



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

**Συμβολή στη λειτουργία συστημάτων συνεχούς ρεύματος σε
εφαρμογές μικροδικτύων και μητροπολιτικών σιδηροδρομικών
δικτύων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Α. Κλεφτάκης

Αθήνα, Δεκέμβριος 2019



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

**Συμβολή στη λειτουργία συστημάτων συνεχούς ρεύματος σε
εφαρμογές μικροδικτύων και μητροπολιτικών σιδηροδρομικών
δικτύων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Α. Κλεφτάκης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου

Σταύρος Α. Παπαθανασίου

Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Δεκεμβρίου 2019.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Προυσαλίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρυσόστομος Δούκας
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2019

.....
Βασίλειος Α. Κλεφτάκης

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

Copyright © Βασίλειος Α. Κλεφτάκης, 2019.

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 .

Περίληψη

Η χρήση τεχνολογιών συνεχούς ρεύματος (Direct Current – DC) για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον διεθνώς λόγω των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται τόσο σε επίπεδο παραγωγής όσο και κατανάλωσης. Το ενδιαφέρον αυτό τροφοδοτείται από την ανάγκη επίτευξης υψηλών στόχων σε ότι αφορά το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ικανοποίηση της συνολικής ζήτησης. Είναι γεγονός ότι ένα μεγάλο πλήθος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μονάδες αποθήκευσης όπως φωτοβολταϊκά, μπαταρίες, κ.α. λειτουργούν σε συνεχή τάση. Συνεπώς η ενσωμάτωση αυτών των συσκευών σε αρχιτεκτονικές DC δικτύων διανομής μέσω των κατάλληλων DC/DC μετατροπέων αποτελεί μία ελκυστική επιλογή σε ότι αφορά την αύξηση της συνολικής απόδοσης λόγω της μείωσης των ενδιάμεσων βαθμίδων μετατροπής. Τα συστήματα αυτά γενικά παρέχουν βελτιωμένη αξιοπιστία και ευκολότερο έλεγχο σε σύγκριση με τα αντίστοιχα εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternative Current – AC) δεδομένης της έλλειψης περιορισμών, όπως είναι η διατήρηση ισοζυγίου αέργου ισχύος, προβλήματα συγχρονισμού κ.α.

Στα πλαίσια της διατριβής μελετώνται δύο εφαρμογές των συστημάτων Χαμηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (Low Voltage DC – LVDC). Η πρώτη κατηγορία αφορά τοπολογίες μικροδικτύων και ζητήματα που αφορούν τον έλεγχο και τη λειτουργία τους ενώ η δεύτερη κατηγορία αφορά τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος (π.χ. τύπου Μετρό, Τραμ κλπ.) καθώς και τα οφέλη που προκύπτουν από τη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας κατά την πέδηση των τρένων.

Αρχικά πραγματοποιείται μια ιστορική αναδρομή των δικτύων συνεχούς ρεύματος και παρουσιάζονται οι βασικές εφαρμογές των LVDC συστημάτων στη σύγχρονη εποχή. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια εισαγωγή στην έννοια των μικροδικτύων και των ηλεκτρικών σιδηροδρομικών δικτύων και παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Γίνεται αναφορά στη βασικότερη αρχιτεκτονική ελέγχου (ιεραρχικός έλεγχος) που εμφανίζεται στις τοπολογίες μικροδικτύων και παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης που καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία και αφορούν τη λειτουργία δικτύων συνεχούς ρεύματος.

Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύσσεται πρωτότυπη μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης βασιζόμενη στη λειτουργία ενός ελεγχόμενου φορτίου παράλληλα στον κεντρικό διακόπτη ενός DC μικροδικτύου και εξετάζεται το ζήτημα της ομαλής μετάβασης από αυτόνομη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία. Παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των επιμέρους στοιχείων του υπό μελέτη μικροδικτύου και εκτελείται προσομοίωση με βάση παραλλαγή των προτύπων IEEE 1547 και UL1741. Επιπροσθέτως, η προτεινόμενη μέθοδος μελετάται και μέσω της Control Hardware-in-the-Loop τεχνικής για εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων για την λειτουργία της. Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος εξετάζεται και πειραματικά με χρήση εξοπλισμού του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ.

Η δεύτερη θεματική ενότητα της διατριβής αφορά τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος (τύπου Μετρό, Τραμ) καθώς και τα οφέλη που προκύπτουν από τη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας κατά την πέδηση των τρένων. Στα ηλεκτρικά

σιδηροδρομικά δίκτυα τα τρένα λειτουργούν είτε ως φορτία (επιτάχυνση - σταθερή ταχύτητα) είτε ως γεννήτριες (αναγεννητική πέδηση των τρένων). Η παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται από τα άλλα τρένα που κινούνται στο δίκτυο ή καταναλώνεται τοπικά πάνω σε απορριπτικά φορτία (αντιστάσεις) που βρίσκονται εγκατεστημένα στα τρένα. Η ενέργεια αυτή δε μπορεί να επιστραφεί στο δίκτυο διανομής καθώς στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι υποσταθμοί έλξης αποτελούνται από μη ελεγχόμενους ανορθωτές (διατάξεις με διόδους) που δεν επιτρέπουν αμφίδρομη ροή ισχύος. Η διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας οδηγεί τόσο σε μείωση απωλειών, όσο και σε ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο.

Στα πλαίσια της διατριβής μελετάται η διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας με χρήση:

1. Αμφίδρομων υποσταθμών έλξης (ελεγχόμενες διατάξεις AC/DC)
2. Μονάδων αποθήκευσης (εγκατεστημένες σε σταθερά σημεία στο δίκτυο).

Επιπροσθέτως, μελετώνται ζητήματα που αφορούν την επίδραση των δρομολογίων των τρένων στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του σιδηροδρομικού δικτύου (τάση υποσταθμών, ρεύματα γραμμών κ.α.). Παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των επιμέρους στοιχείων του δικτύου όπως οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί έλξης, τα ηλεκτρικά τρένα καθώς και η μοντελοποίηση του δικτύου για τον υπολογισμό της τάσης που αναπτύσσεται μεταξύ της γραμμής επιστροφής και της γης. Γίνεται εκτενή αναφορά στις τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης που συναντώνται σε σιδηροδρομικές εφαρμογές. Στα πλαίσια της διατριβής εξετάζονται τόσο ο τοπικός έλεγχος όσο και συντονισμένος έλεγχος των μονάδων (αμφίδρομοι υποσταθμοί και στατικές μονάδες αποθήκευσης) με στόχο τη βέλτιστη ρύθμιση τάσης στην είσοδο των τρένων. Το δίκτυο το οποίο μελετήθηκε αποτελεί παραλλαγή του μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου της Θεσσαλονίκης. Τέλος, η μελέτη των φαινομένων πραγματοποιείται με τη χρήση του εργαλείου MATLAB στο οποίο έχει δημιουργηθεί πρόγραμμα προσομοίωσης της ηλεκτρικής ροής ισχύος σε σιδηροδρομικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος.

Λέξεις κλειδιά

Μικροδίκτυα, ανίχνευση νησιδοποίησης, μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα, αναγεννητική πέδηση, βέλτιστη ρύθμιση τάσης σιδηροδρομικών δικτύων, αμφίδρομοι υποσταθμοί έλξης, κινητές και στατικές μονάδες αποθήκευσης.

Abstract

The use of Direct Current (DC) technologies for electricity distribution networks is of particular international interest because of the technologies used in both production and consumption level. This interest is fueled by the need of achieving high targets in terms of share of renewable energy sources in addressing total demand. It is a fact that a large number of renewable energy sources and storage units such as photovoltaics, batteries, etc. operate with a direct voltage. Therefore, integrating these devices into DC distribution network architectures through appropriate DC/DC converters is an attractive option in terms of increasing overall performance due to the reduction of intermediate conversion steps. These systems generally provide improved reliability and easier control compared to AC alternatives, given the lack of constraints such as reactive power balance, synchronization problems, and so on.

In this thesis two applications of Low Voltage DC (LVDC) systems were studied. The first category is about microgrid topologies and issues related to their control and operation while the second category is about electric railway networks operating in DC (Metro, Tram) as well as the benefits resulting from management of the generative energy producing during the braking phase of the trains.

Firstly, the history of the DC networks and the basic applications of LVDC systems are presented. An introduction to the concept of microgrids and electric railway networks is performed and their basic characteristics are presented. Reference is made to the basic control architecture (hierarchical control) concerning the operation of microgrids as well as the basic islanding detection methods that appear in literature for the operation of DC networks.

In this thesis a novel islanding detection method is developed based on the operation of a controllable load in parallel to the central switch of a DC microgrid. Additionally, the issue of smooth transition of a DC microgrid from stand-alone to interconnected operation is examined. Modeling of the individual elements of the studied microgrid is presented and simulations are performed based on variations of the IEEE 1547 and UL1741 standards. The performance of the proposed control strategy is evaluated through simulations, Control Hardware-in-the-loop tests and fully hardware experiments performed at the Electric Energy Systems Laboratory of National Technical University of Athens.

The second section of this thesis is about electric railway networks operating in DC (Metro, Tram) as well as the benefits resulting from management of the generative energy producing during the braking phase of the trains. In railways, trains operate either as loads (acceleration - constant speed phase) or as generators (regenerative braking of trains). The energy produced is consumed by other trains running on the network or consumed locally on on-board dump loads (resistors). The produced energy cannot be returned to the distribution network since in most cases the traction substations consist of uncontrollable rectifiers (diode devices) that do not allow bi-directional power flow. Managing the energy produced leads both to reduction of losses and to voltage regulation in the railway network.

In the context of this thesis, management of the generative energy is studied using:

1. Bidirectional traction substations (controllable AC/DC inverters)
2. Storage units (installed at fixed points in the railway network).

Additionally, the influence of train schedules on the electrical characteristics of the railway network (substation voltage, line currents, etc.) are studied. The performed analysis include modeling of individual network elements such as electric traction substations, electric trains as well as network modeling to calculate the voltage developed between the return line and the earth (rail to ground voltage). Extensive reference to storage technologies encountered in railway applications, is made. The thesis examines both local controls and coordinated control of the units (bidirectional substations and stationary storage devices) in order to optimize network voltage regulation of the trains. The network studied is a modified version of the Metro railway network of Thessaloniki. Finally, the study of these issues is carried out using MATLAB simulation tool, in which a simulation program of the electric power flow is created in DC power networks.

Keywords

Microgrids, islanding detection, metropolitan railway networks, regenerative braking, optimal voltage regulation in railway networks, bidirectional traction substations, onboard and stationary storage devices.

Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) υπό την επίβλεψη του καθηγητή Νικόλαου Χατζηαργυρίου και άρχισε να εκπονείται το Νοέμβριο του 2014 και ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2019. Σκοπός της διατριβής είναι η μελέτη συστημάτων συνεχούς ρεύματος σε εφαρμογές μικροδικτύων και μητροπολιτικών σιδηροδρομικών δικτύων. Ιδιαίτερα μελετήθηκαν τα ζητήματα της ανίχνευσης νησιδοποίησης σε τοπολογίες DC μικροδικτύων καθώς και το ζήτημα της βέλτιστης ρύθμισης της τάσης στα σύγχρονα μητροπολιτικά δίκτυα.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της εργασίας καθηγητή Νικόλαο Χατζηαργυρίου για την άριστη συνεργασία την οποία είχαμε και την καθοδήγηση που μου έδωσε σε όλα τα στάδια της εργασίας. Ομολογώ ότι αποτελεί πρότυπο ως επιστήμονα, καθηγητή αλλά και άνθρωπο και δεν σταματά να βρίσκει τρόπους να με εντυπωσιάζει. Η όρεξη που επιδεικνύει στη δουλειά του είναι πραγματικά αξιοθαύμαστη.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής καθηγητή κ. Στ. Παπαθανασίου και αναπλ. καθηγητή κ. Π. Γεωργιάκη για όλες τις χρήσιμες υποδείξεις τους και το ενδιαφέρον τους. Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπλ. καθηγητή κ. Ι. Προυσαλίδη και τον επίκ. καθηγητή κ. Α. Αντωνόπουλο για την αποδοχή συμμετοχής στην πενταμελή συμβουλευτική επιτροπή και τις συμβουλές τους κατά την ενδιάμεση εξέταση. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γ. Κορρέ και τον καθηγητή κ. Δούκα για την αποδοχή συμμετοχής στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον συνάδελφο και φίλο Πάνο Κοτσαμπόπουλο ο οποίος αποτέλεσε και τον συνεπιβλέποντα του θέματος της πτυχιακής μου εργασίας και η βοήθεια του οποίου συνέβαλε στην επιτυχημένη ολοκλήρωσή της. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Φοίβο Παλαιογιάννη, Δημήτρη Λαγό καθώς και τη Χριστίνα Παπαδημητρίου οι οποίοι με βοήθησαν σε πολύ μεγάλο βαθμό στην ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής και αποτέλεσαν για εμένα άτομα στα οποία μπορούσα να στηριχθώ και να συζητήσω μαζί τους τις απορίες που είχα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Επίσης οφείλω να ευχαριστήσω τους συνεργάτες Αθανάσιο Βασιλάκη, Μάριο Μανιατόπουλο, Κώστα Λατούφη, Θωμά Πάζιο, Κατερίνα Χήρα, Ιάσωνα Κουβελιώτη, Αλέξανδρο Ρήγα, Δημήτρη Τράκα, Γιώργη Μεσσήνη, Παναγιώτη Πεδιαδίτη για όλη τη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Γεώργιο Κατσαρό, Ειρήνη Γασπαράκη, Ελένη Αυλωνίτου για την άριστη συνεργασία που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια. Θέλω να ευχαριστήσω τους Άρη Δημέα, Κυριάκο Παπαδογιάννη και Ηλία Χρονόπουλο για τη συνεργασία μας η οποία οδήγησε σε μεγάλο βαθμό στην ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω σε όλα τα μέλη της ερευνητικής ομάδας SmartRUE.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους φίλους μου Αθανάσιο Κοντούλη Γιάννη Αχλιόπτα και Θέμη Τσάτσο για την υποστήριξή τους. Πολλές ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου για όλη την συμπαράσταση και την υποστήριξη που μου έδειξαν όλα τα χρόνια της ζωής μου. Η εργασία αυτή αφιερώνεται στην οικογένειά μου, τους γονείς μου και την αδερφή μου.

Βασίλειος Κλεφτάκης
Αθήνα, Δεκέμβριος 2019

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή στα δίκτυα Συνεχούς Ρεύματος	1
1.1 Ιστορική αναδρομή	1
1.2 Εφαρμογές των LVDC συστημάτων	3
1.3 Εισαγωγή στην έννοια των μικροδικτύων	7
1.4 Εισαγωγή στα σιδηροδρομικά δίκτυα	16
1.5 Αντικείμενο και δομή διατριβής	20
Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Ιεραρχικού Ελέγχου στα DC μικροδίκτυα	23
2.1 Εισαγωγή	23
2.2 Ιεραρχικός έλεγχος στα DC μικροδίκτυα	24
2.3 Τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης στα DC μικροδίκτυα	36
2.4 Σύνοψη και συμπεράσματα	48
Κεφάλαιο 3 Ανίχνευση νησιδοποίησης και ομαλή μετάβαση μεταξύ διασυνδεδεμένης και απομονωμένης λειτουργίας στα DC μικροδίκτυα	51
3.1 Εισαγωγή	51
3.2 Μοντελοποίηση επιμέρους στοιχείων μικροδικτύου	52
3.3 Ανάλυση της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου	56
3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	60
3.5 Αποτελέσματα Control Hardware-in-the-Loop τεχνικής	65
3.6 Αποτελέσματα πειραματικής δοκιμής	70
3.7 Σύνοψη και συμπεράσματα	73
Κεφάλαιο 4 Διαχείριση αναγεννητικής ενέργειας στα σύγχρονα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα	75
4.1 Εισαγωγή	75
4.2 Μοντελοποίηση δικτύου και επιμέρους στοιχείων	76
4.3 Στρατηγικές διαχείρισης αναγεννητικής πέδησης	82
4.4 Σύνοψη και συμπεράσματα	120
Κεφάλαιο 5 Βέλτιστος έλεγχος αμφίδρομων υποσταθμών έλξης και στατικών μονάδων αποθήκευσης σε DC σιδηροδρομικά δίκτυα	123
5.1 Εισαγωγή	123
5.2 Κατάλογος Συμβόλων	123
5.3 Θεωρητική ανάλυση	124
5.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων	132
5.5 Σύνοψη και συμπεράσματα	140
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα	141
6.1 Ανακεφαλαίωση	141
6.2 Συμβολή	142

6.3 Μελλοντικές επεκτάσεις	143
----------------------------------	-----

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Οι πινακίδες αυτές αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα της διαμάχης που αναπτύχθηκε την αναφερόμενη περίοδο [1]	1
Εικόνα 1.2 Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ HVDC και HVAC τεχνολογιών για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας [3].	2
Εικόνα 1.3 Επίπεδο τάσης των κυριότερων LVDC εφαρμογών στη σύγχρονη εποχή [4]	3
Εικόνα 1.4 Αντλία νερού τροφοδοτούμενη από το αυτόνομο DC σύστημα [6]	5
Εικόνα 1.5 Φωτοβολταϊκά πάνελ σε σχολείο της Λαϊκής δημοκρατίας του Λάος [7]	6
Εικόνα 1.6 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ στην οροφή κτιρίου στη Σιέρα Λεόνε [7].	7
Εικόνα 1.7 Δεξιά τα δίκτυα του χθες (παθητικά), αριστερά τα δίκτυα του αύριο (ενεργητικά)	8
Εικόνα 1.8 Τοπολογία ενός τυπικού μικροδικτύου [10]	8
Εικόνα 1.9 Τυπική δομή ενός AC μικροδικτύου [16]	11
Εικόνα 1.10 Τυπική δομή ενός DC μικροδικτύου [16]	11
Εικόνα 1.11 Τυπική δομή ενός υβριδικού AC/DC μικροδικτύου [17]	12
Εικόνα 1.12 Μονοπολικό σύστημα μικροδικτύου συνεχούς ρεύματος	13
Εικόνα 1.13 Διπολικό σύστημα μικροδικτύου συνεχούς ρεύματος	14
Εικόνα 1.14 Εκπομπές CO ₂ για διαφορετικά μέσα μεταφοράς [26]	17
Εικόνα 1.15 Παράδειγμα γραμμής παροχής ηλεκτρικής ισχύος (750V) [28]	18
Εικόνα 1.16 Το σύστημα εναέριων γραμμών τροφοδοσίας [28]	19
Εικόνα 1.17 Σύστημα παντογράφου [29]	20
Εικόνα 2.1 Ανάγκη προτυποποίησης στα LVDC συστήματα [4]	23
Εικόνα 2.2 Δομή ιεραρχικού ελέγχου [40]	24
Εικόνα 2.3 Διάγραμμα ελέγχου μετατροπέα για τη ρύθμιση τάσης	25
Εικόνα 2.4 Εσωτερικός βρόχος ενός τριφασικού μετατροπέα πηγής τάσης (AC/DC μετατροπέας) [42]	26
Εικόνα 2.5 Εσωτερικοί βρόχοι DC/DC μετατροπέων	27
Εικόνα 2.6 P-f και Q-V καμπύλες στατισμού σε δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος [45] ..	28
Εικόνα 2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη στατισμού μονάδας αποθήκευσης [46]	28
Εικόνα 2.8 Βασικές κατηγορίες καμπυλών στατισμού στα DC μικροδίκτυα [47]	29
Εικόνα 2.9 Πρωτογενής και Δευτερογενής έλεγχος ενός μικροδικτύου [40]	30
Εικόνα 2.10 Κεντρικός δευτερογενής έλεγχος μικροδικτύου [46]	31
Εικόνα 2.11 Αποκεντρωμένος δευτερογενής έλεγχος μικροδικτύου με επικοινωνία [46] ...	31
Εικόνα 2.12 Αποκεντρωμένος δευτερογενής έλεγχος μικροδικτύου χωρίς επικοινωνία [46]	32
Εικόνα 2.13 Τυπικό DC μικροδίκτυο για εφαρμογή της DBS τεχνικής	33
Εικόνα 2.14 Χαρακτηριστικός πίνακας με τη στρατηγική ελέγχου κάθε μονάδας	34
Εικόνα 2.15 Multi-agent εφαρμογή βασισμένη σε TCP/IP επικοινωνία	35
Εικόνα 2.16 Κατηγοριοποίηση μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης	37
Εικόνα 2.17 Τοπολογία δικτύου συνεχούς ρεύματος [61]	38
Εικόνα 2.18 Ισοδύναμα κυκλώματα: α) Κανονική λειτουργία, β) Κατάσταση νησιδοποίησης [61]	38
Εικόνα 2.19 Αρχή λειτουργίας της προτεινόμενης μεθόδου [61]	39
Εικόνα 2.20 DC τάση ζυγού σύνδεσης για διάφορες τιμές της μεταβλητής k [61]	39
Εικόνα 2.21 Ισοδύναμα κυκλώματα εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος [68]	40
Εικόνα 2.22 Διαταραχή τάσης μέσω: α) βρόχου ισχύος, β) βρόχου ρεύματος	41
Εικόνα 2.23 Κυματομορφή τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης σε κατάσταση αστάθειας.	41
Εικόνα 2.24 Τοπολογία συστήματος υπό μελέτη [67]	42

Εικόνα 2.25 Καμπύλες $\Delta V_{pcc} - V_{dc}$ και $\Delta f - V_{dc}$ για την επιλογή των συντελεστών α και β	42
Εικόνα 2.26 Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου του εργαστηρίου ΣΗΕ.....	44
Εικόνα 2.27 Ο γραμμικός ενισχυτής Spitzenberger & Spies PAS 5000.....	45
Εικόνα 2.28 Μετατροπείς ισχύος της εταιρίας Triphase.....	46
Εικόνα 2.29 Μονάδα ελέγχου (Target PC) των μετατροπέων ισχύος	46
Εικόνα 2.30 Πειραματική διάταξη για τη δοκιμή του αλγόριθμου ανίχνευσης νησιδοποίησης	47
Εικόνα 2.31 Μεταβολές μέτρου εναλλασσόμενης τάσης και επίδραση στη ρύθμιση συνεχούς τάσης από τον DC/DC μετατροπέα	47
Εικόνα 3.1 Τυπική δομή ενός DC δικτύου διανομής.....	52
Εικόνα 3.2 Διάγραμμα φωτοβολταϊκού και DC/DC μετατροπέα	54
Εικόνα 3.3 Καμπύλη Ενεργού Ισχύος – Τάσης του φωτοβολταϊκού συστήματος με ενσωμάτωση της καμπύλης στατισμού.....	55
Εικόνα 3.4 Διάγραμμα ελέγχου του φωτοβολταϊκού DC/DC μετατροπέα.....	55
Εικόνα 3.5 Διάγραμμα ελέγχου του DC/DC μετατροπέα μπαταριών (αντίστοιχα για MOSFET2).....	56
Εικόνα 3.6 Τοπολογία του DC μικροδικτύου	57
Εικόνα 3.7 Τοπολογία του κεντρικού διακόπτη του μικροδικτύου σε συνδυασμό με το ελεγχόμενο φορτίο.....	57
Εικόνα 3.8 Ανάλυση για τη σχεδίαση του ελεγχόμενου φορτίου	59
Εικόνα 3.9 Τοπολογία συστήματος για τη μελέτη της IDM μεθόδου με βάση παραλλαγή των προτύπων IEEE 1547 και UL1741.....	60
Εικόνα 3.10 Απόκριση της προτεινόμενης μεθόδου στη νησιδοποίηση.....	61
Εικόνα 3.11 Ρεύμα δικτύου στον κεντρικό διακόπτη.	61
Εικόνα 3.12 Ρεύμα παράλληλου ελεγχόμενου φορτίου	62
Εικόνα 3.13 Κατάσταση δικτύου και κεντρικού διακόπτη	62
Εικόνα 3.14 Ρεύμα μεταξύ μικροδικτύου και κεντρικού δικτύου διανομής.....	63
Εικόνα 3.15 Προφίλ ηλιοφάνειας της φωτοβολταϊκής παραγωγής	63
Εικόνα 3.16 Διαμοιρασμός ισχύος στο μικροδίκτυο.....	64
Εικόνα 3.17 Προφίλ τάσης στο ζυγό των φορτίων	64
Εικόνα 3.18 Αναφορά της τάσης μπαταριών από τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου	65
Εικόνα 3.19 Τοπολογίες της CHIL και PHIL μεθόδου [71]	66
Εικόνα 3.20 Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου RTDS	67
Εικόνα 3.21 Ο πραγματικός ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε στο CHIL πείραμα.....	67
Εικόνα 3.22 Εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στα CHIL πειράματα	68
Εικόνα 3.23 Διαμοιρασμός ισχύος στο μικροδίκτυο στο CHIL πείραμα	68
Εικόνα 3.24 Προφίλ τάσης στο ζυγό των φορτίων στο CHIL πείραμα	68
Εικόνα 3.25 Αναφορά της τάσης μπαταριών από τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου στο CHIL πείραμα.....	69
Εικόνα 3.26 Ποσοστιαίο σφάλμα στην τάση του ζυγού φορτίου μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος.....	69
Εικόνα 3.27 Τοπολογία συσκευών στην πειραματική δοκιμή για την ανίχνευση νησιδοποίησης σε δίκτυα συνεχούς ρεύματος.	70
Εικόνα 3.28 Κυματομορφές τάσης φορτίου και ρεύματος δικτύου δίχως τη συσκευή ανίχνευσης νησιδοποίησης.....	71
Εικόνα 3.29 Κυματομορφές τάσης φορτίου και ρεύματος δικτύου με τη συσκευή ανίχνευσης νησιδοποίησης.....	71
Εικόνα 3.30 Τοπολογία συσκευών στην πειραματική δοκιμή για την ανίχνευση νησιδοποίησης σε δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος.....	72

Εικόνα 3.31 Κυματομορφές τάσης φορτίου και ρεύματος δικτύου δίχως τη συσκευή ανίχνευσης νησιδοποίησης.....	72
Εικόνα 3.32 Κυματομορφές τάσης φορτίου και ρεύματος δικτύου με τη συσκευή ανίχνευσης νησιδοποίησης.....	72
Εικόνα 4.1 Επισκόπηση ενός μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου	75
Εικόνα 4.2 Μοντελοποίηση ενός μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου	77
Εικόνα 4.3 Μοντέλο ηλεκτρικού υποσταθμού έλξης.....	78
Εικόνα 4.4 α) Μοντελοποίηση ηλεκτρικών τρένων, β) Αναπαράσταση ηλεκτρικής κατανάλωσης τρένων	79
Εικόνα 4.5 Μέγιστο ρεύμα κατανάλωσης των τρένων σύμφωνα με το πρότυπο EN50388:2012.....	80
Εικόνα 4.6 Διαφεύγοντα ρεύματα σε DC σιδηροδρομικά δίκτυα [89]	81
Εικόνα 4.7 Αναπαράσταση γραμμής κύλισης για τον υπολογισμό της τάσης ράγας ως προς γη [87].....	82
Εικόνα 4.8 Αναπαράσταση της τοπολογίας του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.....	83
Εικόνα 4.9 Τάση υποσταθμού TS1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης	84
Εικόνα 4.10 Ρεύμα υποσταθμού TS1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης.....	84
Εικόνα 4.11 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης.....	84
Εικόνα 4.12 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης.....	85
Εικόνα 4.13 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης.....	85
Εικόνα 4.14 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης.....	86
Εικόνα 4.15 Απώλειες στα απορριπτικά φορτία των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης.....	86
Εικόνα 4.16 Απώλειες στα απορριπτικά φορτία των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης.....	86
Εικόνα 4.17 Τάση υποσταθμού TS1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2	87
Εικόνα 4.18 Ρεύμα υποσταθμού TS1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2	88
Εικόνα 4.19 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2.....	88
Εικόνα 4.20 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2	89
Εικόνα 4.21 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2.....	89
Εικόνα 4.22 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2	90
Εικόνα 4.23 Απώλειες στα απορριπτικά φορτία των τρένων της τροχιάς 1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2.....	90
Εικόνα 4.24 Απώλειες στα απορριπτικά φορτία των τρένων της τροχιάς 2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2.....	90
Εικόνα 4.25 Τάση υποσταθμού TS1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal).....	91
Εικόνα 4.26 Ρεύμα υποσταθμού TS1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal).....	91

Εικόνα 4.27 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)	92
Εικόνα 4.28 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)	92
Εικόνα 4.29 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)	93
Εικόνα 4.30 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)	93
Εικόνα 4.31 Διάφοροι τύποι ηλεκτρικών υποσταθμών έλξης	94
Εικόνα 4.32 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας αμφίδρομου υποσταθμού σε αστικό σιδηροδρομικό δίκτυο [95]	94
Εικόνα 4.33 Τάση υποσταθμού TS1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς.....	96
Εικόνα 4.34 Ρεύμα υποσταθμού TS1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς.....	96
Εικόνα 4.35 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς	96
Εικόνα 4.36 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς	97
Εικόνα 4.37 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς	97
Εικόνα 4.38 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς	98
Εικόνα 4.39 Συνολική ενέργεια υποσταθμών για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς.....	98
Εικόνα 4.40 Διάγραμμα ηλεκτροχημικού στοιχείου [97]	99
Εικόνα 4.41 Συσσωρευτής μολύβδου-οξέος [25]	101
Εικόνα 4.42 Συσσωρευτής νικελίου-καδμίου και κυλινδρική διάταξη νικελίου-μετάλλου υδριδίου [96]	102
Εικόνα 4.43 Συσσωρευτής ιόντων-λιθίου [25]	103
Εικόνα 4.44 Συσσωρευτής θείου-χου νατρίου [25].....	104
Εικόνα 4.45 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μπαταριών μετάλλου-αέρα [25].....	105
Εικόνα 4.46 Σχηματική αναπαράσταση και λειτουργία ιδανικού υπερπυκνωτή [25]	107
Εικόνα 4.47 Σφόνδυλος υπερυψηλής ταχύτητας [25].....	108
Εικόνα 4.48 Υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας [25]	109
Εικόνα 4.49 Ragone διάγραμμα με τα χαρακτηριστικά διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης για χρήση σε σιδηροδρομικές εφαρμογές [25].....	112
Εικόνα 4.50 Σύγκριση κόστους διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης για χρήση σε σιδηροδρομικές εφαρμογές [95].....	112
Εικόνα 4.51 Λειτουργία κινητών μονάδων αποθήκευσης στα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα.	113
Εικόνα 4.52 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρικών συστημάτων και κινητής συσκευής αποθήκευσης σε τρένο [78].....	115
Εικόνα 4.53 Παραδείγματα χρήσης συστημάτων αποθήκευσης σε πραγματικές κινητές εφαρμογές [95]	116
Εικόνα 4.54 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας στατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε σιδηροδρομική εφαρμογή [95].....	116
Εικόνα 4.55 Καταστάσεις ενεργοποίησης συστήματος αποθήκευσης [116].....	118
Εικόνα 4.56 Διάγραμμα ροής λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης [116].....	118
Εικόνα 4.57 Παραδείγματα χρήσης συστημάτων αποθήκευσης σε πραγματικές στατικές εφαρμογές [95]	119

Εικόνα 4.58 Δομή τυπικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας [95]	120
Εικόνα 5.1 Γραφική παράσταση εξίσωσης αναπαράστασης μη γραμμικής αγωγιμότητας	131
Εικόνα 5.2 Διάγραμμα ροής προτεινόμενου αλγόριθμου βελτιστοποίησης	131
Εικόνα 5.3 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS1	132
Εικόνα 5.4 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS2	133
Εικόνα 5.5 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS3	133
Εικόνα 5.6 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS4	133
Εικόνα 5.7 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS5	134
Εικόνα 5.8 Προφίλ τάσης στα τρένα της τροχιάς 1	135
Εικόνα 5.9 Προφίλ τάσης στα τρένα της τροχιάς 2	135
Εικόνα 5.10 Απαιτούμενη ενέργεια μέσω του ανορθωτή στα τρία σενάρια	136
Εικόνα 5.11 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS1	137
Εικόνα 5.12 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS2	137
Εικόνα 5.13 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS3	138
Εικόνα 5.14 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS4	138
Εικόνα 5.15 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS5	138
Εικόνα 5.16 Προφίλ τάσης στα τρένα της τροχιάς 1	139
Εικόνα 5.17 Προφίλ τάσης στα τρένα της τροχιάς 2	139
Εικόνα 5.18 Απαιτούμενη ενέργεια μέσω του ανορθωτή στα τρία σενάρια	139

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Κατηγοριοποίηση των επιπέδων τάσης με προτυποποίηση κατά IEC (International Electrotechnical Commission).....	3
Πίνακας 1.2 Βασικές εφαρμογές των LVDC συστημάτων με βάση το επίπεδο τάσης.....	4
Πίνακας 3.1 Παράμετροι Ψηφιακού Προσομοιωτή Πραγματικού Χρόνου	66
Πίνακας 3.2 Παράμετροι Ελεγκτή υπό δοκιμή	67
Πίνακας 4.1 Βασικές παράμετροι προσομοίωσης.....	82
Πίνακας 5.1 Σύγκριση των τριών διαφορετικών σεναρίων	134
Πίνακας 5.2 Σύγκριση των τριών διαφορετικών σεναρίων	135
Πίνακας 5.3 Πληροφορίες σχετικά με τις μονάδες αποθήκευσης.....	136

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στα δίκτυα Συνεχούς Ρεύματος

1.1 Ιστορική αναδρομή

Τα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν "προϊόντα" μακροχρόνιας τεχνολογικής ανάπτυξης που άρχισε ουσιαστικά στα τέλη του 19ου αιώνα. Το έναυσμα για την ταχεία ανάπτυξή τους ήταν η εφεύρεση του μετασχηματιστή, μιας συσκευής που είναι σε θέση να μετασχηματίζει τάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος (Alternating Current – AC) σε διαφορετικές τιμές διατηρώντας με αυτό τον τρόπο τις απώλειες γραμμής σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και όταν η ηλεκτρική ισχύς πρέπει να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις. Πράγματι ο μετασχηματιστής ήταν ο κύριος παράγοντας για τη νίκη του εναλλασσόμενου ρεύματος στην περίφημη "Μάχη των ρευμάτων", όπου οι Thomas Alva Edison και George Westinghouse παρουσίαζαν τα πλεονεκτήματα των προτεινόμενων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τεχνολογίες συνεχούς (Direct Current – DC) και εναλλασσόμενου ρεύματος αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτού του τεχνολογικού πολέμου επηρεάστηκε έντονα από το έργο του Nikola Tesla, ο οποίος εφηύρε μια σειρά από πρωτοποριακές συσκευές όπως η μηχανή επαγωγής και η οποία αποτελεί κυρίαρχο στοιχείο σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές μέχρι σήμερα [1].

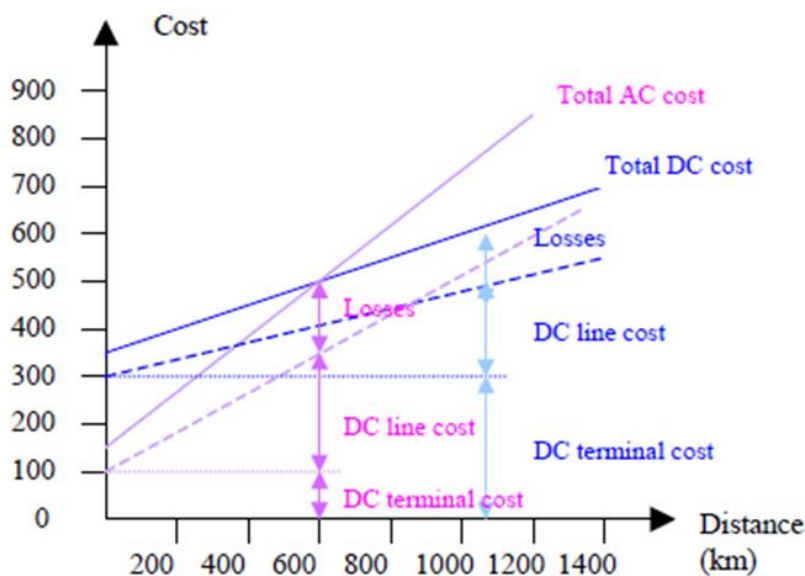


Εικόνα 1.1 Οι πινακίδες αυτές αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα της διαμάχης που αναπτύχθηκε την αναφερόμενη περίοδο [1]

Τελικό αποτέλεσμα της διαμάχης αυτής ήταν η παγκόσμια αποδοχή του εναλλασσόμενου ρεύματος ως θεμελιώδους αρχιτεκτονικής για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ταχεία εξέλιξη η οποία ακολούθησε οδήγησε σε ένα άλλο σημαντικό τεχνολογικό ορόσημο: την εφεύρεση του τρανζίστορ.

Το τρανζίστορ ως ένα από τα μεγαλύτερα ευρήματα του 20ου αιώνα έθεσε τα θεμέλια για την πρόοδο στον τομέα των υπολογιστών και των επικοινωνιών. Στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στη ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος που αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης βιομηχανίας.

Στην παρούσα φάση και λόγω των προηγμένων τεχνολογιών στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος οι τεχνολογίες συνεχούς ρεύματος έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος σε γραμμές μεγάλου μήκους. Η αναφορά γίνεται στα συστήματα Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (High Voltage DC - HVDC) τα οποία αποτελούν μία οικονομικά αποδοτική λύση με καλύτερο έλεγχο της ροής ισχύος και χαμηλότερες απώλειες κατά τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις (> 600km) [2]. Επιπλέον η λειτουργία τους επιτρέπει τη διασύνδεση μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος τα οποία λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες. Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων θεωρείται ότι τα HVDC συστήματα αποτελούν οικονομικές τεχνολογίες που μπορούν να βοηθήσουν στην οικοδόμηση του λεγόμενου "Super-Grid" για την σύνδεση ολόκληρης της Ευρώπης με τις γειτονικές περιοχές όπως Βόρεια Αφρική, Τουρκία κ.α. [2].



Εικόνα 1.2 Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ HVDC και HVAC τεχνολογιών για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας [3].

Στο επίπεδο της διανομής οι τεχνολογίες συνεχούς ρεύματος δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ακόμη ευρέως και οι εφαρμογές τους περιορίζονται σε συγκεκριμένους τομείς όπως είναι τα βοηθητικά συστήματα σε σταθμούς παραγωγής και ηλεκτρικούς υποσταθμούς (φωτισμός έκτακτης ανάγκης, συστήματα συναγερμού κ.α.). Τα συστήματα Χαμηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (Low Voltage DC – LVDC) θεωρούνται επίσης μια καλή λύση στον τομέα των μεταφορών όπως ηλεκτρικά πλοία, συστήματα ισχύος αεροσκαφών και τα ηλεκτρικά συστήματα έλξης (π.χ. σιδηροδρομικά δίκτυα) λόγω της ευρείας χρήσης DC κινητήρων και της ενισχυμένης δυνατότητας ελέγχου που μπορούν να παρέχουν [4].

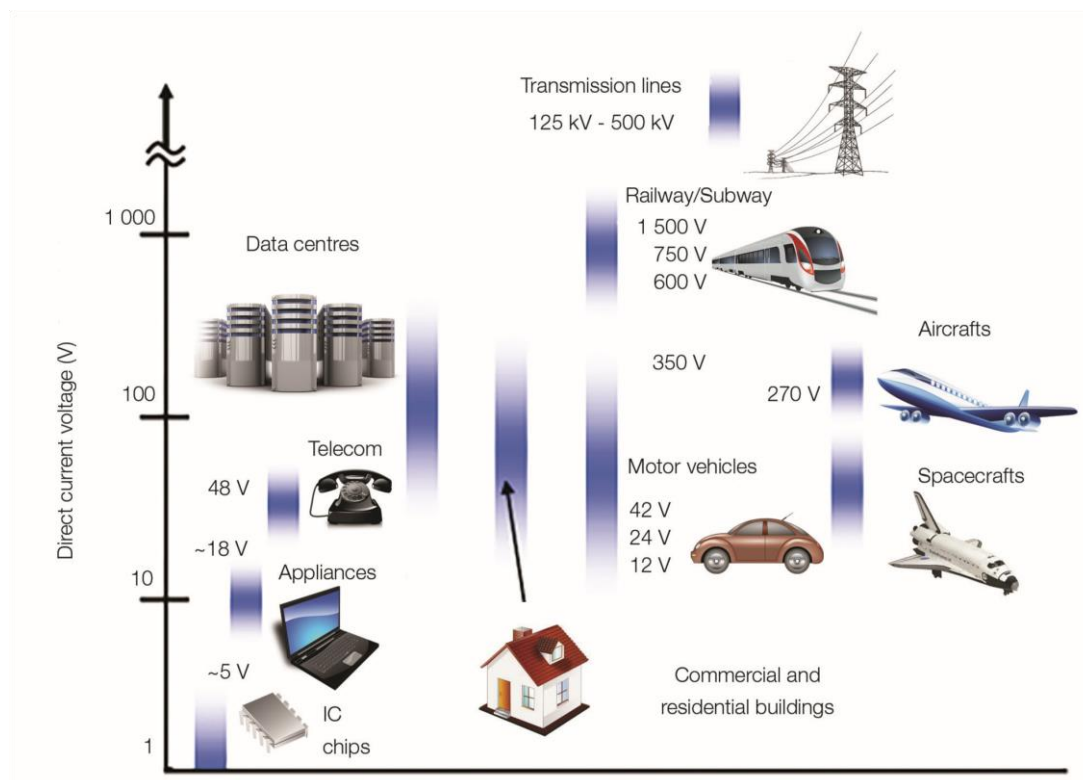
1.2 Εφαρμογές των LVDC συστημάτων

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται μια κατηγοριοποίηση των DC συστημάτων με βάση το επίπεδο τάσης.

Πίνακας 1.1 Κατηγοριοποίηση των επιπέδων τάσης με προτυποποίηση κατά IEC (International Electrotechnical Commission)

Επίπεδο Τάσης	DC	AC
Υψηλή Τάση	> 1500V	> 1000V
Χαμηλή Τάση	120 - 1500V	120 - 1000V
Υπερ-Χαμηλή τάση	< 120V	< 50V

Οι κυριότερες εφαρμογές των LVDC συστημάτων καθώς και τα επίπεδα τάσης που συναντώνται, παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3 Επίπεδο τάσης των κυριότερων LVDC εφαρμογών στη σύγχρονη εποχή [4]

Τα LVDC δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυτιλία, οι σιδηροδρομικές εφαρμογές κ.α. Πρόσφατα, η

χρήση τους εντοπίζεται σε κέντρα συλλογής και επεξεργασίας μεγάλου όγκου πληροφοριών (Data Centers) [5]. Επιπλέον, με τη συμβολή των σύγχρονων τεχνολογιών στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, της πληροφορικής και των ICT συστημάτων, πιστεύεται ότι τα LVDC συστήματα δύναται να αποτελέσουν πολύτιμο στοιχείο στην ανάπτυξη των μελλοντικών "έξυπνων δικτύων" διανομής (Smartgrids).

Ο Πίνακας 1.2 παρουσιάζει τις βασικές εφαρμογές των LVDC συστημάτων καθώς και την ονομαστική τάση λειτουργίας τους.

Πίνακας 1.2 Βασικές εφαρμογές των LVDC συστημάτων με βάση το επίπεδο τάσης

$\leq 48V$	Τροφοδότηση φορτίων όπως φωτισμός, ανεμιστήρες, ηλεκτρονικές συσκευές ψυχαγωγίας καθώς και οικιακές και βιομηχανικές ηλεκτρονικές συσκευές αυτοματισμού. Επιπλέον χρησιμοποιείται σε βοηθητικά συστήματα εγκαταστάσεων υψηλής/μέσης/χαμηλής εναλλασσόμενης τάσης. Συχνά αφορά συστήματα που έχουν αναπτυχθεί για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την ηλιακή ενέργεια και με τεχνολογίες που συνδυάζουν επικοινωνιακά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (PoE και USB-C). Εύρος ισχύος μέχρι 1kW.
60V - 230V	Τροφοδότηση τυπικών οικιακών φορτίων τα οποία συνδέονται με το κεντρικό δίκτυο διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος. Προτείνεται για δίκτυα συνεχούς ρεύματος ή τοπολογίες μικροδικτύων ή για αυτόνομα δίκτυα σε απομακρυσμένες περιοχές καθώς και για εγκαταστάσεις σε οικιακά και εμπορικά κτίρια.
350V - 450V	Τάση δικτύου για εγκαταστάσεις σε οικιακά και εμπορικά κτίρια καθώς και για ελαφριά βιομηχανική χρήση. Χρησιμοποιείται σε κέντρα δεδομένων (Data centers) και προτείνεται επίσης για τοπολογίες μικροδικτύων. Επιπλέον σχετίζεται με διατάξεις που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα. Εύρος ισχύος μέχρι 500kW.
600V - 900V	Αυτό το εύρος τάσης συνδέεται κυρίως με τη βιομηχανία, τα μεταφορικά συστήματα έλξης, καθώς και με την παραγωγή φωτοβολταϊκών. Εμφανίζεται επιπλέον σε τοπολογίες μικροδικτύων. Εύρος ισχύος μέχρι 1MW.
$\geq 1000V$	Τάση δικτύου σε συστήματα έλξης αεροσκαφών και θαλάσσιας πλεύσης. Εύρος ισχύος έως και δεκάδες MW.

1.2.1 Τα LVDC συστήματα ως μέσο ηλεκτροδότησης απομακρυσμένων περιοχών

Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή των LVDC συστημάτων η οποία έχει αρχίσει να αποκτά σημαντικό ενδιαφέρον αποτελεί η ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων περιοχών με εντονότερη την εμφάνισή της στις χώρες του αναπτυσσόμενου κόσμου [4], [6], [7]. Αρκετές χώρες έχουν ήδη δείξει ενδιαφέρον για την ανάπτυξη LVDC δικτύων με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων τους σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της τοπικής οικονομίας. Ακολουθούν ορισμένα παραδείγματα περιπτώσεων σε χώρες του αναπτυσσόμενου κόσμου.

Ινδία: Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα εγκαταστάθηκε το 2014 και λειτουργεί στο χωριό Νταρνέ (Dharnai) στην περιοχή Μπιχάρ (Bihar), μια από τις φτωχότερες περιοχές της Ινδίας σύμφωνα με την οργάνωση της Greenpeace. Το εγκατεστημένο DC δίκτυο τροφοδοτεί ένα μεγάλο αριθμό σπιτιών, δημόσιο φωτισμό αλλά και αντλίες νερού. Είναι το πρώτο χωριό στην Ινδία στο οποίο πλήθος δραστηριοτήτων βασίζεται στο φωτοβολταϊκό σύστημα των 100kW. Ενδεικτικά το δίκτυο αυτό τροφοδοτεί 450 κατοικίες 2.400 κατοίκων, 50 εμπορικές επιχειρήσεις, δύο σχολεία, ένα εκπαιδευτικό κέντρο και μία μονάδα υγειονομικής περίθαλψης. Στο σύστημα αυτό μία διάταξη μπαταριών εξασφαλίζει διαθεσιμότητα ισχύος ανά πάσα χρονική στιγμή. Στην Εικόνα 1.4 φαίνονται μία αντλία νερού καθώς και τα φωτοβολταϊκά συστήματα τα οποία είναι εγκατεστημένα στη στέγη ενός κτιρίου.



Εικόνα 1.4 Αντλία νερού τροφοδοτούμενη από το αυτόνομο DC σύστημα [6]

Μπαγκλαντές: Το Μπαγκλαντές έχει σημειώσει αξιοσημείωτη αύξηση της εγκατάστασης των ΑΠΕ το πρόσφατο παρελθόν. Πάνω από 1.6 εκατομμύρια ηλιακά συστήματα οικιακού εξοπλισμού, με μέσο όρο 50Wp, έχουν εγκατασταθεί μέχρι τον Αύγουστο του 2012. Η πιο κοινή λύση που εφαρμόζεται είναι οι ηλιακές εγκαταστάσεις. Αυτά τα συστήματα αποτελούνται από αυτόνομες φωτοβολταϊκές γεννήτριες, μπαταρίες και ελεγκτές φορτίων για την τροφοδότηση και λειτουργία οικιακών φορτίων συνεχούς ρεύματος (π.χ. φώτα LED, ραδιόφωνα, κλπ.). Αυτές οι εγκαταστάσεις είναι απομονωμένα DC δίκτυα ενώ στο μέλλον αναμένεται ότι θα διασυνδεθούν μεταξύ τους για να σχηματίσουν ένα μεγαλύτερο DC δίκτυο.

Λαϊκή δημοκρατία του Λάος: Περισσότερο από το 70% του πληθυσμού της χώρας ζει σε αγροτικές περιοχές με μικρή ή καθόλου πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Μέχρι τώρα έχουν εγκατασταθεί πάνω από εννέα χιλιάδες κοινοτικά και οικιακά ηλιακά συστήματα. Η Λαϊκή δημοκρατία του Λάος σκοπεύει να υλοποιήσει 15 ηλιακά δίκτυα για την παροχή ενεργειακής πρόσβασης σε τουλάχιστον 10.000 κατοίκους και να συνεισφέρει στο στόχο της κυβέρνησης για ηλεκτροδότηση 90% μέχρι το 2020. Το 2013 ολοκληρώθηκε η εγκατάσταση ηλιακής εγκατάστασης ισχύος 6.5kWp που διανέμει ηλεκτρική ενέργεια σε περίπου 500 άτομα ενός απομακρυσμένου χωριού στην επαρχία Λουάνγκ Πραμπάνγκ (Luang Prabang). Η DC ηλιακή εγκατάσταση διανέμει ηλεκτρικό ρεύμα στα νοικοκυριά, το κοινοτικό κέντρο και ορισμένα φωτιστικά δρόμων. Το 2014 εγκαταστάθηκαν τρία φωτοβολταϊκά συστήματα σε δύο σχολεία της επαρχίας Σαΐνγιαμπουλι (Xayaboury) για την παροχή πρόσβασης σε αξιόπιστο ηλεκτρικό ρεύμα. Η διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται στο φωτισμό, ανεμιστήρες οροφής, κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές και εκτυπωτές στα γραφεία και στους κοιτώνες των σχολείων.



Εικόνα 1.5 Φωτοβολταϊκά πανέλα σε σχολείο της Λαϊκής δημοκρατίας του Λάος [7]

Σιέρρα Λεόνε: 13 εγκαταστάσεις ηλιακής φωτοβολταϊκής παραγωγής εγκαταστάθηκαν το 2013 σε διάφορες αγροτικές περιοχές της Σιέρρα Λεόνε, μια χώρα με ποσοστό ηλεκτροδότησης μικρότερο από 10%. Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις - δώδεκα μονάδες ισχύος 5kWp και μία μονάδα 16kWp - παρέχουν σε κεντρικά κτίρια (π.χ. σχολεία) ηλεκτρική ενέργεια για κατανάλωση σε φορτία όπως υπολογιστές, διαδίκτυο και άλλα εργαλεία επικοινωνίας για τη βελτίωση των συνθηκών εκπαίδευσης.

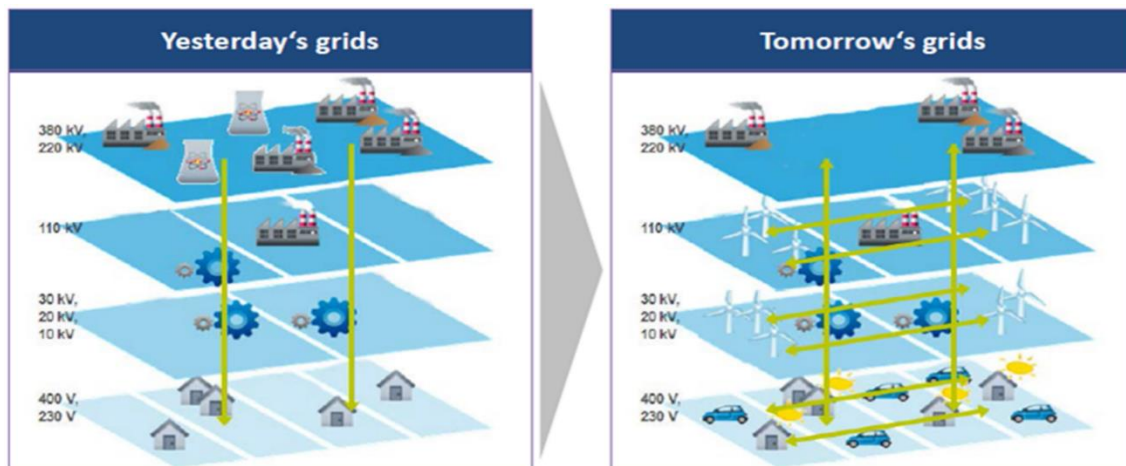


Εικόνα 1.6 Εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ στην οροφή κτιρίου στη Σιέρα Λεόνε [7]

Η παρούσα διδακτορική διατριβή μελετάει 2 τομείς εφαρμογής των LVDC συστημάτων και συγκεκριμένα τα DC μικροδίκτυα και DC σιδηροδρομικά δίκτυα (π.χ. μητροπολιτικά δίκτυα - Μετρό). Στη συνέχεια ακολουθεί μια εισαγωγή στις βασικές έννοιες και τοπολογίες αυτών των συστημάτων.

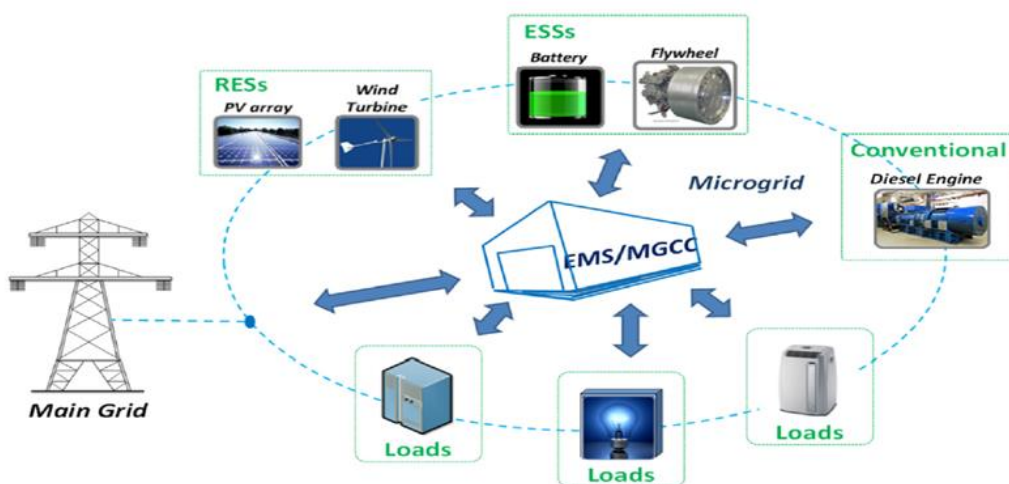
1.3 Εισαγωγή στην έννοια των μικροδικτύων

Τα δίκτυα διανομής μετασχηματίζονται σταδιακά από παθητικά σε ενεργητικά δίκτυα με την έννοια ότι οι αποφάσεις και ο έλεγχος είναι κατανεμημένα και η ροή ισχύος στο δίκτυο αμφίδρομη. Αυτή η αρχιτεκτονική διευκολύνει την ενσωμάτωση της διεσπαρμένης παραγωγής, των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και των τεχνολογιών αποθήκευσης και δημιουργεί ευκαιρίες για καινοτόμες υπηρεσίες οι οποίες θα πρέπει να ακολουθούν συγκεκριμένα πρωτόκολλα και πρότυπα. Η κύρια λειτουργία ενός ενεργητικού δικτύου διανομής είναι να συνδέσει αποτελεσματικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τις απαιτήσεις των καταναλωτών επιτρέποντας και στις δύο πλευρές να αποφασίσουν σε πραγματικό χρόνο τον καλύτερο δυνατό τρόπο λειτουργίας τους.



Εικόνα 1.7 Δεξιά τα δίκτυα του χθες (παθητικά), αριστερά τα δίκτυα του αύριο (ενεργητικά)

Η υλοποίηση των ενεργητικών δικτύων διανομής απαιτεί την εφαρμογή νέων αρχιτεκτονικών. Τα μικροδίκτυα [8]-[13], τα οποία χαρακτηρίζονται ως τα δομικά στοιχεία των "έξυπνων δικτύων" είναι ίσως η πιο ελπιδοφόρα νέα αρχιτεκτονική δικτύων. Η οργάνωση των μικροδικτύων βασίζεται στις ικανότητες ελέγχου πάνω στη λειτουργία του δικτύου και οι οποίες προέρχονται από την αυξημένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και μονάδων ΑΠΕ όπως π.χ. φωτοβολταϊκά συστήματα, κυψέλες καυσίμων, μικροτουρμπίνες κ.α. μαζί με τεχνολογίες αποθήκευσης όπως περιστρεφόμενοι σφόνδυλοι, υπερπυκνωτές, μπαταρίες και ελεγχόμενα φορτία (π.χ. ηλεκτρικά οχήματα [14]). Αυτές οι ικανότητες ελέγχου επιτρέπουν σε τμήματα του δικτύου διανομής να λειτουργούν επίσης απομονωμένα στην περίπτωση βλαβών ή άλλων εξωτερικών διαταραχών ή καταστροφών βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας προς στους καταναλωτές.



Εικόνα 1.8 Τοπολογία ενός τυπικού μικροδικτύου [10]

Η έννοια των μικροδικτύων χρονολογείται από το 1882 όταν ο Thomas Edison έχτισε την πρώτη του μονάδα παραγωγής. Η εταιρία του Edison εγκατέστησε 50 DC μικροδίκτυα μέσα σε τέσσερα χρόνια. Εξαιτίας του γεγονότος εμφάνισης και

λειτουργίας μεγάλων μονάδων παραγωγής καθώς και τη δημιουργία ολοένα και μεγαλύτερων δικτύων μέσω της διασύνδεσης με γραμμές μεταφοράς, η έννοια των μικροδικτύων άρχισε σιγά σιγά να ξεθωριάζει. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία νέα τάση στην ανάπτυξη των μικροδικτύων η οποία εν μέρει οφείλεται στην ανάγκη υψηλότερης αξιοπιστίας και ποιότητας στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και των τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σύμφωνα με την ομάδα εργασίας WG C6.21 του οργανισμού CIGRE τα μικροδίκτυα είναι συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία περιέχουν φορτία και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης που μπορούν να λειτουργούν με ελεγχόμενο και συντονισμένο τρόπο, είτε όταν συνδέονται στο κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είτε όταν βρίσκονται σε απομονωμένη λειτουργία.

1.3.1 Πλεονεκτήματα μικροδικτύων

Η ανάπτυξη των μικροδικτύων είναι αρκετά ευοίωνα, καθώς προκύπτουν αρκετά πλεονεκτήματα, όσον αφορά τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικότερα οφέλη είναι [15]:

- Η ανάπτυξη των μικροδικτύων και η ευρεία χρήση συστημάτων διεσπαρμένης παραγωγής μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, διότι είναι βασισμένη σε μεγάλο βαθμό στις ανανεώσιμες πηγές και σε μικρές μονάδες παραγωγής που χαρακτηρίζονται από χαμηλές εκπομπές καυσαερίων.
- Η λειτουργία των μικροδικτύων συμβάλει στη μείωση των απωλειών κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τα μεγάλα κέντρα παραγωγής προς την κατανάλωση, εξαιτίας του τοπικού τους χαρακτήρα.
- Η δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας μπορεί να εξασφαλίσει στον καταναλωτή του εκάστοτε μικροδικτύου την αδιάλειπτη λειτουργία την ίδια ώρα όπου το κεντρικό δίκτυο διανομής μπορεί να είναι εκτός λειτουργίας.
- Το μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει υποστηρικτικά ως προς το κεντρικό δίκτυο, δηλαδή να απορροφά ή να παρέχει ενεργό ή άεργο ισχύ όταν χρειάζεται.
- Μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης της παραγόμενης ενέργειας. Η συνολική απόδοση αυξάνεται με τις εφαρμογές συμπαραγωγής, που αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων. Έτσι, ενώ πριν τη δημιουργία των μικροδικτύων είχαμε μεγάλη κεντρική παραγωγή ισχύος και τοπική παραγωγή θερμότητας, με τη δημιουργία των μικροδικτύων τόσο η παραγωγή ισχύος όσο και θερμότητας γίνεται τοπικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κατανάλωση της ενέργειας, που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, να μειώνεται κατά το 1/3.
- Διαχείριση των φορτίων η οποία είναι σε θέση να βοηθά σημαντικά στην ευστάθεια του δικτύου αλλά και στην οικονομική του λειτουργία.

- Η δυνατότητα αναβολής επενδύσεων προς ενίσχυση του δικτύου και των κεντρικών σταθμών παραγωγής καθώς και η μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου.

1.3.2 Μειονεκτήματα μικροδικτύων

Ωστόσο, η ανάπτυξη των μικροδικτύων αντιμετωπίζει, ακόμα, κάποιες προκλήσεις, δυσκολίες και πιθανά μειονεκτήματα όπως [15]:

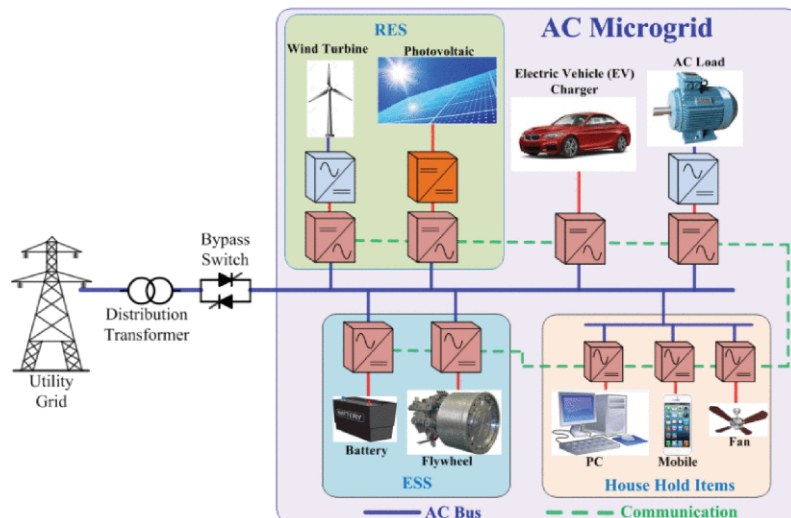
- Τεχνικά προβλήματα που προκύπτουν από τη σύνδεση και λειτουργία των μικροδικτύων στα δίκτυα διανομής όπως διαταραχές στην τάση του δικτύου.
- Προβλήματα στις υπάρχουσες διατάξεις προστασίας σε περιπτώσεις σφαλμάτων στο δίκτυο, καθώς η τοπική παραγωγή μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να προκαλέσει ανάστροφες ροές ισχύος. Επιπλέον, η τοποθέτηση αξιόπιστων διατάξεων προστασίας αποτελεί μια εκ των σημαντικότερων προκλήσεων σε ότι αφορά τη λειτουργία ενός μικροδικτύου.
- Τεχνικές δυσκολίες που αφορούν στην έλλειψη τεχνογνωσίας στο χειρισμό πολλών, ταυτόχρονων μονάδων παραγωγής.
- Η απουσία προτύπων, όσον αφορά διάφορα καίρια θέματα, όπως η ποιότητα ισχύος των μονάδων παραγωγής, και πρωτοκόλλων, ώστε να ενισχυθεί η ένταξη των μονάδων στην αγορά ενέργειας.

1.3.3 Κατηγορίες μικροδικτύων

Τα μικροδίκτυα χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

A. Μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος – AC μικροδίκτυα:

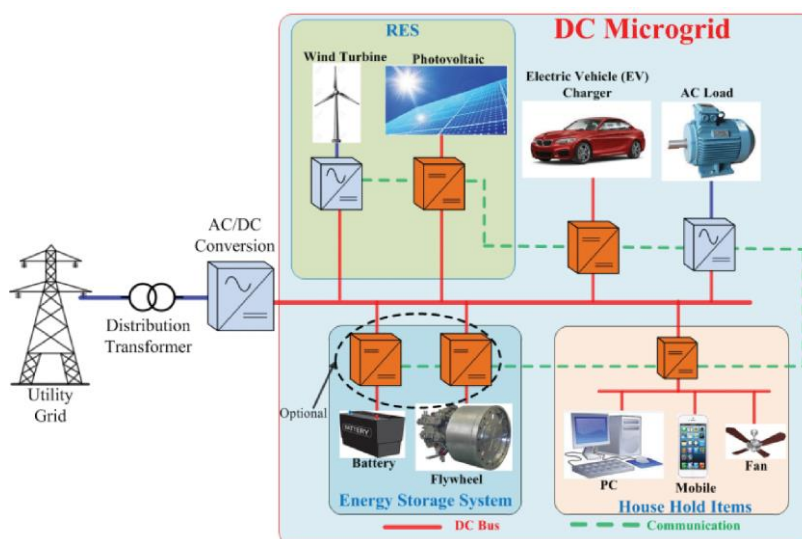
Εμπνευσμένα από τα παραδοσιακά ηλεκτρικά δίκτυα, τα μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούν τη πιο συνηθισμένη τοπολογία μικροδικτύων. Για τη σχεδίαση και λειτουργία τους χρησιμοποιούνται υπάρχουσες υποδομές του δικτύου (π.χ. γραμμές διανομής, μετασχηματιστές, διατάξεις προστασίας, κ.α.) [16]. Στην Εικόνα 1.9 παρουσιάζεται μια τυπική δομή ενός AC μικροδικτύου.



Εικόνα 1.9 Τυπική δομή ενός AC μικροδίκτυου [16]

B. Μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος – DC μικροδίκτυα:

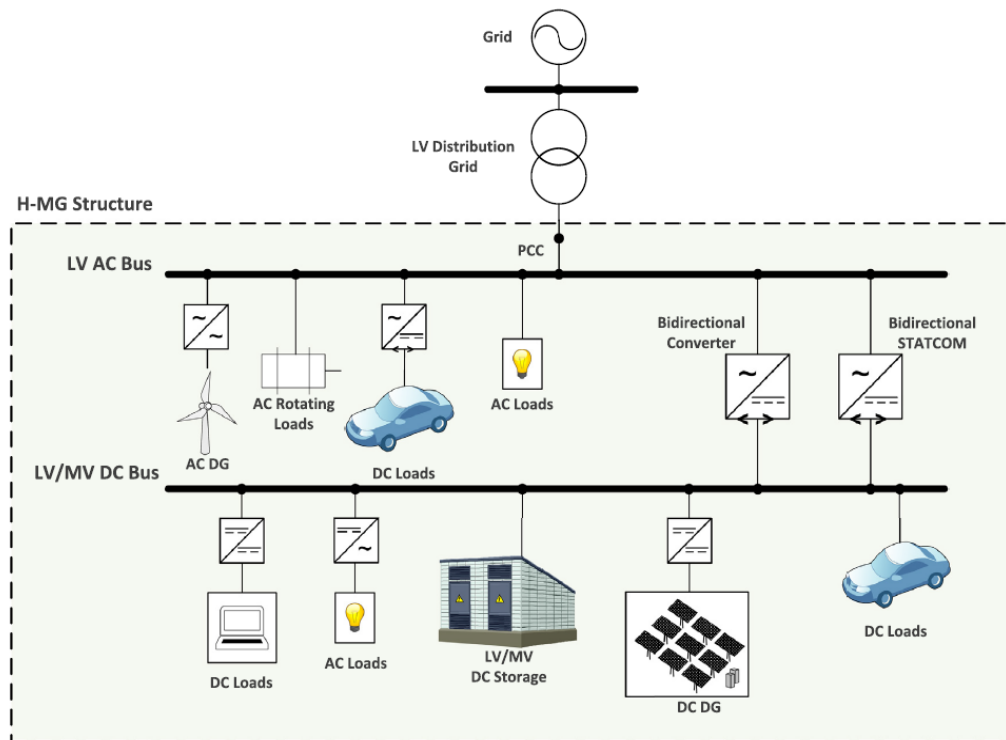
Οι περισσότερες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής είτε παράγουν στην έξοδό τους DC τάση, είτε παρουσιάζουν έναν DC ζυγό σε κάποιο στάδιο του μετατροπέα διασύνδεσης με το υπόλοιπο δίκτυο. Επιπλέον, η πλειοψηφία των τεχνολογιών αποθήκευσης όπως οι υπερπυκνωτές, οι μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου κ.α. λειτουργούν αποκλειστικά σε συνεχή τάση. Πολλά από τα φορτία στις μέρες μας όπως ηλεκτρονικές συσκευές (τηλεοράσεις, οθόνες, LED φωτισμός, κλπ.) λειτουργούν με συνεχή τάση οδηγώντας σε απώλειες που φτάνουν το 10-25% σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω των μετατροπών που γίνονται για τη σύνδεση με το AC δίκτυο. Επομένως, η ενσωμάτωση αυτών των συσκευών σε τοπολογίες DC μικροδικτύων αποτελεί μια "έξυπνη" επιλογή από την άποψη του βαθμού απόδοσης λόγω της μείωσης των ενδιάμεσων βαθμίδων μετατροπής [16]. Μία τυπική δομή ενός DC μικροδικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.10.



Εικόνα 1.10 Τυπική δομή ενός DC μικροδικτύου [16]

C. Υβριδικά μικροδίκτυα – Hybrid AC/DC μικροδίκτυα

Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα των AC και DC αρχιτεκτονικών, τα υβριδικά μικροδίκτυα AC-DC παρουσιάζουν αυξανόμενο ενδιαφέρον σε σχέση με τις υπόλοιπες αρχιτεκτονικές, κυρίως λόγω της ενσωμάτωσης δύο τοπολογιών δικτύων μαζί στο ίδιο δίκτυο διανομής, βοηθώντας την άμεση και αποδοτική ενσωμάτωση των μονάδων παραγωγής συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος [17]. Μια τυπική δομή υβριδικού μικροδικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.11.



Εικόνα 1.11 Τυπική δομή ενός υβριδικού AC/DC μικροδικτύου [17]

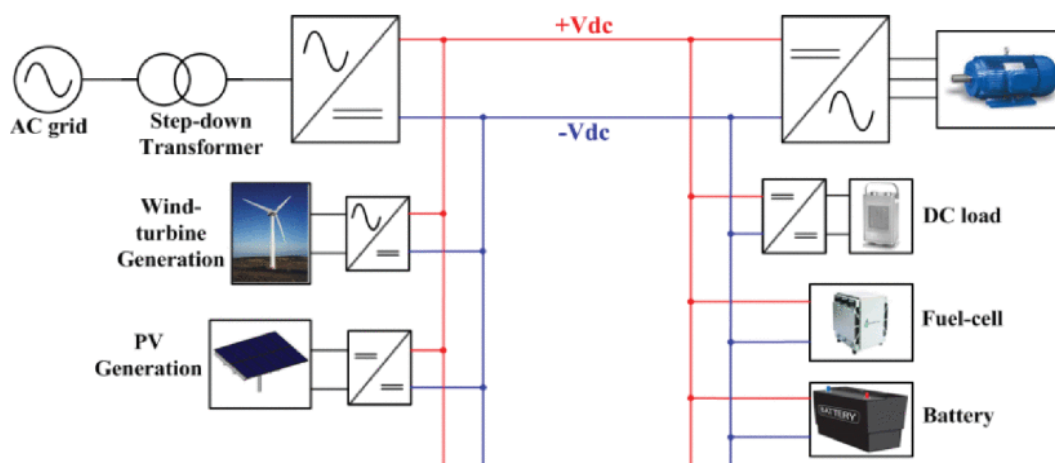
1.3.4 Πολικότητα τάσης στα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος

Στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος η ισχύς μπορεί να μεταδοθεί με τη χρήση δύο καλωδίων (μονοφασικά δίκτυα) και τεσσάρων καλωδίων (τριφασικά δίκτυα). Η ισχύς στα συστήματα συνεχούς ρεύματος μπορεί να μεταδοθεί με τη χρήση παρόμοιας λογικής: δύο καλώδια (μονοπολικά δίκτυα) και τρία καλώδια (διπολικά δίκτυα). Η διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο τοπολογίες είναι ο αριθμός των διαθέσιμων επιπέδων τάσης.

A. Μονοπολικό σύστημα

Σε ένα μονοπολικό σύστημα συνεχούς ρεύματος, οι πηγές και τα φορτία είναι συνδεδεμένα ανάμεσα στο θετικό και αρνητικό πόλο του ζυγού τάσης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.12. Η ενέργεια μεταδίδεται μέσω του DC ζυγού και επομένως η επιλογή του επιπέδου τάσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το σύστημα. Υψηλότερες τιμές τάσης αυξάνουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος στο

σύστημα αλλά απαιτούν περισσότερα στάδια μετατροπής (DC/DC μετατροπείς) ώστε να φτάσουν το τελικό επίπεδο τάσης που εφαρμόζεται στους καταναλωτές. Επιπροσθέτως, η χρήση υψηλού επιπέδου τάσης αυξάνει τα προβλήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια και την προστασία του εξοπλισμού και των καταναλωτών.



Εικόνα 1.12 Μονοπολικό σύστημα μικροδικτύου συνεχούς ρεύματος

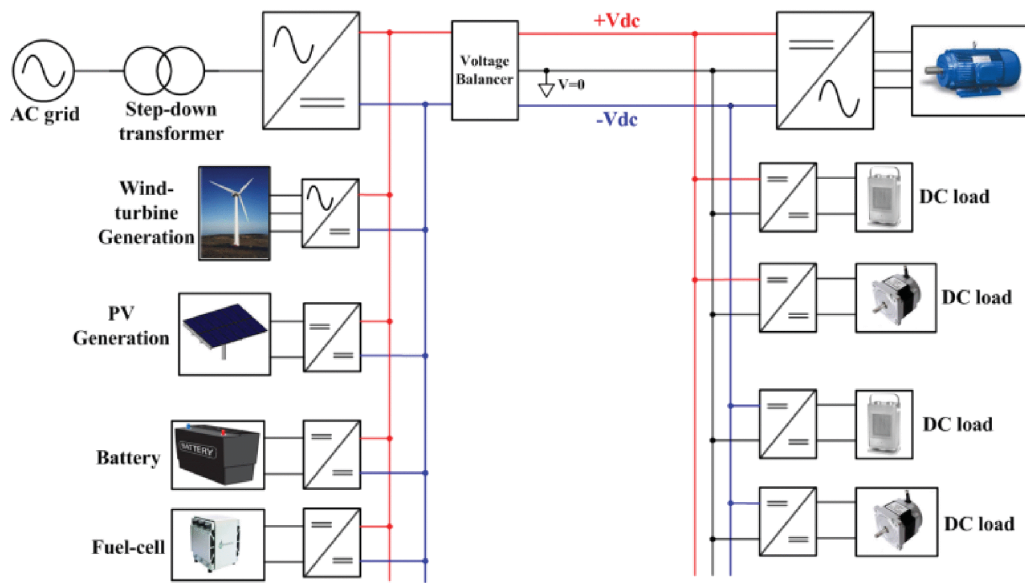
Από την άλλη μεριά, με τη χρήση ενός χαμηλού επιπέδου τάσης, η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος περιορίζεται σε κοντινές αποστάσεις. Το μονοπολικό σύστημα είναι προτιμητέο σε εγκαταστάσεις σπιτιών απομακρυσμένων περιοχών όπου δεν υπάρχει διασύνδεση με το κεντρικό δίκτυο. Πρόσφατα έχουν υλοποιηθεί μονοπολικά συστήματα 48V DC με την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκής παραγωγής σε μικροδίκτυα αγροτικών περιοχών της Ινδίας [18].

Συνολικά, το μονοπολικό σύστημα είναι απλό στην εφαρμογή του ενώ δεν υφίσταται το ζήτημα της ασυμμετρίας μεταξύ των πόλων. Ωστόσο, αυτό το σύστημα δεν παρέχει αυξημένη αξιοπιστία καθώς ακόμη και ένα μόνο σφάλμα μπορεί να οδηγήσει σε διακοπή λειτουργίας του συνολικού συστήματος.

B. Διπολικό σύστημα

Ένα διπολικό σύστημα μπορεί να ξεπεράσει τους προαναφερθέντες περιορισμούς που συνδέονται με τη χρήση μονοπολικού συστήματος. Το διπολικό σύστημα είναι επίσης γνωστό ως σύστημα "τριών καλωδίων" με επίπεδα τάσης $+V_{dc}$, $-V_{dc}$ και μια ουδέτερη γραμμή όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.13. Σε αυτή τη διαμόρφωση οι καταναλωτές έχουν την επιλογή να επιλέξουν τρία διαφορετικά επίπεδα τάσης: $+V_{dc}$, $-V_{dc}$ και $2V_{dc}$. Επιπλέον, σε μια κατάσταση σφάλματος σε έναν από τους πόλους, η ισχύς μπορεί ακόμα να τροφοδοτείται από τα άλλα δύο καλώδια (διπολική τροφοδοσία) και από ένα βοηθητικό DC/DC μετατροπέα. Επομένως, η αξιοπιστία, η διαθεσιμότητα και η ποιότητα ισχύος του συστήματος αυξάνονται κατά την εμφάνιση σφαλμάτων στο δίκτυο. Τα διαφορετικά επίπεδα τάσης προσφέρουν περισσότερη ευελιξία στους καταναλωτές προκειμένου να συνδέσουν διαφορετικά φορτία, αλλά ταυτόχρονα αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ασυμμετρία στο σύστημα λόγω της άνισης κατανομής φορτίων. Επομένως, σε αυτό το είδος συστημάτων συστήνεται ιδιαίτερα ένα κύκλωμα

εξισορρόπησης τάσης ή ένα κατάλληλο σύστημα ελέγχου για τους DC/DC μετατροπείς ισχύος του κεντρικού δικτύου [19].



Εικόνα 1.13 Διπολικό σύστημα μικροδικτύου συνεχούς ρεύματος

1.3.5 Ζητήματα προστασίας στα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα των δικτύων συνεχούς ρεύματος σε σύγκριση με τα αντίστοιχα εναλλασσόμενου, η πιο απαιτητική πτυχή της DC τεχνολογίας είναι ο σχεδιασμός του συστήματος προστασίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στην απουσία μηδενικού σημείου διέλευσης του ρεύματος, όπως συμβαίνει στο εναλλασσόμενο ρεύμα [20]-[22].

Στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος οι συσκευές προστασίας μπορούν να αποσυνδέσουν το τμήμα του δικτύου στο οποίο εμφανίζεται κάποιο σφάλμα ανοίγοντας τον διακόπτη τη στιγμή που το ρεύμα περνά από το μηδέν. Δεδομένου ότι αυτό το χαρακτηριστικό δεν είναι διαθέσιμο στα δίκτυα συνεχούς ρεύματος, οι περισσότεροι από τους AC αυτόματους διακόπτες ισχύος δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για να περιπλέξει περαιτέρω το πρόβλημα, η σύνθετη αντίσταση σφάλματος ενός DC συστήματος είναι κυρίως ωμική και αυτό οδηγεί σε υψηλή αιχμή στο ρεύμα σφάλματος με πολύ γρήγορο ρυθμό μεταβολής σε σύγκριση με τα αντίστοιχα που εμφανίζονται στα AC συστήματα. Οι συμβατικές AC διατάξεις προστασίας δεν μπορούν να χειριστούν έναν τόσο γρήγορο ρυθμό αύξησης του ρεύματος σφάλματος.

Λόγω ορισμένων υφιστάμενων δικτύων συνεχούς ρεύματος, ορισμένες συσκευές προστασίας όπως ασφάλειες τήξης και DC διακόπτες διατίθενται στο εμπόριο [23], [24]. Ορισμένες από αυτές τις συσκευές είναι ειδικά σχεδιασμένες για χρήση τόσο σε συστήματα συνεχούς όσο και εναλλασσόμενου ρεύματος.

1.3.6 Σύγκριση μικροδικτύων εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος.

Τα περισσότερα μικροδίκτυα είναι μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου η παραγωγή και τα φορτία διασυνδέονται μέσω μετασχηματιστών ισχύος σε ένα AC ζυγό όπως αντίστοιχα συμβαίνει στα συμβατικά δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο AC ζυγός του μικροδικτύου συνδέεται με το κεντρικό δίκτυο μέσω ενός ηλεκτρονικού διακόπτη. Τα AC μικροδίκτυα αποτελούν ένα λογικό αποτέλεσμα της εκτεταμένης εμπειρίας με τα μεγάλα δίκτυα διανομής, της ευρείας χρήσης AC φορτίων και της ωριμότητας της βιομηχανίας μετατροπών ισχύος για την ανάπτυξη DC/AC αντιστροφών ισχύος. Ωστόσο, τα AC μικροδίκτυα παρουσιάζουν πολλές τεχνικές προκλήσεις που είναι δύσκολες και/ή δαπανηρές για επίλυση.

