



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη βέλτιστης τοποθέτησης συστήματος αποθήκευσης
ενέργειας σε ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο για μεγιστοποίηση
εξοικονόμησης ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεράσιμος Κ. Πετράτος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μελέτη βέλτιστης τοποθέτησης συστήματος αποθήκευσης
ενέργειας σε ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο για μεγιστοποίηση
εξοικονόμησης ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεράσιμος Κ. Πετράτος

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20η Μαρτίου 2017

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Πάυλος Γεωργιλάκης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2017

.....
Γεράσιμος Κ. Πετράτος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Γεράσιμος Κ. Πετράτος 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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα, ως δημοφιλή και οικολογικά μέσα μαζικής μεταφοράς, οφείλουν να είναι ανταγωνιστικά σε σχέση με τα άλλα συμβατικά μέσα. Για να γίνει αυτό, νέες μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας ανακαλύπτονται και εφαρμόζονται σε αυτά, με στόχο την μείωση της ενεργειακής τους κατανάλωσης. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποκτούν, έτσι, κομβικό ρόλο, με τις πολλαπλές ιδιότητες που μπορούν να επιτελέσουν.. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μελέτη της βέλτιστης τοποθέτησης ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα, με στόχο τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας.

Αρχικά, γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της ενεργειακής κατανάλωσης των τρένων, καθώς και διαφόρων τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί για την εξοικονόμησή της, όπως η αναγεννητική πέδηση. Εν συνεχεία, περιγράφονται τα πιο σημαντικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ως αποδοτική λύση στο ανωτέρω πρόβλημα. Εξετάζεται ο ρόλος και η λειτουργία τους, παρουσιάζονται κάποιες βασικές εφαρμογές και τεχνικές ελέγχου τους και επιχειρείται μια σύντομη περιγραφή των κυριότερων τεχνολογιών που χρησιμοποιούν.

Επιπροσθέτως, διαχωρίζονται οι κύριοι τρόποι τοποθέτησης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα σε δύο κατηγορίες (ως κινητά συστήματα και ως στατικά) και αναλύονται τα χαρακτηριστικά της κάθε μιας, με τη χρήση εμπορικών παραδειγμάτων.

Στο 4^ο κεφάλαιο, διενεργείται μια θεωρητική ανάλυση αναφορικά με την εύρεση της βέλτιστης θέσης ενός στατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε ένα κατασκευασμένο μοντέλο ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου, για μέγιστη εξοικονομούμενη ενέργεια. Η θέση αυτή υπολογίζεται μαθηματικά με την χρησιμοποίηση μιας συνάρτησης βελτιστοποίησης, που χρησιμοποιεί συγκεκριμένες παραμέτρους του δικτύου, για διαφορετικά σενάρια απόστασης μεταξύ των διερχόμενων τρένων.

Έπειτα, στο 5^ο κεφάλαιο, επιχειρείται η μοντελοποίηση ενός ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου στο περιβάλλον του Matlab/Simulink, με ταυτόχρονη προσομοίωση της λειτουργίας ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένου σε τεχνολογία υπερπυκνωτή. Ελέγχονται διαφορετικά σενάρια τοποθέτησης του συστήματος αποθήκευσης στο δίκτυο και εξάγονται αποτελέσματα, τα οποία οδηγούν στην επιλογή της αποδοτικότερης μεθόδου, για την επίτευξη της μικρότερης συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στο δίκτυο.

Τέλος, εξάγονται γενικά συμπεράσματα και κατατίθενται βελτιωτικές προτάσεις.

Λέξεις Κλειδιά

Κινητό/Στατικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, βέλτιστη θέση, μοντελοποίηση/προσομοίωση σιδηροδρομικού δικτύου, υπερπυκνωτής, εξοικονόμηση ενέργειας, υποσταθμοί, τρένα, τεχνικές ελέγχου

ABSTRACT

The electric railways, which are popular and eco-friendly means of public transport, have to be competitive in comparison with the other conventional means. For this reason new methods are discovered and applied, aiming to the reduction of their energy consumption. Energy Storage Systems (ESS) are a basic factor in this field because they can fulfill a lot of different tasks. In this diploma thesis the optimal location of an ESS in electric railways has been studied in order to maximize the energy saving in the grid.

First of all, a short description of the energy consumption of the trains is provided, as well as some different techniques that have been developed for its reduction; for instance the regenerative braking. Moreover, the most important ESSs are described as an efficient solution to the aforementioned problem. Their role and function are examined, some basic applications and control techniques are presented and a description of the major storage technologies that they use is made.

Additionally, the ways of locating the ESSs in the electric railways are separated in two basic categories (on-board or stationary) and their characteristics are analyzed with the use of commercial examples.

In chapter 4, a theoretical analysis takes place, which regards to the optimal location of a stationary ESS in a constructed model of an electric railway for maximized energy savings. This location is calculated by an optimization function, which uses specified grid parameters, applied to different scenarios of distance between the running trains.

Furthermore, in chapter 5, a modeling of an electric railway system is presented in Matlab/Simulink environment, along with the simulation of an ESS function based in supercapacitor technology. Different scenarios of locating the ESS along the grid are controlled. Subsequently, the results lead to the selection of the most efficient location, in terms of the smallest total energy consumption that is caused to the grid.

Finally, general conclusions are drawn and proposals for improvement and further work are given.

Key Words

On-board/Stationary Energy Storage System, optimal position, modeling/simulation of an electric railway system, supercapacitor, energy saving, substations, trains, control techniques.

Ευχαριστίες

Οφείλω να ευχαριστήσω πρωταρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλη Κλεφτάκη, υπό την επίβλεψη του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία, για την στοχευμένη και εποικοδομητική βοήθειά του, όπου και όποτε τη χρειαζόμουν.

Τέλος, η οικογένεια μου και οι φίλοι μου, που με στηρίζουν πάντα, αξίζουν το πιο ιδιαίτερο ευχαριστώ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ηλεκτρική ενέργεια στα σιδηροδρομικά δίκτυα	13
1.1 Εισαγωγή στα σιδηροδρομικά δίκτυα	13
1.2 Ενεργειακή Κατανάλωση των τρένων	14
1.2.1 Μηχανικές απώλειες	14
1.2.2 Απώλειες κίνησης στις γραμμές	15
1.2.3 Απώλειες βοηθητικών λειτουργιών	16
1.2.4 Απώλειες γραμμής παροχής	17
1.3 Εξοικονόμηση ενέργειας	17
1.3.1 Σάρωση της πυκνότητας κυκλοφορίας των τρένων ως μέθοδος εκτίμησης της εξοικονόμησης ενέργειας	18
1.3.2 Μια θεώρηση για την κατανάλωση ενέργειας	19
1.3.3 Δυναμική – Αναγεννητική πέδηση	20
1.3.4 Άλλες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας	22
1.4 Μεγιστοποίηση ανταλλαγής αναγεννητικής ενέργειας μεταξύ των οχημάτων	23
1.4.1 Βελτιστοποίηση δρομολογίων	24
1.4.2 Υποσταθμοί διπλής κατεύθυνσης ισχύος (Reversible substations)	25
1.4.3 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems-ESS)	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας	29
2.1 Ρόλος και λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας	29
2.2 Τυπικές διατάξεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας	30
2.3 Εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα	32
2.3.1 Απαιτήσεις	32
2.3.2 Άμεσες εφαρμογές	32

2.4 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	32
2.4.1 Ηλεκτροχημικοί Συσσωρευτές	33
2.4.1.1 Συσσωρευτές μολύβδου - οξέος (Lead - acid).....	33
2.4.1.2 Συσσωρευτές Νικελίου.....	34
2.4.1.3 Συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Lithium - ion).....	36
2.4.1.4 Συσσωρευτές θειούχου νατρίου (NaS).....	37
2.4.2 Σφόνδυλοι υπερυψηλής ταχύτητας (Flywheels).....	38
2.4.3 Υπερπυκνωτές	40
2.4.4 Υπεραγώγιμες μαγνητικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (Superconducting magnetic energy storage, SMES)	42
2.5 Μετατροπείς ισχύος για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	43
2.6 Τεχνικές Ελέγχου.....	45
2.6.1 Τεχνική ελέγχου με PI ελεγκτή (PI control strategy).....	46
2.6.2 Τεχνική ελέγχου ανίχνευσης ταχύτητας (Speed Tracker Control strategy).....	47
2.6.3 Τεχνική ελέγχου ανίχνευσης τάσης γραμμής (Line Voltage Tracker Control strategy).....	47
2.6.4 Τεχνική ελέγχου κατάστασης ρεύματος γραμμής (Line Current State Control strategy).....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Τρόποι τοποθέτησης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.....	49
3.1 Τοποθέτηση κινητών (onboard) συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.....	49
3.1.1 Κύρια χαρακτηριστικά.....	49
3.1.2 Έλεγχος.....	51
3.1.3 Τεχνολογίες αποθήκευσης	51
3.1.4 Εμπορικά παραδείγματα	52
3.2 Τοποθέτηση στατικών (stationary) συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας	53
3.2.1 Κύρια χαρακτηριστικά.....	53
3.2.2 Έλεγχος.....	55

3.2.3 Τεχνολογίες αποθήκευσης	56
3.2.4 Εμπορικά παραδείγματα	56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Θεωρητική ανάλυση βέλτιστης θέσης για στατικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο..... 59

4.1 Θεωρητική περιγραφή δικτύου.....	59
4.2 Μαθηματική μοντελοποίηση δικτύου.....	60
4.2.1 Μοντελοποίηση σιδηροδρομικού δικτύου.....	60
4.2.2 Μαθηματική περιγραφή της διέλευσης των τρένων	61
4.3 Κατασκευή συνάρτησης για την εύρεση της θέσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας...	62
4.4 Υπολογισμός βέλτιστης θέσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με αριθμητική εφαρμογή	64
4.4.1 Δεδομένα	64
4.4.2 Καθορισμός συνάρτησης θέσης.....	67
4.4.3 Καθορισμός συνάρτησης ρεύματος.....	68
4.4.4 Υπολογισμός τιμής σταθεράς γ και συνάρτησης βελτιστοποίησης.....	68
4.5 Συμπεράσματα	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μοντελοποίηση ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου στο Simulink και προσομοίωση λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένο σε υπερπυκνωτή 73

5.1 Περιγραφή μοντελοποίησης επιμέρους ηλεκτρικών μερών του δικτύου	73
5.1.1 Ηλεκτρικοί υποσταθμοί	73
5.1.2 Ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς	74
5.1.3 Τρένο	74
5.1.4 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	75
5.2 Προσομοιώσεις	80
5.2.1 Περιγραφή μεθοδολογιών.....	80
5.2.2 Προσομοίωση χωρίς σύστημα αποθήκευσης ενέργειας	81

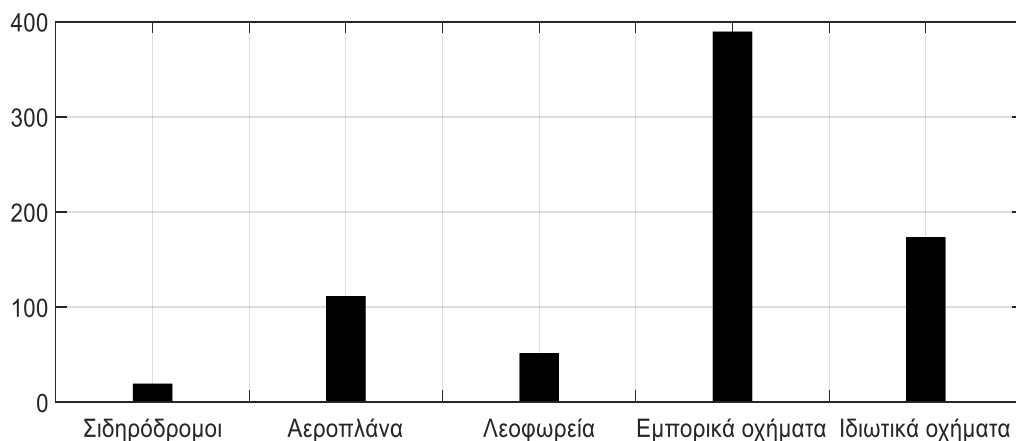
5.2.3 Προσομοίωση τοποθέτησης ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας	82
5.2.4 Προσομοίωση τοποθέτησης διαφόρων συνδυασμών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με κοινή συνολική χωρητικότητα	91
5.3 Συμπεράσματα	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση	95
6.1 Γενικά συμπεράσματα	95
6.2 Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση.....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Βιβλιογραφία	97

Ηλεκτρική ενέργεια στα σιδηροδρομικά δίκτυα

1.1 Εισαγωγή στα σιδηροδρομικά δίκτυα

Τα σιδηροδρομικά δίκτυα παίζουν σημαντικό ρόλο ως επίγεια μέσα μαζικής μεταφοράς. Παρά το θέμα της κοινωνικής τους αποδοχής στην εποχή της όλο και αυξανόμενης αυτοκίνησης στο δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα, τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά συστήματα αποκτούν μεγαλύτερη σημασία ως αποτέλεσμα πρόσφατων επιχειρημάτων για εξοικονόμηση ενέργειας και φιλικής προς το περιβάλλον βιωσιμότητας. Στην πραγματικότητα, η παγκοσμιοποίηση, η κλιματική αλλαγή και η αύξηση του πληθυσμού απαιτούν νέες και βελτιστοποιημένες μεθόδους μεταφοράς.

Ένα ουσιαστικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών σιδηροδρόμων σε σύγκριση με άλλους τρόπους μεταφοράς είναι η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτρέπει τη χρησιμοποίηση διαφόρων κύριων ενεργειακών πηγών. Αυτός είναι επίσης ο λόγος για την πρόσφατη εντατική τεχνική εξέλιξη στην ηλεκτροκίνηση από τις αυτοκινητοβιομηχανίες, που περιλαμβάνουν τεχνολογίες για υβριδικά οχήματα, καθώς και για οχήματα βασισμένα σε κυψέλες καυσίμου. Αυτή η αύξηση στην αναλογία ηλεκτροκίνησης προς μηχανοκίνηση/πετρελαιοκίνηση εκτιμάται ότι θα συνεισφέρει στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα χάρη στη μεταφορά και κατά συνέπεια βιώσιμη ανάπτυξη στην κίνηση. [2]



Διάγραμμα 1.1: Εκπομπές CO₂ για διαφορετικούς τρόπους μεταφοράς [2]

Η βιωσιμότητα είναι ζωτική για την εφαρμογή των σιδηροδρομικών μεταφορών. Δεδομένου ότι οι χώρες επιζητούν συνεχώς πιο βιώσιμα μέσα μεταφοράς, τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά συστήματα χρησιμοποιώντας ανανεώσιμη ενέργεια πληρούν στο ακέραιο αυτή την προϋπόθεση. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι σιδηρόδρομοι είναι εκ φύσεως πιο αποδοτικός τρόπος μεταφοράς από ότι οι οδικοί τρόποι και σε συνδυασμό με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μπορούν να παρέχουν μια πηγή κινητικότητας για τις μελλοντικές γενιές που θα διαρκεί, ενώ ταυτόχρονα θα μειώνει τις ποσότητες εκπομπών ρύπων. [2]

1.2 Ενεργειακή Κατανάλωση των τρένων

Η ζήτηση ενέργειας των σιδηροδρομικών οχημάτων μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, αναφορικά με τις απώλειες, οι οποίες και θα αναλυθούν διεξοδικά:

- **Μηχανικές απώλειες:** Η μηχανική ισχύς στους τροχούς χρειάζεται να ξεπεράσει τους διαφορετικούς τύπους αντιστάσεων που αντιμετωπίζει το τρένο (αντίσταση κίνησης, αδράνεια του οχήματος και αντίσταση κλίσης)
- **Απώλειες κίνησης στις γραμμές:** Η κίνηση των τροχών στις ηλεκτρικές γραμμές επιφέρει ένα συνακόλουθο ποσό θερμικών απωλειών.
- **Απώλειες βοηθητικών λειτουργιών:** Εμπεριέχουν τα βοηθητικά μέρη του τρένου που πρέπει να ηλεκτροδοτηθούν, όπως η ψύξη του κινητήρα και ο συμπιεσμένος κλιματισμός του αέρα. Επιπλέον, ένα υπολογίσιμο μερίδιο της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας χρειάζεται για κάποιες παροχές των επιβατών (π.χ. θέρμανση, φωτισμός, αποχωρητήρια κτλ)
- **Απώλειες γραμμής παροχής:** Στην περίπτωση ηλεκτροκίνησης, μέρος της ενέργειας δεν φτάνει στα οχήματα, αλλά χάνεται στον δρόμο από τον υποσταθμό μέχρι το όχημα.

1.2.1 Μηχανικές απώλειες

Λόγω του ότι η αδράνεια και η αντίσταση κλίσης (η δύναμη που, λόγω βαρύτητας, αντιστέκεται στην κίνηση του οχήματος όταν αυτό ανεβαίνει μια ανηφόρα/κλίση) είναι ανάλογες της μάζας του οχήματος, τα αποτελέσματά τους τις περισσότερες φορές αντιμετωπίζονται μαζί. Έτσι, η ενέργεια που περικλείεται στην επιτάχυνση και στην οδήγηση σε επικλινές επίπεδο δεν μετατρέπεται σε θερμότητα αλλά αποθηκεύεται ως κινητική και δυναμική και μπορεί επομένως να ανακτηθεί σε μεγάλο βαθμό από την αναγεννητική πέδηση (όσον αφορά στην ηλεκτροκίνηση). Το σχετικό μέρος της συνολικής ζήτησης

ενέργειας που αποκτάται από τα αποτελέσματα της αδράνειας και της κλίσης καθορίζεται σημαντικά από την μάζα των τρένων, την τοπογραφία του σιδηροδρομικού δικτύου και τον αριθμό των στάσεων.

Όσον αφορά στις απώλειες κινητικής ενέργειας, αυτές περιγράφονται από την εξίσωση (1.1), η οποία εμπεριέχει πολυάριθμα φαινόμενα θερμικής απαγωγής, διαφορετικές δυνάμεις τριβής του συστήματος τροχών-σιδηροδρομικών γραμμών και αντίσταση αέρα:

$$P_{loss,run} = (a + bvt + cvt^2)vt \quad (1.1)$$

Όπου οι συντελεστές a , b , c εξαρτώνται από τη σχεδίαση του τρένου και η v αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του τρένου. Ο συντελεστής a προέρχεται από τη μηχανική αντίσταση (τριβή), ενώ οι bv και cv^2 από την αντίσταση του αέρα, δίνονται συνήθως από τον κατασκευαστή και δεν είναι γενικές σταθερές αλλά εξαρτώνται από το τρένο (μάζα, μήκος κτλ) και τα χαρακτηριστικά των σιδηροδρομικών γραμμών.

Η σχετική σημασία της αντίστασης κίνησης για τη ζήτηση ενέργειας της λειτουργίας του τρένου εξαρτάται δυναμικά από το προφίλ ταχύτητας του συστήματος. Σε λειτουργία υψηλής ταχύτητας, όπου οι μέσες ταχύτητες είναι μεγάλες και οι τυπικές αποστάσεις μεταξύ των στάσεων μικρές, η αντίσταση κίνησης είναι η κυρίαρχη ποσότητα. Αυτό συμβαίνει σχεδόν αποκλειστικά λόγω της αντίστασης του αέρα, αφού η τριβή των γραμμών είναι γενικά μικρή. Κυρίως εξαρτάται από το βάρος του τρένου και σε έναν βαθμό από την κυρτότητα των γραμμών. Αντιθέτως, σε τρένα με βαριά φορτία, η τριβή τροχών-γραμμών παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας.

1.2.2 Απώλειες κίνησης στις γραμμές

Η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια των τροχών παρέχεται από την ηλεκτρική ενέργεια της κεντρικής γραμμής παροχής. Οι αλυσίδες που προκαλούνται από τη σύνδεση της κεντρικής γραμμής με τον τροχό προκαλούν μια επιπρόσθετη κατανάλωση ενέργειας με τη μορφή θερμικών απωλειών στα εμπλεκόμενα εξαρτήματα και στα βοηθητικά, όπως ο ανεμιστήρας. Για μεγαλύτερη απλούστευση όμως, γίνεται αναφορά μόνο στο ηλεκτρικό μέρος των απωλειών αυτών.

Η ενέργεια από την κεντρική γραμμή τροφοδοτεί μια περίπλοκη αλυσίδα μετατροπών και τελικά καταλήγει στους κινητήρες. Κάθε εξάρτημα που συμμετέχει σε αυτή τη φάση εμπεριέχει και ένα ορισμένο ποσό απώλειας θερμότητας. Για την αποφυγή υπερθέρμανσης του εξοπλισμού, χρειάζονται βοηθητικές συσκευές ψύξης.

Λόγω της χρησιμοποίησης DC γραμμών από τα αστικά ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα, απαιτείται η ύπαρξη διαφόρων DC ηλεκτρικών υποσταθμών τοποθετημένων κατά μήκος των γραμμών που συνδέουν τις γραμμές τροφοδοσίας με την κύρια παροχή. Αυτός ο τύπος των υποσταθμών επιτρέπει τη

ροή ισχύος με κατεύθυνση αποκλειστικά από το δίκτυο προς το σιδηροδρομικό σύστημα, γεγονός που συμβαίνει εξαιτίας των φθηνότερων λύσεων που προσφέρει η χρησιμοποίηση διόδων (για ελεγχόμενες ανορθώσεις) συγκριτικά με πιο προηγμένα ηλεκτρονικά ισχύος. Στη σημερινή εποχή όμως, πολλά τρένα είναι εφοδιασμένα με την τεχνική της αναγεννητικής πέδησης, γεγονός που δεν ευνοεί αυτόν τον περιορισμό ροής της ενέργειας.

Γενικά, ο εξοπλισμός ηλεκτρικής κίνησης συλλέγει απώλειες μεταγωγής και απώλειες αγωγιμότητας στους μετατροπείς και τους κινητήρες του οχήματος, όταν η ενέργεια ρέει από την ηλεκτρική προς τη μηχανική πλευρά και κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης. Οι πρώτοι όροι των απωλειών είναι ανεξάρτητοι από το ρεύμα του κινητήρα και συνεπώς από την ροπή της μηχανής, ενώ ο τελευταίος εξαρτάται από την ελκτική δύναμη και από το ρεύμα της μηχανής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για μοντελοποίηση των απωλειών, αλλά λαμβάνοντας υπόψη το εύρος των πιθανών σημείων λειτουργίας των κινητήρων, μια ακριβής εκτίμηση των απωλειών ισχύος προτείνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{loss_tract} = V_t I_{t,max} \frac{F_t(v_t)}{F_{t,max}(v_t)} \frac{1}{k} - F_t(v_t) v_t \quad (1.2)$$

όπου V_t αντιπροσωπεύει την τάση του παντογράφου του τρένου, $I_{t,max}$ είναι το ρεύμα που απορροφά το τρένο για μέγιστη ελκτική δύναμη $F_{t,max}$, $F_t / F_{t,max}$ είναι η αναλογία μεταξύ της πραγματικής και της μέγιστης ελκτικής δύναμης και k είναι ο συντελεστής ποιότητος, ο οποίος παίρνει τιμές από 0.55 ως 1 για τα αστικά σιδηροδρομικά οχήματα. Αυτός ο όρος είναι αντιπροσωπευτικός της αποδοτικότητας της αλυσίδας κίνησης και η τιμή του θα μπορούσε να αξιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη τις καμπύλες κατανάλωσης ρεύματος που δίνονται από τους κατασκευαστές των κινητήρων.

1.2.3 Απώλειες βοηθητικών λειτουργιών

Η βοηθητική ενέργεια δε χρησιμοποιείται μόνο στην ψύξη των κινητήρων και του μετατροπέα, αλλά περιλαμβάνει και τη λειτουργία του συστήματος πέδησης του οχήματος (π.χ συμπιεσμένος αέρας). Αναφορικά με τους επιβάτες, υπάρχει μια επιπρόσθετη ζήτηση ενέργειας για να διασφαλιστούν οι απαιτούμενες ανέσεις, όπως η θέρμανση, ο φωτισμός και ο εξαερισμός των βαγονιών. Η ενέργεια αυτή, η οποία τυπικά ανέρχεται στο 20% της ολικής καταναλισκόμενης ενέργειας του τρένου, παρέχεται από την πρωταρχική πηγή που χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση του τρένου (κεντρική γραμμή παροχής) και διανέμεται κατά μήκος του τρένου μέσω του βοηθητικού ζυγού παροχής.

1.2.4 Απώλειες γραμμής παροχής

Οι απώλειες στο σύστημα παροχής περιλαμβάνουν τις απώλειες μετατροπής στους υποσταθμούς, καθώς και τις απώλειες στις γραμμές παροχής. Υπάρχει ισχυρή εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος. Γενικά όμως, οι απώλειες μειώνονται με υψηλότερες τάσεις, γι' αυτό και τα DC συστήματα εξαιτίας των σχετικά χαμηλών τους τάσεων έχουν τις μεγαλύτερες απώλειες στην γραμμή παροχής.

Βασικά, οι απώλειες της γραμμής παροχής αποτελούνται από απώλειες Joule στους αγωγούς, που είναι ανάλογες με την αντίσταση των αγωγών και το τετράγωνο των ρευμάτων που τους διαρρέουν. Σ' ένα DC σύστημα με κόμβους από 1 ως N, οι απώλειες ισχύος των αγωγών μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{loss_line} = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N (V_i - V_j)^2 (-G_{ij}) \quad (1.3)$$

Όπου V_i είναι η τάση του δοθέντος κόμβου και G_{ij} αντιπροσωπεύει το στοιχείο ij στη μήτρα αγωγιμότητας των κόμβων, η οποία καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα ανάμεσα στους κόμβους.

Σ' αυτήν την κατηγορία απωλειών είναι κατάλληλο να συμπεριλάβουμε και τις απώλειες που λαμβάνουν χώρα στη μεταβλητή αντίσταση πέδησης, όταν η αναγεννητική πέδηση δεν λειτουργεί (π.χ. όταν το σύστημα δεν είναι δεκτικό). [2]

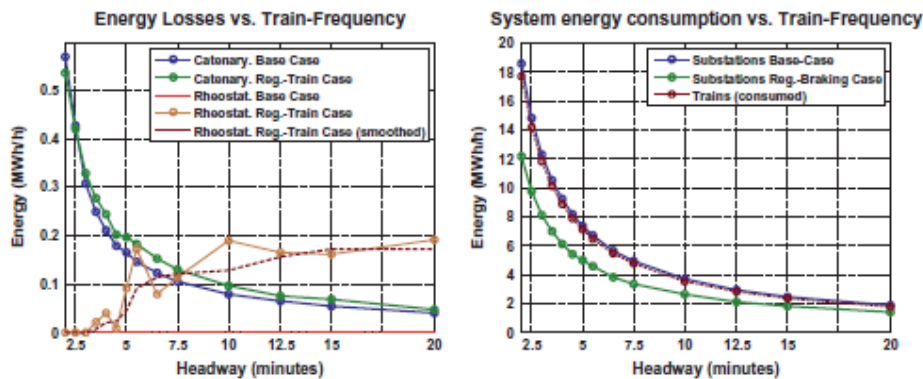
1.3 Εξοικονόμηση ενέργειας

Είναι γενικώς αποδεκτό ότι υπάρχει μια αξιοσημείωτη ικανότητα για εξοικονόμηση ενέργειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα, τόσο βραχυπρόθεσμη όσο και μακροπρόθεσμη. Κι ενώ οι τεχνολογικές βελτιώσεις στα σιδηροδρομικά οχήματα είναι σταδιακές και απαιτούν πολύ χρόνο για πλήρη υιοθέτηση, υπάρχουν πολλές υποσχόμενες στρατηγικές εξοικονόμησης ή λειτουργικές βελτιώσεις, που αφορούν στο πολύ αμεσότερο μέλλον. Πολλές απ' αυτές χρειάζονται μόνο μικρές επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες και συχνά βασίζονται σε «ελαφρείς» παράγοντες, όπως τα προγράμματα κατάρτισης. Η ενισχυμένη χρήση αποδοτικών ενεργειακών στρατηγικών και αναγεννητικής πέδησης είναι μέσα στις περισσότερο υποσχόμενες μεθόδους. Από μακροπρόθεσμη οπτική, η εισαγωγή καινοτόμων τεχνολογιών κίνησης, η αφομοίωση ενεργειακά αποδοτικών στόχων σε στρατηγικές οχημάτων και η βελτιστοποίηση των σιδηροδρόμων ως συστήματα θα επιφέρουν σημαντική πρόοδο προς την κατεύθυνση των ενεργειακά αποτελεσματικών και κοστολογικά εφικτών σιδηροδρομικών λειτουργιών. [2]

1.3.1 Σάρωση της πυκνότητας κυκλοφορίας των τρένων ως μέθοδος εκτίμησης της εξοικονόμησης ενέργειας

Μια μέθοδος για τη συστηματική ανάλυση των επιπτώσεων της εξοικονόμησης ενέργειας στις απώλειες ενός συστήματος και άρα και στην αποδοτικότητά του συνιστά η ανάλυση της πυκνότητας κυκλοφορίας των οχημάτων. Η πυκνότητα κυκλοφορίας εκφράζεται μέσω του headway, το οποίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών τρένων σε μια γραμμή. Παρ' όλο που είναι μέγεθος χώρου, το headway εκφράζεται συχνά σε λεπτά (min) στην βιβλιογραφία, αντιπροσωπεύοντας το χρόνο μεταξύ δύο συνεχόμενων διερχόμενων τρένων σε μια γραμμή. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας αντιστοιχεί σε μικρό headway και αντίθετα.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σάρωσης πυκνότητας κυκλοφορίας σ' ένα τυπικό παράδειγμα ενός υπόγειου σιδηρόδρομου. Στο αριστερό γράφημα φαίνονται οι ενεργειακές απώλειες (κεντρικής γραμμής και απορριπτικά φορτία), ενώ στο δεξιό η συνολική κατανάλωση ενέργειας των υποσταθμών, αμφότερες σε συνάρτηση της συχνότητας διέλευσης των διερχόμενων τρένων.



Σχήμα 1.1: Ανάλυση αποτελεσμάτων απωλειών και κατανάλωσης ενέργειας συναρτήσει της συχνότητας διέλευσης των τρένων [3]

Από τη μια πλευρά, μπορεί να παρατηρηθεί στο αριστερό διάγραμμα ότι οι απώλειες της κεντρικής γραμμής είναι πολύ υψηλές για υψηλές πυκνότητες κυκλοφορίας. Όσο η πυκνότητα μειώνεται, οι απώλειες της κεντρικής γραμμής πέφτουν σταθερά, αλλά αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό κλάσμα των απωλειών μέχρι υπερβολικά μικρές πυκνότητες κυκλοφορίας, όπως headway 15-20 λεπτών.

Από την άλλη πλευρά, τονίζεται ότι τα απορριπτικά φορτία λαμβάνουν χώρα νωρίς. Αυτό σημαίνει ότι εμφανίζονται σε αραιό σενάριο κυκλοφορίας, παραδείγματος χάρη headway 30 λεπτών. Έπειτα, σε 5-

10 λεπτά headway, γίνονται συγκρίσιμα με τις απώλειες της κεντρικής γραμμής, ενώ για υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας είναι κυρίαρχα.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα αυτά, μπορούν να εξαχθούν δύο βασικά συμπεράσματα:

- Η μείωση της αντίστασης της γραμμής τροφοδοσίας μπορεί να έχει σημαντικά οφέλη στην βελτίωση της επίδοσης του συστήματος, ειδικά σε σενάρια πυκνής κυκλοφορίας.
- Οι τεχνικές που προσανατολίζονται στη βελτίωση της δεκτικότητας του συστήματος στην αναγεννητική ενέργεια έχουν ενδιαφέρουσα προοπτική για βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας από ενεργειακής άποψης, αφού τα απορριπτικά φορτία εμφανίζονται στην αραιή κυκλοφορία. [3]

1.3.2 Μια θεώρηση για την κατανάλωση ενέργειας

Η μηχανή των τρένων επιτελεί δύο λειτουργίες ανάλογα τη φάση της κίνησης στην οποία αυτό βρίσκεται. Κατά την επιτάχυνση λειτουργεί ως κινητήρας, δηλαδή απορροφάει ενέργεια από το δίκτυο, ενώ κατά την επιβράδυνση αλλάζει κατάσταση και δρα ως γεννήτρια, αφού διοχετεύει το πλεόνασμα ενέργειας που έχει συγκεντρώσει πίσω στο δίκτυο. Συνεπώς, στο ισοζύγιο ενέργειας του συστήματος, σύμφωνα με τα παραπάνω, μπορούμε να θεωρήσουμε ως εισόδους την ενέργεια που αποδίδουν οι υποσταθμοί (E_{sub}) και την ανακτώμενη ενέργεια (E_{reg}), που ορίζεται ως ενέργεια που ρέει από τους κινητήρες στο ηλεκτρικό μέρος του συστήματος λόγω της πέδησης. Ως έξοδος, μπορεί να εκληφθεί η ενέργεια που καταναλώνεται από τα οχήματα, η οποία αναλύεται στην μηχανική ενέργεια (E_{mech}), στην ενέργεια του βοηθητικού εξοπλισμού (E_{aux}), στην ενέργεια που σπαταλάται στους ροοστάτες όταν το σύστημα δεν είναι δεκτικό στην αναγεννητική ενέργεια (E_{BR}) και στις ενεργειακές απώλειες στους αγωγούς της γραμμής ($E_{sub} - E_{line}$). Δηλαδή, ισχύει η σχέση:

$$E_{sub} + E_{reg} = E_{mech} + E_{aux} + E_{line} + E_{BR} \quad (1.4)$$

Επιπροσθέτως, παρακάτω παρουσιάζεται μια γενική σχέση για την καθαρή ενέργεια του τρένου σε κάποια χρονική στιγμή. Αν χ είναι η ενεργειακή απόδοση της αλυσιδωτής μετατροπής του οχήματος (E_{mech} / E_{sub}), π.χ το ποσοστό της απορροφούμενης ενέργειας από την κύρια γραμμή που πραγματικά μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια των τροχών, και β ο συντελεστής της ανακτώμενης ενέργειας της πέδησης, τότε η καθαρή ενέργεια που προσλαμβάνει το τρένο κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού ορίζεται ως εξής:

$$E_{net_tract} = \frac{1}{\chi} (E_{kin+pot} + E_{run} + E_{aux}) - \chi\beta E_{kin+pot} \quad (1.5)$$

Όπου $E_{kin+pot}$ είναι το άθροισμα της αδράνειας και της ενέργειας κλίσης που χρειάζεται στους τροχούς, E_{run} είναι η ενέργεια που απαιτείται στους τροχούς για να ξεπεράσουν την αντίσταση κίνησης (μηχανική τριβή + αντίσταση αέρα) και E_{aux} η ενέργεια των βοηθητικών λειτουργιών. Όπως έχει προαναφερθεί, το μη αντιστρεπτό μέρος $E_{kin+pot}$ αυτής της πρόσληψης μπορεί να ανακτηθεί από την αναγεννητική πέδηση. Σημειώνεται ότι ο όρος $\chi\beta E_{kin+pot}$ ισούται με την ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας που ανακτάται από το όχημα.

