



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

**ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ
ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαριάννα Μαριόλη

Επίβλεψη : Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018



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

**ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ
ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαριάννα Μαριόλη

Επίβλεψη : Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2^η Μαρτίου 2018.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Πάυλος Γεωργιλάκης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018

.....

Μαριάννα Μαριόλη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Μαριάννα Μαριόλη, 2018.

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

Οι τεχνολογίες συστημάτων για την αποθήκευση ενέργειας αποτελούν εργαλείο μεγάλου ενδιαφέροντος, ιδιαίτερα για τις σιδηροδρομικές εφαρμογές, καθώς μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ευελιξία και την απόδοση των ηλεκτρικών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, οι διαχειριστές επιλέγουν την εγκατάστασή τους για την ικανοποίηση κάποιου από τους παρακάτω σκοπούς: μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, μείωση των απαιτούμενων ποσών ισχύος κατά τις ώρες αιχμής, και σταθεροποίηση τάσης στην είσοδο των τρένων και στις γραμμές του δικτύου γενικότερα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται αρχικά μια εισαγωγική ανάλυση για την εμπλεκόμενη ενεργειακή κατανάλωση των σιδηροδρομικών συστημάτων, καθώς και για τους τρόπους οι οποίοι συμβάλλουν στη μείωση των απωλειών στο δίκτυο αλλά και στην ενεργειακή εξοικονόμηση. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη περιγραφή των σπουδαιότερων τεχνολογιών αποθήκευσης για τις σιδηροδρομικές εφαρμογές, ενώ παράλληλα εκτελείται και μια τεχνοοικονομική σύγκριση μεταξύ τους. Τέλος αναλύονται οι εφαρμογές και οι διαδικασίες λειτουργίας και ελέγχου των κινητών και στατικών συστημάτων αποθήκευσης στα σιδηροδρομικά δίκτυα.

Ωστόσο κύριο στόχο της εργασίας αποτελεί η μελέτη λειτουργίας στατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο για την επίλυση ζητημάτων σταθεροποίησης τάσης, καθώς επίσης και για την εξοικονόμηση ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 4, σχεδιάστηκε μια θεωρητική μελέτη για την εγκατάσταση και τη στρατηγική ελέγχου των συστημάτων για σταθεροποίηση της τάσης στα DC σιδηροδρομικά δίκτυα. Εφαρμόστηκε αρχικά για τη διόρθωση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων, και στη συνέχεια στους ζυγούς των τεσσάρων ηλεκτρικών υποσταθμών του δικτύου. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν αφορούν την αποτελεσματική τοποθέτηση, διαστασιολόγηση και λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης υπερπυκνωτών. Στο επόμενο κεφάλαιο, μελετήθηκε το ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας, με στόχο τη μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων του δικτύου. Αναλυτικότερα, με την εγκατάσταση και λειτουργία των συστημάτων, επιτεύχθηκε μείωση της συνολικής παραγόμενης από τους υποσταθμούς ενέργειας, καθώς επίσης και των απωλειών στις γραμμές παροχής. Σημειώνεται επίσης ότι για την υλοποίηση των εν λόγω προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον εργασίας MATLAB.

Τέλος πραγματοποιήθηκε μια σύντομη θεωρητική ανάλυση για την οικονομική αξιολόγηση ενός επενδυτικού πλάνου, με στόχο τον έλεγχο της μελλοντικής του αποδοτικότητας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Σιδηροδρομικό δίκτυο, αναγεννητική πέδηση, κινητό/στατικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, υπερπυκνωτές, ηλεκτρικοί υποσταθμοί, τρένο, σταθεροποίηση τάσης, εξοικονόμηση ενέργειας.

ABSTRACT

Energy storage systems (ESS) play a role of paramount importance, especially in railway applications, as they can enhance the flexibility and efficiency of the electrical grid. More specifically, transit operators expect ESSs to meet some of the following energy saving objectives: reduction of the total energy consumption, reduction of the power peak demand charges and voltage stabilization in the vehicle's pantograph or in the supply lines.

This thesis, provides an introductory analysis of the energy consumption involved in a railway system, along with the ways that contribute to the reduction of the line losses and the energy consumption of the grid. Subsequently, a brief description of the most important ESSs technologies for railway applications, as well as a techno-economic comparison between them, are presented. Additionally, the applications and procedures needed for the operation and control of mobile and stationary ESSs in the railway networks are analyzed.

However, the main objective of the project is to study the operation of static ESSs on the grid, for voltage stabilization and energy saving issues. More specifically, in chapter 4, a theoretical approach on the installation and control strategy of the ESSs for voltage stabilization in DC railway networks has been designed. This was initially applied to stabilize the voltage drops on the trains' pantographs and then on the buses of the four electrical substations. The steps followed by this study concern the effective placement, sizing and operation of the supercapacitor storage systems. Afterwards, the issue of energy saving has been studied in chapter 5, in order to reduce the overall energy consumption of the grid. The installation and operation of the systems resulted in a reduction of the total energy produced by the substations, as well as of the losses taking place in the supply lines. MATLAB environment was used for the implementation of the aforementioned simulations.

Finally, a brief theoretical analysis for the economic evaluation of the investment was carried out, with the aim of controlling its future profitability.

KEY WORDS

Railway network, regenerative braking, onboard/stationary energy storage system, supercapacitors, electric substations, train, voltage stabilization, energy saving.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλω αρχικά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή του Ε.Μ.Π κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να αναλάβω την παρούσα διπλωματική εργασία και να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλη Κλεφτάκη, για τη σημαντική βοήθεια και καθοδήγησή του, καθώς και την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΑ ΑΣΤΙΚΑ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

1.1	Εισαγωγή στα σιδηροδρομικά δίκτυα	1
1.2	Βιωσιμότητα στις μεταφορές	2
1.3	Ενεργειακή απόδοση σιδηροδρομικών συστημάτων	3
1.4	Ενεργειακή κατανάλωση οχημάτων	4
1.4.1	Μηχανικές απώλειες	4
1.4.2	Απώλειες εξοπλισμού για κίνηση του συρμού	5
1.4.3	Απώλειες βοηθητικών συστημάτων	6
1.4.4	Απώλειες γραμμών παροχής	6
1.5	Αναγεννητική πέδηση	7
1.6	Μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα	9
1.6.1	Μια θεώρηση για την κατανάλωση ενέργειας	9
1.6.2	Έλεγχος της πυκνότητας κυκλοφορίας των οχημάτων ως μέθοδος εκτίμησης και επιλογής τεχνικών για την εξοικονόμηση ενέργειας	11
1.6.3	Άλλες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας	12
1.7	Βελτίωση δεκτικότητας ενεργειακών συστημάτων	13
1.7.1	Βελτίωση δρομολογίων στο δίκτυο	13
1.7.2	Ηλεκτρικοί υποσταθμοί διπλής κατεύθυνσης	15
1.7.3	Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Είδη συστημάτων αποθήκευσης	19
2.1.1	Ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές	19
2.1.1.1	Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος	20
2.1.1.2	Συσσωρευτές νικελίου	21
2.1.1.3	Συσσωρευτές λιθίου	22

2.1.1.4	Συσσωρευτές νατρίου	24
2.1.1.5	Άλλες αναδυόμενες τεχνολογίες συσσωρευτών	25
2.1.2	Ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος-Υπερπυκνωτές	26
2.1.3	Σφόνδυλοι υπερυψηλής ταχύτητας	28
2.1.4	Υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	29
2.2	Τεχνοοικονομική σύγκριση διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας για χρήση σε σιδηροδρομικές εφαρμογές	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

3.1	Ρόλος και χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας	33
3.2	Τυπική διάταξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας	34
3.3	Απαιτούμενα χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας	35
3.4	Κινητές σιδηροδρομικές εφαρμογές	35
3.4.1	Κινητά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	35
3.4.2	Διαστασιολόγηση και έλεγχος λειτουργίας	36
3.4.3	Τεχνολογίες κινητών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας	39
3.4.4	Πραγματικές εφαρμογές	39
3.5	Στατικές σιδηροδρομικές εφαρμογές	40
3.5.1	Στατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	40
3.5.2	Διαστασιολόγηση και έλεγχος λειτουργίας	41
3.5.3	Τεχνολογίες στατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας	43
3.5.4	Πραγματικές εφαρμογές	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΑΣΗΣ ΣΕ DC ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

4.1	Θεωρητικό μέρος	45
4.1.1	Σταθεροποίηση τάσης στην είσοδο των τρένων	45
4.1.2	Σταθεροποίηση τάσης σε ηλεκτρικούς υποσταθμούς	52
4.2	Προσομοιώσεις και αριθμητικά αποτελέσματα	53

4.2.1	Διόρθωση βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων	53
4.2.2	Διόρθωση βυθίσεων τάσης σε ηλεκτρικούς υποσταθμούς	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ DC ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

5.1	Θεωρητικό μέρος	83
5.2	Προσομοιώσεις και αριθμητικά αποτελέσματα	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟΥ ΠΛΑΝΟΥ

6.1	Οικονομικοί δείκτες αξιολόγησης επενδύσεων	93
6.2	Υπολογισμός ταμειακών ροών	95
6.3	Αξιολόγηση επένδυσης	95
6.3.1	Αξιολόγηση επένδυσης ως προς τα ίδια κεφάλαια	96
6.3.2	Αξιολόγηση επένδυσης ως προς το σύνολο της επένδυσης	97

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΣΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	99
7.2	Επεκτάσεις της εργασίας	102

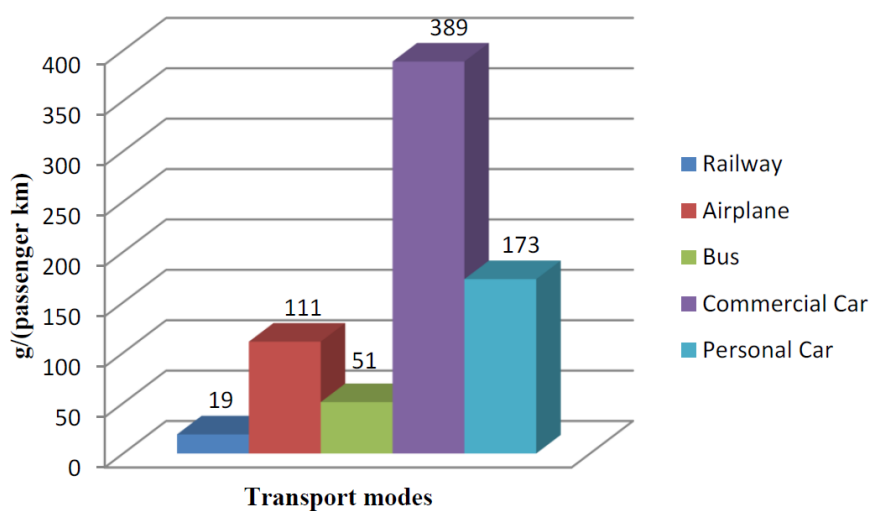
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

103

Ηλεκτρική ενέργεια στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα

1.1 Εισαγωγή στα σιδηροδρομικά δίκτυα

Οι μεταφορές ευθύνονται περίπου για το ένα τέταρτο των συνολικών εκπομπών αέριων ρύπων στην Ευρώπη, με το μεγαλύτερο ποσοστό να οφείλεται στις οδικές μεταφορές, ενώ το μικρότερο να προέρχεται από τις σιδηροδρομικές εφαρμογές. Η υψηλή ενεργειακή απόδοση των σιδηροδρομικών μεταφορών σε συνδυασμό με την χαμηλή εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα, τις καθιστά ως ένα από τα καλύτερα και πιο αποδοτικά συστήματα μεταφοράς. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές εκπομπής CO₂ από διάφορα μέσα μεταφοράς. Οι ηλεκτρικοί συρμοί, αποτελούν ζωτικό τμήμα των μέσων μεταφοράς, αφού παρουσιάζουν τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση συγκριτικά με τα υπόλοιπα συστήματα. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνηση των τρένων η οποία επιτρέπει την αξιοποίηση μιας μεγάλης ποικιλίας πρωτογενών ενεργειακών πόρων και συμβάλλει στην αποδοτική και πιο οικονομική λειτουργία τους. Αυτός είναι επίσης ο λόγος της πρόσφατης εντατικής εξέλιξης στην ηλεκτροκίνηση, η οποία εκτιμάται ότι θα συνεισφέρει στη δραστική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Το τεράστιο αυτό πλεονέκτημα, αναφέρεται και τονίζεται σε πλήθος σχετικών δημοσιεύσεων. [6][10]



Σχήμα 1.1: Εκπομπές CO₂ για διαφορετικά μέσα μεταφοράς [10]

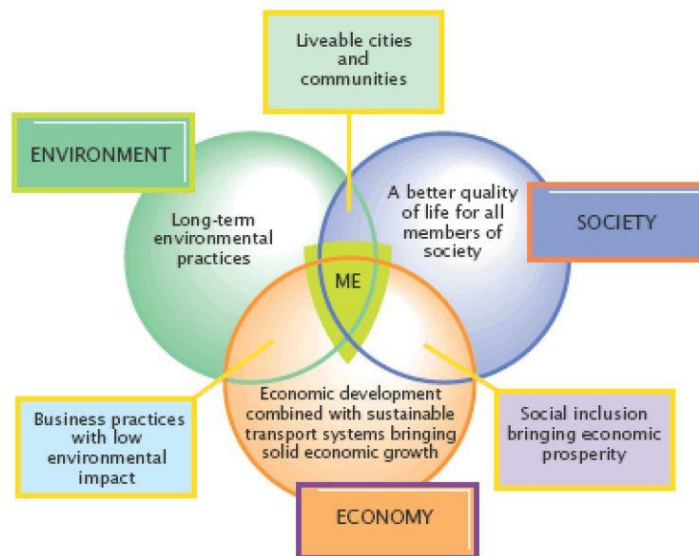
Δεδομένου ότι η ενεργειακή τους απόδοση βρίσκεται ήδη σε πολύ υψηλό επίπεδο, οι δυνατότητες περαιτέρω βελτίωσης όσον αφορά το ποσό της καταναλισκόμενης ενέργειας είναι αρκετά περιορισμένες, ωστόσο όχι αδύνατες. Το μέλλον των σιδηροδρομικών εφαρμογών θα χαρακτηρίζεται από συνεχή ανταγωνισμό ως προς τα κόστη και την περιβαλλοντική συμβατότητα των συστημάτων που θα χρησιμοποιούνται. Αυτό σημαίνει ότι θα συνεχίσουν να διατηρούν την καλή υπόστασή τους ανάμεσα σε άλλα ανταγωνιστικά συστήματα, ενώ παράλληλα θα στοχεύσουν στην επιπλέον βελτίωση των χαρακτηριστικών τους. [15]

Τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα άρχισαν να αναπτύσσονται σημαντικά, ως αποτέλεσμα της σύγχρονης τάσης για εξοικονόμηση ενέργειας και των περιβαλλοντικά βιώσιμων μεταφορών. Η κατανάλωση ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική και αναπαριστά ένα μεγάλο ποσοστό του συνολικού τελικού κόστους λειτουργίας. Για την αποδοτικότερη και πιο οικονομική λειτουργία τους, αναπτύσσονται συνεχώς καινούριες τεχνολογίες οι οποίες συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της ροής ισχύος μεταξύ των οχημάτων και του ηλεκτρικού δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, αναζητούνται καινοτομίες που στοχεύουν στην αξιοποίηση της ανατροφοδοτούμενης προς το δίκτυο ενέργειας η οποία προκύπτει από την πέδηση των τρένων στις γραμμές. Η χρήση συστημάτων αποθήκευσης μπορεί να αποτελέσει μια αποδοτική λύση για την αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση της αναγεννητικής ενέργειας, και συνεπώς την αύξηση της απόδοσης του δικτύου. Εκτός όμως από την ενεργειακή εξοικονόμηση, τα συστήματα αυτά προσφέρουν αρκετά ακόμα πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα σταθεροποίηση της τάσης στο δίκτυο. [10]

1.2 Βιωσιμότητα στις μεταφορές

Σήμερα, η όλο και αυξανόμενη ανάγκη για προστασία του περιβάλλοντος και η ανάπτυξη της οικολογικής συνείδησης, αποτελούν ζητήματα που απασχολούν την κοινωνία σε μεγάλο βαθμό. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις λαμβάνονται υπόψη και παίζουν σημαντικότατο ρόλο στην απόφαση υλοποίησης κάθε δημόσιου έργου ή μεταρρύθμισης. Λόγω των κλιματικών αλλαγών και της συνεχούς μόλυνσης του πλανήτη, η «πράσινη» ανάπτυξη καθίσταται πλέον ύψιστης σημασίας σε όλους τους τεχνολογικούς κλάδους.

Υπάρχουν τρία κύρια συστατικά μέρη που συνιστούν τη βιώσιμη ανάπτυξη. Η περιβαλλοντική προστασία, η οικονομική βιωσιμότητα και η κοινωνική δικαιοσύνη. Η βασική θεωρία πίσω από αυτά, στηρίζεται στη συνειδητοποίηση της ανάγκης για αύξηση της κοινωνικής ευημερίας με ταυτόχρονη μείωση των απαιτούμενων πόρων για την επίτευξή της. Οι ανησυχίες πηγάζουν από την περιβαλλοντική υποβάθμιση που προκαλείται από τη συνεχώς αυξανόμενη κατανάλωση για την ικανοποίηση των ανθρώπινων αναγκών. Η «πράσινη» λοιπόν ανάπτυξη, αποτελεί τη μόνη δυνατή προσέγγιση για την κοινωνική ευημερία των επόμενων γενεών.



Σχήμα 1.2: Δομή της βιώσιμης ανάπτυξης [10]

Μελλοντικό στόχο των περισσότερων κρατών αποτελεί λοιπόν η ανάπτυξη των μέσων μεταφοράς, με την εφαρμογή όσο το δυνατό φιλικότερων προς το περιβάλλον τεχνικών. Όσον αφορά τα σιδηροδρομικά συστήματα, η λειτουργία και συνεχής βελτίωση των ηλεκτρικών συρμών αποτελεί ζήτημα ανυπέρβλητης σημασίας. Αυτό διότι πρόκειται για ένα μέσο το οποίο χρησιμοποιεί, και θα συνεχίσει να χρησιμοποιεί, ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, αποτελώντας έναν από τους καλύτερους και πιο οικονομικούς τρόπους μεταφοράς. Ωστόσο, η υλοποίηση πράξεων για την ανάπτυξη και εφαρμογή φιλικών προς το περιβάλλον έργων, παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Οι κυβερνήσεις θα πρέπει να υιοθετήσουν απόψεις και πολιτικές για την προσέγγιση μιας όσο το δυνατόν πιο «πράσινης» ανάπτυξης στις μεταφορές κίνησης. Σε μία εποχή λοιπόν που η οικολογική συνείδηση και η ανάγκη για προστασία του περιβάλλοντος ολοένα και αυξάνονται, πρέπει να εφαρμοστούν σημαντικές βελτιώσεις όσον αφορά την ενεργειακή απόδοση αυτών των συστημάτων. [10]

1.3 Ενεργειακή απόδοση σιδηροδρομικών συστημάτων

Η ενεργειακή απόδοση των ηλεκτρικών σιδηρόδρομων αποτελεί ζήτημα πολύ μεγάλης σημασίας στις μέρες μας και έχει απασχολήσει σε τεράστιο βαθμό τις σιδηροδρομικές εταιρείες. Στην περίπτωση που η φήμη των σιδηροδρομικών συστημάτων ως το πιο οικονομικό και φιλικό προς το περιβάλλον μέσο κλονιστεί, θα δημιουργηθούν σοβαρά προβλήματα τόσο σε αυτές, όσο και στην ίδια την κοινωνία. Επιπλέον, η απελευθέρωση και ιδιωτικοποίηση της αγοράς, ασκούν συνεχή πίεση στους διαχειριστές, προκειμένου να εφαρμόσουν οικονομικά αποδοτικές και ανταγωνιστικές μεταρρυθμίσεις στα δίκτυά τους.

Υπάρχει μια ευρέως αποδεκτή άποψη μεταξύ των ειδικών, η οποία υποστηρίζει ότι η προοπτική για επιπλέον εξοικονόμηση της ενεργειακής κατανάλωσης στους σιδηροδρόμους είναι μεγάλη. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την σπουδαιότητα και τα πλεονεκτήματα που

παρουσιάζουν στο χώρο των μεταφορών, έχει ενεργοποιήσει τους διαχειριστές, οι οποίοι αρχίζουν πλέον να εφαρμόζουν καινοτόμες τεχνικές για την ανάπτυξη και βελτίωση των δικτύων. Αυτές στοχεύουν τόσο στην αύξηση της συνολικής απόδοσης, όσο και στην αναβάθμιση και το βέλτιστο έλεγχο όλων των υπάρχουσών τεχνολογιών του δικτύου. Η εφαρμογή στρατηγικών αποδοτικής οδήγησης καθώς επίσης και η αξιοποίηση της ανατροφοδοτούμενης ενέργειας λόγω αναγεννητικής πέδησης των τρένων, αποτελούν κάποιες από τις πιθανές κινήσεις που μπορούν να εφαρμοστούν.

Για την δυνατότητα λοιπόν βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης καθώς επίσης και των γενικότερων χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών συρμών, θα πρέπει κάποιος αρχικά να κατανοήσει την ενεργειακή ροή και κατανάλωση των συστημάτων σε ένα σιδηροδρομικό δίκτυο. [10]

1.4 Ενεργειακή κατανάλωση οχημάτων

Οι ενεργειακές απαιτήσεις ενός σιδηροδρομικού οχήματος, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερα βασικά τμήματα τα οποία και είναι άμεσα συνδεδεμένα με τις απώλειες και παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- **Μηχανικές απώλειες:** Η μηχανική ισχύς στους τροχούς είναι απαραίτητη προκειμένου να υπερνικηθούν οι διάφοροι τύποι αντιστάσεων που αντιμετωπίζει το τρένο (αντίσταση κίνησης, αδράνεια, αντίσταση λόγω κλίσης των γραμμών)
- **Απώλειες εξοπλισμού για την κίνηση του συρμού:** Σημαντικό ποσό απωλειών θερμότητας παρατηρείται κατά την παροχή μηχανικής ισχύος από τη λειτουργία του εξοπλισμού, για την κίνηση των τρένων πάνω στις γραμμές του δικτύου
- **Απώλειες βοηθητικών συστημάτων:** Οι απώλειες αυτές προκαλούνται από τη λειτουργία του βοηθητικού εξοπλισμού που απαιτείται για την ασφαλή κίνηση των τρένων. Ορισμένα από τα συστήματα αυτά είναι για παράδειγμα το σύστημα ψύξης του κινητήρα ή ακόμα και λειτουργίες για την άνεση των επιβατών, όπως ο κλιματισμός και ο φωτισμός
- **Απώλειες γραμμών παροχής:** Στα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα, μέρος της ενέργειας που τροφοδοτείται από τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς καταναλώνεται στις αντιστάσεις των γραμμών [10]

1.4.1 Μηχανικές απώλειες

Δεδομένου ότι η αδράνεια και η αντίσταση που προκαλείται λόγω της κλίσης των γραμμών στο δίκτυο είναι ανάλογες με τη μάζα του κινούμενου οχήματος, οι επιπτώσεις τους ως απώλειες συνήθως αντιμετωπίζονται μαζί και θεωρούνται ως ένα. Έτσι, η ενέργεια που απαιτείται για την πορεία ενός τρένου σε κάποιο ανηφορικό τμήμα του δικτύου, δεν μετατρέπεται σε θερμότητα αλλά αποθηκεύεται ως κινητική και δυναμική ενέργεια και επομένως, μπορεί να ανακτηθεί κατά μεγάλο βαθμό χάρη στην αναγεννητική πέδηση. Το ποσό της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί καθορίζεται σημαντικά από τη μάζα του οχήματος και τον αριθμό των στάσεων που αυτό εκτελεί, καθώς επίσης και από την τοπολογία του σιδηροδρομικού δικτύου.

Οι απώλειες λόγω κινητικής ενέργειας περιγράφονται από την εξίσωση (1.1) η οποία λαμβάνει υπόψη πλήθος φαινομένων θερμικής απαγωγής, διαφορετικές δυνάμεις τριβής του συστήματος τροχών-γραμμών, καθώς επίσης και την αντίσταση του αέρα:

$$P_{loss_run} = (a + bv_t + cv_t^2)v_t \quad (1.1)$$

Οι συντελεστές της εξίσωσης εξαρτώνται από τον σχεδιασμό του τρένου, ενώ ο όρος v_t αντιπροσωπεύει την ταχύτητά του. Πιο αναλυτικά, ο συντελεστής a προέρχεται κατά κύριο λόγο από τις μηχανικές αντιστάσεις (τριβή), ενώ οι όροι bv_t και cv_t^2 από την αντίσταση αέρα. Οι τιμές αυτές, συνήθως δίνονται από τον κατασκευαστή και δεν αποτελούν γενικές σταθερές. Αντίθετα, εξαρτώνται από την ειδική σχεδίαση του κάθε οχήματος και τα χαρακτηριστικά των γραμμών του δικτύου.

Το προφίλ ταχύτητας που ακολουθεί κάθε όχημα παίζει επίσης μεγάλο ρόλο στον υπολογισμό των απωλειών. Όταν το δίκτυο λειτουργεί σε σημαντικές ταχύτητες κίνησης, δηλαδή όταν η μέση μετρούμενη ταχύτητα είναι υψηλή και οι αποστάσεις μεταξύ δύο στάσεων μεγάλες, η αντίσταση κίνησης αποτελεί την κύρια πηγή απωλειών. Αυτό συμβαίνει λόγω της μεγάλης αντίστασης που προκαλεί ο αέρας κατά την κίνηση του τρένου, σε αντίθεση με τις απώλειες λόγω των τριβών στις γραμμές, οι οποίες θα είναι και σχετικά μικρής ποσότητας. Οι τελευταίες εξαρτώνται κυρίως από το βάρος του τρένου, καθώς και, σε περιορισμένο βαθμό, από την κυρτότητα των γραμμών. Στις περιπτώσεις λοιπόν που το φορτίο του τρένου είναι μεγάλο και συνεπώς το βάρος του αυξάνεται κατά πολύ, οι τελευταίες είναι σαφώς υψηλότερες και αποτελούν σημαντικό ποσοστό των μηχανικών απωλειών. [10]

1.4.2 Απώλειες εξοπλισμού για την κίνηση του συρμού

Η απαιτούμενη μηχανική ενέργεια στους τροχούς, παρέχεται μέσω του ειδικού εξοπλισμού του τρένου, ο οποίος μετατρέπει την απορροφημένη, από την κεντρική παροχή του δικτύου, ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή της ενέργειας προκαλεί τη δημιουργία επιπλέον απωλειών, σε μορφή θερμότητας, στα εμπλεκόμενα εξαρτήματα. Στο σημείο αυτό, για μεγαλύτερη απλούστευση, θα γίνει αναφορά μόνο στο ποσό απωλειών των ηλεκτρικών συστημάτων.

Η ενέργεια που λαμβάνεται, μέσω των περίπλοκων αλυσιδωτών μετατροπών, τροφοδοτεί τελικά τους κινητήρες προκαλώντας την κίνηση στους τροχούς του οχήματος. Κάθε ένα από τα στάδια μετατροπής από τα οποία περνάει η αρχική ενέργεια, παρουσιάζει και από ένα ποσό θερμικών απωλειών. Προκειμένου λοιπόν να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη υπερθέρμανση του εξοπλισμού, γίνεται χρήση βοηθητικών συστημάτων ψύξης. Οι βαθμοί απόδοσης σε κάθε στάδιο διαφέρουν ανάλογα με το εάν πρόκειται για ένα σιδηροδρομικό δίκτυο εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος. Ωστόσο, η συνολική απόδοση που προκύπτει από τη λειτουργία μετατροπής ενέργειας που ξεκινάει από την κεντρική παροχή και φτάνει στους τροχούς, συγκριτικά με αυτή της ακριβώς αντίστροφης διαδικασίας, θεωρούνται σχεδόν ίσες.

Μια ακριβής εκτίμηση των απωλειών εξοπλισμού για την κίνηση των τρένων, παρουσιάζεται λοιπόν στην εξίσωση (1.2). Σύμφωνα με αυτή, οι πρώτοι όροι είναι ανεξάρτητοι

από το ρεύμα του κινητήρα, και συνεπώς την ροπή της μηχανής, ενώ αντίθετα ο τελευταίος εξαρτάται από την ελκτική δύναμη και το ρεύμα της μηχανής.

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

Όπου ο όρος V_t αντιπροσωπεύει την τάση στον παντογράφο του τρένου και ο $I_{t,max}$ το ρεύμα που απορροφάει το τρένο για μέγιστη ελκτική δύναμη $F_{t,max}$. Ο λόγος $\frac{F_t}{F_{t,max}}$ πρόκειται για την αναλογία μεταξύ της πραγματικής και της μέγιστης ελκτικής δύναμης, ενώ ο συντελεστής k αποτελεί έναν συντελεστή ποινής για τα οχήματα, ο οποίος λαμβάνει τιμές από 0.55 έως 1 και είναι αντιπροσωπευτικός της συνολικής αποδοτικότητας της διαδρομής που ακολουθεί η ενέργεια. [10]

1.4.3 Απώλειες βοηθητικών συστημάτων

Οι απώλειες αυτές προκύπτουν από τη λειτουργία των βοηθητικών συστημάτων, η οποία και είναι απαραίτητη για την ασφαλή κίνηση των οχημάτων καθώς επίσης και για την καλύτερη εξυπηρέτηση των επιβατών. Όσον αφορά το πρώτο ζήτημα, ορισμένες ενδεικτικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται είναι τα συστήματα ψύξης των κινητήρων και των μετατροπέων του κάθε οχήματος, τα συστήματα πέδησης, καθώς επίσης και αρκετά άλλα μηχανήματα. Αναφορικά με την άνεση των επιβατών, τα συστήματα που τίθενται σε λειτουργία μπορεί να είναι για παράδειγμα η θέρμανση, ο φωτισμός ή και ο εξαερισμός των βαγονιών. Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των παραπάνω παρέχεται από την κεντρική πηγή μέσω της οποίας εκτελείται και η τροφοδότηση του σιδηροδρομικού δικτύου, ενώ υπολογίζεται ότι αγγίζει περίπου το 20% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας ενός τρένου. [10]

1.4.4 Απώλειες γραμμών παροχής

Η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την τροφοδότηση και λειτουργία ενός σιδηροδρομικού συρμού παράγεται από τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς του δικτύου και διανέμεται σε μεγάλες αποστάσεις προκειμένου να φτάσει στα φορτία (τρένα). Οι απώλειες που προκαλούνται λόγω του φαινομένου αυτού στο σύστημα παροχής, εμπεριέχουν τις απώλειες μετατροπής στους υποσταθμούς, καθώς επίσης και εκείνες που προκαλούνται λόγω των αντιστάσεων στις γραμμές. Το τελικό μέγεθός τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του δικτύου αλλά και του ίδιου του συστήματος τροφοδότησης. Γενικότερα, οι απώλειες είναι μειωμένες σε υψηλότερες τάσεις λειτουργίας. Συνεπώς, τα DC σιδηροδρομικά δίκτυα τα οποία χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλές τιμές τάσης, παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες απώλειες παροχής.

Οι απώλειες των γραμμών παροχής οφείλονται κυρίως στο φαινόμενο Joule, και συνεπώς είναι ανάλογες με την αντίσταση των αγωγών και το τετράγωνο του ρεύματος που τους διαρρέει. Ενδεικτικά, σε ένα DC σιδηροδρομικό δίκτυο με N κόμβους, οι απώλειες ισχύος των αγωγών μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τη σχέση (1.3).

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

Στην παραπάνω εξίσωση, ο όρος V_i αντιπροσωπεύει την τάση σε κάποιον δοσμένο κόμβο, ενώ ο G_{ij} το στοιχείο i,j του πίνακα της μήτρας αγωγιμοτήτων, η οποία καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ των κόμβων.

Στη συγκεκριμένη κατηγορία, δεν γίνεται επίσης να αγνοηθούν και οι απώλειες που παρατηρούνται στα απορριπτικά φορτία, δηλαδή στις αντιστάσεις εκείνες πάνω στις οποίες καταναλώνεται η επιστρεφόμενη προς το δίκτυο αναγεννητική ενέργεια όταν αυτή δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλλιώς. [10]

1.5 Αναγεννητική πέδηση

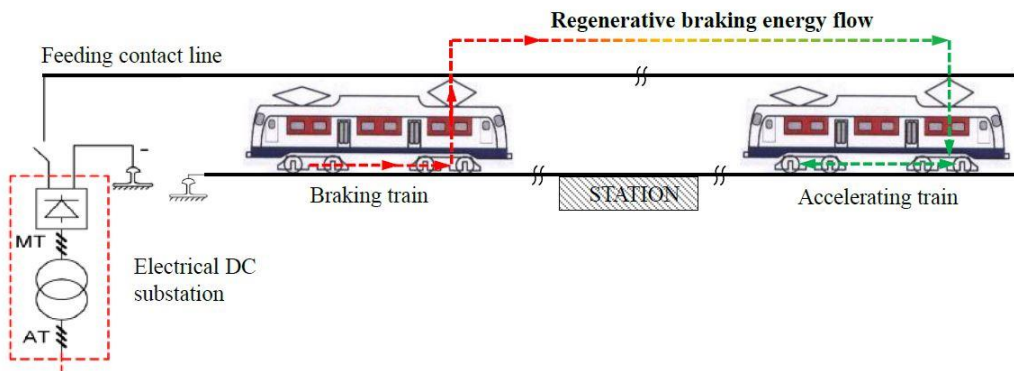
Χάρη στην ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας, η αναγεννητική πέδηση (γνωστή και ως αναγεννητική ή δυναμική πέδηση), αποτελεί μια πολύ ελπιδοφόρα λύση για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης στα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα. Η χρήση ηλεκτρικού φρεναρίσματος είναι ευρέως διαδομένη στις σιδηροδρομικές μεταφορές, καθώς σε αντίθεση με την πέδηση λόγω τριβής, δεν προκαλεί φθορές, σκόνη, αύξηση της θερμοότητας ή θόρυβο στο δίκτυο, τα οποία αναπόφευκτα προκαλούν και μεγάλα κόστη συντήρησης.

Η διαθέσιμη ενέργεια κατά την πέδηση είναι η κινητική η οποία αποκτάται κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης του οχήματος. Στην κατάσταση λειτουργίας αναγεννητικής πέδησης, δηλαδή κατά το φρενάρισμα, γίνεται μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική, η οποία στη συνέχεια επιστρέφεται προς το δίκτυο. Από τη σκοπιά της μηχανής, πρόκειται κυρίως για τη λειτουργία της ως γεννήτρια, ενώ η ροή ισχύος έχει φορά από τους τροχούς προς το δίκτυο (πηγή). Η επιστρεφόμενη λοιπόν ενέργεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την τροφοδότηση άλλων επιταχυνόμενων τρένων, είτε για να αποθηκευτεί σε συστήματα αποθήκευσης που είναι εγκατεστημένα στο σιδηροδρομικό δίκτυο. Ωστόσο, οφείλει να σημειωθεί, ότι δεν είναι δυνατή η δέσμευση και αξιοποίηση όλης της ενέργειας που είναι διαθέσιμη κατά την πέδηση ενός οχήματος, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για απότομες επιβραδύνσεις των τρένων.

Αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι η εφαρμογή της αναγεννητικής πέδησης στα αστικά σιδηροδρομικά δίκτυα θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει την ενεργειακή κατανάλωση κατά ποσοστό που κυμαίνεται ανάμεσα στα 10% έως και 42%, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας θα μπορούσε να επιστραφεί πίσω στο δίκτυο, πραγματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι το ποσό αυτό αγγίζει μόλις το 19%. [10]

Η αναγεννητική ενέργεια χρησιμοποιείται συνήθως, για την τροφοδότηση του βοηθητικού εξοπλισμού του ίδιου του οχήματος (φωτισμός, κλιματισμός κ.α.). Η ποσότητα της ενέργειας που απομένει ως πλεόνασμα, μπορεί να επιστραφεί στην γραμμή παροχής ρεύματος για χρήση από άλλα οχήματα του ίδιου δικτύου. Ωστόσο, τα DC σιδηροδρομικά δίκτυα, τα οποία είναι κυρίως αυτά που χρησιμοποιούνται σε σιδηροδρομικές αστικές εφαρμογές, δεν είναι πάντα «δεκτικά».

Αυτό σημαίνει ότι δε μπορούν πάντα να απορροφήσουν την επιστρεφόμενη προς το δίκτυο ενέργεια. Η δεκτικότητα ενός σιδηροδρομικού συστήματος ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής συνολικής ενέργειας που επιστρέφεται πίσω στη γραμμή, ως προς την δυνητική αναγεννητική ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί κατά τη διαδικασία πέδησης των οχημάτων. Γενικότερα, η ανακτώμενη ενέργεια μπορεί να σταλεί πίσω στο δίκτυο παροχής μόνο όταν λαμβάνει χώρα μια ταυτόχρονη κατανάλωση, για παράδειγμα όταν ένα άλλο τρένο επιταχύνει στο ίδιο ηλεκτρικό τμήμα. Για να καταναλωθεί η ενέργεια 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.[6]



Σχήμα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση της ενεργειακής ροής κατά την αναγεννητική πέδηση [10]

Δυστυχώς, η ικανότητα κάθε δικτύου να δέχεται και να αξιοποιεί την αναγεννητική ενέργεια δε μπορεί να δοθεί με βεβαιότητα. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στις διαφορές που εμφανίζονται ανάμεσα σε ορισμένες παραμέτρους των δικτύων. Η συχνότητα δρομολογίων των τρένων, τα προφίλ ισχύος και ταχύτητάς τους, η διαμόρφωση του ίδιου του ηλεκτρικού δικτύου, η τάση των γραμμών, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας από τα βοηθητικά συστήματα, αποτελούν στοιχεία που συντελούν στη διαφορετική δεκτικότητα που παρουσιάζει κάθε δίκτυο. Ένας τρόπος λοιπόν για τη σημαντική βελτίωσή της, είναι η αύξηση των δρομολογίων ώστε να επιτευχθεί συγχρονισμός ανάμεσα στις επιβραδύνσεις και στις επιταχύνσεις των κινούμενων τρένων στις γραμμές. Μέσω αυτού, η ενέργεια που επιστρέφεται στο δίκτυο λόγω της πέδησης κάποιου οχήματος, θα μπορέσει να αξιοποιηθεί από κάποιο άλλο το οποίο, τη συγκεκριμένη στιγμή, θα επιταχύνει. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετοί περιορισμοί που εμποδίζουν την αύξηση της συχνότητας των δρομολογίων σε ένα δίκτυο, όπως για παράδειγμα το ελάχιστο επιτρεπτό headway. Αυτό αποτελεί τη χρονική διαφορά που πρέπει να υπάρχει ανάμεσα στην κίνηση δύο διαφορετικών οχημάτων στις γραμμές.

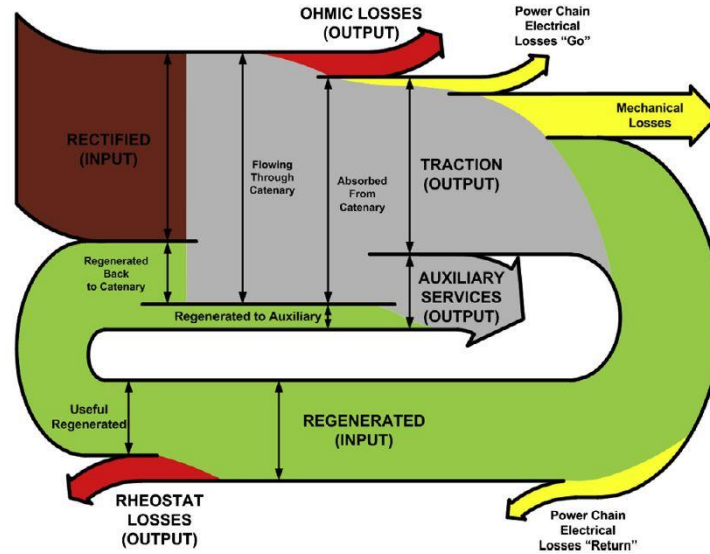
Γενικότερα, η αναγεννητική πέδηση μπορεί να συμβάλει στην εξοικονόμηση σημαντικού ποσού ενέργειας στα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα. Επιπροσθέτως, μπορεί να μετριάσει αρκετά προβλήματα που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς, όπως για παράδειγμα οι πτώσεις τάσης στις γραμμές παροχής και οι υψηλές καταναλώσεις μέγιστης ισχύος. [10]

1.6 Μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ενεργειακή απόδοση των ηλεκτρικών σιδηροδρομικών συστημάτων αποτελεί πολύ σημαντικό ζήτημα στις μέρες μας και έχει απασχολήσει σε τεράστιο βαθμό τους ειδικούς επί του θέματος. Οι διάφορες τεχνολογίες που αναπτύσσονται βελτιώνονται συνεχώς, ωστόσο η χρήση και η αποτελεσματική εφαρμογή τους στα δίκτυα απαιτούν πολύ χρόνο. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αρκετές στρατηγικές που μπορούν να εφαρμοστούν στο αμεσότερο μέλλον, και στοχεύουν στις γενικότερες λειτουργικές βελτιώσεις των δικτύων. Η εφαρμογή αρκετών από αυτές απαιτεί μικρές επενδυτικές ενέργειες ή ακόμα και απλά προγράμματα κατάρτισης. Για παράδειγμα, η αποτελεσματική αξιοποίηση της αναγεννητικής ενέργειας που προκαλείται κατά την πέδηση των τρένων στις γραμμές αποτελεί μία από τις εν λόγω στρατηγικές. Οι πιο μακροπρόθεσμες εφαρμογές στηρίζονται στην εισαγωγή καινοτόμων τεχνολογιών στα δίκτυα, με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη βελτιστοποίηση των σιδηροδρομικών συστημάτων ως σύνολο. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν τέτοιου είδους εφαρμογές, συντελούν στην ανάπτυξη και δημιουργία οικονομικά και ενεργειακά αποδοτικών δικτύων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες τεχνικές που μπορεί να συμβάλλουν σημαντικά στη βελτίωση της λειτουργίας και απόδοσης των σιδηροδρομικών συστημάτων. [10]

1.6.1 Μια θεώρηση για την κατανάλωση ενέργειας

Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η ροή ισχύος ενός τυπικού DC σιδηροδρομικού δικτύου, όπου τα τρένα αναπαράγουν ενέργεια κατά την πέδησή τους πάνω στις γραμμές. Αυτή η ενέργεια επιστρέφει πίσω στο δίκτυο όπου και χρησιμοποιείται είτε για την τροφοδότηση του βοηθητικού εξοπλισμού του ίδιου του οχήματος, είτε για την επιτάχυνση των υπόλοιπων οχημάτων που βρίσκονται κοντά σε αυτό. Στην περίπτωση που τα τρένα δεν είναι εξοπλισμένα με συστήματα αναγεννητικής πέδησης, το πράσινο βέλος ανατροφοδότησης του σχήματος δε θα υπάρχει και, συνεπώς, η συνολική απαιτούμενη ενέργεια που καταναλώνεται από αυτά θα παρέχεται ολοκληρωτικά από τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς του δικτύου. Επιπλέον, όλο το ποσό ενέργειας που χρησιμοποιείται για την μετακίνηση των οχημάτων στις γραμμές, δε θα μπορεί να αποθηκεύεται πλέον ως κινητική και δυναμική ενέργεια αλλά, αντιθέτως, θα μετατρέπεται σε θερμότητα. [16]



Σχήμα 1.4: Ροή ενέργειας σε DC σιδηροδρομικό δίκτυο [16]

Η μηχανή των τρένων επιτελεί δύο λειτουργίες, ανάλογα με τη φάση κίνησης που αυτό εκτελεί. Κατά την επιτάχυνση, λειτουργεί ως κινητήρας απορροφώντας ενέργεια από το δίκτυο, ενώ κατά την επιβράδυνση λειτουργεί ως γεννήτρια, διοχετεύοντας ενέργεια προς αυτό. Με βάση λοιπόν τις δύο αυτές διαδικασίες, κατασκευάζεται και το ισοζύγιο ενέργειας του σιδηροδρομικού δικτύου. Ως εισοδοί θεωρούνται, η ενέργεια που παραδίδεται από τους υποσταθμούς (E_{sub}) και η αναγεννητική ενέργεια που γυρίζει στο δίκτυο κατά την πέδηση των τρένων και ανακτάται από τις ηλεκτρικές μηχανές των οχημάτων (E_{reg}). Αντίστοιχα, οι έξοδοι αποτελούνται από τρεις βασικές συνιστώσες. Από τη συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια των τρένων, η οποία αναλύεται σε δύο τομείς, την απαιτούμενη ενέργεια των βασικών ($E_{traction}$) και βοηθητικών (E_{aux}) λειτουργιών τους, από την ενέργεια που καταναλώνεται πάνω στα απορριπτικά φορτία (E_{BR}) όταν το σύστημα δεν είναι δεκτικό, και τέλος από την ενέργεια που προκύπτει λόγω των ωμικών απωλειών στους αγωγούς (E_{ohmic}). Το ισοζύγιο λοιπόν του συστήματος δίνεται από τη σχέση (1.4).

$$E_{sub} + E_{reg} = E_{traction} + E_{aux} + E_{ohmic} + E_{BR} \quad (1.4)$$

Σημειώνεται, ότι στην περίπτωση που στο δίκτυο έχουν εγκατασταθεί συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τότε στο δεξί μέλος της παραπάνω εξίσωσης, θα πρέπει να προστεθούν άλλοι δύο όροι. Αυτοί αποτελούνται από το ποσό της ενέργειας που τελικά αποθηκεύεται στα συγκεκριμένα συστήματα, καθώς επίσης και από τις απώλειες που προκύπτουν για τη χρήση και λειτουργία τους. [6][16]

Μια γενικότερη σχέση για την καθαρή ενέργεια που απορροφάει ένα τρένο παρουσιάζεται στη συνέχεια. Αν το χ δηλώνει την ενεργειακή απόδοση της αλυσιδωτής μετατροπής που ακολουθεί η ενέργεια του οχήματος, $\left(\frac{E_{traction}}{E_{sub}}\right)$ το ποσοστό της πραγματικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την κίνηση του τρένου και μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια στους τροχούς

ως προς την τροφοδοτούμενη ενέργεια από τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς, και β ο συντελεστής της ανακτώμενης αναγεννητικής ενέργειας τότε η σχέση λαμβάνει τη μορφή:

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

Όπου ο όρος $E_{kin+pot}$ αντιπροσωπεύει το άθροισμα της κινητικής και δυναμικής ενέργειας στους τροχούς, ο E_{run} την ενέργεια που απαιτείται στους τροχούς για να υπερνικήσει την αντίσταση κίνησης του οχήματος (αδράνεια και αντίσταση αέρα) και ο E_{aux} την ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία των βοηθητικών συστημάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα μέρος της κινητικής και δυναμικής ενέργειας ($E_{kin+pot}$) μπορεί να ανακτηθεί χάρη στην αναγεννητική πέδηση. Επειδή η αντίστροφη διαδικασία ροής για τη μετατροπή της επιστρεφόμενης ενέργειας (από τους τροχούς προς το δίκτυο) παρουσιάζει σχεδόν ίδιο βαθμό απόδοσης χ , λαμβάνεται ως τελική ανακτώμενη ενέργεια ο όρος $\chi\beta E_{kin+pot}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι κυρίαρχες στρατηγικές για εξοικονόμηση ενέργειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα προέρχονται από την σχέση (1.5). Κάθε ένας από τους όρους της μπορεί να επηρεαστεί έτσι ώστε να μειωθεί η τελική ενεργειακή κατανάλωση. Τέτοιες στρατηγικές μπορεί να είναι:

- Η μείωση της μάζας των οχημάτων, η οποία συνεπάγεται μείωση της ποσότητας $E_{kin+pot}$
- Η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής και των απωλειών λόγω τριβής στις γραμμές, γεγονός που συμβάλει στην ελάττωση της μηχανικής ενέργειας στους τροχούς, $E_{traction}$
- Η αύξηση αποδοτικότητας των βοηθητικών συστημάτων που προκαλεί μείωση του E_{aux}
- Η μείωση των απωλειών κατά τη μετατροπή της ενέργειας αυξάνει την αλυσοειδή απόδοση χ
- Η βελτίωση της ικανότητας των οχημάτων να χρησιμοποιούν αναγεννητική πέδηση καθώς επίσης και της δεκτικότητας των δικτύων αυξάνουν το συντελεστή β [10]

1.6.2 Έλεγχος της πυκνότητας κυκλοφορίας των οχημάτων ως μέθοδος εκτίμησης και επιλογής τεχνικών για την εξοικονόμηση ενέργειας

Για την επιλογή της τεχνικής που θα εφαρμοστεί με στόχο τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός σιδηροδρομικού δικτύου, πρώτο βήμα αποτελεί ο έλεγχος της πυκνότητας κυκλοφορίας των τρένων σε αυτό. Σκοπό της μελέτης αποτελεί η εύρεση της συσχέτισης μεταξύ της κυκλοφοριακής πυκνότητας στο δίκτυο με τις απώλειες του συστήματος.

