλοφοριακές συνθήκες και μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με τον κεντρικό έλεγχο της μηχανής του οχήματος.

Από την άλλη πλευρά, τα βασικά μειονεκτήματα των κινητών συσκευών αποθήκευσης είναι η τροποποίηση των παλαιών οχημάτων (περιορισμοί χώρου και βάρους), η τοποθέτηση μιας συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ανά όχημα (παρουσιάζει σημαντικό κόστος), η ακινητοποίηση των οχημάτων για κάποιο χρονικό διάστημα προκειμένου να γίνουν οι απαραίτητες προσαρμογές, η συντήρηση και η επισκευή. Στην πραγματικότητα, για μία κινητή συσκευή αποθήκευσης ενέργειας το όχημα θα πρέπει να διαθέτει αρκετό ελεύθερο χώρο για την εγκατάσταση του κιβωτίου της συσκευής την ίδια στιγμή που η μάζα του οχήματος θα αυξηθεί περίπου 2%, [38] γεγονός που οδηγεί σε μία αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας κίνησης της τάξεως του 1-2% [39,40]. Για το λόγο αυτό η εγκατάσταση κινητής συσκευής αποθήκευσης ενέργειας συνήθως γίνεται κατά τη σχεδίαση νέων οχημάτων.

Είναι απαραίτητη η ενδελεχής έρευνα προκειμένου να καταλήξουμε τη βέλτιστη σχεδίαση μιας κινητής μονάδας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να

αποφύγουμε περιττή αύξηση τόσο της μάζας όσο και του όγκου του συστήματος (περίπτωση *oversizing*) ή την μη αξιοποίηση της ενέργειας (περίπτωση *downsizing*). Η διαστασιολόγηση της συσκευής εξαρτάται άμεσα από το σκοπό για τον οποίο έχει σχεδιαστεί.

Όταν στοχεύουμε στη βελτίωση της εξοικονόμησης ενέργειας, το βασικό κριτήριο που θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας είναι η αύξηση της μέγιστης δυνατής ποσότητας ενέργειας πέδησης που μπορεί να ανακτηθεί σε ένα απότομο φρενάρισμα, υποθέτοντας ότι δεν επιτρέπεται να επιστραφεί καθόλου ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο [16]. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει πολύ πιο ακριβείς αν λάβουμε υπόψη μας τι μεταβλητή ταχύτητα και το ποσοστό πληρότητας του οχήματος, καθώς επίσης το βάρος και το κόστος προκειμένου να καταλήξουμε στο βέλτιστο μέγεθος της συσκευής [17,18].

Αν πρωτεύοντας στόχος μας είναι να περιορίσουμε τις πτώσεις τάσης στη γραμμή τροφοδοσίας [19], ή να υποστηρίξουμε τα AC και DC βοηθητικά ηλεκτρονικά κυκλώματα του τρένου (κλιματισμός, εξαερισμός, φωτισμός κ.λ.π) [20], απαιτείται να λάβουμε υπόψη μας τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ολόκληρης της γραμμής, όπως για παράδειγμα η απόσταση μεταξύ των υποσταθμών και τα δρομολόγια των τρένων [18,21]. Κάποιες προσεγγίσεις, που βασίζονται σε τεχνικές βελτιστοποίησης, χρησιμοποιούνται προκειμένου να πετύχουμε καλύτερα αποτελέσματα διαστασιολόγησης της συσκευής αποθήκευσης και με τον τρόπο αυτό να εξασφαλίσουμε την ελαχιστοποίηση των πτώσεων τάσης στη γραμμή [22].

Τέλος, στην περίπτωση που βασικός στόχος μας είναι η συσκευή αποθήκευσης να επιτρέπει την μερική αυτόνομη λειτουργία [23,24], η διαστασιολόγηση της συσκευής θα πρέπει να γίνει με σκοπό να παρέχει ενέργεια τόσο στον κινητήρα όσο και στα βοηθητικά συστήματα του οχήματος. Ακόμη και στην περίπτωση αυτή, συνηθίζουμε να στοχεύουμε στη βελτιστοποίηση της οδηγικής συμπεριφοράς του οχήματος και για το λόγο αυτό προσπαθούμε να περιορίσουμε όσο το δυνατόν το μέγεθος της κινητής συσκευής αποθήκευσης [18,25].

Όσον αφορά τον έλεγχο της κινητής συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει να λαμβάνουμε σοβαρά υπόψη μας μία σειρά από παραμέτρους, όπως η ταχύτητα και η μάζα του οχήματος, η κατάσταση φόρτισης, η απαιτούμενη ισχύς πορείας και η τάση της γραμμής. Σε κάθε περίπτωση τα συστήματα ελέγχου θα πρέπει να εγγυώνται ότι η συσκευή είναι αρκετά φορτισμένη προκειμένου να δώσει ισχύει στο όχημα κατά τη διάρκεια των επιταχύνσεων καθώς και ότι διατηρείται εκφορτισμένη κατά τη διάρκεια της πέδησης ή της φάσεως φόρτισής της από την κεντρική τροφοδοσία, έτσι ώστε να μπορεί να δεχτεί την υψηλότερη δυνατή ποσότητα ανατροφοδοτούμενης ενέργειας.

2.8 Χαρακτηριστικά των εγκατεστημένων στους σταθμούς συσκευών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στους αστικούς σιδηροδρόμους

Οι εγκατεστημένες στους σταθμούς (στατικές) συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από μία ή περισσότερες συσκευές αποθήκευσης τοποθετημένες κατά μήκος των συρμών (Εικόνα 1.8). Η διάταξη αυτή έχει την ικανότητα να αποθηκεύει την περίσσεια ενέργεια πέδησης που δεν μπορεί να τροφοδοτηθεί απευθείας σε κάποιο άλλο προκειμένου να την επιστρέψει πίσω στο δίκτυο κατά τη διάρκεια κάποιας μετέπειτα επιτάχυνσης εφόσον αυτή συμβαίνει στο ίδιο τμήμα τροφοδοσίας με τη συσκευή. Αυτό συνεισφέρει σημαντικά στην ταχεία και αποτελεσματική ανάκτηση ενέργειας, που σχετίζεται με την μείωση του ρυθμού παροχής ισχύος από το δίκτυο καθώς περιορίζονται οι αιχμές ισχύος, καθώς και με τη συνολική βελτίωση της ποιότητας ισχύος για το σύνολο του ηλεκτρικού αστικού σιδηροδρομικού δικτύου [26]. Στην παρούσα φάση, οι στατικές συσκευές αποθήκευσης φαίνεται ότι αποτελούν την πιο κατάλληλη λύση για τον περιορισμό των πτώσεων τάσης χωρίς

να απαιτούνται σημαντικές τροποποιήσεις στα βασικά στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου, όπως για παράδειγμα την ενίσχυση των υφιστάμενων ηλεκτρικών υποσταθμών ή την αύξηση της διατηρησιακής περιοχής των γραμμών μεταφοράς ενέργειας [19]. Τέλος, η εγκατάσταση και η συντήρησή τους δεν επηρεάζει τη λειτουργικότητα του σιδηροδρομικού δικτύου.

Οι στατικές συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως εγκαθίστανται δίπλα στους υπάρχοντες ηλεκτρικούς υποσταθμούς ή σε συγκεκριμένα σημεία όπου οι διακυμάνσεις της τάσης των γραμμών μεταφοράς είναι πιο σημαντικές, όπως για παράδειγμα κοντά σε σταθμούς, όπου συνήθως συμβαίνουν ταυτόχρονα οι μέγιστες επιτάχυνσεις και επιβράδυνσεις όταν συναντούνται δύο οχήματα που κυκλοφορούν στο ίδιο τμήμα της γραμμής μεταφοράς με αντίθετες κατευθύνσεις [27].

Η λύση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί από όλα τα οχήματα που λειτουργούν στο δίκτυο επιτρέπει διαφορετικά πλεονεκτήματα όπως η σταθεροποίηση της τάσης περιορίζοντας τις πτώσεις τάσης που συμβαίνουν συνήθως στα άκρα των γραμμών [28], ο περιορισμός των αιχμών ζήτησης ισχύος ισοκαταμερίζοντας τα φορτία σε μία χρονική περίοδο, η μείωση του αριθμού των ηλεκτρικών υποσταθμών ή ακόμα η πιθανότητα να συμπεριλάβουμε περισσότερα οχήματα χωρίς να αναβαθμίσουμε το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο. Τα βασικά μειονεκτήματα σχετίζονται με τη δυσκολία που ενέχει η σωστή διαστασιολόγηση καθώς και η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για εγκατάσταση των συσκευών, η μείωση της αποδοτικότητας του συστήματος εξαιτίας της αύξησης των απωλειών ενέργειας στις γραμμές καθώς αυξάνεται η απόσταση του οχήματος από τις συσκευές, το γεγονός ότι η εσφαλμένη επιλογή του σωστού μεγέθους για τη συσκευή μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ενέργειας στους ροοστάτες πέδησης, η κατάληψη σημαντικού χώρου στους υποσταθμούς ή κατά μήκος των γραμμών καθώς και η αδυναμία για αυτόνομη λειτουργία των οχημάτων.

Όσον αφορά τη σχεδίαση των συσκευών είναι πολύ σημαντικό να λάβουμε υπόψη μας τη διακύμανση των κυκλοφοριακών συνθηκών καθώς και της συχνότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ενδελεχή ανάλυση των παραμέτρων αυτών προκειμένου να καταλήξουμε στην πιο αποδοτική λύση που βελτιστοποιεί τόσο το μέγεθος όσο και την θέση των στατικών συσκευών αποθήκευσης [29].

Οι διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης απαιτούν τον κατάλληλο ελεγκτή όποιος σε γενικές γραμμές λειτουργεί σαν μία συνάρτηση της τάσης των γραμμών και συγκεκριμένα όταν ανιχνεύεται υπέρταση σαν αποτέλεσμα της πέδησης οποιουδήποτε τρένου, η συσκευή αποθήκευσης φορτίζεται χρησιμοποιώντας την περιουσία της ανατροφοδοτούμενη σε ενέργειες στη γραμμή και κατά αντιστοιχία όταν παρουσιάζεται πτώση τάσης, η συσκευή παρέχει την αποθηκευμένη ενέργεια προκειμένου να διατηρήσει την επιθυμητή τάση στο δίκτυο.

2.9 Βιβλιογραφία

- [1] Ibrahim, H.; Ilinca, A.; Perron, J. Energy storage systems-characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12 (5), June 2008, pp. 1221-1250.
- [2] Chen, H.; Cong, T. N.; Yang, W.; Tan, C.; Li, Y.; Ding, Y. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, vol. 19 (3), Mar. 2009, pp. 291-312.
- [3] Ribeiro, P. F.; Johnson, B. K.; Crow, M. L.; Arsoy, A.; Liu, Y. Energy storage systems for advances power applications. *Proceedings of the IEEE*, vol. 89 (12), 2001, pp. 1744-1756.
- [4] Vazquez, S.; Lukic, S. M.; Galvan, E.; Franquelo, L. G.; Carrasco, J. M. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57 (12), Dec. 2010, pp. 3881-3895.

- [5] González-Gil, A.; Palacin, R., Batty, P. Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. *Energy Conversion and Management*, vol. 75, 2013, pp. 374-388.
- [6] Abrahamsson, J.; Bernhoff, H. Magnetic bearings in kinetic energy storage systems for vehicular applications. *Journal of Electrical Systems*, vol. 7 (2), June 2011, pp. 225-236.
- [7] Suzuki, Y.; Koyanagi, A.; Kobayashi, M.; Shimada, R. Novel applications of the flywheel energy storage system. *Energy*, vol. 30 (11-12 sp. iss.), Aug. 2005, pp. 2128-2143.
- [8] Richardson, M. B.. Flywheel energy storage system for traction applications. *Proc. Int. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives, PEMD 2002*, (Conf. Publ. No. 487), Bath, UK, 4-7 June 2002, pp. 275,279.
- [9] Liu, H.; Jiang, J. Flywheel energy storage-an upswing technology for energy sustainability. *Energy and Buildings*, vol. 39 (5), May 2007, pp. 599-604.
- [10] Flynn, M. M.; McMullen, P.; Solis, O. Saving energy using flywheels. *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 14 (6), Nov. 2008, pp. 69-76.
- [11] Miller, J. M. *Ultracapacitor Applications*. Iet Power and Energy Series, The Institution of Engineering and Technology , London, UK, 2011.
- [12] Hsu, C.; Lee, W. Superconducting magnetic energy storage for power system applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29(5), Sept. 1993, pp. 990-996.
- [13] Sutanto, D., Cheng, K. W. E. Superconducting magnetic energy storage systems for power system applications. *Proc. 2009 Int. Conf. on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, ASEMD 2009*, Chengdu, China; 25-27 Sept. 2009, pp. 377-380.
- [14] Suzuki, S.; Baba, J.; Shutoh, K.; Masada, E. Effective application of superconducting magnetic energy storage (SMES) to load leveling for high speed transportation system. *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 14 (2), June 2004, pp.713,716.
- [15] Ise, T.; Kita, M.; Taguchi, A. A hybrid energy storage with a SMES and secondary battery. *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 15 (2 part II), June 2005, pp. 1915-1918.
- [16] Ciccarelli, F.; Iannuzzi, D.; Tricoli, P. Speed-based supercapacitor state of charge tracker for light railway vehicles. *Proc. 14th Eur. Conf. Power Electronics and Applications EPE 2011*, Birmingham, UK, Aug. 30 – Sept. 1, 2011.
- [17] Barrero R.; Tackoen X.; Van Mierlo, J. Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles. *Proc. 13th Int. Power Electron. and Motion Control Conf. EPE-PEMC 2008*, Poznan, Poland, 1-3 Sept. 2008, pp. 1512-1517.
- [18] Szenasy, I. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. *Proc. 5th Vehicle Power and Propulsion Conf. VPPC 2009*, Dearborn, Michigan, USA, 7-10 Sep. 2008, pp. 181-187.
- [19] Iannuzzi, D.; Pagano, E.; Tricoli, P.. The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines. *Energies*, vol. 6 (4), Apr. 2013, pp. 1802-1820.
- [20] Xiao-li, C., Jian, Y.; Yu, F. Model and simulation of a super-capacitor braking energy recovery system for urban railway vehicles. *Proc. WASE Int. Conf. on Information Eng. ICIE 2010*, Beidaihe, China, 14-15 Aug. 2010, pp. 295-300.
- [21] Steiner, M.; Scholten, J. Energy storage on board of railway vehicles. *Proc. 11th Eur. Conf. Power Electron. and Applicat. EPE 2005*, Dresden, Germany, 11-14 Sept. 2005.
- [22] Iannuzzi, D.; Tricoli, P. Optimal control strategy of onboard supercapacitor storage system for light railway vehicles. *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics ISIE 2010*, Bari, Italy, 4-7 July 2010, pp.280-285.

- [23] Allègre, A.L.; Bouscayrol, A.; Delarue, P.; Barrade, P.; Chattot, E.; El-Fassi, S. Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57 (12), Dec. 2010, pp. 4001-4012.
- [24] Ishino, K.; Sakamoto, K.; Miyatake, M. Energy-saving operating strategy of a catenary free light rail transit. *Proc. 15th Int. Conf. on Electrical Machines and Systems ICEMS 2010*, Sapporo, Japan, 21-24 Oct. 2012.
- [25] Ogasa, M. Application of energy storage technologies for electric railway vehicles-examples with hybrid electric railway vehicles. *IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5 (3), May 2010, pp. 304-311.
- [26] Konishi, T.; Morimoto, H.; Aihara, T.; Tsutakawa, M. Fixed energy storage technology applied for DC electrified railway. *IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5 (3), May 2010, pp. 270–277.
- [27] Brenna, M.; Foadelli, F.; Zaninelli, D.; Roscia, M. Prospective for Energy Saving by Means of Ultracapacitors in Electric Systems for Transportation. *Proc. Int. Conf. and Exhib. on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER 2009*, Monaco, 26-29 Mar. 2009.
- [28] Rufer, A.; Hotellier, D.; Barrade, P. A Supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19 (2), Feb. 2004, pp. 629-636.
- [29] Iannuzzi, D.; Lauria, D.; Tricoli, P. Optimal Design of Stationary Supercapacitors Storage Devices for Light Electrical Transportation Systems. *Journal of Optimization and Engineering*, vol. 13 (4), Dec. 2012, pp. 689-704.
- [30] Flavio Ciccarelli; Diego Iannuzzi; Claudio Serpico; Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems, Mar. 2017.

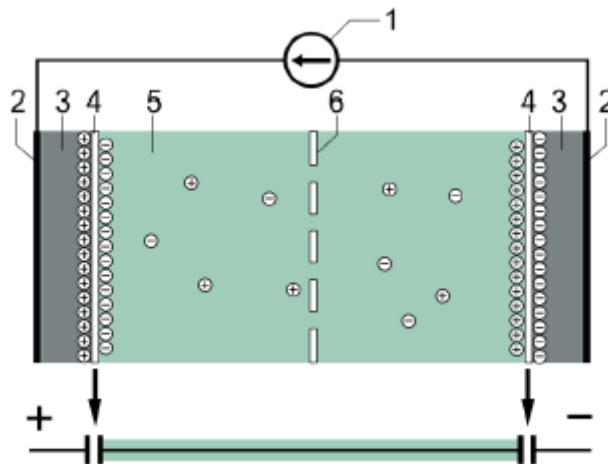
Κεφάλαιο 3^ο

Επισκόπηση στους Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές ή επίσημα πυκνωτές διπλής βαθμίδας, ανήκουν στην οικογένεια των ηλεκτροχημικών πυκνωτών. Οι υπερπυκνωτές δεν διαθέτουν συμβατικό στέρεο διηλεκτρικό μέσο, όπως συμβαίνει με τους συνήθεις ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές, με συνέπεια να διαφέρουν σημαντικά τόσο στην κατασκευή όσο και στη λειτουργία τους σε σχέση με τους τελευταίους. Έχουν μία χαρακτηριστική χωρητικότητα της τάξεως του F/g ή F/cm^2 , που είναι κατά πολύ υψηλότερη σε σχέση με τους περισσότερους απλούς ηλεκτροστατικούς πυκνωτές, των οποίων η χωρητικότητα είναι της τάξης των μερικών pico ή milli-farad ανά μονάδα μάζας ή όγκου.

Η αρχή λειτουργίας ενός υπερπυκνωτή στηρίζεται στο φαινόμενο που για πρώτη φορά παρατηρήθηκε από τον H. Helmholtz [1-3]. Εν συντομία, αν ένα ηλεκτρόδιο βυθιστεί σε έναν ηλεκτρολύτη, τότε κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη, παρατηρείται διαχωρισμός φορτίων. Καθώς απαιτούνται δύο ηλεκτρόδια προκειμένου να έχουμε ροή ρεύματος, είναι προφανές ότι απαιτούνται δύο από τις παραπάνω διεπαφές.

Πιο συγκεκριμένα, στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου μπορεί να εμφανιστεί περίσσεια ηλεκτρονίων (και έλλειμμα στο άλλο ηλεκτρόδιο αντίστοιχα), η οποία τείνει να εξισορροπηθεί από τα ιόντα του ηλεκτρολύτη προκειμένου να διατηρηθεί ηλεκτρική ουδετερότητα. Η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας των ηλεκτροδίων και του κέντρου του ηλεκτρολύτη (με άλλα λόγια η απόσταση διαχωρισμού του φορτίου), που σχηματίζει μία βαθμίδα είναι ισοδύναμη με τη διηλεκτρική αντίσταση ενός κλασικού πυκνωτή. Έτσι η κάθε μία από τις δύο διαμορφωμένες διεπαφές είναι ισοδύναμη με την αντίστοιχη διεπαφή του κλασικού πυκνωτή, με συνέπεια η συσκευή να ισοδυναμεί με εν σειρά σύνδεση δύο πυκνωτών όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1 – Βασική μονάδα ενός πυκνωτή διπλής βαθμίδας: 1. Πηγή, 2. Συλλέκτες ρεύματος, 3. Πολωμένα ηλεκτρόδια, 4. Ηλεκτρική διπλή στρώση Helmholtz, 5. Διάλυμα ηλεκτρολύτη που περιέχει θετικά και αρνητικά ιόντα, 6. Διαχωριστής [8]

Έτσι λοιπόν το όνομα πυκνωτής διπλής βαθμίδας προκύπτει από αυτές τις δύο βαθμίδες όπου η ενέργεια αποθηκεύεται εξαιτίας της δημιουργίας ενός σημαντικού ηλεκτροστατικού πεδίου. Ο διαχωριστής αποτρέπει οποιαδήποτε απευθείας επαφή μεταξύ των ηλεκτροδίων το οποίο θα μπορούσε να δημιουργήσει βραχυκύκλωμα.

Ένας τυπικός ηλεκτρικός πυκνωτής διπλής βαθμίδας κατασκευάζεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1, από δύο μεταλλικές πλάκες, συλλέκτες ρεύματος, στους οποίους τοποθετείται το υλικό του ηλεκτροδίου, συγκολλάται και διαχωρίζεται με μία μεμβράνη, που λειτουργεί σαν μονωτήρας μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Η μεμβράνη αυτή, όμως, θα πρέπει παράλληλα να επιτρέπει την διέλευση των ιόντων του ηλεκτρολύτη. Σε σχέση με τις ηλεκτροχημικές μπαταρίες, η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στον ηλεκτρικό διβάθμιο πυκνωτή δεν έχουμε τη διεξαγωγή ηλεκτροχημικών αντιδράσεων και την εναλλαγή φάσεων.

Η ενέργεια αποθηκεύεται χρησιμοποιώντας την αμφίδρομη απορρόφηση των ιόντων του ηλεκτρολύτη σε ενεργά υλικά που είναι ηλεκτροχημικά σταθερά και έχουν υψηλή διαπερατότητα, κάνοντας εφικτή την πολύ συχνή εναλλαγή μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης. Η διβάθμια διαφορική χωρητικότητα κατά Helmholtz δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_h = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad (3.1)$$

όπου $\epsilon_0 \epsilon_r$ αντιπροσωπεύει τη διηλεκτρική σταθερά, S είναι η επιφάνεια του ηλεκτροδίου και d είναι η επιφάνεια μεταξύ των ηλεκτροδίων και ταυτοποιεί το πάχος των δύο βαθμίδων.

Οστόσο, οι Gouy και Chapman πρότειναν ένα μαθηματικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας τη διαφορική εξίσωση Poisson και την κατανομή Boltzman, που ορίζει τη διβάθμια διαφορική χωρητικότητα ως εξής:

$$C_{g-c} = z \sqrt{\frac{2qn_0\epsilon}{u_t}} \cosh \frac{z\psi_0}{2u_t} \quad (3.2)$$

όπου ϵ είναι η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά, z είναι το σθένος των ιόντων, n_0 ο αριθμός των ιόντων ανά κυβικό μέτρο, ψ_0 η διαφορά τάσης που εφαρμόζεται, q το στοιχειώδες φορτίο και u_t η θερμοδυναμική κατανομή που ορίζεται ως:

$$u_t = \frac{kT}{q} \quad (3.3)$$

όπου με T να συμβολίζεται η θερμοκρασία (στην κλίμακα Kelvin) και με k η σταθερά Boltzman.

Τέλος, ο Stern γενίκευσε και συνδύασε τις δύο παραπάνω θεωρίες, συνυπολογίζοντας και το μέγεθος των ιόντων στο διάλειμμα, καταλήγοντας στην παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{1}{C_S} = \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_{g-c}} \quad (3.4)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, οι δύο βαθμίδες διαχωρίζονται σε δύο επιμέρους ζώνες: μία πρώτη περιοχή, όπου σύμφωνα με τη θεωρία του Helmholtz, η κατανομή της πιθανότητας είναι γραμμική, και μία δεύτερη όπου η κατανομή του φορτίου αντιστοίχισε διάχυση διπλής βαθμίδας.

Εκτός από αυτήν τη διαβάθμιση χωρητικότητα, η εσωτερική ικανότητα αποθήκευσης ενός υπέρ πυκνωτή καθορίζεται επίσης από την αρχή της ψευδοχωρητικότητας, που οφείλεται στις αμφίδρομες αντιδράσεις Faraday που διεξάγονται το ηλεκτρόδιο. Η μεταφορά φορτίου που γίνεται κατά τη διάρκεια αυτών των αντιδράσεων εξαρτάται από την τάση, οφείλεται σε οξυγονοαναγωγικές αντιδράσεις, ηλεκτρική απορρόφηση ή διάσπαση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Η ψευδοχωρητικότητα μπορεί να αυξήσει την τιμή της χωρητικότητας μέχρι και μία τάξη μεγέθους πάνω από τη χωρητικότητα διπλής βαθμίδας.

Με βάση όλα αυτά τα ηλεκτροχημικά μοντέλα, έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από βελτιώσεις οι οποίες συνυπολογίζουν τη συνεισφορά των αντιστάσεων των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη, μέσα από συνεχή έρευνα των ηλεκτρικών μοντέλων που προκύπτουν από σειρά αντιστάσεων και μη γραμμικά εξαρτώμενους από την τάση κλάδους πυκνωτή.

Ωστόσο, το πάχος της διπλής βαθμίδας εξαρτάται από την συγκέντρωση του ηλεκτρολύτη και το μέγεθος των ιόντων. Συνήθως για υψηλής συγκέντρωσης ηλεκτρολύτες το πάχος είναι της τάξης του 0,2 Angstrom [4].

Αντίθετα, τα ηλεκτρόδια είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν μία μεγάλης επιφάνειας περιοχή, ούτως ώστε να μεγιστοποιείται η επιφάνεια της διπλής βαθμίδας. Κατασκευάζονται κυρίως από ενεργό άνθρακα, ο οποίος είναι ένα πορώδες υλικό και παρέχει ενεργό περιοχή μέχρι 2000 m²/g ή ακόμα και 3.000 m²/g. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται συσκευές χωρητικότητας μέχρι και 250 F/kg [5-6].

Συνοψίζοντας, η διβάθμια χωρητικότητα παρέχει καλή δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου εξαιτίας του ότι διαθέτει υλικά μεγάλης επιφάνειας σαν ηλεκτρόδια, καθώς του γεγονότος ότι ο διαχωρισμός του φορτίου συμβαίνει σε ατομικό επίπεδο. Η ψευδοχωρητικότητα που οφείλεται σε οξυγονοαναγωγικές αντιδράσεις ή απορρόφησης ιόντων βελτιώνουν ακόμη περισσότερο τη συνολική χωρητικότητα της συσκευής.

Σε κάθε περίπτωση, η δυναμική συμπεριφορά των υπερπυκνωτών συνδέεται άμεσα με την κινητικότητα των ιόντων του ηλεκτρολύτη, καθώς και με την πορώδη φύση των ηλεκτροδίων.

Προκειμένου να κατηγοριοποιήσουμε τους υπερπυκνωτές, τα βασικά υπό εξέταση χαρακτηριστικά τους είναι το υλικό των ηλεκτροδίων, ο τύπος του ηλεκτρολύτη, καθώς και η σχεδίαση των ηλεκτροδίων [8].

3.1 Διάκριση με βάση το υλικό των ηλεκτροδίων

Η επιλογή των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτροδίων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των ιδιοτήτων του υπερπυκνωτή. Η διαδικασία συσσώρευσης φορτίων στις δύο βαθμίδες είναι ένα επιφανειακό φαινόμενο και κατά συνέπεια τα χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων επηρεάζουν τα μέγιστα την απόδοση της συσκευής.

Ο άνθρακας είναι το πιο διαδεδομένο υλικό που χρησιμοποιείται για ηλεκτρόδια, αλλά συχνά χρησιμοποιούνται οξειδία μετάλλων και αγώγιμα πολυμερή. Με βάση τον τύπο του άνθρακα υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ενεργού άνθρακα: η πρώτη περιλαμβάνει σκόνη και ίνες άνθρακα, ενώ οι δεύτεροι αποτελείται από νάνο συστάδες όπως γραφένιο, αέριο ζελέ, ξηρό ζελέ και νανοσωλήνες άνθρακα. Τα ηλεκτρόδια που κατασκευάζονται από ενεργό άνθρακα έχουν χαμηλό κόστος τη στιγμή που προσφέρουν περιοχές με μεγάλη επιφάνεια (2500 m²/g), ενώ αυτά που αποτελούνται από νάνο συστάδες και κυρίως νανοσωλήνες, προσφέρουν εξαιρετικά πορώδη υλικά τα οποία έχουν οπές μέχρι και 2 νανόμετρα, με σημαντικό όμως κόστος.

Η χρήση οξειδίων μετάλλων, όμως, παρουσιάζει επιθυμητή συμπεριφορά σε σχέση με το μέγεθος της χωρητικότητας, αλλά παρατηρούνται παρενέργειες που σχετίζονται με την παρουσία πολλών οξυγονοαναγωγικών αντιδράσεων, που λαμβάνουν χώρα στο οξείδιο του μετάλλου και προκαλούν μη γραμμική συμπεριφορά. Τα συνθετικά που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι οξειδία του Ρουθενίου (RuO₂), Ιριδίου (IrO₂) και άλλων ευγενών αερίων. Τα υλικά αυτά έχουν εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα και ενεργό περιοχή μέχρι και 100 m²/g.

Τα πολυμερή ηλεκτρόδια, τέλος, προσφέρουν τα ίδια πλεονεκτήματα των οργανικής φύσεως υπερπυκνωτών, αλλά σε χαμηλότερη τιμή. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην

εξάντληση των πολυμερών που έχουν την ικανότητα να συμμετέχουν σε υψηλής κινητικότητας οξυγονοαναγωγικές αντιδράσεις. Τέτοια πολυμερή κατασκευάζονται από ηλεκτροχημική οξείδωση των αντίστοιχων μονομερών. Τα βασικά πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν το χαμηλό κόστος παραγωγής, σε σχέση με τα οξείδια του Ρουθενίου και την υψηλή χαρακτηριστική τους χωρητικότητα. Επιπλέον, αυτά τα υλικά έχουν την ιδιαιτερότητα να μπορούν να ενισχυθούν, όπως συμβαίνει και στους ημιαγωγούς, με τρόπο που να μας επιτρέπει τον έλεγχο της αγωγιμότητάς τους [7].

3.2 Διάκριση με βάση τον τύπο του ηλεκτρολύτη

Η επιλογή του ηλεκτρολύτη σε έναν ηλεκτρικό διβάθμιο πυκνωτή είναι εξίσου σημαντική με την επιλογή του υλικού που χρησιμοποιείται για το ηλεκτρόδιο. Η μέγιστη τάση που μπορεί να επιτευχθεί από τη συσκευή εξαρτάται από τα όρια αποσύνθεσης του ηλεκτρολύτη και για αυτό το λόγο η πυκνότητα της ενέργειας εξαρτάται από τον ίδιο τον ηλεκτρολύτη. Η πυκνότητα ισχύος εξαρτάται από τις ισοδύναμες εν σειρά αντιστάσεις, οι οποίες συνδέονται άμεσα με την αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη. Η ευκολία με την οποία τα φορτία συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του άνθρακα εξαρτάται από τη διαπερατότητα σε ιόντα των οπών του ίδιου του άνθρακα. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να βελτιστοποιήσουμε το μέγεθος των οπών σε συνάρτηση με το μέγεθος των ιόντων του ηλεκτρολύτη.

Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη ηλεκτρολύτη:

Οργανικός: είναι ο πιο διαδεδομένος σε εμπορικές εφαρμογές εξαιτίας της υψηλής πιθανότητας αποσύνδεσης που διαθέτει. Οι τυπικές τάσεις λειτουργίας κυμαίνονται από 2,5 - 3,0 V για μια απλή συσκευή, ενώ μετά από ειδικές διαδικασίες καθαρισμού του ηλεκτρολύτη κάποιοι κατασκευαστές πετυχαίνουν τιμές τάσης ακόμη και υψηλότερες από τα 3,5 V. Προς το παρόν, η τετραεθυλαμμονική τετραφλουορομπορίνη (TEATFB) σε ακετονιτρίλιο (CH_3CN) ενδείκνυται σαν το καλύτερο οργανικό ηλεκτρολύτη για χρήση σε υπερπυκνωτές (και για το λόγο αυτό είναι επί της ουσίας ο πιο συνήθης), καθώς φτάνουν τιμές αγωγιμότητας μέχρι 60 mS/cm. Αντιθέτως, παρά τις καλές αυτές ιδιότητες το ακετονιτρίλιο έχει υψηλή τοξικότητα και για αυτό στο μέλλον θα πρέπει να εστιάσουμε σε διαφορετικούς διαλύτες, όπως η ανθρακική προπυλένη ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$).

Υδατικός: επιτρέπει την επίτευξη υψηλότερης ονομαστικής χωρητικότητας και χαμηλότερης τάξης εν σειρά ισοδύναμης αντίστασης. Από την άλλη πλευρά, περιορίζουν την μέγιστη τάση της συσκευής σε κάποιες περιπτώσεις ακόμη και μέχρι το 1 V. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη υδατικοί διαλύτες είναι το σουλφωρικό οξύ (H_2SO_4) και το ποτασικό υδροξείδιο (KOH), τα οποία προσφέρουν σχετικά υψηλές τιμές αγωγιμότητας περίπου από 100 - 1000 mS/cm.

Στερεός: όταν τα πολυμερή ενώνονται με συγκεκριμένα άλατα, παρουσιάζουν υψηλή ιοντική αγωγιμότητα. Πιο συγκεκριμένα, ο πολυμερικός τύπος παρέχει μικρότερη διάβρωση λιγότερη απελευθέρωση επικίνδυνων ουσιών λεπτότερες συστάδες και πιο ευσταθείς δομές. Ο ηλεκτρολύτης στερεού πολυμερούς είναι ευρέως γνωστός ως μεμβράνη Nafion, υψηλής αγωγιμότητας σε ιόντα. Το βασικό μειονέκτημα έγκειται στο υψηλό του κόστος. Το πολυμερές αυτό χρησιμοποιείται επίσης και σε κυψέλες καυσίμου όπου η χρήση του συνδέεται με κάποια λειτουργικά προβλήματα όταν χρησιμοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Τέλος, οι διαχωριστές θα πρέπει να διαχωρίζουν φυσικά τα δύο ηλεκτρόδια, προκειμένου να αποτρέψουν το βραχυκύκλωμα σε περίπτωση άμεσης επαφής. Θα πρέπει να είναι πολύ λεπτοί (μερικά εκατοστά του μιλιμέτρου) και ταυτόχρονα να εμφανίζουν υψηλή διαπερατότητα σε ιόντα, ώστε να ελαχιστοποιείται η εν σειρά ισοδύναμη αντίσταση.

Επιπρόσθετα οι διαχωριστές θα πρέπει να είναι χημικά ανενεργοί, ώστε να διαφυλάττουν την σταθερότητα και την αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη.

3.3 Διαχωρισμός με βάση τη σχεδίαση των ηλεκτροδίων

Ο υπερπυκνωτής είναι ο γενικός όρος μίας οικογένειας ηλεκτροχημικών πυκνωτών. Αποθηκεύουν, όπως περιγράφεται παραπάνω, την ηλεκτρική τους ενέργεια με δύο διαφορετικούς τρόπους αποθήκευσης, τη στατική χωρητικότητα διπλής βαθμίδας και την ηλεκτροχημική ψευδοχωρητικότητα. Η συνεισφορά των δύο αυτών χωρητικοτήτων εξαρτάται από το υλικό και τη δομή των ηλεκτροδίων. Με βάση αυτό η οικογένεια των υπερπυκνωτών χωρίζεται σε τρεις τύπους:

Συμμετρικός τύπος, ή όπως αλλιώς λέγεται διβάθμιος πυκνωτής, με ηλεκτρόδια ενεργού άνθρακα ή παρόμοια, με πολύ μεγαλύτερη ηλεκτροστατική χωρητικότητα διπλής βαθμίδας σε σχέση με την ηλεκτροχημική ψευδοχωρητικότητα. Συμμετρικός ονομάζεται επειδή και τα δύο ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα πανομοιότυπα. Ωστόσο, καθώς φορτίζεται οι προσμίξεις που περιέχονται στον ενεργό άνθρακα έρχονται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη και δίνουν σε κάθε ηλεκτρόδιο μία παραμένουσα τέφρα. Ο συμμετρικός τύπος κατασκευάζεται από υψηλής καθαρότητας αλουμίνιο στο θετικό πόλο και από ένα κράμα αλουμινίου στον αρνητικό. Οι συλλέκτες ρεύματος του ηλεκτροδίου κατασκευάζονται επίσης από αλουμίνιο το οποίο χαράζεται για καλύτερη επαφή με την ταινία ενεργού άνθρακα του ηλεκτροδίου.

Ασύμμετρος τύπος, πρόκειται για ψευδοπυκνωτές, με μεταβατικά οξειδία μετάλλου ή αγωγίμα ηλεκτρόδια από πολυμερή, με πολύ υψηλή τιμή ηλεκτροχημικής ψευδοχωρητικότητας. Ο συμμετρικός τύπος είναι ιδανικά ένα μη πολωμένο ηλεκτρόδιο παρόμοιο με αυτό της μπαταρίας, όπως ένα οξείδιο μετάλλου, που συνδέεται με το ηλεκτρόδιο ενός ηλεκτρικού πυκνωτή διπλής βαθμίδας, όπως ένα ηλεκτρόδιο άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, η σύνδεση ενός αρνητικού ηλεκτροδίου ενεργού άνθρακα με ένα θετικό ηλεκτρόδιο αγωγιμότητας προσελκύει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Υβριδικό πυκνωτές, όπως οι ασύμμετροι, χρησιμοποιούν δύο διαφορετικά ηλεκτρόδια, αλλά με τη διαφορά ότι συνδέουν το ηλεκτρόδιο ενός υπερπυκνωτή με το ηλεκτρόδιο μιας μπαταρίας. Αυτή η ιδιαίτερη διαμόρφωση αντικατοπτρίζει την ανάγκη για υπερπυκνωτές υψηλότερης ενέργειας ή μπαταρίες μεγαλύτερης ισχύος, συνδυάζοντας ενεργειακά τα χαρακτηριστικά των μπαταριών με την ισχύ τη διάρκεια ζωής και την ικανότητα επαναφορτίζεται των υπερπυκνωτών. Οι έρευνες εστιάζουν κυρίως στη χρήση ενός ηλεκτροδίου από υδροξείδιο του Νικελίου και LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) και του άλλου ηλεκτροδίου από ενεργό άνθρακα. Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στο ότι οι πυκνωτές αυτοί μπορούν να γεφυρώσουν το κενό μεταξύ υπερπυκνωτών και μπαταριών. Παρά τα εξαιρετικά υποσχόμενα αποτελέσματα, κατά γενική ομολογία απαιτείται περαιτέρω έρευνα, προκειμένου να καθορίσουμε τις πλήρεις δυνατότητες των υβριδικών πυκνωτών.

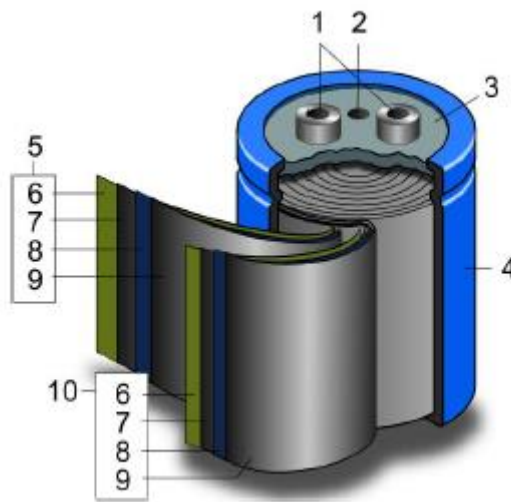
3.4 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

Γενικά, οι πιο συνήθεις υπερπυκνωτές είναι οι συμμετρικοί, οι οποίοι κατασκευάζονται συναρμολογώντας το βασικό σύνολο στοιχείων που απαρτίζουν τον πυκνωτή (διαχωριστής, ηλεκτρόδια, συλλέκτης) με δύο διαφορετικές συνδεσμολογίες: τη μονοπολική και τη διπολική. Οι μονοπολικές συσκευές έχουν πολύ μεγαλύτερη τιμή χωρητικότητας, εξαιτίας τις μεγάλου

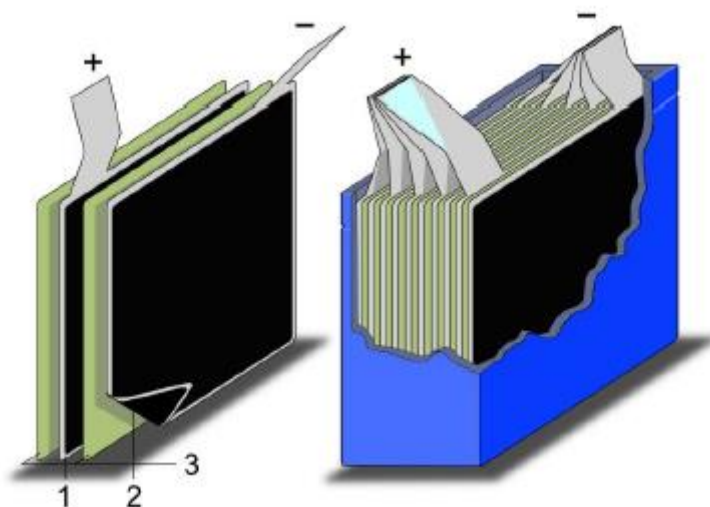
εύρους επιφάνειες που διαθέτουν και συναρμολογούνται τυλίγοντας παράλληλα πανομοιότυπα στρώματα μεταλλικού συλλέκτη πορώδους ηλεκτροδίου και διαχωριστή. Η μέγιστη τάση της όλης συσκευής ισούται με την τάση της κάθε απλής συστοιχίας, καθώς αυτές συνδέονται παράλληλα.