- Η μεγάλη αδράνεια των γεννητριών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή παρέχει ευστάθεια στο AC δίκτυο. Τα AC μικροδίκτυα βασίζονται κυρίως σε καταναμεμένη παραγωγή μικρής κλίμακας που συνδέεται μέσω μετατροπών ισχύος. Η μικρή αδράνεια του συστήματος οδηγεί σε επιπρόσθετες επιπλοκές και προκλήσεις ελέγχου για να διατηρηθεί το σύστημα ευσταθές.
- Εκτός από τη ρύθμιση τάσης ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος απαιτεί έλεγχο συχνότητας και γωνίας φάσης για τη ρύθμιση ενεργού και αέργου ισχύος. Η ρύθμιση της συχνότητας και της φάσης είναι πιο πολύπλοκη στα μικροδίκτυα από ότι στα συμβατικά δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος.
- Η ανίχνευση της νησιδοποίησης στα AC μικροδίκτυα μπορεί να είναι πιο σύνθετη σε σχέση με τα συμβατικά δίκτυα.

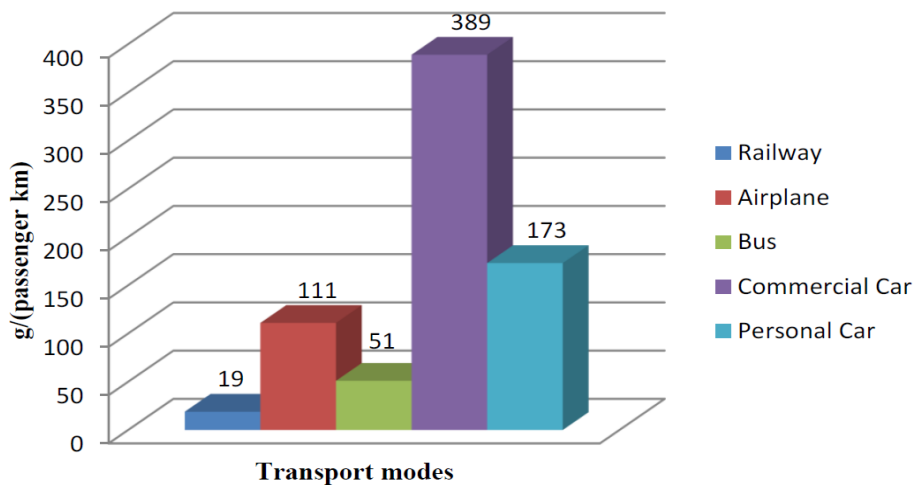
Είναι δύσκολο να διαφωνήσουμε με το γεγονός ότι τα τοπικά συστήματα διανομής θα επωφεληθούν σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση τεχνολογιών συνεχούς ρεύματος. Ακολουθούν ορισμένα στοιχεία που ενισχύουν την άποψη αυτή:

- Οι περισσότερες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (όπως π.χ. φωτοβολταϊκά) παράγουν DC τάση στην έξοδό τους, ενώ παράλληλα τα περισσότερα σύγχρονα φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως τα ηλεκτρονικά είδη (υπολογιστές, τηλεοράσεις), Led φωτισμός κ.α., είναι εφοδιασμένα με AC/DC ανορθωτή για τη διασύνδεση με το δίκτυο. Επομένως, η χρήση απευθείας ενός DC ζυγού τάσης θα οδηγούσε σε μείωση των ενδιάμεσων σταδίων μετατροπής καθώς και τις απώλειες που εμφανίζονται.
- Η πλειοψηφία των μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες, υπερπυκνωτές κτλ.) και οι οποίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία των μικροδικτύων, είναι επίσης συσκευές συνεχούς ρεύματος. Στις περισσότερες των περιπτώσεων οι τεχνολογίες αποθήκευσης συνδέονται με το AC δίκτυο μέσω ενός DC/DC μετατροπέα σε σειρά με έναν DC/AC αντιστροφέα. Σε μία τοπολογία ενός DC μικροδικτύου, η παρουσία του αντιστροφέα είναι περιττή μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τις απώλειες που εμφανίζονται καθώς επίσης και απλοποιώντας τον έλεγχο της μονάδας.

- Η αναμενόμενη αύξηση της χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τα προσεχή έτη μπορεί να αποτελέσει μία από τις πιο απαιτητικές προκλήσεις στη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γρήγοροι φορτιστές μπαταριών μπορούν να απλουστευθούν και να γίνουν πιο αποδοτικοί εάν τροφοδοτούνται μέσω ενός ζυγού συνεχούς τάσης.
- Τα προβλήματα που αφορούν την ποιότητα ισχύος, όπως διακυμάνσεις στην τάση (βυθίσεις/ανυψώσεις τάσης), το λεγόμενο flicker κ.α. που συνδέονται με την υψηλή διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αποτελούν σημαντικό ζήτημα για τα μικροδίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτού του είδους τα προβλήματα μπορούν ευκολότερα να αντιμετωπιστούν σε τοπολογίες μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος.
- Η ευστάθεια ενός δικτύου εξαρτάται από τη διατήρηση της τάσης εντός ενός εύρους λειτουργίας για όλες τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο ζυγό σε κάθε κατάσταση μεταβατικής και μόνιμης κατάστασης. Παρόλο, που το ζήτημα της ευστάθειας γίνεται όλο και πιο δύσκολο καθώς περνάμε σε μεγαλύτερα συστήματα, οι λύσεις που εμφανίζονται είναι απλούστερες στα συστήματα συνεχούς ρεύματος από ότι στα αντίστοιχα εναλλασσόμενου.

1.4 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 [25]. Η υψηλή ενεργειακή απόδοση των σιδηροδρομικών μεταφορών σε συνδυασμό με τη χαμηλή εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα, τις καθιστά ως ένα από τα καλύτερα και πιο αποδοτικά συστήματα μεταφοράς. Στην Εικόνα 1.14 παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές εκπομπών 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 [25]. 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.



Εικόνα 1.14 Εκπομπές CO₂ για διαφορετικά μέσα μεταφοράς [26]

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 [30].

Τα σιδηροδρομικά δίκτυα διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) Συνεχούς ρεύματος, β) Εναλλασσόμενου ρεύματος.

Τα επίπεδα τάσης που συναντώνται στα DC σιδηροδρομικά δίκτυα είναι τα εξής [27]:

1. 600 - 1000V: Χρησιμοποιείται κυρίως σε μητροπολιτικά δίκτυα, Τραμ, Τρόλεϊ και προαστιακούς σιδηροδρόμους. Η ηλεκτρική ισχύς φτάνει στο όχημα είτε μέσω μιας τρίτης ράγας, όπως στα Μετρό και στους προαστιακούς, είτε με εναέριες γραμμές μεταφοράς.
2. 1500V: Αυτό το επίπεδο τάσης είναι η πιο οικονομική επιλογή για δίκτυα Μετρό μεγάλης ισχύος. Η ηλεκτρική ισχύς φτάνει στο όχημα μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
3. 3000V: Σε αυτό το επίπεδο τάσης υπάρχουν εκτεταμένες εγκαταστάσεις για προαστιακούς σιδηρόδρομους και κύριες αρτηρίες Μετρό, ιδιαίτερα στην Ιταλία και τη Νότιο Αφρική. Αυτό το επίπεδο τάσης, σήμερα έχει ξεπεραστεί και στη θέση του χρησιμοποιείται η τάση των 25kV AC.

Στα AC σιδηροδρομικά δίκτυα, τα επίπεδα τάσης που συναντώνται είναι τα εξής [27]:

1. 15kV, 16.7Hz: Αυτό το επίπεδο τάσης και συχνότητας ήταν το αρχικό που χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα εξαιτίας των περιορισμένων ικανοτήτων λειτουργίας που είχαν οι πρώτοι μονοφασικοί AC κινητήρες μεταβλητών στροφών. Πλέον οι λόγοι αυτοί έχουν εκλείψει, παρά ταύτα τα μεγάλα ποσά που δαπανήθηκαν για αυτές τις υποδομές δεν επιτρέπουν την αντικατάστασή τους και χρησιμοποιούνται ακόμα στη Βόρεια Ευρώπη.

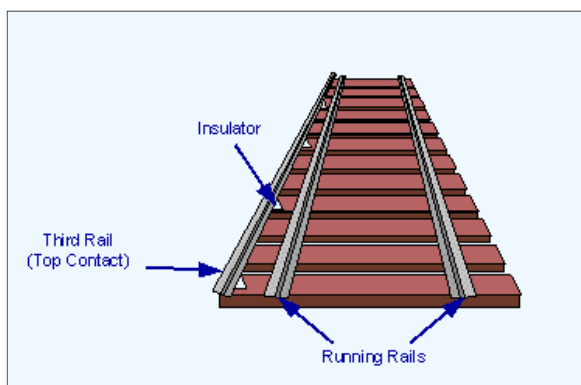
2. Τριφασικό 3.6kV, 16.7Hz: Το συγκεκριμένο επίπεδο τάσης χρησιμοποιήθηκε παράλληλα με το προηγούμενο, στη βόρεια Ιταλία ώστε να εκμεταλλευτεί την αναγεννητική πέδηση κατά την κάθοδο των τρένων από τα βουνά. Εγκαταλείφθηκε τη δεκαετία του 60 εξαιτίας της πολυπλοκότητας του.
3. 25kV, 50/60Hz: Αυτό είναι το παγκόσμιο πρότυπο για τους προαστιακούς σιδηρόδρομους. Το συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, απαιτεί ειδικά χαρακτηριστικά κατά τη μεταφορά, ώστε να μειώνεται το ρεύμα γης.
4. 50kV, 50/60Hz: Αυτό το επίπεδο τάσης χρησιμοποιείται μόνο σε ιδιαίτερες περιπτώσεις όπου απαιτείται ρυμούλκηση αντικειμένων, για παράδειγμα σε ανθρακωρυχεία.

Στους πρώτους ηλεκτρικούς σιδηρόδρομους χρησιμοποιήθηκε κυρίως συνεχή τάση καθώς ο έλεγχος της ταχύτητας ενός DC κινητήρα ήταν ευκολότερος και μπορούσε να γίνει κατευθείαν από το τρένο μέσω διακοπών και αντιστάσεων. Πάραυτα, η οικονομικότερη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούσε τη χρήση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης τάσης ώστε η ισχύς να μεταφέρεται με το μικρότερο δυνατό ρεύμα. Αυτός ήταν και ο κυριότερος λόγος που στη συνέχεια υιοθετήθηκε πλήρως η εναλλασσόμενη τάση για βιομηχανική χρήση, καθώς είναι πιο εύκολη η αλλαγή του επιπέδου της μέσω μετασχηματιστών. Επιπροσθέτως, ο έλεγχος της ταχύτητας των μηχανών εναλλασσόμενης τάσης σήμερα έχει γίνει ευκολότερος από το παρελθόν.

Όσον αφορά τους τρόπος τροφοδότησης, δύο είναι οι πιο διαδεδομένοι:

α) *Τροφοδότηση μέσω της "τρίτης ράγας":*

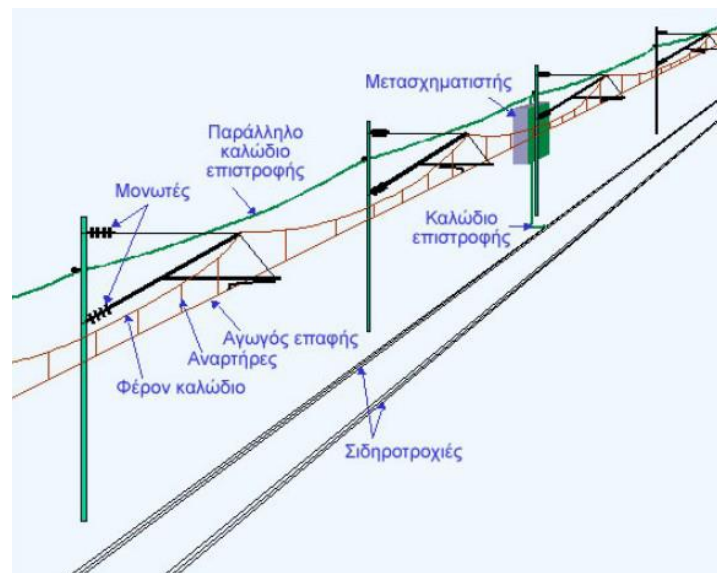
Η τρίτη ράγα αποτελείται από έναν άκαμπτο συνεχή αγωγό τοποθετημένο δίπλα στις ράγες ή ανάμεσα από τις ράγες στις οποίες κινείται το τρένο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.15 και συναντάται κυρίως σε DC σιδηροδρομικά συστήματα. Επιπλέον, χρησιμοποιείται σε μικρότερης διαμέτρου τούνελ, για αυτό και είναι ο πιο δημοφιλής τρόπος τροφοδότησης σε μητροπολιτικούς σιδηροδρόμους. Η σύνδεση με την τρίτη ράγα γίνεται μέσω ενός αγωγού επαφής.



Εικόνα 1.15 Παράδειγμα γραμμής παροχής ηλεκτρικής ισχύος (750V) [28]

β) Τροφοδότηση μέσω εναέριων γραμμών τροφοδοσίας:

Ο συγκεκριμένος τρόπος αποτελεί τον πιο δημοφιλή για τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας σε AC συστήματα. Ο βασικός λόγος που τον κάνει τον κυριότερο τρόπο μεταφοράς και διανομής είναι το μικρότερο κόστος σε σχέση με τα υπόγεια. Ακόμη είναι ευκολότερη και οικονομικότερη τόσο η τοποθέτηση όσο και η επισκευή τους. Ωστόσο απαιτείται να ληφθούν σοβαρά υπόψη διάφοροι παράμετροι για την ασφαλή και μακροβιότερη λειτουργία τους. Για αυτό πρέπει να αντέχουν στη θερμική και μηχανική καταπόνηση και να ελαχιστοποιούνται οι κίνδυνοι από το φαινόμενο Corona. Οι γραμμές λοιπόν ελέγχονται τόσο στην τοποθέτηση όσο και στη συντήρησή τους για σημεία διαβρώσεως, ρωγμές, θραυσμένα σύρματα και αποκλίσεις από την κατασκευαστική τους μορφή. Ακόμη λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως η ταχύτητα ανέμου, το ονομαστικό ρεύμα, το προφίλ της σιδηροδρομικής γραμμής και η τοποθέτηση των σημείων τροφοδότησης [27].



Εικόνα 1.16 Το σύστημα εναέριων γραμμών τροφοδοσίας [28]

Ο τρόπος επαφής μεταξύ των εναέριων γραμμών μεταφοράς και του τρένου γίνεται μέσω του παντογράφου. Ο παντογράφος αποτελεί μια συσκευή που συλλέγει το ρεύμα από τις γραμμές στο τρένο και η πρώτη του χρήση χρονολογείται στο 1895.



Εικόνα 1.17 Σύστημα παντογράφου [29]

Το πιο κοινό σύστημα για την πλειοψηφία των Τραμ και Μετρό είναι αυτό των 600 ή 750V DC [27]. Τα DC σιδηροδρομικά δίκτυα αποτελούν ακόμα τον πιο οικονομικό και σύνηθες δίκτυο για την μαζική μετακίνηση των επιβατών, σε επίπεδο αστικών κέντρων. Για περιφερειακά και υπεραστικά δίκτυα το επίπεδο τάσης που χρησιμοποιείται είναι 1.5kV.

1.5 Αντικείμενο και δομή διατριβής

Στα πλαίσια της διατριβής μελετώνται δύο εφαρμογές των συστημάτων Χαμηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (Low Voltage DC – LVDC). Η πρώτη κατηγορία αφορά τοπολογίες μικροδικτύων και ζητήματα που αφορούν τον έλεγχο και τη λειτουργία τους ενώ η δεύτερη κατηγορία αφορά τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος (π.χ. τύπου Μετρό, Τραμ κλπ.) καθώς και τα οφέλη που προκύπτουν από τη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας κατά την πέδηση των τρένων.

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από 5 κεφάλαια και διαρθρώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται τα 3 επίπεδα του ιεραρχικού ελέγχου για εφαρμογή σε τοπολογίες DC μικροδικτύων. Το πρώτο επίπεδο αποτελεί τον πρωτογενή έλεγχο και διαθέτει την ταχύτερη απόκριση βασιζόμενος σε τοπικές μετρήσεις δίχως την ανάγκη επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων. Το δεύτερο επίπεδο του ιεραρχικού ελέγχου είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση της τάσης και η λειτουργία του μπορεί να βασίζεται στον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου ή να εκτελείται αποκεντρωμένα από τους τοπικούς ελεγκτές των μονάδων που συμμετέχουν στο μικροδίκτυο. Τέλος, ο τριτογενής έλεγχος σχετίζεται με την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου διανομής και είναι υπεύθυνος για ζητήματα που αφορούν τη βέλτιστα οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου.

Επιπλέον, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι βασικές τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης για εφαρμογή σε τοπολογίες DC μικροδικτύων. Στα πλαίσια της διατριβής, ο αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης βασιζόμενος στην ύπαρξη μεταβολών τάσης και συχνότητας στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος μελετήθηκε μέσω της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ.

Το Κεφάλαιο 3 ασχολείται με την ομαλή μετάβαση μεταξύ διασυνδεδεμένης και απομονωμένης λειτουργίας ενός DC μικροδικτύου. Εξετάζονται όλα τα στάδια π.χ. μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης, έλεγχος μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης, μετάβαση από απομονωμένη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία κλπ. Επιπλέον, προτείνεται μια νέα μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης έχοντας ως βάση την εισαγωγή ενός ελεγχόμενου φορτίου παράλληλα με τον κεντρικό διακόπτη του μικροδικτύου. Η ομαλή μετάβαση από απομονωμένη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία επιτυγχάνεται με έναν PI ελεγκτή ενσωματωμένο στον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου, στέλνοντας την κατάλληλη τιμή αναφοράς στη μονάδα παραγωγής της τάσης (μπαταρίες) προκειμένου να μειωθεί η διαφορά μεταξύ του DC μικροδικτύου και του LVDC δικτύου διανομής. Για τη μελέτη της προτεινόμενης μεθόδου γίνεται χρήση τόσο προσομοιώσεων όσο και της Control Hardware-in-the-Loop τεχνικής για την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων. Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος περνάει στο στάδιο της υλοποίησης και εξετάζεται με χρήση εξοπλισμού του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ.

Το Κεφάλαιο 4 ασχολείται με τις μεθόδους διαχείρισης της αναγεννητικής ενέργειας η οποία παράγεται κατά την πέδηση των τρένων. Παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του δικτύου και των επιμέρους στοιχείων. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα μοντέλα των ηλεκτρικών υποσταθμών έλξης, των ηλεκτρικών τρένων καθώς και η μοντελοποίηση του δικτύου για τον υπολογισμό της τάσης που αναπτύσσεται μεταξύ γραμμής επιστροφής και δυναμικού γης. Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται οι τρεις βασικές στρατηγικές διαχείρισης της αναγεννητικής ενέργειας που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Στην ανάλυση που πραγματοποιείται, μία παραλλαγή του μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου της Θεσσαλονίκης μήκους 6,6km, έχει χρησιμοποιηθεί.

Στο Κεφάλαιο 5 διατυπώνεται το πρόβλημα της βέλτιστης ρύθμισης τάσης σε DC σιδηροδρομικά δίκτυα εξοπλισμένα με αμφίδρομους υποσταθμούς έλξης ή στατικές μονάδες αποθήκευσης. Παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της προτεινόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης και η οποία βασίζεται σε μία επαναληπτική μέθοδο και γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής ισχύος. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε παραλλαγή του δικτύου της Θεσσαλονίκης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται μια ανακεφαλαίωση της διατριβής και παρουσιάζεται η συμβολή της διατριβής καθώς επίσης και οι προοπτικές μελλοντικής έρευνας πάνω στα θέματα της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2

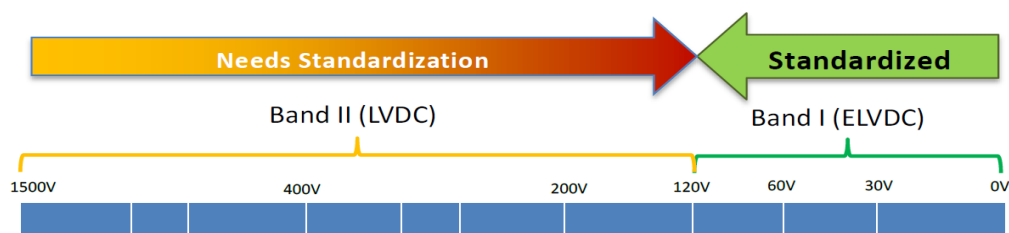
Ανάλυση Ιεραρχικού Ελέγχου στα DC μικροδίκτυα

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, το ερώτημα σχετικά με τη λειτουργία και χρήση ηλεκτρικών συστημάτων εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος προσελκύει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αυτό αποδεικνύεται από τις προσπάθειες διαφόρων επιτροπών και φορέων προτυποποίησης (π.χ. Emerge Alliance, International Electrotechnical Commission, IEEE Standards Association, κ.λπ.) για τον εντοπισμό νέων τομέων προτυποποίησης που πρέπει να αναληφθούν σε σχέση με τα ηλεκτρικά συστήματα συνεχούς ρεύματος [31], [32].

Πολλοί από τους παράγοντες που καθιστούσαν τις τεχνολογίες εναλλασσόμενου ρεύματος ιδανικές στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής είναι τώρα συζητήσιμοι [33]. Για παράδειγμα, τις τελευταίες δεκαετίες, η μεταφορά ισχύος σε χαμηλή DC τάση δεν ήταν δυνατή σε μεγάλες αποστάσεις δίχως την ύπαρξη αυξημένων απωλειών. Σήμερα, λόγω των σημαντικών εξελίξεων στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, το ζήτημα αυτό δεν υφίσταται. Επιπλέον, τα DC συστήματα ισχύος προσφέρουν σχετικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα AC [33], όπως η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και η μείωση του κόστους λόγω λιγότερων μετατροπών DC-AC και AC-DC για τη σύνδεση των DC πηγών ενέργειας (φωτοβολταϊκά, μπαταρίες κ.α.).

Παρόλο που τα συστήματα LVDC έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε τομείς όπως η ναυτιλία, η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία [34], [35] μόλις πρόσφατα ερευνήθηκε η έννοια των LVDC συστημάτων στα δίκτυα διανομής. Δύο από τις κύριες προκλήσεις που εμποδίζουν τη διαδεδομένη χρήση των LVDC συστημάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής είναι η έλλειψη προτύπων καθώς και ζητήματα ασφάλειας/προστασίας [36], [37] που προκύπτουν και πρέπει να αντιμετωπιστούν.



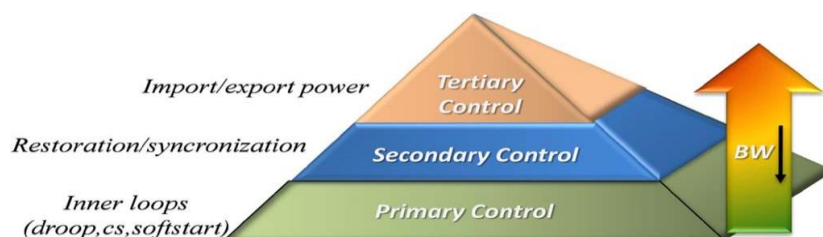
Εικόνα 2.1 Ανάγκη προτυποποίησης στα LVDC συστήματα [4]

Τα τελευταία χρόνια, η εφαρμογή των τεχνολογιών συνεχούς ρεύματος σε τοπολογίες μικροδικτύων έχει προσελκύσει πολλά ερευνητικά ενδιαφέροντα [53], [54], [55], [56] κυρίως εξαιτίας του γεγονότος ότι πολλές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λειτουργούν κατά κύριο λόγο σε συνεχή τάση (π.χ. μπαταρίες, φωτοβολταϊκά, κ.λπ.). Σύμφωνα με τον ορισμό τους, τα μικροδίκτυα είναι συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που περιέχουν φορτία και μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής (όπως μικρές γεννήτριες, συσκευές αποθήκευσης, ελεγχόμενα φορτία, κ.α.) που μπορούν να λειτουργούν με ελεγχόμενο και συντονισμένο τρόπο είτε όταν είναι συνδεδεμένα με το κύριο δίκτυο διανομής είτε ενώ λειτουργούν απομονωμένα [39]. Τα μικροδίκτυα διαφέρουν από τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής όσον αφορά τον έλεγχο και το συντονισμό των φορτίων και όλων των διαθέσιμων πόρων παραγωγής και αποθήκευσης, έτσι ώστε να εμφανίζονται στο κεντρικό δίκτυο ως μία ενιαία οντότητα.

Ένα μικροδίκτυο θα πρέπει να είναι ικανό να λειτουργεί σε σύνδεση με το δίκτυο, σε αυτόνομη λειτουργία καθώς και να χειρίζεται ομαλά τις μεταβάσεις μεταξύ των δύο λειτουργιών. Σε διασυνδεδεμένη λειτουργία, στην περίπτωση όπου υπάρχει έλλειμα ισχύος το δίκτυο συνεισφέρει στα φορτία, ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση που υπάρχει περίσσεια ισχύος η ενέργεια του μικροδικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το κεντρικό δίκτυο. Κατά την αυτόνομη λειτουργία, τα συστήματα αποθήκευσης σε συνδυασμό με τις μονάδες παραγωγής θα πρέπει να βρίσκονται σε ισορροπία με την τοπική ζήτηση. Η ομαλή μετάβαση μεταξύ των δύο λειτουργιών, είναι σημαντική για την ασφάλεια του συστήματος και του εξοπλισμού. Τέλος, για την αξιόπιστη και βέλτιστη οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου, το μικροδίκτυο θα πρέπει να διαθέτει λειτουργίες όπως ρύθμιση της τάσης, διαχείριση των μονάδων αποθήκευσης, διατήρηση του ισοζυγίου ισχύος, διαχείριση της ζήτησης κ.α. Ο σχεδιασμός του ελέγχου επομένως θα πρέπει να ανταποκρίνεται σε αυτές τις προκλήσεις [38].

2.2 Ιεραρχικός έλεγχος στα DC μικροδίκτυα

Ο έλεγχος των μικροδικτύων συχνά είναι οργανωμένος σε μια ιεραρχική δομή που περιλαμβάνει τρία βασικά επίπεδα ελέγχου: α) πρωτογενή, β) δευτερογενή και γ) τριτογενή έλεγχο [53], [56], [57], [58], [59], [60].

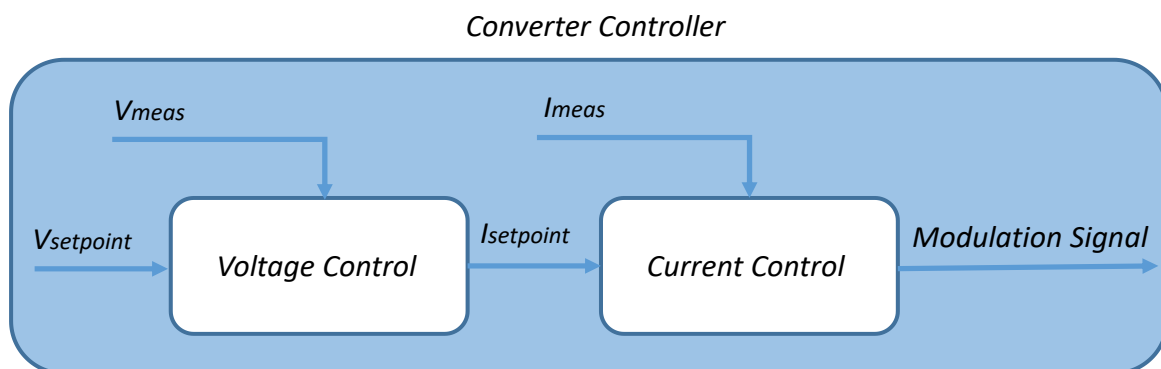


Εικόνα 2.2 Δομή ιεραρχικού ελέγχου [40]

2.2.1 Πρωτογενής έλεγχος

Ο πρωτογενής έλεγχος (αλλιώς τοπικός ή εσωτερικός έλεγχος), αποτελεί το πρώτο επίπεδο ελέγχου και διαθέτει την ταχύτερη απόκριση. Ο έλεγχος αυτός βασίζεται σε τοπικές μετρήσεις και δεν χρειάζεται επικοινωνία. Ο έλεγχος των μονάδων με βάση καμπύλες στατισμού και τοπικές μετρήσεις εφαρμόζεται κυρίως ως το πρώτο επίπεδο ελέγχου, προκειμένου να σταθεροποιηθεί το σύστημα κατά τις πρώτες χρονικές περιόδους μετά από μία διαταραχή στο ισοζύγιο ισχύος. Κατά την απομονωμένη λειτουργία ενός μικροδίκτυου η ευστάθεια τάσης (και συχνότητας στα AC μικροδίκτυα) καθορίζεται από το διαμοιρασμό της ισχύος στις μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης. Σε διασυνδεδεμένη λειτουργία, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής παρέχουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ (Maximum Power Point Tracking - MPPT), ενώ διαφορές στο ισοζύγιο μεταξύ μονάδων παραγωγής και κατανάλωσης καλύπτονται από το κεντρικό δίκτυο [53], [56], [57], [58], [59], [60].

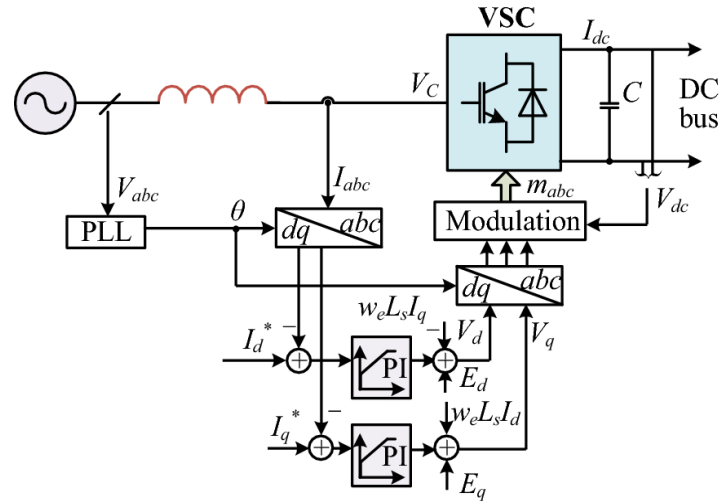
Ένας μεγάλος αριθμός μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης (φωτοβολταϊκά, μπαταρίες, κ.α.) απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλων μετατροπών DC/DC για τη διασύνδεση με το μικροδίκτυο. Ο έλεγχος των μετατροπών αυτών αποτελείται από δύο στάδια: τον ελεγκτή διαμοιρασμού ισχύος της διεσπαρμένης πηγής και τον ελεγκτή εξόδου του μετατροπέα. Ο ελεγκτής διαμοιρασμού ισχύος είναι υπεύθυνος για το διαμοιρασμό των αναντιστοιχιών της ενεργού ισχύος στο μικροδίκτυο, ενώ ο ελεγκτής εξόδου είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση των τάσεων και των ρευμάτων εξόδου. Ο έλεγχος εξόδου του μετατροπέα αποτελείται από έναν εξωτερικό βρόγχο για τον έλεγχο της τάσης και έναν εσωτερικό βρόγχο αντίστοιχα για την ρύθμιση του ρεύματος [41]. Επιπροσθέτως, η διασύνδεση ενός DC μικροδίκτυου με το κεντρικό εναλλασσόμενο δίκτυο, επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων αντιστροφών ισχύος DC/AC. Συμπερασματικά, στον πρωτογενή έλεγχο επιτυγχάνεται ο έλεγχος της τάσης και του ρεύματος των διεπαφών που βρίσκονται συνδεδεμένοι στις μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης, ενώ είναι υπεύθυνος και για το διαμοιρασμό της ισχύος μεταξύ των μονάδων.



Εικόνα 2.3 Διάγραμμα ελέγχου μετατροπέα για τη ρύθμιση τάσης

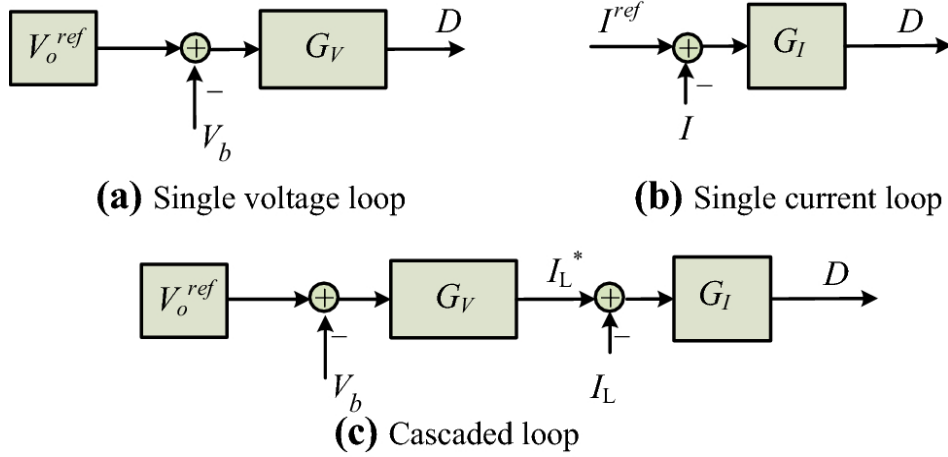
Στον τριφασικό μετατροπέα πηγής τάσης της Εικόνα 2.4, ο εσωτερικός βρόχος ρυθμίζει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε ένα σύγχρονο περιστρεφόμενο πλαίσιο συνιστωσών (dq-συνιστώσες). Μετά το μετασχηματισμό των μετρούμενων ρευμάτων από ένα τριφασικό

σταθερό σύστημα συνιστωσών στο σύγχρονο περιστρεφόμενο dq σύστημα συνιστωσών, οι γραμμικοί ελεγκτές ρυθμίζουν το ρεύμα εξόδου με βάση κάποιες τιμές αναφοράς. Η έξοδος των ελεγκτών αυτών είναι οι dq-συνιστώσες τάσης οι οποίες με τη σειρά τους μετασχηματίζονται σε μία τριφασική αναφορά που οδηγείται στην διαμόρφωση εύρους παλμών τεχνική (Pulse Width Modulation - PWM). Οι i_d^* και i_q^* αναφορές ρεύματος καθορίζονται από την απαιτούμενη ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα με αποτέλεσμα ο έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος να μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα.



Εικόνα 2.4 Εσωτερικός βρόχος ενός τριφασικού μετατροπέα πηγής τάσης (AC/DC μετατροπέας) [42]

Οι τύποι DC/DC μετατροπέων [43], [44] μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους, αλλά ο έλεγχός τους μπορεί να γενικευθεί σε δύο κατηγορίες: α) λειτουργία ελέγχου τάσης και β) λειτουργία ελέγχου ρεύματος (λειτουργία ελέγχου ισχύος). Ο DC/DC μετατροπέας υπό τη λειτουργία ελέγχου τάσης ρυθμίζει την τάση αναφοράς και λειτουργεί ως μια ελεγχόμενη πηγή τάσης. Εναλλακτικά, ο μετατροπέας υπό τη λειτουργία ρεύματος/ισχύος συμπεριφέρεται ως μια ελεγχόμενη πηγή ρεύματος/ισχύος. Το ρεύμα/ισχύς εξόδου ρυθμίζεται ώστε να ακολουθεί τη δεδομένη αναφορά. Η Εικόνα 2.5a) παρουσιάζει ένα βρόχο ρύθμισης τάσης όταν ο μετατροπέας λειτουργεί σε λειτουργία ελέγχου τάσης. Η έξοδος του ελεγκτή τάσης G_v είναι ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) των διακοπτικών στοιχείων σε μία PWM τεχνική διαμόρφωσης. Η αναφορά V_o^{ref} θα μπορούσε να είναι η έξοδος μίας καμπύλης στατισμού Τάσης - Ρεύματος (V-I Droop) και η οποία θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Η Εικόνα 2.5b) παρουσιάζει τον εσωτερικό βρόχο όταν ο μετατροπέας λειτουργεί σε λειτουργία ελέγχου ρεύματος. Ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) επιτυγχάνεται μέσω ενός ρυθμιστή ρεύματος. Η τρέχουσα αναφορά I^{ref} θα μπορούσε να δοθεί με βάση μία χαρακτηριστική καμπύλη στατισμού Ρεύματος - Τάσης (I-V Droop). Η εικόνα παρουσιάζει και μια άλλη επιλογή του DC/DC μετατροπέα σχετικά με τον έλεγχο τάσης. Τη χρήση μιας κλιμακωτής λογικής κατά την οποία δεδομένης της αναφοράς τάσης, ο ελεγκτής τάσης G_v παρέχει την αναφορά ρεύματος στην είσοδο του ελεγκτή G_I .



Εικόνα 2.5 Εσωτερικοί βρόχοι DC/DC μετατροπέων

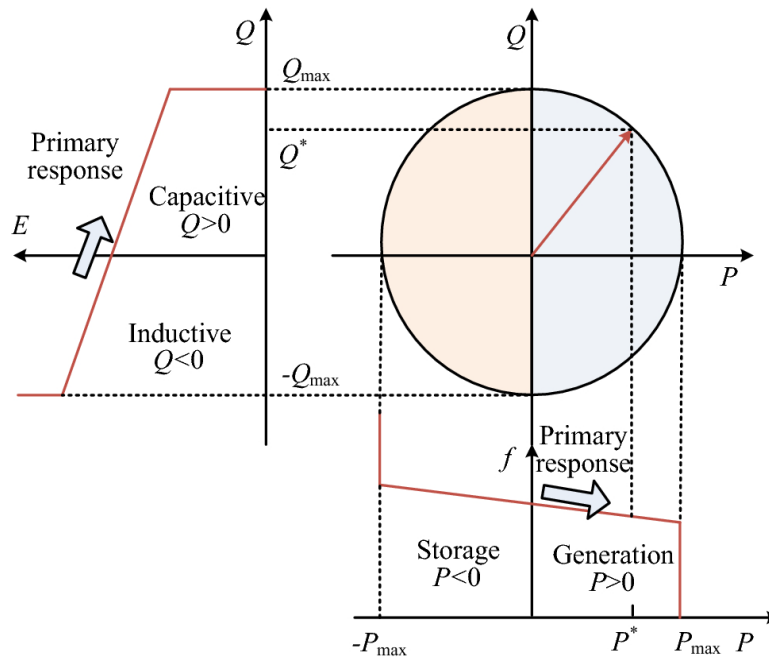
Μία από τις πιο συνηθισμένες στρατηγικές πρωτογενούς ελέγχου όπου δεν χρειάζεται επικοινωνία μεταξύ των συσκευών είναι η χρήση καμπυλών στατισμού (Droop control). Είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη για τα πλεονεκτήματα που προσφέρει σχετικά με άλλους ελέγχους όπως δυνατότητα plug-and-play, λιγότερα σφάλματα λόγω της απουσίας επικοινωνίας, απλή δομή κ.α.

Αρχικά ο έλεγχος μέσω καμπυλών στατισμού εφαρμόστηκε στα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε ένα δίκτυο διανομής το οποίο χαρακτηρίζεται από έντονο επαγωγικό χαρακτήρα η ενεργός ισχύς εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη γωνία ισχύος δ και η οποία με τη σειρά της συνδέεται με τη συχνότητα του συστήματος, ενώ η άεργος ισχύς καθορίζεται κυρίως από το μέτρο της τάσης. Η Εικόνα 2.6 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ ενεργού και αέργου ισχύος σε ένα δίκτυο διανομής με τις καμπύλες στατισμού. Στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος οι καμπύλες στατισμού διαμορφώνονται ως εξής:

$$\omega = \omega^* - k_{P-f}(P - P^*) \quad (2.1)$$

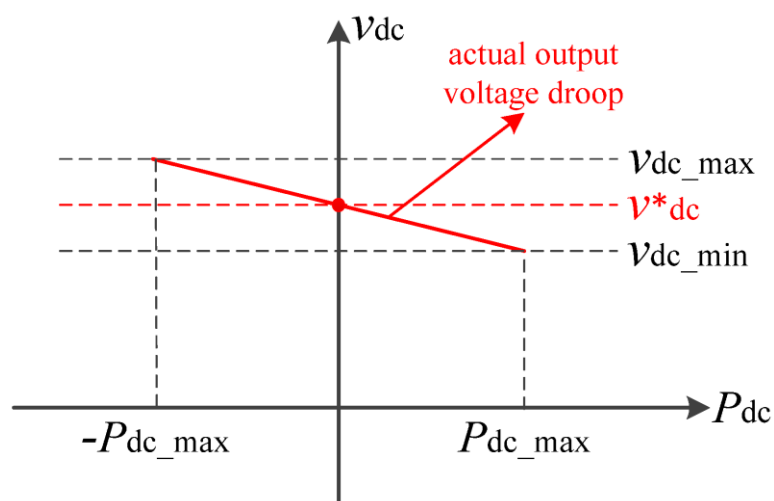
$$V = V^* - k_{Q-V}(Q - Q^*) \quad (2.2)$$

Όπου ω και V είναι η συχνότητα και το πλάτος της τάσης αντίστοιχα, ω^* και V^* είναι οι αναφορές συχνότητας και τάσης, P και Q είναι η μέτρηση της ενεργού και αέργου ισχύος, P^* και Q^* είναι οι αναφορές ενεργού και αέργου ισχύος, k_{P-f} και k_{Q-V} είναι τα αναλογικά κέρδη στις καμπύλες στατισμού.



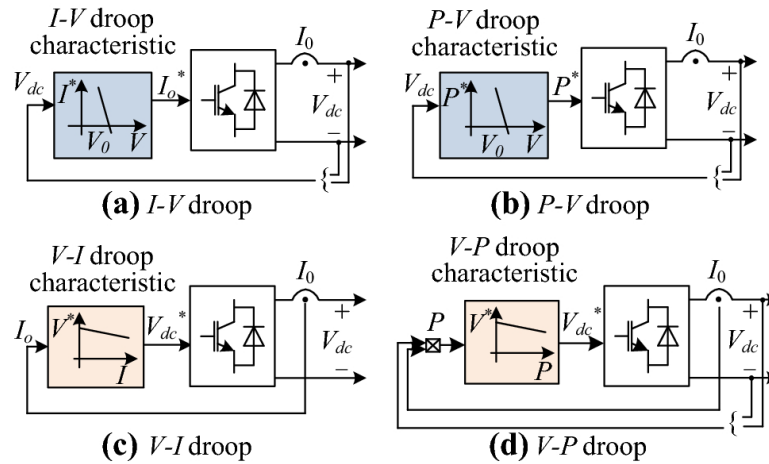
Εικόνα 2.6 P-f και Q-V καμπύλες στατισμού σε δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος [45]

Με παρόμοιο τρόπο η χρήση καμπυλών στατισμού έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στα συστήματα συνεχούς ρεύματος. Εν αντιθέσει με τα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος το μέγεθος της αέργου ισχύος δεν υφίσταται και έχουμε επομένως μόνο τη μεταφορά ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Η ποσότητα της ενεργού ισχύος η οποία μεταφέρεται στο δίκτυο καθορίζεται από το μέτρο της συνεχούς τάσης. Επομένως στα DC δίκτυα μία παρόμοια λογική μπορεί να εφαρμοστεί θέτοντας μία εξάρτηση μεταξύ ενεργού ισχύος και μέτρο της DC τάσης με στόχο την επίτευξη του επιθυμητού διαμοιρασμού ισχύος στο δίκτυο. Τη στρατηγική αυτή τη διαθέτουν συνήθως και τα αποθηκευτικά συστήματα του μικροδικτύου για τον βέλτιστο διαμοιρασμό του.



Εικόνα 2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη στατισμού μονάδας αποθήκευσης [46]

Οι βασικές κατηγορίες καμπυλών στατισμού στα DC μικροδίκτυα παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.8. Οι κατηγορίες (a) και (b) αναφέρονται στη ρύθμιση ρεύματος και ισχύος με βάση την τάση εξόδου και εφαρμόζονται σε μετατροπείς οι οποίοι λειτουργούν σε διασυνδεδεμένη λειτουργία. Οι κατηγορίες (c) και (d) αναφέρονται σε μετατροπείς οι οποίοι λειτουργούν σε αυτόνομη λειτουργία και καθορίζουν την τάση εξόδου με βάση το ρεύμα ή αντίστοιχα την ισχύ εξόδου.

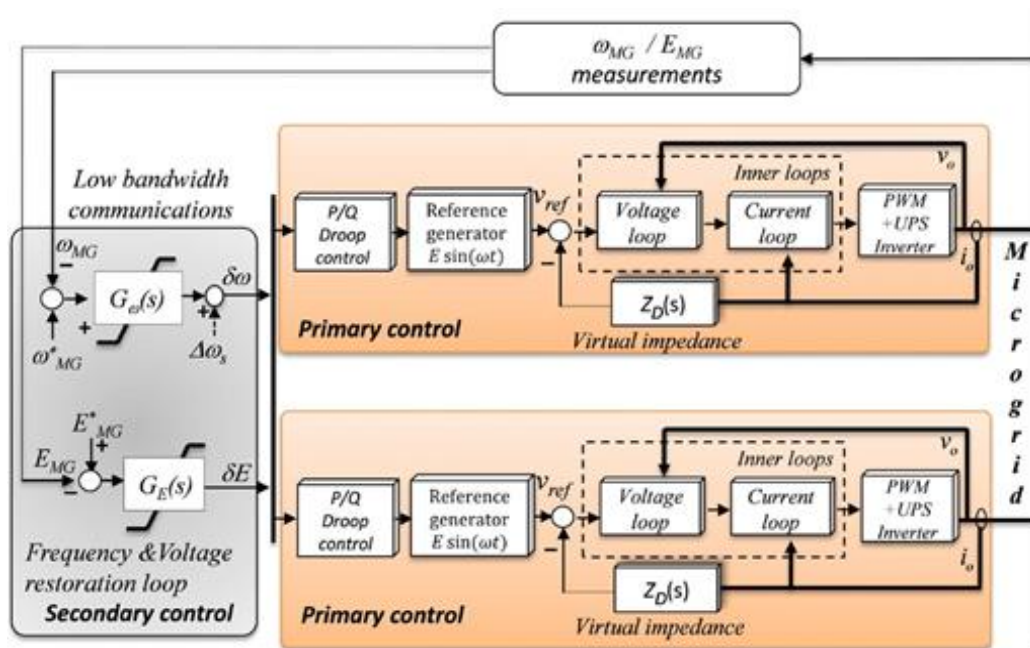


Εικόνα 2.8 Βασικές κατηγορίες καμπυλών στατισμού στα DC μικροδίκτυα [47]

Αξίζει να αναφερθεί ότι εκτός από τη γραμμική μορφή των καμπυλών στατισμού, όπως αυτή παρουσιάστηκε προηγουμένως, διαφορετικοί τύποι καμπυλών έχουν αναπτυχθεί συμπεριλαμβάνοντας μη γραμμικές εξισώσεις [48], αντίστροφες καμπύλες στατισμού (inverse droop control) [49] και προσαρμοστικές καμπύλες στατισμού [50] με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

2.2.2 Δευτερογενής Έλεγχος

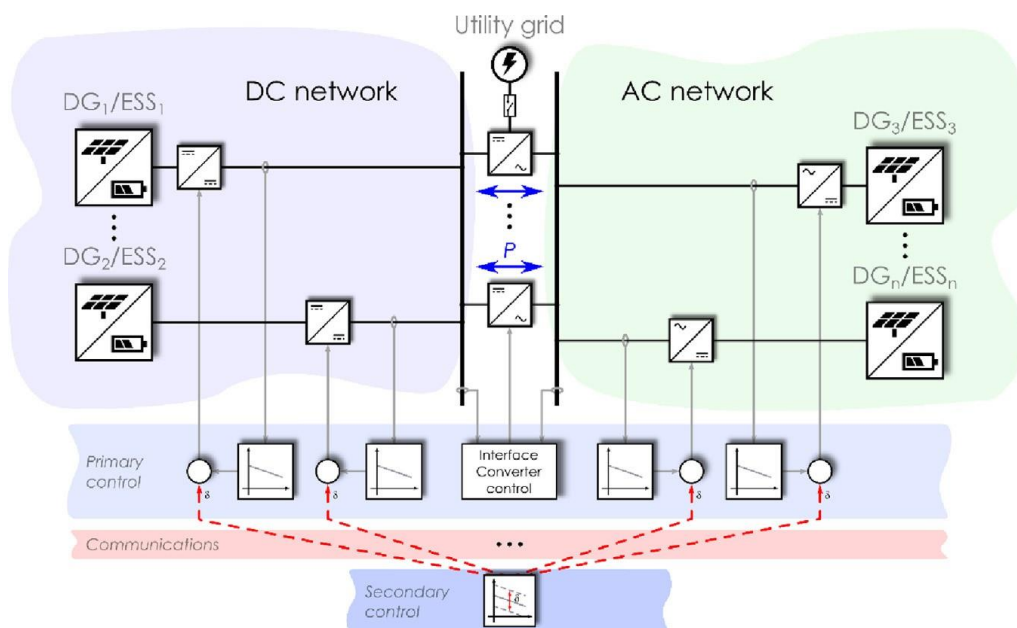
Το δεύτερο επίπεδο του ιεραρχικού ελέγχου είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση της τάσης (ρύθμιση και συχνότητας στα AC μικροδίκτυα) και η λειτουργία του μπορεί να βασίζεται στον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου (Microgrid Central Controller - MGCC) ή να εκτελείται αποκεντρωμένα από τους τοπικούς ελεγκτές των μονάδων που συμμετέχουν στο μικροδίκτυο. Αυτό το επίπεδο ελέγχου είναι πιο αργό από τον πρωτογενή έλεγχο και βασίζεται συνήθως σε συστήματα επικοινωνίας με χαμηλό εύρος ζώνης [53], [56], [57], [58], [59], [60].



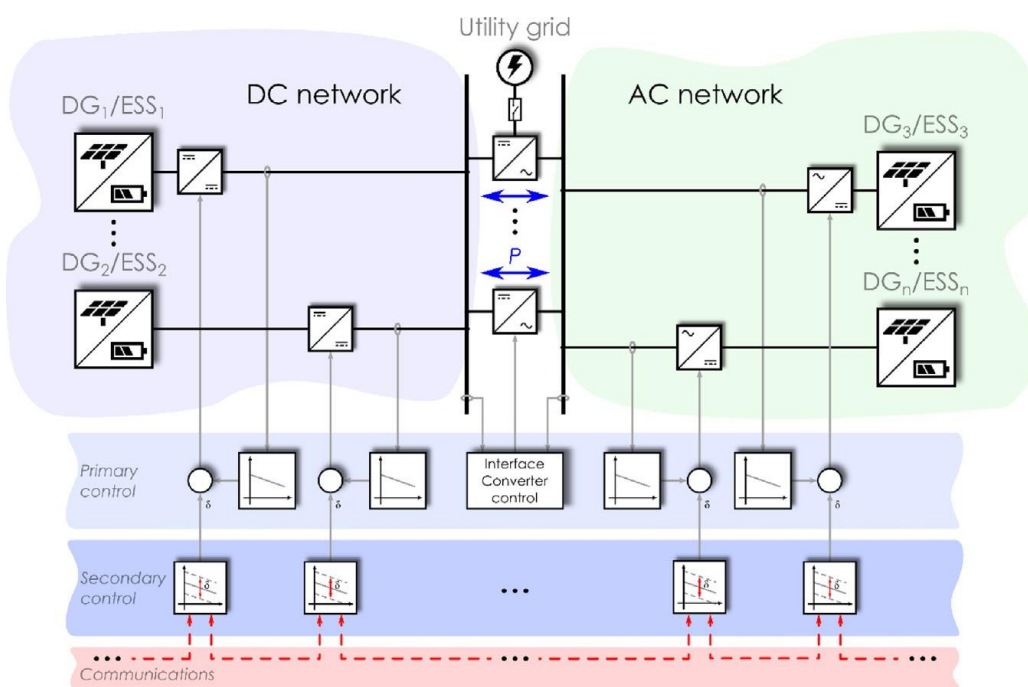
Εικόνα 2.9 Πρωτογενής και Δευτερογενής έλεγχος ενός μικροδικτύου [40]

Ο δευτερογενής έλεγχος αναφέρεται συχνά και ως σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management System - EMS) και είναι υπεύθυνος για τη διόρθωση της τάσης από αποκλίσεις που προκύπτουν στον πρωτογενή, την αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου τόσο σε αυτόνομη λειτουργία όσο και σε σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο. Το αντικείμενο του δευτερογενή ελέγχου είναι να βρίσκει τη βέλτιστη λειτουργία μεταξύ των μονάδων και να αποδεσμεύει τις διαθέσιμες πηγές ή φορτία, ανάλογα με τις ανάγκες του μικροδικτύου και τους στόχους που πρέπει να υλοποιηθούν. Ο δευτερογενής έλεγχος είναι το υψηλότερο ιεραρχικό επίπεδο στην αυτόνομη λειτουργία ενός μικροδικτύου και είναι επιπλέον υπεύθυνος για την ομαλή μετάβαση του μικροδικτύου σε σύνδεση με το δίκτυο, καθώς και την ομαλή νησιδοποίηση του μικροδικτύου σε περίπτωση σφάλματος [46]. Να σημειωθεί πως τα ζητήματα της ανίχνευσης νησιδοποίησης και της ομαλής μετάβασης μεταξύ διασυνδεδεμένης και αυτόνομης λειτουργίας θα μελετηθούν με λεπτομέρεια τόσο σε αυτό το κεφάλαιο όσο και στο Κεφάλαιο 3.

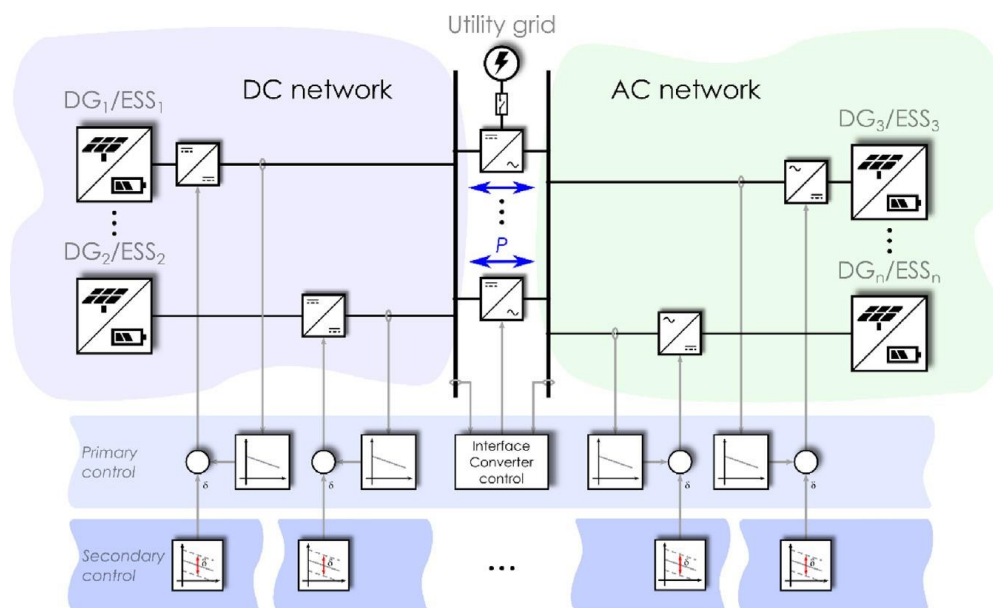
Ο δευτερογενής έλεγχος διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: α) κεντρικός, β) αποκεντρωμένος. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος με τη σειρά του χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες ανάλογα με την ύπαρξη ή μη επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων. Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν τις διάφορες τοπολογίες που αναπτύσσονται στο δευτερογενή έλεγχο.



Εικόνα 2.10 Κεντρικός δευτερογενής έλεγχος μικροδικτύου [46]



Εικόνα 2.11 Αποκεντρωμένος δευτερογενής έλεγχος μικροδικτύου με επικοινωνία [46]



Εικόνα 2.12 Αποκεντρωμένος δευτερογενής έλεγχος μικροδικτύου χωρίς επικοινωνία [46]

A. Κεντρικός δευτερογενής έλεγχος

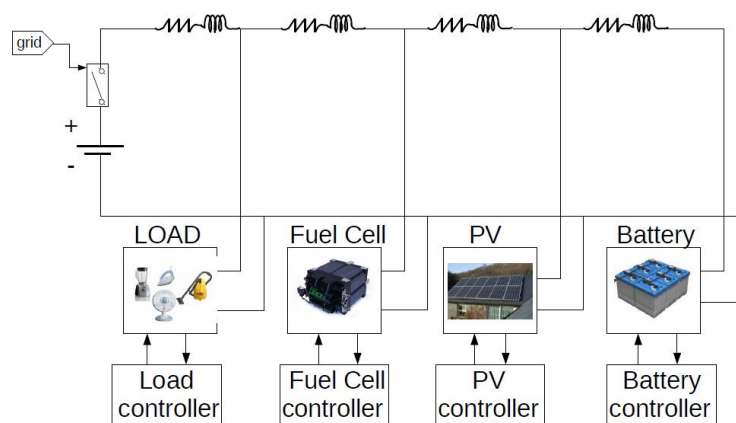
Σε αυτή την κατηγορία η διαχείριση του μικροδικτύου πραγματοποιείται σε έναν κεντρικό ελεγκτή (MGCC). Στηρίζεται σε επικοινωνιακό σύστημα για τον έλεγχο των επιμέρους μονάδων του μικροδικτύου. Ο ελεγκτής αυτός συλλέγει όλα τα δεδομένα των τάσεων και των ισχύων του μικροδικτύου, από τις μονάδες παραγωγής, αποθήκευσης και τα φορτία ενώ παράλληλα επιβλέπει την ποιότητα της ισχύος και λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την λειτουργία του μικροδικτύου. Πιο αναλυτικά ο κεντρικός ελεγκτής [40], [46], [51]:

- Διορθώνει αποκλίσεις στην τάση, οι οποίες προέρχονται είτε από τις αποκλίσεις στην έξοδο του πρωτογενούς ελέγχου, είτε από πιθανόν εσφαλμένο καταμερισμό ισχύος στους μετατροπείς των μονάδων. Η τάση του κεντρικού ζυγού του μικροδικτύου συγκρίνεται με την τάση αναφοράς και το σφάλμα δV στέλνεται σε όλους τους μετατροπείς των μονάδων μέσω του συστήματος επικοινωνίας, μετατοπίζοντας κατακόρυφα τις καμπύλες στατισμού.
- Επιβλέπει το μικροδίκτυο και επεμβαίνει στις λειτουργίες του σε πραγματικό χρόνο. Οι πληροφορίες από κάθε μονάδα του μικροδικτύου όπως τάση και ρεύμα, πληροφορίες όπως κόστη λειτουργίας, τεχνικά χαρακτηριστικά και περιορισμοί συλλέγονται στον κεντρικό ελεγκτή. Με βάση αυτές ο ελεγκτής προγραμματίζει τις λειτουργίες των επιμέρους μονάδων.
- Επιβλέπει την κατάσταση φόρτισης των αποθηκευτικών μέσων (State of Charge - SoC) τα οποία αποτελούν το σταθμιστικό παράγοντα μεταξύ παραγωγής-ζήτησης στην περίπτωση όπου υπάρχει έλλειμμα ή περίσσεια ενέργειας στο μικροδίκτυο. Επιπλέον, λόγω των συστημάτων αποθήκευσης οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να λειτουργούν στη μέγιστη απόδοση ενώ ταυτόχρονα μπορούν να αποτρέψουν τη λειτουργία άλλων κοστοβόρων μονάδων παραγωγής, σε περιόδους υψηλής ζήτησης.

- Είναι υπεύθυνος για την ομαλή σύνδεση με το δίκτυο. Για την ομαλή σύνδεση θα πρέπει να γίνει ο συγχρονισμός του μικροδικτύου με το κεντρικό δίκτυο στο σημείο κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling - PCC). Σημειώνεται ότι στα DC μικροδίκτυα η μοναδική μεταβλητή συγχρονισμού είναι η τάση.
- Είναι εξοπλισμένος με τις απαραίτητες τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης. Σε περίπτωση σφάλματος του κεντρικού δικτύου, για την αποφυγή βλαβών στον εξοπλισμό, την ασφάλεια του προσωπικού και την αδιάλειπτη εξυπηρέτηση των κρίσιμων φορτίων, το μικροδίκτυο θα πρέπει να εντοπίζει το σφάλμα και να απομονώνεται από το δίκτυο. Ταυτόχρονα θα πρέπει να διατηρεί την αυτόνομη λειτουργία του για την εξυπηρέτηση των φορτίων.
- Αποκόπτει φορτία όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο στην αυτόνομη λειτουργία. Στην περίπτωση όπου η παραγωγή του μικροδικτύου δεν είναι αρκετή, γίνεται αποκοπή των φορτίων με μικρότερη προτεραιότητα.
- Λαμβάνει αποφάσεις με βάση τα προγνωστικά καιρού και φορτίου, ώστε να αποδεσμεύσει ΑΠΕ στην περίπτωση όπου τα καιρικά φαινόμενα δεν ευνοούν ή να αυξήσει τις μονάδες παραγωγής για την κάλυψη της αναμενόμενης ζήτησης.

B. Αποκεντρωμένος δευτερογενής έλεγχος δίχως επικοινωνία μεταξύ των μονάδων

Οι στρατηγικές που χρησιμοποιούνται στον αποκεντρωμένο δευτερογενή έλεγχο πραγματοποιούνται μέσω των τοπικών ελεγκτών αποκλειστικά. Η πιο δημοφιλής στρατηγική για τον συντονισμό πολλαπλών μετατροπέων είναι η λεγόμενη DC Bus Signaling τεχνική (DBS). Παρά το γεγονός ότι προσφέρει απλότητα στον έλεγχο και την ανεξαρτησία από κάποιο σύστημα επικοινωνίας, παρουσιάζει παρόλα αυτά περιορισμούς στην απόδοση λόγω απουσίας πληροφοριών από τις γειτονικές μονάδες [51].



Εικόνα 2.13 Τυπικό DC μικροδίκτυο για εφαρμογή της DBS τεχνικής

	Συνδεδεμένη λειτουργία	Απομονωμένη λειτουργία				
		Mode 0	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
PV	MPPT	MPPT	MPPT	MPPT	MPPT	MPPT
FC	OFF	Droop-μείωση ισχύος	Σταθερή ισχύς	Droop-αύξηση ισχύος	Droop-αύξηση ισχύος	Droop-αύξηση ισχύος
Battery	OFF/φόρτιση	Droop-φόρτιση	OFF	Droop-εκφόρτιση	Droop-εκφόρτιση	Droop-εκφόρτιση
VSC	Ρύθμιση τάσης	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

Εικόνα 2.14 Χαρακτηριστικός πίνακας με τη στρατηγική ελέγχου κάθε μονάδας

Στην DBS τεχνική η τάση του DC ζυγού χρησιμοποιείται σαν μέσο πληροφορίας για να διακρίνονται τα διαφορετικά σημεία λειτουργίας των μονάδων παραγωγής. Η τάση χωρίζεται σε επίπεδα και σε κάθε επίπεδο πραγματοποιούνται διαφορετικές λειτουργίες για κάθε μονάδα παραγωγής και αποθήκευσης, ανάλογα με το σχεδιασμό που έχει υλοποιηθεί. Τα επίπεδα τάσης θα πρέπει να απέχουν μεταξύ τους τόσο, ώστε να μην οδηγήσουν το σύστημα σε αστάθεια. Ωστόσο ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως ο αριθμός των πηγών και των αποθηκευτικών συστημάτων περιορίζεται στον αριθμό των επιπέδων. Επίσης στην περίπτωση όπου τα καλώδια των συνδέσεων είναι αρκετά μεγάλα, η πτώση τάσης γίνεται εμφανής και μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στους μετατροπείς, λόγω των διαφορετικών επιπέδων τάσης που δημιουργούνται κατά μήκος. Η DBS τεχνική συνίσταται για μικρά κυρίως μικροδίκτυα με μικρές ηλεκτρικές γραμμές [51], [52].

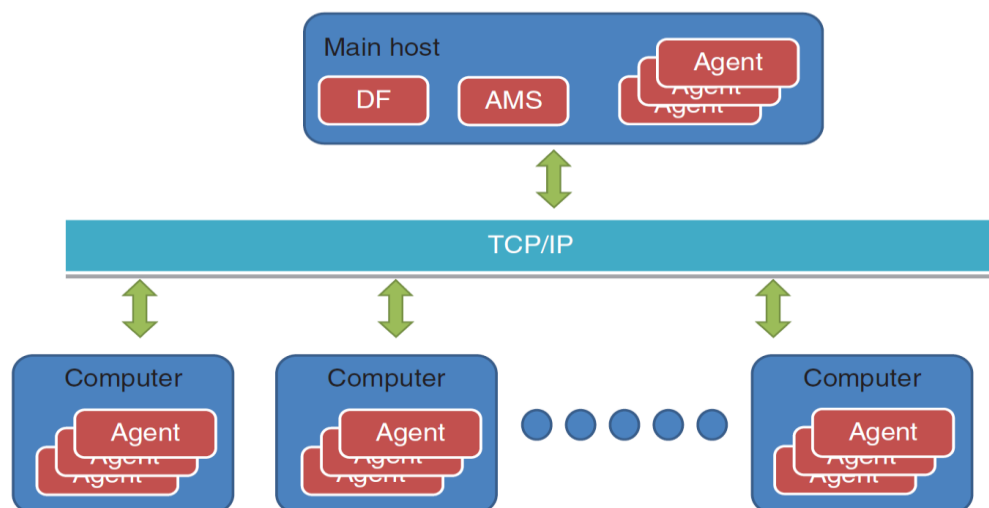
C . Αποκεντρωμένος δευτερογενής έλεγχος με επικοινωνία μεταξύ των μονάδων

Η αρχή λειτουργίας του αποκεντρωμένου δευτερογενή ελέγχου με επικοινωνία είναι η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των γειτονικών μονάδων σε μία προσπάθεια να ενώσει τον πρωτογενή και δευτερογενή έλεγχο στους τοπικούς ελεγκτές των μονάδων[41], [51].

Η πιο κοινή μέθοδος σε αυτή την κατηγορία είναι τα συστήματα ευφυών πρακτόρων (Multi-Agent Systems - MAS) [57]. Ένα MAS μπορεί εν συντομία, να περιγραφεί ως ένα σύστημα που αποτελείται από πολλούς ευφείς ελεγκτές (πράκτορες), που τους παρέχονται τοπικές πληροφορίες, και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, προκειμένου να επιτευχθούν πολλαπλοί ευρύτεροι και τοπικοί στόχοι. Είναι αρκετά εμφανές, ότι η συνδεσιμότητα των πρακτόρων, οι λειτουργίες και οι ευθύνες που αποδίδονται σε κάθε έναν εξ' αυτών, και τα χαρακτηριστικά των πληροφοριών που μοιράζονται, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του συστήματος. Οι πράκτορες είναι οντότητες που δρουν στο περιβάλλον και έχουν την ικανότητα επικοινωνίας, κάποιο επίπεδο αυτονομίας με βάση τους δικούς τους στόχους, και περιορισμένη γνώση του περιβάλλοντος. Παρά το γεγονός ότι οι πράκτορες μπορούν να επικοινωνούν, ένα

μεγάλο μέρος του ελέγχου βασίζεται στην αυτονομία τους και εκτελείται σε τοπικό επίπεδο.

Σε πρακτικές εφαρμογές των Multi-Agent συστημάτων χρησιμοποιείται συχνά η πλατφόρμα JADE, που βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού JAVA και παρέχει ένα σύνολο βιβλιοθηκών που επιτρέπουν την υλοποίηση των απαραίτητων επικοινωνιών. Συνήθως μια Multi-Agent εφαρμογή απαιτεί ένα δίκτυο επεξεργαστών ικανό να φιλοξενεί εφαρμογές JAVA και να επικοινωνεί μέσω TCP/IP πρωτοκόλλου όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.15.



Εικόνα 2.15 Multi-agent εφαρμογή βασισμένη σε TCP/IP επικοινωνία

2.2.3 Τριτογενής Έλεγχος

Ο τριτογενής έλεγχος σχετίζεται με την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου διανομής και είναι υπεύθυνος για ζητήματα που αφορούν τη βέλτιστα οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου λαμβάνοντας υπόψιν το κόστος παραγωγής των μονάδων και τις τιμές στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ του διαχειριστή του δικτύου διανομής και του μικροδικτύου, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία του [53], [56], [57], [58], [59], [60].

Ο τριτογενής έλεγχος είναι το υψηλότερο επίπεδο ελέγχου και στέλνει τα βέλτιστα σημεία λειτουργίας με βάση τις ανάγκες του δικτύου διανομής, όπου το μικροδίκτυο είναι συνδεδεμένο. Ο τριτογενής έλεγχος είναι υπεύθυνος για το συντονισμό πολλαπλών μικροδικτύων που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους σε ένα σύστημα. Για παράδειγμα ένα δίκτυο που αποτελείται από πολλά μικροδίκτυα μπορεί να συντονιστεί μέσω του τριτογενούς ελέγχου. Τέλος, ορίζει μακροπρόθεσμες και βέλτιστες τιμές αναφοράς, ανάλογα με τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού δικτύου.

2.3 Τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης στα DC μικροδίκτυα

Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα ο δευτερογενής έλεγχος είναι το υψηλότερο ιεραρχικό επίπεδο στην αυτόνομη λειτουργία ενός μικροδικτύου και είναι επιπλέον υπεύθυνος για την ομαλή μετάβαση του μικροδικτύου σε σύνδεση με το δίκτυο, καθώς και την ομαλή νησιδοποίηση του μικροδικτύου σε περίπτωση σφάλματος. Με τον όρο νησιδοποίηση προσδιορίζουμε την κατάσταση στην οποία τουλάχιστον μία μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής τροφοδοτεί τοπικά φορτία χωρίς να είναι συνδεδεμένη στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο [62].

Η νησιδοποίηση μπορεί να είναι είτε σκόπιμη, είτε μη σκόπιμη. Με βάση αυτό, υπάρχουν δύο απόψεις σχετικά με την αξιολόγηση της επίδρασης της νησιδοποίησης. Από τη μία πλευρά, η σκόπιμη νησιδοποίηση συνδέεται με την έννοια του μικροδικτύου και έτσι, δίνεται η δυνατότητα διατήρησης της λειτουργίας ενός τμήματος της ηλεκτρικής νησίδας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η δυνατότητα σκόπιμης νησιδοποίησης προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκούς ελέγχου προκειμένου να διατηρείται ευσταθής η λειτουργία του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, η μη σκόπιμη νησιδοποίηση έχει συνήθως μικρή διάρκεια ζωής, λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει μεγάλη επίδραση στο ισοζύγιο ισχύος παραγωγής - κατανάλωσης. Η ανισορροπία αυτή προκαλεί μεγάλες αλλαγές στο μέτρο της τάσης με αποτέλεσμα να ξεπερνούνται τα προκαθορισμένα επιτρεπόμενα όρια. Έτσι, διακόπτεται η λειτουργία των συμμετεχόντων μονάδων παραγωγής. Όμως, υπάρχει η περίπτωση σχετικής ισορροπίας του ενεργειακού ισοζυγίου με αποτέλεσμα η αλλαγή του μέτρου της τάσης να είναι τόσο μικρή, ώστε να μην ξεπεραστούν τα επιτρεπόμενα όρια και συνεπώς οι μονάδες παραγωγής να παραμείνουν συνδεδεμένες για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Στην κατάσταση της μη σκόπιμης νησιδοποίησης εμφανίζονται μία σειρά από αρνητικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια, την αξιοπιστία του δικτύου και την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Οι επιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

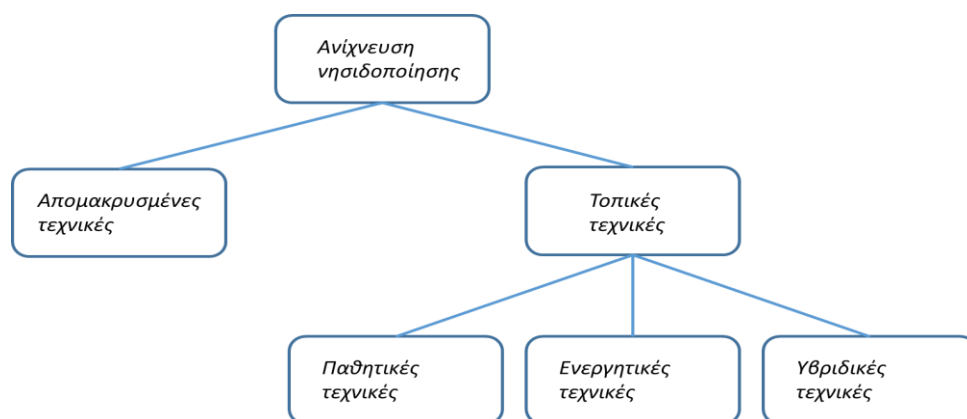
- i. Ύπαρξη θανάσιμου κινδύνου για το προσωπικό που εργάζεται σε κάποιο τμήμα του δικτύου το οποίο είναι σε κατάσταση νησιδοποίησης. Το προσωπικό διατρέχει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας, διότι εργάζεται με την προϋπόθεση ότι το συγκεκριμένο τμήμα έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο (άρα, θεωρείται ανενεργό), αλλά στην πραγματικότητα συνεχίζει να τροφοδοτείται από τις μονάδες παραγωγής της νησίδας.
- ii. Ύπαρξη κινδύνου διαταραχών της τάσης και διακύμανση αυτών εκτός των προκαθορισμένων ορίων, καθώς τα μεγέθη αυτά δεν επιβάλλονται από το δίκτυο. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφική βλάβη ορισμένων συσκευών που εξακολουθούν να λειτουργούν στο νησιδοποιημένο τμήμα του δικτύου.
- iii. Πολλοί πάροχοι χρησιμοποιούν πρακτικές στιγμιαίας επανασύνδεσης. Αν η μονάδα παραγωγής επανασυνδεθεί με το σύστημα διανομής, μπορεί η

επανασύνδεση αυτή να γίνει σε διαφορετικό επίπεδο τάσης γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει βλάβες στον εξοπλισμό.

- iv. Σε περίπτωση σφάλματος εντός της ηλεκτρικής νησίδας, οι μονάδες παραγωγής δεν έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης. Επιπλέον, τα υφιστάμενα μέσα προστασίας είναι επιλεγμένα με βάση τα μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης που προέρχονται από το δίκτυο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα μέσα προστασίας να μη διεγερθούν από τα χαμηλά ρεύματα των μονάδων και συνεπώς να διατηρηθούν τα σφάλματα εντός της ηλεκτρικής νησίδας.

Για λόγους όπως οι παραπάνω, υπάρχει απαίτηση η κατάσταση της μη σκόπιμης νησιδοποίησης να ανιχνεύεται και να διακόπτεται έγκαιρα.

Η βασική φιλοσοφία της ανίχνευσης νησιδοποίησης είναι αφενός η παρακολούθηση των παραμέτρων εξόδου των μονάδων και των παραμέτρων του συστήματος και αφετέρου η λήψη απόφασης για το αν οι μονάδες βρίσκονται σε κατάσταση νησιδοποίησης ή όχι. Οι τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης κατηγοριοποιούνται σε απομακρυσμένες και τοπικές και οι τελευταίες χωρίζονται περαιτέρω σε παθητικές, ενεργητικές και υβριδικές όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.16 [63].



Εικόνα 2.16 Κατηγοριοποίηση μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης

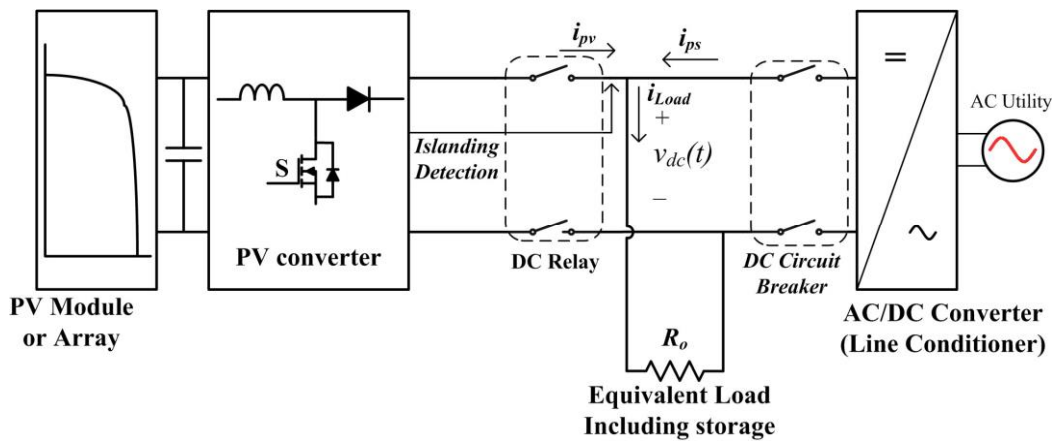
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία και αφορούν τα συστήματα συνεχούς ρεύματος. Επιπροσθέτως, στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης η οποία βασίζεται στην εισαγωγή ενός ελεγχόμενου φορτίου στο σημείο κοινής σύνδεσης ενός DC μικροδικτύου.

2.3.1 Αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω διαταραχής ρεύματος εξόδου σε Φ/Β μετατροπείς

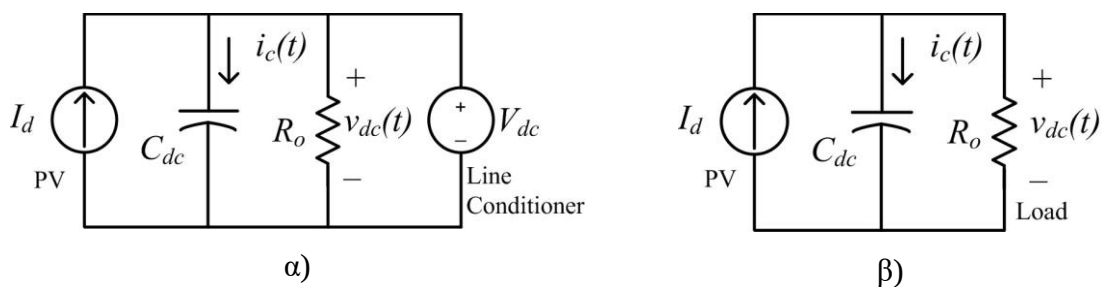
Για τη μελέτη της νησιδοποίησης το σύστημα παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.17. Αποτελείται από ένα φ/β μετατροπέα DC/DC, έναν αντιστροφέα DC/AC για τη ρύθμιση του DC ζυγού καθώς και το ισοδύναμο φορτίο του συστήματος. Όταν η διαφορά μεταξύ

της παραγωγής ισχύος του φ/β και της κατανάλωσης των φορτίων είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να οδηγήσει την τάση στα ανώτερα ή στα κατώτερα όρια της κανονικής λειτουργίας, η κατάσταση νησιδοποίησης μπορεί να ανιχνευτεί εύκολα. Όμως, με βάση το πρότυπο IEEE std. 929-2000 [64], η χειρότερη περίπτωση είναι όταν η διαφορά παραγωγής - κατανάλωσης είναι κοντά στο μηδέν, κατά την οποία η τάση παραμένει εντός ορίων ακόμα κι όταν το σύστημα νησιδοποιηθεί. Μια μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης πρέπει να ανιχνεύει το φαινόμενο υπό οποιεσδήποτε συνθήκες. Για αυτό το λόγο στην αναφορά [61] αναπτύχθηκε μια ενεργητική τεχνική για να εγγυηθεί την προστασία του συστήματος.

Για να μοντελοποιηθεί η κατάσταση νησιδοποίησης, στην Εικόνα 2.18 φαίνονται τα ισοδύναμα κυκλώματα για κανονική και νησιδοποιημένη λειτουργία. Ο φ/β αντιστροφέας μοντελοποιείται ως μια πηγή ρεύματος με χωρητικότητα εξόδου C_{dc} . Το φορτίο μοντελοποιείται ως μια ισοδύναμη αντίσταση R_o και ο DC/AC αντιστροφέας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια σταθερή πηγή τάσης σε κανονική λειτουργία.