Οι κύριες στρατηγικές για εξοικονόμηση ενέργειας προέρχονται από την προηγούμενη σχέση. Κάθε μια από τις ποσότητες εξόδου στην σχέση (1.5) θα μπορούσαν να επηρεαστούν για τη μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης. Επιγραμματικά σημειώνεται ότι:

- Μείωση της μάζας του οχήματος μειώνει την $E_{kin+pot}$
- Βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής και της τριβής του οχήματος μειώνει την E_{mech}
- Μείωση των απωλειών μετατροπής στο κινούμενο βαγόνι αυξάνει την ενεργειακή απόδοση χ
- Αυξάνοντας την αποδοτικότητα των βοηθητικών λειτουργιών μειώνεται η E_{aux}
- Βελτίωση της ικανότητας του οχήματος να χρησιμοποιεί αναγεννητική πέδηση ή της δεκτικότητας του δικτύου αυξάνει το β

1.3.3 Δυναμική – Αναγεννητική πέδηση

Τα αστικά σιδηροδρομικά συστήματα παίζουν βασικό ρόλο στην αειφόρο ανάπτυξη των μητροπολιτικών περιοχών για πολλούς λόγους, αλλά κυρίως λόγω της σχετικά χαμηλής αναλογίας κατανάλωσης ενέργειας ως προς την ικανότητα μεταφοράς που διαθέτουν. Παρόλα αυτά, για να διατηρήσουν τα περιβαλλοντικά τους πλεονεκτήματα σε σχέση με τα άλλα μέσα μεταφοράς, σε μια εποχή που χαρακτηρίζεται από τις ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις για μεγάλη ικανότητα μεταφοράς και μικρό ενεργειακό κόστος, σημαντικές βελτιώσεις στην αποδοτικότητα τους πρέπει να επιτευχθούν.

[1]

Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό κατά το φρενάρισμα του οχήματος, κοινώς γνωστή ως δυναμική πέδηση, βασίζεται στην ικανότητα των ηλεκτρικών κινητήρων να συμπεριφέρονται επίσης και ως γεννήτριες. Η χρήση αυτού του είδους της πέδησης είναι ευρέως διαδεδομένη στις σιδηροδρομικές μεταφορές καθώς, σε αντίθεση με την πέδηση λόγω τριβής, δεν παράγει φθορά, σκόνη, οσμή, θερμότητα ή ήχο. Κατά την πέδηση, ο αναπαραγόμενος ηλεκτρισμός μπορεί είτε να διαχέεται σε μεταβλητές αντιστάσεις (ροοστατική πέδηση), είτε να επαναχρησιμοποιείται από το ίδιο το δίκτυο (αναγεννητική πέδηση – regenerative braking). Πριν τη ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος τις τελευταίες δεκαετίες, η ροοστατική πέδηση ήταν η μόνη διαθέσιμη επιλογή. Όμως, με την σύγχρονη

τεχνολογία, η αναγεννητική πέδηση δείχνει να αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα ηλεκτρικά αστικά δίκτυα μεταφοράς. [1]

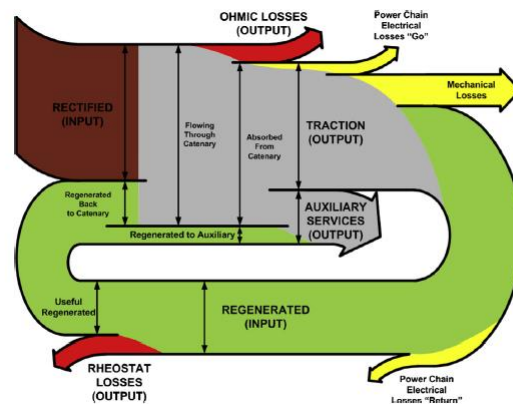
Κανονικά, στην αναγεννητική πέδηση, η ανακτώμενη ενέργεια χρησιμοποιείται αρχικά για την τροφοδότηση των βοηθητικών λειτουργιών του ίδιου του οχήματος (φωτισμός, κλιματισμός κ.α). Έπειτα, η ποσότητα της ενέργειας που απομένει ως πλεόνασμα μπορεί να επιστραφεί στην γραμμή παροχής ρεύματος για χρήση από άλλα οχήματα του ίδιου δικτύου. Όμως, τα δίκτυα διανομής συνεχούς ρεύματος (DC), τα οποία είναι κυρίως αυτά που χρησιμοποιούνται σε σιδηροδρομικές αστικές συγκοινωνίες, δεν είναι πάντα δεκτικά, δηλαδή δεν μπορούν πάντοτε να απορροφήσουν την ανακτώμενη ενέργεια της πέδησης. Γενικά, η ανακτώμενη πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να σταλεί πίσω στο δίκτυο παροχής μόνο όταν μια ταυτόχρονη κατανάλωση λαμβάνει χώρα, για παράδειγμα όταν ένα άλλο τρένο επιταχύνεται στο ίδιο ηλεκτρικό τμήμα. Για να καταναλώσουν την ενέργεια αυτή που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το σύστημα, τα οχήματα είναι εξοπλισμένα συνήθως με απορριπτικά φορτία, τα οποία προκαλούν όχι μόνο επιπρόσθετο βάρος και κόστος, αλλά και πιθανό κίνδυνο πυρκαγιάς. [1]

Εκτός του ότι η ενέργεια από την αναγεννητική πέδηση μπορεί να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση των σιδηροδρομικών δικτύων σε σημαντικό ποσοστό (ανάλογα και τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος), επιπλέον μπορεί και να μετριάσει αρκετά προβλήματα που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς, όπως οι πτώσεις τάσης στις γραμμές παροχής ή οι υψηλές καταναλώσεις μέγιστης ισχύος. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο για τις υπόγειες εφαρμογές, όπως το Μετρό, αποτελεί η συνεισφορά της αναγεννητικής πέδησης στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε θέρμανση, εξαερισμό και κλιματισμό (HVAC), ελαχιστοποιώντας τα θερμικά φορτία σε σήραγγες και σταθμούς. [1]

Παρόλα τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα της αναγεννητικής πέδησης, στη σημερινή εποχή η ανακτώμενη ενέργεια κυρίως διαχέεται σε φορτία ηλεκτρικών αντιστάσεων και μόνο ένα μικρό μέρος αυτής χρησιμοποιείται για την παροχή των βοηθητικών συστημάτων του οχήματος ή επιστρέφεται στο δίκτυο. Μια πιθανή αιτία είναι πως οι τεχνολογίες που δίνουν τη δυνατότητα για αποδοτική εκμετάλλευση αυτής της ενέργειας έχουν καταστεί πρόσφατα διαθέσιμες. Η έλλειψη εμπειρίας, λοιπόν, κάνει τους διαχειριστές του δικτύου και τις αρχές διστακτικούς στο να δοκιμάσουν επενδύσεις στα συστήματα αναγεννητικής ενέργειας πέδησης, ως μέτρο για την αύξηση της αποδοτικότητας στα σιδηροδρομικά δίκτυα. [1]

Το σχήμα 1.2 αντιπροσωπεύει τη ροή της ενέργειας στην γενικευμένη περίπτωση ενός τυπικού DC σιδηροδρομικού δικτύου, όπου τρένα αναπαράγουν ενέργεια κατά τη διάρκεια της φάσης της πέδησης (αναγεννητική ή δυναμική πέδηση). Η ενέργεια αυτή ανατροφοδοτείται στο σύστημα και επαναχρησιμοποιείται από άλλα τρένα ή από τα ίδια όταν φρενάρουν για την κατανάλωση του βοηθητικού τους εξοπλισμού. Αν τα τρένα δεν είναι εξοπλισμένα με σύστημα αναγεννητικής πέδησης, τότε το πράσινο βέλος δεν θα υπάρχει και όλη η ενέργεια που θα καταναλώνεται απ' αυτά, θα

απελευθερώνεται στους ανορθωτές των ηλεκτρικών υποσταθμών. Επιπλέον, όλη η ενέργεια που χρησιμοποιείται για να κατανικηθεί η αδράνεια και η αντίσταση κλίσης θα μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση πέδησης και στα μηχανικά φρένα. [2]



Σχήμα 1.2: Ροή ενέργειας σε DC σύστημα σιδηροδρομικού δικτύου [3]

1.3.4 Άλλες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας

Οι παρακάτω τεχνικές θα μπορούσαν επίσης να βελτιώσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος, επηρεάζοντας το ηλεκτρικό του μέρος:

- *Επίπεδο τάσης:* Όσο αναβαθμίζεται το επίπεδο της τάσης, τα ρεύματα στους αγωγούς μειώνονται. Έτσι, μειώνονται και οι ωμικές απώλειες. Πρακτικοί περιορισμοί για την αύξηση της τάσης είναι τα πρότυπα απομόνωσης και ασφάλειας και η τεχνολογία των ημιαγωγών του μετατροπέα. Τα καθορισμένα επίπεδα τάσης στα DC δίκτυα είναι 600V, 750V (σύνηθες), 1.5kV και 3kV.
- *Τάση κενού φορτίου:* Όταν καθοριστεί το επίπεδο τάσης, η ρύθμιση τάσης του μετασχηματισμού του υποσταθμού επιτρέπει την προσαρμογή της τάσης κενού φορτίου του συστήματος. Η αύξηση την τάσης αυτής επιφέρει περαιτέρω μείωση στις ωμικές απώλειες και βοηθάει στην αποφυγή χαμηλών τάσεων στα τρένα. Από την άλλη, μειώνει το περιθώριο τάσης των τρένων για αναγεννητική ισχύ, αφού οι τάσεις τους είναι κοντινότερα στο μέγιστο επιτρεπτό όριο κι έτσι καλούνται γρηγορότερα να στείλουν ενέργεια στους ροοστάτες κατά την πέδηση, γεγονός που μειώνει την ικανότητα τους για αναπαραγωγή ενέργειας.
- *Σύνθετη αντίσταση αγωγών:* Ορίζει τις πτώσεις τάσης (και άρα τις απώλειες) και την μέγιστη ισχύ που θα μεταδοθεί σε μια δεδομένη απόσταση. Ως συνέπεια αυτού, μείωση της σύνθετης

αντίστασης των αγωγών αναμένεται όχι μόνο να μειώσει τις ωμικές απώλειες, αλλά και να αυξήσει τη δεκτικότητα του συστήματος σε αναγεννητική ισχύ.

- *Σύνδεση ηλεκτρικών τμημάτων:* Αν οι τάσεις των υποσταθμών δεν είναι ίσες και αυτοί συνδέονται μέσω της γραμμής τροφοδοσίας, θα προκύψουν προβλήματα παρασιτικών ρευμάτων στο σύστημα. Με την τμηματοποίηση της γραμμής τροφοδοσίας αποφεύγονται τέτοιου είδους σφάλματα, όμως η τεχνική αυτή μειώνει δραματικά τη δεκτικότητα του συστήματος στην αναγεννητική πέδηση. Για το λόγο αυτό, στις μέρες μας δεν χρησιμοποιείται στα DC σιδηροδρομικά δίκτυα. [3]

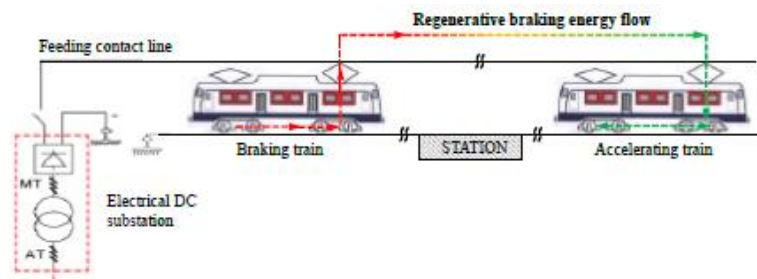
1.4 Μεγιστοποίηση ανταλλαγής αναγεννητικής ενέργειας μεταξύ των οχημάτων

Για τη μεγιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας που ανακτάται από την αναγεννητική πέδηση και συνεπώς, την ελαχιστοποίηση της ανάγκης για αντιστάτες επί του οχήματος (on-board), υπάρχουν δύο βασικές εναλλακτικές που μελετώνται:

- Εξοπλισμός των τρένων με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία προσωρινά θα έχουν τη δυνατότητα συσσώρευσης της πλεονάζουσας ανακτώμενης ενέργειας και απελευθέρωσής της στην επόμενη φάση επιτάχυνσης
- Βελτίωση της δεκτικότητας του δικτύου, γεγονός που απαιτεί την εισαγωγή επιπρόσθετων φορτίων στο σύστημα, τα οποία θα απαιτούν ενέργεια την ίδια στιγμή που θα συμβαίνει η φάση της πέδησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους:
 - Βελτιστοποίηση των προγραμματισμένων δρομολογίων των τρένων, ώστε να συγχρονίζονται κατά το δυνατόν οι φάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσής τους
 - Εγκατάσταση συσκευών αποθήκευσης σε υποσταθμούς ή κατά μήκος των σιδηροδρομικών γραμμών, οι οποίες θα μπορούσαν να απορροφούν την πλεονάζουσα ανακτώμενη ενέργεια, διοχετεύοντάς την όταν αυτή απαιτείται από την επιτάχυνση άλλων οχημάτων
 - Εξοπλισμός των υποσταθμών με αντιστροφείς συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (DC to AC inverters), έτσι ώστε η αναγεννητική ενέργεια να μπορεί να δοθεί στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης, το οποίο είναι φύσει δεκτικό. [1]

1.4.1 Βελτιστοποίηση δρομολογίων

Η δεκτικότητα του δικτύου μπορεί να οριστεί ως η αναλογία της ολικής ενέργειας που γυρνάει πίσω στη γραμμή ως προς την ενέργεια που θα μπορούσε να αναπαραχθεί στην διαδικασία της πέδησης (κινητική και δυναμική). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ανάκτηση της δυναμικής ενέργειας εξαρτάται κυρίως από το προφίλ των γραμμών και τη συχνότητα των στάσεων, και άρα είναι δεδομένη για κάθε σύστημα, ένας απλός τρόπος να βελτιώσουμε τη δεκτικότητα της γραμμής είναι η αύξηση των τρένων που επιταχύνονται και επιβραδύνονται ταυτόχρονα. Σημειώνεται ότι αν ένα όχημα επιβραδύνει ενώ ένα άλλο επιταχύνει στο ίδιο ηλεκτρικό τμήμα, η αναπαραγόμενη ενέργεια μπορεί αμέσως να μεταφερθεί από το ένα στο άλλο διαμέσου της γραμμής παροχής ισχύος, όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση ροής ενέργειας κατά την αναγεννητική πέδηση [2]

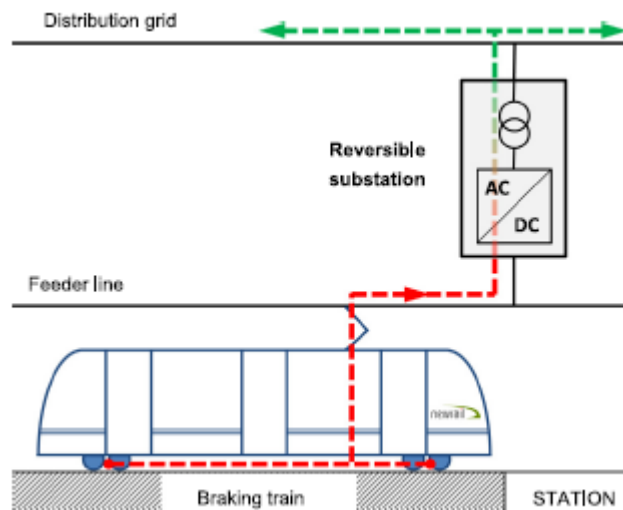
Ένας προσεκτικός σχεδιασμός του προγράμματος λειτουργίας των τρένων ίσως έτσι οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε ολόκληρο το σύστημα. Επίσης, η βελτιστοποίηση του χρονοδιαγράμματος μπορεί να περιορίσει την ταυτόχρονη επιτάχυνση πολλών οχημάτων, και άρα να μειώσει την μέγιστη ισχύ και επομένως και το κόστος επένδυσης και λειτουργίας.

Κάπου εδώ πρέπει να σημειωθεί πως μια επιτυχής εφαρμογή των βελτιστοποιημένων χρονοδιαγραμμάτων απαιτεί την παρουσία ενός συστήματος ελέγχου πραγματικού χρόνου το οποίο, εκτός από το να συμβουλεύει τους οδηγούς για τις ώρες αναχώρησης και τις στρατηγικές οδήγησης, θα δίνει τη δυνατότητα αυτόματου επανυπολογισμού του προγράμματος, σε περίπτωση απρόβλεπτων συμβάντων, όπως καθυστερήσεις ή ατυχήματα. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή μιας τέτοιας τεχνολογίας λογισμικού αντιπροσωπεύει σχετικά χαμηλά επενδυτικά κόστη, ειδικά αν συγκριθεί με την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ή υποσταθμών διπλής κατεύθυνσης ισχύος. Για το λόγο αυτό, η βελτιστοποίηση των χρονοδιαγραμμάτων θα πρέπει να θεωρείται ως η πρώτη επιλογή για θεώρηση, όταν ο σκοπός είναι η αύξηση των ωφελειών της αναγεννητικής πέδησης στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα.

1.4.2 Υποσταθμοί διπλής κατεύθυνσης ισχύος (Reversible substations)

Στα DC δίκτυα, οι υποσταθμοί κανονικά παρέχουν ρεύμα μόνο προς μία κατεύθυνση (ισχύ σε τρένα) και δεν έχουν τη δυνατότητα να οδηγήσουν τον ηλεκτρισμό που παράγεται στο σύστημα πίσω στο δίκτυο διανομής. Αυτό συμβαίνει διότι οι συμβατικοί σταθμοί χρησιμοποιούν ανορθωτές διόδων που επιτρέπουν μόνο μονής κατεύθυνσης ροή ισχύος. Αντίθετα, οι υποσταθμοί διπλής κατεύθυνσης ισχύος περιλαμβάνουν έναν αντιστροφέα με λειτουργία διπλής κατεύθυνσης (σχήμα 1.4). Αυτό σημαίνει ότι η περισσευούμενη αναγεννητική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο του διαχειριστή (φωτισμός, κλιμακοστάσιο, γραφεία κτλ) ή τελικά να πουληθεί πίσω στον πάροχο ενέργειας, ανάλογα με τη νομοθεσία της κάθε χώρας ή κοινότητας.

Παρόλο που ο κύριος σκοπός των υποσταθμών αυτών είναι να μεγιστοποιούν την ανάδραση της ενέργειας πέδησης στο εξωτερικό δίκτυο, θα πρέπει να έχουν ως προτεραιότητα τη φυσική ανταλλαγή της αναγεννητικής ενέργειας ανάμεσα στα οχήματα. Επιπρόσθετα, οι υποσταθμοί διπλής κατεύθυνσης ισχύος απαιτείται να ελαχιστοποιούν το επίπεδο των αρμονικών συνιστωσών, διασφαλίζοντας καλή ποιότητα παροχής ισχύος και στην AC και στην DC πλευρά, ενώ η διατήρηση της τάσης εξόδου στην κανονική λειτουργία και στη λειτουργία αναγεννητικής ενέργειας για μείωση των απωλειών είναι ένας ακόμα σημαντικός ρόλος που καλούνται να επιτελέσουν.



Σχήμα 1.4: Σχηματική αναπαράσταση αντιστρεπτού υποσταθμού σε αστικό σιδηροδρομικό δίκτυο [1]

Οι αντιστροφείς τυπικά αποτελούνται από IGBTs ή MOSFETs, που επιτρέπουν στη ροή του ρεύματος να κυκλοφορεί και προς τις δύο κατευθύνσεις. Εκτός από τη λειτουργία αυτή, η χρήση των ανορθωτικών αυτών διατάξεων αντί για κοινούς ανορθωτές διόδων μπορεί να παράξει επιπλέον πλεονεκτήματα, όπως καλύτερη ρύθμιση τάσης και περιορισμό του ρεύματος σφάλματος.

Συγκρινόμενη με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, η ανάκτηση της ενέργειας πέδησης μέσω των υποσταθμών διπλής κατεύθυνσης ισχύος μπορεί να θεωρηθεί πιο αποδοτική επιλογή, καθώς παρουσιάζει μικρότερες απώλειες μετασχηματισμού, ακόμα κι αν οι απώλειες αντίστασης είναι σχετικά υψηλές. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα αυτού του είδους των υποσταθμών σε σχέση με τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν ο μειωμένος χώρος που καταλαμβάνουν, οι χαμηλότεροι περιορισμοί ασφαλείας που χρειάζονται και η ήπια συντήρηση που απαιτούν. Εξάλλου, η εφαρμογή, η συντήρηση και η επισκευή τους δεν επηρεάζουν τη λειτουργία του σιδηροδρομικού συστήματος. Αντίθετα, δεν επιτρέπουν λειτουργία των οχημάτων ελεύθερη από τη σύνδεση τους με την κύρια γραμμή παροχής και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σταθεροποίηση της τάσης ή για μείωση της μέγιστης ισχύος.

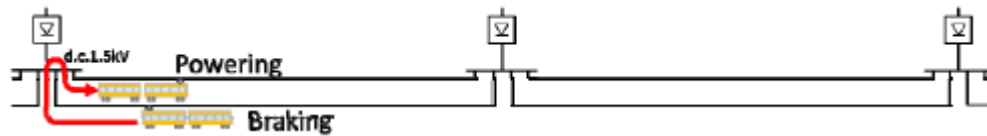
Ένα από τα κύρια εμπόδια για τη χρήση των υποσταθμών διπλής κατεύθυνσης ισχύος σε αστικά σιδηροδρομικά συστήματα είναι τα υψηλά επενδυτικά κόστη που σχετίζονται με την εγκατάστασή τους. Ως ένας τρόπος μείωσης της περιόδου αποπληρωμής, η ενέργεια που στέλνεται πίσω στο δίκτυο θα μπορούσε να μεγιστοποιηθεί μειώνοντας την ανταλλαγή της αναγεννητικής ενέργειας μεταξύ των τρένων. Όμως, αυτό θα απαιτούσε μια σε βάθος οικονομική μελέτη σχετική, όχι μόνο με τις τιμές της ενέργειας που καθορίζονται από τον διαχειριστή του δημόσιου δικτύου, αλλά και με την αύξηση της κατανάλωσης ισχύος εξαιτίας της μικρότερης ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των οχημάτων. Ανάλογα με τη διαμόρφωση της γραμμής, εκτιμάται ότι η περίοδος αποπληρωμής κυμαίνεται περίπου στα 3 χρόνια.

[2]

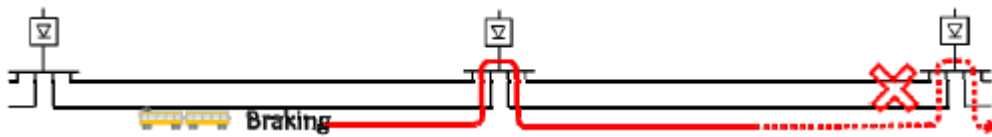
1.4.3 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems-ESS)

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αναμένεται κι αυτά να αυξήσουν τη δεκτικότητα του συστήματος και άρα να μειώσουν τις απώλειες στα απορριπτικά φορτία, αλλά η διαφορά με τους υποσταθμούς διπλής κατεύθυνσης ισχύος έγκειται στο ότι μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια από την πέδηση όταν το σύστημα δεν είναι δεκτικό και να την απελευθερώσουν σε μετέπειτα χρονική στιγμή. Από την οπτική της απόδοσης, η χρήση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επιδεικνύει υψηλότερες απώλειες από τους υποσταθμούς, ειδικά όταν το επίπεδο φόρτισής τους είναι χαμηλό και η ισχύς υψηλή. Παρόλα αυτά, συνιστούν ενδιαφέρουσα επιλογή σε κάποιες περιπτώσεις, όπως σε χώρες όπου η επιστροφή ισχύος στο κυρίως δίκτυο δεν επιφέρει χρηματική αμοιβή ή είναι αδύνατη αν δεν υπάρχουν αντιστροφείς διπλής κατεύθυνσης στους υποσταθμούς[2].

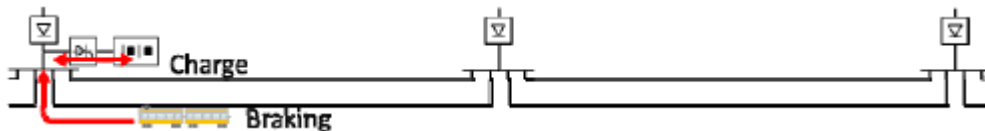
Στο σχήμα 1.5 φαίνεται το απλοποιημένο σκεπτικό της επίδρασης της εγκατάστασης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε DC ηλεκτρικό σύστημα παροχής. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5(α), αν υπάρχει επιταχυνόμενο τρένο γειτονικό με το τρένο που φρενάρει με αναγεννητική πέδηση, η αναγεννητική ενέργεια από το επιβραδυνόμενο τρένο καταναλώνεται από το επιταχυνόμενο τρένο ταυτόχρονα. Εξαιτίας της πτώσης τάσης στο κυρίως σύστημα παροχής όμως, είναι απίθανο να μεταφερθεί η αναγεννητική αυτή ενέργεια σε μεγάλη απόσταση και έτσι ακυρώνεται αν δεν είναι κανένα επιταχυνόμενο τρένο κοντά στο επιβραδυνόμενο, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5(β). Για την αποφυγή αυτής της απώλειας ενέργειας, εγκαθίσταται ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας στη γραμμή, το οποίο φορτίζεται με την περίσσεια αναγεννητικής ενέργειας του επιβραδυνόμενου τρένου και χρησιμοποιείται για τη μετέπειτα παροχή σε κάποιο άλλο επιταχυνόμενο τρένο, όταν το τελευταίο διέλθει από το σημείο που βρίσκεται το σύστημα αποθήκευσης [5].



(α) Πέδηση με επιταχυνόμενο τρένο



(β) Πέδηση χωρίς επιταχυνόμενο τρένο



(γ) Πέδηση χωρίς επιταχυνόμενο τρένο με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Σχήμα 1.5: Λειτουργία συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε DC σύστημα παροχής [5]

Υπάρχει μια σειρά από διαφορετικά είδη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και σημαντικές διαφορές στη λειτουργία τους ανάλογα με την εγκατάστασή τους. Όλα αυτά τα ενδεχόμενα θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

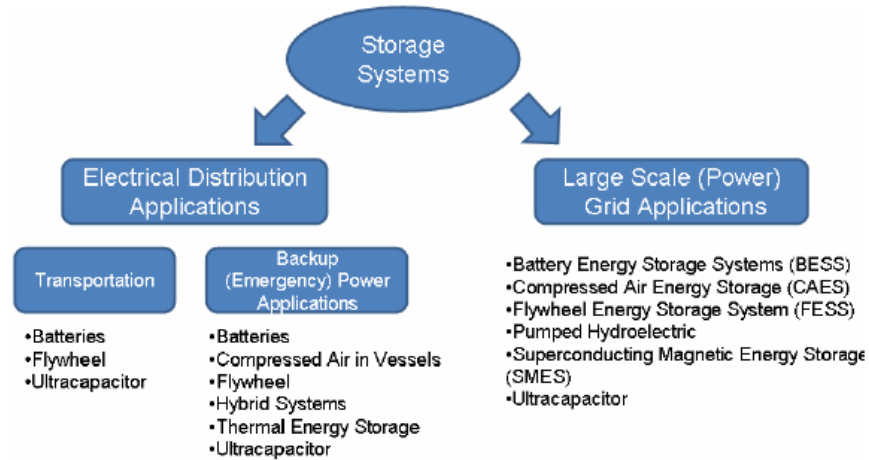
2.1 Ρόλος και λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems) δεν αποτελούν καινοτόμο λύση στη λειτουργία των συστημάτων ενέργειας, καθώς ο ρόλος τους να παρέχουν υποστηρικτικές υπηρεσίες, όπως η εφεδρική τροφοδοσία, υπάρχει εδώ και δεκαετίες. Τελευταία όμως, η διαρκής αύξηση της ζήτησης και η υψηλή διείσδυση μεταβλητών πηγών παραγωγής χωρίς προβλεπόμενη σταθερή απόδοση, όπως η αιολική και η ηλιακή παραγωγή, σε συνδυασμό με την απελευθέρωση της ενεργειακής αγοράς, δημιούργησαν πολλές ευκαιρίες για την αφομοίωση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε διάφορα επίπεδα του ηλεκτρικού δικτύου. Διαφορετικές απαιτήσεις ανάλογα με το επίπεδο του συστήματος, διαφορετικές τεχνολογίες αποθήκευσης, καθώς και διαφορετικές τεχνολογίες ενός συγκεκριμένου τύπου αποθήκευσης που χαρακτηρίζεται από τεχνικοοικονομικούς περιορισμούς υποδηλώνουν πως δεν υπάρχει μια ενοποιημένη λύση για την εφαρμογή, την τοποθέτηση και τον καθορισμό του μεγέθους των ESS [20].

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι ένα εργαλείο μεγάλου ενδιαφέροντος, δεδομένου ότι μπορούν να παίζουν ζωτικό ρόλο στη βελτίωση της ευελιξίας και της αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων και στην διαθεσιμότητα των διαφορετικών ενεργειακών πηγών. Η πιθανότητα χρήσης των συστημάτων αυτών στα περισσότερα μέρη ενός δικτύου έχει καταστήσει δυνατή τη διαδικασία συσσώρευσης ενέργειας με τρόπο πιο αποδοτικό, οικονομικό και περιβαλλοντικά φιλικό σε έναν αξιοσημείωτο αριθμό από τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας, που εμπλέκουν διάφορες μεθόδους και συστήματα. [1] Η ανάγκη για χρησιμοποίηση ενός ESS μπορεί να προκύψει στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Όταν είναι αναγκαίο να τροφοδοτήσουμε φορτία ηλεκτρικής ισχύος, όπου η κύρια πηγή ισχύος είναι μη διαθέσιμη εξαιτίας σφαλμάτων ή συντήρησης (backup power)
- Όταν υπάρχει απαίτηση για άμεση διαθεσιμότητα ενέργειας επί των οχημάτων με ηλεκτρική πρόωση, ακόμα και μερική
- Όταν εμφανίζεται μεγάλη ανάγκη για πρώιμη διαθεσιμότητα επιπλέον ισχύος η οποία δεν μπορεί να παρασχεθεί από την υπάρχουσα εγκατάσταση

- Όταν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια σε χρήσιμη μορφή αλλά δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως, λόγω απουσίας ζήτησης



Σχήμα 2.1: Χρήσεις συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [9]

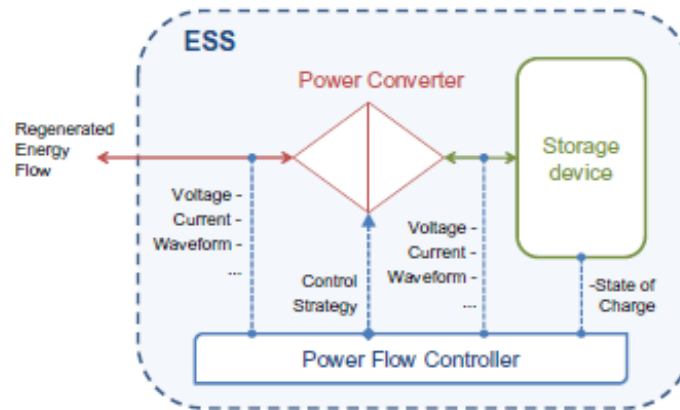
Οι κύριες παράμετροι που καθορίζουν ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι εξής:

- Η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Capacity, kWh), η οποία καθορίζεται από το μέγεθος της τεχνολογίας αποθήκευσης
- Η ικανότητα απορρόφησης ισχύος (Power rating, kW), η οποία σχετίζεται άμεσα με το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να μεταφερθεί ανάμεσα στην κύρια παροχή και το σύστημα αποθήκευσης
- Οι κύκλοι φόρτισης, ή αλλιώς, πόσους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης μπορεί να διαχειριστεί το σύστημα αποθήκευσης μέσα στο χρόνο ζωής του
- Η ικανότητα μετατροπής ισχύος
- Η τάση ελέγχου, η τάση φόρτισης και η τάση εκφόρτισης (V)
- Το μέγιστο ρεύμα (φόρτισης ή εκφόρτισης) (A) [22]

2.2 Τυπικές διατάξεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

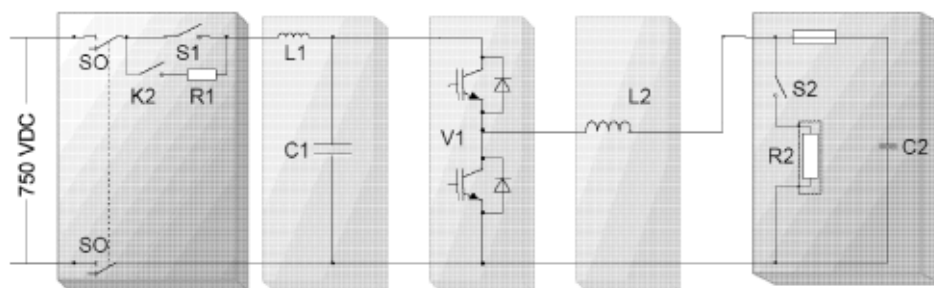
Στον όρο σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας εμπεριέχονται τρία κύρια μέρη που αποτελούν τη βασική διάταξη του συστήματος και επιτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες, όπως φαίνεται και στο

σχήμα 2.2. Το ίδιο το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, ένας μετατροπέας ηλεκτρικής ισχύος, που εγγυάται την σωστή λειτουργία της ροής ενέργειας εισόδου και εξόδου και μια μονάδα ελέγχου, που διαχειρίζεται γρήγορα και αποδοτικά τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος.