Οι διπολικές συσκευές, αντίθετα, επιτρέπουν υψηλότερες τάσεις και συνεπώς μεγαλύτερη αντοχή, με κόστος όμως σε χωρητικότητα. Συναρμολογούνται συνδυάζοντας τη βασική συστοιχία του πυκνωτή σε σειρά. Η ηλεκτρονική απομόνωση των επιμέρους τμημάτων, συνεπώς, είναι πολύ σημαντική προκειμένου να αποτρέψουμε την απευθείας επαφή του ηλεκτρολύτη που βρίσκεται μεταξύ των διαφορετικών συστοιχιών.

Σε κάθε περίπτωση, τα ηλεκτρόδια περιορίζονται από φύλλα αλουμινίου από τα οποία ξεκινάνε και τα μεταλλικά τερματικά της κάθε συστοιχίας. Οι υπερπυκνωτές λοιπόν κατασκευάζονται είτε με τη μορφή ρολού (Εικόνα 3.3) είτε με τη μορφή φακέλου (Εικόνα 3.4) σε κυλινδρικό ή παραλληλόγραμμο σχήμα και περικλείονται από έναν αλουμινένιο κύλινδρο ή σε μια προσαρμοσμένη ορθογώνια συσκευασία.



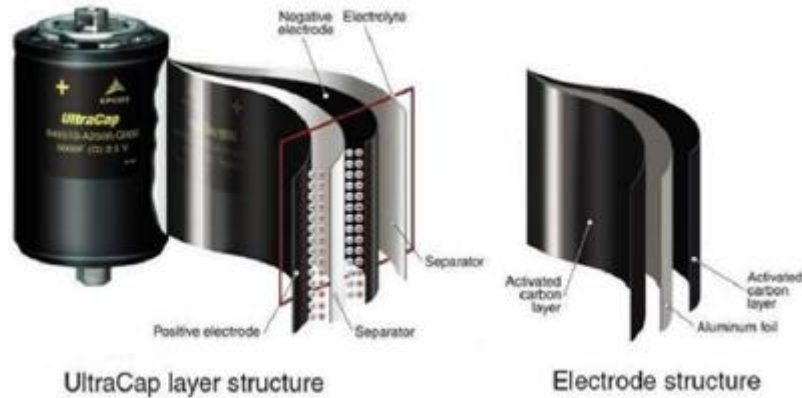
Εικόνα 3.3 – Σχηματική απεικόνιση της κατασκευής ενός υπερπυκνωτή τύπου ρολού:
1. Τερματικά, 2. Οπή ασφαλείας, 3. Δίσκος σφράγισης, 4. Περίβλημα αλουμινίου,
5. Θετικός πόλος, 6. Διαχωριστής, 7. Ηλεκτρόδιο άνθρακα, 8. Συλλέκτης, 9. Ηλεκτρόδιο
άνθρακα, 10. Αρνητικός πόλος [8]



Εικόνα 3.4 – Σχηματική απεικόνιση της κατασκευής ενός υπερπυκνωτή τύπου φακέλου:

1. Θετικό ηλεκτρόδιο, 2. Αρνητικό ηλεκτρόδιο, 3. Διαχωριστής [8]

Μία από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους συναρμολόγησης των ηλεκτροδίων περιλαμβάνει μια ενιαία μεταλλική λωρίδα, στην οποία τοποθετείται ένα μείγμα ενεργού άνθρακα συμπιεσμένων πολυμερών και στη συνέχεια προσκολλάται πάνω στον διαχωριστή (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5 – Παράδειγμα ενός υπερπυκνωτή EPCOS 5000 F

Η ταινία στη συνέχεια κόβεται και ανάλογα με την περίπτωση τυλίγεται ή διπλώνεται, ενσωματώνεται με το ηλεκτρόδιο και τέλος τοποθετείται μέσα στην κάψουλα. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι η υψηλή παραγωγικότητα, το χαμηλό κόστος, η καλή ομογενοποίηση των συμπιεσμένων υλικών, η ευκολία κατασκευής συσκευών με διαφορετικά μεγέθη και σχήματα και ο περιορισμός της εσωτερικής αντίστασης (ελέγχοντας κατάλληλα το πάχος της λωρίδας). Τέλος, η εξωτερική συσκευασία κλείνεται ερμητικά προκειμένου να διασφαλίσουμε την μόνωση μεταξύ των τερματικών και να περιορίσουμε την εξάπλωση του ηλεκτρολύτη στο εξωτερικό για ένα συγκεκριμένο χρόνο ζωής της συσκευής.

Για παράδειγμα, η εικόνα 3.6 και ο Πίνακας 3.1 [9] δείχνουν το σχήμα και τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν έναν πυκνωτή Maxwell BCAP350F. Οι παράμετροι αυτοί καθορίζονται από τις πληροφορίες που παρέχει ο κατασκευαστής, όπως επίσης και από τη δοκιμή συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 3.6 – Παράδειγμα ενός υπερπυκνωτή MAXWELL 350 F [9]

Rated Capacitance₁	350 F
Internal Resistance in DC	3.2 mΩ
Internal Resistance at 1 kHz	1.6 mΩ
Rated Voltage	2.5 V
Absolute Maximum Voltage	2.85 V
Absolute Maximum Current	170 A
Leakage Current at 25°C, maximum	0.3 mA
Minimum Operating Temperature (Cell case)	-40 °C
Maximum Operating Temperature (Cell case)	65 °C
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%
Usable Specific Power	4.6 W/kg
Specific Energy	5.9 Wh/kg
Storable Energy	0.35 Wh
Projected DC Life at 25 °C	10 years
Projected Cycle Life at 25 °C	5·10 ⁷ cycles
Mass, typical	60 g

Πίνακας 3.1 – Βασικά χαρακτηριστικά του υπερπυκνωτή MAXWELL BCAP350F [9]

Πολλές εφαρμογές απαιτούν επίπεδα τάσης πολύ υψηλότερα από αυτά που μπορούμε να πετύχουμε χρησιμοποιώντας έναν μόνο πυκνωτή. Για το λόγο αυτό είναι συχνά απαραίτητο να συνδέουμε με κατάλληλο τρόπο πολλές συσκευές μαζί ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή επίδοση. Η τελική τάση είναι απλά το αποτέλεσμα το γινόμενο της τάσης της κάθε συσκευής επί το πλήθος N των εν σειρά συνδεδεμένων συσκευών. Κάθε υπερπυκνωτής σε διάταξη σειράς αυξάνει τη συνολική αντίσταση της μονάδας και αν η παραγόμενη ισχύς απαιτεί όρια όσον αφορά τη μέγιστη επιτρεπτή αντίσταση, τότε μπορεί να χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε και υπερπυκνωτές συνδεδεμένους παράλληλα. Για μία συσκευή αποθήκευσης με M παράλληλες συστοιχίες, η καθεμία από τις οποίες αποτελείται από N υπερπυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά, τότε η συνολική ισοδύναμη αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$R_{SC} = R_{SC,cell} \frac{N}{M} \quad (3.5)$$

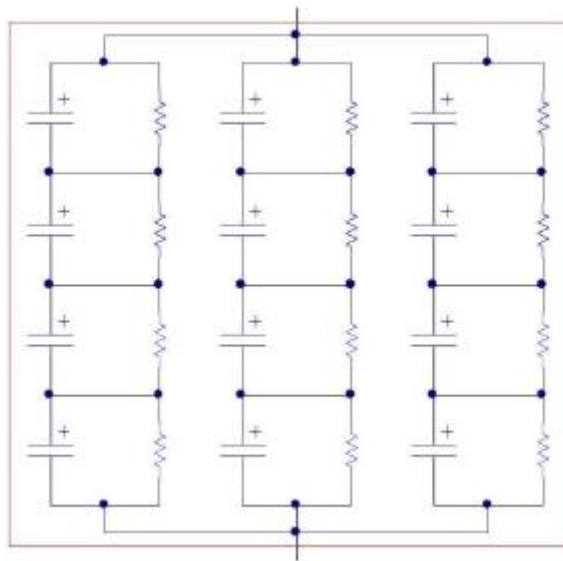
όπου $R_{SC,cell}$ είναι η συνολική αντίσταση του κάθε υπερπυκνωτή. Μεγαλύτερος αριθμός παράλληλων συστοιχιών οδηγεί με αυτό τον τρόπο σε μειωμένες τιμές συνολικής αντίστασης της μονάδας.

Οι απαιτήσεις που σχετίζονται με την ισοδύναμη χωρητικότητα C_{SC} καθορίζονται από τις αντίστοιχες απαιτήσεις ενέργειας, σύμφωνα με τη γνωστή τετραγωνική σχέση που συνδέει ενέργεια και χωρητικότητα. Η συνολική χωρητικότητα της μονάδας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_{SC} = C_{SC,cell} \frac{M}{N} \quad (3.6)$$

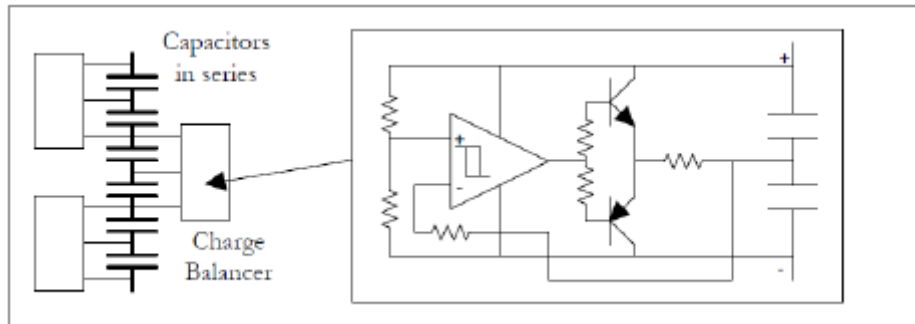
Στις περισσότερες εφαρμογές ή υπερπυκνωτές βρίσκονται ήδη σε συστοιχίες που αποτελούνται από επιμέρους μονάδες συνδεδεμένες σε σειρά και παράλληλα προκειμένου να

αυξήσουμε τόσο την τάση λειτουργίας όσο και τη συνολική χωρητικότητα. το σύνολο αυτό των πυκνωτών τοποθετείται σε κάψουλα προκειμένου να εξασφαλίσουμε καλύτερη μηχανική αντοχή καθώς και υψηλότερο βαθμό μόνωσης από σκόνης και υγρασία και συνοδεύονται από συστήματα που εξισορροπούν την τάση των επιμέρους μονάδων. Οι τελευταίες είναι απαραίτητες επειδή καθώς αυξάνεται ο αριθμός των υπερπυκνωτών που συνδέονται σε σειρά, η συνολική ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί με ασφάλεια μειώνεται δραματικά. Έτσι, η χρήση εξισορροπιτών τάσεως στοχεύει στον περιορισμό των υπερτάσεων μεταξύ των μονάδων και τη δημιουργία αντιστροφών τάσεων που προκαλούνται από ρεύματα διαρροής. Ομοιομορφία στην τάση μπορούμε να επιτύχουμε με ενεργητικές ή παθητικές συσκευές. Απλούστερη περίπτωση οι εξισορροπιστές κατασκευάζονται από αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα με κάθε υπερπυκνωτή (παθητική εξισορρόπηση – Εικόνα 3.7). Η λύση αυτή προτιμάται για εφαρμογές στις οποίες το ρεύμα που διαρρέει τους υπερπυκνωτές διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα.



Εικόνα 3.7 – Η εν σειρά και παράλληλη σύνδεση των επιμέρους στοιχείων με τη χρήση παθητικού συστήματος εξισορρόπησης

Αντίθετα, η χρήση ενεργητικών ηλεκτρονικών συσκευών (ενεργητική εξισορρόπηση - Εικόνα 3.8) χρησιμοποιείται όταν το ρεύμα των υπερπυκνωτών μπορεί να παρουσιάσει υψηλές αιχμές σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση αυτή η εξισορρόπηση επιτυγχάνεται με τη χρήση κυκλωμάτων ελέγχου που συνδέονται παράλληλα με κάθε μεμονωμένη μονάδα που το καθένα αποτελείται από έναν διαφωριστή συνδεδεμένο εσωτερικά με μία τάση αναφοράς: αν η τιμή της τάσης στα άκρα του υπερπυκνωτή υπερβεί το κατώφλι της τάσης αναφοράς τότε τίθεται εκτός λειτουργίας μέχρι η εκφόρτισή του να οδηγήσει σε πτώση της τάσης του κάτω από το κατώφλι.



Εικόνα 3.8 – Ενεργητική εξισορρόπηση των υπερπυκνωτών χρησιμοποιώντας την τεχνολογία MAXWELL

Η εμπορική χρήση των μονάδων αυτών περιλαμβάνει μεταφορικές ή βιομηχανικές εφαρμογές, με τάσεις λειτουργίας από μερικά volts μέχρι και περισσότερα από 300 V και χωρητικότητες από μερικές εκατοντάδες ως ακόμη χιλιάδες Farads.

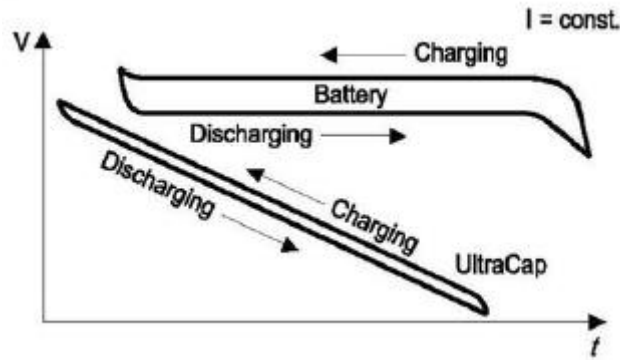
Στην Εικόνα 3.9 απεικονίζεται ένας υπερπυκνωτής MAXWELL BMOD0063P125 για μεταφορικές εφαρμογές με χωρητικότητα 63 F, 125 V DC τάση λειτουργίας και ενεργό μηχανισμό εξισορρόπησης [11].



Εικόνα 3.9 – Παράδειγμα μίας συσκευής MAXWELL 69 F [11]

Για τη διάταξη αυτή, η διαδικασία φόρτισης και απελευθέρωσης ενέργειας είναι αυστηρώς αντιστρέψιμη και η αποτελεσματικότητά της δεν επηρεάζεται από το πλήθος των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης. Κατά συνέπεια, έχει πολύ υψηλή αντοχή στη διαδικασία φόρτισης καθώς η τάση στα άκρα του στοιχείου δεν ξεπερνά ποτέ τα επιθυμητά όρια. Το μόνο ζήτημα που απαιτεί προσοχή είναι ο περιορισμός του ρεύματος που θα πρέπει να συνυπολογίσουμε, εξαιτίας της χαμηλής εσωτερικής αντίστασης της συσκευής.

Ένας από τους παράγοντες που θα πρέπει να λάβουμε υπόψη σε οποιαδήποτε συσκευή αποθήκευσης ενέργειας είναι η ευκολία με την οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε την κατάσταση φόρτισής της. Τα χαρακτηριστικά του υπερπυκνωτή παρουσιάζουν μία απλή σχέση μεταξύ του επιπέδου της τερματικής τάσης και της κατάστασης φόρτισής της (Γράφημα 3.10).



Γράφημα 3.10 – Σύγκριση της χαρακτηριστικής εκφόρτισης μίας κλασικής μπαταρίας και ενός υπερπυκνωτή

Ο λόγος για τον οποίον συμβαίνει αυτό είναι κυρίως εξαιτίας του γεγονότος ότι η ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Έτσι η τάση που μετράται στα τερματικά ενός υπερπυκνωτή δείχνει απευθείας και την κατάσταση φόρτισης της συσκευής (SoC).

Από το προηγούμενο Γράφημα 3.10, παρατηρούμε ότι οι ηλεκτροχημικές μπαταρίες προσφέρουν μία σχεδόν σταθερή τάση εκφόρτισης σε όλο το φάσμα της χρησιμοποιούμενης ενέργειας, τη στιγμή που η τάση του υπερπυκνωτή έχει μία γραμμική και φθίνουσα συμπεριφορά από τη μέγιστη τιμή μέχρι και τα 0 V. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο υπερπυκνωτής δεν μπορεί να παράξει όλες τις δυνατές φορτίσεις και κατά συνέπεια στο εύρος εκείνο της τάσης που δεν χρησιμοποιείται, παραμένει ένα ποσό ενέργειας το οποίο δεν μπορεί να αποδοθεί από τη συσκευή. Ακόμη και αν η αποθηκευμένη ενέργεια είναι ανάλογη του γινομένου της χωρητικότητας με το τετράγωνο της τάσης, κατά την φάση εκφόρτισης η ενέργεια που αποδίδεται είναι μικρότερη, εξαιτίας του περιορισμού του ρεύματος. Το γεγονός αυτό οδηγεί στη χρήση μόνο ενός μέρους του εύρους των τάσεων από 0 έως $V_{SC,max}$. Μία συνηθισμένη τιμή του εύρους της τάσης λειτουργίας είναι από $0,5 V_{SC,max} - V_{SC,max}$, το οποίο συνήθως αναφέρεται σαν αναλογία τάσης εκφόρτισης. Με την επιλογή αυτού του εύρους, η χρησιμοποιούμενη ενέργεια ισούται με το 75% της ενέργειας που δυνητικά θα μπορούσε να δώσει ένας υπερπυκνωτής κατά την εκφόρτιση του και συνήθως στο φυλλάδιο προδιαγραφών που δίνεται από τον κατασκευαστή υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$E_{SC,max} = \frac{3}{8} C_{SC} V_{SC,max}^2 \quad (3.7)$$

Κλείνοντας, ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τις διαφορές μεταξύ του εύρους χωρητικότητας, τάσης, εσωτερικής αντίστασης και πυκνότητας ενέργειας των πυκνωτών διαφορετικών κατασκευαστών.

Manufacturer	Type	Cell voltage (rated) [V]	Capacitance (rated) [F]	ESR at Cmax [mΩ]	$\tau = R \cdot C$ [s]	Specific Energy [Wh/kg]	Specific Power [W/kg]	Max specific Power [W/kg]	Mass [kg]	Volume [dm ³]
Maxwell	Activated Carbon	2.7	2885	0.38	1.08	4.20	994	8836	0.550	0.414
Maxwell	Activated Carbon	2.7	605	0.90	0.55	2.35	1139	9597	0.200	0.211
Skeleton Technologies	Activated Carbon	2.8	1600	1.30	2.10	5.80	800	7140	0.220	0.130
Yunasko	Hybrid	2.7	55	4.00	0.22	5.50	5695	50625	0.009	N/A
Yunasko	Hybrid	2.7	450	1.30	0.58	5.89	2766	24595	0.057	0.045
Yunasko	Hybrid	2.7	510	0.90	0.46	5.00	2919	25962	0.078	0.055
Ness	Activated Carbon	2.7	1800	0.55	1.00	3.60	975	8674	0.380	0.277
Ness	Activated Carbon	2.7	3640	0.30	1.10	4.20	928	8010	0.650	0.514
Ness	Activated Carbon	2.7	3160	0.40	1.26	4.40	982	8728	0.522	0.379
Asahi Glass	Propylene	2.7	1375	2.50	3.40	4.90	390	3471	0.210	0.151
Panasonic	Propylene	2.5	1200	1.00	1.20	2.30	514	4596	0.340	0.245
EPCOS	Activated Carbon	2.7	3400	0.45	1.50	4.30	760	6750	0.600	0.480
LS Cable	Activated Carbon	2.8	3200	0.25	0.80	3.70	1400	12400	0.630	0.470
Batscap	Activated Carbon	2.7	2680	0.20	0.54	4.20	2050	18225	0.500	0.572
Power Sys.	Activated Carbon - propylene	2.7	1350	1.50	2.00	4.90	650	5785	0.210	0.151
Power Sys.	Graphite propylene	3.3	1800	3.00	5.40	8.00	486	4320	0.210	0.150
Power Sys.	Graphite propylene	3.3	1500	1.70	2.50	6.00	776	6903	0.230	0.150
JSR Micro	Hybrid	3.8	1000	4.00	4.00	11.20	900	7987	0.113	0.073
JSR Micro	Hybrid	4.8	2000	1.90	3.80	12.10	1038	9223	0.206	0.132

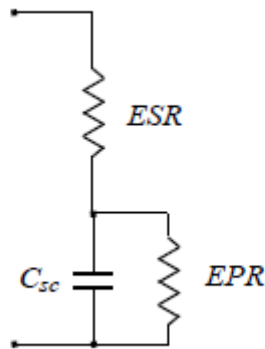
Πίνακας 3.2 – Ηλεκτρικοί παράμετροι υπερπυκνωτών των διαφόρων κατασκευαστών

3.5 Μοντέλο Ηλεκτρικών Πυκνωτών Διπλής Βαθμίδας

Οι υπερπυκνωτές εμπορικής χρήσης παρουσιάζουν ακόμα τρία βασικά μειονεκτήματα που οφείλονται στα εσωτερικά χαρακτηριστικά του σχεδιασμού των δύο βαθμίδων και είναι η χαμηλή τάση λειτουργίας, η αδυναμία μέτρησης των παραμέτρων του και τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του. Επιπλέον, οι παράμετροι και η συμπεριφορά του υπερπυκνωτή εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, την κατάσταση φόρτισης, την αναλογία και τη συχνότητα φορτίσεων-εκφορτίσεων και μία σειρά από άλλες παραμέτρους. Έχουν αναπτυχθεί μία σειρά από διαφορετικά μοντέλα με βάση τις παραπάνω προσεγγίσεις [3-12]. Κάποιες από αυτές μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκες σύμφωνα με τη δυνατότητά τους να μοντελοποιήσουν κατάλληλα τη συμπεριφορά των δύο βαθμίδων του υπερπυκνωτή. Από την άλλη πλευρά, κάποια από αυτά τα μοντέλα, παρά την έλλειψη ακρίβειας, χαρακτηρίζονται από μία απλή διαδικασία ταυτοποίησης παραμέτρων.

3.5.1 Μοντέλο απλής RC αντίδρασης

Το απλούστερο από όλα τα μοντέλα είναι αυτό του κλασικού ισοδύναμου κυκλώματος με την ιδανική συγκεντρωμένη χωρητικότητα, την ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση (EPR) και την ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR). Η Εικόνα 3.11 απεικονίζει το κλασικό ισοδύναμο κύκλωμα με τις τρεις αυτές παραμέτρους. Ο καθορισμός των παραμέτρων αυτών παρέχει μία πρώτη προσέγγιση ενός υπερπυκνωτή.



Εικόνα 3.11 – Απλό ισοδύναμο κύκλωμα ενός υπερπυκνωτή

Τα μοντέλα ESR, η εσωτερική αντίσταση της συσκευής και η εμπειρική επαλήθευση από τους Syrkker και Nelms, αποδεικνύουν ότι η παράμετρος ESR δεν επηρεάζεται σημαντικά από την τερματική τάση ή τη συχνότητα φόρτισης της συσκευής, αλλά αντίθετα εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία [13].

Η παράμετρος EPR αντιπροσωπεύει την διαρροή ρεύματος και επιδρά στην μακροπρόθεσμη χωρητικότητα ενέργεια, μοντελοποιώντας με τον τρόπο αυτό το φαινόμενο της αυτό-αποφόρτισης του υπερπυκνωτή. Όταν έχουμε εν σειρά σύνδεση πολλών υπερπυκνωτών, η EPR επηρεάζει την τάση της κάθε μονάδας, καθώς λειτουργεί σαν διαιρέτης τάσης. Χρησιμοποιώντας εμπειρικές μεθόδους, οι Nyrkker και Nelms [12] απέδειξαν ότι η EPR σχετίζεται με το πηλίκο της πτώσης τάσης ως εξής:

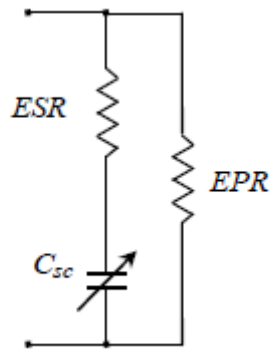
$$EPR = \frac{-t}{\ln\left(\frac{V_f}{V_0}\right) C_{sc}} \quad (3.8)$$

όπου V_0 είναι η τάση στην είσοδο, V_f είναι η τάση στην έξοδο και C_{sc} η μετρημένη χωρητικότητα της συσκευής.

Έπειτα από πειραματικές μετρήσεις, έχουμε καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η επίδραση της EPR μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα όσον αφορά τους υπολογισμούς για τα μεταβατικά φαινόμενα κατά την εκφόρτιση. Ωστόσο, η τιμή της EPR είναι σημαντική όταν συνυπολογίζεται η επίδραση του εξισορροπιστή τάσης των εν σειρά συνδεδεμένων υπερπυκνωτών, καθώς η δυναμική-μεταβατική συμπεριφορά του κάθε υπερπυκνωτή δεν είναι γραμμική.

Μία πρώτη εξέλιξη του μοντέλου αυτού είναι το μοντέλο της μη γραμμικής χωρητικότητας όπως αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 3.12, η οποία λαμβάνει υπόψη τη μη γραμμική συμπεριφορά της ισοδύναμης χωρητικότητας της συσκευής, χρησιμοποιώντας μία μεταβλητή χωρητικότητα εξαρτώμενη με μη γραμμικό τρόπο από την επιβαλλόμενη τάση. Παρόλο που είναι αρκετά εύκολο στη χρήση του, εξαιτίας της έλλειψης επιπρόσθετων στοιχείων που να αναπαριστούν τα φαινόμενα αναδιανομής και τη δυναμική συμπεριφορά της

συσκευής κατά τη διάρκεια των φορτίσεων/εκφορτίσεων, δεν μπορούν να προσδιορίσουν τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά της συσκευής [14].



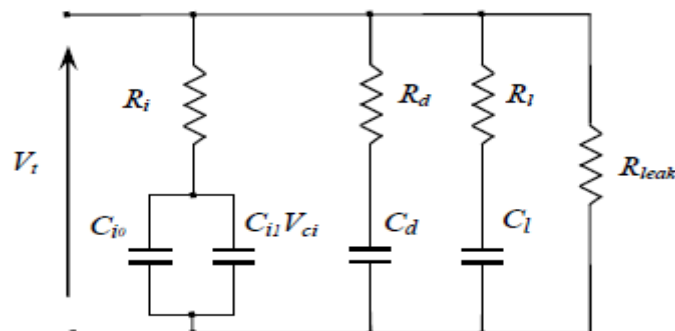
Εικόνα 3.12 – Βελτιωμένο απλό ισοδύναμο κύκλωμα ενός υπερπυκνωτή

Για την ακρίβεια, σε τέτοια μοντέλα θα πρέπει πάντα να εισάγουμε μια εν σειρά επαγωγική αντίδραση, πολύ μικρής τιμής (της τάξης των δεκάτων του nH) και της οποίας η συνεισφορά είναι αισθητή μόνο στις πολύ υψηλές συχνότητες. Σε όλα τα μοντέλα η επαγωγική αντίδραση χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσουμε τη συμφωνία του μοντέλου με την πραγματικότητα ακόμα και στις υψηλές συχνότητες και για το λόγο αυτό συχνά παραλείπεται, καθώς η συνεισφορά της στο εύρος των συχνοτήτων των περισσότερων βιομηχανικών εφαρμογών είναι σχεδόν αμελητέα.

3.5.2 Μοντέλο Παράλληλου Κλάδου

Περιγράφοντας ένα πιο ακριβές μοντέλο αναπαράστασης, οι Zubietta και Bonert πρότειναν και ένα δίκτυο τριών κλάδων RC, με τον έναν κλάδο να έχει μια μεταβλητή χωρητικότητα εξαρτώμενη από την τάση [15]. Κάθε κλάδος του ισοδυνάμου κυκλώματος, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.13 έχει και μία διαφορετική σταθερά χρόνου. Το μοντέλο αυτό έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- η δομή του μοντέλου, που σχετίζεται με τη φυσική δομή της συσκευής είναι απλή προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί με ευκολία σε μηχανικές εφαρμογές,
- το μοντέλο περιγράφει με σαφήνεια τη συμπεριφορά της συσκευής σε συχνότητες που κυμαίνονται από μερικά mHz και φτάνει μέχρι και εκατοντάδες mHz.
- είναι πιθανό να καθορίσουμε τους παραμέτρους του μοντέλου μέσα από μετρήσεις των τερματικών τιμών του υπερπυκνωτή.



Εικόνα 3.13 – Μοντέλο Παράλληλου Κλάδου

Ο πρώτος κλάδος αντιπροσωπεύεται από τα στοιχεία R_i , C_{i0} και τον όρο C_{i1} που είναι συνάρτηση της τάσης V_{ci} , που αναπαριστά τη «μέση» συμπεριφορά της συσκευής σε χρονικό διάστημα μερικών δευτερολέπτων κατά τις φορτίσεις και τις εκφορτίσεις. Ο δεύτερος κλάδος, που αντιπροσωπεύεται από τα στοιχεία R_d και C_d , προσομοιώνει το φαινόμενο της καθυστέρησης στα τερματικά της συσκευής με εύρος δευτερολέπτων και τέλος ο τρίτος κλάδος, που αποτελείται από τα στοιχεία R_l και C_l , χαρακτηρίζει την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά της συσκευής για χρόνους μεγαλύτερους των δέκα λεπτών.

Η αντίσταση διαρροής R_{leak} , που συνδέεται παράλληλα με τους τρεις κλάδους, όπως περιγράφηκε παραπάνω, επιτρέπει στο μοντέλο να προσομοιώνει το φαινόμενο της αυτό-αποφόρτισης.

Το μοντέλο που μόλις παρουσιάστηκε δίνει έμφαση στη φυσική δομή του υπερπυκνωτή, τα χαρακτηριστικά της οποίας λαμβάνονται υπόψη απλώς εισάγοντας τη μη γραμμική χωρητικότητα στον πρώτο κλάδο.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στον προσδιορισμό της ισοδύναμης μεταβλητής χωρητικότητας. Ο ορισμός της χωρητικότητας στην περίπτωση της γραμμικής συμπεριφοράς αυτής δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3.9)$$

όπου Q είναι το συνολικό φορτίο που είναι αποθηκευμένο στη συσκευή και V η τερματική τάση της συσκευής.

Στην περίπτωση της σταθερής χωρητικότητας, ο λόγος της θερμοδυναμικής πιθανότητας όπως δίνεται στη σχέση (3.3) είναι ο ίδιος καθώς ο όρος ΔQ αναφέρεται στην αύξηση του φορτίου σαν αποτέλεσμα της αύξησης της τάσης ΔV .

Αυτό, όμως, δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση της μη γραμμικής χωρητικότητας. Προκειμένου να περιγράψουμε την μεταβολή του φορτίου για μία δεδομένη τάση είναι απαραίτητο να ορίσουμε τη διαφορική χωρητικότητα ως εξής:

$$C_{diff}(V) = \left. \frac{dQ}{dV} \right|_V \quad (3.10)$$

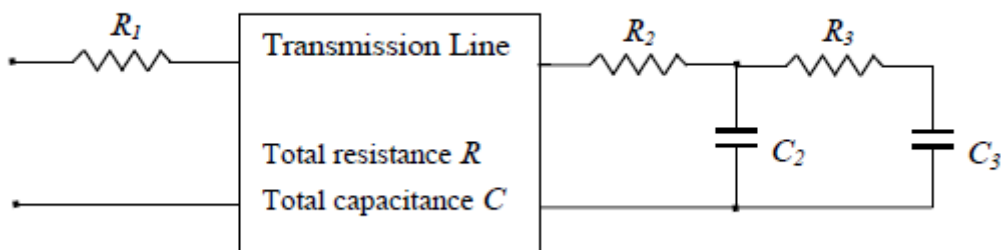
Στο εύρος των τάσεων που επιβάλλονται σε έναν υπερπυκνωτή, όπως προσδιορίζεται από τους Zubieta και Bonert, η διαφορική χωρητικότητα μοντελοποιείται ως το άθροισμα μίας χωρητικότητας σταθερής τιμής C_{i0} και της χωρητικότητας $C_{i1} \cdot V$ της οποίας η τιμή αυξάνεται γραμμικά με την επιβαλλόμενη τάση στα τερματικά του υπερπυκνωτή:

$$i(t) = C_{diff}(V) \frac{dV}{dt} = (C_0 + 2 \cdot C_1 V) \frac{dV}{dt} \quad (3.11)$$

Αντίστροφα, το μοντέλο αυτό απαιτεί ακριβείς και λεπτομερείς μετρήσεις προκειμένου να προσδιορίσουμε τους παραμέτρους των διαφόρων κλάδων, που βασίζονται σε δοκιμές συνεχούς ρεύματος.

3.5.3 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς

Το μοντέλο αυτό ακολουθεί μία φυσική προσέγγιση με στόχο να περιγράψει τη συμπεριφορά του υπερπυκνωτή και λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά της συσκευής στο σύνολό τους, μοντελοποιώντας τη συμπεριφορά της μεμβράνης του ηλεκτροδίου ανόδου και της μεμβράνης του ηλεκτροδίου καθόδου, των οποίων οι ιδιότητες μεταβάλλονται με το χώρο με μη κανονικό τρόπο. Το μοντέλο αποτελείται από ένα σύνθετο δίκτυο RC κυκλωμάτων στα οποία οι χωρητικότητες είναι μη γραμμικές [16]-[17]. Οι αντιστάσεις εξαρτώνται από μία σειρά παραμέτρων, όπως η αγωγιμότητα των ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη. Αντίθετα, τα κυκλώματα RC εξαρτώνται από το μέγεθος των οπών και τη σύνδεση του συλλέκτη και δεν είναι όμοια μεταξύ τους εξαιτίας της ανομοιομορφίας του ηλεκτρολύτη. Το τελικό μοντέλο απεικονίζεται στην Εικόνα 3.14. Η πολυπλοκότητα του μοντέλου έγγυται στο γεγονός ότι είναι δύσκολη η προσαρμογή του σε πραγματικές εφαρμογές, καθώς επίσης και στην ύπαρξη σημαντικών προβλημάτων που αφορούν τον προσδιορισμό των διαφορετικών παραμέτρων του.



Εικόνα 3.14 – Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς

Εφαρμόζοντας τη θεωρία των γραμμών μεταφοράς, η ισοδύναμη αντίδραση του κυκλώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Z_{eq}(t) = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{\tau}{\pi t}} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{\left(-n^2 \frac{\tau}{t}\right)} \right] \quad (3.12)$$

όπου: C είναι η χωρητικότητα της γραμμής ($C = cl$, με το c να ισούται με τη χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους l), R η συνολική αντίσταση της γραμμής ($R = rl$, με το r να ισούται με τη χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους l) και τ είναι η σταθερά χρόνου που ισούται με το γινόμενο RC.

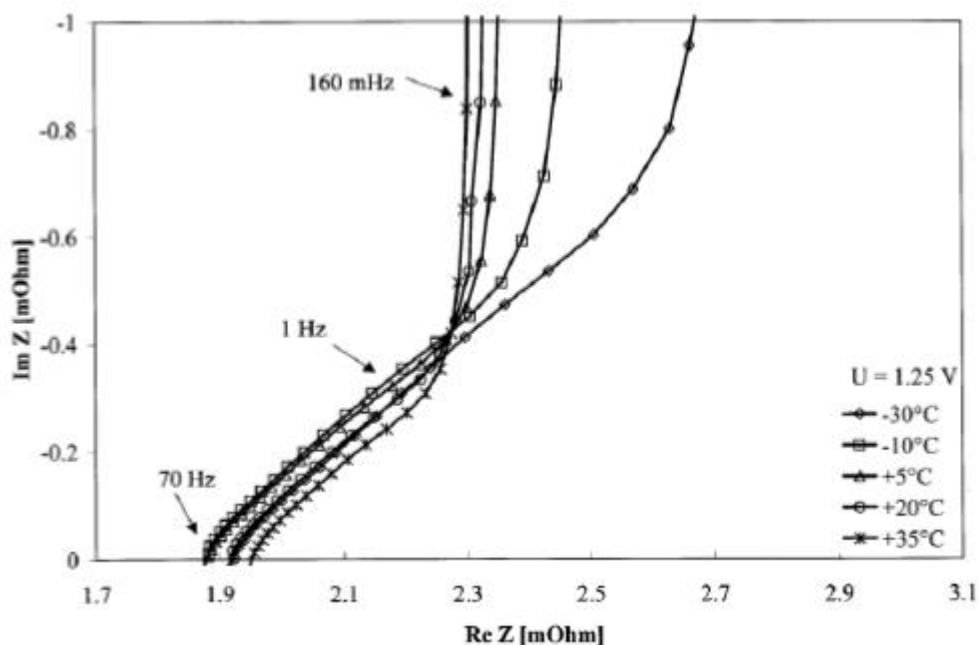
3.5.4 Μοντέλο Σειράς βασισμένο στην Ανάλυση Συχνότητας του Υπερπυκνωτή

Το μοντέλο αυτό προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά του υπερπυκνωτή από μετρήσεις που διεξάγονται στα εξωτερικά τερματικά του μέσω της μεθόδου φασματοσκοπίας ηλεκτροχημικής αντίδρασης (EIS), που συνήθως χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόκρισης συχνότητας των ηλεκτροχημικών μπαταριών.

Προκειμένου να λάβουμε τις σωστές μετρήσεις η πηγή ρεύματος δεν θα πρέπει να περιέχει DC στοιχεία, με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται ότι το πείραμα διεξάγεται με σταθερή τάση. Στην πραγματικότητα ο υπερπυκνωτής τροφοδοτείται με σταθερή DC τάση (τάση πόλωσης), η οποία υπερτίθεται σε μία ημιτονική τάση μεταβλητής συχνότητας. Η σχέση μεταξύ του πλάτους της κυματομορφής της ημιτονικής τάσης και του πλάτους της

κυματομορφής του ρεύματος που απορροφάται από τον υπερπυκνωτή μας δίνει την αντίδρασή του για τη δεδομένη συχνότητα.

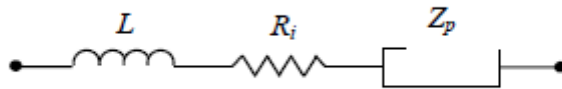
Στο Γράφημα 3.15 παρουσιάζεται το τυπικό φάσμα της αντίδρασης ενός υπερπυκνωτή σε διαφορετικές θερμοκρασίες και τάση πόλωσης 1,25 V. Το εύρος συχνοτήτων κυμαίνεται μεταξύ των 120 mHz και 70 Hz, καθώς αυτό είναι το τυπικό εύρος συχνοτήτων των περισσότερων εφαρμογών ισχύος.



Γράφημα 3.15 – Φάσμα της αντίδρασης σε σύνθετες καρτεσιανές συντεταγμένες ενός υπερπυκνωτή Montana Components SA, 1400 F 2.5 V

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στις υψηλές συχνότητες η συμπεριφορά του υπερπυκνωτή έχει εξ' ολοκλήρου χαρακτήρα αντίστασης. Στην πραγματικότητα το γράφημα τέμνει τον άξονα των πραγματικών αριθμών στην τιμή των 1,9 mΩ περίπου. Το χαρακτηριστικό αυτό του μοντέλου αναπαρίσταται από την αντίσταση σειράς R_i . Για ενδιάμεσες τιμές συχνότητας το γράφημα παρουσιάζει μία σχεδόν μοναδιαία κλίση σε σχέση με τον πραγματικό άξονα, γεγονός που οφείλεται στην δομή των οπών των ηλεκτροδίων. Στις χαμηλές συχνότητες το γράφημα είναι σχεδόν κάθετο για έναν ιδανικό πυκνωτή.

Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε το φάσμα της αντίδρασης απαιτούνται N κυκλώματα RC, τα οποία με τη σειρά τους απαιτούν την $2N$ παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί εξαρτώνται άμεσα η μία με την άλλη, γεγονός που καθιστά εξαιρετικά δύσκολο το να καθορίσουμε περισσότερες από πέντε ή έξι ανεξάρτητες παραμέτρους με γρήγορο και αποδοτικό τρόπο. Μία πιθανή λύση, όπως προτείνεται από τον Buller, παρουσιάζεται στο Γράφημα 3.16, όπου ο υπερπυκνωτής αναπαρίσταται από την αντίσταση σειράς R_i , την επαγωγή L και τη σύνθετη αντίδραση Z_p , η οποία επιτρέπει να μοντελοποιήσουμε τη συμπεριφορά της συσκευής για το εύρος των ενδιάμεσων συχνοτήτων, καθώς και να πετύχουμε μία αρκετά καλή προσέγγιση για τις πολύ χαμηλές συχνότητες κοντά στη συμπεριφορά του ιδανικού πυκνωτή [18].



Εικόνα 3.16 – Ισοδύναμο κύκλωμα υπερπυκνωτή με βάση τη μέθοδο ανάλυσης συχνότητας

Η τιμή της αντίδρασης Z_p εξαρτάται από τη δομή των οπών των ηλεκτροδίων. Εξαιτίας του πορώδους αυτού χαρακτήρα των ηλεκτροδίων, το πραγματικό μέρος της αντίδρασης αυξάνει καθώς μειώνεται η τιμή της συχνότητας και η μέγιστη τιμή της χωρητικότητας εμφανίζεται μόνο σε σταθερές συνθήκες. Η μαθηματική έκφραση της Z_p σαν συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας ω , δηλαδή $Z_p(j\omega)$, δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Z_p(j\omega) = \frac{\tau \coth(\sqrt{j\omega\tau})}{C\sqrt{j\omega\tau}} \quad (3.13)$$

Η παραπάνω μαθηματική έκφραση περιέχει δύο μόνο ανεξάρτητες μεταβλητές, τη χωρητικότητα C και την σταθερά χρόνου τ . Έτσι, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων L και R_i , το μοντέλο αυτό περιγράφεται με μόλις τέσσερις ανεξάρτητες μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να εξαχθούν από τις φασματικές μετρήσεις. Προκειμένου να καταρτίσουμε ένα μοντέλο κατάλληλο για ένα πρόγραμμα προσομοίωσης πρέπει να μετατρέψουμε το πεδίο της συχνότητας σε πεδίο χρόνου. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier της εξίσωσης (3.13) είναι:

$$G(j\omega) = \frac{k_1}{\sqrt{j\omega}} \coth\left(\frac{k_1}{k_2} \sqrt{j\omega}\right) \quad (3.14)$$

στον οποίο k_1 και k_2 είναι σταθερές. Έτσι στο πεδίο του χρόνου έχουμε:

$$g(t) = \frac{k_1^2}{k_2} + \frac{2k_1^2}{k_2} \sum_{n=1}^{\infty} e^{\left(\frac{-n^2\pi^2 k_1^2}{k_2^2}\right)t} \quad (3.15)$$

Συγκρίνοντας τους συντελεστές των σχέσεων (3.13), (3.14) και (3.15), καταλήγουμε στα εξής:

$$k_1 = \frac{\sqrt{\tau}}{C} \quad \text{and} \quad k_2 = \frac{\tau}{C} \quad (3.16)$$

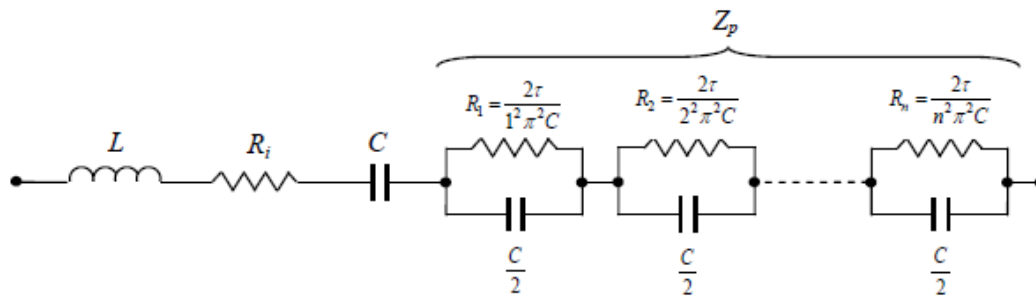
και κατά συνέπεια:

$$g(t) = \frac{1}{C} + \frac{2}{C} \sum_{n=1}^{\infty} e^{\left(\frac{-n^2\pi^2}{\tau}\right)t} \quad (3.17)$$

Έχοντας κατά νου την αρχική συνάρτηση μεταφοράς καθώς και τον αντίστροφο μετασχηματισμό ενός απλού RC κυκλώματος (με $\tau = RC$), αναλύοντας την εξίσωση (3.15) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μπορεί να θεωρηθεί σαν το άθροισμα n RC εκθετικών συναρτήσεων, οι οποίες αντιστοιχούν σε μία ακολουθία n παράλληλων RC κλάδων. Συγκεκριμένα:

$$\begin{cases} \text{for } n = 0 \Rightarrow g(t) = \frac{1}{C} \Rightarrow C_0 = C \text{ and } R_0 = R \\ \text{for } n \neq 0 \Rightarrow g(t) = \frac{2}{C} \sum_{n=1}^{\infty} e^{\left(-\frac{n^2 \pi^2}{\tau}\right)t} \Rightarrow C_n = \frac{C}{2} \text{ and } R_n = \frac{2\tau}{n^2 \pi^2 C} \end{cases} \quad (3.18)$$

Το κυκλωματικό μοντέλο της παραπάνω σχέσης αποτυπώνεται στην Εικόνα 3.17 – Το κυκλωματικό μοντέλο του υπερπυκνωτή με τη χρήση 4 παραμέτρων L, R_i, C και τ [18]

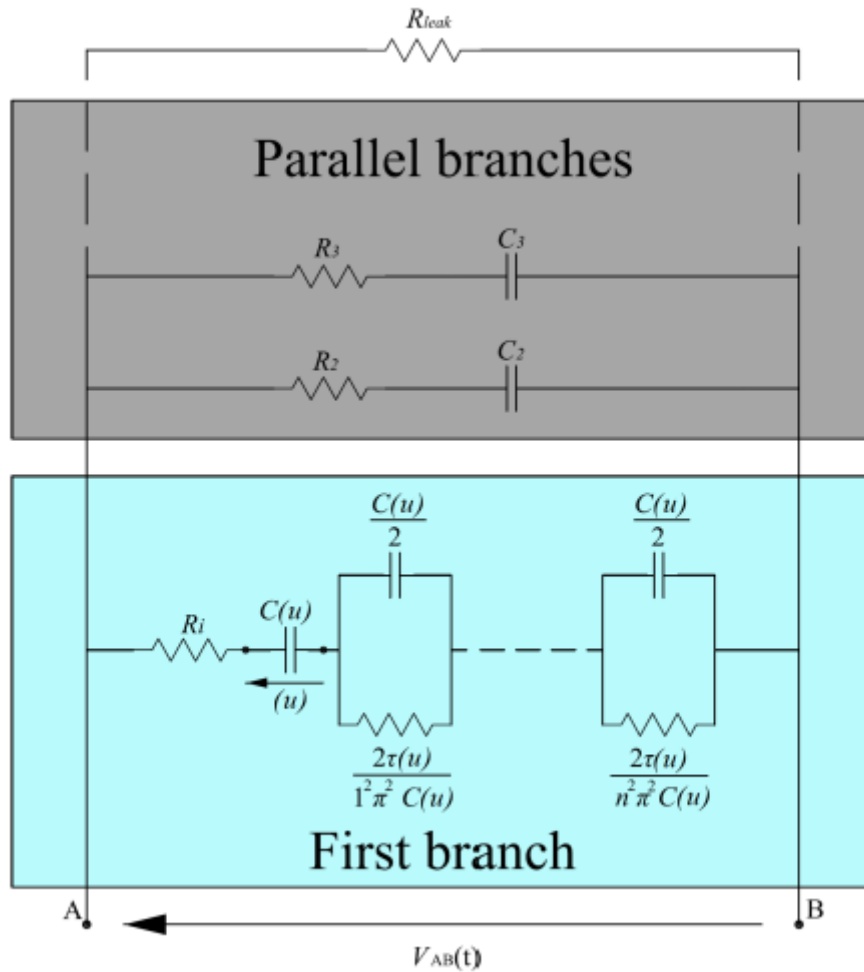


Εικόνα 3.17 – Το κυκλωματικό μοντέλο του υπερπυκνωτή με τη χρήση 4 παραμέτρων L, R_i, C και τ [18]

Για μία πιο σωστή μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του υπερπυκνωτή σε βιομηχανικές εφαρμογές, είναι χρήσιμο να αναπαραστήσουμε την αντίδραση Z_p με ένα πλήθος μεταξύ πέντε και δέκα RC κυκλωμάτων. Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι όλοι οι παράμετροι R_n και C_n των RC παράλληλων κλάδων υπολογίζονται μαθηματικά ξεκινώντας από πρώτες δύο C και τ μεταβλητές. Ο περιορισμός του μοντέλου αυτού έγγυται στην αδυναμία του να συμπεριλάβει τόσο τα φαινόμενα κατανομής του φορτίου και το φαινόμενο της αυτό-αποφόρτισης του υπερπυκνωτή, όσο και την ανάγκη να διεξάγουμε ανάλυση συχνότητας σε μία συσκευή προκειμένου να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους του ίδιου του μοντέλου.

3.5.5 Μοντέλο Πλήρους Εύρους Συχνότητων

Το πλήρες μοντέλο του υπερπυκνωτή, όπως αλλιώς λέγεται, προτάθηκε από τον Musolino και με βάση αυτό μπορούμε να αναπαραστήσουμε με μεγάλη ακρίβεια την πλήρη δυναμική ενός πραγματικού υπερπυκνωτή (Εικόνα 3.18) [19]. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από τρεις παράλληλους κλάδους: τον πρώτο που χαρακτηρίζεται από την ίδια αντίδραση με το Μοντέλο Σειράς όπως περιγράφεται από τη σχέση (3.13), το δεύτερο που απαρτίζεται από μία σειρά από παράλληλα RC κλάδους και αναπαριστά το φαινόμενο της ανακατανομής του φορτίου μετά από μία ταχεία φόρτιση ή εκφόρτιση και τέλος τον τρίτο κλάδο που περιλαμβάνει την τελική αντίσταση R_{leak} η οποία επιτρέπει στο μοντέλο να συμπεριλάβει στην προσέγγισή του και το φαινόμενο της αυτό-αποφόρτισης. Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακρίβεια στην προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς της συσκευής κατά τη φόρτιση και την εκφόρτισή της, συμπεριλαμβανομένων των χρονικών διαστημάτων από μερικά milliseconds μέχρι και αρκετές εβδομάδες.



Εικόνα 3.18 – Πλήρες μοντέλο ενός υπερπυκνωτή [19]

Η αντίδραση του πρώτου κλάδου, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.13), χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους C και τ , οι οποίες είναι και οι δύο γραμμικές συναρτήσεις της επιβαλλόμενης τάσης στα τερματικά του υπερπυκνωτή. Πιο συγκεκριμένα:

$$\begin{aligned} C(u) &= C_0 + k_c u \\ \tau(u) &= \tau_0 + k_\tau u \end{aligned} \quad (3.19)$$

Επιπλέον, εξειδικεύοντας την σχέση (3.17) για συνθήκες σταθερής λειτουργίας, λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} \Re \{ Z_p \} &= \lim_{\omega \rightarrow 0} \Re \{ R_p \} = R_i + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\tau(u)}{n^2 \pi^2 C(u)} = R_i + \frac{\tau(u)}{3C(u)} = R_{dc} \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} \Im \{ \omega Z_p \} &= -\frac{1}{C(u)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

όπου R_p είναι το πραγματικό μέρος της αντίδρασης Z_p .

Η τιμή της χωρητικότητας για κάθε τιμή τάσης u μπορεί να προσδιοριστεί από μία δοκιμή φόρτισης σταθερού ρεύματος και πιο συγκεκριμένα είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουμε την ίδια διαδικασία που υποδεικνύεται στην [18]. Η αντίσταση R_p δεν μπορεί να μετρηθεί σωστά με τη δοκιμή σταθερού ρεύματος, καθώς στις χαμηλές συχνότητες (μερικά δέκατα του mHz) η συνεισφορά της ισοδύναμης αντίστασης των παράλληλων κλάδων δεν μπορεί να

θεωρηθεί αμελητέα. Σε συμφωνία με όσα αναγράφονται συνήθως και στα φυλλάδια τεχνικών δεδομένων των κατασκευαστών, όταν η συσκευή λειτουργεί σε συχνότητες ίσες με το αντίστροφο του χρόνου εκφόρτισης T_{dc} , στον οποίο αντιστοιχεί η αναγραφόμενη χωρητικότητα, η συνεισφορά των παράλληλων κλάδων μπορεί να αγνοηθεί και κατά συνέπεια η μέτρηση της αντίστασης που διεξάγεται στις συχνότητες αυτές παρέχει μία πολύ καλή προσέγγιση της αντίστασης R_{dc} . Στις υψηλές συχνότητες, όταν ο υπερπυκνωτής λειτουργεί σαν αντιστάτης, η μέτρηση της αντίστασης στα τερματικά του παρέχει μία προσέγγιση της τιμής της αντίστασης R_i (η παράμετρος αυτή επίσης αναγράφεται συνήθως στα φυλλάδια τεχνικών δεδομένων των κατασκευαστών). Από τη σχέση (3.19), συνδυάζοντας τις παραμέτρους R_{dc} και R_i μπορούμε να προσδιορίσουμε την παράμετρο $u(t)$ ως εξής:

$$\tau(u) \approx 3C(u)(R_{dc} - R_i) \quad (3.21)$$

Επαναλαμβάνοντας τη δοκιμή σταθερού ρεύματος για μία σειρά από διαφορετικές τιμές τάσης πόλωσης, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την τιμή της σταθεράς k_c της σχέσης (3.19), η οποία λαμβάνει υπόψη διακύμανση της χωρητικότητας με την μεταβολή της επιβαλλόμενης τάσης.

Όσον αφορά τον προσδιορισμό των παράλληλων κλάδων, πρώτα απ' όλα το πλήθος τους θα πρέπει να επιλεγεί συνυπολογίζοντας το βαθμό ακρίβειας για την αποτύπωση του φαινομένου της ανακατανομής του φορτίου με την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Στην περίπτωση που οι χρονικές σταθερές των παράλληλων κλάδων επιλεγθούν με τρόπο τέτοιο ώστε να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, τότε μπορούμε να διαιρέσουμε το χρόνο εκφόρτισης σε $n+1$ διαστήματα. Σε κάθε διάστημα n , συμμετέχουν στη διαδικασία κατανομής του φορτίου μόνο οι κλάδοι από 1 έως και $n-1$. Αντίθετα, όλοι οι υπόλοιποι κλάδοι θεωρούνται ότι βρίσκονται σε μία στατική κατάσταση και δεν επηρεάζονται ούτε επιδρούν στην ανακατανομή του φορτίου, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλότερες χρονικές σταθερές. Τέλος, στα διάστημα $n+1$ όλη η ενέργεια καταναλώνεται στην αντίδραση αυτό-αποφόρτισης, R_{leak} .

Προκειμένου να καταρτίσουμε μία απλοποιημένη μέθοδο προσδιορισμού των παραμέτρων των παράλληλων κλάδων, οι διαφορετικές χρονικές σταθερές θα πρέπει να επιλεγούν με τέτοιο τρόπο ώστε το μεταβατικό φαινόμενο που συμβαίνει στον κλάδο n , να επηρεάζει μόνο τους κλάδους 1 έως και n , ενώ οι υπόλοιποι κλάδοι να παραμένουν σε σταθερή κατάσταση. Συγκεκριμένα, τα διαστήματα μπορούν να είναι ισομοιρασμένα σε μία λογαριθμική κλίμακα ως εξής:

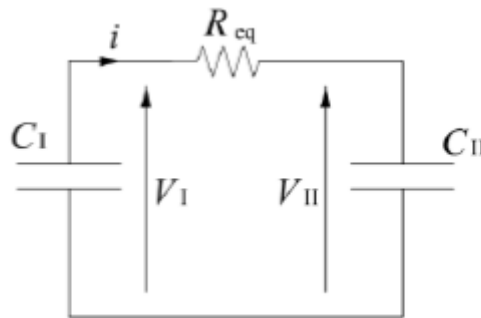
$$\begin{aligned} I_1 : \tau_0 < t < M\tau_0 = \tau_1 \\ I_2 : \tau_1 < t < M\tau_1 = \tau_2 \\ \dots \\ I_n : \tau_{n-1} < t < M\tau_{n-1} = \tau_n \end{aligned} \quad (3.22)$$

όπου τ_0 είναι ο χρόνος που απαιτείται για την διάδοση του μεταβατικού φαινομένου από τον 1^ο στο 2^ο κλάδο. Ο χρόνος αυτός έχει επιλεγεί ίσος με το πενταπλάσιο της χρονικής σταθεράς του 1^{ου} κλάδου, και η τιμή του κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως και δέκατα του δευτερολέπτου. Για να διασφαλίσουμε ότι η διάδοση της διαταραχής στα παράλληλα μέρη του κάθε κλάδου τερματίζεται προτού επεκταθεί και στους επόμενους κλάδους, στη σχέση (3.22) είναι απαραίτητο η χρονική σταθερά του κλάδου n , να είναι τουλάχιστον πέντε φορές

μεγαλύτερη από τη χρονική σταθερά του n-1 κλάδου. Αυτό σημαίνει ότι M θα πρέπει να είναι σίγουρα μεγαλύτερο του πέντε. Από την (3.22), δεδομένου ότι T_w είναι το τυπικό χρονικό παράθυρο στο οποίο εξελίσσεται το μεταβατικό φαινόμενο της ανακατανομής του φορτίου, παίρνουμε ότι η παράμετρος M μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$M = n-1 \sqrt{\frac{T_w}{\tau_0}} \quad (3.23)$$

Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης των μεταβατικών φαινομένων, το ισοδύναμο κύκλωμα είναι αυτό που φαίνεται στην Εικόνα 3.19. Τη χρονική στιγμή $t=0$, η χωρητικότητα C_I εκφορίζεται στην χωρητικότητα C_{II} , ενώ συμβολίζουμε την ισοδύναμη αντίσταση των δύο κλάδων με R_{eq} .



Εικόνα 3.19 – Ισοδύναμο κύκλωμα για δύο παράλληλους κλάδους [19]

Καθώς η χωρητικότητα του πρώτου κλάδου είναι συνάρτηση της τάσης κατά τη διάρκεια της εξέλιξης του μεταβατικού στον κλάδο αυτό, συμβολίζοντας V_0 και V_f την αρχική και την τελική τάση αντίστοιχα, μπορούμε να γράψουμε:

$$C_{II} = \frac{V_0 - V_f}{V_f} C_I + k_c \frac{V_0^2 - V_f^2}{2V_f} \quad (3.23)$$

όπου η μεταβλητή k_c είναι διάφορη του μηδενός μόνο κατά τη διάρκεια της ανάλυσης του πρώτου μεταβατικού φαινομένου ανακατανομής του φορτίου.

Με βάση την αρχή διατήρησης του φορτίου, οι χωρητικότητες των παράλληλων κλάδων μπορούν να υπολογιστούν με εναδρομικό τρόπο και κατά συνέπεια μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητες από την αντίσταση. Γνωρίζοντας την τιμή της χωρητικότητας του κάθε κλάδου καθώς και των διαφορετικών χρονικών σταθερών, με βάση τις σχέσεις (3.21) και (3.22) μπορούμε να καθορίσουμε τις διαφορετικές αντιστάσεις ως εξής:

$$C_\rho = k_c \frac{V_{\tau_{\rho-1}}^2 - V_{\tau_\rho}^2}{2V_{\tau_\rho}} + \frac{V_{\tau_{\rho-1}} - V_{\tau_\rho}}{V_{\tau_\rho}} \sum_{j=1}^{\rho-1} C_j$$

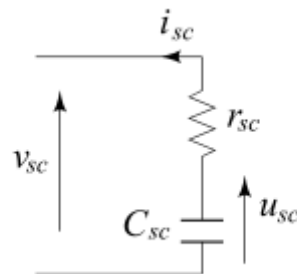
$$R_\rho = \frac{\tau_\rho}{C_\rho} \quad (3.23)$$

$$R_{leak} = \frac{\tau_n}{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} C_j}$$

Συνοψίζοντας, αυτό το πλήρες μοντέλο του υπερπυκνωτή που έχει τη δυνατότητα να αποτυπώσει την πλήρη δυναμική της συσκευής, βασίζεται στην απόκριση συχνότητας της ίδιας της συσκευής και προσδιορίζεται από μια απλοποιημένη διαδικασία καθορισμού των παραμέτρων του.

3.5.6 Μοντέλο Υπερπυκνωτή κατάλληλο για σιδηροδρομικές εφαρμογές

Αναλογιζόμενοι τη χρήση του υπερπυκνωτή σαν μία συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε σιδηροδρομικά δίκτυα, λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά χαρακτηριστικά των αστικών σιδηροδρομικών συρμών, όπως αυτά περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα, κάθε υπερπυκνωτής μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα πρώτης τάξης, υπολογίζοντας στη θεώρηση αυτή μόνο τον κλάδο βραχείας απόκρισης (ή αλλιώς κύριο κλάδο) του παραπάνω πλήρους μοντέλου [20]. Πιο συγκεκριμένα, μόνο ο πρώτος παράλληλος κλάδος πρέπει να συμπεριληφθεί οδηγώντας έτσι σε ένα απλό κύκλωμα σειράς, όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3.20.



Εικόνα 3.20 – Ισοδύναμο υπερπυκνωτή 1^{ης} τάξης για σιδηροδρομικές εφαρμογές

Αυτό το μοντέλο περιγράφεται από μία ισοδύναμη αντίσταση σειράς r_{sc} , η οποία είναι σταθερή και ανεξάρτητη της συχνότητας και από μία ισοδύναμη χωρητικότητα C_{sc} , η οποία περιγράφεται από ένα σταθερό όρο C_0 [F] (που θεωρητικά αντιπροσωπεύει την χωρητικότητα του υπερπυκνωτή για τάση $v_{sc} = 0$) και έναν όρο που μεταβάλλεται γραμμικά με την εσωτερική τάση του υπερπυκνωτή, $C_1 u_{sc}$, όπου C_1 (Farad/Volt) είναι μία σταθερά:

$$C(u_{sc}) = C_0 + C_1 u_{sc} \quad (3.24)$$

Αν θέλουμε να αποτυπώσουμε την ισοδύναμη χωρητικότητα του υπερπυκνωτή με μία μεταβλητή, αυτό είναι εφικτό για μία μόνο τιμή τάσης και κατά προτίμηση την μετρημένη τάση. Συνεπώς, η συνολική τιμή της χωρητικότητας του υπερπυκνωτή θα πρέπει να εξακριβωθεί ακριβώς στη μέγιστη τάση λειτουργίας, $V_{sc,max}$, και για το λόγο αυτό δίνεται από τη σχέση $C_{sc} = C_0 + C_1$. Η προηγούμενη σχέση μπορεί να θεωρηθεί γραμμική όταν ο υπερπυκνωτής λειτουργεί μεταξύ της ονομαστικής τάσης και του μισού της τάσης αυτής. Οπότε στο εύρος αυτό ο υπερπυκνωτής παρέχει το 75% της αποθηκευμένης ενέργειάς του.

Η σχέση μεταξύ του ρεύματος και της τάσης των τερματικών του υπερπυκνωτή έχει την παρακάτω μορφή:

$$\begin{cases} v_{SC} = u_{SC} - r_{SC}i_{SC} \\ i_{SC} = -(C_0 + 2C_1u_{SC})\frac{du_{SC}}{dt} \end{cases} \quad (3.25)$$

Ο όρος $C_0 + 2C_1u_{SC}$ χαρακτηρίζεται σαν διαφορική χωρητικότητα του υπερπυκνωτή (3.11) και συνήθως η σταθερά C_1 κυμαίνεται από το 10 έως το 25% της σταθεράς C_0 για τους υπερπυκνωτές εμπορικής χρήσης [21]-[22].

3.6 Βιβλιογραφία

- [1] Conway, B. E.. Electrochemical Supercapacitors – Scientific Fundamentals and Technological Applications. New York, Kluwer Academic / Plenum Publishers, 1999.
- [2] Miller, J. M.. Ultracapacitor Applications. The Institution of Engineering and Technology, UK, 2011.
- [3] Musolino, V.. Supercapacitor storage systems: modeling, control strategies, applications and sizing criteria. Ph.D. Thesis in Electrical Engineering, XXVI Cycle, Electrical Department, Polytechnic of Milan, Italy, 2011, supervisor Tironi E.
- [4] Kotz, R.; Carlen, M. Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica Acta*, vol. 45 (15-16), May 2000, pp. 2483–2498.
- [5] Namisnyk, A. M. A survey of electrochemical supercapacitor technology. Ph.D Thesis in Electrical Engineering, University of Technology, Sydney, Supervisor: Jian Guo Zhu.
- [6] Čihak, E.E.T.; Jakopović, E.E.Z. Supercapacitors in power converter DC link: A short overview of design and application issues. Proc. 34th Int. convention on information and communication technology, electronics and microelectronics MIPRO 2011, Opatija; Croatia; 23-27 May 2011, pp. 130-135.
- [7] Arbizzani, C.; Mastragostino, M.; Meneghello, L. Polymer-based redox supercapacitors: A comparative study. *Electrochimica Acta*, vol. 41 (1), Jan. 1996, pp. 21-26.
- [8] Wikipedia the free encyclopedia. Supercapacitors. Available on-line: <http://http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor> (Accessed 2013).
- [9] Maxwell Technologies. BC series ultracapacitors. Available on-line: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/bcseries_ds_1017105-4.pdf (Accessed 2013).
- [10] Rosario, L. C. Power and Energy Management of Multiple Energy Storage Systems in Electric Vehicles. Ph.D Thesis in Electrical Engineering, Department of Aerospace Power & Sensors, Cranfield University, DCMT Shrivenham, UK, June 2007, Supervisor: Patrick Chi Kwong Luk.
- [11] Maxwell Technologies. 125 V heavy transportation module. Available on-line: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/125vmodule_ds_1014696-7.pdf (Accessed 2013).
- [12] Devillers, N.; Jemei, S.; Péra, M.; Bienaimé, D.; Gustin, F. Review of characterization methods for supercapacitor modelling. *J Power Sources*, vol. 246, 2014, pp. 596-608.
- [13] Spyker, R.L.; Nelms, R.M. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36 (3 –PART 1), 2000, pp.829-836.
- [14] Kurzweil, P.; Frenzel, B. Capacitance characterization methods and ageing behaviour of supercapacitors. Proc. 15th Int. Seminar on Double Layer Capacitors, Deerfield Beach, FL., U.S.A., Dec. 5-7, 2005.
- [15] Zubieta, L.; Bonert, R. Characterization of double layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 36 (1), Jan./Feb. 2000, pp. 199-205.

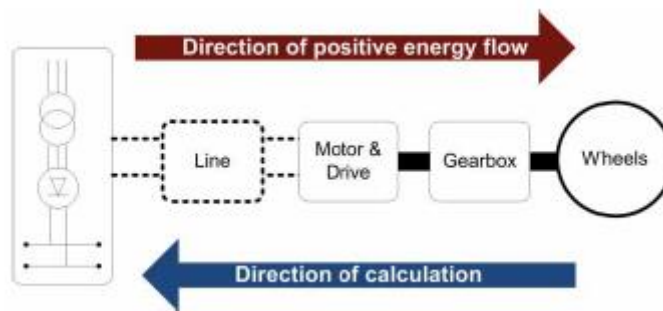
- [16] Belhachemi, F.; Rael, S.; Davat, B. Physical based model of power electric double-layer supercapacitors. Proc. 35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial applications of Electrical Energy, Rome, Italy, 8-12 Oct. 2000, pp. 3069-3076.
- [17] Faranda, R.; Gallina, M.; Son, D.T. A new simplified model of double-layer capacitors. Proc. Int. Conf. on Clean Electrical Power, ICCEP 2007; Capri; Italy; 21-23 May 2007, pp. 706-710.
- [18] Buller, S.; Karden, E.; Kok, D.; De Doncker, R.W. Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy. IEEE Trans Ind Appl. , vol. 38 (6), Nov. 2002, pp. 1622-1626.
- [19] Musolino, V.; Piegari, L.; Tironi, E. New full-frequency-range supercapacitor model with easy identification procedure. IEEE Trans Ind Electron. Vol. 60 (1), 2013, pp.112-120.
- [20] Camara, M.B.; Gualous, H.; Dakyo, B. Supercapacitors modeling and integration in transport applications. Proc. 46th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IAS 2011, Orlando, FL, U.S.A., 9-13 Oct. 2011.
- [21] Rafik, F.; Gualous, H.; Gallay, R.; Crausaz, A.; Berthon, A. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling. J Power Sources, vol. 165 (2), Mar. 2007, pp. 928-934.
- [22] Funaki, T. Evaluating energy storage efficiency by modeling the voltage and temperature dependency in EDLC electrical characteristics. IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 25 (5), May 2010, pp. 1231-1239.
- [23] Flavio Ciccarelli; Diego Iannuzzi; Claudio Serpico; Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems, Mar. 2017.

Κεφάλαιο 4^ο

Μοντέλο Προσομοίωσης

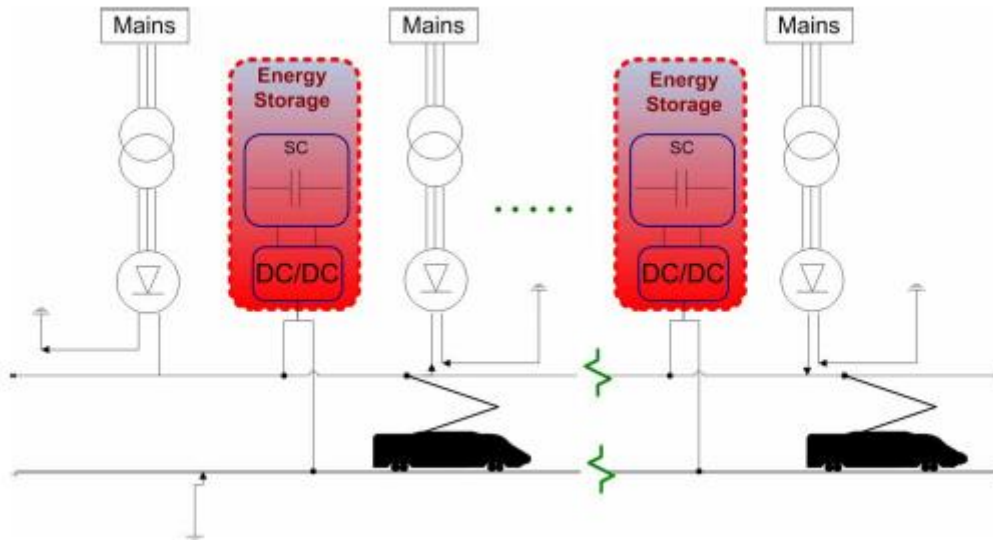
Η προτεινόμενη μέθοδος προσομοίωσης βασίζεται στην «ημιστατική» αντίστροφη μέθοδο (“quasistatic backwards looking method”). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για προσομοιώσεις που αφορούν τη ροή ισχύος και την κατανάλωση σε οχήματα, εξαιτίας των σχετικά απλών μοντέλων και του μικρού χρόνου περάτωσης της προσομοίωσης που απαιτεί [24-27]. Βασίζεται στην εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας ενός οχήματος ακολουθώντας ένα προκαθορισμένο μοτίβο κίνησης. Το μοτίβο αυτό διαιρείται σε μικρά χρονικά βήματα κατά τη διάρκεια των οποίων οι μεταβλητές του οχήματος μπορούν να θεωρηθούν σταθερές [28-30].

Η ισχύς που θεωρητικά θα πρέπει να καταναλωθεί από το όχημα προκειμένου αυτό να ακολουθήσει το συγκεκριμένο μοτίβο κίνησης καθορίζεται στο επίπεδο των τροχών και στη συνέχεια υπολογίζοντας προς τα πίσω τη συνεισφορά των υπόλοιπων μηχανικών στοιχείων του οχήματος, παίρνουμε μία εκτίμηση της ισχύος που θα πρέπει να προμηθευτεί στο όχημα από την παροχή ενέργειας (δηλαδή το δίκτυο συνεχούς ρεύματος στην περίπτωση μας). Η κατεύθυνση που ακολουθεί η προσομοίωση, λοιπόν, είναι ακριβώς αντίθετη από τη ροή της ισχύος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1 – Ημιστατική αντίστροφη μέθοδος προσομοίωσης

Το μοντέλο αυτό θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς μίας γραμμής μετρό με κινούμενα οχήματα, υποσταθμούς με δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος και στατικές συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, παρόμοιο με εκείνο που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.2. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι όποτε αναφερόμαστε σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας στο εξής θα αναφερόμαστε σε υπερπυκνωτές. Η αιτία της επιλογής αυτής αναλύθηκε ενδελεχώς στο κεφάλαιο 2. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από τρία διαφορετικά υπομοντέλα: το υπομοντέλο του δικτύου, το υπομοντέλο των οχημάτων και το υπομοντέλο των συσκευών αποθήκευσης. Τα υπομοντέλα αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας τις κατάλληλες μεταβλητές.

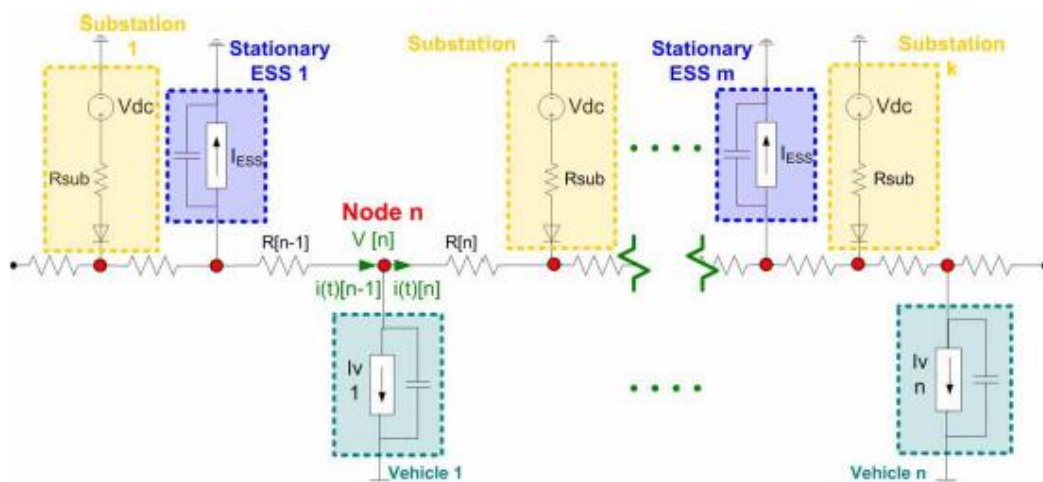


Εικόνα 4.2 – Δίκτυο DC τάσης σε μία γραμμή μετρό με στατικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας

4.1 Μοντέλο Δικτύου

Το μοντέλο του δικτύου περιλαμβάνει τους υποσταθμούς και τη γραμμή μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και συνδέεται με τα άλλα δύο υπομοντέλα, με τον τρόπο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3.

Οι υποσταθμοί μοντελοποιούνται από μία ιδανική πηγή συνεχούς τάσης, V_{dc} , με μία εσωτερική αντίσταση, R_{sub} , με τα τρένα και τις συσκευές αποθήκευσης να συμπεριφέρονται σαν ιδανικές πηγές ρεύματος. Η δυσκολία του συστήματος έγκυται στην ύπαρξη κινούμενων φορτίων (τρένα), η οποία έχει σαν αποτέλεσμα οι εξισώσεις του συστήματος να μεταβάλλονται σε κάθε χρονικό βήμα. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να διαχωρίσουμε τους κόμβους (τα σημεία σύνδεσης της γραμμής μεταφοράς με τα διαφορετικά στοιχεία: υποσταθμούς, οχήματα και συσκευές αποθήκευσης) ανάλογα με τη θέση τους καθώς επίσης και να υπολογίσουμε την τιμή των αντιστάσεων R_n σε κάθε χρονικό βήμα. Η διαδικασία αυτή αποτυπώνεται στην Εικόνα 4.3, μοντελοποιώντας το δίκτυο που δίνεται στη Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.3 – Παράδειγμα του μοντέλου δικτύου που θα χρησιμοποιηθεί

Για να επιλύσουμε το σύστημα των εξισώσεων του δικτύου, πρέπει να προσδιορίσουμε την τάση σε κάθε κόμβο, V_n , καθώς και το ρεύμα σε κάθε κλάδο της γραμμής, I_n . Για το λόγο αυτό, ο αριθμός των μεταβλητών που πρέπει να υπολογίσουμε ακολουθεί την εξίσωση (4.1), όπου το πλήθος των κόμβων ισούται με το άθροισμα του αριθμού των οχημάτων, n_v , των υποσταθμών, n_{sub} και των συσκευών αποθήκευσης, n_{ESS} , όπως δίνεται στην εξίσωση (4.2).

$$N_{variables} = 2Nodes - 1 \quad (4.1)$$

$$Nodes = n_{sub} + n_v + n_{ESS} \quad (4.2)$$

Έτσι, θα πρέπει να καταρτίσουμε και να επιλύσουμε ένα σύστημα $(2Nodes - 1)$ γραμμικά ανεξάρτητων εξισώσεων. Οι εξισώσεις αυτές ποικίλουν ανάλογα με το είδος του κάθε κόμβου και περιγράφονται από τις εξισώσεις (4.3)-(4.8).

4.1.1 Εξισώσεις Κόμβου Υποσταθμών

1. Κατάσταση Παροχής Ενέργειας

$$V_{dc} - (i_n - i_{n-1})R_{sub} = V_n \quad (4.3)$$

$$V_{n+1} = V_n - R_n i_n \quad (4.4)$$

2. Κατάσταση Αποσύνδεσης

$$i_n = i_{n-1} \quad (4.5)$$

$$V_{n+1} = V_n - R_n i_n \quad (4.6)$$

Για τη μοντελοποίηση της διόδου, η εξίσωση (4.3) χρησιμοποιείται για την κατάσταση αγωγής της, ενώ η εξίσωση (4.5) για την κατάσταση κατά την οποία δεν άγει. Η κατάσταση της διόδου καθορίζεται συγκρίνοντας την τάση της γραμμής με την προκαθορισμένη τιμή της τάσης ανοικτοκύκλωσης, V_{dc} . Αν η τάση της γραμμής είναι μικρότερη της V_{dc} , τότε η διάδος άγει και εφαρμόζεται η εξίσωση (4.3). διαφορετικά, η συμπεριφορά της αποσυνδεδεμένης διόδου περιγράφεται από την εξίσωση (4.5).

4.1.2 Εξισώσεις Κόμβου Οχημάτων και Συσκευών Αποθήκευσης

$$i_n - i_{n-1} = i_{vehicle} + i_{capacitor} \quad (4.7)$$

$$V_{n+1} = V_n - R_n i_n \quad (4.8)$$

όπου i_n είναι το ρεύμα που εξέρχεται από τον κόμβο n , V_n είναι η τάση του κόμβου n , $i_{vehicle}$ είναι το ρεύμα που παρέχεται στο όχημα, $i_{capacitor}$ το ρεύμα που διαρρέει την παράλληλη χωρητικότητα και R_n είναι η αντίσταση του τομέα n της γραμμής.

Οι εξισώσεις (4.7) και (4.8) αντιπροσωπεύουν την περίπτωση των οχημάτων. Αντικαθιστώντας, όμως, το $i_{vehicle}$ με i_{ESS} , μπορούμε να πάρουμε και τις εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας.