Εικόνα 2.17 Τοπολογία δικτύου συνεχούς ρεύματος [61]



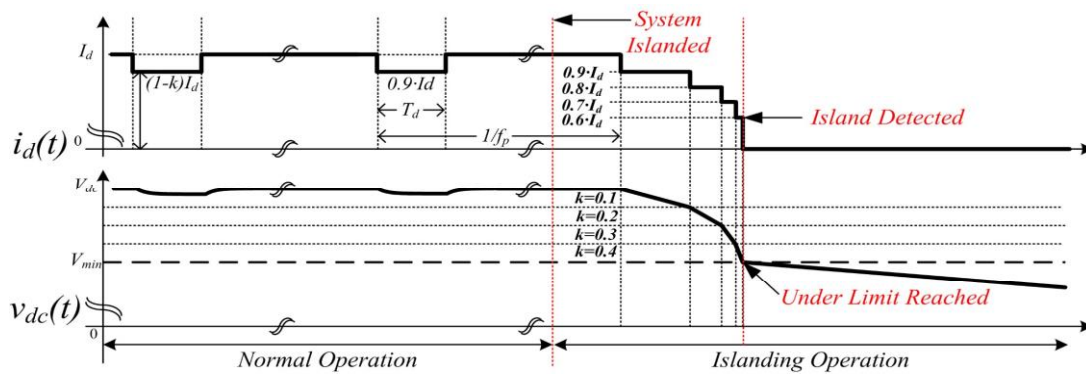
Εικόνα 2.18 Ισοδύναμα κυκλώματα: α) Κανονική λειτουργία, β) Κατάσταση νησιδοποίησης [61]

Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στην τεχνική διαταραχής και παρατήρησης. Δημιουργώντας μια ανισορροπία ρεύματος για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα σε μια προκαθορισμένη συχνότητα και παρατηρώντας την απόκριση, η κατάσταση νησιδοποίησης μπορεί να ανιχνευθεί μέσα στον απαιτούμενο χρόνο. Με τον AC/DC αντιστροφέα σε λειτουργία που σημαίνει ότι το σύστημα λειτουργεί κανονικά, η τάση του DC ζυγού δεν αλλάζει λόγω της ρύθμισης που επιβάλλεται από τον αντιστροφέα

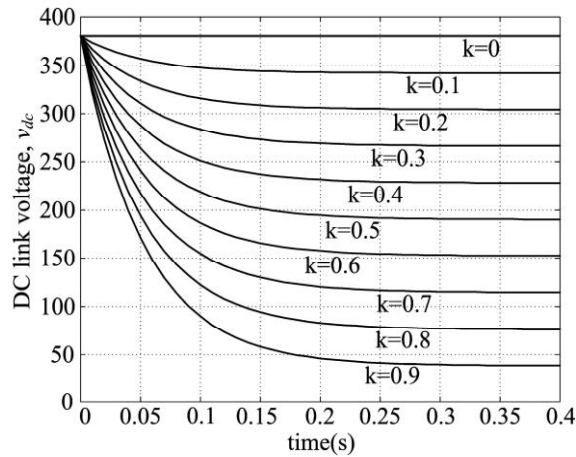
όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.18α). Όμως, σε κατάσταση νησιδοποίησης, η τάση θα επηρεαστεί από τη διαταραχή του ρεύματος λόγω της απουσίας του δικτύου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.18β).

Στην Εικόνα 2.19 παρουσιάζεται η λειτουργία της προτεινόμενης μεθόδου. Σε κανονική λειτουργία παρατηρούμε μια μικρή διακύμανση στην τάση του δικτύου η οποία όμως είναι εντονότερη δίχως την ύπαρξη του δικτύου. Αν οι διακυμάνσεις στην τάση, οι οποίες προκαλούνται απ' την εγγεόμενη διαταραχή ρεύματος ξεπερνούν την επιτρεπόμενη τιμή, ο αλγόριθμος αυξάνει έναν συντελεστή διαταραχής, k . Η κλίση της πτώσης τάσης επιτυγχάνεται λόγω περαιτέρω διαταραχής και η κατάσταση νησιδοποίησης ανιχνεύεται από τους ηλεκτρονόμους Over/Under Voltage (OUV).

Η απόδοση του αλγορίθμου εξαρτάται από το συντελεστή διαταραχής k , τη συχνότητα διαταραχής f_p και την περίοδο διαταραχής T_d . Καθώς οι αρχικές τιμές των k , f_p , T_d αυξάνονται, η απόκριση της ανίχνευσης βελτιώνεται. Ωστόσο, η εισαγωγή της διαταραχής δε θα πρέπει να επηρεάζει την απόδοση της MPPT μεθόδου. Ως εκ τούτου, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων θα πρέπει να επιλέγονται κατά το σχεδιασμό έτσι ώστε να υπάρχει ισορροπία μεταξύ της απόδοσης της MPPT μεθόδου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και της απόκρισης ανίχνευσης νησιδοποίησης.



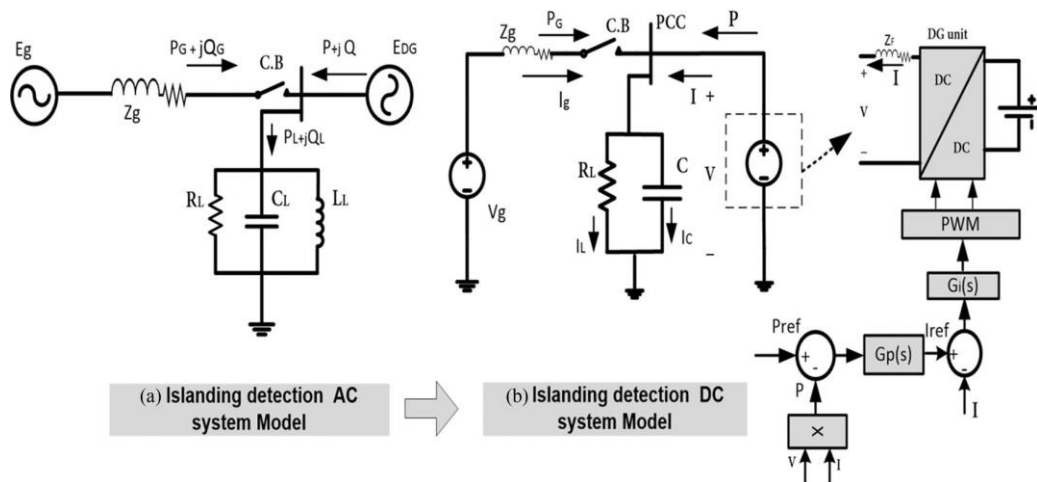
Εικόνα 2.19 Αρχή λειτουργίας της προτεινόμενης μεθόδου [61]



Εικόνα 2.20 DC τάση ζυγού σύνδεσης για διάφορες τιμές της μεταβλητής k [61]

2.3.2 Αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω θετικής ανάδρασης στο σύστημα ελέγχου του DC/DC μετατροπέα

Το βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου αυτής είναι η επιλογή ενός κέρδους στον έλεγχο του μετατροπέα παραγωγής (π.χ. ϕ/β μετατροπέα), το οποίο θα καθορίζει την αστάθεια του συστήματος όταν απουσιάζει το δίκτυο και την ευστάθεια του συστήματος όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο [68].



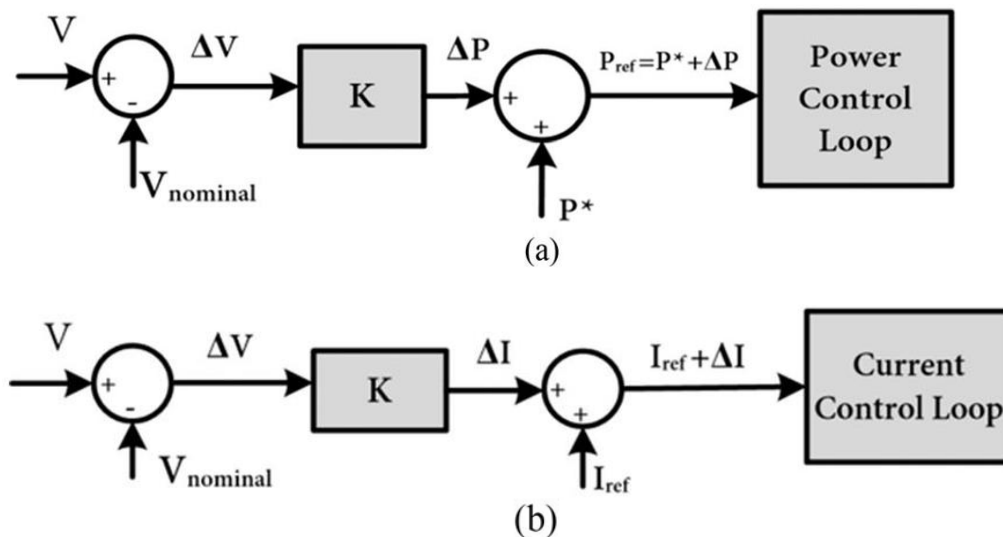
Εικόνα 2.21 Ισοδύναμα κυκλώματα εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος [68]

Στην Εικόνα 2.21a παρουσιάζεται το διάγραμμα μιας διασυνδεδεμένης στο AC δίκτυο μονάδας παραγωγής. Το κλασικό μοντέλο αποτελείται από μια μονάδα παραγωγής, η οποία παράγει ισχύ $P_{DG} + jQ_{DG}$ και ένα φορτίο RLC συνδεδεμένο στο ζυγό καταναλώνοντας ισχύ $P_L + jQ_L$. Η μονάδα παραγωγής και το φορτίο με τη σειρά τους συνδέονται στο AC δίκτυο μέσω μια γραμμής με σύνθετη αντίσταση Z_g το οποίο καταναλώνει την αναντιστοιχία ισχύος μεταξύ της μονάδας παραγωγής και του φορτίου, $P_G + jQ_G$. Χρησιμοποιώντας μια παρόμοια αναλογία, το προτεινόμενο DC δίκτυο για την ανίχνευση της νησιδοποίησης φαίνεται στην Εικόνα 2.21b. Σε κανονική λειτουργία, η μονάδα παραγωγής λειτουργεί παρέχοντας σταθερή ισχύ στο δίκτυο (P_{ref}), ενώ η λειτουργία ρύθμισης της τάσης εκτελείται από την πλευρά του δικτύου. Δύο PI ελεγκτές ($G_p(s)$ και $G_i(s)$) χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν την ισχύ της μονάδας παραγωγής μέσω δύο βρόχων ελέγχου. Ο ελεγκτής του εξωτερικού βρόχου $G_p(s)$ είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση της εγγεόμενης ισχύος και ο ελεγκτής του εσωτερικού βρόχου $G_i(s)$ είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση του ρεύματος.

Οι ενεργητικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης εισήλθαν στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν τη μη ανιχνεύσιμη ζώνη (Non Detection Zone - NDZ) ακόμα και όταν υπάρχει τέλεια αντιστοιχία ισχύος μεταξύ του φορτίου και της μονάδας παραγωγής. Η πρωταρχική μέθοδος στις ενεργητικές μεθόδους είναι να εκμεταλλευτούμε την έννοια της θετικής ανάδρασης με σκοπό να δημιουργήσουμε συνθήκες αστάθειας σε περίπτωση νησιδοποίησης. Στα AC συστήματα, η μέθοδος θετικής ανάδρασης εφαρμόστηκε στα σήματα τάσης και συχνότητας, εισάγοντας μια διαταραχή, ανάλογα με την απόκλιση της τάσης ή της

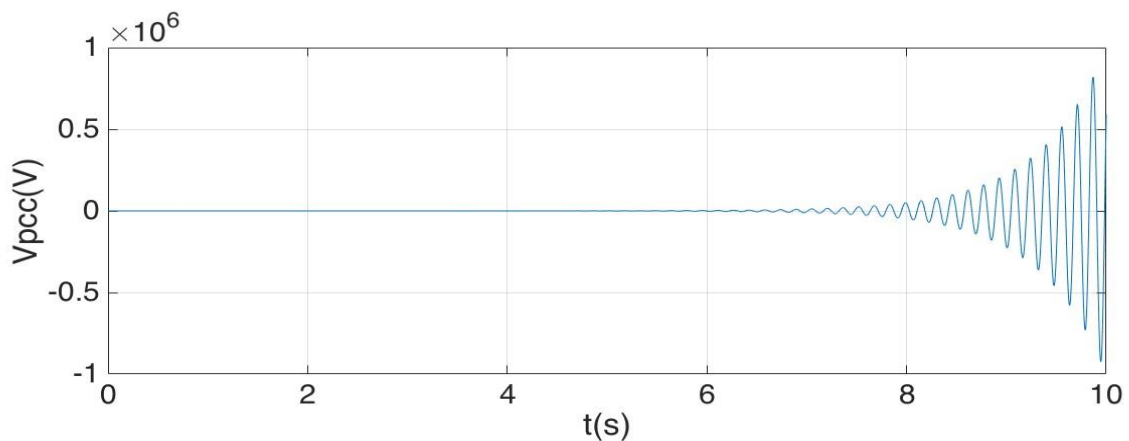
συχνότητας απ' την ονομαστική της τιμή, στην εντολή αναφοράς του ελεγκτή της μονάδας παραγωγής.

Στα DC δίκτυα, η έννοια της θετικής ανάδρασης μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στο σήμα της τάσης. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, προτείνονται δύο μέθοδοι βασισμένοι στη θετική ανάδραση της τάσης, όπου η διαταραχή της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης περνά μέσα από ένα κέρδος είτε στον εξωτερικό βρόχο (βρόχο ισχύος), είτε στον εσωτερικό βρόχο (βρόχο ρεύματος) του ελεγκτή της μονάδας παραγωγής.



Εικόνα 2.22 Διαταραχή τάσης μέσω: α) βρόχου ισχύος, β) βρόχου ρεύματος

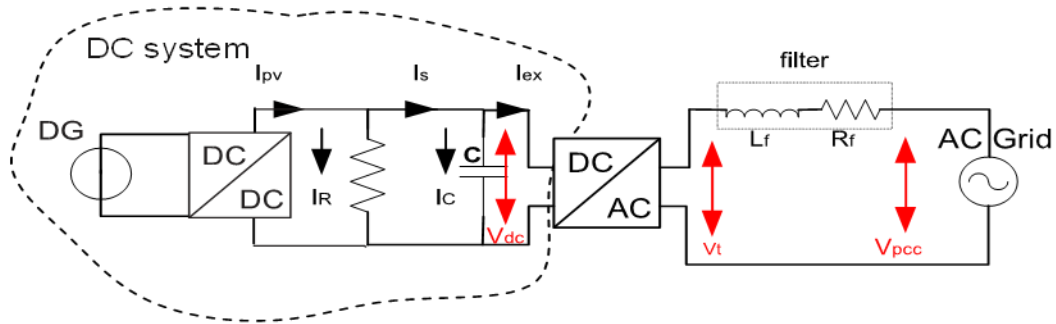
Εν κατακλείδι, η μέθοδος αυτή στηρίζεται στη σχεδίαση του μετατροπέα παραγωγής έτσι ώστε η ύπαρξη του δικτύου να εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος ενώ ενδεχόμενη παύση λειτουργίας να οδηγεί σε αστάθεια και εν τέλει στην ανίχνευση της νησιδοποίησης. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στην αναφορά [68].



Εικόνα 2.23 Κυματομορφή τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης σε κατάσταση αστάθειας

2.3.3 Αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης βασιζόμενος στην ύπαρξη μεταβολών τάσης και συχνότητας στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος

Στην Εικόνα 2.24 παρουσιάζεται η διασύνδεση ενός DC δικτύου με ένα δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω της λειτουργίας ενός αντιστροφέα DC/AC υπεύθυνου για τη ρύθμιση της ροής ισχύος μεταξύ των δύο συστημάτων.

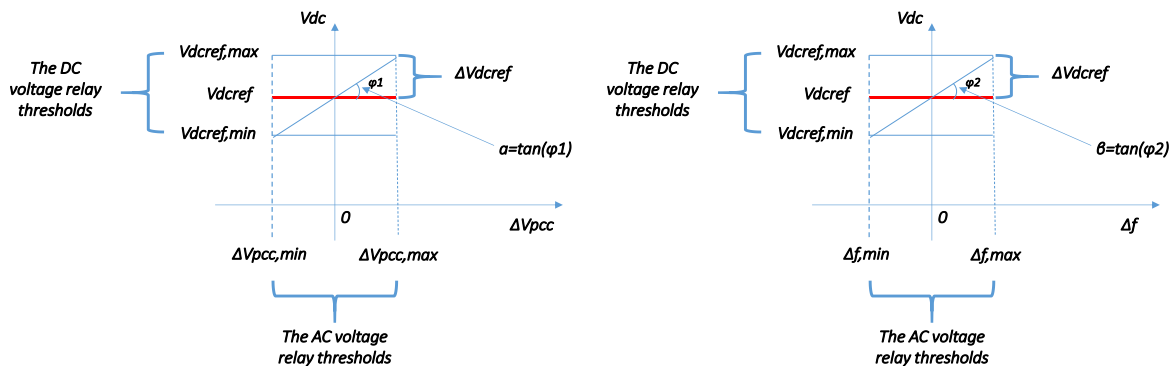


Εικόνα 2.24 Τοπολογία συστήματος υπό μελέτη [67]

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην "αντανάκλαση" των διαταραχών τάσης και συχνότητας του εναλλασσόμενου δικτύου, στη λειτουργία του δικτύου συνεχούς ρεύματος και συγκεκριμένα στη ρύθμιση της DC τάσης από τον ελεγκτή του DC/DC μετατροπέα της παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας την DC τάση αναφοράς του μετατροπέα όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (2.3).

$$V_{dc\text{ref}} = V_{dc\text{ref},\text{stdy}} + a\Delta V_{pcc} + \beta\Delta f \quad (2.3)$$

Από την εξίσωση αυτή παρατηρούμε ότι οι μεταβολές στην τάση (ΔV_{pcc}) και στη συχνότητα (Δf) μπορούν να επιφέρουν μεταβολές στην τάση του DC συστήματος ενώ η επίδρασή τους εξαρτάται από τους συντελεστές a και β . Οι συντελεστές αυτοί επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να θέσουν το σύστημα εκτός λειτουργίας ακόμα και στην περίπτωση όπου οι διαταραχές αυτές δεν εμφανίζονται ταυτόχρονα.



Εικόνα 2.25 Καμπύλες $\Delta V_{pcc} - V_{dc}$ και $\Delta f - V_{dc}$ για την επιλογή των συντελεστών a και β

Η μέθοδος για την επιλογή των παραμέτρων αυτών συνοψίζεται μέσω της Εικόνα 2.25 στην οποία τα επιτρεπτά όρια τάσης και συχνότητας του εναλλασσόμενου δικτύου ($\Delta V_{pcc,min} - \Delta V_{pcc,max}$ & $\Delta f_{min} - \Delta f_{max}$) σε συνδυασμό με τα επιτρεπτά όρια της συνεχούς τάσης ($V_{dcref,min} - V_{dcref,max}$) καθορίζουν τους συντελεστές α και β .

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη και σε δίκτυα στα οποία λειτουργούν πολλές μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής όπως παρουσιάστηκε και στην αναφορά [67]. Τέλος στη μέθοδο αυτή απαραίτητη είναι η ύπαρξη τηλεπικοινωνιακού δικτύου για την ενημέρωση του ελεγκτή του DC/DC μετατροπέα σχετικά με τις διακυμάνσεις που υπάρχουν στο εναλλασσόμενο δίκτυο.

Η παρούσα μέθοδος μελετήθηκε μέσω της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ. Η Εικόνα 2.30 παρουσιάζει την πειραματική διάταξη για τη δοκιμή του αλγορίθμου ανίχνευσης νησιδοποίησης. Αποτελείται από μία συστοιχία μπαταριών (250Ah, 60V), ένα μετατροπέα DC/DC σε σειρά με έναν αντιστροφέα DC/AC συνολικής ισχύος 15kW και ένα σύστημα προσομοίωσης δικτύου αποτελούμενο από ένα γραμμικό ενισχυτή (Spitzenberger Spies) ισχύος 5kW εν σειρά με ένα ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS) για την παραγωγή του εναλλασσόμενου δικτύου και των διακυμάνσεων τάσης και συχνότητας. Ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.

2.3.3.1 Ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου

Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου της εταιρείας RTDS Technologies (RealTime Digital Simulator – RTDS) είναι μία συσκευή η οποία χρησιμοποιείται για την εκτέλεση προσομοιώσεων σχεδόν σε πραγματικό χρόνο με την επίτευξη χρονικών βημάτων προσομοίωσης της τάξης των 10μsec. Εκμεταλλεύεται την αρχιτεκτονική της παράλληλης επεξεργασίας χρησιμοποιώντας διαφορετικούς επεξεργαστές για την επίτευξη χαμηλών βημάτων προσομοίωσης. Μέσω αναλογικών και ψηφιακών εισόδων και εξόδων υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικών συσκευών με το προσομοιωμένο σύστημα στα πλαίσια μίας Hardware-in-the-Loop προσομοίωσης. Ο υπολογιστής του χρήστη συνδέεται με τον ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου και αλληλοεπιδρά μαζί του μέσω του λογισμικού RSCAD. Το λογισμικό αυτό είναι φιλικό προς τον χρήστη με πλήθος έτοιμων μοντέλων εξοπλισμού συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως σύγχρονες γεννήτριες, μετασχηματιστές, ανεμογεννήτριες, ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι κ.ά., Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης είναι της τάξης των 10μsec. Προσομοιώσεις με χρονικό βήμα της τάξης του 1-5μsec είναι επίσης δυνατές με στόχο τη δοκιμή αλγορίθμων ελέγχου μετατροπέων ισχύος. Τέλος, είναι δυνατή η λήψη μετρήσεων σε μορφή γραφικών παραστάσεων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Κατά τη διάρκεια συγγραφής της διατριβής το Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ διαθέτει ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου που αποτελείται από:

- 2 κάρτες επεξεργασίας GPC (Giga Processor Card) για την επίλυση των υπολογισμών
- 1 κάρτα επικοινωνίας WIF (Workstation InterFace Card) που είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία των καρτών επεξεργασίας και της επικοινωνίας με τον προσωπικό υπολογιστή του χρήστη
- Περιφερειακές κάρτες επικοινωνίας (αναλογικές και ψηφιακές είσοδοι και έξοδοι):
 - GTAO – Giga-Transceiver Analogue Output Card
 - GTAI – Giga-Transceiver Analogue Input Card
 - GTFPI – Gigabit Transceiver Front Panel Interface
 - GTDI – Giga-Transceiver Digital Input Card
- Λογισμικό προσομοίωσης RSCAD (version 4.009) που περιλαμβάνει βιβλιοθήκη με μοντέλα εξοπλισμού συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. γεννήτριες, μετασχηματιστές, ηλεκτρονόμοι κ.ά), περιβάλλον σχεδίασης και περιβάλλον επιτήρησης και ελέγχου των προσομοιώσεων.



Εικόνα 2.26 Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου του εργαστηρίου ΣΗΕ

2.3.3.2 Γραμμικός ενισχυτής ισχύος

Ο γραμμικός ενισχυτής ισχύος Spitzenberger & Spies PAS 5000 είναι μία συσκευή που χρησιμοποιείται στην ενίσχυση σημάτων χαμηλής τάσης και ισχύος. Η ονομαστική ισχύς του ενισχυτή είναι 5kVA με δυνατότητα λειτουργίας 4 τεταρτημορίων το οποίο σημαίνει δυνατότητα απορρόφησης και παραγωγής ισχύος. Ο ενισχυτής διαθέτει πολύ γρήγορη δυναμική απόκριση (52 V/ μ sec) με χρόνο ανόδου στην ονομαστική τάση (230 V_{rms}) μικρότερο από 5 μ sec. Το εύρος ζώνης είναι 0-15kHz και το THD σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας ισούται με 0.3%. Βασική χρήση της μονάδας είναι η σύνδεση συσκευών ισχύος π.χ. μετατροπείς ισχύος κ.α. και η λειτουργία της ως ένα ενδιάμεσο στάδιο για τη σύνδεση εξωτερικών συσκευών με τον ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου. Μέσω του γραμμικού αυτού ενισχυτή τόσο η σύνδεση συσκευών εναλλασσόμενου όσο και συνεχούς ρεύματος καθίσταται δυνατή.



Εικόνα 2.27 Ο γραμμικός ενισχυτής Spitzenberger & Spies PAS 5000

2.3.3.3 DC/DC - DC/AC μετατροπείς ισχύος

Το εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ είναι εξοπλισμένο με δύο μονάδες μετατροπών ισχύος της εταιρείας Triphase με ονομαστική ισχύ 15kVA. Κάθε μονάδα ισχύος αποτελείται από μία τριφασική γέφυρα DC/AC η οποία με κατάλληλη αλλαγή στη συνδεσμολογία και κατάλληλο έλεγχο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές εφαρμογές όπως π.χ. 3-channel DC/DC μετατροπέα, μονοφασικός AC/DC/AC ενισχυτής κ.α. Στα πειράματα της διατριβής ο ρόλος των μετατροπών αυτών καθορίζεται ως εξής: α) 3-channel DC/DC μετατροπέας με ονομαστική ισχύ

15kW, β) τριφασικός DC/AC αντιστροφέας με ονομαστική ισχύ 15kVA. Ο έλεγχος των μονάδων ισχύος πραγματοποιείται από μία ανεξάρτητη μονάδα ελέγχου (Target PC). Η μονάδα ελέγχου είναι ένας διακομιστής (server) σε λειτουργικό σύστημα Linux που αλληλοεπιδρά με το μετατροπέα, δέχεται εντολές από τον χρήστη και συλλέγει δεδομένα, όπως μετρήσεις ρεύματος και τάσης. Δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να σχεδιάσει έναν αλγόριθμο ελέγχου στο λογισμικό Matlab/Simulink και να τον "φορτώσει" στη μονάδα ελέγχου. Έτσι, συνδέεται ο υπολογιστής του χρήστη με τη μονάδα ελέγχου, ώστε να γίνεται έλεγχος του μετατροπέα από τον χρήστη. Ένα Field-Programmable Gate Array (FPGA) στέλνει τους PWM παλμούς στα διακοπτικά στοιχεία (IGBT) του μετατροπέα. Επιπλέον αναλογικοί/ψηφιακοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται για να είναι εφικτή η ανταλλαγή σημάτων με εξωτερικές συσκευές.

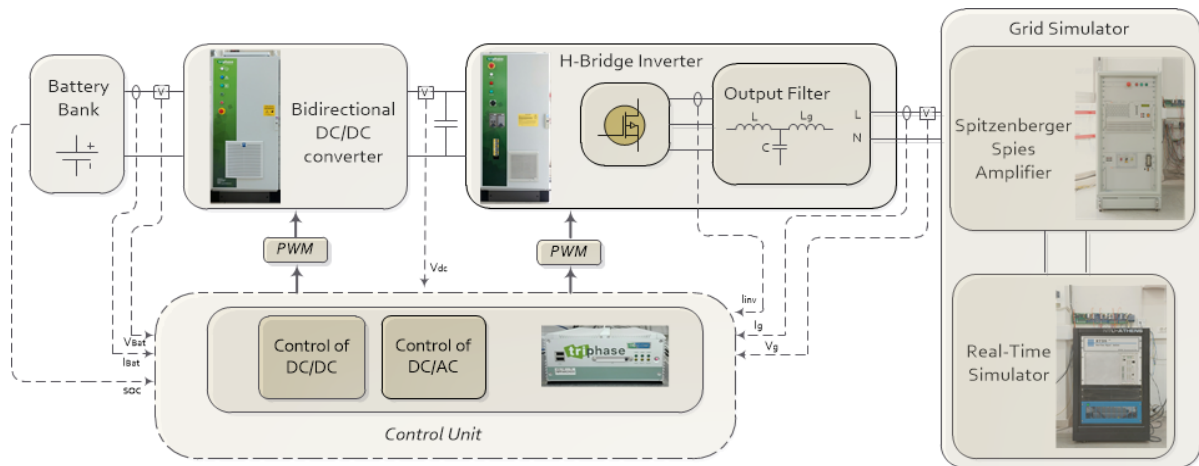


Εικόνα 2.28 Μετατροπείς ισχύος της εταιρίας Triphase

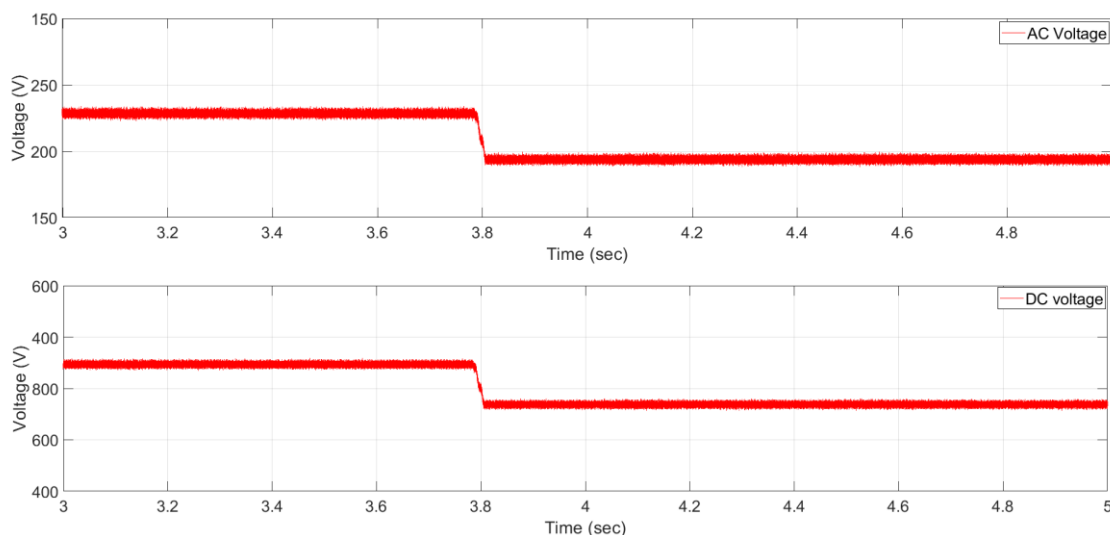


Εικόνα 2.29 Μονάδα ελέγχου (Target PC) των μετατροπέων ισχύος

Στο πείραμα που ακολουθεί, το σύστημα του γραμμικού ενισχυτή και του προσομοιωτή πραγματικού χρόνου παράγει το εναλλασσόμενο δίκτυο (230V, 50Hz) στο οποίο συνδέονται οι μπαταρίες μέσω των μετατροπέων DC/DC και DC/AC. Ο γραμμικός ενισχυτής είναι απαραίτητος για τη σύνδεση του προσομοιωτή πραγματικού χρόνου με το υπόλοιπο σύστημα καθώς πρόκειται για συσκευή που παράγει χαμηλής ισχύος σήματα ($\pm 10V$) με αποτέλεσμα η ύπαρξη ενός ενδιάμεσου σταδίου για την παραγωγή τάσης (230V, 50Hz) να είναι απαραίτητη. Ο μετατροπέας DC/DC είναι υπεύθυνος για την παραγωγή της DC τάσης ενώ ο αντιστροφέας DC/AC ρυθμίζει τη ροή ισχύος με το εναλλασσόμενο δίκτυο. Τέλος, ένας ελεγκτής (Control Unit) ελέγχει τους μετατροπείς DC/DC και DC/AC. Στον έλεγχο του μετατροπέα DC/DC περιλαμβάνεται η εξίσωση (2.3) με αποτέλεσμα η DC τάση που παράγει να εξαρτάται από τις διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας του δικτύου.



Εικόνα 2.30 Πειραματική διάταξη για τη δοκιμή του αλγόριθμου ανίχνευσης νησιδοποίησης



Εικόνα 2.31 Μεταβολές μέτρου εναλλασσόμενης τάσης και επίδραση στη ρύθμιση συνεχούς τάσης από τον DC/DC μετατροπέα

Ενδεικτικά, στην Εικόνα 2.31 παρατηρούμε την επίδραση που έχει μια μεταβολή του μέτρου της εναλλασσόμενης τάσης στη ρύθμιση της συνεχούς τάσης. Μια μεταβολή από 230V σε 190V οδηγεί σε βύθιση της DC τάσης κατά 12% (650V σε 570V) με συνέπεια τον εντοπισμό του γεγονότος από τους DC ηλεκτρονόμους.

2.4 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν τα 3 επίπεδα του ιεραρχικού ελέγχου για εφαρμογή σε τοπολογίες DC μικροδικτύων. Το πρώτο επίπεδο αποτελεί τον πρωτογενή έλεγχο και διαθέτει την ταχύτερη απόκριση βασιζόμενος σε τοπικές μετρήσεις δίχως την ανάγκη επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων με στόχο τη σταθεροποίηση του συστήματος κατά τις πρώτες χρονικές περιόδους έπειτα από μία διαταραχή στο ισοζύγιο ισχύος. Το δεύτερο επίπεδο του ιεραρχικού ελέγχου είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση της τάσης και η λειτουργία του μπορεί να βασίζεται στον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου ή να εκτελείται αποκεντρωμένα από τους τοπικούς ελεγκτές των μονάδων που συμμετέχουν στο μικροδίκτυο. Ο δευτερογενής έλεγχος διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: α) κεντρικός, β) αποκεντρωμένος. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος με τη σειρά του χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες ανάλογα με την ύπαρξη ή μη επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων. Τέλος, ο τριτογενής έλεγχος σχετίζεται με την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου διανομής και είναι υπεύθυνος για ζητήματα που αφορούν τη βέλτιστα οικονομική λειτουργία του μικροδικτύου λαμβάνοντας υπόψιν το κόστος παραγωγής των μονάδων και τις τιμές στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπροσθέτως, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν οι βασικές τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης για εφαρμογή σε τοπολογίες DC μικροδικτύων. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν οι παρακάτω αλγόριθμοι:

- Αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω διαταραχής ρεύματος εξόδου σε Φ/B μετατροπείς.
- Αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω θετικής ανάδρασης στο σύστημα ελέγχου του DC/DC μετατροπέα.
- Αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης βασιζόμενος στην ύπαρξη μεταβολών τάσης και συχνότητας στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στα πλαίσια της διατριβής, ο αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης βασιζόμενος στην ύπαρξη μεταβολών τάσης και συχνότητας στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος μελετήθηκε μέσω της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ. Η πειραματική διάταξη για τη δοκιμή του αλγορίθμου ανίχνευσης νησιδοποίησης αποτελούνταν από μία συστοιχία μπαταριών, ένα μετατροπέα DC/DC σε σειρά με έναν αντιστροφέα DC/AC και ένα σύστημα προσομοίωσης δικτύου αποτελούμενο από ένα γραμμικό ενισχυτή και ένα ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου. Με την εκτέλεση του πειράματος παρατηρήσαμε την επίδραση που έχει μια

μεταβολή του μέτρου της εναλλασσόμενης τάσης στη ρύθμιση της συνεχούς τάσης. Μια μεταβολή από 230V σε 190V οδήγησε σε βύθιση της DC τάσης κατά 12% (650V σε 570V) με συνέπεια τον εντοπισμό του γεγονότος από τους DC ηλεκτρονόμους.

Συμπερασματικά, στο Κεφάλαιο 2 αναφέρουμε το μικρό αριθμό μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης που έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογή σε τοπολογίες DC μικροδικτύων και την ανάγκη ύπαρξης περαιτέρω έρευνας στο συγκεκριμένο τομέα. Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύσσεται μία πρωτότυπη μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης.

Κεφάλαιο 3

Ανίχνευση νησιδοποίησης και ομαλή μετάβαση μεταξύ διασυνδεδεμένης και απομονωμένης λειτουργίας στα DC μικροδίκτυα

3.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο ασχολείται με την ομαλή μετάβαση μεταξύ διασυνδεδεμένης και απομονωμένης λειτουργίας ενός DC μικροδικτύου. Δύο σημαντικά ζητήματα ελέγχου που σχετίζονται με τη μετάβαση μεταξύ αυτών των δύο καταστάσεων είναι:

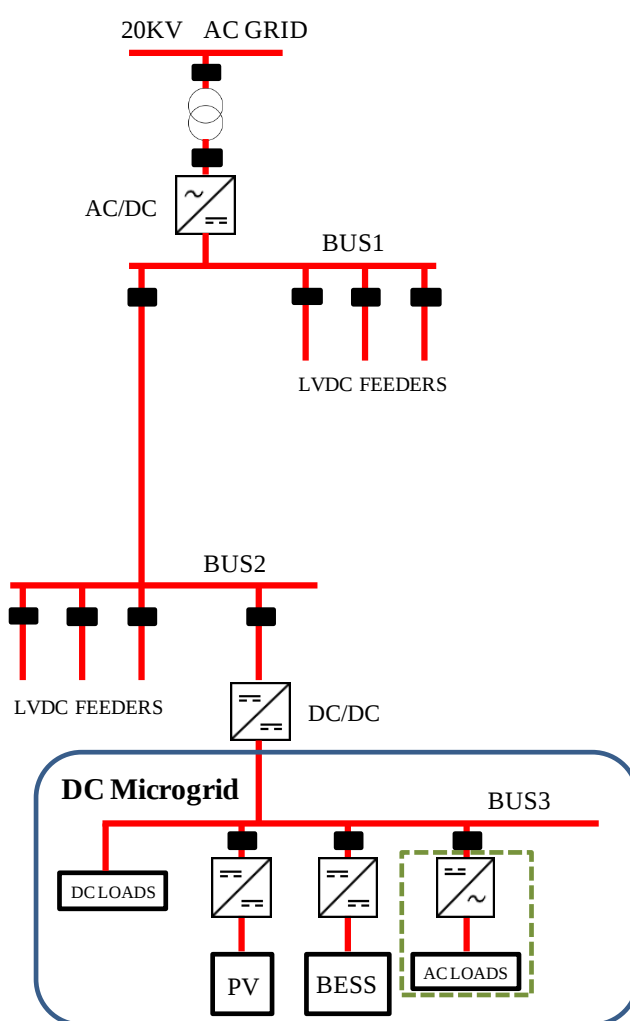
- Μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης (Islanding Detection Method - IDM): Περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες ενέργειες για τον εντοπισμό της μη σκόπιμης αποσύνδεσης από το κεντρικό δίκτυο.
- Ομαλή μετάβαση από απομονωμένη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία χωρίς διακοπή λειτουργίας των κρίσιμων φορτίων του μικροδικτύου.

Λίγες δημοσιεύσεις μέχρι σήμερα, αντιμετωπίζουν τα ζητήματα της ανίχνευσης νησιδοποίησης και της ομαλής μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων σε μία δομή ενός DC μικροδικτύου. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης που συναντώνται στη βιβλιογραφία.

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνεται μια στρατηγική μετάβασης μεταξύ διασυνδεδεμένης και απομονωμένης λειτουργίας (και αντίστροφα) ενός DC μικροδικτύου. Εξετάζονται όλα τα στάδια π.χ. μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης, έλεγχος μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης, μετάβαση από απομονωμένη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία κλπ. Προτείνεται μια νέα μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης έχοντας ως βάση την εισαγωγή ενός ελεγχόμενου φορτίου παράλληλα με τον κεντρικό διακόπτη του μικροδικτύου. Αυτή η τεχνική είναι ικανή να παρέχει γρήγορη ανίχνευση της νησιδοποίησης οδηγώντας έτσι σε ένα ομαλό προφίλ τάσης κατά τη μετάβαση, με αποτέλεσμα τη μη διακοπή λειτουργίας των κρίσιμων φορτίων. Αυτή η τεχνική, μπορεί να εφαρμοστεί και σε τοπολογίες μικροδικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος [62]. Η ομαλή μετάβαση από απομονωμένη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία επιτυγχάνεται με έναν PI ελεγκτή (Proportional - Integral Controller) ενσωματωμένο στον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου, στέλνοντας την κατάλληλη τιμή αναφοράς στη μονάδα παραγωγής της τάσης (μπαταρίες) προκειμένου να μειωθεί η διαφορά μεταξύ του DC μικροδικτύου και του LVDC δικτύου διανομής.

3.2 Μοντελοποίηση επιμέρους στοιχείων μικροδικτύου

Η τοπολογία ενός τυπικού LVDC δικτύου διανομής παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1. Το LVDC δίκτυο διασυνδέεται με το σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός μετατροπέα πηγής τάσης αμέσως μετά τον μετασχηματιστή MT/XT. Ένας αριθμός μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης ομαδοποιούνται μεταξύ τους σχηματίζοντας δομές DC μικροδικτύων και εμφανίζονται στο κεντρικό δίκτυο ως μία ενιαία οντότητα. Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει την ομαλή μετάβαση μεταξύ διασυνδεδεμένης και απομονωμένης λειτουργίας ενός DC μικροδικτύου που λειτουργεί στα 380V και περιλαμβάνει φωτοβολταϊκή παραγωγή, μπαταρίες και ελεγχόμενα φορτία.



Εικόνα 3.1 Τυπική δομή ενός DC δικτύου διανομής.

3.2.1 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκού και DC/DC μετατροπέα

Ένα απλό φωτοβολταϊκό στοιχείο αναπαρίσταται από μία ιδανική πηγή ρεύματος παράλληλα συνδεδεμένη με μία ιδανική δίοδο. Οι δύο παράμετροι που

χρησιμοποιούνται στο μοντέλο και χαρακτηρίζουν το Φ/Β στοιχείο είναι η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} και το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} . Η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι η μέγιστη τάση που μπορεί το στοιχείο να αποδώσει για μηδενικό ρεύμα, ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι το μέγιστο ρεύμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου όταν η τάση του είναι μηδενική.

Το ρεύμα εξόδου μπορεί να βρεθεί από την εξίσωση:

$$I = I_{pv} - I_d \quad (3.1)$$

Το I_{pv} είναι το φωτορρέυμα, η ένταση του οποίου εξαρτάται από την απορροφούμενη ηλιακή ισχύ, ενώ I_d είναι το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο το οποίο υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_d = I_0 * \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Όπου I_0 είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

$q = 1.602 \cdot 10^{-23} \text{ C}$ το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου

V_d η τάση της διόδου

$k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ η σταθερά Boltzmann

T η θερμοκρασία επαφής σε Kelvin

Το παραπάνω ιδανικό ισοδύναμο κύκλωμα αποτυγχάνει να περιγράψει με ακρίβεια την έξοδο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος γιατί αγνοεί τα παρακάτω στοιχεία:

- Την αντίσταση σειράς R_s , η οποία μοντελοποιεί το σύνολο των ωμικών αντιστάσεων που συναντά το ρεύμα καθώς διαρρέει τον ημιαγωγό, τους αγωγούς, τις επαφές καθώς και το σύστημα επιστροφής. Εδώ λαμβάνονται επίσης υπόψη οι απώλειες λόγω της σύνδεσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά.
- Την παράλληλη αντίσταση R_p , η τιμή της οποίας επηρεάζεται από τον ρυθμό επανασύνδεσης των οπών - ηλεκτρονίων στην περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος και στην επιφάνεια που δέχεται την ακτινοβολία.

Η εξίσωση που περιγράφει το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού φαίνεται ακολούθως:

$$I = I_{pv} - I_0 * \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{akT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (3.3)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το φωτορρέυμα I_{pv} μεταβάλλεται για διαφορετικές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{pv} = [I_{sc} * \frac{R_s + R_p}{R_p} + K_I(T - T_n)] * \frac{G}{G_n} \quad (3.4)$$

Ο υπολογισμός του ανάστροφου ρεύματος κόρου της διόδου υπολογίζεται από τη σχέση που φαίνεται ακολούθως:

$$I_0 = \frac{K_I(T - T_n) + I_{sc}}{e^{\frac{K_V(T - T_n) + V_{oc}}{a N_s V_t}} - 1} \quad (3.5)$$

όπου I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης στη θερμοκρασία και ακτινοβολία αναφοράς

R_s η αντίσταση σειράς

R_p η παράλληλη αντίσταση

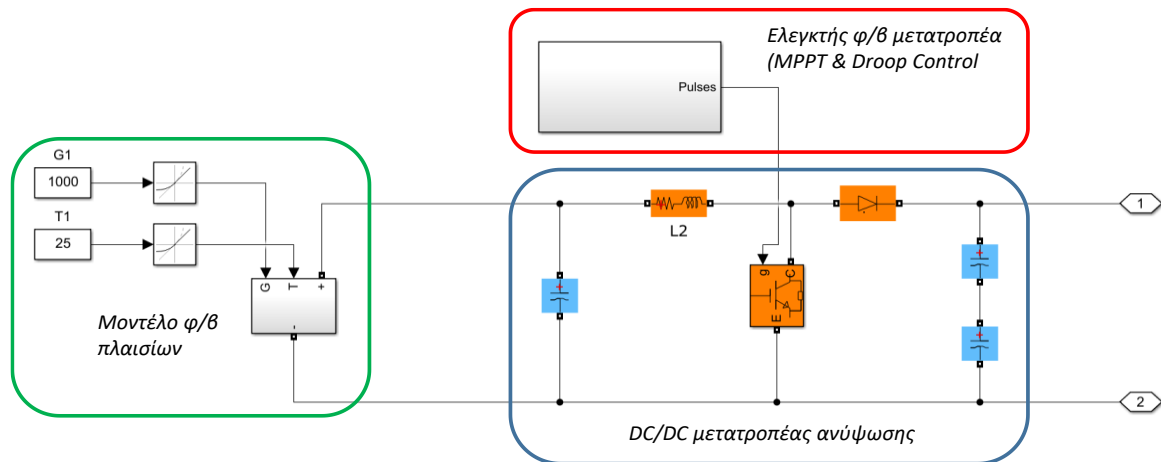
K_I ο θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης

T η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου

T_n η θερμοκρασία αναφοράς (κατά κανόνα 25 °C)

G η ηλιακή ακτινοβολία

G_n η ηλιακή ακτινοβολία αναφοράς (κατά κανόνα 1000 W/m²)

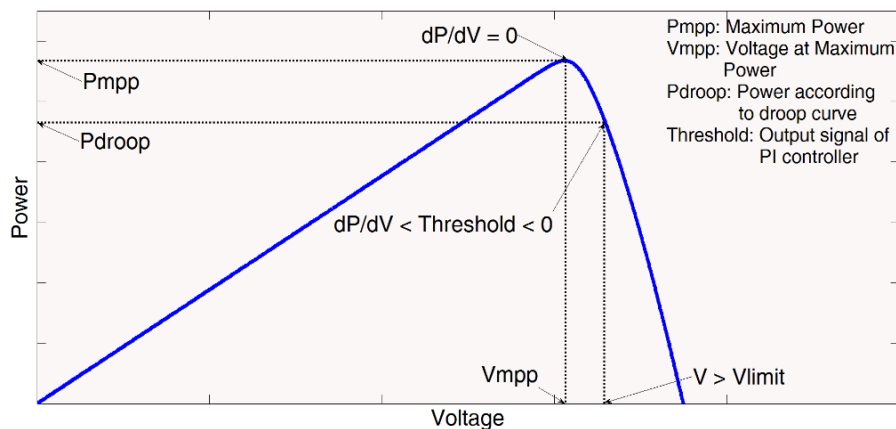


Εικόνα 3.2 Διάγραμμα φωτοβολταϊκού και DC/DC μετατροπέα

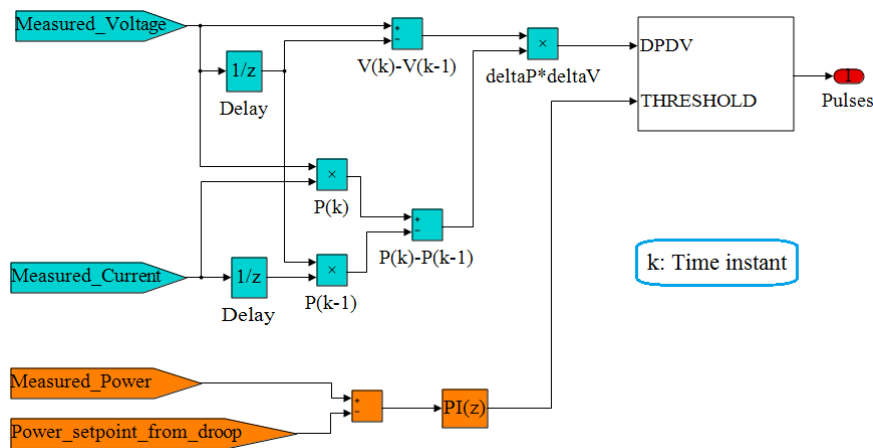
Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται το μοντέλο του φωτοβολταϊκού μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις. Πρόκειται για έναν μετατροπέα ονομαστικής ισχύος 1kW με παραμέτρους που προκύπτουν από τη διαστασιολόγηση για τη δεδομένη ονομαστική ισχύ. Ο πυκνωτής εισόδου ορίστηκε ως $C_{in}=10\mu F$, η αγωγιμότητα του πηνίου ορίστηκε ως $L = 0.005H$ και η χωρητικότητα εξόδου του πυκνωτή ως $C_{out} = 150\mu F$.

Ο DC/DC μετατροπέας των φωτοβολταϊκών λειτουργεί σύμφωνα με μια καμπύλη στατισμού "Ενεργού ισχύος - Τάσης", δηλαδή όταν η τάση εξόδου είναι κάτω από μια καθορισμένη τιμή (V_{limit}), τα φωτοβολταϊκά παρέχουν τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ,

διαφορετικά η ισχύς εξόδου περιορίζεται από την καμπύλη στατισμού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3, η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς επιτυγχάνεται όταν ο όρος dP/dV είναι πολύ κοντά στο μηδέν. Όταν ενεργοποιηθεί η καμπύλη στατισμού, το κατώφλι του όρου καθορίζεται από έναν PI ελεγκτή που ρυθμίζει την ισχύ εξόδου σύμφωνα με την επιθυμητή τιμή της καμπύλης στατισμού. Το σήμα εισόδου του PI ελεγκτή είναι η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης ισχύος και της τιμής ισχύος που λαμβάνεται από την καμπύλη στατισμού, ενώ η έξοδος είναι το νέο κατώφλι του όρου dP/dV . Η υλοποίηση του MPPT αλγορίθμου σε συνδυασμό με την καμπύλη στατισμού παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.3 Καμπύλη Ενεργού Ισχύος – Τάσης του φωτοβολταϊκού συστήματος με ενσωμάτωση της καμπύλης στατισμού.

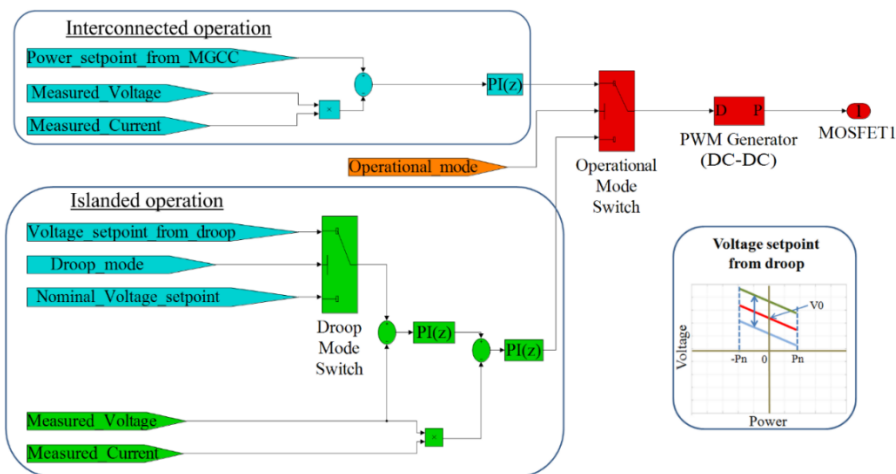


Εικόνα 3.4 Διάγραμμα ελέγχου του φωτοβολταϊκού DC/DC μετατροπέα

3.2.2 Μοντελοποίηση μπαταριών και DC/DC μετατροπέα

Το μοντέλο μπαταριών που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση αυτού του κεφαλαίου ήταν τεχνολογίας μολύβδου - οξέος, ονομαστικής τάσης 96V και χωρητικότητας 440Ah. Ο υπολογισμός της στάθμης φόρτισης (State-of-Charge - SoC) έγινε με χρήση της "Coulomb Counting" μεθόδου.

Ο μετατροπέας DC/DC των μπαταριών είναι ένας κλασικός μετατροπέας buck/boost με δύο MOSFETs για αμφίδρομη λειτουργία [65]. Αυτή η δομή ελέγχου επιτρέπει τη λειτουργία τόσο σε διασυνδεδεμένη όσο και σε απομονωμένη λειτουργία. Συγκεκριμένα, σε διασυνδεδεμένη λειτουργία, ο αμφίδρομος μετατροπέας ρυθμίζει την ισχύ εξόδου σύμφωνα με μια δεδομένη τιμή αναφοράς (P_0), ενώ σε απομονωμένη λειτουργία υπάρχουν δύο διαθέσιμες επιλογές. Στην πρώτη επιλογή, η μπαταρία, ως μονάδα σχηματισμού της DC τάσης, ρυθμίζει την τάση εξόδου στην ονομαστική τιμή. Στη δεύτερη επιλογή, η τάση εξόδου καθορίζεται από την καμπύλη στατισμού (Τάση εξόδου - Ισχύ). Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της ρύθμισης τάσης, ο κεντρικός ελεγκτής στέλνει στο μετατροπέα μπαταρίας ένα κατάλληλο σήμα (V_0) το οποίο μετακινεί την καμπύλη στατισμού πάνω ή κάτω, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5.

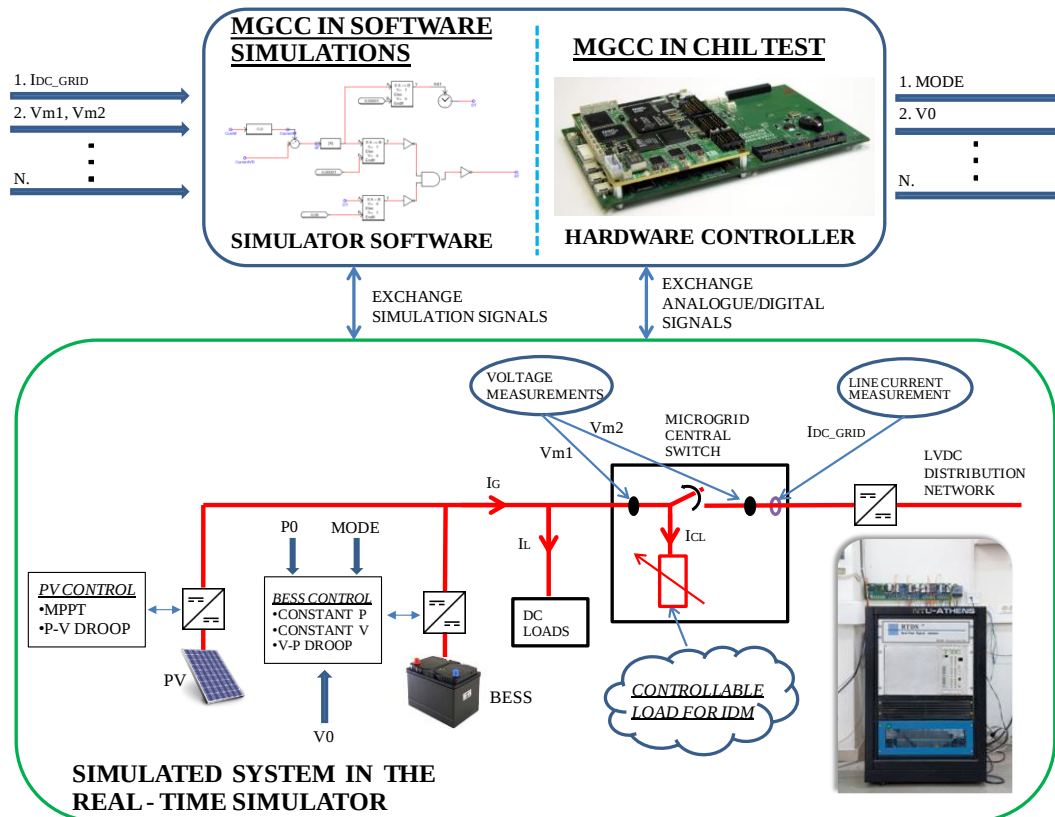


Εικόνα 3.5 Διάγραμμα ελέγχου του DC/DC μετατροπέα μπαταριών (αντίστοιχα για MOSFET2).

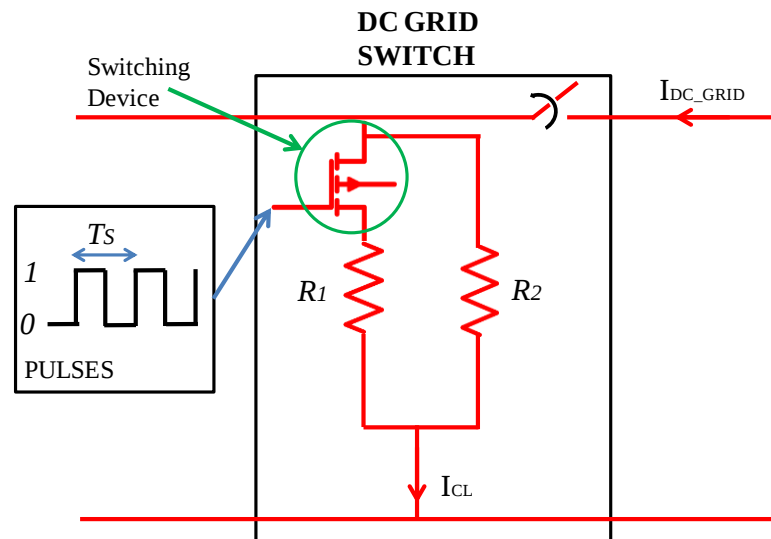
3.3 Ανάλυση της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου

Η προτεινόμενη μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης βασίζεται στην εισαγωγή ενός ελεγχόμενου φορτίου, συνδεδεμένου παράλληλα με τον κεντρικό διακόπτη του μικροδικτύου, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.6. Γενικά, οποιαδήποτε αναντιστοιχία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης σε ένα διασυνδεδεμένο μικροδίκτυο, καλύπτεται από το κεντρικό δίκτυο. Ως αποτέλεσμα, μία μη ελεγχόμενη νησιδοποίηση μπορεί εύκολα να εντοπιστεί με μέτρηση του ρεύματος στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο διανομής (το ρεύμα θα γίνει μηδέν). Ωστόσο, σε περίπτωση που η παραγωγή είναι πολύ κοντά στην κατανάλωση, το ρεύμα μέσω του κεντρικού διακόπτη είναι σχεδόν μηδενικό και η ανίχνευση της νησιδοποίησης είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εισαγωγή ενός ελεγχόμενου φορτίου που αλλάζει περιοδικά την τρέχουσα ισορροπία. Το ελεγχόμενο φορτίο μπορεί να είναι κάτι απλό, όπως μια δομή δύο παράλληλων αντιστάσεων (R_1 , R_2) που αλλάζουν σύμφωνα με ένα δεδομένο μοτίβο (όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7)

ή μια πιο περίπλοκη δομή, όπως ένα πλήρως προγραμματιζόμενο ηλεκτρονικό φορτίο. Η πρώτη προσέγγιση είναι μια εύκολα εφαρμόσιμη λύση χαμηλού κόστους.



Εικόνα 3.6 Τοπολογία του DC μικροδικτύου



Εικόνα 3.7 Τοπολογία του κεντρικού διακόπτη του μικροδικτύου σε συνδυασμό με το ελεγχόμενο φορτίο

Η ακόλουθη ανάλυση παρουσιάζει τη γενική ιδέα της προτεινόμενης μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης.

i. DC Μικροδίκτυο δίχως το ελεγχόμενο φορτίο:

- Αν η παραγωγή δεν είναι ίση με την κατανάλωση τότε

$$I_G \neq I_L \Rightarrow |I_{DC_GRID}| = |I_G - I_L| \neq 0 \quad (3.6)$$

όπου I_G : ρεύμα παραγωγής, I_L : ρεύμα κατανάλωσης, I_{DC_GRID} : ρεύμα DC δικτύου διανομής.

Μέσω της μέτρησης του ρεύματος I_{DC_GRID} μπορούμε να ανιχνεύσουμε τη νησιδοποίηση όταν το ρεύμα γίνει μηδέν.

- Αν η παραγωγή είναι ίση (ή σχεδόν ίση) με την κατανάλωση, τότε:

$$I_G \cong I_L \Rightarrow |I_{DC_GRID}| \cong 0 \quad (3.7)$$

Μέσω της μέτρησης του ρεύματος I_{DC_GRID} δε μπορούμε να ανιχνεύσουμε τη νησιδοποίηση.

Τοποθετώντας το ελεγχόμενο φορτίο παράλληλα με τον κεντρικό διακόπτη:

ii. DC Μικροδίκτυο με το ελεγχόμενο φορτίο:

- Αν η παραγωγή είναι ίση (ή σχεδόν ίση) με την κατανάλωση, τότε:

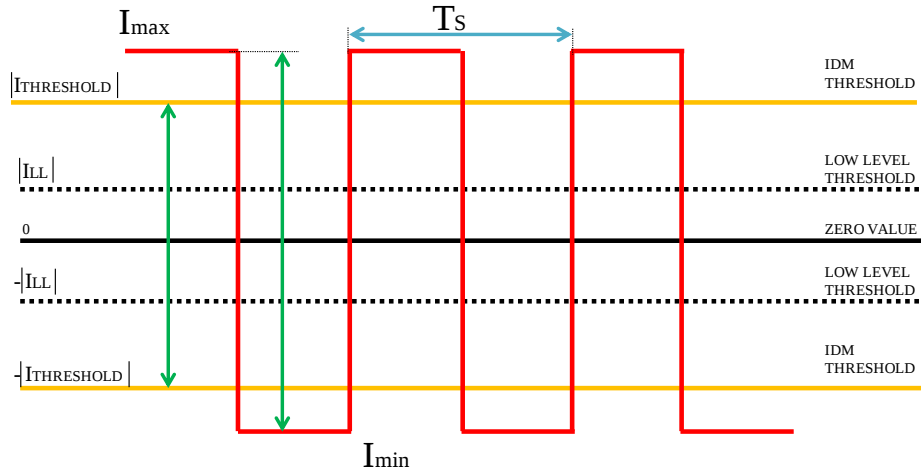
$$I_G \cong I_L \Rightarrow |I_{DC_GRID}| \cong |I_{CL}| \neq 0 \quad (3.8)$$

όπου I_{CL} : ρεύμα ελεγχόμενου φορτίου.

Μέσω της μέτρησης του ρεύματος I_{DC_GRID} μπορούμε να ανιχνεύσουμε τη νησιδοποίηση ακόμα και στην περίπτωση όπου η παραγωγή είναι ίση με την κατανάλωση.

Όταν το ρεύμα I_{DC_GRID} παραμένει κάτω από ένα καθορισμένο κατώτατο όριο (πολύ κοντά στο μηδέν) για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (συνήθως 0,2sec), βεβαιώνεται η ύπαρξη νησιδοποίησης στο δίκτυο και ανοίγει ο κεντρικός διακόπτης του μικροδικτύου. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι χαρακτηριστικές παράμετροι του μοτίβου με το οποίο αλλάζει το μεταβλητό αυτό φορτίο (π.χ. μορφή, διάρκεια, τιμές αντιστάσεων $R1$ και $R2$ κ.λπ.) επηρεάζουν την ευαισθησία και την ακρίβεια της μεθόδου, καθώς και τις συνολικές απώλειες στο σύστημα και συνεπώς η σχεδίαση χρήζει ιδιαίτερης προσοχής.

Οι παράμετροι του ελεγχόμενου φορτίου εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού μέτρησης ρεύματος, όπως η ακρίβεια στις χαμηλές τιμές ρεύματος, το εύρος ζώνης των μετρήσεων κ.λπ. Η αποτελεσματική επιλογή των $R1$ και $R2$ εξηγείται χρησιμοποιώντας την Εικόνα 3.8 και την ανάλυση που ακολουθεί.



Εικόνα 3.8 Ανάλυση για τη σχεδίαση του ελεγχόμενου φορτίου

- I_{LL} είναι η χαμηλότερη τιμή που το μετρητικό σύστημα μπορεί να μετρήσει με επαρκή ακρίβεια.
- $I_{THRESHOLD}$ είναι το όριο που ορίζεται στην προτεινόμενη μέθοδο. Είναι πάντοτε μεγαλύτερο από το όριο I_{LL} . Αν το ρεύμα I_{DC_GRID} είναι χαμηλότερο από αυτή την τιμή για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (π.χ. 0,2sec) τότε η μέθοδος ανιχνεύει τη νησιδοποίηση.
- I_{min} είναι το ρεύμα που ρέει στην αντίσταση $R2$ όταν το διακοπτικό στοιχείο είναι ανοικτό (ON).
- I_{max} είναι το συνολικό ρεύμα των αντιστάσεων όταν το διακοπτικό στοιχείο είναι κλειστό (OFF), $(R1//R2)$.
- T_s είναι η χρονική περίοδος των αλλαγών στις αντιστάσεις.

Προκειμένου να έχουμε επιτυχή ανίχνευση της νησιδοποίησης, η ελάχιστη διαφορά μεταξύ I_{max} και I_{min} πρέπει να είναι μεγαλύτερη από δύο φορές την τιμή $I_{THRESHOLD}$. Με άλλα λόγια, για την επιτυχή ανίχνευση, η ακόλουθη ανισότητα πρέπει να είναι "ΑΛΗΘΗΣ" κατά την επιλογή του ελεγχόμενου φορτίου.

$$|I_{max} - I_{min}| > 2 * |I_{THRESHOLD}| \Rightarrow \left| \frac{V_{DC_LOW}}{R_1//R_2} - \frac{V_{DC_LOW}}{R_2} \right| > 2 * |I_{THRESHOLD}| \quad (3.9)$$

όπου V_{DC_LOW} : η ελάχιστη τάση λειτουργίας του DC δικτύου διανομής.

Από την παραπάνω εξίσωση βλέπουμε ότι η ελάχιστη διαφορά μεταξύ I_{max} και I_{min} πρέπει να υπολογιστεί ως προς την ελάχιστη τάση του δικτύου V_{DC_LOW} . Από αυτή την ανισότητα εξάγουμε μια σχέση μεταξύ των αντιστάσεων $R1$ και $R2$. Το χρονικό βήμα (T_s) για τις μεταβολές του παράλληλου φορτίου εξαρτάται από την επιθυμητή απόκριση της μεθόδου ανίχνευσης. Σε αυτά τα σενάρια επιλέγεται η χρονική περίοδος των αλλαγών ίση με 0.05sec. Το ρεύμα δύναται να μετρηθεί από ένα μετρητικό ρεύματος (π.χ. συσκευή LEM).

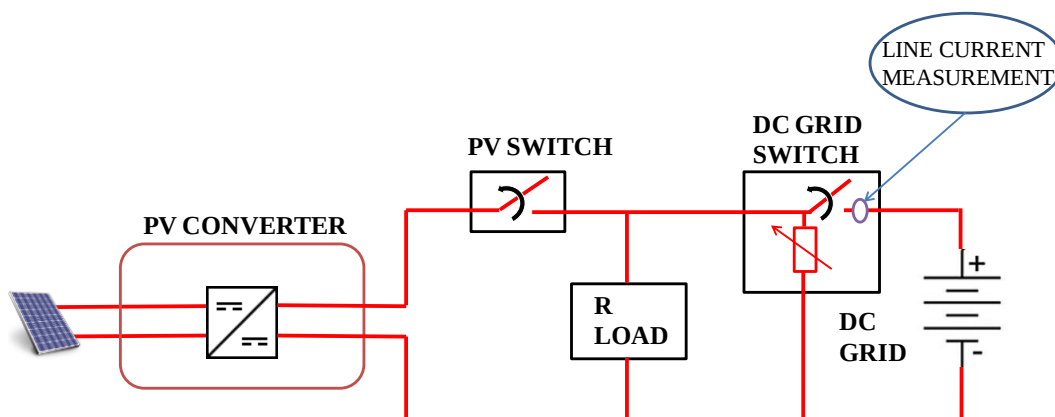
Τα πρότυπα IEEE 1547 και UL1741 παρέχουν προδιαγραφές για το πόσο γρήγορα απαιτείται η αποσύνδεση των φωτοβολταϊκών μετατροπέων από το δίκτυο ηλεκτροδότησης, σε περίπτωση νησιδοποίησης, προκειμένου να ικανοποιηθούν όλα τα ζητήματα ασφαλείας. Το χρονικό αυτό διάστημα έχει οριστεί σε 2sec [66], [67]. Στην αναφορά [67] παρουσιάζεται μια τροποποιημένη έκδοση της τοπολογίας που παρουσιάζεται σε αυτά τα πρότυπα με στόχο την ανίχνευση νησιδοποίησης σε δίκτυα συνεχούς ρεύματος.

3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

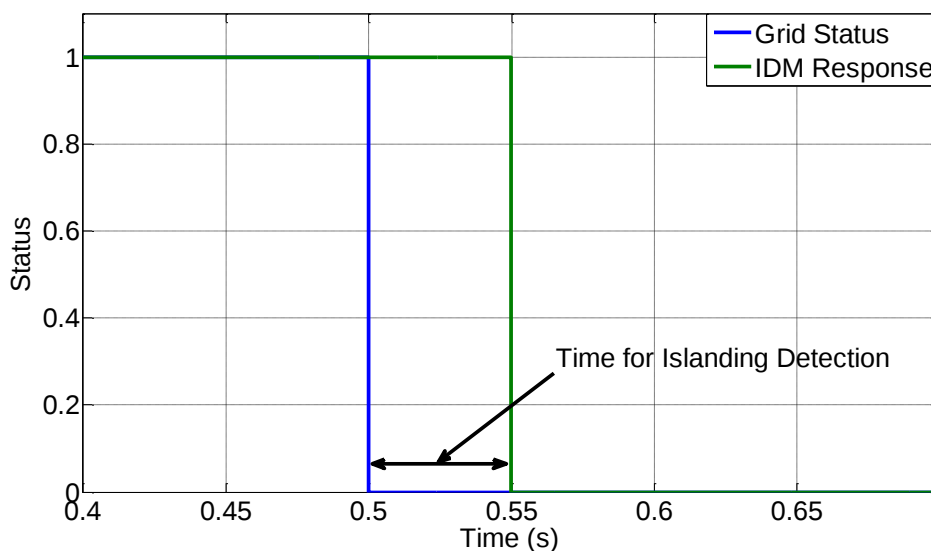
Δύο σενάρια προσομοίωσης εξετάζονται παρακάτω. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται η επίδοση της προτεινόμενης μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης με βάση παραλλαγή των προτύπων IEEE 1547 και UL1741, ενώ στη δεύτερη μελετάται η συνολική στρατηγική ελέγχου του DC μικροδικτύου όπως αυτό εμφανίζεται στην Εικόνα 3.6.

3.4.1 Εφαρμογή της μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης με βάση παραλλαγή των προτύπων IEEE 1547 και UL1741

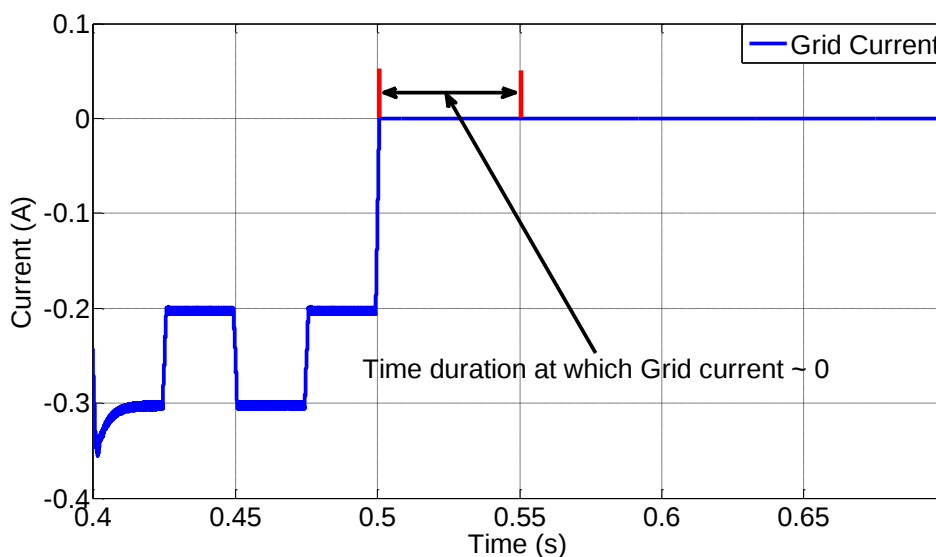
Στην Εικόνα 3.9 παρουσιάζεται η τοπολογία που χρησιμοποιείται για τη δοκιμή της προτεινόμενης μεθόδου IDM με βάση παραλλαγή των προτύπων IEEE 1547 και UL1741. Το δυσκολότερο σενάριο που θα μπορούσαμε να μελετήσουμε είναι αυτό της ίσης παραγωγής και κατανάλωσης και τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 3.10 και Εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.9 Τοπολογία συστήματος για τη μελέτη της IDM μεθόδου με βάση παραλλαγή των προτύπων IEEE 1547 και UL1741



Εικόνα 3.10 Απόκριση της προτεινόμενης μεθόδου στη νησιδοποίηση.



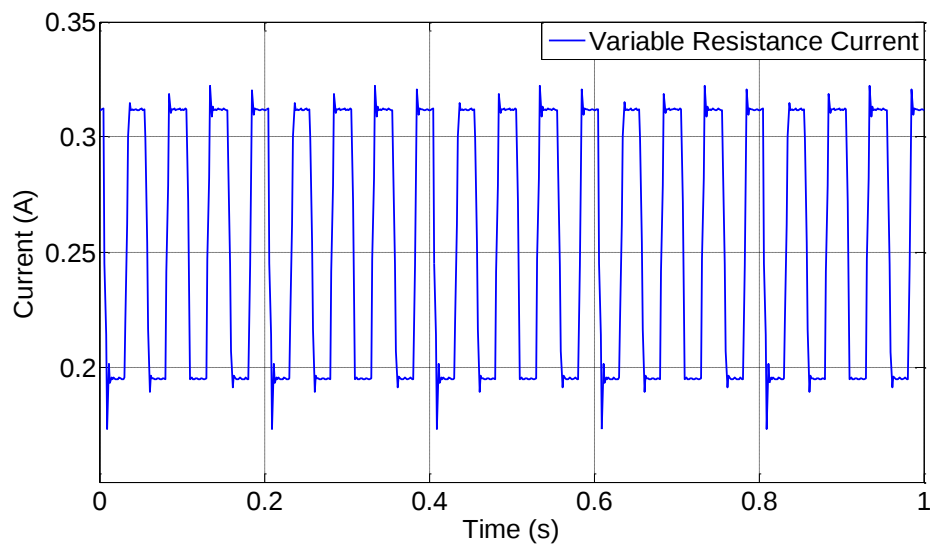
Εικόνα 3.11 Ρεύμα δικτύου στον κεντρικό διακόπτη.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10, η μέθοδος ήταν σε θέση να ανιχνεύσει τη νησιδοποίηση μετά από 0.05sec, χρόνος που είναι καθορισμένος εξαρχής από το χρήστη. Με άλλα λόγια, μετά από 0.05sec όπου το ρεύμα δικτύου παρέμεινε κάτω από 0.01A ($I_{THRESHOLD}$), η μέθοδος ανίχνευσε το γεγονός και άνοιξε τον κεντρικό διακόπτη. Το ρεύμα του ελεγχόμενου φορτίου άλλαξε από 0.2A σε 0.3A. Η επίδραση στο ρεύμα δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.11.

3.4.2 Εφαρμογή της μεθόδου σε δομή ενός DC μικροδικτύου

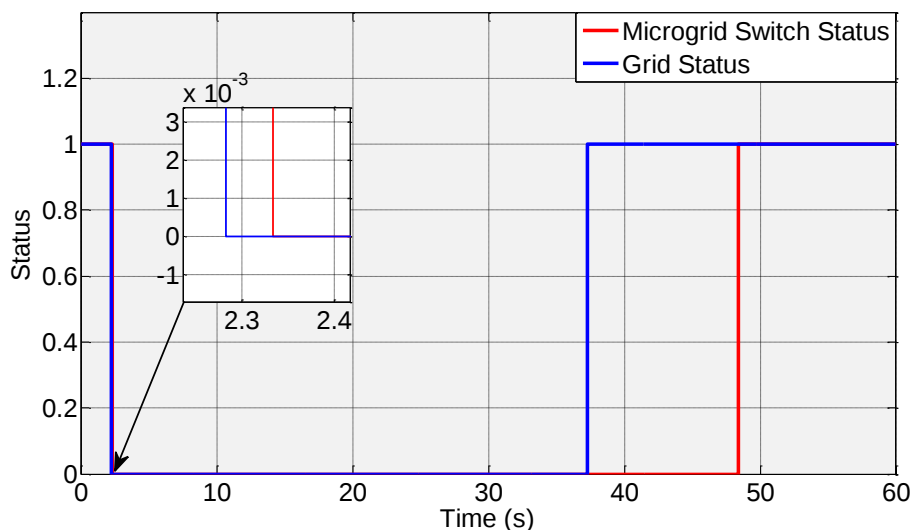
Σε αυτή την ενότητα, εξετάζεται το μικροδίκτυο της Εικόνα 3.6. Στην προσομοίωση το δίκτυο διανομής αποσυνδέεται στα 2.2sec και παραμένει αποσυνδεδεμένο μέχρι τα

48.2sec. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.12 έως και την Εικόνα 3.18.



Εικόνα 3.12 Ρεύμα παράλληλου ελεγχόμενου φορτίου

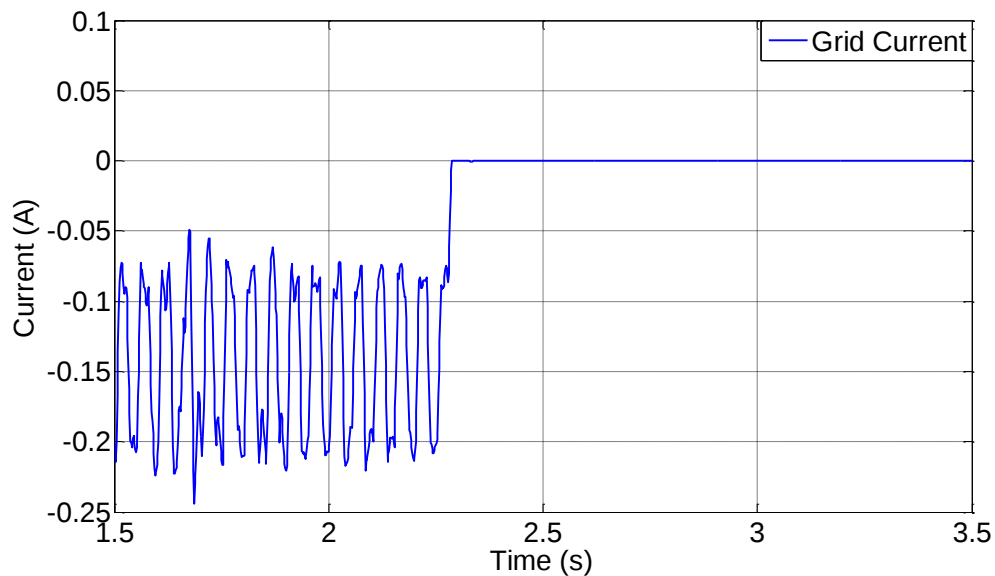
Η Εικόνα 3.12 δείχνει τη ροή ρεύματος στο ελεγχόμενο φορτίο. Μια αλλαγή του ρεύματος κατά 0.1A επαρκεί για την επιτυχή ανίχνευση της νησιδοποίησης. Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται η κατάσταση τόσο του δικτύου όσο και του κεντρικού διακόπτη. Η προτεινόμενη μέθοδος IDM ανιχνεύει τη νησιδοποίηση μετά από 0.05sec, ενώ η διασύνδεση με το δίκτυο διανομής έχει μια πολύ πιο αργή απόκριση περίπου 10sec, καθώς δεν υπάρχουν ζητήματα ασφάλειας και προστασίας που απαιτούν γρήγορη σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο.



Εικόνα 3.13 Κατάσταση δικτύου και κεντρικού διακόπτη

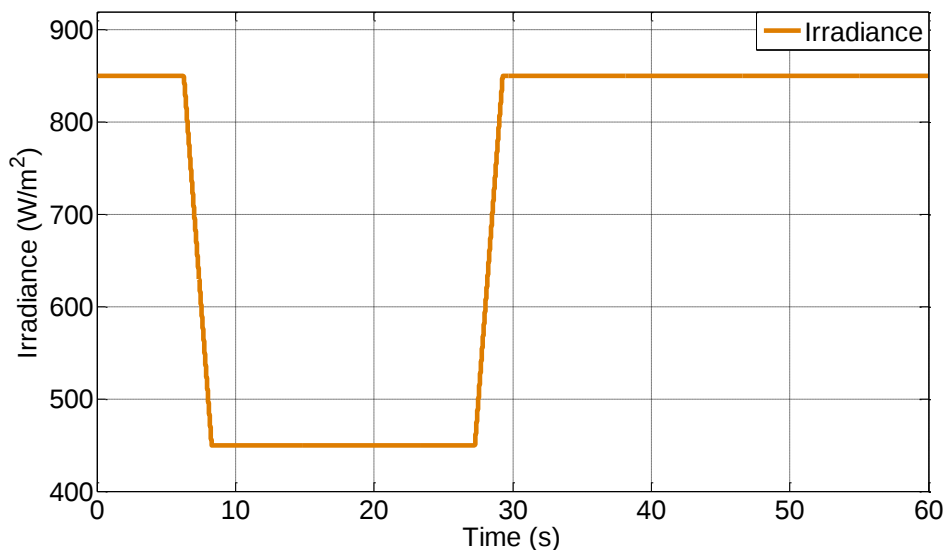
Στο σενάριο που προσομοιώθηκε, η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου κατά τη στιγμή της αποσύνδεσης είναι σχεδόν μηδενική. Ένα μικρό

ρεύμα ρέει μεταξύ των δύο συστημάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.14. Η διαταραχή που εισάγεται από το ελεγχόμενο μεταβλητό φορτίο είναι ορατή μέχρι τα 2.2sec όπου έχουμε την αποσύνδεση του κεντρικού δικτύου. Μετά από 0.05sec, η προτεινόμενη μέθοδος ανιχνεύει την κατάσταση νησιδοποίησης.