Η πυκνότητα κυκλοφορίας εκφράζεται μέσω του headway, το οποίο ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οχημάτων σε μια γραμμή. Παρά το γεγονός ότι αποτελεί χωρικό μέγεθος, το headway εκφράζεται σε μονάδες χρόνου (λεπτά), αντιπροσωπεύοντας το χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο αυτών τρένων. Σημειώνεται ότι υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας, δηλαδή η ύπαρξη πολλών ταυτόχρονα κινούμενων τρένων στη γραμμή, αντιστοιχεί σε μικρή τιμή headway και αντίστροφα. Γενικότερα έχει παρατηρηθεί ότι όσο πυκνότερα είναι τα δρομολόγια μιας γραμμής, τόσο μεγαλύτερες είναι οι ωμικές απώλειες που εμφανίζονται σε αυτήν. Αντιθέτως, οι απώλειες λόγω της κατανάλωσης της επιστρεφόμενης ενέργειας πάνω στα απορριπτικά φορτία, αυξάνονται

με την αύξηση του headway, δηλαδή με τη μείωση της κυκλοφορίας των τρένων στις γραμμές. Αυτό είναι λογικό, διότι σε σενάρια πυκνής κυκλοφορίας, υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα απορρόφησης της επιστρεφόμενης αναγεννητικής ενέργειας από κάποιο επιταχυνόμενο όχημα, από ότι στις περιπτώσεις χαμηλότερης κυκλοφορίας τρένων. Στις τελευταίες, οι απώλειες των απορριπτικών αντιστάσεων είναι συνήθως μεγαλύτερες από ότι οι απώλειες που προκύπτουν λόγω της διέλευσης ρευμάτων στους αγωγούς του δικτύου. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω αποτελέσματα, εξάγονται δύο βασικά συμπεράσματα:

- 1) Η μείωση της αντίστασης των γραμμών μπορεί να επιφέρει σημαντικότερη βελτίωση στην απόδοση του δικτύου, ειδικά σε δρομολόγια πυκνής κυκλοφορίας όπου οι ωμικές απώλειες είναι αυξημένες.
- 2) Όσον αφορά την αναγεννητική πέδηση, τεχνικές που προσανατολίζονται στη βελτίωση της δεκτικότητας του δικτύου ευνοούν σημαντικά την ενεργειακή του απόδοση, αφού η κατανάλωση ενέργειας πάνω στα απορριπτικά φορτία δεν εμφανίζεται μόνο στα αραιά, αλλά και στα πυκνότερα δρομολόγια.

Επόμενο βήμα αποτελεί η εύρεση των πιθανών στρατηγικών που μπορούν να ακολουθηθούν προκειμένου να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Η τελική επιλογή στηρίζεται στα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος, δηλαδή του ελέγχου της πυκνότητας κυκλοφορίας των οχημάτων. Μέσω αυτού, καθίσταται σαφές εάν συμφέρει να εφαρμοστούν τεχνικές για περαιτέρω βελτίωση της δεκτικότητας του δικτύου, εάν είναι προτιμότερο να βρεθούν τρόποι για τη μείωση των αντιστάσεων στους αγωγούς ή να υλοποιηθεί κάποια άλλη αλλαγή στο ηλεκτρικό σύστημα.

1.6.3 Άλλες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες τεχνικές που μπορεί να βελτιώσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου μέσω αλλαγών στα ηλεκτρικά συστήματα:

- 1) Αλλαγή επιπέδου τάσης: Καθώς αυξάνεται το επίπεδο τάσης στο δίκτυο, το ρεύμα στους αγωγούς μειώνεται και, συνεπώς, οι ωμικές απώλειες ελαττώνονται. Η διόρθωση σημαντικών πτώσεων τάσης στο δίκτυο μπορεί επομένως να προκαλέσει σημαντικές βελτιώσεις στη συνολική αποδοτικότητα που αυτό εμφανίζει.
- 2) Ρύθμιση τάσης κενού φορτίου: Μέσω μετασχηματιστή στους ηλεκτρικούς υποσταθμούς του δικτύου, μπορεί να εκτελεστεί αποτελεσματική ρύθμιση της τάσης κενού φορτίου του συστήματος. Με την αύξησή της επιτυγχάνεται μείωση των ωμικών απωλειών στις γραμμές, ενώ παράλληλα αποφεύγονται και οι ανεπιθύμητες πτώσεις τάσεις στην είσοδο των τρένων. Ωστόσο, μειώνεται η δυνατότητα απορρόφησης αναγεννητικής ενέργειας από τα τρένα στις γραμμές. Αυτό συμβαίνει διότι οι τάσεις των τρένων βρίσκονται πλέον πιο κοντά στο μέγιστο επιτρεπτό όριο που έχει τεθεί και, συνεπώς, οι απορριπτικές αντιστάσεις ενεργοποιούνται πιο γρήγορα. Το γεγονός λοιπόν αυτό, προκαλεί μείωση της ικανότητας ανάκτησης ενέργειας από άλλα οχήματα του δικτύου. [16]

1.7 Βελτίωση δεκτικότητας σιδηροδρομικών συστημάτων

Για τη μεγιστοποίηση στην ανταλλαγή της αναγεννητικής ενέργειας μεταξύ των οχημάτων στο δίκτυο, αλλά και τη μείωση της χρήσης των εγκατεστημένων στα τρένα απορριπτικών φορτίων, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές. Αυτές στοχεύουν στη βελτίωση της δεκτικότητας των δικτύων, είτε μέσω της αμοιβαίας ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των οχημάτων, είτε επιστρέφοντας την ανακτώμενη ενέργεια στο κεντρικό δίκτυο παροχής, είτε ακόμα και με τη χρήση ειδικών συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Συνοψίζοντας λοιπόν, οι τακτικές που μπορούν να εφαρμοστούν είναι οι εξής:

- Βελτιστοποίηση των προγραμματισμένων δρομολογίων στο δίκτυο, με στόχο να συγχρονίζονται όσο περισσότερο γίνεται οι φάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης των οχημάτων
- Εξοπλισμός των ηλεκτρικών υποσταθμών με σύγχρονους μετατροπείς διπλής κατεύθυνσης, έτσι ώστε η αναγεννητική ενέργεια να μπορεί να επιστρέψει πίσω στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης, το οποίο και είναι φύσει δεκτικό
- Εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είτε στο δίκτυο είτε πάνω στα τρένα, τα οποία έχουν την ικανότητα ανάκτησης της πλεονάζουσας επιστρεφόμενης ενέργειας και διοχέτευσής της όταν απαιτείται για την επιτάχυνση οχημάτων στις γραμμές [6]

1.7.1 Βελτίωση δρομολογίων στο δίκτυο

Η πρώτη προσέγγιση που θα πρέπει να εξεταστεί για τη μεγιστοποίηση της ανταλλαγής ενέργειας ανάμεσα στα οχήματα, έχει να κάνει με την αναδιοργάνωση των προγραμματιζόμενων δρομολογίων και γενικότερα της κίνησης των οχημάτων. Ένας προσεκτικός σχεδιασμός του προγράμματος λειτουργίας των τρένων, ίσως οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας σε ολόκληρο το σύστημα. Οι τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν αφορούν είτε ατομικά την κίνηση ενός οχήματος, είτε συνολικά την κίνηση όλων των οχημάτων στο δίκτυο. Όσον αφορά την πρώτη περίπτωση, τα στοιχεία που οφείλουν να ελεγχθούν είναι τα προφίλ ταχύτητας και επιτάχυνσης του συρμού, καθώς και η γενικότερη στρατηγική οδήγησης που θα πρέπει να ακολουθεί ο οδηγός. Η βελτιστοποίηση των χρονοδιαγραμμάτων των δρομολογίων καθώς και η αποφυγή των συγκρούσεων στα δρομολόγια των οχημάτων, αποτελούν επίσης τεχνικές που συμβάλλουν στη βελτίωση της δεκτικότητας ενός δικτύου.

- **Βελτιστοποίηση του προφίλ ταχύτητας των οχημάτων:** Οι συχνές εκκινήσεις και στάσεις που εκτελούν τα οχήματα, συμβάλλουν σημαντικά στην ενίσχυση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στα σιδηροδρομικά δίκτυα. Γενικότερα, η ενέργεια που απαιτείται για να υπερνικηθεί η αντίσταση τριβής στις γραμμές, είναι μικρότερη συγκριτικά με τις απώλειες που προκύπτουν όταν μετά από μία επιβράδυνση ακολουθεί κατευθείαν μία απότομη επιτάχυνση. Η αποτελεσματικότερη λύση σε αυτό το πρόβλημα, είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση της φάσης coasting της κίνησης των οχημάτων, ειδικά στις περιπτώσεις που η

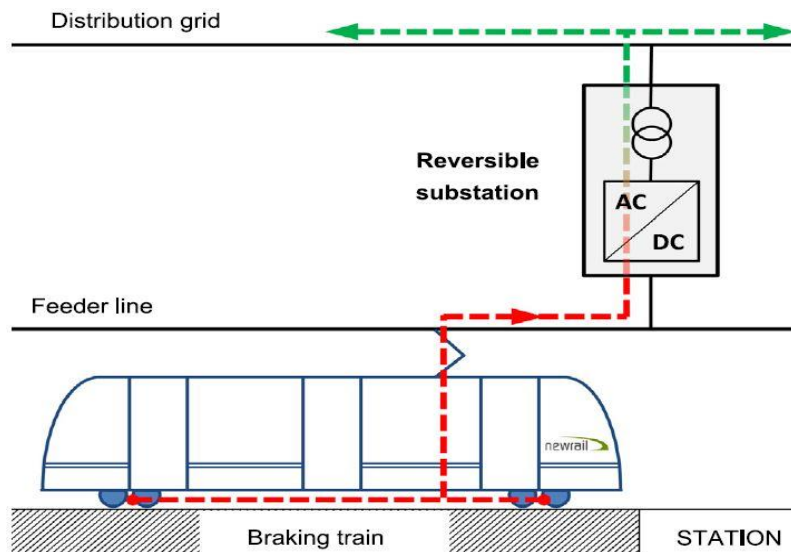
αναγεννητική ενέργεια δε μπορεί να αξιοποιηθεί από άλλα τρένα στο δίκτυο. Το coasting αποτελεί την κατάσταση κίνησης κατά την οποία τα οχήματα πορεύονται στις γραμμές με σβησμένο κινητήρα. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας αποδεσμεύεται από τους τροχούς και, συνεπώς, δεν καταναλώνεται επιπλέον ενέργεια για την κίνηση του τρένου. Ωστόσο, λόγω των διάφορων αντιστάσεων που ασκούνται σε αυτό, το όχημα χάνει σιγά σιγά ταχύτητα. Τα DC σιδηροδρομικά δίκτυα, πλήττονται από σημαντικές απώλειες οι οποίες προκαλούνται από την πέδηση των οχημάτων στις γραμμές. Κατά τη διάρκεια της πέδησης, η ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και καίγεται πάνω στις απορριπτικές αντιστάσεις των οχημάτων εφόσον δε μπορεί να αξιοποιηθεί αλλιώς. Σήμερα, η χρήση απλών ηλεκτρικών συσκευών μπορεί να βοηθήσει σημαντικά την κατάσταση. Αυτές υπολογίζουν το καλύτερο και πιο αποδοτικό προφίλ ταχύτητας για κάθε τρένο, ενώ παράλληλα ενημερώνουν και τους οδηγούς σχετικά με το βέλτιστο δυνατό τρόπο οδήγησης (αναφορικά πάντα με την κατανάλωση ενέργειας). Οι τεχνικές που εφαρμόζονται μπορεί να αφορούν τη διατήρηση σταθερής ταχύτητας ή την αποφυγή αχρείαστων φρεναρισμάτων και απότομων επιταχύνσεων των οχημάτων, καθώς και αρκετά ακόμα σενάρια κίνησης. Αποτελέσματα από μελέτες έχουν δείξει ότι μέσω της οδηγικής αυτής βελτιστοποίησης, μπορεί να σωθεί ποσοστό της τάξης του 25% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας των τρένων.

- **Αποφυγή συγκρούσεων στα δρομολόγια των τρένων:** Τα βελτιωμένα προφίλ ταχύτητας μπορεί να διαταραχθούν λόγω των συγκρούσεων στα δρομολόγια των τρένων που συμβαίνουν κατά μήκος της διαδρομής τους. Οι συγκρούσεις αυτές προκαλούνται στην περίπτωση που υπάρξει καθυστέρηση σε κάποιο από τα προγραμματισμένα δρομολόγια, κι έτσι πιθανότητα συνάντησης δύο συρμών σε κοινό σημείο του δικτύου κατά την πορεία τους προς τον τερματικό σταθμό. Το συγκεκριμένο γεγονός, πυροδοτεί την ανάγκη για συχνά και απότομα φρεναρίσματα των οχημάτων στις γραμμές, που έχουν ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των απωλειών. Σε αυτήν, συνδράμουν και οι συχνές επιταχύνσεις που λαμβάνουν χώρα έτσι ώστε τα τρένα να φτάσουν γρηγορότερα στον προορισμό τους και να αποζημιωθεί ο χρόνος που χάθηκε λόγω των καθυστερήσεων. Οι συγκρούσεις δρομολογίων λοιπόν παρεμποδίζουν σε μεγάλο βαθμό την αποδοτική λειτουργία των οχημάτων, ειδικά στην περίπτωση που αυτά έχουν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις. Οι σημαντικές καθυστερήσεις στα δρομολόγια που βρίσκονται σε εξέλιξη, αποτελούν ένα ακόμα μειονέκτημα του ζητήματος. Ωστόσο, σύγχρονα συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας έχουν τη δυνατότητα να προβλέψουν τις συγκρούσεις που πρόκειται να πραγματοποιηθούν και να υποδείξουν εναλλακτικές διαδρομές που μπορούν να ακολουθήσουν τα τρένα ώστε να τις αποφύγουν. [15]
- **Βελτιστοποίηση χρονοδιαγράμματος δρομολογίων:** Στα σιδηροδρομικά δίκτυα, η κίνηση όλων των τρένων εκτελείται με βάση τα ήδη προγραμματισμένα χρονοδιαγράμματα, ενώ δεν υπάρχει έλεγχος του κάθε οχήματος ξεχωριστά. Για τη βελτίωση της ενεργειακής κατανάλωσης, τα χρονοδιαγράμματα αυτά θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν έτσι ώστε οι περισσότερες διαδικασίες πέδησης, να συμπίπτουν με αντίστοιχες επιταχύνσεις άλλων αμαξοστοιχιών στις γραμμές. Σημαντικό στόχο της στρατηγικής αυτής αποτελεί και ο περιορισμός των πολλών ταυτόχρονων επιταχύνσεων, ο οποίος θα έχει ως αποτέλεσμα τη

μείωση της μέγιστης απαιτούμενης στιγμιαίας ισχύς στο δίκτυο. Έτσι το συνολικό τελικό κόστος που απαιτείται για τη λειτουργία του σιδηροδρομικού συστήματος, θα ελαττωθεί σημαντικά. Ακόμα και στην περίπτωση που στα καινούρια προγραμματισμένα χρονοδιαγράμματα υπάρξουν καθυστερήσεις δρομολογίων, η τελική εξοικονόμηση ενέργειας θα είναι αρκετά υψηλή. Κάπου εδώ, πρέπει να σημειωθεί ότι για την επιτυχή βελτιστοποίηση των χρονοδιαγραμμάτων, απαιτείται η παρουσία ενός συστήματος ελέγχου πραγματικού χρόνου το οποίο, εκτός από το να συμβουλεύει τους οδηγούς για τις ώρες αναχώρησης, θα δίνει και τη δυνατότητα αυτόματου επανυπολογισμού του προγράμματος σε περίπτωση απρόβλεπτων συμβάντων (καθυστερήσεις, ατυχήματα κλπ). Η ανάπτυξη και εφαρμογή μιας τέτοιας τεχνολογίας λογισμικού, απαιτεί σχετικά χαμηλά κόστη επένδυσης, ειδικά σε σύγκριση με άλλες μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας που μπορεί να εφαρμοστούν, όπως για παράδειγμα η ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης στο δίκτυο. Για το λόγο αυτό, η τροποποίηση των χρονοδιαγραμμάτων αποτελεί στρατηγική που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη προτού εκτελεστεί οποιαδήποτε άλλη στο δίκτυο. [6][15]

1.7.2 Ηλεκτρικοί υποσταθμοί διπλής κατεύθυνσης

Στα DC σιδηροδρομικά δίκτυα, οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί συνήθως παρέχουν ρεύμα μόνο προς μία κατεύθυνση, έτσι ώστε να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τα τρένα στις γραμμές. Αυτό συμβαίνει διότι οι συμβατικοί υποσταθμοί διαθέτουν ανορθωτές που επιτρέπουν τη μονόδρομη ροή ισχύος. Αντιθέτως, οι υποσταθμοί διπλής κατεύθυνσης (bidirectional substations), συμπεριλαμβάνουν έναν σύγχρονο μετατροπέα που επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ρεύματος, η λειτουργία του οποίου παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5. Αυτό σημαίνει ότι η πλεονάζουσα ενέργεια που προκύπτει κατά τη διαδικασία της αναγεννητικής πέδησης και δε χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση κάποιου άλλου γειτονικού οχήματος, μπορεί πλέον να επιστραφεί στο δίκτυο του διαχειριστή, είτε στο ίδιο το δίκτυο διανομής. Στην πρώτη περίπτωση, ο διαχειριστής μπορεί να χρησιμοποιήσει την επιστρεφόμενη ενέργεια προς όφελός του, και να τη διαθέσει για λειτουργίες όπως για παράδειγμα ο φωτισμός, η λειτουργία των γραφείων ή των ηλεκτρικών κυλιόμενων σκάλων, καθώς επίσης και για πολλές άλλες εφαρμογές. Στην περίπτωση που η ενέργεια επιστρέφεται στο δίκτυο διανομής, δηλαδή στον κεντρικό πάροχο ενέργειας, στόχος είναι να πουληθεί ώστε να προκύψει κάποιο αντίστοιχο κέρδος για το διαχειριστή. Ωστόσο, η δυνατότητα υλοποίησης του τελευταίου, εξαρτάται από τη νομοθεσία της κάθε χώρας.



Σχήμα 1.5: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας υποσταθμών διπλής κατεύθυνσης σε αστικό σιδηροδρομικό δίκτυο [1]

Παρά το γεγονός ότι κύριο στόχο των υποσταθμών διπλής κατεύθυνσης αποτελεί η μεγιστοποίηση της αναγεννητικής ενέργειας που επιστρέφεται στα εξωτερικά δίκτυα, η λειτουργία τους θα πρέπει να δίνει προτεραιότητα στην ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ των οχημάτων στις γραμμές. Μια επιπλέον χρήσιμη εφαρμογή τους είναι η μείωση του επιπέδου των ανεπιθύμητων αρμονικών στο δίκτυο, διασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο την καλύτερη ποιότητα τροφοδοσίας ισχύος και στις δύο πλευρές του (στην AC και στη DC).

Συγκριτικά με την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης, η χρήση υποσταθμών διπλής κατεύθυνσης μπορεί να θεωρηθεί ως μια πιο αποδοτική μέθοδος καθώς παρουσιάζει λιγότερες απώλειες μετασχηματισμού. Ωστόσο, οι απώλειες αντίστασης μπορεί να είναι σχετικά υψηλές στην περίπτωση που η θέση των υποσταθμών δεν είναι ευνοϊκή. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι των συστημάτων αποθήκευσης είναι ο μειωμένος χώρος που καταλαμβάνουν, οι χαμηλότεροι περιορισμοί ασφαλείας που χρειάζονται και η ηπιότερη συντήρηση που απαιτούν. Επιπλέον, η εγκατάσταση, η συντήρηση και η επισκευή τους, δεν επηρεάζουν τη λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου. Ωστόσο, η εφαρμογή τους δεν ευνοεί την αυτόνομη λειτουργία των οχημάτων, αλλά ούτε και την επίτευξη άλλων στόχων όπως η σταθεροποίηση τάσης και η μείωση της μέγιστης στιγμιαίας ισχύος στο δίκτυο. Τέλος, ένα ακόμα βασικό εμπόδιο της χρήσης ηλεκτρικών υποσταθμών διπλής κατεύθυνσης, αποτελεί το γεγονός ότι η εγκατάστασή τους απαιτεί αρκετά μεγάλο επενδυτικό κόστος. [1]

1.7.3 Συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας

Η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας θεωρείται ως το κύριο εργαλείο για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των αστικών σιδηροδρομικών δικτύων. Η εγκατάστασή τους είτε ως κινητά συστήματα (πάνω στα οχήματα), είτε ως στατικά (στους σταθμούς ή και κατά μήκος των γραμμών του δικτύου) εγγυάται τη μείωση της χρήσης των απορριπτικών φορτίων και,

παράλληλα, την αύξηση της δεκτικότητας του δικτύου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που παρουσιάζουν έναντι των υποσταθμών διπλής κατεύθυνσης είναι το ότι μπορούν να αποθηκεύουν ενέργεια και να την απελευθερώνουν σε μετέπειτα χρονική στιγμή. Συνιστούν πολύ χρήσιμη επιλογή, ειδικά όταν η επιστροφή ισχύος στο δίκτυο διανομής δεν επιφέρει κάποια χρηματική αμοιβή για τον διαχειριστή του σιδηροδρομικού συστήματος.

Οι τεχνολογίες των συστημάτων αποθήκευσης βελτιώνονται συνεχώς, γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη καινούριων ικανοτήτων που μπορούν να προσφέρουν. Επίσης, η γρήγορη και εξαιρετική εξέλιξη των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, καθιστά πλέον τα συστήματα αποθήκευσης ως τη βέλτιστη λύση για αποδοτική αξιοποίηση της ενέργειας που επιστρέφεται στο δίκτυο κατά την πέδηση των οχημάτων. Η ραγδαία αυτή ανάπτυξη συνοδεύεται από σημαντικές βελτιώσεις των χαρακτηριστικών τους οι οποίες αφορούν: υψηλότερες τιμές πυκνοτήτων ισχύος και ενέργειας, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και κόστη, καθώς επίσης και καλύτερη γενική αποδοτικότητα. Υπάρχει μια σειρά από διαφορετικά είδη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και σημαντικές διαφορές στη λειτουργία τους ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Μια πιο εκτενής ανάλυση της λειτουργίας και των χαρακτηριστικών αυτών παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας. [10]

Τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

2.1 Είδη συστημάτων αποθήκευσης

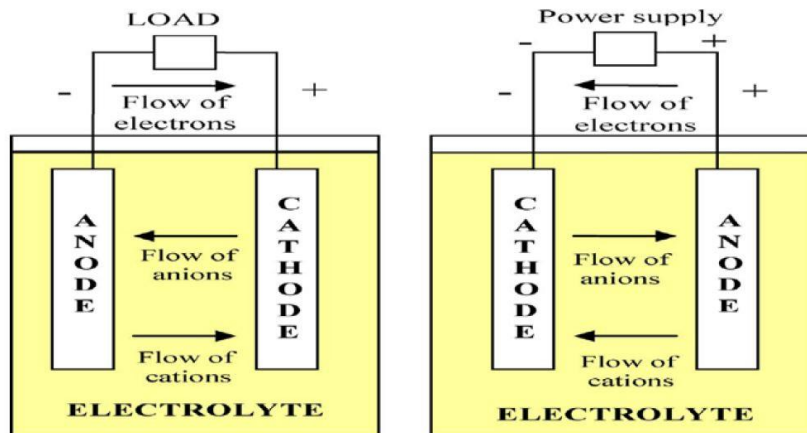
Οι τεχνολογίες συστημάτων για την αποθήκευση ενέργειας αποτελούν εργαλείο μεγάλου ενδιαφέροντος, ιδιαίτερα για τις σιδηροδρομικές εφαρμογές, καθώς μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ευελιξία και την απόδοση των ηλεκτρικών δικτύων. Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από ένα σύστημα δε μπορεί να γίνει ηλεκτρικά αλλά μέσω της μετατροπής της σε μια άλλη μορφή ενέργειας. Στη συνέχεια μπορεί να ξαναμετατραπεί σε ηλεκτρική και να χρησιμοποιηθεί όταν πλέον χρειαστεί. Σήμερα υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης διαθέσιμες στην αγορά οι οποίες, ανάλογα με τον τρόπο που αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μηχανικές, ηλεκτροχημικές, θερμικές κα. [10]

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά διάφορων τεχνολογιών αποθήκευσης οι οποίες είναι κατάλληλες για χρήση σε σιδηροδρομικές εφαρμογές, καθώς επίσης πραγματοποιείται και μια τεχνοοικονομική σύγκριση μεταξύ τους.

2.1.1 Ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές

Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, γνωστοί και ως μπαταρίες, αποτελούν χημικές πηγές ρεύματος που είναι ικανές να αποθηκεύουν και να επιστρέφουν ηλεκτρική ενέργεια προς το δίκτυο μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια, το αρνητικό (άνοδος) και το θετικό (κάθοδος). Αυτά είναι βυθισμένα σε ηλεκτρολύτη και μαζί με αυτόν συνιστούν τα βασικά συστατικά κάθε στοιχείου. Τα συστήματα αποθήκευσης συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, αποτελούνται από ένα ή περισσότερα στοιχεία, συνδεδεμένα παράλληλα ή σε σειρά, αριθμός που εξαρτάται από την επιθυμητή χωρητικότητα και τάση εξόδου που θέλουν να επιτύχουν.

Στο σχήμα 2.1 που ακολουθεί, παρατίθεται σχηματικά η δομή ενός ηλεκτρικού στοιχείου. Το αρνητικό ηλεκτρόδιο ή αλλιώς άνοδος, παρέχει ηλεκτρόνια στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Ακολούθως, το θετικό ηλεκτρόδιο, ή αλλιώς κάθοδος, δέχεται τα ηλεκτρόνια και, κατά συνέπεια, το θετικό του φορτίο μειώνεται κατά τη διάρκεια της αντίδρασης. Ο ηλεκτρολύτης παρέχει το μέσο για την μεταφορά των ηλεκτρονίων μεταξύ ανόδου και καθόδου. Τέλος, για ηλεκτρική μόνωση χρησιμοποιούνται διαχωριστές ανάμεσα στα θετικά και τα αρνητικά ηλεκτρόδια. [9]



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ηλεκτροχημικού στοιχείου [9]

Ανάλογα με την χημική σύστασή τους, οι συσσωρευτές μπορούν να προσφέρουν μεγάλο πλήθος χαρακτηριστικών λειτουργίας για διάφορες εφαρμογές. Μια πιο αναλυτική περιγραφή των σημαντικότερων και πιο υποσχόμενων τεχνολογιών συσσωρευτών για αποθήκευση ενέργειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα παρουσιάζεται στη συνέχεια.

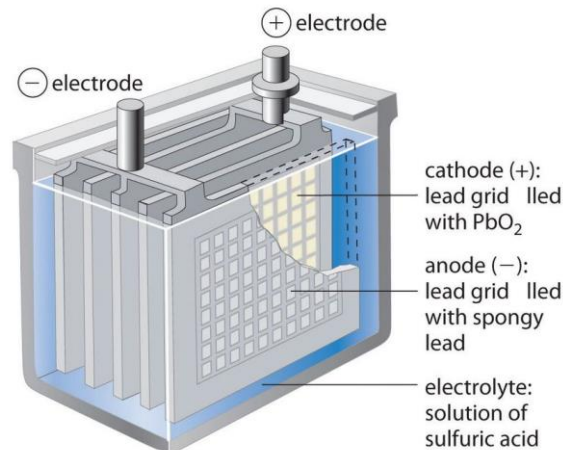
2.1.1.1 Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (lead-acid) αποτελούν την παλαιότερη και ευρύτερα διαδεδομένη τεχνολογία συστημάτων αποθήκευσης. Χρησιμοποιούν διοξείδιο του μολύβδου ως ενεργό θετικό υλικό (κάθοδος), σπογγώδη μόλυβδο ως αρνητικό ενεργό υλικό (άνοδος) και ένα αραιό διάλυμα θεικού οξέος ως ηλεκτρολύτη. Κατά τη διαδικασία εκφόρτισής τους, τα δύο ηλεκτρόδια μετατρέπονται σε θεικό μόλυβδο και ο ηλεκτρολύτης γίνεται κυρίως νερό. [1] Εάν αποφορτιστούν εντελώς ή διατηρηθούν σε κατάσταση εκφόρτισης για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι θεικοί κρύσταλλοι μεγαλώνουν και γίνεται δυσκολότερο να σπάσουν κατά τη λειτουργία επαναφόρτισης. Οι κρύσταλλοι αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου, ελαχιστοποιώντας την ποσότητα του ενεργού υλικού που συμμετέχει στην αντίδραση και συνεπώς την ενεργή επιφάνεια των πλακών, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τη χωρητικότητα του συσσωρευτή. Εάν γίνουν πολύ μεγάλοι, μπορεί να προκαλέσουν μη αναστρέψιμες μηχανικές βλάβες στο πλέγμα των πλακών. [7] Αντίθετα, σε περίπτωση υπερφόρτισής τους, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος πλήττονται από απώλειες νερού λόγω της παραγωγής υδρογόνου στο θετικό ηλεκτρόδιό τους, γεγονός που μπορεί να μετριαστεί με προσθήκη αποσταγμένου νερού. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών αυτών, έχουν σχεδιαστεί εκδόσεις συσσωρευτών που δεν απαιτούν συντήρηση. Αυτές χρησιμοποιούν μια βαλβίδα η οποία και επιτρέπει την επανασύνδεση υδρογόνου-οξυγόνου.[2]

Το συγκεκριμένο είδος συσσωρευτών, χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλά κόσθη, υψηλή αξιοπιστία και αποδοτικότητα, περιορισμένο χρόνο ζωής, χαμηλές ενεργειακές πυκνότητες και σχετικά υψηλές πυκνότητες ισχύος συγκριτικά με άλλα είδη. Επιπλέον χαρακτηριστικό τους, αποτελεί το γεγονός ότι παρουσιάζουν πολύ χαμηλούς δείκτες αυτό-εκφόρτισης. Ωστόσο, υπολειτουργούν όταν βρεθούν σε χαμηλές θερμοκρασίες και συνεπώς για την ορθή εφαρμογή τους

απαιτείται χρήση κάποιου συστήματος θερμικής διαχείρισης. Επίσης, δε μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως και έχουν αρνητικό αντίκτυπο προς το περιβάλλον λόγω της επεξεργασίας του μολύβδου.

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που δεν υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με χαμηλές ενεργειακές πυκνότητες ή μικρό κύκλο ζωής των συσκευών. Όσον αφορά τη χρήση τους στις σιδηροδρομικές εφαρμογές, συνήθως λειτουργούν ως εφεδρικά συστήματα. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες, επικεντρώνονται στην αύξηση των ικανοτήτων ισχύος και ενέργειας αντικαθιστώντας τον μολύβδο με ελαφρύτερα υλικά, όπως για παράδειγμα με άνθρακα ο οποίος μπορεί να επιτρέψει την ευρύτερη χρήση τους στις εν λόγω εφαρμογές. [1]



Σχήμα 2.2: Συσσωρευτής μολύβδου-οξέος [10]

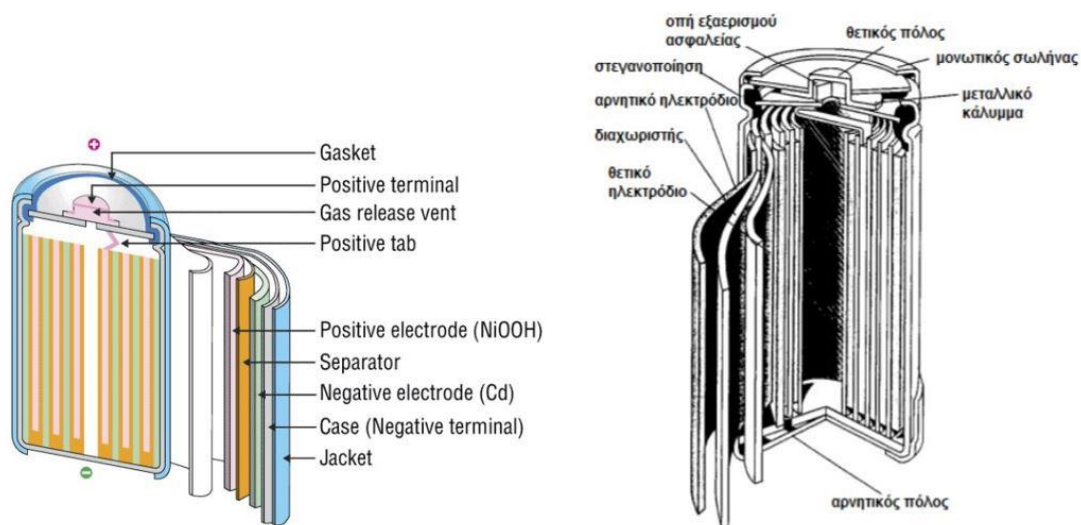
2.1.1.2 Συσσωρευτές νικελίου

Οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες στη συγκεκριμένη κατηγορία είναι οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium) και οι νικελίου-μετάλλου υδριδίου (nickel-metal hydride). Και οι δύο αυτοί τύποι μπαταριών χρησιμοποιούν οξύ-υδροξείδιο του νικελίου ως ενεργό θετικό υλικό και αλκαλικό ηλεκτρολύτη ο οποίος είναι υδροξείδιο του καλίου. [1]

Στους συσσωρευτές νικελίου-καδμίου, το αρνητικό ηλεκτρόδιο αποτελείται από κάδμιο. Κατά τη διαδικασία της εκφόρτισης, το οξύ-υδροξείδιο του νικελίου μεταπίπτει σε υδροξείδιο του νικελίου με τη συμμετοχή νερού, ενώ το κάδμιο οξειδώνεται σε υδροξείδιο του καδμίου. Κατά την φόρτιση συμβαίνει το αντίθετο. Όσον αφορά τους συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου υδριδίου, το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι κατασκευασμένο από ένα μέταλλο το οποίο, εύκολα, απορροφά και αποδίδει υδρογόνο καθώς η μπαταρία φορτίζεται και εκφορτίζεται. Κατά την εκφόρτιση και εδώ, το οξύ-υδροξείδιο του νικελίου μεταπίπτει σε υδροξείδιο του νικελίου. [6]

Γενικότερα, αυτοί οι τύποι συσσωρευτών, χαρακτηρίζονται από υψηλή αξιοπιστία ενώ παράλληλα απαιτούν ελάχιστη συντήρηση. Συγκριτικά με τους μολύβδου-οξέος, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου παρουσιάζουν σημαντικότερες πυκνότητες ισχύος και ενέργειας, και αρκετά μεγαλύτερο χρόνο ζωής. Το κόστος λειτουργίας τους, ωστόσο, είναι αρκετά υψηλότερο και χαρακτηρίζονται πιο μικρές αποδοτικότητες και αυξημένους δείκτες αυτό-εκφόρτισης. Στην πράξη, στις σιδηροδρομικές εφαρμογές, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου εγκαθίστανται κυρίως

ως εφεδρικές λύσεις για τα βοηθητικά συστήματα. [1] Χρησιμοποιούνται για τον φωτισμό και κλιματισμό των βαγονιών, καθώς και σε μηχανισμούς έκτακτης ανάγκης ανοίγματος των θυρών. Τοποθετούνται, επιπλέον, ως εφεδρική πηγή ενέργειας στους σιδηροδρομικούς σταθμούς, καθώς επίσης και σε συστήματα σήμανσης και ελέγχου της σιδηροδρομικής κυκλοφορίας. [8] Πλέον, έχουν αντικατασταθεί από τους συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου υδριδίου, οι οποίοι προσφέρουν υψηλότερες πυκνότητες ισχύος και ενέργειας, παρουσιάζουν μεγαλύτερους χρόνους ζωής, καθώς επίσης είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον (αφού το κάδμιο είναι ένα πολύ τοξικό στοιχείο). Η γρήγορη, λοιπόν, ανάπτυξη των συσσωρευτών αυτών στην αγορά, οφείλεται κυρίως στα περιβαλλοντικά και ενεργειακά πλεονεκτήματά τους έναντι των πρώτων, αλλά και στην εκρηκτική ανάπτυξη των φορητών ηλεκτρονικών συσκευών. Χάρη, στην τεχνολογική αυτή υπεροχή τους, άρχισαν να κατασκευάζονται και σε μεγαλύτερα μεγέθη. Παρόλο που η απόδοσή τους δεν είναι τόσο μεγάλη όσο των πρώτων, το κυριότερο μειονέκτημα που τους χαρακτηρίζει είναι οι πολύ υψηλοί δείκτες αυτό-εκφόρτισης. Το πρόβλημα αυτό μπορεί ωστόσο να μετριαστεί με την εισαγωγή καινοτόμων διαχωριστών, οι οποίοι τοποθετούνται ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο του συσσωρευτή και τις κρατάνε διαχωρισμένες, αποφεύγοντας έτσι ανεπιθύμητα βραχυκυκλώματα ρεύματος. [1]



Σχήμα 2.3: Συσσωρευτής νικελίου-καδμίου και κυλινδρική διάταξη νικελίου-μετάλλου υδριδίου [10][8]

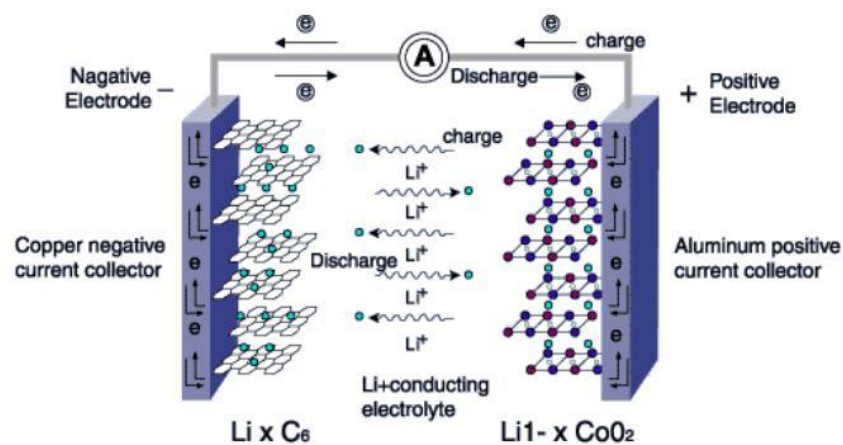
2.1.1.3 Συσσωρευτές λιθίου

Η αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων συσσωρευτών, βασίζεται στη μετακίνηση των ιόντων λιθίου από το αρνητικό ηλεκτρόδιο προς το θετικό κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, και αντίστροφα κατά τη διαδικασία φόρτισης. Η μετακίνηση αυτή γίνεται μέσω του ηλεκτρολύτη και έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ροής ρεύματος. Παρόλο που υπάρχει μια ευρεία ποικιλία υλικών διαθέσιμη για την κατασκευή των εν λόγω συσσωρευτών, οι κυριότεροι από αυτούς είναι οι ιόντων λιθίου (Li-ion) και οι πολυμερών-λιθίου (poly-ion). Η κύρια διαφορά μεταξύ τους είναι

ότι στους δεύτερους, ο ηλεκτρολύτης (ο οποίος αποτελείται από άλατα λιθίου), κρατείται σε ένα στερεό σύνθετο πολυμερές σε αντίθεση με τον οργανικό διαλύτη του πρώτου.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας μπαταριών είναι ότι παρουσιάζουν σχετικά υψηλές πυκνότητες ενέργειας και ισχύος, χαμηλούς δείκτες αυτό-εκφόρτισης, υψηλή αποδοτικότητα και αυξημένους κύκλους ζωής. Παράλληλα, απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή συντήρηση και δεν εμφανίζουν το φαινόμενο «μνήμης». Σοβαρό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι για τη λειτουργία τους χρειάζεται κατάλληλο σύστημα διαχείρισης, ώστε να διατηρούνται τα επίπεδα θερμοκρασίας, τάσης και επιπέδου φόρτισής τους, ανάμεσα σε συγκεκριμένα όρια. Ωστόσο, κυριότερο περιοριστικό παράγοντα χρήσης των μπαταριών λιθίου σε εφαρμογές, αποτελεί το υψηλό τους κόστος. Αυτό πηγάζει από τις ειδικές συσκευασίες προστασίας και τα κυκλώματα ασφαλείας που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία και εγκατάστασή τους. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία συσσωρευτών πολυμερών λιθίου, απαιτεί χαμηλότερο κόστος κατασκευής και χαρακτηρίζεται από ευρύτερη προσαρμοστικότητα όσον αφορά τα σχήματα συσκευασίας τους. Επιπλέον, είναι ελαφρύτεροι και παρουσιάζουν χαμηλότερα ποσοστά κινδύνου ανάφλεξης σε σχέση με τους ιόντων λιθίου. Λειτουργούν, ωστόσο, σε στενότερο εύρος θερμοκρασιών και έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από ότι οι δεύτεροι.

Οι μπαταρίες λιθίου χρησιμοποιούνται ευρέως σε φορητές συσκευές, όπως για παράδειγμα σε φορητούς υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα. Ωστόσο, λόγω της εξαιρετικής προόδου που επιτυγχάνεται όσον αφορά στα ζητήματα πυκνότητας ενέργειας και ισχύος τους, αποτελούν πλέον μια πολύ ελπιδοφόρα επιλογή για χρήση σε εφαρμογές κίνησης, όπως σιδηροδρομικές εφαρμογές, καθώς ακόμη και σε αεροδιαστημικές λειτουργίες. Πρόσφατες έρευνες πάνω στη συγκεκριμένη τεχνολογία, στοχεύουν στην εύρεση νέων ηλεκτροχημικών συνδυασμών και νανοδομών, με σκοπό τη βελτίωση των πυκνοτήτων ενέργειας και ισχύος, της ανθεκτικότητας και ασφάλειας χρήσης τους, καθώς επίσης και την ελάττωση του κόστους τους.[1]

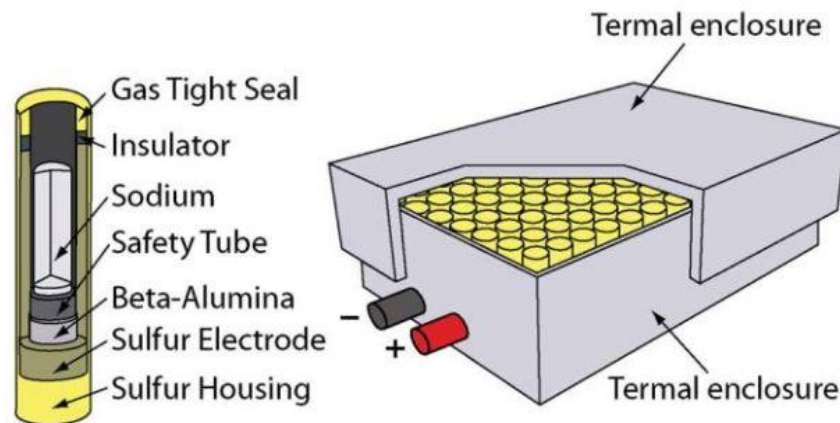


Σχήμα 2.4: Συσσωρευτής ιόντων-λιθίου [10]

2.1.1.4 Συσσωρευτές νατρίου

Η λειτουργία του συγκεκριμένου είδους επαναφορτιζόμενων μπαταριών, στηρίζεται στην μεταφορά των ιόντων νατρίου μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, της ανόδου και της καθόδου. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι είναι οι συσσωρευτές θειούχου νατρίου (sodium-sulphur) και οι νατρίου-χλωριούχου νικελίου (sodium-nickel chloride), γνωστοί και ως συσσωρευτές ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activities). [1]

Οι συσσωρευτές θειούχου νατρίου αποτελούνται από λιωμένο θείο στο θετικό ηλεκτρόδιο και λιωμένο νάτριο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, διαχωρισμένα από ένα στερεό ηλεκτρολύτη οξειδίου του αργιλίου. Ο ηλεκτρολύτης επιτρέπει μόνο στα θετικά ιόντα νατρίου να τον διαπερνάνε και να συνδυάζονται με το θείο σχηματίζοντας πολυσουλφίδια του νατρίου. Κατά την εκφόρτιση, τα θετικά ιόντα νατρίου ρέουν μέσω του ηλεκτρολύτη. Η θερμοκρασία λειτουργίας των συσσωρευτών κυμαίνεται στο εύρος των 300°C-360°C. Επιδεικνύουν υψηλές πυκνότητες ισχύος και ενέργειας (πάνω από τέσσερις φορές μεγαλύτερες από αυτές των μπαταριών μολύβδου-οξέος), υψηλή αποδοτικότητα, θερμοκρασιακή σταθερότητα, μεγάλο κύκλο ζωής, χαμηλό κόστος και ασφάλεια. [2]



Σχήμα 2.5: Συσσωρευτής θειούχου νατρίου [10]

Οι συσσωρευτές Zebra ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται σχετικά πρόσφατα. Λειτουργούν στους 245°C και χρησιμοποιούν τετηγμένο νάτριο ως αρνητικό ηλεκτρόδιο, ενώ το θετικό ηλεκτρόδιο είναι νικέλιο κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και χλωριούχο νικέλιο κατά τη διαδικασία φόρτισης. Αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες χρησιμοποιούν τα τελευταία χρόνια αυτούς τους συσσωρευτές στα ηλεκτρικά οχήματα που κατασκευάζουν. Όταν δε χρησιμοποιούνται συνήθως διατηρούνται σε υψηλές θερμοκρασίες, έτσι ώστε να παραμείνει λιωμένο το νάτριο και να είναι έτοιμο για χρήση. Εάν σταματήσει η λειτουργία τους και αυτό στερεοποιηθεί, τότε η αναθέρμανσή τους διαρκεί περίπου δώδεκα ώρες έως ότου φτάσουν στην επιθυμητή θερμοκρασία τους. [8]

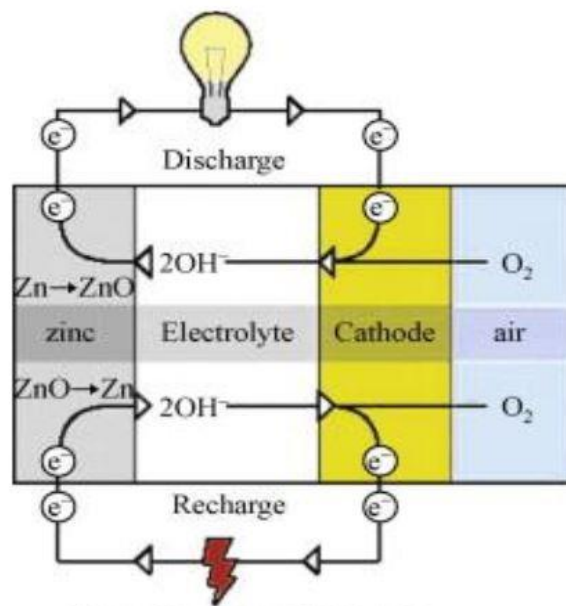
Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για τη λειτουργία των παραπάνω, χρήζει απαραίτητη την ύπαρξη συστημάτων για την εξωτερική θέρμανσή τους, γεγονός που αποτελεί ουσιαστικό μειονέκτημα των συγκεκριμένων συσσωρευτών, και περιορίζει αρκετά τη χρήση τους.