Σχήμα 2.2: Διάταξη ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε σιδηροδρομικές εφαρμογές [1]

Στο σχήμα 2.3 εμφανίζεται η κυκλωματική αναπαράσταση των επιμέρους μερών ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένο σε τεχνολογία αποθήκευσης με υπερπυκνωτές, όπου μπορεί να γίνει κατανοητή η σύνδεση των επιμέρους στοιχείων με το DC δίκτυο των 750V. Το στοιχείο C_2 αποτελείται από πολλές εν σειρά συστοιχίες πυκνωτών συνδεδεμένες παράλληλα, με τον καθένα να έχει ονομαστική τάση 2.3V. Αυτή η τοπολογία είναι πολύ συνηθισμένη στις πρακτικές εφαρμογές.



Σχήμα 2.3: Κυκλωματική σύνδεση κύριων στοιχείων συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένου σε υπερπυκνωτές [14]

2.3 Εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα

2.3.1 Απαιτήσεις

Οι πιο διερευνημένες απαιτήσεις για αστικές σιδηροδρομικές εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας θα μπορούσαν να συνοψιστούν στις παρακάτω:

- Ο χρόνος έχει εύρος από δευτερόλεπτα έως λεπτά
- Οι αιχμές υψηλής ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης κυμαίνονται τυπικά μεταξύ 0.1 και 10 MW
- Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης είναι πολύ μεγάλος, μεταξύ 100,000 και 300,000 ανά έτος
- Οι ενεργειακές χωρητικότητες είναι ενδιάμεσες, ενώ το βάρος και ο όγκος μειωμένα

Συνεπώς, η φορητότητα, η επεκτασιμότητα και η πυκνότητα ενέργειας και ισχύος αποτελούν αναμφίβολα πολύ σημαντικά κριτήρια απόδοσης των ESS [23].

2.3.2 Άμεσες εφαρμογές

Στα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά οχήματα, λόγω της περιοδικής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης καθώς κινούνται από σταθμό σε σταθμό, η κατανάλωση ενέργειας δεν ακολουθεί κάποια ομαλή διαδικασία. Έτσι, η χρήση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να λειτουργήσει ιδιαίτερα ωφέλιμα στην εξομάλυνση της ζήτησης ισχύος του τρένου. Τα ESS λοιπόν έχουν τη δυνατότητα:

- να εγκατασταθούν στον ηλεκτρικό υποσταθμό, τροφοδοτώντας το δίκτυο των τρένων
- να εγκατασταθούν επί του τρένου
- να χρησιμεύσουν στην υβριδοποίηση σιδηροδρομικών συστημάτων που λειτουργούν με ντιζελογεννήτριες, βελτιώνοντας την αποδοτικότητά τους.

Οι δύο πρώτες χρήσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας αναλύονται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο. [7]

2.4 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

Οι τεχνολογίες των ESS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη μορφή ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης σε μηχανικές, ηλεκτροχημικές, χημικής ενέργειας, ηλεκτρικές και θερμικές. Συγκεκριμένα, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται σε μια διαδικασία μετατροπής της

ηλεκτρικής ενέργειας από ένα δίκτυο σε μια μορφή που μπορεί να αποθηκευτεί για να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια όποτε χρειάζεται. Παράγοντες κλειδιά μιας τεχνολογίας ESS είναι οι φυσικές εγκαταστάσεις, οι αλληλεπιδράσεις με τις υπάρχουσες μορφές και χρήσεις αερίων, οι βέλτιστες χημικές διαδικασίες, η ασφάλεια, η αξιοπιστία και η αποδοτικότητα [6].

Σε αυτή την ενότητα η παρούσα διπλωματική επιχειρεί μια σύντομη περιγραφή και ανάλυση των διαφόρων τεχνολογιών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σχετικών με σιδηροδρομικές εφαρμογές, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα ποιος τύπος συστήματος έχει τα καταλληλότερα χαρακτηριστικά για κάθε χρήση.

2.4.1 Ηλεκτροχημικοί Συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές, γνωστοί και ως μπαταρίες, είναι τα πιο γνωστά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Αποτελούνται από ένα ή περισσότερα στοιχεία (η βασική τους ηλεκτροχημική μονάδα), συνδεδεμένα μεταξύ τους παράλληλα ή σε σειρά, ανάλογα με την επιθυμητή χωρητικότητα ή την επιθυμητή τάση εξόδου. Το αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος), το θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) και ο ηλεκτρολύτης, συνιστούν τα βασικά συστατικά ενός στοιχείου. Ο συσσωρευτής μετατρέπει τη χημική ενέργεια που περιέχεται στο ενεργό υλικό του απευθείας σε ηλεκτρική, μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης οξειδοαναγωγής. Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος και δεν υπόκειται στους περιορισμούς του κύκλου Carnot που διέπονται από το 2^ο νόμο της θερμοδυναμικής, αφού γίνεται ηλεκτροχημικά. Συνεπώς, οι μπαταρίες έχουν υψηλότερη ενεργειακή απόδοση μετατροπής. Στις περιπτώσεις επαναφορτιζόμενων συστημάτων, οι συσσωρευτές φορτίζονται ξανά, ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία. [8]

Ανάλογα με την βασική χημεία που χρησιμοποιείται, οι συσσωρευτές μπορούν να παρέχουν ένα ευρύ φάσμα λειτουργικών χαρακτηριστικών. Μια σύντομη περιγραφή των πιο κοινών και υποσχόμενων διαθέσιμων διαμορφώσεων συσσωρευτών για αποθήκευση ενέργειας στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα δίνεται παρακάτω.

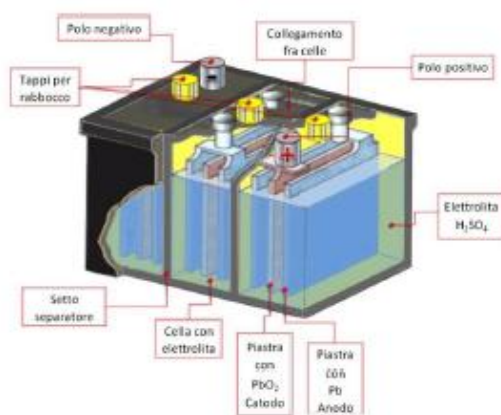
2.4.1.1 Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (Lead-acid)

Οι μονάδες των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος αποτελούνται από σπογγώδη μόλυβδο ως το αρνητικό ενεργό υλικό, διοξείδιο του μολύβδου ως θετικό ενεργό υλικό, βυθισμένα σε αραιό ηλεκτρολύτη θεικού οξέος, και μόλυβδο ως τον συλλέκτη ρεύματος. Κατά την εκφόρτιση, θεικός μόλυβδος είναι το προϊόν και στα δύο ηλεκτρόδια. Αν οι μπαταρίες είναι υπερ-αποφορτισμένες ή διατηρούνται σε κατάσταση εκφόρτισης, τα θεικά κρύσταλλα γίνονται μεγαλύτερα και είναι πιο δύσκολο να σπάσουν κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Επιπλέον, τα μεγάλα κρύσταλλα θεικού μολύβδου αποσυνδέουν το ενεργό

υλικό από τις πλάκες του συλλέκτη. Εξαιτίας της παραγωγής υδρογόνου στο θετικό ηλεκτρόδιο, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος υποφέρουν από απώλεια νερού κατά την υπερφόρτιση, γεγονός που μετριάζεται με την πρόσθεση αποσταγμένου νερού. Ένα άλλος είδος σχεδίασης που δεν χρειάζεται συντήρηση χρησιμοποιεί μια βαλβίδα (VRLA) για την ελαχιστοποίηση της απώλειας νερού επιτρέποντας τον ανασυνδυασμό υδρογόνου-οξυγόνου. Οι συλλέκτες ρεύματος είναι φτιαγμένοι από μολύβδο, κι έτσι έχουν χαμηλή πυκνότητα ενέργειας (σε Wh/kg). Επίσης, ο μολύβδος είναι επιρρεπής στη διάβρωση όταν είναι εκτεθειμένος σε ηλεκτρολύτη θειικού οξέος. [7]

Οι συσσωρευτές αυτοί είναι οι πιο πολυχρησιμοποιημένοι και χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλό κόστος, υψηλή αξιοπιστία και αποδοτικότητα, αρκετά περιορισμένο χρόνο ζωής, χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, σχετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με άλλα είδη συσσωρευτών και τέλος, χαμηλό δείκτη αυτο-εκφόρτισης. Παρόλα αυτά, τα μειονεκτήματά τους είναι η περιορισμένη απόδοση σε χαμηλή θερμοκρασία, το ότι δεν μπορούν να εκφορτιστούν εντελώς και η αρνητική επίδρασή τους στο περιβάλλον, εξαιτίας της επεξεργασίας του μολύβδου.

Αναφορικά με τα σιδηροδρομικά συστήματα, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται κυρίως ως εφεδρικές εφαρμογές, ενώ πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι η αύξηση της πυκνότητας ενέργειας και ισχύος με αντικατάσταση του μολύβδου από άλλα ελαφρύτερα υλικά, όπως ο άνθρακας, πιθανόν να επιτρέψει την χρήση τους στον εξοπλισμό κίνησης [21].

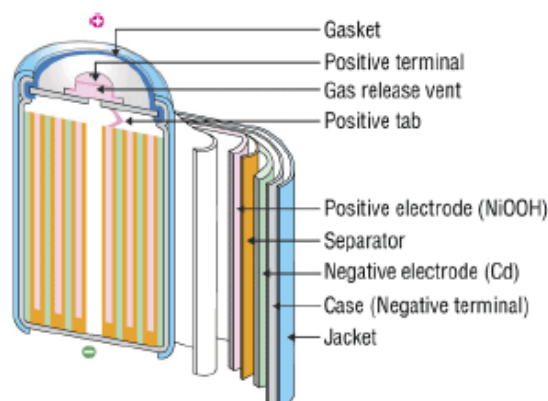


Σχήμα 2.4: Σχηματική άποψη συσσωρευτή μολύβδου-οξέος [2]

2.4.1.2 Συσσωρευτές Νικελίου

Σε αυτή την κατηγορία συσσωρευτών εμπεριέχονται οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium, NiCd) και οι συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου (nickel-metal hydride, NiMH).

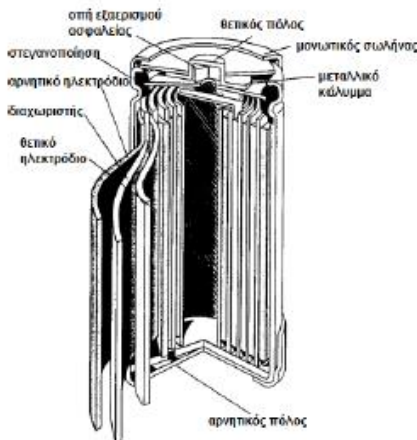
Οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου χρησιμοποιούν οξύ-υδροξείδιο νικελίου για την θετική πλάκα ηλεκτροδίου και κάδμιο για την αρνητική πλάκα. Ανάμεσά τους υπάρχει ένα λεπτό πορώδες μονωτικό φύλλο. Ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης είναι υδροξείδιο του καλίου. Κατά την εκφόρτιση, το οξύ-υδροξείδιο του νικελίου μεταπίπτει σε υδροξείδιο του νικελίου με τη συμμετοχή νερού και το κάδμιο σε υδροξείδιο του καδμίου, ενώ κατά την εκφόρτιση γίνεται η αντίστροφη διαδικασία. Αυτός ο τύπος συσσωρευτών έχει υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και μεγαλύτερο κύκλο ζωής από τους συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, αλλά είναι κατώτερος σε σχέση με τους συσσωρευτές ιόντων λιθίου ή νικελίου-υδριδίου μετάλλου. Άλλα μειονεκτήματά του σε σύγκριση με το συσσωρευτή NiMH είναι ο μικρότερος κύκλος ζωής, το αυξημένο φαινόμενο μνήμης που εμφανίζει, η τοξικότητα του καδμίου, που απαιτεί μια περίπλοκη διαδικασία ανακύκλωσης, η χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και η επίπεδη καμπύλη εκφόρτισης που μαζί με τον αρνητικό συντελεστή θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσουν θερμική διαρροή στη φόρτιση ελεγχόμενης τάσης.



Σχήμα 2.5: Συσσωρευτής νικελίου-καδμίου [2]

Στους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου κατά την εκφόρτιση, το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου είναι οξύ-υδροξείδιο νικελίου και το αρνητικό ενεργό υλικό είναι υδρογόνο σε μορφή υδριδίου μετάλλου. Αυτό το μεταλλικό κράμα έχει τη δυνατότητα να απορροφά και να απορρίπτει υδρογόνο εναλλάξ, καθώς η μπαταρία φορτίζεται και εκφορτίζεται. Το κύριο συστατικό του ηλεκτρολύτη είναι το διάλυμα υδροξειδίου του καλίου, όπως και στους συσσωρευτές NiCd [8]. Οι συσσωρευτές NiMH επιδεικνύουν σχετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος, αποδεδειγμένη ασφάλεια, καλή ανεκτικότητα στην κατάχρηση και πολύ μεγάλο κύκλο ζωής σε μερική κατάσταση φόρτισης. Ένα από τα μειονεκτήματά τους όμως είναι ο σχετικά υψηλός δείκτης αυτο-εκφόρτισης, αν και η εισαγωγή καινούριων διαχωριστών έχει μετριάσει κάπως το πρόβλημα. Τέλος, όταν υπερφορτιστούν οι μπαταρίες

αυτές χρησιμοποιούν την περισσευόμενη ενέργεια για να χωρίσουν και να ανασυνδυάσουν το νερό, έτσι δεν χρειάζονται συντήρηση, ενώ σε περίπτωση υπερεκφόρτισης, το στοιχείο μπορεί να πολωθεί αντίστροφα και να οδηγήσει σε μείωση της χωρητικότητας [7].



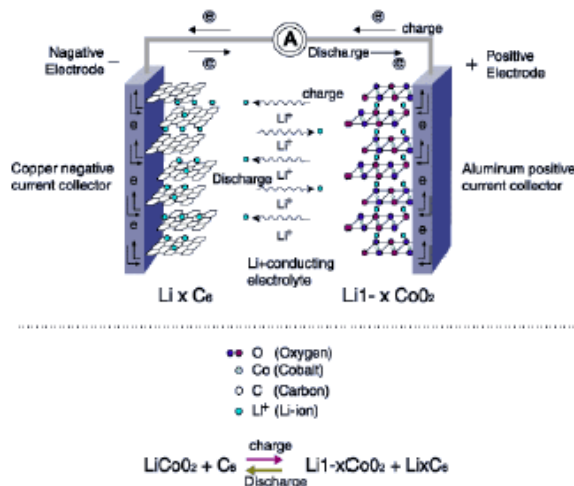
Σχήμα 2.6: Κυλινδρική διάταξη συσσωρευτή νικελίου-υδριδίου μετάλλου [8]

2.4.1.3 Συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Lithium-ion)

Στους συγκεκριμένους συσσωρευτές, ιόντα του λιθίου κινούνται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου για να παράγουν μια ροή ρεύματος. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η υψηλή αναλογία της ενέργειας τους ως προς το βάρος τους, το ότι δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της μνήμης (memory effect) και η χαμηλή αυτο-εκφόρτισή τους. Επίσης, εμφανίζουν καλή αποδοτικότητα και ανεβασμένο αριθμό κύκλων φόρτισης και χρειάζονται λιγότερη συντήρηση [2]. Λόγω της υψηλής πυκνότητας ενέργειας που παρουσιάζουν, οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου είναι η πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία μπαταριών για εφαρμογές συνδεδεμένων υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων, παρόλη την υψηλή τους τιμή.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συσσωρευτή αυτού, η πυκνότητα και η τάση του, εξαρτώνται από την χημεία που χρησιμοποιείται. Η ακριβής πυκνότητα ενέργειας είναι περίπου 200 Wh/kg, η διπλάσια δηλαδή από των συσσωρευτών υβριδίου νικελίου-μετάλλου ή νικελίου-καδμίου. Ο συσσωρευτής ιόντων λιθίου μπορεί να λειτουργήσει με υψηλότερο επίπεδο ρεύματος από ότι άλλοι συσσωρευτές, δεδομένου ότι θα επιλυθούν κάποια προβλήματα, όπως η παραγωγή εσωτερικής θερμότητας και βλάβης από την εσωτερική αντίσταση. Για την εξασφάλιση, λοιπόν, της ασφαλούς λειτουργίας του συσσωρευτή, είναι υποχρεωτικό να χρησιμοποιείται ένα σύστημα διαχείρισης που να παρέχει προστασία ενάντια στην

υπέρταση, την υπόταση, την υπερθέρμανση και την υπερένταση. Πιο προηγμένα συστήματα μπορούν να παρέχουν και ισορροπία στην τάση του συσσωρευτή, ώστε να εξασφαλίζεται ότι όλες οι μπαταρίες λειτουργούν υπό την ίδια τάση και άρα, και στην ίδια κατάσταση φόρτισης (State of Charge)[7].

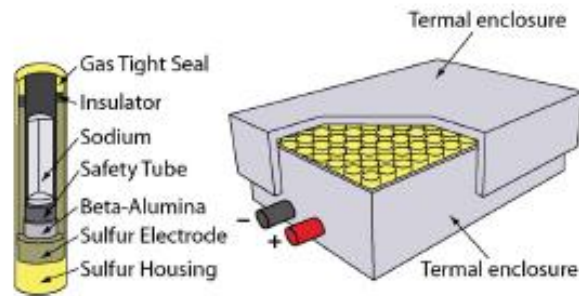


Σχήμα 2.7: Συσσωρευτής ιόντων λιθίου [2]

2.4.1.4 Συσσωρευτές θειούχου νατρίου (NaS)

Οι συσσωρευτές θειούχου νατρίου αποτελούνται από λιωμένο θείο στο θετικό ηλεκτρόδιο και λιωμένο νάτριο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, διαχωρισμένα από στερεό ηλεκτρολύτη. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει μόνο στα ιόντα θετικού νατρίου να τον διαπερνάνε και συνδυαζόμενα με το θείο να σχηματίζουν πολυσουλφίδια του νατρίου. Κατά την εκφόρτιση, τα κατιόντα νατρίου ρέουν μέσω του ηλεκτρολύτη. Η θερμοκρασία λειτουργίας του συσσωρευτή κυμαίνεται στο εύρος από 300⁰C-360⁰C, επομένως χρειάζεται εξωτερική θέρμανση για βέλτιστη λειτουργία. Το πρόβλημα αυτό είναι ένα ουσιαστικό μειονέκτημα των συσσωρευτών αυτών, που περιορίζει τη χρήση τους σε μεγάλης κλίμακας σταθερά συστήματα, όπως οι εφαρμογές σχετικές με την ποιότητα ισχύος και την περικοπή αιχμής ισχύος (peak shaving).

Οι συσσωρευτές θειούχου νατρίου επιδεικνύουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας (πάνω από 4 φορές μεγαλύτερη αυτής της μπαταρίας μολύβδου-οξέος), υψηλή αποδοτικότητα, καλή θερμοκρασιακή σταθερότητα, μεγάλο κύκλο ζωής, χαμηλό κόστος και ασφάλεια [7].



Σχήμα 2.8: Συσσωρευτής θειούχου νατρίου [7]

2.4.2 Σφόνδυλοι υπερυψηλής ταχύτητας (Flywheels)

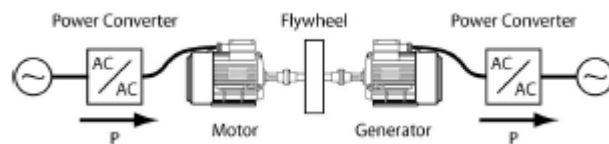
Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν περιστροφική και κινητική ενέργεια σε μορφή ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου ή δίσκου και έπειτα την χρησιμοποιούν για να αναπαράξουν ηλεκτρική ενέργεια. Το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται στον σφόνδυλο εξαρτάται άμεσα από τις διαστάσεις και τη μάζα του και από το τετράγωνο της περιστροφικής ταχύτητάς του. Συνεπώς, η κατάσταση φόρτισής του μπορεί εύκολα να μετρηθεί ως συνάρτηση της γωνιακής ταχύτητας. Οι σφόνδυλοι γενικά χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρικό κινητήρα για την περιστροφή ενός κυλινδρικού δρομέα σε πολύ υψηλή ταχύτητα και έτσι, αποτελούνται από τον περιστρεφόμενο δρομέα, ρουλεμάν, έναν κινητήρα/γεννήτρια, ηλεκτρονικά ισχύος και ένα περίβλημα συγκράτησης [2]. Η περιστροφική ταχύτητα καθορίζει το υλικό, τη γεωμετρία και το μήκος του σφονδύλου, καθώς επίσης και τον τύπο του ηλεκτρικού κινητήρα και του ρουλεμάν.



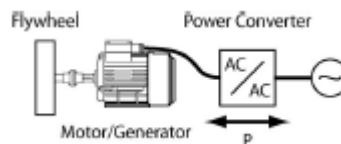
Σχήμα 2.9: Σφόνδυλος υπερυψηλής ταχύτητας [2]

Τα συστήματα αποθήκευσης με σφόνδylους χαρακτηρίζονται από την ικανότητα παροχής πολύ υψηλής αιχμής ισχύος. Συγκεκριμένα, η αιχμή εισόδου/εξόδου περιορίζεται μόνο από τον μετατροπέα ισχύος. Επιπλέον, τα flywheels έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και θεωρητικά άπειρο αριθμό κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης, ενώ η ενεργειακή τους αποδοτικότητα μπορεί να φτάσει και το 90%. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι το θερμοκρασιακό τους φάσμα είναι πολύ ευρύ και ότι χρησιμοποιούν υλικά με χαμηλή περιβαλλοντική επίδραση κάνει αυτή την τεχνολογία αποθήκευσης κατάλληλη επιλογή για εφαρμογές όπως η μεταφορά, δεδομένης και της καλής τους λειτουργίας και αξιοπιστίας ως σύστημα.

Στο σχήμα 2.10(α) φαίνονται τα διαφορετικά μέρη ενός σφονδύλου, σχεδιασμένου με ξεχωριστό κινητήρα και γεννήτρια. Παρόλα αυτά, το τυπικό flywheel έχει μόνο μια μηχανή που εξυπηρετεί την μονάδα κινητήρα/γεννήτριας, όπως δείχνει και το σχήμα 2.10(β) [6].



(α)

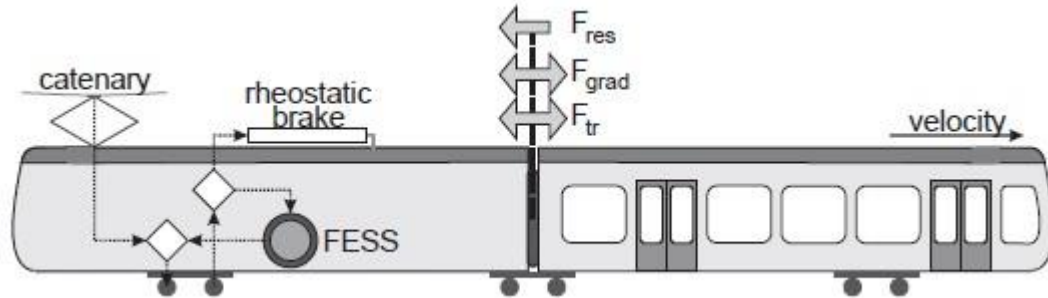


(β)

Σχήμα 2.10: Σφόνδυλος με (α) ξεχωριστό σύστημα κινητήρα/γεννήτριας, (β) ενιαίο σύστημα κινητήρα γεννήτριας [6]

Εκτός από όλα τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα βέβαια, οι σφόνδυλοι παρουσιάζουν και σοβαρά μειονεκτήματα, όπως η αυξημένη μάζα και διάμετρος τους που τους κάνει μη συμβατούς για εγκατάσταση πάνω στο όχημα και προκαλεί την αύξηση του δείκτη αυτο-εκφόρτισής τους. Επίσης, η ασφάλεια σε περίπτωση ατυχήματος αποτελεί μια δεύτερη αχίλλειο πτέρνα τους, αφού η πιθανή ρήξη του προστατευτικού τους καλύμματος δύναται να προκαλέσει εκρηκτική θραύση, ακόμα και σε περίπτωση υπερφόρτισης. Αυτό τείνει να αναχαιτίσει την εκτεταμένη χρήση τους στις σιδηροδρομικές εφαρμογές, όπου η ασφάλεια σε πιθανούς κινδύνους θεωρείται μείζον ζήτημα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται

η ροή ισχύος μεταξύ του τρένου, της γραμμής παροχής και του flywheel, καθώς και οι δυνάμεις που δρούν στο τρένο.



Σχήμα 2.11: Ροή ισχύος μεταξύ γραμμής παροχής, τρένου και flywheel και δυνάμεις που δρούν στο τρένο [17]

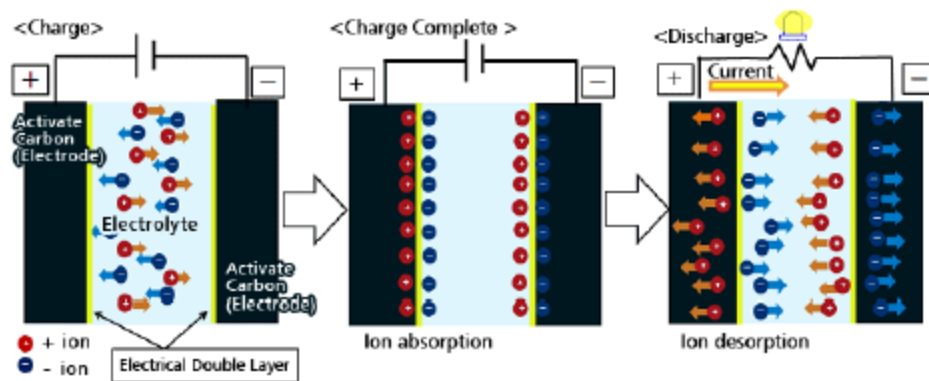
2.4.3 Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές (Supercapacitors ή Ultracapacitors) είναι ηλεκτροχημικές συσκευές και συγκεκριμένα ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος (Electrochemical Double Layer Capacitors). Αποθηκεύουν ενέργεια με απλό διαχωρισμό φορτίου, επομένως η αποθηκευμένη ενέργεια του ηλεκτροχημικού πυκνωτή μπορεί να υπολογιστεί από τη γνωστή εξίσωση:

$$Q = CV = \frac{A\varepsilon}{d} V \quad (2.1)$$

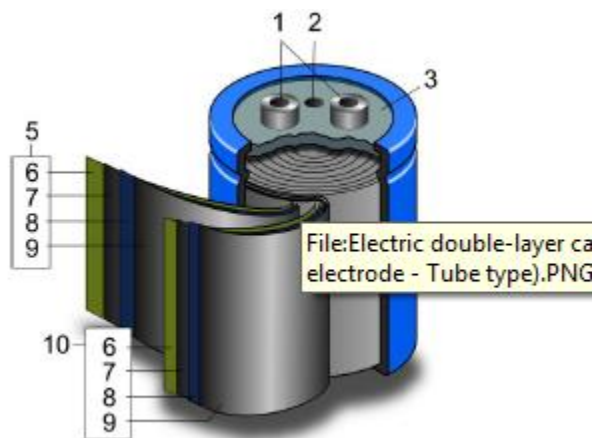
όπου η χωρητικότητα C είναι ανάλογη με το εμβαδόν A των πλακών και την επιτρεπτότητα ε του διηλεκτρικού υλικού και αντιστρόφως ανάλογη με την απόσταση d μεταξύ των πλακών.

Οι υπερπυκνωτές είναι σχεδιασμένοι να έχουν μεγάλο εμβαδόν επιφάνειας των ηλεκτροδίων τους και χρησιμοποιούν διηλεκτρικό με υψηλή επιτρεπτότητα. Το εμβαδόν της επιφάνειας των ηλεκτροδίων μεγιστοποιείται με τη χρήση πορώδους άνθρακα ως συλλέκτη ρεύματος, επιτρέποντας κατ'αυτόν τον τρόπο μια σχετικά μεγάλη ποσότητα ενέργειας να αποθηκευτεί στην επιφάνεια του συλλέκτη. Οι υπερπυκνωτές λοιπόν φθάνουν σε πολύ υψηλές τιμές χωρητικότητας (kF), σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές (mF ή μ F). Τα δύο ηλεκτρόδια είναι διαχωρισμένα από ένα πολύ λεπτό πορώδες υλικό και βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη, όπως το ανθρακικό προπυλένιο. Λόγω της μεγάλης διαπερατότητας και της κοντινής απόστασης των ηλεκτροδίων τους, οι υπερπυκνωτές έχουν ικανότητα αντοχής σε χαμηλή τάση [7].



Σχήμα 2.12: Δομή και λειτουργία ιδανικού υπερπυκνωτή [2]

Οι υπερπυκνωτές χαρακτηρίζονται από μεγάλο κύκλο ζωής (μέχρι και 10^6 κύκλους) με μικρή υποβάθμιση, χάρη στο ότι (ιδανικά) δεν υπάρχουν χημικές αλλαγές στα ηλεκτρόδια στην κανονική λειτουργία, γεγονός που τους καθιστά φιλικούς προς το περιβάλλον. Επίσης, έχουν ανώτερη απόδοση (έως και 95%) από άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, αφού αυτή είναι συνάρτηση των ωμικών αντιστάσεων του αγωγίμου δρόμου, βελτιωμένη ασφάλεια (χρήση μη διαβρωτικών ηλεκτρολυτών και χαμηλής τοξικότητας υλικών), ενώ παρέχουν και τεράστια πυκνότητα ισχύος (6 kWh/kg), αφού τα φορτία είναι φυσικά αποθηκευμένα στα ηλεκτρόδια. Στα πλεονεκτήματά τους συγκαταλέγεται και το ότι έχουν μικρές απώλειες θερμότητας, αλλά και η μεγάλη ικανότητα ρεύματος φόρτισης/εκφόρτισης που παρουσιάζουν.



Σχήμα 2.13: Σχηματική κατασκευή κυκλικού υπερπυκνωτή: 1.τερματικά, 2.οπή ασφαλείας, 3.Στεγανοποιητικός δίσκος, 4. Αλουμινένιο κουτί, 5.θετικός πόλος, 6.διαχωριστής, 7.ηλεκτρόδιο άνθρακα, 8.συλλέκτης, 9.ηλεκτρόδιο άνθρακα, 10. αρνητικός πόλος [2]

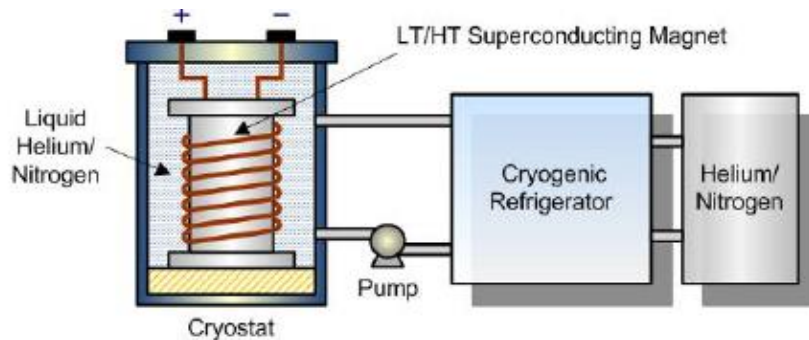
Αντιθέτως, η πυκνότητα της ενέργειάς τους είναι χαμηλή (6 Wh/kg), επειδή τα ηλεκτρόνια δεν είναι περιορισμένα από χημικές αντιδράσεις κι αυτό συνεπάγεται ότι οι υπερπυκνωτές μπορούν να εκφορτιστούν εντελώς και επομένως να έχουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις τάσης, ως συνάρτηση της κατάστασης φόρτισής τους. Επιπλέον, έχουν σημαντικό δείκτη αυτο-εκφόρτισης, χαμηλή μέγιστη τάση (χρησιμοποιούνται διατάξεις με εν σειρά συνδέσεις για υψηλότερες τιμές τάσεων), γρήγορη πτώση τάσης και κίνδυνο σπινθηρισμού όταν βραχυκυκλωθούν [2].

Τα συνολικά χαρακτηριστικά τους καθιστούν τους υπερπυκνωτές ως μια κατάλληλη επιλογή για σιδηροδρομικές εφαρμογές, ενώ χάρη στην γρήγορη απόκρισή τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για παροχή μέγιστης ισχύος και για ρύθμιση τάσης. Τέλος, σημαντική πρόοδος έχει επιτευχθεί στον σχεδιασμό των υπερπυκνωτών με τη χρήση τεχνολογίας νανοσωλήνων, για τη βελτίωση της πυκνότητας ενέργειάς τους [9].