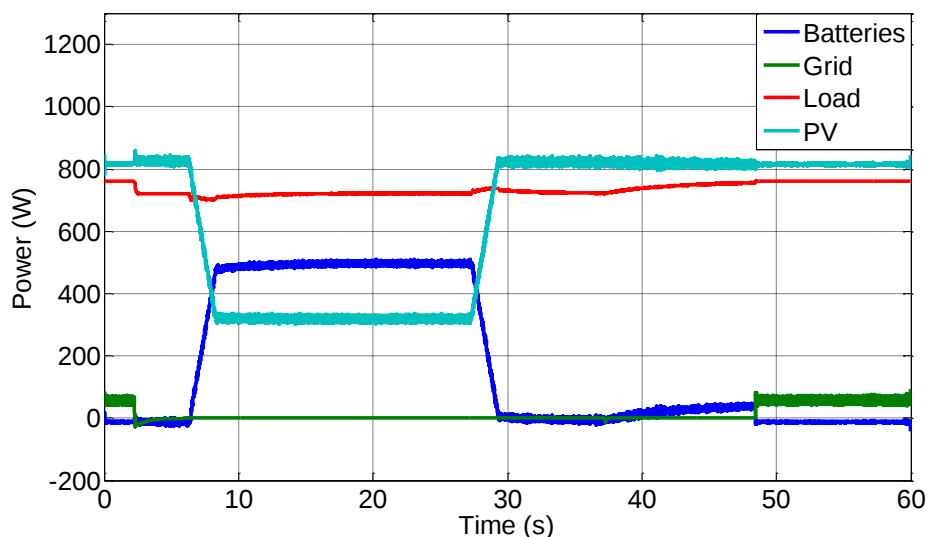


Εικόνα 3.14 Ρεύμα μεταξύ μικροδικτύου και κεντρικού δικτύου διανομής

Από τη χρονική στιγμή 6.2sec έως 29.2sec, δημιουργείται μία διαταραχή στο ισοζύγιο ισχύος λόγω μείωσης της φωτοβολταϊκής παραγωγής όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.15 και Εικόνα 3.16.

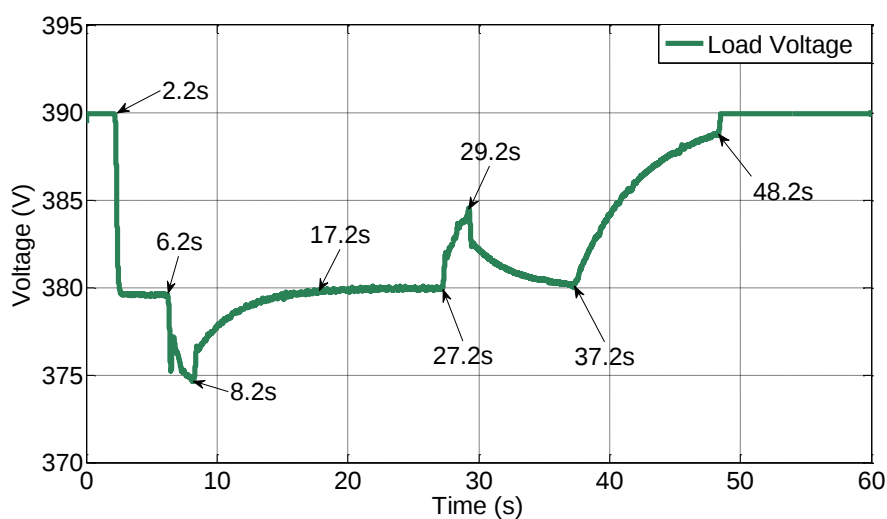


Εικόνα 3.15 Προφίλ ηλιοφάνειας της φωτοβολταϊκής παραγωγής

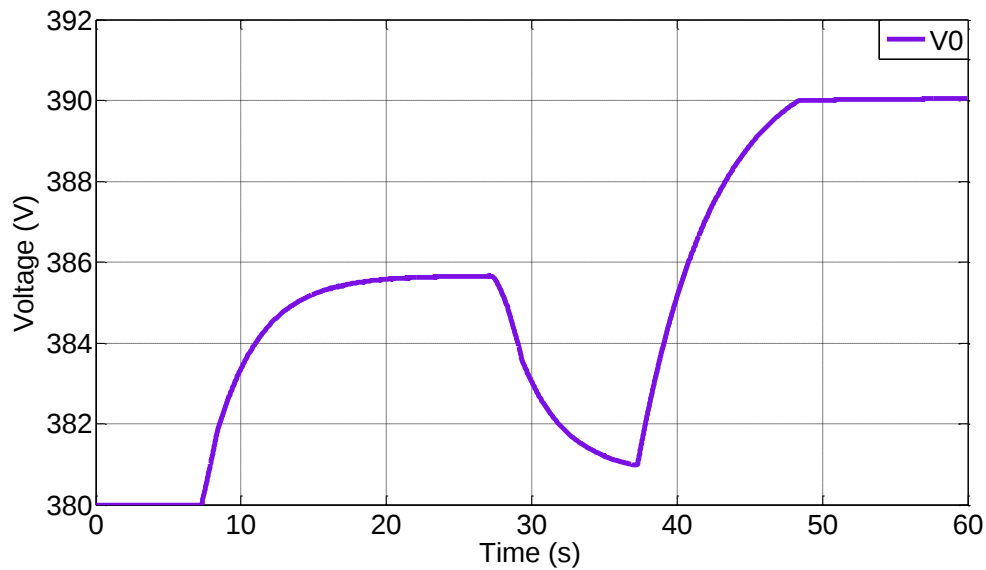


Εικόνα 3.16 Διαμοιρασμός ισχύος στο μικροδίκτυο

Στην Εικόνα 3.17 παρουσιάζονται οι μεταβολές τάσης στο ζυγό του φορτίου. Κατά τη διάρκεια της μείωσης και αύξησης της φωτοβολταϊκής παραγωγής, η τάση στο ζυγό του φορτίου παρουσιάζεται στα διαστήματα από 6.2sec έως 8.2sec και 27.2sec έως 29.2sec αντίστοιχα. Ο δευτερεύων έλεγχος είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση της τάσης στην ονομαστική της τιμή στις περιόδους από 8.2sec έως 17.2sec και 29.2sec έως 37.2sec. Κατά τη διάρκεια της περιόδου 37.2sec έως 48.2sec, ενεργοποιείται ο αλγόριθμος για την ομαλή σύνδεση με το δίκτυο και στα 48.2sec ο κεντρικός διακόπτης του μικροδικτύου κλείνει. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τάση του κεντρικού δικτύου είναι 390V (διαφορετική από την τιμή των 380V που θεωρείται σε απομονωμένη λειτουργία), έτσι ώστε το μικροδίκτυο να πρέπει να αυξήσει την τάση του κατά 10V για να επιτευχθεί ομαλή μετάβαση μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας. Η Εικόνα 3.18 δείχνει την τιμή αναφοράς V_0 (βλέπε Εικόνα 3.5) που ο κεντρικός ελεγκτής MGCC πρέπει να στέλνει στον DC/DC μετατροπέα της μπαταρίας.



Εικόνα 3.17 Προφίλ τάσης στο ζυγό των φορτίων

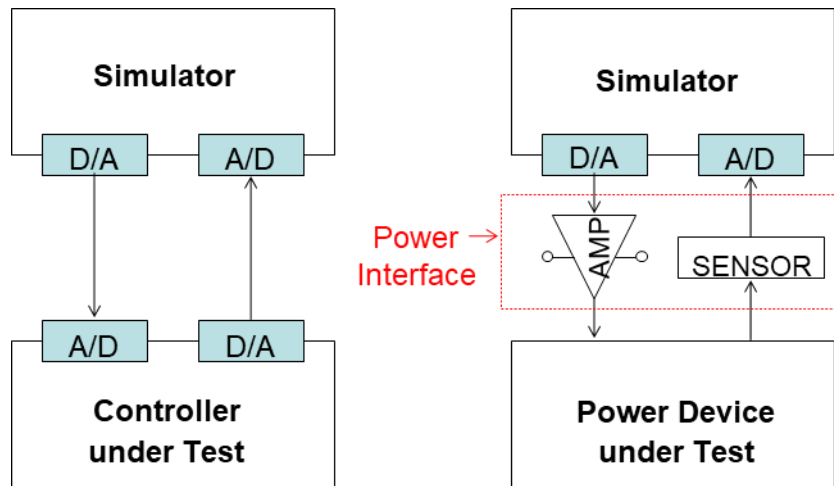


Εικόνα 3.18 Αναφορά της τάσης μπαταριών από τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου

3.5 Αποτελέσματα Control Hardware-in-the-Loop τεχνικής

Μία πολλά υποσχόμενη τεχνική η οποία το τελευταίο διάστημα αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι η λεγόμενη "Hardware-in-the-Loop (HIL)" προσομοίωση. Σε αυτή την τεχνική μία εξωτερική συσκευή ελέγχεται με τη χρήση ενός προσομοιωτή πραγματικού χρόνου (Real-Time Simulator - RTS) με αποτέλεσμα το συνδυασμό των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν τόσο οι προσομοιώσεις όσο και τα πειράματα. Επιπροσθέτως, προσφέρει τη δυνατότητα της δοκιμής πραγματικών συσκευών σε συνθήκες σχεδόν ταυτόσημες με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η όλη διαδικασία είναι ένας κλειστός βρόγχος όπου η πραγματική συσκευή επηρεάζεται από το προσομοιωμένο σύστημα και αντιστρόφως [69], [70].

Η HIL τεχνική έχει εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς συμπεριλαμβανομένου τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, την αυτοκίνηση καθώς και σε διάφορες περιοχές των συστημάτων αυτοματισμού. Η HIL τεχνική διαχωρίζεται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία (Control Hardware-in-the-Loop) ελέγχει αλγόριθμους ελέγχου οι οποίοι εκτελούνται σε πραγματικούς ελεγκτές (π.χ. ελεγκτές μονάδων παραγωγής, ρελέ κ.α.) [72], ενώ στην δεύτερη κατηγορία (Power Hardware-in-the-Loop) ανήκει ο έλεγχος πραγματικών συσκευών ισχύος (π.χ. φωτοβολταϊκός αντιστροφέας κ.α.) [71]. Κοινό χαρακτηριστικό και στις δύο αυτές κατηγορίες είναι η ύπαρξη ενός προσομοιωτή πραγματικού χρόνου για τη σχεδίαση και την εκτέλεση του προσομοιωμένου συστήματος.



Εικόνα 3.19 Τοπολογίες της CHIL και PHIL μεθόδου [71]

Στην Control Hardware-in-the-Loop (CHIL) τεχνική, δοκιμάζεται μία πραγματική μονάδα ελέγχου (π.χ. Digital Signal Processor (DSP), Programmable Logic Controller, βιομηχανικό PC) πριν την εφαρμογή της στο πραγματικό σύστημα [69], [72]. Ο ελεγκτής υπό εξέταση ανταλλάσσει αναλογικά/ψηφιακά σήματα (π.χ. $\pm 10V$) με έναν προσομοιωτή πραγματικού χρόνου στα πλαίσια μιας τοπολογίας κλειστού βρόχου που επιτρέπει την αλληλεπίδραση των δύο συστημάτων. Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική δοκιμής, μπορούν να εντοπιστούν και να επιλυθούν διάφορα τεχνικά προβλήματα που δεν είναι ορατά σε προσομοιώσεις (π.χ. καθυστερήσεις στη μετάδοση των σημάτων, θόρυβος από εξωτερικές συσκευές κ.λπ.).

Στην ενότητα αυτή, η προτεινόμενη στρατηγική ελέγχου μελετάται μέσω ενός πειράματος Control Hardware-in-the-Loop. Το DC μικροδίκτυο της Εικόνα 3.6 προσομοιώνεται στον ψηφιακό προσομοιωτή πραγματικού χρόνου του εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ της εταιρείας RTDS Technologies [73]. Αναλυτικές πληροφορίες για τον εξοπλισμό αυτό μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 2, ενότητα 2.3.3.1. Οι βασικές παράμετροι του συστήματος παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

Πίνακας 3.1 Παράμετροι Ψηφιακού Προσομοιωτή Πραγματικού Χρόνου

Παράμετροι προσομοιωτή πραγματικού χρόνου	
Υπολογιστής παράλληλης επεξεργασίας	
Τύπος προσομοίωσης	EMT προσομοίωση (Electromagnetic Transient solution)
Αλγόριθμος προσομοίωσης	Αλγόριθμος Dommel [74]
Χρονικό βήμα προσομοίωσης	Ελάχιστο: 1μsec



Εικόνα 3.20 Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου RTDS

Οι κύριες παράμετροι του ελεγκτή στον οποίο προγραμματίστηκε ο αλγόριθμος ελέγχου του μικροδικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Παράμετροι Ελεγκτή υπό δοκιμή

Παράμετροι ελεγκτή	
<i>Real-time Linux OS</i>	
<i>Ελεγχόμενος από C, C++, Matlab/Simulink</i>	
<i>Ethercat CAN fieldbus Υποστήριξη</i>	
<i>Χρονικό βήμα προσομοίωσης</i>	<i>Μέγιστο: 20kHz</i>

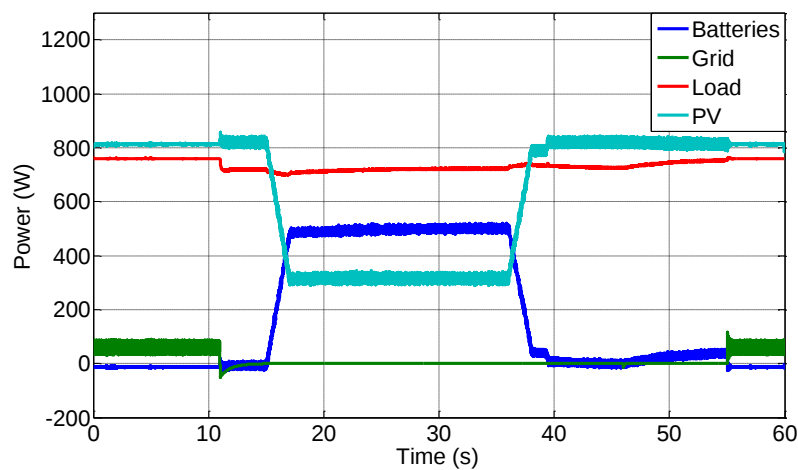


Εικόνα 3.21 Ο πραγματικός ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε στο CHIL πείραμα

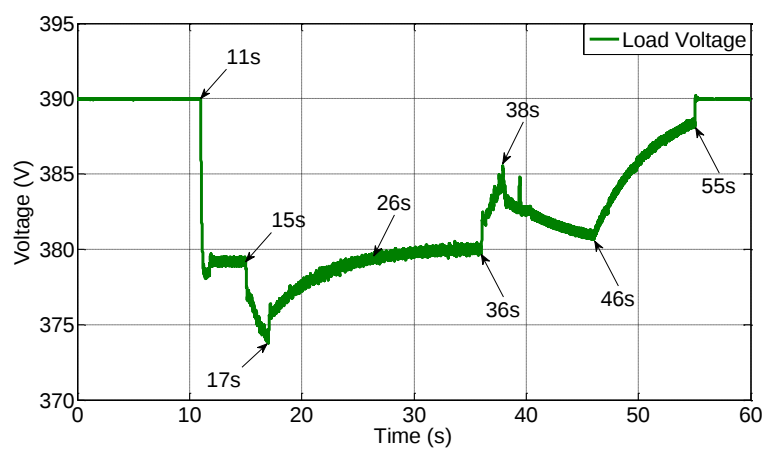


Εικόνα 3.22 Εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στα CHIL πειράματα

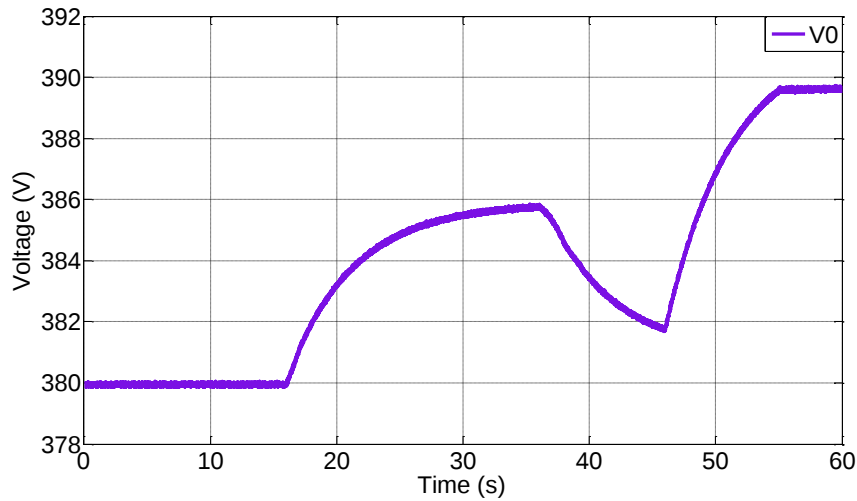
Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα από την CHIL τεχνική. Η Εικόνα 3.24 δείχνει την τάση στο ζυγό του φορτίου κατά τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στην Εικόνα 3.26 παρουσιάζεται η διαφορά στην τάση του φορτίου μεταξύ προσομοίωσης και CHIL πειράματος.



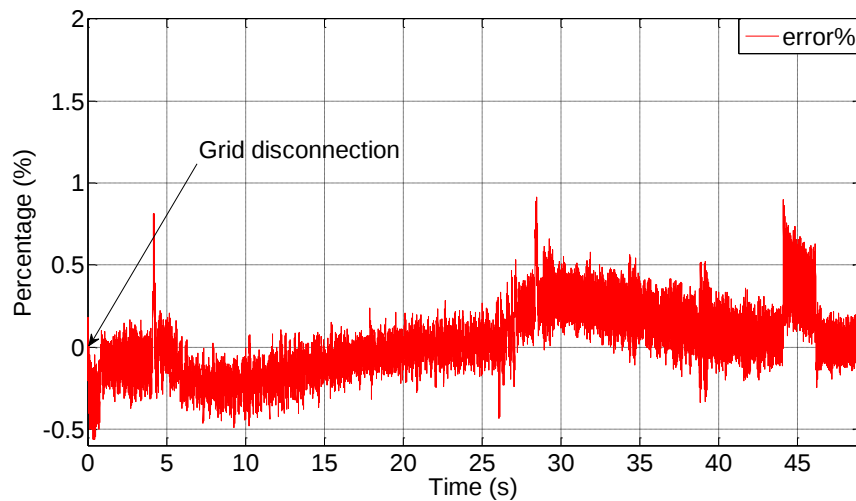
Εικόνα 3.23 Διαμοιρασμός ισχύος στο μικροδίκτυο στο CHIL πείραμα



Εικόνα 3.24 Προφίλ τάσης στο ζυγό των φορτίων στο CHIL πείραμα



Εικόνα 3.25 Αναφορά της τάσης μπαταριών από τον κεντρικό ελεγκτή του μικροδικτύου στο CHIL πείραμα



Εικόνα 3.26 Ποσοστιαίο σφάλμα στην τάση του ζυγού φορτίου μεταξύ προσομοίωσης και πειράματος

Από την Εικόνα 3.26 προκύπτει ότι το σφάλμα μεταξύ προσομοίωσης και CHIL πειράματος είναι κάτω από 1%. Ωστόσο, υπάρχουν μικρές διαφορές που υπογραμμίζουν την αξία των CHIL πειραμάτων. Για παράδειγμα, στις προσομοιώσεις, το ρεύμα δικτύου ($I_{THRESHOLD}$) έπρεπε να είναι κάτω από 0.01A για ένα χρονικό διάστημα 0.05sec, προκειμένου να ανιχνευθεί η κατάσταση νησιδοποίησης, ενώ στο CHIL πείραμα το όριο αυτό έπρεπε να αλλάξει σε 0.08A λόγω του θορύβου στις μετρήσεις και των χρονικών καθυστερήσεων στα σήματα που ανταλλάσσονταν. Επιπλέον, η διάρκεια επανασύνδεσης του μικροδικτύου είναι διαφορετική στις δύο περιπτώσεις. Η κυμάτωση (θόρυβος) που υπήρξε γύρω από τη μέση τιμή στα αναλογικά σήματα που ανταλλάσσονται μεταξύ του προσομοιωτή πραγματικού χρόνου και του ελεγκτή, ενεργοποίησε την επανασύνδεση του μικροδικτύου λίγο νωρίτερα (διάρκεια επανασύνδεσης: 9sec) σε σχέση με την προσομοίωση (11sec).

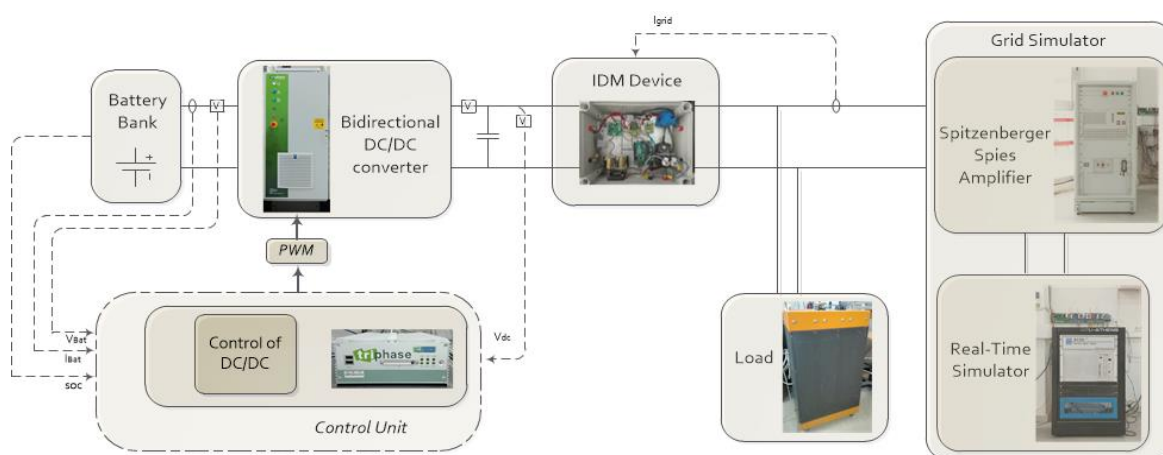
3.6 Αποτελέσματα πειραματικής δοκιμής

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής δοκιμής για τη συσκευή που αναπτύχθηκε και υλοποιεί την προτεινόμενη μέθοδο ανίχνευσης νησιδοποίησης. Ο εξοπλισμός του εργαστηρίου ΣΗΕ χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή της συσκευής. Αναλυτικές πληροφορίες μπορούν να αναζητηθούν στο Κεφάλαιο 2.

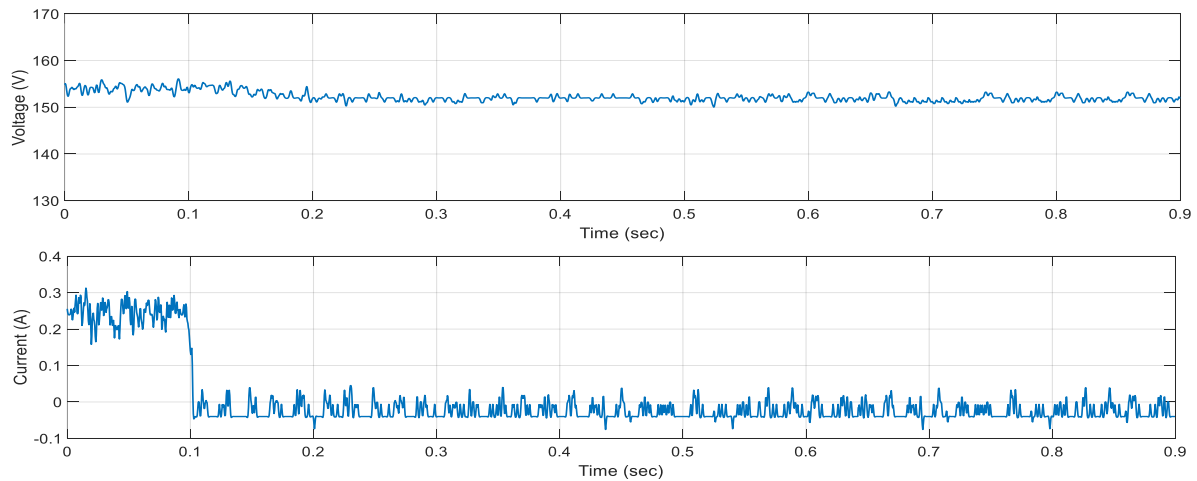
Η μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο μπορεί να εφαρμοστεί και σε δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος με την RMS τιμή του ρεύματος του κεντρικού διακόπτη να μετράται. Για την πληρότητα της μελέτης, πραγματοποιήθηκε δοκιμή της συσκευής τόσο σε DC όσο και AC τοπολογίες.

3.6.1 Αποτελέσματα πειραματικής δοκιμής σε τοπολογίες συνεχούς ρεύματος

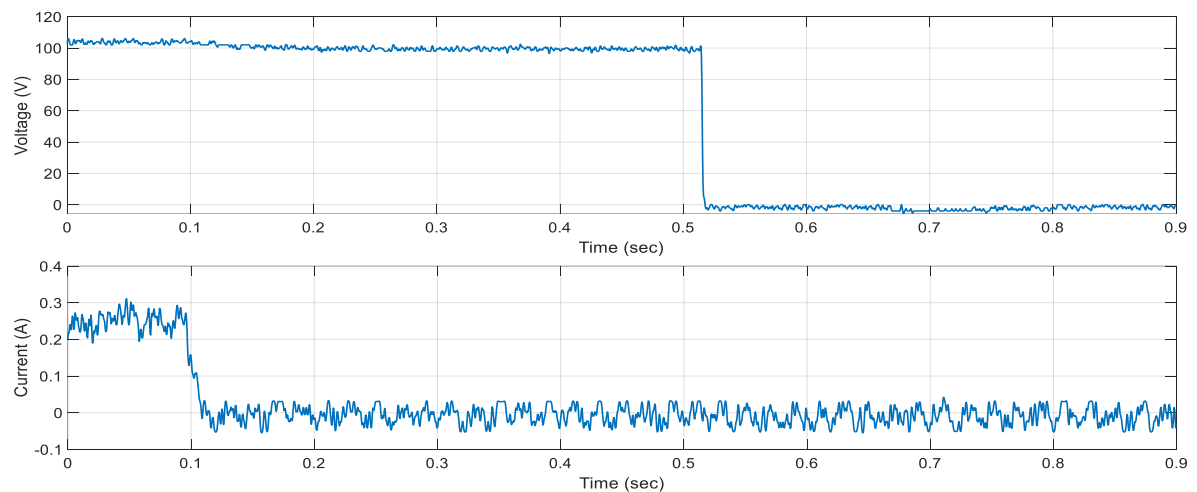
Στην Εικόνα 3.27 παρουσιάζεται η διασύνδεση των συσκευών που συμμετείχαν στην πειραματική δοκιμή. Ο ψηφιακός προσομοιωτής πραγματικού χρόνου σε σειρά με το γραμμικό ενισχυτή παρήγαγαν την DC τάση. Στην έξοδο του γραμμικού ενισχυτή είναι συνδεδεμένο ωμικό φορτίο καθώς επίσης και μία ελεγχόμενη παραγωγή από μπαταρίες. Οι μπαταρίες είναι συνδεδεμένες στο DC δίκτυο μέσω του DC/DC μετατροπέα της Triphase (ενότητα 2.3.3.3) και δε διαθέτουν κάποιον ενσωματωμένο αλγόριθμο ανίχνευσης νησιδοποίησης στην περίπτωση όπου το DC δίκτυο αποσυνδεθεί. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 3.28 όπου στην περίπτωση ίσης παραγωγής - ίσης κατανάλωσης η αποσύνδεση του DC δικτύου κατά τη χρονική στιγμή 0.1sec (το ρεύμα μηδενίζεται) δεν οδηγεί σε αποσύνδεση της παραγωγής από το φορτίο (η τάση εξακολουθεί να εφαρμόζεται στο φορτίο). Η εγκατάσταση της προτεινόμενης συσκευής όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.29 έχει ως αποτέλεσμα την αποσύνδεση της παραγωγής σε χρόνο 0.4sec ο οποίος είναι σύμφωνος με το πρότυπο IEEE 1547 (κάτω από 2sec).



Εικόνα 3.27 Τοπολογία συσκευών στην πειραματική δοκιμή για την ανίχνευση νησιδοποίησης σε δίκτυα συνεχούς ρεύματος.



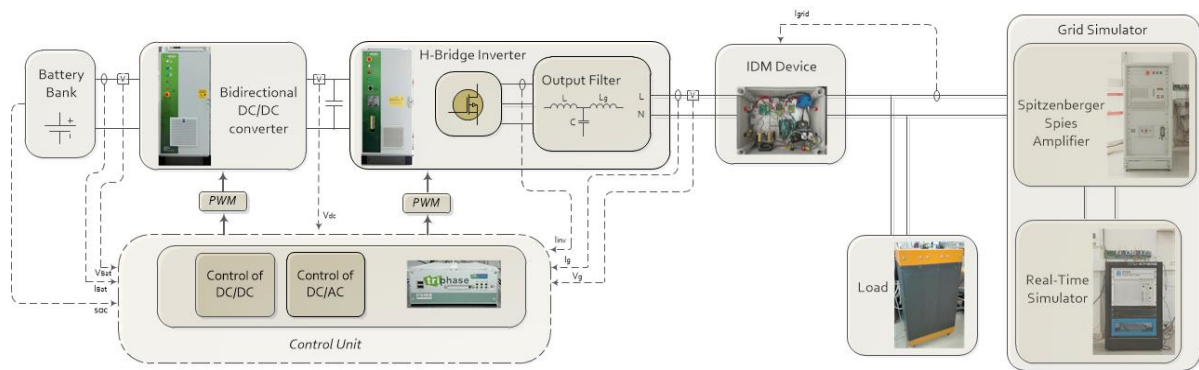
Εικόνα 3.28 Κυματομορφές τάσης φορτίου και ρεύματος δικτύου δίχως τη συσκευή ανίχνευσης νησιδοποίησης



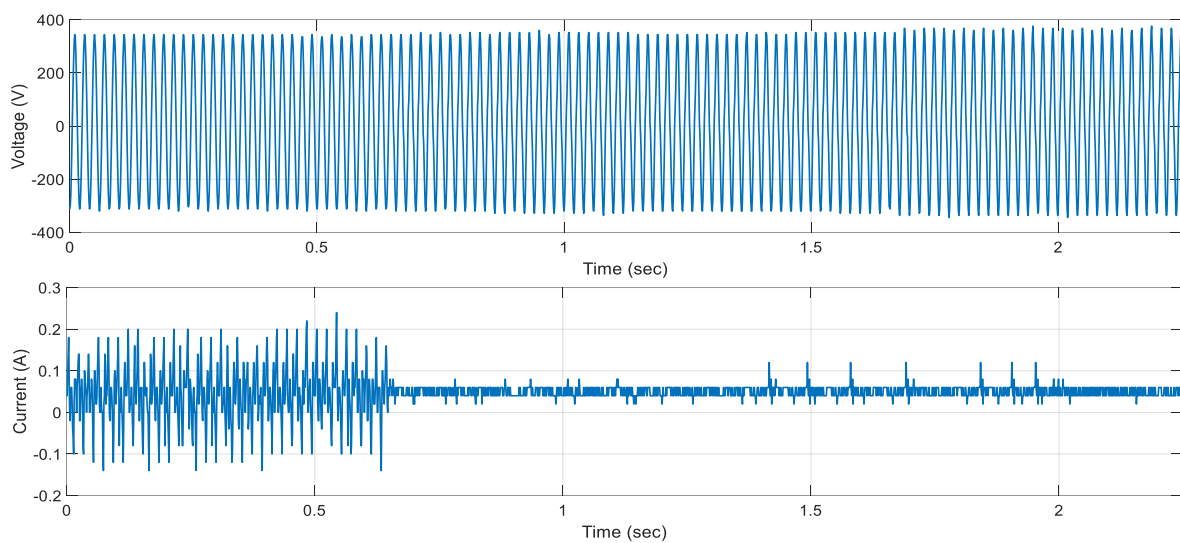
Εικόνα 3.29 Κυματομορφές τάσης φορτίου και ρεύματος δικτύου με τη συσκευή ανίχνευσης νησιδοποίησης

3.6.2 Αποτελέσματα πειραματικής δοκιμής σε τοπολογίες εναλλασσόμενου ρεύματος

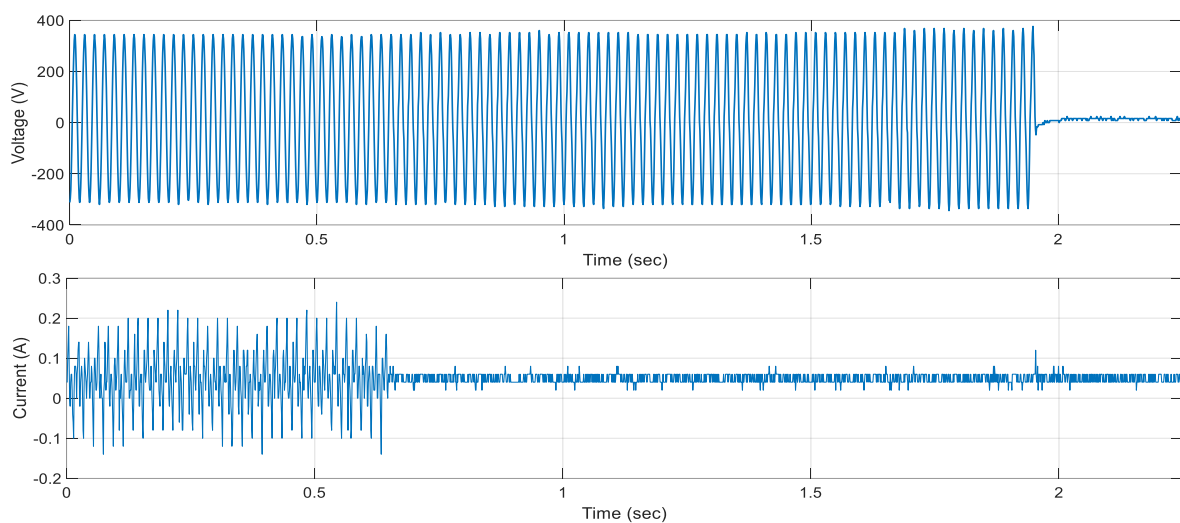
Για την πληρότητα της μελέτης, η συσκευή εξετάστηκε και σε τοπολογίες εναλλασσόμενου ρεύματος. Απαραίτητη είναι η χρήση ενός αντιστροφέα DC/AC (αντιστροφέας Triphase, ενότητα 2.3.3.3) για τη διασύνδεση των μπαταριών και του υπόλοιπου δικτύου. Και σε αυτή την περίπτωση αρχικά πραγματοποιήθηκε πειραματική δοκιμή δίχως τη συσκευή ανίχνευσης της νησιδοποίησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.31. Παρατηρούμε και πάλι τη μη αποσύνδεση των μπαταριών από το φορτίο στην περίπτωση της σκόπιμης νησιδοποίησης. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με την εγκατάσταση της συσκευής όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.32.



Εικόνα 3.30 Τοπολογία συσκευών στην πειραματική δοκιμή για την ανίχνευση νησιδοποίησης σε δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος



Εικόνα 3.31 Κυματομορφές τάσης φορτίου και ρεύματος δικτύου δίχως τη συσκευή ανίχνευσης νησιδοποίησης



Εικόνα 3.32 Κυματομορφές τάσης φορτίου και ρεύματος δικτύου με τη συσκευή ανίχνευσης νησιδοποίησης

3.7 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο παρούσα ενότητα παρουσιάστηκε μια τεχνική για την ομαλή μετάβαση μεταξύ διασυνδεδεμένης και απομονωμένης λειτουργίας ενός DC μικροδικτύου. Εξετάστηκαν όλα τα στάδια αυτής της διαδικασίας (ανίχνευση νησιδοποίησης, έλεγχος μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης, μετάβαση από απομονωμένη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία κ.λπ.). Για την ανίχνευση νησιδοποίησης προτείνεται μια νέα μέθοδος που βασίζεται στην εισαγωγή ενός ελεγχόμενου φορτίου παράλληλα με τον κεντρικό διακόπτη του μικροδικτύου. Αυτή η τεχνική είναι ικανή να παρέχει γρήγορη ανίχνευση της νησιδοποίησης οδηγώντας με αυτό τον τρόπο σε ένα ομαλό προφίλ τάσης ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται η λειτουργία των κρίσιμων φορτίων του μικροδικτύου. Οι παράμετροι του ελεγχόμενου φορτίου εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού μέτρησης ρεύματος, όπως η ακρίβεια στις χαμηλές τιμές ρεύματος, το εύρος ζώνης των μετρήσεων κ.λπ. Επιπλέον, μέσω ενός κατάλληλου PI ελεγκτή επιτυγχάνεται ομαλή μετάβαση κατά τη φάση επανασύνδεσης με το κύριο δίκτυο. Το σήμα εισόδου του PI ελεγκτή είναι η διαφορά τάσης στις δύο πλευρές του κεντρικού διακόπτη, ενώ το σήμα εξόδου είναι η τάση αναφοράς προς τη μονάδα παραγωγής της τάσης σε απομονωμένη λειτουργία.

Η απόδοση της προτεινόμενης στρατηγικής ελέγχου αξιολογήθηκε μέσω ψηφιακών προσομοιώσεων και πειραμάτων Control Hardware-in-the-Loop. Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική δοκιμής, μπορούν να εντοπιστούν και να επιλυθούν διάφορα τεχνικά προβλήματα που δεν είναι ορατά σε προσομοιώσεις (π.χ. καθυστερήσεις στη μετάδοση των σημάτων, θόρυβος από εξωτερικές συσκευές κ.λπ.). Στο σενάριο που εξετάστηκε στο παρόν κεφάλαιο υπήρξαν μικρές διαφορές που υπογραμμίζουν την αξία των CHIL πειραμάτων. Για παράδειγμα, στις προσομοιώσεις, το ρεύμα δικτύου ($I_{THRESHOLD}$) έπρεπε να είναι κάτω από 0.01A για ένα χρονικό διάστημα 0.05sec, προκειμένου να ανιχνευθεί η κατάσταση νησιδοποίησης, ενώ στο CHIL πείραμα το όριο αυτό έπρεπε να αλλάξει σε 0.08A λόγω του θορύβου στις μετρήσεις και των χρονικών καθυστερήσεων στα σήματα που ανταλλάσσονταν. Επιπλέον, η διάρκεια επανασύνδεσης του μικροδικτύου ήταν διαφορετική στις δύο περιπτώσεις. Η κυμάτωση (θόρυβος) που υπήρξε γύρω από τη μέση τιμή στα αναλογικά σήματα που ανταλλάσσονταν μεταξύ του προσομοιωτή πραγματικού χρόνου και του ελεγκτή, ενεργοποίησε την επανασύνδεση του μικροδικτύου λίγο νωρίτερα (διάρκεια επανασύνδεσης: 9sec) σε σχέση με την προσομοίωση (11sec).

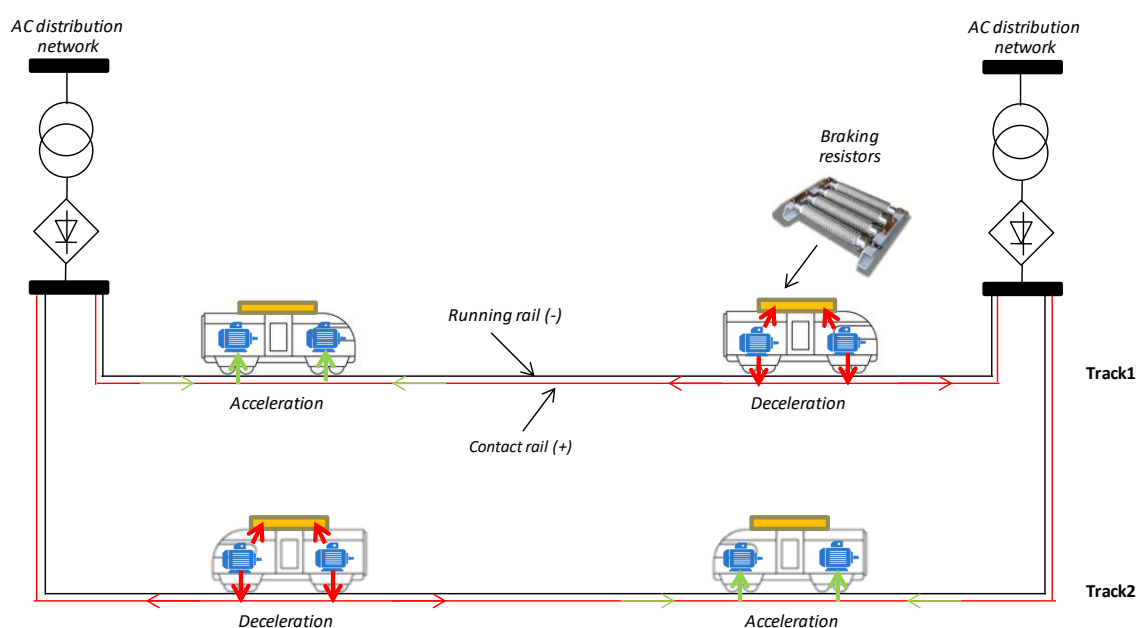
Τελευταίο στάδιο της ανάλυσης που προηγήθηκε αποτελεί η πειραματική δοκιμή της συσκευής που αναπτύχθηκε τόσο σε τοπολογίες συνεχούς όσο και εναλλασσόμενου ρεύματος. Και στις δύο περιπτώσεις η εγκατάσταση της συσκευής οδήγησε σε ασφαλή νησιδοποίηση του συστήματος.

Κεφάλαιο 4

Διαχείριση αναγεννητικής ενέργειας στα σύγχρονα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα

4.1 Εισαγωγή

Τα πλεονεκτήματα των μητροπολιτικών σιδηροδρομικών συστημάτων (δίκτυα συνεχούς ρεύματος) έναντι άλλων συμβατικών μέσων μεταφοράς είναι κοινώς αναγνωρισμένα. Αυτό το ενδιαφέρον έχει αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες ως αποτέλεσμα των αυξανόμενων ανησυχιών για περιβαλλοντικά ζητήματα όπως η κλιματική αλλαγή και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) [75]-[81]. Ωστόσο προκειμένου να διατηρηθούν τα εγγενή πλεονεκτήματα των μητροπολιτικών σιδηροδρομικών συστημάτων, όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας ανά μεταφορική ικανότητα, ορισμένα μέτρα ενεργειακής απόδοσης θα πρέπει να εφαρμοστούν [75], [76], [82].



Εικόνα 4.1 Επισκόπηση ενός μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου

Στα σιδηροδρομικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος ένας συνδυασμός δυναμικής και μηχανικής πέδησης χρησιμοποιείται συνήθως για την επίτευξη του επιθυμητού ρυθμού επιβράδυνσης [83]-[86]. Ο όρος δυναμική πέδηση αναφέρεται στην ικανότητα των κινητήρων να λειτουργούν επίσης ως γεννήτριες κατά τη φάση της επιβράδυνσης των τρένων, μετατρέποντας την κινητική σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πλεόνασμα ενέργειας καταναλώνεται πάνω σε απορριπτικά φορτία τα οποία βρίσκονται πάνω στα τρένα

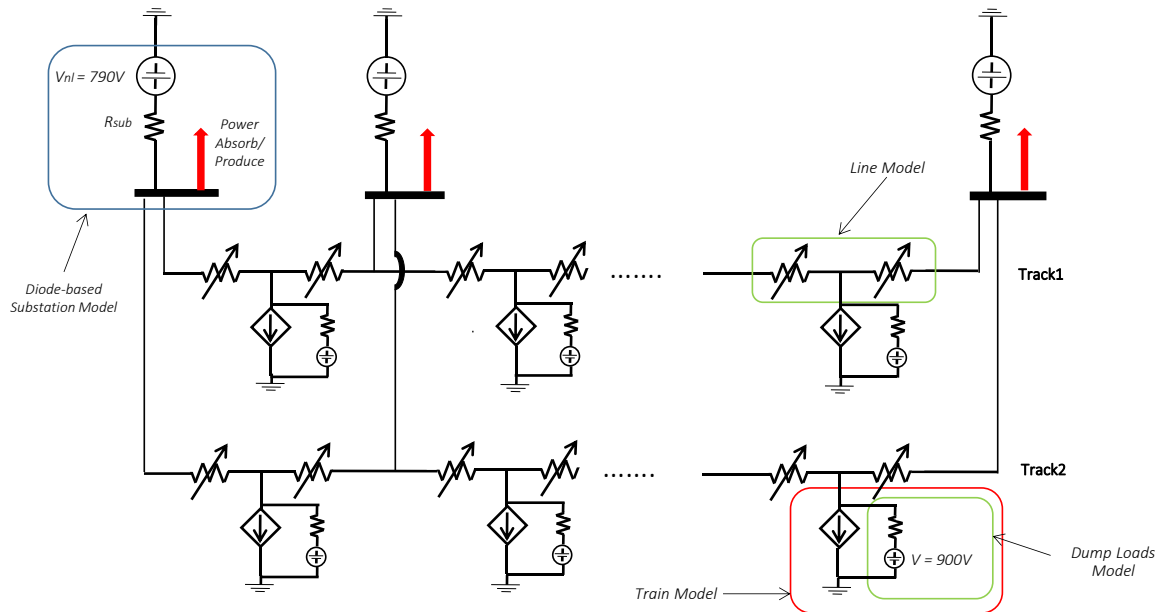
δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ανεπιθύμητες απώλειες, καθώς στις περισσότερες των περιπτώσεων μονόδρομοι υποσταθμοί τροφοδοτούν το σιδηροδρομικό δίκτυο μη επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την επιστροφή της παραγόμενης ενέργειας πίσω στο δίκτυο διανομής. Λόγω του γεγονότος ότι στα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα σημειώνονται πολυάριθμες φάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης η διαχείριση της ενέργειας πέδησης προσφέρει μεγάλες δυνατότητες όχι μόνο για την αύξηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης αλλά και για τη σταθεροποίηση της τάσης στο δίκτυο. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται μια επισκόπηση ενός μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου.

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 30%, 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% [25].

4.2 Μοντελοποίηση δικτύου και επιμέρους στοιχείων

Στην ενότητα αυτή, θα μελετηθούν τα μοντέλα τα οποία αντιπροσωπεύουν κάθε τμήμα του δικτύου ώστε να είναι εφικτή η μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος. Αυτό σημαίνει πως παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των σταθμών παροχής ηλεκτρικής ισχύος, των ηλεκτρικών τρένων σε όλες τις πιθανές περιπτώσεις κίνησης τους (επιτάχυνση, πέδηση) καθώς και των ηλεκτρικών γραμμών παροχής ισχύος. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του δικτύου για τον υπολογισμό της τάσης που αναπτύσσεται ανάμεσα στις ράγες κύλισης και τη γη και αναλύεται το ζήτημα των διαφυγόντων ρευμάτων και των προβλημάτων που αναπτύσσονται εξαιτίας τους στα σιδηροδρομικά δίκτυα.

Μία τυπική τοπολογία ενός μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2. Οι δύο τροχιές συνδέονται παράλληλα μέσω καλωδίων κατάλληλης αντίστασης για να επιτρέπεται η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των τρένων που κινούνται προς διαφορετικές κατευθύνσεις.



Εικόνα 4.2 Μοντελοποίηση ενός μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου

4.2.1 Ηλεκτρικοί υποσταθμοί έλξης

Οι υποσταθμοί έλξης με χρήση μη ελεγχόμενου ανορθωτή με διόδους μοντελοποιούνται ως ιδανικές πηγές DC τάσης V_{nl} με εσωτερική αντίσταση R_{sub} . Η τιμή της αντίστασης R_{sub} επιλέγεται έτσι ώστε η τάση εξόδου των υποσταθμών κατά την ονομαστική φόρτιση να είναι η ονομαστική τάση.

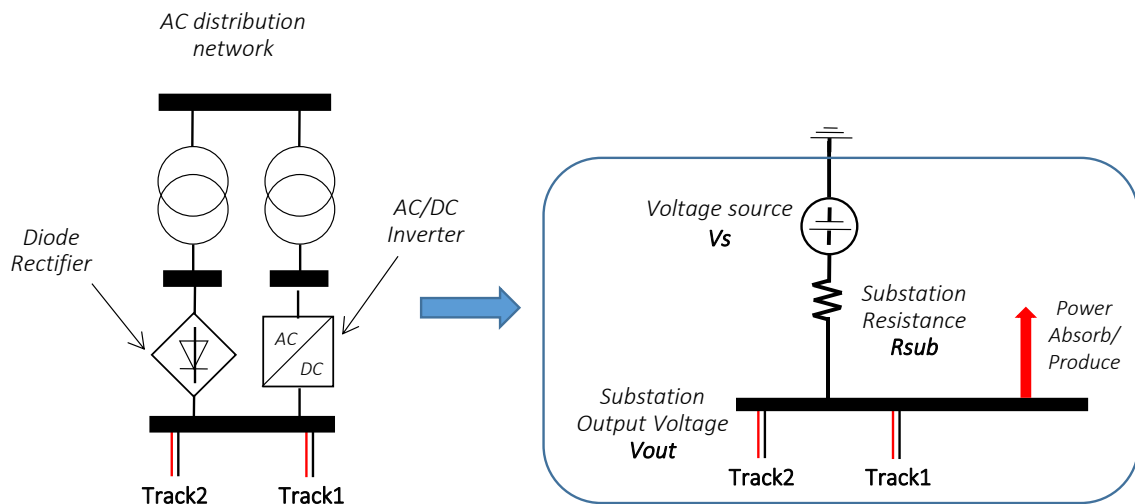
$$R_{sub} = ((V_{nl} - V_{nom}) * V_{nom}) / P_{nom} \quad (4.1)$$

Η εσωτερική αυτή αντίσταση αναπαριστά επίσης τον μη ελεγχόμενο ανορθωτή που εμποδίζει την αντίστροφη ροή ισχύος από το DC δίκτυο προς το δίκτυο διανομής μέσης τάσης. Η λειτουργία αυτή ενσωματώνεται στην εσωτερική αντίσταση του υποσταθμού με την έννοια ότι όταν το ρεύμα αλλάξει πολικότητα (αντίστροφη ροή ισχύος) τότε η τιμή της αντίστασης γίνεται 1000 φορές μεγαλύτερη μη επιτρέποντας την επιστροφή μεγάλης ποσότητας ισχύος πίσω στο δίκτυο.

Η αντίστροφη ροή ισχύος στους αμφίδρομους υποσταθμούς ή αντίστοιχα η τοπική αποθήκευση μέσω στατικών μονάδων αποθήκευσης (βλέπε ενότητα 4.3) προσομοιώνεται από ελεγχόμενες πηγές ισχύος συνδεδεμένες στους υποσταθμούς έλξης. Η μόνη διαφορά μεταξύ της αντίστροφης ροής ισχύος προς το δίκτυο διανομής μέσω αμφίδρομων υποσταθμών και της τοπικής αποθήκευσης είναι η ύπαρξη των ορίων φόρτισης/εκφόρτισης που οι στατικές μονάδες αποθήκευσης παρουσιάζουν.

Η ανάστροφη λειτουργία των ηλεκτρικών υποσταθμών ενεργοποιείται με τη μέτρηση της DC τάσης στο σημείο σύνδεσής τους. Όταν η τάση στην έξοδο των υποσταθμών αυξηθεί πάνω από ένα επιλεγμένο όριο (π.χ. 800V), η ενέργεια που παράγεται κατά την επιβράδυνση των τρένων τροφοδοτείται πίσω στο δίκτυο διανομής διατηρώντας

σταθερή την τάση σε αυτό το όριο αναφοράς (τοπικός έλεγχος). Η Εικόνα 4.3 παρουσιάζει το μοντέλο του ηλεκτρικού υποσταθμού έλξης.



Εικόνα 4.3 Μοντέλο ηλεκτρικού υποσταθμού έλξης

4.2.2 Ηλεκτρικά τρένα

Τα τρένα μοντελοποιούνται ως ελεγχόμενες πηγές ισχύος με ισχύ αναφοράς κάθε φορά την ηλεκτρική ισχύ που απαιτείται για την κίνηση με συγκεκριμένα δυναμικά χαρακτηριστικά. Αναλυτικότερα, η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση των τρένων παρουσιάζεται στην εξίσωση (4.2) για τη φάσης επιτάχυνσης και επιβράδυνσης.

$$P_{el} = P_{aux} + P_m/eff : \text{επιτάχυνση}$$

ή

(4.2)

$$P_{el} = P_{aux} + P_m * eff : \text{επιβράδυνση}$$

Όπου

- P_{aux} είναι η συνολική ηλεκτρική ισχύς για όλα τα βοηθητικά συστήματα (π.χ. φωτισμός, συστήματα ψύξης/θέρμανσης κ.λπ.)
- eff είναι η συνολική απόδοση όλων των ενδιάμεσων συστημάτων (π.χ. μετατροπείς ισχύος, κιβώτιο ταχυτήτων κ.λπ.) για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική ισχύ
- P_m είναι η απαιτούμενη μηχανική ισχύς για την κίνηση με την επιθυμητή ταχύτητα και ρυθμό επιτάχυνσης/επιβράδυνσης και εξαρτάται από την αντίσταση κίνησης του κινούμενου τρένου, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (4.3).

$$P_m = u * (Mf - R) \quad (4.3)$$

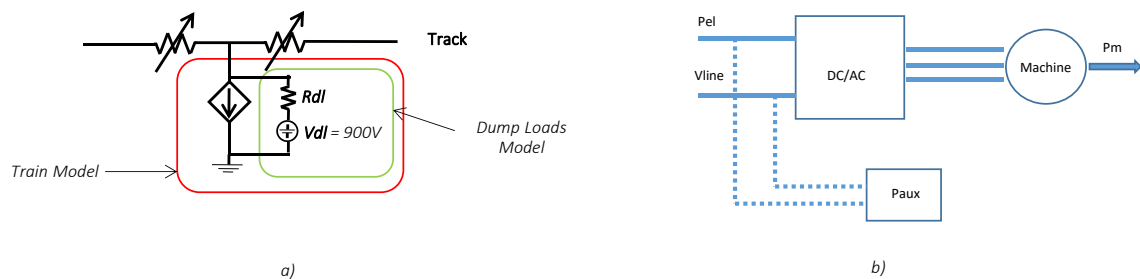
Στην εξίσωση (4.3), u είναι η ταχύτητα του τρένου, και Mf είναι η δύναμη που παράγεται από τους ηλεκτροκινητήρες. Ο όρος R είναι η συνολική δύναμη που αντιτίθεται της επιτάχυνσης του τρένου και δίνεται από την εξίσωση (4.4) (Davis equation).

$$R(u) = A + B * u + C * u^2 \quad (4.4)$$

Οι συντελεστές A , B , C είναι μοναδικοί για κάθε τρένο και μπορούν να προσδιοριστούν με μετρήσεις.

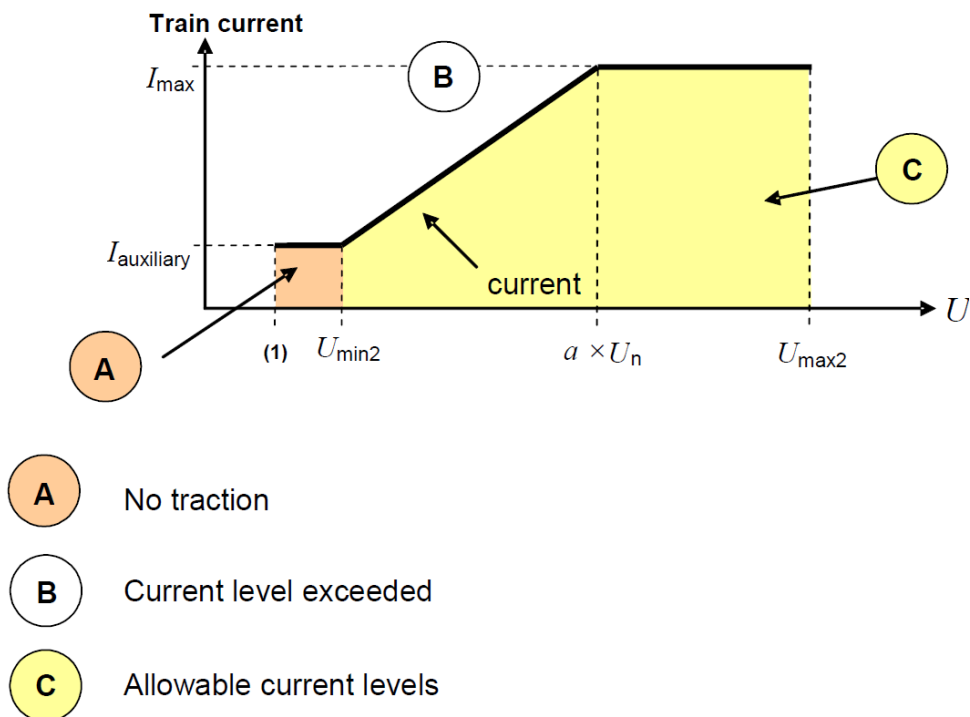
Τα απορριπτικά φορτία των τρένων που στόχο έχουν τον καθορισμό ενός άνω ορίου τάσης (π.χ. 900V) διαμορφώνονται ως μία DC πηγή τάσης σε σειρά με μία αντίσταση η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη διαφορά των τάσεων στα άκρα της. Όταν η τάση της γραμμής υπερβαίνει το καθορισμένο αυτό όριο τότε η αντίσταση λαμβάνει μία μικρή τιμή ($R_{dl}^{LOW} = 0.001\Omega$) ώστε με αυτόν τον τρόπο, η τάση στο σημείο σύνδεσης του τρένου να διατηρείται σταθερή στη μέγιστη τιμή κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης, μέχρι το σημείο που αυτή θα πέσει ξανά κάτω από το όριο με την τιμή της αντίστασης να λαμβάνει μία μεγάλη τιμή ($R_{dl}^{HIGH} = 1000\Omega$).

Η προσομοίωση της κίνησης των τρένων στις δύο γραμμές πραγματοποιείται με τη χρήση μεταβλητών αντιστάσεων αριστερά και δεξιά του μοντέλου του τρένου, έτσι ώστε να μοντελοποιείται μια κινούμενη κατανάλωση ενέργειας (παραγωγή κατά τη διάρκεια της πέδησης).



Εικόνα 4.4 α) Μοντελοποίηση ηλεκτρικών τρένων, β) Αναπαράσταση ηλεκτρικής κατανάλωσης τρένων

Τέλος να σημειωθεί ότι τα ηλεκτρικά τρένα πρέπει να ακολουθούν το πρότυπο EN50388:2012 για τη μέγιστη κατανάλωση που μπορούν να έχουν και να ακολουθούν την καμπύλη της Εικόνα 4.5 η οποία παρουσιάζει το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να καταναλώνει ένα τρένο συναρτήσει της τάσης γραμμής που εφαρμόζεται στα άκρα του. Για τα 750V μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα οι τιμές διαμορφώνονται: $\alpha = 0.8$, $U_n = 750V$, $U_{min2} = 550V$, $U_{max2} = 900V$. Οι τιμές $I_{auxiliaries}$ και I_{max} εξαρτώνται από τον κατασκευαστή των τρένων.



Εικόνα 4.5 Μέγιστο ρεύμα κατανάλωσης των τρένων σύμφωνα με το πρότυπο EN50388:2012

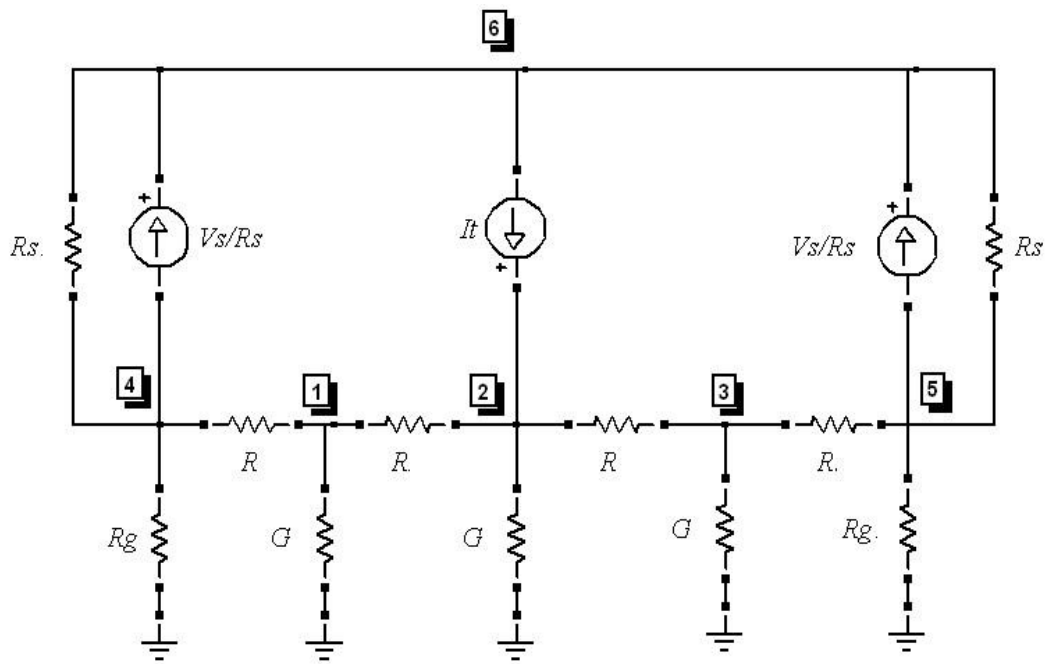
4.2.3 Μοντελοποίηση για τον υπολογισμό της τάσης που αναπτύσσεται στη γραμμή επιστροφής σε σχέση με το δυναμικό γης

Στα αστικά μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα οι ράγες κύλισης χρησιμοποιούνται και σαν γραμμές επιστροφής του ρεύματος, για την ελαχιστοποίηση του κόστους. Εξαιτίας της ηλεκτρικής αντίστασης και αγωγιμότητας ως προς γη των γραμμών αυτών, παρόλο που είναι μονωμένες, μέρος του ρεύματος επιστροφής από το ηλεκτρικό τρένο προς τους υποσταθμούς διαφεύγει στη γη. Το ρεύμα αυτό αποτελεί το διαφεύγον ρεύμα στο ηλεκτρικό σιδηροδρομικό δίκτυο [87].

Τα προβλήματα που εισάγουν τα διαφεύγοντα ρεύματα είναι κυρίως δύο ειδών:

1. Η αύξηση του δυναμικού των γραμμών επιστροφής σε σχέση με τη γη (Rail to Ground Voltage).
2. Η ηλεκτροχημική διάβρωση όλων των μεταλλικών στοιχείων στη γειτονική περιοχή (π.χ. μεταλλικοί αγωγοί στα θεμέλια κτιρίων κ.α.)

Ενώ ο πιο σημαντικός κίνδυνος που απασχολεί, είναι η πιθανή άμεση επαφή ανθρώπου με μια ράγα κύλισης η οποία βρίσκεται υπό τάση, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν το διαφεύγον ρεύμα κατά μήκος των μη ιδανικών μονώσεων μεταξύ γραμμών επιστροφής και γης [88]. Το πρόβλημα των διαφευγόντων ρευμάτων σε ένα DC σιδηροδρομικό δίκτυο, εμφανίζεται σχηματικά στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.7 Αναπαράσταση γραμμής κύλισης για τον υπολογισμό της τάσης ράγας ως προς γη [87]

4.3 Στρατηγικές διαχείρισης αναγεννητικής πέδησης

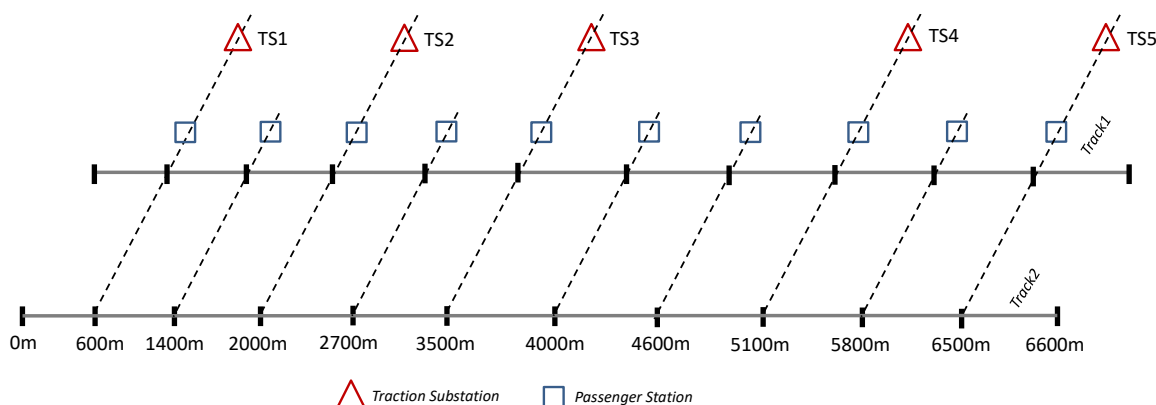
Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η χρήση της παραγόμενης αυτής ενέργειας τρεις βασικές στρατηγικές έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Στα πλαίσια της ανάλυσης που θα ακολουθήσει, μια παραλλαγή του μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου της Θεσσαλονίκης μήκους 6.6km έχει χρησιμοποιηθεί. Τα κύρια χαρακτηριστικά του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Η τοπολογία του δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.8.

Πίνακας 4.1 Βασικές παράμετροι προσομοίωσης

Παράμετροι τρένων	
Μήκος, βάρος τρένων	51.5m, 120tn
Ηλεκτρική ισχύς βοηθητικών συστημάτων (P_{aux})	330kW
Βαθμός απόδοσης τρένων (eff)	95%
Χαρακτηριστικά υποσταθμών έλξης	
Ονομαστική ισχύς	3MW
Τάση "κενού φορτίου"	790V
Ονομαστική τάση	750V
Μέγιστη τάση	900V

Χαρακτηριστικά σιδηροδρομικού δικτύου

Αντίσταση γραμμής επιστροφής	20mOhm/km
Αντίσταση 3 ^{ης} ράγας	7.5mOhm/km
Χρονοαπόσταση	300sec

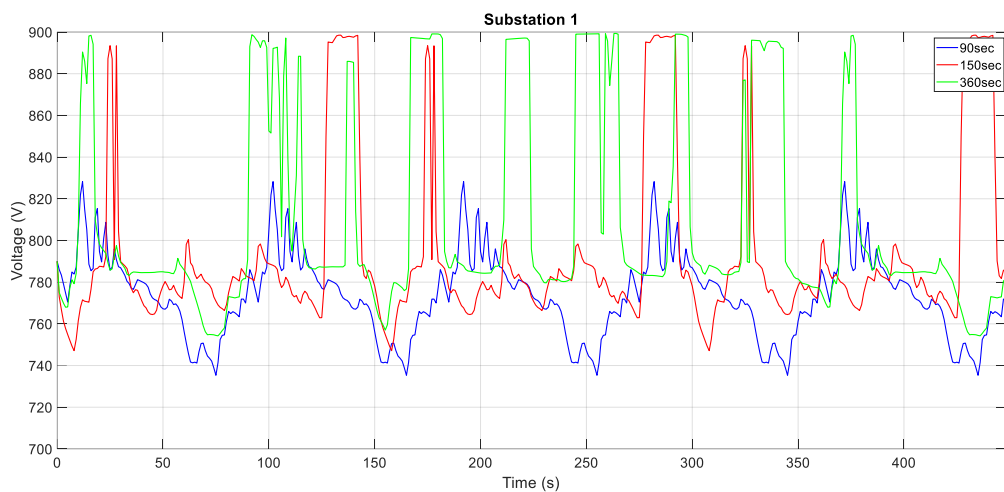


Εικόνα 4.8 Αναπαράσταση της τοπολογίας του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις.

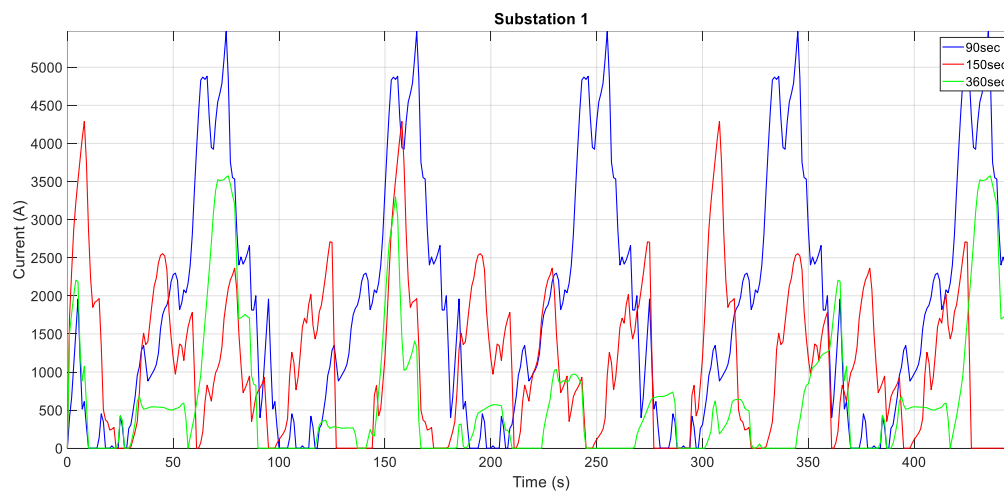
4.3.1 Βελτιστοποίηση δρομολογίων

Δεδομένου ότι η ενέργεια πέδησης καταναλώνεται από τα ίδια τα οχήματα και από άλλα οχήματα που επιταχύνουν ταυτόχρονα σε κάποιο κοντινό σημείο, μία λύση είναι η προσαρμογή των δρομολογίων έτσι ώστε οι επιταχύνσεις και οι επιβραδύνσεις που παρουσιάζονται στο ίδιο ηλεκτρικό τμήμα να συγχρονίζονται. Αυτή η λύση απαιτεί ένα σύστημα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο το οποίο όμως είναι ήδη διαθέσιμο στα περισσότερα σιδηροδρομικά δίκτυα. Πρόκειται για μία λύση χαμηλού κόστους ειδικά σε σύγκριση με την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης ή αμφίδρομων υποσταθμών έλξης. Για τους λόγους αυτούς, η βελτιστοποίηση των δρομολογίων θα πρέπει να θεωρηθεί ως η πρώτη επιλογή για την αύξηση των ωφελειών της αναγεννητικής πέδησης στα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα. Σε αυτή την κατεύθυνση, διάφορες μελέτες έχουν προτείνει βελτιστοποιημένα χρονοδιαγράμματα για την αύξηση της συνολικής απόδοσης [86], [90]-[92].

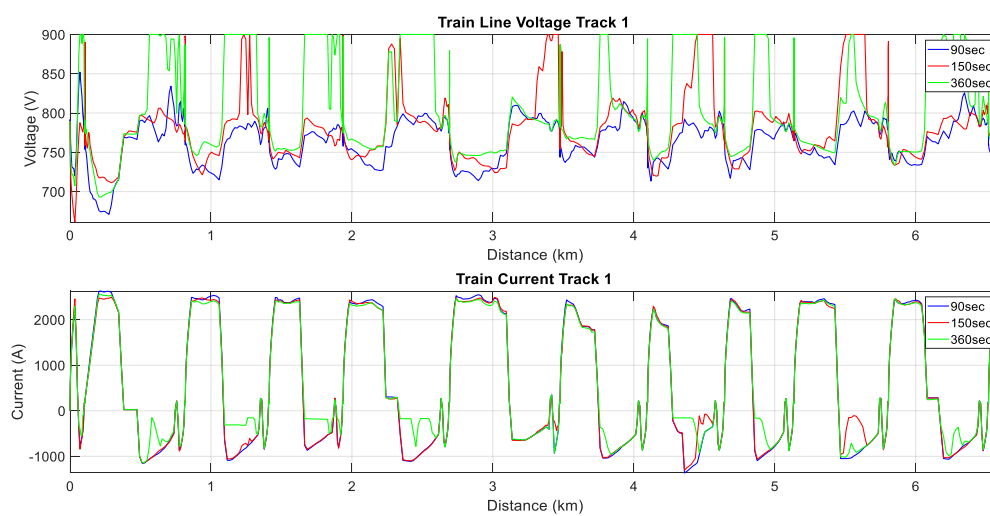
Ένα βασικό μέγεθος για τη λειτουργία των σιδηροδρομικών δικτύων αποτελεί η χρονοαπόσταση (headway) μεταξύ δύο διαδοχικών τρένων σε μία γραμμή. Εκφράζεται σε λεπτά και αντιπροσωπεύει το χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών τρένων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι υψηλή πυκνότητα κυκλοφορίας αντιστοιχεί σε μικρό headway και αντιστρόφως. Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4.9 έως Εικόνα 4.16) βλέπουμε την επίδραση της χρονοαπόστασης στη λειτουργία του σιδηροδρομικού δικτύου της Εικόνα 4.8. Στο Παράρτημα Α μπορούν να βρεθούν τα διαγράμματα τάσης και ρεύματος για όλους τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς του δικτύου. Ενδεικτικά εδώ παρουσιάζεται μόνο ο υποσταθμός TS1.



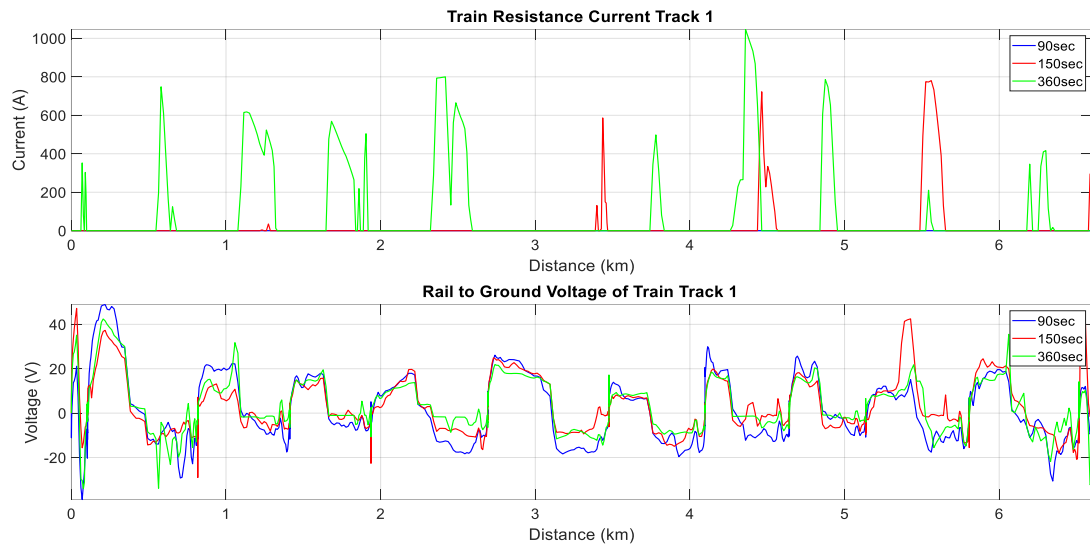
Εικόνα 4.9 Τάση υποσταθμού TS1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



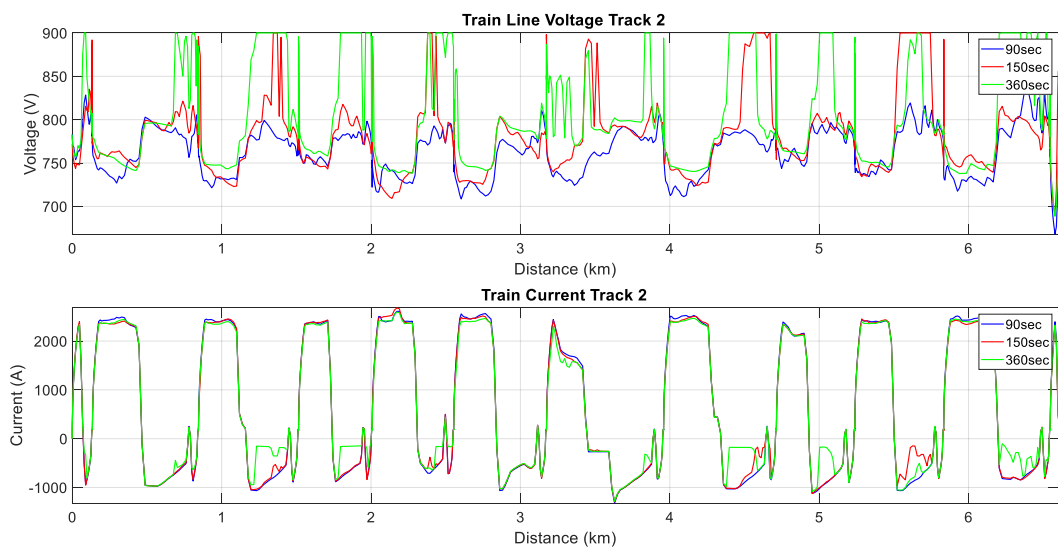
Εικόνα 4.10 Ρεύμα υποσταθμού TS1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



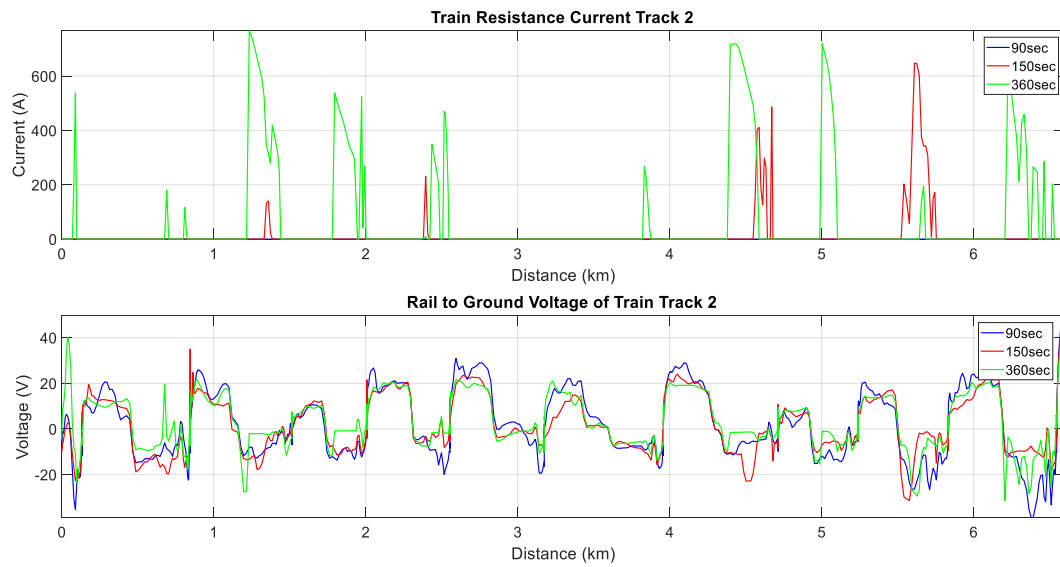
Εικόνα 4.11 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



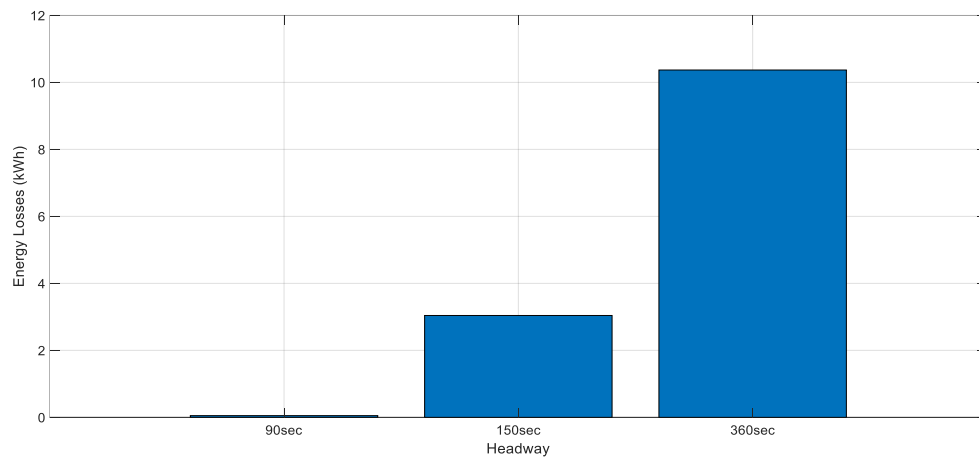
Εικόνα 4.12 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



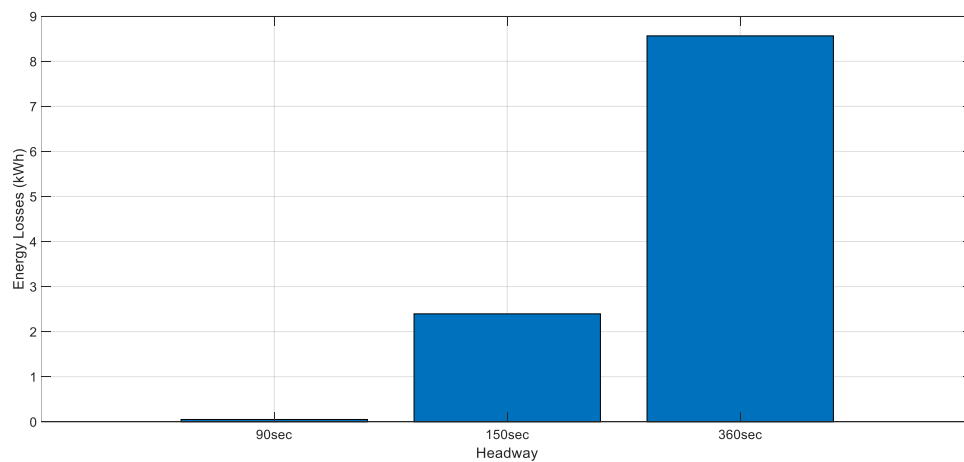
Εικόνα 4.13 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



Εικόνα 4.14 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



Εικόνα 4.15 Απώλειες στα απορριπτικά φορτία των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης

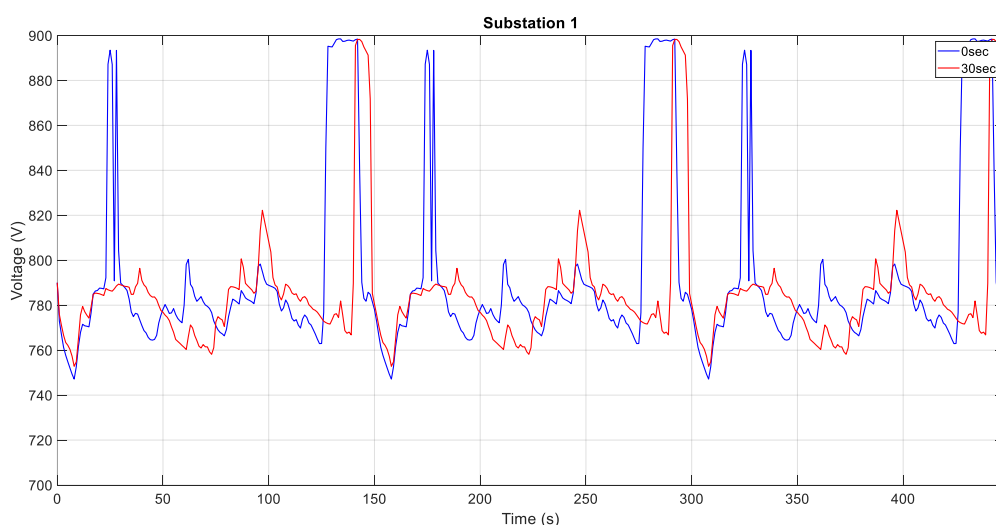


Εικόνα 4.16 Απώλειες στα απορριπτικά φορτία των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης

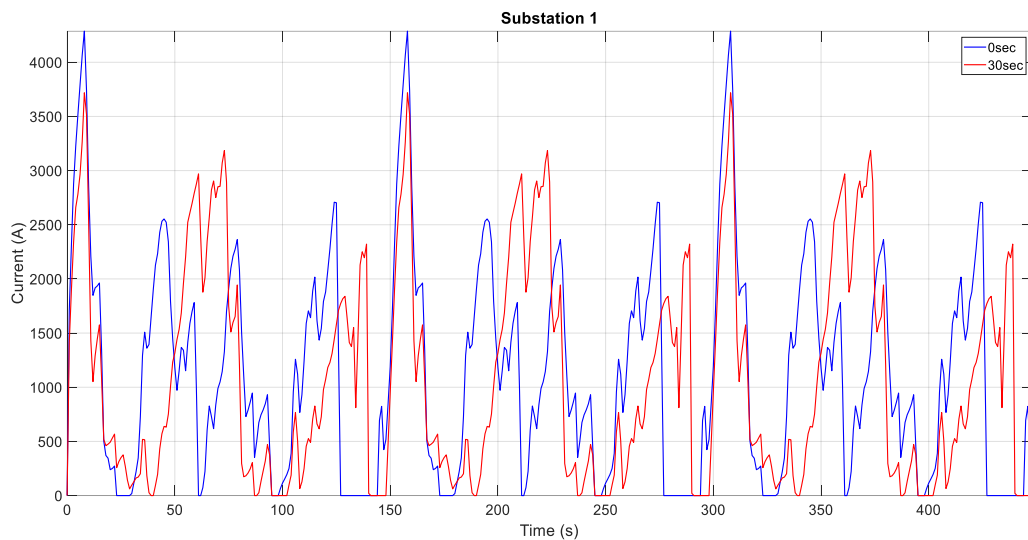
Στην Εικόνα 4.9 και Εικόνα 4.10 βλέπουμε την τάση και το ρεύμα εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS1. Η Εικόνα 4.11 και Εικόνα 4.12 παρουσιάζουν την τάση στην έξοδο ενός τρένου που κινείται στην τροχιά 1, το ρεύμα που καταναλώνεται/παράγεται στις μηχανές καθώς και το ρεύμα που καταναλώνεται ως θερμότητα (απώλειες) στα απορριπτικά φορτία για τρεις διαφορετικές χρονοαποστάσεις λειτουργίας. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα τρένα της τροχιάς 2 παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.13 και Εικόνα 4.14. Από τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε ότι η μείωση της χρονοαπόστασης βελτιώνει τα προφίλ τάσεων και ρευμάτων στα τρένα και στους υποσταθμούς καθώς αυξάνεται η πιθανότητα της ταυτόχρονης επιτάχυνσης/επιβράδυνσης των τρένων που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις. Έτσι η ενέργεια που παράγεται από ένα τρένο που επιβραδύνει καταναλώνεται τοπικά από ένα άλλο που την ίδια στιγμή επιταχύνει.