Αυτός είναι και ο λόγος που χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλούς δείκτες αυτό-εκφόρτισης, αφού μέρος της αποθηκευμένης τους ενέργειας χρησιμοποιείται για τη διατήρηση των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας τους. [1]

2.1.1.5 Άλλες αναδιδόμενες τεχνολογίες συσσωρευτών

Ως παράδειγμα άλλων τεχνολογιών που βρίσκονται σήμερα υπό ανάπτυξη με στόχο να γίνουν εμπορικά διαθέσιμες, αξίζει να αναφερθεί η τεχνολογία συσσωρευτών μετάλλου-αέρα (metal-air). [1] Σε αυτές τις μπαταρίες, ως αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) χρησιμοποιούνται συνήθως κατάλληλα μέταλλα, όπως είναι το αλουμίνιο, ο ψευδάργυρος, ο μόλυβδος ή ακόμη και ο σίδηρος, τα οποία τοποθετούνται σε ρευστό ή πολυμερή ενσωματωμένο ηλεκτρολύτη και απελευθερώνουν ηλεκτρόνια κατά την αντίδραση οξειδωσης. Τα ηλεκτρόνια καθώς έλκονται από την κάθοδο (αέρας) και καθώς ρέουν σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, δημιουργούν διαφορά δυναμικού στα άκρα της μπαταρίας. [9]

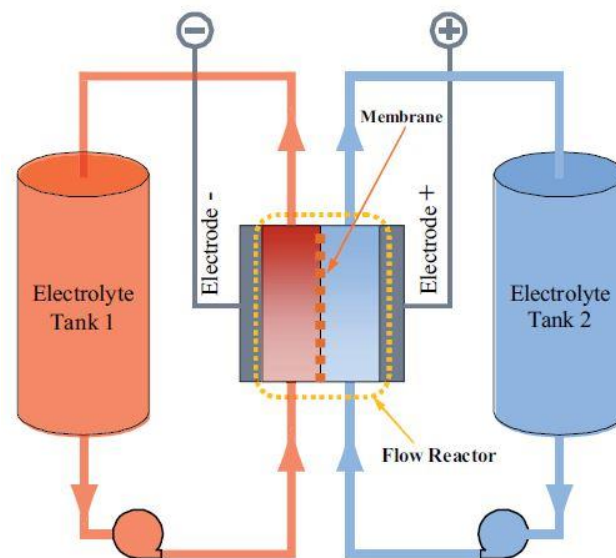
Οι μπαταρίες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλές ενεργειακές πυκνότητες (αρκετά μεγαλύτερες από ότι των συσσωρευτών μολύβδου), καθώς επίσης και από εύλογα κόστη αγοράς και λειτουργίας τους. Ακόμα, είναι φιλικές προς το περιβάλλον, αφού στην κατασκευή τους δεν περιλαμβάνεται κανένα τοξικό υλικό. Για τους παραπάνω λόγους, αποτελούν πολύ καλή επιλογή για μελλοντική χρήση σε πληθώρα εφαρμογών, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές κίνησης. Σημαντικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν αποτελεί η δυσκολία τους να επαναφορτιστούν, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν χαμηλή ενεργειακή απόδοση (της τάξης του 50%), καθώς και το γεγονός ότι το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας τους είναι περιορισμένο. Προκειμένου λοιπόν να επεκταθεί η χρήση τους, απαιτείται πραγματοποίηση εκτεταμένων ερευνών, με στόχο να βελτιωθούν οι χαμηλοί δείκτες απόδοσης που τις χαρακτηρίζουν. [1][9]



Σχήμα 2.6: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μπαταριών μετάλλου-αέρα [10]

Μια επιπλέον πολλά υποσχόμενη τεχνολογία συσσωρευτών αποτελούν οι μπαταρίες ροής (flow batteries). Οι μπαταρίες αυτού του είδους, αποθηκεύουν και αποδεσμεύουν την ενέργεια μέσω μιας αντίστροφης ηλεκτροχημικής αντίδρασης μεταξύ δύο ηλεκτρολυτών. Ο ηλεκτρολύτης αποθηκεύεται σε χωριστές δεξαμενές από τις οποίες ρέει μέσα σε σωλήνες, συγκρατώντας έτσι τη συναρμολόγηση των ηλεκτροδίων της μπαταρίας. Η ηλεκτροχημική απελευθέρωση της ενέργειας εμφανίζεται όταν οι δύο διαφορετικές ενώσεις άλατος (ηλεκτρολύτες) φέρονται κοντά η μία στην άλλη, χωρισμένες από μία ειδική μεμβράνη. Η ροή ρεύματος μέσω της μεμβράνης δημιουργεί διαφορά δυναμικού στα ηλεκτρόδια και κατά συνέπεια, ενέργεια σε ένα εξωτερικό κύκλωμα.[9]

Σημαντικότερο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνολογίας μπαταριών, αποτελεί το γεγονός ότι δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της αυτό-εκφόρτισης, καθώς επίσης και ότι η διάρκεια ζωής τους είναι αρκετά μεγάλη. Ωστόσο, παρά το ότι καθίστανται κατάλληλες για αποθήκευση υψηλών ποσοτήτων ισχύος, εξακολουθούν να απαιτούν υψηλά επενδυτικά κόστη για την αγορά και λειτουργία τους, ενώ παράλληλα χρειάζονται και περαιτέρω τεχνική ανάπτυξη. [1][9]



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα μπαταρίας ροής [2]

2.1.2 Ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος-Υπερπυκνωτές

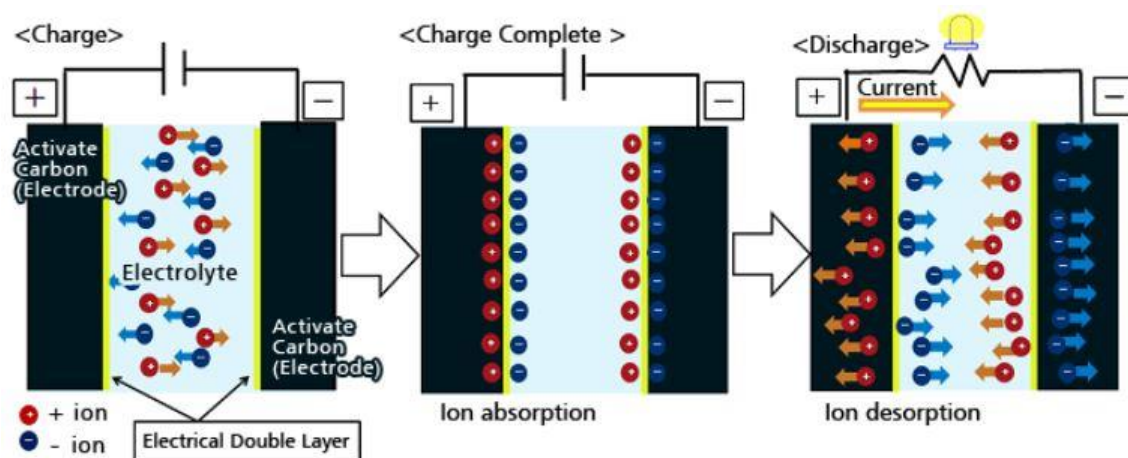
Οι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές διπλού στρώματος (Electrochemical Double Layer Capacitors, EDLC) ή αλλιώς υπερπυκνωτές (Supercapacitors), είναι συσκευές αποθήκευσης οι οποίες λειτουργούν με βάση την ίδια αρχή λειτουργίας των συμβατικών ηλεκτρολυτικών πυκνωτών. Η ενέργεια, δηλαδή, αποθηκεύεται σε ένα ηλεκτροστατικό πεδίο μέσω απλού διαχωρισμού φορτίων και χωρίς να λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις, και δίνεται από τη γνώστη εξίσωση των συμβατικών πυκνωτών: $Q = CV = \frac{A\varepsilon}{d}V$, όπου A είναι το εμβαδόν των πλακών, ε η επιτρεπτότητα του διηλεκτρικού υλικού και d η απόσταση μεταξύ των πλακών. [2]

Οι υπερπυκνωτές χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλη επιφάνεια ηλεκτροδίων, υψηλή διηλεκτρική επιτρεπτότητα και πολύ μικρό διαχωρισμό φορτίου, γεγονός που τους καθιστά

καλύτερους σε σχέση με τους συμβατικούς πυκνωτές σε θέματα πυκνότητας ενέργειας. Λόγω της απουσίας χημικών αντιδράσεων στα ηλεκτρόδια (ιδανικά), παρουσιάζουν πολύ χαμηλή εσωτερική αντίσταση και συνεπώς, υψηλές αποδοτικότητες (γύρω στο 95%). Επιπλέον, εκτελούν ταχύτατες διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης σε υψηλές τιμές ρεύματος, ενώ μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως και να λειτουργήσουν σε πλήθος περιβαλλοντικών συνθηκών. Χαρακτηρίζονται από αρκετά μεγάλο κύκλο ζωής (μέχρι και 10^6 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης) και παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλές πυκνότητες ισχύος. Σημαντικό, επίσης, πλεονέκτημα των συστημάτων υπερπυκνωτών αποτελεί το ότι το επίπεδο φόρτισής τους (State of Charge–SoC) μπορεί να υπολογιστεί αρκετά εύκολα μέσω της τερματικής τάσης των συσκευών, [1] καθώς και το ότι δεν αποτελούνται από κινούμενα μέρη. Συνεπώς, καθίστανται κατάλληλα για χρήση σε σιδηροδρομικές εφαρμογές, είτε ως κινητά συστήματα πάνω στα τρένα (on-board), είτε ως στατικά(stationary), τοποθετημένα σε κάποιο σημείο δίπλα στις γραμμές ή στους σταθμούς του δικτύου. [3]

Μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τους υπερπυκνωτές αποτελούν οι υψηλοί δείκτες αυτο-εκφόρτισης που παρουσιάζουν, φαινόμενο με βάση το οποίο εσωτερικές χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα μειώνουν το αποθηκευμένο σε αυτούς φορτίο, και οι χαμηλές ενεργειακές πυκνότητες. Πρόσφατες μελέτες πάνω στην τεχνολογία των υπερπυκνωτών επικεντρώνονται στη βελτίωση του ποσού ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί, μέσω της ανάπτυξης σύνθετων και νανοδομικών υλικών.[1] Επιπλέον, ο χρόνος ζωής τους επηρεάζεται σημαντικά από τις διακυμάνσεις και τις υψηλές τιμές τάσης στα άκρα τους. Η αποφυγή καταπόνησής τους, μπορεί να επιτευχθεί με τοποθέτηση πολλών στοιχείων υπερπυκνωτών σε σειρά. Το γεγονός όμως αυτό, συνεπάγεται αυξημένο κόστος και όγκο, καθώς επίσης και ανάγκη για μεγαλύτερη συντήρηση των συστημάτων. Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή οφείλει να δοθεί και στο γεγονός ότι εάν οι υπερπυκνωτές εκτεθούν σε σημαντικές υπερτάσεις, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος βλάβης ή ακόμα και καταστροφής τους. [3][4]

Τα χαρακτηριστικά των υπερπυκνωτών, τους καθιστούν την καταλληλότερη επιλογή για αποθήκευση ενέργειας σε σιδηροδρομικές εφαρμογές. Χάρη στη γρήγορη απόκρισή τους μπορεί να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τροφοδότηση ισχύος, εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και σταθεροποίηση τάσης στα δίκτυα. [1]



Σχήμα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση και λειτουργία ιδανικού υπερπυκνωτή [10]

2.1.3 Σφόνδυλοι υπερυψηλής ταχύτητας

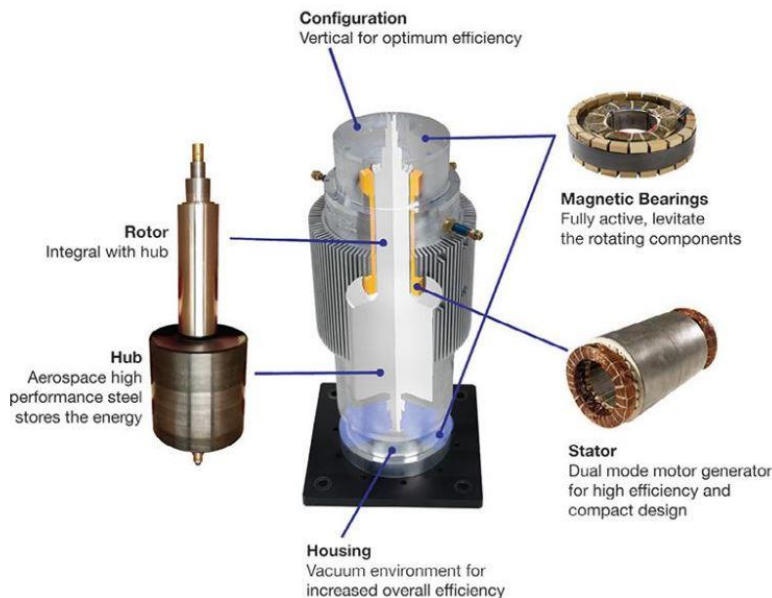
Οι σφόνδυλοι υπερυψηλής ταχύτητας (Flywheels) είναι ηλεκτρομηχανικές συσκευές οι οποίες αποθηκεύουν κινητική ενέργεια σε μία περιστρεφόμενη μάζα που ονομάζεται δρομέας. Χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά για την αποθήκευση της αναγεννητικής ενέργειας που προκαλείται από το φρενάρισμα των τρένων, βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση όλου του δικτύου. Τα βασικά τμήματα από τα οποία αποτελείται ένας σφόνδυλος είναι:

- 1) Ο δρομέας
- 2) Ο άξονας
- 3) Το δοχείο κενού που το περιβάλλει
- 4) Η ηλεκτρική μηχανή

Ο δρομέας του σφονδύλου συνδέεται με μια ηλεκτρική μηχανή, η οποία λειτουργεί είτε ως κινητήρας για τη λειτουργία φόρτισης, είτε ως γεννήτρια για την εκφόρτιση της συσκευής. Παρά το γεγονός ότι τα πρώτα συστήματα χρησιμοποιούσαν πολύ μεγάλες μεταλλικές μάζες δρομέα, η νέα γενιά σφονδύλων χρησιμοποιεί σύνθετα υλικά τα οποία ενώ μειώνουν την αδράνεια του δρομέα, επιτρέπουν τη σημαντική αύξηση της γωνιακής του ταχύτητας. Η κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται είναι ανάλογη της ροπής αδράνειας και του τετραγώνου της γωνιακής ταχύτητας και δίνεται από τη σχέση: $E_k = \frac{1}{2} I \omega^2$. Η παραπάνω εξίσωση υποδηλώνει ότι η αύξηση της γωνιακής ταχύτητας του σφονδύλου είναι το κλειδί για την αύξηση της χωρητικότητάς του αλλά και τη μείωση του βάρους του. Παρά το γεγονός ότι υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σφόνδυλο, υπάρχει ένα όριο πέρα από το οποίο η εφελκυστική αντοχή του υλικού δε μπορεί να αντέξει την παραμόρφωση που προκαλεί η φυγόκεντρος δύναμη.

Σημαντικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι ότι παρουσιάζουν μεγάλες πυκνότητες ισχύος και ενέργειας, υψηλές αποδόσεις και χρόνο ζωής. Επιπλέον, η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία και δεν υπάρχουν ανησυχίες για τοξικές χημικές διαδικασίες όπως στις μπαταρίες, γεγονός που τους καθιστά φιλικούς προς το περιβάλλον. Η αποθήκευση ενέργειας σε σφονδύλους είναι αξιόπιστη γιατί ελέγχεται απόλυτα, ενώ η κατάσταση φόρτισής τους μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια μέσω μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής. Τα παραπάνω καθιστούν τους σφονδύλους κατάλληλους για χρήση σε σιδηροδρομικές εφαρμογές.

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, υπάρχουν ακόμη ορισμένα πολύ σημαντικά μειονεκτήματα. Η μεγαλύτερη δυσκολία στην εφαρμογή ενός ενεργειακού συστήματος σφονδύλων είναι ο σοβαρός κίνδυνος έκρηξης του εάν αυτό εκτεθεί σε υπερτάσεις. Συνεπώς, ο εξοπλισμός θα πρέπει να τοποθετηθεί σε ειδικό προστατευτικό δοχείο, γεγονός που προσθέτει επιπλέον βάρος και έξοδα για τον διαχειριστή του δικτύου. Το σοβαρό θέμα της ασφάλειας, αποτελεί και τον μεγαλύτερο ανασταλτικό παράγοντα για την εγκατάσταση και λειτουργία τέτοιου είδους συστημάτων στις σιδηροδρομικές εφαρμογές. Επιπλέον σημαντικό πρόβλημα που παρουσιάζουν, αποτελεί το γεγονός ότι χαρακτηρίζονται από υψηλούς δείκτες αυτό-εκφόρτισης. Γενικά, η τεχνολογία των σφονδύλων υπερυψηλής ταχύτητας βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο.[1]



Σχήμα 2.9: Σφόνδυλος υπερυψηλής ταχύτητας [10]

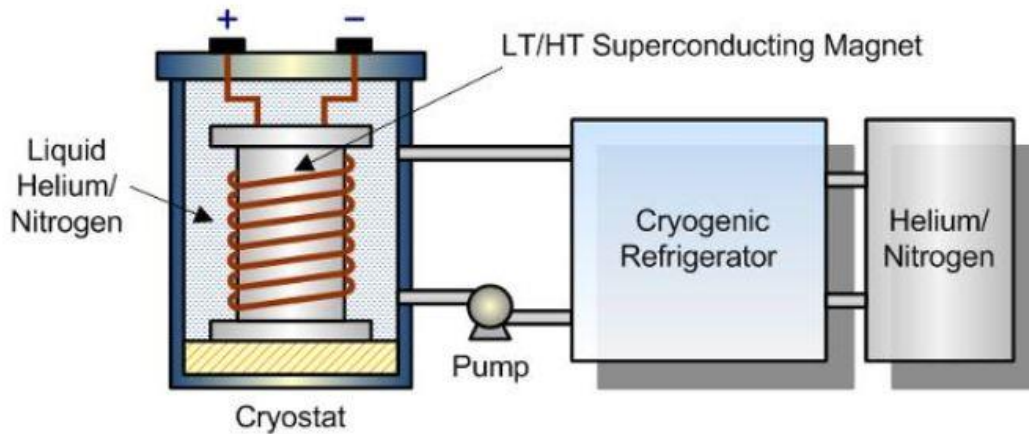
2.1.4 Υπεραγωγίμα μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Τα υπεραγωγίμα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) επιτρέπουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από τη ροή συνεχούς ρεύματος μέσα σε πηνίο. Τα χαρακτηριστικά της διάταξης ενός υπεραγωγίμου πηνίου είναι τέτοια ώστε να εμφανίζουν σχεδόν μηδενική αντίσταση στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην επ' άοριστο ροή του ρεύματος (σχεδόν χωρίς απώλειες) μέσα στα καλώδια του συστήματος, τα οποία και είναι συνήθως φτιαγμένα από νιόβιο-τιτάνιο (NbTi). Όπως και οι υπόλοιπες τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης, έτσι και αυτή, απαιτεί την ύπαρξη ενός ειδικού συστήματος μετατροπής ισχύος το οποίο θα ρυθμίζει τη ροή ισχύος προς και από το σύστημα.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τα υπεραγωγίμα μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης, είναι η υψηλή ενεργειακή απόδοσή τους και οι ταχύτατοι χρόνοι απόκρισης κατά τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης. [1] Η ισχύς διατίθεται σχεδόν στιγμιαία ενώ η παροχή πολύ υψηλών ποσών ισχύος διατίθεται για σύντομη χρονική περίοδο. Ακόμα, η συχνή φόρτιση και εκφόρτισή τους δεν προκαλεί καμία επίδραση στη διάρκεια ζωής τους. Αντίθετα, τα συστήματα αυτά έχουν μεγάλο κύκλο ζωής και μπορούν να αποφορτιστούν πλήρως.[9]

Ωστόσο, παρουσιάζουν και ορισμένα σοβαρά μειονεκτήματα που προκαλούν δισταγμό ως προς τη χρήση τους σε εφαρμογές. Ανάμεσα σε αυτά είναι το υψηλό κόστος για την αγορά και εγκατάστασή τους, το οποίο και προκύπτει κατά κύριο λόγο από την ανάγκη ύπαρξης κατάλληλου συστήματος ψύξης για την ασφαλή λειτουργία τους. Επιπλέον, η αστάθεια που εμφανίζουν, η οποία προκαλείται λόγω του δημιουργούμενου ισχυρού μαγνητικού πεδίου, καθώς επίσης και οι έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που αυτά μπορεί να προκαλέσουν, αποτελούν επίσης σημαντικά προβλήματα των συγκεκριμένων τεχνολογιών.

Τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές προκειμένου να εξασφαλιστεί σταθερότητα στα δίκτυα. Ωστόσο, τα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν, τα καθιστούν ενδεχομένως κατάλληλα για τις σιδηροδρομικές εφαρμογές, ειδικά στην περίπτωση χρήσης τους ως στατικά συστήματα αποθήκευσης. [1]



Σχήμα 2.10: Υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας [10]

2.2 Τεχνοοικονομική σύγκριση διατάξεων αποθήκευσης ενέργειας για χρήση σε σιδηροδρομικές εφαρμογές

Προκειμένου να γίνει σύγκριση και αξιολόγηση των προαναφερθέντων συστημάτων αποθήκευσης, ένα από τα σημαντικότερα κριτήρια που θα πρέπει αρχικά να ληφθεί υπόψη είναι η «τεχνική ωριμότητα» των τεχνολογιών. Σύμφωνα με αυτή, οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος αποτελούν μια ευρέως καθιερωμένη τεχνολογία, η οποία και χρησιμοποιείται σε πλήθος ενεργών εφαρμογών για πάνω από εκατό χρόνια. Αντίστοιχα, οι συσσωρευτές με βάση το νικέλιο, το λίθιο και το νάτριο, μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως πολυχρησιμοποιημένες και απολύτως καθιερωμένες τεχνολογίες στη σημερινή αγορά. Όσον αφορά τους σφονδύλους υπερυψηλής ταχύτητας και τους υπερπυκνωτές, η λειτουργία τους μέχρι και σήμερα βασίζεται σε πολύ γνωστές τεχνολογίες. Συνεπώς, παρά τις σημαντικές βελτιώσεις και την ραγδαία ανάπτυξη που σημειώθηκε τα τελευταία χρόνια, οι συσκευές χαρακτηρίζονται από τεχνική ωριμότητα. Αντιθέτως, η χρήση των υπεραγώγιμων μαγνητικών συστημάτων σε πραγματικές εφαρμογές, δεν έχει επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό, ενώ η τεχνολογία των μπαταριών ροής καθώς και των αντίστοιχων μετάλλου-αέρα, θεωρείται πρώιμη και βρίσκεται ακόμα υπό ανάπτυξη. Συνεπώς, απαιτείται περισσότερη έρευνα για την αποτελεσματική χρήση τους σε εφαρμογές κίνησης.

Οι πυκνότητες ενέργειας και ισχύος που χαρακτηρίζουν κάθε σύστημα αποθήκευσης, αποτελούν επίσης σημαντικούς παράγοντες για τις σιδηροδρομικές εφαρμογές. Ειδικότερα στην περίπτωση των κινητών εφαρμογών, όπου το βάρος και ο χώρος που καταλαμβάνουν τα συστήματα είναι κρίσιμης σημασίας, οι παράμετροι αυτοί παίζουν ιδιαίτερο ρόλο για την τελική επιλογή των συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν. Πιο αναλυτικά, οι μπαταρίες παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές ενεργειακής χωρητικότητας ανά μονάδα όγκου συγκριτικά με τις υπόλοιπες

διατάξεις. Μεταξύ αυτών, οι λιθίου είναι εκείνες που προσφέρουν το μεγαλύτερο ενεργειακό εύρος, ακολουθούμενες από τις νατρίου. Οι πρώτες όμως, είναι πιο συμπαγείς και παρουσιάζουν υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου, γεγονός που τις καθιστά και πιο κατάλληλες για χρήση σε κινητές σιδηροδρομικές εφαρμογές. Ωστόσο, η πυκνότητα ισχύος που προσφέρουν οι μπαταρίες είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αντίστοιχη των σφονδύλων, των υπερπυκνωτών και των υπεραγωγίων μαγνητικών συστημάτων. Από αυτά, οι σφόνδυλοι και οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν υψηλότερες πυκνότητες ισχύος συγκριτικά με τα υπεραγώγιμα συστήματα, με τους σφονδύλους να είναι πιο συμπαγείς και συνεπώς να χαρακτηρίζονται από ελαφρώς μεγαλύτερες ενεργειακές ικανότητες.

Όσον αφορά το χρόνο απόκρισης, οι μπαταρίες βρίσκονται σε μειονεκτική θέση συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνολογίες οι οποίες επιτρέπουν πολύ γρήγορες εκτελέσεις των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα, παρουσιάζουν τους μικρότερους χρόνους απόκρισης αφού είναι και η μοναδική τεχνολογία που επιτρέπει την απευθείας αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Το γεγονός αυτό, είναι ιδιαίτερο χρήσιμο σε εφαρμογές σταθεροποίησης τάσης και ψαλιδισμού των αιχμών ισχύος στο δίκτυο.

Η αποδοτικότητα και ο δείκτης αυτό-εκφόρτισης κάθε συστήματος, είναι επίσης δύο σημαντικές παράμετροι που οφείλουν να λαμβάνονται υπόψη σε κάθε αξιολόγηση, δεδομένου ότι έχουν ισχυρή επίδραση στα τελικά συνολικά κόστη κάθε εφαρμογής. Χαμηλά ποσοστά απόδοσης σε συνδυασμό με υψηλούς δείκτες αυτό-εκφόρτισης, συνεπάγονται μείωση της ικανότητας χρησιμοποίησης της αποθηκευμένης ενέργειας και, συνεπώς, αυξημένα έξοδα για τον διαχειριστή του δικτύου. Όσον αφορά την απόδοση, υψηλότερες τιμές παρουσιάζουν οι μπαταρίες λιθίου, οι σφόνδυλοι, οι υπερπυκνωτές και τα υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα, με τιμές που αγγίζουν το 95% ή και παραπάνω. Αντίστοιχα, οι μικρότεροι δείκτες αυτό-εκφόρτισης, εμφανίζονται στους συσσωρευτές (με εξαίρεση τους συσσωρευτές νατρίου) ενώ οι μεγαλύτεροι στους σφονδύλους, οι οποίοι μπορεί να αποφορτιστούν πλήρως ακόμα και στο διάστημα μίας ημέρας. Ωστόσο, δεδομένου ότι στις σιδηροδρομικές εφαρμογές απαιτείται η ικανότητα γρήγορης εκτέλεσης των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης από τα συστήματα, οι υψηλοί δείκτες αυτό-εκφόρτισης συνήθως δε δημιουργούν σοβαρά προβλήματα.

Η ανθεκτικότητα των συστημάτων αποτελεί επίσης βασική παράμετρο που πρέπει να ληφθεί υπόψη, αφού συνδέεται άμεσα με το τελικό κόστος της επένδυσης. Αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, κυρίως για τις αστικές σιδηροδρομικές εφαρμογές όπου ο απαιτούμενος αριθμός εκτελέσεων φόρτισης και εκφόρτισης των συσκευών είναι αρκετά μεγάλος. Συνεπώς, τα καταλληλότερα συστήματα θα είναι και αυτά που χαρακτηρίζονται από τη μεγαλύτερη αντοχή. Οι συσσωρευτές χαρακτηρίζονται από σημαντικά χαμηλότερους κύκλους ζωής σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις, οι οποίες παρουσιάζουν δείκτες της τάξης αρκετών εκατοντάδων χιλιάδων κύκλων. Παρ' όλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί ότι οι σύγχρονες μπαταρίες ιόντων λιθίου μπορούν να προσφέρουν πλέον μέχρι και 10.000 κύκλους ζωής.

Τέλος, για τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών αποθήκευσης, δε γίνεται να αγνοηθούν τα κόστη κεφαλαίου, μέσα στα οποία μπορούν να συμπεριλαμβάνονται και τα κόστη λειτουργίας, συντήρησης και αντικατάστασης των συστημάτων. Οι μπαταρίες, και ιδιαίτερα οι μπαταρίες λιθίου, αποτελούν την οικονομικότερη λύση όσον αφορά τα κόστη ανά kWh αποθηκευμένης

ενέργειας. Ωστόσο, δεν αποτελούν την καλύτερη επιλογή όταν αυτά υπολογίζονται με βάση την αποθηκευμένη ισχύ, αφού παρουσιάζουν μεγαλύτερες δαπάνες συγκριτικά με τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Όπως προαναφέρθηκε, η διάρκεια ζωής των συσκευών αποτελεί σημαντικό παράγοντα που οφείλει να συμπεριληφθεί για την ακριβέστερη αξιολόγηση των εξόδων. Με βάση λοιπόν τη διάρκεια ζωής τους, έχει αποδειχθεί ότι οι μπαταρίες αποτελούν την πιο δαπανηρή επιλογή στην αγορά, σε σχέση με άλλα συστήματα αποθήκευσης. [1]

Λειτουργία συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στις σιδηροδρομικές εφαρμογές

3.1 Ρόλος και χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Η ραγδαία ανάπτυξη των συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (ESS-Energy Storage Systems), σε συνδυασμό με αυτή των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, τα καθιστά πλέον ως εξαιρετική επιλογή για αξιοποίηση της ενέργειας η οποία επιστρέφεται στο δίκτυο κατά την αναγεννητική πέδηση των οχημάτων. [1] Πιο συγκεκριμένα, στις σιδηροδρομικές εφαρμογές, οι διαχειριστές επιλέγουν την εγκατάστασή τους για την ικανοποίηση κάποιου από τους παρακάτω σκοπούς:

- 1) Μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στο δίκτυο. Το σύστημα αποθήκευσης αποθηκεύει την τροφοδοτούμενη προς το δίκτυο ενέργεια από την πέδηση των τρένων, και επιτρέπει την παροχή της προς αυτό κατά την επιτάχυνσή τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όχι μόνο τη μείωση του ενεργειακού κόστους, αλλά και τη μείωση του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα προς την ατμόσφαιρα.
- 2) Μείωση της απαιτούμενης ισχύος κατά τις ώρες αιχμής. Στη Νότια Αμερική και στην Ευρώπη, οι επιχειρήσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εκτός από τις κανονικές χρεώσεις που επιβάλλουν στους πελάτες, τους επιβαρύνουν με επιπλέον χρεώσεις για την κατανάλωση ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής. Το γεγονός αυτό, έχει δημιουργήσει την ανάγκη για περιορισμό της απαιτούμενης ισχύος κατά τα εν λόγω χρονικά διαστήματα. [3]
- 3) Σταθεροποίηση τάσης στην είσοδο των τρένων και στις γραμμές του δικτύου γενικότερα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών και της καταπόνησης στο δίκτυο, που προκύπτουν λόγω των ισχυρών διακυμάνσεων της τάσης. [5]

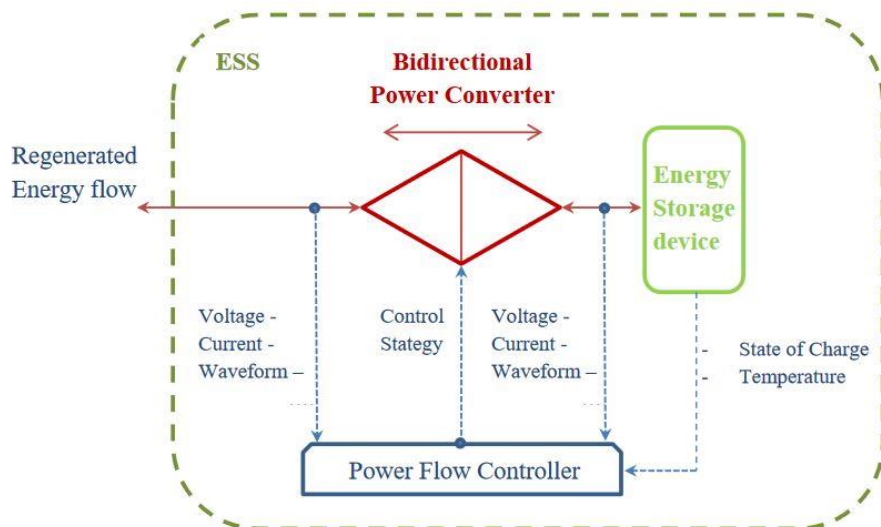
Γενικότερα, δύο παράγοντες χαρακτηρίζουν τη λειτουργία κάθε συστήματος αποθήκευσης. Ο πρώτος αφορά το ποσό ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν, και ο δεύτερος το ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια αυτή μπορεί να τροφοδοτηθεί προς και από το σύστημα. Το τελευταίο εξαρτάται κυρίως από το πόσο γρήγορα μπορεί να εκτελεστεί η μετατροπή ισχύος από τον ηλεκτρικό μετατροπέα, καθώς επίσης και από το χρόνο απόκρισης του ίδιου του συστήματος. [4] Οι συσκευές αποθήκευσης, μπορούν να είναι είτε κινητές (on-board), δηλαδή να εγκατασταθούν πάνω στα οχήματα, είτε στατικές (stationary), δηλαδή να τοποθετηθούν δίπλα στις γραμμές των τρένων ή και σε κάποιον υποσταθμό του δικτύου. Ένα κινητό σύστημα αποθηκεύει την παραγόμενη κατά την πέδηση ενέργεια του ίδιου του τρένου στο οποίο είναι τοποθετημένο, επαναχρησιμοποιώντας την στην επόμενη επιτάχυνσή του. Αντιθέτως, τα στατικά συστήματα

έχουν τη δυνατότητα να απορροφήσουν ενέργεια από διάφορα τρένα που επιβραδύνουν στο δίκτυο και να την επιστρέψουν όταν κάποιο από αυτά τη χρειαστεί. [1]

3.2 Τυπική διάταξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Ανεξάρτητα από τη χρήση τους, όλα τα συστήματα αποθήκευσης αποτελούνται από τρία σημαντικά τμήματα τα οποία και εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες:

- 1) Την ίδια τη συσκευή αποθήκευσης.
- 2) Έναν μετατροπέα ηλεκτρικής ισχύος ο οποίος ρυθμίζει τη ροή ενέργειας στους ακροδέκτες του συστήματος και εγγυάται τη σωστή λειτουργία της. Τα συστήματα αποθήκευσης λειτουργούν συνήθως σε διαφορετικές τιμές εισόδου και εξόδου σε σχέση με τα σιδηροδρομικά δίκτυα, και αυτός είναι και ο λόγος που χρειάζονται συστήματα μετατροπής ισχύος για τη λειτουργία τους. Οι μετατροπείς ισχύος, λοιπόν, αποτελούνται από ηλεκτρονικές συσκευές που προσαρμόζουν τα χαρακτηριστικά του φορτίου (ρεύμα, τάση κλπ), στις συνθήκες λειτουργίας κάθε συστήματος αποθήκευσης. Οφείλουν επίσης να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος και βάρος, ειδικά στις κινητές εφαρμογές στις οποίες τα συστήματα αποθήκευσης τοποθετούνται πάνω στα κινούμενα οχήματα.
- 3) Έναν ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης της συσκευής. Ανεξάρτητα από την τεχνολογία που έχει επιλεγεί, οι ελεγκτές ροής ισχύος είναι απαραίτητοι για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων αποθήκευσης. Αυτοί οφείλουν να διαχειρίζονται τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης των συσκευών σύμφωνα με διάφορες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα το επίπεδο φόρτισής τους και τη μετρούμενη στους ακροδέκτες τους τάση. [1]



Σχήμα 3.1: Δομή τυπικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας [10]

3.3 Απαιτούμενα χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης

Η επιλογή των συστημάτων αποθήκευσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κάποια εφαρμογή, εξαρτάται, συνήθως, από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εφαρμογής αυτής. Οι τιμές ισχύος και ενέργειας, ο χρόνος απόκρισης, το βάρος και ο όγκος των συστημάτων αποτελούν τις παραμέτρους με βάση τις οποίες γίνεται επιλογή των συστημάτων αποθήκευσης που θα χρησιμοποιηθούν. Σημαντικό ρόλο έχει επίσης και ο περιορισμός που προκύπτει λόγω των θερμοκρασιακών συνθηκών κάτω από τις οποίες θα πρέπει αυτές να μπορούν να λειτουργούν. [2] Υπάρχουν, ωστόσο, και κάποια κοινά χαρακτηριστικά που κάθε σύστημα αποθήκευσης οφείλει να έχει προκειμένου να θεωρείται κατάλληλο για χρήση στις σιδηροδρομικές εφαρμογές. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Μεγάλος αριθμός κύκλων ζωής (συνήθως ανάμεσα σε 100.000–300.000 κύκλους ανά χρόνο, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου)
- Δυνατότητα παροχής και απορρόφησης υψηλών αιχμών ισχύος (τυπικά μεταξύ 0.1 – 10 MW ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου και με το εάν το σύστημα χρησιμοποιείται σε κινητές ή στατικές εφαρμογές)
- Μεσαίες ενεργειακές χωρητικότητες (στις κινητές εφαρμογές ωστόσο, οι χωρητικότητες που απαιτούνται είναι υψηλές)
- Όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος και όγκο, ειδικότερα όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε κινητές εφαρμογές [1]

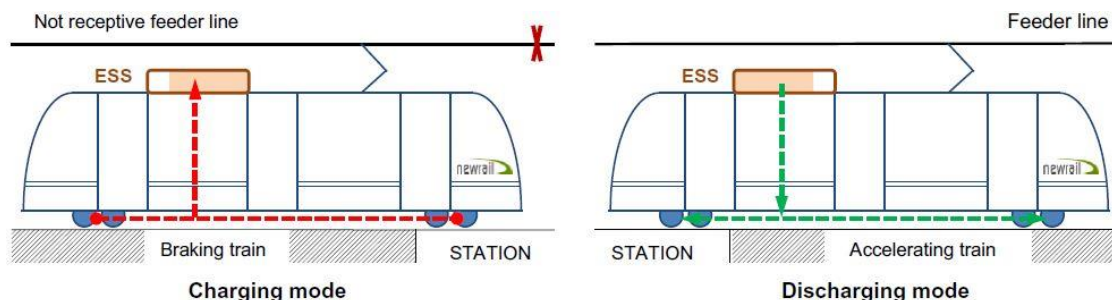
3.4 Κινητές σιδηροδρομικές εφαρμογές

3.4.1 Κινητά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Τα κινητά συστήματα τοποθετούνται πάνω στα οχήματα και επιτρέπουν την αποθήκευση ενέργειας των ίδιων των τρένων κατά την πέδησή τους, επαναχρησιμοποιώντας την στην επόμενη επιτάχυνσή τους. Τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η εγκατάστασή τους απαριθμούνται παρακάτω:

- Περιορισμός των υψηλών απαιτήσεων ισχύος που παρουσιάζονται στις γραμμές του δικτύου κατά την επιτάχυνση των τρένων, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του ενεργειακού κόστους και των ωμικών απωλειών.
- Περιορισμός των πτώσεων τάσης στο δίκτυο που μπορεί ενδεχομένως να επιτρέψει την εφαρμογή πυκνότερων δρομολογίων στις γραμμές χωρίς επιπλέον μεταβολές στην υποδομή του συστήματος.
- Ορισμένη αυτονομία λειτουργίας των οχημάτων η οποία μπορεί να είναι απαραίτητη σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα κατά την κίνησή τους μέσα σε κάποιο μεγάλο τούνελ όπου η τροφοδότηση από το δίκτυο δεν είναι δυνατή, ή ακόμη και κατά τη διαδρομή τους διαμέσου κάποιου ιστορικού χώρου που υπάρχουν οπτικοί περιορισμοί σχετικά με τις γραμμές τροφοδότησης.

Συγκριτικά με τη χρήση στατικών συστημάτων αποθήκευσης, τα κινητά παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποδοτικότητες λόγω της απουσίας των απωλειών των γραμμών. Επιπροσθέτως, η λειτουργία των συσκευών αυτών και η διαχείριση της ανακτώμενης ενέργειας, είναι αρκετά πιο απλές αφού ο έλεγχός τους είναι ανεξάρτητος από άλλους παράγοντες όπως η κίνηση των τρένων πάνω στις γραμμές. Σημαντικό, ωστόσο, μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι για την τοποθέτησή τους πάνω σε κάποιο όχημα απαιτείται αρκετός διαθέσιμος χώρος, ενώ και η ίδια η εγκατάσταση εισάγει επιπλέον βάρος σε αυτό. Μελέτες έχουν δείξει ότι το επιπρόσθετο αυτό βάρος, προκαλεί αύξηση των ενεργειακών καταναλώσεων του συρμού κατά ποσοστό περίπου ίσο με 1-2 %. Λόγω των παραπάνω περιορισμών, η εγκατάσταση κινητών συσκευών αποθήκευσης σε ήδη υπάρχουσες αμαξοστοιχίες, δεν προτιμάται. Συνίσταται, αντιθέτως, στην περίπτωση που πρόκειται να υλοποιηθεί σχεδίαση καινούριων οχημάτων. Για τη διαστασιολόγηση των συστημάτων αυτών, οφείλουν να πραγματοποιηθούν λεπτομερείς μελέτες ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Τυχόν υπερδιαστασιολόγηση οδηγεί σε ανεπιθύμητη αύξηση της μάζας των τρένων, ενώ το αντίθετο σε αδυναμία διόρθωσης των προβλημάτων που χρήζουν αντιμετώπισης. Ανάλογα λοιπόν με τους στόχους που θέλει να επιτύχει ο κάθε διαχειριστής, η διαδικασία επιλογής μεγέθους των συστημάτων αλλάζει. Επισημαίνεται επίσης, ότι αντίστοιχες μελέτες οφείλουν να πραγματοποιηθούν και για τον έλεγχο λειτουργίας τους κατά την κίνηση των τρένων στο δίκτυο.[1]



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας κινητού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε σιδηροδρομική εφαρμογή [1]

3.4.2 Διαστασιολόγηση και έλεγχος λειτουργίας

Ένα σύστημα αποθήκευσης αποτελείται από πολλά στοιχεία υπερπυκνωτών τα οποία μπορεί να είναι συνδεδεμένα είτε σε σειρά, είτε παράλληλα, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η επιθυμητή τιμή τάσης και χωρητικότητας. Για την εύρεση του κατάλληλου μεγέθους, θα πρέπει να υπολογιστεί η μέγιστη κινητική ενέργεια η οποία προκύπτει κατά την πέδησή του τρένου στις γραμμές. Το σύστημα θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να απορροφήσει, και στη συνέχεια να επιστρέψει όλη αυτή την ενέργεια. Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι παρά το γεγονός ότι η μεταβολή της κινητικής ενέργειας ενός οχήματος είναι ίδια κατά την επιτάχυνση και επιβράδυνσή του, η ηλεκτρική ενέργεια που περιλαμβάνεται στις διαδικασίες μετατροπής, είναι προφανώς διαφορετική λόγω των διαφορετικών απωλειών που εμπλέκονται στις διαδικασίες. Επομένως, το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης που αναφέρεται στα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επιτάχυνση του οχήματος, θα είναι μεγαλύτερο από ότι στην περίπτωση που

αυτό υπολογίζεται με βάση την επιβράδυνσή του. Ωστόσο, λόγω του ότι το μέγεθος της συσκευής για τις κινητές εφαρμογές, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, επιλέγεται συνήθως η διαστασιολόγηση με βάση την επιβράδυνση.

Κάθε τρένο είναι εξοπλισμένο με το δικό του σύστημα αποθήκευσης και, συνεπώς, η διαστασιολόγηση υπολογίζεται ανάλογα με τη δική του ξεχωριστή μάζα και μέγιστη ταχύτητα. Στην περίπτωση που κάθε βαγόνι διαθέτει και από ένα σύστημα, τότε το μέγεθος κάθε εγκατεστημένης συσκευής υπολογίζεται ανάλογα με τη μάζα του βαγονιού και τη μέγιστη ταχύτητα του τρένου. Για τον υπολογισμό της πραγματικής διαθέσιμης ενέργειας για αποθήκευση, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μέσες αποδόσεις των μηχανικών και ηλεκτρικών συστημάτων. Επομένως, αναφορικά με ένα τρένο, η μέγιστη κινητική ενέργεια που μπορεί να ανακτηθεί από την αναγεννητική πέδηση, και συνεπώς να αποθηκευτεί στο σύστημα αποθήκευσης, υπολογίζεται από την εξίσωση (3.1).

$$E_{SC,max} = n_{mech}n_{em}n_{inv}n_{dc/dc}n_{SC} \frac{1}{2} (m_t + m_{SC})v_{t,max}^2 \quad (3.1)$$

Όπου n_{mech} , n_{em} , n_{inv} , $n_{dc/dc}$ και n_{SC} οι βαθμοί απόδοσης των ηλεκτρικών μηχανών, του αντιστροφέα της μηχανής, του dc/dc μετατροπέα και των στοιχείων υπερπυκνωτών αντίστοιχα. Ο όρος m_{SC} αναπαριστά την μάζα του συστήματος αποθήκευσης, ο m_t τη συνολική μάζα του τρένου, και ο $v_{t,max}$ τη μέγιστη ταχύτητα που φτάνει το τρένο. Η μάζα του συστήματος αποθήκευσης μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της ενέργειας που αποθηκεύεται σε αυτό, $m_{SC} = \frac{E_{SC}}{a}$ όπου a ένας συντελεστής, οπότε η εξίσωση (3.1) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$E_{SC,max} = \frac{an_{mech}n_{em}n_{inv}n_{dc/dc}n_{SC}m_tv_{t,max}^2}{2a - n_{mech}n_{em}n_{inv}n_{dc/dc}n_{SC}v_{t,max}^2} \quad (3.2)$$

Δεδομένου ότι περίπου μόνο το 75% της αποθηκευμένης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί, υπολογίζονται στη συνέχεια τα στοιχεία υπερπυκνωτών που θα τοποθετηθούν σε σειρά (strings) και παράλληλα, ώστε να επιτευχθούν τα ζητούμενα επίπεδα τάσης και χωρητικότητας. Αυτό το ποσοστό αποτελεί μια αρκετά καλή προσέγγιση η οποία έχει υπολογιστεί από τους κατασκευαστές, και προκύπτει από το βαθμό απόδοσης και το βάρος του συστήματος αποθήκευσης, το μέγεθος του μετατροπέα dc/dc και το ποσό της ενέργειας που τελικά χρησιμοποιείται. Περισσότερες λεπτομέρειες πάνω σε αυτό το ζήτημα, παρουσιάζονται στα [11][12]. Είναι απαραίτητο επίσης, να υπολογιστεί και η μέγιστη ισχύς που θα πρέπει να μπορεί να παρέχει το σύστημα, καθώς και η μέγιστη τιμή ρεύματος, ώστε να ελεγχθεί εάν βρίσκεται στα επιτρεπτά όρια αντοχής των στοιχείων αποθήκευσης που επιλέχθηκαν κατά τη διαστασιολόγηση. Η μέγιστη λοιπόν στιγμιαία ισχύς δίνεται από τη σχέση (3.3).

$$P_{SC,max} = (m_t + m_{SC})dv_{t,max}n_{mech}n_{em}n_{inv}n_{dc/dc} \quad (3.3)$$

Η ισχύς αυτή ρέει στο σύστημα αποθήκευσης κατά το ξεκίνημα της πέδησης, όταν δηλαδή τα στοιχεία είναι πλήρως άδεια. Στις περισσότερες περιπτώσεις ένα σύστημα αποθήκευσης θεωρείται

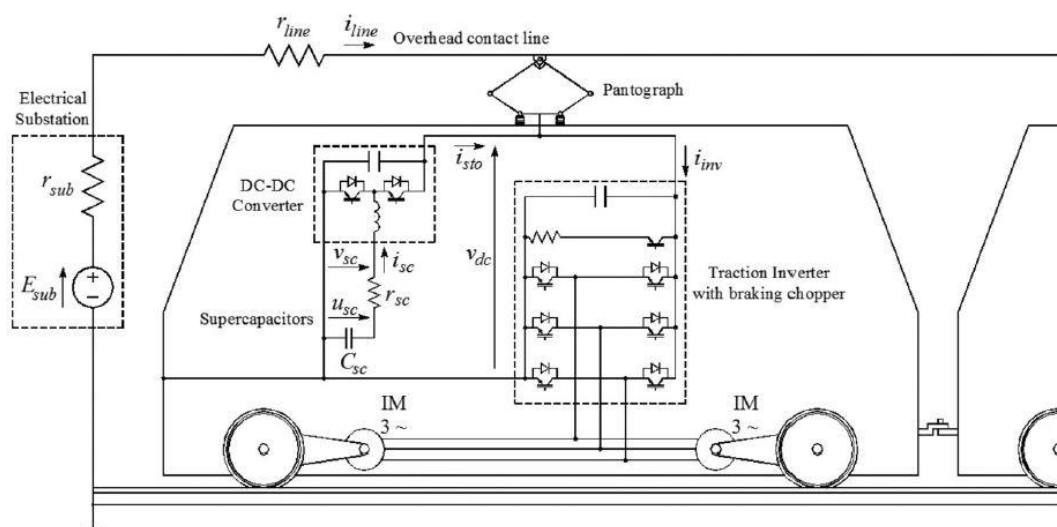
άδειο όταν η τάση κάθε στοιχείου ισούται με το μισό της μέγιστης τιμής της. Συνεπώς, όταν το σύστημα είναι άδειο η τάση του θα ισούται με το μισό της μέγιστης τιμής. Το μέγιστο ρεύμα που ρέει σε κάθε στοιχείο δίνεται από τη σχέση (3.4).

$$I_{m,max} = \frac{P_{SC,max}}{N_p N_s \frac{V_{m,max}}{2}} \quad (3.4)$$

Όπου N_s ο αριθμός των στοιχείων υπερπυκνωτών που είναι συνδεδεμένα σε σειρά σε κάθε string, και N_p ο αριθμός των strings που είναι συνδεδεμένα παράλληλα. Με βάση λοιπόν το αποτέλεσμα που προέκυψε, ελέγχεται εάν η διαστασιολόγηση που πραγματοποιήθηκε είναι εφαρμόσιμη, δηλαδή εάν τα στοιχεία του συστήματος αποθήκευσης μπορούν να αντέξουν τη συγκεκριμένη τιμή ρεύματος. [11][12]

Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης, χρειάζεται αποτελεσματική διαχείριση και έλεγχος της λειτουργίας του. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα υπερπυκνωτών θα πρέπει να εκφορτίζεται σε υψηλές ταχύτητες του τρένου αδειάζοντας, έτσι ώστε να μπορεί να αποθηκεύσει την επερχόμενη ενέργεια που προέρχεται από τη φάση της αναγεννητικής πέδησης. Αντίθετα, θα πρέπει να φορτίζεται κατά την επιβράδυνση, ώστε να μπορεί να προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια στην επόμενη επιτάχυνση του οχήματος. Η παροχή ενέργειας από το σύστημα γίνεται επομένως στη φάση της επιτάχυνσης, κατά την οποία η κατάσταση φόρτισής του ελέγχεται σύμφωνα με την κινητική ενέργεια του οχήματος. Όταν αυτό φρενάρει, προσπαθεί να στείλει την ενέργεια πέδησης πίσω στο δίκτυο, όσο η τάση του βρίσκεται μέσα σε ένα εύρος προκαθορισμένων τιμών. Αν η τάση ξεπεράσει το άνω όριο, τότε η ενέργεια στέλνεται στο κινητό σύστημα αποθήκευσης που είναι εγκατεστημένο. Τέλος, στην αδρανή κατάσταση οι υπερπυκνωτές φορτίζονται αργά από την ενέργεια του δικτύου συναρτήσει της κατάστασης φόρτισής τους. [13]

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η τυπική διαμόρφωση των ηλεκτρικών συστημάτων ενός τρένου:



Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρικών συστημάτων και κινητής συσκευής αποθήκευσης σε τρένο [11]

3.4.3 Τεχνολογίες κινητών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Το γεγονός ότι οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν μικρό χρόνο απόκρισης, υψηλές δυνατότητες πυκνότητας ισχύος και σχετικά χαμηλό κόστος, τους καθιστά σήμερα την καλύτερη επιλογή για ανάκτηση ενέργειας στις κινητές σιδηροδρομικές εφαρμογές. Οι χαμηλές πυκνότητες ενέργειας που τους χαρακτηρίζουν, προκαλούν κάποιους ενδοιασμούς ως προς τη χρήση τους σε εφαρμογές που στοχεύουν κυρίως στην αυτόνομη λειτουργία κίνησης των οχημάτων. Στην περίπτωση αυτή, αποτελεσματικότερη επιλογή αποτελούν οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου ή ακόμη και οι νικελίου-μετάλλου υδριδίου, σε μικρότερο όμως βαθμό. Αντίθετα, οι σφονδύλοι υπερυψηλής ταχύτητας (Flywheels) και οι υπεραγωγίμες μαγνητικές συσκευές αποθήκευσης (SMES) θεωρούνται ακατάλληλα συστήματα για χρήση σε κινητές εφαρμογές, λόγω των θεμάτων ασφαλείας και λειτουργικότητας τους.