Η εισαγωγή της παράλληλης χωρητικότητας, τόσο στα οχήματα, όσο και στις συσκευές αποθήκευσης, χρησιμεύει στην προσομοίωση της δεκτικότητας του δικτύου σε καταστάσεις παραγωγής περίσσειας ανατροφοδοτούμενης ενέργειας πέδησης. Πράγματι, χωρίς τη

συγκεκριμένη χωρητικότητα δεν θα ήταν δυνατό να μοντελοποιήσουμε την παροχή ενέργειας πίσω στο δίκτυο, καθώς όταν δεν υπάρχουν φορτία (δηλαδή τρένα που να καταναλώνουν ενέργεια) και οι υποσταθμοί είναι σε κατάσταση αποσύνδεσης, τότε όλα τα μονοπάτια θα είναι μπλοκαρισμένα.

Το αποτέλεσμα της χωρητικότητας αυτής, είναι η ανύψωση της τάσης της γραμμής όταν επιχειρείται η ανατροφοδότηση μίας ποσότητας ισχύος μεγαλύτερης από αυτή που καταναλώνεται από τα τρένα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η μεταβολή αυτή μπορεί να χειριστεί από τον ελεγκτή των οχημάτων/συσκευών αποθήκευσης, ώστε να πετύχουμε βέλτιστη ροή ισχύος.

Στον τελευταίο κόμβο, μπορεί να σχηματιστεί μόνο μία εξίσωση. Ανάλογα με το είδος του τερματικού αυτού κόμβου η εξίσωση θα είναι είτε της μορφής (4.3), είτε της μορφής (4.5) για την περίπτωση κόμβου οχήματος ή συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, αντίστοιχα, με το i_n να τίθεται ίσο με μηδέν, καθώς δεν υπάρχει εξερχόμενο ρεύμα από τον συγκεκριμένο κόμβο.

4.2 Υπομοντέλο Οχήματος

Τα οχήματα μοντελοποιούνται σαν κινητές εξαρτημένες πηγές ρεύματος. Η ισχύς που αποδίδουν η απορροφούν στο δίκτυο υπολογίζεται με βάση το μοντέλο «αίτιο-αποτέλεσμα». Ξεκινώντας από ένα δοσμένο μοτίβο κίνησης, υπολογίζεται η ισχύς που καταναλώνεται στους τροχούς του οχήματος. Η ισχύς αυτή απαιτείται για να υπερνικηθεί η αδράνεια του οχήματος, η τριβή ολίσθησης και η αντίσταση του αέρα. Στη συνέχεια, πηγαίνοντας αντίστροφα προς τα μηχανικά μέρη του οχήματος και με βάση τους σχετικούς βαθμούς απόδοσής τους ($n_{component}$), υπολογίζουμε την ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο. Η ισχύς στην DC γραμμή μεταφοράς υπολογίζεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.9) και (4.10), με βάση πάντα την κατεύθυνση της ροής ισχύος.

$$P_{DCbusTRACTION} = \frac{P_{Wheels}}{n_{gearbox} n_{motor} n_{motordrive}} \quad (4.9)$$

$$P_{DCbusBRAKING} = P_{Wheels} n_{gearbox} n_{motor} n_{motordrive} \quad (4.10)$$

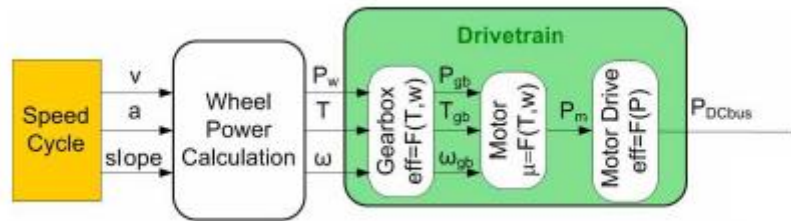
όπου $P_{DCbusTRACTION}$ είναι η ισχύς κίνησης που παρέχεται από την DC γραμμή στο όχημα και $P_{DCbusBRAKING}$ είναι η ισχύς πέδησης που επιστρέφει στη γραμμή μεταφοράς.

Οι συντελεστές απόδοσης των διαφόρων μερών του οχήματος δεν είναι σταθεροί, αλλά εξαρτώνται από το σημείο λειτουργίας τους (π.χ. ροπή και ταχύτητα για τα μηχανικά μέρη και ρεύμα, τάση για τα ηλεκτρικά συστήματα). Οι βαθμοί αυτοί μπορούν να προσδιοριστούν με βάση κατάλληλους πίνακες.

Ο υπολογισμός της τρέχουσας θέσης της αμαξοστοιχίας υπολογίζεται με βάση το δοσμένο προφίλ ταχύτητας. Η μεταβολή της θέσης του τρένου προσομοιώνεται στο παρόν μοντέλο από την αλλαγή της τιμής των αντιστάσεων της γραμμής R_{n-1} και R_n , όπου R_{n-1} είναι η αντίσταση της γραμμής από τον σταθμό (n-1) μέχρι την τρέχουσα θέση του τρένου και R_n η αντίσταση της γραμμής από την τρέχουσα θέση του τρένου μέχρι και τον σταθμό n, ενώ ανά πάσα στιγμή το άθροισμα $R_{n-1} + R_n = R_{n-1,n} = \text{σταθ.}$ (4.11). Συγκεκριμένα, καθώς ένα τρένο κινείται από τον σταθμό (n-1) προς τον σταθμό n, η τιμή της αντίστασης R_{n-1} μειώνεται, τη στιγμή που η τιμή της αντίστασης R_n αυξάνεται, ώστε να ισχύει η σχέση (4.11)

Το ποσό της ισχύος που απαιτείται από το όχημα θα αποτελεί, μαζί με την τρέχουσα θέση του οχήματος, την έξοδο του συγκεκριμένου μοντέλου. Οι δύο αυτές μεταβλητές εξόδου

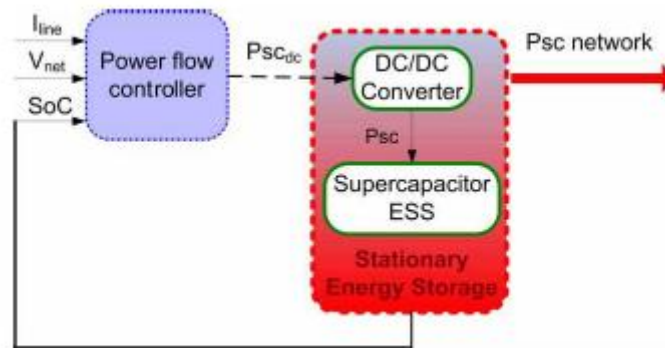
θα μεταβιβάζονται στο υπομοντέλο δικτύου, ώστε να καθορίζεται η τάση και το ρεύμα του δικτύου. Στην Εικόνα 4.4 απεικονίζεται σχηματικά το υπομοντέλο του οχήματος.



Εικόνα 4.4 – Υπομοντέλο Οχήματος

4.3 Υπομοντέλο Στατικής Συσκευής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η δομή της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας είναι σχετικά απλή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.5. Ο ελεγκτής ροής ισχύος θα καθορίσει την ισχύ που ζητείται/παρέχεται από/προς το δίκτυο, μέσα από την καθοδήγηση της ελεγχόμενης πηγής ρεύματος που περιλαμβάνεται στο συγκεκριμένο υπομοντέλο. Η τιμή της παραγόμενης από την πηγή αυτή ισχύος καθορίζεται με βάση την τάση του δικτύου, της κατάστασης φόρτισης (SoC) της συσκευής αποθήκευσης καθώς και της προηγούμενης τιμής της παραγόμενης ή απορροφηθείσας ισχύος.



Εικόνα 4.5 – Υπομοντέλο Στατικής Συσκευής Αποθήκευσης Ηλεκτρικής Ενέργειας

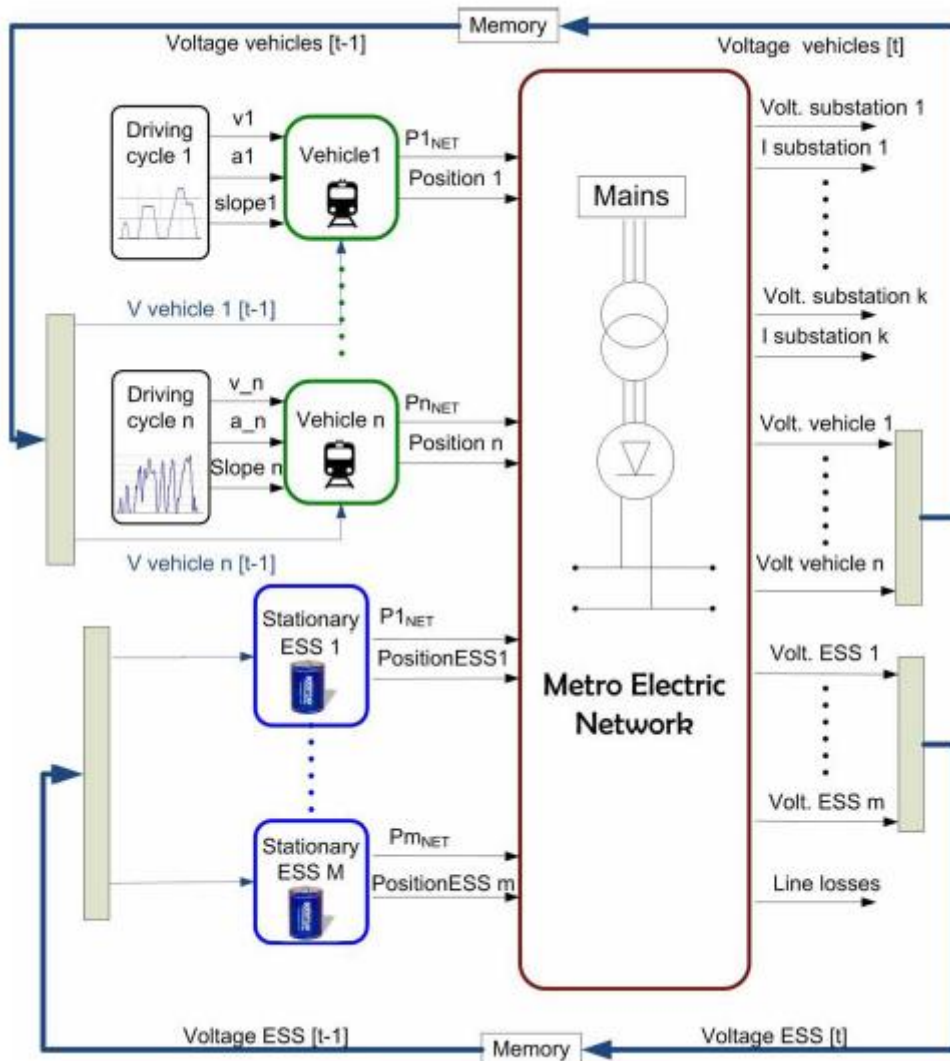
4.4 Επικοινωνία Υπομοντέλων

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών υπομοντέλων, που περιγράφηκε στις προηγούμενες υποενότητες παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.6, στην οποία απεικονίζεται ένα υποθετικό δίκτυο που αποτελείται από n οχήματα, m συσκευές αποθήκευσης και k υποσταθμούς που τροφοδοτούν μία γραμμή μεταφοράς που επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ενέργειας.

Το υπομοντέλο του δικτύου θα υπολογίσει την τάση στους υποσταθμούς, στα οχήματα και στις στατικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως επίσης και το ρεύμα που διαρρέει όλους τους κλάδους της γραμμής μεταφοράς. Για να εκτελέσει τους υπολογισμούς αυτούς,

απαιτεί σαν είσοδο την ισχύ και τη θέση των οχημάτων και των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας.

Τα οχήματα μεταφέρουν την τιμή της ισχύος που απαιτούν για την κίνησή τους καθώς και τη θέση τους στο υπομοντέλο του δικτύου, ενώ οι συσκευές αποθήκευσης μεταβιβάζουν μόνο την τιμή της ισχύος που απορροφούν ή τροφοδοτούν από ή προς το δίκτυο, καθώς η θέση τους είναι προκαθορισμένη και σταθερή, με αποτέλεσμα να καθορίζεται μόνο μία φορά στην αρχή της προσομοίωσης. Ταυτόχρονα, τόσο τα οχήματα όσο και οι συσκευές αποθήκευσης θα ανατροφοδοτήσουν στην ελεγκτή την τιμή της τάσης και ισχύος του προηγούμενου χρονικού βήματος, ώστε ο τελευταίος να βελτιστοποιήσει τη ροή ισχύος.



Εικόνα 4.6 – Αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης των υπομοντέλων

4.5 Βιβλιογραφία

- [1] Van Mierlo, J. and Maggetto, G. Vehicle simulation program: a tool to evaluate hybrid power management strategies based on an innovative iteration algorithm. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, 2001, 215(D9), 1043–1052. DOI: 10.1243/0954407011528608.
- [2] Van Mierlo, J. and Maggetto, G. Innovative iteration algorithm for a vehicle simulation programme. IEEE Trans. Veh. Technol., 2004, 53(2), 401–412.
- [3] Gao, D. W., Mi, C., and Emadi, A. Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles. Proc. IEEE, 2007, 95(4), 729–745.
- [4] Gazella, L. and Sciarretta, A. Vehicle propulsion systems. Introduction to modeling and optimization, 2005 (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg).
- [5] Wipke, K. B., Cuddy, M. R., and Burch, S. D. ADVISOR 2.1: a user-friendly advanced power train simulation using a combined backward/forward approach. IEEE Trans. Veh. Technol., 1999, 48(5), 1751–1761.
- [6] Markel, T., Brooker, A., Hendricks, T., Johnson, V., Kelly, K., Kramer, B., O’Keefe, M., Sprik, S., and Wipke, K. ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. J. Power Sources, 2002, 110(2), 255–266.
- [7] Barrero, R., Tackoen, X., and Van Mierlo, J. Quasistatic simulation method for evaluation of energy consumption in hybrid light rail vehicles. In Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, P. R. China, 2008.
- [8] Barrero, R., Tackoen, X., and Van Mierlo, J. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network, Mar. 2010.

Κεφάλαιο 5^ο

Πειραματική Διαδικασία

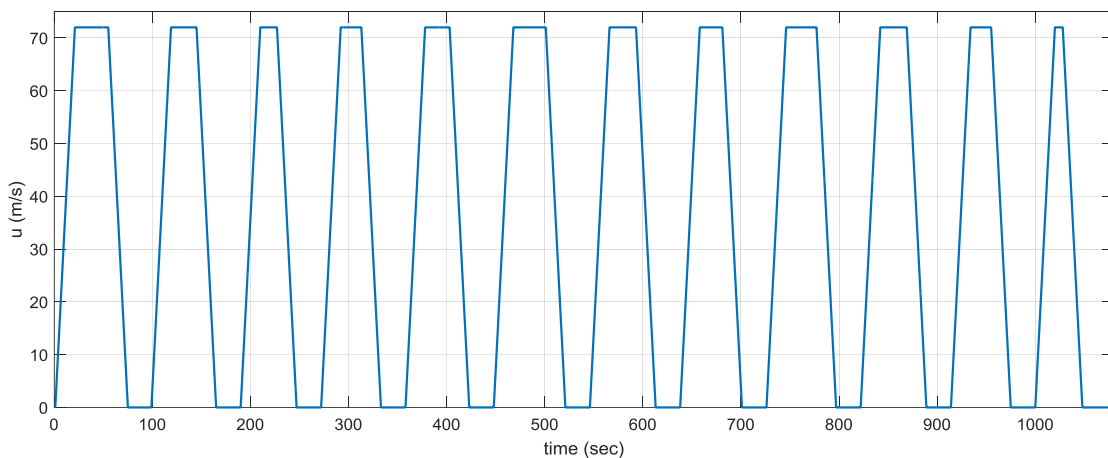
Στην παρούσα εργασία έχουμε υλοποιήσει σε περιβάλλον Matlab/Simulink και με βάση τη μοντελοποίηση που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, μέρος ενός τυπικού αστικού σιδηροδρομικού δικτύου. Το συνολικό μήκος της συγκεκριμένης διαδρομής ανέρχεται περίπου στα 11 km, περιλαμβάνει 13 σταθμούς και τροφοδοτείται από 13 υποσταθμούς που επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ενέργειας. Κάθε αμαξοστοιχία έχει καθαρό βάρος 30,4 τόνους και χωρητικότητα 223 επιβάτες (που συνεπάγεται με 4 επιβάτες ανά τετραγωνικό μέτρο), με αποτέλεσμα το μεικτό βάρος της αμαξοστοιχίας να φτάνει τους 45 περίπου τόνους, σε πλήρες φορτίο.

5.1 Παραδοχές

- Η κατανάλωση των βοηθητικών συστημάτων κάθε οχήματος τίθεται στα 300 kW.
- Το προφίλ κίνησης του κάθε τρένου απεικονίζεται στο Γράφημα 5.1 και περιλαμβάνει:
 - α. Χρόνο επιτάχυνσης ίσο με 20 sec.
 - β. Χρόνο πέδησης ίσο με 20 sec.
 - γ. Χρόνο παραμονής σε κάθε σταθμό ίσο με 25 sec.
 - δ. Ο χρόνος κίνησης με σταθερή ταχύτητα ποικίλει, καθώς η απόσταση μεταξύ των σταθμών δεν είναι σταθερή και κατά συνέπεια υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$t_{steady_speed_n} = t_{station_1ton} - t_{station_1to(n-1)} - t_{braking} - t_{acc} - t_{stop} \quad (5.1)$$

όπου $t_{steady_speed_n}$ είναι ο χρόνος κίνησης με σταθερή ταχύτητα μεταξύ των σταθμών n και $n-1$, $t_{station_1ton}$ ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το τρένο από την αφετηρία στον σταθμό n (θεωρείται γνωστός με βάση τα δρομολόγια της συγκεκριμένης γραμμής), $t_{station_1to(n-1)}$ ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το τρένο από την αφετηρία στον σταθμό $n-1$, $t_{braking}$ ο χρόνος πέδησης, t_{acc} ο χρόνος επιτάχυνσης και t_{stop} ο χρόνος παραμονής σε κάθε σταθμό.



Γράφημα 5.1 – Προφίλ Κίνησης Τρένου

- Η μέγιστη ταχύτητα των τρένων φτάνει τα 72 m/s.
- Το πλήθος των τρένων που κινούνται ταυτόχρονα κατά μήκος της γραμμής εξαρτάται από την τιμή της μεταβλητής “headway”, η οποία αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την εκκίνηση ενός τρένου μέχρι την εκκίνηση του επομένου.
- Ο χρόνος κίνησης του κάθε τρένου από τον 1^ο σταθμό μέχρι και τον 13^ο σταθμό ορίζεται στα 1073 sec.

5.2 Περιγραφή Λειτουργίας Στατικών Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας

Οι στατικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάζουν μία σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τις κινητές (ενσωματωμένες στα οχήματα) συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Αρχικά, είναι εγκατεστημένες στο έδαφος, με αποτέλεσμα το βάρος και ο όγκος τους να μην δυσχεραίνουν τη λειτουργία του δικτύου. Επιπλέον, μπορούν να αποθηκεύσουν αλλά και να τροφοδοτήσουν ενέργεια από και προς το σύνολο των οχημάτων που κινούνται κατά μήκος της διαδρομής. Από την άλλη πλευρά, για χάρη πληρότητας, θα πρέπει να αναφέρουμε σαν βασικό τους μειονέκτημα τις απώλειες ενέργειας κατά μήκος των γραμμών καθώς έχουμε ροή ισχύος από και προς αυτές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η ικανότητα αποθήκευσης και τροφοδοσίας ενέργειας και κατά συνέπεια και η αποδοτικότητα του συστήματος να περιορίζεται με την απόσταση. Το πρόβλημα αυτό, βέβαια, αντιμετωπίζεται, εν μέρει, με την τοποθέτηση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας κατά μήκος της διαδρομής.

Τα οχήματα μπορούν να ανατροφοδοτήσουν ενέργεια πίσω στο δίκτυο, όσο η τάση τους (V_{vehicle}) δεν υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή $V_{\text{REGENERATION_VEHICLES}}$. Όταν έχουμε υπέρβαση της τιμής αυτής, τότε το ρεύμα που εξέρχεται από το όχημα προς το δίκτυο μειώνεται, καθώς διαφορετικά θα έχουμε σημαντική αύξηση των απωλειών.

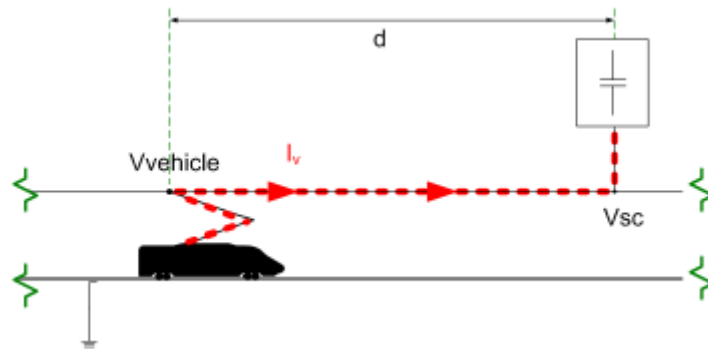
Με βάση το παράδειγμα της Εικόνας 5.2, με μόνο ένα όχημα να επιβραδύνει και μία συσκευή αποθήκευσης στη γραμμή, το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να εξέλθει από το όχημα, εξαιτίας του παραπάνω περιορισμού της τάσης, δίνεται από την εξής σχέση:

$$I_V < \frac{V_{\text{REGENERATION_VEHICLES}} - V_{SC}}{R(d) \cdot d} \quad (5.2)$$

όπου V_{SC} είναι η τάση στα τερματικά της συσκευής αποθήκευσης, $R(d)$ είναι η αντίσταση της γραμμής μεταφοράς και δίνεται Ω/km , ενώ d είναι η απόσταση του τρένου από τη συσκευή αποθήκευσης.

Παρά το γεγονός ότι η παραπάνω ανισότητα αναφέρεται στην περίπτωση της Εικόνας 5.2, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς από τα οχήματα είναι ανάλογη της τιμής $V_{\text{REGENERATION_VEHICLES}}$ και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης που χωρίζει το τρένο από τη συσκευή αποθήκευσης ενέργειας καθώς και της τάσης στα τερματικά της συσκευής.

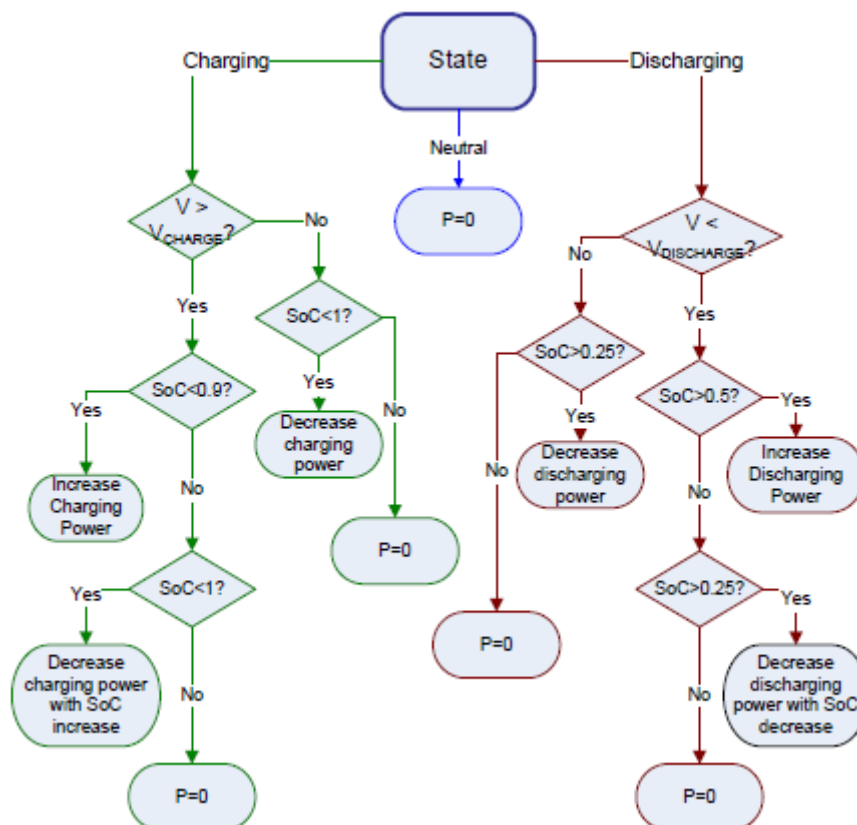
Ο έλεγχος της ροής ισχύος για την περίπτωση των στατικών συσκευών αποθήκευσης είναι αρκετά πιο σύνθετος σε σχέση με τον αντίστοιχο αλγόριθμο ελέγχου που απαιτούν οι κινητές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τις μεν πρώτες ο έλεγχος της ροής ισχύος θα πρέπει να γίνεται με βάση τόσο την μετρούμενη τάση στη γραμμή μεταφοράς, όσο και για την κατάσταση φόρτισης της ίδιας της συσκευής, ενώ όσον αφορά τις τελευταίες ο έλεγχος καθορίζεται από την κινητική ενέργεια του οχήματος [1].



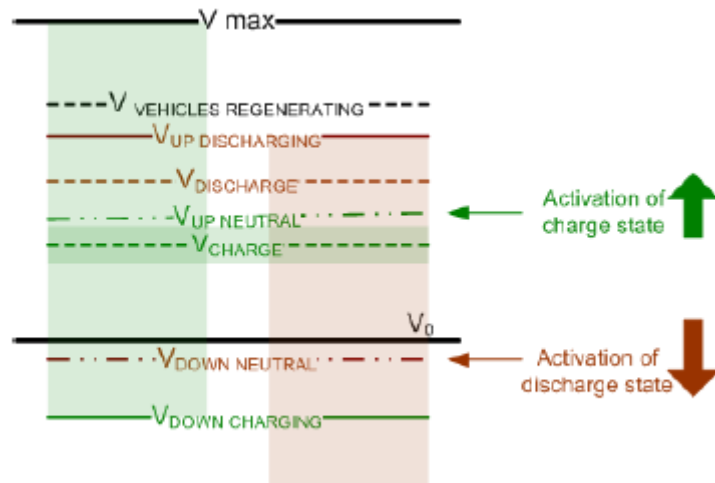
Εικόνα 5.2 – Παράδειγμα οχήματος που παράγει ενέργεια κατά την πέδηση και την τροφοδοτεί σε μία συσκευή αποθήκευσης

5.3 Στρατηγική Ελέγχου των Συσκευών Αποθήκευσης

Στην παρούσα φάση, θεωρούμε σαν βασικούς στόχους τη σταθεροποίηση της τάσης του δικτύου και την εξοικονόμηση ενέργειας. Με βάση τους στόχους αυτούς, έχουμε αναπτύξει έναν αλγόριθμο ελέγχου της συσκευής αποθήκευσης που στηρίζεται στις μεταβλητές κατάστασης της ίδιας της συσκευής και στην τάση του δικτύου. Η συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου περιγράφεται σχηματικά στα Γραφήματα 5.3 και 5.4.



Γράφημα 5.3 – Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας



Γράφημα 5.4 – Αναπαράσταση των ορίων τάσης που χρησιμοποιήθηκαν στον συγκεκριμένο αλγόριθμο ελέγχου

Η δυσκολία στον έλεγχο έγκυται στο να αποφανθούμε πότε πρέπει να αποθηκευτεί και πότε να προσφερθεί ενέργεια από και προς το δίκτυο, αντίστοιχα. Θεωρητικά, όταν η μετρούμενη τάση της γραμμής μεταφοράς υπερβεί την τάση κενού φορτίου, V_0 , του υποσταθμού τροφοδοσίας, αυτό σημαίνει ότι τα τρένα παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο και κατά συνέπεια, η συσκευή αποθήκευσης θα πρέπει να τεθεί σε κατάσταση φόρτισης. Ακριβώς αντίστροφα, όταν η τάση της γραμμής μεταφοράς γίνει μικρότερη από την τιμή V_0 , τότε συμπεραίνουμε ότι τα κοντινά τρένα καταναλώνουν ενέργεια και συνεπώς οι συσκευές αποθήκευσης θα πρέπει να μεταβούν σε κατάσταση εκφόρτισης.

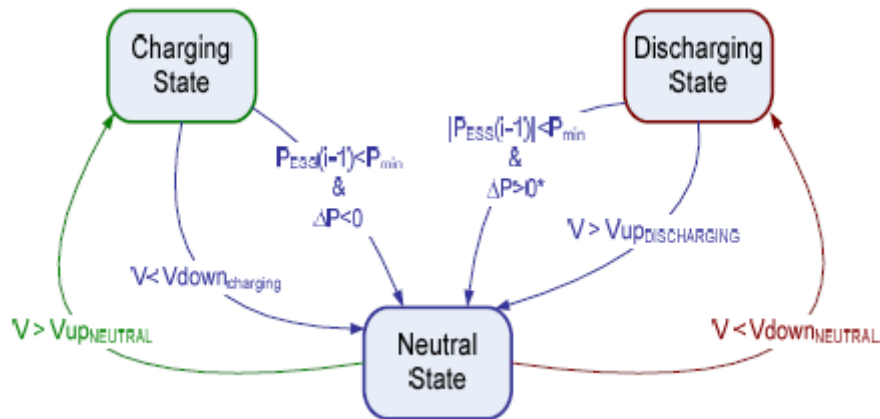
Ο βαθμός πολυπλοκότητας του αλγορίθμου ελέγχου αυξάνει καθώς υπεισέρχεται στο δίκτυο η επίδραση της λειτουργίας των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Για παράδειγμα, όταν η τάση της γραμμής ανιχνευθεί κάτω από την ονομαστική τιμή, V_0 , τότε μπορεί να ξεκινήσει η εκφόρτιση του υπερπυκνωτή. Ωστόσο, η παροχή ενέργειας στα οχήματα θα προκαλέσει αύξηση της τάσης στο σημείο σύνδεσης της συσκευής με το δίκτυο. Με άλλα λόγια, η διαχείριση της ισχύος δεν μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη μόνο την τιμή κάποιων μεταβλητών εισόδου, όπως τα επίπεδα της τάσης του δικτύου ή η κατάσταση φόρτισης της συσκευής, αλλά θα πρέπει να προσδιοριστούν μία σειρά από διακριτές καταστάσεις και κατόπιν να καθοριστούν και οι δυνατές μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων αυτών.

Επιπλέον, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ακόμα και μικρές μεταβολές στην τιμή των κατωφλίων της τάσης, χωρίς να παραβιάζουν όσα περιγράφονται στο Γράφημα 5.4, επιδρούν σημαντικά στην λειτουργία και κατ' επέκταση την συνολική αποδοτικότητα του αλγορίθμου ελέγχου. Στην παρούσα φάση, καταλήξαμε στις τελικές τιμές των κατωφλίων αυτών μέσα από εμπειρικές δοκιμές, καθώς η διεξοδική μελέτη των τιμών αυτών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου, δεν αποτελεί βασικό αντικείμενο της συγκεκριμένης μελέτης.

Το Γράφημα 5.5 παρουσιάζει τις τρεις διακριτές καταστάσεις μίας συσκευής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας: την κατάσταση φόρτισης, την ουδέτερη κατάσταση και την κατάσταση εκφόρτισης. Ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση, την τάση του δικτύου, την κατάσταση φόρτισης της συσκευής αλλά και την προηγούμενη τιμή της ισχύος που απορροφήθηκε ή τροφοδοτήθηκε, ο ελεγκτής θα καθορίσει την νέα τιμή της ισχύος που θα πρέπει να μεταβιβαστεί από ή προς το δίκτυο.

Το Γράφημα 5.3 παρουσιάζει τις βασικές ενέργειες που εκτελούνται από τον ελεγκτή σε καθεμία από τις τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Η βασική ιδέα έγκυται στην προσπάθεια

καθοδήγησης της ισχύος φόρτισης ή εκφόρτισης με σκοπό τη διατήρηση μία προκαθορισμένης τιμής τάσης στο δίκτυο.



Εικόνα 5.5 – Διάγραμμα Καταστάσεων της Συσκευής Αποθήκευσης

Όπως είναι λογικό, η τάση μετάβασης στην κατάσταση φόρτισης του υπερπυκνωτή, V_{CHARGE} , τίθεται σε υψηλότερο επίπεδο από την ονομαστική τάση του δικτύου, V_0 . Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουμε ότι η φόρτιση των συσκευών αποθήκευσης γίνεται από την ανατροφοδοτούμενη ενέργεια πέδησης των επιβραδυνόμενων τρένων. Σε διαφορετική περίπτωση, αν δηλαδή η τάση V_{CHARGE} ήταν χαμηλότερη της V_0 , τότε ουσιαστικά θα πετυχαίναμε την αποθήκευση ενέργειας προερχόμενης από τους υποσταθμούς τροφοδοσίας, γεγονός που προφανώς δεν είναι επιθυμητό. Όσο υψηλότερα τίθεται η τιμή της V_{CHARGE} , τόσο περιορίζεται η ενέργεια πέδησης που μπορούμε να αποθηκεύσουμε. Από την άλλη πλευρά, όμως, αν η τιμή της τάσης είναι σχετικά κοντά στην ονομαστική τάση του δικτύου, τότε η παραγόμενη ενέργεια από κάποιο κοντινό τρένο που βρίσκεται σε κατάσταση επιβράδυνσης θα αποθηκεύεται στις συσκευές αντί να χρησιμοποιείται απευθείας από κάποια επιταχυνόμενη αμαξοστοιχία, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος. Το εύρος των τιμών της V_{CHARGE} αποτυπώνεται στην παρακάτω σχέση:

$$V_0 \leq V_{CHARGE} < V_{REGENERATION_VEHICLES} \quad (5.3)$$

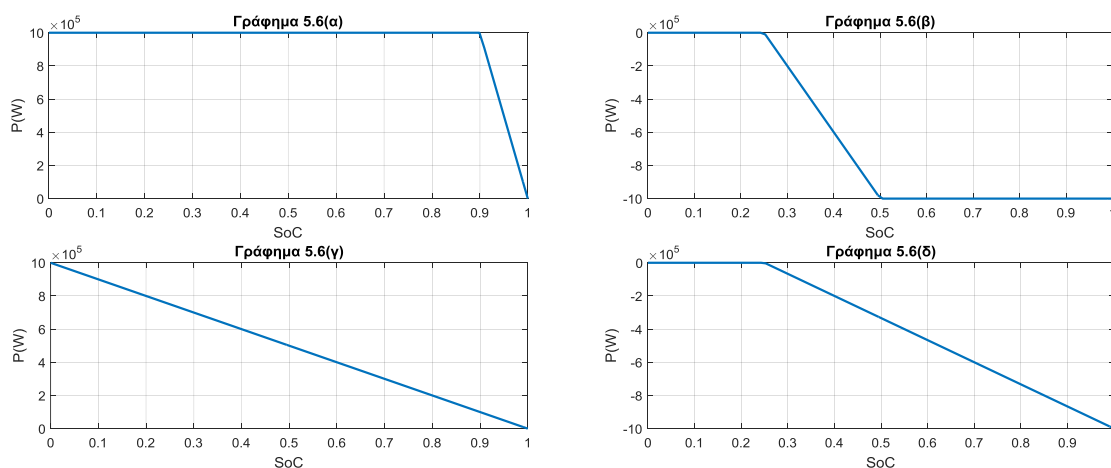
Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης του υπερπυκνωτή, επιχειρείται η διατήρηση της τάσης κοντά στα επίπεδα της τιμής $V_{DISCHARGE}$. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή αυτή, τόσο αυξάνει το ποσό της ενέργειας που η συσκευή θα καλείται να τροφοδοτήσει το δίκτυο. αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα, την ταχεία εκφόρτιση του υπερπυκνωτή, καθώς και την αύξηση των απωλειών εξαιτίας της δημιουργίας ρευμάτων μεγάλης τιμής. Φυσικά, ο μικρός χρόνος εκφόρτισης των συσκευών αποθήκευσης είναι κάτι επιθυμητό, καθώς με τον τρόπο αυτό η συσκευή θα διαθέτει την απαιτούμενη χωρητικότητα για τη δέσμευση της παραγόμενης ενέργειας πέδησης οποτεδήποτε της ζητηθεί [2].

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινίσουμε τα εξής:

- Στο διάγραμμα ροής (Γράφημα 5.3) τα blocks “Increase Charging Power” και “Decrease Charging Power” ακολουθούν τη γραφική παράσταση που απεικονίζεται στο Γράφημα 5.6(α).
- Στο διάγραμμα ροής (Γράφημα 5.3) τα blocks “Increase Discharging Power” και “Decrease Discharging Power” ακολουθούν τη γραφική παράσταση που απεικονίζεται στο Γράφημα 5.6(β).

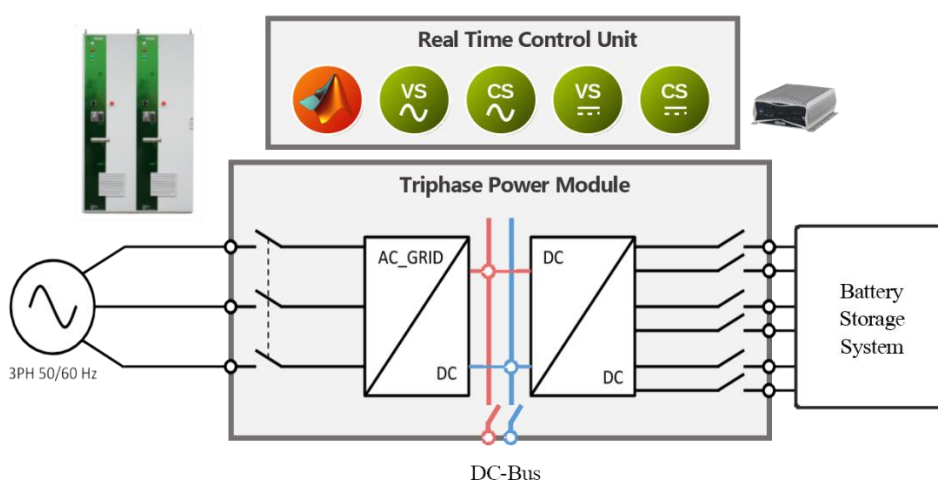
- Στο διάγραμμα ροής (Γράφημα 5.3) το block “Decrease Charging Power with SoC increase”, ακολουθεί τη γραφική παράσταση που απεικονίζεται στο Γράφημα 5.6(γ). Πρακτικά, στην περίπτωση αυτή, κατά την οποία η κατάσταση φόρτισης της συσκευής κυμαίνεται από το 90% έως και το 100%, επιθυμούμε την μείωση του ρυθμού αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό το πετυχαίνουμε επιλέγοντας μία γνησίως φθίνουσα καμπύλη SoC-P, η οποία, όμως, να είναι πάντοτε μικρότερη της αντίστοιχης καμπύλης του Γραφήματος 5.6(α).
- Στο διάγραμμα ροής (Γράφημα 5.3) το block “Decrease Discharging Power with SoC decrease”, ακολουθεί τη γραφική παράσταση που απεικονίζεται στο Γράφημα 5.6(δ). Κατ’ αναλογία με την προηγούμενη περίπτωση, επιθυμούμε την μείωση του ρυθμού τροφοδότησης ενέργειας στο δίκτυο, καθώς η κατάσταση φόρτισης του υπερπυκνωτή πλησιάζει το 0% και για το λόγο αυτό επιλέγουμε μία γνησίως φθίνουσα καμπύλη SoC-P, της οποίας η τιμή να είναι κατά απόλυτη τιμή μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της καμπύλης του Γραφήματος 5.6(β).
- Επιλέξαμε, συμβατικά, σαν θετική τη φορά του ρεύματος που εισέρχεται από το δίκτυο στη συσκευή αποθήκευσης ενέργειας. Κατά συνέπεια, η ισχύς φόρτισης είναι θετική, ενώ η ισχύς εκφόρτισης έχει αρνητικό πρόσημο.
- Θεωρήσαμε πως στην αρχή της προσομοίωσης οι συσκευές αποθήκευσης έχουν κατάσταση φόρτισης ίση με το 66,66%.