Στην Εικόνα 4.15 και Εικόνα 4.16 παρατηρούμε ότι μείωση της χρονοαπόστασης οδηγεί σε μείωση των απωλειών στα απορριπτικά φορτία των τρένων. Η μείωση αυτή εξηγείται και πάλι από το γεγονός ότι για πυκνή κυκλοφορία των τρένων (μικρές τιμές χρονοαπόστασης) αυξάνεται η πιθανότητα της ταυτόχρονης επιτάχυνσης/επιβράδυνσης των τρένων που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις με αποτέλεσμα η παραγόμενη ενέργεια να καταναλώνεται τοπικά από τα τρένα που επιταχύνουν και όχι ως απώλειες πάνω στα απορριπτικά φορτία.

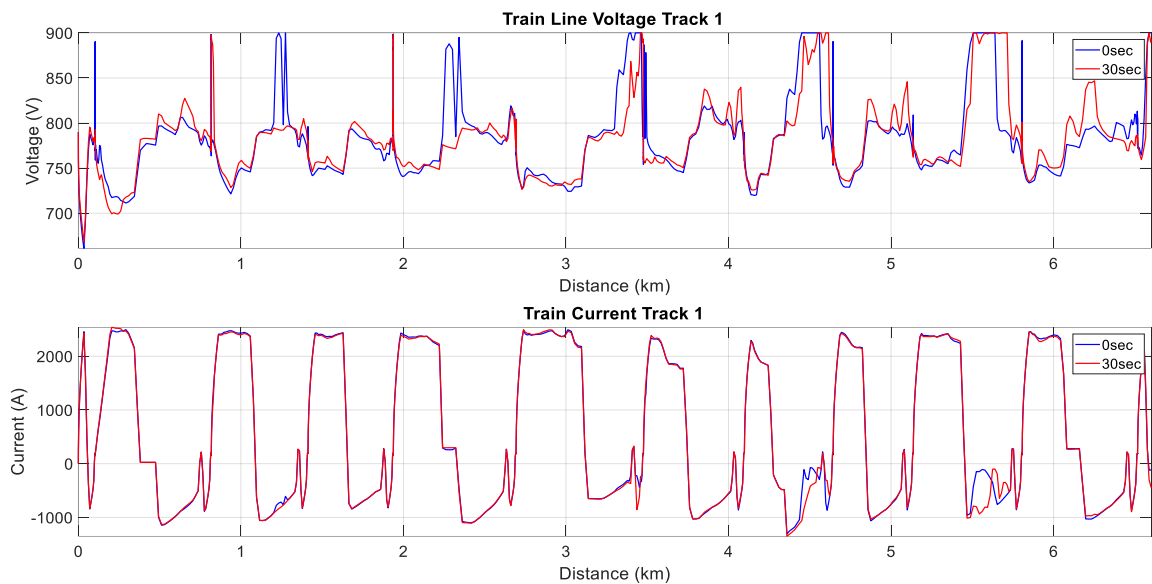
Ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τον ταυτοχρονισμό των επιταχύνσεων/επιβραδύνσεων είναι η σχετική κίνηση των τρένων της τροχιάς 2 σε σχέση με αυτά που κινούνται στην τροχιά 1. Οι παρακάτω εικόνες παρουσιάζουν την επίδραση που έχει μία καθυστέρηση των τρένων της τροχιάς 2 σε σχέση με αυτά που κινούνται στην τροχιά 1. Παρατηρούμε σημαντικές διαφορές στην επίδοση του συστήματος εξαιτίας καθυστερήσεων στα τρένα της τροχιάς 2 οι οποίες εντοπίζονται τόσο στα χαρακτηριστικά μεγέθη τάσης και ρεύματος υποσταθμών και τρένων όσο και στις απώλειες που εμφανίζονται στα απορριπτικά φορτία των τρένων.



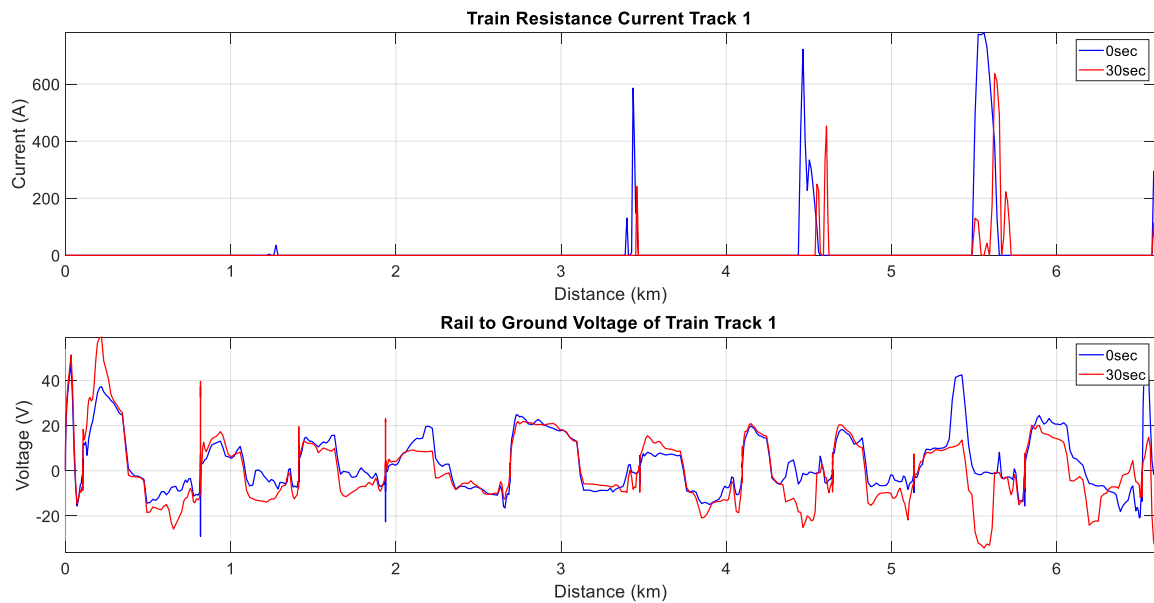
Εικόνα 4.17 Τάση υποσταθμού TS1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



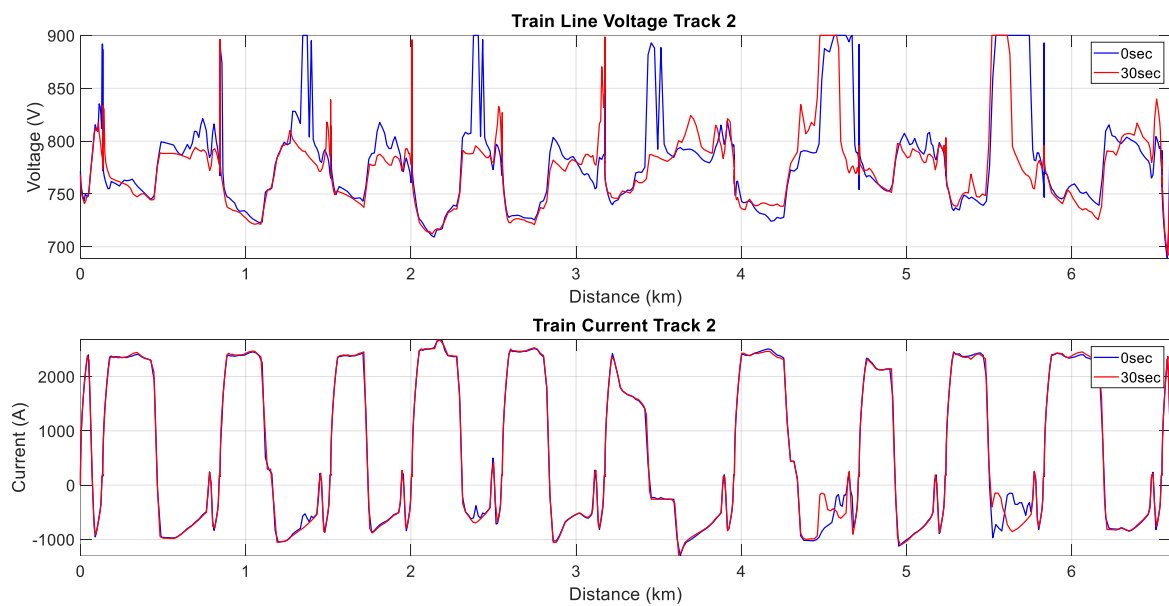
Εικόνα 4.18 Ρεύμα υποσταθμού TS1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



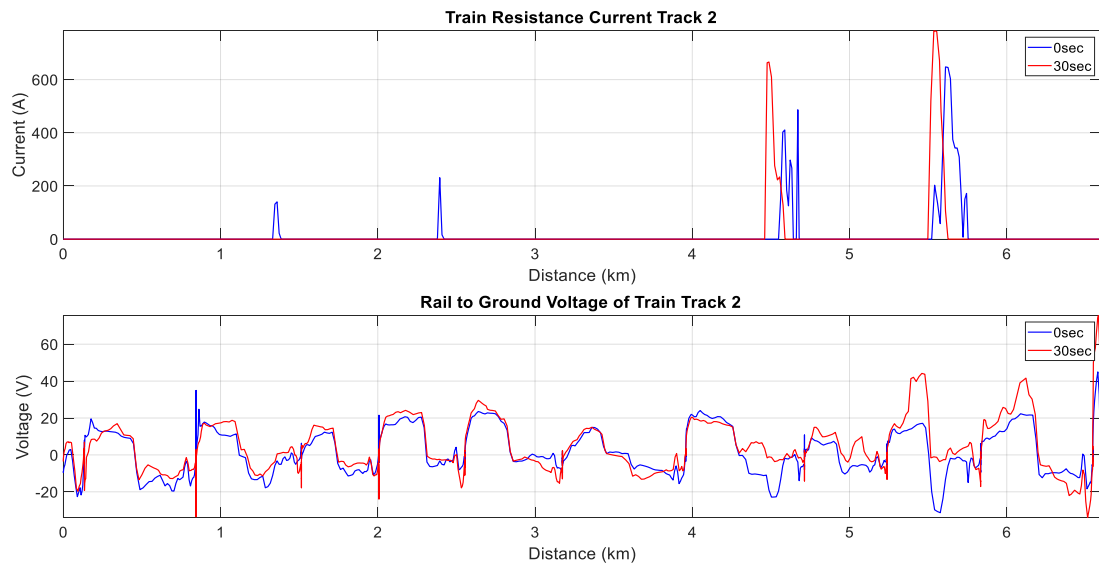
Εικόνα 4.19 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



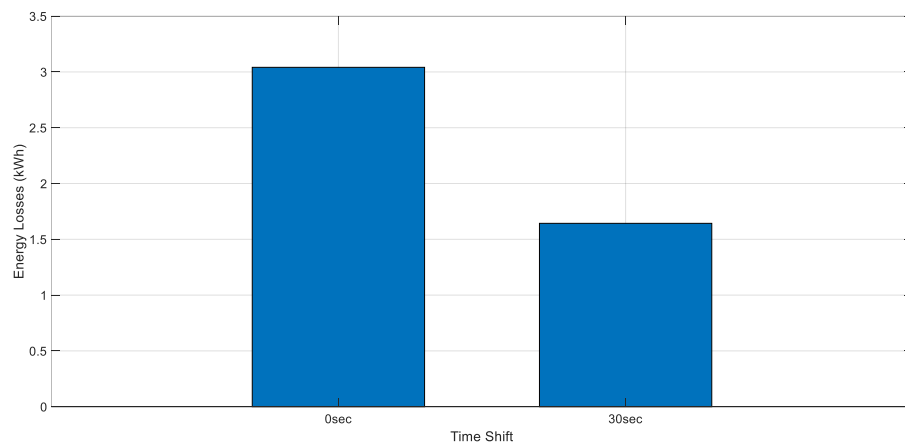
Εικόνα 4.20 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



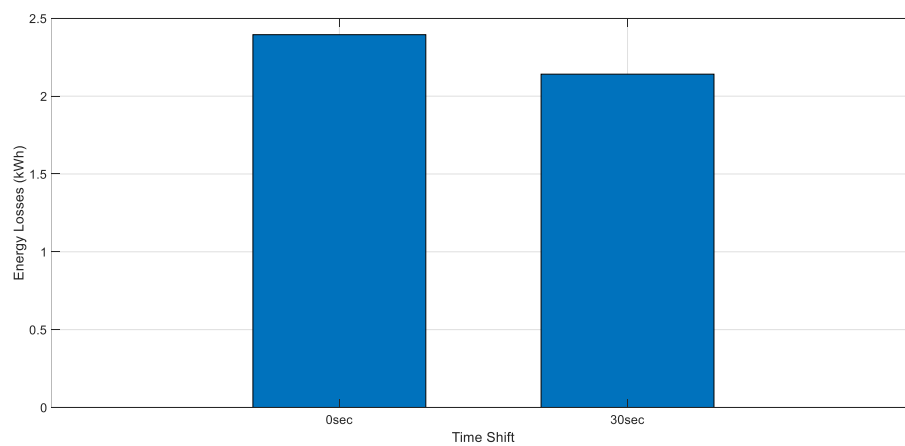
Εικόνα 4.21 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



Εικόνα 4.22 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



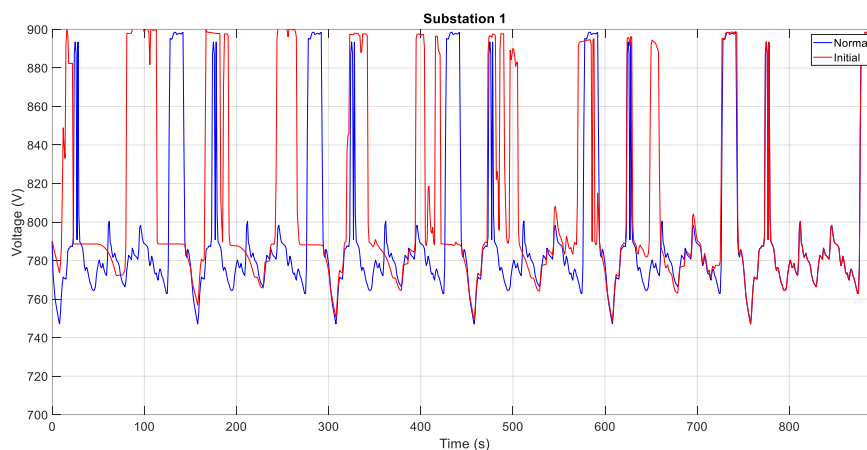
Εικόνα 4.23 Απώλειες στα απορριπτικά φορτία των τρένων της τροχιάς 1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



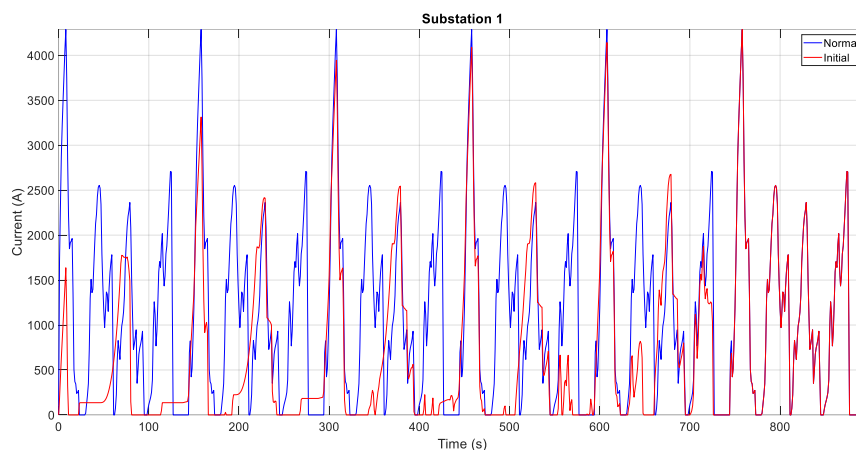
Εικόνα 4.24 Απώλειες στα απορριπτικά φορτία των τρένων της τροχιάς 2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2

Όλες οι παραπάνω γραφικές (Εικόνα 4.17 έως και Εικόνα 4.24) παρουσιάζουν την επίδραση που έχουν τα δρομολόγια των τρένων στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Μία βελτιστοποίηση των δρομολογίων μπορεί να αυξήσει τα οφέλη που προέρχονται από την αναγεννητική πέδηση δίχως να απαιτείται αλλαγή στον εγκατεστημένο εξοπλισμό του δικτύου.

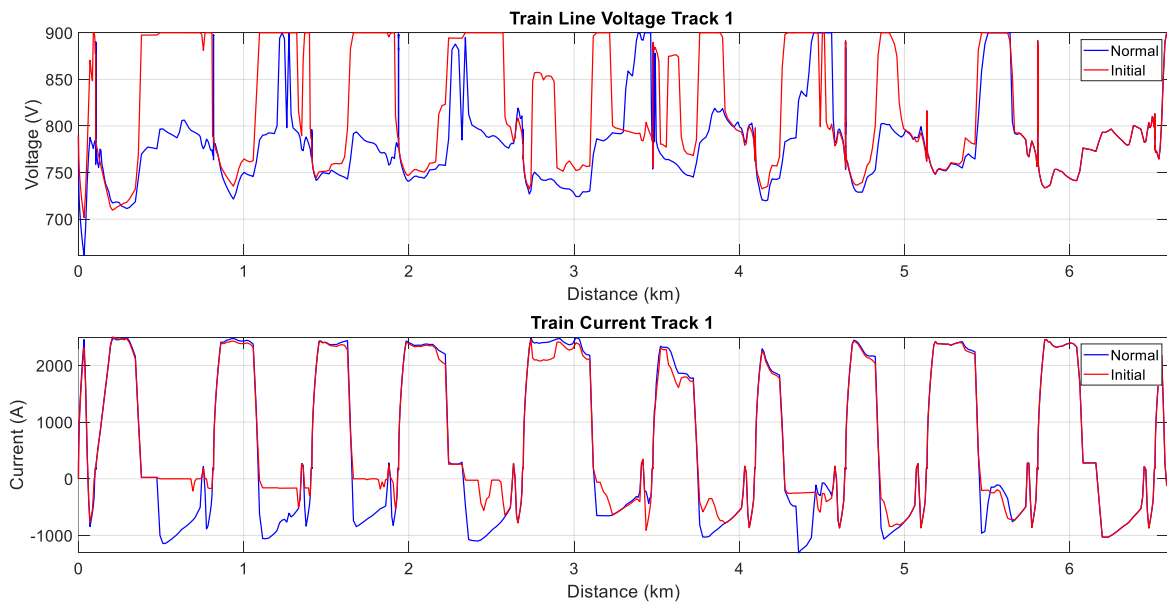
Τέλος, αξίζει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο πως η λειτουργία ενός μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου διακρίνεται σε 2 κύριες φάσεις. Την φάση κατά την εκκίνηση του συστήματος (πρωινές ώρες όπου στο δίκτυο ξεκινούν να εισέρχονται τρένα και στις δύο κατευθύνσεις) και τη φάση κανονικής λειτουργίας όπου όλα τα τρένα κινούνται σε όλο το μήκος των γραμμών. Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4.25 έως Εικόνα 4.30) παρουσιάζονται ορισμένα μεγέθη λειτουργίας του συστήματος για τις δύο αυτές φάσεις. Σε όλες τις γραφικές αυτές παρατηρούμε μία σύγκλιση των δύο καταστάσεων προς το τέλος, πράγμα το οποίο είναι λογικό καθώς η είσοδος ολοένα και περισσότερων τρένων στο δίκτυο οδηγεί στη φάση κανονικής λειτουργίας.



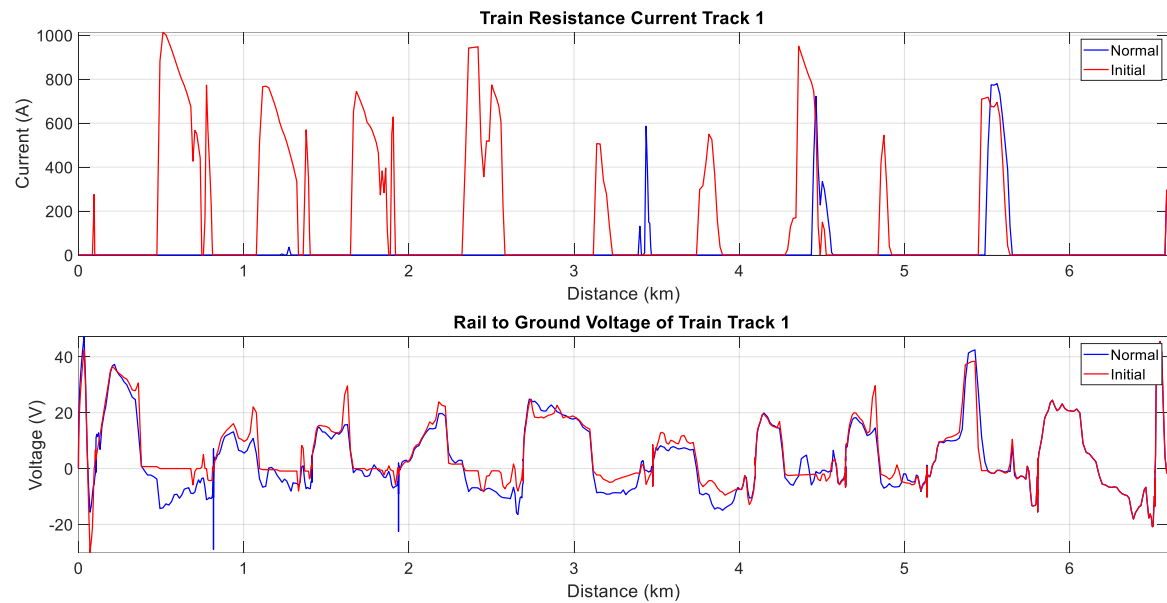
Εικόνα 4.25 Τάση υποσταθμού TS1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



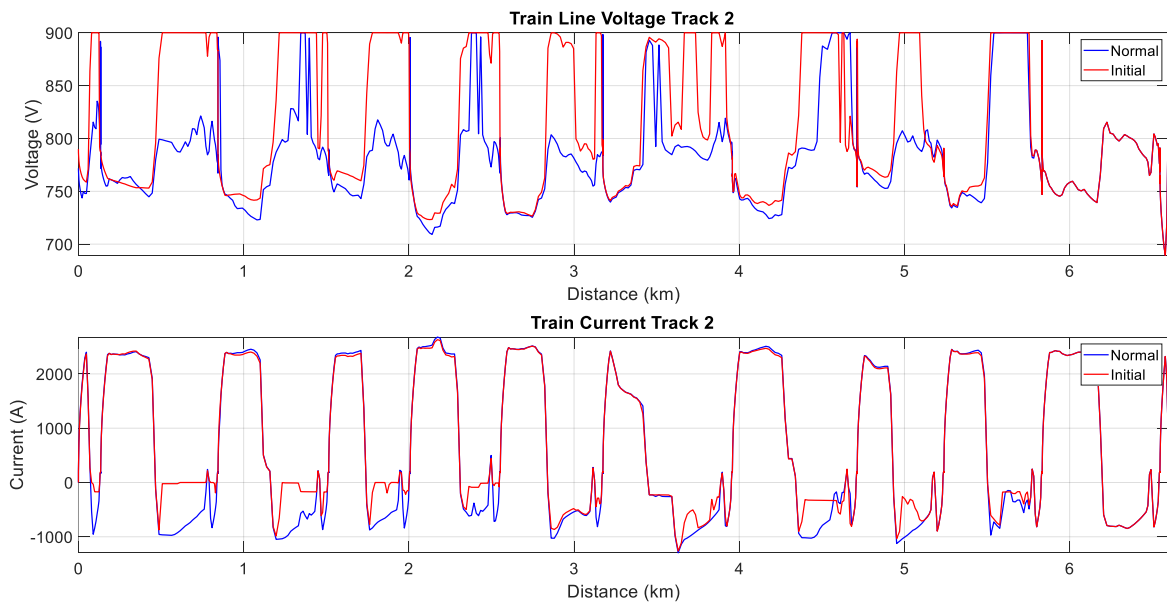
Εικόνα 4.26 Ρεύμα υποσταθμού TS1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



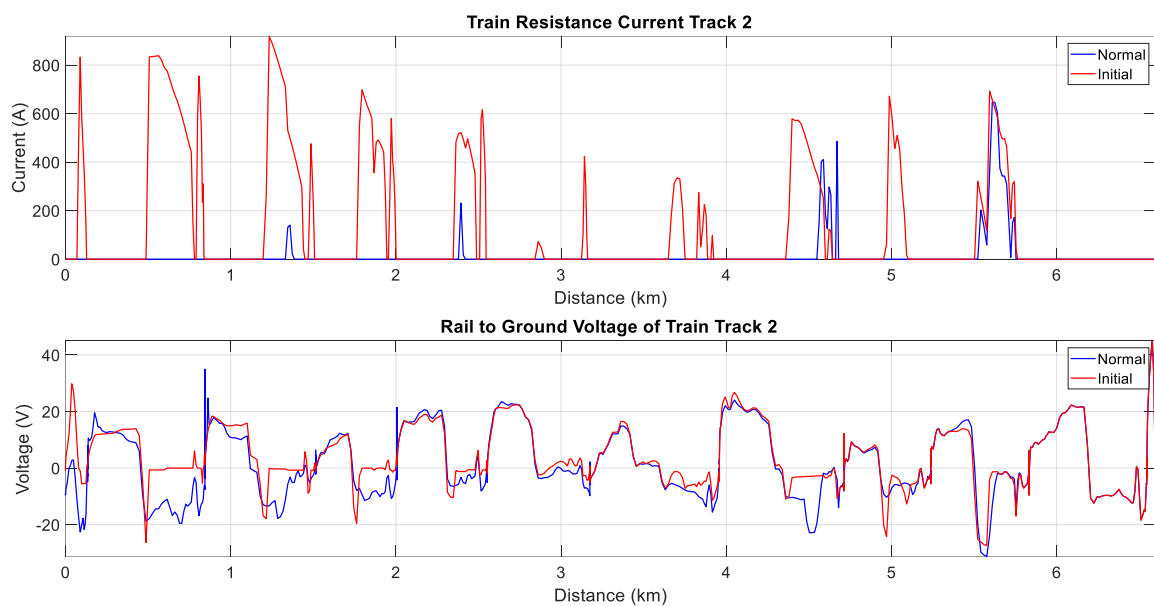
Εικόνα 4.27 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



Εικόνα 4.28 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



Εικόνα 4.29 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



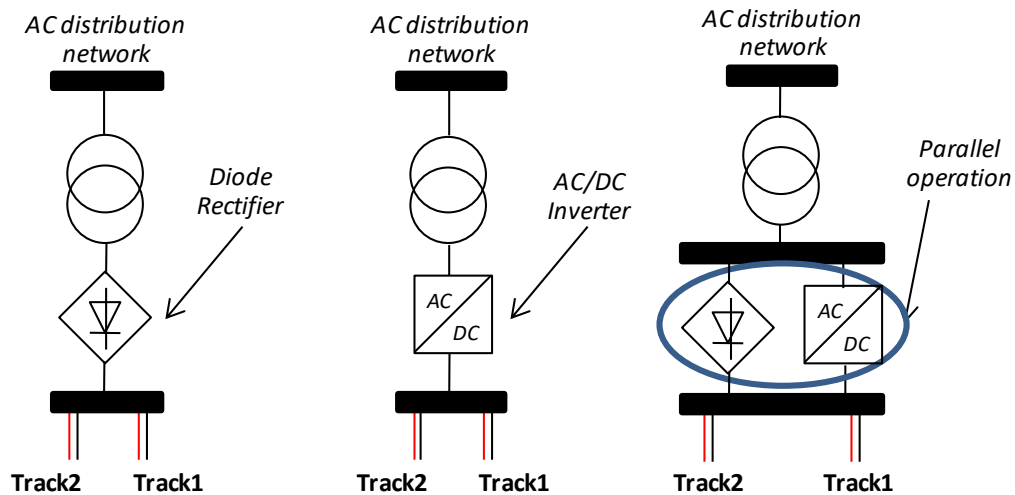
Εικόνα 4.30 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)

4.3.2 Αμφίδρομοι υποσταθμοί έλξης

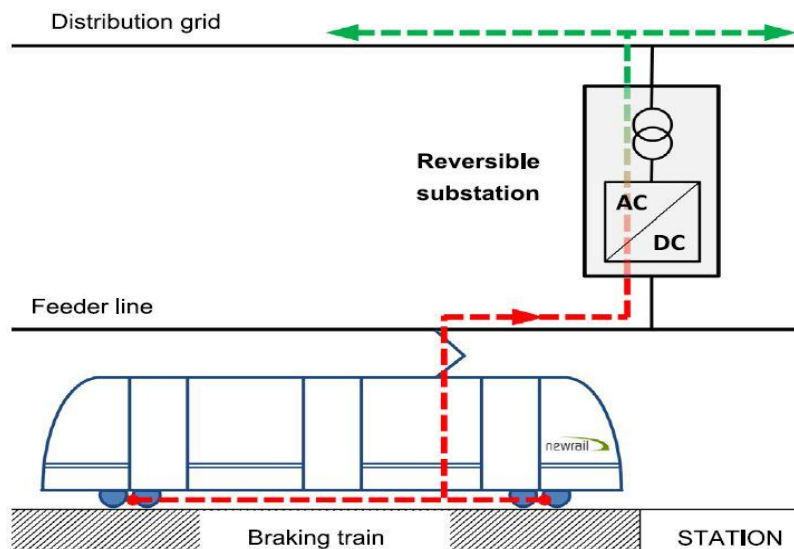
Στα περισσότερα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα οι εγκατεστημένοι υποσταθμοί βασίζονται σε ανορθωτές διόδου για μετατροπή της εναλλασσόμενης σε συνεχή τάση και δεν επιτρέπουν αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ του δικτύου διανομής και του σιδηροδρομικού δικτύου. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αύξηση της τάσης κατά μήκος της γραμμής μέχρι το επίπεδο που ενεργοποιούνται τα απορριπτικά φορτία των τρένων για

τη διατήρηση σταθερής τάσης. Στα δίκτυα με ονομαστική τάση 750V η επιτρεπτή αύξηση τάσης είναι 900V.

Η Εικόνα 4.31 παρουσιάζει τρεις διαφορετικές τοπολογίες υποσταθμών έλξης δύο εκ των οποίων επιτρέπουν αμφίδρομη λειτουργία και βασίζονται σε ελεγχόμενους μετατροπείς ισχύος AC/DC [93]-[95], [99][101]-[100]. Στο επόμενο κεφάλαιο, ως αμφίδρομος υποσταθμός αναφέρεται ένας ανορθωτής διόδων παράλληλα με έναν ελεγχόμενο αντιστροφέα ισχύος DC/AC.



Εικόνα 4.31 Διάφοροι τύποι ηλεκτρικών υποσταθμών έλξης



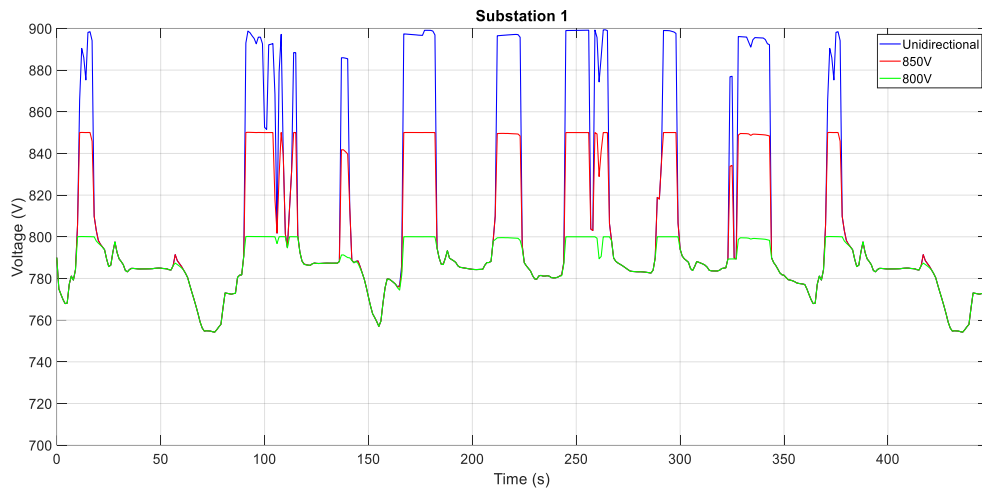
Εικόνα 4.32 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας αμφίδρομου υποσταθμού σε αστικό σιδηροδρομικό δίκτυο [95]

Η διαστασιολόγηση των ηλεκτρικών υποσταθμών έλξης θα πρέπει να ακολουθεί τα πρότυπα EN 50328 και EN 50329. Στα πρότυπα αυτά ορίζεται η αδιάλειπτη λειτουργία των υποσταθμών σε συνθήκες υπερφόρτισης (150% για 2 ώρες, 300% για 60 λεπτά).

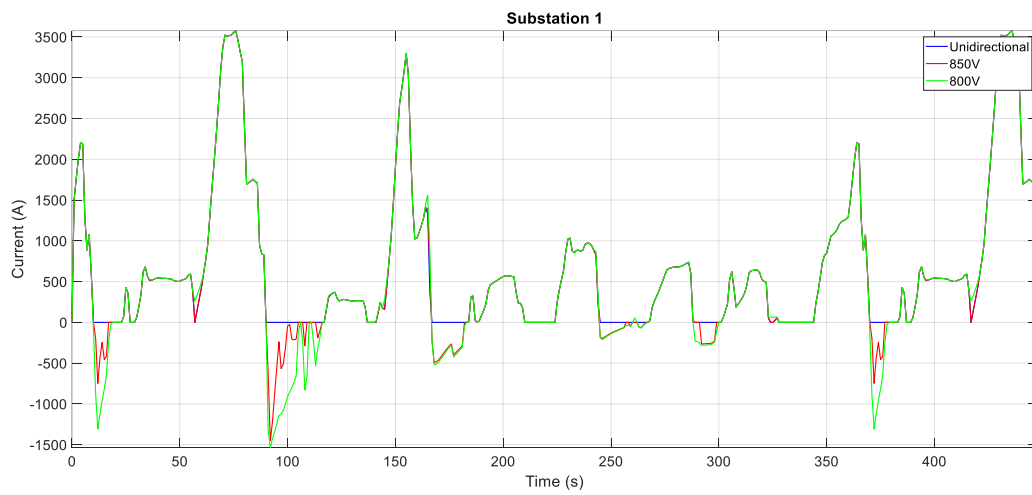
Επιπλέον, η διαστασιολόγηση των υποσταθμών θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν την αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες όπου ένας υποσταθμός είναι εκτός λειτουργίας καθώς και τον ταυτοχρονισμό των τρένων στις 2 τροχιές. Το Παράρτημα Β περιέχει τα βασικά τμήματα των προτύπων EN 50328 και EN 50329 τα οποία αναφέρονται στην υπερφόρτιση των υποσταθμών έλξης. Επιπλέον, το Παράρτημα Β περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την διαστασιολόγηση των υποσταθμών του δικτύου της Εικόνα 4.8 με βάση τα παραπάνω κριτήρια. Εν τέλει η επιλογή υποσταθμών ισχύος 3MW (Πίνακας 4.1) ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η επιστροφή ισχύος πίσω στο δίκτυο διανομής μέσω των ηλεκτρικών υποσταθμών ενεργοποιείται με τη μέτρηση της DC τάσης στο σημείο σύνδεσης. Όταν η τάση υπερβεί ένα καθορισμένο όριο, π.χ. 850V, τότε ο αντιστροφέας αρχίζει να τροφοδοτεί ενέργεια πίσω στο δίκτυο διανομής διατηρώντας σταθερή την τάση σε αυτό το όριο αναφοράς. Η επιλογή του ορίου καθορίζει και την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των τρένων. Μία τιμή κοντά στην τάση "κενού φορτίου" των υποσταθμών έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της αναγεννητικής ενέργειας να επιστρέφει πίσω στο δίκτυο και το υπόλοιπο να ανταλλάσσεται μεταξύ των τρένων. Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου το όριο αυτό επιλεγεί κοντά στη μέγιστη τάση των υποσταθμών η ποσότητα ενέργειας που επιστρέφεται στο δίκτυο μειώνεται. Σε κάθε περίπτωση, η πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το εσωτερικό δίκτυο (π.χ. φωτισμός, συστήματα ψύξης κ.λπ.) ή να παρέχεται πίσω στο δίκτυο διανομής Μέσης Τάσης ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Να σημειώσουμε ότι η παραπάνω στρατηγική είναι μία στρατηγική τοπικού ελέγχου χωρίς συντονισμό των ηλεκτρικών υποσταθμών έλξης. Ένα από τα μειονεκτήματα αυτής της στρατηγικής είναι ότι η εγκατάσταση αντιστροφέων μπορεί να δημιουργήσει ζητήματα ποιότητας ισχύος π.χ. με την έγχυση αρμονικών ή ανεπιθύμητης αέργου ισχύος πίσω στο δίκτυο διανομής [100], [101].

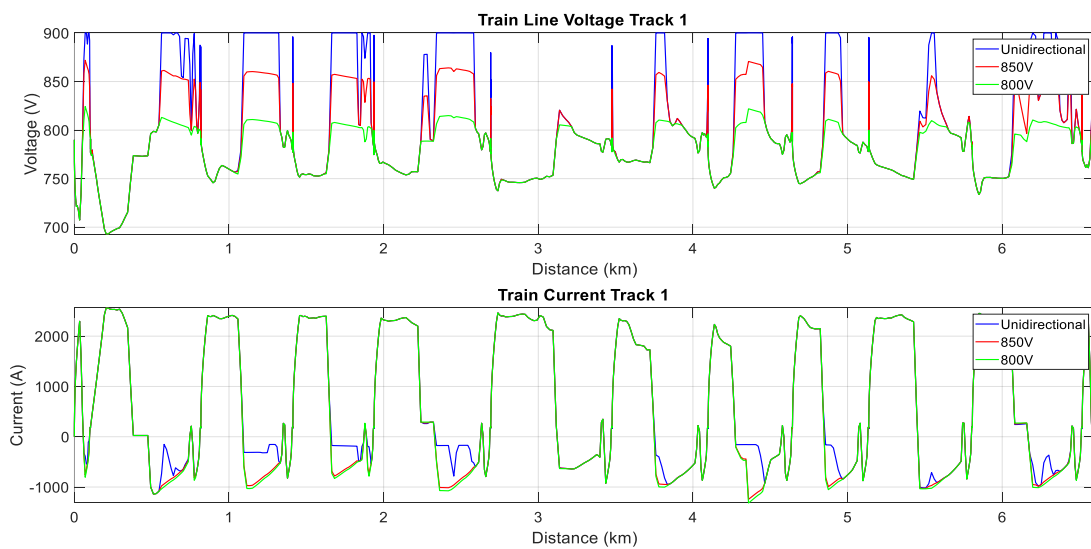
Οι παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4.33 έως Εικόνα 4.39) αφορούν τη λειτουργία του σιδηροδρομικού δικτύου (Εικόνα 4.8) για τα σενάρια της ύπαρξης ή όχι αμφίδρομων υποσταθμών. Στις εικόνες αυτές παρουσιάζεται επιπλέον η επίδραση που έχει η επιλογή του ορίου έναρξης της επιστροφής ισχύος στο δίκτυο (850V ή 800V). Στην Εικόνα 4.33 και Εικόνα 4.34 παρατηρούμε πως η επιλογή του ορίου στα 800V οδηγεί σε μείωση της τάσης του υποσταθμού TS1 με αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος επιστροφής (αρνητικές τιμές ρεύματος στην Εικόνα 4.34). Επιπλέον, η επιλογή και των δύο ορίων τάσης οδηγεί σε μηδενισμό των απωλειών στα απορριπτικά φορτία. Παρόλα αυτά όμως η επιλογή του ορίου των 800V οδηγεί σε μείωση της συνολικής ενέργειας που απορροφάται από τους υποσταθμούς (από 452.92kWh σε 407.64kWh).



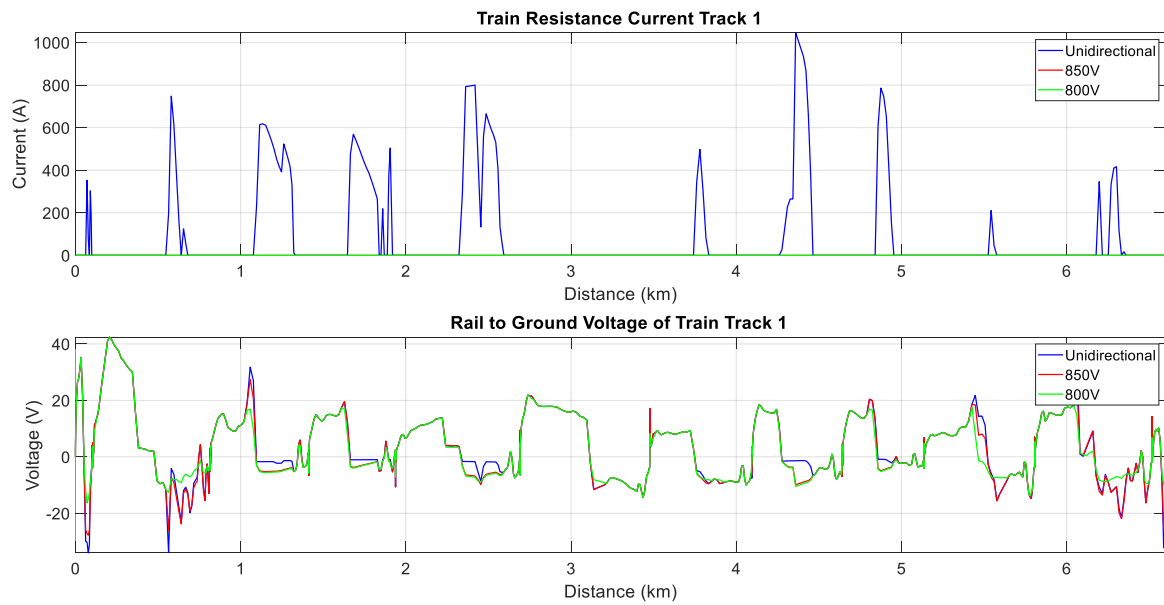
Εικόνα 4.33 Τάση υποσταθμού TS1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



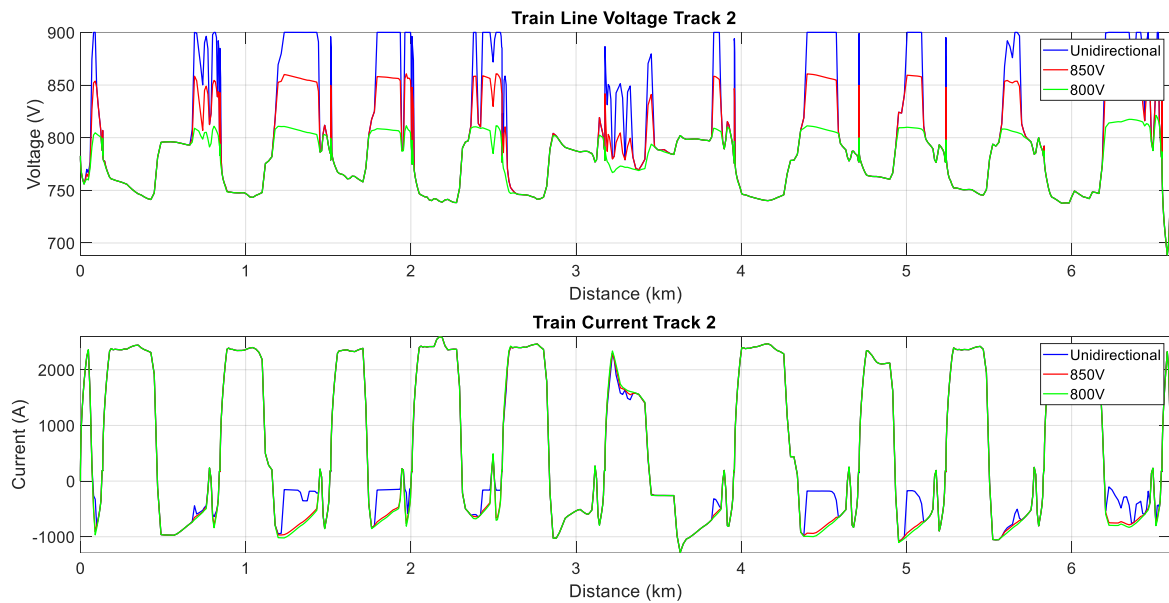
Εικόνα 4.34 Ρεύμα υποσταθμού TS1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



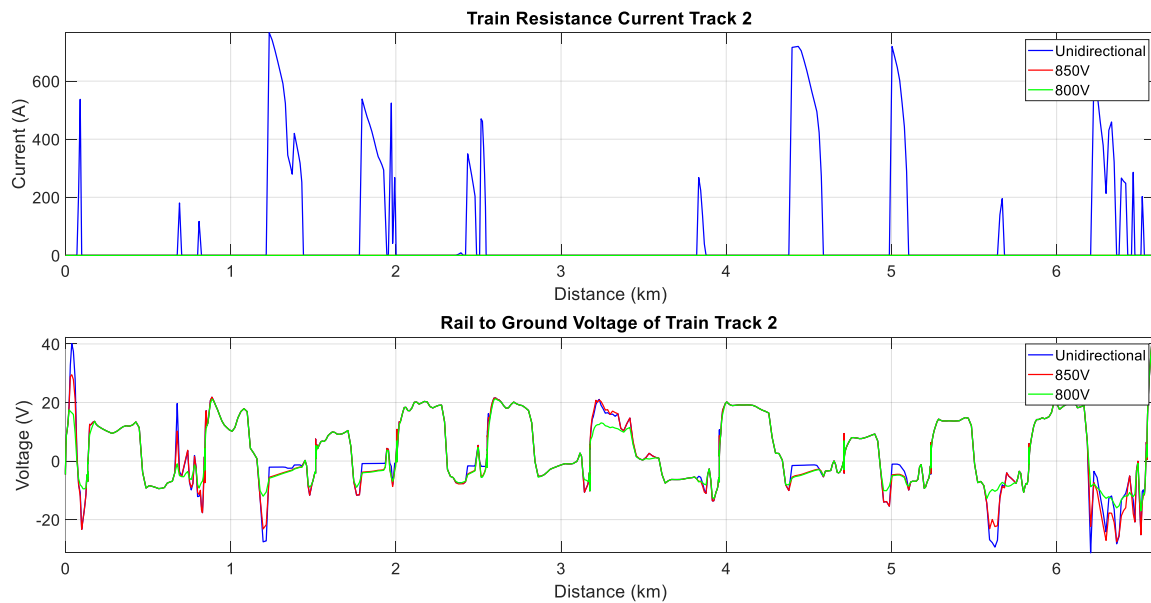
Εικόνα 4.35 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



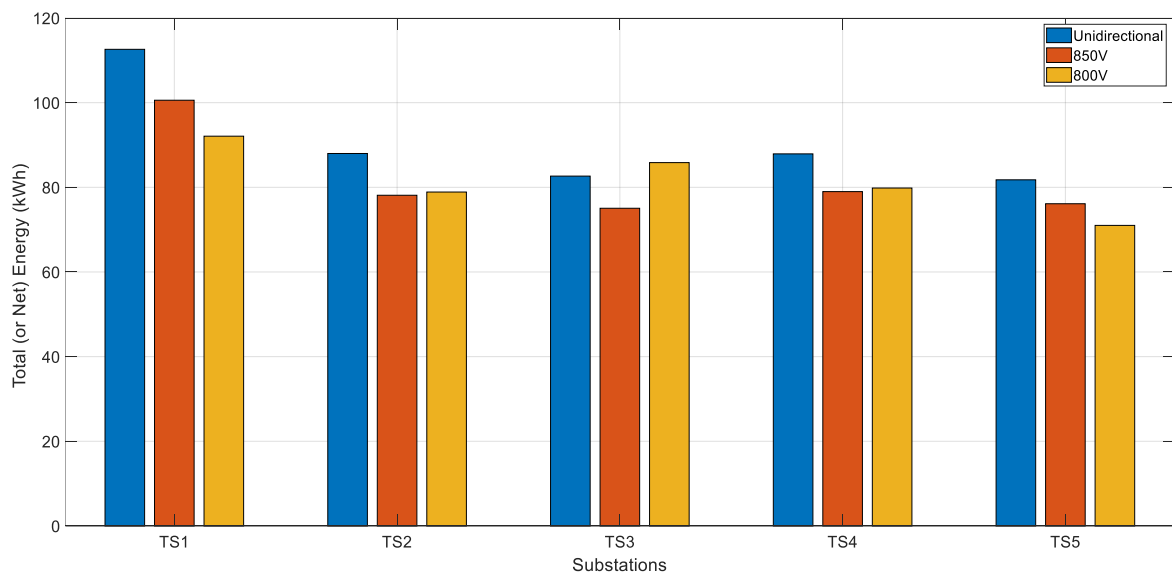
Εικόνα 4.36 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



Εικόνα 4.37 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



Εικόνα 4.38 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



Εικόνα 4.39 Συνολική ενέργεια υποσταθμών για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς

4.3.3 Συστήματα αποθήκευσης

4.3.3.1 Τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στις σιδηροδρομικές εφαρμογές

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. Σήμερα υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης διαθέσιμες στην αγορά οι οποίες

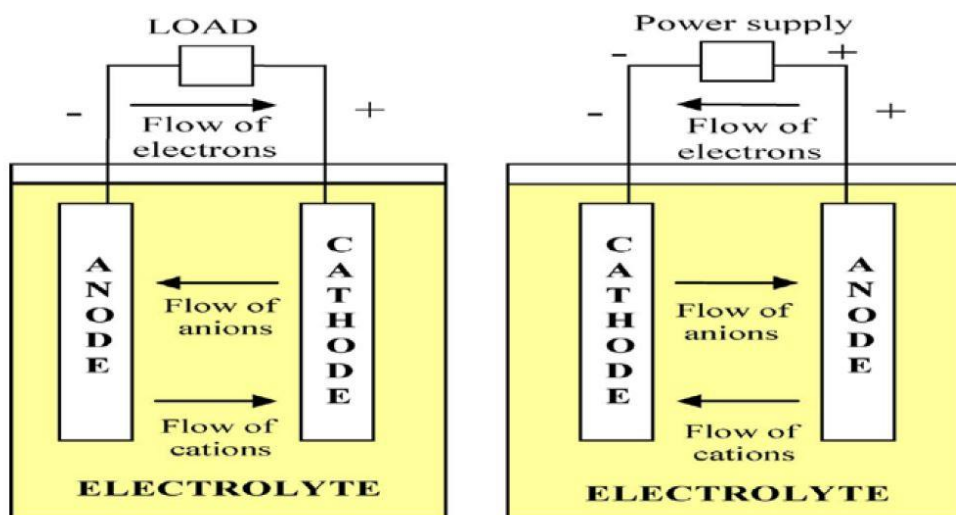
ανάλογα με τον τρόπο που αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μηχανικές, ηλεκτροχημικές κ.α. [25], [95].

Στη συγκεκριμένη ενότητα, 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.

4.3.3.1.1 Ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές

Οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές (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.

Στην Εικόνα 4.40 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. Ακολουθώντας, 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 άνοδου και καθόδου. Τέλος, για ηλεκτρική μόνωση χρησιμοποιούνται διαχωριστές ανάμεσα στα θετικά και τα αρνητικά ηλεκτρόδια [97].



Εικόνα 4.40 Διάγραμμα ηλεκτροχημικού στοιχείου [97]

Ανάλογα με την χημική σύστασή τους, οι συσσωρευτές μπορούν να προσφέρουν μεγάλο πλήθος χαρακτηριστικών λειτουργίας για διάφορες εφαρμογές. Μια πιο αναλυτική

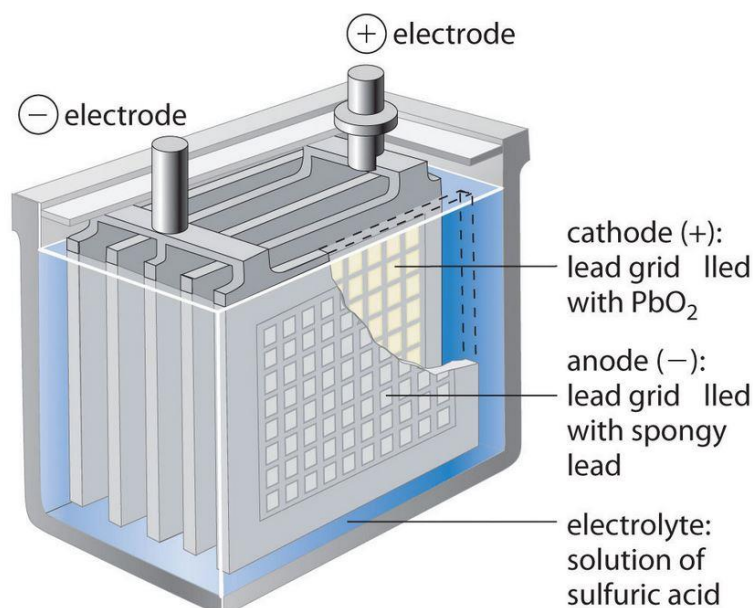
περιγραφή των σημαντικότερων και πιο υποσχόμενων τεχνολογιών συσσωρευτών για αποθήκευση ενέργειας στα σιδηροδρομικά δίκτυα παρουσιάζεται στη συνέχεια.

A. 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. 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. 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 [98].

Το συγκεκριμένο είδος συσσωρευτών, χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλά κόστη, 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 μόλυβδο με ελαφρύτερα υλικά, όπως για παράδειγμα με άνθρακα ο οποίος μπορεί να επιτρέψει την ευρύτερη χρήση τους στις εν λόγω εφαρμογές [95].



Εικόνα 4.41 Συσσωρευτής μολύβδου-οξέος [25]

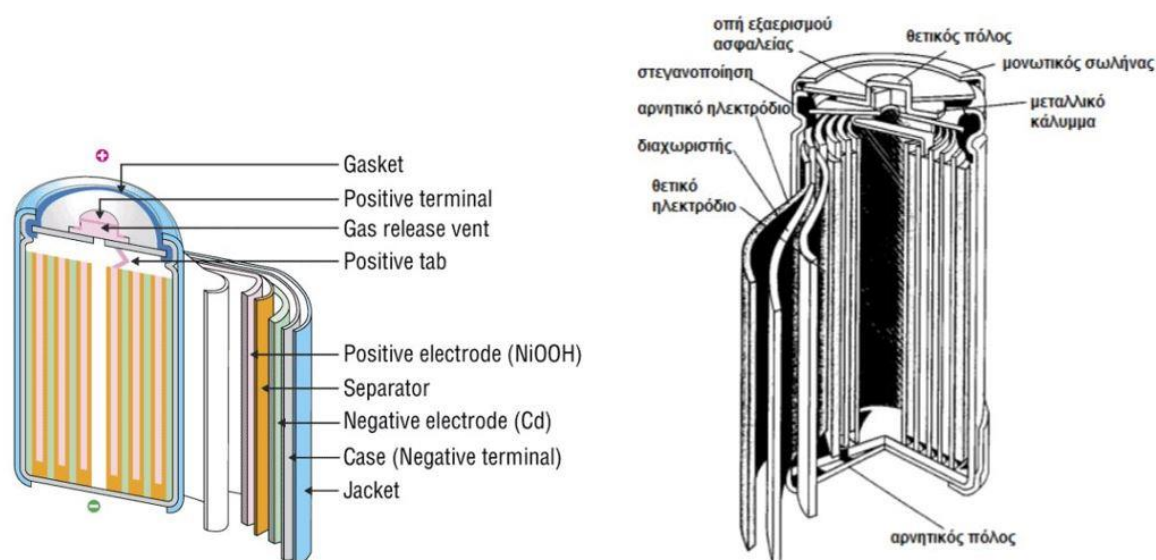
B. Συσσωρευτές νικελίου

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 [95].

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 τη 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.

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 από 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. 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. 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 [95].



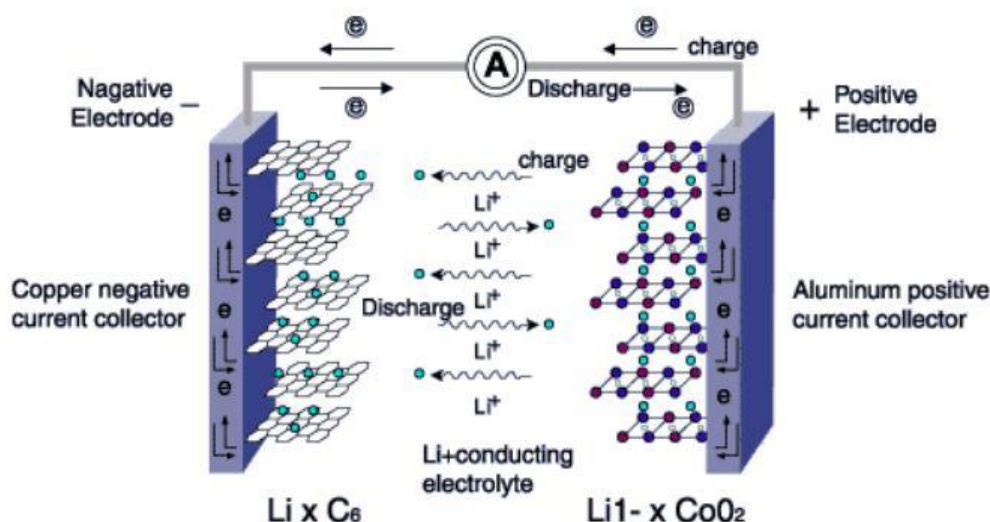
Εικόνα 4.42 Συσσωρευτής νικελίου-καδμίου και κυλινδρική διάταξη νικελίου-μετάλλου υδριδίου [96]

Γ. 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 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 στέρεο 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. 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.

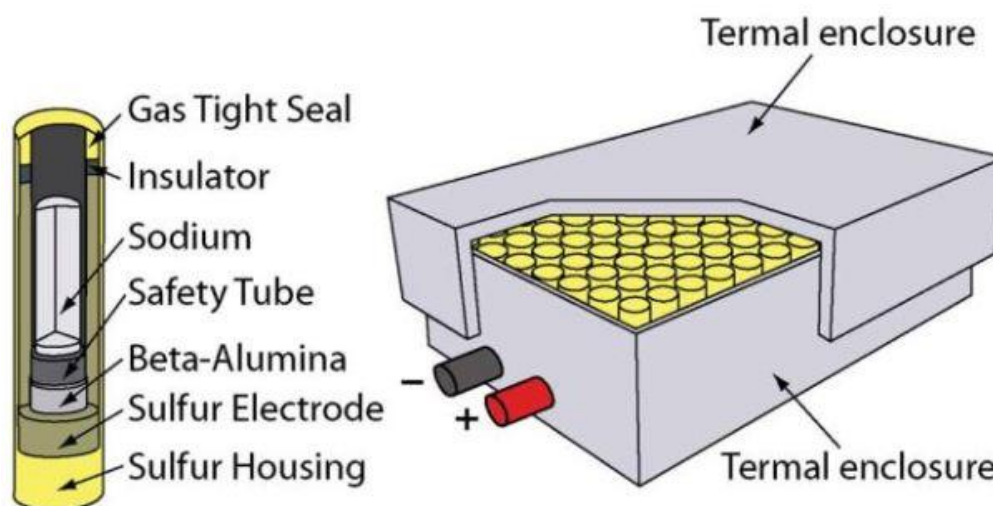


Εικόνα 4.43 Συσσωρευτής ιόντων-λιθίου [25]

Δ. 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) [95].

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. 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.



Εικόνα 4.44 Συσσωρευτής θειούχου νατρίου [25]

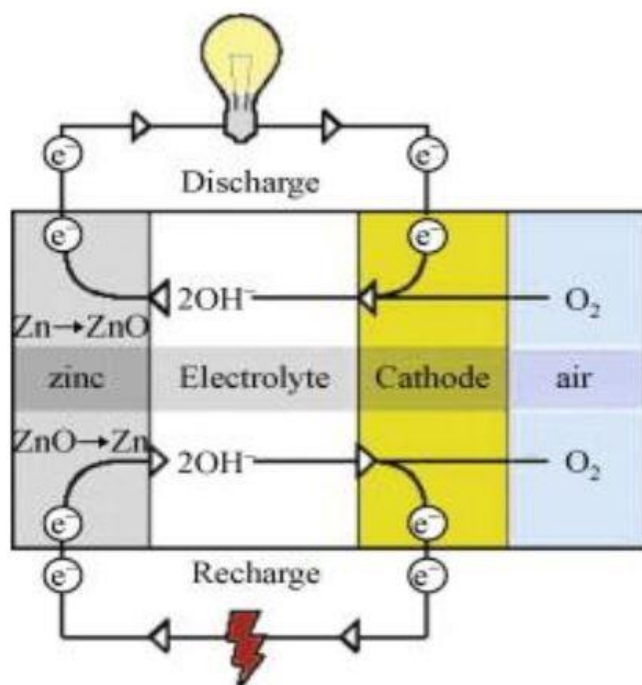
Οι συσσωρευτές ZEBRA ξεκίνησαν να χρησιμοποιούνται σχετικά πρόσφατα. Λειτουργούν στους 245°C και χρησιμοποιούν τετηγμένο νάτριο ως αρνητικό ηλεκτρόδιο, ενώ το θετικό ηλεκτρόδιο είναι νικέλιο κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης και χλωριούχο νικέλιο κατά τη διαδικασία φόρτισης. Αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες χρησιμοποιούν τα τελευταία χρόνια αυτούς τους συσσωρευτές στα ηλεκτρικά οχήματα που κατασκευάζουν.

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 [95].

Ε. Συσσωρευτές μετάλλου - αέρα

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) [95]. 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 οξείδωσης. Τα ηλεκτρόνια καθώς έλκονται από την κάθοδο (αέρα) και καθώς ρέουν σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, δημιουργούν διαφορά δυναμικού στα άκρα της μπαταρίας.

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 [95].



Εικόνα 4.45 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μπαταριών μετάλλου-αέρα [25]

4.3.3.1.2 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:

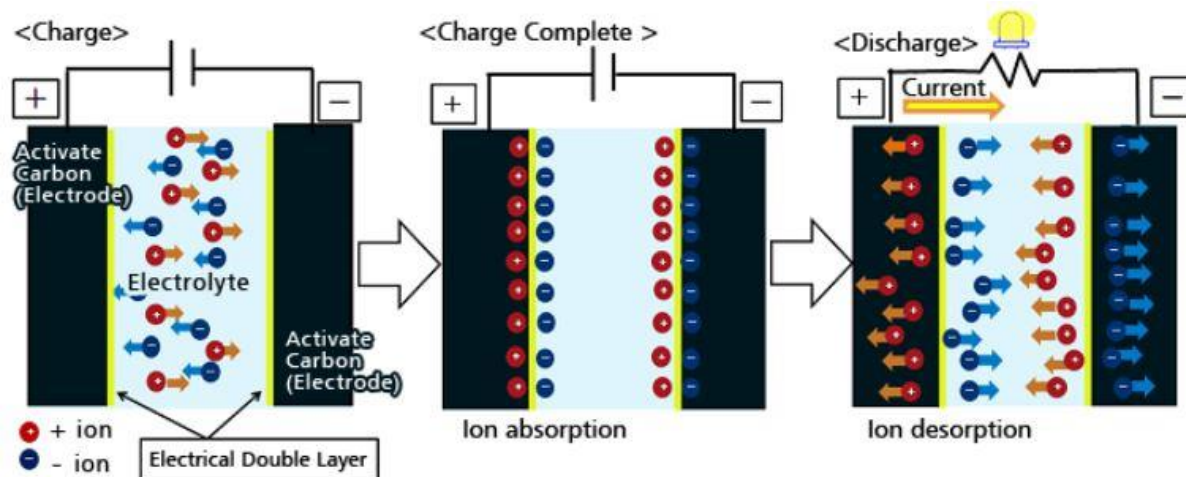
$$Q = CV = \frac{A\varepsilon}{d}V \quad (4.5)$$

όπου A είναι το εμβαδόν των πλακών, ε η επιτρεπτότητα του διηλεκτρικού υλικού και d η απόσταση μεταξύ των πλακών [98].

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, [95] 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.

Μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τους υπερπυκνωτές αποτελούν οι υψηλοί δείκτες αυτο-εκφόρτισης που παρουσιάζουν, φαινόμενο με βάση το οποίο εσωτερικές 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 [95]. 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.

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 [95].



Εικόνα 4.46 Σχηματική αναπαράσταση και λειτουργία ιδανικού υπερπυκνωτή [25]

4.3.3.1.3 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:

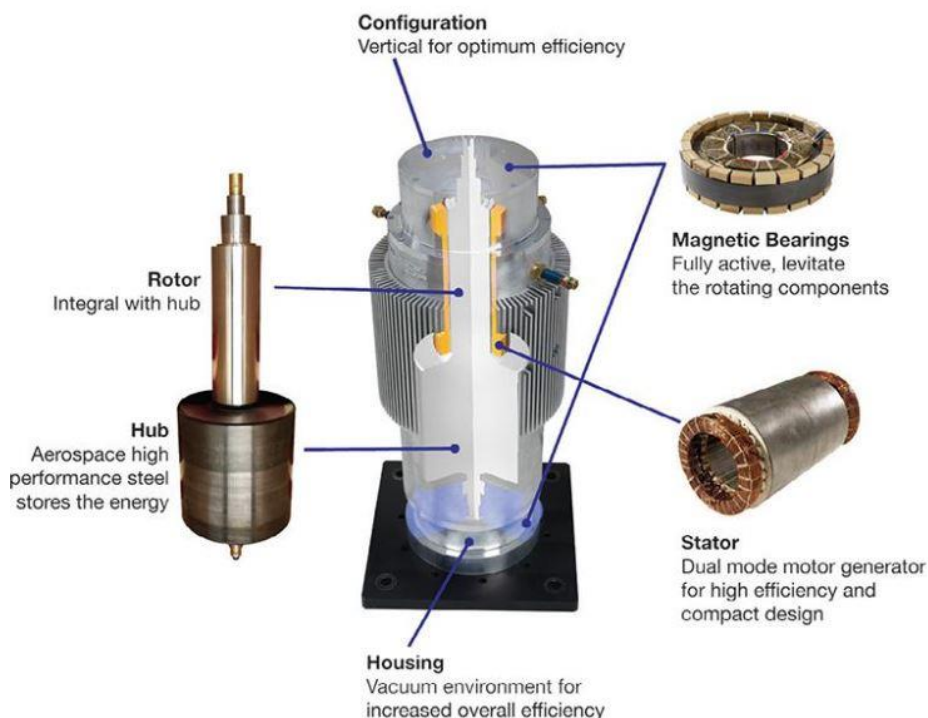
- 1) Ο δρομέας
- 2) Ο άξονας
- 3) Το δοχείο κενού που το περιβάλλει
- 4) Η ηλεκτρική μηχανή

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 [95].



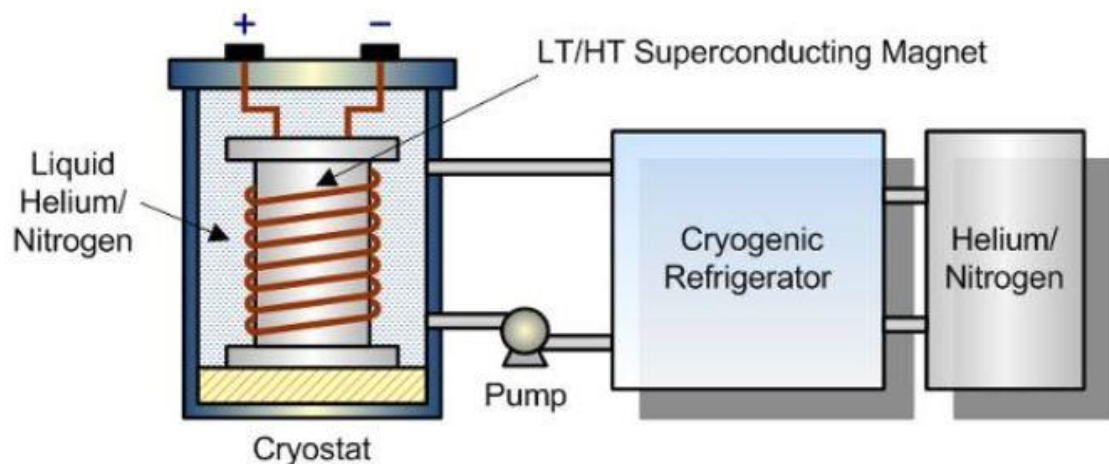
Εικόνα 4.47 Σφόνδυλος υπερυψηλής ταχύτητας [25]

4.3.3.1.4 Υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Τα υπεραγώγιμα 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 υπεραγώγιμου πηνίου είναι τέτοια ώστε να εμφανίζουν σχεδόν μηδενική αντίσταση στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην επ' αόριστο 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 υπεραγώγιμα μαγνητικά συστήματα αποθήκευσης, είναι η υψηλή ενεργειακή απόδοσή τους και οι ταχύτατοι χρόνοι απόκρισης κατά τις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης. 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 [97].

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 χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τα καθιστούν ενδεχομένως κατάλληλα για τις σιδηροδρομικές εφαρμογές, ειδικά στην περίπτωση χρήσης τους ως στατικά συστήματα αποθήκευσης [95].



Εικόνα 4.48 Υπεραγώγιμο μαγνητικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας [25]

4.3.3.2 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 υπεραγωγίων μαγνητικών συστημάτων σε πραγματικές εφαρμογές, δεν έχει επεκταθεί σε μεγάλο βαθμό, ενώ η τεχνολογία των μπαταριών μετάλλου-αέρα, θεωρείται πρώιμη και βρίσκεται ακόμα υπό ανάπτυξη. Συνεπώς, απαιτείται περισσότερη έρευνα για την αποτελεσματική χρήση της σε εφαρμογές κίνησης.

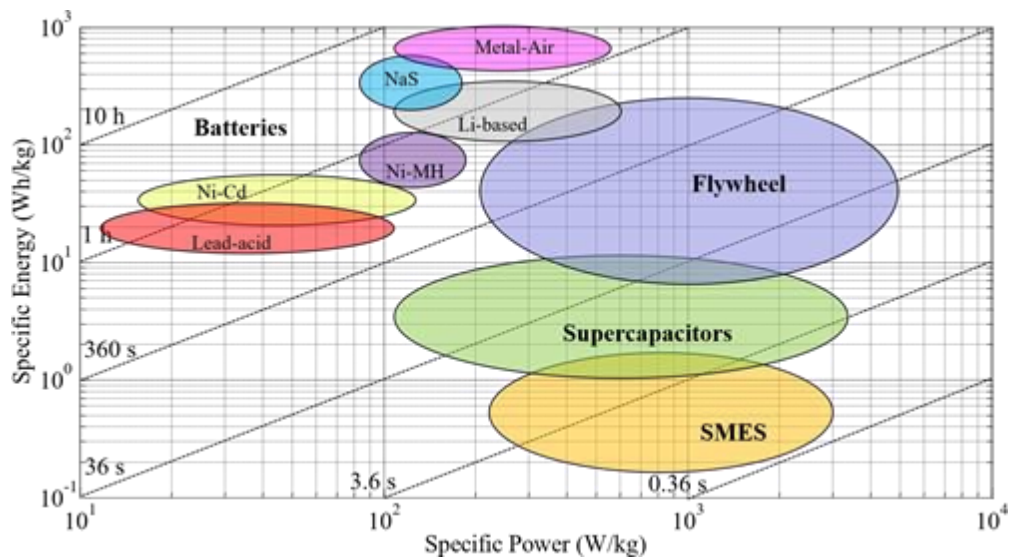
Οι πυκνότητες ενέργειας και ισχύος που χαρακτηρίζουν κάθε σύστημα αποθήκευσης, αποτελούν επίσης σημαντικούς παράγοντες για τις σιδηροδρομικές εφαρμογές. Ειδικότερα στην περίπτωση των κινητών εφαρμογών, όπου το βάρος και ο χώρος που καταλαμβάνουν τα συστήματα είναι κρίσιμης σημασίας, οι παράμετροι αυτοί 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 υπεραγωγία 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 υπεραγωγία 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 ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές σταθεροποίησης τάσης και ψαλιδισμού των αιχμών ισχύος στο δίκτυο.

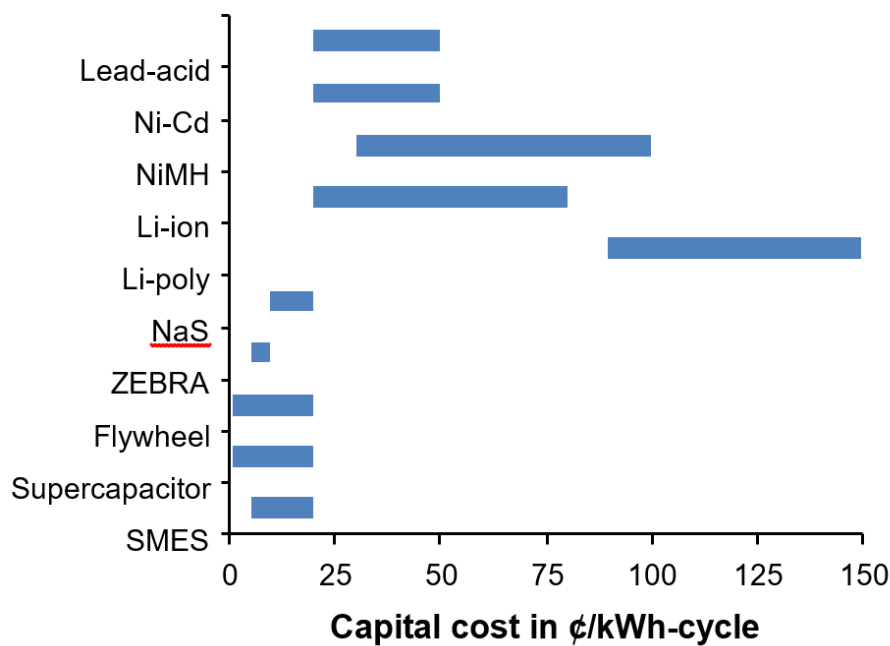
Η αποδοτικότητα και ο δείκτης αυτό-εκφόρτισης κάθε συστήματος, είναι επίσης δύο σημαντικές παράμετροι που οφείλουν να λαμβάνονται υπόψη σε κάθε αξιολόγηση, δεδομένου ότι έχουν ισχυρή επίδραση στα τελικά συνολικά κόστη κάθε εφαρμογής. Χαμηλά ποσοστά απόδοσης σε συνδυασμό με υψηλούς δείκτες αυτό-εκφόρτισης, 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. 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 [95].