2.4.4 Υπεραγώγιμες μαγνητικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (Superconducting magnetic energy storage, SMES)

Οι υπεραγώγιμες μαγνητικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας αποθηκεύουν ενέργεια σε ένα μαγνητικό πεδίο δημιουργούμενο από συνεχές ρεύμα που ρέει μέσω ενός υπεραγώγιμου πηνίου. Το πηνίο ψύχεται σε θερμοκρασία υπό της κρίσιμης θερμοκρασίας υπεραγωγιμότητάς του. Η κατασκευή του μπορεί να είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης ή μια ομάδα από δύο ή περισσότερους ηλεκτρομαγνήτες, ώστε να ακυρώνουν το μαγνητικό πεδίο τριγύρω τους.

Οι συσκευές SMES παρέχουν μια από τις υψηλότερες πυκνότητες από κάθε μέθοδο αποθήκευσης ενέργειας. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι η υψηλή απόδοση αποθήκευσης (πάνω από 90%, μη συμπεριλαμβάνοντας το σύστημα ψύξης που απαιτεί περίπου 1.5 kW συνεχώς ανά MWh χωρητικότητας ενέργειας), ενώ επιπλέον πλεονέκτημα συνιστά ο γρήγορος δυναμικός χρόνος απόκρισης που διαθέτουν (της τάξης των ms) [7]. Επίσης, μπορούν να εκφορτιστούν σχεδόν εντελώς και παρουσιάζουν μεγάλο κύκλο ζωής. Αντίθετα, το κύριο μειονέκτημά τους είναι το υψηλό επενδυτικό και λειτουργικό κόστος που απαιτούν, λόγω κυρίως του συστήματος ψύξης τους.



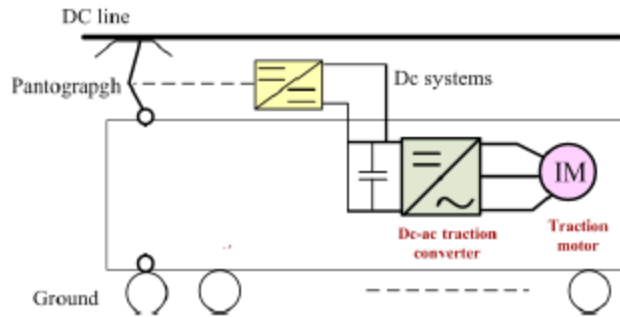
Σχήμα 2.14: Υπεραγωγική μαγνητική συσκευή αποθήκευσης ενέργειας [2]

2.5 Μετατροπείς ισχύος για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Κάποιες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, στις οποίες εμπεριέχονται όλες οι τεχνολογίες που αναφέρθηκαν προηγουμένως, χρειάζονται επιπρόσθετο εξοπλισμό για να προσαρμόσουν την τάση ή το ρεύμα εξόδου τους στο απαιτούμενο επίπεδο. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτού του έργου είναι οι μετατροπείς ισχύος. Ανάλογα με την τεχνολογία αποθήκευσης και την εφαρμογή, ο μετατροπέας πρέπει να επιτρέπει την σύνδεση μεταξύ δύο DC ζυγών διαφορετικού επιπέδου τάσης (μετατροπέας DC-DC buck-boost), ενός ζυγού DC τάσης κι ενός ζυγού AC τάσης (αντιστροφέας DC-AC ή ανορθωτής AC-DC) ή ακόμα να συνδέουν μια πηγή ρεύματος σε έναν ζυγό τάσης. Γενικά όμως, οι μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται σε ESSs πρέπει να εμφανίζουν τα ακόλουθα γνωρίσματα:

- να διαχειρίζονται τη ροή ενέργειας και προς τις δύο κατευθύνσεις, ελέγχοντας τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας
- να έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης

Συγκεκριμένα, σε ένα σιδηροδρομικό σύστημα όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 2.15, η κεντρική γραμμή παρέχει ισχύ στις αμαξοστοιχίες είτε μέσω ενός DC-AC αντιστροφέα είτε ενός DC-DC μετατροπέα, που μπορεί να ελέγχει αν το επίπεδο της τάσης της γραμμής παροχής είναι συμβατό με τον DC σύνδεσμο. Η γραμμή παροχής στα DC σιδηροδρομικά συστήματα που εξετάζονται σε αυτή την εργασία μπορεί να είναι 3kV/1.5kV/750V ανάλογα με το μέρος ή τη χώρα.



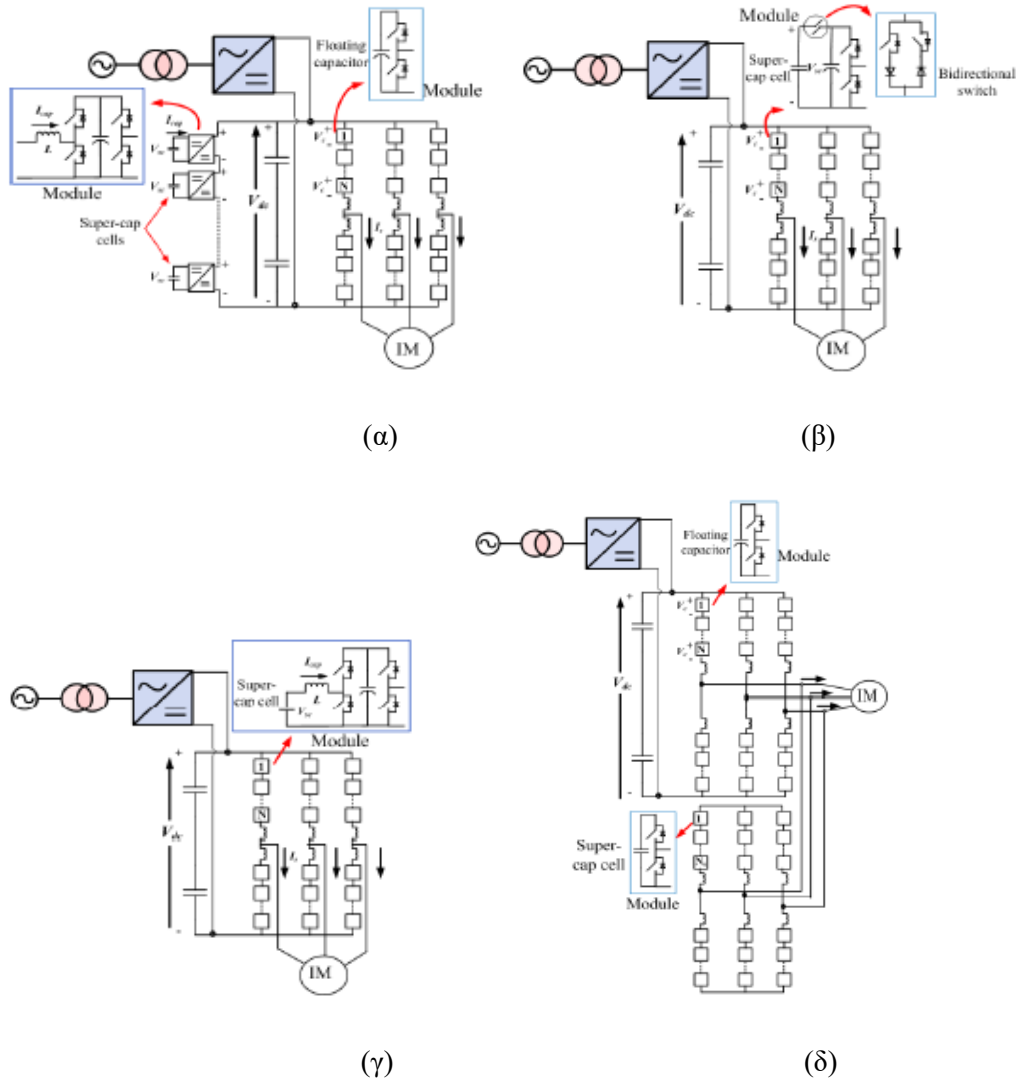
Σχήμα 2.15: Γενικό διάγραμμα παροχής ισχύος σε ένα τρένο [10]

Εναλλακτικά, οι πολυεπίπεδοι μετατροπείς (*Modular Multilevel Converters, MMC*) μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως δείχνεται στο σχήμα 2.16. Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούν στοιχεία υπερπυκνωτών χαμηλής τάσης και έναν μεγάλο αριθμό υπομονάδων, που έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- καλύτερη χρησιμοποίηση των υπερπυκνωτών
- ισορροπία της κατάστασης φόρτισης (SoC) μεταξύ των υπερπυκνωτών, με τη χρήση των μετατροπέων υπομονάδων
- ανοχή στο σφάλμα ανάλογα με το σφάλμα του υπερπυκνωτή
- υψηλό αριθμό επιπέδων τάσης στην έξοδο και μικρή αρμονική παραμόρφωση
- υψηλή απόδοση και μειωμένο μέγεθος των μετατροπέων, χρησιμοποιώντας κατάλληλες ημιαγωγίμες συσκευές χαμηλής τάσης

Οι τοπολογίες αυτές μπορούν να χωριστούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- I. DC σύνδεση των υπερπυκνωτών παράλληλα με τον DC σύνδεσμο των πολυεπίπεδων μετατροπέων με έναν DC-DC μετατροπέα, όπως στο σχήμα 2.16(α)
- II. AC σύνδεση των υπερπυκνωτών με τους πολυεπίπεδους μετατροπείς παράλληλα με τον κινητήρα του τρένου, όπως στο σχήμα 2.16(δ)
- III. Οι υπερπυκνωτές να είναι ενσωματωμένοι στις υπομονάδες των πολυεπίπεδων μετατροπέων, όπως στα σχήματα 2.16(β) και 2.16(γ) [10]



Σχήμα 2.16: Βασικές τοπολογίες πολυεπίπεδων μετατροπέων: (α) DC-DC με MMC, (β) άμεση ενσωμάτωση υπερπυκνωτή εντός των υπομονάδων, (γ) υπερπυκνωτές εντός των MMC μέσω ενσωματωμένων DC-DC μετατροπέων, (δ) παράλληλοι MMC με ενσωματωμένους υπερπυκνωτές

[10]

2.6 Τεχνικές Ελέγχου

Η βασική αλληλεπίδραση της συσκευής αποθήκευσης ενέργειας και του συστήματος παροχής ισχύος ελέγχεται από τερματική τάση του ESS ως εξής:

- Όταν η τερματική τάση του ESS είναι μικρότερη από την τάση εκφόρτισης, τότε το ESS είναι στην κατάσταση της εκφόρτισης

- Όταν η τερματική τάση του ESS είναι μεγαλύτερη από την τάση φόρτισης, τότε το ESS είναι στην φάση της φόρτισης [22].

Ο ρόλος της μονάδας ελέγχου που υπάρχει σε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι κυρίως η ταχεία και αποδοτική διαχείριση των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης της συσκευής. Όμως, όπως θα φανεί και στην ανάλυση των διαφορών κατά την εγκατάσταση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας επί του οχήματος (on-board) ή σε κάποιον υποσταθμό (stationary) που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3, δεν μπορούν όλες οι στρατηγικές ελέγχου που υπάρχουν στη βιβλιογραφία να εφαρμοστούν σε όλες τις περιπτώσεις. Παρακάτω, λοιπόν, περιγράφονται συνοπτικά κάποιες τεχνικές ελέγχου, που δυνητικά είναι κατάλληλες και για τους δύο τρόπους εγκατάστασης, για συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με την τεχνολογία των υπερπυκνωτών, που είναι και το βασικό στοιχείο μελέτης αυτής της διπλωματικής.

2.6.1 Τεχνική ελέγχου με PI ελεγκτή (PI control strategy)

Η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή είναι η ακόλουθη:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.2)$$

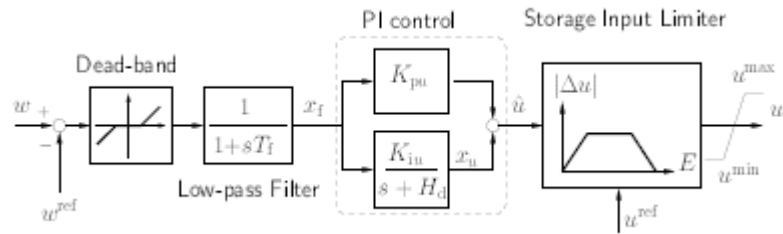
Οι όροι K_p και K_i αντιπροσωπεύουν το αναλογικό και το ολοκληρωτικό κέρδος του ελεγκτή αντίστοιχα. Η αρχή λειτουργίας του έχει ως εξής: η μεταβλητή της εισόδου (έστω x) αντιπροσωπεύει το σφάλμα παρακολούθησης, δηλαδή τη διαφορά ανάμεσα στην τιμή της επιθυμητής εισόδου και σε εκείνη της πραγματικής εξόδου. Αυτό το σήμα σφάλματος (x) θα σταλεί στον PI ελεγκτή και εκείνος με τη σειρά του θα υπολογίσει το ολοκλήρωμα του σήματος. Το σήμα αμέσως μετά τον ελεγκτή είναι πλέον ίσο με το αναλογικό κέρδος (K_p) επί την τιμή του σφάλματος συν το ολοκληρωτικό κέρδος (K_i) επί το ολοκλήρωμα του σφάλματος. Δηλαδή:

$$u = K_p x + K_i \int x dt \quad (2.3)$$

Το σήμα αυτό θα σταλεί στο σύστημα προς έλεγχο και στη συνέχεια θα λάβουμε ένα νέο σήμα εξόδου. Η νέα έξοδος θα σταλεί ξανά πίσω στο αισθητήριο για να ανιχνεύσει κι αυτό με τη σειρά του το νέο σήμα σφάλματος κι η διαδικασία αυτή θα επαναλαμβάνεται συνέχεια.

Η χρησιμοποίηση του αναλογικού ελεγκτή έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του χρόνου ανύψωσης και την μείωση, αλλά όχι την εξάλειψη, του μόνιμου σφάλματος. Ο ολοκληρωτικός έλεγχος αντιθέτως, θα εξαλείψει το μόνιμο σφάλμα, αλλά θα χειροτερέψει την μεταβατική απόκριση (αριθμός ταλαντώσεων

μέχρι την τελική ισορροπία του συστήματος) [24]. Σχηματικά, η λειτουργία του PI ελεγκτή φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.17: Έλεγχος με PI ελεγκτή [11]

Η απλότητα της εφαρμογής και της σχεδίασης και το ότι η δομή του PI ρυθμιστή δεν εξαρτάται από την τεχνολογία του συστήματος αποθήκευσης είναι τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής ελέγχου [11].

2.6.2 Τεχνική ελέγχου ανίχνευσης ταχύτητας (Speed Tracker Control strategy)

Η τεχνική αυτή ελέγχου διαιρείται σε τρία μέρη: Τον έλεγχο κίνησης, τον έλεγχο προσανατολισμένου πεδίου και τον έλεγχο ανίχνευσης ταχύτητας για την εξοικονόμηση ενέργειας του υπερπυκνωτή. Οι δύο πρώτοι έλεγχοι εστιάζουν στον έλεγχο της ταχύτητας του τρένου και της ροπής του κινητήρα, αντίστοιχα. Αντίθετα, ο έλεγχος ανίχνευσης ταχύτητας εστιάζει στον έλεγχο της κατάστασης φόρτισης, στο SoC δηλαδή, του υπερπυκνωτή, ώστε να μεγιστοποιήσει την ανάκτηση της κινητικής ενέργειας κατά την ηλεκτρική πέδηση.

2.6.3 Τεχνική ελέγχου ανίχνευσης τάσης γραμμής (Line Voltage Tracker Control strategy)

Ο στόχος της τεχνικής αυτής είναι να ρυθμίσει την τάση παροχής κατά τη διάρκεια της λειτουργίας κίνησης και πέδησης των οχημάτων, με τη κατάλληλη διαχείριση του SoC του υπερπυκνωτή της μονάδας αποθήκευσης. Τα ρεύματα φόρτισης/εκφόρτισης υπολογίζονται σύμφωνα με τις αλλαγές της τάσης της γραμμής παροχής. Με την ανίχνευση της τάσης γραμμής, η ονομαστική τιμή της τάσης για την φόρτιση/εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να εξομαλυνθούν οι διακυμάνσεις της DC τάσης γραμμής.

Θεωρητικά, όταν η τάση γραμμής ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή, ο υπερπυκνωτής πρέπει να φορτιστεί, ενώ αντιθέτως, όταν πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο, αρχίζει η διαδικασία εκφόρτισης του

υπερπυκνωτή. Πρέπει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι ως τάση γραμμής θεωρείται η τάση παροχής στο σημείο της γραμμής όπου εγκαθίσταται το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, επομένως είναι η τάση στον παντογράφο του οχήματος (V_t), στην περίπτωση on-board συστήματος ή η τάση του σημείου στην γραμμή παροχής που το σύστημα είναι τοποθετημένο, στην περίπτωση stationary συστήματος.

2.6.4 Τεχνική ελέγχου κατάστασης ρεύματος γραμμής (Line Current State Control strategy)

Η τεχνική αυτή αποσκοπεί στη μείωση των μεγίστων τιμών ισχύος από τη γραμμή παροχής, με αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της τάσης γραμμής. Το ρεύμα γραμμής διατηρείται σταθερό, ακόμα κι όταν τα τρένα επιταχύνουν ή φρενάρουν, λόγω της συνεισφοράς του υπερπυκνωτή του συστήματος αποθήκευσης.

Η φόρτιση και η εκφόρτιση του υπερπυκνωτή κατά την πέδηση και την επιτάχυνση ελέγχονται από ένα setpoint βοηθητικού ρεύματος και από το όριο της τάσης γραμμής, διατηρώντας την τάση του υπερπυκνωτή ανάμεσα στο ελάχιστο και το μέγιστο όριο. Η κύρια δυσκολία αυτής της μεθόδου είναι ο κατάλληλος καθορισμός αυτού του setpoint του ρεύματος γραμμής. Μια τιμή πολύ χαμηλή θα συνεπαγόταν την πλήρη εκφόρτιση του υπερπυκνωτή πριν το τέλος της επιτάχυνσης, και άρα αύξηση του ρεύματος παροχής και των απωλειών, ενώ μια πολύ υψηλή τιμή θα σήμαινε ανεπαρκή χρήση της χωρητικότητας αποθήκευσης του υπερπυκνωτή. Η βέλτιστη τιμή λοιπόν του setpoint πρέπει να καθοριστεί ανάλογα με το SoC του υπερπυκνωτή και το ποσό της ενέργειας που θα ανακτηθεί κατά τη διαδικασία πέδησης.

Το δεύτερο κομμάτι της συγκεκριμένης τεχνικής ελέγχου είναι η ρύθμιση της ροής ισχύος του υπερπυκνωτή, ώστε να διατηρείται σταθερό το ρεύμα γραμμής. Αυτό επιτυγχάνεται με τον περιορισμό της τάσης του υπερπυκνωτή εντός δύο προκαθορισμένων ορίων κατά τη λειτουργία του και την αυτόματη αποσύνδεσή του από την γραμμή παροχής σε περίπτωση απόκλισης [2].

Τρόποι τοποθέτησης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

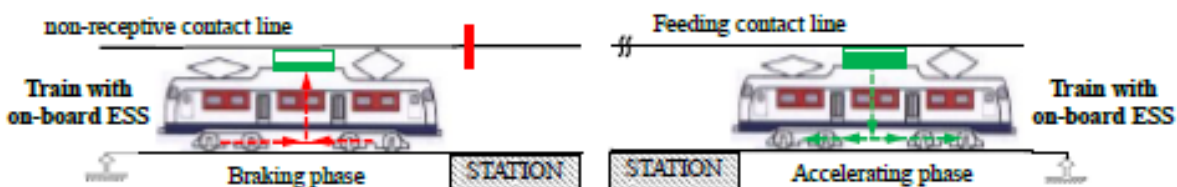
3.1 Τοποθέτηση κινητών (onboard) συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

3.1.1 Κύρια χαρακτηριστικά

Τα onboard συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συνεισφέρουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα. Κάθε σύστημα λειτουργεί ανεξάρτητα και η ενέργεια που ανακτάται κατά τη διαδικασία πέδησης αποθηκεύεται αμέσως στο σύστημα αποθήκευσης που είναι τοποθετημένο πάνω στο όχημα, συνήθως στην οροφή του. Η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται κατά προτεραιότητα στην τροφοδοσία του οχήματος στην επόμενη επιτάχυνσή του, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1. Επιπλέον, από την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επί του οχήματος μπορούν να αναμένονται τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Περικοπή των μεγίστων τιμών ισχύος κατά την επιτάχυνση των οχημάτων, η οποία οδηγεί σε μειωμένα ενεργειακά κόστη και υψηλότερη απόδοση χάρη στις μειωμένες απώλειες αντιστάσεων της γραμμής παροχής
- Σταθεροποίηση της τάσης, με τον περιορισμό των πτώσεων τάσης στο δίκτυο παροχής, που πιθανόν να επιτρέπει μεγαλύτερη πυκνότητα κυκλοφορίας χωρίς επιπλέον διαμόρφωση στην ήδη υπάρχουσα υποδομή παροχής
- Ορισμένη αυτονομία λειτουργίας των οχημάτων, για παράδειγμα σε έκτακτες καταστάσεις, σε συγκεκριμένα τμήματα των γραμμών ή σε εφαρμογές μη υποστηρικτικές από το σύστημα παροχής (πχ. γραμμές που διασχίζουν ιστορικά κέντρα πόλεων)
- Μείωση των απορριπτικών φορτίων που βρίσκονται στο όχημα

- Απλούστερη διαχείριση της ανακτώμενης ενέργειας, αφού ο έλεγχος είναι ανεξάρτητος των συνθηκών κυκλοφορίας των οχημάτων και μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στον κύριο έλεγχο του κινητήρα [2]



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας onboard συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε αστικό σιδηρόδρομο [1]

Όταν σκοπός είναι η βελτίωση της εξοικονόμησης ενέργειας, το κριτήριο που πρέπει να αξιολογηθεί είναι το κατά πόσο το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας έχει τη δυνατότητα να απορροφήσει το μέγιστο ποσό της ενέργειας πέδησης που μπορεί να ανακτηθεί από ένα ξαφνικό φρενάρισμα, υποθέτοντας ότι καθόλου ενέργεια δεν θα γυρίσει στο κυρίως δίκτυο. Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει πιο ακριβής, αν ληφθούν υπόψη οι μεταβλητές ταχύτητες και τα ποσοστά πληρότητας των τρένων, όπως επίσης τα βάρη και τα κόστη λειτουργίας των συσκευών. Κατά αυτόν τον τρόπο, θα καθοριστεί το βέλτιστο μέγεθος αποθήκευσης του συστήματος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

Αν ο βασικός στόχος είναι η μείωση των πτώσεων τάσης στη γραμμή παροχής ή η υποστήριξη των AC και DC βοηθητικών ηλεκτρικών λειτουργιών του οχήματος, απαιτείται η γνώση των λειτουργικών χαρακτηριστικών ολόκληρης της γραμμής, όπως της απόστασης μεταξύ των υποσταθμών ή του χρονοδιαγράμματος των δρομολογίων.

Τέλος, στην περίπτωση που το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποσκοπεί κυρίως στην εξασφάλιση αυτόνομης λειτουργίας για το όχημα, πρέπει να βρεθεί το κατάλληλο μέγεθος ώστε να μπορεί να παρέχει ενέργεια σε αμφότερα τα μηχανικά και τα ηλεκτρικά μέρη του τρένου [2].

Αντιθέτως, η ύπαρξη μόνο ενός συστήματος αποθήκευσης ανά όχημα (λόγω αύξησης του κόστους) και η ακινητοποίηση του οχήματος για την τοποθέτηση, τη συντήρηση και την επισκευή του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, σε συνδυασμό με την απαίτηση για μεγάλη ικανότητα χώρου και την σημαντική αύξηση του βάρους του οχήματος, αποτελούν τα κυριότερα μειονεκτήματα αυτού του τρόπου εγκατάστασης. Γι αυτούς τους λόγους, η onboard τοποθέτηση προτιμάται να γίνεται σε καινούρια οχήματα, παρά ως μετασκευή παλαιών [12].

3.1.2 Έλεγχος

Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας χρειάζεται αποτελεσματική διαχείριση, λόγω της περιορισμένης ενέργειας του υπερπυκνωτή του συστήματος αποθήκευσης. Ο υπερπυκνωτής θα πρέπει να εκφορτίζεται σε υψηλές ταχύτητες του οχήματος, ώστε να δέχεται την ενέργεια πέδησης, και να φορτίζεται όταν το τρένο θα κινείται επιβραδυνόμενο, ώστε να συνεισφέρει στην επόμενη επιτάχυνσή του. Η εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης λαμβάνει χώρα κυρίως κατά την περίοδο επιτάχυνσης του οχήματος, κατά την οποία η κατάσταση φόρτισης ελέγχεται σύμφωνα με την κινητική ενέργεια του οχήματος. Όταν το όχημα φρενάρει, προσπαθεί να στείλει την ενέργεια πέδησης πίσω στο δίκτυο, όσο η τάση του είναι μεταξύ των προκαθορισμένων ορίων. Αν η τάση ξεπεράσει το άνω όριο, τότε το όχημα στέλνει την ενέργεια στο onboard σύστημα αποθήκευσης. Στη φάση επιβράδυνσης, οι υπερπυκνωτές φορτίζονται αργά από την περίσσεια της αναγεννητικής ενέργειας που παράγει το όχημα και δεν μπορεί να απορροφήσει το δίκτυο, συναρτήσει του SoC τους [13].

3.1.3 Τεχνολογίες αποθήκευσης

Δεδομένης της γρήγορης απόκρισής τους, της υψηλής πυκνότητας ισχύος τους και του σχετικά χαμηλού κόστους, οι υπερπυκνωτές συνιστούν την καλύτερη επιλογή για αποθήκευση αναγεννητικής ενέργειας onboard σε σιδηροδρομικά οχήματα. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί ότι η μικρή ενεργειακή τους ικανότητα παρεμποδίζει την εκτεταμένη χρήση τους σε εφαρμογές όπου ο κύριος σκοπός είναι η παροχή αυτόνομης λειτουργίας στα τρένα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου ή σε μικρότερο ποσοστό οι συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου προσφέρουν καλύτερη λειτουργία, ειδικά αν επιτευχθούν υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και μειωμένα κόστη στο εγγύς μέλλον, όπως αναμένεται. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα flywheels και τα SMES συστήματα δεν θεωρούνται κατάλληλες επιλογές για κινητά συστήματα αποθήκευσης εξαιτίας των θεμάτων ασφαλείας και λειτουργικότητας που παρουσιάζουν.

Μια ενδιαφέρουσα, καινοτόμα και πολλά υποσχόμενη ιδέα αποτελεί ο συνδυασμός των συσσωρευτών με τους υπερπυκνωτές ως onboard σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Σε αυτό το υβριδικό σύστημα, οι υπερπυκνωτές θα απορροφήσουν τα μέγιστα της ενέργειας πέδησης και θα παρέχουν και την απαραίτητη ισχύ για την επιτάχυνση των τρένων, ενώ με τη σειρά τους, οι συσσωρευτές θα απορροφήσουν την υπόλοιπη αναγεννητική ενέργεια και θα εκφορτιστούν κατά τη διάρκεια της αυτόνομης λειτουργίας. Με αυτό τον τρόπο, οι συσσωρευτές προστατεύονται ενάντια στα μέγιστα της ισχύος και υφίστανται λιγότερους κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης, συνεπώς αυξάνουν σημαντικά το χρόνο ζωής και την απόδοσή τους [1]. Παρόλα τα ανωτέρω πλεονεκτήματα όμως, αυτό το σύστημα αποθήκευσης ενέχει

μεγάλο κόστος λειτουργίας και απαιτεί ακόμα περισσότερο χώρο πάνω στο όχημα, αυξάνοντας ταυτόχρονα περαιτέρω και το βάρος του, με αποτέλεσμα να είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο η χρήση του σε πραγματικά σιδηροδρομικά δίκτυα.

3.1.4 Εμπορικά παραδείγματα

Οι περισσότερες εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο χώρο των αστικών σιδηροδρομικών εφαρμογών έχουν προτιμήσει την τεχνολογία των υπερπυκνωτών ως τεχνολογία αποθήκευσης στα onboard συστήματα, παρουσιάζοντας ένα εύρος διαφορετικών προϊόντων για την ενίσχυση της αποδοτικότητας των ηλεκτρικών σιδηροδρομικών δικτύων. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες από αυτές τις εμπορικές προτάσεις:

Εταιρεία	Όνομα προϊόντος	Τεχνολογία αποθήκευσης	Λειτουργία
Bombardier Transportation	MITRAC Energy Saver	Υπερπυκνωτές	Γρήγορη φόρτιση/εκφόρτιση υψηλής ισχύος από την πέδηση/επιτάχυνση των τρένων
Siemens	Sitras MES system	Υπερπυκνωτές	Ενσωμάτωση σε νέα τρένα απευθείας ή εγκατάσταση σε υπάρχοντα τρένα με εξοικονόμηση ενέργειας έως 30%
CAF	ACR evoDRIVE system	Υπερπυκνωτές	20% εξοικονόμηση ενέργειας, μέχρι 100m αυτόνομη λειτουργία
Alstom	STEEM	Υπερπυκνωτές	Εφαρμογή σε τραμ με εξοικονόμηση ενέργειας 10-18% και έως 300m αυτόνομη λειτουργία
Siemens	Sitras HES	Συσσωρευτής νικελίου-υδριδίου μετάλλου και υπερπυκνωτές	Ταυτόχρονη υψηλή ισχύς και μεγάλη πυκνότητα ενέργειας

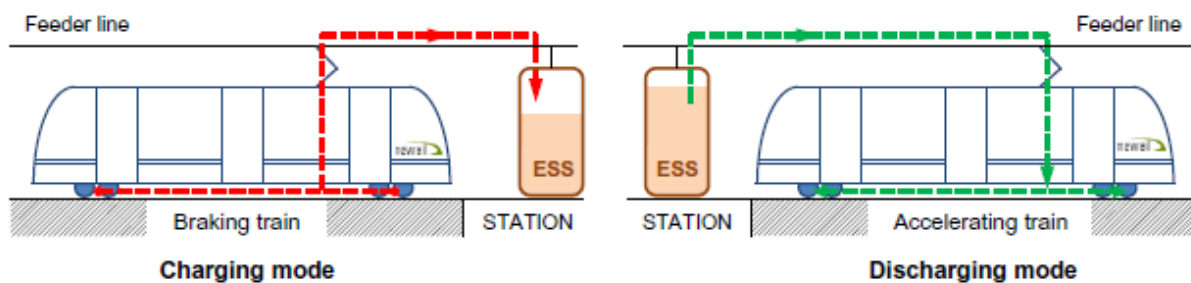
Πίνακας 3.1: Εμπορικά παραδείγματα onboard συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

3.2 Τοποθέτηση στατικών (stationary) συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

3.2.1 Κύρια χαρακτηριστικά

Τα στατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούνται από ένα ή περισσότερα ESS, τοποθετημένα κατά μήκος των σιδηροδρομικών γραμμών σε συγκεκριμένα σημεία όπου οι μεταβολές της τάσης γραμμής είναι πιο σημαντικές, όπως οι επιβατικοί σταθμοί, λόγω των περισσότερων επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων που λαμβάνουν χώρα, ή εγκατεστημένα σε υποσταθμούς του δικτύου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2. Αυτή η διαμόρφωση είναι ικανή να αποθηκεύσει την περισσευούμενη ενέργεια πέδησης που δεν μπορεί να παρασχεθεί απευθείας σε άλλα μη δεκτικά οχήματα και να τροφοδοτήσει την ενέργεια πίσω στην κύρια γραμμή παροχής, ώστε να είναι διαθέσιμη για τις μεταγενέστερες επιταχύνσεις όσον αυτές αφορούν στο ίδιο ηλεκτρικό δίκτυο [19]. Αυτή η λειτουργία επιφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα:

- Γρήγορη και αποδοτική ανάκτηση ενέργειας, που σχετίζεται με τη μείωση του ρυθμού παροχής ισχύος, αφού περικόπτεται η αιχμή ισχύος υπολογίζοντας κατά μέσο όρο τα φορτία σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Αυτό συνεπάγεται αισθητή εξοικονόμηση κόστους για το διαχειριστή του δικτύου
- Χρησιμοποίηση από όλα τα οχήματα της ίδιας γραμμής και μείωση των υποσταθμών
- Συνολική βελτίωση της ποιότητας ισχύος για όλο το ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο
- Μείωση των πτώσεων τάσης, χωρίς ισχυρές τροποποιήσεις στα κύρια στοιχεία της γραμμής, με συνέπεια τη σταθεροποίησή της σε αδύνατα σημεία του δικτύου, όπως το τέλος των γραμμών (μεγάλο πλεονέκτημα σε σύγκριση με τους υποσταθμούς διπλής κατεύθυνσης ισχύος)
- Η συντήρηση και η εγκατάστασή τους δεν επηρεάζει τη λειτουργία των τρένων



Σχήμα 3.2: Λειτουργία Stationary συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε σιδηροδρομική εφαρμογή [1]

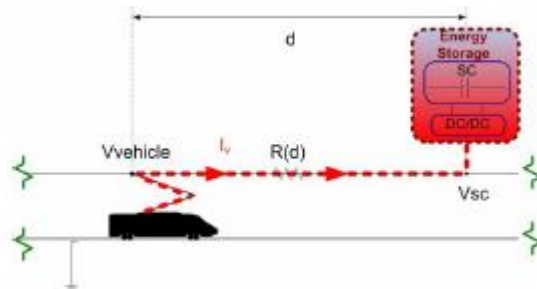
Τα κυριότερα μειονεκτήματα των stationary συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας αφορούν στην χαμηλότερη απόδοση του συστήματος αποθήκευσης, λόγω των αυξανόμενων απωλειών της γραμμής μεταφοράς συναρτήσει της απόστασης των οχημάτων από το σημείο εγκατάστασης, την πιθανή απώλεια ενέργειας στους αντιστάτες πέδησης αν το σύστημα έχει μικρότερη χωρητικότητα από την αναγεννητική ενέργεια που λαμβάνει από το όχημα, καθώς και την ανικανότητα παροχής αυτόνομης λειτουργίας στο όχημα [2]. Επιπλέον, μείζον πρόβλημα στην εφαρμογή τους στα πραγματικά σιδηροδρομικά ηλεκτρικά δίκτυα αποτελεί η καλά συντονισμένη ανάλυση για το κατάλληλο μέγεθος, και συνεπώς τη βέλτιστη χωρητικότητα, και για την ορθή επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης των συστημάτων αποθήκευσης, ενώ για τη σχεδίαση είναι βασικό να ληφθεί υπόψη η μεταβλητότητα και η συχνότητα της κυκλοφορίας των οχημάτων. Αυτό ακριβώς το ζήτημα είναι η αιτία διεξαγωγής και ο στόχος της παρούσας διπλωματικής.