Το Γράφημα 5.4 παρουσιάζει μία επισκόπηση των ορίων τάσης που χρησιμοποιήσαμε στο συγκεκριμένο αλγόριθμο ελέγχου των συσκευών αποθήκευσης. Η περιοχή με την πράσινη σκίαση αναπαριστά το εύρος των τιμών τάσης στις οποίες πιθανόν η συσκευή αποθήκευσης να βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης. Αντίθετα, η περιοχή με την κόκκινη σκίαση καταδεικνύει το εύρος των τάσεων, όπου έχουμε την πιθανή εκφόρτιση των συσκευών. Ο λόγος για τον οποίο παρατηρείται επικάλυψη μεταξύ των δύο αυτών περιοχών, έγγυται στο γεγονός ότι όταν βρισκόμαστε σε κατάσταση φόρτισης, πρωταρχικός στόχος είναι η πλήρης φόρτιση του υπερπυκνωτή και κατά συνέπεια επεκτείνουμε τα όρια της περιοχής φόρτισης ακόμα και σε περιοχές λίγο κάτω από την ονομαστική τάση του δικτύου, V_0 , η οποία στην περίπτωση μας τίθεται ίση με 750 V. Με τον τρόπο αυτό, αποτρέπουμε τις συχνές εναλλαγές καταστάσεων, οι οποίες θα καθιστούσαν μη αποδοτική τη λειτουργία των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Ακριβώς για τον ίδιο λόγο, επεκτείνουμε τα όρια της περιοχής εκφόρτισης σε περιοχές πάνω από την ονομαστική τάση. Ωστόσο στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι η φόρτιση των υπερπυκνωτών συμβαίνει κατά κύριο λόγο κοντά στην τιμή V_{CHARGE} . Κατ’ αναλογία, η εκφόρτιση των υπερπυκνωτών γίνεται σε τιμές τάσης κοντά στην $V_{DISCHARGE}$.



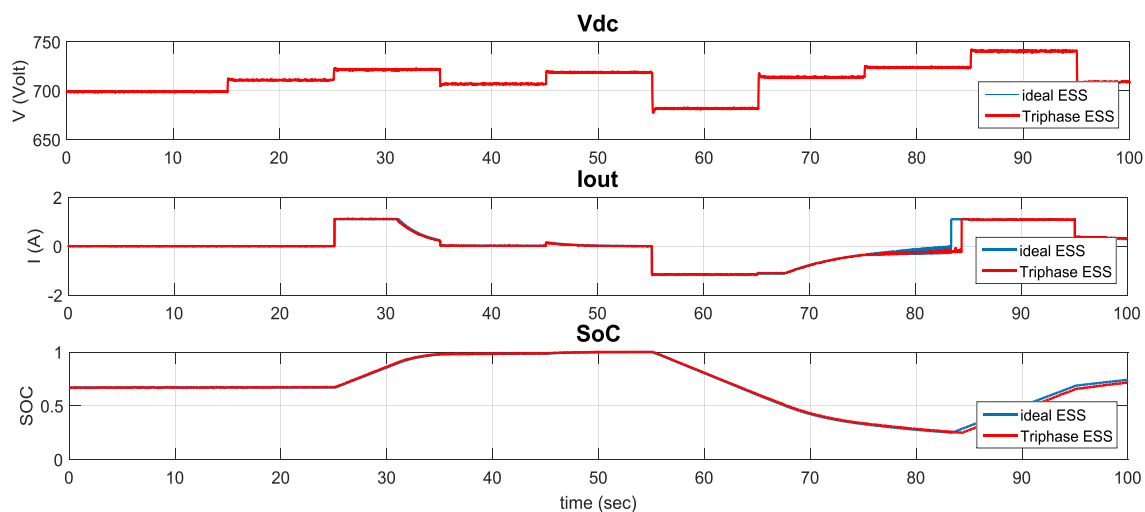
5.4 Πειραματική Εξακρίβωση Ορθότητας Αλγορίθμου Ελέγχου

Προκειμένου να επαληθεύσουμε ότι ο παραπάνω αλγόριθμος λειτουργεί ορθά, υλοποιούμε τη διάταξη της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιώντας την εφαρμογή Triphase. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελείται από μία συστοιχία μπαταριών. Οι μπαταρίες αυτές συνδέονται αρχικά με έναν DC/DC μετατροπέα, ο οποίος ελέγχεται από κατάλληλο λογισμικό, και στη συνέχεια τροφοδοτούνται από το 3Φ δίκτυο του εργαστηρίου, μέσω ενός AC/DC μετατροπέα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.8. Κατά συνέπεια, με την απαιτούμενη ρύθμιση του μετατροπέα DC/DC, μπορούμε να σχηματίσουμε την επιθυμητή τάση στην είσοδο των μπαταριών και στη συνέχεια υλοποιώντας τον επιθυμητό αλγόριθμο στο λογισμικό ελέγχου της εξόδου του Triphase, μπορούμε να εξακριβώσουμε αν οι μπαταρίες αποδίδουν στην έξοδό τους την επιθυμητή ισχύ.



Εικόνα 5.7 – Διάταξη Εφαρμογής Triphase

Στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, λοιπόν, θα εισάγουμε μία προκαθορισμένη κυματομορφή τάσης στην είσοδο της διάταξης των μπαταριών και θα καταγράψουμε το ρεύμα εξόδου καθώς επίσης και την κατάσταση φόρτισης (SoC) της συσκευής. Στη συνέχεια, θα εισάγουμε την ίδια ακριβώς διέγερση στο μοντέλο συσκευής αποθήκευσης ενέργειας που έχουμε υλοποιήσει σε περιβάλλον Matlab/Simulink και θα καταγράψουμε την εξέλιξη ακριβώς των ίδιων μεγεθών, ώστε τελικά να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.



Γράφημα 5.8 – Ρεύμα εξόδου και κατάσταση φόρτισης για βηματική τάση εισόδου

Όπως διαπιστώνουμε από το παραπάνω γράφημα παρατηρείται σχεδόν απόλυτη ταύτιση των μετρούμενων μεγεθών μεταξύ της διάταξης Triphase και του μοντέλου Matlab/Simulink. Συγκεκριμένα, όσο η τάση διατηρείται κάτω από την τιμή $V_{upNEUTRAL}$, που στην παρούσα φάση έχει τεθεί ίση με τα 720 V, η συσκευή παραμένει σε ουδέτερη κατάσταση και το ρεύμα στην έξοδο παραμένει μηδενικό, ενώ η κατάσταση φόρτισης διατηρείται σταθερή και ίση με την αρχική τιμή της, δηλαδή το 66%. Στη συνέχεια, ξεκινάει η φόρτιση της συσκευής με μέγιστο ρεύμα, μέχρι η κατάσταση φόρτισης να ξεπεράσει το 90%, οπότε στη συνέχεια το ρεύμα φόρτισης μειώνεται με την αύξηση της κατάστασης φόρτισης, μέχρι η δεύτερη να φτάσει το 100%, χρονική στιγμή που το ρεύμα μηδενίζεται. Έτσι, η συσκευή αποθήκευσης μεταβαίνει σε ουδέτερη κατάσταση και παραμένει σε αυτή όσο η τάση διατηρείται πάνω από την τιμή $V_{downNEUTRAL}$, δηλαδή τα 695 V για την περίπτωση μας. Όταν η τάση υποβιβαστεί κάτω από το κατώφλι των 695 V, τότε η συσκευή μεταβαίνει σε κατάσταση εκφόρτισης και το ρεύμα εκφόρτισης τίθεται στην μέγιστη τιμή του, για χρονικό διάστημα που η κατάσταση φόρτισης διατηρείται πάνω από το 25%. Όταν συμβεί αυτό, τότε το ρεύμα εκφόρτισης περιορίζεται (κατά απόλυτη τιμή) ανάλογα με τη μείωση της κατάστασης φόρτισης. Τη χρονική στιγμή που ανιχνεύεται στην είσοδο υψηλή τιμή τάσης ίση με 740 V, τότε εφόσον αυτό είναι πάνω από το κατώφλι $V_{upDISCHARGING}$ (730 V), η συσκευή μεταβαίνει σε ουδέτερη κατάσταση και ακαριαία μεταβαίνει σε κατάσταση φόρτισης καθώς η τάση εισόδου υπερβαίνει και το κατώφλι $V_{upNEUTRAL}$. Κατ' αυτόν τον τρόπο η συσκευή αποδίδει στην έξοδό της μέγιστο ρεύμα, τη στιγμή που η κατάσταση φόρτισής της είναι κάτω από το 90%.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος ελέγχου της συσκευής αποθήκευσης λειτουργεί ορθά τόσο σε συνθήκες προσομοίωσης, όσο και σε πραγματικές συνθήκες. Αυτό που μένει, λοιπόν, είναι να εξετάσουμε και την ενεργειακή αποδοτικότητα του, αντικείμενο με το οποίο θα ασχοληθούμε στις επόμενες παραγράφους. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειώσουμε, πως για τις ανάγκες της παραπάνω πειραματικής διαδικασίας και συγκεκριμένα εξαιτίας των περιορισμών τάσης και ρεύματος της διάταξης Triphase, επιλέξαμε διαφορετικά σημεία λειτουργίας της συσκευής αποθήκευσης (μέγιστο ρεύμα, όρια τάσης εισόδου), χωρίς βέβαια αυτό να αλλοιώνει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων

5.5 Διάταξη Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας

Εξαιτίας του γεγονότος ότι η κάθε μεμονωμένη συσκευή υπερπυκνωτή έχει χαμηλή τάση και μικρή πυκνότητα ενέργειας, είναι αναγκαίο να σχηματίσουμε συστοιχίες συνδεδεμένες σε σειρά, ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή τάση λειτουργίας. Στη συνέχεια, προκειμένου να δημιουργήσουμε την απαιτούμενη χωρητικότητα ενέργειας και ισχύος, παραλληλίζουμε κατάλληλο πλήθος των εν σειρά συστοιχιών υπερπυκνωτών.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήσαμε μία σειρά από διαφορετικά σενάρια, σε καθένα από τα οποία μεταβάλλαμε τη διάταξη αλλά και τη θέση των συσκευών αποθήκευσης, προκειμένου να ελέγξουμε την ορθότητα αλλά και αποδοτικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου ελέγχου. Συγκεκριμένα, σαν δομική μονάδα χρησιμοποιήσαμε τον υπερπυκνωτή Maxwell BCAP3000F, 2.7V, στις εξής δύο διατάξεις:

- α. 15 παράλληλες συστοιχίες, η καθεμία από τις οποίες αποτελείται από 232 εν σειρά συνδεδεμένες στοιχειώδεις μονάδες υπερπυκνωτών. Η συνολική χωρητικότητα της διάταξης ανέρχεται στα 195 F περίπου, ενώ η μέγιστη τάση φτάνει τα 625 V.

- β. 1 συστοιχία αποτελούμενη από 203 εν σειρά συνδεδεμένες στοιχειώδεις μονάδες υπερπυκνωτών. Η συνολική χωρητικότητα της διάταξης ανέρχεται στα 15 F περίπου, ενώ η μέγιστη τάση φτάνει τα 550 V.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος για τον οποίο η μέγιστη τάση κάθε διάταξης συσκευής αποθήκευσης είναι μικρότερη από την τάση κενού φορτίου του δικτύου, που στην περίπτωση μας ανέρχεται στα 750 V, είναι για τη διευκόλυνση του σχεδιασμού του μετατροπέα DC/DC. Επιπλέον, για λόγους απλότητας θεωρήσαμε ότι στο υπό εξέταση χρονικό παράθυρο, στην γραμμή κινείται μία μόνο αμαξοστοιχία ανά κατεύθυνση ($headway = 1500sec$).

Τέλος, όσον αφορά τη θέση των συσκευών αποθήκευσης διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

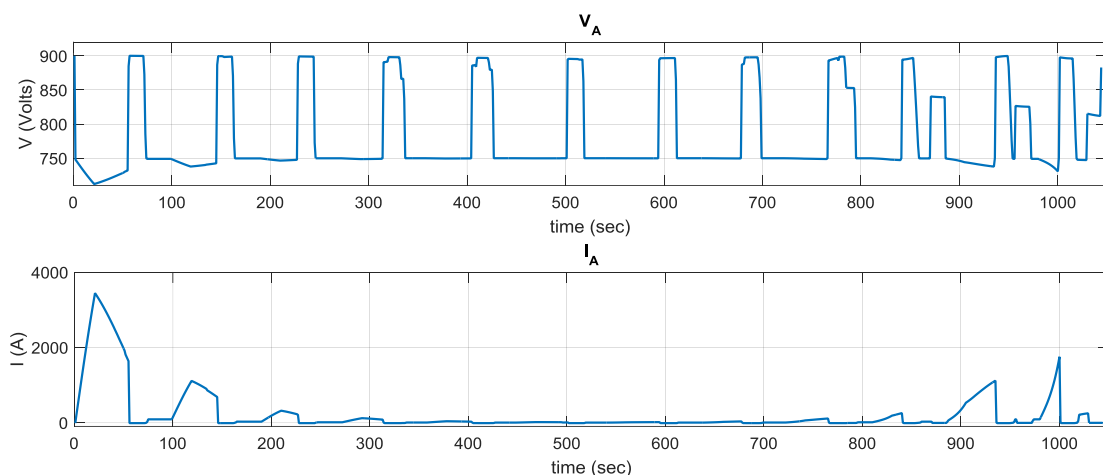
1. Μία συσκευή αποθήκευσης διάταξης (α), τοποθετημένη στον σταθμό A (αρχή της διαδρομής). Η συνολική χωρητικότητα του σεναρίου αυτού ανέρχεται στα 195 F.
2. Μία συσκευή αποθήκευσης διάταξης (α), τοποθετημένη στον σταθμό G (μέσο της διαδρομής). Η συνολική χωρητικότητα του σεναρίου αυτού ανέρχεται στα 195 F.
3. Μία συσκευή αποθήκευσης διάταξης (α), τοποθετημένη στον σταθμό M (τέλος της διαδρομής). Η συνολική χωρητικότητα του σεναρίου αυτού ανέρχεται στα 195 F.
4. 13 συσκευές αποθήκευσης διάταξης (β), τοποθετημένες μία σε κάθε σταθμό της διαδρομής. Η συνολική χωρητικότητα του σεναρίου αυτού ανέρχεται στα 195 F.

5.6 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Για κάθε ένα από τα παραπάνω τέσσερα σενάρια διεξήγαμε την προσομοίωση σε περιβάλλον Matlab/Simulink και παρατηρήσαμε τη διακύμανση των εξής μεγεθών:

- α. Τάση υποσταθμού σύνδεσης συσκευής (ή συσκευών) αποθήκευσης ενέργειας,
- β. Ρεύμα υποσταθμού σύνδεσης συσκευής (ή συσκευών) αποθήκευσης ενέργειας,
- γ. Συνολική κατανάλωση ενέργειας υποσταθμών (MWh).
- δ. Συνολική κατανάλωση ενέργειας τρένων (MWh).

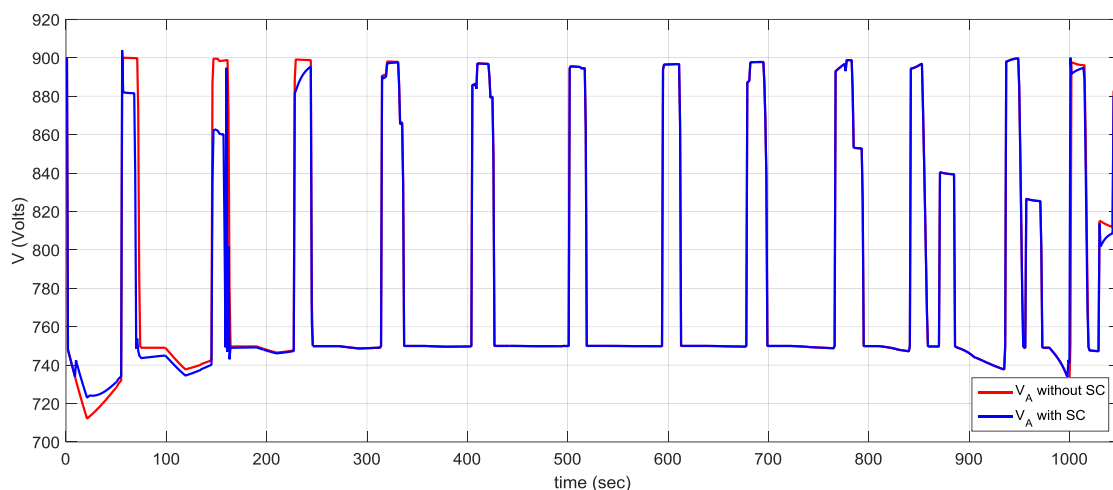
Αρχικά, για λόγους πληρότητας και καλύτερης κατανόησης θα παραβάλουμε τη γραφική παράσταση της τάσης και του ρεύματος του υποσταθμού A, χωρίς την τοποθέτηση καμίας συσκευής αποθήκευσης στο δίκτυο, όπως φαίνεται στο Γράφημα 5.5.



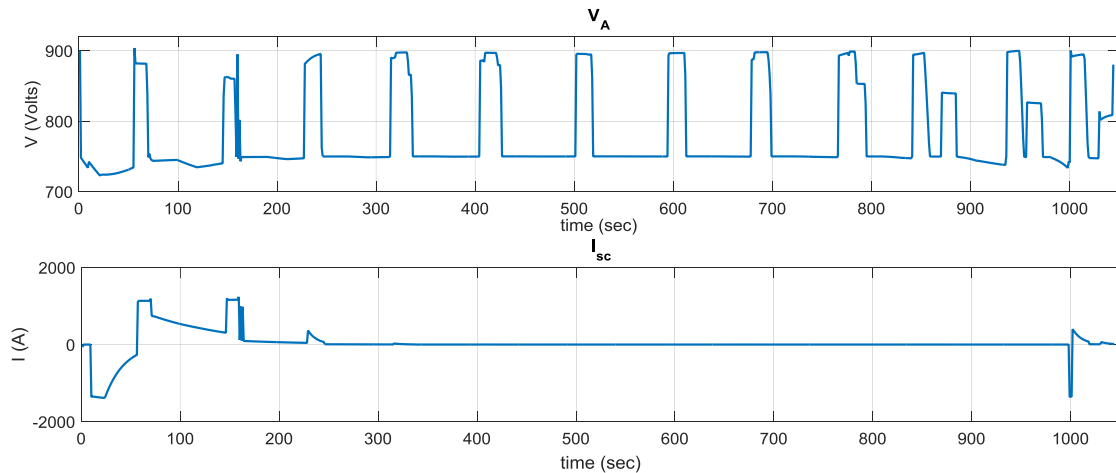
Γράφημα 5.9 – Τάση και Ρεύμα υποσταθμού A, χωρίς την προσθήκη συσκευής αποθήκευσης ενέργειας

Από το παραπάνω γράφημα παρατηρούμε ότι όταν οι αμαξοστοιχίες (μία ανά κατεύθυνση) ξεκινούν από τον σταθμό A και σταθμό M, αντίστοιχα, τότε παρατηρείται πτώση τάσης στο δίκτυο, καθώς τα τρένα επιταχύνουν με αποτέλεσμα να αντλούν ένα αρκετά υψηλό ρεύμα από το δίκτυο, όπως φαίνεται και στη γραφική παράσταση του ρεύματος. Στη συνέχεια, όταν το κάθε τρένο πλησιάζει κάποιο σταθμό, επιβραδύνει, με αποτέλεσμα να επιστρέφει ενέργεια στο δίκτυο και να αυξάνεται απότομα η τάση του δικτύου. Το γεγονός ότι μετά την απομάκρυνση του τρένου από τον σταθμό A, η τάση του υποσταθμού A παραμένει σταθερή κατά την επιτάχυνση του τρένου, οφείλεται στο σχεδιασμό του δικτύου και συγκεκριμένα στην ύπαρξη υποσταθμού τροφοδοσίας σε κάθε σταθμό της γραμμής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η αμαξοστοιχία να αντλεί την απαιτούμενη ενέργεια κατά κύριο λόγο από τον κοντινότερο υποσταθμό. Από την άλλη πλευρά, η περίσσεια ενέργεια κατά την επιβράδυνση του τρένου δεν μπορεί να διοχετευθεί πουθενά, τη στιγμή μάλιστα που στο δίκτυο δεν υφίστανται συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, παρά μόνο να καταναλωθεί εν μέρει στους ροοστάτες πέδησης, με αποτέλεσμα η ανόρθωση της τάσης να είναι καθολική στο σύνολο του δικτύου και να έχει μεγαλύτερη οξύτητα σε σχέση με την πτώση τάσης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι, προς το πέρας της προσομοίωσης και συγκεκριμένα μετά τη χρονική στιγμή $t = 800\text{sec}$ περίπου, η εμφάνιση διπλής κορυφής τάσης οφείλεται στο γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ των σταθμών δεν είναι σταθερή, με αποτέλεσμα η διαφορά αυτή να αποσυγχρονίζει την κίνηση των δύο τρένων, δηλαδή η επιτάχυνση/επιβράδυνση του ενός να μην συμπίπτει χρονικά με την επιτάχυνση/επιβράδυνση του άλλου. Επιπλέον, η πτώση τάσης που παρατηρείται στον υποσταθμό A, οφείλεται στο γεγονός ότι το τρένο που κινείται αντίστροφα να πλησιάζει τον σταθμό A και κατά συνέπεια, να αντλεί ενέργεια κατά την επιτάχυνσή του από τον υποσταθμό A.

Σενάριο 1^ο: Συσκευή αποθήκευσης τύπου (α), συνδεδεμένη στον σταθμό A



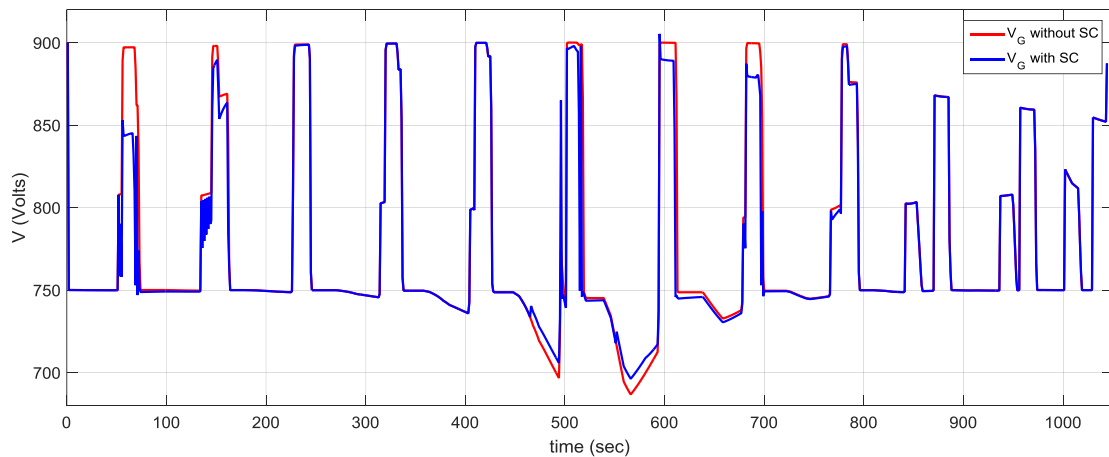
Γράφημα 5.10 – Τάση Υποσταθμού Α



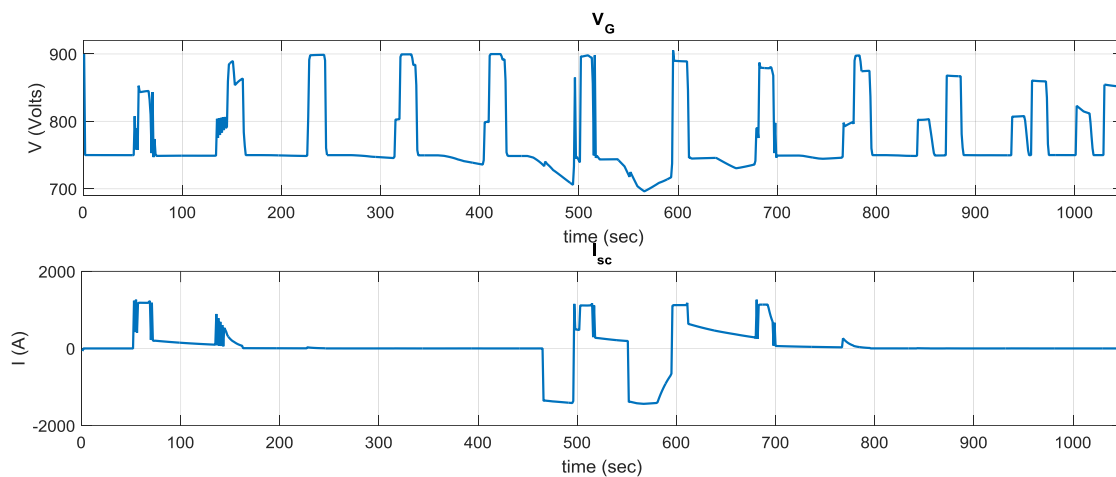
Γράφημα 5.11 – Τάση-Ρεύμα Συσσκευής Αποθήκευσης στον Υποσταθμό Α

Με βάση το Γράφημα 5.6, παρατηρούμε ότι η σύνδεση της συσκευής αποθήκευσης έχει σαν αποτέλεσμα τον «ψαλιδισμό» των ακραίων τιμών τάσης. Το γεγονός ότι η επίδραση της συσκευής περιορίζεται κατά τους δύο πρώτους κύκλους κίνησης της αμαξοστοιχίας, οφείλεται στην χωρητικότητα της συγκεκριμένης διάταξής. Πιο συγκεκριμένα, τη χρονική στιγμή $t = 0 \text{ sec}$ η αμαξοστοιχία επιταχύνεται με αποτέλεσμα να αντλεί ενέργεια από το δίκτυο (στον υποσταθμό Α επιδρά, όσον αφορά την επιτάχυνσή της, μόνο η αμαξοστοιχία που κινείται από τον σταθμό Α προς στον σταθμό Μ). Την ίδια στιγμή η συσκευή αποθήκευσης, ανιχνεύοντας την πτώση τάσης στη γραμμή, τροφοδοτεί ρεύμα στην αμαξοστοιχία με αποτέλεσμα να αποτρέπει την περαιτέρω πτώση τάσης στη γραμμή μεταφοράς, όπως φαίνεται και στο Γράφημα 5.7. Στη συνέχεια, κατά τη χρονική στιγμή $t = 50 \text{ sec}$, οπότε ξεκινάει η πέδηση των δύο τρένων, η συσκευή αντλεί ρεύμα από το δίκτυο, ώστε να περιορίσει την ανύψωση τάσης. Κατόπιν και μέχρι τη χρονική στιγμή $t = 145 \text{ sec}$, συνεχίζει να αντλεί ρεύμα από το δίκτυο, καθώς η τάση διατηρείται πάνω από την τιμή $V_{downCharging} = 720V$, το οποίο όμως συνεχώς μειώνεται, καθώς βρισκόμαστε στον κλάδο “Decrease Charging Power with SoC increase” του διαγράμματος ροής (Γράφημα 5.3). Στη συνέχεια, ανιχνεύει εκ νέου πολύ υψηλή τιμή τάσης, λόγω της ταυτόχρονης πέδησης των δύο τρένων, και επιχειρεί να αντλήσει υψηλότερο ρεύμα, όμως εξαιτίας του γεγονότος ότι βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης που αγγίζει το 100%, αδυνατεί να απορροφήσει επιπλέον ρεύμα με αποτέλεσμα από τη χρονική στιγμή αυτή και έπειτα πρακτικά να μην επιδρά άλλο στο δίκτυο. Η συσκευή τίθεται εκ νέου «σε λειτουργία» όταν κατά τη χρονική στιγμή $t = 800 \text{ sec}$, το τρένο που κινείται αντίστροφα πλησιάζει τον σταθμό Α, οπότε κατά την επιτάχυνσή του αντλεί ενέργεια από τον υποσταθμό Α και κατ’ επέκταση μέρος της ζητούμενης ενέργειας καλύπτεται από τη συσκευή αποθήκευσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η κατάσταση φόρτισης της συσκευής και κατά συνέπεια, να δύναται να απορροφήσει μέρος της ενέργειας πέδησης.

Σενάριο 2^ο: Συσκευή αποθήκευσης τύπου (α), συνδεδεμένη στον σταθμό G



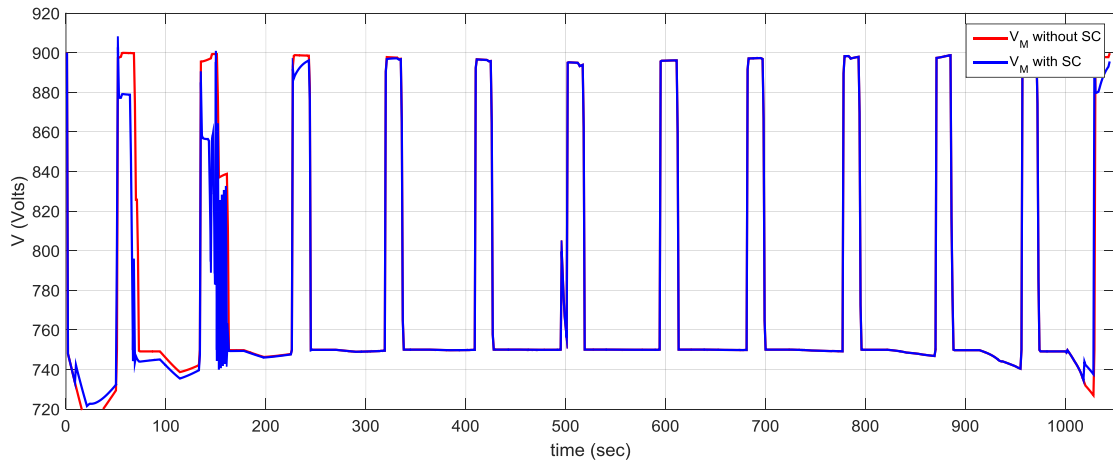
Γράφημα 5.12 - Τάση Υποσταθμού G



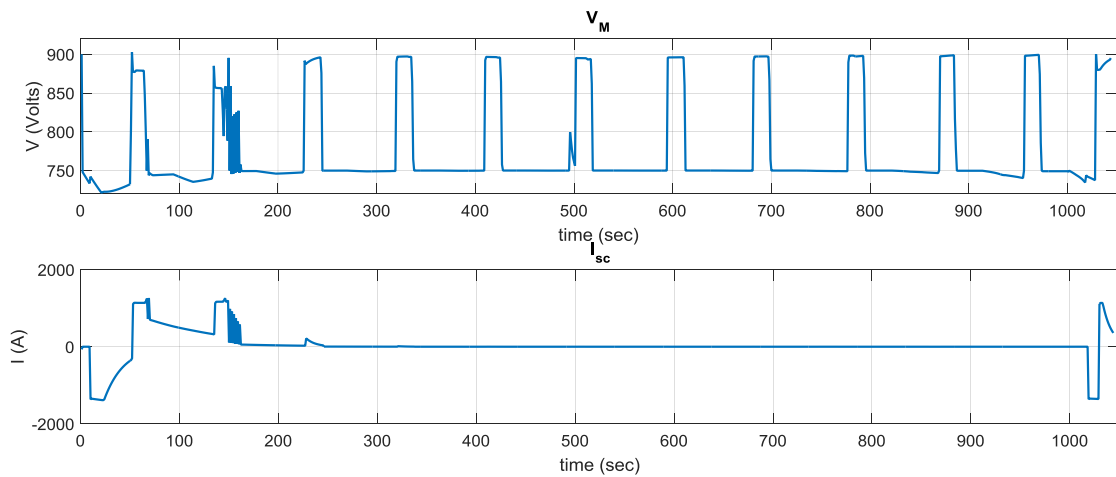
Γράφημα 5.13 - Τάση-Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης στον Υποσταθμό G

Η περίπτωση αυτή παρουσιάζει πολλά κοινά με το 1^ο σενάριο, καθώς η συσκευή αποθήκευσης αρχικά απορροφά ενέργεια κατά τους δύο πρώτους κύκλους κίνησης των τρένων και στην συνέχεια τίθεται εκτός λειτουργίας, γιατί αγγίζει 100% πληρότητα φόρτισης. Η βασική διαφορά έγκυται στο γεγονός ότι οι δύο αμαξοστοιχίες φτάνουν σχεδόν ταυτόχρονα στο σταθμό G, καθώς αυτός αποτελεί το μέσο της διαδρομής, με αποτέλεσμα η συσκευή αποθήκευσης, που τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή βρίσκεται μάλιστα σε 100% κατάσταση φόρτισης, να τροφοδοτεί τις αμαξοστοιχίες με αρκετά υψηλό ρεύμα. Με τον τρόπο αυτό εκφορτίζεται ταχύτατα και στη συνέχεια μπορεί να δεσμεύσει εκ νέου αρκετά υψηλό ποσό ενέργειας κατά την πέδηση των τρένων. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι τοποθετώντας τη συσκευή αποθήκευσης ενέργειας στο μέσο της διαδρομής αυξάνεται η αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Σενάριο 3^ο: Συσκευή αποθήκευσης τύπου (α), συνδεδεμένη στον σταθμό Μ



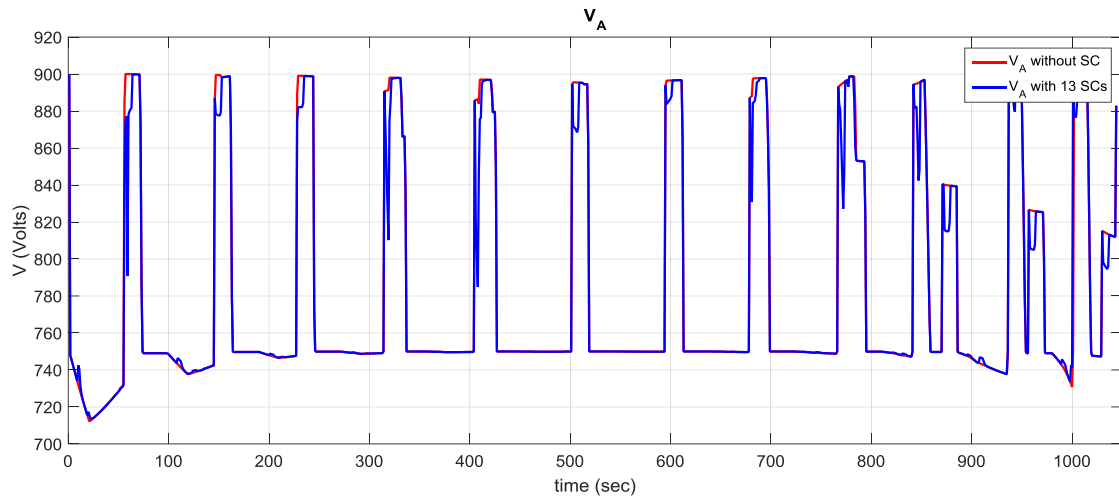
Γράφημα 5.14 – Τάση Υποσταθμού Μ



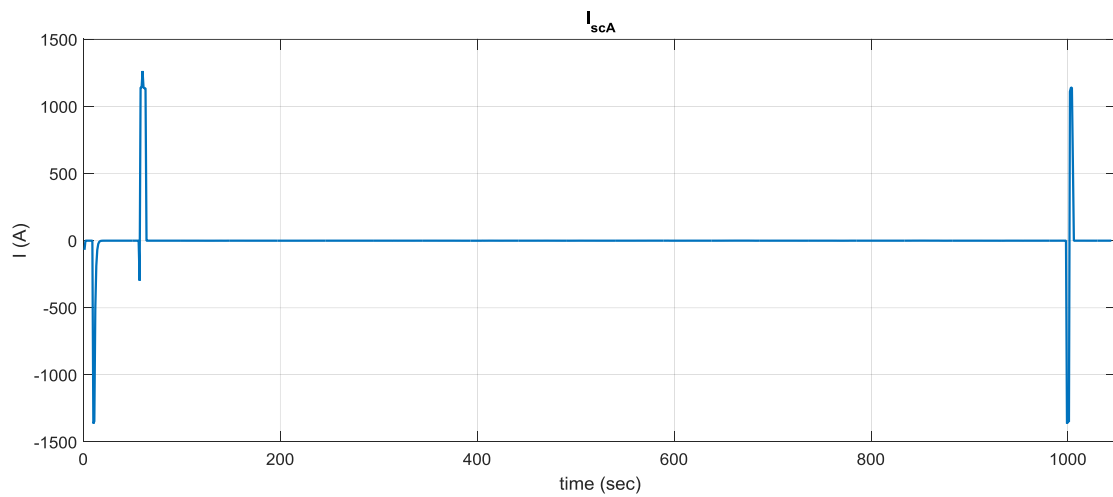
Γράφημα 5.15 - Τάση-Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης στον Υποσταθμό Μ

Το σενάριο αυτό αποτελεί πρακτικά το συμμετρικό του 1^{ου} Σεναρίου και κατά συνέπεια τα γραφήματα δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διαφορές. Σε γενικές γραμμές, λοιπόν, καταλήγουμε στα ίδια συμπεράσματα με την 1^η περίπτωση.