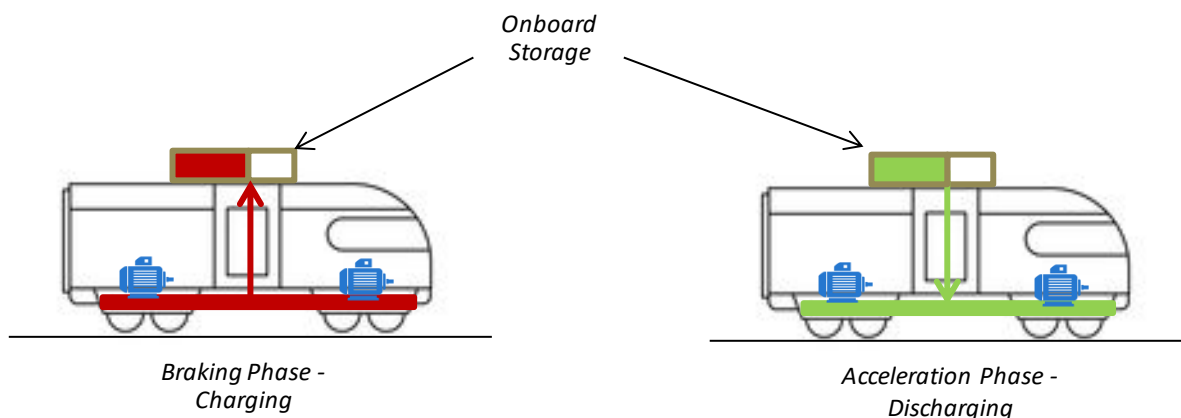
Εικόνα 4.49 Ragone διάγραμμα με τα χαρακτηριστικά διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης για χρήση σε σιδηροδρομικές εφαρμογές [25]



Εικόνα 4.50 Σύγκριση κόστους διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης για χρήση σε σιδηροδρομικές εφαρμογές [95]

4.3.3.3 Κινητές μονάδες αποθήκευσης

Η ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια της πέδησης μπορεί να αποθηκευτεί τοπικά και να χρησιμοποιηθεί σε μία μεταγενέστερη φάση κατά τη διάρκεια της επιτάχυνσης του τρένου όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.51.



Εικόνα 4.51 Λειτουργία κινητών μονάδων αποθήκευσης στα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα.

Οι κινητές μονάδες αποθήκευσης 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.
- Ορισμένη αυτονομία λειτουργίας των οχημάτων η οποία μπορεί να είναι απαραίτητη σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου η τροφοδότηση από τους ηλεκτρικούς υποσταθμούς είναι αδύνατη.

Η εγκατάσταση συσκευών αποθήκευσης όχι μόνο οδηγεί σε μείωση των απωλειών, καθώς μειώνεται η ροή ισχύος κατά μήκος της γραμμής, αλλά και σε ομαλότερα προφίλ τάσης δίχως να απαιτείται οποιαδήποτε αλλαγή στις υποδομές του συστήματος. Ωστόσο η εγκατάσταση συσκευών αποθήκευσης σε ένα όχημα απαιτεί επαρκή χώρο προσθέτοντας παράλληλα επιπλέον βάρος που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα δυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Ως αποτέλεσμα η εγκατάσταση κινητών μονάδων αποθήκευσης είναι προτιμητέα σε νέες εγκαταστάσεις δεδομένου ότι οι απαιτήσεις τους μπορούν να συμπεριληφθούν στη διαδικασία σχεδιασμού των οχημάτων.

Ορισμένες ενδιαφέρουσες μελέτες σχετικά με τη χρήση κινητών μονάδων αποθήκευσης αναφέρονται στις [102]-[106]. Οι εν λόγω δημοσιεύσεις ασχολούνται με τη βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση του κόστους στα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά συστήματα στα οποία τα τρένα είναι εξοπλισμένα με κινητές μονάδες αποθήκευσης.

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.

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 (4.6)

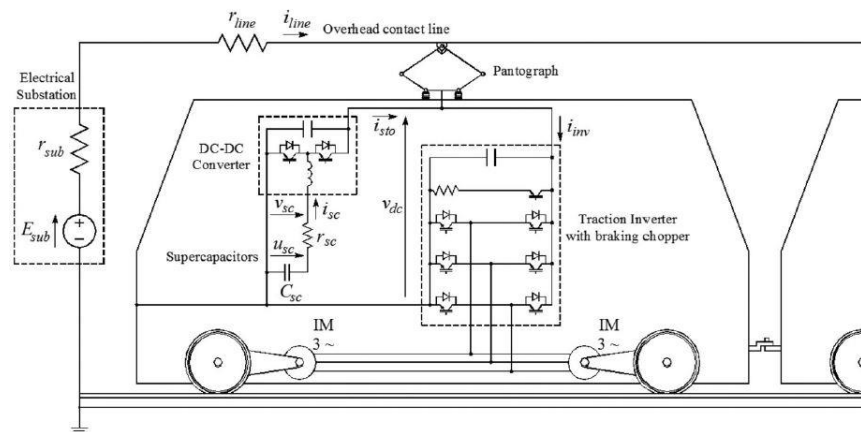
$$E_{SC,max} = n_{mech} n_{em} n_{inv} n_{dc/dc} n_{SC} \frac{1}{2} (m_t + m_{SC}) v_{t,max}^2 \quad (4.6)$$

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 [78][79].

Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης, χρειάζεται αποτελεσματική διαχείριση και έλεγχος της λειτουργίας του. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα αποθήκευσης 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 μονάδες αποθήκευσης φορτίζονται αργά από την ενέργεια του δικτύου συναρτήσει της κατάστασης φόρτισής τους [78].

Στην Εικόνα 4.52 παρουσιάζεται η τυπική διαμόρφωση των ηλεκτρικών συστημάτων ενός τρένου:



Εικόνα 4.52 Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτρικών συστημάτων και κινητής συσκευής αποθήκευσης σε τρένο [78]

4.3.3.3.1 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 ενδιαασμούς 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 σφόνδυλοι υπερυψηλής ταχύτητας (Flywheels) και οι υπεραγώγιμες 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 εκφόρτισής που εκτελούν κατά τη λειτουργία τους, είναι

σαφώς μικρότερος στις περιπτώσεις της συγκεκριμένης διάταξης [95]. 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 [95].

4.3.3.2 Πραγματικές εφαρμογές

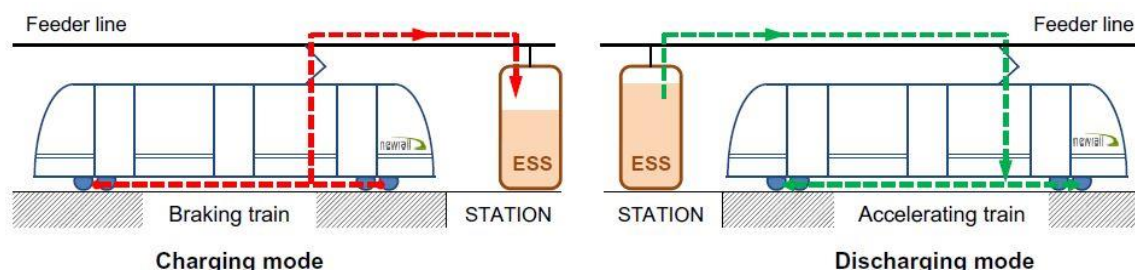
Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει για τις κινητές σιδηροδρομικές εφαρμογές, αφορούν την τεχνολογία των υπερπυκνωτών. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως απόδειξη ότι οι υπερπυκνωτές αποτελούν την πλέον κατάλληλη επιλογή για χρήση ως κινητά συστήματα αποθήκευσης. Αντιθέτως, για τους σφονδύλους υπερυψηλής 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

Εικόνα 4.53 Παραδείγματα χρήσης συστημάτων αποθήκευσης σε πραγματικές κινητές εφαρμογές [95]

4.3.3.4 Στατικές μονάδες αποθήκευσης

Μία άλλη στρατηγική αποτελεί η εγκατάσταση μεγαλύτερων ομάδων αποθήκευσης σε συγκεκριμένες θέσεις του δικτύου. Συνήθως αυτές οι συσκευές αποθήκευσης τοποθετούνται παράλληλα στους υποσταθμούς έλξης ή στους επιβατικούς σταθμούς ανάλογα με τη διαθεσιμότητα χώρου και την επίδραση που αυτά έχουν στην εξομάλυνση των διακυμάνσεων της τάσης [107]-[110].



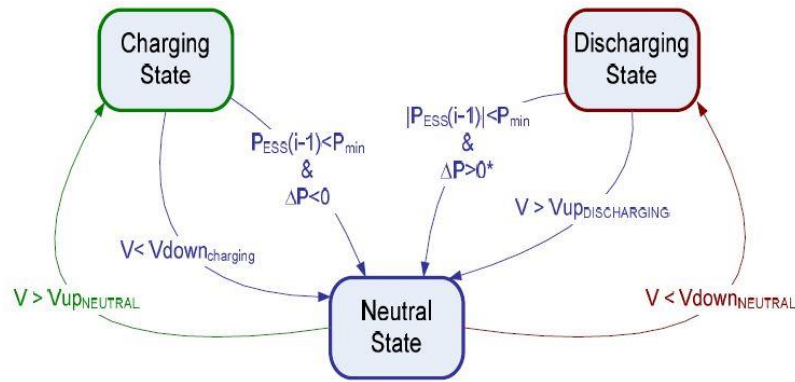
Εικόνα 4.54 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας στατικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε σιδηροδρομική εφαρμογή [95]

Συγκριτικά με τις κινητές μονάδες αποθήκευσης παρουσιάζουν λιγότερους περιορισμούς στο βάρος και τον όγκο που απαιτείται και επιπλέον μπορούν να απορροφούν ενέργεια από διάφορα τρένα τα οποία κινούνται στο δίκτυο. Από την άλλη πλευρά παρουσιάζουν χαμηλότερους δείκτες ενεργειακής απόδοσης λόγω της ύπαρξης αυξημένων απωλειών στις γραμμές του δικτύου. Επιπλέον το συνολικό κόστος για την εγκατάσταση μιας στατικής μονάδας αποθήκευσης είναι τέσσερις έως δέκα φορές υψηλότερο από το κόστος ενός αμφίδρομου υποσταθμού έλξης [106], [108]-[114].

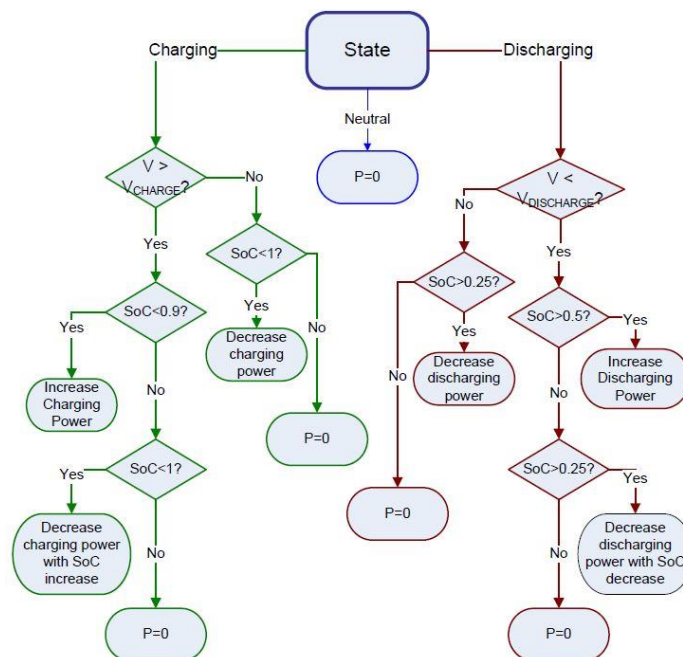
Η τοποθεσία εγκατάστασης καθώς και η ονομαστική ισχύς των στατικών μονάδων αποθήκευσης αποτελούν δύο παράγοντες οι οποίοι θα πρέπει να καθοριστούν με ιδιαίτερη προσοχή. Στην αναφορά [108] αναπτύχθηκε μία πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με στόχο την επιλογή των βασικών χαρακτηριστικών των στατικών μονάδων αποθήκευσης. Επιπροσθέτως, στην αναφορά [109] παρουσιάστηκε ο βέλτιστος σχεδιασμός μιας στατικής μονάδας αποθήκευσης ως ένα κλασικό ισοπεριμετρικό πρόβλημα, η λύση του οποίου καθορίζει επίσης τη βέλτιστη κατανομή της συσκευής αποθήκευσης. Η αναφορά [111] παρουσίασε μια νέα μεθοδολογία σχεδίασης στατικών μονάδων αποθήκευσης λαμβάνοντας υπόψη τη στοχαστική φύση των μεταβλητών. Αυτή η μεθοδολογία βελτιώθηκε στην αναφορά [112] με τη χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου με στόχο την εύρεση των συντελεστών βάρους που χρησιμοποιούνται στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Συχνά, η φόρτιση και η εκφόρτιση των στατικών μονάδων αποθήκευσης βασίζονται στη μέτρηση της τάσης στο σημείο σύνδεσης με το σιδηροδρομικό δίκτυο [115]. Όπως έχει αναφερθεί, κατά τη διάρκεια της φάσης επιβράδυνσης των τρένων, η τάση γραμμής αυξάνεται μέχρι να φτάσει ένα όριο (τυπικά 900V σε συστήματα 750V), όπου ενεργοποιούνται οι αντιστάσεις πέδησης και η πλεονάζουσα ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Όταν η τάση εξόδου μιας συσκευής αποθήκευσης υπερβεί ένα προκαθορισμένο όριο (π.χ. 850V), η συσκευή αποθήκευσης αρχίζει να απορροφά την ισχύ μέχρι να είναι πλήρης ή η τάση να πέσει ξανά κάτω από το καθορισμένο όριο. Αντίστοιχα, όταν εντοπιστεί πτώση τάσης, ενεργοποιείται η λειτουργία εκφόρτισης κατά τη διάρκεια της οποίας το σύστημα αποθήκευσης τροφοδοτεί ενέργεια στο δίκτυο για να διατηρήσει την τάση εντός της επιθυμητής περιοχής [116].

Η πλειοψηφία των δημοσιεύσεων προτείνει τοπικές μεθόδους ελέγχου για τον καθορισμό της φόρτισης και εκφόρτισης των συσκευών. Η αναφορά [116] προτείνει μια στρατηγική διαχείρισης βασισμένη σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις (φόρτιση, εκφόρτιση και αδρανιοποίηση). Η μετάβαση μεταξύ αυτών των καταστάσεων βασίστηκε σε καθορισμένα όρια τάσης και στο επίπεδο φόρτισης (State of Charge - SoC) της συσκευής. Στην αναφορά [113] προτάθηκε μια στρατηγική βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό του ρεύματος αναφοράς με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών γραμμής. Επιπλέον, στην αναφορά [117] η στρατηγική ελέγχου βασίστηκε σε κατάλληλες παραδοχές και απλοποιήσεις, αποφεύγοντας τόσο την εκτίμηση του φορτίου έλξης όσο και τους επίπονους υπολογισμούς που μία προβλεπτική διαδικασία απαιτεί. Τέλος, στις αναφορές [118], [119] προτάθηκε μία μέθοδος ελέγχου βασισμένη στη διαχείριση δύο τάσεων αναφοράς κατά τη διάρκεια των φάσεων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης των οχημάτων.



Εικόνα 4.55 Καταστάσεις ενεργοποίησης συστήματος αποθήκευσης [116]



Εικόνα 4.56 Διάγραμμα ροής λειτουργίας του συστήματος αποθήκευσης [116]

4.3.3.4.1 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 [95].

4.3.3.4.2 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 σχεδιάσή τους. Ορισμένες από τις εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση στατικών συστημάτων αποθήκευσης, παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα.

Brand name	Manufacturer	ESS	Application in urban rail
Sitras® SES	Siemens	EDLC	– 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	– 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	– Hannover metro, pilot project in 2004 – Rennes metro, pilot project in 2010
GTR system	Kinetic Traction Systems	Flywheel	– 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	– 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

Εικόνα 4.57 Παραδείγματα χρήσης συστημάτων αποθήκευσης σε πραγματικές στατικές εφαρμογές [95]

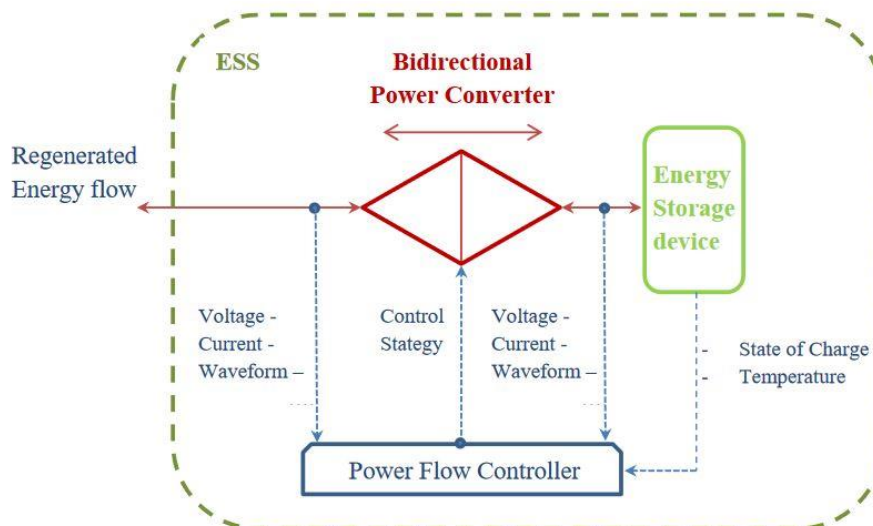
4.3.3.5 Τυπική διάταξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας

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) Ένα μετατροπέα ηλεκτρικής ισχύος ο οποίος ρυθμίζει τη ροή ενέργειας και εγγυάται τη σωστή λειτουργία του συστήματος. 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 [95].



Εικόνα 4.58 Δομή τυπικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας [95]

4.4 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στα σιδηροδρομικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος ένας συνδυασμός δυναμικής και μηχανικής πέδησης χρησιμοποιείται συνήθως για την επίτευξη του επιθυμητού ρυθμού επιβράδυνσης. Ο όρος δυναμική πέδηση αναφέρεται στην ικανότητα των κινητήρων να λειτουργούν επίσης ως γεννήτριες κατά τη φάση της επιβράδυνσης των τρένων, μετατρέποντας την κινητική σε ηλεκτρική ενέργεια. Το πλεόνασμα ενέργειας καταναλώνεται πάνω σε απορριπτικά φορτία τα οποία βρίσκονται πάνω στα τρένα δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο ανεπιθύμητες απώλειες, καθώς στις περισσότερες των περιπτώσεων μονόδρομοι υποσταθμοί τροφοδοτούν το σιδηροδρομικό δίκτυο μη

επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την επιστροφή της παραγόμενης ενέργειας πίσω στο δίκτυο διανομής. Λόγω του γεγονότος ότι στα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα σημειώνονται πολυάριθμες φάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης η διαχείριση της ενέργειας πέδησης προσφέρει μεγάλες δυνατότητες όχι μόνο για την αύξηση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης αλλά και για τη σταθεροποίηση της τάσης στο δίκτυο.

Η συγκεκριμένη ενότητα ασχολήθηκε με τις μεθόδους διαχείρισης της αναγεννητικής ενέργειας η οποία παράγεται κατά την πέδηση των τρένων. Παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση του δικτύου και των επιμέρους στοιχείων. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν τα μοντέλα των ηλεκτρικών υποσταθμών έλξης, των ηλεκτρικών τρένων καθώς και η μοντελοποίηση του δικτύου για τον υπολογισμό της τάσης που αναπτύσσεται μεταξύ γραμμής επιστροφής και δυναμικού γης.

Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού παρουσιάστηκαν οι τρεις βασικές στρατηγικές διαχείρισης της αναγεννητικής ενέργειας που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν:

- Βελτιστοποίηση δρομολογίων (π.χ. επίδραση χρονοαπόστασης, ταυτοχρονισμού τρένων τροχιάς 2 σε σχέση με τα τρένα της τροχιάς 1 κ.α.): Πρόκειται για μία λύση χαμηλού κόστους ειδικά σε σύγκριση με την εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης ή αμφίδρομων υποσταθμών έλξης. Παρατηρήσαμε ότι η μείωση της χρονοαπόστασης βελτιώνει τα προφίλ τάσεων και ρευμάτων στα τρένα και στους υποσταθμούς με ταυτόχρονη μείωση των απωλειών στα απορριπτικά φορτία των τρένων καθώς αυξάνεται η πιθανότητα της ταυτόχρονης επιτάχυνσης/επιβράδυνσης των τρένων που βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις. Έτσι η ενέργεια που παράγεται από ένα τρένο που επιβραδύνει καταναλώνεται τοπικά από ένα άλλο που την ίδια στιγμή επιταχύνει. Μία βελτιστοποίηση των δρομολογίων μπορεί να αυξήσει τα οφέλη που προέρχονται από την αναγεννητική πέδηση δίχως να απαιτείται αλλαγή στον εγκατεστημένο εξοπλισμό του δικτύου.
- Αμφίδρομοι υποσταθμοί έλξης: Η επιστροφή ισχύος πίσω στο δίκτυο διανομής μέσω των ηλεκτρικών υποσταθμών ενεργοποιείται με τη μέτρηση της DC τάσης στο σημείο σύνδεσης. Όταν η τάση υπερβεί ένα καθορισμένο όριο, π.χ. 850V, τότε ο αντιστροφέας αρχίζει να τροφοδοτεί ενέργεια πίσω στο δίκτυο διανομής διατηρώντας σταθερή την τάση σε αυτό το όριο αναφοράς. Η επιλογή του ορίου καθορίζει και την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των τρένων. Μία τιμή κοντά στην τάση "κενού φορτίου" των υποσταθμών έχει ως αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της αναγεννητικής ενέργειας να επιστρέφει πίσω στο δίκτυο και το υπόλοιπο να ανταλλάσσεται μεταξύ των τρένων. Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου το όριο αυτό επιλεγεί κοντά στη μέγιστη τάση των υποσταθμών η ποσότητα ενέργειας που επιστρέφεται στο δίκτυο μειώνεται.
- Συστήματα αποθήκευσης: Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκαν οι βασικές τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στις σιδηροδρομικές εφαρμογές ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε μία βασική τεχνοοικονομική σύγκριση των τεχνολογιών αυτών. Παρατέθηκαν πληροφορίες τόσο για τις κινητές όσο και για τις στατικές μονάδες αποθήκευσης, πληροφορίες που

περιλάμβαναν τις βασικές τεχνολογίες που συναντώνται καθώς και ορισμένες πραγματικές εφαρμογές τους. Εν τέλει, η τεχνολογία αποθήκευσης των υπερπυκνωτών θεωρείται η καλύτερη δυνατή λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει.

Στην ανάλυση που πραγματοποιείται, μία παραλλαγή του μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου της Θεσσαλονίκης μήκους 6,6km, έχει χρησιμοποιηθεί.

Κεφάλαιο 5

Βέλτιστος έλεγχος αμφίδρομων υποσταθμών έλξης και στατικών μονάδων αποθήκευσης σε DC σιδηροδρομικά δίκτυα

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η λειτουργία ενός μητροπολιτικού σιδηροδρομικού συστήματος εξοπλισμένο με αμφίδρομους υποσταθμούς ή στατικά συστήματα αποθήκευσης με στόχο τη βέλτιστη ρύθμιση τάσης στη γραμμή. Η τοπολογία του δικτύου είναι μια τροποποιημένη έκδοση του μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου της Θεσσαλονίκης (Εικόνα 4.8). Η διαδικασία που παρουσιάζεται στη συνέχεια παρέχει τις τιμές ισχύος (τιμές αναφοράς) που θα πρέπει να εκτελέσουν οι εγκατεστημένες συσκευές προκειμένου να ρυθμίσουν τις τάσεις των τρένων στο δίκτυο (σε αντίθεση με τους τοπικούς ελέγχους που ρυθμίζουν τις τάσεις των υποσταθμών) ενώ παράλληλα οδηγούν σε αύξηση του επιπέδου εξοικονόμησης ενέργειας στο δίκτυο.

Ο βασικός αλγόριθμος της βελτιστοποίησης είναι κοινός και στις δύο περιπτώσεις α) αμφίδρομοι υποσταθμοί έλξης, β) στατικές μονάδες αποθήκευσης, και βασίζεται σε μία επαναληπτική μέθοδο και γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροών ισχύος.

5.2 Κατάλογος Συμβόλων

V_{nl} : Τάση κενού φορτίου των υποσταθμών έλξης.

R_{sub} : Εσωτερική αντίσταση των υποσταθμών έλξης.

V_{nom} : Ονομαστική τάση λειτουργίας των υποσταθμών έλξης.

P_{nom} : Ονομαστική ισχύς των υποσταθμών έλξης.

P_{el} : Συνολική ηλεκτρική ισχύς ενός τρένου.

P_{aux} : Ηλεκτρική ισχύς βοηθητικών συστημάτων ενός τρένου.

eff : Συνολικός βαθμός απόδοσης τρένου.

P_m : Μηχανική ισχύς για κίνηση με επιθυμητή επιτάχυνση/επιβράδυνση.

u : Ταχύτητα τρένου.

Mf : Δύναμη που παράγεται από τους κινητήρες.

R : Αντίσταση κύλισης.

A,B,C : Συντελεστές Davis εξίσωσης.

P_{ij} : Ροή ισχύος στον κλάδο (i,j) .

V_i : Τάση στον κόμβο i .

r_{ij} : Αντίσταση κλάδου (i,j) .

Y_{ij} : Αγωγιμότητα κλάδου (i,j) .

$V_{i0,k}$: Αρχική τάση στον κόμβο i την $k^{\text{η}}$ επανάληψη.

N_{trains} : Αριθμός τρένων στην τροχιά 1 και 2.

$V_{tr,n}$: Τάση γραμμής στην έξοδο του τρένου, $\forall n \in N_{trains}$.

V_{ref} : Αναφορά τάσης για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

N_{nodes} : Αριθμός κόμβων στο δίκτυο.

N_{rs} : Αριθμός αμφίδρομων υποσταθμών.

U : Σύνολο κόμβων αναφοράς των υποσταθμών (πηγές τάσης).

L : Σύνολο κόμβων αναφοράς των απορριπτικών φορτίων (πηγές τάσης).

$P_{g,i}$: Έγχυση ισχύος στον κόμβο i .

$P_{ld,i}$: Απορρόφηση ισχύος στον κόμβο i .

$V_{line,min}$: Ελάχιστη τάση γραμμής.

$V_{line,max}$: Μέγιστη τάση γραμμής.

$P_{rs,m}$: Αναφορά ισχύος των αμφίδρομων υποσταθμών, $\forall m \in N_{rs}$.

$P_{rs,nom}$: Ονομαστική ισχύς των AC/DC αντιστροφέων.

P_{line_limit} : Μέγιστη ροή ισχύος στους κλάδους.

T_{period} : Χρονική περίοδος για τη βελτιστοποίηση σε εφαρμογές στατικών μονάδων αποθήκευσης.

$SoC(t)$: Κατάσταση φόρτισης τη χρονική στιγμή t .

5.3 Θεωρητική ανάλυση

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τη θεωρητική ανάλυση της προτεινόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης στα σενάρια λειτουργίας αμφίδρομων υποσταθμών έλξης ή στατικών μονάδων αποθήκευσης. Η βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε βασίζεται σε μία επαναληπτική μέθοδο και στη γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής ισχύος [120]-[122].

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής ισχύος που χρησιμοποιείται στην k^{η} επανάληψη με βάση ένα αρχικό σημείο λειτουργίας (δηλ. $V_{0,k-1}$).

Η ροή ισχύος σε έναν κλάδο (i,j) του δικτύου εκφράζεται ως εξής:

$$P_{ij} = V_i \frac{V_i - V_j}{r_{ij}} = \frac{1}{r_{ij}} [V_i^2 - V_i V_j] \quad (5.1)$$

Το τετράγωνο της τάσης θεωρείται ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Ο πρώτος όρος στην εξίσωση (5.1) είναι ήδη γραμμικός. Για το δεύτερο όρο χρησιμοποιείται ο ακόλουθος μαθηματικός μετασχηματισμός:

$$V_i V_j = \frac{1}{2} [V_i^2 + V_j^2 - (V_i - V_j)^2] = \frac{V_i^2 + V_j^2}{2} - \frac{(V_i - V_j)^2}{2} \quad (5.2)$$

Αντικαθιστώντας την (5.2) στην (5.1), η ακόλουθη εξίσωση παράγεται:

$$P_{ij} = \frac{1}{r_{ij}} \left[\frac{V_i^2 + V_j^2}{2} - \frac{(V_i - V_j)^2}{2} \right] \quad (5.3)$$

Στην εξίσωση (5.3) η ροή ισχύος στον κλάδο (i,j) αποτελείται από ένα γραμμικό όρο που καθορίζει την ενεργό ισχύ που μεταφέρεται στον κλάδο και έναν τετραγωνικό όρο που αντιπροσωπεύει τις απώλειες. Χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \quad (5.4)$$

ο τετραγωνικός όρος $(V_i - V_j)^2$ στην εξίσωση (5.3) γραμμικοποιείται ως εξής

$$\begin{aligned} H(V_i, V_j) &= (V_i - V_j)^2 \approx 2(V_{i0,k-1} - V_{j0,k-1})(V_i - V_j) - (V_{i0,k-1} - V_{j0,k-1})^2 \\ &\approx 2(V_{i0,k-1} - V_{j0,k-1})(V_i - V_j) \frac{V_i + V_j}{V_{i0,k-1} + V_{j0,k-1}} - (V_{i0,k-1} - V_{j0,k-1})^2 \\ &= 2 \frac{V_{i0,k-1} - V_{j0,k-1}}{V_{i0,k-1} + V_{j0,k-1}} [V_i^2 - V_j^2] - (V_{i0,k-1} - V_{j0,k-1})^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Ορίζοντας:

$$D(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1}) = \frac{V_{i0,k-1} - V_{j0,k-1}}{V_{i0,k-1} + V_{j0,k-1}} \quad (5.6)$$

$$G(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1}) = (V_{i0,k-1} - V_{j0,k-1})^2 \quad (5.7)$$

Η εξίσωση (5.5) αναλύεται ως:

$$H(V_i, V_j) = 2D(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1})[V_i^2 - V_j^2] - G(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1}) \quad (5.8)$$

Για την αποφυγή αρνητικών τιμών του όρου $H(V_i, V_j)$, στη βελτιστοποίηση προστίθενται οι παρακάτω περιορισμοί:

$$H(V_i, V_j) \geq 0 \quad (5.9)$$

Αντικαθιστώντας την (5.8) στην (5.3), γίνεται η γραμμικοποίηση των εξισώσεων.

$$P_{ij} = \frac{1}{r_{ij}} \left[\frac{V_i^2 - V_j^2}{2} + \frac{H(V_i, V_j)}{2} \right] \quad (5.10)$$

$$P_{ij} = Y_{ij} \left[\frac{X_i - X_j}{2} + \frac{H(X_i, X_j)}{2} \right] \quad (5.11)$$

Η εξίσωση (5.11) είναι γραμμική αναπαράσταση της ροής ισχύος με το τετράγωνο της τάσης ως ανεξάρτητη μεταβλητή $X_i = V_i^2$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρότι ο όρος $H(X_i, X_j)$ εισάγει ένα ορισμένο επίπεδο σφάλματος προσέγγισης, η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου είναι ικανοποιητική, ακόμη και όταν οι αρχικές παραδοχές σχετικά με τις τάσεις στις πρώτες λίγες επαναλήψεις είναι κακές και αυτό γιατί ο όρος $(V_i^2 - V_j^2)/2$ είναι ανεξάρτητος από το αρχικό σημείο. Μια ποσοτική ανάλυση για το σφάλμα μιας τέτοιας προσέγγισης μπορεί να βρεθεί στην αναφορά [123].

5.3.1 Αμφίδρομοι υποσταθμοί έλξης

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει την προτεινόμενη στρατηγική κεντρικού ελέγχου για μητροπολιτικές σιδηροδρομικές εφαρμογές στις οποίες έχουν εγκατασταθεί αμφίδρομοι υποσταθμοί έλξης. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο όπου απαιτούνται μετρήσεις από το σύστημα σε πραγματικό χρόνο (δειγματοληψία π.χ. κάθε δευτερόλεπτο) και παράγονται τιμές ισχύος προς τους αμφίδρομους υποσταθμούς. Αυτές οι τιμές αναφοράς στέλνονται στο ελεγχόμενο τμήμα του αμφίδρομου υποσταθμού που είναι ο αντιστροφέας ισχύος DC/AC (βλέπε Εικόνα 4.31).

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$\min fun = \sum_{n=1}^{N_{trains}} (V_{tr,n}^2 - V_{ref}^2)^2, \quad V_{tr,n} \in [V_1, \dots, V_{N_{nodes}}] \quad (5.12)$$

Επειδή η προτεινόμενη στρατηγική βελτιστοποίησης έχει ως στόχο να ρυθμίσει τις τάσεις των τρένων και όχι τις τάσεις των υποσταθμών θα πρέπει σε κάθε χρονική στιγμή να εντοπίζεται η θέση των τρένων στο δίκτυο. Με άλλα λόγια θα πρέπει να εντοπίζεται ο κόμβος, την τάση του οποίου θέλουμε να ρυθμίσουμε, στο σύνολο $[1 \dots N_{nodes}]$.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης υπόκειται στους ακόλουθους περιορισμούς:

$$X_i = V_i^2 = 790^2, \quad \forall i \in U \quad (5.13)$$

$$X_i = V_i^2 = 900^2, \quad \forall i \in L \quad (5.14)$$

$$P_{g,i} - P_{ld,i} = V_i \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij}, \quad \forall i \in [1 \dots N_{nodes}], \quad \forall i \notin U, L \text{ \& } \forall j \in [1 \dots N_{nodes}] \quad (5.15)$$

Ο μη γραμμικός χαρακτήρας της εξίσωσης (5.15) στην οποία εμφανίζονται γινόμενα τάσεων γραμμικοποιείται μέσω της ανάλυσης που προηγήθηκε και επομένως οι εξισώσεις ροής ισχύος διαμορφώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} P_{g,i} - P_{ld,i} = & V_i^2 \left[Y_{ii} + \sum_{j=1}^{N_{nodes}} \frac{1}{2} Y_{ij} + Y_{ij} D(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1}) \right] \\ & + \sum_{j=1}^{N_{nodes}} V_j^2 \left(\frac{1}{2} Y_{ij} - Y_{ij} D(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1}) \right) \\ & + \sum_{j=1}^{N_{nodes}} \left(\frac{1}{2} Y_{ij} G(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1}) \right), \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$\forall i \in [1 \dots N_{nodes}], \quad \forall i \notin U, L \text{ \& } \forall j \in [1 \dots N_{nodes}]$$

Από την εξίσωση (5.16) βλέπουμε πως λαμβάνοντας το μέγεθος V_i^2 ως ανεξάρτητη μεταβλητή $X_i = V_i^2$, γραμμικοποιούμε τις εξισώσεις ροής ισχύος.

$$\begin{aligned} P_{g,i} - P_{ld,i} = & X_i \left[Y_{ii} + \sum_{j=1}^{N_{nodes}} \frac{1}{2} Y_{ij} + Y_{ij} D(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1}) \right] \\ & + \sum_{j=1}^{N_{nodes}} X_j \left(\frac{1}{2} Y_{ij} - Y_{ij} D(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1}) \right) \\ & + \sum_{j=1}^{N_{nodes}} \left(\frac{1}{2} Y_{ij} G(V_{i0,k-1}, V_{j0,k-1}) \right), \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\forall i \in [1 \dots N_{nodes}], \quad \forall i \notin U, L \text{ \& } \forall j \in [1 \dots N_{nodes}]$$

Παρόλα αυτά όμως θα πρέπει να αντιμετωπίσουμε και το μη γραμμικό χαρακτήρα που ορισμένες αγωγιμότητες Y_{ij} παρουσιάζουν. Συγκεκριμένα η εσωτερική αντίσταση των υποσταθμών όπως αναλύθηκε στην ενότητα 4.2.1 λαμβάνει δύο τιμές R_{sub} (εξίσωση

(4.1)) και $R_{sub} * 1000$. Στη συνέχεια θεωρούμε $R_{sub}^{LOW} = R_{sub}$ και $R_{sub}^{HIGH} = R_{sub} * 1000$. Σε μια ανάλογη λογική, η εν σειρά αντίσταση με την πηγή τάσης στο μοντέλο των απορριπτικών φορτίων όπως αναλύθηκε στην ενότητα 4.2.2, λαμβάνει δύο τιμές $R_{dl}^{LOW} = 0.001\Omega$ και $R_{dl}^{HIGH} = 1000\Omega$ όταν τα απορριπτικά φορτία είναι ενεργοποιημένα και απενεργοποιημένα αντίστοιχα.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της μη γραμμικής συμπεριφοράς Y_{ij} των αντιστάσεων υποσταθμών και απορριπτικών φορτίων, προσθέτουμε στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ένα σύνολο από περιορισμούς της μορφής:

$$X_i \geq X_j - M(1 - \delta_{ij}) \quad (5.18)$$

$$X_i < X_j + M\delta_{ij} \quad (5.19)$$

Όπου $i \in U$ σχετικά με τις αντιστάσεις υποσταθμών και $i \in L$ σχετικά με τις αντιστάσεις των απορριπτικών φορτίων. Ο δείκτης j αναφέρεται στον κόμβο που οι αντιστάσεις αυτές ενώνονται. Η μεταβλητή M είναι ένας μεγάλος αριθμός για την ταυτόχρονη ικανοποίηση των ανισοτήτων και δ_{ij} είναι μία δυαδική μεταβλητή $\{0,1\}$ η οποία χαρακτηρίζει τη λειτουργία της αντίστασης.

Για να γίνει κατανοητή η παραπάνω ανάλυση ας δούμε τη λειτουργία ενός υποσταθμού. Για παράδειγμα σε έναν ηλεκτρικό υποσταθμό με τάση αναφοράς $V_i = 790V$ και εσωτερική αγωγιμότητα Y_{ij} που συνδέει τους κόμβους (i,j) , αν $V_i \geq V_j$ τότε οι ανισότητες (5.18) και (5.19) οδηγούν σε $\delta_{ij}=1$ ενώ αν $V_i < V_j$ τότε $\delta_{ij}=0$.

Με βάση τις ανισότητες αυτές η αγωγιμότητα Y_{ij} των υποσταθμών και των απορριπτικών φορτίων μετασχηματίζεται ως εξής:

$$Y_{ij} = \left[\frac{1}{R_{sub}^{LOW}} \delta_{ij} + \frac{1}{R_{sub}^{HIGH}} (1 - \delta_{ij}) \right] \quad (5.20)$$

$$Y_{ij} = \left[\frac{1}{R_{dl}^{HIGH}} \delta_{ij} + \frac{1}{R_{dl}^{LOW}} (1 - \delta_{ij}) \right] \quad (5.21)$$

Τελευταίο βήμα στην πλήρη γραμμικοποίηση του προβλήματος αποτελεί η επίλυση των γινομένων δυαδικών μεταβλητών με συνεχείς μεταβλητές όπως αυτές δημιουργούνται στην εξίσωση (5.17) με τα γινόμενα:

$$X_i Y_{ij} = X_i \left[\frac{1}{R_{sub}^{LOW}} \delta_{ij} + \frac{1}{R_{sub}^{HIGH}} (1 - \delta_{ij}) \right] \quad (5.22)$$

$$X_i Y_{ij} = X_i \left[\frac{1}{R_{dl}^{HIGH}} \delta_{ij} + \frac{1}{R_{dl}^{LOW}} (1 - \delta_{ij}) \right] \quad (5.23)$$

Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με την εισαγωγή της βοηθητικής μεταβλητής Z_{ij} και τελικά έχουμε την πλήρη γραμμικοποίηση του προβλήματος με την εισαγωγή στο πρόβλημα των παρακάτω ανισωτικών περιορισμών:

Θέτοντας $Z_{ij} = X_i * \delta_{ij}$ έχουμε:

$$(V_{line,min})^2 \leq Z_{ij} \leq (V_{line,max})^2 \quad (5.24)$$

$$(V_{line,min})^2 \delta_{ij} \leq Z_{ij} \leq (V_{line,max})^2 \delta_{ij} \quad (5.25)$$

$$X_i - (1 - \delta_{ij})(V_{line,max})^2 \leq Z_{ij} \leq X_i - (1 - \delta_{ij})(V_{line,min})^2 \quad (5.26)$$

$$Z_{ij} \leq X_i + (1 - \delta_{ij})(V_{line,min})^2 \quad (5.27)$$

Τέλος, στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζουμε και τους παρακάτω περιορισμούς για τα όρια τάσεων και ισχύων στο δίκτυο, μη παραλείποντας τον περιορισμό (εξισώσεις (5.8) και 5.9)) που είναι αναγκαίος για τη γραμμικοποίηση των εξισώσεων ροής ισχύος.

$$(V_{line,min})^2 \leq V_i^2 \leq (V_{line,max})^2, \quad \forall i \in N_{nodes} \quad (5.28)$$

$$-P_{rs,nom} \leq P_{rs,m} \leq P_{rs,nom}, \quad \forall m \in N_{rs} \quad (5.29)$$

$$-P_{line_limit} \leq P_{ij} \leq P_{line_limit}, \quad \forall i, j \in N_{nodes} \quad (5.30)$$

Το τελικό πρόβλημα βελτιστοποίησης που δημιουργείται είναι ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού.

5.3.2 Στατικές μονάδες αποθήκευσης

Στο πλαίσιο της βέλτιστης αξιοποίησης της παραγόμενης ενέργειας από αναγεννητική πέδηση, η κύρια διαφορά μεταξύ της χρήσης αμφίδρομων υποσταθμών και συστημάτων αποθήκευσης είναι το γεγονός ότι τα συστήματα αποθήκευσης παρουσιάζουν ένα όριο στην ενέργεια που μπορούν να απορροφήσουν/παράγουν από/προς το σιδηροδρομικό δίκτυο. Έτσι, η διαδικασία βελτιστοποίησης πρέπει να εξετάσει το επίπεδο φόρτισης των συστημάτων αποθήκευσης.

Στην προηγούμενη περίπτωση των αμφίδρομων υποσταθμών η βελτιστοποίηση βασιζόταν σε μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο που ήταν διαθέσιμες στο κεντρικό σύστημα ελέγχου. Με βάση αυτές τις μετρήσεις και την κατάσταση του δικτύου (π.χ. θέσεις τρένων), ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης παρήγαγε τις αναφορές ισχύος προκειμένου να επιτευχθεί σταθεροποίηση τάσης και κατ' επέκταση μείωση των απωλειών. Στην περίπτωση των στατικών μονάδων αποθήκευσης, η εκτέλεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης δε δύναιτο να εκτελεστεί σε πραγματικό χρόνο, αλλά πρέπει

να συμπεριλάβει ένα χρονικό παράθυρο $[0 T_{period}]$, έτσι ώστε να μπορεί να ληφθεί υπόψη και η κατάσταση φόρτισης των συσκευών. Σε αυτή την περίπτωση, οι ισοτικοί και ανισοτικοί περιορισμοί διαμορφώνονται ως μια ομάδα εξισώσεων κάθε χρονικού βήματος μέσα στο παράθυρο $[0 T_{period}]$.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης υπόκειται στους ίδιους περιορισμούς (5.9) (5.13), (5.14), (5.17), (5.28), (5.29), (5.30) αλλά για ολόκληρη την χρονική περίοδο $[0 T_{period}]$. Επιπλέον, η επίδραση των ορίων φόρτισης συμπεριλαμβάνεται στην ανάλυση με τους ακόλουθους περιορισμούς:

$$SoC(t) = SoC(t-1) + \int_{t-1}^t I dt, \quad \forall t \in [0 T_{period}] \quad (5.31)$$

$$0 \leq SoC(t) \leq 100, \quad \forall t \in [0 T_{period}] \quad (5.32)$$

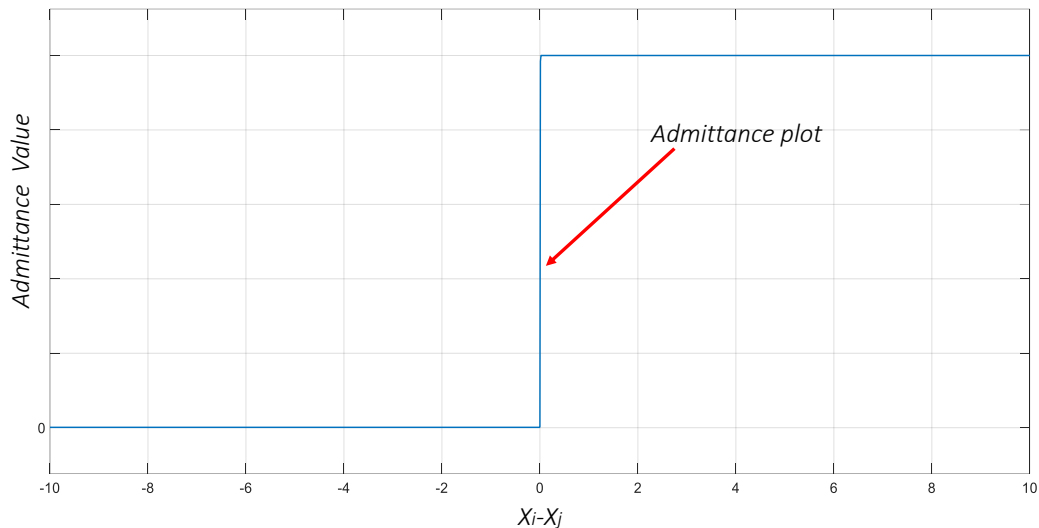
Σε αυτή την περίπτωση η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$minfun = \sum_{t=0}^{T_{period}} \sum_{n=1}^{N_{trains}} (V_{tr,n}(t)^2 - V_{ref}^2)^2, \quad V_{tr,n} \in [V_1, \dots V_{N_{nodes}}] \quad (5.33)$$

Στην περίπτωση των στατικών μονάδων αποθήκευσης προτιμήθηκε η επίλυση του προβλήματος ως μη γραμμικού με την εισαγωγή των εξισώσεων (5.34), (5.35) για την αναπαράσταση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των αγωγιμοτήτων των ηλεκτρικών υποσταθμών και των απορριπτικών φορτίων. Η επίλυση του προβλήματος με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην ενότητα 5.3.1 θα οδηγούσε σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό δυαδικών μεταβλητών καθώς οι υπολογισμοί θα πραγματοποιούνταν για το σύνολο των χρονικών στιγμών στο διάστημα $[0 T_{period}]$.

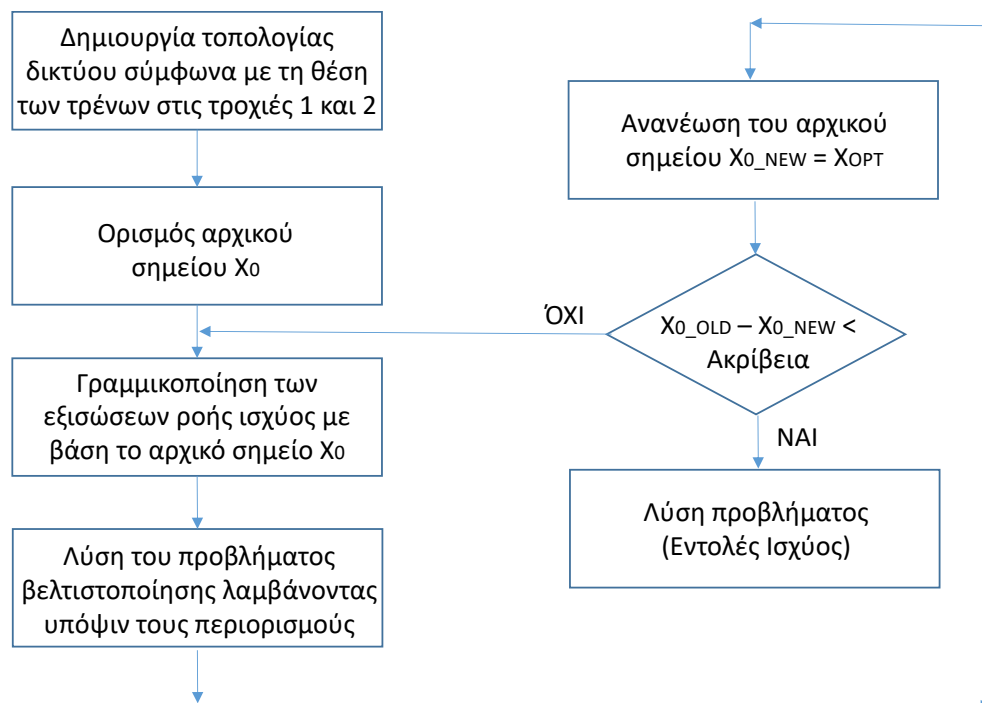
$$Y_{ij} = \frac{1 + e^{1000*(X_i - X_j)}}{(1 + e^{1000*(X_i - X_j)})R_{sub}^{LOW} + R_{sub}^{HIGH}} \quad (5.34)$$

$$Y_{ij} = \frac{1 + e^{1000*(X_j - X_i)}}{(1 + e^{1000*(X_j - X_i)})R_{dl}^{HIGH} + R_{dl}^{LOW}} \quad (5.35)$$



Εικόνα 5.1 Γραφική παράσταση εξίσωσης αναπαράστασης μη γραμμικής αγωγιμότητας

Η Εικόνα 5.2 παρουσιάζει ένα μπλοκ διάγραμμα της διαδικασίας ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε τόσο στην περίπτωση των αμφίδρομων υποσταθμών όσο και στις στατικές μονάδες αποθήκευσης. Το αρχικό σημείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η λύση του συστήματος (τάση στους ζυγούς) δίχως την ύπαρξη αμφίδρομων υποσταθμών ή αποθήκευσης. Επιπλέον, οι αρχικές τιμές ισχύος ορίζονται ίσες με το μηδέν ενώ στο σενάριο όπου στατικές μονάδες αποθήκευσης είναι εγκατεστημένες στο δίκτυο, το αρχικό επίπεδο φόρτισης ορίζεται στο 50%.



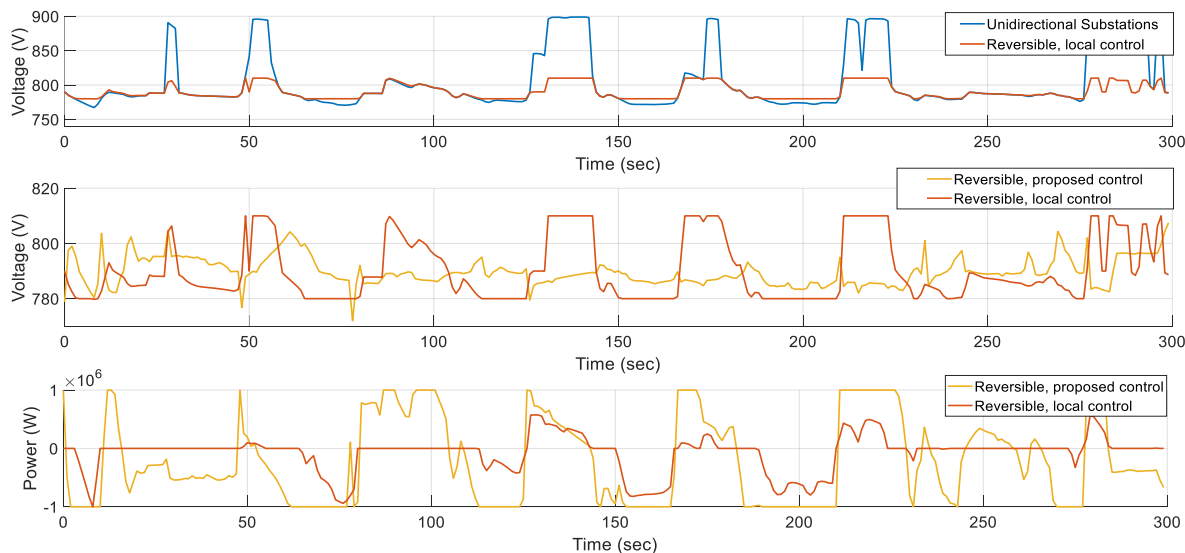
Εικόνα 5.2 Διάγραμμα ροής προτεινόμενου αλγόριθμου βελτιστοποίησης

5.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

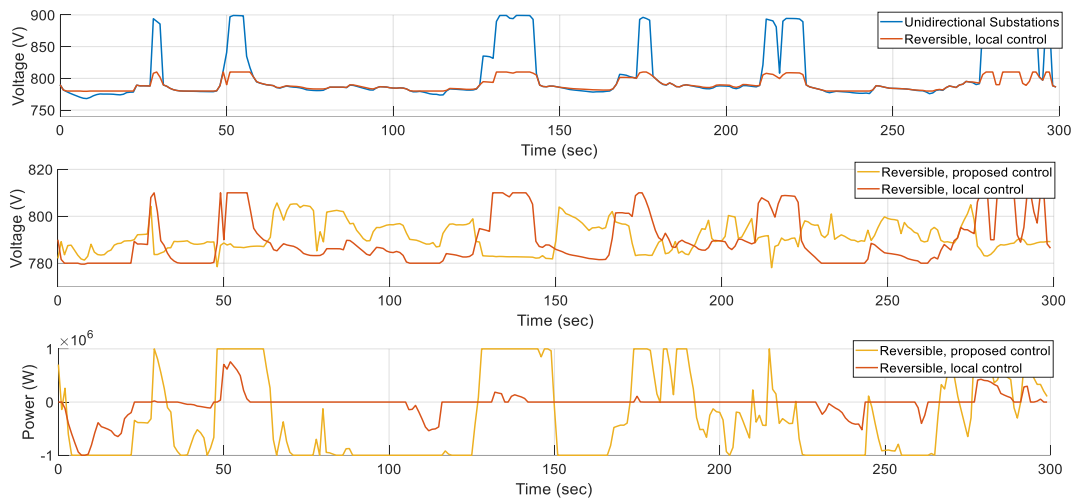
Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης στρατηγικής εξετάζεται στο δίκτυο της Εικόνα 4.8 μήκους 6,6km. Η τοπολογία του δικτύου είναι μια τροποποιημένη έκδοση του μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου της Θεσσαλονίκης. Να σημειωθεί ότι στις προσομοιώσεις από 80km/h έως 10km/h η πέδηση των τρένων επιτυγχάνεται ως συνδυασμός αναγεννητικής πέδησης και μηχανικών φρένων, ενώ κάτω από τα 10km/h χρησιμοποιούνται μόνο μηχανικά φρένα.

5.4.1 Αμφίδρομοι υποσταθμοί έλξης

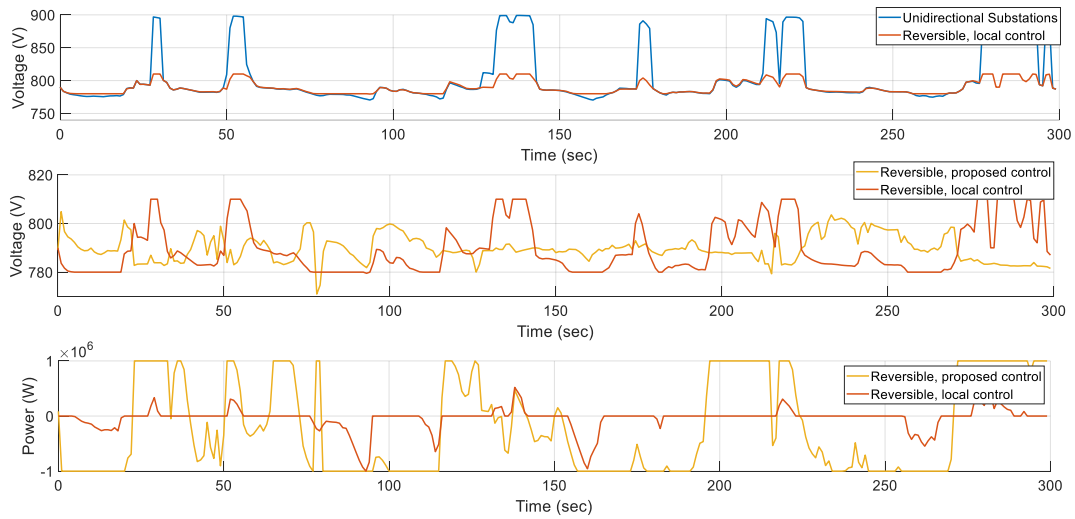
Σε αυτό το σενάριο οι υποσταθμοί έλξης είναι ικανοί για αμφίδρομη ροή ισχύος με τη χρήση αντιστροφών ονομαστικής ισχύος 1MW εγκατεστημένων παράλληλα με τις ανορθωτικές διατάξεις διόδων. Η σύγκριση μεταξύ του τοπικού ελέγχου και της προτεινόμενης στρατηγικής είναι απαραίτητη και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην τοπική στρατηγική ελέγχου οι αντιστροφείς αρχίζουν να απορροφούν ισχύ στα 810V και να εγχέουν ισχύ στο σιδηροδρομικό δίκτυο στα 780V. Η επιλογή των ορίων φόρτισης και εκφόρτισης έχει επιλεγεί πολύ κοντά στην τιμή τάσης "κενού φορτίου" των υποσταθμών, προκειμένου να μην μειωθεί η αποτελεσματικότητα της τοπικής μεθόδου ελέγχου.



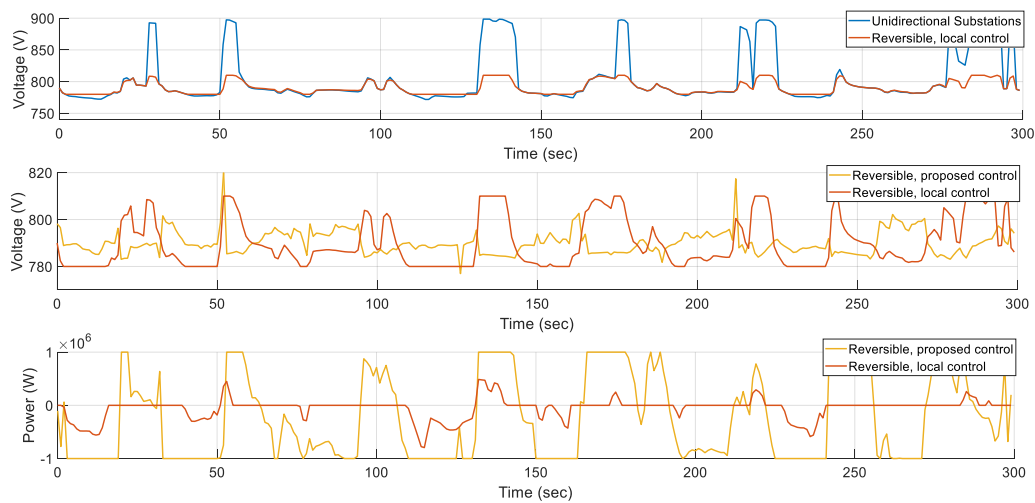
Εικόνα 5.3 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS1



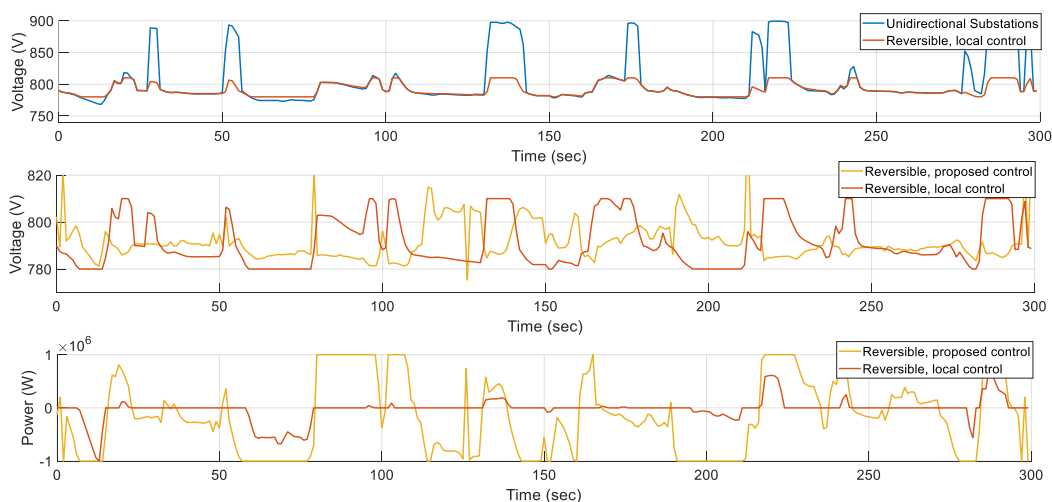
Εικόνα 5.4 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS2



Εικόνα 5.5 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS3



Εικόνα 5.6 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS4



Εικόνα 5.7 Τερματική τάση και ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού υποσταθμού TS5

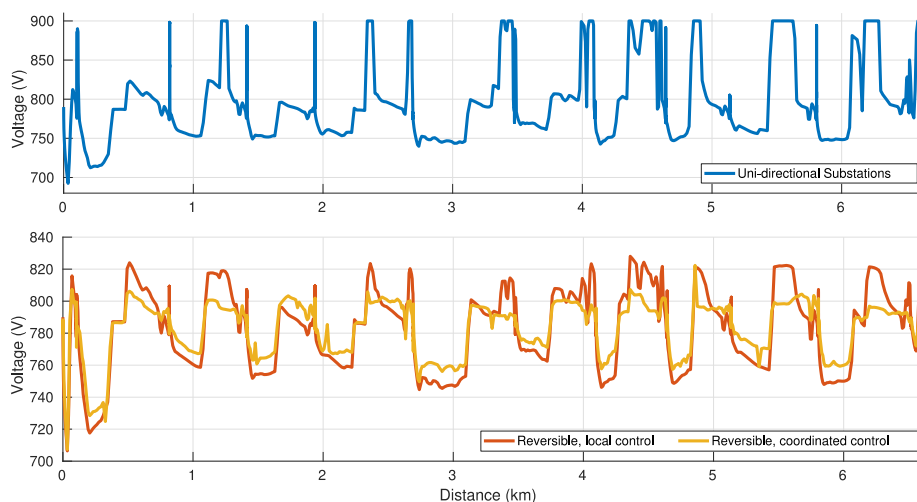
Οι παραπάνω εικόνες (Εικόνα 5.3 έως Εικόνα 5.7) δείχνουν την τάση εξόδου των ηλεκτρικών υποσταθμών στα τρία διαφορετικά σενάρια καθώς και το προφίλ ισχύος των εγκατεστημένων αντιστροφών. Αρχικά παρουσιάζεται η τάση εξόδου στα σενάρια των μονόδρομων υποσταθμών και του τοπικού ελέγχου, ενώ έπειτα παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ του τοπικού ελέγχου και της προτεινόμενης μεθόδου. Χρησιμοποιώντας την ενέργεια των κυματομορφών [124], [125] ως μέτρο της απόκλισης από την τιμή τάσης "κενού φορτίου" (περιοχή της καμπύλης γύρω από την τιμή "κενού φορτίου") στο χρονικό παράθυρο του γραφήματος, γίνεται σύγκριση μεταξύ όλων των σεναρίων.

Πίνακας 5.1 Σύγκριση των τριών διαφορετικών σεναρίων

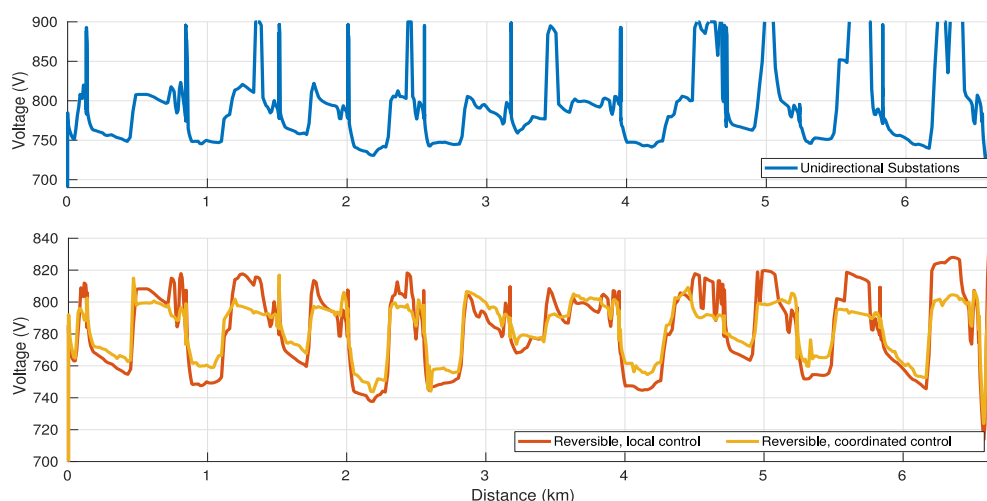
	TS1(kJ)	TS2(kJ)	TS3(kJ)	TS4(kJ)	TS5(kJ)
Unidirectional Substations	8.23	7.70	7.45	7.28	6.88
Reversible, local control	2.76	2.46	2.53	2.62	2.49
Reversible, proposed control	1.21	1.59	1.28	1.13	1.54

Η προτεινόμενη μέθοδος δίνει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τις τάσεις των υποσταθμών, καθώς το μέτρο της απόκλισης από την επιθυμητή τάση είναι χαμηλότερο από τις άλλες δύο περιπτώσεις (π.χ. μείωση 56,87% στον υποσταθμό TS4 σε σύγκριση με τον τοπικό έλεγχο), πράγμα που σημαίνει μικρότερη απόκλιση από την τιμή τάσης "κενού φορτίου".

Σε σύγκριση με τον τοπικό έλεγχο, ο προτεινόμενος έλεγχος παρέχει καλύτερη αξιοποίηση των αντιστροφών, καθώς αυξάνεται η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του σιδηροδρομικού δικτύου και του κεντρικού δικτύου. Για παράδειγμα, υπάρχει 5 φορές αύξηση στην ανταλλαγή ενέργειας του υποσταθμού TS5 που προέρχεται από τη μείωση της διάρκειας ανταλλαγής μηδενικής ισχύος και την αύξηση των μέγιστων τιμών όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.8 Προφίλ τάσης στα τρένα της τροχιάς 1



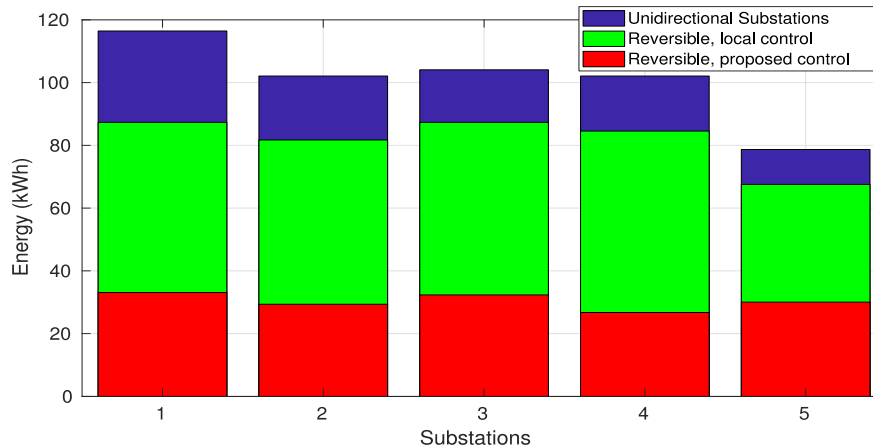
Εικόνα 5.9 Προφίλ τάσης στα τρένα της τροχιάς 2

Πίνακας 5.2 Σύγκριση των τριών διαφορετικών σεναρίων

	Track1(kJ)	Track2(kJ)
Unidirectional Substations	28.58	31.05
Reversible, local control	14.44	16.48
Reversible, proposed control	8.04	10.38

Στην Εικόνα 5.8 και Εικόνα 5.9 παρουσιάζεται η τάση γραμμής των τρένων για αμφότερες τις διαδρομές. Και πάλι, το προφίλ τάσης έχει πολύ πιο ομαλή απόκριση σε σύγκριση με τα άλλα δύο σεναρία. Μία μείωση κατά 44,32% στην τροχιά 1 και 37,01% στην τροχιά 2 επιτυγχάνεται σε σύγκριση με τον τοπικό έλεγχο.

Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής απώλειας ισχύος (8% σε σύγκριση με τον τοπικό έλεγχο) καθώς και σημαντική μείωση της απαιτούμενης ενέργειας μέσω του ανορθωτή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10 Απαιτούμενη ενέργεια μέσω του ανορθωτή στα τρία σενάρια

5.4.2 Στατικές μονάδες αποθήκευσης

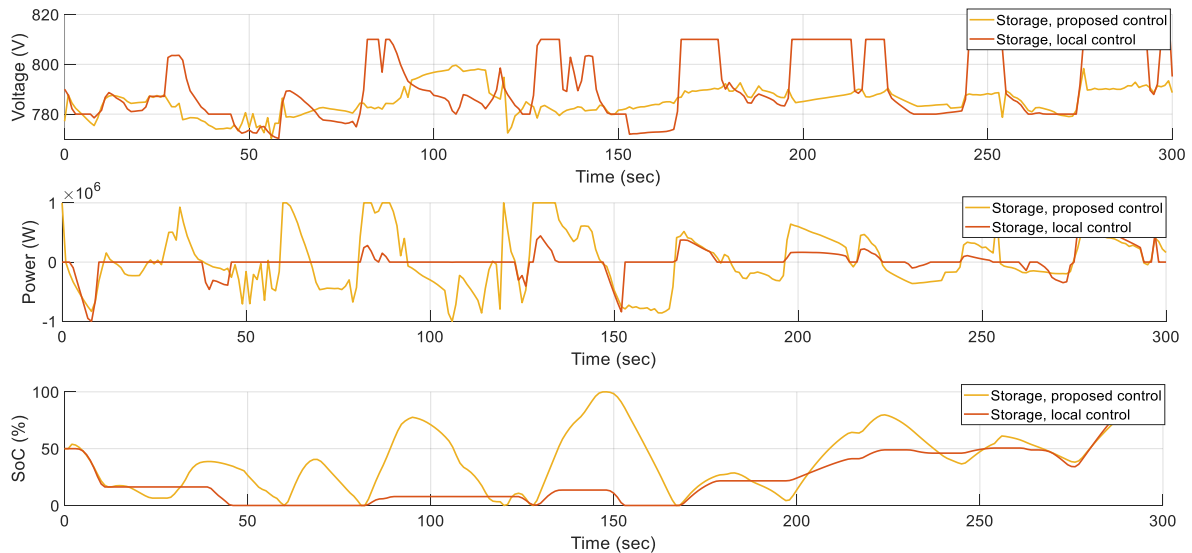
Σε αυτό το σενάριο, εγκαθίστανται 5 παράλληλες μονάδες αποθήκευσης (διατάξεις υπερπυκνωτών) παράλληλα με τους υποσταθμούς έλξης. Η χωρητικότητα του ενός υπερπυκνωτή που χρησιμοποιήθηκε είναι 3000F ενώ ο αριθμός των μονάδων σε σειρά είναι 232. Η συνολική αποθήκευση αποτελείται από 5 συστοιχίες που συνδέονται παράλληλα. Και πάλι πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ του τοπικού ελέγχου και της προτεινόμενης μεθόδου και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες.

Πίνακας 5.3 Πληροφορίες σχετικά με τις μονάδες αποθήκευσης

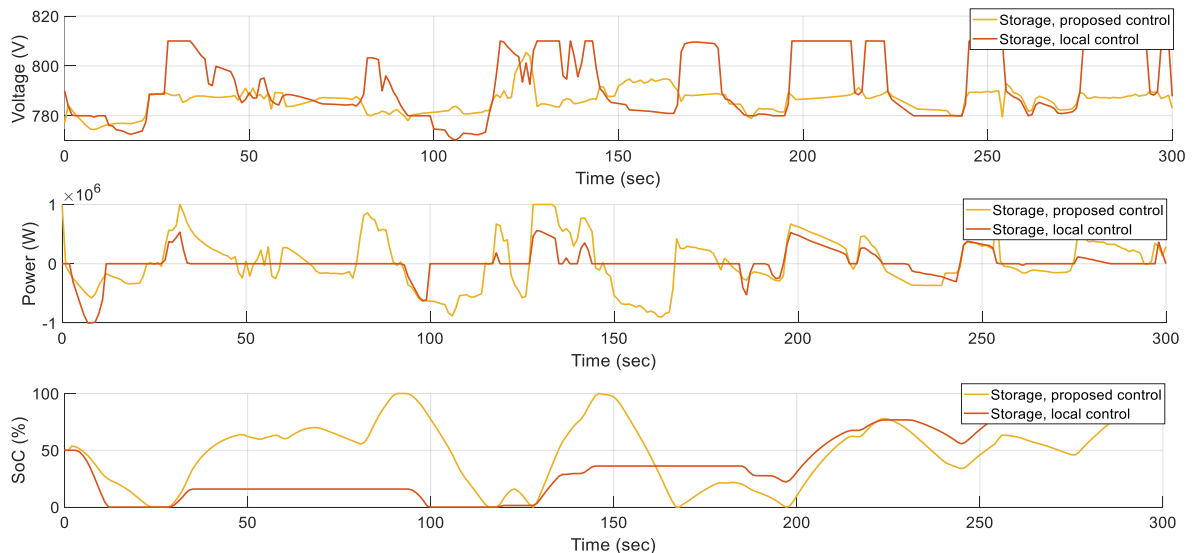
Μονάδες:	$C = 3000F, V_{max} = 2,7V$	
Διάταξη:	5 συστοιχίες * 232 μονάδες σε σειρά	
Συνολική Ενέργεια:	2,26kWh	
Μέγιστη Τάση:	$232 * 2.7 = 626,4V$	
Μέγιστη Ισχύς:	1MW	

Σε αυτό το σενάριο η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται σε ένα χρονικό παράθυρο $[0, T_{period}]$, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση φόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το χρονικό αυτό παράθυρο δεν πρέπει να είναι η διάρκεια ενός πλήρους ταξιδιού ενός τρένου. Με άλλα λόγια, η διαδικασία βελτιστοποίησης δεν πρέπει να υπολογίζει τις εντολές ισχύος για τις συσκευές αποθήκευσης για ένα πλήρες ταξίδι, επειδή οι εκτιμήσεις σχετικά με τη θέση και την κατανάλωση ισχύος των τρένων πρέπει να αναπροσαρμόζονται κυρίως λόγω απρογραμμάτιστων καθυστερήσεων (π.χ. καθυστερήσεις στην επιβίβαση των επιβατών στις πλατφόρμες, κ.α.). Για τους σκοπούς της προσομοίωσης, επιλέγεται ένα χρονικό παράθυρο 1 λεπτού, προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των υπολογισμών και να αυξηθεί η ταχύτητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Παρά αυτό το μικρό χρονικό παράθυρο, παρουσιάζεται καλύτερη χρήση των συσκευών αποθήκευσης σε σύγκριση με μια τοπική στρατηγική ελέγχου με τα ίδια όρια τάσης (φόρτιση στα 810V, εκφόρτιση στα 780V).

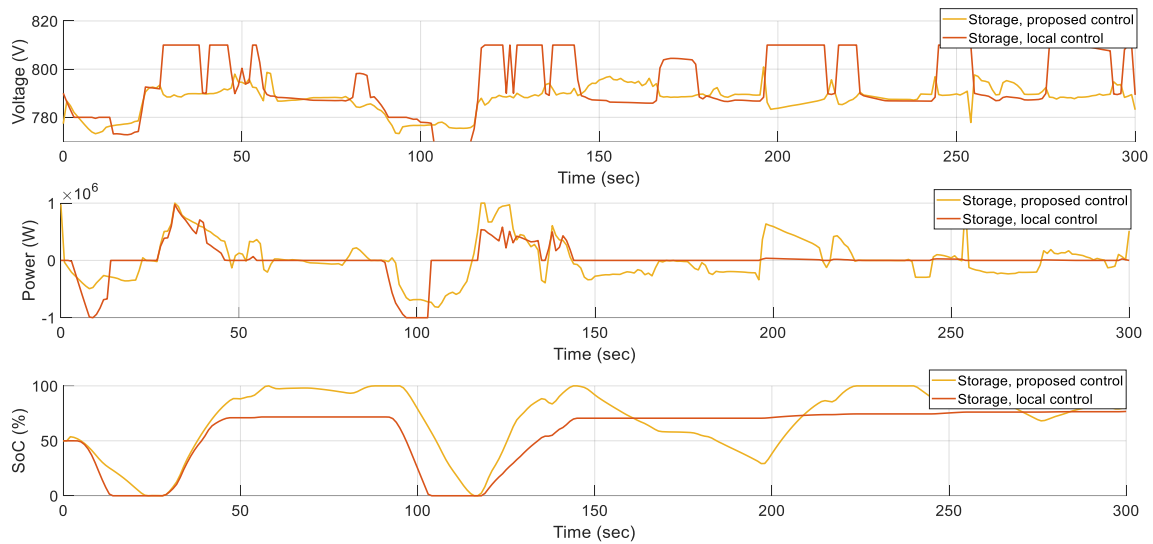
Οι παρακάτω εικόνες (Εικόνα 5.11 έως Εικόνα 5.15) παρουσιάζουν την τερματική τάση, τις εντολές ισχύος και το επίπεδο φόρτισης των συσκευών αποθήκευσης. Ο προτεινόμενος έλεγχος δίνει καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τις τάσεις υποσταθμών (π.χ. μείωση κατά 56% στο TS2) και την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του δικτύου αποθήκευσης και του σιδηροδρομικού δικτύου (2,6 φορές αύξηση του TS2). Επιπλέον προκύπτει καλύτερη χρήση των συσκευών, καθώς εκτελούνται περισσότεροι κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης σε σύγκριση με την τοπική στρατηγική ελέγχου.