Καινοτόμα τεχνολογία για κινητές εφαρμογές, αποτελεί επίσης ο συνδυασμός υπερπυκνωτών με συσσωρευτές, ιδιαίτερα για εφαρμογές που στοχεύουν στην αυτονομία κίνησης των οχημάτων. Σε τέτοιου είδους συστήματα, οι υπερπυκνωτές λειτουργούν για την απορρόφηση των αιχμών ισχύος κατά την πέδηση των τρένων και αντίστοιχα την ανατροφοδότησή της προς αυτά κατά την επιτάχυνσή τους. Οι συσσωρευτές χρησιμεύουν για την απορρόφηση της υπολειπόμενης αναγεννητικής ενέργειας, την οποία και θα τροφοδοτούν προς τα οχήματα κατά την αυτόνομη λειτουργία τους πάνω στις γραμμές. Έτσι, θα προστατεύονται από την καταπόνηση που προκαλείται λόγω υψηλών αιχμών ισχύος και συνεπώς ο χρόνος ζωής και η απόδοσή τους θα αυξηθούν. Σε αυτό συμβάλει σημαντικά το γεγονός ότι ο αριθμός των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης που εκτελούν κατά τη λειτουργία τους, είναι σαφώς μικρότερος στις περιπτώσεις της συγκεκριμένης διάταξης. [1] Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτός ο συνδυασμός, το κόστος λειτουργίας και ο χώρος που απαιτείται πάνω στο όχημα για την εγκατάστασή του, είναι σαφώς αυξημένα σε σχέση με τη χρήση ενός απλού συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η εφαρμογή τους να μην είναι ακόμα διαδεδομένη σε πραγματικά σιδηροδρομικά δίκτυα. [6]

3.4.4 Πραγματικές εφαρμογές

Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει για τις κινητές σιδηροδρομικές εφαρμογές, αφορούν την τεχνολογία των υπερπυκνωτών. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως απόδειξη ότι οι υπερπυκνωτές αποτελούν την πλέον καλύτερη επιλογή για χρήση ως κινητά συστήματα αποθήκευσης. Αντιθέτως, για τους σφονδύλους υπερυψηλής ταχύτητας, υπάρχει πολύ μικρό δημοσιευμένο υλικό και καμία πραγματική εφαρμογή, ενώ η χρήση ηλεκτροχημικών συσσωρευτών ως επιλογή δεν έχει συζητηθεί σε μεγάλο βαθμό. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται συνοπτικά κάποιες από τις πραγματικές εφαρμογές εγκατάστασης κινητών τεχνολογιών αποθήκευσης.

Brand name	Manufacturer	ESS	Application in urban rail
MITRAC™ Energy Saver	Bombardier	EDLC	- LRV in Mannheim, in-service from 2003 to 2007 - Rhein-Neckar-Verkehr GmbH tramway, to be run in 2013
Sitras® MES	Siemens	EDLC	- Innsbruck tramway
ACR	CAF	EDLC	- Seville, Saragossa and Granada tramway systems, in-service
STEEM	Alstom	EDLC	- Paris tramway, in-service from 2009 to 2010
-	Alstom - Saft	NiMH	- Nice tramway, in-service since 2007
LRV Swimo	Kawasaki	NiMH	- Prototype tests in Sapporo Municipal Transport network, 2007 - 2008
LFX-300 streetcar	Kinki Shayro	Li-ion	- Prototype tests in Charlotte, 2010
Sitras® HES	Siemens	EDLC + NiMH	- MTS light rail system in south Lisbon, in-service since 2008

Σχήμα 3.4: Παραδείγματα χρήσης συστημάτων αποθήκευσης σε πραγματικές κινητές εφαρμογές [1]

3.5 Στατικές σιδηροδρομικές εφαρμογές

3.5.1 Στατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

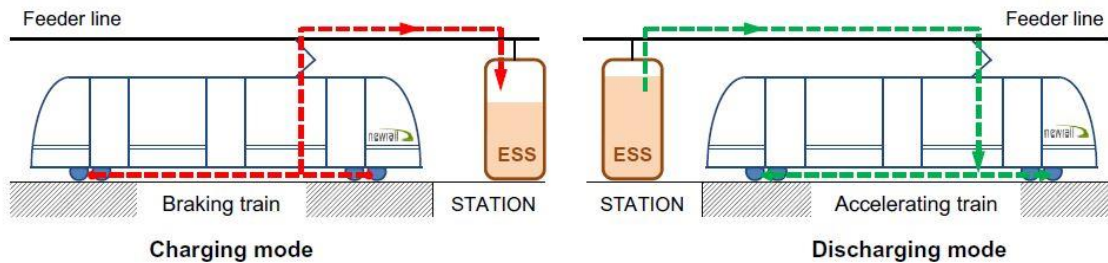
Τα στατικά συστήματα αποθήκευσης έχουν τη δυνατότητα να απορροφήσουν ενέργεια από διάφορα τρένα που επιβραδύνουν στο δίκτυο και να την επιστρέψουν όταν κάποιο από αυτά τη χρειαστεί. Η τοποθέτησή τους πραγματοποιείται δίπλα στις γραμμές, είτε και σε κάποιον σταθμό ή ηλεκτρικό υποσταθμό του σιδηροδρομικού δικτύου, ανάλογα με τη διαθεσιμότητα χώρου και τη θέση που εξυπηρετεί περισσότερο στην επίλυση των ζητημάτων. Συνήθως τοποθετούνται στο ζυγό κάποιου ηλεκτρικού υποσταθμού ή σε σημεία του δικτύου στα οποία παρατηρείται έντονη διακύμανση της τάσης, όπως για παράδειγμα στο τέλος των γραμμών του δικτύου. Η λειτουργία τους συνίσταται στην απορρόφηση της αναγεννητικής ενέργειας η οποία, τη στιγμή που παράγεται, δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας από το δίκτυο (δε μπορεί να απορροφηθεί δηλαδή από κάποιο επιταχυνόμενο όχημα). Η χρήση τους επιλέγεται για την αντιμετώπιση των παρακάτω ζητημάτων:

- Εξοικονόμηση της καταναλισκόμενης ενέργειας του δικτύου
- Σταθεροποίηση τάσης σε διάφορα σημεία του δικτύου στα οποία παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις που προκαλούνται από την κίνηση των τρένων στις γραμμές
- Περιορισμός των υψηλών απαιτήσεων ισχύος που χρειάζονται κατά την επιτάχυνση των τρένων, γεγονός που μειώνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας του δικτύου

Οι διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης των συσκευών εκτελούνται από έναν ηλεκτρονικό ρυθμιστή του οποίου η λειτουργία βασίζεται στη μετρούμενη στους ακροδέκτες τους τάση, δηλαδή στην τάση του σημείου της γραμμής που αυτές είναι συνδεδεμένες. Όταν δηλαδή παρατηρείται αύξηση της τάσης πάνω από κάποιο προκαθορισμένο όριο λόγω της πέδησης των τρένων, ενεργοποιείται η διαδικασία φόρτισης της εγκατεστημένης συσκευής η οποία και απορροφάει ενέργεια από το δίκτυο. Αντίστοιχα, όταν ανιχνεύεται κάποια πτώση τάσης, ενεργοποιείται η λειτουργία εκφόρτισης κατά την οποία το σύστημα τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο ώστε να διατηρηθεί το προφίλ τάσης στα επιθυμητά επίπεδα. Ωστόσο, στην πράξη η διαδικασία αυτή είναι αρκετά πιο πολύπλοκη διότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν

τη λειτουργία του ρυθμιστή και την τάση στους ακροδέκτες του. Αναλυτικότερη μελέτη για τον έλεγχο αυτό παρουσιάζεται στη συνέχεια της εργασίας.

Συγκριτικά με τα κινητά συστήματα αποθήκευσης, τα στατικά έχουν το πλεονέκτημα ότι παρουσιάζουν λιγότερους περιορισμούς όσον αφορά ζητήματα βάρους και όγκου αφού δεν τοποθετούνται πάνω στο κινούμενο όχημα. Επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια από διάφορα κινούμενα τρένα στις γραμμές ταυτόχρονα, ενώ η εγκατάσταση και λειτουργία τους δεν επηρεάζει τις υπόλοιπες λειτουργίες του δικτύου, όπως την κίνηση των τρένων στις γραμμές. Παρουσιάζουν, ωστόσο, χαμηλότερους δείκτες απόδοσης, σε σχέση με τα κινητά, λόγω των ωμικών απωλειών κατά την μεταφορά της ενέργειας πάνω στις γραμμές. Αυτές οι απώλειες οφείλονται στην απόσταση μεταξύ των στατικών συστημάτων αποθήκευσης και των τρένων που επιβραδύνουν πάνω στις γραμμές, και συνεπώς η μελέτη για τη βέλτιστη θέση για εγκατάσταση των συστημάτων καθίσταται απαραίτητη. Τέλος, για την αποδοτικότερη σχεδίαση λειτουργίας και τοποθέτησης των στατικών συστημάτων, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα δρομολόγια των τρένων σε κάθε δίκτυο. [1]



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας στατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε σιδηροδρομική εφαρμογή [1]

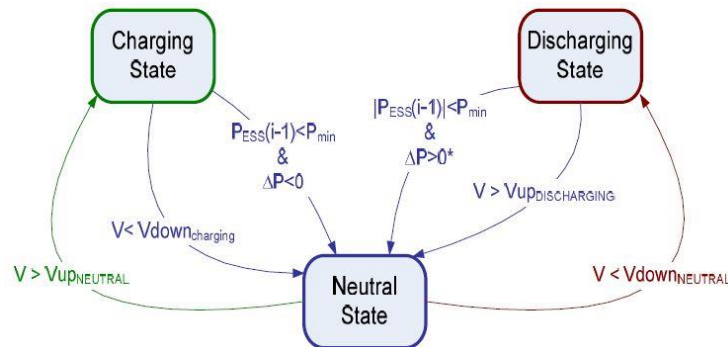
3.5.2 Διαστασιολόγηση και έλεγχος λειτουργίας

Όσον αφορά τη διαστασιολόγηση και τον έλεγχο λειτουργίας των στατικών συστημάτων αποθήκευσης, τα πράγματα είναι αρκετά πιο περίπλοκα. Με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, δεν καθίσταται σαφές το πώς ακριβώς αυτά εκτελούνται. Στο κεφάλαιο 4 της συγκεκριμένης εργασίας έχουν ακολουθηθεί στρατηγικές τόσο για την εύρεση του μεγέθους των συσκευών, όσο και για τον έλεγχο λειτουργίας τους, οι οποίες δημιουργήθηκαν στηριζόμενες στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν.

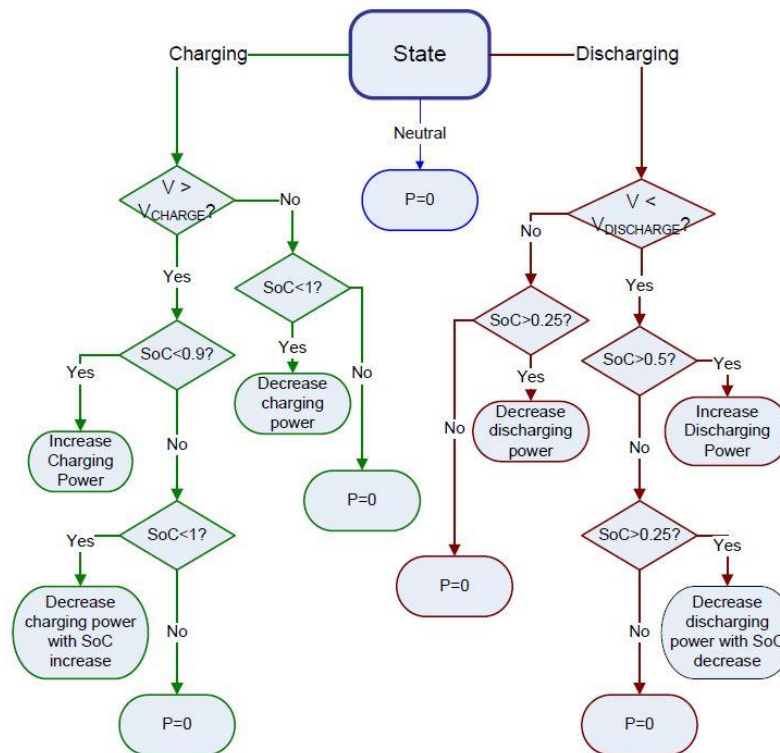
Ενδεικτικά παρουσιάζεται μία τακτική ελέγχου η οποία αναφέρεται στη βιβλιογραφία για τα στατικά συστήματα αποθήκευσης, και αφορά τη λειτουργία τους για εξοικονόμηση ενέργειας. Σε αντίθεση με τις κινητές εφαρμογές, ο έλεγχος των στατικών συστημάτων εξαρτάται από τη διαχείριση της ροής ενέργειας, και πρέπει να καθορίζει την ποσότητα ισχύος που αυτό θα παρέχει ή θα απορροφάει ανάλογα με την τάση του δικτύου. Ωστόσο, όταν ενεργοποιείται το σύστημα, είτε για να απορροφήσει, είτε για να παρέχει ενέργεια, η τάση στο σημείο σύνδεσής του με το δίκτυο θα μεταβληθεί. Για παράδειγμα, όταν το σύστημα αποθήκευσης ανιχνεύει τιμή τάσης μικρότερη του προκαθορισμένου ορίου, τότε θα δώσει ενέργεια προς το δίκτυο και συνεπώς η τάση στο σημείο σύνδεσής του με αυτό αυξάνεται με κίνδυνο να διακοπεί η λειτουργία τροφοδότησης

ενέργειας. Με άλλα λόγια, για τον αποδοτικό έλεγχο της ροής ισχύος, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες παράμετροι εκτός από τη μετρούμενη τάση στους ακροδέκτες της συσκευής.

Οι διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης απαιτούν λοιπόν έναν κατάλληλο ελεγκτή, ο οποίος θα λειτουργεί ως συνάρτηση της τάσης γραμμής. Η κύρια ιδέα είναι η ανίχνευση των πτώσεων και ανυψώσεων τάσης ώστε να ενεργοποιείται κατάλληλα το σύστημα αποθήκευσης. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται οι μεταβάσεις μεταξύ τριών διαφορετικών καταστάσεων ενεργοποίησης του συστήματος αποθήκευσης, καθώς και οι προϋποθέσεις που πρέπει να τηρούνται σε κάθε μία από αυτές. Μόλις καθοριστεί η κατάσταση του συστήματος, ο ελεγκτής θα επιλέξει την τιμή της ισχύος αναφοράς ανάλογα με την τάση του δικτύου και το επίπεδο φόρτισης της συσκευής, ακολουθώντας το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.7. [13]



Σχήμα 3.6: Καταστάσεις ενεργοποίησης συστήματος αποθήκευσης [5]



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ροής λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης [5]

Περισσότερες λεπτομέρειες για την εν λόγω στρατηγική ελέγχου παρουσιάζονται στα [5][13]. Αντίστοιχη τεχνική ελέγχου που αφορά τη λειτουργία στατικών συστημάτων αποθήκευσης για σταθεροποίηση της τάσης, παρουσιάζεται στο [14].

3.5.3 Τεχνολογίες στατικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

Δεδομένου ότι για την εγκατάσταση στατικών συστημάτων αποθήκευσης οι περιορισμοί βάρους και όγκου είναι σαφώς μικρότεροι από ότι στις κινητές εφαρμογές, το εύρος των πιθανών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται είναι αρκετά μεγαλύτερο. Πιο συγκεκριμένα, οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν τα καταλληλότερα χαρακτηριστικά όταν στόχος είναι η σταθεροποίηση τάσης και η αποκοπή των αιχμών ισχύος. Οι χαμηλές ενεργειακές τους ικανότητες όμως, μπορεί να μειώσουν την καταλληλότητα και επιλογή χρήσης τους, γεγονός που εξαρτάται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κάθε δικτύου και τις ενεργειακές ανάγκες που αυτό παρουσιάζει. Αντίθετα, οι σφόνδυλοι υπερυψηλής ταχύτητας, ενώ παρουσιάζουν παρόμοιες πυκνότητες ισχύος με τους υπερπυκνωτές, χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες ενεργειακές ικανότητες. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι περιορισμοί προστασίας που συνδέονται με τα συστήματα αυτά δεν είναι τόσο περιοριστικοί στις στατικές εφαρμογές, αφού μπορούν να τοποθετηθούν σε μεγάλα δοχεία ή ακόμη και σε υπόγεια, τα καθιστά ως μία αρκετά καλή εναλλακτική επιλογή. Παρόλα αυτά, τα υψηλά έξοδα για την εγκατάστασή τους, καθώς επίσης και η περιπλοκότητα λειτουργίας τους, προκαλούν ακόμη δισταγμό ως προς την επιλογή τους από τους διαχειριστές των σιδηροδρομικών δικτύων. Όσον αφορά τις τεχνολογίες συσσωρευτών, μια κατάλληλη επιλογή αποτελούν οι συσσωρευτές νατρίου λόγω των σχετικά υψηλών χωρητικοτήτων ισχύος αλλά και του χαμηλού κεφαλαιακού κόστους ανά μονάδα ενέργειας που παρουσιάζουν. Εναλλακτικές λύσεις μπορούν να βασιστούν σε χρήση συσσωρευτών ιόντων λιθίου ή ακόμη και νικελίου-μετάλλου υδριδίου. [1]

3.5.4 Πραγματικές εφαρμογές

Στην επιστημονική βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετές μελέτες για την ανάπτυξη και εφαρμογή στατικών συστημάτων αποθήκευσης στα σιδηροδρομικά δίκτυα. Όπως και στην περίπτωση των κινητών συστημάτων αποθήκευσης, έτσι και εδώ, οι υπερπυκνωτές αποτελούν την πιο διαδεδομένη επιλογή. Οι περισσότερες μελέτες που ασχολούνται με τη συγκεκριμένη τεχνολογία, εστιάζουν στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για την βέλτιστη και πιο αποδοτική σχεδίασή τους. Ορισμένες από τις εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση στατικών συστημάτων αποθήκευσης, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Brand name	Manufacturer	ESS	Application in urban rail
Sitras® SES	Siemens	EDLC	<ul style="list-style-type: none"> - Madrid metro, in-service since 2003 - Cologne public transport network, in-service since 2003 - Beijing metro, in-service since 2007 - Toronto rail transit, in-service since 2011
EnerGstor™	Bombardier	EDLC	-
NeoGreen® Power	Adeneo (Adetel Group)	EDLC	- Lyon tramway, pilot project in 2011
-	Woojin Industrial Systems	EDLC	- Gyengsan light rail system, pilot project in 2008 and 2009
Envistore™	Envitech Energy (ABB group)	EDLC	<ul style="list-style-type: none"> - Warsaw metro, to be implemented - Philadelphia transit system, pilot project in 2012 (battery-based)
Capapost	Meiden	EDLC	- Hong Kong metro, to be delivered
Powerbridge	Piller Power Systems	Flywheel	<ul style="list-style-type: none"> - Hannover metro, pilot project in 2004 - Rennes metro, pilot project in 2010
GTR system	Kinetic Traction Systems	Flywheel	<ul style="list-style-type: none"> - London metro, pilot project in 2000 - New York City transit system, pilot project in 2002 - Lyon metro, pilot project in 2003-2004
Regen® system	Vycon	Flywheel	- Los Angeles metro, to be delivered
Gigacell® BPS	Kawasaki	NiMH	- New York City Transit network, pilot project in 2010
B-CHOP	Hitachi	Li-ion	<ul style="list-style-type: none"> - Kobe transit system, pilot project in 2005 and regular service since 2007 - Macau metro system, to be delivered
Intensium Max	Saft	Li-ion	- Philadelphia transit system, pilot project in 2012

Σχήμα 3.8: Παραδείγματα χρήσης συστημάτων αποθήκευσης σε πραγματικές στατικές εφαρμογές [1]

Σταθεροποίηση τάσης σε DC σιδηροδρομικά δίκτυα με χρήση στατικών συστημάτων αποθήκευσης

4.1 Θεωρητικό μέρος

4.1.1 Σταθεροποίηση τάσης στην είσοδο των τρένων

1. Εύρεση προβληματικών σημείων στις γραμμές

Με σκοπό την σταθεροποίηση τάσης στην είσοδο των τρένων, πραγματοποιούνται αρχικά προσομοιώσεις για τα διάφορα σενάρια headway. Σε κάθε περίπτωση εξετάζεται η τάση των τρένων συναρτήσει της απόστασής τους (x) από την αρχή των αξόνων ή και του χρόνου (t) που απαιτείται ώστε να ολοκληρώσουν μία πλήρη διαδρομή στις γραμμές. Σκοπός είναι η εύρεση των προβληματικών διαστημάτων κατά τα οποία παρατηρούνται ανεπιθύμητες τιμές τάσης στην είσοδο των τρένων, και η προσπάθεια τοποθέτησης συστημάτων αποθήκευσης όσο το δυνατόν πιο κοντά στα σημεία αυτά.

Τα επιτρεπτά όρια μέσα στα οποία θα πρέπει να βρίσκεται η τάση, ορίζονται από το διαχειριστή του δικτύου ο οποίος και αποφασίζει εάν επιθυμεί τη διόρθωση των βυθίσεων ή των ανυψώσεων που εμφανίζονται κατά την κίνηση των τρένων στις γραμμές. Ακόμη μπορεί να επιλέξει και ταυτόχρονη διόρθωση των παραπάνω εάν αυτό είναι πραγματοποιήσιμο. Ωστόσο, πιο λογική επιλογή θεωρείται η διόρθωση των βυθίσεων τάσης καθώς στην αντίθετη περίπτωση οδηγούμαστε συνήθως σε χρήση πολύ μεγάλων μονάδων αποθήκευσης η οποία δε συμφέρει ούτε οικονομικά αλλά ούτε και σε θέματα εγκατάστασης. Η τελική επιλογή για τη διαστασιολόγηση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως για παράδειγμα τα κόστη, τη διαθεσιμότητα χώρου για την εγκατάσταση κάθε συστήματος κλπ.

Σημειώνεται, ότι σε κάθε περίπτωση, είτε για τη διόρθωση βυθίσεων ή ανυψώσεων τάσης, ακολουθούνται τα ίδια βήματα και η ίδια τακτική για την επίλυση των προβλημάτων. Όσον αφορά την προσπάθεια διόρθωσης και των δύο ταυτόχρονα, η μελέτη είναι αρκετά πιο περίπλοκη και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετοί παράγοντες.

2. Εύρεση “βέλτιστης” τοποθέτησης των συστημάτων

Για την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης με σκοπό τη διόρθωση των βυθίσεων ή ανυψώσεων τάσης στην είσοδο των τρένων, πρώτο βήμα αποτελεί η εύρεση των θέσεων στις οποίες θα πρέπει αυτά να τοποθετηθούν για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των προβλημάτων.

Ο όρος “βέλτιστη” έχει τοποθετηθεί σε εισαγωγικά διότι η μελέτη που προτείνεται δεν είναι θεωρητική ώστε να εξετάζει όλους τους δυνατούς παράγοντες που επηρεάζουν στην επιλογή της αποδοτικότερης τοποθέτησης των συστημάτων αποθήκευσης στο δίκτυο. Δεν εκτελούνται, δηλαδή, πολύπλοκες μαθηματικές διαδικασίες και υπολογισμοί που θα φανερώσουν τη βέλτιστη δυνατή θέση για εγκατάσταση των συσκευών. Αντιθέτως, η επιλογή γίνεται μέσω εκτέλεσης προσομοιώσεων για κάθε ενδεικτικό σενάριο headway, από τις οποίες και θα βρεθούν τελικά οι ζητούμενες θέσεις για την τοποθέτηση των συστημάτων.

Οι καταλληλότερες θέσεις θα είναι εκείνες που βρίσκονται όσο το δυνατό πιο κοντά στα σημεία των γραμμών που παρατηρούνται προβλήματα τάσης στην είσοδο των τρένων. [18] Τα τμήματα αυτά, εντοπίζονται από την εκτέλεση προσομοιώσεων για κάθε ενδεικτικό headway. Με βάση τα όρια που έχουν τεθεί από τον διαχειριστή, προσδιορίζονται αρχικά τα διαστήματα κατά τα οποία η τάση στον παντογράφο των τρένων ξεφεύγει από τα επιθυμητά επίπεδα, και στη συνέχεια, επιλέγονται οι πιθανές θέσεις εγκατάστασης των συστημάτων αποθήκευσης. Αυτές μπορεί να βρίσκονται είτε σε κάποιον από τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς του δικτύου που μελετάται, είτε σε κάποιον επιβατικό σταθμό ή ακόμη και σε άλλα σημεία του δικτύου εφόσον υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασής τους εκεί (παραδείγματος χάριν σε γραμμές που βρίσκονται σε εξωτερικό χώρο).

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι αφού βρεθούν τα διαστήματα στα οποία παρατηρείται ανεπιθύμητη μεταβολή της τάσης στην είσοδο των τρένων, επιχειρείται αρχικά η διόρθωσή της μέσω σύνδεσης των δύο γραμμών με καλώδια. Έτσι κι αλλιώς με την τοποθέτηση ενός συστήματος σε σημείο του δικτύου στο οποίο δεν υπάρχει κάποιος ηλεκτρικός υποσταθμός, η σύνδεση των δύο γραμμών είναι αναπόφευκτη. Οι προσομοιώσεις λοιπόν θα πρέπει να πραγματοποιηθούν εκ νέου διότι η σύνδεση αυτή μπορεί να διορθώσει αισθητά ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, ακόμα και ολοκληρωτικά τα προβλήματα τάσης, και συνεπώς η εγκατάσταση κάποιας μονάδας αποθήκευσης να είναι περιττή. Αυτό είναι λογικό διότι εφόσον οι γραμμές είναι πλέον συνδεδεμένες, όταν σε μία από αυτές παρουσιάζεται πρόβλημα πτώσης ή ανύψωσης τάσης ενώ στην άλλη όχι, τότε το ρεύμα ρέει προς ή αντίστοιχα από τη γραμμή με το πρόβλημα προς τη δεύτερη, βελτιώνοντας έτσι την κατάστασή της. Εάν το πρόβλημα διατηρείται και είναι αισθητό και μετά τη σύνδεση των γραμμών, η διόρθωση οφείλει να γίνει με βάση τα καινούρια διαστήματα και τις καινούριες τιμές τάσης στην είσοδο των τρένων. Αφού βρεθούν τα νέα διαστήματα, συνεχίζεται η μελέτη για τη διόρθωση της τάσης στην είσοδο των τρένων και, πιο συγκεκριμένα, ακολουθεί η διαστασιολόγηση των συστημάτων αποθήκευσης.

Η επιλογή, ωστόσο, των θέσεων αυτών είναι θεωρητική. Στην πράξη υπάρχει το ενδεχόμενο να μη μπορεί να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση στα επιλεγμένα σημεία. Οι περιοριστικοί παράγοντες μπορεί να είναι για παράδειγμα: έλλειψη χώρου στο σημείο που θα εξυπηρετούσε να γίνει η τοποθέτηση των συσκευών, αυξημένο κόστος για προσπάθεια εγκατάστασής τους στα συγκεκριμένα σημεία με συνέπεια ο διαχειριστής να προτιμήσει να τα

τοποθετήσει σε άλλο μέρος του δικτύου, και άλλα. Έτσι, στην περίπτωση που η εγκατάσταση δε μπορεί να πραγματοποιηθεί στα σημεία που ορίστηκαν από τη μελέτη, το κάθε σύστημα αποθήκευσης θα πρέπει να τοποθετηθεί όσο πιο κοντά στα σημεία αυτά γίνεται, ώστε να βρίσκεται αντίστοιχα κοντά στα “προβληματικά σημεία” των γραμμών.

3. Εύρεση μεγέθους του συστήματος

Για την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους των συστημάτων αποθήκευσης που θα χρησιμοποιηθούν, πρέπει να ληφθούν υπόψη αρκετοί παράγοντες. Σημαντικότεροι είναι η μέγιστη στιγμιαία ισχύς αλλά και η μέγιστη ενέργεια που θα πρέπει να μπορεί να τροφοδοτήσει ή αντίστοιχα να απορροφήσει η κάθε συσκευή. Τα εγκατεστημένα λοιπόν συστήματα, θα πρέπει να είναι σε θέση να διορθώσουν ακόμα και τη χειρότερη δυνατή περίπτωση όσον αφορά θέματα τιμής αλλά και χρονικής διάρκειας της μετρούμενης “προβληματικής” τάσης. Η διαστασιολόγηση μπορεί να γίνει είτε με βάση τις βυθίσεις είτε με τις ανυψώσεις τάσης, ανάλογα με το πλάνο του διαχειριστή. Σε κάθε περίπτωση, εξετάζονται όλα τα ενδεικτικά σενάρια μέσα από τα οποία θα ληφθούν και οι μετρήσεις για τις απαιτούμενες ικανότητες ισχύος και ενέργειας των συστημάτων αποθήκευσης. Με βάση αυτές, θα πραγματοποιηθεί στη συνέχεια η διαστασιολόγηση των συσκευών, έτσι ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική σταθεροποίηση της τάσης στην είσοδο των τρένων.

Ωστόσο, και πάλι ο διαχειριστής του δικτύου είναι εκείνος που θα αποφασίσει για το τελικό μέγεθος του κάθε συστήματος, ανάλογα με τους περιορισμούς που αυτός έχει θέσει όσον αφορά τα κόστη καθώς και το αποτέλεσμα που σκοπεύει να επιτύχει. Σημαντικοί παράγοντες αποτελούν τα κόστη εγκατάστασης, συντήρησης και λειτουργίας των συστημάτων αποθήκευσης, καθώς επίσης και τα αντίστοιχα οφέλη που θα έχει επιλέγοντας είτε τη λύση που θα καλύπτει τα προβλήματα για κάθε πιθανό σενάριο, ή μία λιγότερο αποδοτική λύση με χαμηλότερα όμως έξοδα για αυτόν.

3.1 Εύρεση ορίων τάσης για ενεργοποίηση της αποθήκευσης

Επόμενο βήμα αποτελεί η εύρεση των ορίων με βάση τα οποία θα τίθενται σε λειτουργία τα συστήματα αποθήκευσης για διόρθωση είτε των βυθίσεων, είτε των ανυψώσεων τάσης στην είσοδο των τρένων. Μέσω αυτών, θα μπορέσει εν συνεχεία να εκτελεστεί και η διαστασιολόγηση ισχύος και ενέργειας των μονάδων. Καθίσταται λοιπόν απαραίτητο, να βρεθεί μία συσχέτιση μεταξύ της τάσης στους ζυγούς σύνδεσης κάθε αποθήκευσης και της αντίστοιχης καμπύλης τάσης στην είσοδο των τρένων. Με βάση αυτή, θα μπορεί να βρεθεί ένα κατώφλι για κάθε αποθήκευση, κάτω από το οποίο θα ενεργοποιείται ώστε να παρέχει την κατάλληλη ισχύ προς το δίκτυο όταν παρατηρούνται προβλήματα σημαντικών πτώσεων τάσης στην είσοδο των τρένων. Αντίστοιχα, ένα ανώφλι πάνω από το θα ενεργοποιείται ώστε να απορροφάει ισχύ από το δίκτυο για την αντιμετώπιση των ανεπιθύμητων ανυψώσεων. Τα όρια αυτά αφορούν την καμπύλη τάσης των ζυγών στους οποίους πρόκειται να συνδεθεί κάποια μονάδα αποθήκευσης. Αυτό, διότι τα συστήματα υπερπυκνωτών ενεργοποιούνται ανάλογα με την τιμή τάσης που μετρείται στους ακροδέκτες τους κάθε χρονική στιγμή.

Από τις προσομοιώσεις που έχουν ήδη εκτελεστεί πριν τη λειτουργία των συστημάτων, εντοπίζονται τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία παρουσιάζονται προβλήματα τάσης στην είσοδο των τρένων. Για κάθε ενδεικτικό headway, γίνεται σύγκριση των διαστημάτων αυτών με τα αντίστοιχα των καμπύλων τάσης στους ζυγούς σύνδεσης των υπερπυκνωτών, με στόχο να βρεθεί τυχόν συσχέτιση μεταξύ τους. Ελέγχεται, δηλαδή, εάν υπάρχει χρονική σύνδεση μεταξύ των ανεπιθύμητων μεταβολών τάσης στην είσοδο των τρένων και της τάσης των ζυγών σύνδεσης. Εφόσον βρεθεί κάποια συσχέτιση, σημειώνονται τα όρια τάσης του κάθε ζυγού στον οποίο πρόκειται να συνδεθεί αποθήκευση, με βάση τα οποία θα πρέπει αυτές να ενεργοποιούνται. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και επαναλαμβάνεται για όλα τα ενδεικτικά headway.

Από τα αποτελέσματα που θα ληφθούν επιλέγεται για τη διόρθωση βυθίσεων τάσης, το μέγιστο όριο που έχει βρεθεί μεταξύ όλων των προσομοιώσεων, έτσι ώστε να καλύπτεται κάθε πιθανό σενάριο βύθισης. Επιλέγεται, δηλαδή, το ενιαίο κατώφλι στο οποίο θα πρέπει να σταθεροποιείται η τάση στους ζυγούς σύνδεσης κάθε αποθήκευσης, ώστε να μπορούν να αποζημιώνονται τα προβλήματα βυθίσεων στην είσοδο των τρένων, σε κάθε πιθανό headway. Αντίθετα, την ελάχιστη τιμή με βάση την οποία θα ενεργοποιείται κάθε αποθήκευση και στην οποία θα σταθεροποιείται η τάση των ζυγών για την αποτελεσματική διόρθωση των ανυψώσεων τάσης. Με τον τρόπο αυτό, θα διορθώνεται αποτελεσματικά ακόμα και η μικρότερη ανεπιθύμητη βύθιση ή ανύψωση τάσης στην είσοδο των τρένων.

Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι δεν υπάρχει πάντα απόλυτη ταύτιση των πτώσεων ή ανυψώσεων τάσης στην είσοδο των τρένων με αντίστοιχες στους ζυγούς που επιλέγεται να γίνει η σύνδεση των συστημάτων αποθήκευσης. Αυτό εξαρτάται βέβαια από το κάθε δίκτυο και τα δρομολόγια των τρένων, καθώς επίσης και από το πόσο κοντά στα παρατηρούμενα σημεία που εμφανίζονται προβλήματα τάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση των συστημάτων. Είναι λογικό ότι όσο πιο κοντά στα διαστήματα αυτά τοποθετηθούν οι συσκευές, τόσο μεγαλύτερη συσχέτιση θα υπάρχει μεταξύ των καμπύλων τάσης στους ζυγούς σύνδεσης και στην είσοδο των τρένων. Συνεπώς, σε κάθε περίπτωση λαμβάνονται διαφορετικά αποτελέσματα και ανάλογα με αυτά ακολουθείται η αντίστοιχη πορεία για την επίλυση και διόρθωση των ζητημάτων που επιθυμεί ο διαχειριστής κάθε δικτύου. Εάν για παράδειγμα δεν μπορεί να βρεθεί κάποια κοντινή συσχέτιση μεταξύ των δύο καμπυλών τάσης, τότε δε θα μπορούν να βρεθούν κατάλληλα όρια με βάση τα οποία θα ενεργοποιούνται τα συστήματα αποθήκευσης. Φυσικά, το πρόβλημα ίσως μπορεί να επιλυθεί επιλέγοντας μια σχετικά υψηλή τιμή σταθεροποίησης της τάσης στους ζυγούς σύνδεσης των συσκευών, γεγονός όμως που θα απαιτούσε τη χρήση αρκετά μεγαλύτερων συστημάτων αποθήκευσης, τόσο σε θέματα ισχύος όσο και ενέργειας. Αυτό θα οδηγούσε σε σημαντικά υψηλότερα κόστη επένδυσης, λειτουργίας και συντήρησης των συστημάτων για το διαχειριστή. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις, αυτό μπορεί να συμβαίνει σε αρκετά μικρότερο βαθμό, εννοώντας ότι παράλληλα με τη διόρθωση τάσης στα προβληματικά σημεία, μπορεί να παρατηρείται και διόρθωση σε σημεία που, αρχικά, δεν παρουσιαζόταν κάποιο πρόβλημα. Το γεγονός αυτό μπορεί να αγνοηθεί εάν τα σημεία είναι ελάχιστα και οι τιμές ισχύος που πρέπει να παρέχονται ή να απορροφούνται εκείνες τις χρονικές στιγμές είναι αρκετά μικρές. Συνεπώς, το αποτέλεσμα θα είναι η αύξηση ή αντίστοιχα η μείωση της τιμής τάσεως σε σημεία που δεν υπήρχε αρχικά πρόβλημα, κατά ελάχιστο, γεγονός που δε θα δημιουργεί πρόβλημα ούτε σε θέματα λειτουργίας αλλά ούτε και σε σπατάλης αχρείαστης ενέργειας. Εάν όμως τα σημεία αυτά είναι πολλά, όπως αναφέρθηκε και

παραπάνω, υπάρχει πιθανότητα να γίνει υπέρ-διαστασιολόγηση του συστήματος η οποία πιθανώς να επιφέρει μεγαλύτερα κόστη από ότι κέρδη στον διαχειριστή. Όλα αυτά θα πρέπει να μελετηθούν και να ληφθούν υπόψη για την τελική λήψη απόφασης.

3.2 Διαστασιολόγηση με βάση την ισχύ

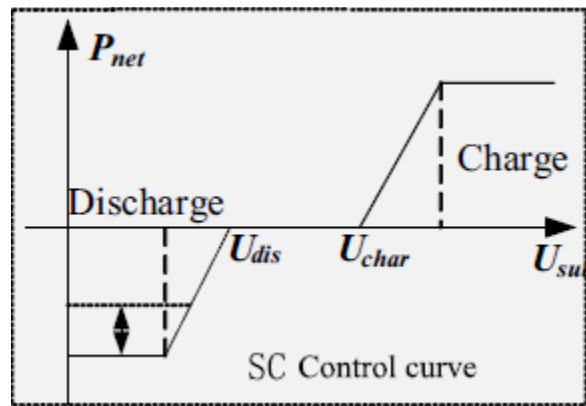
Σκοπός είναι η εύρεση της μέγιστης στιγμιαίας τιμής ισχύος που θα πρέπει να είναι ικανό να τροφοδοτήσει ή να απορροφήσει το κάθε σύστημα για τη διόρθωση της τάσης στην είσοδο των τρένων. Για να βρεθεί η τιμή αυτή, εκτελούνται αρχικά προσομοιώσεις για όλα τα ενδεικτικά headway. Στο σημείο αυτό έχει θεωρηθεί ότι τα απαραίτητα συστήματα αποθήκευσης έχουν τοποθετηθεί στο δίκτυο και ενεργοποιούνται, με βάση τα όρια που βρέθηκαν στο προηγούμενο βήμα, ώστε να διατηρείται η τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Μέσα από τις προσομοιώσεις που εκτελούνται, λαμβάνονται τα προφίλ ισχύος των συστημάτων αποθήκευσης για κάθε σενάριο ξεχωριστά. Από τις καμπύλες αυτές, γίνεται καταγραφή της μέγιστης τιμής ισχύος κάθε σεναρίου. Στη συνέχεια, επιλέγεται η μεγαλύτερη τιμή που προκύπτει από σύγκριση όλων των καταγραφών, η οποία και θα εξυπηρετήσει στην αντιμετώπιση των προβλημάτων σε κάθε headway. Σημαντικό καθίσταται το γεγονός ότι το ενεργειακό περιεχόμενο της καμπύλης δε λαμβάνεται υπόψη σε θέματα διαστασιολόγησης ισχύος.

Όσον αφορά τη διόρθωση βυθίσεων τάσης, το προφίλ ισχύος θα αποτελείται από τις τιμές εκείνες που θα πρέπει να τροφοδοτούν τα συστήματα προς το δίκτυο, ώστε να διατηρείται η τάση στα επιθυμητά επίπεδα κάθε χρονική στιγμή. Από την καμπύλη αυτή λαμβάνεται η μέγιστη κορυφή ισχύος κάθε περίπτωσης και στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των τιμών αυτών και επιλέγεται και πάλι η μεγαλύτερη. Αντίστοιχα για τη διόρθωση ανυψώσεων, λαμβάνεται η καμπύλη των τιμών ισχύος που θα πρέπει να απορροφούν τα συστήματα αποθήκευσης κάθε χρονική στιγμή για τη διατήρηση της τάσης στο προεπιλεγμένο όριο. Όπως και στην προαναφερθείσα περίπτωση, έτσι και εδώ, σημειώνεται η μεγαλύτερη τιμή κάθε σεναρίου, καθώς επίσης και η τελική μέγιστη ισχύς όλων των περιπτώσεων. Έτσι, θα είναι δυνατό να αντιμετωπιστεί κάθε πρόβλημα τάσης που εμφανίζεται στην είσοδο των τρένων.

Σε ορισμένες περιπτώσεις ωστόσο, αυτό μπορεί να αποδειχτεί μη συμφέρον για το διαχειριστή ο οποίος, τελικά, να προτιμήσει μια πιο μικρή διαστασιολόγηση των συστημάτων. Παραδείγματος χάρι, μπορεί ένα δίκτυο να λειτουργεί συνήθως σε μεγάλες τιμές headway στις οποίες να απαιτούνται μικρότερα ποσά ισχύος και ενέργειας για τη διόρθωση των βυθίσεων τάσης σε σχέση με τα πιο πυκνά δρομολόγια. Συνεπώς, η διαστασιολόγηση θα αποβεί πιο συμφέρουσα εάν πραγματοποιηθεί με βάση τις τιμές που λήφθηκαν από τις προσομοιώσεις των μεγαλύτερων headway.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι η λειτουργία ενός συστήματος αποθήκευσης όσον αφορά τον τρόπο παροχής η αντίστοιχα απορρόφησης ισχύος, μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Πρώτη λύση αποτελεί η μέθοδος που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή ο λεπτομερής υπολογισμός του ποσού ισχύος που απαιτείται προκειμένου να διατηρηθούν τα επίπεδα της τάσης σε κάποια συγκεκριμένη τιμή. Η δεύτερη αποσκοπεί στην στήριξη τάσης και όχι στη σταθεροποίησή της σε προκαθορισμένα όρια. Η στήριξη αυτή επιτυγχάνεται μέσω μιας συνάρτησης η οποία έχει ως είσοδο τη μετρούμενη τάση στο ζυγό σύνδεσης, και ως έξοδο το ποσό ισχύος που θα πρέπει να

τροφοδοτήσει ή αντίστοιχα να απορροφήσει το σύστημα ώστε να βελτιώσει τα επίπεδα τάσης. Η ζητούμενη καμπύλη θα έχει τη μορφή του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 4.1: Καμπύλη στήριξης τάσης [17]

Όταν τα τρένα επιταχύνουν και η τάση στην είσοδό τους πέφτει, το σύστημα αποθήκευσης εκφορτίζεται παρέχοντας ενέργεια προς το δίκτυο έτσι ώστε να αποτρέψει τη μεγάλη διακύμανση τάσης κατά τις βυθίσεις. Αντιθέτως, όταν τα τρένα επιβραδύνουν (φρενάρουν), και συνεπώς η τάση αυξάνεται, τότε η αποθήκευση αρχίζει να φορτίζει απορροφώντας ενέργεια από το δίκτυο ώστε να καταστείλει τη διακύμανση των απότομων ανυψώσεων στην είσοδο των τρένων. Η στρατηγική ελέγχου κάθε μονάδας αποθήκευσης που στοχεύει στον περιορισμό της διακύμανσης της τάσης στην είσοδο των τρένων, βασίζεται στην καμπύλη ισχύος που παρουσιάστηκε παραπάνω. Λειτουργεί, δηλαδή, μέσω σύγκρισης της μετρούμενης τάσης του ζυγού σύνδεσης με κάποια προκαθορισμένα όρια ενεργοποίησης που έχουν τεθεί. Φυσικά, κατά τη διαδικασία αυτή λαμβάνεται υπόψη και το επίπεδο φόρτισης της αποθήκευσης σε κάθε χρονική στιγμή, για το οποίο θα γίνει μεγαλύτερη ανάλυση στη συνέχεια.

3.3 Διαστασιολόγηση με βάση την ενέργεια

Επόμενο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός της μέγιστης ενέργειας που θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει κάθε σύστημα. Ως γνωστόν, η ενέργεια προκύπτει από την ισχύ μέσω της σχέσης:

$$E = \int_0^T P dt.$$

Το ζήτημα διαστασιολόγησης ενέργειας είναι αρκετά πολυδιάστατο. Μία πρώτη προσέγγιση για την επιλογή της μέγιστης ενέργειας, είναι μέσω της ολοκλήρωσης της καμπύλης ισχύος των συστημάτων αποθήκευσης. Πιο συγκεκριμένα, από τα προφίλ που μελετήθηκαν για κάθε headway, εντοπίζονται τα διαστήματα παροχής ή απορρόφησης ισχύος, και για κάθε ένα από αυτά υπολογίζονται οι διάφορες τιμές ενέργειας. Επιλέγονται, λοιπόν, οι μέγιστες κάθε σεναρίου, και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση μεταξύ τους και κρατείται πάλι η μεγαλύτερη από αυτές. Αυτή θα είναι και η τιμή που ενδεχομένως να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του δικτύου.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η σημασία του επιπέδου φόρτισης (State of Charge-SoC) των συστημάτων αποθήκευσης, η οποία σε συνδυασμό με τη διαστασιολόγηση που επιλέγεται επηρεάζει σημαντικά τη δυνατότητα επίλυσης των ζητημάτων τάσης στην είσοδο των

τρένων. Ο τρόπος ρύθμισης της λειτουργίας κάθε συστήματος υπερπυκνωτών εξαρτάται κάθε χρονική στιγμή από την κατάσταση φόρτισής του. Η δυσκολία έγκειται στο πότε και πόση ενέργεια θα μπορεί να προσφέρει ή αντίστοιχα να απορροφήσει η συσκευή. Κάθε σύστημα λαμβάνει μέτρηση για την τιμή τάσης του ζυγού στον οποίο είναι συνδεδεμένο και τη συγκρίνει με τα όρια που έχουν τεθεί για την ενεργοποίηση των λειτουργιών του. Έτσι ρυθμίζεται η ροή ισχύος στα άκρα του, ενώ παράλληλα γίνεται έλεγχος και για το ποσό ενέργειας που είναι αποθηκευμένο ώστε να γνωρίζει κατά πόσο μπορεί να φορτιστεί ή να αποφορτιστεί αντίστοιχα. Για την αποτελεσματική διόρθωση των πτώσεων τάσης, το σύστημα θα πρέπει κάθε χρονική στιγμή πριν αυτές εμφανιστούν, να μπορεί να διαθέσει το απαραίτητο ποσό ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι μετά από κάθε τροφοδότηση ενέργειας προς το δίκτυο, αυτή θα πρέπει να επανακτάται σε βαθμό ώστε να μπορούν να καλυφθούν οι επακόλουθες βυθίσεις. Ανάλογη λογική εφαρμόζεται και για τη διόρθωση ανυψώσεων, όπου παράλληλα με τη φόρτιση των συσκευών θα πρέπει να υπάρχει και αντίστοιχη τροφοδότηση ισχύος προς το δίκτυο όταν παρατηρούνται πτώσεις στην είσοδο των τρένων. Έτσι, τα συστήματα αποθήκευσης θα αδειάζουν ώστε στη συνέχεια να μπορούν να απορροφήσουν περαιτέρω ισχύ από το δίκτυο και να εξαλείψουν τις ανεπιθύμητες ανυψώσεις.

Ωστόσο, η επιλογή για διόρθωση ανυψώσεων συνήθως οδηγεί σε μεγάλες ενεργειακά μονάδες αποθήκευσης και δε συνίσταται. Η μόνη περίπτωση όπου μια τέτοια στρατηγική θα είχε νόημα είναι για μικρά headway, όπου τα διαστήματα ανυψώσεων είναι σημαντικά λιγότερα από ότι στα μεγάλα headway. Αυτό διότι υπάρχουν περισσότερα τρένα στο δίκτυο και οι πιθανότητες κάποια από αυτά να επιταχύνουν όταν άλλα επιβραδύνουν είναι αρκετά μεγαλύτερες. Συνεπώς, η ισχύς που επιστρέφεται στο δίκτυο κατά την πέδηση των τρένων και προκαλεί τις ανεπιθύμητες ανυψώσεις στην τάση, θα μπορεί πλέον να απορροφηθεί από τα οχήματα που επιταχύνουν την αντίστοιχη χρονική στιγμή. Η διαστασιολόγηση λοιπόν των συστημάτων για διόρθωση των ανυψώσεων τάσης στην είσοδο των τρένων, θα είναι ενδεχομένως συγκρίσιμη με την περίπτωση της διόρθωσης των βυθίσεων, και άρα θα έχει νόημα η εκτέλεσή της. Η χρήση και αγορά μεγάλων μονάδων αποθήκευσης για ζητήματα σταθεροποίησης τάσης συνήθως δε συμφέρει οικονομικά και δεν προτιμάται από τους διαχειριστές των δικτύων.

Αφού επιλεγεί και η μέγιστη ενεργειακή ικανότητα του κάθε συστήματος, εκτελούνται προσομοιώσεις και ελέγχεται η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης διαστασιολόγησης για κάθε headway. Το καλύτερο δυνατό σενάριο είναι η διόρθωση των προβλημάτων σε κάθε περίπτωση, ωστόσο αυτό δε συμβαίνει πάντα. Για την ακρίβεια, η επιλογή των συγκεκριμένων τιμών δεν εγγυάται την επιτυχημένη επίλυση όλων των προβλημάτων. Σε αυτή την περίπτωση, οφείλουν να πραγματοποιηθούν διορθωτικές κινήσεις για την καλύτερη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης που πρόκειται να εγκατασταθούν στο δίκτυο. Παραδείγματος χάρη, η εκτέλεση καινούριων μετρήσεων για την εύρεση της μέγιστης ενέργειας, κατά τις οποίες μπορεί να περιλαμβάνονται μεγαλύτερα διαστήματα για την ολοκλήρωση της ισχύος, θα οδηγήσει σε αλλαγή στη διαστασιολόγηση του συστήματος. Μία άλλη επιλογή θα μπορούσε να είναι η εξωτερική φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης με σταθερή ισχύ, σε διαστήματα και εκτός της πέδησης των τρένων. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορεί να αποθηκευτεί η απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται για τη διόρθωση επερχόμενων πτώσεων τάσης η οποία δεν ήταν δυνατό να ανακτηθεί μέσω απορρόφησης ισχύος κατά την πέδηση των τρένων. Οι κινήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν είναι αρκετές και πολλές φορές οδηγούν στην αποτελεσματική αντιμετώπιση

των ζητημάτων σταθεροποίησης τάσης στις γραμμές. Σε κάθε περίπτωση όμως, η μελέτη θα πρέπει να γίνει με απόλυτη προσοχή και μεθοδικότητα ώστε να διορθωθούν τα προβλήματα τάσης στο δίκτυο.