Στο σχήμα 3.3 φαίνεται γραφικά ο περιορισμός στην μεταφορά της ενέργειας στη γραμμή εξ' αιτίας των ορίων των τάσεων. Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να σταλεί στη συσκευή αποθήκευσης από το όχημα που φρενάρει εκφράζεται από τη σχέση:

$$I_V < \frac{V_{reg,max} - V_{sc}}{R(d)} \quad (3.1)$$

όπου $V_{reg,max}$ είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση, V_{sc} είναι η τάση του δικτύου στην θέση της συσκευής αποθήκευσης, I_V το ρεύμα που στέλνει το όχημα και $R(d)$ η εξαρτώμενη από την αντίσταση γραμμής απόσταση του οχήματος από το σύστημα αποθήκευσης.

Γενικά, αποδεικνύεται ότι το μέγιστο ρεύμα που στέλνεται στο δίκτυο αυξάνεται ανάλογα με την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση και αντιστρόφως ανάλογα με την αντίσταση της γραμμής, την απόσταση οχήματος-ESS και την τάση του ESS [18].

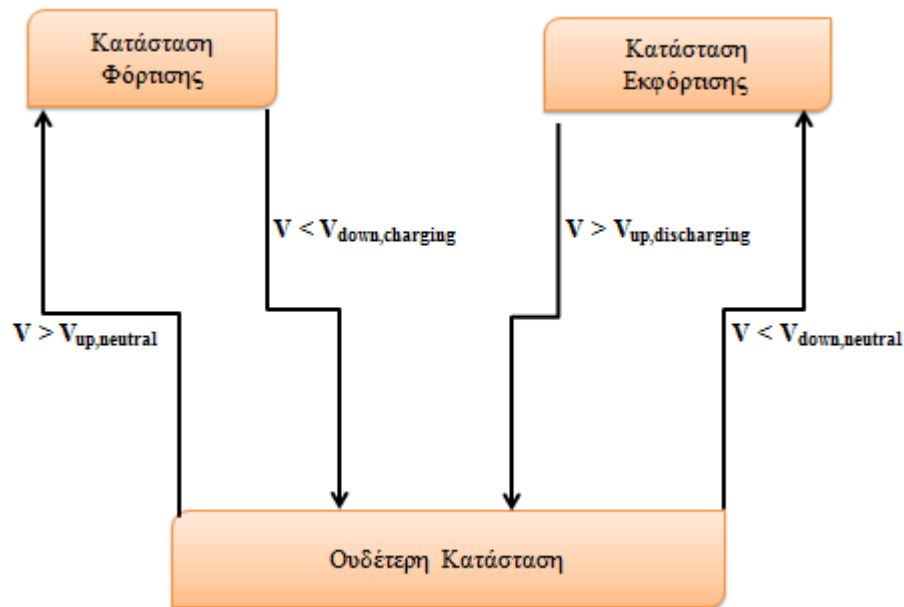


Σχήμα 3.3: Μεταφορά ενέργειας από το όχημα στο ESS σε σιδηροδρομική γραμμή [18]

3.2.2 Έλεγχος

Σε αντίθεση με τα onboard συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, ο έλεγχος των στατικών συστημάτων πρέπει να καθορίζει την ποσότητα της ισχύος που θα παρέχει/αποθηκεύει ανάλογα με την τάση του δικτύου. Ωστόσο, όταν το στατικό ESS αρχίσει να παρέχει ή να αποθηκεύει ενέργεια, η τάση του δικτύου θα μεταβληθεί. Δηλαδή, η μεταβλητή εισόδου επηρεάζεται από την δράση της ίδιας της συσκευής αποθήκευσης. Ο αλγόριθμος επίλυσης αυτού του προβλήματος παρουσιάζεται παρακάτω [13].

Οι διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης απαιτούν έναν κατάλληλο ελεγκτή που θα λειτουργεί ως συνάρτηση της τάσης γραμμής. Συγκεκριμένα, η τεχνική ελέγχου θα εστιάζει στο πότε συμβαίνει μια υπέρταση πάνω από ένα καθορισμένο ανώτατο όριο της τάσης γραμμής ως αποτέλεσμα κάποιας διαδικασίας πέδησης και το σύστημα αποθήκευσης θα μπαίνει στη λειτουργία φόρτισης, χρησιμοποιώντας το περίσσειμα αναγεννητικής ενέργειας στη γραμμή. Αντίθετα, στην περίπτωση πτώσης της τάσης γραμμής κάτω από ένα προκαθορισμένο κατώτατο όριο, το σύστημα αποθήκευσης θα εκφορτίζεται, προμηθεύοντας την αποθηκευμένη ενέργεια του στο δίκτυο, ώστε να μην ξεπεραστεί η οριακή τιμή [2]. Όταν οι συνθήκες αυτές δε πληρούνται το σύστημα αποθήκευσης θα γυρνάει στην ουδέτερη κατάσταση. Όλες αυτές οι μεταβάσεις φαίνονται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Διαδικασία επιλογής καταστάσεων φόρτισης

3.2.3 Τεχνολογίες αποθήκευσης

Δεδομένου ότι τα στατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έχουν μικρότερους περιορισμούς σε βάρος και όγκο από τα κινητά, το φάσμα των κατάλληλων τεχνολογιών αποθήκευσης είναι ευρύτερο. Οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά στη χρήση για λειτουργίες περικοπής της αιχμής ισχύος και σταθεροποίησης τάσης αλλά, όπως και στις onboard εφαρμογές, η μειωμένη ενεργειακή τους ικανότητα είναι περιοριστικός παράγοντας για την εκτεταμένη χρήση τους, σε εξάρτηση και με τα ειδικά χαρακτηριστικά κάθε συστήματος. Σε αυτό το κομμάτι, οι σφόνδυλοι (flywheels) έχουν τη δυνατότητα παροχής παρόμοιων ικανοτήτων ισχύος αλλά ελαφρώς υψηλότερων πυκνοτήτων ενέργειας. Τα θέματα ασφαλείας που σχετίζονται με τα flywheels είναι λιγότερο περιοριστικά σε στατικές εφαρμογές, αφού μπορούν να εγκατασταθούν μέσα σε βαριά κιβώτια ή ακόμα και υπόγεια. Τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (SMES) εμφανίζονται ως κατάλληλη εναλλακτική επιλογή χάρη στη γρήγορη απόκρισή τους, αλλά τα ανεβασμένα κόστη τους, η περιπλοκότητα και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούν εμποδίζουν την εκτενή χρησιμοποίησή τους. Τέλος, αναφορικά με τους συσσωρευτές, οι συσσωρευτές με τεχνολογία νατρίου θα μπορούσαν να είναι μια καλή λύση, λόγω της σχετικά υψηλής ικανότητας ισχύος και του μειωμένου κεφαλαιακού κόστους ανά μονάδα ενέργειας και κύκλου ζωής. Επίσης, ως εφεδρικές επιλογές θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου και νικελίου-υδριδίου μετάλλου [1].

3.2.4 Εμπορικά παραδείγματα

Αναμφίβολα, οι περισσότεροι κατασκευαστές αναπτύσσουν τα στατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας υιοθετώντας την τεχνολογία των υπερπυκνωτών, ως τεχνολογία αποθήκευσης, με κάποιες λίγες εξαιρέσεις να έχουν γίνει στην κατασκευή συστημάτων αποθήκευσης βασισμένων σε συσσωρευτές και flywheels. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια εμπορικά παραδείγματα stationary συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

Εταιρεία	Όνομα προϊόντος	Τεχνολογία αποθήκευσης	Λειτουργία
Siemens	Sitras SES	Υπερπυκνωτές	30% εξοικονόμηση ενέργειας, 50% μείωση αιχμής ισχύος δικτύου, σταθεροποίηση τάσης
Bombardier	EnerGstor	Υπερπυκνωτές	20-30% μείωση κατανάλωσης ενέργειας δικτύου, ικανότητα ενέργειας 0.25-5kWh
Adeneo	NeoGreen Power system	Υπερπυκνωτές	Αυτόνομα "πακέτα" αποθήκευσης, μείωση ενεργειακής κατανάλωσης έως 40%
National Korean railway research agency	Woojin Industrial Systems	Υπερπυκνωτές	Μείωση ολικής κατανάλωσης ενέργειας μέχρι και 23.4%
Piller	Powerbridge storage system	Flywheels	Μέση απόδοση 80% σε μεγάλη κυκλοφορία τρένων
Kinetic Traction Systems	GTR	Flywheel από ανθρακόνημα	Διαθέσιμη ενέργεια 1.5kWh
Saft	Intensium Max system	Συσσωρευτές Li-ion	1.5MW αιχμή φόρτισης/εκφόρτισης και 420kWh ικανότητα αποθήκευσης

Πίνακας 3.2: Εμπορικά παραδείγματα στατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Θεωρητική ανάλυση βέλτιστης θέσης για στατικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο

4.1 Θεωρητική περιγραφή δικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η εγκατάσταση ενός στατικού συστήματος αποθήκευσης βασισμένο σε υπερπυκνωτές στην περίπτωση ενός σιδηροδρομικού δικτύου, μοντελοποιώντας μαθηματικά το δίκτυο και χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση που προτείνεται στο [15], η οποία θα δίνει τη βέλτιστη θέση και την κατάλληλη χωρητικότητα του υπερπυκνωτή, ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο.

Η βέλτιστη σχεδίαση των στατικών συστημάτων αποθήκευσης σε σιδηροδρομικά δίκτυα απαιτεί την προκαταρκτική κατασκευή των μαθηματικών μοντέλων όλων των υποσυστημάτων, δηλαδή των ηλεκτρικών υποσταθμών, των γραμμών μεταφοράς, των τρένων, καθώς και του συστήματος αποθήκευσης. Εκτός από την περιπλοκότητα του κάθε υποσυστήματος, το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο πολυσύνθετο από τη στοχαστική φύση της ζητούμενης ισχύος από τα τρένα και τη θέση τους κατά μήκος της σιδηροδρομικής γραμμής. Για την απλοποίηση της διαδικασίας αυτής έγινε η παραδοχή ότι η μέση τιμή της ισχύος που απορροφά το k -οστό τρένο σε κάθε θέση είναι μια χρονική συνάρτηση $P_{t,k}(t)$.

Στα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα, οι υποσταθμοί συνήθως τροφοδοτούνται από τα AC δίκτυα μέσης τάσης και μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή σε κατάλληλα επίπεδα για τα καλώδια επαφής. Τα τυπικά επίπεδα DC τάσης των δικτύων αυτών είναι τα 750V ή τα 1500V. Σε ένα δίκτυο περιλαμβάνεται ένας υποσταθμός, που βρίσκεται στο ένα άκρο της γραμμής, αν η γραμμή έχει σχετικά μικρό μήκος και μικρό αριθμό διερχόμενων τρένων, ή περισσότεροι υποσταθμοί (με ίδια τάση εξόδου) για μεγαλύτερες γραμμές με πυκνότερη κυκλοφορία οχημάτων.

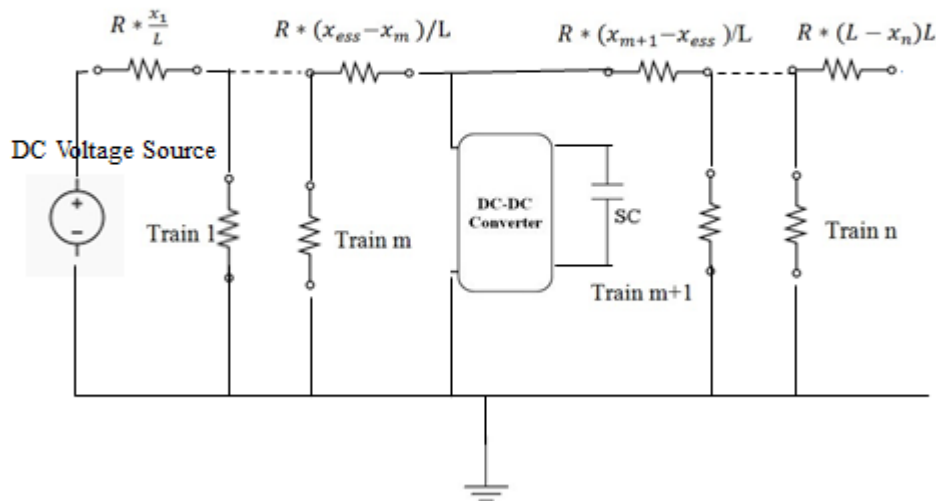
4.2 Μαθηματική μοντελοποίηση δικτύου

4.2.1 Μοντελοποίηση σιδηροδρομικού δικτύου

Το δίκτυο που εξετάζεται περιλαμβάνει έναν ηλεκτρικό υποσταθμό τοποθετημένο σε μια άκρη του, ενώ μόνο ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας τοποθετείται κατά μήκος της γραμμής, σε μια σταθερή θέση x_{ESS} . Ο ηλεκτρικός υποσταθμός μοντελοποιείται ως μια ιδανική πηγή DC τάσης E , ενώ το k -οστό διερχόμενο τρένο μοντελοποιείται ως μια χρονικά εξαρτημένη πηγή ρεύματος. Η τιμή του ρεύματος που απορροφά το k -οστό τρένο, $I_{t,k}(t)$, εξαρτάται από την απαιτούμενη ισχύ την ίδια χρονική στιγμή, $P_{t,k}(t)$, η οποία θεωρείται γνωστή, και από την τάση του τρένου, $V_{t,k}(t)$, που ισούται με την τάση γραμμής στο σημείο που βρίσκεται το τρένο τη στιγμή t , σύμφωνα με την σχέση:

$$I_{t,k}(t) = \frac{P_{t,k}(t)}{V_{t,k}(t)} \quad (4.1)$$

Επίσης, θεωρείται ότι η σιδηροδρομική γραμμή έχει μήκος L και συνολική ωμική αντίσταση R , ενώ το k -οστό τρένο που διέρχεται κάθε χρονική στιγμή t από τη γραμμή απέχει απόσταση $x_{t,k}(t)$ από τον ηλεκτρικό υποσταθμό (άκρο της γραμμής). Το ισοδύναμο κύκλωμα της διάταξης φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Ισοδύναμο κύκλωμα DC γραμμής ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

4.2.2 Μαθηματική περιγραφή της διέλευσης των τρένων

Εξετάζοντας την απλή περίπτωση της ύπαρξης μόνο 2 τρένων στη γραμμή και εφαρμόζοντας τους νόμους τάσεων του Kirchhoff για τα τρένα και για το σύστημα αποθήκευσης στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 4.1, το μαθηματικό μοντέλο του σιδηροδρομικού δικτύου περιγράφεται από το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\bullet \quad V_1 - E + \frac{R}{L} \cdot x_1 \cdot I_1 + \frac{R}{L} \cdot \min(x_1, x_2) \cdot I_2 - \frac{R}{L} \cdot \min(x_1, x_{ESS}) \cdot I_{ESS} = 0 \quad (4.2)$$

$$\bullet \quad V_2 - E + \frac{R}{L} \cdot x_2 \cdot I_2 + \frac{R}{L} \cdot \min(x_1, x_2) \cdot I_1 - \frac{R}{L} \cdot \min(x_2, x_{ESS}) \cdot I_{ESS} = 0 \quad (4.3)$$

$$\bullet \quad V_{ESS} - E - \frac{R}{L} \cdot x_{ESS} \cdot I_{ESS} + \frac{R}{L} \cdot \min(x_{ESS}, x_1) \cdot I_1 + \frac{R}{L} \cdot \min(x_{ESS}, x_2) \cdot I_2 = 0 \quad (4.4)$$

όπου οι ποσότητες $V_1(t)$, $I_1(t)$ είναι η τάση και το ρεύμα αντίστοιχα του τρένου 1 κάθε χρονική στιγμή t , ενώ οι $V_2(t)$, $I_2(t)$ και $V_{ESS}(t)$, $I_{ESS}(t)$ ομοίως για το τρένο 2 και το ESS.

Σημειώνεται ότι η θέση του συστήματος αποθήκευσης x_{ESS} είναι ανεξάρτητη του χρόνου και σταθερή, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, ενώ προφανώς οι θέσεις των δύο τρένων, $x_1(t)$ και $x_2(t)$, μεταβάλλονται με το χρόνο, καθώς αυτά κινούνται.

Για να λυθεί το σύστημα χρειάζεται και η παρουσία μιας βοηθητικής συνθήκης, η οποία θα πρέπει να συνάδει με την φυσική συμπεριφορά του συστήματος. Στην περίπτωση που εξετάζεται, τα τρένα κινούνται κατά μήκος της 1^{ης} γραμμής απομακρυνόμενα από τον ηλεκτρικό υποσταθμό κι όταν φτάσουν στο άκρο της γραμμής γυρίζουν πίσω από την 2^η γραμμή προσεγγίζοντας πλέον τον υποσταθμό. Για να θεωρηθεί ένας κύκλος συμπληρωμένος, πρέπει και τα 2 τρένα να έχουν τελειώσει μια κυκλική διαδρομή, ενώ για να είναι το σύστημα αποθήκευσης ικανό να επαναλάβει τη λειτουργία του στον επόμενο κύκλο, θα πρέπει να έχει την ίδια κατάσταση φόρτισης (SoC) στην αρχή και στο τέλος της κυκλικής διαδρομής. Μαθηματικά, η συνθήκη αυτή ικανοποιείται αν μηδενιστεί το ολοκλήρωμα της ισχύος που απορροφά ο υπερπυκνωτής σε μια κυκλική διαδρομή. Επομένως, η βοηθητική συνθήκη έχει τη μορφή:

$$\bullet \quad \int_0^T V_{ess} \cdot I_{ess} dt = 0 \quad (4.5)$$

όπου T η διάρκεια της κυκλικής διαδρομής των τρένων.

4.3 Κατασκευή συνάρτησης για την εύρεση της θέσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Η βέλτιστη σχεδίαση ενός συστήματος ηλεκτρικής ισχύος διενεργείται με την επιλογή μιας κατάλληλης συνάρτησης κόστους, η οποία απαιτεί μια επαρκή ταυτοποίηση δεικτών που χαρακτηρίζουν σφαιρικά και αποδοτικά τις τεχνικές και οικονομικές πτυχές του συστήματος [15]. Στα σιδηροδρομικά συστήματα, αυτοί οι δείκτες είναι η ρύθμιση του προφίλ της τάσης των οχημάτων, δηλαδή η απόκλιση της τάσης του οχήματος από την πραγματική τάση της γραμμής και η ελαχιστοποίηση των ρευμάτων των υποσταθμών και του μεγέθους του συστήματος αποθήκευσης.

Η ρύθμιση του προφίλ της τάσης συνεπάγεται σημαντική βελτίωση της επίδοσης των τρένων και όλου του συστήματος, καθώς η μείωση των πτώσεων τάσης επιφέρει και μείωση των ρευμάτων των τρένων και, συνεπώς, των ρευμάτων των γραμμών. Επίσης, η ελαχιστοποίηση των ρευμάτων των υποσταθμών είναι ευθέως σχετιζόμενη με τη μείωση του τρέχοντος κόστους ενέργειας και μπορεί να θεωρηθεί ως μια μέθοδος για εξοικονόμηση ενέργειας. Τέλος, η μείωση της χωρητικότητας του συστήματος αποθήκευσης σημαίνει αυτόματα και μείωση του κεφαλαιακού του κόστους.

Σύμφωνα με το [15], η συνάρτηση βελτιστοποίησης που ικανοποιεί όλες τις σχέσεις του δικτύου και ταυτόχρονα τους τεχνικούς περιορισμούς στον υποσταθμό, στα τρένα, στις γραμμές και στο σύστημα αποθήκευσης είναι η παρακάτω:

$$\bullet \quad f = \int_0^T [w_1 \cdot (V_1 - V_{ref})^2 + w_2 \cdot (V_2 - V_{ref})^2 + w_3 \cdot I_s^2 + w_4 \cdot I_{ESS}^2] dt \quad (4.6)$$

όπου w_1, w_2, w_3, w_4 είναι οι κατάλληλοι συντελεστές βάρους, V_{ref} η πραγματική τάση γραμμής και I_s το ρεύμα του υποσταθμού. Οι δύο πρώτοι όροι είναι ανάλογοι της μέσης τετραγωνικής απόκλισης της τάσης και οι δύο τελευταίοι σχετίζονται με τις ενέργειες του υποσταθμού και του συστήματος αποθήκευσης.

Προτείνεται επίσης μια αναλυτική διαδικασία για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης βασισμένο στην υπόθεση ότι τα ρεύματα των οχημάτων κατά τις λειτουργίες της επιτάχυνσης και της επιβράδυνσης υπολογίζονται από τη γνώση της ισχύος των τρένων (τύπος 4.1), αγνοώντας την απόκλιση της τάσης από την πραγματική τάση γραμμής. Έτσι, το πρόβλημα έγκειται στην ελαχιστοποίηση της συνάρτησης βελτιστοποίησης f , ικανοποιώντας ταυτόχρονα τις σχέσεις 4.2-4.4, καθώς και τη βοηθητική συνθήκη 4.5. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, θεωρείται η παρακάτω επαυξημένη συνάρτηση [16]:

$$\bullet \quad f_a = f + \sum_{h=1}^3 \lambda_h \theta_h + \gamma V_{ESS} I_{ESS} \quad (4.7)$$

όπου θ_h τα αριστερά μέλη των εξισώσεων 4.2-4.4, λ_h πολλαπλασιαστές Lagrange και γ μια πραγματική σταθερά. Η βέλτιστη μεταβλητή ελέγχου I_{ESS} υπολογίζεται από την επίλυση του ακόλουθου συστήματος εξισώσεων:

$$\begin{aligned} & \bullet \frac{\theta f_a}{\theta \lambda_h} = 0, \quad h=1,2,3 \\ & \bullet \frac{\theta f_a}{\theta I_{ESS}} = 0, \end{aligned} \tag{4.8}$$

Έτσι, το ρεύμα του συστήματος αποθήκευσης δίνεται τελικά από τον τύπο:

$$\begin{aligned} \bullet \quad I_{ESS} = & \{ w_1 \cdot \frac{R}{L} \cdot \min(x_1, x_{ESS}) \cdot [V_{ref} - E + \frac{R}{L} \cdot x_1 \cdot I_1 + \frac{R}{L} \cdot \min(x_1, x_2) \cdot I_2] \\ & + w_2 \cdot \frac{R}{L} \cdot \min(x_2, x_{ESS}) \cdot [V_{ref} - E + \frac{R}{L} \cdot x_2 \cdot I_2 + \frac{R}{L} \cdot \min(x_1, x_2) \cdot I_1] \\ & + w_3 \cdot (I_1 + I_2) - \frac{\gamma}{2} \cdot [E - \frac{R}{L} \cdot \min(x_1, x_{ESS}) \cdot I_1 - \frac{R}{L} \cdot \min(x_2, x_{ESS}) \cdot I_2] \} \\ & / \{ w_1 \cdot [\frac{R}{L} \cdot \min(x_1, x_{ESS})]^2 + w_2 \cdot [\frac{R}{L} \cdot \min(x_2, x_{ESS})]^2 + w_3 + w_4 + \gamma \cdot \frac{R}{L} \cdot x_{ESS} \} \end{aligned} \tag{4.9}$$

Υπολογίζοντας το ρεύμα του υπερπυκνωτή αποθήκευσης, η τάση του ESS στην πλευρά της γραμμής μπορεί πλέον να καθοριστεί από τη σχέση 4.4, κι επομένως, με γνωστά τα I_{ESS} και V_{ESS} , η σταθερά γ βρίσκεται από τη βοηθητική συνθήκη (4.5). Συνεπώς, οι τάσεις V_1 και V_2 των τρένων υπολογίζονται από τις σχέσεις 4.2 και 4.3 και έτσι, όλες οι ποσότητες της συνάρτησης βελτιστοποίησης f θεωρούνται γνωστές. Η αναλυτική επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε θέση εγκατάστασης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας x_{ESS} , αποκτώντας την αντίστοιχη τιμή της συνάρτησης $f(x_{ESS})$, με x_{ESS} να ανήκει στο διάστημα $[0, L]$. Η παρακάτω αριθμητική εφαρμογή θα αποδώσει τη βέλτιστη θέση $x_{ESS,OPT}$ του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στην περίπτωση των 2 τρένων στο δίκτυο που εξετάζεται.

4.4 Υπολογισμός βέλτιστης θέσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με αριθμητική εφαρμογή

4.4.1 Δεδομένα

Η περίπτωση που μελετάται για την εύρεση της βέλτιστης θέσης τοποθέτησης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας εμπεριέχει τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετροι	Ποσότητα	Μονάδα μέτρησης
Μήκος γραμμής	3	Km
Αντίσταση καλωδίου επαφής	0.125	Ω/km
Πραγματική τάση γραμμής	750	V
Αριθμός υποσταθμών	1	-
Αριθμός τρένων	2	-
Αριθμός στάσεων	5	-
Απόσταση διαδοχικών στάσεων	600	m
Μέσος ρυθμός επιτάχυνσης τρένου	1	m/s^2
Μέσος ρυθμός επιβράδυνσης τρένου	0.7	m/s^2
W_1	400	Ω^{-1}
W_2	400	Ω^{-1}
W_3	200	Ω
W_4	20	Ω

Πίνακας 4.1: Παράμετροι ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου

Έχει γίνει η παραδοχή ότι τα 2 τρένα που κυκλοφορούν στο ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο κάθε χρονική στιγμή απέχουν σταθερή απόσταση μεταξύ τους, δηλαδή έχουν σταθερή καθυστέρηση διέλευσης από το ίδιο σημείο. Αυτό συνεπάγεται, δεδομένου ότι οι στάσεις απέχουν μεταξύ τους 600m, ότι τα 2 τρένα θα ξεκινάνε και θα καταλήγουν ταυτόχρονα στις στάσεις. Συνεπώς, σε όποια φάση της κίνησής του βρίσκεται το 1^ο τρένο (επιτάχυνση, επιβράδυνση ή σταθερή ταχύτητα), στην αντίστοιχη φάση θα βρίσκεται και το 2^ο τρένο.

Εξετάζονται 5 πιθανά σενάρια σταθερής απόστασης μεταξύ των 2 τρένων, σε καθένα από τα οποία θα μελετηθεί το ενδεχόμενο τοποθέτησης του συστήματος αποθήκευσης σε 6 πιθανές θέσεις, όπως φαίνεται στους παρακάτω πίνακες.

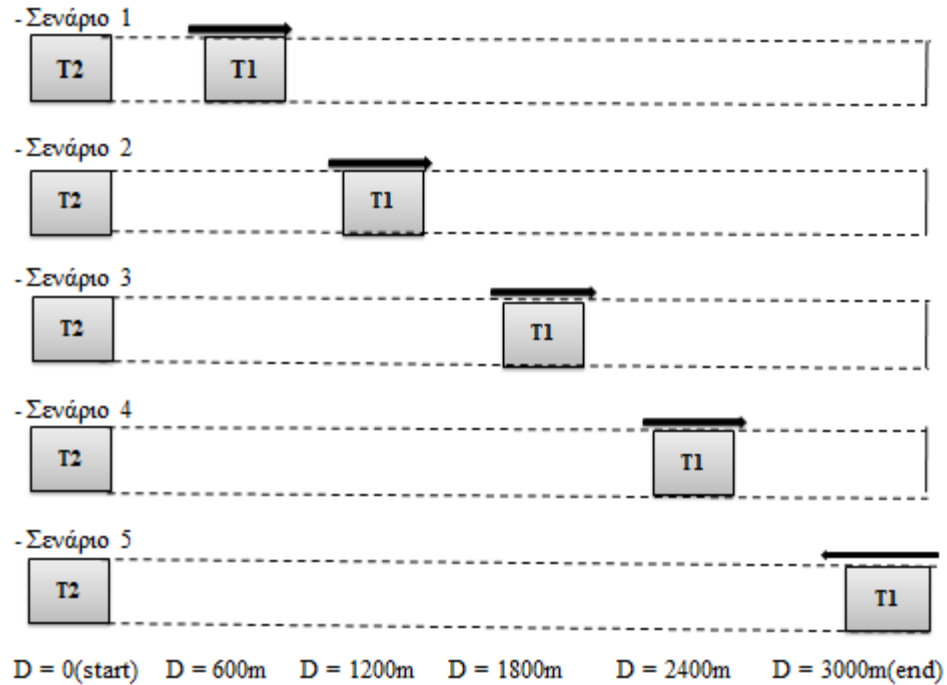
Σενάριο	1	2	3	4	5
Απόσταση (m)	600	1200	1800	2400	3000

Πίνακας 4.2: Σενάρια σταθερής απόστασης μεταξύ των 2 τρένων

Θέση τοποθέτησης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας x_{ESS} (m)
500
1000
1500
2000
2500
3000

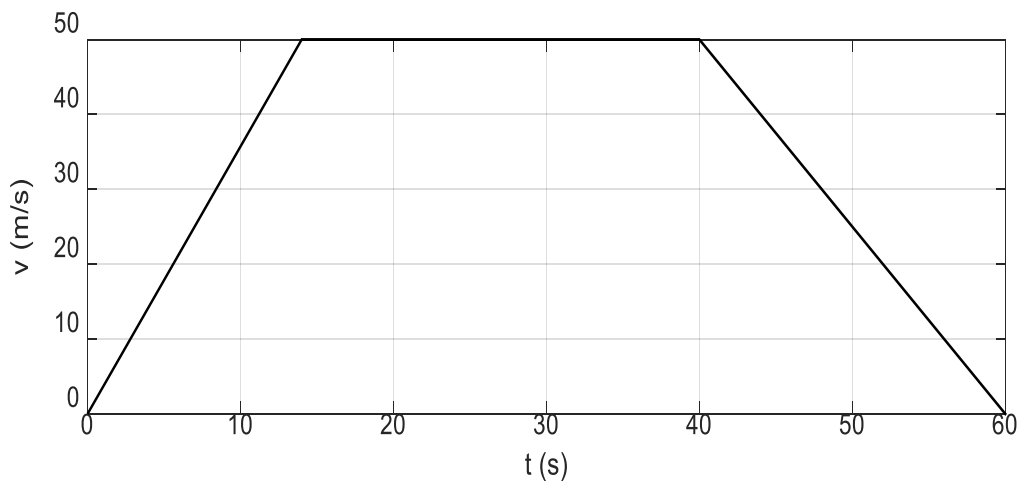
Πίνακας 4.3: Θέσεις τοποθέτησης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για κάθε σενάριο

Απαραίτητη επισήμανση συνιστά το γεγονός ότι σε κάθε σενάριο θεωρείται ότι το 2^ο τρένο ξεκινάει πάντα από την αρχή της γραμμής, ενώ το 1^ο προηγείται κατά την αντίστοιχη απόσταση που ορίζει το σενάριο, ξεκινάει επομένως από τη στάση που αντιστοιχεί στην απόσταση που απέχει από το 2^ο τρένο, π.χ από την 1^η στάση που βρίσκεται στα 600m για το 1^ο σενάριο, από την 2^η στάση για το 2^ο σενάριο κ.ο.κ. Παρατηρείται επίσης, ότι για το τελευταίο σενάριο το 1^ο τρένο ξεκινάει από την 5^η στάση που βρίσκεται στα 3000m, δηλαδή από το άλλο άκρο της γραμμής που ταυτίζεται με την αρχή της 2^{ης} γραμμής. Δηλαδή, στο σενάριο αυτό τα 2 τρένα κινούνται αντιπαράλληλα καθόλη την πορεία τους. Αν θεωρήσουμε την οριζόντια ως κατεύθυνση κίνησης των τρένων, τότε σχηματικά τα διάφορα σενάρια της μεταξύ τους απόστασης αναπαρίστανται ως εξής:

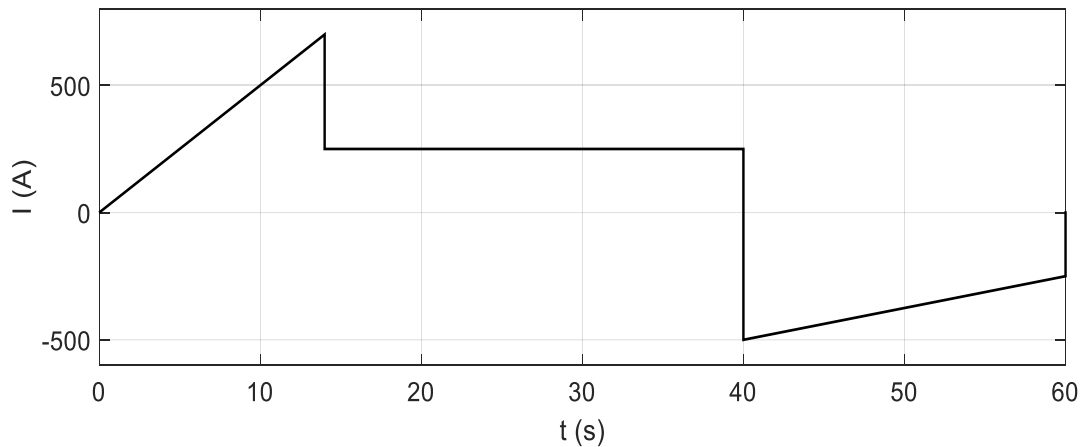


Σχήμα 4.2: Σχηματική αναπαράσταση αρχικής θέσης των 2 τρένων σε όλα τα πιθανά σενάρια της μεταξύ τους απόστασης

Επίσης, η ταχύτητα του κάθε τρένου σε μια περίοδο, η οποία ορίζεται ως ο χρόνος που διαρκεί το ταξίδι του τρένου από τη στιγμή που φεύγει από μια στάση μέχρι να φθάσει στην επόμενη και ισούται με $T_{περ} = 60s$, καθώς και το ρεύμα που αυτό καταναλώνει, δίνονται στα παρακάτω διαγράμματα. Θεωρείται ότι και τα δύο μεγέθη ακολουθούν την ίδια συνάρτηση για κάθε ζεύγος στάσεων, μεταβάλλονται δηλαδή μόνο στον άξονα του χρόνου.