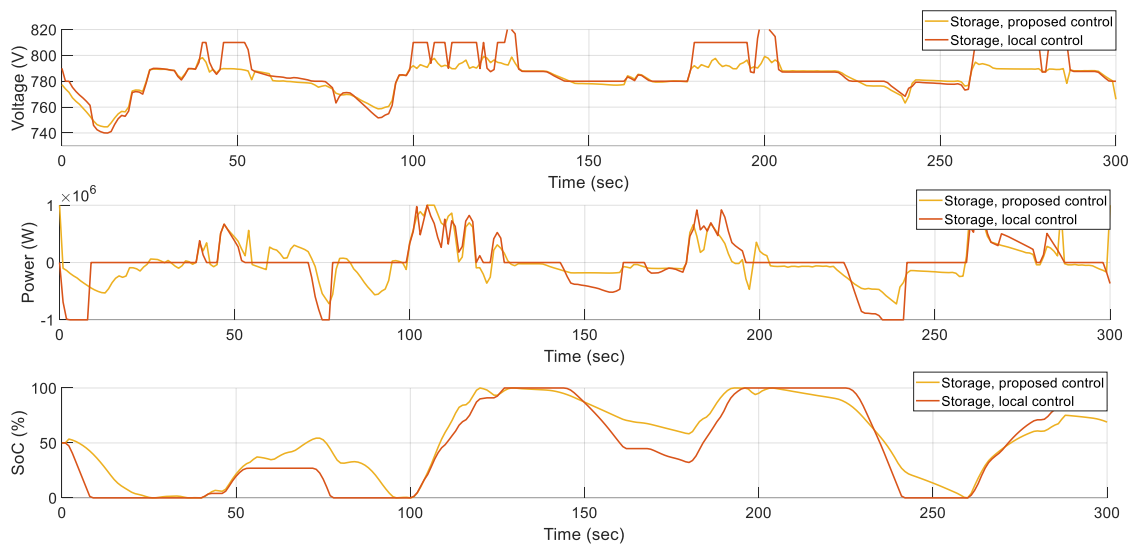
Εικόνα 5.11 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS1



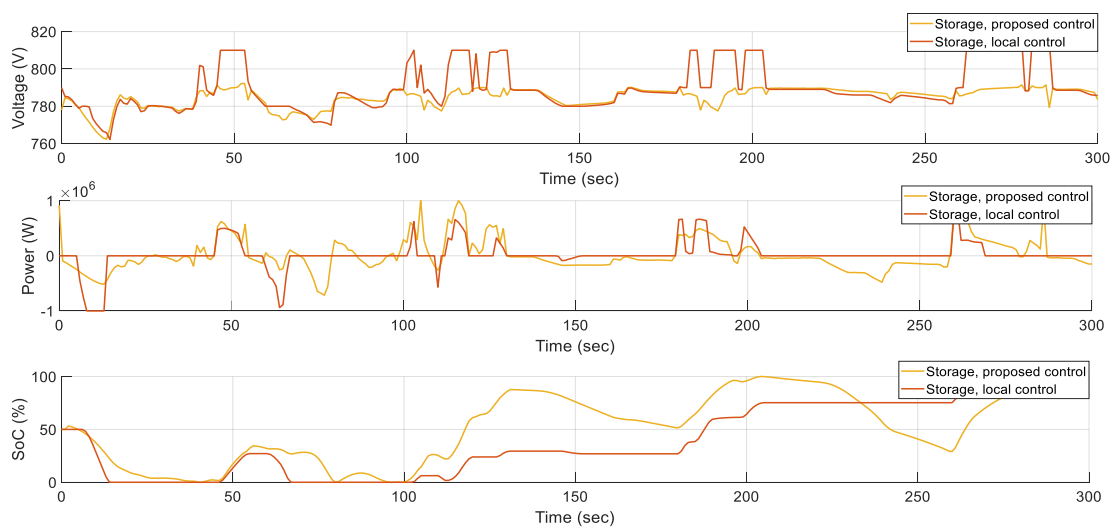
Εικόνα 5.12 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS2



Εικόνα 5.13 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS3

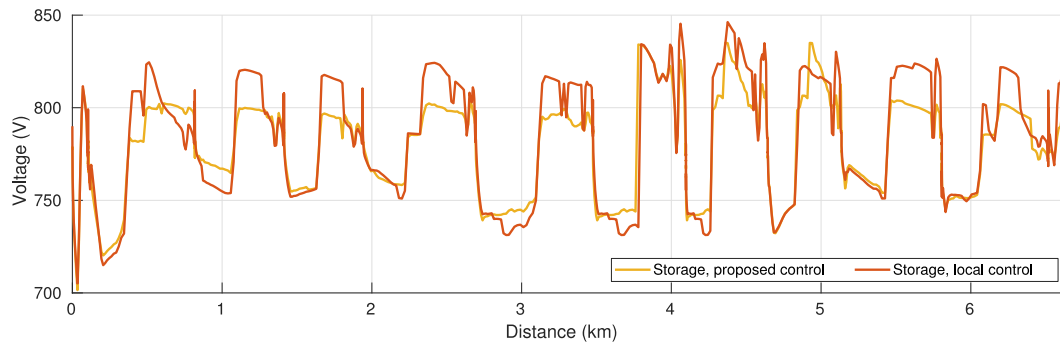


Εικόνα 5.14 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS4

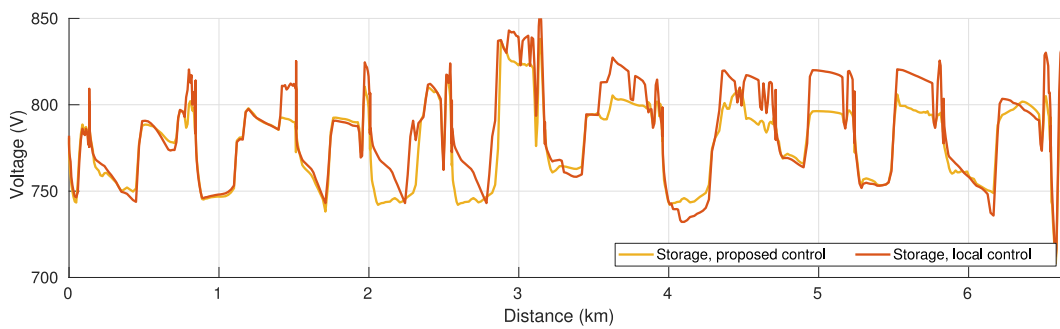


Εικόνα 5.15 Τάση εξόδου, προφίλ ισχύος, επίπεδο φόρτισης μονάδας αποθήκευσης στον Υ/Σ TS5

Στην Εικόνα 5.16 και Εικόνα 5.17 παρουσιάζεται η τάση γραμμής των τρένων και για τις δύο τροχιές. Και πάλι, το προφίλ τάσης έχει πολύ πιο ομαλή απόκριση σε σύγκριση με το τοπικό σενάριο ελέγχου (π.χ. μείωση κατά 19,6% στην τροχιά 1 και μείωση κατά 18,5% στη τροχιά 2).

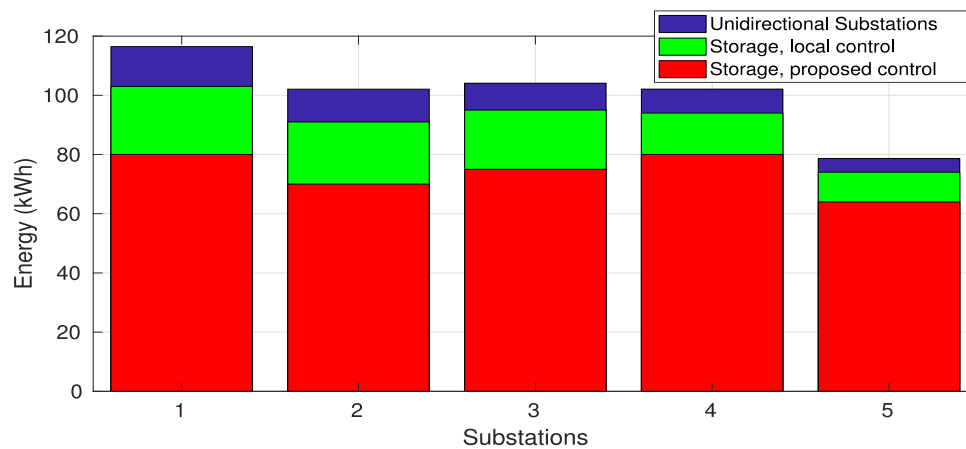


Εικόνα 5.16 Προφίλ τάσης στα τρένα της τροχιάς 1



Εικόνα 5.17 Προφίλ τάσης στα τρένα της τροχιάς 2

Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος καταλήγει σε μείωση των συνολικών απωλειών ισχύος (4% σε σύγκριση με τον τοπικό έλεγχο) και την απαιτούμενη ενέργεια μέσω του ανορθωτή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.18.



Εικόνα 5.18 Απαιτούμενη ενέργεια μέσω του ανορθωτή στα τρία σενάρια

5.5 Σύνοψη και συμπεράσματα

Το παρόν κεφάλαιο προτείνει μια νέα προσέγγιση για τη ρύθμιση της τάσης των τρένων και την εξοικονόμηση ενέργειας στα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά συστήματα εξοπλισμένα με αμφίδρομους υποσταθμούς ή μονάδες αποθήκευσης μέσω κατάλληλης διαχείρισης της αναγεννητικής ενέργειας κατά την επιβράδυνση των τρένων. Η στρατηγική που παρουσιάζεται παρέχει τιμές ρύθμισης ισχύος στις εγκατεστημένες συσκευές για τη ρύθμιση των τάσεων των τρένων, σε αντίθεση με τοπικούς ελέγχους που ρυθμίζουν τις τάσεις των υποσταθμών. Η προτεινόμενη μέθοδος έχει ως αποτέλεσμα επίσης την αύξηση της εξοικονόμησης ενέργειας στο δίκτυο. Η αποτελεσματικότητά του εξετάζεται σε ένα τροποποιημένο σιδηροδρομικό δίκτυο του Μετρό Θεσσαλονίκης συνολικού μήκους 6,6 χιλιομέτρων.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν σημαντική βελτίωση στην επίδοση του σιδηροδρομικού συστήματος που επιτυγχάνεται με την προτεινόμενη μέθοδο βελτιστοποίησης σε σύγκριση με τον τοπικό έλεγχο και τους μονόδρομους υποσταθμούς έλξης. Η απόδοση της προτεινόμενης στρατηγικής έχει αξιολογηθεί με τη μέτρηση των διακυμάνσεων τάσης από την τιμή τάσης "κενού φορτίου". Ενδεικτικά, στο σενάριο των "αμφίδρομων υποσταθμών" οι διακυμάνσεις τάσης στην έξοδο των τρένων έχουν μειωθεί κατά 44,32% και 37,01% στις τροχιές 1 και 2 αντίστοιχα, με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών ισχύος κατά 8% σε σύγκριση με τη στρατηγική τοπικού ελέγχου. Επιπλέον, η χρήση στατικών μονάδων αποθήκευσης οδηγεί σε μείωση των διακυμάνσεων τάσης κατά 19,6% και 18,5% στις τροχιές 1 και 2 αντίστοιχα, με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών ισχύος κατά 4%. Συμπερασματικά, το παρόν κεφάλαιο υπογραμμίζει την ανάγκη συντονισμού μεταξύ των εγκατεστημένων συσκευών (αμφίδρομοι υποσταθμοί ή μονάδες αποθήκευσης), προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των τοπικών στρατηγικών ελέγχου και να βελτιωθεί η απόδοση των σύγχρονων μητροπολιτικών σιδηροδρομικών δικτύων.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

6.1 Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει ως αντικείμενο τη μελέτη συστημάτων συνεχούς ρεύματος σε εφαρμογές μικροδικτύων και μητροπολιτικών σιδηροδρομικών δικτύων. Βασικό έναυσμα για τη μελέτη αποτελεί το ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον προς τις τεχνολογίες συνεχούς ρεύματος ενδιαφέρον το οποίο τροφοδοτείται από την ανάγκη επίτευξης υψηλών στόχων σε ότι αφορά το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ικανοποίηση της συνολικής ζήτησης. Επιπλέον, η ηλεκτροδότηση απομακρυσμένων περιοχών φαίνεται να αποτελεί μία βασική περιοχή ανάπτυξης των συστημάτων συνεχούς ρεύματος κυρίως λόγω της απλότητας των συστημάτων αυτών τόσο κατά την εγκατάσταση όσο και τη λειτουργία τους.

Στη διατριβή αναλύθηκαν ζητήματα που αφορούν τον έλεγχο και τη λειτουργία των μικροδικτύων και πραγματοποιήθηκε αναφορά στη βασικότερη αρχιτεκτονική ελέγχου που εμφανίζεται, τον ιεραρχικό έλεγχο. Παρουσιάστηκαν οι βασικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης που αφορούν δίκτυα συνεχούς ρεύματος και καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Μία εξ αυτών και συγκεκριμένα ο αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης που βασίζεται στην ύπαρξη μεταβολών τάσης και συχνότητας στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, μελετήθηκε με την πειραματική διάταξη του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ.

Επιπλέον, αναπτύχθηκε πρωτότυπη μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης σε τοπολογίες DC μικροδικτύων βασιζόμενη στη λειτουργία ενός ελεγχόμενου φορτίου παράλληλα με τον κεντρικό διακόπτη. Εξετάστηκε το ζήτημα της ομαλής μετάβασης ενός DC μικροδικτύου από αυτόνομη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία και παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση των επιμέρους στοιχείων του υπό μελέτη μικροδικτύου. Για τη μελέτη της προτεινόμενης μεθόδου πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με βάση παραλλαγή των προτύπων IEEE 1547 και UL1741. Η προτεινόμενη μέθοδος μελετήθηκε και μέσω της Control Hardware-in-the-Loop τεχνικής για εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων για την λειτουργία της. Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος μελετήθηκε μέσω πειραμάτων με χρήση εξοπλισμού του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ.

Η δεύτερη θεματική ενότητα της διατριβής αφορούσε τα ηλεκτρικά σιδηροδρομικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος (π.χ. τύπου Μετρό, Τραμ) καθώς και τα οφέλη που προκύπτουν από τη διαχείριση της αναγεννητικής ενέργειας που παράγεται κατά την πέδηση των τρένων. Η ενέργεια αυτή τις περισσότερες φορές καταναλώνεται σε απορριπτικά φορτία τοποθετημένα πάνω στα τρένα, καθώς τα περισσότερα σιδηροδρομικά δίκτυα τροφοδοτούνται από μονόδρομους υποσταθμούς οι οποίοι δεν επιτρέπουν την επιστροφή της παραγόμενης ενέργειας πίσω στο κεντρικό δίκτυο. Στα

πλαίσια της διατριβής παρουσιάστηκαν οι στρατηγικές διαχείρισης της αναγεννητικής ενέργειας με στόχο την εξομάλυνση τάσης καθώς και τη μείωση των απωλειών στο δίκτυο. Μελετήθηκε η διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας με χρήση α) Αμφίδρομων υποσταθμών έλξης (ελεγχόμενες διατάξεις AC/DC), β) Μονάδων αποθήκευσης (εγκατεστημένες σε σταθερά σημεία στο δίκτυο). Επιπροσθέτως, μελετήθηκαν ζητήματα που αφορούν την επίδραση των δρομολογίων των τρένων στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του σιδηροδρομικού δικτύου (τάση υποσταθμών, ρεύματα γραμμών κ.α.). Παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση των επιμέρους στοιχείων του δικτύου όπως οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί έλξης, τα ηλεκτρικά τρένα καθώς και η μοντελοποίηση του δικτύου για τον υπολογισμό της τάσης που αναπτύσσεται μεταξύ της γραμμής επιστροφής και της γης. Έγινε εκτενή αναφορά στις τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης που συναντώνται σε σιδηροδρομικές εφαρμογές. Τέλος, εξετάστηκαν τόσο τοπικοί έλεγχοι όσο και συντονισμένος έλεγχος των μονάδων (αμφίδρομοι υποσταθμοί και στατικές μονάδες αποθήκευσης) με στόχο τη βέλτιστη ρύθμιση τάσης στην είσοδο των τρένων. Το δίκτυο το οποίο μελετήθηκε αποτελεί παραλλαγή του μητροπολιτικού σιδηροδρομικού δικτύου της Θεσσαλονίκης.

6.2 Συμβολή

Η κύρια συμβολή της διατριβής συνοψίζεται στα εξής:

1. Το ζήτημα της ανίχνευσης νησιδοποίησης που αφορά τοπολογίες δικτύων συνεχούς ρεύματος βρίσκεται ακόμα σε πολύ πρώιμο στάδιο. Ελάχιστες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί και αντιμετωπίζουν το ζήτημα αυτό. Στα πλαίσια της διατριβής παρουσιάστηκαν οι βασικές μέθοδοι που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία. Με χρήση της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ μελετήθηκε ο αλγόριθμος ανίχνευσης νησιδοποίησης που βασίζεται στην ύπαρξη μεταβολών τάσης και συχνότητας στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος.
2. Προτάθηκε και αναπτύχθηκε μία πρωτότυπη μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης η οποία βασίζεται στη λειτουργία ενός ελεγχόμενου φορτίου παράλληλα στο κεντρικό διακόπτη. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μία λύση η οποία χαρακτηρίζεται από την απλότητα και το χαμηλό κόστος κατασκευής και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε τοπολογίες εναλλασσόμενου όσο και συνεχούς ρεύματος. Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές που θα πρέπει να ακολουθούνται κατά το σχεδιασμό της συσκευής ελεγχόμενου φορτίου. Η ανάλυση που προηγήθηκε ολοκληρώθηκε με την κατασκευή της εν λόγω συσκευής.
3. Στη διατριβή αναδεικνύεται η σημασία της Control Hardware-in-the-Loop τεχνικής ως ένα μέσο για τη μελέτη νέων αλγορίθμων ελέγχου. Στο CHIL πείραμα του Κεφάλαιο 3 παρατηρήθηκαν διαφορές σε σχέση με την προσομοίωση. Συγκεκριμένα, στην προσομοίωση το ρεύμα δικτύου ($I_{THRESHOLD}$)

έπρεπε να είναι κάτω από 0,01A για ένα χρονικό διάστημα 0,05sec προκειμένου να ανιχνευθεί η κατάσταση νησιδοποίησης, ενώ στο CHIL πείραμα το όριο αυτό έπρεπε να αλλάξει σε 0,08A λόγω του θορύβου στις μετρήσεις και των χρονικών καθυστερήσεων στα σήματα που ανταλλάσσονταν. Επιπλέον, η διάρκεια επανασύνδεσης του μικροδικτύου ήταν διαφορετική στις δύο περιπτώσεις. Η κυμάτωση (θόρυβος) που υπήρξε γύρω από τη μέση τιμή στα αναλογικά σήματα που ανταλλάσσονται μεταξύ του προσομοιωτή πραγματικού χρόνου και του ελεγκτή, ενεργοποίησε την επανασύνδεση του μικροδικτύου λίγο νωρίτερα (διάρκεια επανασύνδεσης: 9sec) σε σχέση με την προσομοίωση (11sec).

4. Προτείνεται μια στρατηγική ελέγχου DC μικροδικτύου σχετικά με την ομαλή μετάβαση μεταξύ διασυνδεδεμένης και απομονωμένης λειτουργίας. Στη διατριβή παρουσιάζονται όλα τα στάδια αυτής της διαδικασίας (ανίχνευση νησιδοποίησης, έλεγχος μονάδων παραγωγής και αποθήκευσης, μετάβαση από απομονωμένη σε διασυνδεδεμένη λειτουργία).
5. Παρουσιάστηκαν οι κύριες στρατηγικές διαχείρισης της αναγεννητικής πέδησης στα σιδηροδρομικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος. Συγκεκριμένα παρουσιάστηκε η επίδραση των δρομολογίων και η χρήση αμφίδρομων υποσταθμών έλξης και στατικών μονάδων αποθήκευσης στη λειτουργία των σιδηροδρομικών δικτύων συνεχούς ρεύματος. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις που δείχνουν την επίδρασή τους στη λειτουργία ενός τροποποιημένου δικτύου της Θεσσαλονίκης.
6. Στη διατριβή αυτή προτείνεται μία στρατηγική ελέγχου των εγκατεστημένων αμφίδρομων υποσταθμών έλξης ή των στατικών μονάδων αποθήκευσης με στόχο τη βέλτιστη ρύθμιση τάσης στην είσοδο των τρένων με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών που εμφανίζονται στα απορριπτικά φορτία. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκρίθηκαν μεταξύ τους με "μέτρο" την απόκλιση από την τάση "κενού φορτίου" των υποσταθμών. Ο προτεινόμενος συντονισμένος έλεγχος των μονάδων αποτελεί ένα περαιτέρω βήμα από τους τοπικούς ελέγχους που συναντώνται στη βιβλιογραφία.
7. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής παρουσιάστηκε η μεθοδολογία για την διαστασιολόγηση των υποσταθμών έλξης με βάση τα πρότυπα EN 50328 και EN 50329 (Παράρτημα Β)

6.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

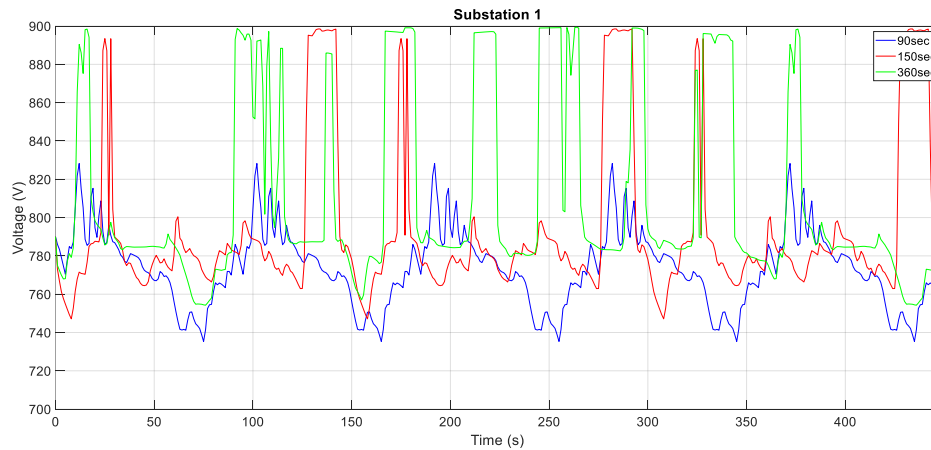
Ως μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας διατριβής διαφαίνονται οι εξής:

- Η ανάπτυξη της συσκευής για την ανίχνευση νησιδοποίησης σε δίκτυα συνεχούς ρεύματος, θα πρέπει να γίνει συμπεριλαμβάνοντας τις θερμικές απώλειες του ελεγχόμενου φορτίου. Η ανάλυση αυτή είναι απαραίτητη για τη μείωση του μεγέθους της συσκευής καθώς και των συνολικών απωλειών που εμφανίζονται.

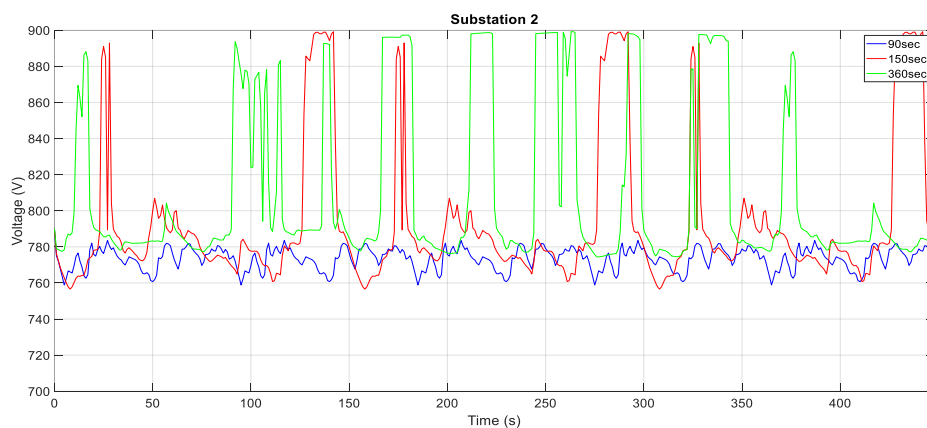
- Η μελέτη κατανεμημένων αλγορίθμων ελέγχου για τη ρύθμιση τάσης και την εξοικονόμηση ενέργειας στα μητροπολιτικά σιδηροδρομικά δίκτυα. Είναι γεγονός ότι σε αυτές τις τοπολογίες δικτύων μεγέθη όπως η τάση στην είσοδο των τρένων επηρεάζεται κυρίως από τους γειτονικούς υποσταθμούς έλξης και λιγότερο από εκείνους που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση (που σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει αρκετά χιλιόμετρα). Με τη χρήση κατανεμημένων αλγορίθμων ελέγχου τα προβλήματα ρύθμισης τάσης και εξοικονόμησης ενέργειας δεν λύνονται πλέον κεντρικά αλλά σε ομάδες υποσταθμών.
- Ως μελλοντική επέκταση αυτής της διατριβής θα μπορούσε να υπάρξει η μελέτη των σιδηροδρομικών δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος καθώς και οι τοπολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι εμφανίζονται κυρίως με τη μορφή δύο τοπολογιών: α) Απευθείας τροφοδότηση (Direct Feeder) στην οποία η τροφοδότηση γίνεται από τον υποσταθμό στο τρένο μέσω εναέριου καλωδίου (catenary) και επιστροφή από τις ράγες, β) Τροφοδότηση με αυτομετασχηματιστές τα τυλίγματα των οποίων συνδέονται ανάμεσα στον αγωγό κύριας τροφοδοσίας (catenary) και ενός βοηθητικού αγωγού τροφοδοσίας, που ονομάζεται feeder, με τις ράγες να βρίσκονται σε ενδιάμεσο σημείο στην ηλεκτρολογική σύνδεση και στόχο την εξισορρόπηση της τάσης στο σιδηροδρομικό δίκτυο.

Παράρτημα Α

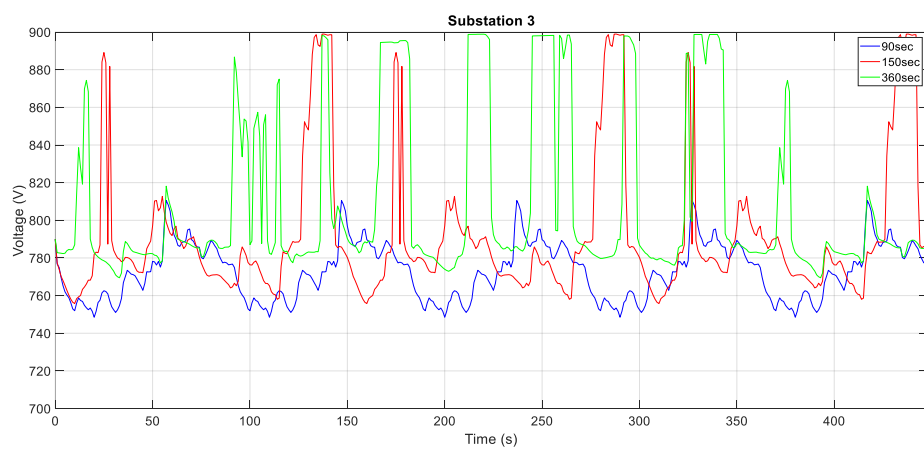
Πλήρη καταγραφή αποτελεσμάτων για επίδραση χρονοαπόστασης στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Εικόνα 4.8 (παραλλαγή σιδηροδρομικού δικτύου Θεσσαλονίκης)



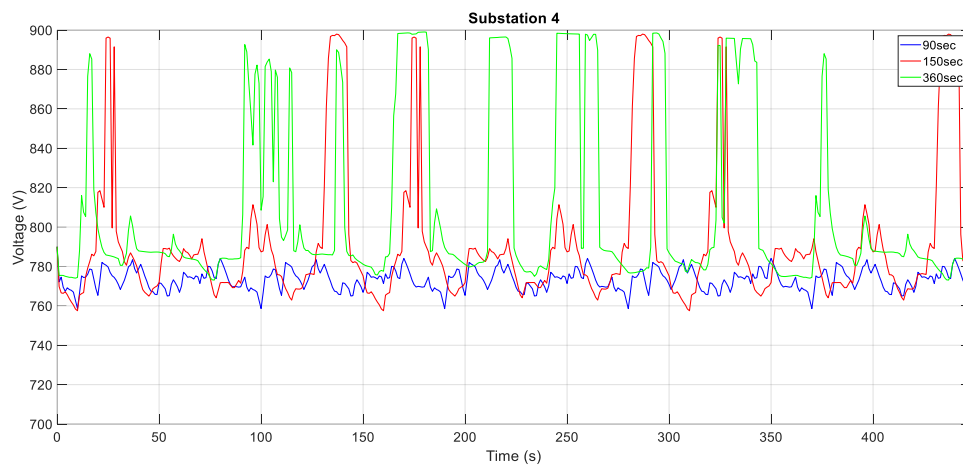
Εικόνα ΠΑ.1 Τάση υποσταθμού TS1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



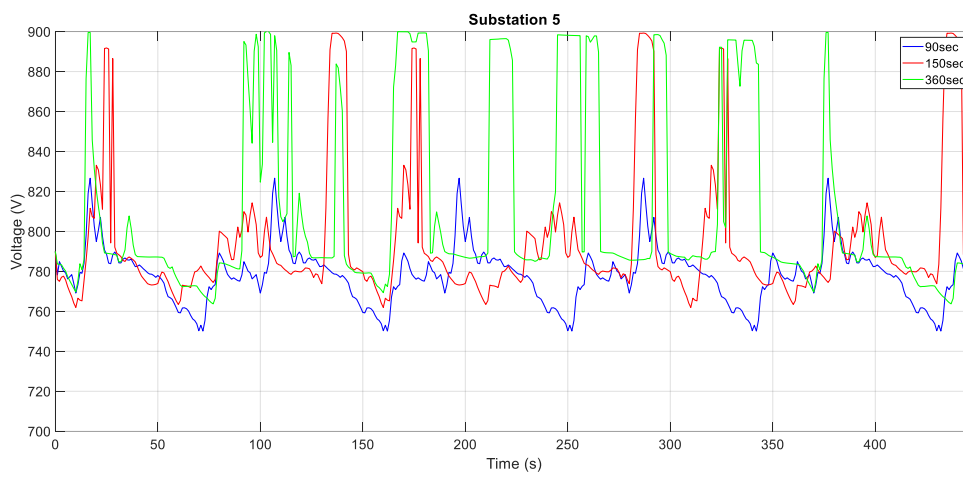
Εικόνα ΠΑ.2 Τάση υποσταθμού TS2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



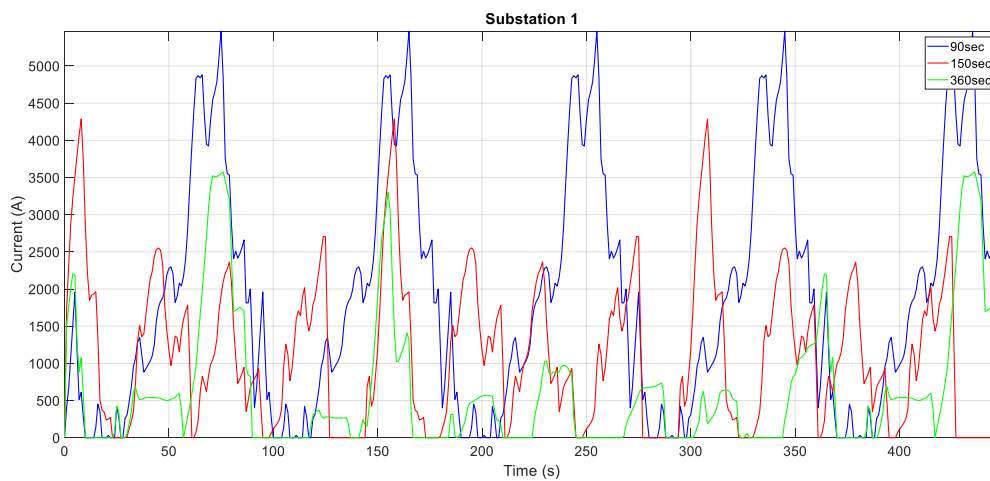
Εικόνα ΠΑ.3 Τάση υποσταθμού TS3 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



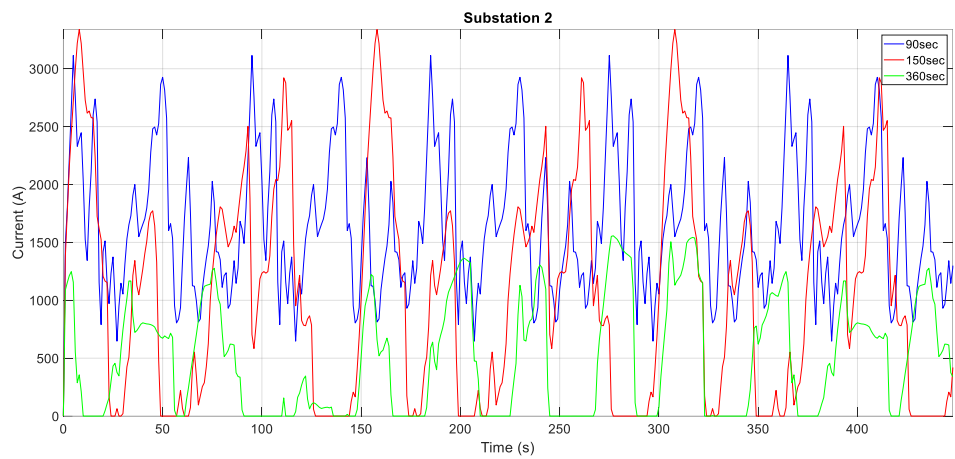
Εικόνα ΠΑ.4 Τάση υποσταθμού TS4 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



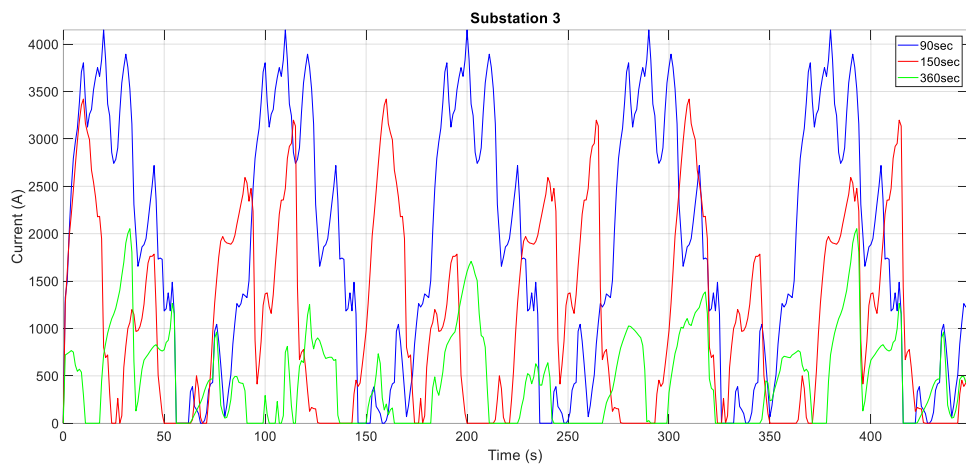
Εικόνα ΠΑ.5 Τάση υποσταθμού TS5 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



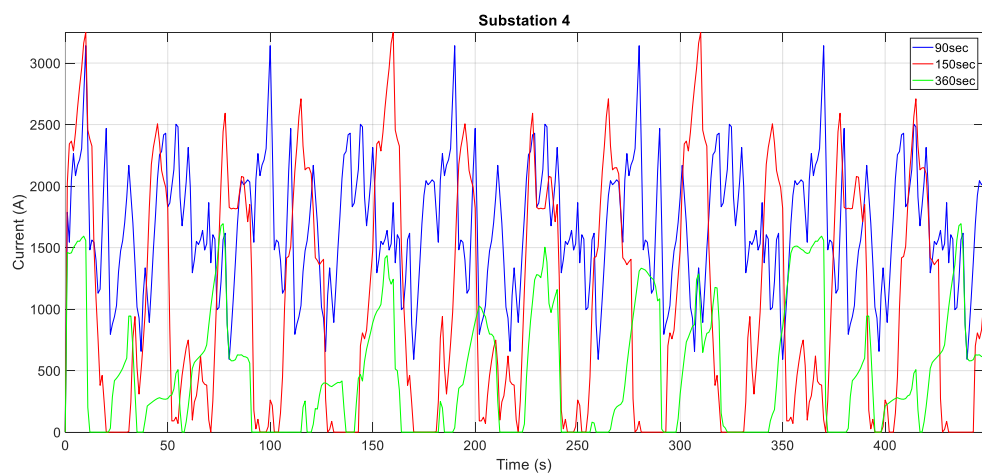
Εικόνα ΠΑ.6 Ρεύμα υποσταθμού TS1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



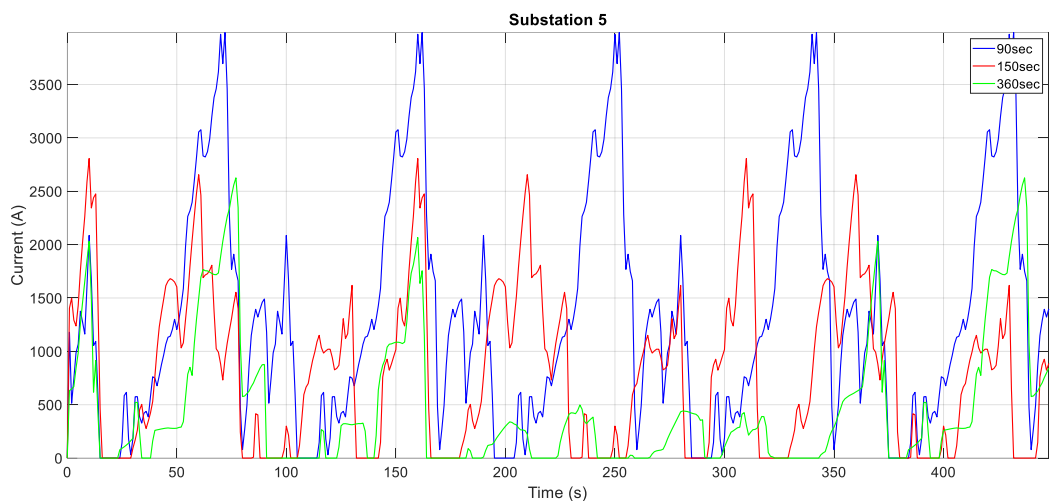
Εικόνα ΠΑ.7 Ρεύμα υποσταθμού TS2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



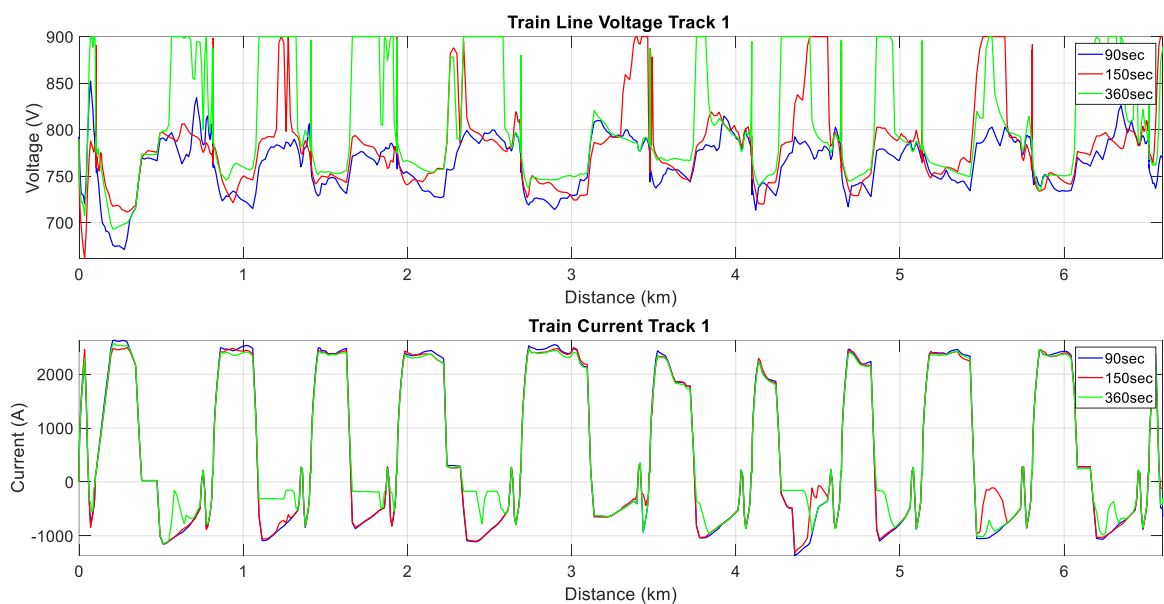
Εικόνα ΠΑ.8 Ρεύμα υποσταθμού TS3 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



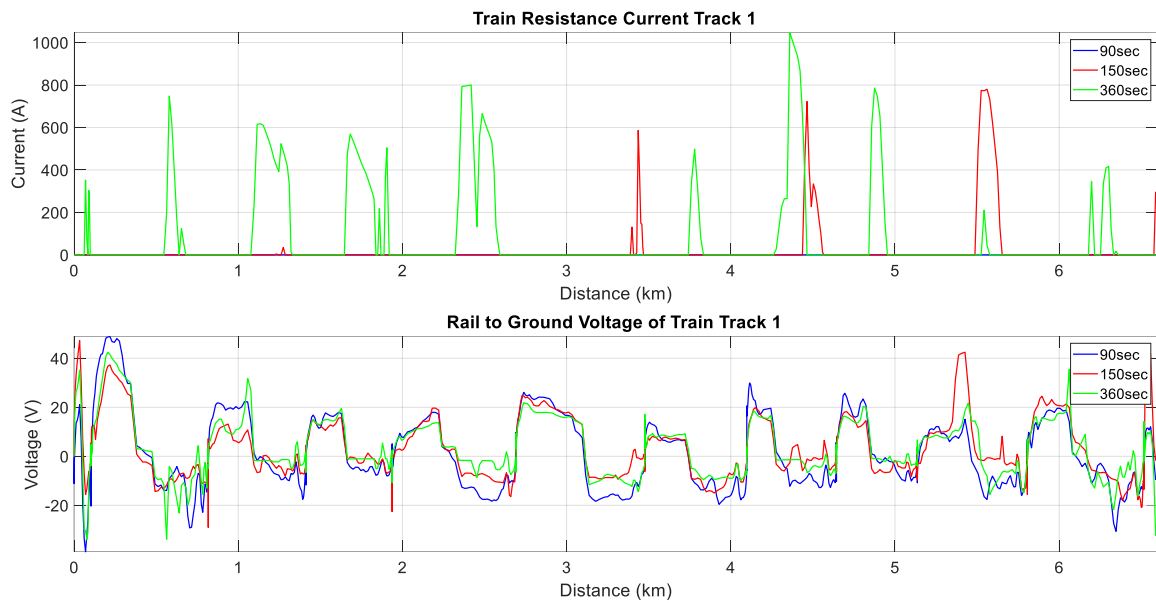
Εικόνα ΠΑ.9 Ρεύμα υποσταθμού TS4 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



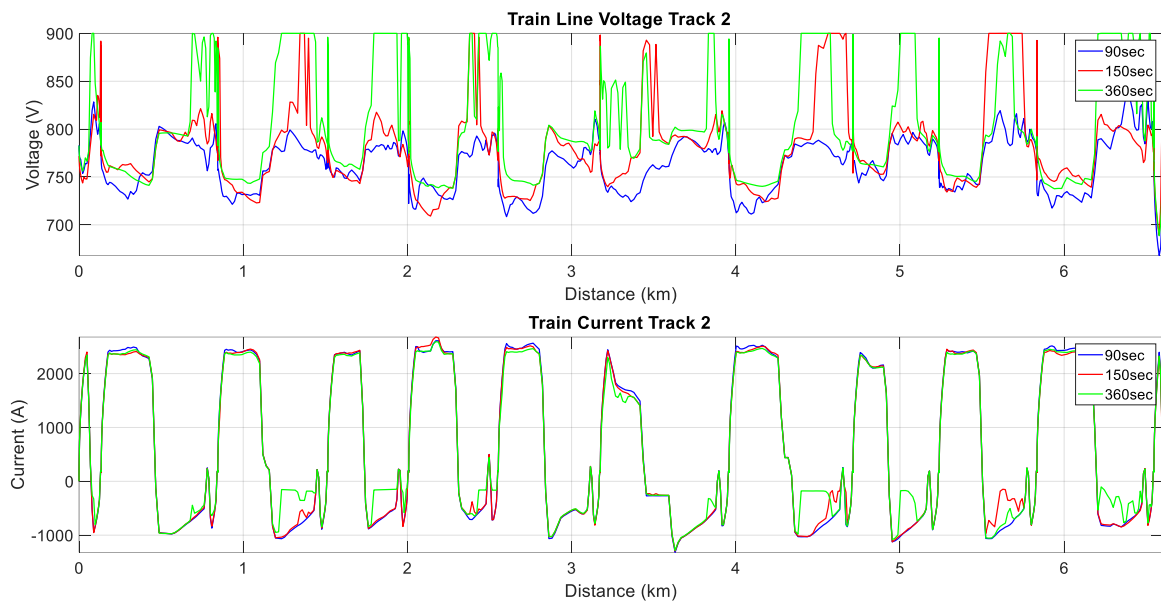
Εικόνα ΠΑ.10 Ρεύμα υποσταθμού TS5 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



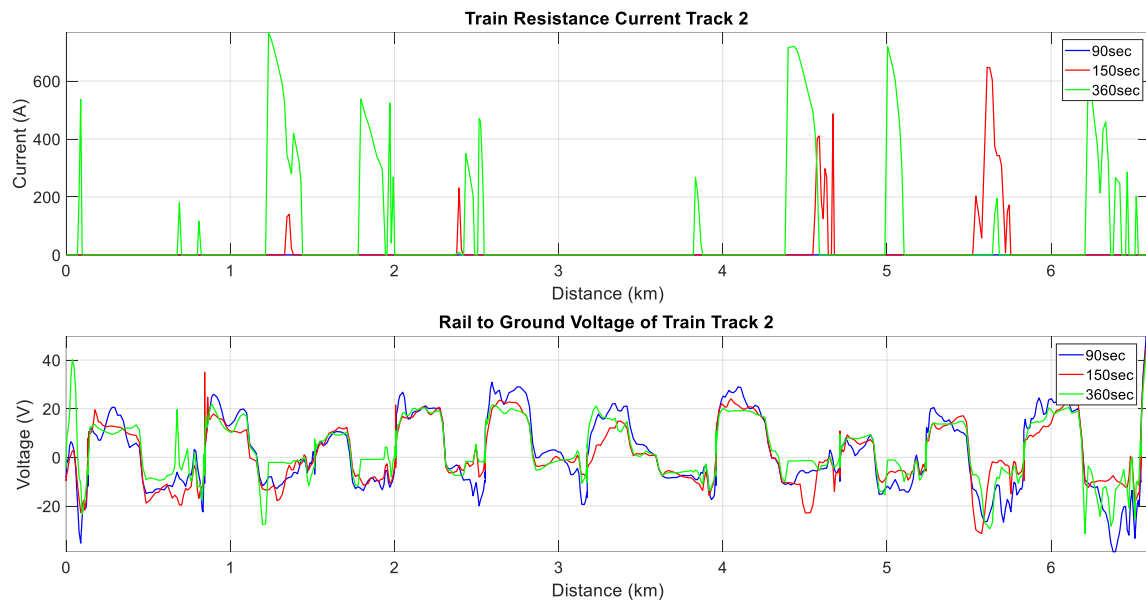
Εικόνα ΠΑ.11 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης



Εικόνα ΠΑ.12 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης

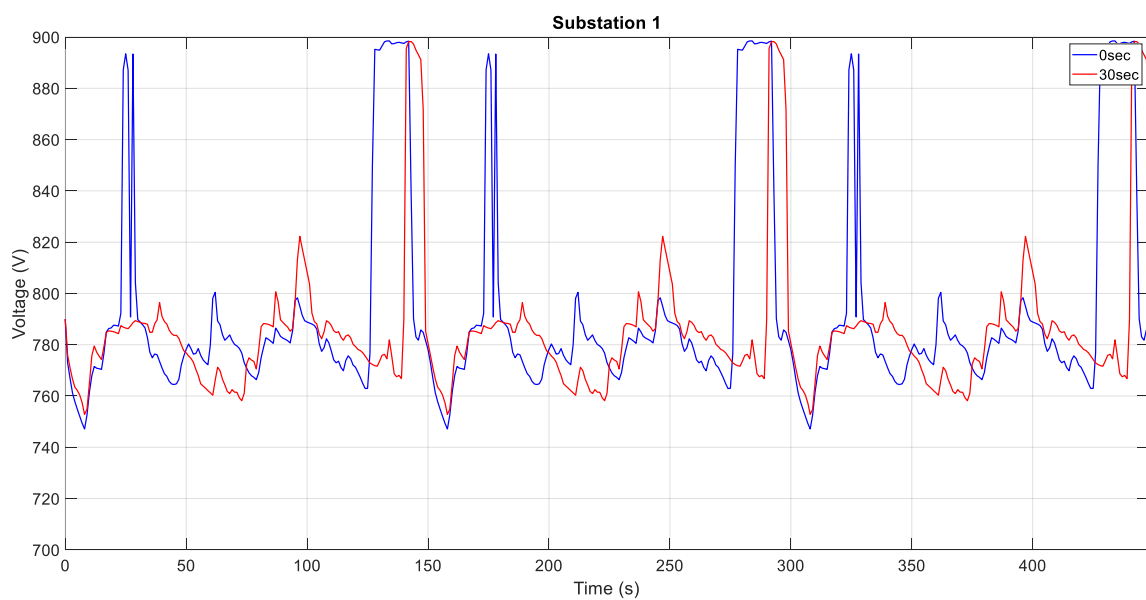


Εικόνα ΠΑ.13 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης

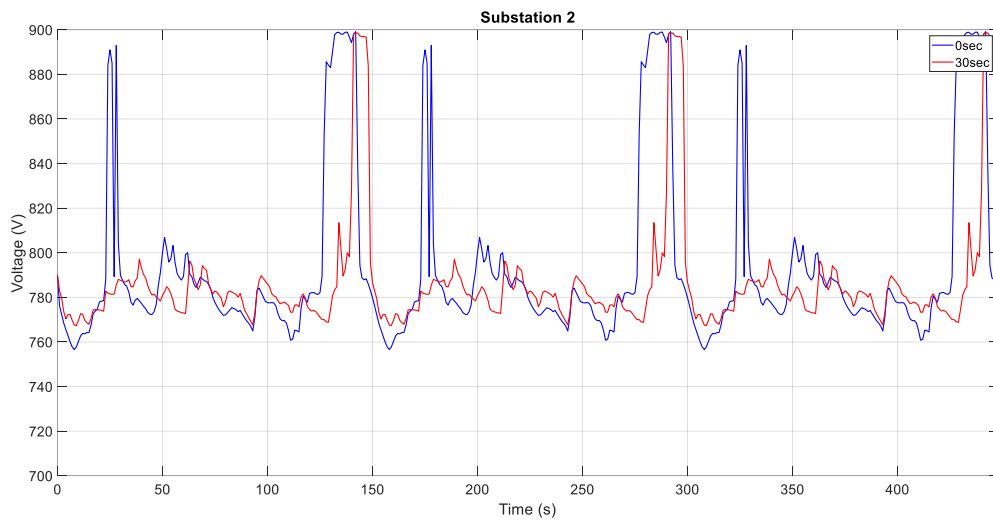


Εικόνα ΠΑ.14 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορες τιμές χρονοαπόστασης

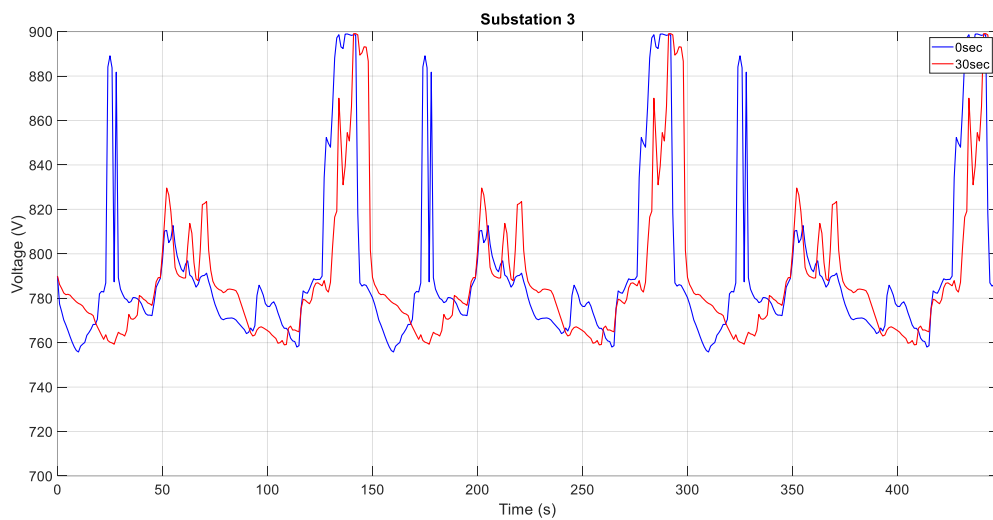
Πλήρη καταγραφή αποτελεσμάτων για επίδραση χρονικής καθυστέρησης των τρένων στην τροχιά 2 στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Εικόνας 4.8 (παραλλαγή σιδηροδρομικού δικτύου Θεσσαλονίκης)



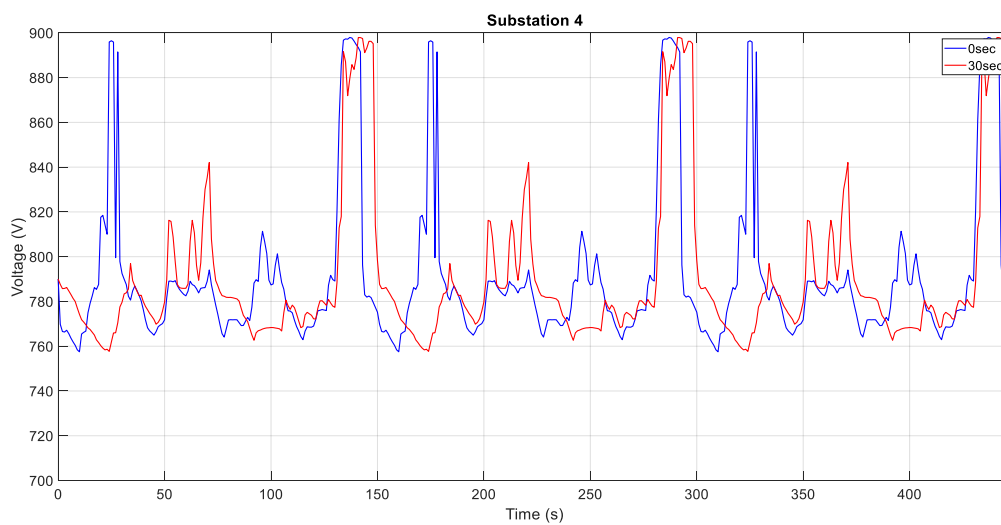
Εικόνα ΠΑ.15 Τάση υποσταθμού TS1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



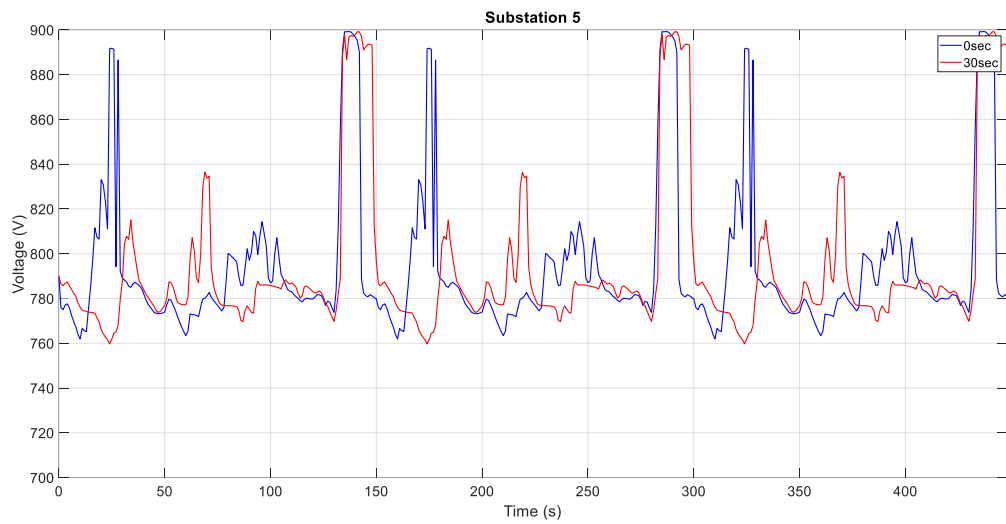
Εικόνα ΠΑ.16 Τάση υποσταθμού TS2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



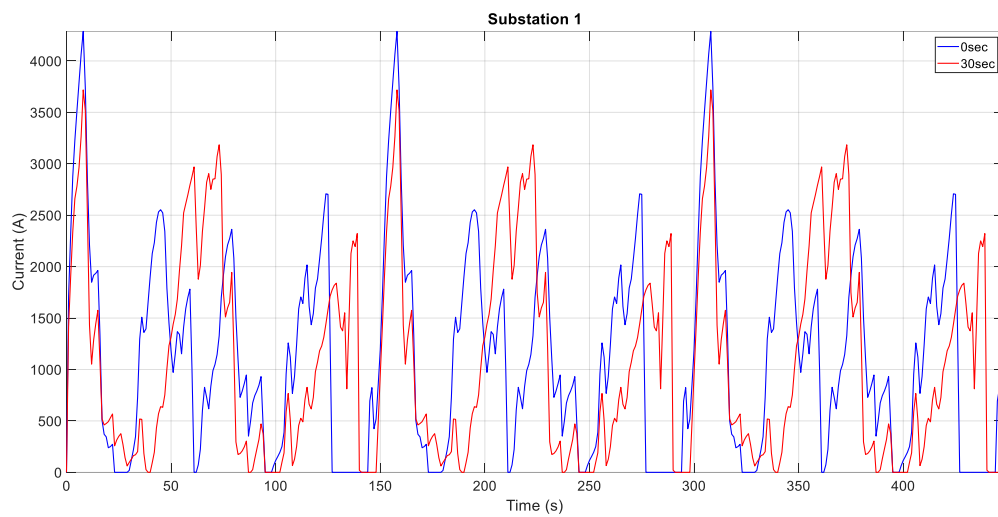
Εικόνα ΠΑ.17 Τάση υποσταθμού TS3 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



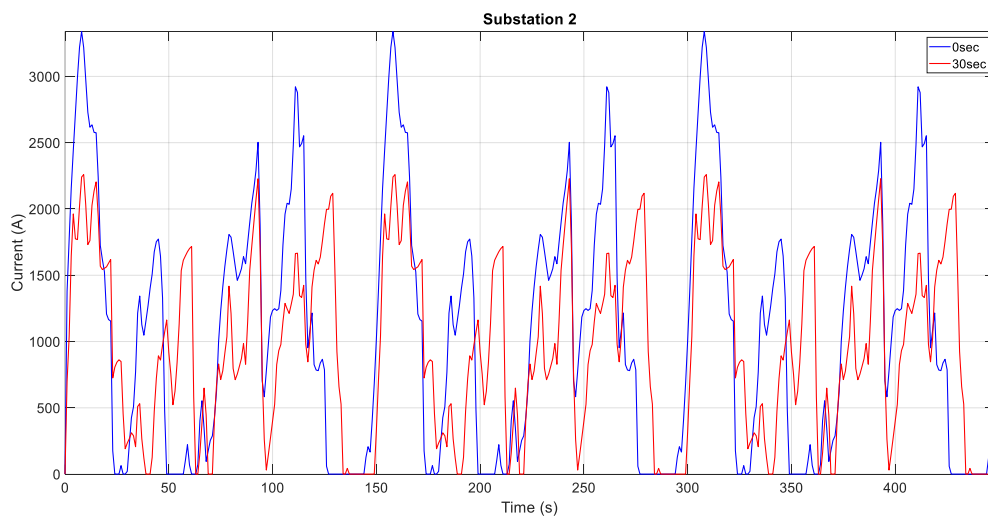
Εικόνα ΠΑ.18 Τάση υποσταθμού TS4 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



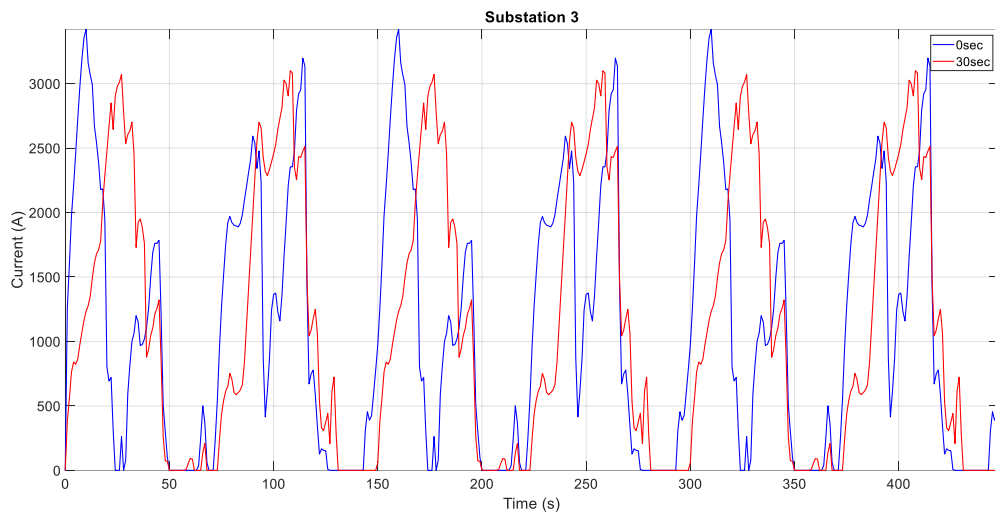
Εικόνα ΠΑ.19 Τάση υποσταθμού TS5 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



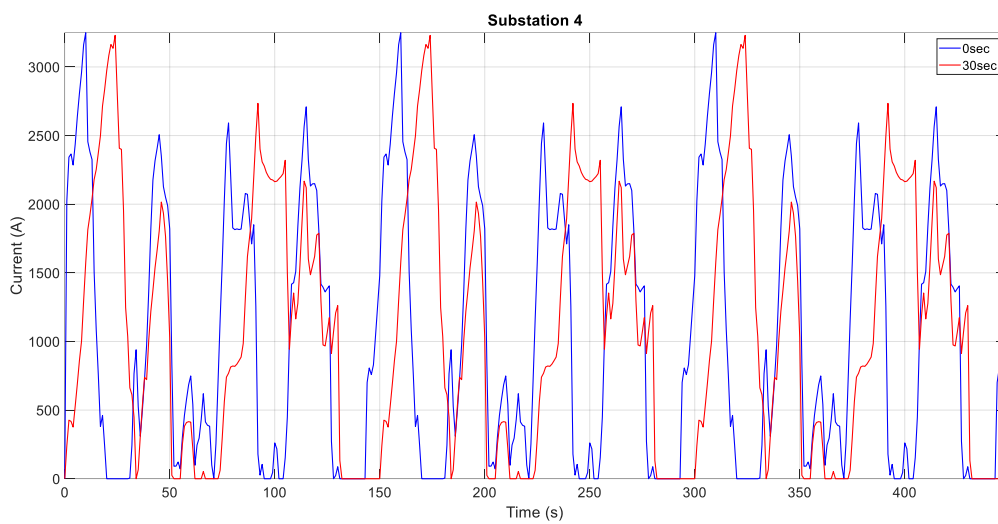
Εικόνα ΠΑ.20 Ρεύμα υποσταθμού TS1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



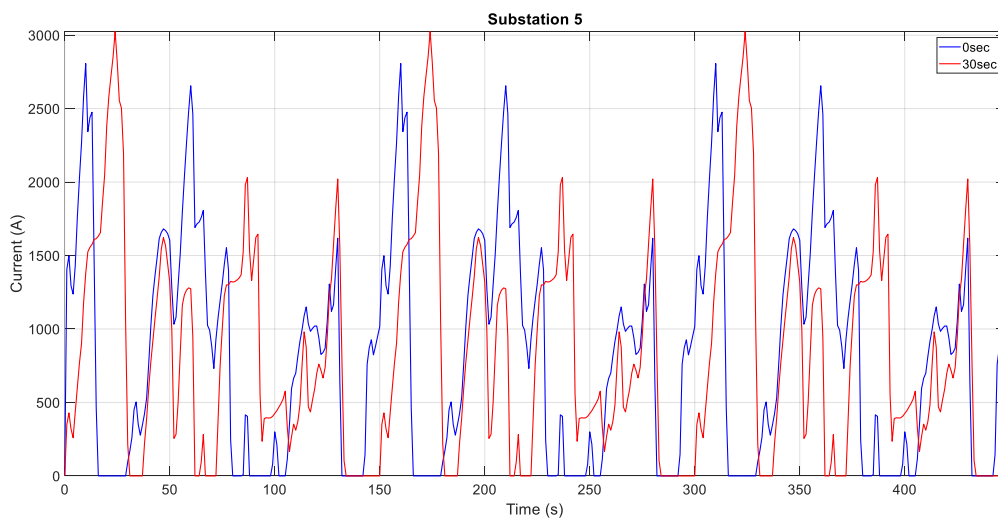
Εικόνα ΠΑ.21 Ρεύμα υποσταθμού TS2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



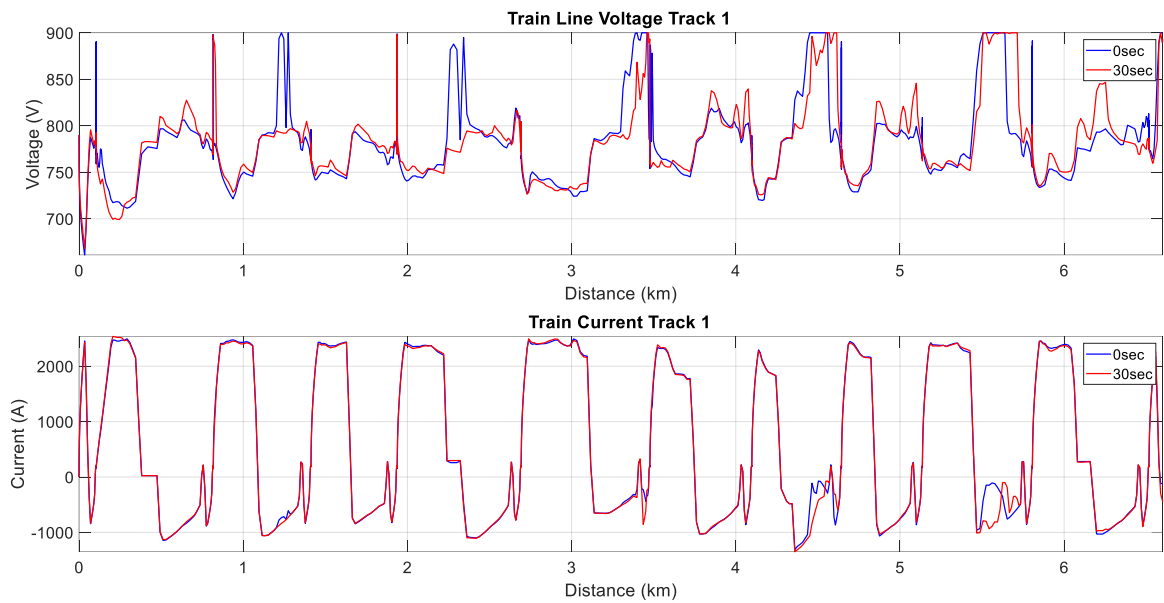
Εικόνα ΠΑ.22 Ρεύμα υποσταθμού TS3 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



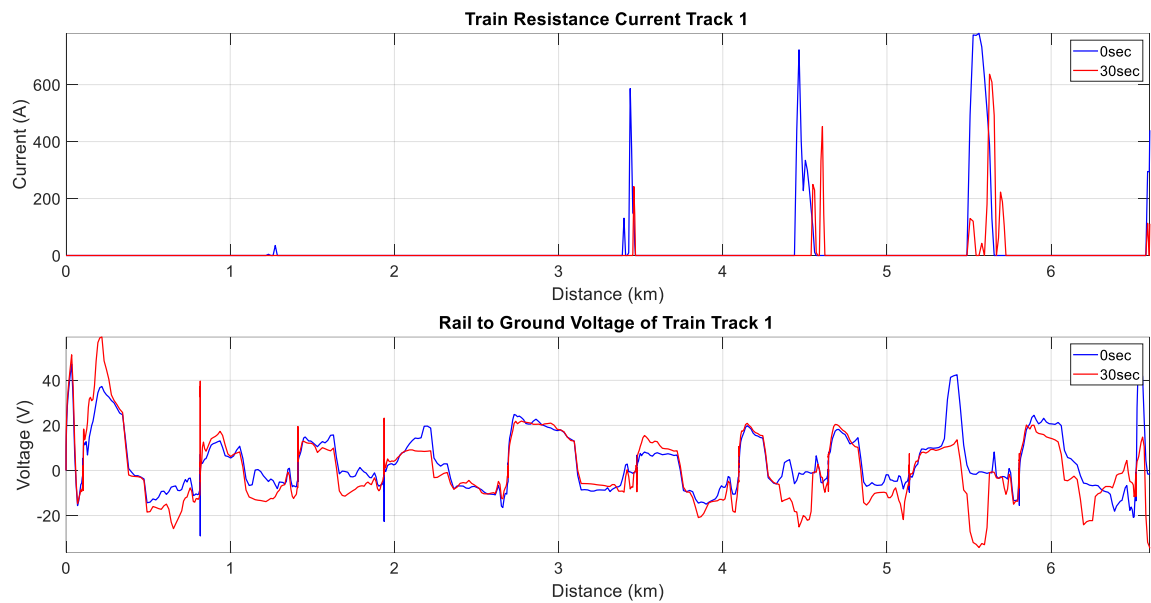
Εικόνα ΠΑ.23 Ρεύμα υποσταθμού TS4 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



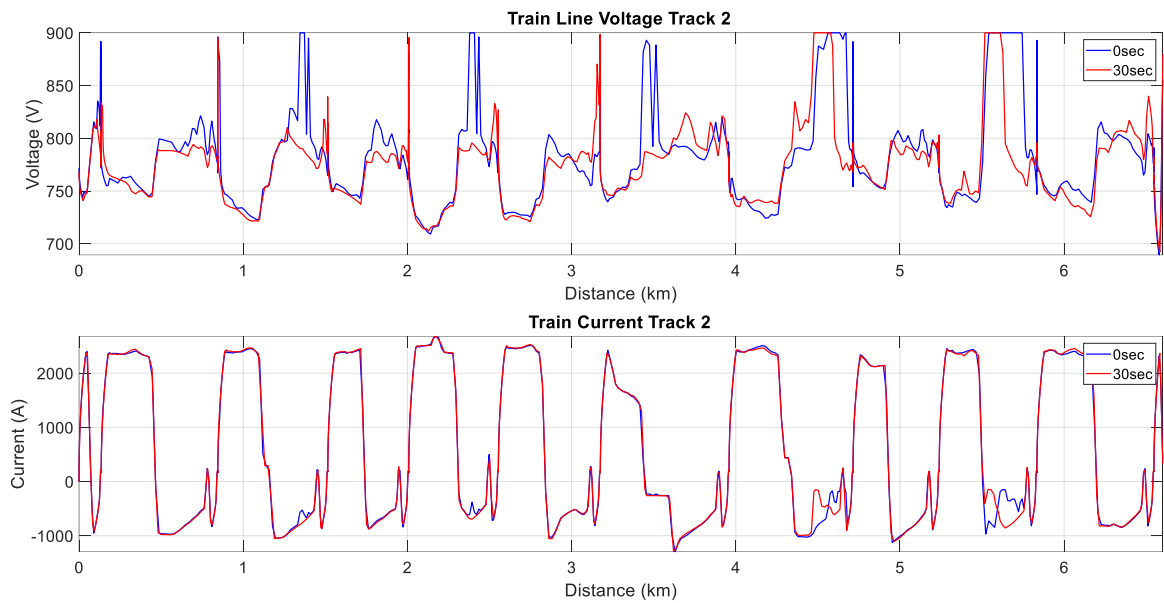
Εικόνα ΠΑ.24 Ρεύμα υποσταθμού TS5 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



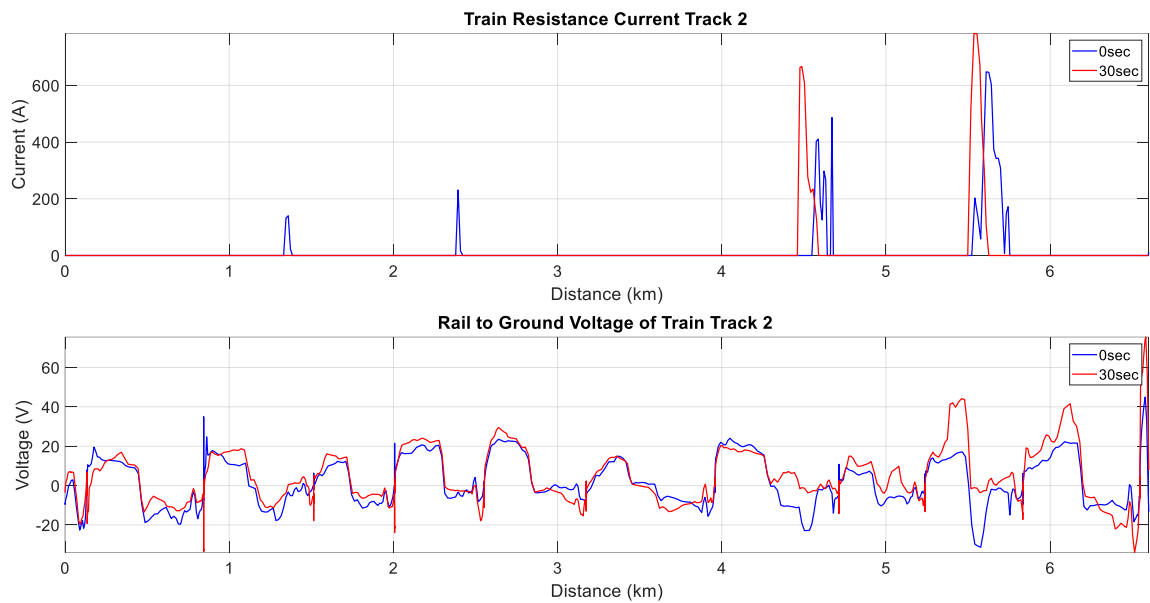
Εικόνα ΠΑ.25 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2



Εικόνα ΠΑ.26 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2

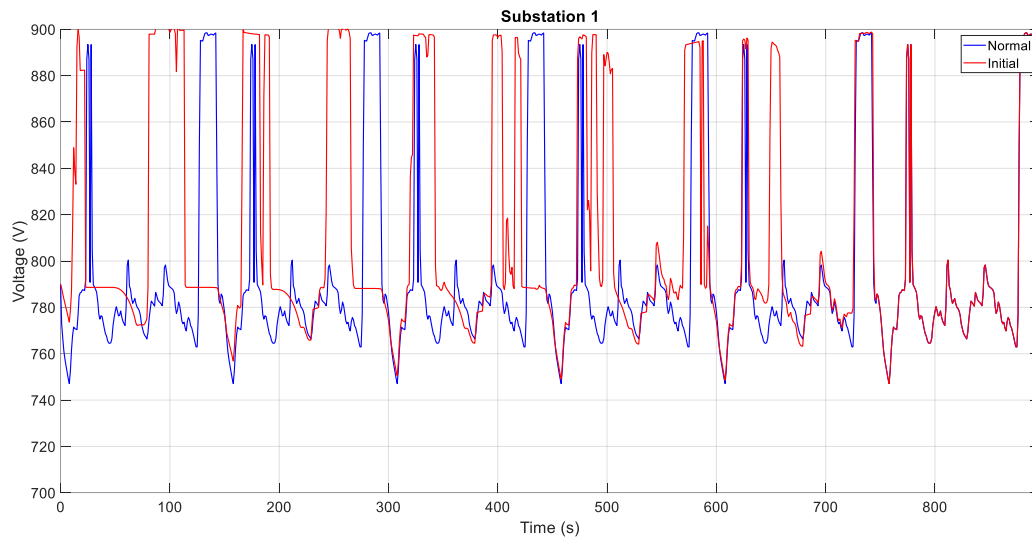


Εικόνα ΠΑ.27 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2

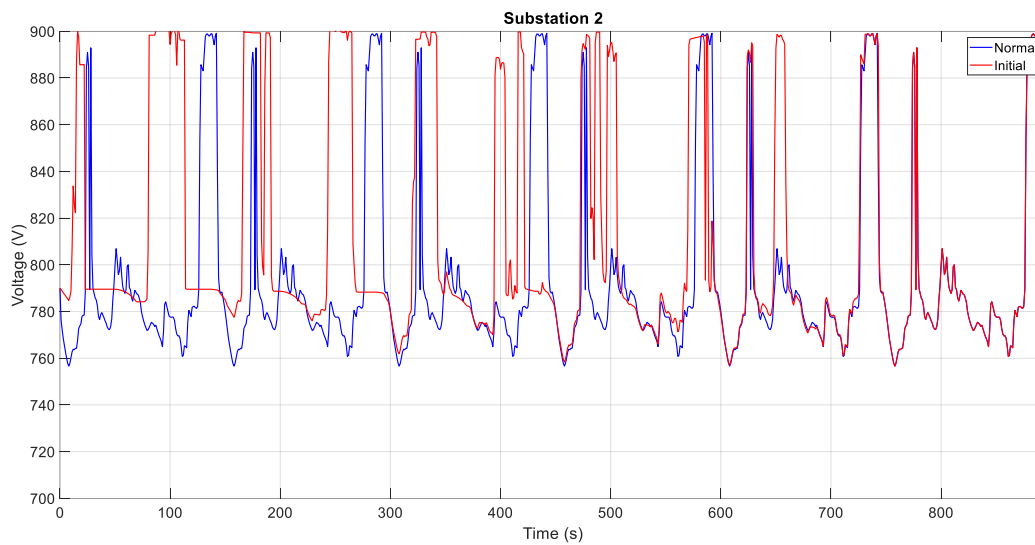


Εικόνα ΠΑ.8 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 για διαφορετικές τιμές εκκίνησης των τρένων στην τροχιά 2

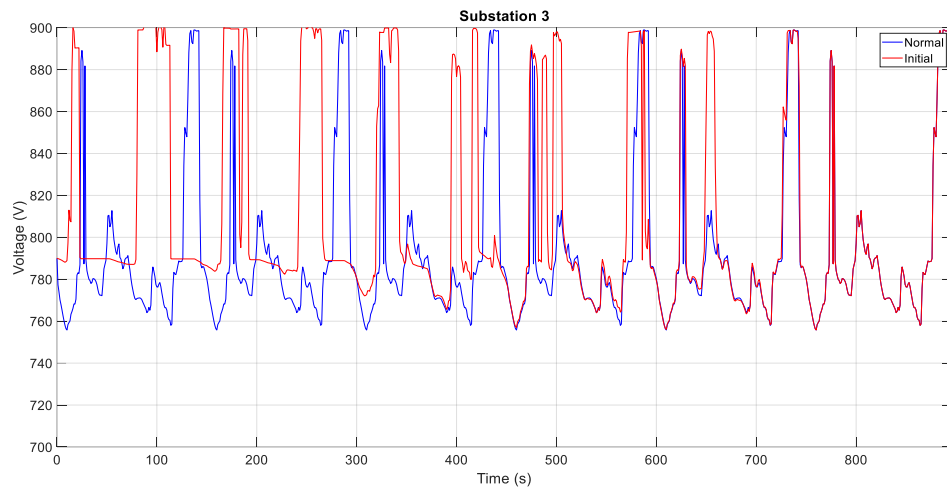
Πλήρη καταγραφή αποτελεσμάτων κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal) στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Εικόνας 4.8 (παραλλαγή σιδηροδρομικού δικτύου Θεσσαλονίκης)



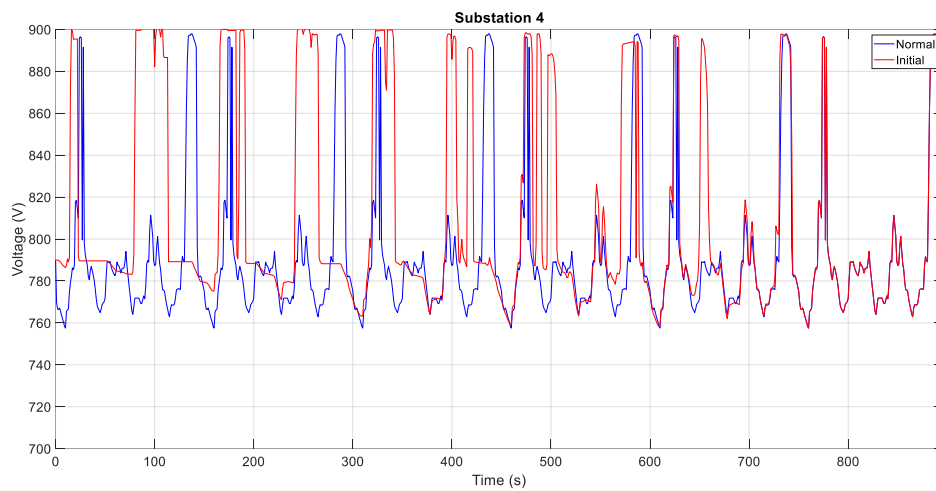
Εικόνα ΠΑ.29 Τάση υποσταθμού TS1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



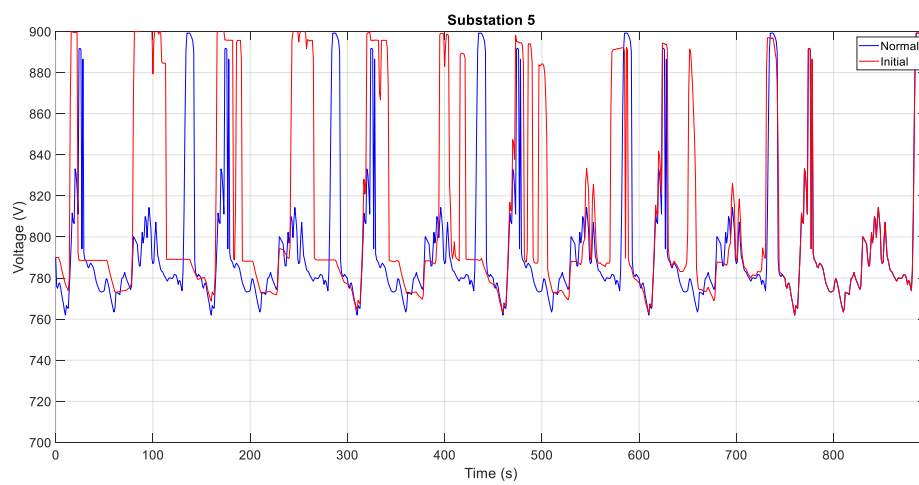
Εικόνα ΠΑ.30 Τάση υποσταθμού TS2 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