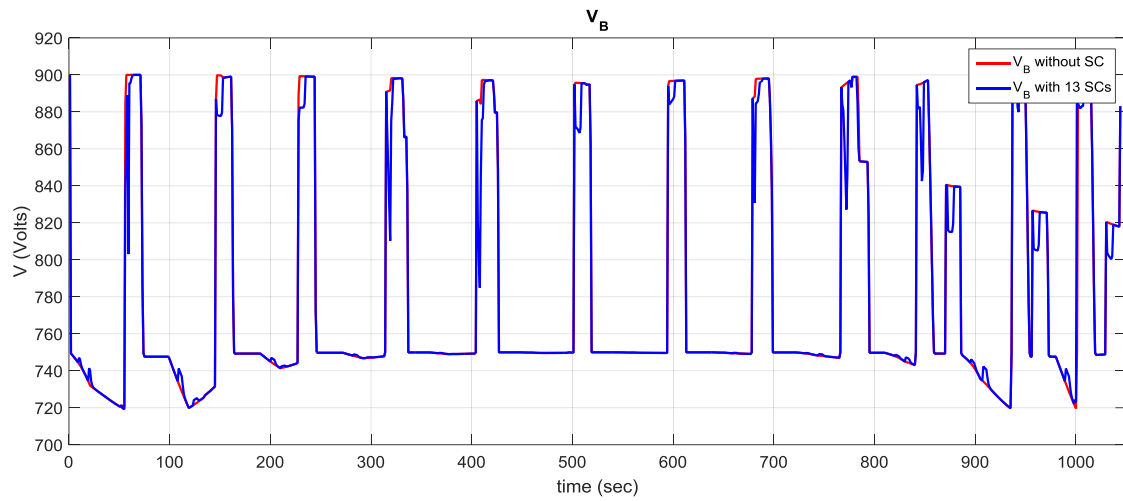
Σενάριο 4^ο: 13 συσκευές αποθήκευσης τύπου (β), συνδεδεμένες μία σε κάθε σταθμό



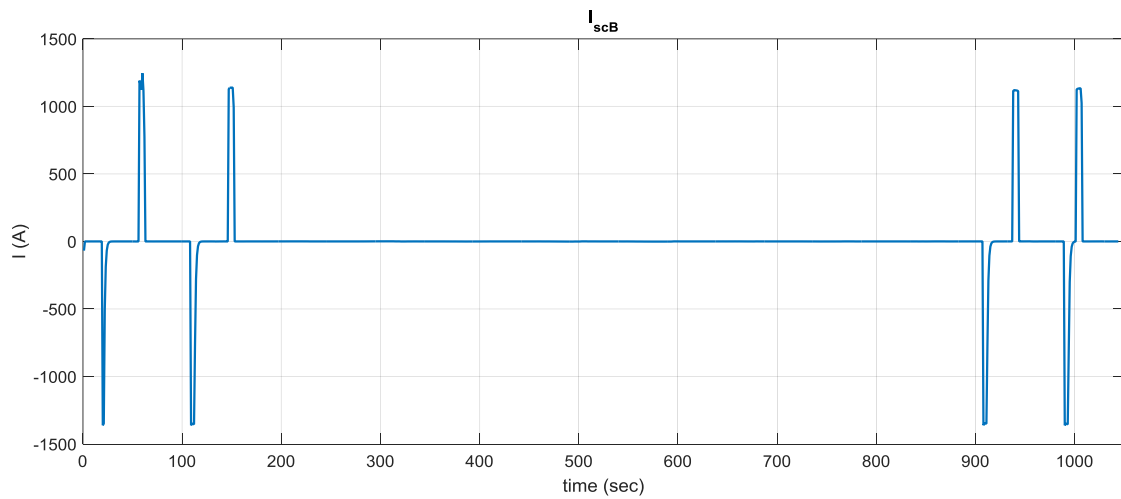
Γράφημα 5.16 – Τάση Υποσταθμού Α



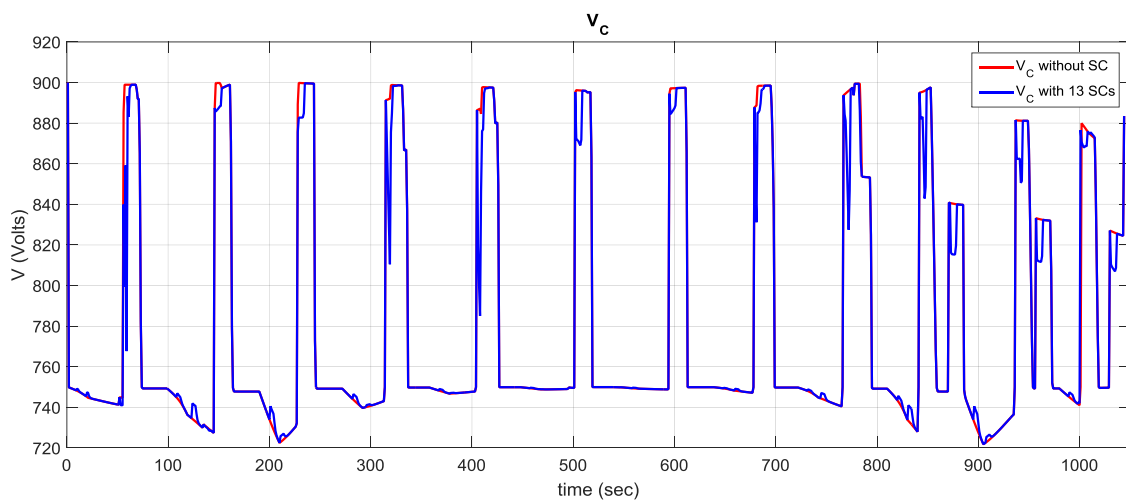
Γράφημα 5.17 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού Α



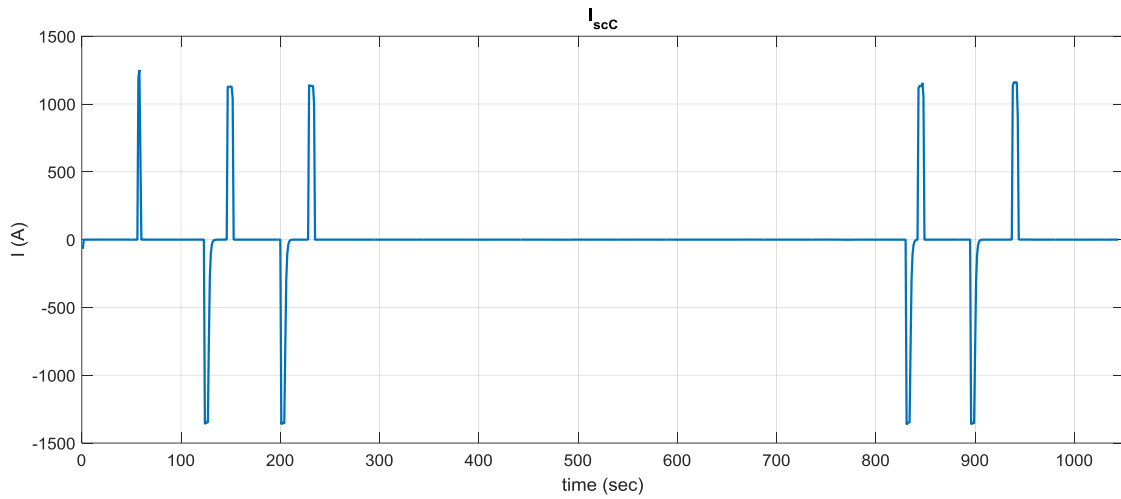
Γράφημα 5.18 – Τάση Υποσταθμού Β



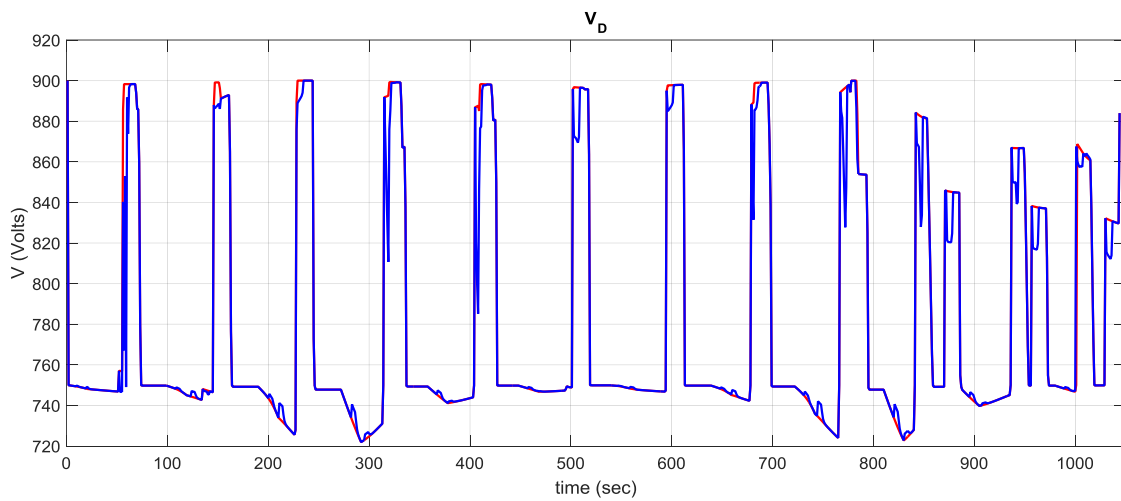
Γράφημα 5.19 – Ρεύμα Συσσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού Β



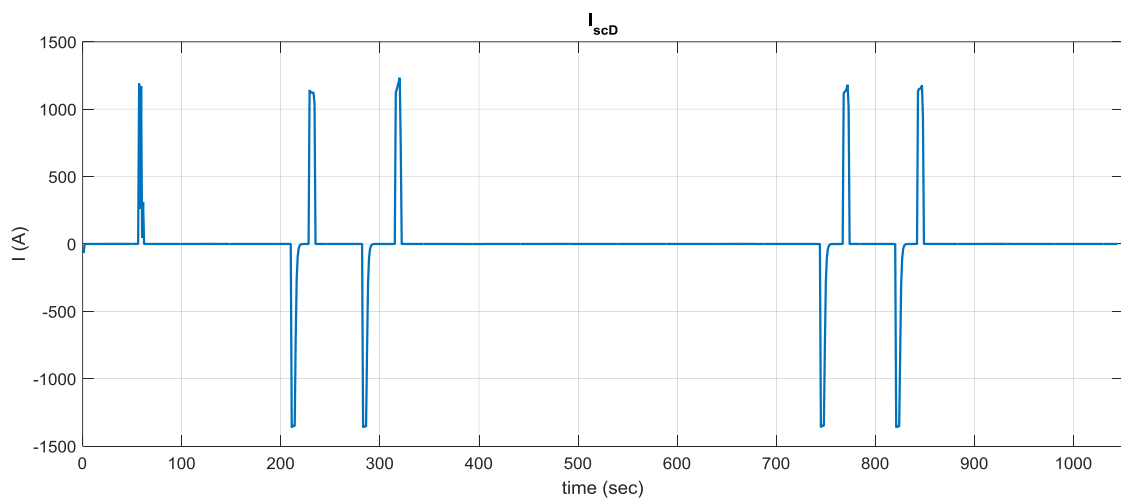
Γράφημα 5.20 – Τάση Υποσταθμού C



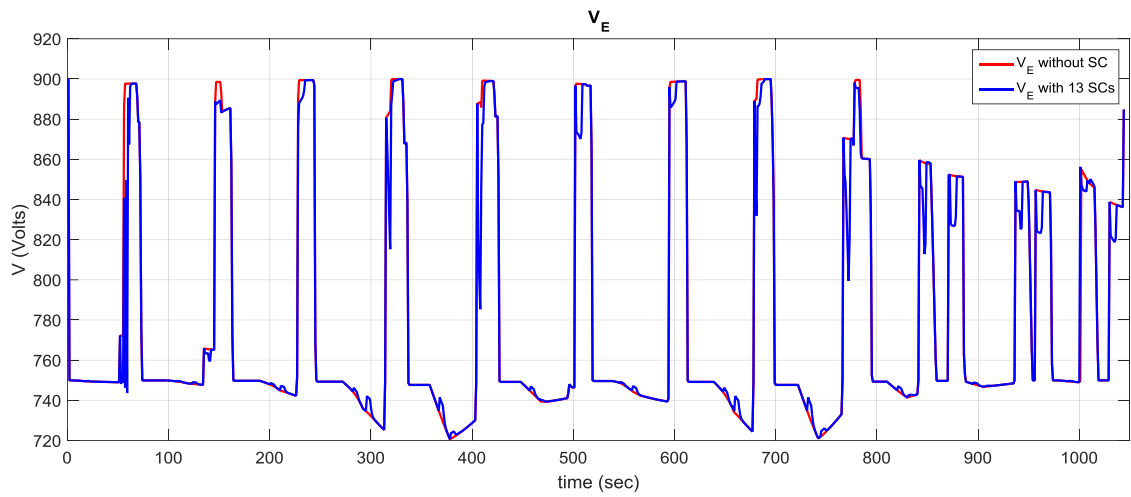
Γράφημα 5.21 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού C



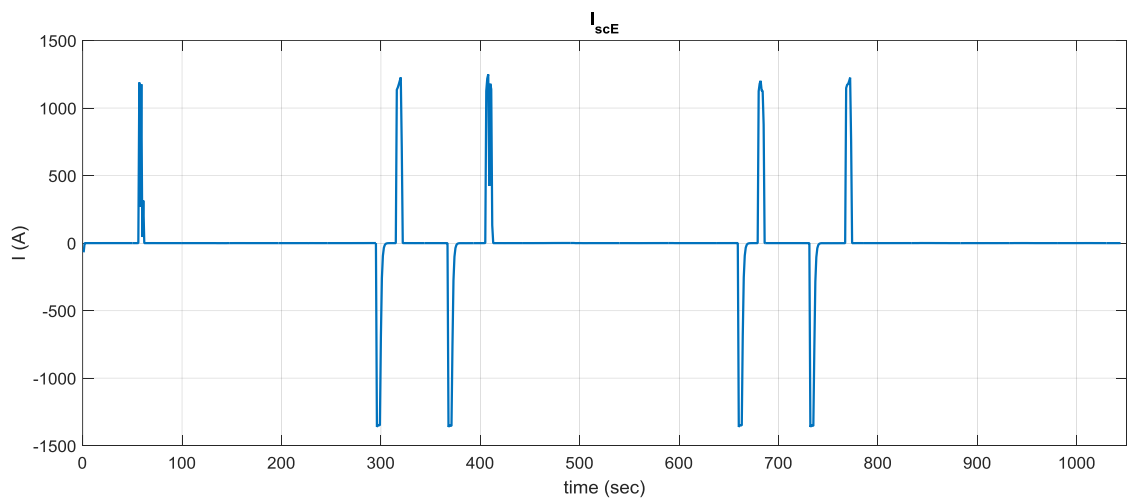
Γράφημα 5.22 – Τάση Υποσταθμού D



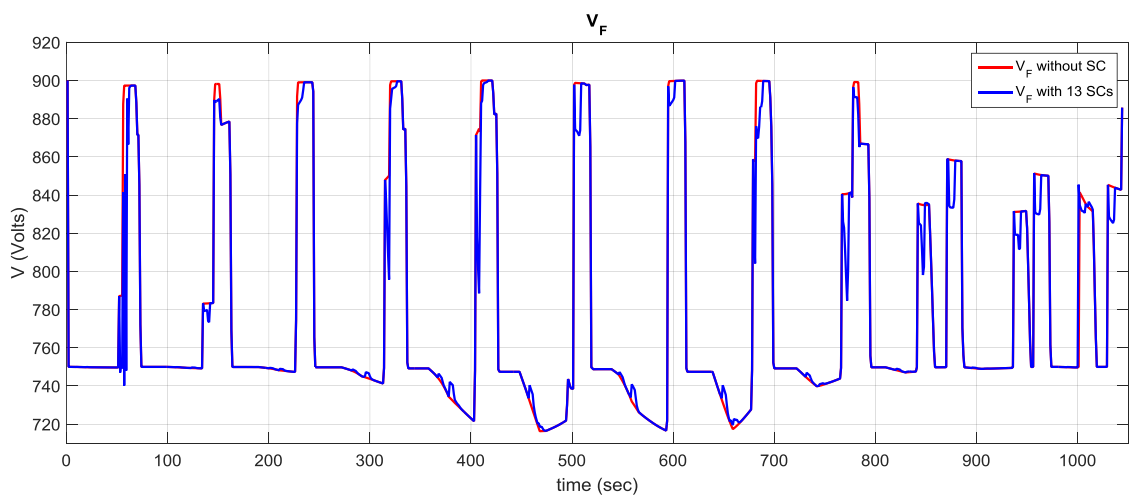
Γράφημα 5.23 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού D



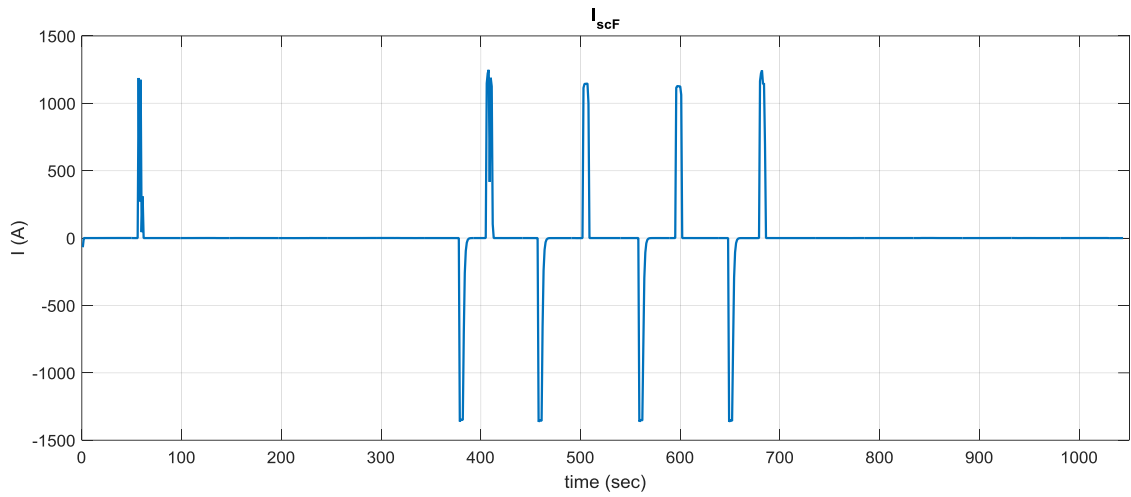
Γράφημα 5.24 – Τάση Υποσταθμού Ε



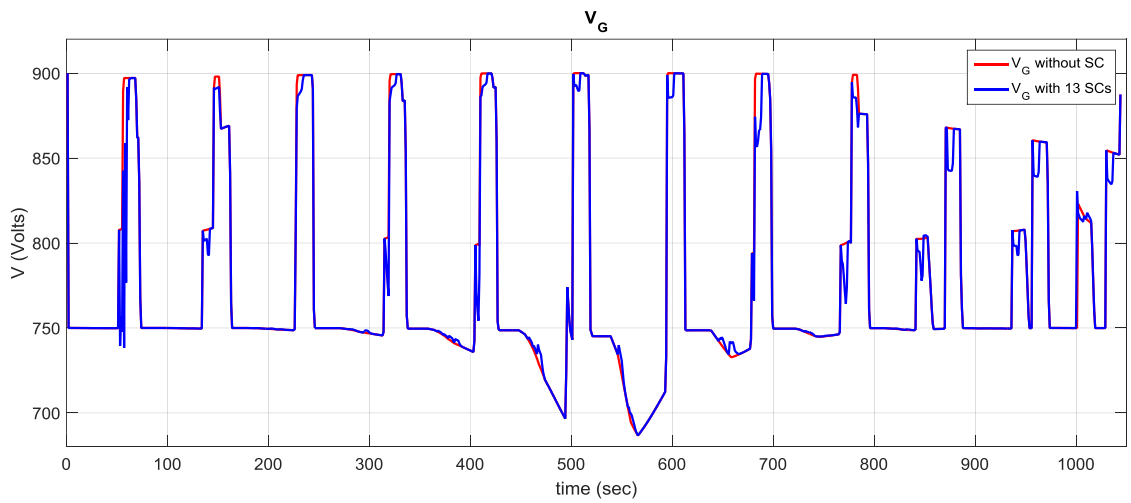
Γράφημα 5.25 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού Ε



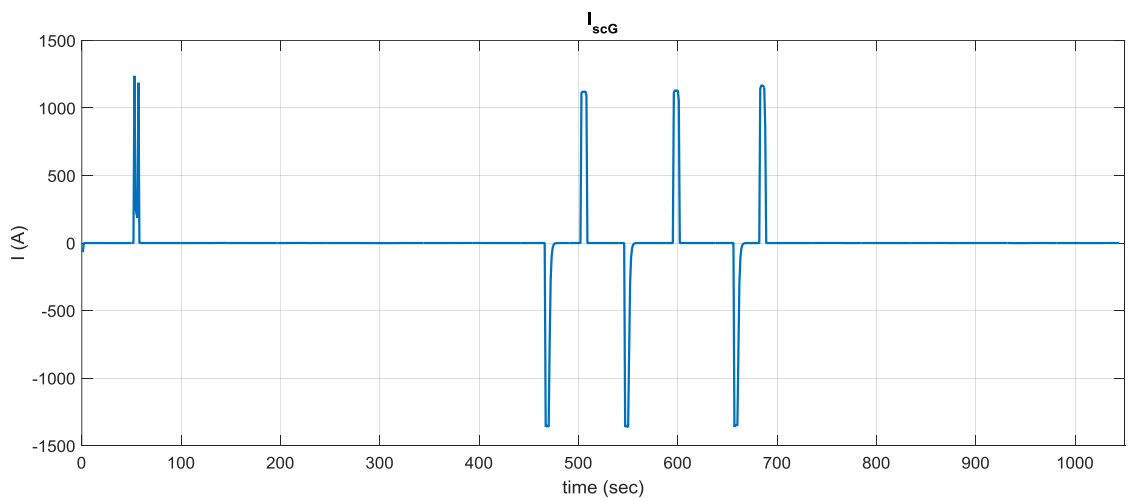
Γράφημα 5.26 – Τάση Υποσταθμού F



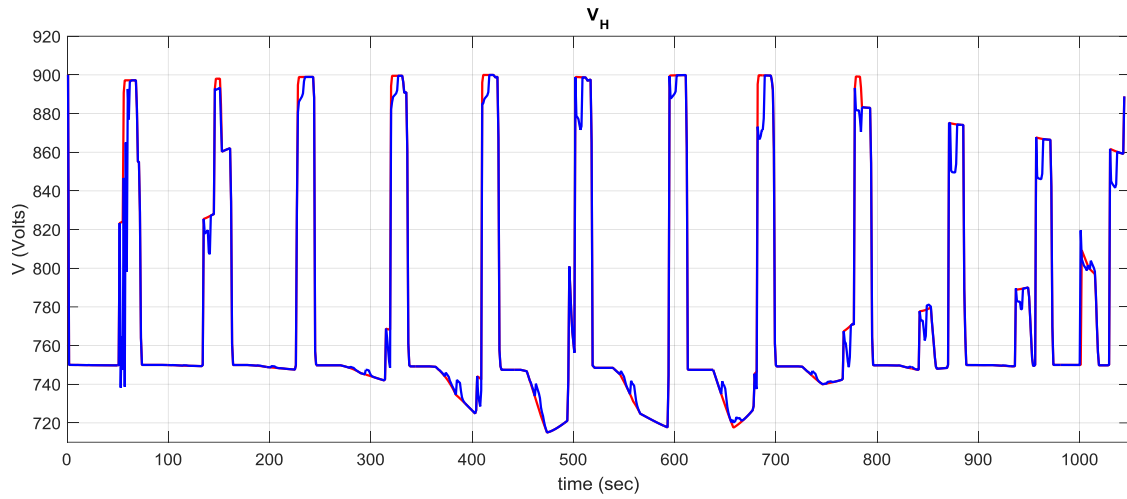
Γράφημα 5.27 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού F



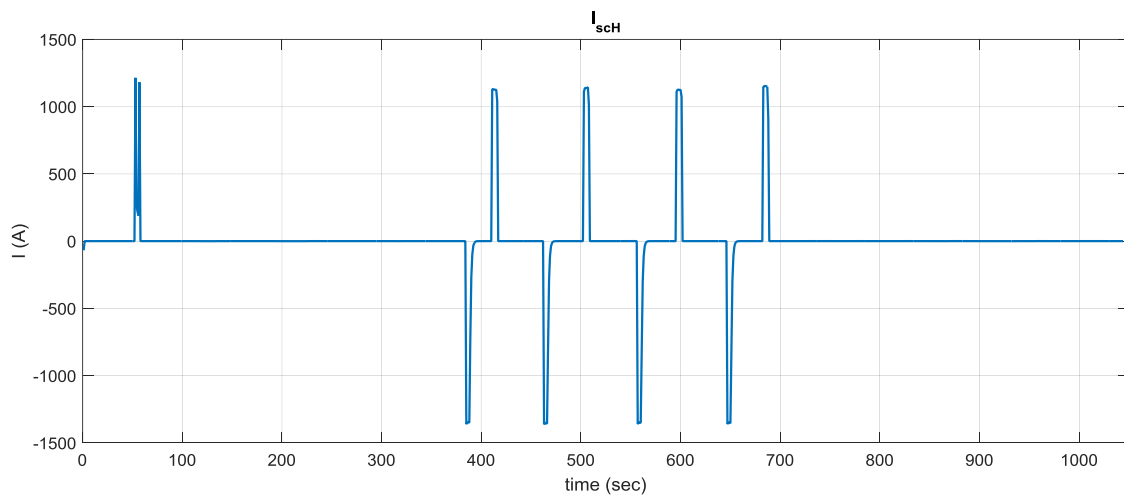
Γράφημα 5.28 – Τάση Υποσταθμού G



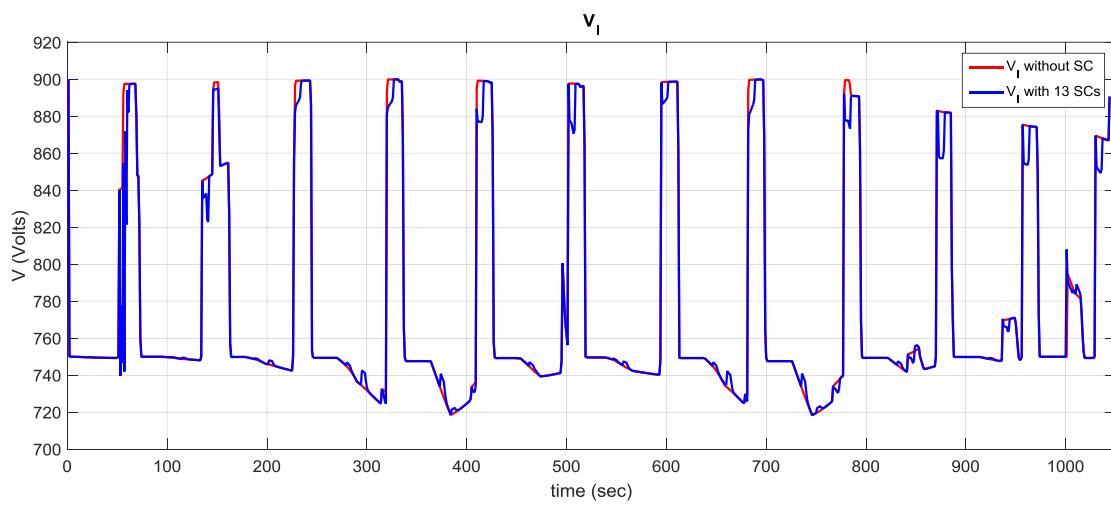
Γράφημα 5.29 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού G



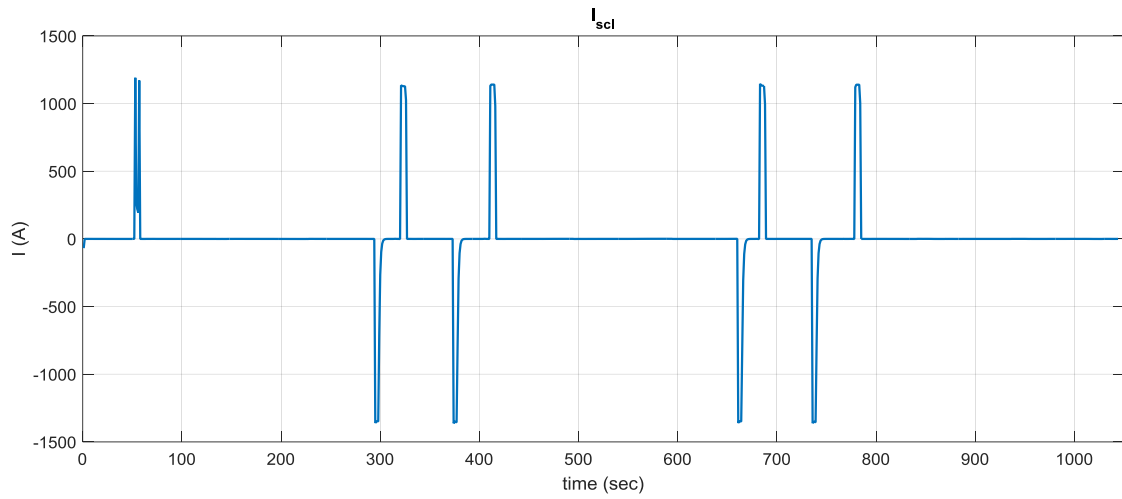
Γράφημα 5.30 – Τάση Υποσταθμού Η



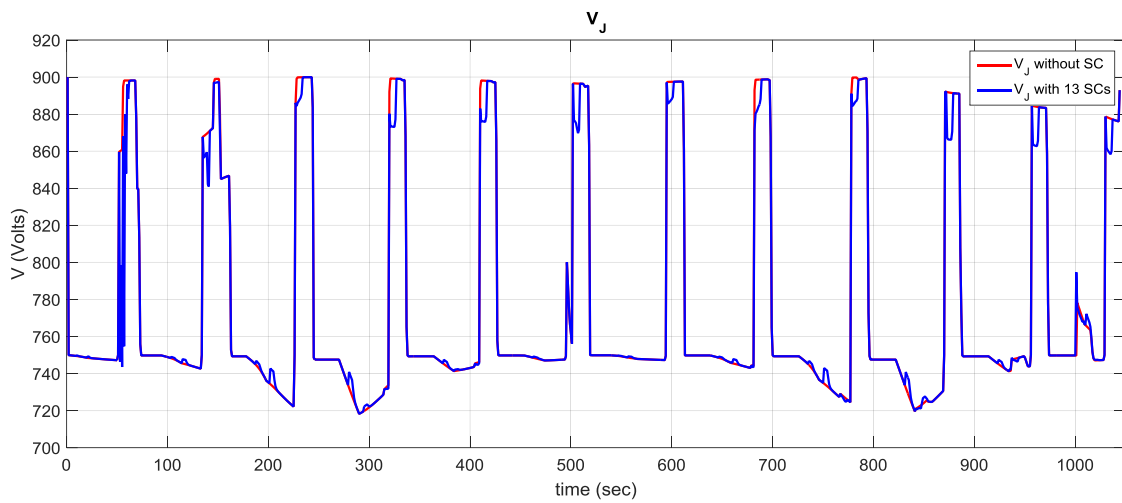
Γράφημα 5.31 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού Η



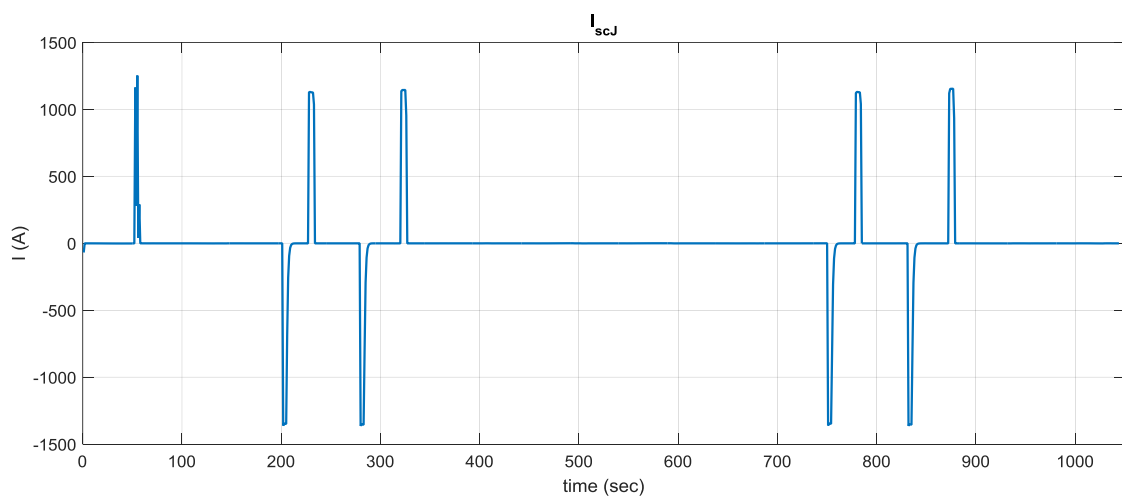
Γράφημα 5.32 – Τάση Υποσταθμού Ι



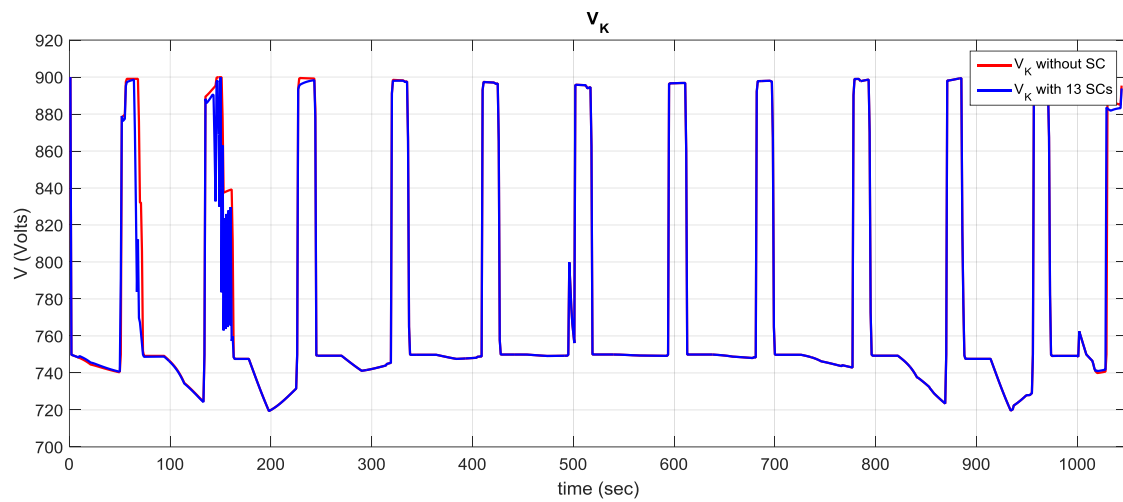
Γράφημα 5.33 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού I



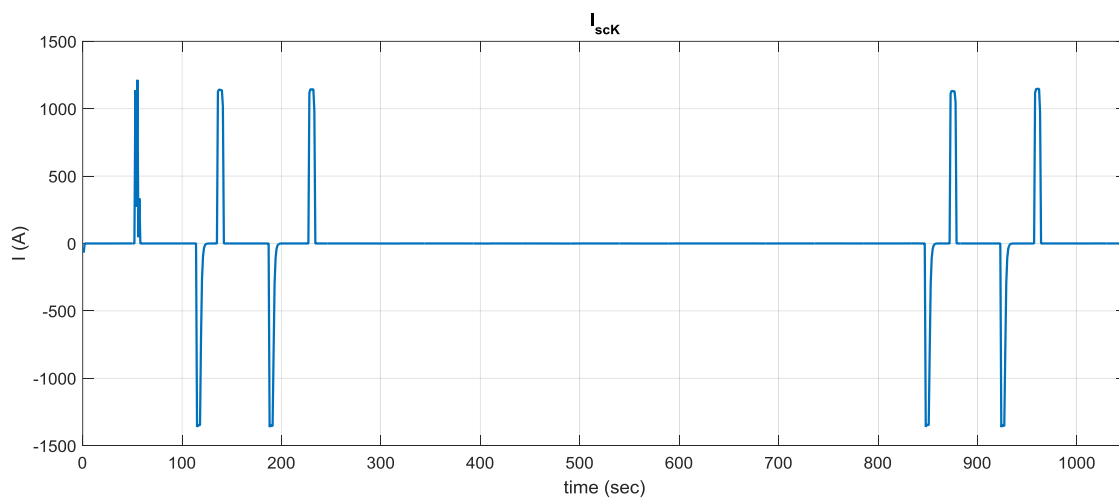
Γράφημα 5.34 – Τάση Υποσταθμού J



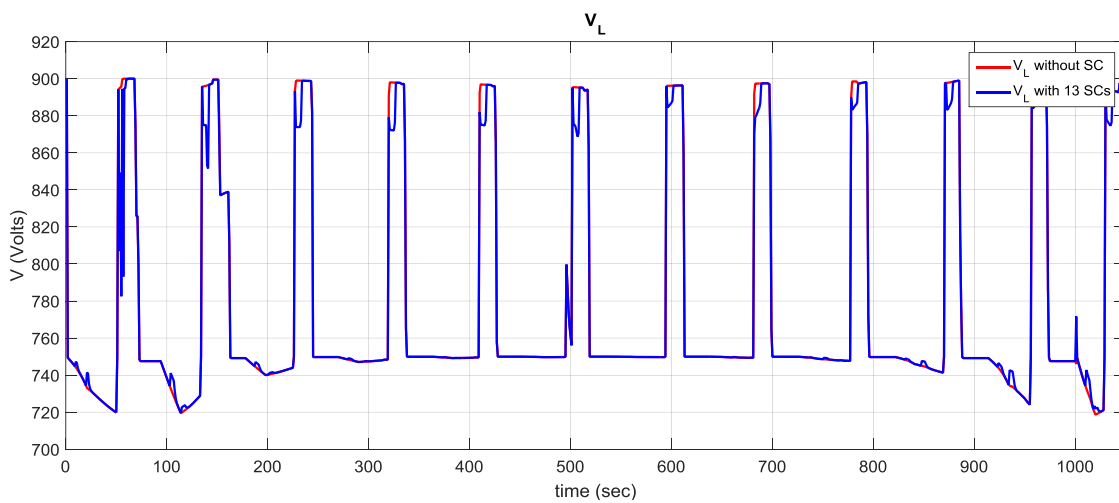
Γράφημα 5.35 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού J



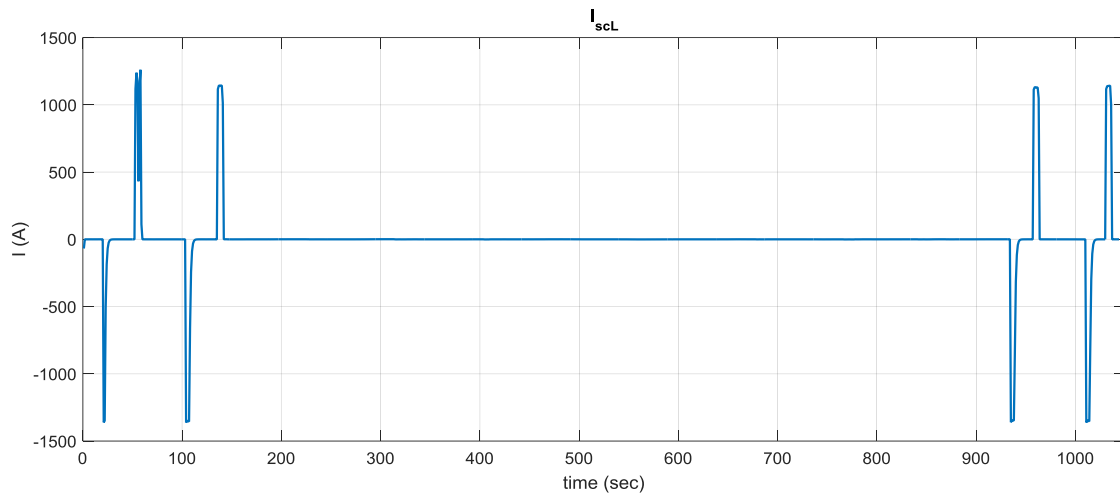
Γράφημα 5.36 – Τάση Υποσταθμού Κ



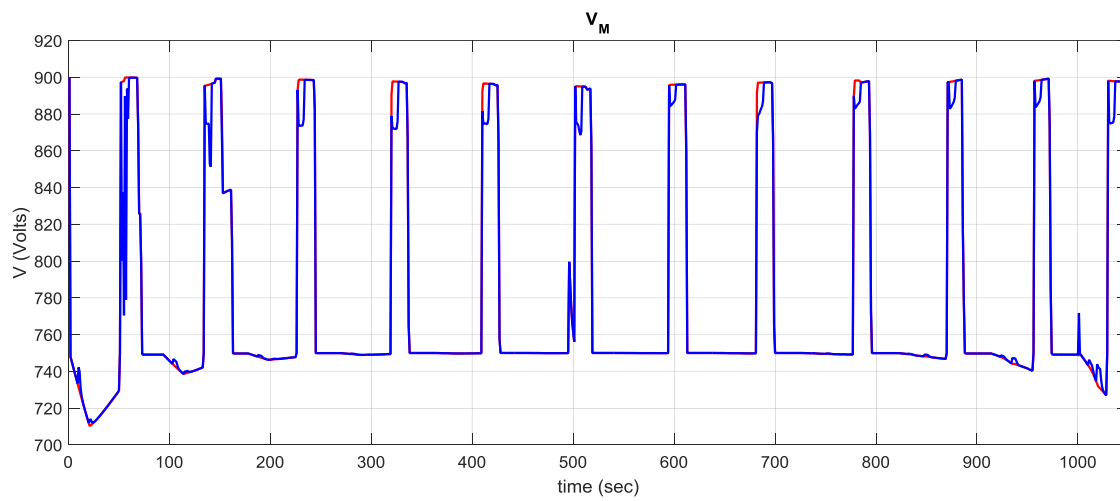
Γράφημα 5.37 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού Κ



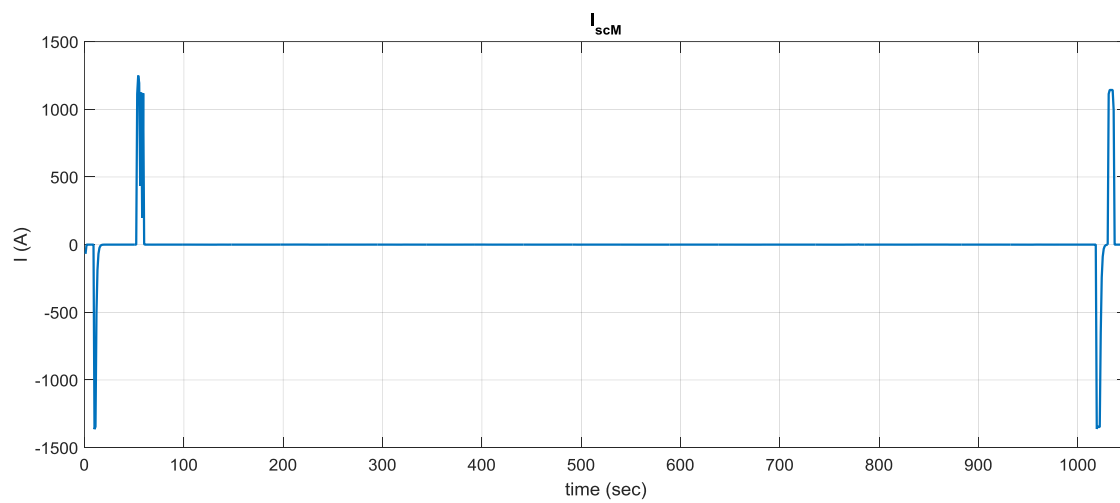
Γράφημα 5.38 – Τάση Υποσταθμού Λ



Γράφημα 5.39 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού L



Γράφημα 5.40 – Τάση Υποσταθμού M

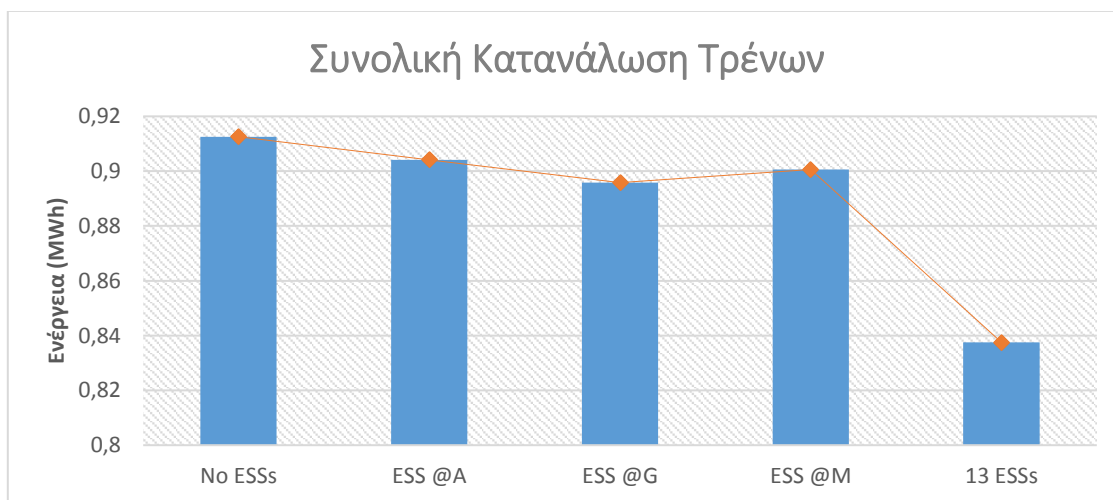


Γράφημα 5.41 – Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας Υποσταθμού M

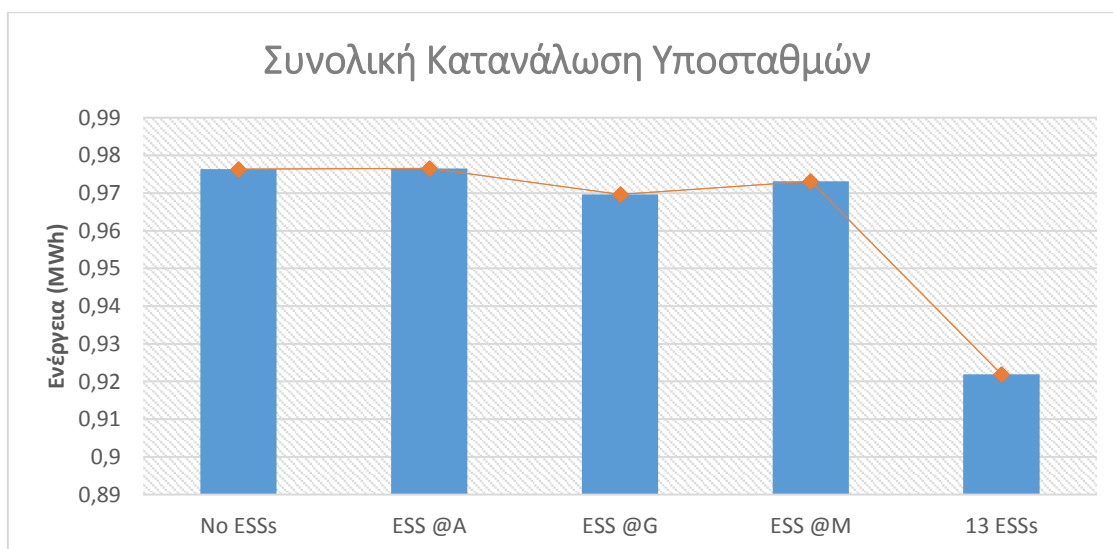
Στο σενάριο αυτό παρατηρούμε πως η τάση του δικτύου τη στιγμή που οι αμαξοστοιχίες επιταχύνονται δεν μειώνεται σημαντικά ανεξαρτήτως του σημείου της διαδρομής στην οποία βρίσκονται, καθώς σε κάθε κομμάτι του δικτύου είναι εγκατεστημένη μία συσκευή αποθήκευσης που καλύπτει εν μέρει τη ζήτηση ενέργειας. Αντίστοιχα, η απορρόφηση ενέργειας κατά την επιβράδυνση των τρένων ισοκατανέμεται στις 13 συσκευές αποθήκευσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συνολική εξομάλυνση της τάσης του δικτύου, με συνέπεια την σημαντική βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος.