4.1.2 Σταθεροποίηση τάσης σε ηλεκτρικούς υποσταθμούς

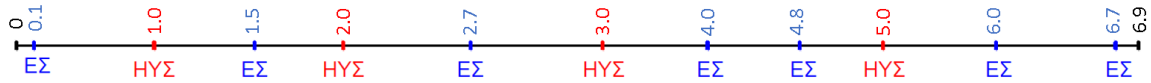
Αντίστοιχη μεθοδολογία με την προαναφερθείσα μπορεί να εφαρμοστεί και για την σταθεροποίηση τάσης σε έναν ή και περισσότερους ηλεκτρικούς υποσταθμούς του δικτύου. Συνεπώς, δεν είναι απαραίτητη η λεπτομερής ανάλυση των διαδικασιών ενσωμάτωσης και λειτουργίας των συστημάτων αποθήκευσης στο δίκτυο.

Στην περίπτωση αυτή, οι μονάδες αποθήκευσης τοποθετούνται στους ζυγούς σύνδεσης των υποσταθμών στους οποίους πρόκειται να εκτελεστεί διόρθωση τάσης, και συνεπώς η έννοια της “βέλτιστης” τοποθέτησης χάνεται. Η διαστασιολόγηση των συστημάτων ακολουθεί επίσης την παραπάνω λογική. Υλοποιείται, δηλαδή, μέσω εύρεσης της μέγιστης στιγμιαίας ισχύος και της ενέργειας. Τα όρια ενεργοποίησης κάθε συσκευής αποθήκευσης θα είναι η τιμές εκείνες που έχουν ορισθεί από το διαχειριστή για σταθεροποίηση της τάσης στους υποσταθμούς. Όπως και στη διόρθωση τάσης στην είσοδο των τρένων, έτσι και εδώ, η διαστασιολόγηση με βάση τις ανυψώσεις των ζυγών οδηγεί συνήθως σε ενεργειακά μεγάλες μονάδες των οποίων η εγκατάσταση και λειτουργία ενδεχομένως να μη συμφέρει συγκριτικά με τα αποτελέσματα που φέρουν.

Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί το γεγονός ότι για την τοποθέτηση συστημάτων αποθήκευσης στους ζυγούς των υποσταθμών με στόχο τη διόρθωση τάσης στην είσοδο των τρένων, συνήθως υπάρχουν σημαντικά προβλήματα όσον αφορά την εύρεση των ορίων για ενεργοποίηση των συσκευών. Αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι εύκολο να βρεθεί κάποια συσχέτιση μεταξύ της καμπύλης τάσης στην είσοδο των τρένων και της αντίστοιχης στο ζυγό κάποιου υποσταθμού, αφού αυτός δε βρίσκεται απαραίτητα κοντά στα σημεία του δικτύου που παρατηρούνται προβλήματα. Συνεπώς, η τοποθέτηση συστημάτων αποθήκευσης σε υποσταθμούς με σκοπό τη σταθεροποίηση τάσης, εκτελείται κατά βάση για διόρθωση της καμπύλης τάσης των ίδιων των υποσταθμών, εκτός εάν οι διακυμάνσεις στην είσοδο των τρένων λαμβάνουν χώρα κοντά σε αυτόν ή δεν υπάρχει άλλος διαθέσιμος χώρος για εγκατάσταση των συσκευών.

4.2 Προσομοιώσεις και αριθμητικά αποτελέσματα

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, πραγματοποιήθηκαν μελέτες σε δίκτυο δύο γραμμών και έντεκα επιβατικών σταθμών, τέσσερις εκ των οποίων διαθέτουν έναν ηλεκτρικό υποσταθμό. Η τοπολογία του συγκεκριμένου συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2. Τονίζουμε ότι οι αποστάσεις για τη γραμμή 2 ξεκινούν να υπολογίζονται από τη δεξιά άκρη της γραμμής, σε αντίθεση με αυτές της γραμμής 1.



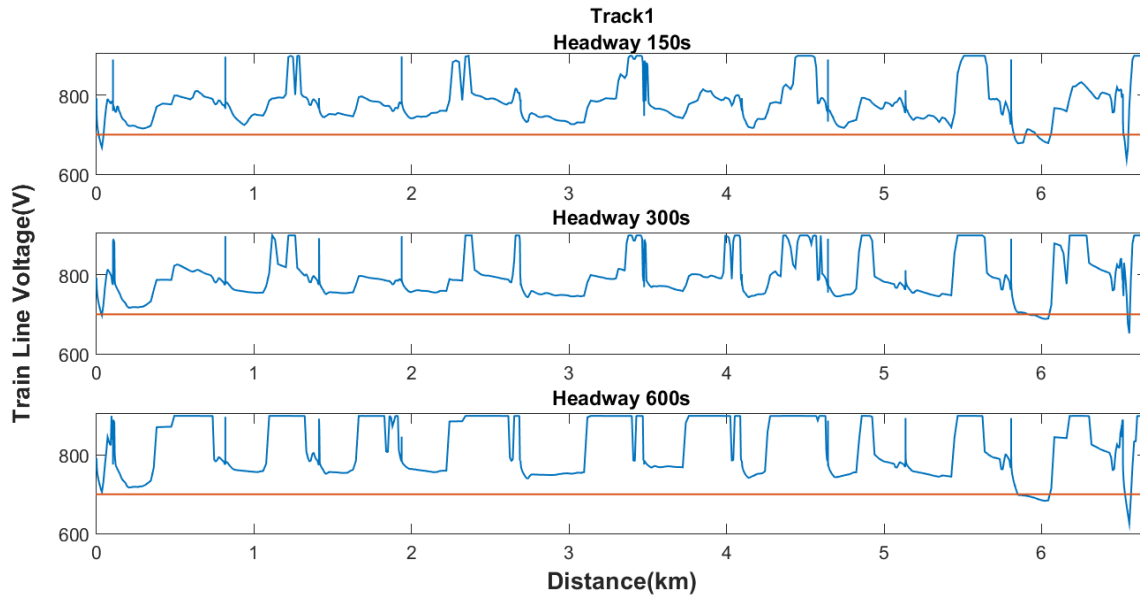
Σχήμα 4.2: Τοπολογία σιδηροδρομικού δικτύου

Στο δίκτυο αυτό, εκτελέστηκαν διάφορες προσομοιώσεις και στρατηγικές για τρία ενδεικτικά σενάρια headway (150s, 300s και 600s), με σκοπό την κατανόηση λειτουργίας και χρησιμότητας των συστημάτων αποθήκευσης υπερπυκνωτών για σταθεροποίηση τάσης στις σιδηροδρομικές εφαρμογές.

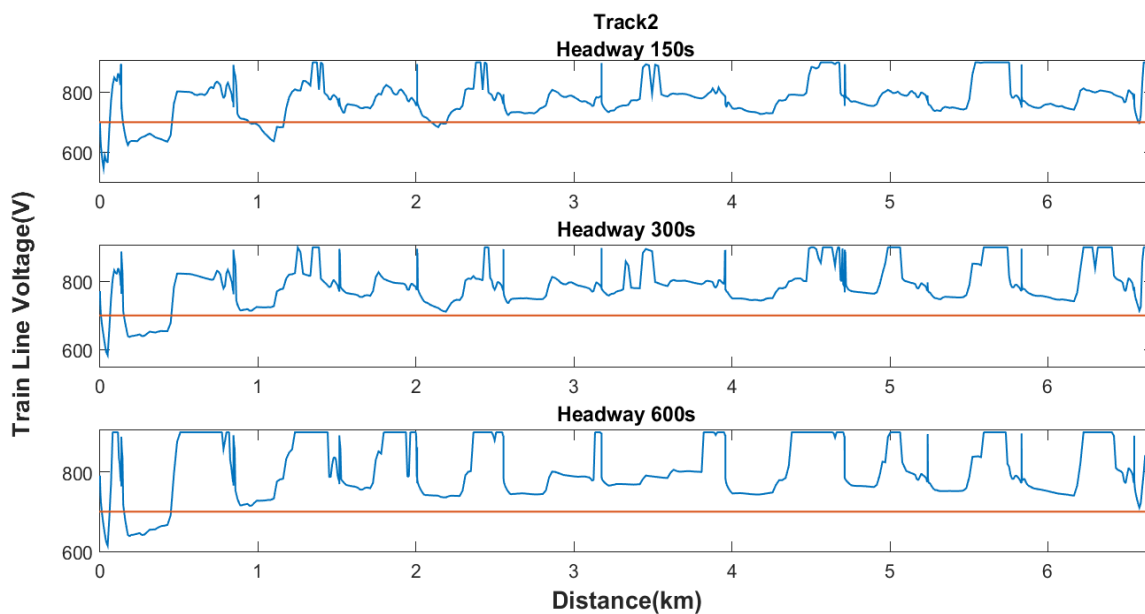
4.2.1 Διόρθωση βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων

1. Εύρεση προβληματικών σημείων στις γραμμές

Ως πρώτο βήμα για την επίλυση του προβλήματος, μελετήθηκαν οι καμπύλες τάσης των τρένων για κάθε ένα από τα ενδεικτικά headway. Με στόχο λοιπόν τον προσδιορισμό των διαστημάτων κατά τα οποία η τάση στην είσοδο των τρένων πέφτει κάτω από το επιτρεπτό όριο, εκτελέστηκαν για κάθε σενάριο οι κατάλληλες προσομοιώσεις. Ορίστηκε ως όριο κάτω από το οποίο δε θέλουμε να πέσει η τάση η τιμή των 700V και μέσα από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν φανερώθηκαν τα σημεία στα οποία παρουσιάζονται ανεπιθύμητες βυθίσεις. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι οι σημαντικότερες πτώσεις τάσης λαμβάνουν χώρα στο τέλος της γραμμής 1 και στην αρχή της γραμμής 2. Οι καμπύλες τάσης των τρένων συναρτήσει της απόστασης για κάθε γραμμή παρουσιάζονται στα σχήματα 4.3 και 4.4. Η κόκκινη γραμμή στις γραφικές αναπαραστάσεις το όριο των 700V κάτω από το οποίο οι βυθίσεις θεωρούνται ανεπιθύμητες.



Σχήμα 4.3: Γραμμή 1-Καμπύλες τάσης στην είσοδο των τρένων για ενδεικτικά headway



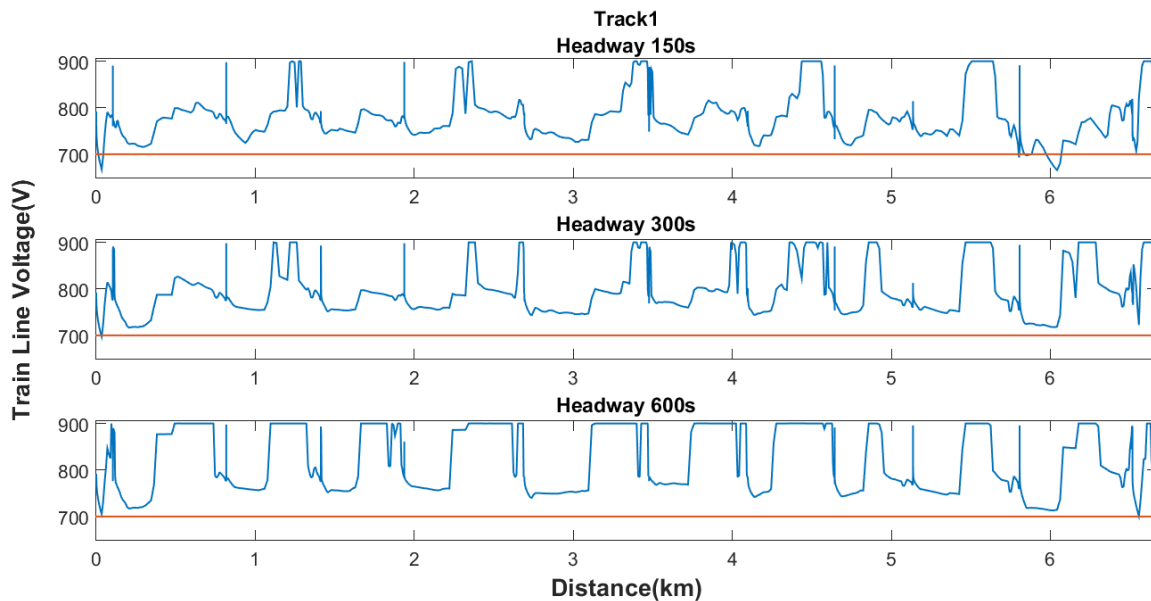
Σχήμα 4.4: Γραμμή 2-Καμπύλες τάσης στην είσοδο των τρένων για ενδεικτικά headway

2. Εύρεση “βέλτιστης” τοποθέτησης των συστημάτων

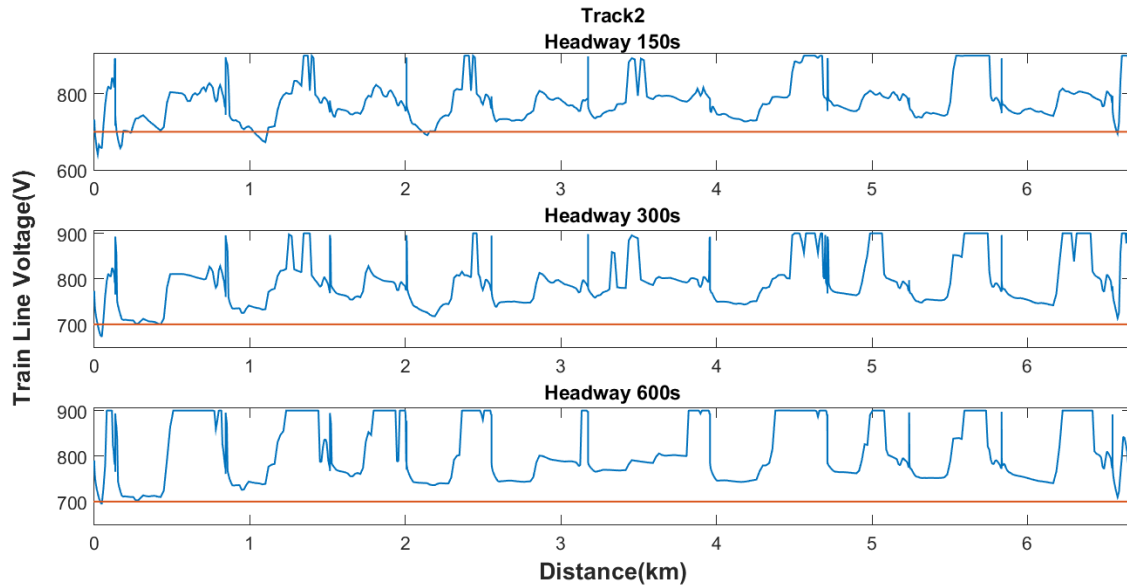
Σκοπός είναι να προσδιοριστούν οι κατάλληλες θέσεις που θα τοποθετηθούν οι μονάδες αποθήκευσης για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση του προβλήματος. Οι θέσεις αυτές θα βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στα διαστήματα των γραμμών που παρουσιάζονται ανεπιθύμητες βυθίσεις τάσης στην είσοδο των τρένων. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, τα σημεία στα οποία η πτώση τάσης είναι μεγαλύτερη της επιτρεπτής, βρίσκονται κατά βάση στο τέλος της γραμμής 1 (μετά τον υποσταθμό 4) και στην αρχή

της γραμμής 2 (πριν τον υποσταθμό 4). Συνεπώς, για την αντιμετώπιση του εν λόγω προβλήματος, αξίζει να τοποθετηθεί ένα σύστημα αποθήκευσης στον επιβατικό σταθμό που βρίσκεται στην απόσταση $x=6.7$ km (γραμμή 1) και, αντίστοιχα, $x=0.2$ km (γραμμή 2). Βέβαια, υπάρχουν και άλλοι επιβατικοί σταθμοί που βρίσκονται κοντά στα σημεία αυτά. Όμως, στα πλαίσια της εργασίας, επιλέχθηκε η τοποθέτηση ενός και όχι παραπάνω συστημάτων αποθήκευσης με σκοπό να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία τους. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι ενώ υπάρχουν και άλλα τμήματα στα οποία παρατηρήθηκαν κάποιες βυθίσεις τάσης, η εγκατάσταση αποθήκευσης κοντά στα σημεία αυτά καθίσταται μη συμφέρουσα διότι η καταγεγραμμένες πτώσεις είναι πολύ μικρής τιμής και διάρκειας.

Όταν εγκατασταθεί το σύστημα στους ζυγούς του επιβατικού σταθμού, οι δύο γραμμές του δικτύου ενώνονται μέσω καλωδίων. Τα σημεία σύνδεσης είναι οι ζυγοί (της γραμμής 1 και της γραμμής 2) στους οποίους θα συνδεθεί η αποθήκευση. Συνεπώς οι μελέτες, όσον αφορά τα προβλήματα τάσης στην είσοδο των τρένων κατά τη μετακίνησή τους στις γραμμές, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν εκ νέου. Οφείλουν λοιπόν να εκτελεστούν προσομοιώσεις για κάθε headway, με σύνδεση πλέον του συστήματος αποθήκευσης χωρίς όμως αυτό να τίθεται σε λειτουργία, ώστε να βρεθούν οι καινούριες πτώσεις τάσης στην είσοδο των τρένων. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης στην είσοδο των τρένων που λήφθηκαν από την εκτέλεση προσομοιώσεων μετά την ένωση των γραμμών. Τα αποτελέσματα αυτά εμφανίζονται αναλυτικότερα στους πίνακες 4.1 και 4.2.



Σχήμα 4.5: Γραμμή 1-Καμπύλες τάσης στην είσοδο των τρένων για ενδεικτικά headway



Σχήμα 4.6: Γραμμή 2-Καμπύλες τάσης στην είσοδο των τρένων για ενδεικτικά headway

Πίνακας 4.1: Πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων γραμμής 1.

Headway(s)	Διαστήματα απόστασης (km)	Διαστήματα χρόνου (t)	Ελάχιστη μετρούμενη τάση διαστήματος (V)
150	[0.0187,0.0433]	[6,9]	667.6
	[5.803]	[760]	693.1
	[5.849,5.871]	[797,799]	697.5
	[5.988,6.062]	[807,811]	665.8
300	[0.0341]	[8]	697.4
600	-	-	-

Πίνακας 4.2: Πίνακας αναλυτικών αποτελεσμάτων γραμμής 2.

Headway(s)	Διαστήματα απόστασης (km)	Διαστήματα χρόνου (t)	Ελάχιστη μετρούμενη τάση διαστήματος (V)
150	[0.0059,0.0481]	[7,13]	641.1
	[0.1465,0.1763]	[57,61]	657.4
	[1.026,1.1]	[156,160]	672.9
	[2.126,2.141]	[309,310]	690.9
	[6.579]	[875]	695
300	[0.022,0.0481]	[10,13]	672.8
	[0.4264]	[77]	699.9
600	[0.0383,0.0481]	[12,13]	694.6

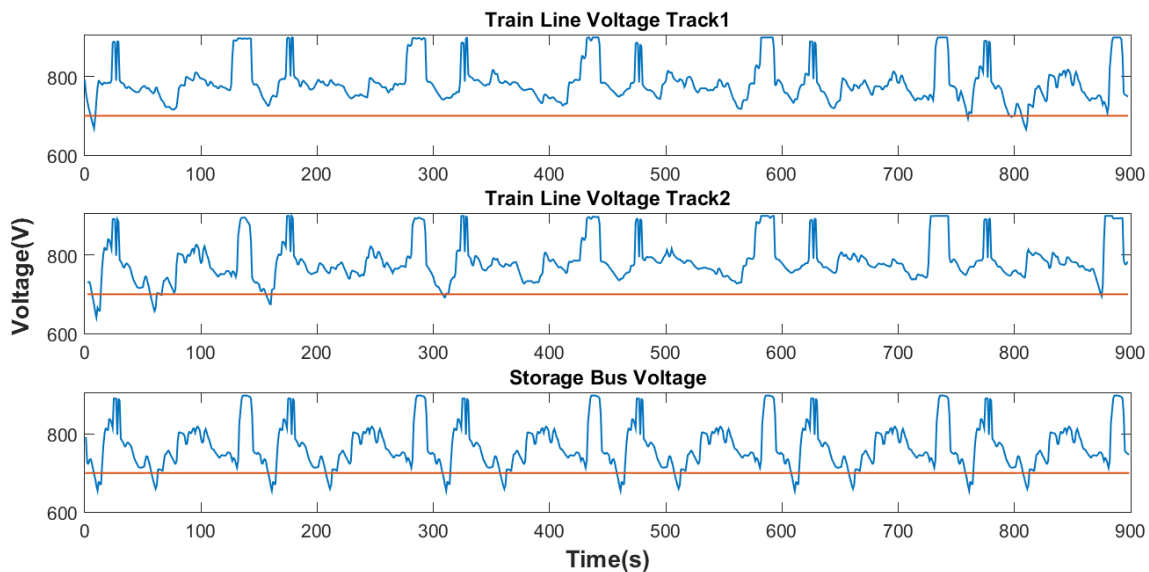
Οι διορθωτικές στρατηγικές, πρέπει να επικεντρωθούν πλέον στα καινούρια διαστήματα και στις νέες πτώσεις που καταγράφηκαν. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι μετά τη σύνδεση των γραμμών του δικτύου, οι τάσεις στην είσοδο των τρένων βελτιώνονται αισθητά. Αυτό είναι λογικό διότι εφόσον οι γραμμές είναι πλέον συνδεδεμένες, όταν σε μία από αυτές παρουσιάζεται πρόβλημα πτώσης στην τάση, τότε ρεύμα ρέει από τη δεύτερη προς αυτή βελτιώνοντας έτσι την κατάστασή της. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα μεγαλύτερα headways (300s και 600s), παρατηρείται ότι το πρόβλημα στο τέλος της γραμμής 1 έχει διορθωθεί πλήρως. Αντίστοιχα, στη γραμμή 2, ενώ παρουσιάζονται ακόμα κάποια προβληματικά διαστήματα, αυτά είναι πολύ μικρά και με σημαντικά μικρότερες πτώσεις τάσης σε σχέση με την κατάσταση του δικτύου προτού την ένωση των γραμμών. Τέλος, στην περίπτωση των 150s, παρουσιάζονται επίσης ραγδαίες βελτιώσεις, παρά το γεγονός ότι υπάρχουν ακόμα αρκετά διαστήματα που χρήζουν αντιμετώπισης και στις δύο γραμμές. Συνεπώς, η εγκατάσταση ενός συστήματος αποθήκευσης στον επιβατικό σταθμό που ορίστηκε προηγουμένως αξίζει να πραγματοποιηθεί. Η επιλογή ωστόσο των θέσεων δεν είναι πάντα πραγματοποιήσιμη, λόγω διάφορων περιορισμών που μπορεί να υπάρχουν. Έτσι, σε περίπτωση που η εγκατάσταση δε μπορεί να πραγματοποιηθεί στο σημείο που ορίστηκε από τη μελέτη, το σύστημα θα πρέπει να τοποθετηθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτό.

Στην περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης του συστήματος μόνο σε κάποιο ηλεκτρικό υποσταθμό, τότε αυτό θα τοποθετηθεί στο ζυγό του υποσταθμού 4. Η ακριβής θέση για την τοποθέτηση του συστήματος θα είναι δηλαδή η $x=5.1365$ km με βάση τις αποστάσεις της γραμμής 1, ή αντίστοιχα η $x=1.5145$ km με βάση τις αποστάσεις της γραμμής 2. Και σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, η επιλογή θα γίνει με βάση την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των πιθανών υποσταθμών εγκατάστασης και των σημείων που παρατηρήθηκαν οι περισσότερες και πιο ισχυρές πτώσεις κάτω από τα 700V.

3. Εύρεση μεγέθους του συστήματος

3.1. Εύρεση ορίων τάσης για ενεργοποίηση της αποθήκευσης

Ως επόμενο βήμα καθίσταται απαραίτητο, να βρεθεί συσχέτιση μεταξύ της τάσεως στην είσοδο των τρένων και του ζυγού σύνδεσης της αποθήκευσης στον επιβατικό σταθμό. Με βάση αυτή θα μπορεί να βρεθεί ένα κατώφλι κάτω από το οποίο θα ενεργοποιείται η αποθήκευση ώστε να παρέχει την κατάλληλη ισχύ στο δίκτυο όταν παρουσιάζονται προβλήματα βυθίσεων. Από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν για κάθε ενδεικτικό headway, λήφθηκαν οι ζητούμενες καμπύλες τάσης. Για την περίπτωση του headway των 150s, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Κυματομορφές τάσης στην είσοδο των τρένων και στο ζυγό σύνδεσης της αποθήκευσης για headway 150s

Για την εύρεση των ορίων ενεργοποίησης της αποθήκευσης θα πρέπει να βρεθεί κάποια συσχέτιση μεταξύ της τάσης στο ζυγό του επιβατικού σταθμού και της αντίστοιχης στην είσοδο των τρένων κατά τα χρονικά διαστήματα στα οποία παρατηρείται πτώση κάτω από τα 700V. Παρατηρήθηκε, αρχικά, ότι για κάθε σενάριο, οι καμπύλες τάσης του ζυγού σύνδεσης παρουσιάζουν ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο, είναι δηλαδή περιοδικές με περίοδο T ίση με το headway κάθε περίπτωσης. Το γεγονός αυτό είναι λογικό διότι θεωρήθηκε ότι οι γραμμές είναι πλήρως κατειλημμένες από τρένα, τα οποία και θα παρουσιάζουν ίδιες καμπύλες τάσης, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι οι πτώσεις τάσεις στην είσοδο κάθε τρένου, οι οποίες και επηρεάζουν την τάση του ζυγού, θα επανεμφανίζονται ανά περίοδο ίση με το headway κάθε περίπτωσης, λόγω του γεγονότος ότι από το ίδιο ακριβώς σημείο θα περνάει κάποιο επόμενο τρένο με ίσο αριθμό οχημάτων μπροστά και πίσω του. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω, οι βυθίσεις τάσης που παρατηρούνται στην

είσοδο των τρένων θα εμφανίζονται κανονικά ανά 150s σε συγκεκριμένα σημεία των γραμμών. Αυτός είναι και ο λόγος που η τάση του ζυγού σύνδεσης παρουσιάζει περιοδικότητα. Για να βρεθεί κάποια συσχέτιση λοιπόν μεταξύ των κυματομορφών αυτών, θα πρέπει να συγκριθούν τα χρονικά διαστήματα στα οποία παρατηρούνται βυθίσεις στην είσοδο των τρένων με αντίστοιχες στο ζυγό σύνδεσης. Προφανώς αυτό οφείλει να πραγματοποιηθεί ταυτόχρονα για τις κυματομορφές των τρένων και στις δύο γραμμές του δικτύου, αφού και οι δύο συμβάλλουν στη διαμόρφωση της τάσης του ζυγού.

Συγκρίνοντας λοιπόν τις παραπάνω γραφικές, παρατηρήθηκε ότι υπάρχει σχέση μεταξύ των πτώσεων τάσης στο ζυγό σύνδεσης και στις αντίστοιχες που λαμβάνουν χώρα στην είσοδο των τρένων καθώς αυτά κινούνται στις γραμμές. Η συσχέτιση που βρέθηκε γίνεται εμφανής και μέσα από τις καμπύλες που παρουσιάστηκαν. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί, ότι στην καμπύλη τάσης του ζυγού σύνδεσης, η καταγραφή της τάσης του άξονα x ξεκινάει από το 1 και όχι από το 0. Αυτό θα ισχύει και σε κάθε αντίστοιχη γραφική παράσταση που παρουσιάζεται στη συνέχεια της εργασίας. Αφού, λοιπόν, ο χρόνος κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων αρχίζει να μετράει από το 0, η διαφορά αυτή θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αντιστοιχία των διαστημάτων μεταξύ των καμπυλών. Αναλυτικότερα, για την περίπτωση των 150s, βρέθηκε ότι η τιμή στην οποία θα πρέπει να σταθεροποιείται η τάση του ζυγού για την αποτελεσματική διόρθωση των βυθίσεων στην είσοδο των τρένων είναι τα 718V. Με βάση την τιμή αυτή, παράλληλα με τη διόρθωση τάσης στα προβληματικά σημεία παρατηρείται και διόρθωση τάσης σε σημεία στα οποία αρχικά δεν παρουσιαζόταν πρόβλημα, γεγονός που μπορεί ωστόσο να αγνοηθεί εφόσον είναι πολύ λίγα. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχει απόλυτη χρονική ταύτιση μεταξύ των πτώσεων τάσης στην είσοδο των τρένων με αντίστοιχες στο ζυγό σύνδεσης. Τα όρια τάσης κάτω από τα οποία θα πρέπει να ενεργοποιείται το σύστημα αποθήκευσης για να παρέχει ενέργεια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για κάθε headway ξεχωριστά.

Πίνακας 4.3: Όρια ενεργοποίησης συστήματος αποθήκευσης.

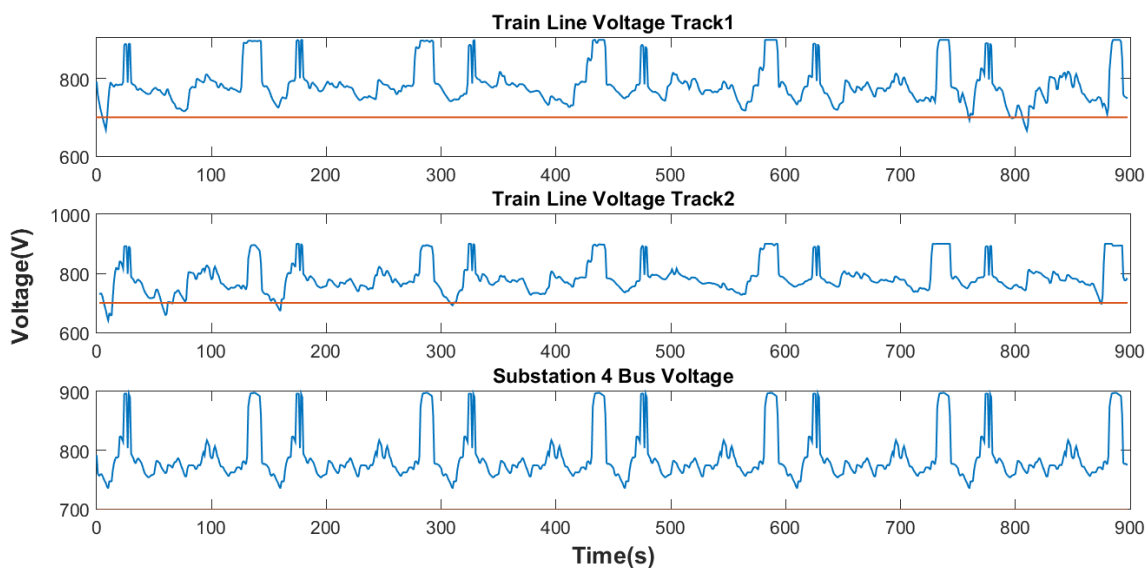
Headway (s)	Τάση ενεργοποίησης αποθήκευσης (V)
150	718
300	715
600	713

Τα αποτελέσματα για τα όρια επιβεβαιώθηκαν και μέσω προσομοιώσεων. Επαληθεύτηκε δηλαδή, ότι με παροχή ισχύος προς το δίκτυο ώστε η τάση στο ζυγό σύνδεσης να διατηρείται στα συγκεκριμένα επίπεδα, οι ανεπιθύμητες βυθίσεις στην είσοδο των τρένων εξαλείφονται. Ως ενιαίο κατώφλι λοιπόν επιλέχθηκε το μεγαλύτερο όριο τάσης, δηλαδή η τιμή των 718V, ώστε να εξασφαλίζεται η διόρθωση των βυθίσεων σε κάθε σενάριο. Με ενεργοποίηση όμως της αποθήκευσης όταν η τάση πέφτει κάτω από το συγκεκριμένο όριο, παράλληλα με τη διόρθωση των ανεπιθύμητων βυθίσεων το σύστημα παρέχει ισχύ και σε ορισμένες χρονικές στιγμές που κανονικά δεν παρουσιάζονται προβλήματα τάσης (ειδικά στα σενάρια των μεγαλύτερων headway). Αυτό είναι αναπόφευκτο διότι για την ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των σεναρίων, επιλέχθηκε μία τιμή

κατωφλίου στην οποία θα σταθεροποιείται η τάση του ζυγού σύνδεσης. Με βάση αυτή την επιλογή, δεν υπάρχει απόλυτη ταύτιση των πτώσεων τάσης στην είσοδο των τρένων με αντίστοιχες στο ζυγό σύνδεσης για κάθε περίπτωση, αφού στα μεγαλύτερα headway το όριο ενεργοποίησης θα έπρεπε να είναι ελαφρώς χαμηλότερο.

Το κατώφλι αυτό, είναι φανερό ότι βρίσκεται σε αρκετά κοντινή τιμή με το όριο των 700V κάτω από το οποίο οι πτώσεις τάσης στην είσοδο των τρένων θεωρούνται ανεπιθύμητες. Αυτό είναι λογικό διότι η τοποθέτηση του συστήματος πραγματοποιείται με βάση τα διαστήματα στα οποία παρατηρούνται οι βυθίσεις. Επιλέγεται δηλαδή θέση για εγκατάσταση της αποθήκευσης όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτά. Εφόσον λοιπόν η μέτρηση γίνεται στο ζυγό του επιβατικού σταθμού, θα υπάρχει μικρή πτώση τάσης ανάμεσα σε αυτόν και στα τρένα όταν εμφανίζεται κάποιο πρόβλημα.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε αντίστοιχη μελέτη για το σενάριο εγκατάστασης της αποθήκευσης σε ζυγό ηλεκτρικού υποσταθμού. Στην περίπτωση αυτή, λήφθηκαν μέσω προσομοιώσεων, οι καμπύλες τάσης του ζυγού του υποσταθμού 4 και της εισόδου των τρένων. Για την εύρεση λοιπόν των ορίων ενεργοποίησης της αποθήκευσης, επιχειρήθηκε να βρεθεί συσχέτιση της πρώτης με τα χρονικά διαστήματα στα οποία παρατηρείται πτώση τάσης στα τρένα. Ωστόσο, στην καμπύλη τάσης του υποσταθμού παρατηρήθηκε ότι οι τιμές ποικίλουν και διαφοροποιούνται ανεξάρτητα από τις τιμές τάσης στην είσοδο των τρένων. Όταν, δηλαδή, παρατηρείται πτώση κάτω από τα 700V δεν υπάρχει κάποια αντίστοιχη σημαντική πτώση στην τάση του υποσταθμού που να εξηγεί την πρώτη. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα στο ότι ο υποσταθμός 4 δε βρίσκεται τόσο κοντά στα σημεία που παρατηρούνται οι ανεπιθύμητες βυθίσεις τάσης. Οι εν λόγω κυματομορφές για την περίπτωση των 150s παρουσιάζονται στο σχήμα 4.8.



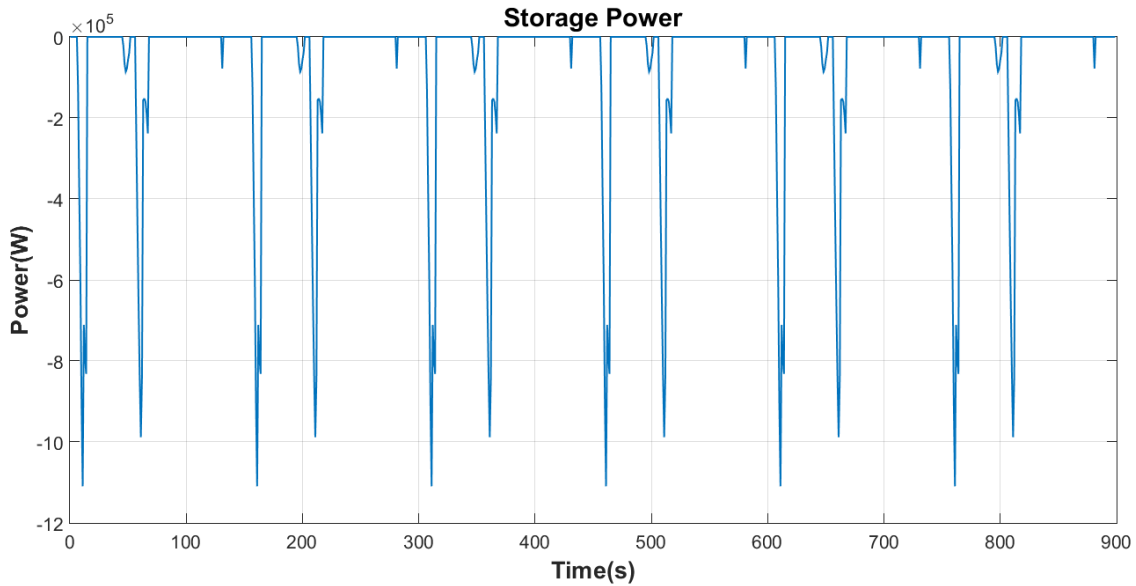
Σχήμα 4.8: Κυματομορφές τάσης στην είσοδο των τρένων και στο ζυγό του υποσταθμού 4 για headway 150s

Καταλήγοντας, λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι δε μπορούμε να συσχετίσουμε απόλυτα τις δύο κυματομορφές τάσης έτσι ώστε να τεθεί ένα κατώφλι κάτω από το οποίο θα ενεργοποιείται το σύστημα αποθήκευσης. Φυσικά, το πρόβλημα θα μπορούσε να επιλυθεί επιλέγοντας μια σχετικά υψηλή τιμή σταθεροποίησης τάσης στο ζυγό του υποσταθμού. Αυτό όμως, θα απαιτούσε τη χρήση αρκετά μεγαλύτερων συστημάτων αποθήκευσης, τόσο σε θέματα ισχύος, όσο και ενέργειας. Καθίσταται λοιπόν εμφανής η σημασία της τοποθέτησης των συστημάτων όσο το δυνατό πιο κοντά στα σημεία που παρατηρούνται προβλήματα τάσης στην είσοδο των τρένων. Εφόσον υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασής τους εκεί, η ζητούμενη συσχέτιση μεταξύ των καμπυλών τάσης για την εύρεση των ορίων ενεργοποίησης θα είναι ευκολότερη, οι απώλειες κατά τη μεταφορά ενέργειας στις γραμμές λιγότερες, και η λύση που θα επιλεγεί πιο συμφέρουσα.

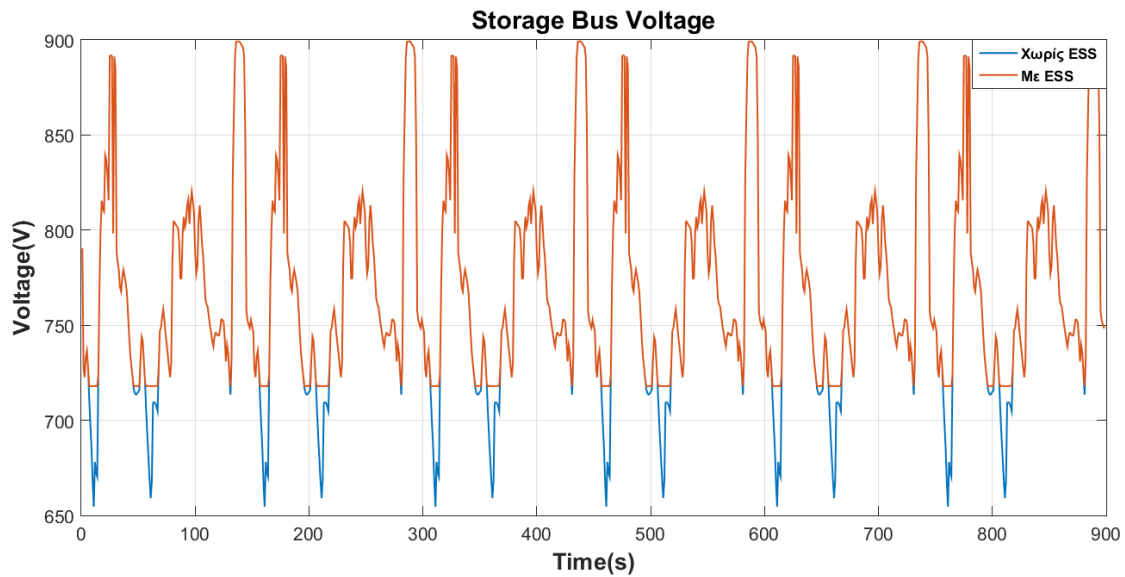
3.2. Διαστασιολόγηση με βάση την ισχύ

Στο σημείο αυτό, το σύστημα αποθήκευσης έχει πλέον τοποθετηθεί στο δίκτυο και ενεργοποιείται ώστε να διατηρείται η τάση του ζυγού σύνδεσης στα επιθυμητά επίπεδα. Για την επιτυχή διόρθωση των βυθίσεων σχεδιάστηκε αρχικά κώδικας που υπολογίζει το ποσό ισχύος που θα πρέπει να τροφοδοτείται από την αποθήκευση κάθε χρονική στιγμή για τη διατήρηση της τάσης στα 718V. Από τα αποτελέσματα, λαμβάνονται τα προφίλ ισχύος του συστήματος για κάθε ενδεικτικό σενάριο. Σκοπός είναι η εύρεση της μέγιστης στιγμιαίας τιμής που θα πρέπει να είναι σε θέση να προσφέρει, έτσι ώστε να διορθώνεται ακόμα και η μεγαλύτερη πτώση τάσης στην είσοδο των τρένων.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το headway των 150s κατά το οποίο καθίσταται και σπουδαιότερη η χρήση του συστήματος αποθήκευσης στη συγκεκριμένη μελέτη. Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζεται το προφίλ ισχύος του συστήματος που προκύπτει από τη λειτουργία του για σταθεροποίηση της τάσης στα 718V, ενώ στο 4.10 γίνεται σύγκριση της καμπύλης τάσης του ζυγού πριν και μετά την ενεργοποίηση της αποθήκευσης.



Σχήμα 4.9: Προφίλ ισχύος συστήματος αποθήκευσης



Σχήμα 4.10: Σύγκριση τάσης ζυγού σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίηση του συστήματος αποθήκευσης

Τα τελικά αποτελέσματα για τη μέγιστη στιγμιαία τιμή ισχύος που θα πρέπει να τροφοδοτεί το σύστημα σε κάθε σενάριο, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Μέγιστη στιγμιαία απαιτούμενη ισχύς

Headway (s)	Μέγιστη Ισχύς (MW)
150	1.10937500
300	0.57031250
600	0.19726562

Η χειρότερη δυνατή περίπτωση όσον αφορά θέματα ισχύος εμφανίζεται για headway 150s στη γραμμή 2 και απαιτούνται περίπου 1.11MW για τη διόρθωση της τάσης στη είσοδο των τρένων. Αυτό είναι βέβαιο λογικό, αφού σε αυτή την περίπτωση καταγράφεται και η ισχυρότερη μετρούμενη πτώση τάσης του τρένου (641.1V), οπότε και θα απαιτείται το μεγαλύτερο ποσό ισχύος για την επαναφορά της στο επιθυμητό επίπεδο. Συνεπώς, το σύστημα που θα εγκατασταθεί θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει στιγμιαία μέγιστη ισχύ 1.11MW.

3.3. Διαστασιολόγηση με βάση την ενέργεια

Επόμενο βήμα αποτελεί ο υπολογισμός της μέγιστης ενέργειας που θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει το σύστημα για τη σταθεροποίηση της τάσης στο ζυγό σύνδεσης και συνεπώς στην είσοδο των τρένων. Από τα προφίλ ισχύος που λήφθηκαν για κάθε περίπτωση, μετρήθηκε η ενέργεια που απαιτείται σε κάθε διάστημα παροχής ισχύος. Οι μέγιστες τιμές που καταγράφηκαν για κάθε σενάριο ξεχωριστά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.5: Μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια

Headway (s)	Μέγιστη Ενέργεια (kWh)
150	1.5137
300	0.4319
600	0.0873

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις, επιλέγεται ως μέγιστη τιμή ενέργειας, σύμφωνα με την οποία θα πραγματοποιηθεί και η διαστασιολόγηση της αποθήκευσης, οι 1.5137 kWh.

Ωστόσο, για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης, θα πρέπει να εκτελεστούν προσομοιώσεις στο δίκτυο σύμφωνα με τη διαστασιολόγηση που επιλέχθηκε. Γίνεται δηλαδή εφαρμογή διάφορων μεθοδολογιών και στρατηγικών, με στόχο τον αποτελεσματικό έλεγχο λειτουργίας της μονάδας που πρόκειται να εγκατασταθεί. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την επιλογή ενέργειας, οφείλουν να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες πέρα από την μέγιστη τιμή που έχει θεωρηθεί ως ικανή για τη διόρθωση των ζητημάτων τάσης. Θα πρέπει, δηλαδή, να τεθεί σε λειτουργία η αποθήκευση, ρυθμίζοντας όχι μόνο τη διαδικασία τροφοδότησης, αλλά ταυτόχρονα και την απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο. Μέσα από τις προσομοιώσεις, γίνεται έλεγχος του επιπέδου φόρτισης του συστήματος κάθε χρονική στιγμή, ώστε να διαπιστωθεί εάν η αποθηκευμένη ενέργεια αρκεί για να καλύψει τις επερχόμενες

ανάγκες τροφοδότησης ισχύος. Θα φανεί έτσι, εάν το σύστημα είναι ικανό να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για τη διατήρηση της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα, και συνεπώς τη διόρθωση των βυθίσεων στην είσοδο των τρένων. Στην περίπτωση που αυτό δε συμβεί, οφείλουν να πραγματοποιηθούν διορθωτικές κινήσεις με στόχο την καλύτερη διαστασιολόγηση και λειτουργία του συστήματος.

Αντιμετώπιση βυθίσεων τάσης και επαναφορά του επιπέδου φόρτισης των υπερπυκνωτών κατά την πέδηση των τρένων

Για τη δυνατότητα πλήρους επαναφοράς του επιπέδου φόρτισης της αποθήκευσης μετά από κάθε τροφοδότηση ισχύος προς το δίκτυο, οφείλουν να εφαρμοστούν κατάλληλες κινήσεις. Πρώτο βήμα αποτελεί η εύρεση ενός ορίου τάσης πάνω από το οποίο θα ενεργοποιείται η λειτουργία απορρόφησης ισχύος από το δίκτυο, ώστε το σύστημα να επαναφορτίζεται. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχουν δύο πιθανές μεθοδολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν.

Η πρώτη, αφορά τη συνεχή απορρόφηση σταθερού ποσού ισχύος από το δίκτυο όταν η μετρούμενη τάση στο ζυγό σύνδεσης ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο. Κάθε χρονική στιγμή λοιπόν, το σύστημα θα απορροφάει σταθερή ισχύ έως ότου ολοκληρωθεί η φόρτισή του. Στην περίπτωση αυτή, δεν εξετάζεται η συμπεριφορά της τάσης του ζυγού κατά την απορρόφηση. Θα πρέπει, ωστόσο, να ελεγχθεί ότι η τάση στο ζυγό, μετά από κάθε απορρόφηση, δεν πέφτει κάτω από το κατώφλι (των 718V στη συγκεκριμένη περίπτωση) που έχει ορισθεί ως το ελάχιστο επιτρεπτό. Ο έλεγχος πραγματοποιείται μέσα από εκτέλεση προσομοιώσεων κατά τις οποίες θα μελετηθεί η αποτελεσματικότητα λειτουργίας της αποθήκευσης. Ελέγχεται, δηλαδή, εάν η ποσότητα απορροφούμενης ισχύος αρκεί ώστε να καλυφθούν οι επερχόμενες βυθίσεις τάσης στο ζυγό, και συνεπώς στην είσοδο των τρένων, καθώς επίσης και αν παραβιάζονται τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας που έχουν τεθεί. Επισημαίνεται, στο σημείο αυτό, ότι υπάρχει και δυνατότητα επιλογής συνεχούς φόρτισης της αποθήκευσης καθ' όλη τη διάρκεια κίνησης των τρένων και όχι απαραίτητα κατά την πέδησή τους στις γραμμές. Το σύστημα δηλαδή, θα απορροφάει σταθερό ποσό ισχύος, προκαθορισμένης τιμής, σε κάθε χρονική στιγμή στην οποία δεν παρατηρούνται ανεπιθύμητες βυθίσεις τάσης, έως ότου να φορτιστεί πλήρως. Και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει προφανώς να εκτελείται έλεγχος σχετικά με τα επιτρεπτά όρια τάσης που έχουν τεθεί για το κάθε δίκτυο.