Διάγραμμα 4.1: Ταχύτητα τρένου σε μια περίοδο



Διάγραμμα 4.2: Ρεύμα τρένου σε μια περίοδο

4.4.2 Καθορισμός συνάρτησης θέσης

Από το διάγραμμα της ταχύτητας μπορεί να εξαχθεί η θέση του κάθε τρένου συναρτήσει του χρόνου, για την περίοδο στην οποία ξεκινάει την πορεία του από την αρχή της γραμμής την χρονική στιγμή $t = 0s$ και κατευθύνεται στην 1^η στάση:

$$0.496t^2, \quad \text{αν } 0s \leq t \leq 14s$$

$$\begin{aligned} \bullet \quad X(t) &= 13.89t - 97.26, & \text{αν } 14s < t \leq 40s & \quad (m) & \quad (4.10) \\ & -0.345t^2 + 41.67t - 656.5, & \text{αν } 40s < t \leq 60s & \end{aligned}$$

Σε κάθε επόμενη περίοδο η μετατόπιση του τρένου αυξάνεται απλά 600m, επομένως η συνάρτηση θέσης του παίρνει την εξής μορφή:

$$\bullet \quad X_i(t) = X_1(t - 60i) + 600i \quad (m), \quad \text{για } 60s < t \leq 300s \quad (4.11)$$

όπου $i = 0, 1, 2, 3, 4$ η κάθε περίοδος μέχρι το τρένο να φτάσει στο τέλος της πρώτης γραμμής.

Όταν φτάσει στο σημείο αυτό, τότε μετατοπίζεται στη δεύτερη γραμμή, από όπου αρχίζει να κάνει την αντίστροφη διαδρομή, πλησιάζοντας πλέον τον υποσταθμό, από όπου ξεκίνησε. Έτσι, η συνάρτηση θέσης πλέον για τις περιόδους στις οποίες το τρένο βρίσκεται στη 2^η γραμμή γίνεται:

$$\bullet \quad X_i(t) = 3000 - X_1(t - 60i) \quad (m), \quad \text{για } 300s < t \leq 600s \quad (4.12)$$

όπου $i = 5,6,7,8,9$ η κάθε περίοδος μέχρι το τρένο να φτάσει στο τέλος της 2^{ης} γραμμής, συμπληρώνοντας έναν ολόκληρο κύκλο. Οι σχέσεις 4.10 - 4.12 παρουσιάζουν τη συνάρτηση θέσης κάθε τρένου για κάθε χρονική στιγμή t στη διάρκεια μιας κυκλικής διαδρομής του. Ωστόσο, η θέση των 2 τρένων είναι καθόλη τη διάρκεια της κυκλικής διαδρομής τους σχετική με την σταθερή απόσταση την οποία αυτά απέχουν (άρα και το σενάριο που εφαρμόζεται).

4.4.3 Καθορισμός συνάρτησης ρεύματος

Τα 2 τρένα ακολουθούν την ίδια καμπύλη ρεύματος, που φαίνεται στο διάγραμμα 4.2. Επομένως, η συνάρτηση του ρεύματος κάθε τρένου για την 1^η περίοδο της πορείας του έχει τον παρακάτω τύπο:

$$\begin{aligned}
 & 50t, & 0s \leq t \leq 14s \\
 \bullet \quad I(t) = & 250, & 14s \leq t \leq 40s \\
 & 12.5t - 1000, & 40s \leq t \leq 60s
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Θεωρείται πως σε κάθε περίοδο το ρεύμα του τρένου κρατιέται ακριβώς ίδιο σε τιμή, άρα η συνάρτηση μετατοπίζεται μόνο στον άξονα του χρόνου. Επομένως, η συνάρτηση του ρεύματος για τις επόμενες περιόδους είναι κοινή και για τα 2 τρένα και έχει τον εξής τύπο:

$$\begin{aligned}
 & 50t - 3000i, & 0 + 60i \leq t \leq 14 + 60i \\
 \bullet \quad I_i(t) = & 250, & 14 + 60i \leq t \leq 40 + 60i \\
 & 12.5t - 1000 - 750i, & 40 + 60i \leq t \leq 60 + 60i
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

όπου $i = 1,2,\dots,9$ η κάθε περίοδος μέχρι τον τερματισμό της κυκλικής διαδρομής των τρένων.

4.4.4 Υπολογισμός τιμής σταθεράς γ και συνάρτησης βελτιστοποίησης

Σύμφωνα με την περιγραφή του θεωρητικού μοντέλου, για τον υπολογισμό της σταθεράς γ μέσω του ολοκληρώματος της σχέσης 4.5 χρειάζεται να προηγηθεί ο υπολογισμός του ρεύματος και της τάσης του συστήματος αποθήκευσης, I_{ESS} και V_{ESS} αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα, η τάση του συστήματος αποθήκευσης υπολογίζεται από τη σχέση 4.4, αν λύσουμε ως προς τον όρο V_{ESS} :

- $$V_{ESS}(t, \gamma) = 750 - I(t)0.000042[\min(X_1(t), X_{ESS}) + \min(X_2(t), X_{ESS})] + \frac{R}{L}X_{ESS} I_{ESS}(t, \gamma) \quad (4.15)$$

Επίσης, το ρεύμα του συστήματος αποθήκευσης, σύμφωνα με τη σχέση 4.9, αντικαθιστώντας τα αριθμητικά δεδομένα των συντελεστών βάρους w_1 , της αντίστασης γραμμής R και του μήκους της γραμμής L και λαμβάνοντας υπόψιν τους τύπους της θέσης και του ρεύματος των τρένων που καθορίστηκαν παραπάνω, είναι συνάρτηση του χρόνου και της σταθεράς γ και έχει τον εξής τύπο:

- $$I_{ESS}(t, \gamma) = \{ 0.0000006944\min(X_1(t), X_{ESS})[X_1(t) + \min(X_1(t), X_2(t))]I(t) + 0.0000006944\min(X_2(t), X_{ESS})I(t)[\min(X_1(t), X_2(t)) + X_2(t)] + 400I(t) - \frac{\gamma}{2}\{ 750 - 0.000042 \cdot I(t)[\min(X_1(t), X_{ESS}) + \min(X_2(t), X_{ESS})] \} \} / \{ 0.0000006944[\min(X_1(t), X_{ESS})^2 + \min(X_2(t), X_{ESS})^2] + 220 + 0.000042X_{ESS}\gamma \} \quad (4.16)$$

Το ολοκλήρωμα της σχέσης υπολογισμού της σταθεράς γ υπολογίζεται για κάθε περίοδο και για κάθε φάση της κίνησης του τρένου ξεχωριστά και στη συνέχεια προστίθενται όλα τα επιμέρους ολοκληρώματα και το άθροισμά τους ισούται με το μηδέν. Επιπροσθέτως, δεδομένου ότι εξετάζεται η πιθανή τοποθέτηση του συστήματος αποθήκευσης σε 6 πιθανές θέσεις x_{ESS} , κάθε θέση τοποθέτησης αντιστοιχεί και σε μια διαφορετική τιμή της σταθεράς γ . Τελικά, η τιμή της συνάρτησης βελτιστοποίησης $f(x_{ESS})$ μπορεί πλέον να υπολογιστεί από το ολοκλήρωμα της σχέσης 4.6, για συγκεκριμένες τιμές της σταθεράς γ και της θέσης x_{ESS} , για κάθε εφαρμοζόμενο σενάριο σταθερής απόστασης των 2 τρένων. Οι διαδικασίες υπολογισμού της σταθεράς γ και της τιμής της συνάρτησης βελτιστοποίησης έγιναν στο περιβάλλον του Matlab.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού της σταθεράς γ για κάθε θέση εγκατάστασης του συστήματος αποθήκευσης x_{ESS} , καθώς της συνάρτησης βελτιστοποίησης, που αποκτήθηκαν από την εφαρμογή της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω.

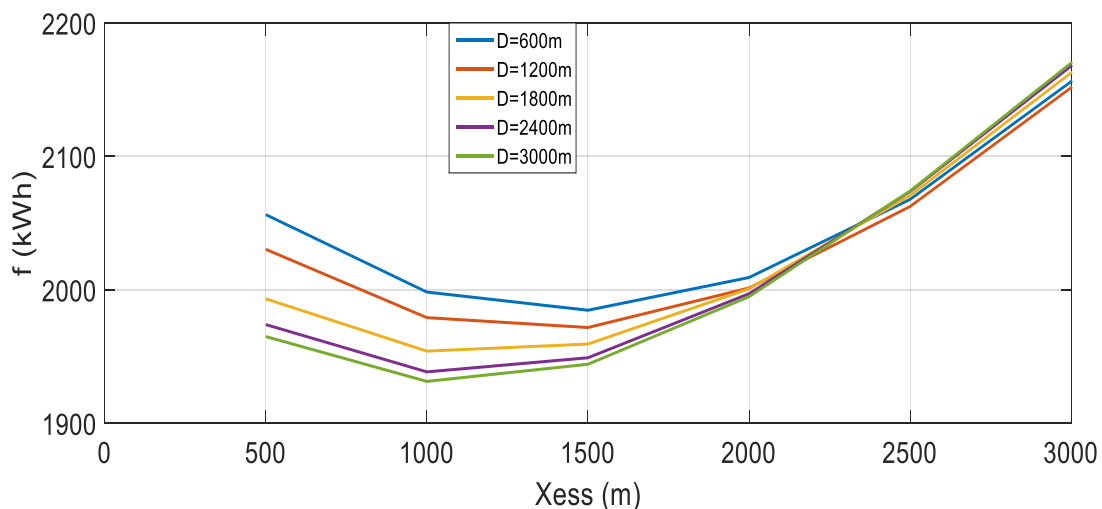
	D = 600m		D = 1200m		D = 1800m		D = 2400m		D = 3000m	
	γ	f (kWh)	γ	f (kWh)	γ	f (kWh)	γ	f (kWh)	γ	f (kWh)
X_{ESS} (m)										
500	69.81	2056.32	69.81	2030.31	69.76	1993.20	69.75	1973.90	69.75	1964.91

1000	71.31	1998.26	71.23	1979.11	71.22	1954.01	71.19	1938.44	71.18	1931.32
1500	73.80	1984.65	73.62	1971.68	73.65	1959.63	73.60	1949.02	73.60	1944.16
2000	77.20	2009.18	76.94	2001.31	76.99	2000.69	76.92	1997.02	76.91	1994.80
2500	81.54	2067.73	81.16	2062.40	81.28	2070.59	81.20	2073.60	81.18	2074.07
3000	86.79	2156.05	86.36	2151.51	86.49	2162.61	86.40	2167.73	86.37	2169.97

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα υπολογισμού σταθεράς γ και τιμές συνάρτησης βελτιστοποίησης για δεδομένο x_{ESS}

Παρατηρείται ότι στα δύο πρώτα σενάρια, όπου τα τρένα απέχουν μεταξύ τους απόσταση 600m και 1200m, η συνάρτηση βελτιστοποίησης λαμβάνει την χαμηλότερη τιμή της όταν το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας τοποθετείται στη θέση $x_{ESS} = 1500m$, δηλαδή στο μέσο της γραμμής. Αντιθέτως, στα 3 υπόλοιπα σενάρια, κατά τα οποία τα τρένα απέχουν μεταξύ τους απόσταση 1800m, 2400m και 3000m, η συνάρτηση βελτιστοποίησης ελαχιστοποιείται όταν το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας τοποθετείται στη θέση $x_{ESS} = 1000m$, δηλαδή στο 1/3 της σιδηροδρομικής γραμμής.

Πρέπει επίσης να επισημανθεί πως η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης συνολικά για όλα τα σενάρια είναι 1931.32 kWh και επιτυγχάνεται για τοποθέτηση του συστήματος αποθήκευσης στη σταθερή θέση $x_{ESS} = 1000m$ στο σενάριο κατά το οποίο τα τρένα απέχουν μεταξύ τους 3000m. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τις τιμές που παίρνει η συνάρτηση βελτιστοποίησης σε κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης του συστήματος αποθήκευσης και για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν.



Διάγραμμα 4.3: Τιμή συνάρτησης βελτιστοποίησης f για συγκεκριμένη θέση x_{ESS} για όλα τα σενάρια απόστασης μεταξύ των τρένων

4.5 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάστηκε το παράδειγμα ενός απλού σιδηροδρομικού δικτύου κατά τα πρότυπα του [15], το οποίο αποτελούνταν από έναν ηλεκτρικό υποσταθμό τοποθετημένο στο ένα άκρο της γραμμής, 2 γραμμές με αντίθετες κατευθύνσεις, 2 διερχόμενα τρένα, η πορεία των οποίων ήταν κυκλική, και ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Όλες οι παράμετροι του συστήματος μοντελοποιήθηκαν μαθηματικά, ορίστηκαν αριθμητικά δεδομένα για κάθε μια και, μέσω μιας συνάρτησης βελτιστοποίησης που προτάθηκε στο [15] και βασίζεται σε ορισμένους δείκτες που αντιπροσωπεύουν την κατανάλωση ενέργειας στο σύστημα, υπολογίστηκε η συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σε διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης του ESS, καθώς και σε διαφορετικά σενάρια σταθερής απόστασης μεταξύ των τρένων.

Από το διάγραμμα 4.3 εξάγεται το συμπέρασμα πως για την επίτευξη της μεγαλύτερης εξοικονόμησης ενέργειας (δηλαδή της μικρότερης κατανάλωσης ενέργειας) το σύστημα αποθήκευσης πρέπει βέλτιστα να τοποθετηθεί στις θέσεις 1000m ή 1500m της γραμμής, ανάλογα και την απόσταση που απέχουν τα διερχόμενα τρένα. Εν ολίγοις, το διάστημα $[L/3, L/2]$ αποτελεί την αποδοτικότερη επιλογή για την εγκατάσταση ενός στατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, ώστε να υπάρξει η ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των τριών δεικτών που ελήφθησαν υπόψιν στη συνάρτηση βελτιστοποίησης, δηλαδή της απόκλιση της τάσης γραμμής, του ρεύματος του υποσταθμού και του ρεύματος του συστήματος αποθήκευσης.

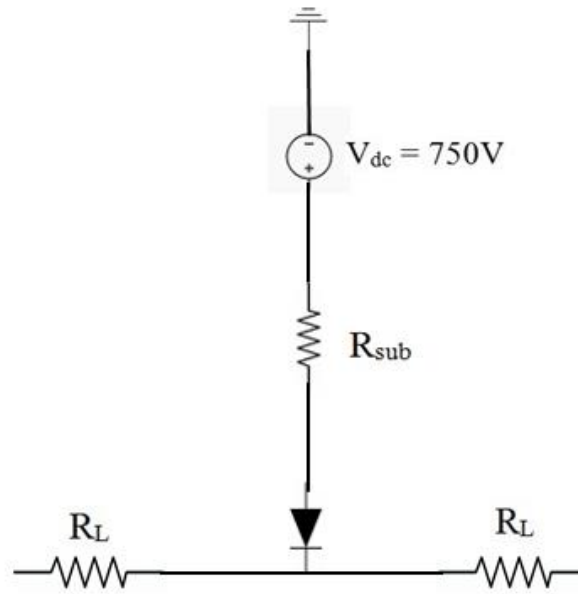
Μοντελοποίηση ηλεκτρικού σιδηροδρομικού δικτύου στο Simulink και προσομοίωση λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένο σε υπερπυκνωτή

5.1 Περιγραφή μοντελοποίησης επιμέρους ηλεκτρικών μερών του δικτύου

Το δεύτερο κομμάτι ενασχόλησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά στην προσομοίωση της λειτουργίας ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένο σε υπερπυκνωτή σε ένα μοντέλο σιδηροδρομικού δικτύου στο περιβάλλον Matlab/Simulink και στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων αναφορικά με τα πλεονεκτήματα χρησιμοποίησής του. Η ανάλυση της μοντελοποίησης του σιδηροδρομικού δικτύου ως προς τα επιπλέον κομμάτια του ακολουθεί παρακάτω, μαζί με όλες τις παραμέτρους και τις παραδοχές που έχουν γίνει στο σχεδιασμό του δικτύου.

5.1.1 Ηλεκτρικοί υποσταθμοί

Το σιδηροδρομικό δίκτυο αποτελείται από 13 ηλεκτρικούς υποσταθμούς, καθένας από τους οποίους αντιπροσωπεύει και μια στάση, συμβολισμένοι με τα γράμματα από το A ως το M. Ένας ηλεκτρικός υποσταθμός μοντελοποιείται μέσω μιας DC πηγής τάσης 750V σε σειρά με μια εσωτερική αντίσταση και μια δίοδο. Ο ρόλος της πηγής τάσης είναι να παρέχει σταθερή συνεχή τάση τιμής 750V για την ηλεκτροδότηση του δικτύου. Στην περίπτωση μη αγωγής (off-state) η σύνθετη αντίσταση της διόδου θεωρείται άπειρη, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι λειτουργεί ως ανοιχτοκύκλωμα. Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η κυκλωματική μοντελοποίηση για έναν ηλεκτρικό υποσταθμό:



Σχήμα 5.1: Μοντελοποίηση ηλεκτρικού υποσταθμού

5.1.2 Ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς

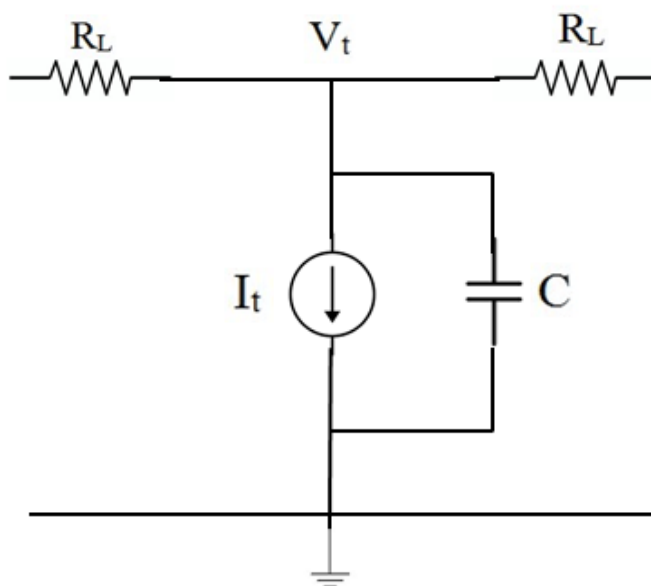
Το μοντελοποιημένο σιδηροδρομικό δίκτυο αποτελείται από 2 κατευθύνσεις όδευσης των τρένων (tracks), κάθε μια από τις οποίες εμπεριέχει δύο γραμμές μεταφοράς, οι οποίες είναι συνδεδεμένες παράλληλα μεταξύ τους και συνδέουν τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς διαδοχικά. Οι σιδηροδρομικές γραμμές μοντελοποιούνται ως μεταβλητές ωμικές αντιστάσεις, ανάλογα εξαρτώμενες από την απόσταση από την αρχή της γραμμής. Έτσι, όσο το τρένο κινείται κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, τόσο μεταβάλλεται η συνολική αντίστασή της.

5.1.3 Τρένο

Στο δίκτυο που εξετάζεται, ο μέγιστος αριθμός τρένων που μπορούν να βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή στις γραμμές είναι 12. Αυτό προκύπτει από το γεγονός της ύπαρξης 13 σταθμών στο σιδηροδρομικό δίκτυο, σε συνδυασμό με την παραδοχή πως δεν μπορούν δύο ή περισσότερα τρένα να βρίσκονται στο ίδιο τμήμα της γραμμής μεταφοράς (δηλαδή ανάμεσα σε 2 ίδιους σταθμούς με την ίδια φορά κίνησης) την ίδια χρονική στιγμή. Συνεπώς, το headway, ο χρόνος δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών τρένων, ρυθμίζεται καταλλήλως, ώστε να πληρείται ο ανωτέρω περιορισμός.

Το τρένο μοντελοποιείται ηλεκτρικά μέσω μιας εξαρτημένης DC πηγής ρεύματος συνδεδεμένης παράλληλα με έναν πυκνωτή. Ο πυκνωτής αυτός έχει πολύ μικρή τιμή χωρητικότητας και χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της δεκτικότητας (receptivity) του δικτύου, δηλαδή αντιπροσωπεύει το επίπεδο ικανότητας του δικτύου στην απορρόφηση ενέργειας.

Στο περιβάλλον του Simulink, χρησιμοποιήθηκε επιπλέον, παράλληλα στον ανωτέρω παράλληλο συνδυασμό πηγής ρεύματος-πυκνωτή, μια δίοδος σε σειρά με μια πηγή τάσης 900V DC. Αυτό έγινε για την μοντελοποίηση των απορριπτικών φορτίων, λόγω μικρής ακρίβειας του μοντέλου. Συγκεκριμένα, με τον τρόπο αυτόν μέχρι η τάση να περάσει το μέγιστο επιτρεπτό όριο των 900V η δίοδος δεν άγει, ενώ όταν το προσπεράσει, τότε η περίσσεια ισχύος θα περάσει μέσα από τη δίοδο, η οποία θα λειτουργήσει ως απορριπτικό φορτίο.

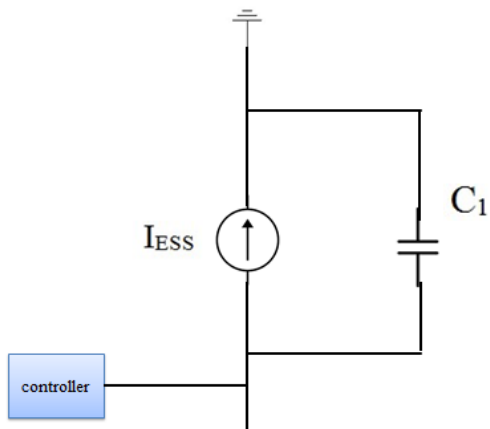


Σχήμα 5.2: Μοντελοποίηση τρένου

5.1.4 Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις αυτές είναι βασισμένο σε τεχνολογία αποθήκευσης υπερπυκνωτή, καθώς αυτή είναι η πιο διαδεδομένη και στις πραγματικές σιδηροδρομικές εφαρμογές. Το σύστημα αυτό είναι stationary, τοποθετείται δηλαδή σε κάποιον ηλεκτρικό υποσταθμό, και η λειτουργία του έγκειται στην αποθήκευση μέρους της ενέργειας πέδησης των διερχόμενων τρένων και την διοχέτευσή της σε κάποιο επόμενο τρένο που θα βρίσκεται στην διαδικασία επιτάχυνσης.

Το σύστημα αποθήκευσης μοντελοποιείται με μια ελεγχόμενη DC πηγή ρεύματος συνδεδεμένη παράλληλα με έναν πυκνωτή. Η διάταξη αυτή φαίνεται στο σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Μοντελοποίηση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

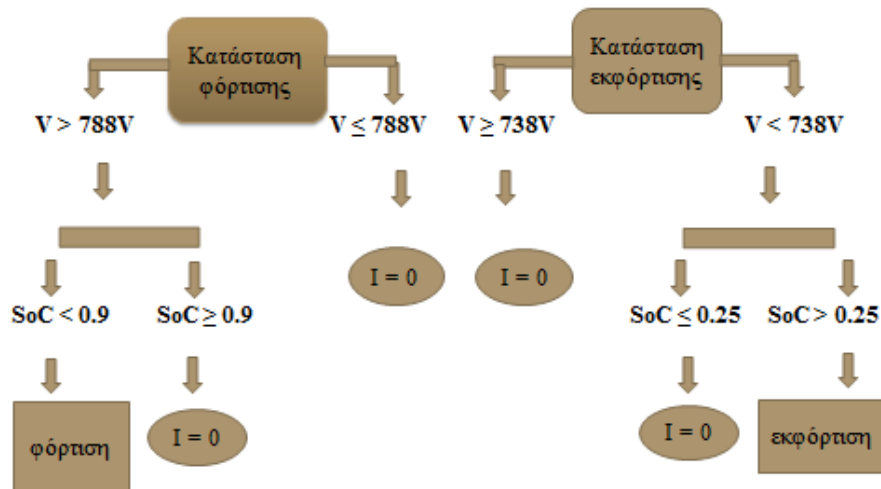
Για τη λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης απαιτείται η ύπαρξη ενός ελεγκτή, ο οποίος θα καθορίζει πότε αυτό θα φορτίζεται, θα απορροφάει δηλαδή ισχύ από το δίκτυο, και πότε θα εκφορτίζεται, θα παρέχει δηλαδή ισχύ στο δίκτυο. Ο ελεγκτής θα εξετάζει δύο συγκεκριμένες παραμέτρους και θα δίνει την ανάλογη εντολή στο σύστημα αποθήκευσης:

- Το επίπεδο της τάσης του δικτύου
- Την κατάσταση φόρτισης (SoC) του υπερπυκνωτή

Όσον αφορά στην τάση του δικτύου, η λειτουργία είναι απλή: Αν η τάση ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο άνω όριο, το οποίο τίθεται στα 788V (περίπου 5% μεγαλύτερο της ονομαστικής τιμής των 750V), τότε η συσκευή αποθήκευσης πρέπει να φορτίζεται, δηλαδή να απορροφά ρεύμα από το δίκτυο, ώστε να μειώσει την τάση του. Αντίθετα, αν η τάση πέσει κάτω από μια κατώτατη επιτρεπτή τιμή, που προκαθορίζεται στα 738V, τότε το σύστημα αποθήκευσης εκφορτίζεται, δηλαδή παρέχει ρεύμα στο δίκτυο, ώστε η τάση του να επανέλθει στα κανονικά της επίπεδα. Η τιμή του ρεύματος την οποία το σύστημα αποθήκευσης παρέχει στο δίκτυο ή απορροφά από αυτό καθορίζεται στα 1000A, σύμφωνα με το data sheet των υπερπυκνωτών που χρησιμοποιήθηκαν.

Για τον έλεγχο του SoC του υπερπυκνωτή απαιτείται να τηρείται μια συνθήκη: Προκειμένου το σύστημα αποθήκευσης να πληροί την προϋπόθεση για την ενεργοποίηση και την συνέχιση της φόρτισης πρέπει το SoC να μην ξεπερνά την τιμή 0.9, καθώς αυτό είναι το ανώτατο όριο που δίνεται από τον

κατασκευαστή για τους υπερπυκνωτές. Αντίστοιχα, για να τηρείται ο περιορισμός της εκφόρτισης, το SoC υποχρεωτικά πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 0.25. Αν κάποια από αυτές τις συνθήκες παραβιαστεί, τότε ο ελεγκτής δίνει μηδενικό σήμα στη συσκευή αποθήκευσης, δηλαδή αυτή είναι στην ουδέτερη κατάσταση. Το παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζει τον αλγόριθμο ελέγχου:



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Ο έλεγχος του συστήματος αποθήκευσης μοντελοποιείται μέσω μιας συνάρτησης, ο αλγόριθμος της οποίας γράφεται σε κώδικα Matlab. Η συνάρτηση αυτή δέχεται δύο εισόδους (τάση V και κατάσταση φόρτισης SoC) και εξετάζει αν τηρούνται οι συνθήκες για την φόρτιση, την εκφόρτιση ή την ουδέτερη κατάσταση του συστήματος αποθήκευσης ταυτόχρονα για αμφότερες τις εισόδους. Δίνοντας μια έξοδο, η οποία συνδέεται στην εξαρτημένη πηγή ρεύματος του συστήματος αποθήκευσης, αντιπροσωπεύει μια ενδεδειγμένη τιμή ρεύματος, που το σύστημα καλείται είτε να απορροφήσει από το δίκτυο (επομένως να φορτιστεί), είτε να παρέχει στο δίκτυο (επομένως να εκφορτιστεί). Στην περίπτωση ουδέτερης κατάστασης, η τιμή ρεύματος που θα είναι η έξοδος της συνάρτησης θα ισούται με μηδέν. Ο αλγόριθμος αυτός φαίνεται παρακάτω:

```

function y = fcn(V, SoC)

if (V>788) && (SoC<0.9);
y = -1000;
elseif (V<738) && (SoC>0.25);
y = 1000;
else
y = 0;
end

```

Επίσης, μεταξύ της εξόδου της συνάρτησης και της εισόδου της DC πηγής ρεύματος του συστήματος αποθήκευσης παρεμβάλλεται σε σειρά ένα βαθυπερατό φίλτρο 1^{ης} τάξης, η μοντελοποίηση του οποίου επιτυγχάνεται μέσω μιας συνάρτησης μεταφοράς με τύπο $G(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{2\pi \cdot 500}\right)s+1}$, που αποσκοπεί στην εξομάλυνση της απότομης μετάβασης του ρεύματος από τα 1000A στα 0A και στα -1000A, σύμφωνα με τον αλγόριθμο ελέγχου.

Τέλος, το block του συστήματος αποθήκευσης περιλαμβάνει επίσης και μια ακόμα συνάρτηση, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τιμής του SoC. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται μέσω του τύπου που ορίζει την κατάσταση φόρτισης ενός υπερπυκνωτή:

$$SoC = \frac{Q_{init} - \int_0^t i(\tau) d\tau}{Q_{max}} \times 100 \quad (5.1)$$

όπου το αρχικό φορτίο του υπερπυκνωτή Q_{init} θεωρείται ίσο με τα 2/3 του μέγιστου φορτίου Q_{max} , το οποίο δίνεται από τη σχέση:

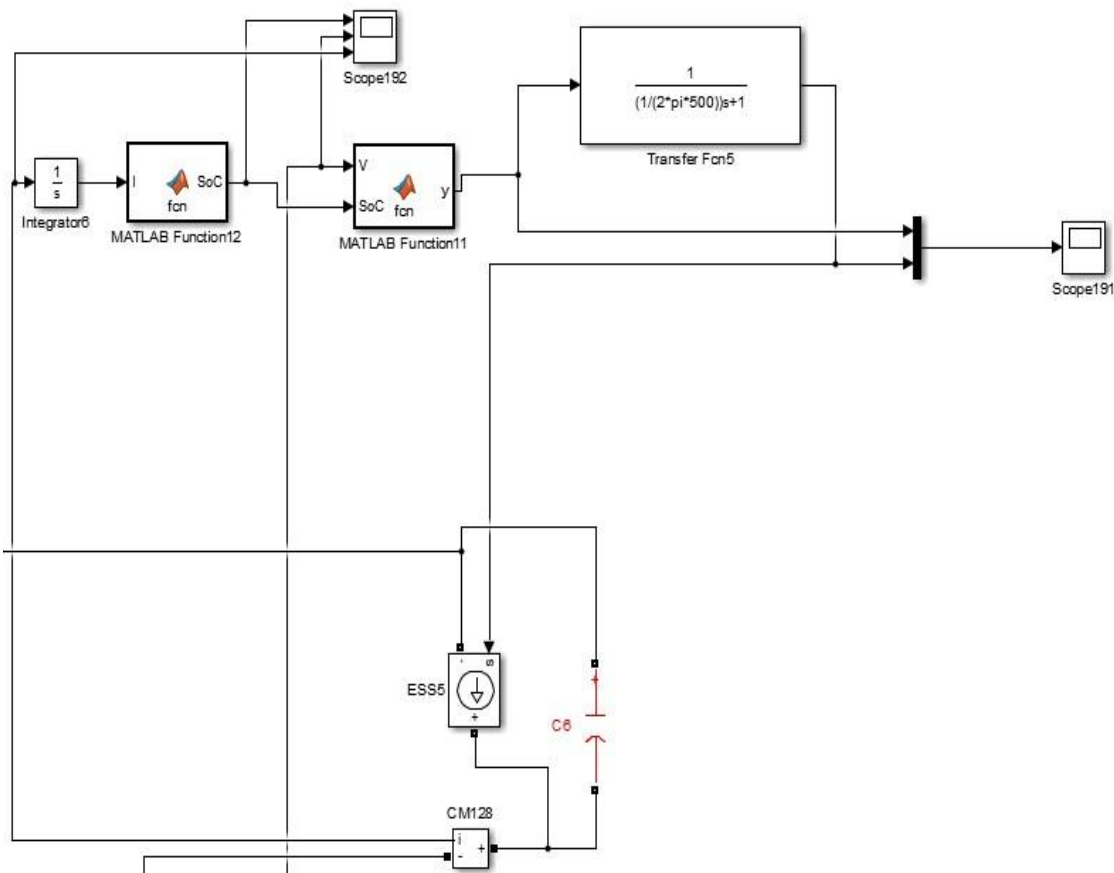
$$Q_{max} = C_{final} \cdot V_{max} \quad (5.2)$$

με το στοιχείο $V_{max} = 580V$ να είναι η μέγιστη τάση της διάταξης των υπερπυκνωτών που χρησιμοποιούνται και C_{final} η συνολική χωρητικότητα των υπερπυκνωτών. Στις προσομοιώσεις, η διάταξη των υπερπυκνωτών που χρησιμοποιήσαμε αποτελούνταν από 232 πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά, ο καθένας από τους οποίους είχε χωρητικότητα $C = 3000F$ και τάση αντοχής $V = 2.7V$, και 15 τέτοιους κλάδους συνδεδεμένους παράλληλα. Επομένως, η συνολική χωρητικότητα της διάταξης δίνεται από τον τύπο:

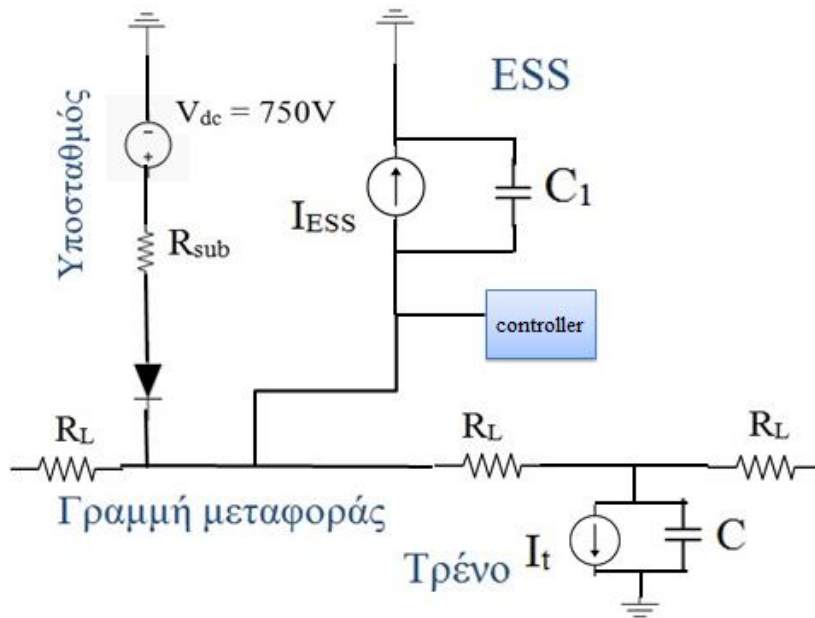
$$C_{final} = \frac{15C}{32} \quad (5.3)$$

Αναφορικά με τον τρόπο μοντελοποίησης, το ρεύμα εξόδου του συστήματος αποθήκευσης συνδέεται σε έναν ολοκληρωτή, ώστε να σχηματιστεί ο όρος $\int_0^t i(\tau)d\tau$, και έπειτα αυτός λειτουργεί ως είσοδος της συνάρτησης υπολογισμού του SoC, η έξοδος της οποίας δίνει την τιμή του SoC και αντιπροσωπεύει την είσοδο της συνάρτησης ελέγχου του συστήματος αποθήκευσης που περιγράψαμε προηγουμένως.