Προκειμένου να έχουμε πιο μετρήσιμα αποτελέσματα, ώστε να εξάγουμε ασφαλέστερα συμπεράσματα αναφορικά με την εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο σε κάθε μία από τις παραπάνω τέσσερις περιπτώσεις, καταγράψαμε τα εξής μεγέθη:

- A) Συνολική Κατανάλωση Ενέργειας Τρένων, που περιλαμβάνει την απαιτούμενη ενέργεια κατά την κίνησή και των δύο τρένων από τον σταθμό A μέχρι των σταθμό M, και αντίστροφα.
- B) Συνολική Κατανάλωση Ενέργειας Υποσταθμών, που περιλαμβάνει το σύνολο της ενέργειας που προσφέρεται στο δίκτυο και περιλαμβάνει τόσο την ζητούμενη από τα τρένα ενέργεια, όσο και την ενέργεια που καταναλώνεται στις απώλειες των γραμμών.



Γράφημα 5.42 – Συνολική Κατανάλωση Τρένων

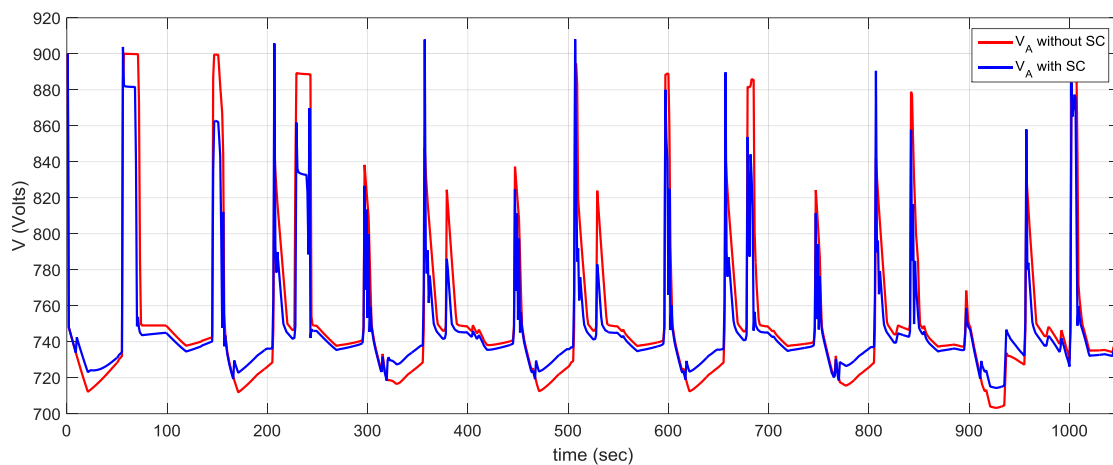


Γράφημα 5.43 – Συνολική Κατανάλωση Υποσταθμών

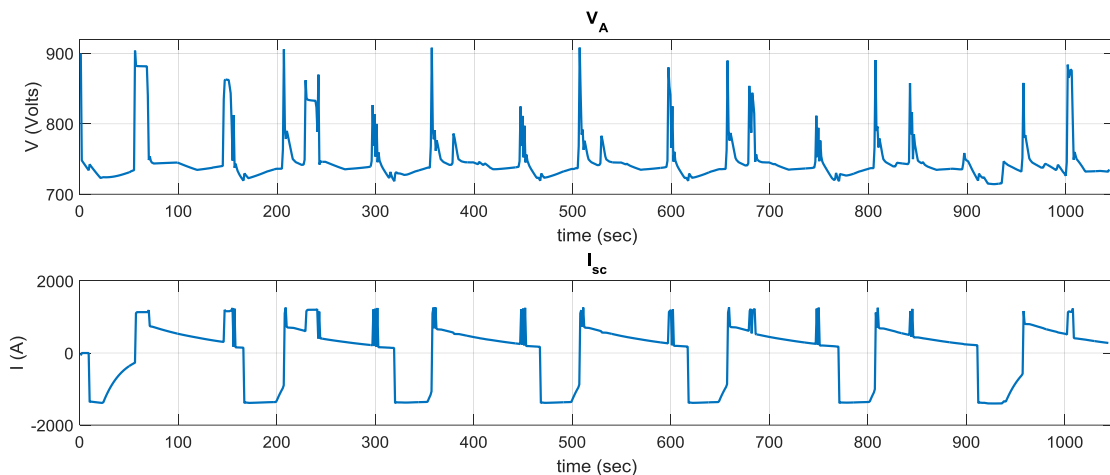
Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρούμε ότι με διαφορά τη βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας πετυχαίνουμε στο Σενάριο 4, όπου δηλαδή έχουμε τη διασπορά συσκευών αποθήκευσης ενέργειας μικρότερης χωρητικότητας κατά μήκος του συνόλου της διαδρομής, με αμέσως επόμενο, αναφορικά με την εξοικονόμηση ενέργειας, να αναδεικνύεται το Σενάριο 2. Τέλος, τα Σενάρια 1 και 3 δεν επιφέρουν σημαντικά αποτελέσματα και συνεπώς δεν βελτιώνουν την αποδοτικότητα του συστήματος σε σημείο άξιο αναφοράς.

Στο σημείο αυτό, θα είχε ενδιαφέρον να μελετήσουμε και την εξοικονόμηση ενέργειας σε περίπτωση που να ανταποκρίνεται περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της εν λόγω γραμμής, δηλαδή στην παράλληλη κίνηση περισσότερων της μίας αμαξοστοιχίας ανά κατεύθυνση. Συγκεκριμένα, περιορίσαμε την τιμή της μεταβλητής “headway” στα 150 sec και εκτελέσαμε εκ νέου την προσομοίωση, οπότε πήραμε τα εξής αποτελέσματα.

Σενάριο 1^ο:

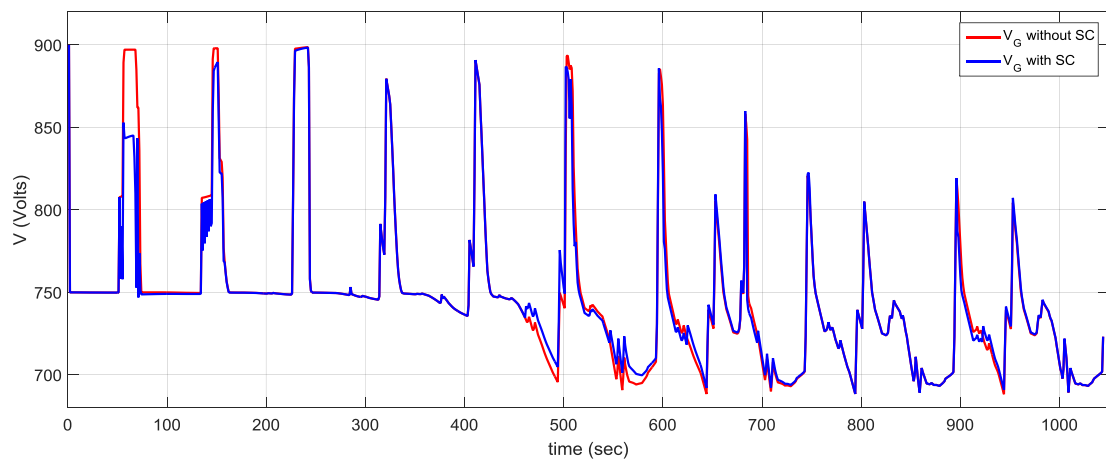


Γράφημα 5.44 – Τάση Υποσταθμού A

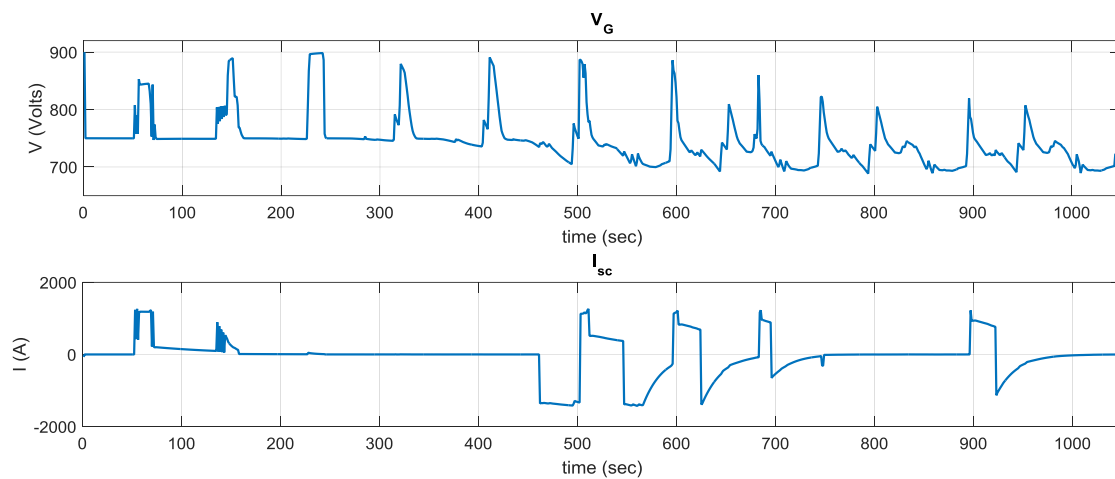


Γράφημα 5.45 – Τάση-Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας στον Υποσταθμό A

Σενάριο 2^ο:

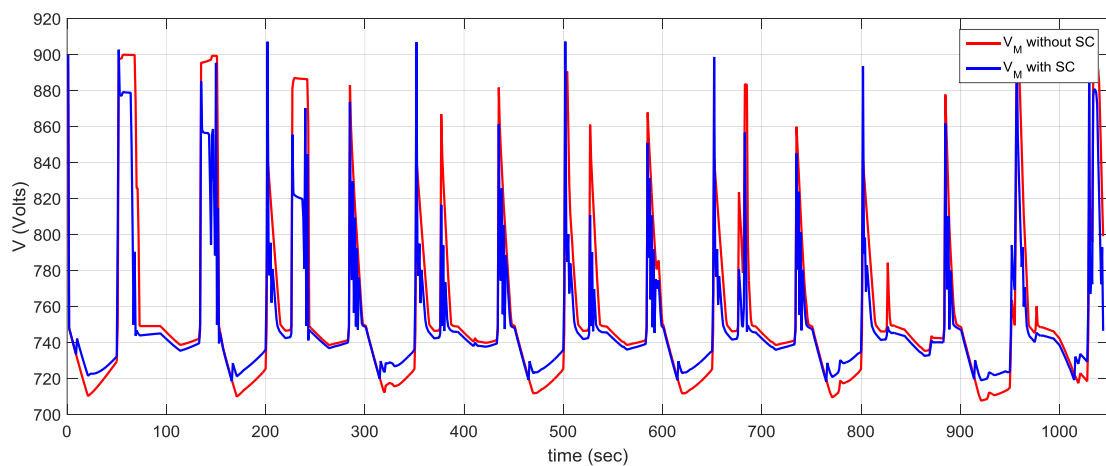


Γράφημα 5.46 – Τάση Υποσταθμού G

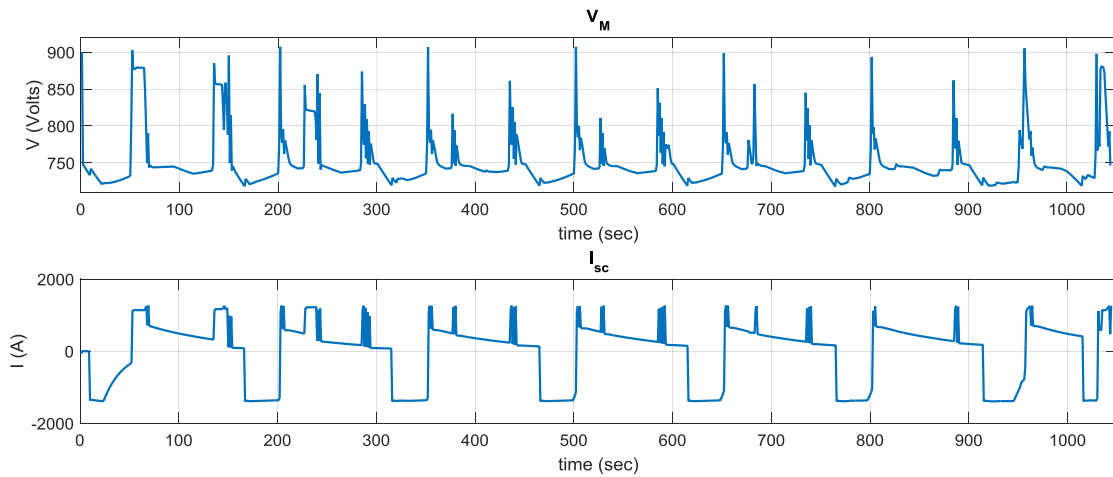


Γράφημα 5.47 – Τάση-Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας στον Υποσταθμό G

Σενάριο 3^ο:

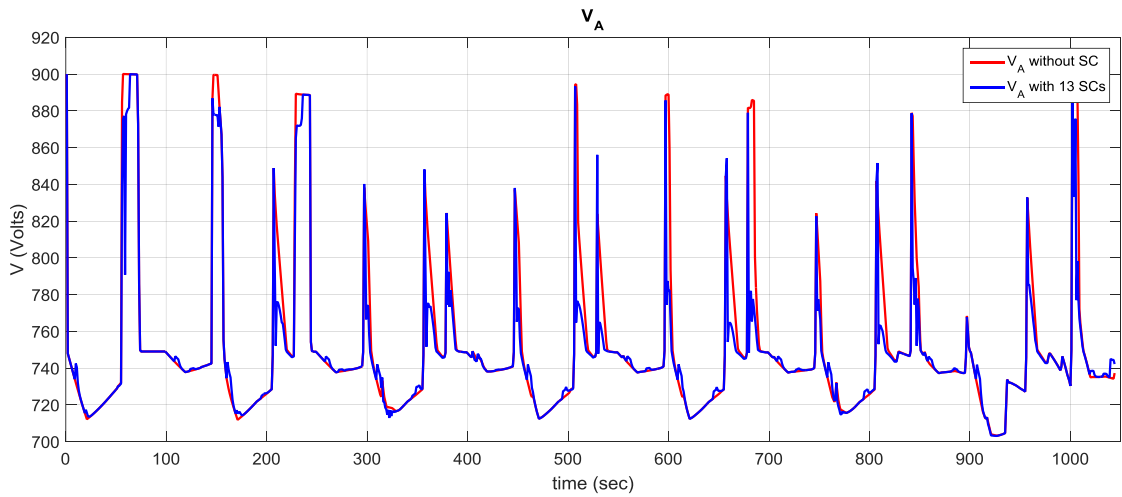


Γράφημα 5.48 – Τάση Υποσταθμού M

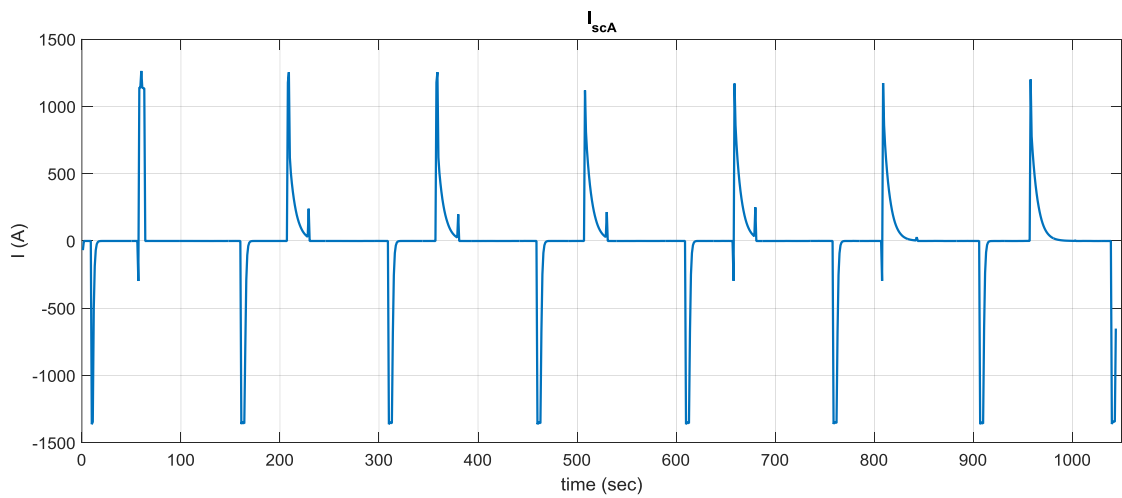


Γράφημα 5.49 – Τάση-Ρεύμα Συσκευής Αποθήκευσης Ενέργειας στον Υποσταθμό Μ

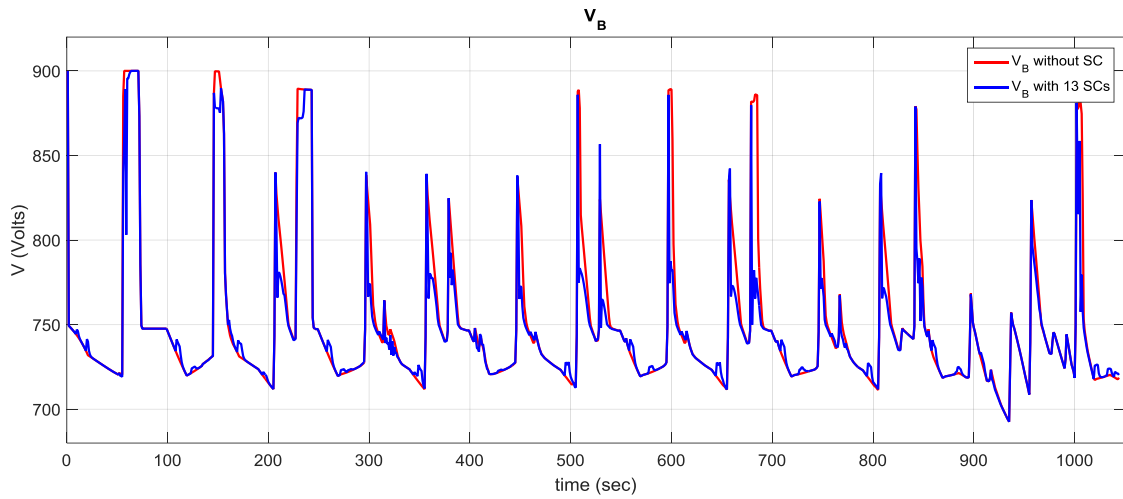
Σενάριο 4^ο:



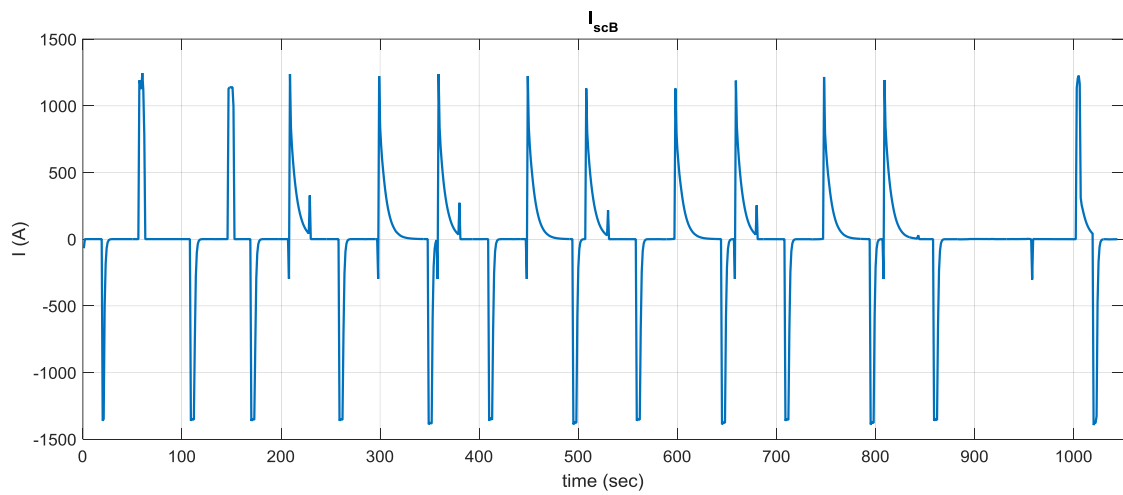
Γράφημα 5.50 – Τάση Υποσταθμών Α



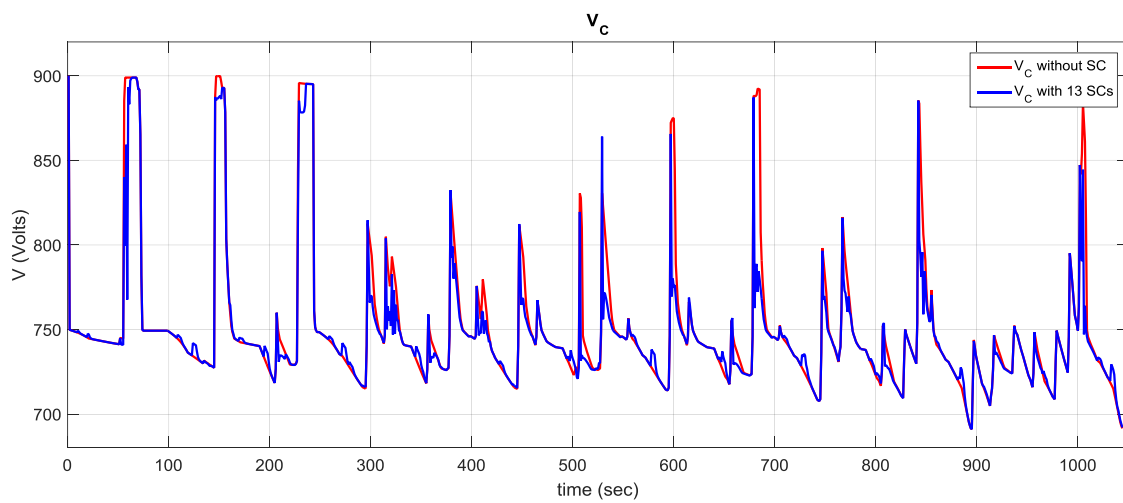
Γράφημα 5.51 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας Α



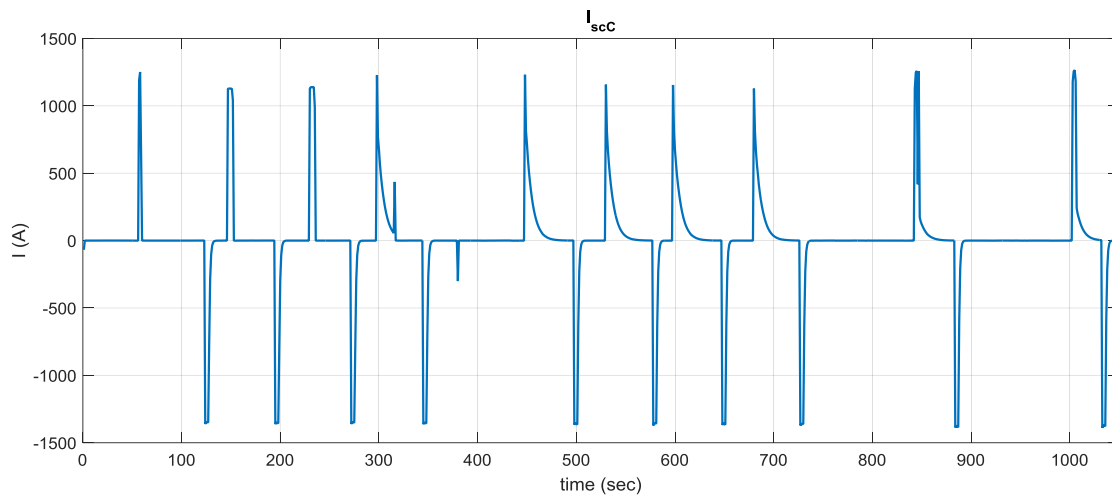
Γράφημα 5.52 – Τάση Υποσταθμών Β



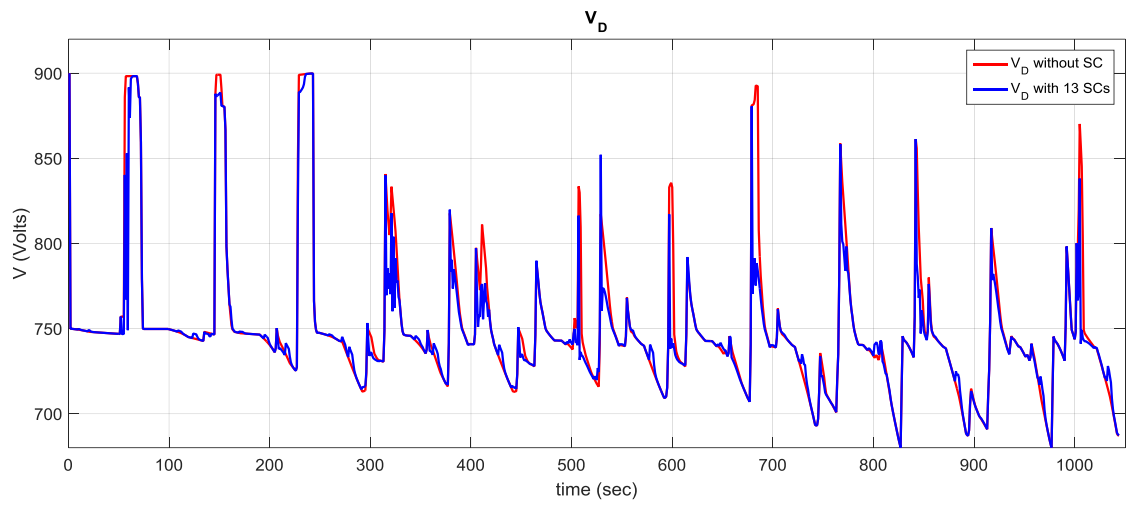
Γράφημα 5.53 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας Β



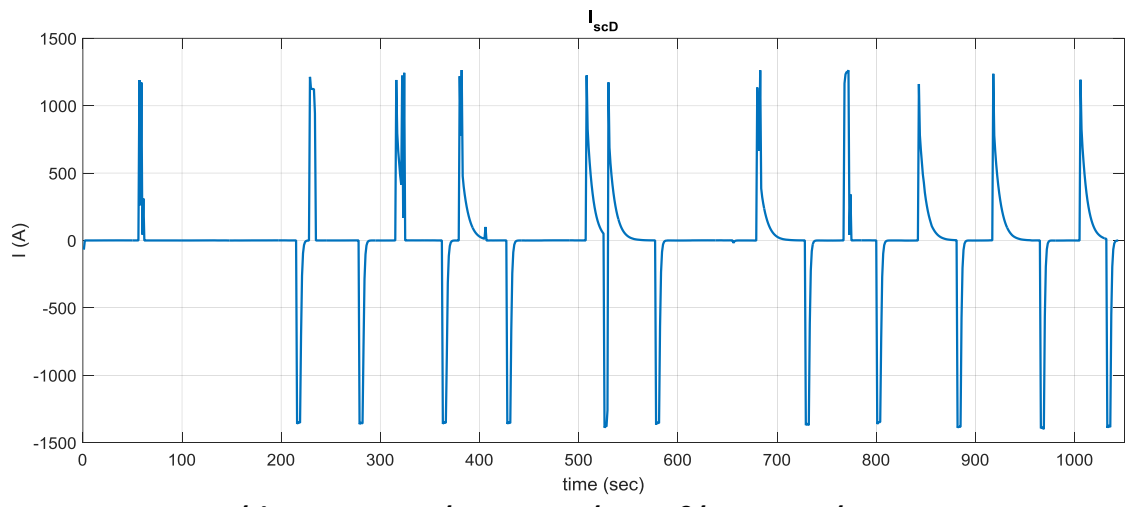
Γράφημα 5.54 – Τάση Υποσταθμών C



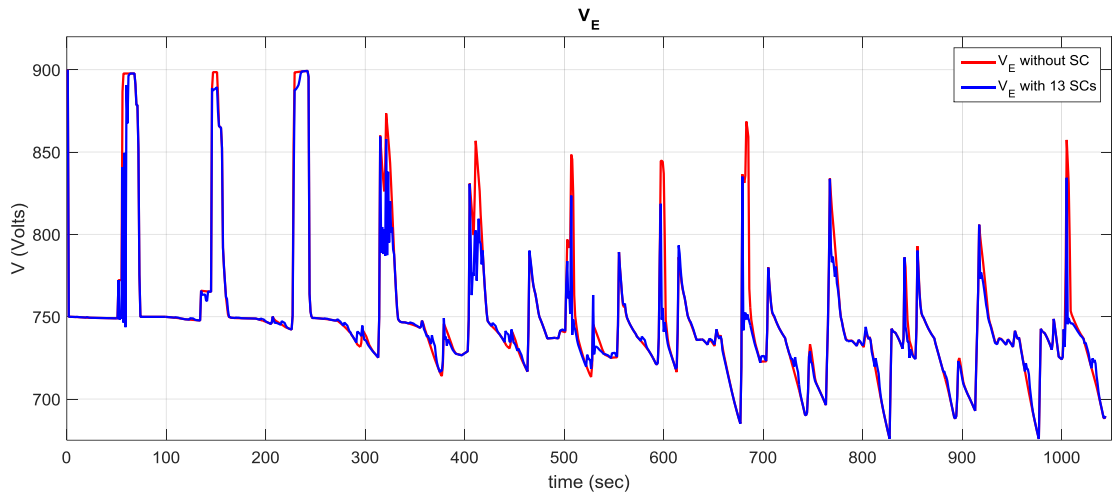
Γράφημα 5.55 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας C



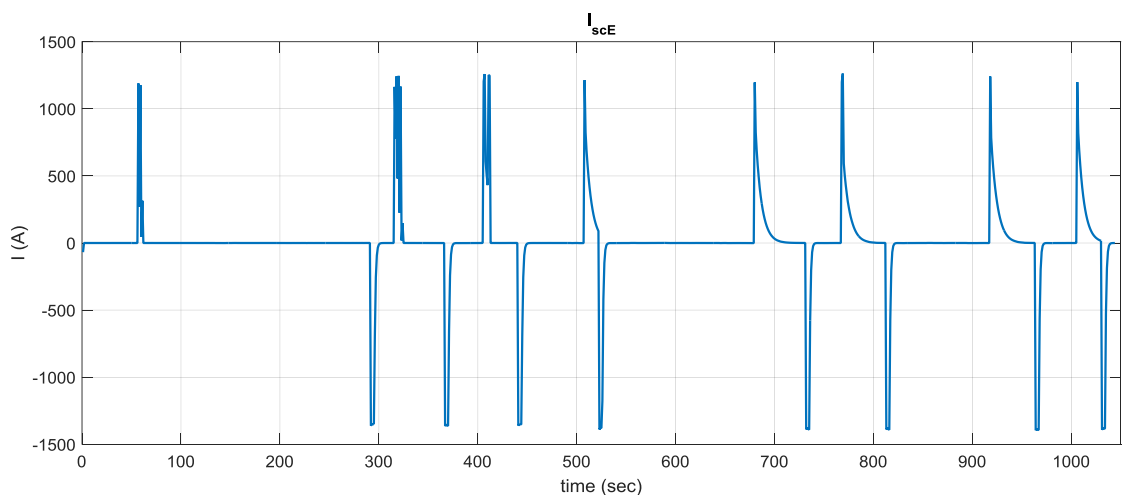
Γράφημα 5.56 – Τάση Υποσταθμών D



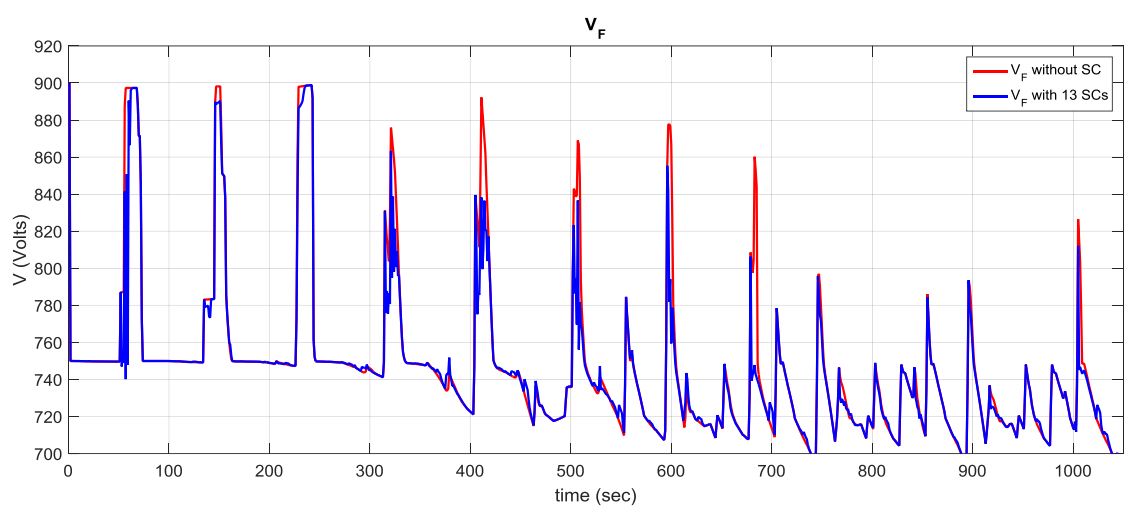
Γράφημα 5.57 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας D



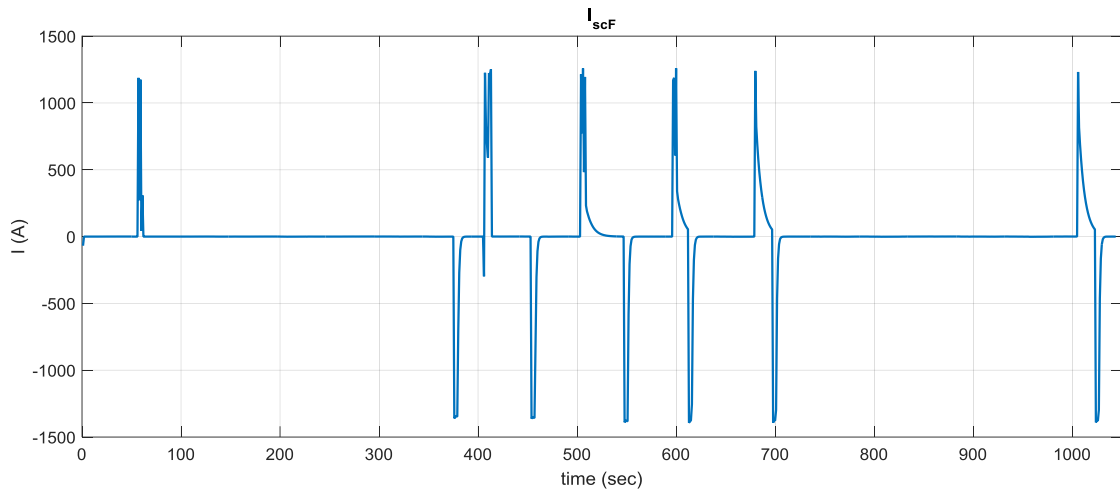
Γράφημα 5.58 – Τάση Υποσταθμών E



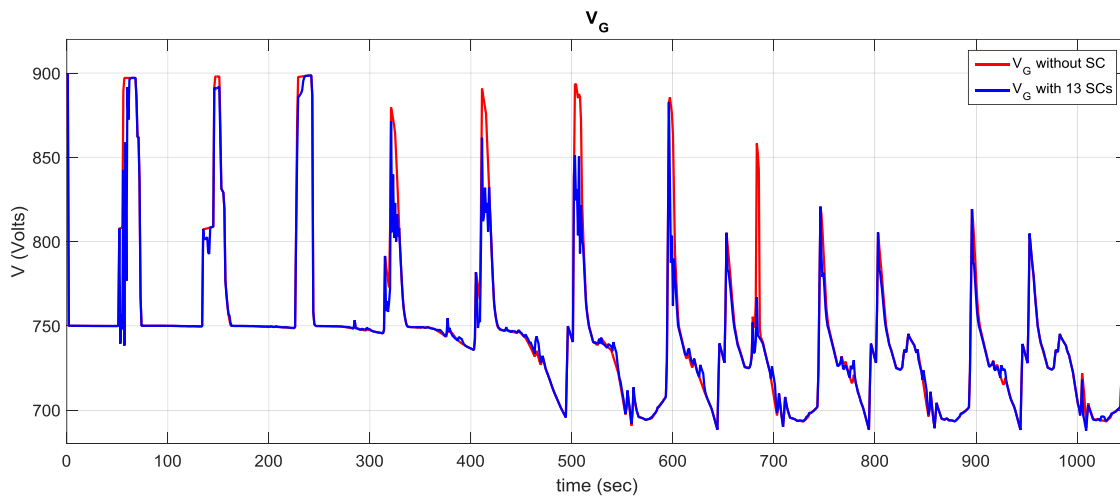
Γράφημα 5.59 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας E