Η δεύτερη στρατηγική, στηρίζεται στην απορρόφηση μεταβλητού ποσού ισχύος κατά την πέδηση των τρένων στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόζεται ταυτόχρονα και έλεγχος διατήρησης της τάσης σε ένα άνω όριο. Αυτό σημαίνει ότι η λειτουργία απορρόφησης ισχύος θα ενεργοποιείται μόνο όταν η μετρούμενη στο ζυγό τάση ξεπερνάει μια συγκεκριμένη τιμή. Συνεπώς, το ποσό ισχύος που θα απορροφάει το σύστημα, θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση τάσης σε κάποιο προκαθορισμένο όριο, διότι εάν η τάση πέφτει κάτω από αυτό θα δημιουργηθούν προβλήματα στη λειτουργία του. Αυτό συμβαίνει διότι το σύστημα δρα με βάση τη μετρούμενη στα άκρα του τάση, και επομένως όπως και κατά τη διαδικασία παροχής ισχύος έτσι και κατά τη διαδικασία απορρόφησης, θα πρέπει να εκτελείται κάποιος έλεγχος για τη διατήρηση της τάσης σε συγκεκριμένα όρια.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι μια διορθωτική κίνηση που αφορά τη διαστασιολόγηση ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί θεωρώντας ότι οι συσκευές που θα τοποθετηθούν έχουν πάρα πολύ μεγάλο ενεργειακό μέγεθος κατά την εκτέλεση προσομοιώσεων. Με αυτό τον τρόπο, μέσα από την κυματομορφή του επιπέδου φόρτισης κάθε μίας, θα μπορεί να βρεθεί το ακριβές μέγεθος που θα επιτρέπει την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων για τη διόρθωση κάθε προβλήματος τάσης. Αυτό, διότι μέσω της διαδικασίας φόρτισης που έχει επιλεγεί μπορεί σε ορισμένα σημεία να μην απορροφάται η απαραίτητη για τη διόρθωση των βυθίσεων ενέργεια, και συνεπώς η αρχική διαστασιολόγηση να μην εξυπηρετεί στην επίλυση κάθε μίας από αυτές. Από το προφίλ του επιπέδου φόρτισης, επιλέγοντας ως αρχική τιμή εκκίνησης το 100% και έχοντας ορίσει τον τρόπο μέσω του οποίου θα απορροφάται ενέργεια ώστε να ξαναγεμίζει η συσκευή, θα βρεθεί η ελάχιστη τιμή στην οποία φτάνει η καμπύλη. Με βάση την τιμή αυτή, θα βρεθεί και το μέγεθος που τελικά θα πρέπει να επιλεγεί για τη διαστασιολόγηση ενέργειας. Παραδείγματος χάρη, εάν η ελάχιστη τιμή στην οποία φτάνει το επίπεδο φόρτισης μιας μονάδας αποθήκευσης είναι το 50%, η επιλογή του μεγέθους όσον αφορά τις δυνατότητες παροχής ενέργειας από αυτή, θα είναι το μισό της αρχικά μεγάλης τιμής που επιλέχθηκε. Αυτό, ωστόσο, συνεπάγεται να έχουν ελεγχθεί οι πιθανές στρατηγικές επαναφόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης ώστε να επιλεγεί εκείνη που δε δημιουργεί περαιτέρω προβλήματα στο δίκτυο, όπως επιπλέον πτώσεις τάσης κλπ.

Ένα επιπλέον ζήτημα αποτελεί το γεγονός ότι η παραπάνω στρατηγική, μπορεί να οδηγήσει σε λύσεις οι οποίες να είναι οικονομικά ασύμφορες για το διαχειριστή του δικτύου. Παραδείγματος χάρη, οι περιπτώσεις κατά τις οποίες η απαιτούμενη ενέργεια για τη διόρθωση των βυθίσεων δεν επαρκεί μπορεί να είναι πολύ λίγες, με αποτέλεσμα η επιλογή κάποιας μεγαλύτερης διαστασιολόγησης να επιφέρει τελικά μεγαλύτερα κόστη από ότι κέρδη. Είναι φανερό λοιπόν, ότι παρόλο που η παραπάνω διαδικασία μπορεί να βρίσκει κατευθείαν το μέγεθος που θα εξυπηρετήσει στη διόρθωση όλων των προβλημάτων τάσης (ανάλογα με τη στρατηγική ελέγχου που ακολουθείται), η επιλογή της μπορεί να αποβεί αρκετά κοστοβόρα. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να γίνουν προσεκτικές μελέτες για την εύρεση της καταλληλότερης και πιο οικονομικά συμφέρουσας ενεργειακής διαστασιολόγησης των συστημάτων αποθήκευσης.

Απορρόφηση σταθερού ποσού ισχύος

Για την εφαρμογή της μεθόδου οφείλουν, αρχικά, να υπολογιστούν δύο σημαντικές παράμετροι με βάση τις οποίες θα λειτουργήσει το σύστημα αποθήκευσης. Η πρώτη θα είναι το όριο πάνω από το οποίο θα ενεργοποιείται η λειτουργία φόρτισης της συσκευής, και η δεύτερη το σταθερό ποσό στιγμιαίας ισχύος που θα απορροφάει από το δίκτυο. Για την εύρεση των παραπάνω οφείλουν να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις στο δίκτυο με λειτουργία της συσκευής αποθήκευσης και συνεχή μεταβολή των παραμέτρων, έως ότου να βρεθεί ο αποτελεσματικότερος συνδυασμός τιμών. Στόχος είναι η εύρεση των τιμών εκείνων που θα περιορίζουν όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα την υψηλή τάση που προκαλείται κατά την πέδηση των τρένων, ενώ παράλληλα θα επιτρέπουν στη συσκευή αποθήκευσης να φτάνει στα κατάλληλα επίπεδα φόρτισης ώστε να μπορεί να αντιμετωπίσει τις επερχόμενες βυθίσεις τάσης στο ζυγό. Σημαντικό επίσης καθίσταται το γεγονός, να εκτελείται η φόρτιση της αποθήκευσης κατά τα διαστήματα πέδησης των τρένων και όχι όταν αυτά επιταχύνουν. Με αυτό τον τρόπο, δε θα δημιουργούνται περαιτέρω

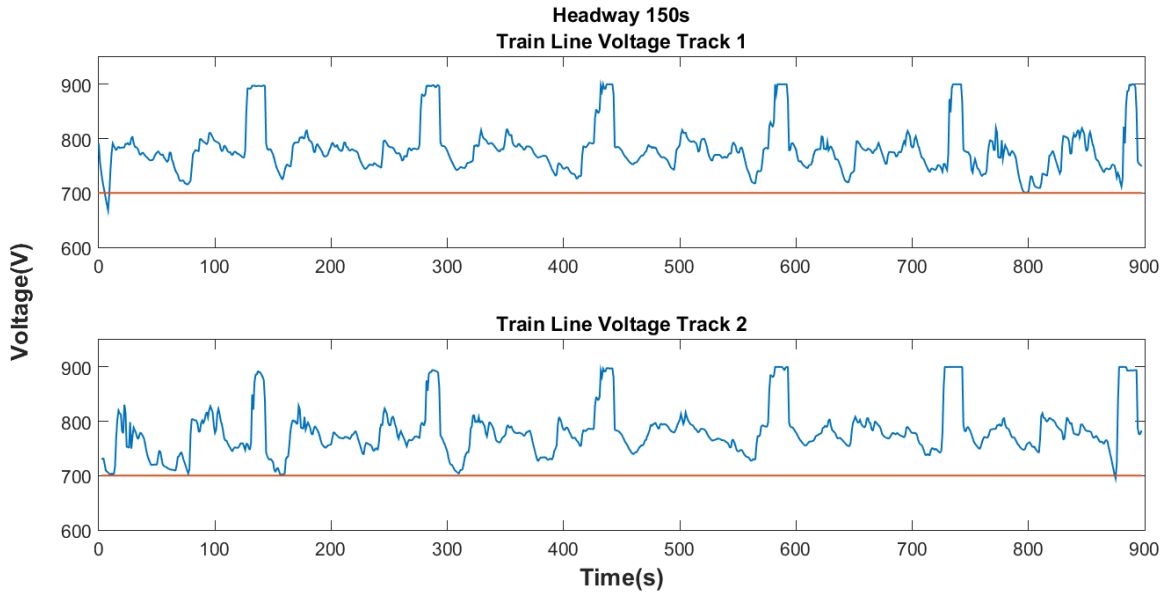
προβλήματα βυθίσεων, ενώ παράλληλα θα αποκόπτονται και οι υψηλές αιχμές τάσης στην είσοδο των τρένων. Έτσι, και θα μειωθούν οι σημαντικές διακυμάνσεις της τάσης, αλλά και δε θα δημιουργούνται προβλήματα στην είσοδο των τρένων κατά την απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο. Μετά από εκτέλεση προσομοιώσεων στο δίκτυο και εναλλαγή των εν λόγω παραμέτρων, βρέθηκε ως αρκετά αποτελεσματική λύση ο συνδυασμός των τιμών τάσης και ισχύος που παρουσιάζεται στον πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6: Παράμετροι λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης

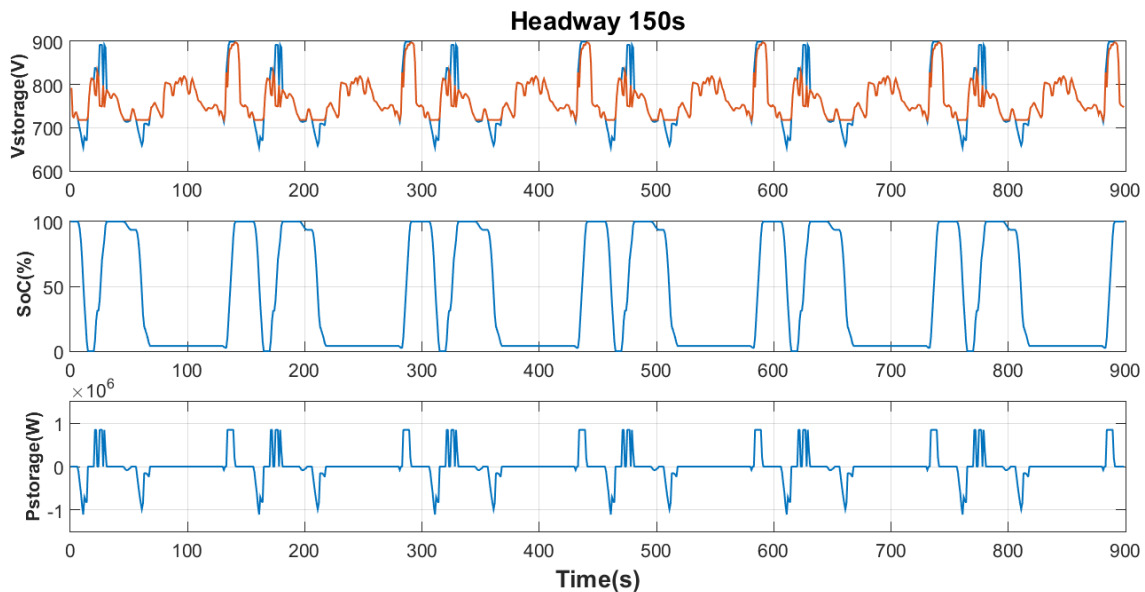
Άνω όριο ενεργοποίησης της αποθήκευσης (V)	Σταθερή απορροφούμενη ισχύς (MW)
830	0.85

Εφαρμόζοντας το παραπάνω σενάριο βρέθηκε ότι η αποθήκευση φορτίζει πλήρως στα διαστήματα ανάμεσα από εκείνα που χρειάζεται να παρέχει ισχύ προς το δίκτυο. Συνεπώς η απορροφούμενη ισχύς επαρκεί για τη διόρθωση των βυθίσεων τάσης στο ζυγό και, επομένως, στην είσοδο των τρένων. Δεδομένου ότι μετά την ένωση των δύο γραμμών τα προβλήματα βυθίσεων τάσης στα μεγαλύτερα headway είναι πολύ λίγα, είναι λογικό στα συγκεκριμένα σενάρια το σύστημα αποθήκευσης να είναι τα περισσότερα χρονικά διαστήματα γεμάτο και να χρησιμοποιεί ελάχιστη από την αποθηκευμένη ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών τάσης. Συνεπώς, όπως παρουσιάζεται και στη συνέχεια, αισθητά αποτελέσματα βελτίωσης παρατηρούνται στην περίπτωση του headway των 150s όπου η μονάδα αποθήκευσης βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία για την αντιμετώπιση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων.

Κατά την εκτέλεση των προσομοιώσεων, γίνεται η παραδοχή ότι η αρχική τιμή φόρτισης της αποθήκευσης είναι στο 100%. Το σύστημα δηλαδή, ξεκινάει πάντα ως πλήρως φορτισμένο. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για κάθε headway παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν τη διορθωμένη τάση στην είσοδο των τρένων της γραμμής 1 και 2 αντίστοιχα. Σε αυτές είναι ενσωματωμένο και το όριο των 700V κάτω από το οποίο δεν πρέπει να βρίσκεται η τάση. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η κυματομορφή τάσης του ζυγού σύνδεσης, όπου με μπλε χρώμα αναπαρίσταται η τάση πριν την ενεργοποίηση της αποθήκευσης ενώ με κόκκινο η αντίστοιχη τάση μετά την ενεργοποίησή της. Αμέσως μετά, η καμπύλη του επιπέδου φόρτισης του συστήματος συναρτήσει του χρόνου, και τέλος το ποσό ισχύος που αυτό απορροφά η τροφοδοτεί προς το δίκτυο για την αντιμετώπιση των ανεπιθύμητων βυθίσεων. Σημειώνεται επίσης, ότι με αρνητικό πρόσημο αναπαρίστανται οι ισχύς τροφοδότησης προς το ζυγό, ενώ με θετικό αυτές που η αποθήκευση απορροφά από το δίκτυο.



Σχήμα 4.11: Κυματομορφές τάσης στην είσοδο των τρένων γραμμής 1 και 2 αντίστοιχα για headway 150s

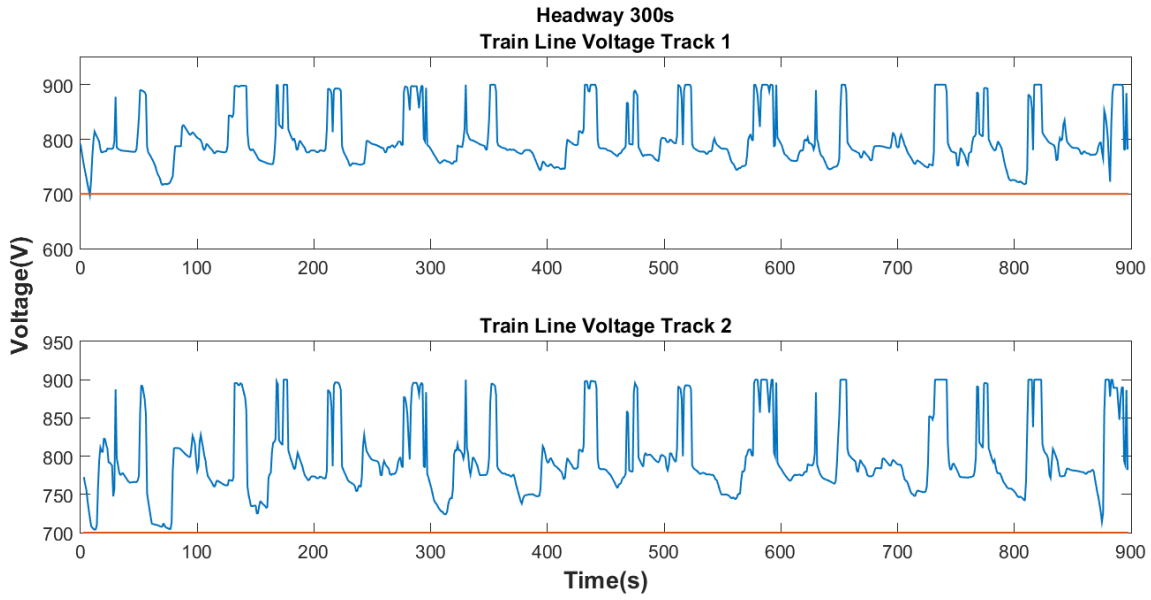


Σχήμα 4.12: Τάση ζυγού σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίηση της αποθήκευσης, επίπεδο φόρτισης και προφίλ ισχύος αποθήκευσης

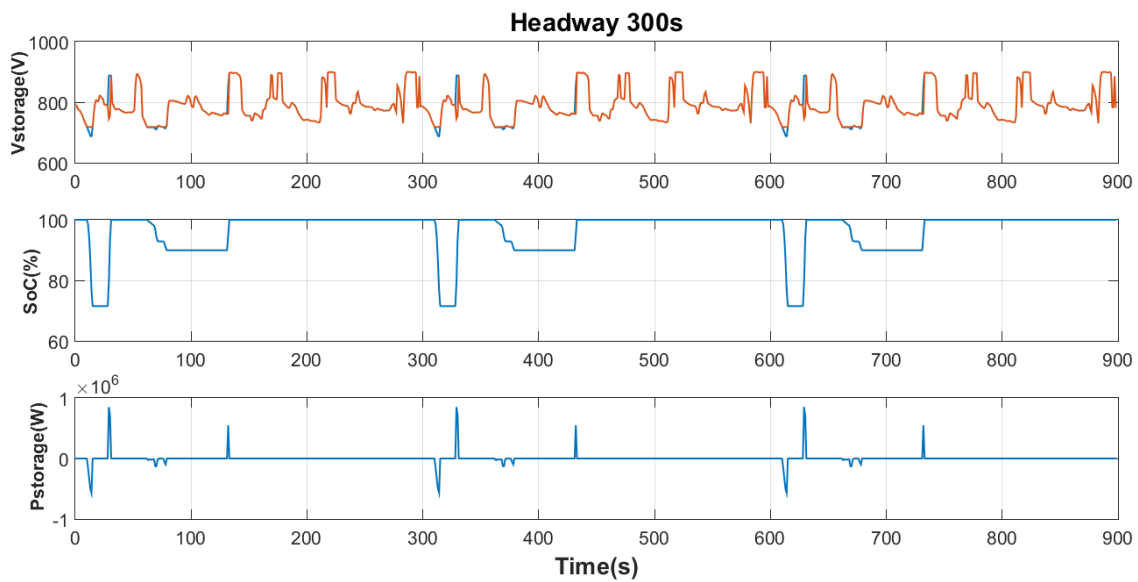
Παρατηρώντας τις καμπύλες τάσης είναι εμφανές ότι εκτελείται αποτελεσματική διόρθωση κάθε βύθισης στο ζυγό σύνδεσης και στην είσοδο των τρένων κοντά στα σημεία που τοποθετήθηκε το σύστημα. Επιπλέον, μετά από κάθε τροφοδότηση ισχύος η αποθήκευση φορτίζει πλήρως κατά τα διαστήματα πέδησης των οχημάτων, με αποτέλεσμα να περιορίζεται αρκετά αποτελεσματικά και το άνω όριο της τάσης στο ζυγό. Υπάρχουν ωστόσο και κάποια χρονικά διαστήματα στα οποία η ανύψωση τάσης είναι μεγάλη και το σύστημα αδυνατεί να την περιορίσει.

Αυτό συμβαίνει διότι τις χρονικές αυτές στιγμές υπάρχουν τρένα που φρενάρουν σε σημεία που βρίσκονται κοντά στην εγκατάσταση της μονάδας αποθήκευση και συνεπώς το ποσό ισχύος που απορροφάται από το δίκτυο δεν είναι επαρκές ώστε να ρίξει την τάση σε χαμηλότερα επίπεδα. Αυτό είναι βέβαιο και λογικό εφόσον η διαστασιολόγηση έχει πραγματοποιηθεί με βάση τις βυθίσεις τάσης οι οποίες δεν απαιτούν τόσο μεγάλα ποσά παρεχόμενης ισχύος ώστε να διορθωθούν. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το επίπεδο φόρτισης του συστήματος, δηλαδή το διαθέσιμο ποσό ενέργειας που είναι ελεύθερο για επιπλέον αποθήκευση, συνδράμουν στην αδυναμία περιορισμού των υψηλών αιχμών τάσης στο ζυγό. Συνεπώς, η διόρθωση των ανυψώσεων αυτών θα απαιτούσε μια αρκετά μεγαλύτερη διαστασιολόγηση, τόσο σε θέματα ισχύος όσο και σε θέματα ενέργειας. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις που επιτυγχάνεται περιορισμός της τιμής τάσης κατά τις ανυψώσεις, τα τρένα που φρενάρουν δεν βρίσκονται κοντά στο σημείο εγκατάστασης της αποθήκευσης. Πιο συγκεκριμένα η ανύψωση τάσης που προκαλείται από αυτά, μεταδίδεται στη γραμμή και συνεπώς και στο ζυγό σύνδεσης. Επομένως, παρά το γεγονός ότι και σε αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται μεγάλη ανύψωση τάσης στο ζυγό, στην ουσία δεν υπάρχει κάποια κοντινή πηγή που να ευθύνεται για την τροφοδότηση μεγάλων τιμών ρεύματος προς το δίκτυο προκαλώντας την απότομη αύξηση στην τάση. Αυτός είναι και ο λόγος που με μικρή απορρόφηση ισχύος επιτυγχάνεται σημαντική μείωση στην τιμή της τάσης στις συγκεκριμένες περιπτώσεις.

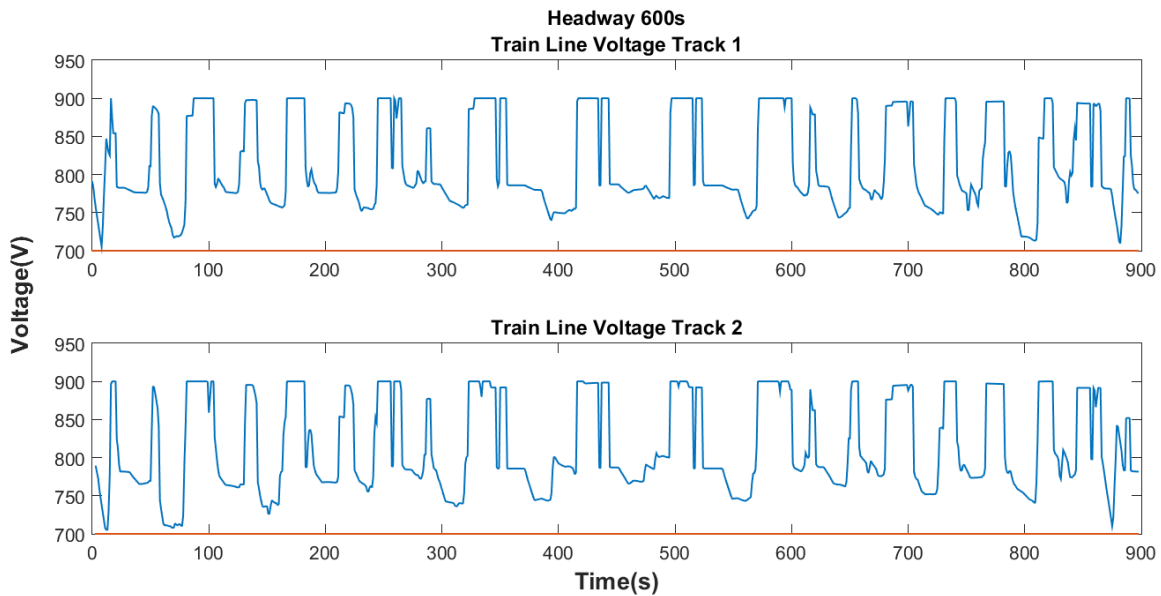
Σημαντική παρατήρηση αποτελεί επίσης το γεγονός ότι κατά το πρώτο διάστημα που παρουσιάζεται πτώση τάσης, η αποθήκευση καλύπτει ιδανικά τις ενεργειακές ανάγκες του δικτύου, αδειάζοντας πλήρως και παρέχοντας την απαραίτητη ισχύ για τη διόρθωσή της. Αυτό είναι λογικό διότι με βάση το διάστημα αυτό πραγματοποιήθηκε και η διαστασιολόγηση ενέργειας εξαρχής. Η αποθήκευση λοιπόν αδειάζει πλήρως παρέχοντας συγκεκριμένα ποσά ισχύος κάθε χρονική στιγμή, και στη συνέχεια φορτίζει με σταθερό ρυθμό έως ότου να επανέλθει σε πλήρες επίπεδα φόρτισης (100%). Η φόρτιση ξεκινάει τη στιγμή που η τάση στο ζυγό ξεπεράσει το όριο των 830V που έχει τεθεί. Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, κατά την απορρόφηση ισχύος η τάση στο ζυγό σύνδεσης της αποθήκευσης μειώνεται και το σύστημα αποθήκευσης φορτίζεται. Καθώς φορτίζεται, παρατηρείται ότι κάποια στιγμή φτάνει το επίπεδο πλήρους φόρτισης και συνεπώς δε μπορεί να απορροφήσει περαιτέρω ισχύ. Στη συνέχεια εκφορτίζεται ξανά και η διαδικασία επαναλαμβάνεται αντιστοίχως με αποτέλεσμα τη διόρθωση των βυθίσεων τάσης κάτω από τα 718V στο ζυγό σύνδεσης της αποθήκευσης. Παράλληλα, εκτελείται και ορισμένος περιορισμός των απότομων ανυψώσεων τάσης οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο ζυγό.



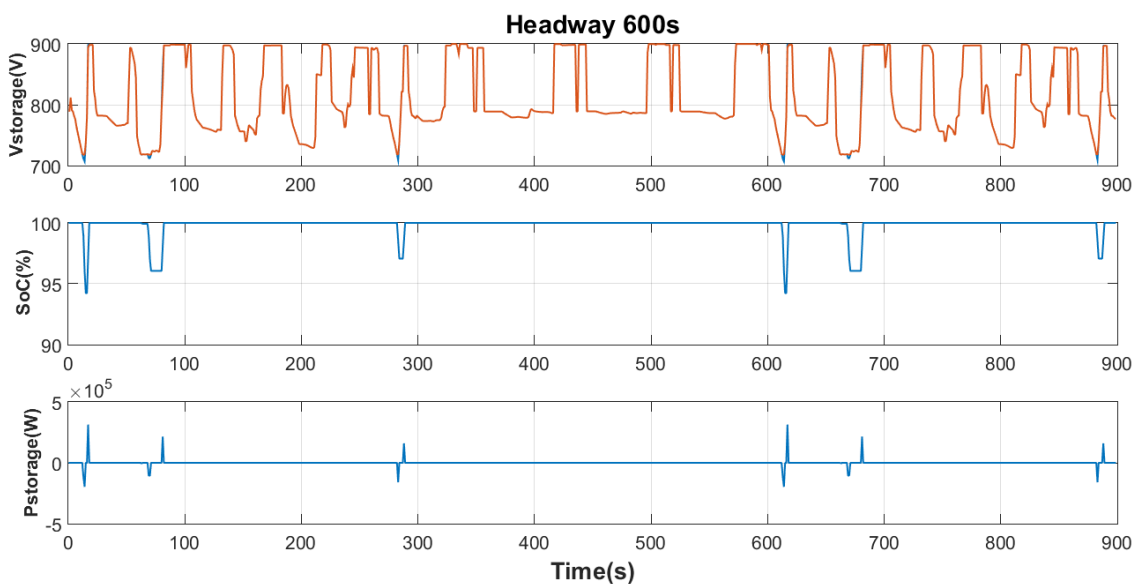
Σχήμα 4.13: Κυματομορφές τάσης στην είσοδο των τρένων γραμμής 1 και 2 αντίστοιχα για headway 300s



Σχήμα 4.14: Τάση ζυγού σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίηση της αποθήκευσης, επίπεδο φόρτισης και προφίλ ισχύος αποθήκευσης



Σχήμα 4.15: Κυματομορφές τάσης στην είσοδο των τρένων γραμμής 1 και 2 αντίστοιχα για headway 600s



Σχήμα 4.16: Τάση ζυγού σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίηση της αποθήκευσης, επίπεδο φόρτισης και προφίλ ισχύος αποθήκευσης

Σε αυτές τις περιπτώσεις, όπου μετά την ένωση των γραμμών του δικτύου παρατηρούνται ελάχιστα προβλήματα βυθίσεων τάσης, η λειτουργία της αποθήκευσης είναι πολύ μικρή. Παρά το γεγονός ότι εξυπηρετεί αποτελεσματικά το σκοπό της, όσον αφορά τη διόρθωση πτώσεων τάσης στην είσοδο των τρένων, δε βοηθάει καθόλου στον περιορισμό των ανυψώσεων τάσης του ζυγού. Αυτό γίνεται κατανοητό και από τα παραπάνω διαγράμματα μέσα από τα οποία είναι εμφανές ότι το σύστημα βρίσκεται, σχεδόν πάντα, σε επίπεδα πλήρους φόρτισης αφού οι ανάγκες παροχής

ισχύος είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις ανάγκες απορρόφησης που δημιουργούνται κατά τις ανυψώσεις τάσης στο ζυγό σύνδεσης. Επιπλέον, το μέγεθος που έχει επιλεγεί για την αποθήκευση είναι πολύ μεγάλο, διότι η διαστασιολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση το σενάριο των 150s που ήταν το μοναδικό κατά το οποίο παρουσιάζονταν σημαντικά προβλήματα βυθίσεων τάσης, άξια προς αντιμετώπιση. Για το λόγο αυτό, η μελέτη του πρώτου ενδεικτικού σεναρίου βοηθάει περισσότερο στην κατανόηση λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης η οποία, στη συγκεκριμένη περίπτωση, έχει σαφώς μεγαλύτερη αξία. Εφόσον, λοιπόν, το μέγεθος που έχει επιλεγεί είναι πολύ μεγαλύτερο από τις ενεργειακές ανάγκες που απαιτούνται για τη διόρθωση των βυθίσεων στα μεγαλύτερα headway, εάν το δίκτυο λειτουργεί κυρίως σε αυτά, θα ήταν λογικότερη μια μικρότερη διαστασιολόγηση του συστήματος αποθήκευσης. Ωστόσο, αυτό αποτελεί επιλογή του διαχειριστή ο οποίος λαμβάνει υπόψη όλους αυτούς τους παράγοντες και αποφασίζει για το τελικό μέγεθος ανάλογα με τους περιορισμούς που έχει θέσει όσον αφορά τα κόστη, καθώς και το αποτέλεσμα που σκοπεύει να επιτύχει.

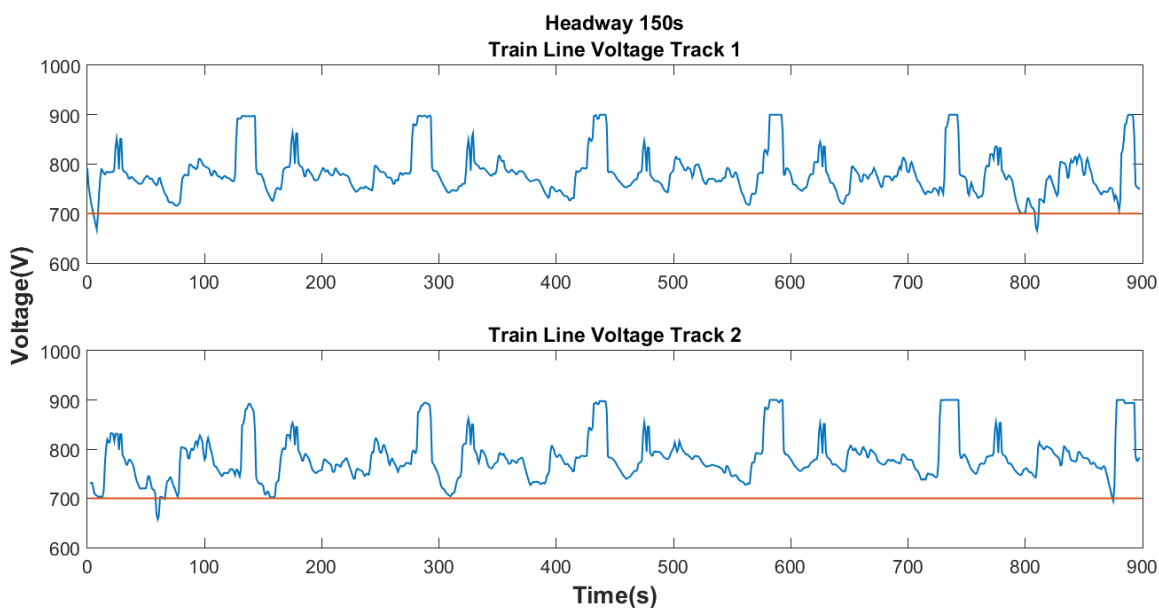
Απορρόφηση μεταβλητού ποσού ισχύος

Η μέθοδος αυτή στοχεύει στη διόρθωση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων, με επιπλέον σταθεροποίηση και των ανυψώσεων σε κάποιο συγκεκριμένο όριο κατά την απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο. Σκοπός λοιπόν, είναι η εύρεση ενός άνω ορίου με βάση το οποίο θα σταθεροποιείται η τάση, ενώ ταυτόχρονα θα εκτελείται αποτελεσματικά διόρθωση των ανεπιθύμητων βυθίσεων στην είσοδο των τρένων. Θα πρέπει, δηλαδή, το ποσό απορροφούμενης από το δίκτυο ενέργειας να είναι επαρκές ώστε να διορθώσει τις ανεπιθύμητες πτώσεις τάσης. Η μεθοδολογία που ακολουθείται είναι αντίστοιχη με αυτή που αναφέρθηκε για την αντιμετώπιση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων με απορρόφηση σταθερού ποσού ισχύος. Η κύρια διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή, απαιτείται ο υπολογισμός μίας παραμέτρου αντί για δύο, με βάση την οποία θα λειτουργεί το σύστημα αποθήκευσης. Αυτή αφορά το κατάλληλο άνω όριο στο οποίο θα πρέπει να σταθεροποιείται η τάση κατά τις ανυψώσεις που δημιουργούνται λόγω της πέδησης των τρένων στις γραμμές. Με μια σωστή επιλογή λοιπόν, θα επιλύεται το κεντρικό ζητούμενο που είναι η διόρθωση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων. Όσον αφορά την ισχύ που θα απορροφάει το σύστημα από το δίκτυο, αυτή θα υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζεται η προσφερόμενη ισχύς για τη σταθεροποίηση των βυθίσεων τάσης.

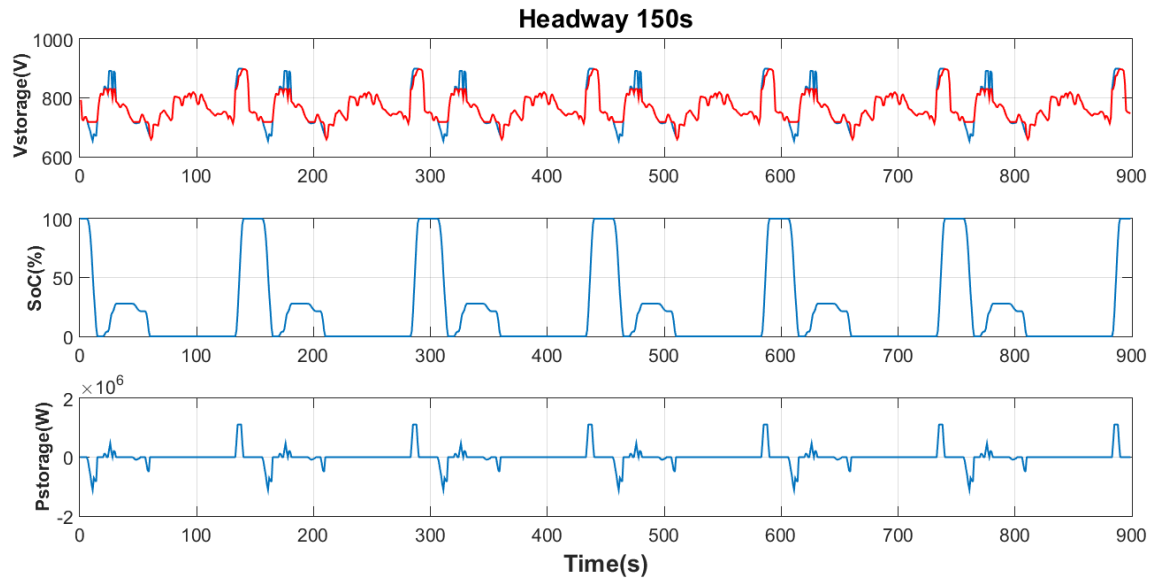
Η επιλογή για τη διαστασιολόγηση και βέλτιστη τοποθέτηση των συστημάτων αποθήκευσης προφανώς και δε θα αλλάξει αφού ο στόχος της μεθοδολογίας παραμένει ο ίδιος. Αυτό που ενδέχεται να μεταβληθεί είναι το άνω όριο ενεργοποίησης της αποθήκευσης στο οποίο θα πρέπει και να σταθεροποιείται η τάση κατά τις ανυψώσεις. Σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη επίσης, είναι το γεγονός ότι για τη σταθεροποίηση του άνω ορίου στην τιμή που επιλέχθηκε, μπορεί να απαιτούνται υψηλότερα ποσά απορρόφησης στιγμιαίας ισχύος από την αποθήκευση. Για την ισχύ αυτή θα πρέπει να γίνεται έλεγχος κάθε χρονική στιγμή κατά την εκτέλεση προσομοιώσεων, ώστε να μην ξεπερνάει το μέγιστο επιτρεπτό όριο που έχει τεθεί από τη διαστασιολόγηση. Στο συγκεκριμένο δίκτυο που μελετάται, επιλέχθηκε ως άνω όριο σταθεροποίησης της τάσης με βάση το οποίο θα απορροφάται η απαραίτητη για τη διόρθωση των

βυθίσεων ενέργεια, η τιμή των 830V. Στο σημείο αυτό, γίνεται και πάλι η παραδοχή ότι το σύστημα αποθήκευσης ξεκινάει ως πλήρως φορτισμένο κατά την εκκίνηση των προσομοιώσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ροής φορτίου που λήφθηκαν κατά την προσπάθεια διόρθωσης των βυθίσεων με ταυτόχρονη σταθεροποίηση των ανυψώσεων τάσης στην προαναφερθείσα τιμή. Επισημαίνεται ότι κύριος στόχος είναι η διόρθωση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων και όχι η σταθεροποίησή των ανυψώσεων στο ζυγό σύνδεσης.

Στο σχήμα 4.17 απεικονίζονται οι καμπύλες τάσης στην είσοδο των τρένων της γραμμής 1 και 2 αντίστοιχα μετά την εφαρμογή του παραπάνω σεναρίου. Στη συνέχεια, στο σχήμα 4.18 παρουσιάζονται η κυματομορφή τάσης του ζυγού σύνδεσης, όπου με μπλε χρώμα είναι η τάση πριν την ενεργοποίηση της αποθήκευσης ενώ με κόκκινο η αντίστοιχη μετά την ενεργοποίησή της, η καμπύλη του επιπέδου φόρτισης του συστήματος συναρτήσει του χρόνου, καθώς επίσης και το ποσό ισχύος που αυτό απορροφά η τροφοδοτεί προς το δίκτυο για την αντιμετώπιση των ανεπιθύμητων βυθίσεων. Υπενθυμίζεται ότι με αρνητικό πρόσημο αναπαρίστανται οι ισχύς τροφοδότησης προς το ζυγό, ενώ με θετικό αυτές που η αποθήκευση απορροφά από το δίκτυο.



Σχήμα 4.17: Κυματομορφές τάσης στην είσοδο των τρένων γραμμής 1 και 2 αντίστοιχα για headway 150s

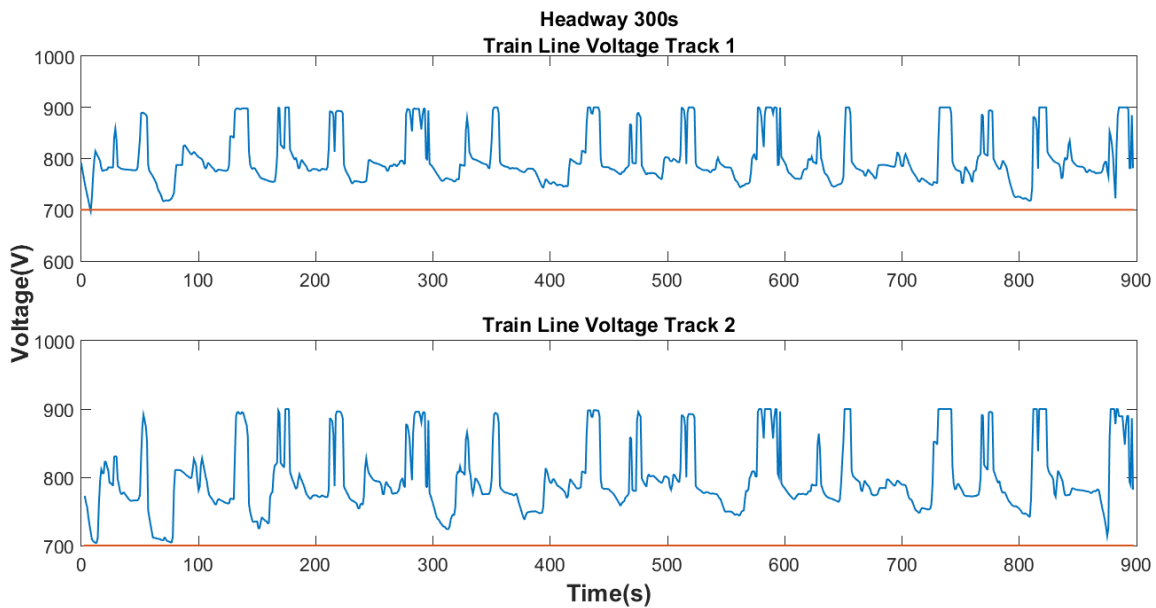


Σχήμα 4.18: Τάση ζυγού σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίηση της αποθήκευσης, επίπεδο φόρτισης και προφίλ ισχύος αποθήκευσης

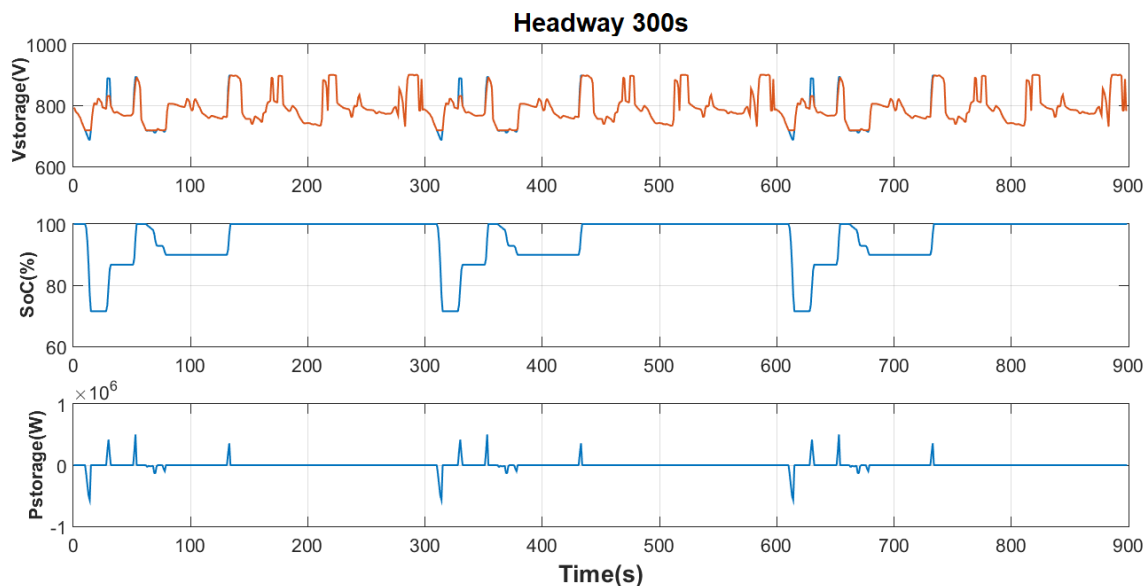
Παρατηρώντας τις καμπύλες τάσης, είναι εμφανές ότι δεν εκτελείται αποτελεσματική διόρθωση των βυθίσεων στο ζυγό σύνδεσης της αποθήκευσης και συνεπώς ούτε στην είσοδο των τρένων. Υπάρχουν, δηλαδή, διαστήματα στα οποία η αποθήκευση δε διαθέτει την απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται να τροφοδοτήσει προς το δίκτυο. Για παράδειγμα, στο χρονικό διάστημα [58,66] η αποθήκευση έχει πλέον αδειάσει και δε μπορεί να διορθώσει τη βύθιση που παρατηρείται στο ζυγό σύνδεσης. Υπάρχουν ωστόσο και διαστήματα στα οποία η αποθήκευση φορτίζει πλήρως και δουλεύει αποτελεσματικά. Αυτό όμως θα έπρεπε να συμβαίνει πάντα με σκοπό τη διόρθωση όλων των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των μεγαλύτερων headway, παρατηρήθηκε ότι το σύστημα βρίσκεται, σχεδόν πάντα, σε επίπεδα πλήρους φόρτισης, γεγονός που είναι λογικό αφού οι ανάγκες παροχής ισχύος είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις ανάγκες απορρόφησης που δημιουργούνται κατά τις ανυψώσεις τάσης στο ζυγό σύνδεσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διόρθωση όλων των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων οι οποίες παρατηρούνται κοντά στο σημείο εγκατάστασης του συστήματος. Στις περιπτώσεις λοιπόν αυτές, στις οποίες μετά την ένωση των γραμμών τα προβλήματα βυθίσεων που παρουσιάζονται στην είσοδο των τρένων είναι ελάχιστα, η μέθοδος που εφαρμόστηκε για τη διόρθωσή τους δεν έχει ουσιαστική διαφορά από την προηγούμενη (απορρόφηση σταθερού ποσού ισχύος). Το γεγονός αυτό γίνεται πιο κατανοητό και μέσα από τις γραφικές, από τις οποίες φαίνεται ότι το επίπεδο φόρτισης της συσκευής βρίσκεται κατά βάση στο 100%, γεγονός που σημαίνει ότι η λειτουργία της είναι πολύ μικρή. Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για το σενάριο των 300s στα σχήματα 4.19 και 4.20. Οι πολυπληθής ανυψώσεις τάσης που παρατηρούνται στις περιπτώσεις αυτές, σε συνδυασμό με τη μικρή ανάγκη παροχής ισχύος προς το δίκτυο, συμβάλλουν επιπλέον στην αδυναμία περιορισμού και σταθεροποίησης της τάσης του ζυγού στα 830V. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι αυτό δεν αποτελεί τον κεντρικό στόχο του πειράματος, η συγκεκριμένη μεθοδολογία που

ακολουθήθηκε στις περιπτώσεις αυτές (των μεγαλύτερων headway) καθίσταται ανούσια από τη στιγμή που δε βοηθάει καθόλου στη σταθεροποίηση τάσης του ζυγού σύνδεσης κατά τις ανυψώσεις.



Σχήμα 4.19: Κυματομορφές τάσης στην είσοδο των τρένων γραμμής 1 και 2 αντίστοιχα για headway 300s

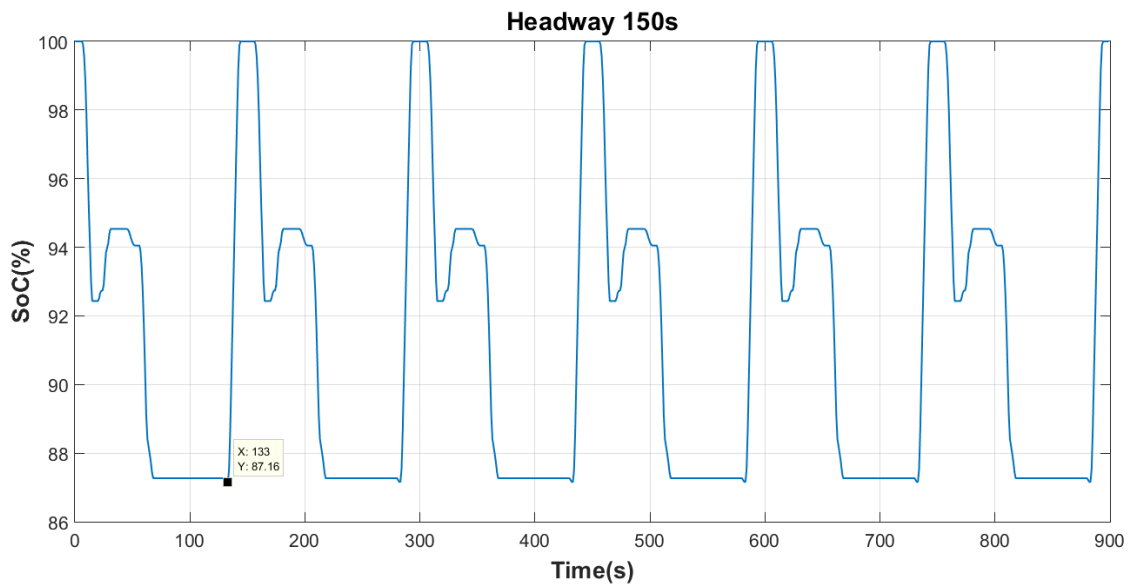


Σχήμα 4.20: Τάση ζυγού σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίηση της αποθήκευσης, επίπεδο φόρτισης και προφίλ ισχύος αποθήκευσης

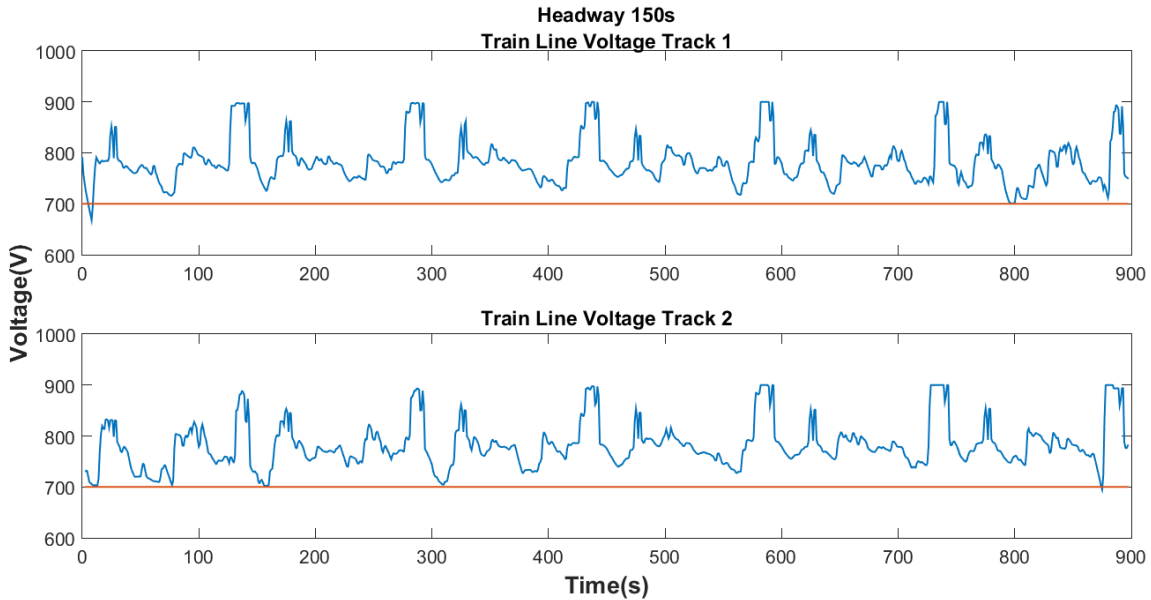
Για τη βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος και την αποτελεσματική διόρθωση κάθε βύθισης τάσης σε όλα τα σενάρια, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες διορθωτικές κινήσεις. Η

λύση μπορεί να βρίσκεται είτε στην εκ νέου διαστασιολόγηση της μονάδας αποθήκευσης που πρόκειται να εγκατασταθεί, ή στην αλλαγή στρατηγικής ελέγχου που ακολουθείται. Από την καμπύλη του επιπέδου φόρτισης στο σενάριο των 150s, παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν σημεία στα οποία η αποθήκευση φτάνει σε επίπεδα πλήρους φόρτισης και, συνεπώς, δε μπορεί να απορροφήσει επιπλέον ισχύ από το δίκτυο. Με επιλογή λοιπόν μιας μεγαλύτερης ενεργειακά διαστασιολόγησης, θα μπορούσε να αποθηκευτεί υψηλότερο ποσό ενέργειας στη συσκευή, γεγονός που ενδεχομένως να οδηγούσε στη διόρθωση όλων των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων η οποία δε μπορούσε να πραγματοποιηθεί λόγω έλλειψης αποθηκευμένης ενέργειας.