Συνολικά, όλα τα μέρη που αποτελούν το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας στην μοντελοποίησή του στο περιβάλλον του Simulink, εμφανίζονται στο σχήμα 5.5, ενώ στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η συνολική προσομοιούμενη διάταξη.



Σχήμα 5.5: Μοντελοποίηση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μαζί με ελεγκτή στο περιβάλλον του Simulink



Σχήμα 5.6: Μοντελοποίηση συνολικής προσομοιούμενης διάταξης

5.2 Προσομοιώσεις

5.2.1 Περιγραφή μεθοδολογιών

Οι προσομοιώσεις οι οποίες εκτελέστηκαν κινούνται σε δύο διαφορετικούς άξονες: Αφενός τοποθετήθηκε ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο και, μετακινούμενο σε όλους τους υποσταθμούς, διαπιστώθηκε ποια είναι η βέλτιστη τοποθέτηση του, έτσι ώστε να υπάρξει η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί. Αφετέρου, χωρίστηκε η συνολική χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης σε μικρότερους συνδυασμούς και δοκιμάστηκε η τοποθέτηση περισσότερων συστημάτων στο σιδηροδρομικό δίκτυο. Έπειτα, παρατηρήθηκαν οι διαφορές που προέκυψαν ανάμεσα στις προαναφερθείσες μεθόδους και εξήχθησαν τα ανάλογα συμπεράσματα. Επιπροσθέτως, έγινε σύγκριση αυτών των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων χρησιμοποίησης του συστήματος αποθήκευσης με τα αποτελέσματα που πάρθηκαν από την μη ύπαρξη κανενός είδους αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο και προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα ως προς τον βέλτιστο τρόπο τοποθέτησης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο.

5.2.2 Προσομοίωση χωρίς σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Αρχικά, διενεργείται μια προσομοίωση της λειτουργίας του μοντελοποιημένου σιδηροδρομικού δικτύου χωρίς την παρουσία συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και εξάγονται ορισμένα αποτελέσματα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας στα επιμέρους κομμάτια του. Ο χρόνος προσομοίωσης καθορίζεται στα 1043s και το headway μεταξύ των τρένων στα 300s. Αυτό σημαίνει ότι το πολύ 4 τρένα μπορούν να βρίσκονται στο ίδιο track σε μια χρονική στιγμή. Στον πίνακα που ακολουθεί εμφανίζονται τα αποτελέσματα που πάρθηκαν:

Κατανάλωση ενέργειας στα επιμέρους κομμάτια του δικτύου χωρίς ESS	Αποτελέσματα
Συνολική ενέργεια ροοστατών track 1 (kWh)	62.7006
Συνολική ενέργεια ροοστατών track 2 (kWh)	42.1299
Συνολική ενέργεια ροοστατών και στα 2 tracks (kWh)	104.8305
Συνολική ενέργεια τρένων track1 (kWh)	933.1742
Συνολική ενέργεια τρένων track2 (kWh)	604.9140
Συνολική ενέργεια κινητήρα και βοηθητικών μερών track1 (kWh)	870.4792
Συνολική ενέργεια κινητήρα και βοηθητικών μερών track2 (kWh)	562.7817
Συνολική αναγεννητική ενέργεια track1 (kWh)	-251.4159
Συνολική αναγεννητική ενέργεια track2 (kWh)	-226.7191
Συνολική ενέργεια υποσταθμών (kWh)	1641.8
Ποσοστό απορριπτόμενων φορτίων (%)	21.9249

Πίνακας 5.1: Κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο χωρίς την χρησιμοποίηση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Η καταναλισκόμενη ενέργεια στις μεταβλητές αντιστάσεις για κάθε track προκύπτει από τη διαφορά της ολικής ενέργειας που καταναλώνει το τρένο σε αυτό το track μείον την ολική ενέργεια που καταναλώνεται στον βοηθητικό εξοπλισμό και στον κινητήρα του. Επίσης, η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται στους υποσταθμούς αντιπροσωπεύει την ενέργεια που παρέχεται από το εξωτερικό AC δίκτυο για την τροφοδότηση του σιδηροδρομικού δικτύου, ενώ τέλος, το ποσοστό των απορριπτόμενων φορτίων προκύπτει από τη διαίρεση της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στις αντιστάσεις και των 2 tracks προς τη συνολική αναγεννητική ενέργεια που παράγεται από όλα τα τρένα του δικτύου.

5.2.3 Προσομοίωση τοποθέτησης ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

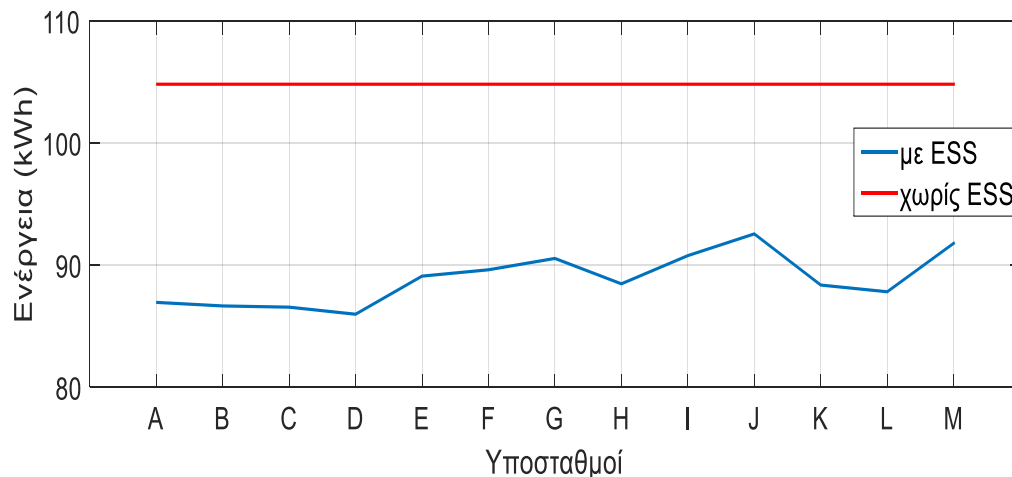
Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται σε υπερπυκνωτή συνολικής χωρητικότητας $C_{total} = 193.97F$ ως τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας. Το σύστημα αυτό τοποθετήθηκε σε όλους τους υποσταθμούς του δικτύου και προσομοιάθηκε η λειτουργία του για καθέναν ξεχωριστά. Παρακάτω επιδεικνύονται τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας των διαφόρων μερών του δικτύου κατά την τοποθέτηση του ESS σε κάθε υποσταθμό.

Τοποθέτηση ESS στον υποσταθμό	Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια ροοστατών track1 (kWh)	Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια ροοστατών track2 (kWh)	Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια ροοστατών και στα 2 tracks (kWh)	Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια υποσταθμών (kWh)	Ποσοστό απορριπτόμενων φορτίων (%)
A	47.8413	39.1148	86.9561	1618.90	18.1865
B	47.7315	38.9424	86.6739	1615.30	18.1275
C	48.1172	38.4571	86.5743	1616.50	18.1067
D	48.6628	37.3258	85.9886	1626.40	17.9842
E	53.5476	35.5621	89.1097	1619.00	18.6369
F	53.5793	36.0511	89.6304	1619.70	18.7458
G	55.1711	35.3903	90.5614	1623.00	18.9406
H	56.4989	31.9807	88.4796	1618.50	18.5052
I	58.1452	32.6407	90.7859	1620.70	18.9875
J	59.9772	32.5904	92.5676	1628.30	19.3601
K	56.3693	32.0099	88.3792	1625.10	18.4842
L	57.1529	30.6813	87.8342	1620.20	18.3702
M	59.3036	32.5012	91.8048	1625.4	19.2006

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας στα διάφορα μέρη του δικτύου κατά την προσομοίωση με ένα σύστημα αποθήκευσης

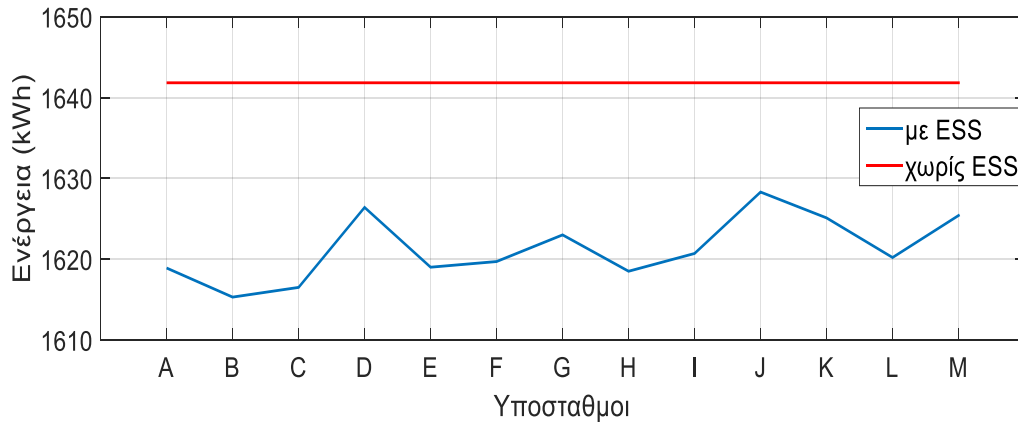
Παρατηρούμε ότι η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια στα απορριπτικά φορτία των σιδηροδρομικών γραμμών είναι αισθητά μικρότερη (της τάξης του 10%) κατά την τοποθέτηση ενός συστήματος αποθήκευσης σε κάποιον από τους υποσταθμούς του δικτύου από ότι στην περίπτωση μη χρησιμοποίησής του. Παρατηρείται, επίσης, ότι η κατανάλωση ενέργειας στους ροοστάτες των γραμμών

διατηρείται σχετικά σταθερή, με μικρότερη τιμή κατά την εγκατάστασή του στον υποσταθμό D, ανεξάρτητα από τον υποσταθμό εγκατάστασης του συστήματος αποθήκευσης. Στο διάγραμμα 5.1, με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η ενέργεια των ροοστατών χωρίς το σύστημα αποθήκευσης, ενώ με μπλε με την παρουσία του συστήματος αποθήκευσης σε κάθε υποσταθμό ξεχωριστά.



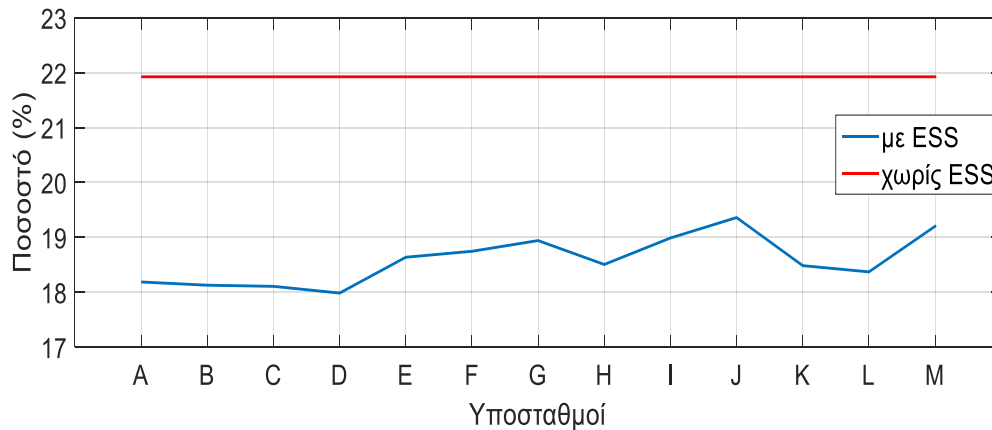
Διάγραμμα 5.1: Συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια στους ροοστάτες των γραμμών με και χωρίς ESS

Αναφορικά με την ενέργεια που καταναλώνεται συνολικά σε όλους τους υποσταθμούς, μπορεί να παρατηρηθεί φανερή μείωση της κατανάλωσης κατά την παρουσία του συστήματος αποθήκευσης, καθώς η παροχή ενέργειας στα τρένα μέσω του συστήματος αποθήκευσης συνεπάγεται τη μείωση της ενέργειας που χρειάζεται να παρέχουν οι υποσταθμοί και συνεπώς, και της ενέργειας που αυτοί απορροφούν από το εξωτερικό AC δίκτυο. Επίσης, παρατηρείται ότι η τοποθέτηση του συστήματος αποθήκευσης στον υποσταθμό B επιφέρει την μικρότερη συνολική κατανάλωση ενέργειας στους υποσταθμούς εν συγκρίσει με τις άλλες περιπτώσεις. Αυτό αντικατοπτρίζεται και στο επόμενο διάγραμμα, όπου πάλι με κόκκινο είναι η περίπτωση χωρίς ESS και με μπλε η περίπτωση με ESS σε κάθε υποσταθμό ξεχωριστά:



Διάγραμμα 5.2: Συνολική κατανάλωση ενέργειας στους υποσταθμούς με και χωρίς ESS

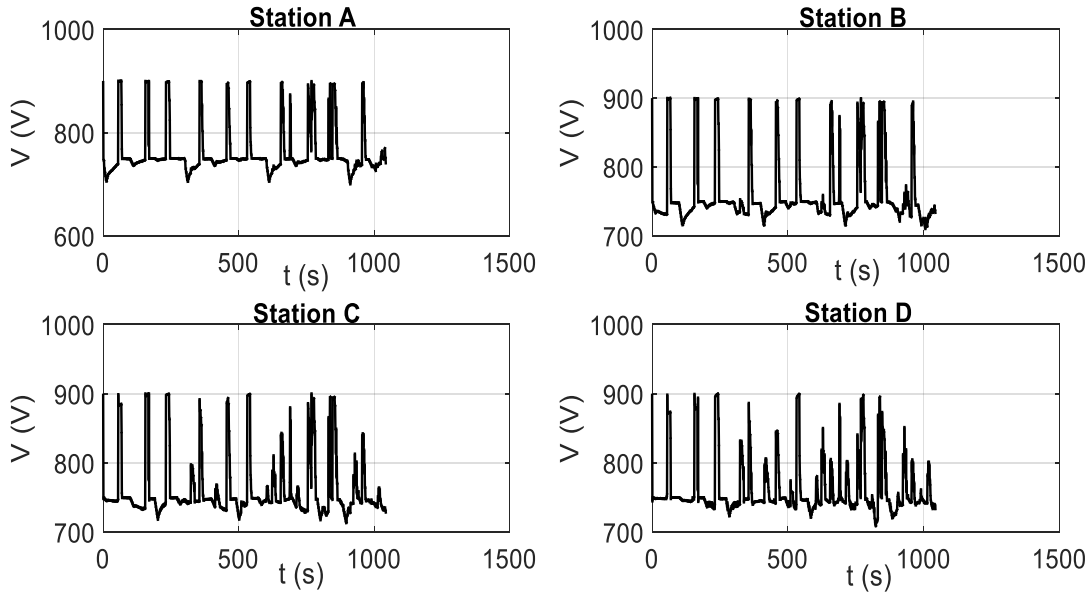
Επιπροσθέτως, το ποσοστό των απορριπτόμενων φορτίων μειώνεται με τη χρήση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε σύγκριση με την περίπτωση της λειτουργίας του δικτύου χωρίς αποθήκευση, γεγονός που απορρέει από το ότι η συσκευή αποθήκευσης παρέχει και αποθηκεύει μέρος της απορριπτόμενης ενέργειας των τρένων. Αυτή η μείωση είναι σε γενικές γραμμές ίδια κατά την τοποθέτηση του συστήματος στον κάθε υποσταθμό, με μεγαλύτερη μείωση να διαφαίνεται κατά την τοποθέτηση του ESS στον υποσταθμό D, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:



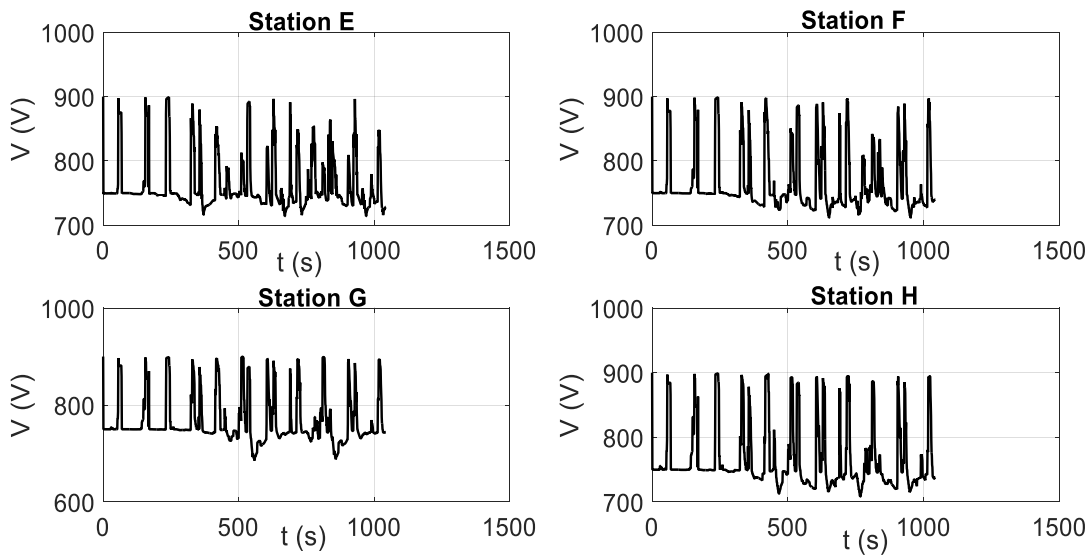
Διάγραμμα 5.3: Ποσοστό απορριπτόμενων φορτίων με και χωρίς ESS

Τελικά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η τοποθέτηση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας στον υποσταθμό D του σιδηροδρομικού δικτύου είναι η πιο επωφελής ως προς την συνολική εξοικονόμηση

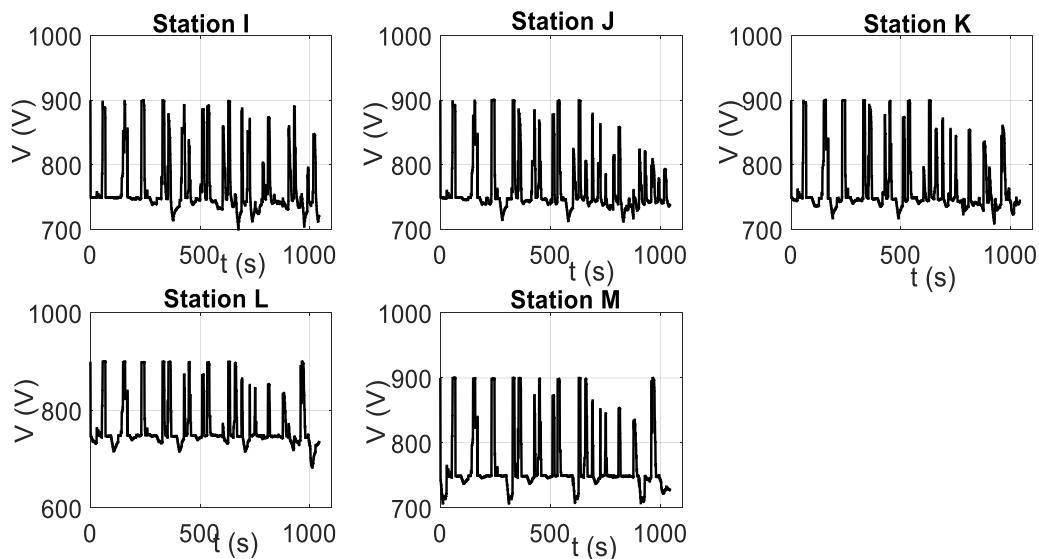
ενέργειας. Οι γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν εμφανίζουν τη συμπεριφορά της τάσης όλων των υποσταθμών κατά την βέλτιστη εγκατάσταση του ESS στον υποσταθμό D.



Διάγραμμα 5.4: Τάση υποσταθμών A, B, C, D

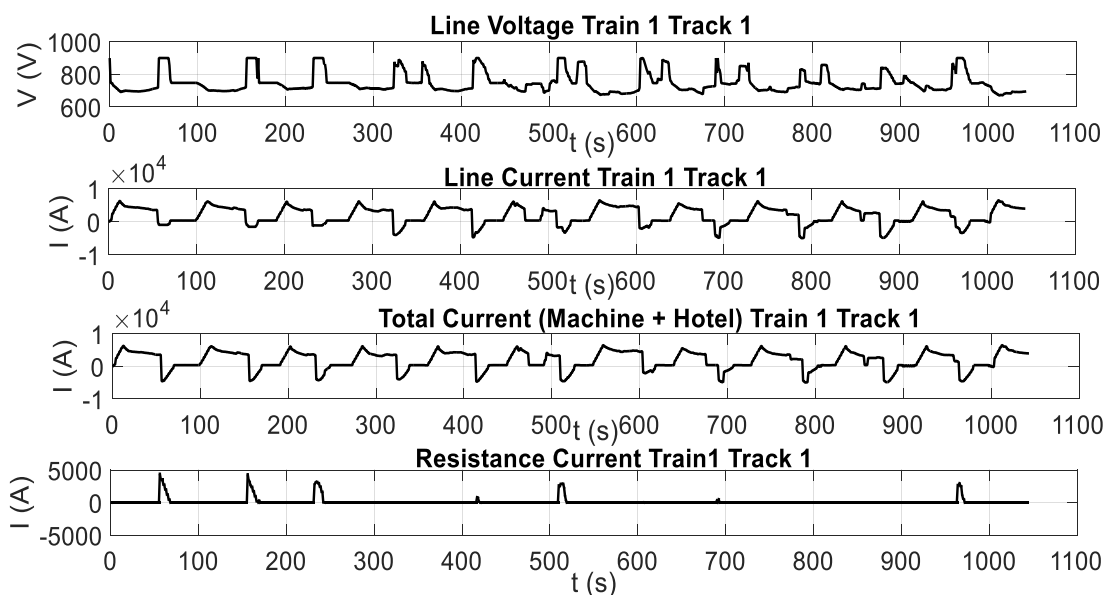


Διάγραμμα 5.5: Τάση υποσταθμών E, F, G, H

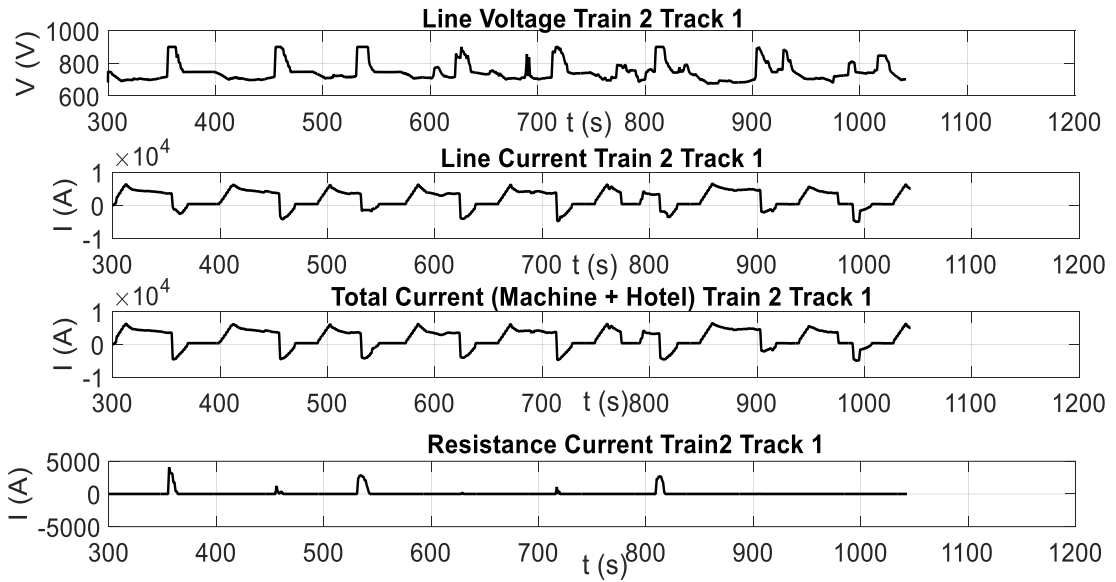


Διάγραμμα 5.6: Τάση υποσταθμών I, J, K, L, M

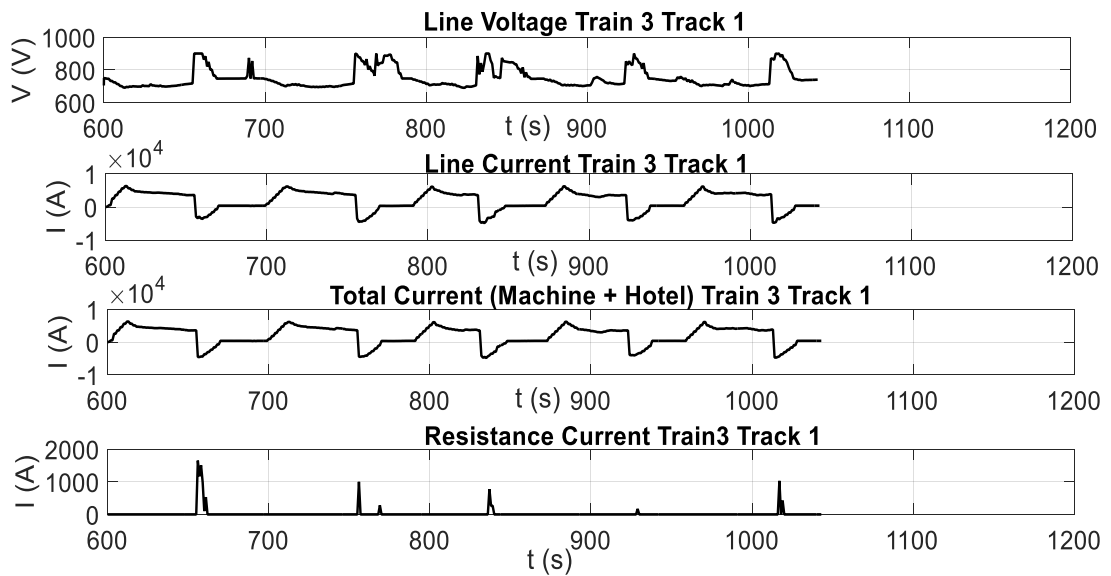
Η τάση γραμμής και το ρεύμα γραμμής κατά τη διέλευση του κάθε τρένου, το ολικό ρεύμα που καταναλώνεται στο τρένο (κινητήρας και βοηθητικές λειτουργίες), καθώς και το ρεύμα που καταναλώνεται στις αντιστάσεις πέδησης (απορριπτικά φορτία) του τρένου παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα για όλα τα τρένα που διέρχονται από το δίκτυο κατά την προσομοίωση τοποθέτησης του συστήματος αποθήκευσης στον υποσταθμό D.