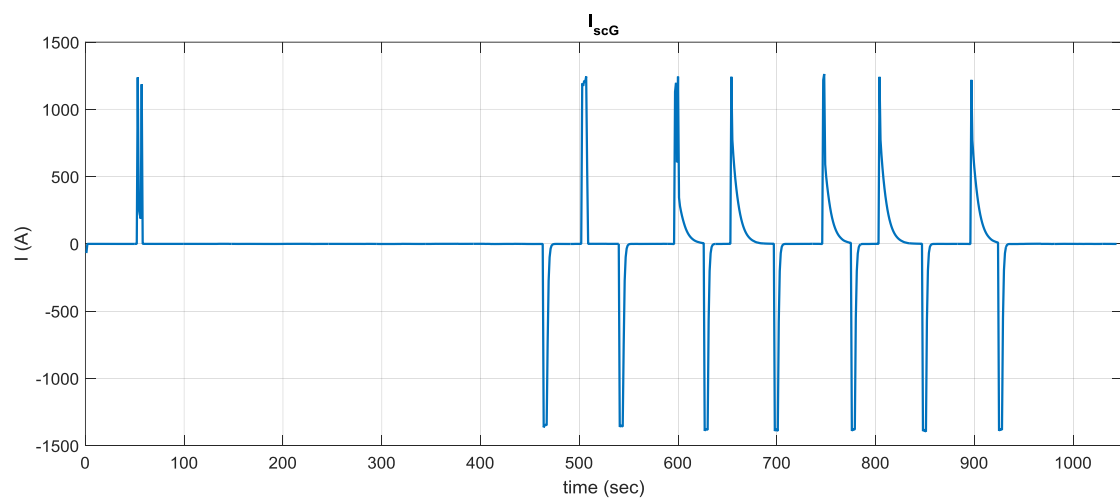
Γράφημα 5.60 – Τάση Υποσταθμών F



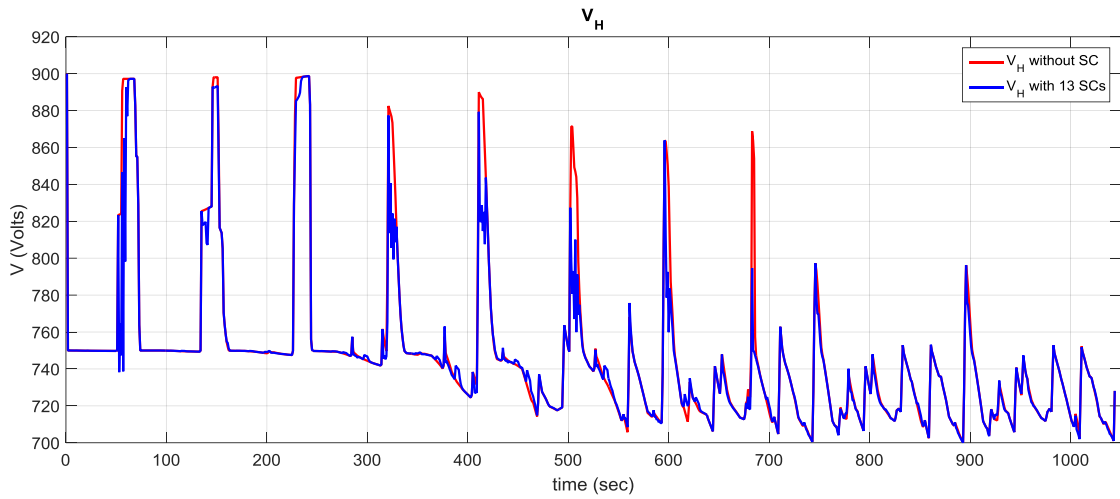
Γράφημα 5.61 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας F



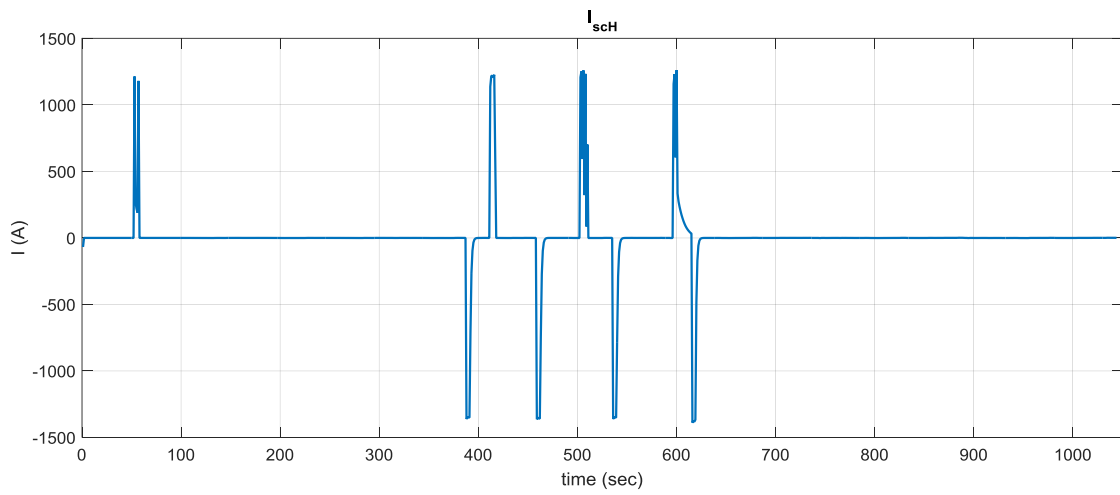
Γράφημα 5.62 – Τάση Υποσταθμών G



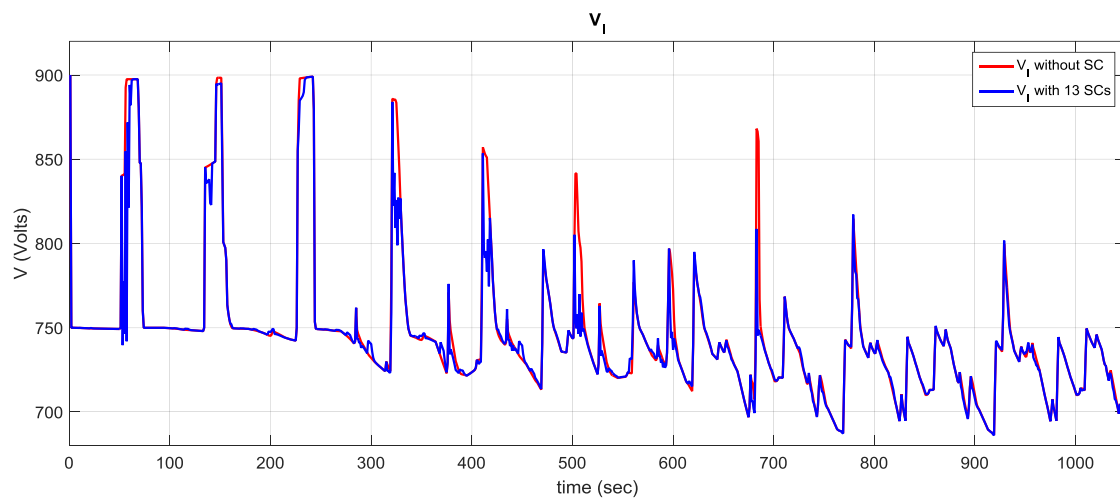
Γράφημα 5.63 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας G



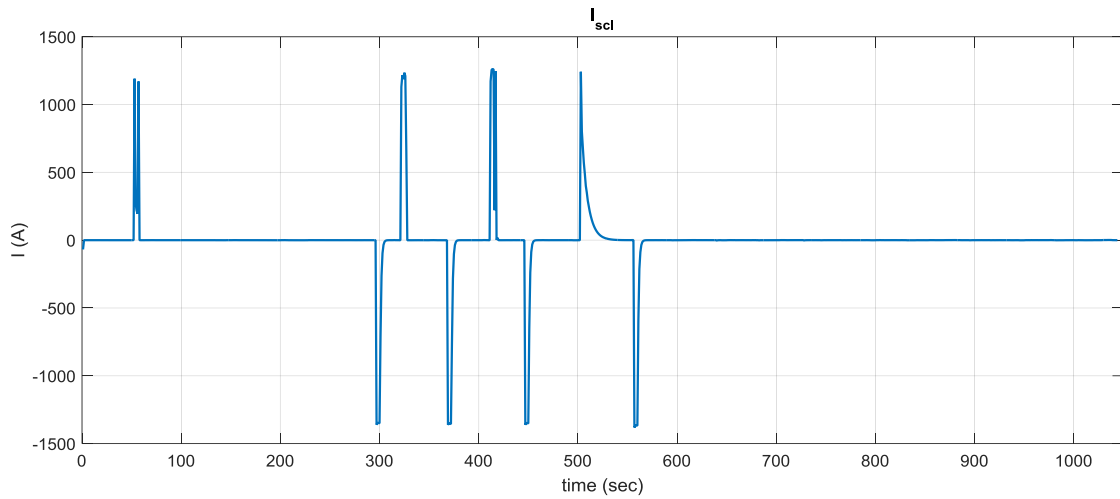
Γράφημα 5.64 – Τάση Υποσταθμών Η



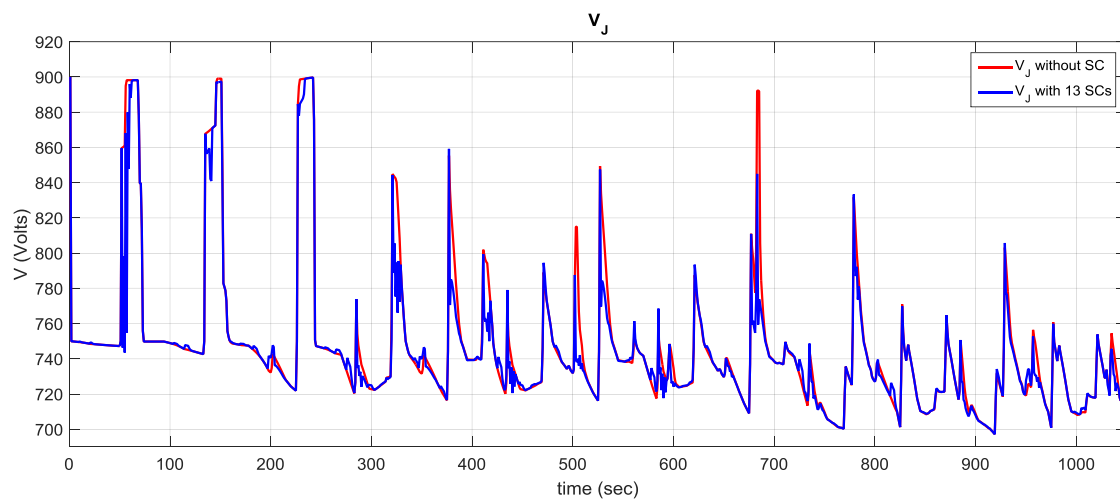
Γράφημα 5.65 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας Η



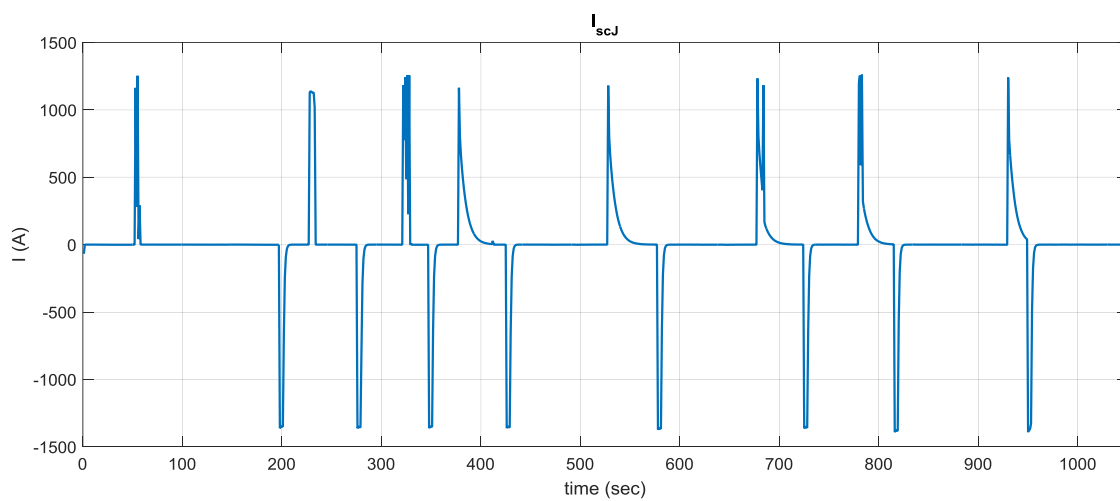
Γράφημα 5.66 – Τάση Υποσταθμών Ι



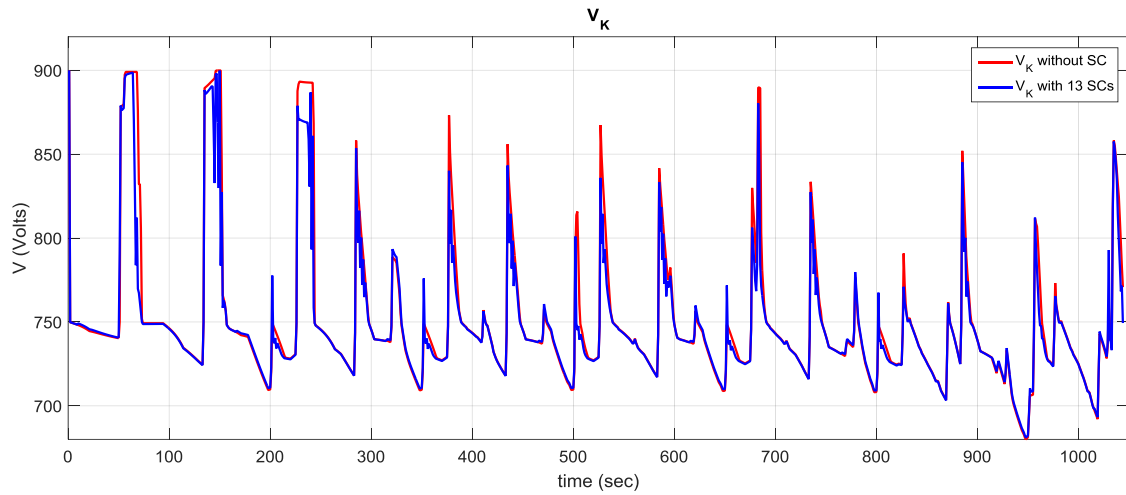
Γράφημα 5.67 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας I



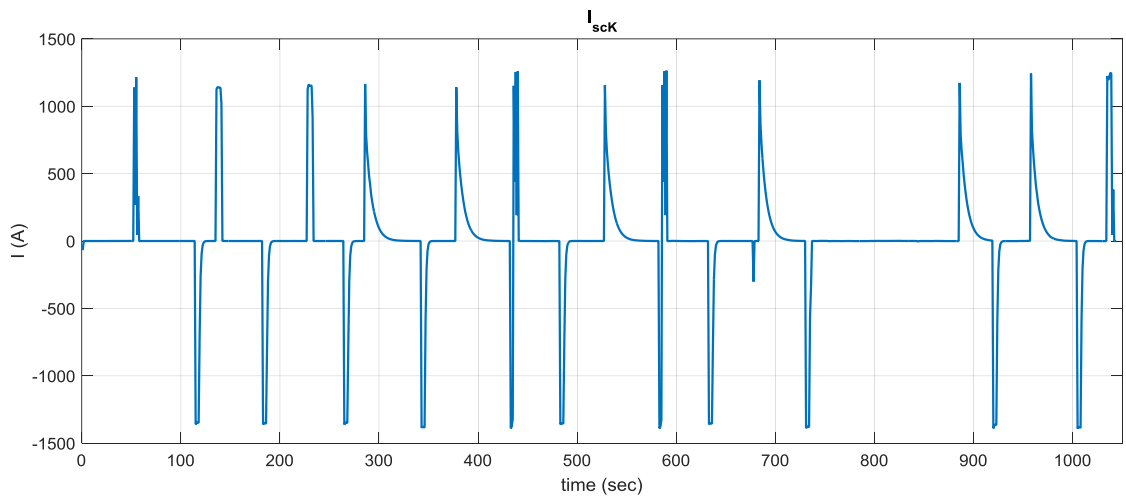
Γράφημα 5.68 – Τάση Υποσταθμών J



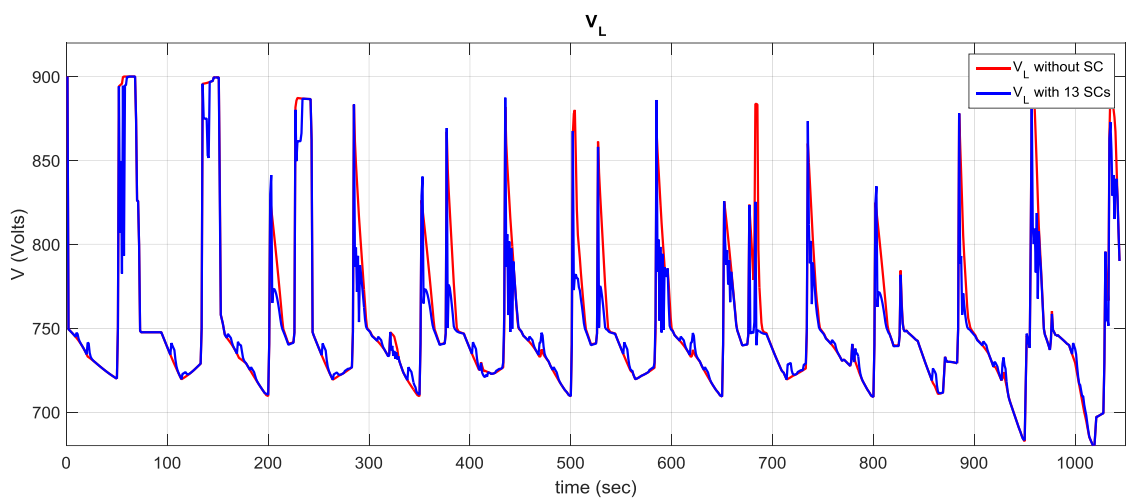
Γράφημα 5.69 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας J



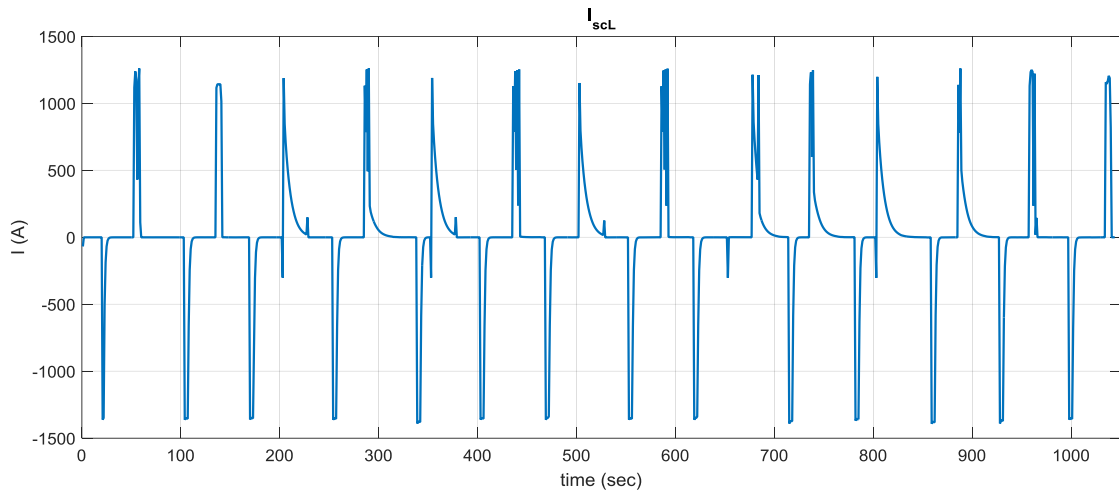
Γράφημα 5.70 – Τάση Υποσταθμών Κ



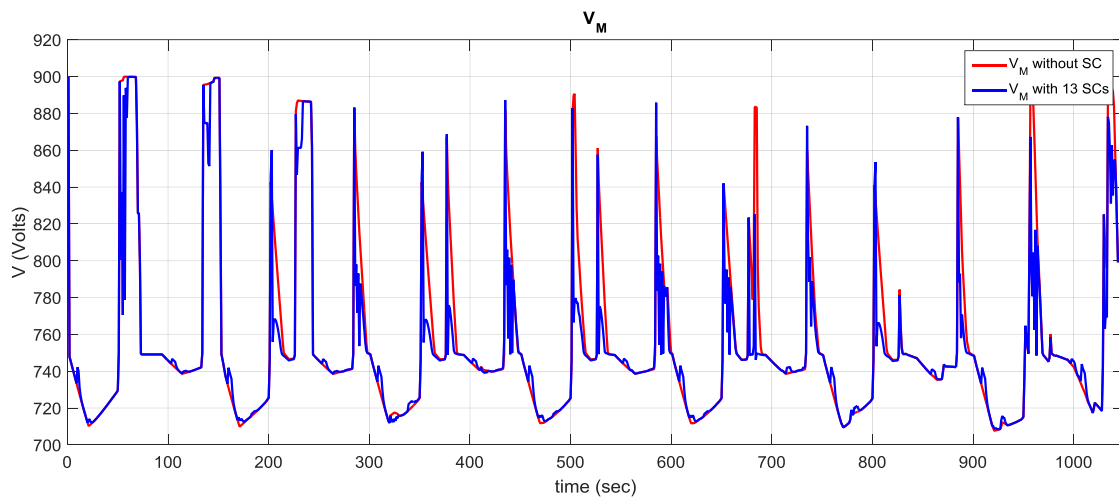
Γράφημα 5.71 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας Κ



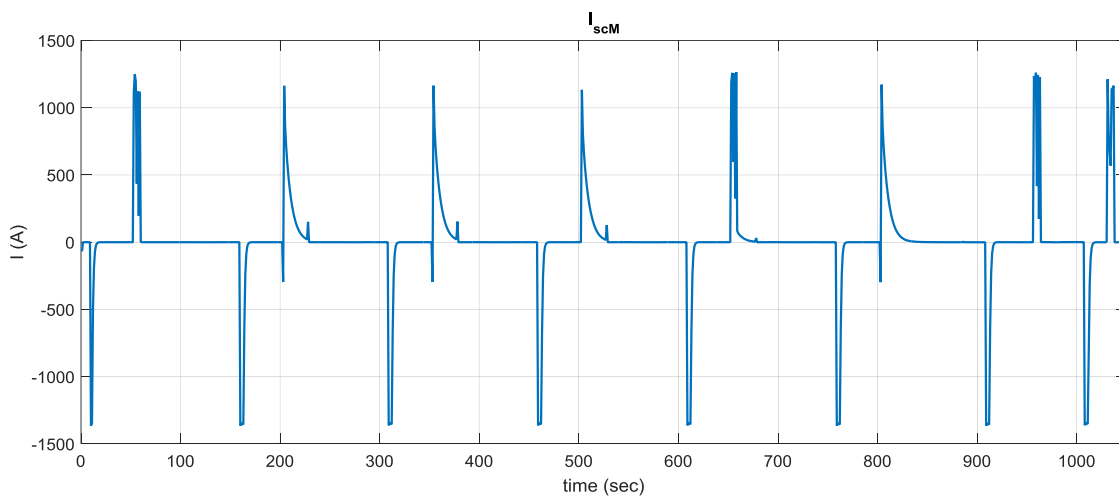
Γράφημα 5.70 – Τάση Υποσταθμών L



Γράφημα 5.73 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας L

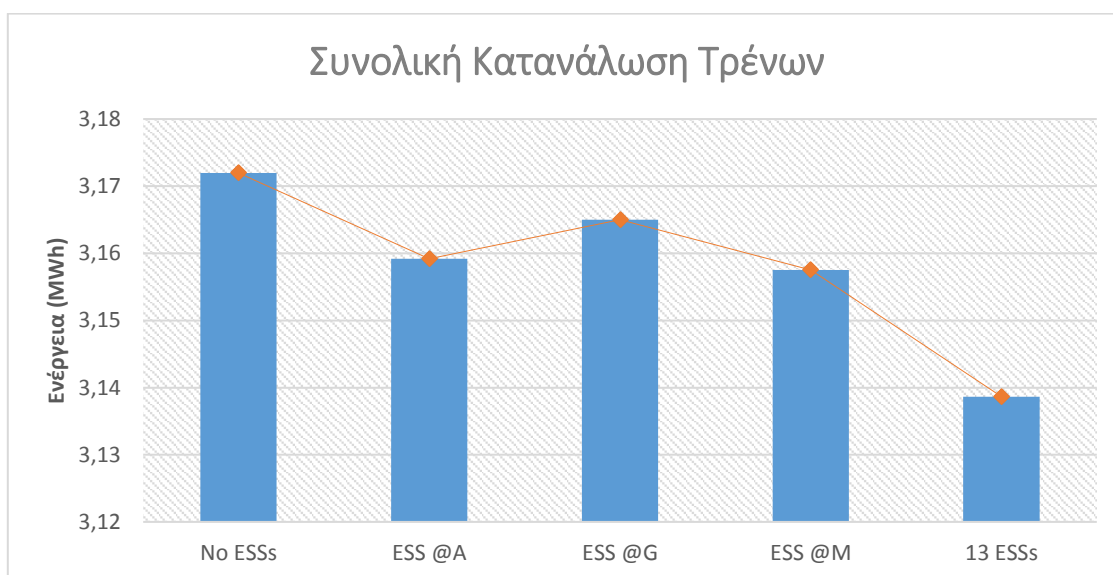


Γράφημα 5.70 – Τάση Υποσταθμών M

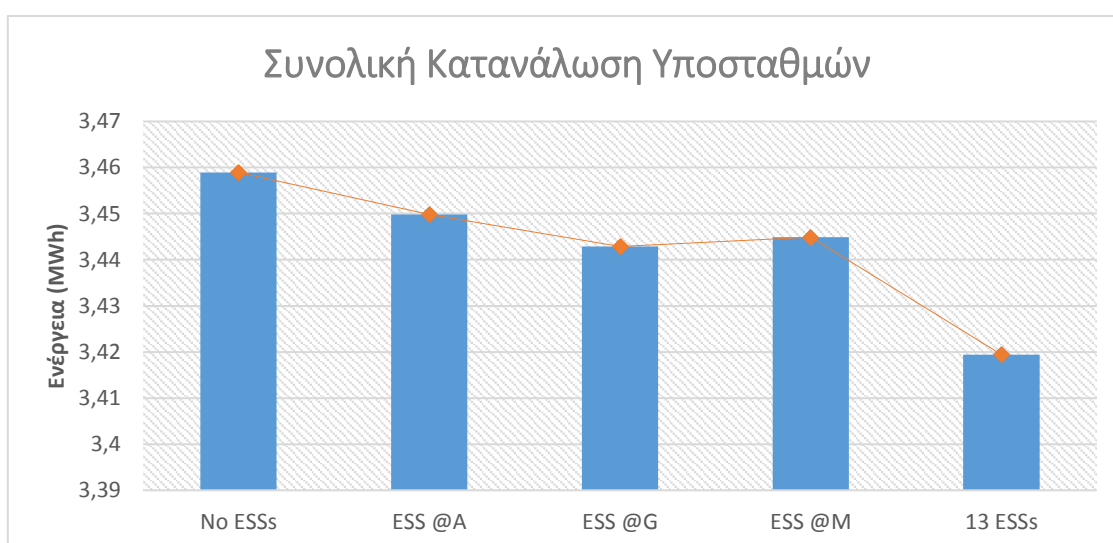


Γράφημα 5.75 – Ρεύμα Συσκευών Αποθήκευσης Ενέργειας M

Τα αποτελέσματα που παρατηρούμε, ως προς τη βασική λογική τους, δεν διαφέρουν από αυτά που διαπιστώσαμε για την απλουστευμένη περίπτωση της κίνησης μίας αμαξοστοιχίας ανά κατεύθυνση, καθώς η κάθε συσκευή εξομαλύνει την τάση στο τομέα ευθύνης της, απορροφώντας ρεύμα κατά την επιβράδυνση των τρένων, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ανύψωσης της τάσης του δικτύου και τροφοδοτώντας τις κοντινές αμαξοστοιχίες με ρεύμα την στιγμή της επιτάχυνσής τους, ανυψώνοντας με τον τρόπο αυτό την τάση του δικτύου. Η βασική διαφορά έγκυται στο γεγονός ότι καθώς έχουμε πολλαπλά τρένα που κινούνται παράλληλα στην κάθε κατεύθυνση, η κάθε συσκευή δεν φορτίζεται-εκφορτίζεται μία μόνο φορά, αλλά πολύ περισσότερες, στο υπό εξέταση χρονικό παράθυρο της προσομοίωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ανταλλαγής ενέργειας από τα τρένα στις συσκευές αποθήκευσης και το αντίστροφο, με συνέπεια να γίνεται πιο ενεργός ο ρόλος τους στη ροή ισχύος και ταυτόχρονα να περιορίζεται η συνεισφορά των υποσταθμών τροφοδοσίας. Όπως είναι αναμενόμενο, λοιπόν, αυξάνεται σημαντικά η ενέργεια που εξοικονομούμε και κατ' επέκταση η συνολική αποδοτικότητα του συστήματος, όπως φαίνεται και στα Γραφήματα 5.76 και 5.77.

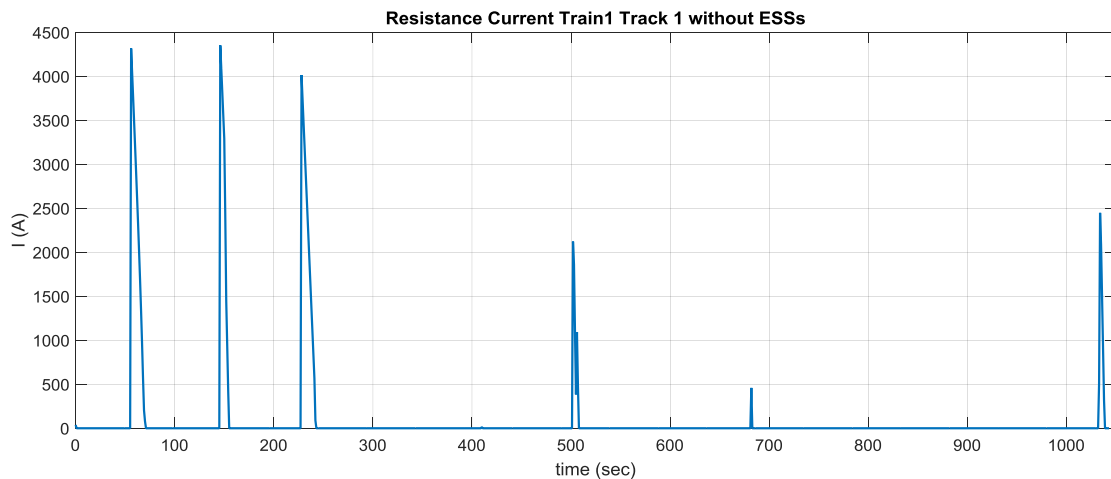


Γράφημα 5.76 – Συνολική Κατανάλωση Τρένων

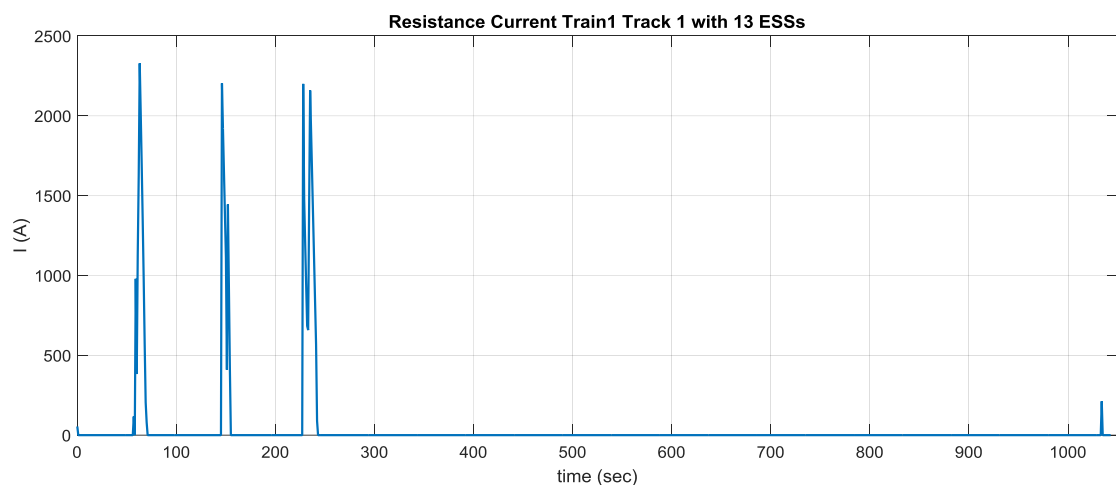


Γράφημα 5.77 – Συνολική Κατανάλωση Τρένων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην περίπτωση που δεν τοποθετηθούν στο δίκτυο οι συσκευές αποθήκευσης, η περίσσεια ενέργεια που παράγεται κατά την πέδηση των τρένων καταναλώνεται με τη μορφή θερμικών απωλειών στους ροοστάτες πέδησης. Προκειμένου να γίνει αυτό πιο εύκολα κατανοητό παραθέτουμε τα παρακάτω γραφήματα.



Γράφημα 5.78 – Ρεύμα στους ροοστάτες πέδησης του 1^{ου} τρένου για δίκτυο χωρίς συσκευές αποθήκευσης ενέργειας



Γράφημα 5.79 – Ρεύμα στους ροοστάτες πέδησης του 1^{ου} τρένου για δίκτυο με 13 συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (Σενάριο 4)

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η εισαγωγή συσκευών αποθήκευσης στο δίκτυο περιορίζει σημαντικά το ρεύμα στους ροοστάτες πέδησης, καθώς οι συσκευές αποθήκευσης απορροφούν μέρος της ενέργειας πέδησης. Κατά συνέπεια, λοιπόν, μικρότερο ποσό ισχύος καταναλώνεται σε αυτούς και έτσι αυξάνεται η συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος.

5.7 Συμπεράσματα

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, καταλήγουμε πως εξ' ορισμού η είσοδος μίας συσκευής αποθήκευσης ενέργειας, βελτιώνει σημαντικά την αποδοτικότητα ενός δικτύου μετρό, καθώς αφενός περιορίζει τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου αλλά αφετέρου πετυχαίνει και εξομάλυνση της τάσης λειτουργίας του.

Επεκτείνοντας, βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των συσκευών αποθήκευσης πετύχαμε όταν εφαρμόσαμε κατακερματισμό της εγκατεστημένης χωρητικότητας στο δίκτυο, σε μικρότερες συσκευές ισοκατεμημένες κατά μήκος της διαδρομής.

Εν κατακλείδι, η εισαγωγή κατάλληλων διατάξεων υπερπυκνωτών, σε ένα δίκτυο αστικού σιδηροδρόμου, αποτελεί μία εξαιρετική προοπτική για τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας αλλά και την αύξηση της αποτελεσματικότητας του συνολικού συστήματος. Μάλιστα μία τέτοια επένδυση παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερα οικονομικά οφέλη για δίκτυα με μεγάλη επισκεψιμότητα, καθώς η ενέργεια που εξοικονομείται είναι ανάλογη με την πυκνότητα των δρομολογίων.

5.8 Βιβλιογραφία

[1] R., Barrero; X., Tackoen; J., Van Mierlo, Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network, Harbin, China Sept. 2008.

[2] Barrero, R., Tackoen, X., and Van Mierlo, Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network, Mar. 2010.

Κεφάλαιο 6^ο

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία κατέστη σαφές ότι στα σύγχρονα δίκτυα μετρό με τις υπάρχουσες υποδομές, μένει ανεκμετάλλευτο σημαντικό ποσό ενέργειας, καθώς δαπανάται στους ροοστάτες πέδησης των αμαξοστοιχιών. Η ενέργεια αυτή, όπως είδαμε, κάνοντας κατάλληλες μετατροπές ή προσθήκες στο υφιστάμενο δίκτυο, μπορεί να ανακτηθεί ώστε να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη μέρους της ζήτησης ισχύος του δικτύου.

Προκειμένου να εκμεταλλευτούμε την ανατροφοδοτούμενη ενέργεια πέδησης έχουμε τις εξής επιλογές: τη χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών ισχύος στους υποσταθμούς τροφοδοσίας, ώστε να καθίσταται δυνατή η διοχέτευση της περίσσειας ενέργειας απευθείας στο δίκτυο του παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας, η εγκατάσταση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας σε συγκεκριμένα σημεία του σιδηροδρομικού δικτύου ή η ενσωμάτωσή τους στις κινούμενες αμαξοστοιχίες. Για λόγους που σχετίζονται με το κόστος της επένδυσης, τη δυνατότητα κεντρικής διαχείρισης της ροής ισχύος για το σύνολο του δικτύου, το κόστος συντήρησης και την αξιοπιστία του συνολικού συστήματος, καταλήξαμε ότι η εισαγωγή στατικών συσκευών αποθήκευσης κατά μήκος του σιδηροδρομικού δικτύου αποτελεί την αποδοτικότερη επιλογή.

Από τις διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης, καταλήξαμε πως την πιο συμφέρουσα επιλογή για τη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελούν οι υπερπυκνωτές. Προκειμένου να οδηγηθούμε στην εν λόγω επιλογή, σαν βασικά κριτήρια αξιολόγησης της κάθε τεχνολογίας θεωρήσαμε την ταχύτητα απόκρισης, την πυκνότητα ισχύος και ενέργειας, τη διάρκεια ζωής και την αξιοπιστία.

Θεωρώντας σαν βασικούς στόχους την εξοικονόμηση ενέργειας και τη σταθεροποίηση της τάσης του δικτύου, διαπιστώσαμε πως η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου της ροής ισχύος των συσκευών αποθήκευσης λειτουργεί τόσο ορθά όσο και αποδοτικά, όπως προέκυψε από τη σύγκριση του μοντέλου Matlab/Simulink με το πραγματικό σύστημα Triphase. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι η επιλογή των ορίων τάσης επιδρά σημαντικά στη συνολική λειτουργία και την αποδοτικότητα του αλγορίθμου. Στην παρούσα εργασία καταλήξαμε στα συγκεκριμένα όρια με βάση εμπειρικές δοκιμές, καθώς δεν αποτελεί αντικείμενο μελέτης η περαιτέρω διερεύνηση του συγκεκριμένου θέματος.

Το επόμενο κρίσιμο αντικείμενο μελέτης που προσδιορίζει σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος είναι η διάταξη και η θέση εγκατάστασης των συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Με βάση τα αποτελέσματα που λάβαμε από τις διεξαχθείσες προσομοιώσεις, καταλήξαμε πως βελτιστοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας πετυχαίνουμε για την περίπτωση κατάτμησης της συνολικής διαθέσιμης χωρητικότητας σε μικρότερες συσκευές αποθήκευσης, εγκατεστημένες κατά μήκος της διαδρομής και συγκεκριμένα η τοποθέτηση μιας συσκευής ανά υποσταθμό τροφοδοσίας.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να τονίσουμε ότι ακόμα και σε περιπτώσεις αυξημένης επισκεψιμότητας, δηλαδή συχνότερων δρομολογιών, η αποδοτικότητα του συνολικού συστήματος είναι υψηλή, καθώς παρά την αυξημένη κατανάλωση, γίνεται καλύτερη αξιοποίηση των εγκατεστημένων συσκευών αποθήκευσης, με τελικό αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά το ποσό της εξοικονομούμενης ενέργειας.