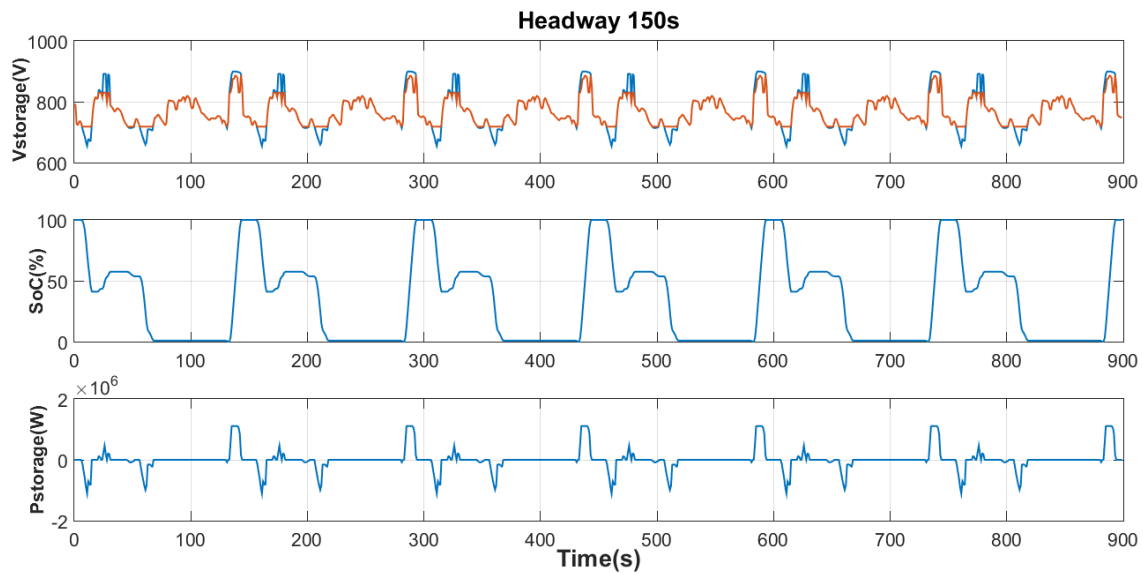
Μία λύση αποτελεί η στρατηγική επιλογής μιας αρκετά μεγάλης διαστασιολόγησης για την εκτέλεση των αρχικών προσομοιώσεων, και στη συνέχεια της εύρεσης του κατάλληλου ενεργειακού μεγέθους μέσω της διαδικασίας που έχει αναφερθεί σε παραπάνω ενότητα. Θέτοντας λοιπόν τη μέγιστη ενεργειακή ικανότητα αποθήκευσης σε πολύ υψηλά επίπεδα (20kWh), λήφθηκε η κυματομορφή του επιπέδου φόρτισης της συσκευής, σχήμα 4.21. Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε στο σενάριο των 150s, διότι εκεί παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ανάγκες παροχής ισχύος προς το δίκτυο για τη διόρθωση των βυθίσεων. Από το προφίλ αυτό, υπολογίστηκε η ελάχιστη τιμή στην οποία φτάνει το επίπεδο φόρτισης (στη συγκεκριμένη περίπτωση στο 87.16%) και μέσα από αυτή, το κατάλληλο μέγεθος που θα πρέπει να έχει το σύστημα αποθήκευσης για τη διόρθωση κάθε ανεπιθύμητης βύθισης τάσης. Για την εύρεση του τελευταίου υπολογίστηκε ότι η χωρητικότητα ενέργειας της συσκευής θα πρέπει να είναι το $(100-87.16)\%=12.84\%$ του αρχικού μεγάλου μεγέθους, το οποίο και είχε επιλεγεί να είναι οι 20kWh. Επομένως η ικανότητα ενέργειας της συσκευής μετρήθηκε ως $12.84\% * 20kWh = 2.568kWh$. Με βάση την καινούρια πλέον διαστασιολόγηση της αποθήκευσης, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις εκ νέου ώστε να διαπιστωθεί εάν αυτή συμβάλλει στην αποτελεσματική πλέον διόρθωση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων. Τα αποτελέσματα των καμπυλών τάσης και των υπόλοιπων σχετικών παραμέτρων, παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.21: Καμπύλη επιπέδου φόρτισης στην περίπτωση που τέθηκε πολύ μεγάλη ενεργειακή διαστασιολόγηση (20kWh) για το σενάριο των 150s



Σχήμα 4.22: Κυματομορφές τάσης στην είσοδο των τρένων γραμμής 1 και 2 αντίστοιχα για headway 150s



Σχήμα 4.23: Τάση ζυγού σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίηση της αποθήκευσης, επίπεδο φόρτισης και προφίλ ισχύος αποθήκευσης

Με την εκτέλεση της διορθωτικής κίνησης, παρατηρείται ότι οι βυθίσεις τάσης στην είσοδο των τρένων που εμφανίζονται στο τέλος της γραμμής 1 και στην αρχή της 2, τώρα εξαλείφονται. Η σταθεροποίηση της τάσης στα 718V στο ζυγό σύνδεσης της αποθήκευσης εκτελείται πλέον αποτελεσματικά επιλύοντας το τρέχον πρόβλημα. Άξιο αναφοράς καθίσταται επίσης το γεγονός, ότι στην καμπύλη τάσης του ζυγού παρατηρείται σημαντική σταθεροποίηση της στα 830V κατά τη διάρκεια των ανυψώσεων. Πιο συγκεκριμένα η μόνη περίπτωση που η τάση

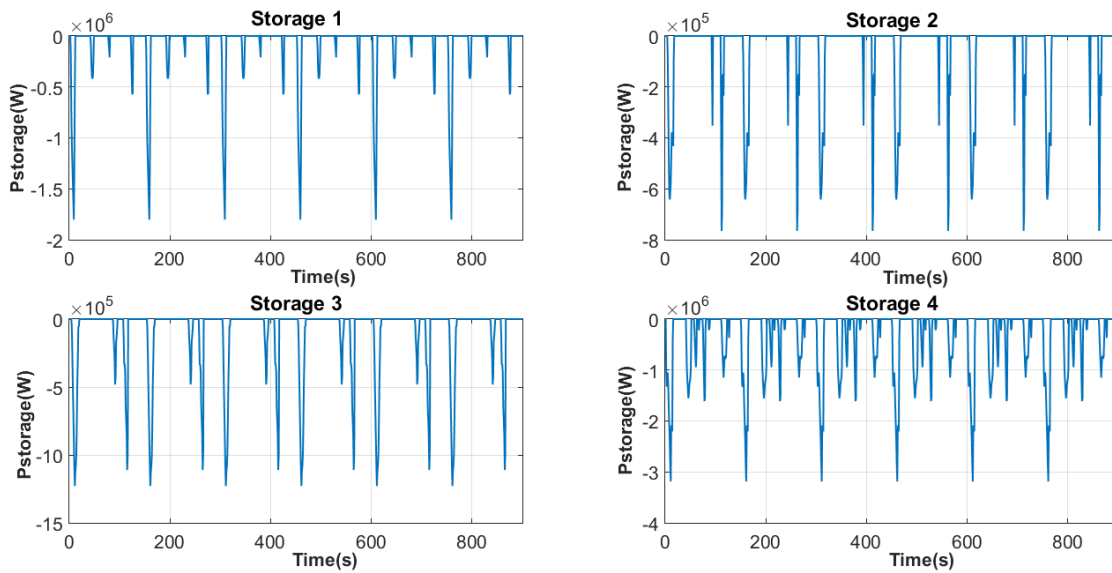
δε σταθεροποιείται στην τιμή αυτή, είναι στα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, τα οχήματα που φρενάρουν βρίσκονται κοντά στο εγκατεστημένο σύστημα αποθήκευσης. Συνεπώς, θα έπρεπε να απορροφηθεί ένα αρκετά μεγάλο ποσό ισχύος προκειμένου να διορθωθεί η ανύψωση στο συγκεκριμένο διάστημα

Είναι εμφανές, λοιπόν, ότι υπάρχουν διάφορες κινήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν με στόχο την καλύτερη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης. Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητάς τους, οφείλουν να εκτελεστούν προσομοιώσεις εκ νέου ώστε να διαπιστωθεί εάν το πρόβλημα μπορεί να διορθωθεί. Στην περίπτωση που αυτό δε συμβεί, θα πρέπει να επιλεγεί κάποια άλλη πιθανή λύση για την αντιμετώπισή του. Σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης και τα οικονομικά κριτήρια. Εάν για παράδειγμα η εφαρμογή μιας τέτοιας κίνησης οδηγεί σε κάποια διαστασιολόγηση η οποία είναι οικονομικά ασύμφορη για το διαχειριστή του δικτύου, τότε θα πρέπει να απορριφθεί. Εξάλλου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επιλογή κάποιου μεγαλύτερου μεγέθους για τα συστήματα αποθήκευσης, μπορεί να επιφέρει τελικά μεγαλύτερα κόστη παρά κέρδη.

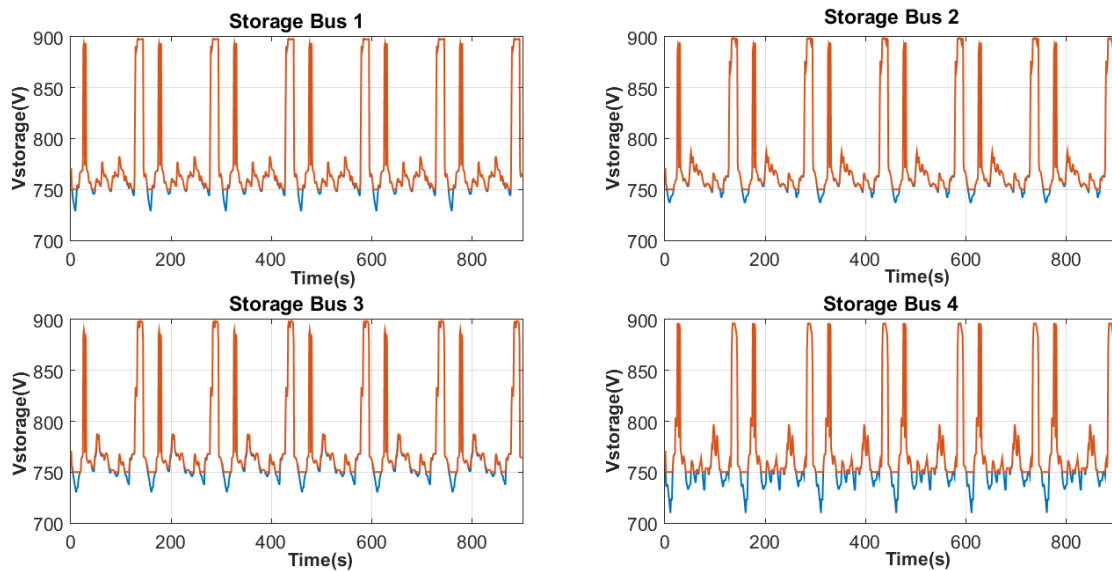
4.2.2 Διόρθωση βυθίσεων τάσης στους ηλεκτρικούς υποσταθμούς

Ως επόμενο βήμα της εργασίας μελετήθηκε η τοποθέτηση συστημάτων αποθήκευσης στους ζυγούς των τεσσάρων υποσταθμών του δικτύου, με στόχο τη διόρθωση των βυθίσεων τάσης σε αυτούς. Το όριο σταθεροποίησης των βυθίσεων, με βάση το οποίο θα τίθενται και σε λειτουργία τα συστήματα, επιλέγεται από το διαχειριστή του δικτύου. Στη συγκεκριμένη εργασία ορίστηκε στα 750V. Για κάθε σύστημα ξεχωριστά, πραγματοποιήθηκε διαστασιολόγηση με βάση τα προφίλ ισχύος που καταγράφηκαν από τις προσομοιώσεις, κατά τις οποίες, αρχικά, δε λήφθηκαν υπόψη τα επίπεδα φόρτισης των συσκευών. Ακολουθήθηκε δηλαδή αντίστοιχη διαδικασία διαστασιολόγησης με την προαναφερθείσα για τη διόρθωση των βυθίσεων στην είσοδο των τρένων. Μέσω του προφίλ ισχύος κάθε συσκευής, βρέθηκαν οι μέγιστες απαιτούμενες τιμές στιγμιαίας ισχύος και ενέργειας με βάση τις οποίες έγινε και η επιλογή για το μέγεθός τους. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η λειτουργία κάθε μονάδας αποθήκευσης επηρεάζει τη λειτουργία των υπόλοιπων και, συνεπώς, για την εύρεση των τιμών ισχύος που θα πρέπει να προσφέρει κάθε συσκευή προς το δίκτυο η διαδικασία είναι αρκετά πιο πολύπλοκη.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το headway των 150s κατά το οποίο καθίσταται και σπουδαιότερη η χρήση των υπερπυκνωτών. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι στο ζυγό του υποσταθμού 4 παρουσιάζονται περισσότερα προβλήματα βυθίσεων τάσης συγκριτικά με τους υπόλοιπους ζυγούς, γεγονός που εξηγεί και τη μεγαλύτερη ανάγκη παροχής ισχύος και ενέργειας από τη συγκεκριμένη μονάδα αποθήκευσης. Στο παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα προφίλ ισχύος των συστημάτων που προκύπτουν από τη λειτουργία τους για σταθεροποίηση της τάσης στα 750V, σχήμα 4.24, και στη συνέχεια η σύγκριση της καμπύλης τάσης των ζυγών σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίησή τους, σχήμα 4.25. Σημειώνεται ότι με μπλε χρώμα αναπαρίσταται η τάση των ζυγών σύνδεσης πριν την ενεργοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης, ενώ με κόκκινο η αντίστοιχη τάση μετά την ενεργοποίησή τους.



Σχήμα 4.24: Προφίλ ισχύος συστημάτων αποθήκευσης



Σχήμα 4.25: Σύγκριση της καμπύλης τάσης των ζυγών σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίηση της αποθήκευσης

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για τις μέγιστες τιμές ισχύος και ενέργειας αντίστοιχα, οι οποίες λήφθηκαν από τα προφίλ ισχύος των συστημάτων αποθήκευσης για κάθε ενδεικτικό headway.

Πίνακας 4.7: Μέγιστη στιγμιαία απαιτούμενη ισχύς συσκευών

Headway (s)	150s	300s	600s
Μέγιστη Ισχύς Συσκευή 1 (MW)	1.8020	0.1605	-
Μέγιστη Ισχύς Συσκευή 2 (MW)	0.7654	0.1111	-
Μέγιστη Ισχύς Συσκευή 3 (MW)	1.2280	0.0185	0.0185
Μέγιστη Ισχύς Συσκευή 4 (MW)	3.1870	1.6670	0.2407

Πίνακας 4.8: Μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια συσκευών

Headway (s)	150s	300s	600s
Μέγιστη Ενέργεια Συσκευή 1 (MW)	2.7326	0.0446	-
Μέγιστη Ενέργεια Συσκευή 2 (MW)	1.5169	0.0532	-
Μέγιστη Ενέργεια Συσκευή 3 (MW)	2.6337	0.0051	0.0051
Μέγιστη Ενέργεια Συσκευή 4 (MW)	6.9582	2.2377	0.2212

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, η διαστασιολόγηση κάθε συστήματος θα πρέπει να εκτελεσθεί με βάση τις τιμές ισχύος και ενέργειας που προέκυψαν από το σενάριο headway των 150s εφόσον είναι οι μεγαλύτερες. Έτσι θα μπορέσει να καλυφθεί και η υψηλότερη παρατηρούμενη πτώση τάσης στους ζυγούς. Ωστόσο, προχωρώντας στη διαδικασία αγοράς των συσκευών, θα ήταν πιο εύκολο για το διαχειριστή να αγοράσει συστήματα αποθήκευσης του ίδιου τύπου, με συγκεκριμένες δηλαδή ονομαστικές ισχύς, αντί για τέσσερα διαφορετικά. Για το λόγο αυτό, η επιλογή του μεγέθους, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω υπολογισμού του μέσου όρου των διαφορετικών τιμών που βρέθηκαν για κάθε συσκευή. Αυτό μπορεί να εκτελεστεί είτε και για όλα τα συστήματα είτε και ανά μερικά, συνδυάζοντας μεταξύ τους εκείνα με τις κοντινότερες μέγιστες τιμές ισχύος και ενέργειας και υπολογίζοντας στη συνέχεια τη μέση τιμή τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα μπορούσε για παράδειγμα να γίνει επιλογή δύο μεγεθών. Λόγω του γεγονότος ότι η μονάδα αποθήκευσης 4 παρουσιάζει αισθητά μεγαλύτερες τιμές λόγω των συχνότερων και πιο ισχυρών πτώσεων τάσης στο ζυγό κάτω από τα 750V, θα ήταν λογικότερο να μη συνδυαστεί με κάποια άλλη τιμή. Αντιθέτως, για τις υπόλοιπες τρεις μονάδες καθίσταται πιο εύλογο να βρεθεί μια

μέση τιμή με βάση την οποία θα εκτελεστεί η διαστασιολόγησή τους. Αυτό βέβαια είναι επιλογή του κάθε διαχειριστή ο οποίος τελικά και θα αποφασίσει για τη στρατηγική που προτιμάει να ακολουθήσει.

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η διαδικασία εύρεσης του κατάλληλου μεγέθους των συσκευών είναι αρκετά πολύπλοκη αφού η λειτουργία κάθε ενός επηρεάζει τη λειτουργία των υπόλοιπων. Στη δυσκολία αυτή συνδράμει και το επίπεδο φόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης σε κάθε χρονική στιγμή. Εάν για παράδειγμα μία μονάδα έχει αποφορτιστεί πλήρως ή δε διαθέτει το απαραίτητο ποσό αποθηκευμένης ενέργειας ώστε να αντιμετωπίσει τις επερχόμενες βυθίσεις, αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την ανεπιθύμητη πτώση τάσης, όχι μόνο στο ζυγό του υποσταθμού που είναι εγκατεστημένη η συγκεκριμένη συσκευή, αλλά και στους ζυγούς των υπόλοιπων υποσταθμών του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, τα άλλα συστήματα θα πρέπει να τροφοδοτήσουν περισσότερη ενέργεια προς το δίκτυο (εφόσον αυτό είναι δυνατό) ώστε να αποζημιώσουν τα καινούρια προβλήματα τάσης που θα δημιουργηθούν στους ζυγούς σύνδεσης, εξαιτίας της αδυναμίας παροχής ενέργειας από το πρώτο. Παραδείγματος χάρη, σε κάποιο ζυγό στον οποίο προηγουμένως μπορεί να μην παρουσιαζόταν πρόβλημα πτώσης στην τάση, πλέον μπορεί να υπάρξει. Συνεπώς η αποθήκευση που είναι συνδεδεμένη σε αυτόν, τώρα θα ενεργοποιηθεί. Για τη διαστασιολόγηση λοιπόν κάθε συσκευής, τα παραπάνω θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, τόσο στην επιλογή μέγιστης ισχύος όσο και ενέργειας που θα πρέπει να είναι σε θέση να τροφοδοτούν. Μετά από την εκτέλεση αντίστοιχων προσομοιώσεων στο δίκτυο και έχοντας επιλέξει απορρόφηση συγκεκριμένου σταθερού ποσού ισχύος για την επαναφόρτιση κάθε συσκευής, λήφθηκαν τα καινούρια προφίλ ισχύος για κάθε μία. Μέσα από αυτά, καθίσταται εμφανές ότι κάποιες μέγιστες τιμές ισχύος έχουν πλέον αλλάξει, λόγω της αδυναμίας τροφοδότησης του απαραίτητου ποσού ενέργειας προς το δίκτυο από κάποιες μονάδες. Αυτό συμβαίνει διότι ο παράγοντας του επιπέδου φόρτισης κάθε συσκευής, επηρεάζει τη λειτουργία των υπόλοιπων συστημάτων, τα οποία μπορεί να χρειαστεί να ενεργοποιηθούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ή ακόμα και να παρέχουν υψηλότερα ποσά ισχύος, εφόσον η απορροφούμενη από το δίκτυο ενέργεια δεν επαρκεί για τη διόρθωση των προβλημάτων τάσης σε κάθε ζυγό. Τα προβλήματα, επομένως, δημιουργούνται σε περίπτωση αδυναμίας φόρτισης των συσκευών ανάμεσα στα διαστήματα ανάγκης παροχής ισχύος από αυτές, γεγονός που μπορεί να οφείλετε σε διάφορους παράγοντες. Για την επιλογή, συνεπώς, του κατάλληλου μεγέθους στην περίπτωση αυτή, καθώς δε μπορεί να εκτελεστεί έλεγχος όλων των δυνατών καταστάσεων των επιπέδων φόρτισης των συσκευών για κάθε δυνατό σενάριο κίνησης των τρένων, θα πρέπει να γίνει ένας συμβιβασμός ώστε να εξυπηρετεί καλύτερα στην αντιμετώπιση των ζητημάτων (στη συγκεκριμένη περίπτωση τις βυθίσεις τάσης που λαμβάνουν χώρα στους ζυγούς των ηλεκτρικών υποσταθμών). Μία μεγαλύτερη, ενεργειακά διαστασιολόγηση, θα μπορούσε, ενδεχομένως, να βελτιώσει αισθητά τα αποτελέσματα αφού οι συσκευές θα είναι σε θέση να αποθηκεύουν υψηλότερα ποσά ενέργειας. Ωστόσο, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία των συστημάτων είναι πολλοί και συνεπώς η μελέτη θα πρέπει να εκτελεστεί με απόλυτη προσοχή. Στη συγκεκριμένη εργασία, τα μεγέθη των συσκευών επιλέχθηκαν με βάση τα αρχικά προφίλ ισχύος που λήφθηκαν κατά την εκτέλεση των πρώτων προσομοιώσεων.

Όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα αποθήκευσης θα επαναφορτίζονται, ώστε να μπορούν στη συνέχεια να τροφοδοτήσουν την απαραίτητη για τη διόρθωση των βυθίσεων

ενέργεια, οι στρατηγικές που μπορεί να ακολουθηθούν είναι πολλές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέχθηκε η συνεχής απορρόφηση σταθερού ποσού ισχύος όταν η μετρούμενη στους ζυγούς τάση ξεπερνούσε κάποιο προκαθορισμένο όριο που είχε τεθεί. Κάθε χρονική στιγμή λοιπόν, κάθε σύστημα θα απορροφάει σταθερή ισχύ έως ότου ολοκληρωθεί η πλήρης φόρτισή του. Ένας περιορισμός που γεννιέται στο σημείο αυτό, είναι φυσικά ο έλεγχος ώστε να μην συνεχίζει η φόρτιση των συσκευών κατά τη διάρκεια που μπορεί να παρατηρείται κάποια βύθιση τάσης στους ζυγούς σύνδεσης. Σε περίπτωση, δηλαδή, που κάποιο σύστημα δεν έχει προλάβει να φορτιστεί πλήρως πριν την εμφάνιση μιας επερχόμενης βύθισης, τότε η διαδικασία φόρτισης θα πρέπει να σταματάει ακαριαία και να τίθεται σε λειτουργία η διαδικασία εκφόρτισης του συστήματος. Θα πρέπει, επίσης, να ορισθεί ένα κατάλληλο ποσό απορροφούμενης ισχύος, ώστε να μην προκαλούνται περαιτέρω βυθίσεις στους ζυγούς κατά την φόρτιση των συστημάτων αποθήκευσης. Όλα αυτά ελέγχονται μέσα από συνεχείς προσομοιώσεις με σκοπό να βρεθεί ο καταλληλότερος και πιο αποτελεσματικός τρόπος λειτουργίας των συστημάτων στο δίκτυο. Στις προσομοιώσεις λοιπόν που εκτελέστηκαν, επιλέχθηκε ως τρόπος απορρόφησης ενέργειας από το δίκτυο η συνεχής απορρόφηση σταθερού ποσού ισχύος κατά την πέδηση των τρένων όταν η τάση ξεπερνούσε την τιμή των 850V στους ζυγούς σύνδεσης. Το ποσό αυτό ήταν διαφορετικό ανάλογα με τον ζυγό των υποσταθμών στους οποίους συνδέθηκαν τα συστήματα αποθήκευσης, καθώς οι ανάγκες τροφοδότησης ισχύος για τη διόρθωση των βυθίσεων ποικίλουν. Για παράδειγμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο ζυγό του υποσταθμού 4 παρουσιάζονται περισσότερα προβλήματα βυθίσεων τάσης συγκριτικά με των υπόλοιπων ζυγών, γεγονός που απαιτεί και τη μεγαλύτερη ανάγκη παροχής ισχύος προς αυτόν.

Παρατηρήθηκε από τις νέες προσομοιώσεις, ότι όσον αφορά τη διαστασιολόγηση των συστημάτων, οι καταγεγραμμένες μετρήσεις είχαν διαφοροποιηθεί αισθητά σε σχέση με τις αρχικές. Καθίσταται λοιπόν σαφές, ότι όταν λαμβάνεται υπόψη το επίπεδο φόρτισης και ο έλεγχος λειτουργίας κάθε συσκευής, τότε οι προεπιλεγμένες διαστάσεις μπορεί να μην ικανοποιούν το στόχο που αρχικά έχει τεθεί. Παρά το γεγονός ότι στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας δε μπορεί να γίνει έλεγχος όλων των δυνατών καταστάσεων που προκύπτουν από τους διαφορετικούς συνδυασμούς των επιπέδων φόρτισης των συσκευών, με βάση τα καινούρια αποτελέσματα που λαμβάνονται, θα μπορούσε ίσως να επιλεγεί μια πιο κατάλληλη διαστασιολόγηση που να εξυπηρετεί στην καλύτερη διόρθωση του προβλήματος. Μια επιπλέον λύση, θα αποτελούσε η επιλογή κάποιας διαφορετικής μεθόδου για την επαναφόρτιση των συστημάτων αποθήκευσης. Παραδείγματος χάρη, απορρόφηση μεγαλύτερου ή και μεταβλητού ποσού ισχύος, έτσι ώστε να μπορεί να αποθηκεύεται από κάθε σύστημα η απαραίτητη ενέργεια για τη διόρθωση των βυθίσεων τάσης και να μη δημιουργούνται προβλήματα κατά τη λειτουργία τους.

Κατά την εκτέλεση προσομοιώσεων θα πρέπει, επομένως, να εκτελείται και έλεγχος για τη διατήρηση της ισχύος εντός των επιτρεπτών ορίων. Η ισχύς που θα προσφέρει ή θα απορροφάει κάθε σύστημα αποθήκευσης οφείλει, δηλαδή, να είναι μικρότερη ή ίση με τη μέγιστη δυνατή που έχει ορισθεί κατά τη διαδικασία της διαστασιολόγησης. Με αυτόν τον τρόπο, δε θα υπάρξουν λανθασμένα αποτελέσματα όσον αφορά τις απαιτούμενες τροφοδοτήσεις ισχύος και ενέργειας, τα οποία προκύπτουν από την αδυναμία παροχής ισχύος κάποιων συστημάτων. Ο περιορισμός ενέργειας γίνεται μέσω του ελέγχου των επιπέδων φόρτισης κάθε μονάδας αποθήκευσης που εκτελείται κάθε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων.

Είναι φανερό, λοιπόν, ότι η εγκατάσταση περισσότερων από ένα σύστημα αποθήκευσης στο δίκτυο ανεβάζει αισθητά την πολυπλοκότητα και δυσκολία επίλυσης των προβλημάτων τάσης σε αυτό. Παρά το γεγονός ότι η γενική διαδικασία που ακολουθείται είναι ίδια με την εγκατάσταση ενός συστήματος, στην περίπτωση αυτή η μελέτη είναι αρκετά πιο περίπλοκη και οφείλει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την επίλυση του ζητήματος μιας και οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι περισσότερες. Αυτό βέβαια συμβαίνει όταν παρατηρείται αδυναμία επαρκούς φόρτισης των εγκατεστημένων συσκευών αποθήκευσης, και συνεπώς διόρθωσης όλων των βυθίσεων τάσης στους ζυγούς, γεγονός που όπως προαναφέρθηκε δημιουργεί προβλήματα στη λειτουργία όλων των συστημάτων. Σε περίπτωση, λοιπόν, που η επιλεγμένη διαστασιολόγηση δεν εξυπηρετεί στην αποτελεσματική επίλυση των προβλημάτων, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες διορθωτικές κινήσεις. Παραδείγματος χάρι, αύξηση του μεγέθους των συστημάτων αποθήκευσης, εξωτερική φόρτισή τους σε περίπτωση αδυναμίας επιστροφής σε πλήρη επίπεδα φόρτισης κατά την απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο, αλλαγή στρατηγικής ελέγχου για τη λειτουργία των συστημάτων και άλλα. Ωστόσο, οι επιλογές αυτές εξαρτώνται από τον κάθε διαχειριστή, ο οποίος πορεύεται ανάλογα με τα αποτελέσματα που θέλει να επιτύχει και το χρηματικό ποσό που είναι διατεθειμένος να επενδύσει.

Εξοικονόμηση ενέργειας σε DC σιδηροδρομικά δίκτυα με χρήση στατικών συστημάτων αποθήκευσης

5.1 Θεωρητικό μέρος

Ο όρος εξοικονόμηση ενέργειας στις σιδηροδρομικές εφαρμογές δεν καθίσταται απολύτως ξεκάθαρος μέσα από τη βιβλιογραφία. Αντιθέτως, υπάρχουν πολλές πτυχές που καλύπτονται ανάλογα με το διαφορετικό αποτέλεσμα και τους στόχους που θέλει να πετύχει ο κάθε διαχειριστής δικτύου. Το τι επιδιώκεται να επιτευχθεί σε κάθε περίπτωση, μπορεί να είναι τελείως διαφορετικό από ότι σε κάποια άλλη. Παραδείγματος χάρη, κάποιος μπορεί να αποσκοπεί στη μείωση της συνολικής κατανάλωσης του δικτύου κατά ένα ποσοστό, ενώ άλλος να στοχεύει στην αποθήκευση και στη συνέχεια επαναχρησιμοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται πάνω στις απορριπτικές αντιστάσεις των οχημάτων. Υπάρχουν, επομένως, διάφορα σενάρια συνδεδεμένα με την έννοια της εξοικονόμησης ενέργειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα, των οποίων και η επιλογή εξαρτάται κάθε φορά από τις συγκεκριμένες επιθυμίες του κάθε διαχειριστή. Γενικότερα, ένα αποδοτικό σύστημα αποθήκευσης εκτός από εξοικονόμηση ενέργειας εκτελεί ταυτόχρονα και σταθεροποίηση τάσης, ελαχιστοποιώντας παράλληλα και την ύπαρξη υψηλών αιχμών ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνονται οι απώλειες στις γραμμές, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνονται και υψηλότερες αποδοτικότητες. Συνεπώς, οι δύο κυριότερες εφαρμογές των συστημάτων αποθήκευσης, δηλαδή η σταθεροποίηση τάσης και η εξοικονόμηση ενέργειας, είναι κατά μία έννοια αλληλένδετες. Εφαρμόζοντας, λοιπόν, μία από τις δύο, εκτελείται σε κάποιο βαθμό και η άλλη. [19]

Η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης για εξοικονόμηση ενέργειας στο δίκτυο, θα είναι αντίστοιχη με την προαναφερθείσα μεθοδολογία εγκατάστασης συσκευών για σταθεροποίηση της τάσης. Αυτό, διότι και στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα συστήματα θα λειτουργούν με βάση την μετρούμενη στους ακροδέκτες τους τάση, την οποία και θα προσπαθούν να σταθεροποιήσουν σε κάποια όρια. Παρόλο που οι διαδικασίες λειτουργίας τους είναι παρόμοιες με τις προαναφερθείσες, η διαφορά στο σημείο αυτό είναι ότι αλλάζει ο στόχος εφαρμογής τους. Αυτό που θα εξετάζεται δηλαδή, θα είναι η ενέργεια που τελικά εξοικονομείται ανάλογα με το όριο που επιλέγεται κάθε φορά για σταθεροποίηση της τάσης.

Από τη στιγμή που θα ενσωματωθούν στο πρόγραμμα οι μονάδες αποθήκευσης, οφείλουν να εκτελεστούν προσομοιώσεις για την εύρεση των κατάλληλων ορίων στα οποία θα σταθεροποιείται η τάση κατά τη διαδικασία απορρόφησης της αναγεννητικής ενέργειας. Στόχο αποτελεί η επιλογή των τιμών εκείνων με βάση τις οποίες θα επιτυγχάνεται η εξοικονόμηση ενέργειας που επιδιώκει να επιτύχει ο διαχειριστής. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται, εκτός από την

αλλαγή του ορίου σταθεροποίησης της τάσης, και την αλλαγή στην τοποθεσία και στον αριθμό των συστημάτων αποθήκευσης που πρόκειται να εγκατασταθούν έτσι ώστε να βρεθεί μια πιο αποδοτική λύση. Η διαστασιολόγηση και ο έλεγχος λειτουργίας των συστημάτων ακολουθούν λοιπόν τη μέθοδο που έχει ήδη αναφερθεί και, συνεπώς, δεν είναι απαραίτητη η λεπτομερής ανάλυση των διαδικασιών ενσωμάτωσης τους στο δίκτυο. Η τελική επιλογή μπορεί να γίνει επομένως με βάση τη μέθοδο «δοκιμών-σφαλμάτων», μέσω της οποίας εξετάζονται διάφορα σενάρια και επιλέγεται η αποδοτικότερη από αυτά λύση. Σημειώνεται ότι για την εύρεση της βέλτιστης δυνατής τοποθεσίας, του μεγέθους και του αριθμού των συστημάτων για μία εφαρμογή, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Αυτός θα δέχεται ως είσοδο όλες τις δυνατές παραμέτρους που επηρεάζουν τα προαναφερθέντα μεγέθη, και θα έχει ως αποτέλεσμα τον συνδυασμό της καλύτερης αποδοτικά και οικονομικά λύσης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα και πιθανοί στόχοι που θα μπορούσαν να τεθούν για εξοικονόμηση ενέργειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα.

Μία μέθοδος που στοχεύει στην αποθήκευση του μέγιστου δυνατού ποσού αναγεννητικής ενέργειας που εμφανίζεται σε κάποιον ηλεκτρικό υποσταθμό του δικτύου, βασίζεται στον υπολογισμό της ενέργειας που θεωρητικά θα επέστρεφε σε κάθε έναν από αυτούς εάν επιτρεπόταν η αμφίδρομη ροή του ρεύματος. Για να συμβεί αυτό, γίνεται η παραδοχή ότι οι μετατροπείς των υποσταθμών του δικτύου είναι διπλής κατεύθυνσης, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα αντίστροφης ροής του ρεύματος και, συνεπώς, υπολογισμού της ισχύος και ενέργειας που θεωρητικά θα επέστρεφε προς τα πίσω. Στη συνέχεια, επιλέγεται εγκατάσταση των συστημάτων αποθήκευσης στον/στους υποσταθμούς που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη διαθέσιμη προς αποθήκευση ενέργεια η οποία προκαλείται από την πέδηση των οχημάτων στις γραμμές. Η διαστασιολόγηση των συσκευών πραγματοποιείται ανάλογα με τα παραπάνω αποτελέσματα και εκτελείται σύμφωνα με τη διαδικασία που παρουσιάζεται στην αντίστοιχη βιβλιογραφία. [19]

Άλλο πιθανό σενάριο αποτελεί η προσπάθεια για αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται πάνω στα απορριπτικά φορτία των οχημάτων. Στην περίπτωση αυτή, τα πράγματα είναι πιο απλά. Από τα προφίλ τάσης στην είσοδο των τρένων, καταγράφονται τα διαστήματα κατά τα οποία γίνεται μεγαλύτερη χρήση των εν λόγω αντιστάσεων κατά την κίνηση των οχημάτων στις γραμμές. Στη συνέχεια, επιλέγεται τοποθέτηση των συστημάτων αποθήκευσης όσο το δυνατόν πιο κοντά στα σημεία αυτά. Ο τελικός αριθμός των συσκευών που θα εγκατασταθούν εξαρτάται από τα διαστήματα που βρέθηκαν, τον στόχο που τέθηκε προς επίτευξη, καθώς επίσης και από το χρηματικό ποσό που ο κάθε διαχειριστής είναι διατεθειμένος να επενδύσει. Αφού, λοιπόν, γίνει η επιλογή θέσης για εγκατάσταση των συσκευών, επόμενο βήμα αποτελεί η διαστασιολόγησή τους. Αυτή εκτελείται με τρόπο αντίστοιχο της περίπτωσης σταθεροποίησης τάσης, αφού και στο συγκεκριμένο σενάριο, η λειτουργία των συστημάτων θα γίνει μέσω σταθεροποίησης της τάσης στους ζυγούς σύνδεσης των συστημάτων. Εφόσον, λοιπόν, η αναγεννητική ενέργεια που θέτει σε λειτουργία τα απορριπτικά φορτία θα αποθηκεύεται στις μονάδες αποθήκευσης, αυτά δε θα χρειάζεται πλέον να ενεργοποιούνται.

Σε κάθε πιθανό σενάριο εξοικονόμησης ενέργειας σημαντικό ρόλο αποτελεί και η εύρεση της στρατηγικής που θα ακολουθηθεί για την παροχή της αποθηκευμένης ενέργειας από τις εγκατεστημένες συσκευές προς το δίκτυο. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα μέσω σταθερής εκφόρτισης των συστημάτων κατά τα διαστήματα

που δεν παρατηρούνται ανυψώσεις τάσης πάνω από το όριο που έχει τεθεί. Μια άλλη στρατηγική μπορεί να βασίζεται στη σταδιακή εκφόρτισή τους κατά την εμφάνιση βυθίσεων τάσης, μειώνοντας ενδεχομένως και τις έντονες διακυμάνσεις της τάσης στο δίκτυο. Ο έλεγχος της αποτελεσματικής λειτουργίας των συσκευών και επίτευξης της ζητούμενης ενεργειακής εξοικονόμησης, εκτελείται στη συνέχεια μέσω προσομοιώσεων για κάθε ενδεικτικό σενάριο.

Καθίσταται, λοιπόν, εμφανές ότι το ζήτημα εξοικονόμησης ενέργειας στις σιδηροδρομικές εφαρμογές, παρουσιάζει πολλές πτυχές και δεν υπάρχει κάποια ξεκάθαρη απάντηση όσον αφορά στο τι επιδιώκεται να επιτευχθεί. Αντίθετα, αυτό είναι στο χέρι του κάθε διαχειριστή ο οποίος θέτει τους δικούς του στόχους και πορεύεται σύμφωνα με αυτούς και τα αποτελέσματα που θέλει να επιτύχει.

5.2 Προσομοιώσεις και αριθμητικά αποτελέσματα

Εξοικονόμηση ενέργειας που προκαλείται από την πέδηση των τρένων στις γραμμές

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, τέθηκε ως στόχος η αποθήκευση και στη συνέχεια επαναχρησιμοποίηση της ενέργειας που επιστρέφεται στο δίκτυο και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στους ζυγούς των υποσταθμών πάνω από τα 790V (τιμή η οποία αποτελεί την τάση ανοιχτοκύκλωσης των υποσταθμών). Η αύξηση αυτή προκαλείται λόγω του ότι δεν επιτρέπεται η αντίστροφη ροή ρεύματος στους ηλεκτρικούς υποσταθμούς. Εφόσον, λοιπόν, το ρεύμα δε μπορεί να γυρίσει προς τα πίσω, διαχέεται προς το υπόλοιπο δίκτυο με αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στους ζυγούς των υποσταθμών ως τα 900V και την κατανάλωση της πλεονάζουσας ενέργειας πάνω στα απορριπτικά φορτία των τρένων και στις αντιστάσεις του δικτύου.

Για την εξοικονόμηση της εν λόγω ενέργειας, τοποθετήθηκαν τέσσερα συστήματα αποθήκευσης, ένα σε κάθε ηλεκτρικό υποσταθμό του δικτύου. Επισημαίνεται στο σημείο αυτό, ότι η συγκεκριμένη επιλογή αριθμού και σημείων τοποθέτησης των συστημάτων δεν αποτελεί την αποδοτικότερη και πιο αποτελεσματική λύση για την επίτευξη του στόχου που έχει τεθεί, αλλά ήταν τυχαία. Αυτό έγινε διότι οι πιθανοί συνδυασμοί είναι πάρα πολλοί και καθίσταται αδύνατο να βρεθεί η βέλτιστη λύση χειροκίνητα. Στην πραγματικότητα, για την εύρεση της καλύτερης επιλογής, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης ο οποίος θα λαμβάνει ως είσοδο όλες τις σχετικές παραμέτρους και θα δίνει ως αποτέλεσμα τον αποδοτικότερο συνδυασμό τους.

Επιλέχθηκε αρχικά το όριο των 790V για τη σταθεροποίηση των ανυψώσεων στους ζυγούς των υποσταθμών που πρόκειται να εγκατασταθούν τα συστήματα αποθήκευσης. Με την επιλογή του συγκεκριμένου ορίου, θα αποθηκεύεται η αναγεννητική ενέργεια που προκαλείται κατά το φρενάρισμα των οχημάτων πάνω στις γραμμές και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης των ζυγών σύνδεσης μέχρι τα 900V. Στη συνέχεια, μέσω προσομοιώσεων, λήφθηκαν τα προφίλ ισχύος των συστημάτων σύμφωνα με τα οποία έγινε και η διαστασιολόγησή τους. Η επιλογή για το μέγεθος κάθε συσκευής πραγματοποιείται με βάση τις ανάγκες απορρόφησης ισχύος. Αναφέρεται

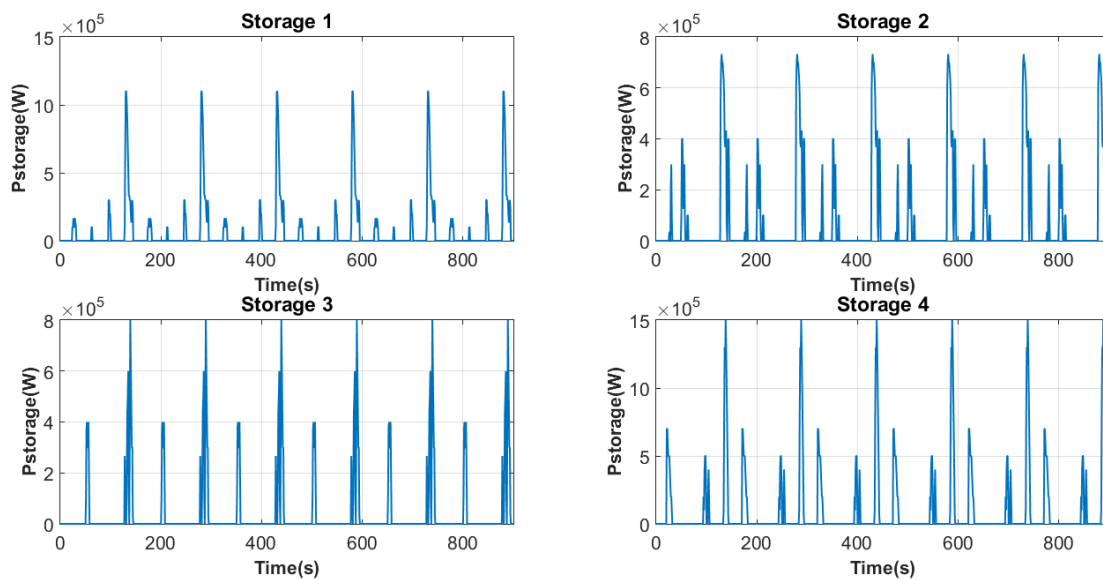
στο σημείο αυτό, ότι το επιτρεπτό σφάλμα όσον αφορά τη σταθεροποίηση τάσης στα 790V, ορίστηκε ως $\pm(1V)$ για λόγους εξοικονόμησης χρόνου κατά την εκτέλεση προσομοιώσεων. Σημειώνεται, επίσης, ότι στη συγκεκριμένη μελέτη, εξετάζεται μόνο το σενάριο για headway ίσο με 150s. Στους πίνακες 5.1 και 5.2, παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές ισχύος και ενέργειας που υπολογίστηκαν για κάθε συσκευή, καθώς επίσης και οι κυματομορφές από τις οποίες λήφθηκαν τα αποτελέσματα αυτά.

Πίνακας 5.1: Μέγιστη στιγμιαία απαιτούμενη ισχύς συσκευών

Μέγιστη Ισχύς Συσκευή 1 (MW)	Μέγιστη Ισχύς Συσκευή 2 (MW)	Μέγιστη Ισχύς Συσκευή 3 (MW)	Μέγιστη Ισχύς Συσκευή 4 (MW)
1.10	0.73	0.80	1.50

Πίνακας 5.2: Μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια συσκευών

Μέγιστη Ενέργεια Συσκευή 1 (kWh)	Μέγιστη Ενέργεια Συσκευή 2 (kWh)	Μέγιστη Ενέργεια Συσκευή 3 (kWh)	Μέγιστη Ενέργεια Συσκευή 4 (kWh)
2.3519	2.2500	1.4259	2.3241



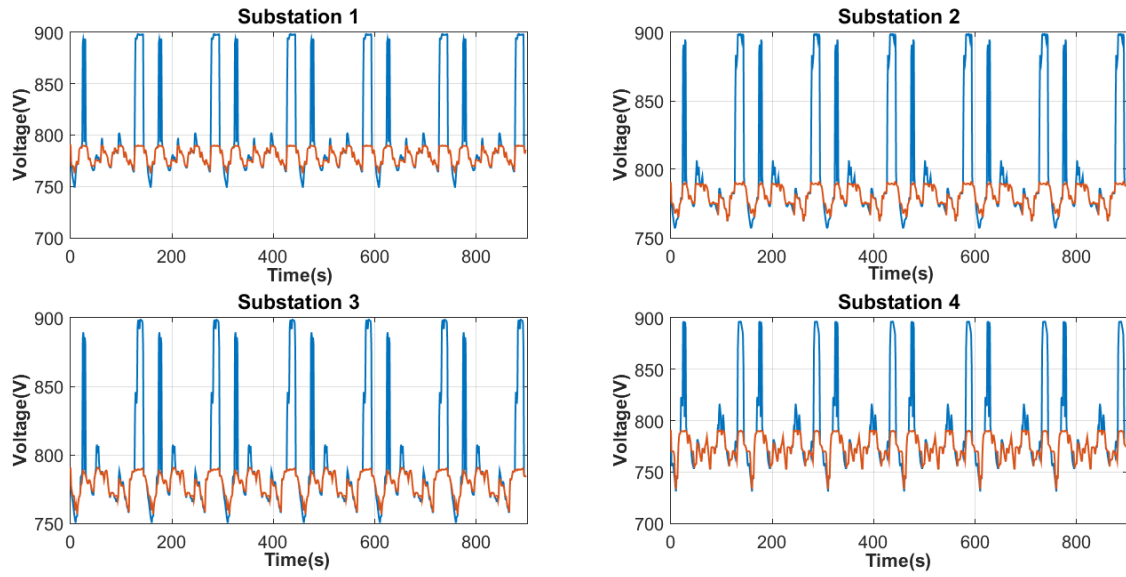
Σχήμα 5.1: Προφίλ ισχύος για διαστασιολόγηση συστημάτων αποθήκευσης

Παρά το γεγονός ότι τα μεγέθη μέγιστης ισχύος και ενέργειας που υπολογίστηκαν διαφέρουν για κάθε σύστημα, θα μπορούσε να υπολογιστεί ο μέσος όρος τους προκειμένου ο διαχειριστής του δικτύου να διευκολυνθεί κατά τη διαδικασία αγοράς τους. Ωστόσο, στα πλαίσια

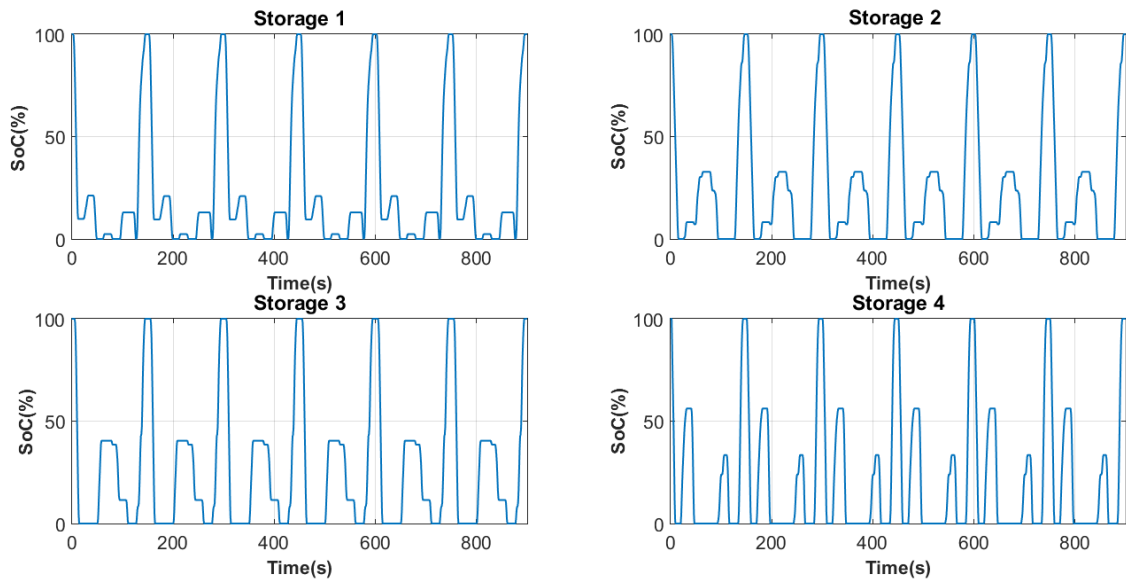
της συγκεκριμένης εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά μεγέθη για τη διαστασιολόγηση κάθε συσκευής.