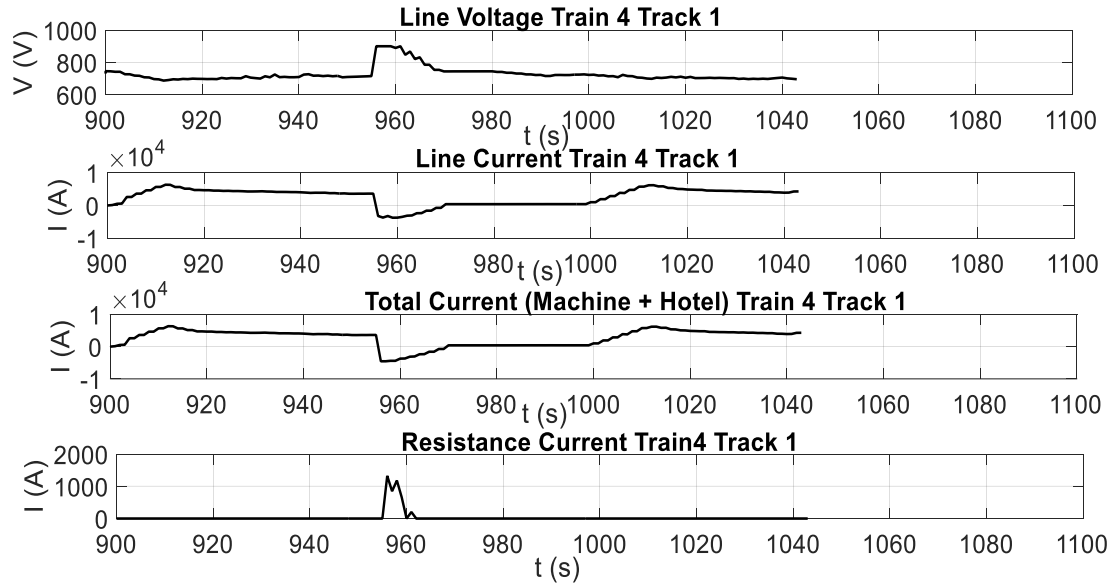
Διάγραμμα 5.7: Τάση γραμμής, Ρεύμα γραμμής, Ολικό ρεύμα και Ρεύμα απορριπτικών φορτίων 1^{ου} τρένου του 1^{ου} track



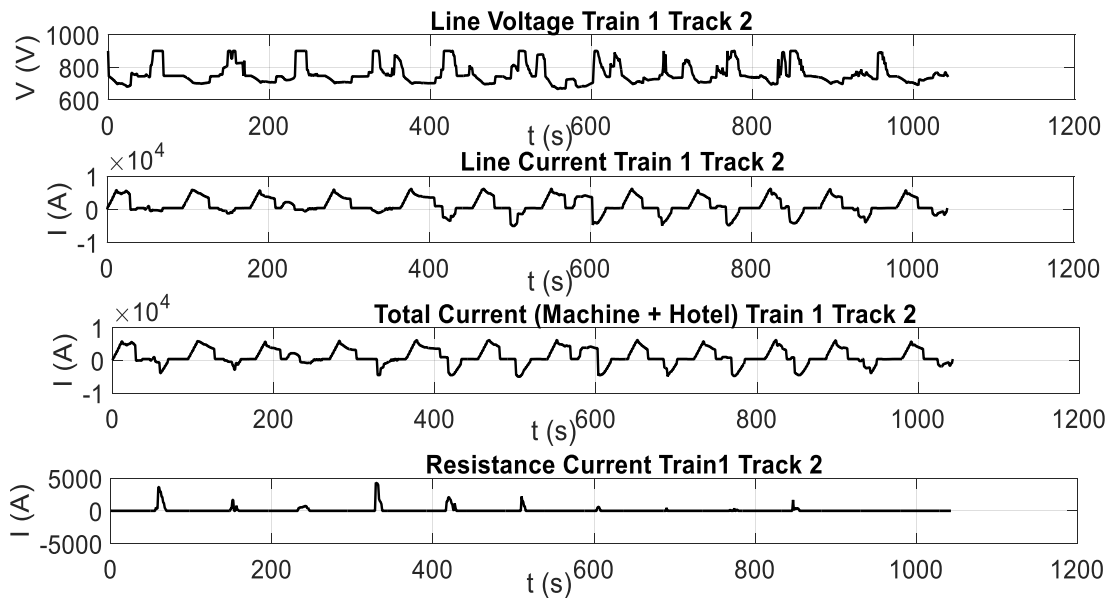
Διάγραμμα 5.8: Τάση γραμμής, Ρεύμα γραμμής, Ολικό ρεύμα και Ρεύμα απορριπτικών φορτίων 2^{ου} τρένου του 1^{ου} track



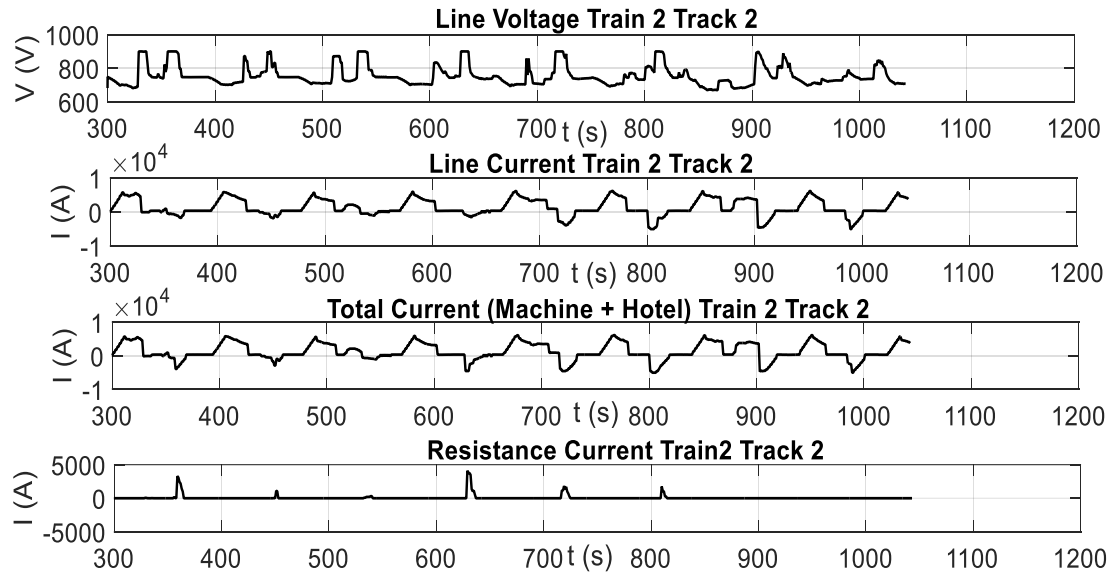
Διάγραμμα 5.9: Τάση γραμμής, Ρεύμα γραμμής, Ολικό ρεύμα και Ρεύμα απορριπτικών φορτίων 3^{ου} τρένου του 1^{ου} track



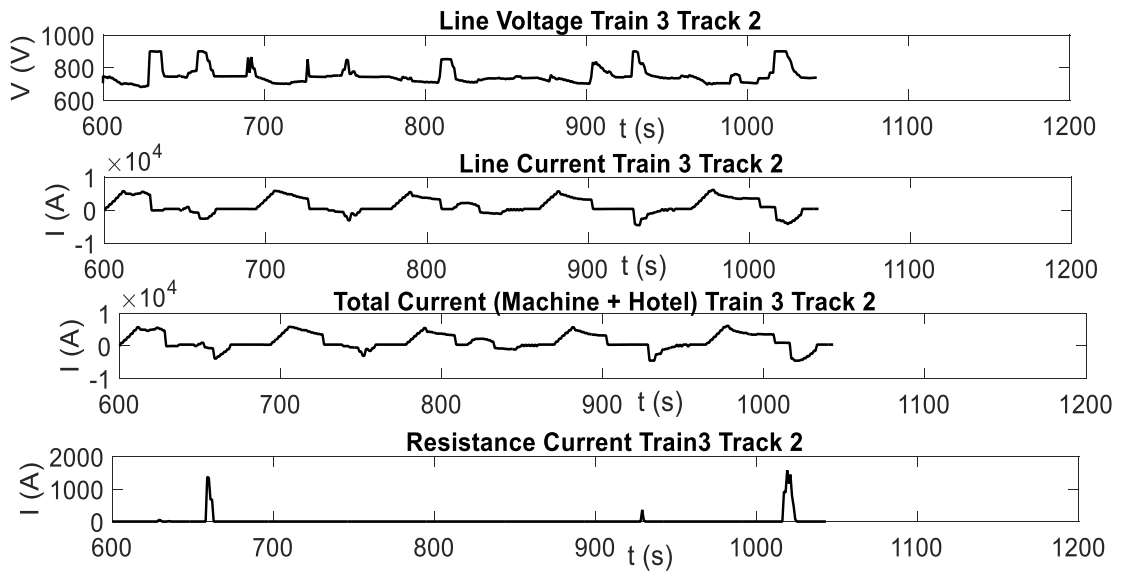
Διάγραμμα 5.10: Τάση γραμμής, Ρεύμα γραμμής, Ολικό ρεύμα και Ρεύμα απορριπτικών φορτίων 4^{ου} τρένου του 1^{ου} track



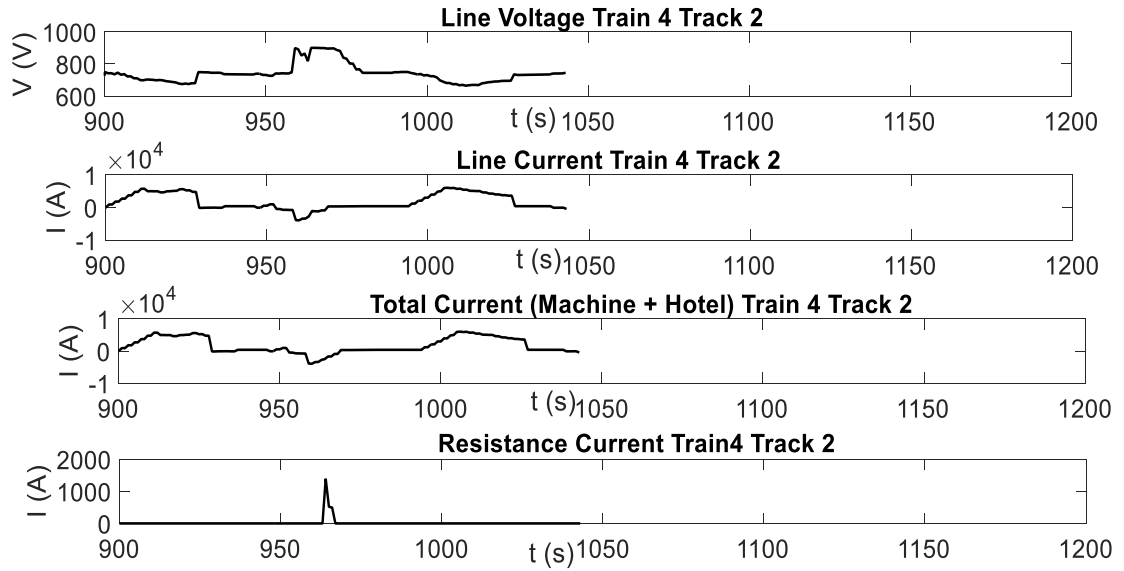
Διάγραμμα 5.11: Τάση γραμμής, Ρεύμα γραμμής, Ολικό ρεύμα και Ρεύμα απορριπτικών φορτίων 1^{ου} τρένου του 2^{ου} track



Διάγραμμα 5.12: Τάση γραμμής, Ρεύμα γραμμής, Ολικό ρεύμα και Ρεύμα απορριπτικών φορτίων 2^{ου} τρένου του 2^{ου} track

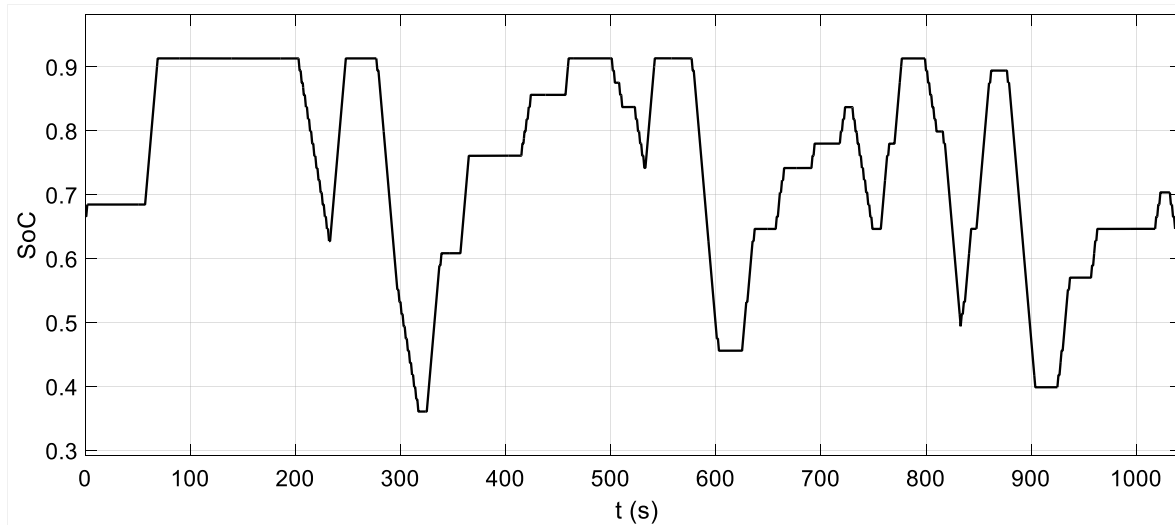


Διάγραμμα 5.13: Τάση γραμμής, Ρεύμα γραμμής, Ολικό ρεύμα και Ρεύμα απορριπτικών φορτίων 3^{ου} τρένου του 2^{ου} track

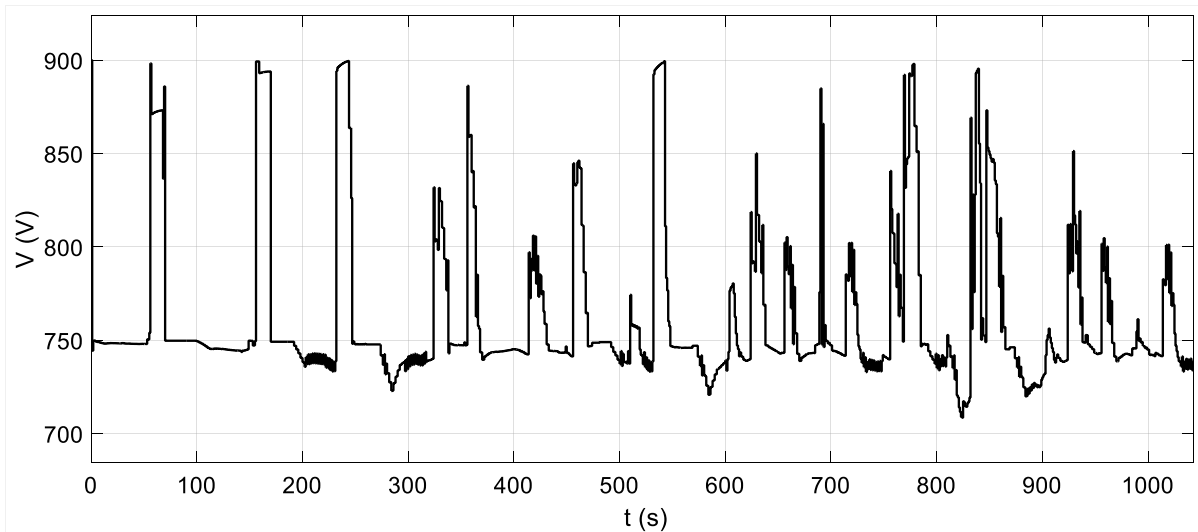


Διάγραμμα 5.14: Τάση γραμμής, Ρεύμα γραμμής, Ολικό ρεύμα και Ρεύμα απορριπτικών φορτίων 4^{ου} τρένου του 2^{ου} track

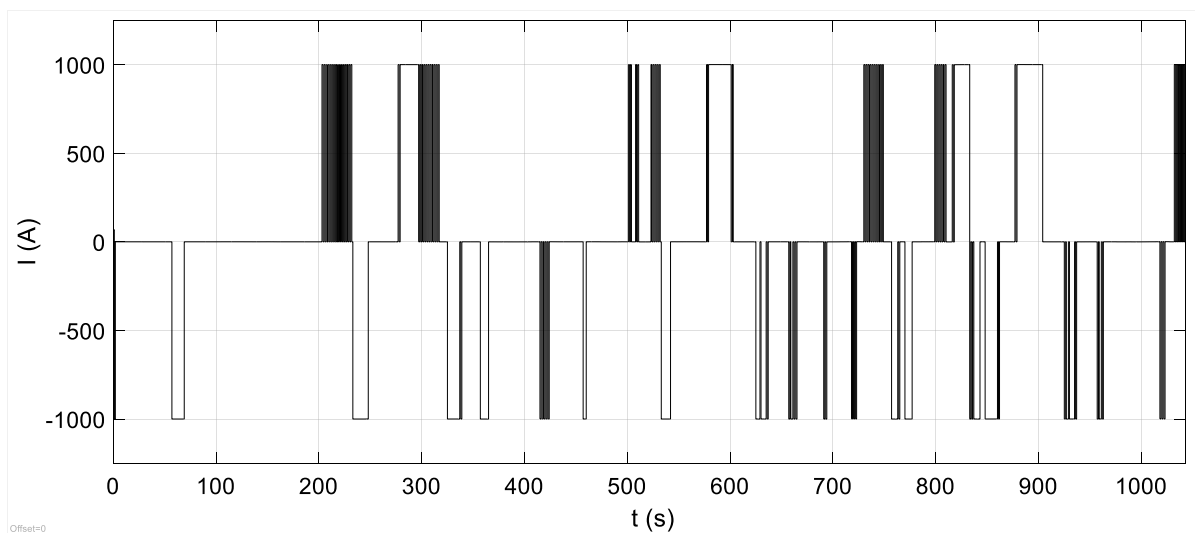
Τέλος, το SoC και το ρεύμα του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και η τάση των γραμμών μεταφοράς, φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 5.15: SoC συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 5.16: Τάση γραμμών μεταφοράς συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 5.17: Ρεύμα συστήματος αποθήκευσης ενέργειας συναρτήσει του χρόνου

5.2.4 Προσομοίωση τοποθέτησης διαφόρων συνδυασμών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με κοινή συνολική χωρητικότητα

Ο τελευταίος τρόπος προσομοίωσης της λειτουργίας ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο περιλαμβάνει τον καταμερισμό της συνολικής χωρητικότητας $C_{total} = 193.97F$ του υπερπυκνωτή αποθήκευσης σε κάποιες μικρότερες διατάξεις και η τοποθέτηση αυτών εκ νέου στο

δίκτυο, αλλά αυτή τη φορά ταυτόχρονα σε περισσότερους από έναν υποσταθμούς. Οι επιμέρους διαμορφώσεις που θα δοκιμαστούν θα είναι οι εξής:

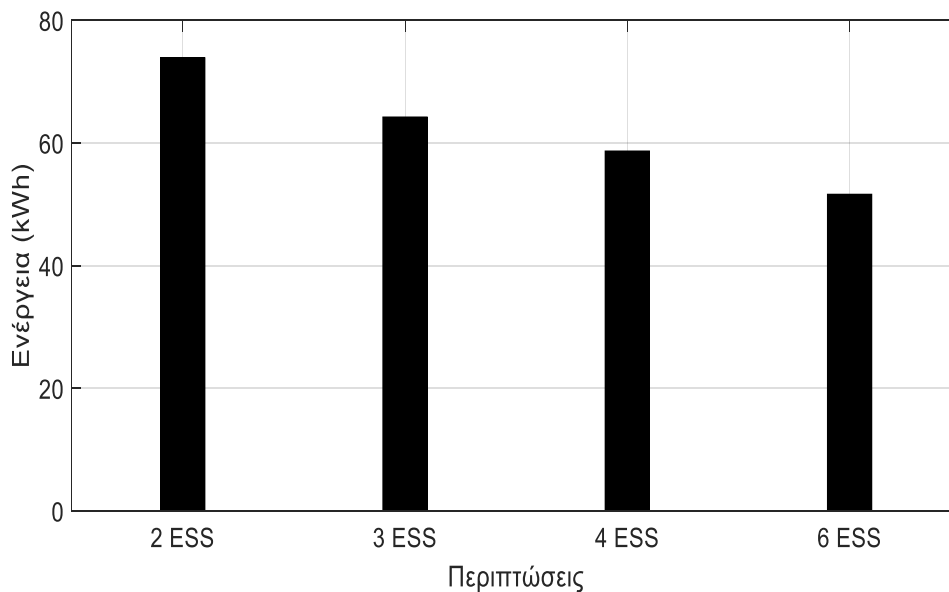
- 2 συστήματα αποθήκευσης, χωρητικότητας $C = 96.99F$ το καθένα, τα οποία θα αποτελούνται από 8 και 7 παράλληλους κλάδους αντίστοιχα, με 232 πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά στον κάθε κλάδο
- 3 συστήματα αποθήκευσης, με $C = 64.66F$ το καθένα, τα οποία θα αποτελούνται από 5 παράλληλους κλάδους αντίστοιχα, με 232 πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά στον κάθε κλάδο
- 4 συστήματα αποθήκευσης, με $C = 48.493F$ το καθένα, τα 3 από τα οποία θα αποτελούνται από 4 παράλληλους κλάδους ενώ το 4^ο από 3, με 232 πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά στον κάθε κλάδο
- 6 συστήματα αποθήκευσης, με $C = 32.33F$ το καθένα, τα 4 οποία θα αποτελούνται από 3 παράλληλους κλάδους ενώ τα υπόλοιπα 2 από 2 παράλληλους κλάδους το καθένα, με 232 πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά στον κάθε κλάδο

Οι διαφορετικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται τοποθετούνται ομοιόμορφα κατά μήκος των υποσταθμών του δικτύου. Συγκεκριμένα, τα 2 συστήματα αποθήκευσης εγκαθίστανται στους υποσταθμούς C και I, αντίστοιχα (δηλαδή στο 1/3 και στα 3/4 της απόστασης), τα 3 συστήματα αποθήκευσης τοποθετούνται κατά σειρά στους υποσταθμούς D, H και L (κάθε 4 στάσεις), τα 4 συστήματα αποθήκευσης στους υποσταθμούς C, F, I, L και τέλος, τα 6 συστήματα αποθήκευσης στους υποσταθμούς B, D, F, H, J, L. Τα αποτελέσματα από κάθε διαφορετική προσομοίωση εμφανίζονται στον πίνακα 4.3.

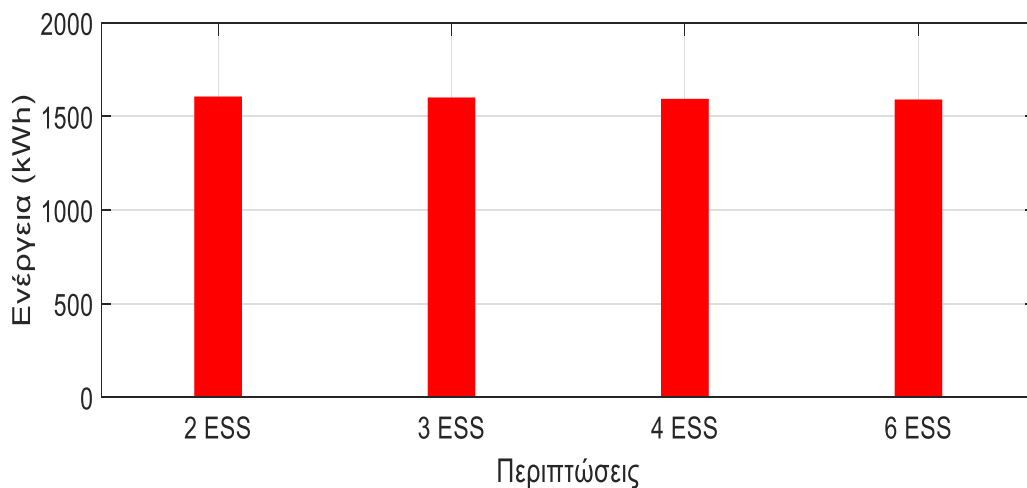
Προσομοιώσεις	Ενέργεια στους ροοστάτες track1 (kWh)	Ενέργεια στους ροοστάτες track2 (kWh)	Συνολική ενέργεια στους ροοστάτες (kWh)	Συνολική ενέργεια υποσταθμών (kWh)	Ποσοστό απορριπτόμενων φορτίων (%)
2 ESS	44.4869	29.3846	73.8715	1603.5	15.4499
3 ESS	43.3846	20.8344	64.2190	1598.4	13.4312
4 ESS	37.9558	20.7177	58.6735	1591.1	12.2713
6 ESS	31.9519	19.6759	51.6278	1587.7	10.7977

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας στα επιμέρους τμήματα του δικτύου με τη χρήση πολλών συστημάτων αποθήκευσης

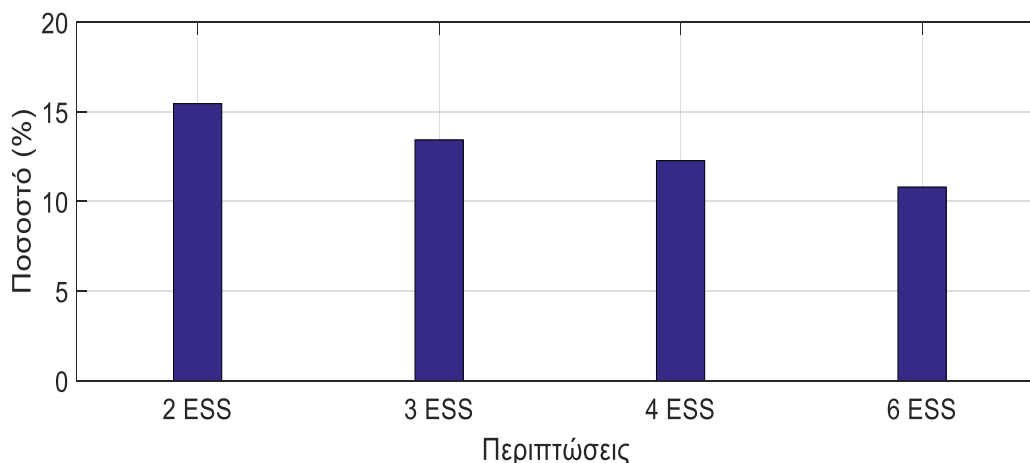
Τα διαγράμματα της εξοικονόμησης στην κατανάλωση ενέργειας στις μεταβλητές αντιστάσεις των γραμμών και στους υποσταθμούς, καθώς και το διάγραμμα του ποσοστού των απορριπτόμενων φορτίων παρουσιάζονται παρακάτω:



Διάγραμμα 5.18: Ολική κατανάλωση ενέργειας στους ροοστάτες των γραμμών



Διάγραμμα 5.19: Ολική κατανάλωση ενέργειας υποσταθμών



Διάγραμμα 5.20: Ποσοστό απορριπτόμενων φορτίων

Παρατηρείται ότι με τη χρήση των 6 συσκευών αποθήκευσης ενέργειας εξάγονται τα καλύτερα αποτελέσματα ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας, δηλαδή την μικρότερη κατανάλωση τόσο στην ενέργεια που “χάνεται” στους ροοστάτες, όσο και στην ενέργεια που καταναλώνουν οι υποσταθμοί. Επίσης, η διαμόρφωση αυτή παρουσιάζει και το μικρότερο ποσοστό απορριπτόμενων φορτίων.

5.3 Συμπεράσματα

Αναφορικά με την τοποθέτηση ενός συστήματος αποθήκευσης σε διάφορους υποσταθμούς, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι διαφορές στην ενεργειακή κατανάλωση είναι αρκετά μικρές. Οι διαφορές αυτές εξαρτώνται από τα όρια της τάσης τα οποία θα τεθούν, η παραβίαση των οποίων θα επιτρέψει στο σύστημα αποθήκευσης να αρχίσει την αλληλεπίδραση με το ρεύμα του δικτύου, καθώς επίσης και από την χωρητικότητα του συστήματος αποθήκευσης, δηλαδή το ρεύμα που αυτό απορροφά/παρέχει.

Συγκρίνοντας και τις τρεις προηγούμενες προσομοιούμενες περιπτώσεις μπορεί κανείς να καταλήξει σε κάποια συμπεράσματα ως προς τα αποτελέσματα που εξάγονται. Είναι εμφανές ότι όσο περισσότερο αυξάνεται ο καταμερισμός στη συνολική χωρητικότητα του υπερπυκνωτή αποθήκευσης σε μικρότερες χωρητικότητες, τόσο περισσότερο μειώνεται αφενός η καταναλισκόμενη ενέργεια στους ροοστάτες των γραμμών μεταφοράς και στους ηλεκτρικούς υποσταθμούς, αφετέρου το ποσοστό των απορριπτόμενων φορτίων στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει διότι η ύπαρξη πολλών συστημάτων αποθήκευσης κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς καθιστά την απορρόφηση της αναγεννητικής ενέργειας πέδησης και την παροχή της ανακτώμενης ενέργειας πίσω στα τρένα πιο εύκολη και αποδοτική, καθώς ελαττώνονται οι απώλειες μεταφοράς. Συνεπώς, αυτός ο τρόπος χρησιμοποίησης των συστημάτων αποθήκευσης σε σιδηροδρομικές εφαρμογές εμφανίζεται ως ο αποδοτικότερος ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο.

Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

6.1 Γενικά συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη βέλτιστη τοποθέτηση ενός ή περισσότερων στατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε ένα DC ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας, με δύο διαφορετικούς τρόπους.

Στο κεφάλαιο 4, επιχειρείται μια θεωρητική ανάλυση, μέσω της μαθηματικής μοντελοποίησης, ενός δικτύου και, με τη βοήθεια μιας συνάρτησης βελτιστοποίησης που προτείνεται στη βιβλιογραφία, δοκιμάζεται η τοποθέτηση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε διαφορετικές θέσεις και με διάφορα σενάρια αναφορικά με το χρονοδιάγραμμα των διερχόμενων τρένων, δηλαδή την απόσταση την οποία θα απέχουν κάθε χρονική στιγμή, και εξάγεται το αποδοτικότερο αποτέλεσμα ως προς την κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Στο συγκεκριμένο σιδηροδρομικό σύστημα που μελετάται, με την ύπαρξη ενός ηλεκτρικού υποσταθμού, 2 παράλληλων γραμμών μεταφοράς με αντίθετες κατευθύνσεις και 2 διερχόμενων τρένων, προκύπτει πως η βέλτιστη θέση εγκατάστασης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βρίσκεται στο διάστημα $[1/3, 1/2]$ της γραμμής για όλα τα σενάρια διαφορετικού headway.

Στο κεφάλαιο 5, μοντελοποιείται στο περιβάλλον του Simulink ένα σιδηροδρομικό δίκτυο με 13 υποσταθμούς, 2 παράλληλες γραμμές μεταφορές με αντίθετες κατευθύνσεις και 12 διερχόμενα τρένα με σταθερό headway και προσομοιώνεται η λειτουργία του σε 3 διαφορετικές περιπτώσεις:

- α) χωρίς τη χρήση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας,
- β) με τη χρήση ενός στατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας βασισμένο σε υπερπυκνωτές καθορισμένης συνολικής χωρητικότητας C_{total} , το οποίο τοποθετείται σε καθέναν από τους υποσταθμούς ξεχωριστά και
- γ) με τον καταμερισμό του συνολικού συστήματος αποθήκευσης σε διάφορους συνδυασμούς μικρότερων στατικών συστημάτων (συγκεκριμένα 2, 3, 4 και 6), τα οποία τοποθετούνται ομοιόμορφα

στους υποσταθμούς κατά μήκος των γραμμών, ενώ οι χωρητικότητές τους είναι ανάλογα διεσπαρμένες και αθροιστικά ισούνται με την συνολική.

Οι 3 περιπτώσεις αυτές συγκρίνονται ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο, με την παρατήρηση τριών κύριων στοιχείων:

- της ολικής κατανάλωσης ενέργειας στις μεταβλητές αντιστάσεις των γραμμών,
- της ολικής κατανάλωσης ενέργειας των υποσταθμών και
- του ποσοστού των απορριπτόμενων φορτίων

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ότι στον συνδυασμό των 6 συστημάτων αποθήκευσης επιτυγχάνεται η μικρότερη κατανάλωση ενέργειας στο δίκτυο. Το γενικό συμπέρασμα, λοιπόν, είναι πως όσο περισσότερες μονάδες αποθήκευσης τοποθετηθούν κατά μήκος ενός δικτύου, τόσο καλύτερη αξιοποίηση και συνεπώς, μεγαλύτερη εξοικονόμηση, της ενέργειας θα επιτευχθεί.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

Το φάσμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να επεκταθεί με την βελτίωση της πολυπλοκότητας του ελεγκτή του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μέσω της εξέτασης περισσότερων παραμέτρων, ώστε να επιτυγχάνεται ακόμα πιο αποδοτική λειτουργία.

Επίσης, χρήσιμη θα ήταν και η ύπαρξη μιας βελτιωμένης συνάρτησης βελτιστοποίησης, που θα λαμβάνει υπόψη, εκτός από τους δείκτες κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου, και οικονομικά δεδομένα επένδυσης και λειτουργίας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, έτσι ώστε η βέλτιστη τοποθέτηση τους να είναι συμφέρουσα και κοστολογικά.

Βιβλιογραφία

[1] Arturo Gonzalez-Gil, Roberto Palacin, Paul Batty. *Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy*. NewRail-Centre for Railway Research, Newcastle University, School of Mechanical and Systems Engineering

[2] Flavio Ciccarelli. *Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems*. PhD School in Industrial Engineering, Department of Electrical Engineering and Information Technologies, University of Naples “Federico II”

[3] Alvaro J.Lopez-Lopez, Ramon R.Pecharroman, Antonio Fernandez-Cardador, A.Paloma Cucala. *Assessment of energy-saving techniques in direct-current-electrified mass transit systems*. Institute for Research and Technology, ICAI School of Engineering, Cornillas Pontifical University, Madrid, Spain.

[4] Maria Carmen Falvo, Regina Lamedica, Richard Bartoni, Gennaro Maranzano. *Energy management in metro-transit systems: An innovative proposal toward an integrated and sustainable urban mobility system including plug-in electric vehicles*. University of Rome Sapienza, Matre Tecnimont, Rome Urban Mobility Company

[5] Hitoshi Hayashiya, Takashi Suzuki, Masami Hino, Daisuke Hara, Masateru Tojo, Shigeo Shimada, Kishin Kudo. *Effect Evaluation of Li-ion battery for regenerative energy utilization in traction power supply system*. East Japan Railway Company. Tokyo, Japan

[6] Grigorios L.Kyriakopoulos, Garyfallos Arabatzis. *Electrical energy storage systems in electricity generation: Energy policies, innovative technologies and regulatory regimes*. National Technical University of Athens, School of Electrical and Computer Engineering, Democritus University of Thrace, Department of Forestry and Management of the Environmental and Natural Resources.

[7] Sergio Vasquez, Member IEEE, Srdjan M.Lukic, Member IEEE, Eduardo Galvan, Member IEEE, Leopoldo G.Franquelo, Fellow IEEE, Juan M.Carrasco, Member IEEE. *Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications*

[8] Ναταλία Η.Ιγγλέζου. *Ανάλυση Λειτουργίας και Μοντελοποίηση Συσσωρευτών*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος. Επιβλέπων Καθηγητής: Ν. Χατζηαργυρίου

- [9] Steven C.Smith, P.K.Sen, Sr.Member IEEE and Benjamin Kroposki, Sr.Member IEEE. *Advancement of Energy Storage Devices and Applications in Electrical Power System*
- [10] Nilanjan Mukherjee, Pietro Tricoli. *Modular Multilevel Converter Based Supercapacitor Integration Strategies and their Comparative Evaluation for Railway Traction Drive Systems*. School of Electronic, Electrical Systems and Engineering, University of Birmingham, United Kingdom
- [11] Alvaro Ordega, Student Member IEEE, Federico Milano, Fellow IEEE. *Modeling, Simulation and Comparison of Control Techniques for Energy Storage Systems*.
- [12] A.Gonzalez-Gil, R.Palacin, P.Batty, J.P Powell. *Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy*. NewRail- Newcastle Centre for Railway Research, Newcastle University, UK
- [13] R Barrero, X Tackoen and J van Mierlo. *Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network*. Vrije Universiteit Brussel, Universite Libre de Bruxelles, Belgium
- [14] Walter Günselman. *Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems*. SIEMENS, Erlangen, Germany
- [15] Diego Iannuzzi, Davide Lauria, Pietro Tricoli. *Optimal design of stationary supercapacitors storage devices for light electrical transportation systems*. Springer Science+Business Media, LLC 2011
- [16] Pierre AD. *Optimization theory with applications*, Dover, New York, 1986
- [17] A.Rupp, H. Baier, P.Mertiny, M.Secanell. *Analysis of a flywheel energy storage system for light rail transit*. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, Technische Universitat Munchen, Germany
- [18] R. Barrero, X. Tackoen, J.V.Mierlo. *Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network*. Vrije Universiteit Brussel, Universite Libre de Bruxelles, Belgium
- [19] S.de la Torre, Member IEEE, A.J.Sanchez-Racero, J.A.Aguado, Member IEEE, M.Reyes, Member IEEE and O.Martinez. *Optimal Sizing of Energy Storage for Regenerative Braking in Electric Railway Systems*.
- [20] M. Zidar, P.S.Georgilakis, N.D.Hatziargyriou, T.Capuder, D. Skrlec. *Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research*. IET Generation, Transmission & Distribution
- [21] L.Battistelli, F. Ciccarelli, D.Lauria, D.Proto. *Optimal Design of DC Electrified Railway Stationary Storage System*. Electrical Engineering Department, Napoli, Italy
- [22] M.Schroeder, J.Yu, D.Teumium. *Guiding the Selection and Application of Wayside Energy Storage Technologies for Rail Transit and Electric Utilities*. Transit Cooperative Research Program

[23] M.Nick, R.Cherkaoui, M.Paolone. *Optimal siting and sizing of distributed energy storage systems via alternating direction method of multipliers*. Distributed Electrical Systems Laboratory, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland

[24] Hebertt Sira-Ramirez, Senior Member, IEEE. *Nonlinear P-I Controller Design for Switchmode dc-to-dc Power Converters*. IEEE transactions on circuits and systems.