Αφού, λοιπόν, πραγματοποιηθεί η διαδικασία της διαστασιολόγησης, επόμενο βήμα αποτελεί η εύρεση της στρατηγικής που θα ακολουθηθεί για την τροφοδότηση της ανακτώμενης από τα συστήματα ενέργειας πίσω στο δίκτυο. Τα συστήματα αποθήκευσης θα πρέπει, δηλαδή, να επιστρέφουν κατάλληλα ποσά ισχύος έτσι ώστε να αδειάζουν και να μπορούν να απορροφήσουν χωρίς πρόβλημα την ενέργεια που προκαλείται κατά την πέδηση των τρένων στις γραμμές. Μέσω αποθήκευσης και παροχής της λοιπόν, θα υπολογιστούν οι διαφοροποιημένες πλέον τιμές καταναλισκόμενης ενέργειας των υποσταθμών με στόχο την εύρεση της ενεργειακής εξοικονόμησης που θα επέλθει. Από την εκτέλεση προσομοιώσεων, βρέθηκε ότι μια επιλογή που εξυπηρετεί αποτελεσματικά το σκοπό αυτό, είναι η παροχή μεταβλητού ποσού ισχύος προς το δίκτυο έτσι ώστε η τάση των ζυγών σύνδεσης κάθε αποθήκευσης να σταθεροποιείται σε συγκεκριμένα όρια. Τα όρια που τέθηκαν για κάθε ένα από τα τέσσερα συστήματα επιλέχθηκαν στα 770V, 775V, 770V και 770V αντίστοιχα. Τονίζεται στο σημείο αυτό, ότι οι συγκεκριμένες τιμές δεν είναι οι μόνες που εξυπηρετούν για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων. Ωστόσο, όταν στόχο αποτελεί η μελέτη της ενεργειακής εξοικονόμησης, η μέθοδος μέσω της οποίας θα επιστρέφεται η αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο δεν έχει σημασία. Ο μόνος περιορισμός που θα πρέπει να τηρείται είναι η τροφοδότηση ολόκληρου του ποσού ενέργειας προς αυτό προτού προκύψει η επόμενη ανάγκη απορρόφησης ισχύος. Στην περίπτωση που για παράδειγμα στόχο αποτελούσε και η όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη σταθεροποίηση τάσης κατά τις παρατηρούμενες βυθίσεις στους ζυγούς, τότε τα όρια αυτά θα μπορούσαν ενδεχομένως να μεταβληθούν προκειμένου να επιτευχθεί το ζητούμενο.

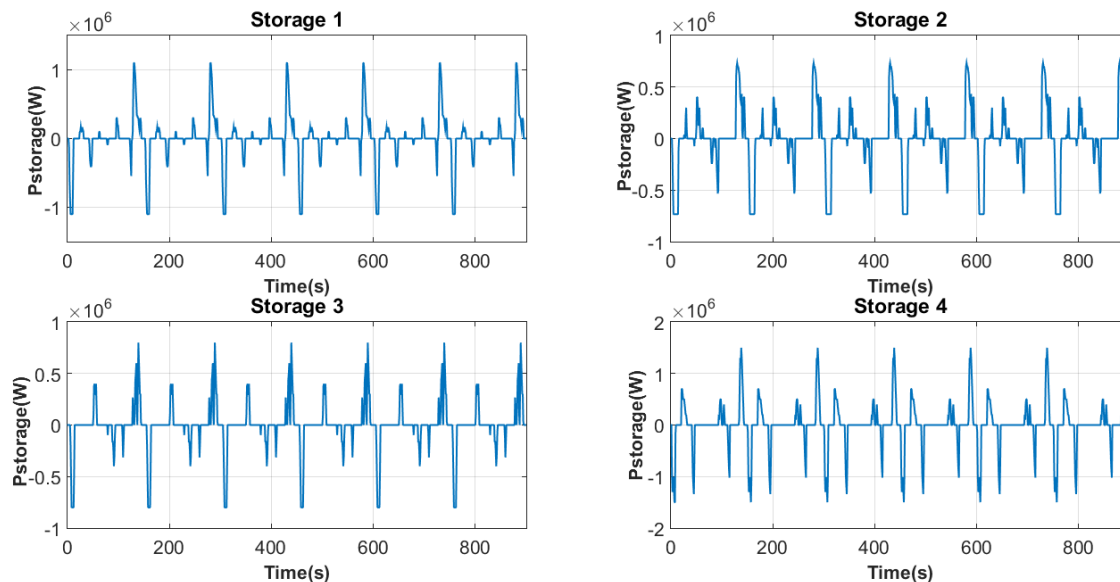
Η εκτέλεση προσομοιώσεων με παροχή της αποθηκευμένης ενέργειας για σταθεροποίηση των βυθίσεων στα συγκεκριμένα όρια, έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα όσον αφορά τις κυματομορφές τάσης στους ζυγούς των υποσταθμών, τα επίπεδα φόρτισης αλλά και το προφίλ ισχύος κάθε συσκευής. Σημειώνεται ότι με μπλε χρώμα αναπαρίσταται η τάση των ζυγών σύνδεσης πριν την ενεργοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης, ενώ με κόκκινο η αντίστοιχη τάση μετά την ενεργοποίησή τους. Τέλος, και στη συγκεκριμένη μελέτη γίνεται η παραδοχή ότι κάθε σύστημα αποθήκευσης θεωρείται ως πλήρως φορτισμένο πριν την έναρξη των προσομοιώσεων.



Σχήμα 5.2: Τάση ζυγών σύνδεσης πριν και μετά την ενεργοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης



Σχήμα 5.3: Επίπεδο φόρτισης συστημάτων αποθήκευσης



Σχήμα 5.4: Προφίλ ισχύος συστημάτων αποθήκευσης

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, καθίσταται εμφανές ότι οι διαδικασίες αποθήκευσης και επαναχρησιμοποίησης της ενέργειας, εκτελούνται αποτελεσματικά. Όση ενέργεια, δηλαδή, αποθηκεύεται στις συσκευές, στη συνέχεια γυρίζει πίσω προς το δίκτυο. Από τις καμπύλες τάσης, παρατηρείται ότι η σταθεροποίηση των ανυψώσεων στα 790V εκτελείται ορθά σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι απορροφάται όλο το ποσό ενέργειας που προκαλείται από το φρενάρισμα των οχημάτων και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στους ζυγούς των υποσταθμών πάνω από την τιμή ανοιχτοκύκλωσης. Αντιθέτως, η αντίστοιχη σταθεροποίηση των βυθίσεων εκτελείται σε πολύ μικρότερο βαθμό, διότι η αποθηκευμένη ενέργεια των συστημάτων δεν επαρκεί ώστε να καλυφθούν όλες οι παρατηρούμενες πτώσεις τάσης κάτω από τα όρια που τέθηκαν για κάθε ζυγό σύνδεσης. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα αφού, όπως προαναφέρθηκε, στόχος είναι απλά η τροφοδότηση ολόκληρου του ποσού της αποθηκευμένης ενέργειας πίσω στο δίκτυο, πράγμα το οποίο και εκτελείται, με σκοπό να μελετηθεί η ενεργειακή εξοικονόμηση στους υποσταθμούς. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι καθώς δεν δημιουργούνται προβλήματα που να σχετίζονται με τον έλεγχο λειτουργίας και το επίπεδο φόρτισης των συσκευών κατά τη διαδικασία τροφοδότησης και απορρόφησης της ενέργειας, η αρχική διαστασιολόγηση κρίνεται ως αποτελεσματική και δεν απαιτείται τυχόν αλλαγή της. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τις προσομοιώσεις και αφορούν την καταναλισκόμενη ενέργεια στο δίκτυο πριν και μετά τη λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης. Σημειώνεται ότι όλες οι τιμές που εμφανίζονται παρακάτω μετρούνται σε kWh, ενώ οι θετικές τιμές δηλώνουν κατανάλωση ενέργειας.

Πίνακας 5.3: Ενέργεια κινούμενων οχημάτων

	<u>Συστήματα Αποθήκευσης</u>	
	Όχι	Ναι
Τρένο-Γραμμή1	68.0594	64.5466
Ηλ.&Μηχ. Εξοπλισμός	64.5466	64.5466
Αναγεννητική ενέργεια	-43.0695	-43.0695
Απορριπτικές αντιστάσεις	3.5128	0
Τρένο-Γραμμή2	72.8186	70.2342
Ηλ.&Μηχ. Εξοπλισμός	70.2342	70.2342
Αναγεννητική ενέργεια	-41.6951	-41.6951
Απορριπτικές αντιστάσεις	2.5844	0

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρείται ότι μετά από την εγκατάσταση και λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης στους ζυγούς των τεσσάρων υποσταθμών, οι απορριπτικές αντιστάσεις των οχημάτων και στις δύο γραμμές, δεν τίθενται πια σε λειτουργία. Το γεγονός αυτό είναι λογικό διότι η τάση στους ζυγούς των υποσταθμών σταθεροποιείται πλέον στα 790V, δηλαδή στην τάση ανοιχτοκύκλωσης. Η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του ηλεκτρικού και μηχανικού εξοπλισμού παραμένει προφανώς ίδια και στις δύο περιπτώσεις, ενώ η συνολική ενέργεια των τρένων κάθε γραμμής, η οποία ισούται με το άθροισμα της ενέργειας που καταναλώνεται από τον εξοπλισμό και από τις απορριπτικές αντιστάσεις των οχημάτων, αλλάζει λόγω του μηδενισμού της τελευταίας. Τέλος, η αναγεννητική ενέργεια εκφράζει την ενέργεια αυτή που επιστρέφεται προς το δίκτυο κατά την πέδηση των οχημάτων στις γραμμές.

Στη συνέχεια, στον πίνακα 5.4, παρουσιάζονται οι ενεργειακές καταναλώσεις των τεσσάρων υποσταθμών πριν και μετά τη χρήση των συστημάτων αποθήκευσης, καθώς επίσης και οι απώλειες στις γραμμές του δικτύου στις περιπτώσεις αυτές.

Πίνακας 5.4: Ενεργειακές καταναλώσεις υποσταθμών και απώλειες γραμμών του δικτύου

	<u>Συστήματα Αποθήκευσης</u>		Εξοικονόμηση(%)
	Όχι	Ναι	
Απώλειες γραμμών	75.5169	74.7460	1.02
Υποσταθμός 1	-200.2027	-188.1123	6.04
Υποσταθμός 2	-193.1243	-181.3857	6.08
Υποσταθμός 3	-217.0546	-213.0914	1.83
Υποσταθμός 4	-307.9402	-298.1108	3.20
Σύνολο υποσταθμών	-918.3218	-880.7002	4.10

Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν, παρατηρείται ότι η παραγόμενη από τον κάθε υποσταθμό ενέργεια, μειώνεται με την εγκατάσταση και λειτουργία των τεσσάρων συστημάτων

αποθήκευσης στους ζυγούς τους. Σημαντικότερη μείωση εμφανίζεται στους ζυγούς των υποσταθμών 1 και 2 (περίπου 6%), ενώ χαμηλότερη στον ζυγό του υποσταθμού 3 (1.83%). Η συνολική ενέργεια που εξοικονομείται στο σενάριο που εξετάστηκε, αγγίζει το 4% της αρχικής τιμής της. Για να επιτευχθεί κάποια μεγαλύτερη εξοικονόμηση, η στρατηγική που ακολουθείται θα πρέπει να αλλάξει. Στην περίπτωση αυτή, οι κινήσεις που θα εκτελεστούν, θα πρέπει να στοχεύουν στην ανύψωση των βυθίσεων τάσης οι οποίες λαμβάνουν χώρα στους ζυγούς σύνδεσης των συσκευών, όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τάση ανοιχτοκύκλωσης των ηλεκτρικών υποσταθμών. Αυτό διότι οι πτώσεις κάτω από τη συγκεκριμένη τιμή, μεταφράζονται ως ανάγκη τροφοδότησης ενέργειας από τους υποσταθμούς προς το σιδηροδρομικό δίκτυο. Συνεπώς, όσο πιο κοντά φέρουμε τις τάσεις στα 790V, τόσο λιγότερη ενέργεια θα απαιτείται να παράγεται από τους υποσταθμούς και, επομένως, η ενεργειακή κατανάλωση θα μειωθεί αισθητά. Στο σενάριο ωστόσο που μελετήθηκε, στόχο αποτέλεσε η αποθήκευση και στη συνέχεια επαναχρησιμοποίηση της ενέργειας που επιστρέφει προς το δίκτυο κατά την πέδηση των τρένων. Αυτή όμως είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με το ποσό που χρειάζεται για την ανύψωση της τάσης κοντά στα 790V και, συνεπώς την επίτευξη σημαντικότερης εξοικονόμησης ενέργειας. Παρόλα αυτά, παρατηρείται μείωση όσον αφορά την παραγόμενη από τους υποσταθμούς ενέργεια, καθώς επίσης και τις απώλειες που λαμβάνουν χώρα στις γραμμές του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι οι απώλειες των γραμμών προκαλούνται κατά ένα βαθμό και από τις αυξημένες τιμές ρεύματος που διαχέονται προς το δίκτυο λόγω του ότι το ρεύμα δε μπορεί να επιστρέψει πίσω στους υποσταθμούς. Η αύξηση συνεπώς της τάσης πάνω από τα 790V, συνεπάγεται και αναπόφευκτη αύξηση των απωλειών πάνω στις γραμμές. Χαμηλώνοντας λοιπόν τα επίπεδα τάσης στους ζυγούς, μειώνονται και οι απώλειες που προκαλούνται από τις αντιστάσεις του δικτύου. Η μείωσή των απωλειών αυτών, στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι αρκετά μικρή και υπολογίστηκε ως 1% της αρχικής τους τιμής (χωρίς δηλαδή τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης).

Συνοψίζοντας, λοιπόν, η συνολική εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται με εφαρμογή του σεναρίου που εξετάστηκε ορίζεται ως:

- 4% μείωση του απαιτούμενου συνολικού ποσού παραγόμενης ενέργειας από τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς
- 1% μείωση των απωλειών που προκαλούνται από τις αντιστάσεις των γραμμών του δικτύου

Οικονομική μελέτη επενδυτικού πλάνου

Κάθε διαχειριστής που έχει σκοπό να επενδύσει στην υλοποίηση ενός έργου, στοχεύει προφανώς και στη μελλοντική επίτευξη κέρδους το οποίο θα αποζημιώσει την αρχική του επένδυση και θα συμβάλει στην αιώτερη οικονομική εξοικονόμηση. Συνεπώς, προτού υλοποιηθεί οποιαδήποτε ενέργεια, οφείλει να πραγματοποιηθεί κάποια οικονομική μελέτη για τον έλεγχο της μελλοντικής απόδοσης της επένδυσης που πρόκειται να εκτελεστεί. Για την οικονομική, λοιπόν, αξιολόγηση μιας επένδυσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι δείκτες με πιο σημαντικούς την Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) και τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (ΕΒΑ).

6.1 Οικονομικοί δείκτες αξιολόγησης επενδύσεων

Η **Καθαρή Παρούσα Αξία** μιας επένδυσης είναι η αξία αυτής ανηγμένη στη χρονική στιγμή έναρξης της εμπορικής της λειτουργίας (t_0) και δίνεται από τη σχέση (6.1).

$$ΚΠΑ = -K_0 + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1+k)^t} + \frac{YA_N}{(1+k)^N} \quad (6.1)$$

Όπου: K_0 = Το κόστος αρχικής επένδυσης

KTP_t = Η Καθαρή Ταμειακή Ροή του έτους t

k = Η ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση των κεφαλαίων που επενδύονται (επιτόκιο αναγωγής)

N = Η διάρκεια ζωής της επένδυσης σε έτη

YA = Η Υπολειμματική Αξία της επένδυσης στο τέλος της διάρκειας ζωής της

Η υπολειμματική αξία ως έννοια χαρακτηρίζει το υπόλοιπο της αξίας ενός αγαθού, την απομείωση δηλαδή της αρχικής αξίας του στο πέρασμα του χρόνου. Σημειώνεται ότι στην παρούσα αξιολόγηση αυτή λαμβάνεται ως μηδενική και απλοποιείται από τη σχέση.

Με βάση το δείκτη αυτό, η επένδυση αξιολογείται ως:

- $ΚΠΑ > 0$, η επένδυση είναι βιώσιμη
- $ΚΠΑ < 0$, η επένδυση δεν είναι βιώσιμη και απορρίπτεται
- $ΚΠΑ = 0$, η επένδυση θεωρείται βιώσιμη με μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης $= k$ και υπάρχει αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή την απόρριψη του επενδυτικού σχεδίου (οριακή κατάσταση) [21]

Όλες οι ταμειακές ροές ανάγονται τη χρονική στιγμή t_0 , με συνυπολογισμό ενός επιτοκίου αναγωγής, και στη συνέχεια τα ανηγμένα ποσά αθροίζονται αλγεβρικά και έτσι προκύπτει η τιμή της καθαρής παρούσας αξίας. Αν η αξία της είναι μεγαλύτερη από το όριο που έχει τεθεί από τους επενδυτές, τότε αποφασίζεται η υλοποίηση της επένδυσης. Σε διαφορετική περίπτωση αυτή απορρίπτεται. Επίσης, όταν αξιολογούνται συγκριτικά δύο εναλλακτικές επενδύσεις (εκ των οποίων η μια αποκλείει την άλλη), αποφασίζεται να υλοποιηθεί εκείνη με την μεγαλύτερη καθαρή παρούσα αξία. [20]

Αντίστοιχα, ο **Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης** είναι η τιμή του επιτοκίου αναγωγής (k) που κάνει την καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης, κατά τη διάρκεια της οικονομικής αξιολόγησης, ίση με το μηδέν. Εξισώνει, δηλαδή, την παρούσα αξία των ετήσιων ταμειακών ροών με το αρχικό κόστος επένδυσης. Ειδικότερα, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης εκφράζει την απόδοση κεφαλαίου της αρχικής επένδυσης κατά τη διάρκεια του οικονομικού κύκλου ζωής της και προσδιορίζεται από τη λύση της εξίσωσης (6.2).

$$KPA_{(k=EBA)} = 0 \Leftrightarrow -K_0 + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1 + EBA)^t} = 0 \quad (6.2)$$

Με βάση το δείκτη αυτό, η επένδυση αξιολογείται ως:

- $EBA > k$, η επένδυση είναι αποδεκτή
- $EBA < k$, η επένδυση είναι μη αποδεκτή
- $EBA = k$, ο επενδυτής αποφασίζει σύμφωνα και με άλλα κριτήρια

Όταν αξιολογούνται συγκριτικά δύο εναλλακτικές επενδύσεις, προτιμάται αυτή με το μεγαλύτερο δείκτη απόδοσης. [21]

Ένας επιπλέον χρήσιμος δείκτης είναι η **Έντοκη Περίοδος Αποπληρωμής** (ΕΠΑ) η οποία εκφράζει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποπληρωμή του αρχικού κόστους επένδυσης. Αποτελεί ένα πολύ απλό οικονομικό δείκτη, ο οποίος όμως δεν εκφράζει αποτελέσματα κέρδους ούτε και εξετάζει την πορεία της επένδυσης μετά την περίοδο αποπληρωμής, και προσδιορίζεται από τη λύση της εξίσωσης (6.3).

$$KPA_{(N=EPA)} = 0 \Leftrightarrow -K_0 + \sum_{t=1}^{EPA} \frac{KTP_t}{(1 + k)^t} = 0 \quad (6.3)$$

Μια επένδυση θεωρείται οικονομικά βιώσιμη εάν η τιμή της έντοκης περιόδου αποπληρωμής ικανοποιεί τις προσδοκίες του επενδυτή ως προς το χρόνο αποπληρωμής, και σίγουρα εάν αυτή η τιμή είναι μικρότερη από το χρόνο ζωής της επένδυσης. [20]

6.2 Υπολογισμός Ταμειακών Ροών

Η αξιολόγηση των επενδύσεων χρησιμοποιεί την έννοια των Καθαρών Ταμειακών Ροών. Αυτές αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα οικονομικά μεγέθη στη διαδικασία αξιολόγησης επενδυτικών στοιχείων, αφού εκφράζουν το ετήσιο καθαρό ταμειακό αποτέλεσμα που προκύπτει από την υλοποίηση μιας επένδυσης. Αλγεβρικά η Καθαρή Ταμειακή Ροή ισούται με τη διαφορά μεταξύ Ταμειακών Εισροών (TE) και Ταμειακών Εκροών (TEκ), προσδιοριζόμενες τη χρονική περίοδο που πραγματοποιούνται.

$$KTP_t = TE_t + TEκ_t \quad (6.4)$$

Οι ταμειακές εισροές είναι οι εισπράξεις από πωλήσεις αγαθών και υπηρεσιών ή η μείωση κόστους λειτουργίας που απορρέει από εγκατάσταση σύγχρονων μηχανημάτων (όπως συμβαίνει και στη συγκεκριμένη εργασία με την εγκατάσταση υπερπυκνωτών στο δίκτυο). Οι ταμειακές εκροές περιλαμβάνουν τις πληρωμές για την εργασία, τις πρώτες ύλες και άλλα υλικά, καύσιμα και ηλεκτρική ενέργεια, που πρόκειται να πραγματοποιηθούν αποκλειστικά για το επενδυτικό έργο, καθώς επίσης και το συνολικό κόστος επένδυσης που απαιτείται. [22]

6.3 Αξιολόγηση επένδυσης

Η καθαρή παρούσα αξία και οι ταμειακές ροές, διαφοροποιούνται εάν οι υπολογισμοί γίνονται ως προς τα ίδια κεφάλαια της επένδυσης, ή ως προς το σύνολο της επένδυσης (ώστε να συγκριθεί για παράδειγμα με κάποια άλλη). Στην πρώτη περίπτωση ο επενδυτής λαμβάνει ως επιτόκιο αναγωγής για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας την ελάχιστη απόδοση που αυτός κρίνει ικανοποιητική για τα ίδια κεφάλαιά του. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση αξιολόγησης, ως επιτόκιο αναγωγής λαμβάνεται το μέσο σταθμικό κόστος του συνολικού επενδύμενου κεφαλαίου, το οποίο συντίθεται από το κόστος των ιδίων και των δανειακών κεφαλαίων της επιχείρησης, και υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$k_{tot} = P_d * k_d + P_{Eq} * k_{Eq} \quad (6.5)$$

Όπου:

k_{tot} : το μέσο σταθμικό κόστος των ιδίων και ξένων κεφαλαίων της επένδυσης

P_d : η συμμετοχή (%) των δανειακών κεφαλαίων στο σύνολο της επένδυσης

k_d : το επιτόκιο δανεισμού

P_{Eq} : η συμμετοχή (%) των ιδίων κεφαλαίων στην επένδυση

k_{Eq} : το κόστος των ιδίων κεφαλαίων της επένδυσης [21]

6.3.1 Αξιολόγηση επένδυσης ως προς τα ίδια κεφάλαια

Στην περίπτωση αυτή οι Καθαρές Ταμειακές Ροές υπολογίζονται ως: $KTP =$ Ετήσια Έσοδα – Λειτουργικά Έξοδα – Τοκοχρεολύσιο. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό της Καθαρής Παρούσας Αξίας, χρησιμοποιείται ο παρακάτω ακριβής τύπος:

$$KPA = -K_{0,Eq} + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1 + k_{Eq})^t} \quad (6.6)$$

Όπου: $K_{0,Eq}$ = Τα ίδια κεφάλαια της επένδυσης

KTP_t = Η Καθαρή Ταμειακή Ροή κάθε έτους t

k_{Eq} = Το επιτόκιο αναγωγής που εκφράζει την επιθυμητή απόδοση των ιδίων κεφαλαίων

N = Η διάρκεια ζωής της επένδυσης σε έτη

Για να είναι η αξιολόγηση της επένδυσης όσο το δυνατόν πιο ασφαλής, εκτός από την απαίτηση για θετική καθαρή παρούσα αξία, οφείλει να πραγματοποιηθεί και υπολογισμός του εσωτερικού βαθμού απόδοσης. Όπως προαναφέρθηκε, η εύρεση του συγκεκριμένου δείκτη γίνεται μέσω επίλυσης της εξίσωσης:

$$-K_{0,Eq} + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1 + EBA)^t} = 0 \quad (6.7)$$

Στη συνέχεια, η επένδυση αξιολογείται ανάλογα με την τιμή που προκύπτει, η οποία και συγκρίνεται με την ελάχιστη απαιτούμενη απόδοση κεφαλαίων που έχει οριστεί από τον επενδυτή ($k_{\min Eq}$). Πιο συγκεκριμένα, εάν ο δείκτης είναι μεγαλύτερος από το την τιμή αυτή ($EBA > k_{\min Eq}$), τότε η επένδυση κρίνεται ως αποδεκτή. Στην αντίθετη περίπτωση ($EBA < k_{\min Eq}$), το επενδυτικό σχέδιο θα πρέπει να απορριφθεί, ενώ στην περίπτωση ισότητας ($EBA = k_{\min Eq}$) έχουμε αδιαφορία του επενδυτή ως προς την αποδοχή ή την απόρριψη του επενδυτικού σχεδίου.

Τέλος, για την εύρεση του αριθμού των ετών που απαιτούνται ώστε να αποσβεστεί η επένδυση, υπολογίζεται η έντοκη περίοδος αποπληρωμής, μέσω επίλυσης της εξίσωσης:

$$-K_{0,Eq} + \sum_{t=1}^{EPA} \frac{KTP_t}{(1 + k_{Eq})^t} = 0 \quad (6.8)$$

Σύμφωνα, λοιπόν, με τους παραπάνω δείκτες εκτελείται αξιολόγηση της επένδυσης ως προς τα ίδια κεφάλαια και αποφασίζεται εάν αυτή είναι τελικά συμφέρουσα για τον επενδυτή (στη συγκεκριμένη περίπτωση τον διαχειριστή του σιδηροδρομικού δικτύου) ή όχι. [20]

6.3.2 Αξιολόγηση επένδυσης ως προς το σύνολο της επένδυσης

Σημαντικότερη διαφοροποίηση της αξιολόγησης ως προς το σύνολο της επένδυσης σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, αποτελεί το γεγονός ότι στο επιτόκιο αναγωγής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη όχι μόνο η απόδοση των ίδιων κεφαλαίων που κρίνει ο επενδυτής ως ικανοποιητική, αλλά και το επιτόκιο των δανειακών κεφαλαίων της επιχείρησης, αφού το αρχικό κόστος της επένδυσης καλύπτεται τόσο από τα ίδια, όσο και από τα δανειακά κεφάλαια. Και εδώ ισχύουν οι γενικοί τύποι, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η δόση του δανείου: $KTP = \text{Ετήσια Έσοδα} - \text{Λειτουργικά Έξοδα}$. Για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας, του εσωτερικού βαθμού απόδοσης και της έντοκης περιόδου αποπληρωμής, οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$KPA = -K_{0,tot} + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1 + k_{tot})^t} \quad (6.9)$$

$$-K_{0,tot} + \sum_{t=1}^N \frac{KTP_t}{(1 + EBA)^t} = 0 \quad (6.10)$$

$$-K_{0,tot} + \sum_{t=1}^{EPA} \frac{KTP_t}{(1 + k_{tot})^t} = 0 \quad (6.11)$$

Όπου: $K_{0,tot}$ = Το συνολικό αρχικό κόστος της επένδυσης

KTP_t = Η Καθαρή Ταμειακή Ροή κάθε έτους t

k_{tot} = Το μέσο σταθμικό κόστος των ιδίων και ξένων κεφαλαίων της επένδυσης

N = Η διάρκεια ζωής της επένδυσης σε έτη

Και στην περίπτωση αυτή, η αξιολόγηση της επένδυσης πραγματοποιείται με τα ίδια κριτήρια και με τις ίδιες απαιτήσεις για τον έλεγχο βιωσιμότητάς της, όπως αναφέρθηκαν και προηγουμένως. Η διαφορά είναι ότι η σύγκριση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης και ο υπολογισμός των άλλων δύο δεικτών, γίνεται με το μέσο σταθμικό κόστος (k_{tot}). [20]

Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η εγκατάσταση και λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στις σιδηροδρομικές εφαρμογές, τόσο για ζητήματα σταθεροποίησης τάσης, όσο και εξοικονόμησης ενέργειας. Κατέστη σαφές από τη θεωρία ότι στα δίκτυα αυτά σημαντικό ποσό ενέργειας μένει ανεκμετάλλευτο και καταναλώνεται πάνω στα απορριπτικά φορτία των οχημάτων, αλλά και στις αντιστάσεις του ίδιου του δικτύου. Οι εμπλεκόμενες στο σύστημα απώλειες είναι επίσης πολλές, και οι διακυμάνσεις τάσης που λαμβάνουν χώρα είτε στην είσοδο των οχημάτων, είτε στις γραμμές του δικτύου, καταπονούν τον εξοπλισμό και ενισχύουν τα παραπάνω φαινόμενα. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη μελέτη το είδος των συστημάτων αποθήκευσης που θεωρητικά χρησιμοποιείται είναι οι υπερπυκνωτές, αφού λόγω των χαρακτηριστικών τους, αποτελούν την καλύτερη επιλογή για χρήση στις σιδηροδρομικές εφαρμογές.

Στο κεφάλαιο 4 λοιπόν, σχεδιάστηκε αρχικά μια θεωρητική μελέτη για την εγκατάσταση και τον έλεγχο λειτουργίας στατικών συστημάτων αποθήκευσης για σταθεροποίηση τάσης στα DC σιδηροδρομικά δίκτυα. Αυτή μπορεί να εφαρμοστεί, είτε για τη σταθεροποίηση στην είσοδο των τρένων, είτε και σε κάποιο άλλο σημείο στις γραμμές του δικτύου. Τα βήματα που ορίστηκαν αφορούν την εύρεση των διαστημάτων κατά τα οποία παρατηρούνται προβλήματα βυθίσεων ή ανυψώσεων τάσης (ανάλογα με τα όρια που έχει θέσει ο κάθε διαχειριστής), την εύρεση κατάλληλων θέσεων για τοποθέτηση των συστημάτων αποθήκευσης, τη διαστασιολόγησή τους (μέγιστη ισχύς και ενέργεια), και τέλος τον έλεγχο που μπορεί να ακολουθηθεί για την ορθή λειτουργία τους. Στη συνέχεια, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις με στόχο την επίτευξη δύο διαφορετικών σεναρίων. Το πρώτο αφορά τη σταθεροποίηση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων, ενώ το δεύτερο στους τέσσερις ζυγούς των ηλεκτρικών υποσταθμών του δικτύου.

Για τη διόρθωση των βυθίσεων στην είσοδο των τρένων, ορίστηκε το όριο των 700V κάτω από το οποίο δε θα πρέπει να πέφτει η τάση στον παντογράφο των οχημάτων. Ως πρώτο βήμα εκτελέστηκαν προσομοιώσεις στο δίκτυο, για κάθε ενδεικτικό headway, με στόχο να βρεθούν τα διαστήματα κατά τα οποία παρατηρούνται πτώσεις τάσεις κάτω από το επιτρεπτό όριο. Με βάση τα διαστήματα αυτά, τα οποία βρίσκονταν κατά κύριο λόγο στο τέλος των γραμμών, επιλέχθηκε να τοποθετηθεί ένα σύστημα αποθήκευσης σε επιβατικό σταθμό ο οποίος βρίσκεται όσο το δυνατό πιο κοντά στα εν λόγω σημεία. Με την τοποθέτησή του ωστόσο στη συγκεκριμένη θέση, πραγματοποιήθηκε σύνδεση των γραμμών 1 και 2 μέσω καλωδίων ανάμεσα στα σημεία που συνδέθηκε η αποθήκευση. Συνεπώς οι μελέτες, όσον αφορά τα προβλήματα τάσης στην είσοδο των τρένων κατά τη μετακίνησή τους στις γραμμές, έπρεπε να εκτελεστούν εκ νέου ώστε να

βρεθούν οι καινούριες πτώσεις τάσεις. Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση μεταξύ της τάσης του ζυγού σύνδεσης της αποθήκευσης και των αντίστοιχων κυματομορφών στην είσοδο των τρένων, για τις γραμμές 1 και 2, με σκοπό την εύρεση κάποιας συσχέτισης μεταξύ των χρονικών διαστημάτων που παρατηρούνται βυθίσεις. Στόχος ήταν να βρεθεί το κατάλληλο όριο ενεργοποίησης για το σύστημα αποθήκευσης. Για κάθε σενάριο ξεχωριστά υπολογίστηκε διαφορετική τιμή ορίου, και μεταξύ αυτών επιλέχθηκε η μεγαλύτερη, έτσι ώστε να εξυπηρετούνται τα προβλήματα σε κάθε πιθανό σενάριο. Το όριο ορίστηκε τελικά στα 718V, τιμή στην οποία θα πρέπει να σταθεροποιείται η τάση του ζυγού σύνδεσης ώστε να μην παρατηρούνται ανεπιθύμητες πτώσεις κάτω από τα 700V στην είσοδο των τρένων. Με λειτουργία πλέον του συστήματος, λήφθηκε το προφίλ ισχύος του και μέσω αυτού πραγματοποιήθηκε η διαστασιολόγηση της συσκευής. Υπολογίστηκαν δηλαδή οι μέγιστες τιμές στιγμιαίας ισχύος και ενέργειας που θα πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει και αντίστοιχα να απορροφάει το σύστημα αποθήκευσης.

Σημαντικό παράγοντα για την ορθή χρήση των συστημάτων αποθήκευσης σε ένα δίκτυο, αποτελεί και ο έλεγχος λειτουργίας τους. Αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετούς τρόπους ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά του κάθε δικτύου ξεχωριστά, και αφορά την ενεργοποίηση των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης των συσκευών. Στη συγκεκριμένη μελέτη, εκτελείται μέσω της μέτρησης της τάσης ακροδεκτών του συστήματος, με βάση και την οποία επιλέγεται η κατάλληλη λειτουργία που θα ενεργοποιηθεί. Δύο σενάρια μελετήθηκαν, που όμως και τα δύο αφορούν την απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο κατά την πέδηση των τρένων, έτσι ώστε να επαναφορτίζονται οι υπερπυκνωτές και να είναι σε θέση να καλύψουν τις επερχόμενες πτώσεις τάσης. Το πρώτο βασίζεται στην απορρόφηση σταθερού ποσού ισχύος όταν η τάση του ζυγού σύνδεσης ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο, το οποίο και τέθηκε στα 830V. Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τις προσομοιώσεις, κατέστη σαφές ότι η διόρθωση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων εκτελέστηκε αποτελεσματικά. Λόγω αυτού, δε χρειάστηκε η εφαρμογή κάποιας διορθωτικής κίνησης που ενδεχομένως να αφορούσε είτε τη διαστασιολόγηση, είτε και τον έλεγχο λειτουργίας του συστήματος.

Αντίθετα στο δεύτερο σενάριο που εκτελέστηκε, στο οποίο και επιλέχθηκε η απορρόφηση μεταβλητού ποσού ισχύος με ταυτόχρονη σταθεροποίηση των ανυψώσεων τάσης του ζυγού στα 830V, παρατηρήθηκε ότι η απορροφούμενη ενέργεια δεν επαρκούσε για τη αποτελεσματική διόρθωση όλων των βυθίσεων σε αυτόν και, συνεπώς, στην είσοδο των τρένων. Για το λόγο αυτό έπρεπε να εκτελεστεί κάποια διορθωτική κίνηση, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση αφορούσε την αλλαγή της ενεργειακής διαστασιολόγησης του συστήματος. Με εφαρμογή του παραπάνω, η διόρθωση των βυθίσεων τάσης στην είσοδο των τρένων εκτελέστηκε πλέον αποτελεσματικά.

Οι διορθωτικές κινήσεις που μπορούν να εφαρμοστούν είναι πολλές, ωστόσο θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και τα οικονομικά κριτήρια τα οποία παίζουν σημαντικότατο ρόλο. Ο διαχειριστής κάθε δικτύου είναι εκείνος που τελικά θα αποφασίσει για το αν θα προβεί στην εκτέλεση κάποιας από αυτές, ανάλογα με τους περιορισμούς που αυτός έχει θέσει σχετικά με τα κόστη, καθώς και το αποτέλεσμα που σκοπεύει να επιτύχει. Εάν για παράδειγμα η εφαρμογή μιας τέτοιας κίνησης οδηγεί σε κάποια διαστασιολόγηση η οποία είναι οικονομικά ασύμφορη, τότε θα πρέπει να απορριφθεί.

Όσον αφορά τη διόρθωση των βυθίσεων τάσης στους ζυγούς των ηλεκτρικών υποσταθμών, τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα. Αυτό διότι τοποθετήθηκαν τέσσερα συστήματα αποθήκευσης των οποίων οι λειτουργίες αλληλοεπηρεάζονται. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν και στην περίπτωση αυτή ήταν ακριβώς τα ίδια με τα προαναφερθέντα, μέχρι και τη διαστασιολόγηση των συστημάτων. Στην τελευταία, ωστόσο, παρουσιάστηκαν ορισμένα προβλήματα τα οποία ενδεχομένως να οφείλονται στη στρατηγική έλεγχου που ακολουθήθηκε για τη λειτουργία των συστημάτων. Αυτό συνέβη διότι με τον έλεγχο που επιλέχθηκε, υπήρχαν διαστήματα κατά τα οποία ορισμένες συσκευές δε διέθεταν το απαραίτητο για τη διόρθωση των βυθίσεων ποσό ενέργειας. Υπήρχε δηλαδή πρόβλημα στην επαναφόρτιση ορισμένων συστημάτων, γεγονός που δημιουργούσε θέματα στη λειτουργία των υπόλοιπων τα οποία έπρεπε να τροφοδοτήσουν περισσότερη ενέργεια για να καλύψουν την αδυναμία παροχής ισχύος από τα πρώτα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στη λανθασμένη επιλογή ορίων τάσης για την ενεργοποίηση των διαδικασιών απορρόφησης ισχύος από τις συσκευές, είτε και στην αδυναμία φόρτισής τους, σε κάποια χρονικά διαστήματα, λόγω των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του δικτύου. Και εδώ θα μπορούσαν να εφαρμοστούν διάφορες διορθωτικές κινήσεις που να αφορούν είτε τον έλεγχο λειτουργίας, είτε και τη διαστασιολόγηση των συστημάτων. Ωστόσο στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης δεν εφαρμόστηκαν διότι σκοπός ήταν να σημειωθούν οι δυσκολίες που μπορεί να αντιμετωπιστούν με εγκατάσταση και ταυτόχρονη λειτουργία παραπάνω από ενός συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο.

Στη συνέχεια, στο κεφάλαιο 5, εξετάστηκε το ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας στις σιδηροδρομικές εφαρμογές. Τονίστηκε ότι υπάρχουν πολλές πτυχές που μπορεί να καλύπτονται από το συγκεκριμένο θέμα, ανάλογα πάντα με το αποτέλεσμα και τους στόχους που επιδιώκει να πετύχει ο κάθε διαχειριστής δικτύου. Στη συγκεκριμένη εργασία τέθηκε ως στόχος η αποθήκευση και στη συνέχεια επαναχρησιμοποίηση της ενέργειας που επιστρέφεται στο δίκτυο κατά την πέδηση των οχημάτων, και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στους ζυγούς των υποσταθμών πάνω από την τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης (790V). Για την εξοικονόμηση της εν λόγω ενέργειας, τοποθετήθηκαν τέσσερα συστήματα αποθήκευσης, ένα σε κάθε ηλεκτρικό υποσταθμό του δικτύου, και με βάση τη λειτουργία τους εξετάστηκε το ποσό της τελικής ενεργειακής εξοικονόμησης. Ο έλεγχος και οι διαδικασίες εγκατάστασης και διαστασιολόγησης, εκτελούνται με αντίστοιχο τρόπο όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Σημαντική διαφορά στο συγκεκριμένο ζήτημα, αποτελεί το γεγονός ότι η διαστασιολόγηση εκτελέστηκε με βάση τον περιορισμό των ανυψώσεων τάσης και τη σταθεροποίησή τους στην τιμή των 790V. Από την εκτέλεση λοιπόν των προσομοιώσεων, και αφού διαπιστώθηκε ότι πραγματοποιείται αποτελεσματική απορρόφηση και αντίστοιχα επανατροφοδότηση της ενέργειας στο δίκτυο, καταγράφηκαν τα συνολικά ενεργειακά αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά, υπολογίστηκε ότι μέσω της συγκεκριμένης εφαρμογής, επιτυγχάνεται μείωση της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας από τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς κατά 4%, και αντίστοιχη μείωση των απωλειών στις γραμμές κατά 1%. Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα απορριπτικά φορτία με τα οποία είναι εξοπλισμένα τα τρένα δεν τίθενται πλέον σε λειτουργία, πράγμα που είναι λογικό αφού η τάση στους ζυγούς των υποσταθμών σταθεροποιείται πλέον στα 790V, δηλαδή στην τάση ανοιχτοκύκλωσης.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια σύντομη παρουσίαση των σημαντικότερων οικονομικών δεικτών που οφείλουν να ληφθούν υπόψη για τον έλεγχο της μελλοντικής απόδοσης κάθε

επενδυτικού πλάνου. Αυτό διότι ο κάθε διαχειριστής που έχει σκοπό να επενδύσει στην υλοποίηση ενός έργου, στοχεύει προφανώς και στη μελλοντική επίτευξη κέρδους το οποίο θα αποζημιώσει την αρχική του επένδυση και θα συμβάλλει στην απώτερη οικονομική εξοικονόμηση. Για το λόγο αυτό προτού υλοποιηθεί οποιαδήποτε ενέργεια, οφείλει να πραγματοποιηθεί μια προσεκτική οικονομική αξιολόγηση για το έργο που πρόκειται να εκτελεστεί.

7.2 Επεκτάσεις της εργασίας

Το φάσμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να επεκταθεί με την υλοποίηση ενός κεντρικού ελέγχου, ο οποίος θα λαμβάνει υπόψη και τα δύο σενάρια που μελετήθηκαν (σταθεροποίηση τάσης και εξοικονόμηση ενέργειας), και θα βγάζει ως αποτέλεσμα το βέλτιστο τρόπο εφαρμογής και λειτουργίας των συστημάτων αποθήκευσης στο δίκτυο για την ταυτόχρονη επίτευξή τους. Θα πρόκειται δηλαδή για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που θα συνδυάζει την αποδοτικότερη σταθεροποίηση τάσης με την καλύτερη δυνατή ενεργειακή εξοικονόμηση που μπορεί να επιτευχθεί σε κάποιο δίκτυο.

Μια επιπλέον επέκταση θα αποτελούσε η εγκατάσταση διαφορετικού μοντέλου υποσταθμών οι οποίοι και θα επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ρεύματος προς και από το δίκτυο παροχής. Πιο συγκεκριμένα, δύο τοπολογίες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν. Η πρώτη αφορά την αντικατάσταση του AC-DC ανορθωτή με έναν σύγχρονο μετατροπέα ισχύος ο οποίος θα επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ρεύματος, ενώ η δεύτερη την τοποθέτηση ενός αντιστροφέα παράλληλα στον ηλεκτρικό υποσταθμό, ο οποίος θα επιτρέπει την αντίστροφη ροή του ρεύματος προς το δίκτυο παροχής.

Τέλος, αξίζει να μελετηθούν επιπλέον σενάρια που αφορούν την εξοικονόμηση ενέργειας στις σιδηροδρομικές εφαρμογές. Αυτά μπορεί να στοχεύουν για παράδειγμα στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ανεξαρτητοποίηση του σιδηρόδρομου από το δίκτυο παροχής. Αυτό σημαίνει ότι η τάση του δικτύου δε θα πρέπει να πέφτει σημαντικά κάτω από την τάση ανοιχτοκύκλωσης των υποσταθμών, αλλά να κρατείται κοντά σε αυτή. Αυτό διότι οι πτώσεις κάτω από τη συγκεκριμένη τιμή μεταφράζονται ως ανάγκη τροφοδότησης ενέργειας από τους υποσταθμούς προς το δίκτυο. Συνεπώς, όσο πιο κοντά φέρουμε τις τάσεις στο συγκεκριμένο όριο, τόσο λιγότερη ενέργεια θα απαιτείται να παράγεται από τους υποσταθμούς και, επομένως, η ενεργειακή κατανάλωση θα μειωθεί αισθητά. Τέλος, ένα ακόμα πιθανό σενάριο αποτελεί η προσπάθεια για αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση της ενέργειας που καταναλώνεται πάνω στις απορριπτικές αντιστάσεις των οχημάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Gonzalez-Gil, R. Palacin, P. Batty, "Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy," *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 374–388, Nov. 2013.
- [2] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, J. M. Carrasco, "Energy storage systems for transport and grid applications", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 3881-3895, Dec. 2010.
- [3] L. Romo, "Cutting traction power costs with wayside energy storage systems in rail transit systems", *Proc. 2005 Joint Rail Conf.*, pp. 187-192.
- [4] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, Y. Liu, "Energy storage systems for advanced power applications", *Proc. IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1744-1756, Dec. 2001.
- [5] R. Barrero, X. Tackoen, J. Van Mierlo, "Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro-network", *Proc. Vehicle Power and Propulsion Conf.*, pp. 1-8, 2008.
- [6] Γ. Κ. Πετράτος, "Μελέτη βέλτιστης τοποθέτησης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο για μεγιστοποίηση εξοικονόμησης ενέργειας," Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, 2017.
- [7] Ε. Κυριακόπουλος, "Ηλεκτρική εγκατάσταση μουσείου Ικάρου μέσω φωτοβολταϊκών στοιχείων," Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικών και Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, 2009.
- [8] Ν. Η. Ιγγλέζου, "Ανάλυση Λειτουργίας και Μοντελοποίηση Συσσωρευτών," Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, 2013.
- [9] Α. Σαγάνη, "Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας-Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές," Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ρευστών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2009.
- [10] F. Ciccarelli, "Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems," Ph.D. dissertation, Department of Electrical Engineering and Information Technologies, University of Naples "Federico II", 2014.
- [11] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, P. Tricoli, "Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand", *Transp. Res. C Emerg. Technol.*, vol. 24, pp. 36-49, 2012.

- [12] D. Iannuzzi, P. Tricoli, "Speed-based state of charge tracking control for metro-trains with onboard supercapacitors", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 2129-2140, Apr. 2012.
- [13] R. Barrero, X. Tackoen, J. V. Mierlo, "Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, no. 3, pp. 207-225, Apr. 2010.
- [14] A. Rufer, D. Hotellier, P. Barrade, "A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 2, pp. 629-636, Apr. 2004.
- [15] W. Günselmann, "Technologies for increased energy efficiency in railway systems", *Proc. EPE 2005*, 2005.
- [16] Á. J. López-López, R. R. Pecharromán, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, "Assessment of energy-saving techniques in direct-current-electrified mass transit systems", *Transp. Res. Part C: Emerging Technol.*, vol. 38, pp. 85-100, Jan. 2014.
- [17] Z. Gao, J. Fang, Y. Zhang, L. Jiang, Di Sun, W. Guo, "Control of urban rail transit equipped with ground-based supercapacitor for energy saving and reduction of power peak demand", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, no. 2015, pp. 439-447.
- [18] Iannuzzi, D. Pagano, E. Tricoli, P., "The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines". *Energies*, vol. 6, no. 4, pp. 1802-1820, April 2013.
- [19] R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini and R. N. fard, "Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line," *Energy Conversion and Management*, vol. 56, no. 0, pp. 206-214, 2012.
- [20] Θ. Λαδάς, "Οικονομοτεχνική Μελέτη Εγκατάστασης Διασυνδεδεμένου Οικιακού Συστήματος Φωτοβολταϊκών," Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικών και Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων, Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, 2012.
- [21] Στ. Παπαθανασίου Καθ. ΕΜΠ, Σημειώσεις Οικονομικής Αξιολόγησης Επενδύσεων Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΕΜΠ, 2012.
- [22] Α. Α. Δράκος, Γ. Α. Καραθανάσης, Σημειώσεις στη Χρηματοοικονομική Διοίκηση Επιχειρήσεων, Τμήμα Οργάνωσης και Διοίκησης Επιχειρήσεων, Οικονομικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2016.