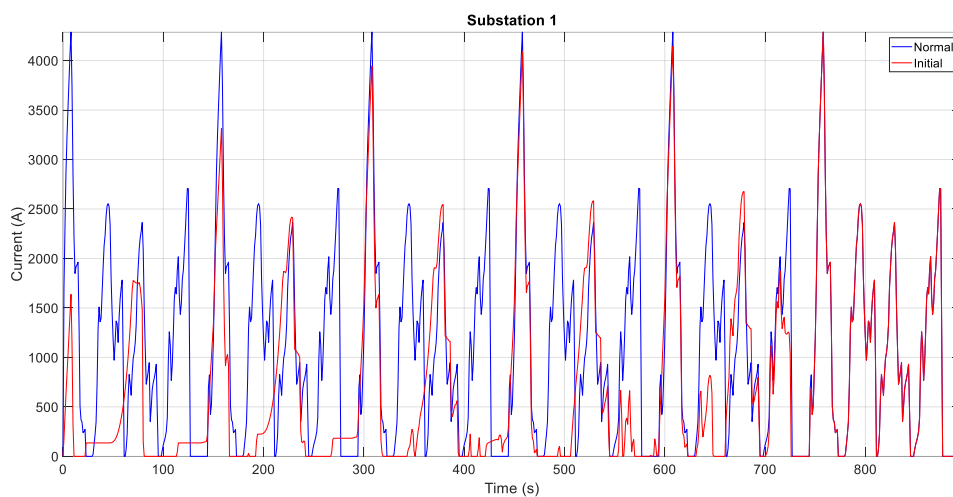
Εικόνα ΠΑ.31 Τάση υποσταθμού TS3 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



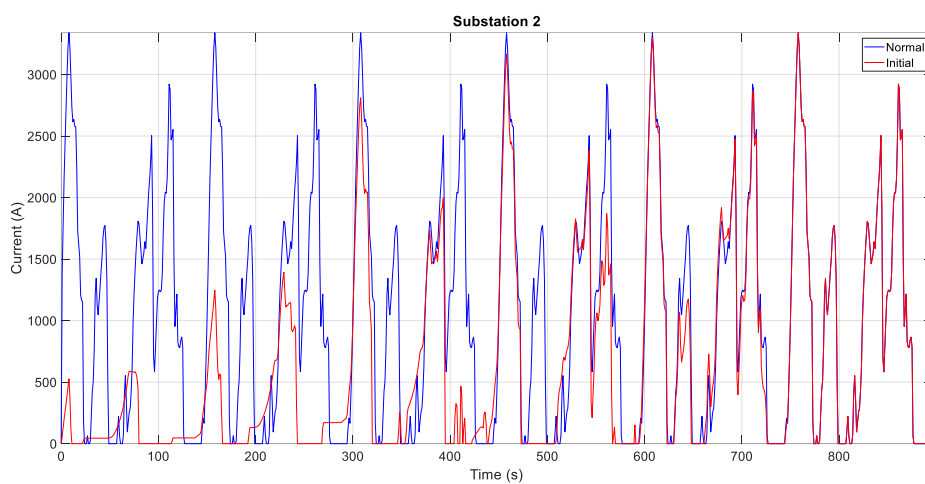
Εικόνα ΠΑ.32 Τάση υποσταθμού TS4 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



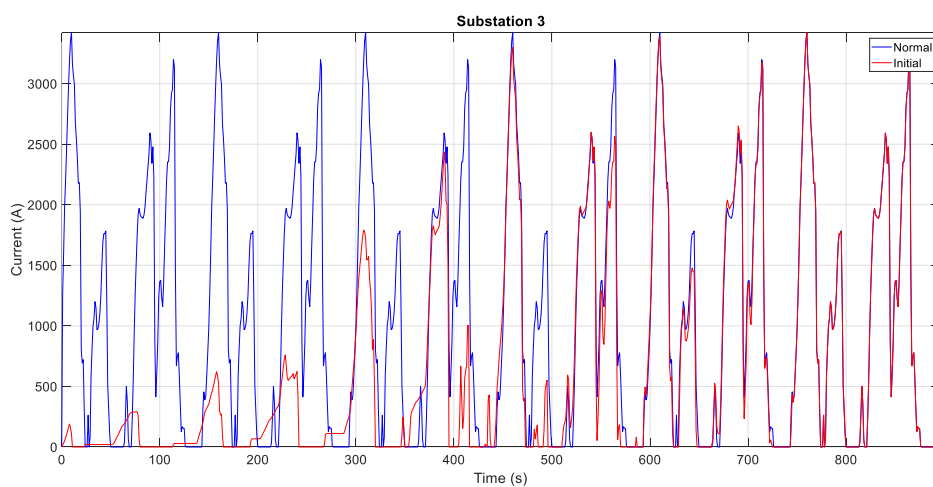
Εικόνα ΠΑ.33 Τάση υποσταθμού TS5 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



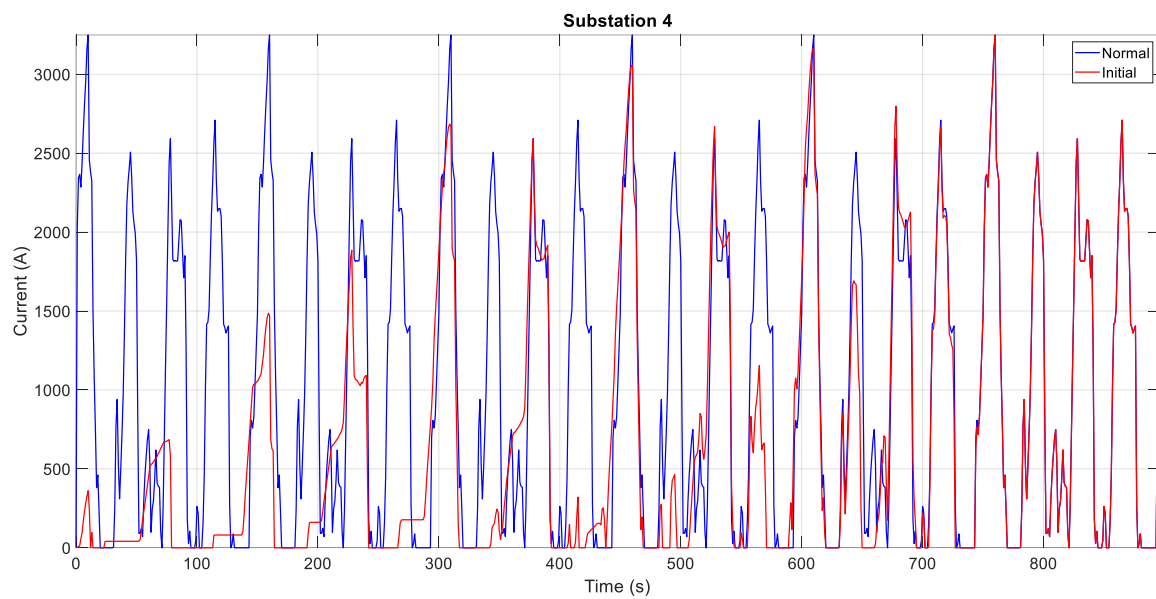
Εικόνα ΠΑ.34 Ρεύμα υποσταθμού TS1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



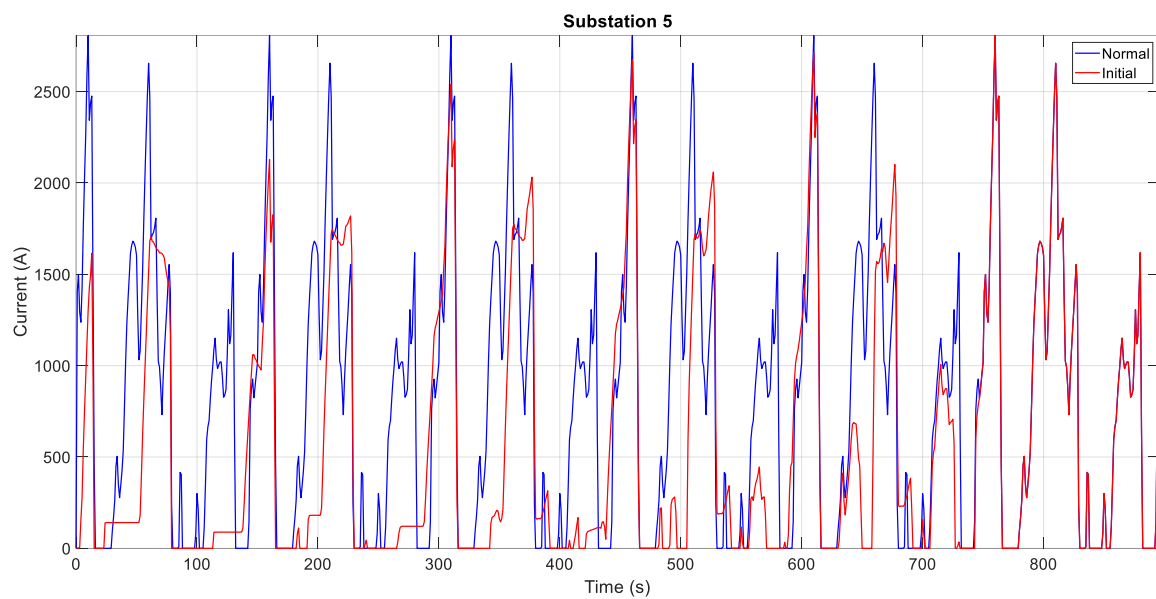
Εικόνα ΠΑ.35 Ρεύμα υποσταθμού TS2 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



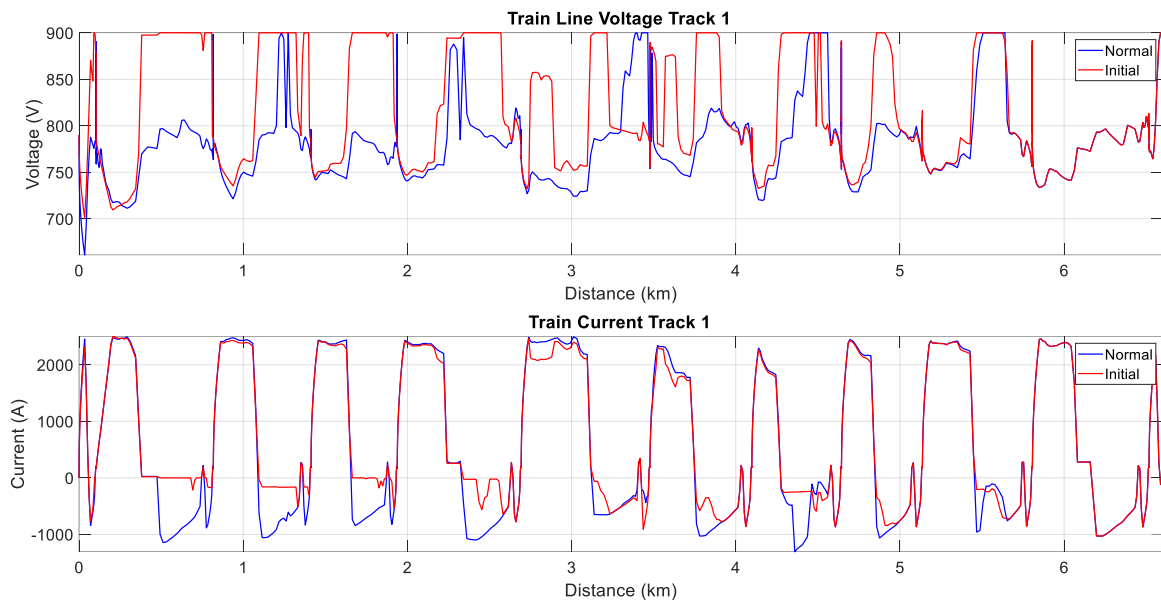
Εικόνα ΠΑ.36 Ρεύμα υποσταθμού TS3 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



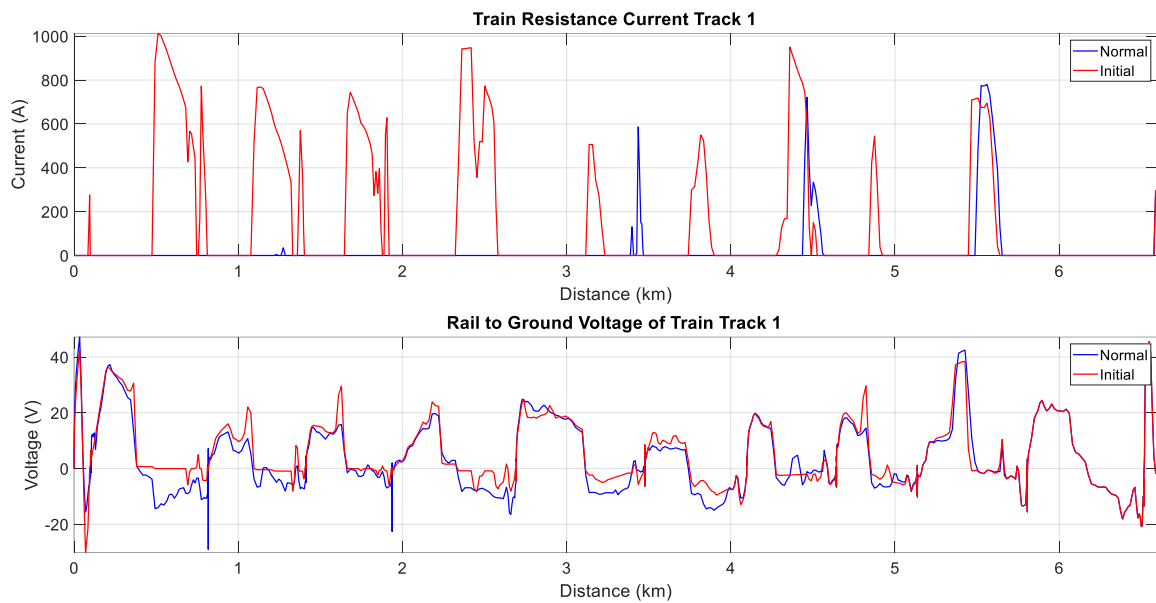
Εικόνα ΠΑ.37 Ρεύμα υποσταθμού TS4 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



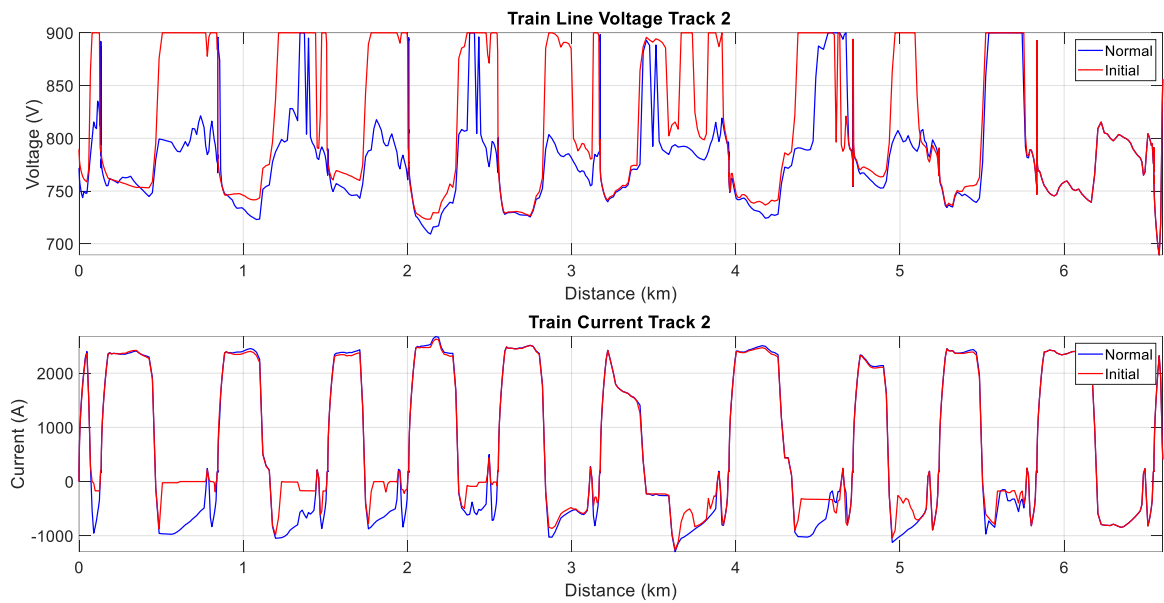
Εικόνα ΠΑ.38 Ρεύμα υποσταθμού TS5 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



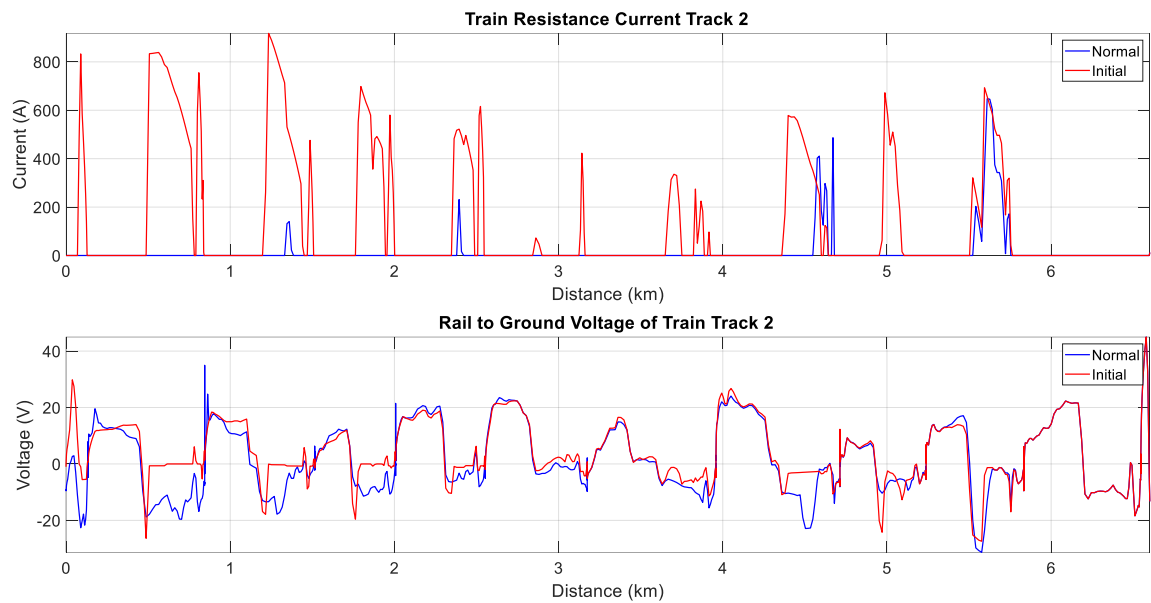
Εικόνα ΠΑ.39 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)



Εικόνα ΠΑ.40 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)

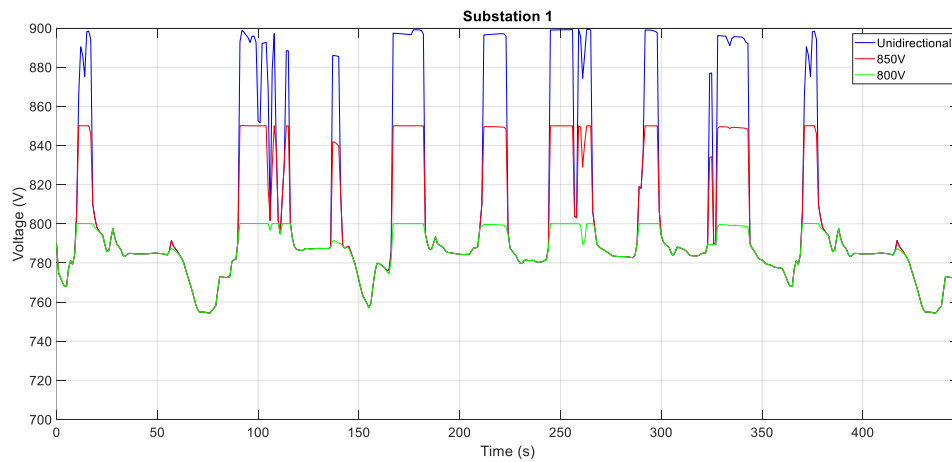


Εικόνα ΠΑ.41 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)

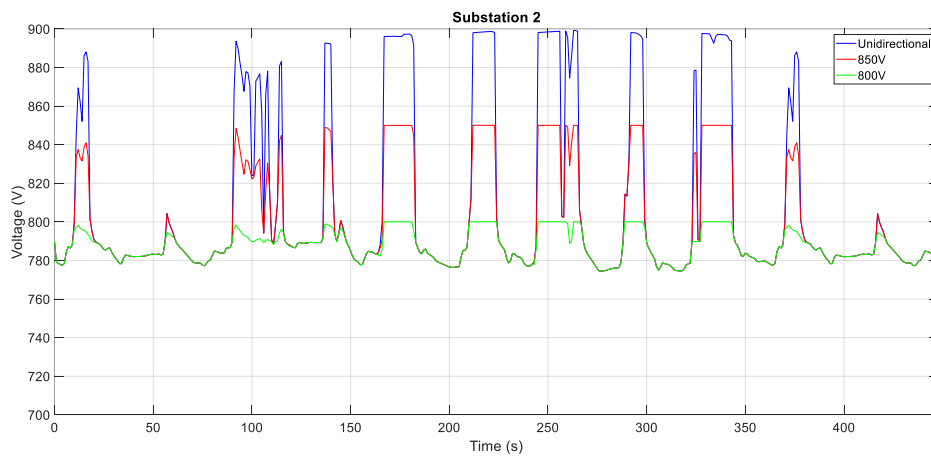


Εικόνα ΠΑ.42 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 κατά την εκκίνηση του συστήματος (Initial) και κατά την κανονική λειτουργία (Normal)

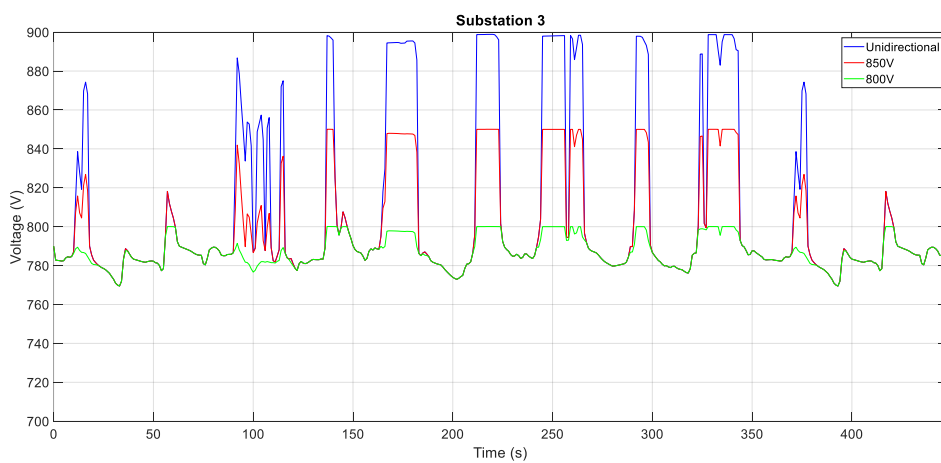
Πλήρη καταγραφή αποτελεσμάτων για την επίδραση του ορίου φόρτισης στους αμφίδρομους υποσταθμούς στο σιδηροδρομικό δίκτυο της Εικόνας 4.8 (παραλλαγή σιδηροδρομικού δικτύου Θεσσαλονίκης)



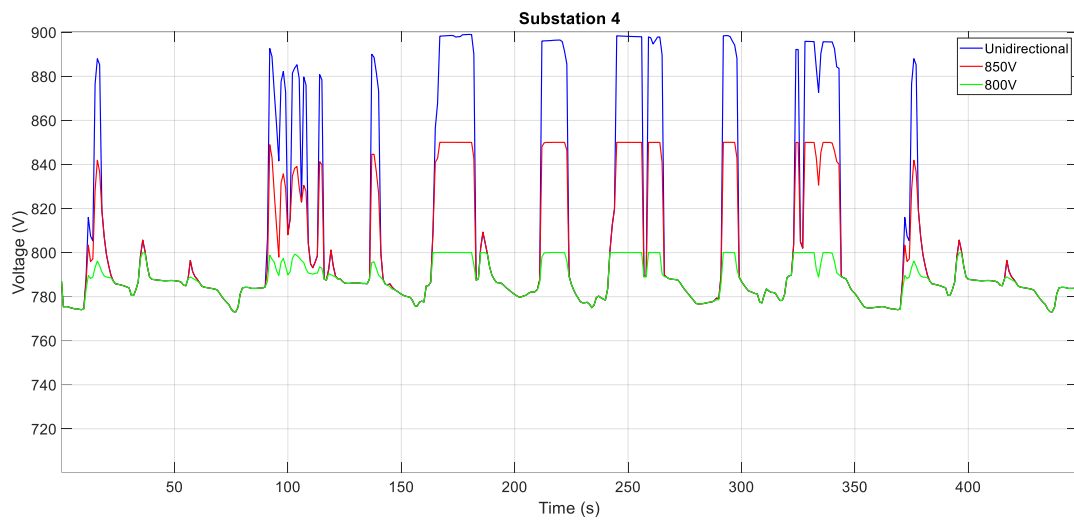
Εικόνα ΠΑ.43 Τάση υποσταθμού TS1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



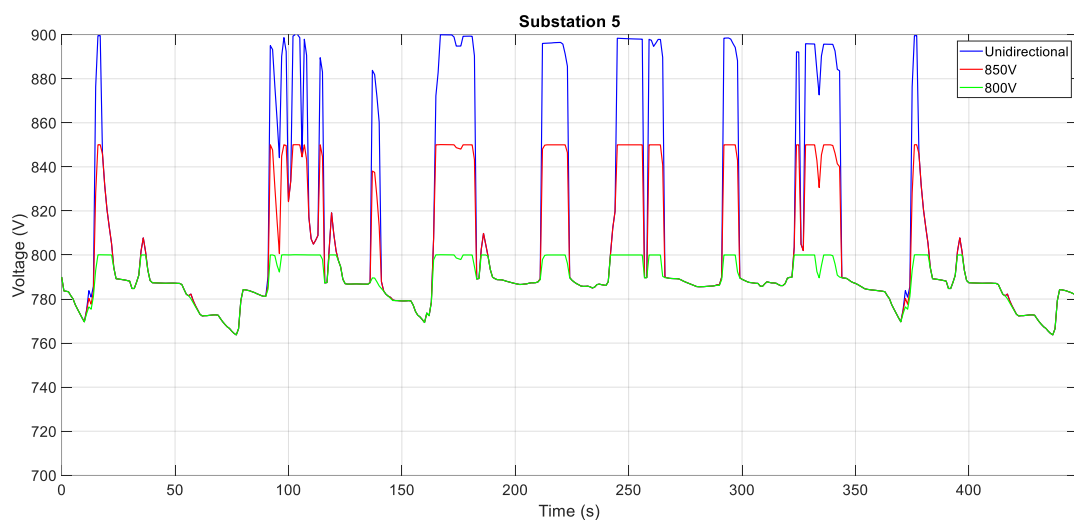
Εικόνα ΠΑ.44 Τάση υποσταθμού TS2 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



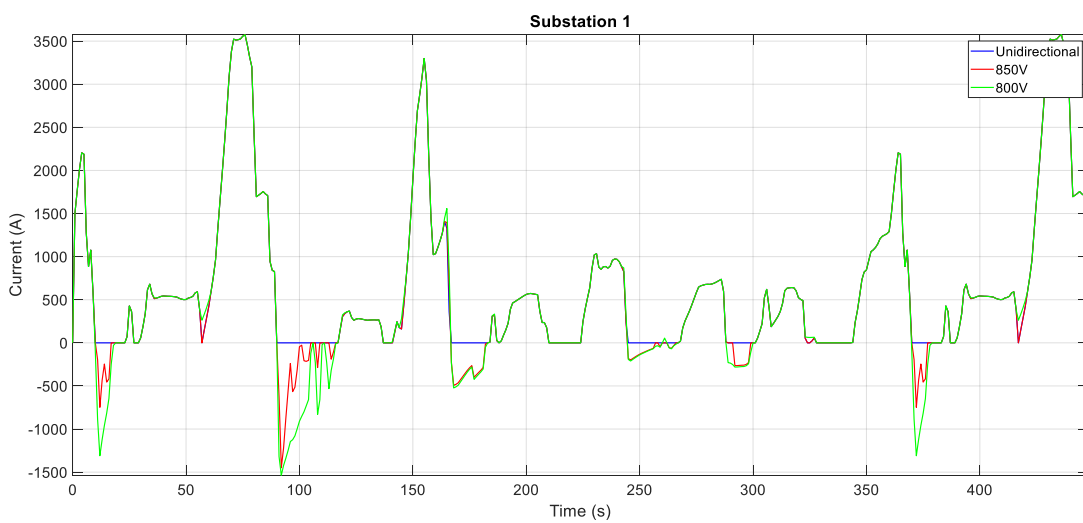
Εικόνα ΠΑ.45 Τάση υποσταθμού TS3 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



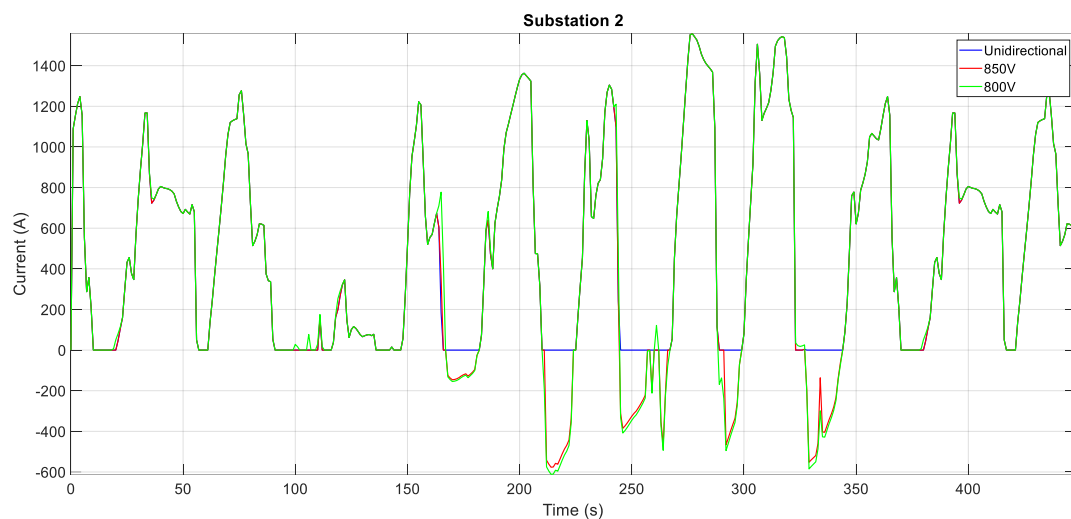
Εικόνα ΠΑ.46 Τάση υποσταθμού TS4 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



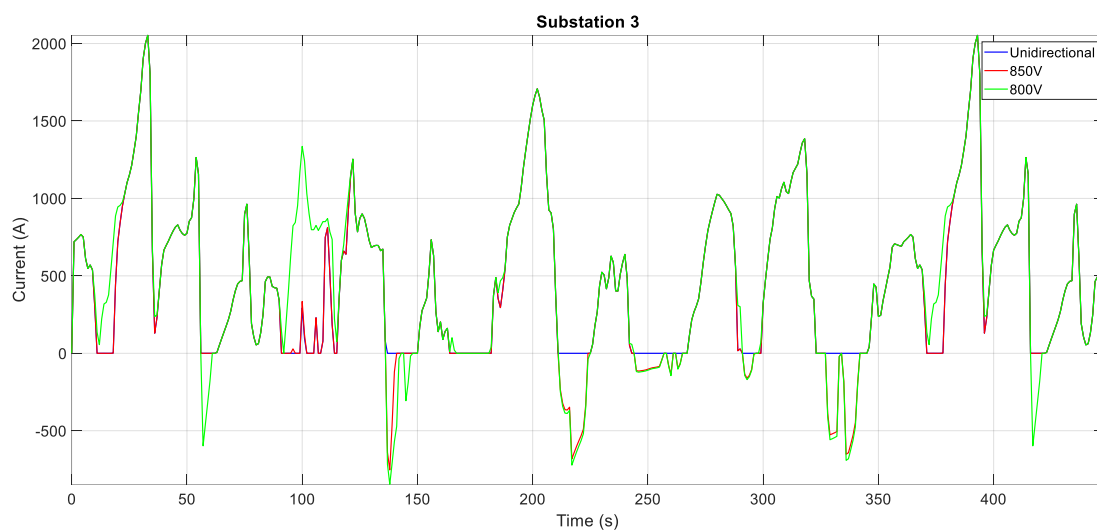
Εικόνα ΠΑ.47 Τάση υποσταθμού TS5 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



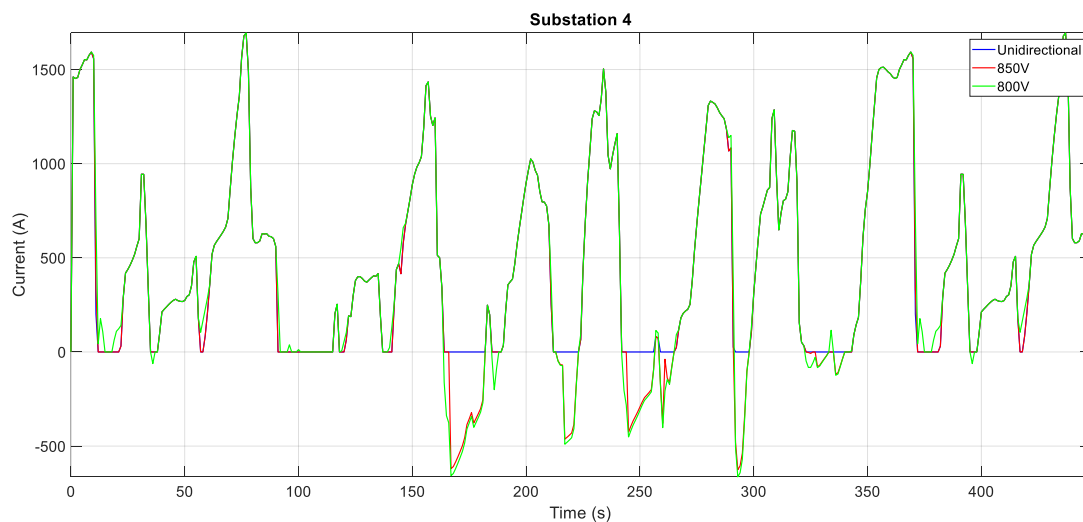
Εικόνα ΠΑ.48 Ρεύμα υποσταθμού TS1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



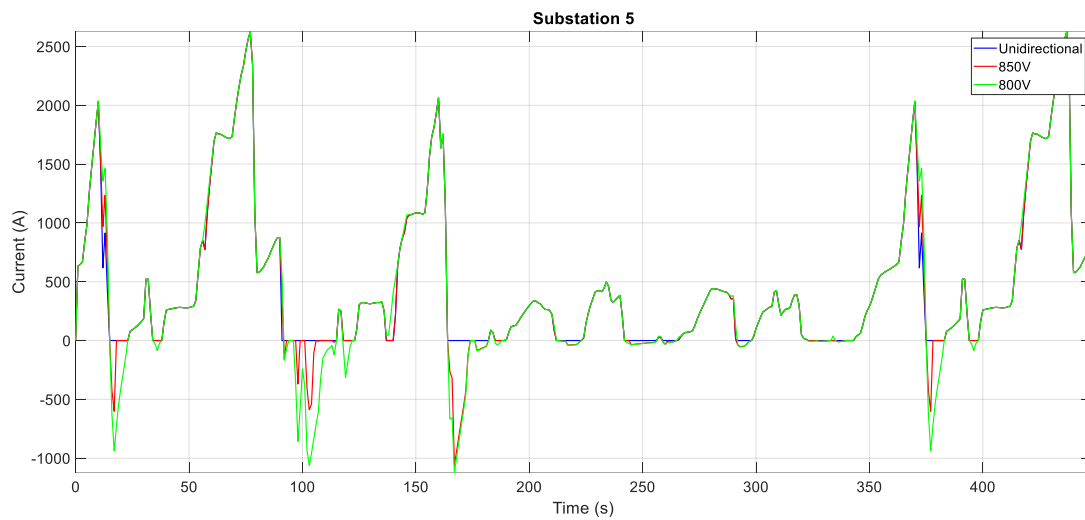
Εικόνα ΠΑ.49 Ρεύμα υποσταθμού TS2 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



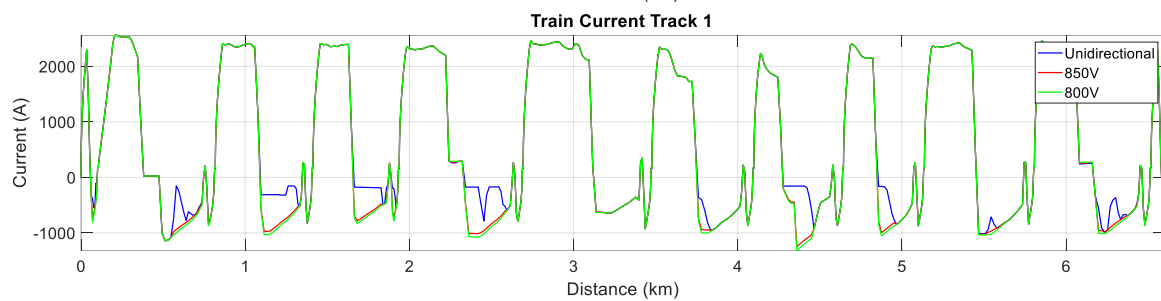
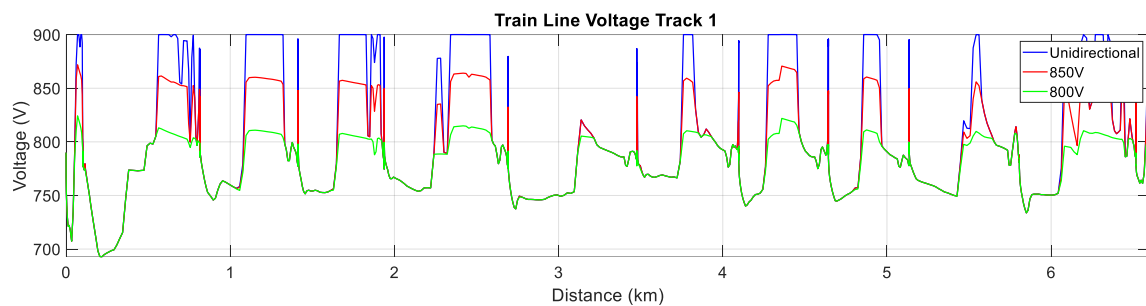
Εικόνα ΠΑ.50 Ρεύμα υποσταθμού TS3 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



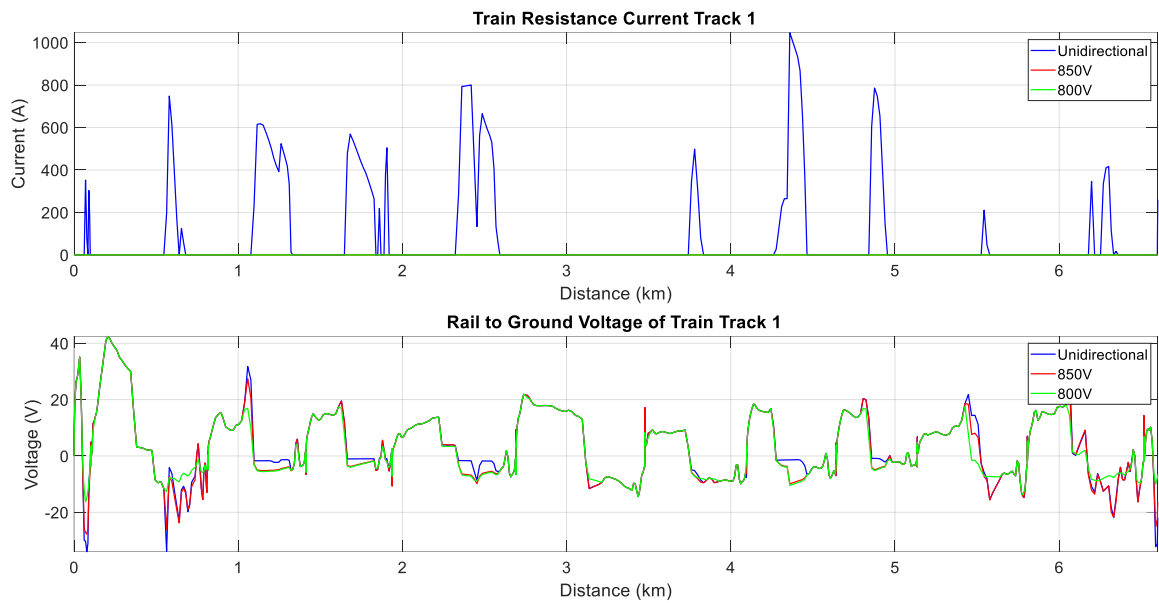
Εικόνα ΠΑ.51 Ρεύμα υποσταθμού TS4 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



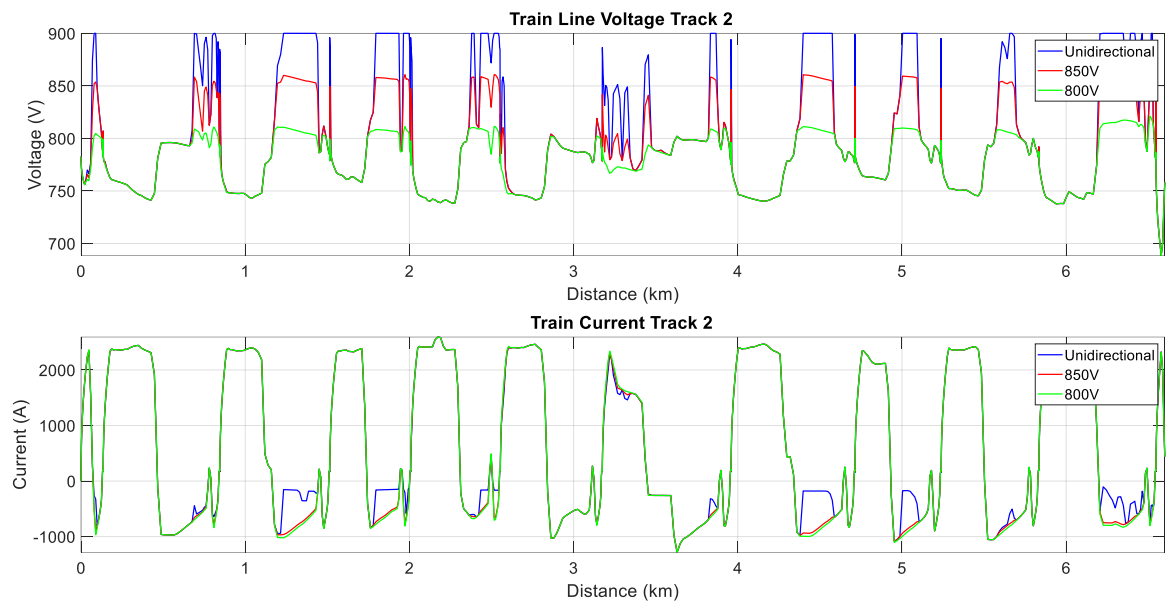
Εικόνα ΠΑ.52 Ρεύμα υποσταθμού TS5 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



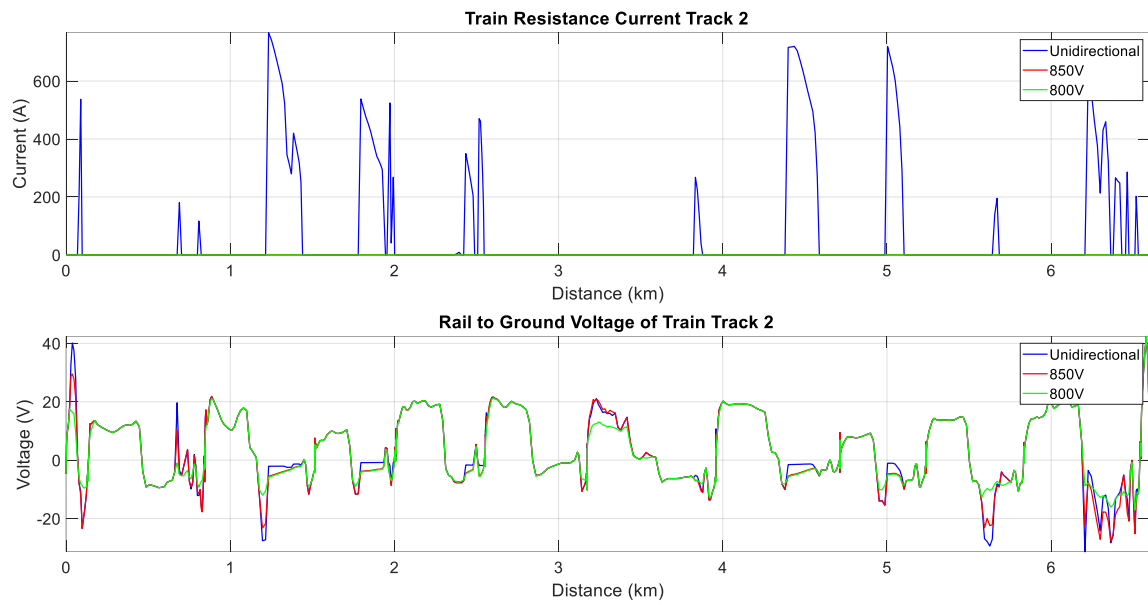
Εικόνα ΠΑ.53 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



Εικόνα ΠΑ.54 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 1 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



Εικόνα ΠΑ.55 Τάση και ρεύμα γραμμής στην έξοδο των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς



Εικόνα ΠΑ.56 Ρεύμα απωλειών στα απορριπτικά φορτία και Rail-to-Ground τάση των τρένων της τροχιάς 2 για διάφορα επίπεδα τάσης αναφοράς

Παράρτημα Β

Διαστασιολόγηση ηλεκτρικών υποσταθμών με βάση τα πρότυπα EN 50328 με τίτλο "Railway applications – Fixed installations – Electronic power converters for substations" και EN 50329 με τίτλο "Railway applications – Fixed installations – Traction transformers".

Τα δύο αυτά πρότυπα καθορίζουν τους κανόνες που θα πρέπει να ακολουθούνται κατά την επιλογή των υποσταθμών έλξης σε AC και DC σιδηροδρομικά δίκτυα. Το πρότυπο EN 50328 αναφέρεται στους εγκατεστημένους μετατροπείς (π.χ. ανορθωτές διόδων) ενώ το EN 50329 στους μετασχηματιστές για τη διασύνδεση των μετατροπέων με το κεντρικό δίκτυο. Σύμφωνα με τα δύο αυτά πρότυπα η διαστασιολόγηση των υποσταθμών έλξης των DC σιδηροδρομικών δικτύων θα πρέπει να ακολουθεί τον Πίνακα Α που παρουσιάζεται παρακάτω. Στον πίνακα αυτόν η μέγιστη υπερφόρτιση καθώς και το επιτρεπτό χρονικό διάστημα αυτής παρουσιάζονται σε συνάρτηση με την εφαρμογή λειτουργίας τους. Τα σιδηροδρομικά δίκτυα ονομαστικής τάσης 750V ανήκουν στην κατηγορία VI με αποτέλεσμα να μπορούν να λειτουργήσουν στο 150% της ονομαστικής ισχύος για 2 ώρες και στο 300% για 1 λεπτό.

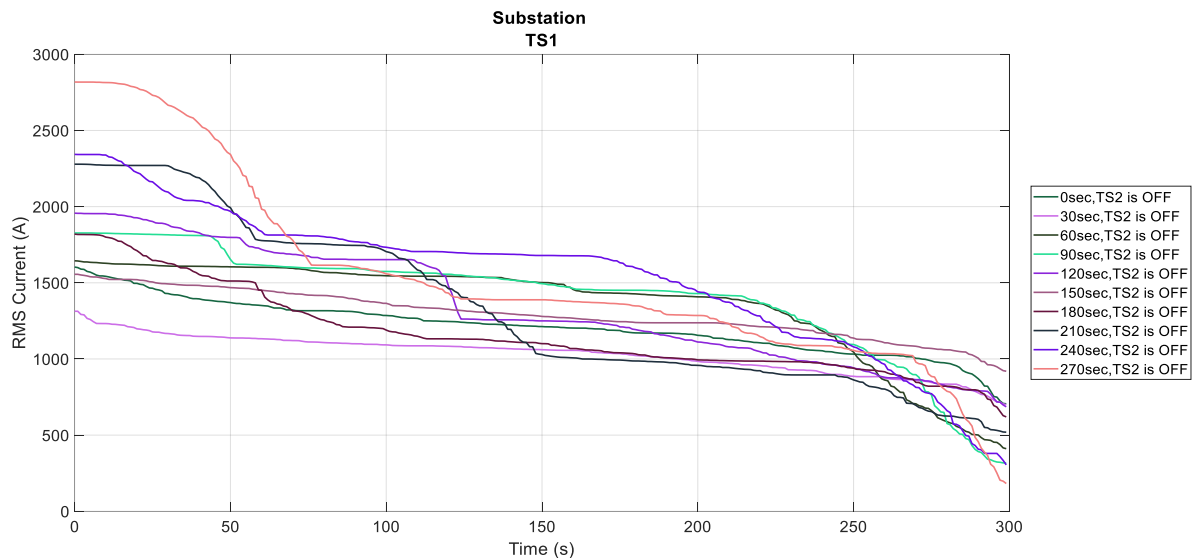
Πίνακας Α – Προτυποποιημένες Κλάσεις

Duty class	Current capabilities for converters (relative values in per unit of I_{Bd})	Typical applications	Note
I	1.0 p.u. continuously	Frequency converters for mainline railways	
V	a) 1.0 p.u. continuously b) 1,5 p.u. 2 h — after a) c) 2.0 p.u. 1 min — after a)	Mass rapid transit Trolleybuses	
VI	a) 1.0 p.u. continuously b) 1,5 p.u. 2 h — after a) c) 3.0 p.u. 1 min — after a)	Mainline railways Mass rapid transit Light rails systems	
VII	a) 1.0 p.u. continuously b) 1,5 p.u. 2 h — after a) c) 4.5 p.u. 15 sec — after a)	Minor railways Light rail systems Tramways	
VIII	a) 1.0 p.u. continuously b) 1,5 p.u. 2 h — after a) c) 2.0 p.u. 1 min — after b)	Mass rapid transit	cumulative
IX	a) 1.0 p.u. continuously b) 1,5 p.u. 2 h — after a) c) 3.0 p.u. 5 min — after b)	Mainline railways	cumulative

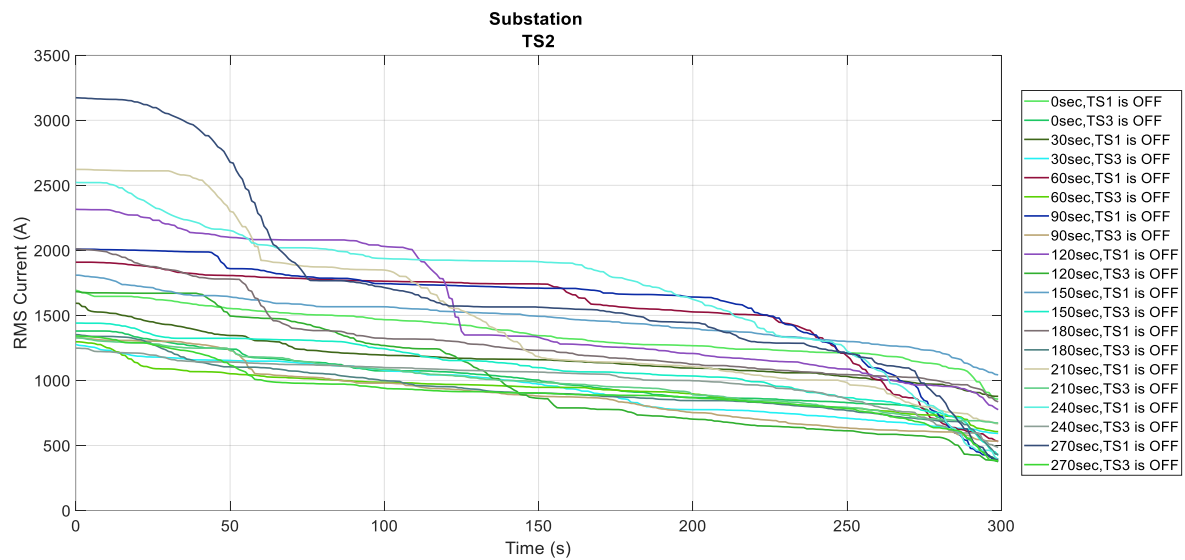
Σύμφωνα με τα πρότυπα, η διαστασιολόγηση των υποσταθμών θα πρέπει να βασίζεται στην RMS τιμή του ρεύματος υπολογιζόμενη σε ένα χρονικό διάστημα T (1 λεπτό & 2 ώρες για εφαρμογές κλάσης VI) όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση (ΠΑ.1).

$$I_{Bd} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T I_d^2 dt} \quad (\text{ΠΑ.1})$$

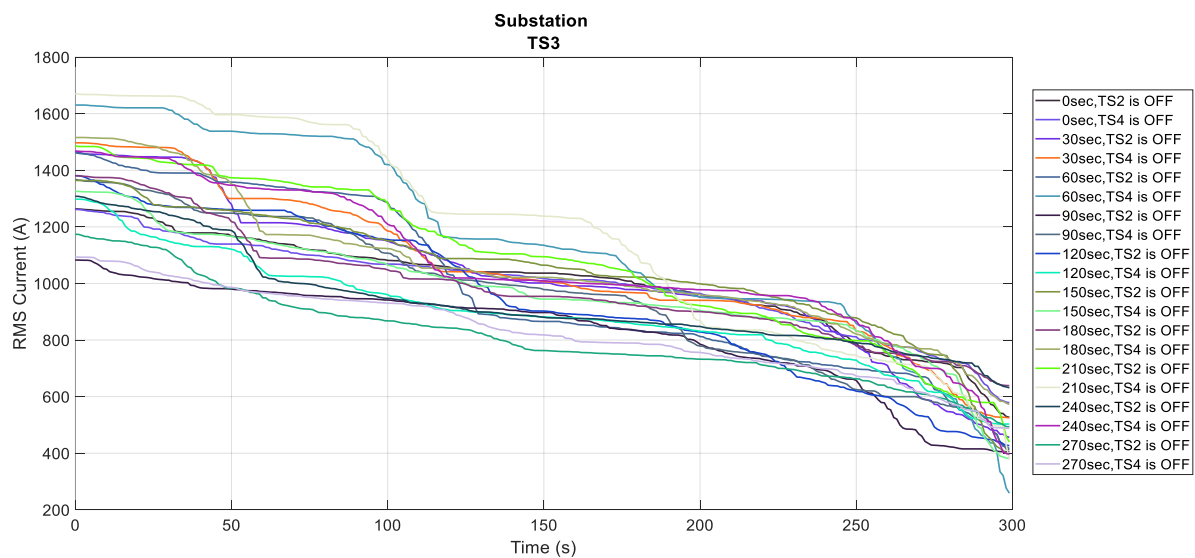
Καθώς το παράθυρο υπολογισμού της RMS τιμής δεν δύναται να συμπίπτει με την περίοδο επανάληψης της κυματομορφής ρεύματος (περίοδος επανάληψης = χρονοαπόσταση) καταλήγουμε στη δημιουργία καμπύλης RMS τιμής ρεύματος μέσω ενός κινούμενου χρονικού παραθύρου T . Για παράδειγμα, στην περίπτωση όπου η χρονοαπόσταση είναι 300sec, ο υπολογισμός της RMS τιμής του ρεύματος για $T = 60\text{sec}$ θα πραγματοποιηθεί στο χρονικό παράθυρο $[t, t + 60\text{sec}]$ με το t να λαμβάνει τιμές $t = 0, 1, 2, 3, \dots, 300$. Επιπλέον, τα όρια υπερφόρτισης θα πρέπει να ικανοποιούνται και στη χειρότερη περίπτωση απώλειας ενός γειτονικού υποσταθμού έλξης. Για το λόγο αυτό δημιουργείται μία ομάδα καμπυλών RMS τιμών ρεύματος για όλες τις περιπτώσεις απώλειας γειτονικών υποσταθμών. Στην περίπτωση του τροποποιημένου δικτύου της Θεσσαλονίκης (Εικόνα 4.8) και για υποσταθμούς με ονομαστική ισχύ 3MW, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι καμπύλες RMS τιμών ρεύματος για χρονικό παράθυρο 1 λεπτού.



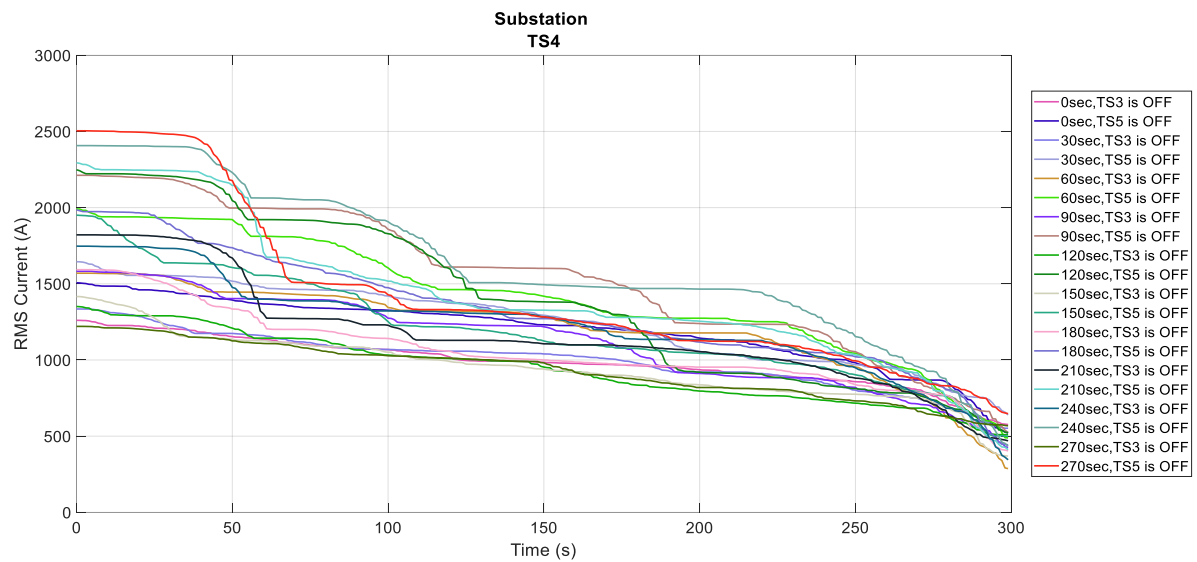
Εικόνα ΠΑ.57 RMS καμπύλες ρεύματος του υποσταθμού TS1 στην περίπτωση απώλειας γειτονικού υποσταθμού (TS2).



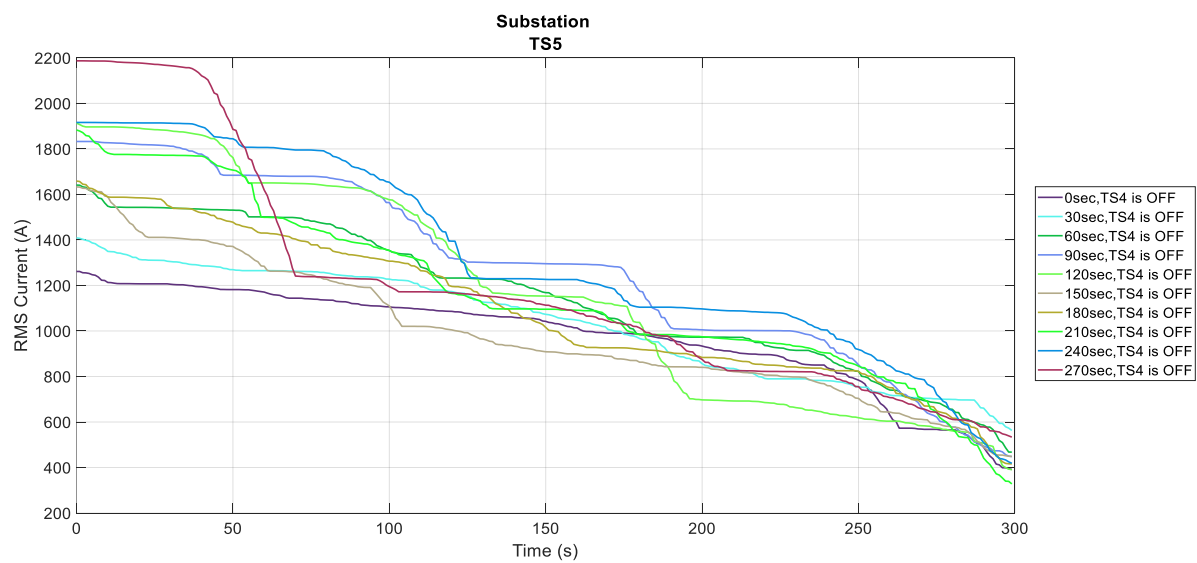
Εικόνα ΠΑ.58 RMS καμπύλες ρεύματος του υποσταθμού TS2 στην περίπτωση απώλειας γειτονικού υποσταθμού (TS1, TS3).



Εικόνα ΠΑ.59 RMS καμπύλες ρεύματος του υποσταθμού TS3 στην περίπτωση απώλειας γειτονικού υποσταθμού (TS2, TS4).



Εικόνα ΠΑ.60 RMS καμπύλες ρεύματος του υποσταθμού TS4 στην περίπτωση απώλειας γειτονικού υποσταθμού (TS3, TS5).



Εικόνα ΠΑ.61 RMS καμπύλες ρεύματος του υποσταθμού TS5 στην περίπτωση απώλειας γειτονικού υποσταθμού (TS4).

Βιβλιογραφία

- [1] Manuel A. Vargas Evans, “Why Low Voltage Direct Current Grids? A case-study assessment of using direct current in low voltage distribution, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, July 4th, 2013.
- [2] R. Adapa, "High-Wire Act: HVdc Technology: The state of the art," IEEE Power and Energy Magazine, vol. 10, pp. 18-29, 2012.
- [3] D.M. Larruskain, I. Zamora, A.J. Mazón, O. Abarategui, J. Monasterio, “Transmission and Distribution Networks: AC versus DC”
- [4] LVDC: electricity for the 21st century, IEC Technology Report
- [5] Patterson, B.T.; “DC, Come Home”, Power and Energy Magazine, IEEE , Power, Energy, & Industry Applications, Vol. 10, Issue 6, pp. 60-69, Nov/Dec 2012.
- [6] <http://www.greenpeace.org/international/en/news/Blogs/makingwaves/Dharnai-Live/blog/49962/>
- [7] <http://www.sunlabob.com/news-2013/sunlabob-photo-tour-electrifying-sierra-leone-with-solar.html>
- [8] Lasseter, R., Akhil, A., Marnay, C. et al. (April 2002) White paper on Integration of Distributed Energy Resources – The CERTS MicroGrid Concept. s.l.: Office of Power Technologies of the US Department of Energy, Contract DE-AC03-76SF00098.
- [9] Lasseter, R.H. (2002) MicroGrids. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference Proceedings, vol. 1. New York, NY: s.n., pp. 305–308.
- [10] Hatziargyriou, Nikos & Jenkins, Nick & Strbac, G & Lopes, Joao Abel & Ruela, José & Engler, Alfred & Kariniotakis, George & Oyarzabal, José & , A.Amorim. (2006). Microgrids-Large Scale Integration of Microgeneration to Low Voltage Grids. Proceedings of CIGRE 2006, 41st annual session conference.
- [11] Hatziargyriou, N. (2004) MicroGrids. 1st International Conference on the Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Energy Resources (IRED). Brussels: s.n., 1–3 December.
- [12] Hatziargyriou, N., Asano, H., Iravani, R. and Marnay, C. (July/August 2007) microgrids: An Overview of Ongoing Research, Development and Demonstration Projects. IEEE Power and Energy, Vol. 5, Nr. 4, pp. 78–94.
- [13] Hatziargyriou, N. (May–June 2008,) Microgrids [guest editorial]. IEEE Power and Energy Magazine, Volume 6, Issue 3, pp. 26–29.
- [14] Karfopoulos, E.L. et al. (25–28 Sept 2011) Introducing electric vehicles in the microgrids concept. 16th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, Hersonissos, Heraklion, Greece.
- [15] Ν. Βοβός, Εξελεγμένα Δίκτυα Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, 2014
- [16] D. Kumar, F. Zare and A. Ghosh, "DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications, and Standardizations Aspects", IEEE Access, vol. 5, pp. 12230-12256, 2017. Available: 10.1109/access.2017.2705914 [Accessed 8 April 2019].

- [17] D. Leskarac, M. Moghimi, J. Liu, W. Water, J. Lu and S. Stegen, "Hybrid AC/DC Microgrid testing facility for energy management in commercial buildings", *Energy and Buildings*, vol. 174, pp. 563-578, 2018. Available: 10.1016/j.enbuild.2018.06.061 [Accessed 8 April 2019].
- [18] A. Jhunjhunwala, A. Lolla, and P. Kaur, "Solar-DC microgrid for Indian homes: A transforming power scenario," *IEEE Electrific. Mag.*, vol. 4, no. 2, pp. 10-19, Jun. 2016.
- [19] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, and R. Uchida, "DC voltage control of the DC micro-grid for super high quality distribution," in *Proc. Power Convers. Conf. (PCC)*, 2007, pp. 518-525.
- [20] A. H. Chang, B. R. Sennett, A.-T. Avestruz, S. B. Leeb, and J. L. Kirtley, "Analysis and design of DC system protection using Z-source circuit breaker," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 1036-1049, Feb. 2016.
- [21] A. A. S. Emhemed, K. Fong, S. Fletcher, and G. M. Burt, "Validation of fast and selective protection scheme for an LVDC distribution network," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 32, no. 3, pp. 1432-1440, Jun. 2017.
- [22] M. Monadi, M. A. Zamani, J. I. Candela, A. Luna, and P. Rodriguez, "Protection of AC and DC distribution systems embedding distributed energy resources: A comparative review and analysis," *J. Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1578-1593, Nov. 2015.
- [23] J. P. Brozek, "DC overcurrent protection-where we stand," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 5, pp. 1029-1032, Sep. 1993.
- [24] D. Salomonsson, L. Söder, and A. Sannino, "Protection of low voltage DC microgrids," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1045-1053, Jul. 2009.
- [25] 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.
- [26] Koseki, T. "Technologies for saving energy in railway operation: general discussion on energy issues concerning railway technology." *IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5 (3), May 2010, pp. 285–290.
- [27] C. Goodman. Overview of electric railway systems and the calculation of train performance. In *Electric Traction Systems*, 2008 IET Professional Development course on, November 2008.
- [28] Μιχαλός Μιχαήλ (2010) Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα Τρένων. Καβάλα, Ελλάδα Μιχαλός Μιχαήλ (2010) Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα Τρένων. Καβάλα, Ελλάδα
- [29] Sheilah Frey (2012) *Railway Electrification Systems and Engineering*. Delhi: White word publication
- [30] W. Günselmann, "Technologies for increased energy efficiency in railway systems", *Proc. EPE 2005*, 2005.
- [31] "EMerge Alliance > Home", *Emergealliance.org*, 2017. [Online]. Available: <http://www.emergealliance.org>. [Accessed: 19- Jan- 2017].

- [32] "IEC - SEG 4: Systems Evaluation Group - Low Voltage Direct Current Applications, Distribution and Safety for use in Developed and Developing Economies"
- [33] D. M. Larruskain, I. Zamora, A. J. Mazón, O. Abarrategui, and J. Monasterio, "Transmission and distribution networks: AC versus DC," in Proc. 9th Spanish–Portuguese Congr. Elect. Eng., 2005, pp. 1–6.
- [34] B. Zahedi and L. Norum, "Voltage regulation and power sharing control in ship LVDC power distribution systems", 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013.
- [35] A. Cavallo and B. Guida, "Power management of DC aeronautical electrical networks including supercapacitors", 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2015.
- [36] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, "Protection of low-voltage DC microgrids," IEEE Trans. on Power Del., vol. 24, no. 3, pp. 1045– 1053, July 2009.
- [37] T. Dragicevic, X. Lu, J. Vasquez and J. Guerrero, "DC microgrids — Part II: A review of power architectures, applications, and standardization issues", IEEE Trans. on Power Electron., vol. 31, no. 5, pp. 3528-3549, 2016.
- [38] J. Ashna, G. Sijo, P. Jasmine, Study on DC Microgrid, Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2017, pp. 89-94
- [39] T. Dragicevic, J. Vasquez, J. Guerrero and D. Skrlec, "Advanced LVDC electrical power architectures and microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks.", IEEE Electrification Magazine, vol. 2, no. 1, pp. 54-65, 2014.
- [40] Guerrero, J. M., J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, and M. Castilla. 2011. Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—A general approach toward standardization. IEEE Trans. Ind. Electron. 58:158–172.
- [41] C. A. Canizares, R. Palma-Behnke, Trends in microgrid control, IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, pp. 1905-1919
- [42] F. Gao, R. Kang, J. Cao and T. Yang, "Primary and secondary control in DC microgrids: a review", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 7, no. 2, pp. 227-242, 2018.
- [43] Lakshmi M, Hemamalini S, "Non isolated high gain DC-DC converter for DC microgrids", IEEE Trans. Ind. Electron 65(2):1205–1212
- [44] Chen F, Burgos R, Boroyevich D, "Output impedance comparison of different droop control realizations in DC systems", Proceedings of IEEE 17th workshop on control and modeling for power electronics, Trondheim, Norway, 27–30 June 2016, pp 1–6
- [45] Guerrero JM, Chandorkar M, Lee TL et al, "Advanced control architectures for intelligent microgrids—part I: decentralized and hierarchical control", IEEE Trans. Ind. Electron 60(4):1254–1262
- [46] E. Unamuno, J. A. Barrena, Hybrid ac/dc microgrids —Part II : Review and classification of control strategies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, pp. 1123-1134

- [47] Gao F, Bozhko S, Costabeber A et al, "Comparative stability analysis of droop control approaches in voltage source converters-based DC microgrids", *IEEE Trans. Power Electron* 32(3):2395–2415
- [48] Chen F, Burgos R, Boroyevich D et al, "A nonlinear droop method to improve voltage regulation and load sharing in DC systems", *Proceedings of IEEE first international conference on DC microgrids (ICDCM)*, Atlanta, USA, 7–10 June 2015, pp 45–50
- [49] Xu G, Shang DS, Liao XZ, "Decentralized inverse-droop control for input-series-output-parallel DC-DC converters", *IEEE Trans. Power Electron* 30(9):4621–4625
- [50] Kim J, Choi H, Cho BH, "A novel droop method for converter parallel operation", *IEEE Trans. Power Electron* 17(1):25–32
- [51] Papadimitriou CN, Zountouridou EI, Hatziargyriou ND. Review of hierarchical control in DC microgrids. *Electr Power Syst Res* 2015;122:159–67.
- [52] C.N. Papadimitriou, V.A. Kleftakis, A. Rigas, N.D. Hatziargyriou, "DC-microgrid control strategy using DC-BUS signaling", 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, MedPower2014, November 2014, Athens
- [53] T. Dragicevic, X. Lu, J. Vasquez and J. Guerrero, "DC microgrids — Part I: A review of control strategies and stabilization techniques", *IEEE Trans. on Power Electron.*, pp. 1-1, 2015.
- [54] N. Hatziargyriou, E. Zountouridou, A. Vassilakis, P. Moutis, C. Papadimitriou and A. Anastasiadis, "Overview of distributed energy resources", *Smart Grid Handbook*, pp. 1-44, 2016.
- [55] N. Diaz, T. Dragicevic, J. Vasquez and J. Guerrero, "Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids – A New Concept on Cooperative Control Without Communications Beyond Droop Control", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2476- 2485, 2014.
- [56] M. Kumar, S. Srivastava and S. Singh, "Control strategies of a DC microgrid for grid connected and islanded operations", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1588-1601, 2015.
- [57] N. Hatziargyriou, "Microgrids: Architectures and Control", Wiley, IEEE Press, Athens 2014.
- [58] Liang Che and M. Shahidehpour, "DC microgrids: Economic operation and enhancement of resilience by hierarchical control", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 5, no. 5, pp. 2517-2526, 2014.
- [59] Xiaoliang Yang, Fen Tang, Xuezhi Wu and Xinmin Jin, "Hierarchical control strategy of grid-connected DC microgrids", 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016.
- [60] J. Xiao, P. Wang and L. Setyawan, "Hierarchical control of hybrid energy storage system in DC microgrids", *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 62, no. 8, pp. 4915-4924, 2015.
- [61] G. Seo, B. Cho and K. Lee, "DC islanding detection algorithm using injection current perturbation technique for photovoltaic converters in DC distribution", 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012.

- [62] C. Papadimitriou, V. Kleftakis and N. Hatziargyriou, "A novel islanding detection method for microgrids based on variable impedance insertion", *Electric Power Systems Research*, vol. 121, pp. 58-66, 2015.
- [63] C. Li , C. Cao , Y. Cao , Y. Kuang , L. Zeng , B. Fang , A review of islanding detection methods for microgrid, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 35 (2014) 211–220.
- [64] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, IEEE Std 929-2000, 2000.
- [65] M. Wens and M. Steyaert, *Design and implementation of fully integrated inductive DC-DC converters in standard CMOS*, 1st ed. Dordrecht: Springer, 2011.
- [66] W. Bower, M. Ropp, "Evaluation of islanding detection methods for utility-interactive inverters in photovoltaic systems", Sandia National Laboratories, 2002.
- [67] C. Papadimitriou, V. Kleftakis and N. Hatziargyriou, "A novel method for islanding detection in DC networks", *IEEE Trans. on Sustain. Energy*, pp. 1-1, 2016.
- [68] Mohamad, Ahmed MI, and Yasser Abdel-Rady I. Mohamed. "Assessment and Performance Comparison of Positive Feedback Islanding Detection Methods in DC Distribution Systems." *IEEE Transactions on Power Electronics* 32.8 (2017): 6577-6594.
- [69] B. Xiao, M. Starke, G. Liu, B. Ollis, K. Prabakar, K. Dowling and Y. Xu, "Development of hardware-in-the-loop microgrid testbed", 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015.
- [70] P. Kotsampopoulos, A. Kapetanaki, G. Messinis, V. Kleftakis, N. Hatziargyriou, "A PHIL facility for Microgrids", *International Journal of Distributed Energy Resources*, Vol. 9, No. 1, pp. 71-86, January-March 2013
- [71] W. Ren, "Accuracy evaluation of power hardware-in-the-loop simulation", Ph.D. dissertation, Electrical Computer Engineering Department, Florida State University, Tallahassee, FL, 2007
- [72] Ran Mo, M. Steurer and Hui Li, "Controller hardware-in-the-loop (CHIL) simulation of a multi-functional energy storage system based on modular multilevel DC/DC converter (M2DC) for MVDC grid", 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016.
- [73] RTDS Technologies, www.rtds.com
- [74] T. Maguire and A. Gole, "Digital simulation of flexible topology power electronic apparatus in power systems", *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 6, no. 4, pp. 1831-1840, 1991.
- [75] T. Ratniyomchai, P. Tricoli and S. Hillmansen, "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways", *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 4, no. 1, pp. 9-20, 2014.
- [76] F. Ciccarelli, A. Del Pizzo and D. Iannuzzi, "Improvement of Energy Efficiency in Light Railway Vehicles Based on Power Management Control of Wayside

- Lithium-Ion Capacitor Storage", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 1, pp. 275-286, 2014.
- [77] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, D. Lauria and P. Natale, "Optimal Control of Stationary Lithium-Ion Capacitor-Based Storage Device for Light Electrical Transportation Network", *IEEE Trans. Transp Electr.*, vol. 3, no. 3, pp. 618-631, 2017.
 - [78] 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.
 - [79] 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.
 - [80] Ruoyu Hou, Yinye Yang and A. Emadi, "Hybrid electric locomotive powertrains", 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014.
 - [81] A. Verdicchio, P. Ladoux, H. Caron and C. Courtois, "New Medium-Voltage DC Railway Electrification System", *IEEE Trans. Transp. Electr.*, vol. 4, no. 2, pp. 591-604, 2018.
 - [82] X. Zhao, B. Ke and K. Lian, "Optimization of Train Speed Curve for Energy Saving Using Efficient and Accurate Electric Traction Models on the Mass Rapid Transit System", *IEEE Trans. Transp. Electr.*, vol. 4, no. 4, pp. 922-935, 2018.
 - [83] M. Falvo, R. Lamedica, R. Bartoni and G. Maranzano, "Energy management in metro-transit systems: An innovative proposal toward an integrated and sustainable urban mobility system including plug-in electric vehicles", *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 12, pp. 2127-2138, 2011.
 - [84] M. Falvo, R. Lamedica, R. Bartoni and G. Maranzano, "Energy saving in metro-transit systems: Impact of braking energy management", *SPEEDAM 2010*, 2010.
 - [85] A. Kara, K. Mardikyan and S. Baran, "Application of regenerative braking energy to Istanbul metro operation system", 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, 2012.
 - [86] A. Nasri, M. Moghadam and H. Mokhtari, "Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems", *SPEEDAM 2010*, 2010.
 - [87] M.A. Sandidzadeh, A. Shapour, "A review of simulation models for railway systems. In Controlling and Simulation of Stray Currents in DC Railway by Considering the Effects of Collection Mats, Infrastructure Design, Signaling and Security in Railway", Chapter 9, 4 April 2012.
 - [88] J.G. Yu, C.J. Goodman. "Modelling of rail potential rise and leakage current in DC rail transit systems. In Stray Current Effects of DC Railways and Tramways", *IEE Colloquium on*, 11 October 1990.
 - [89] K. Budnik, W. Machzynski, J. Szymenderski, "Simulation of stray currents generated by DC Electric Traction", In *Poznan University of Technology Academic Journals*, No.82, 2015.
 - [90] X. Yang, A. Chen, X. Li, B. Ning and T. Tang, "An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems",

- Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 57, pp. 13-29, 2015.
- [91] X. Li and H. Lo, "An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations", *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 64, pp. 73-89, 2014.
 - [92] E. Setyawan and D. Diah Damayanti, "Integrated railway timetable scheduling optimization model and rescheduling recovery optimization model: A systematic literature review", 2018 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 2018.
 - [93] T. Suzuki, "DC power-supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes", *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, vol. 129, no. 1, p. 18, 1982.
 - [94] A. Gray and D. Stinton, "Designing Reversible Substations using Inverters", 7th IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems (REIS 2015), 2015.
 - [95] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy *Energy Convers Manage*, 75 (2013), pp. 374-388
 - [96] Ν. Η. Ιγγλέζου, "Ανάλυση Λειτουργίας και Μοντελοποίηση Συσσωρευτών," Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, 2013.
 - [97] Α. Σαγάνη, "Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας-Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές," Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ρευστών, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2009.
 - [98] 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.
 - [99] D. Cornic, "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation", *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2010.
 - [100] V. Gelman, "Energy Storage That May Be Too Good to Be True: Comparison Between Wayside Storage and Reversible Thyristor Controlled Rectifiers for Heavy Rail", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 70-80, 2013.
 - [101] H. Wang, G. Zhu, X. Fu, S. Ma and H. Wang, "Waveform control method for mitigating harmonics of inverter systems with nonlinear load", *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015.
 - [102] C. Sumpavakup, T. Ratniyomchai and T. Kulworawanichpong, "Optimal energy saving in DC railway system with on-board energy storage system by using peak demand cutting strategy", *Journal of Modern Transportation*, vol. 25, no. 4, pp. 223-235, 2017.
 - [103] A. Obando, V. Herrera, H. Gaztanaga, B. Gallardo, T. Nieva and M. Varela, "Optimization Methodology of Infrastructure and Onboard Energy Storage System for Cost-Reduction in Tramway Lines Design", 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2017.

- [104] M. Steiner, M. Klohr and S. Pagiela, "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles", 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, 2007.
- [105] I. El-Sayed, B. Mohamed and P. Arbolea, "Assessing the Impact of On-Board Storage Systems over the Railway Electrical Infrastructure", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2017.
- [106] P. Arbolea, P. Bidaguren and U. Armendariz, "Energy Is On Board: Energy Storage and Other Alternatives in Modern Light Railways", IEEE Electrification Magazine, vol. 4, no. 3, pp. 30-41, 2016.
- [107] G. Graber, V. Calderaro, V. Galdi, A. Piccolo, R. Lamedica and A. Ruvio, "Techno-economic Sizing of Auxiliary-Battery-Based Substations in DC Railway Systems", IEEE Trans. Transp. Electr., vol. 4, no. 2, pp. 616-625, 2018.
- [108] D. Iannuzzi, D. Lauria, F. Ciccarelli, "Wayside ultracapacitors storage design for light transportation systems: A multiobjective optimization approach". International Review of Electrical Engineering, pp. 190-199.
- [109] D. Iannuzzi, D. Lauria and P. Tricoli, "Optimal design of stationary supercapacitors storage devices for light electrical transportation systems", Optimization and Engineering, 2011.
- [110] R. Teymourfar, G. Farivar, H. Iman-Eini and B. Asaei, "Optimal stationary super-capacitor energy storage system in a metro line", 2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011.
- [111] L. Battistelli, M. Fantauzzi, D. Iannuzzi and D. Lauria, "Generalized approach to design supercapacitor-based storage devices integrated into urban mass transit systems", 2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2011.
- [112] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen and P. Tricoli, "Energy loss minimisation by optimal design of stationary supercapacitors for light railways", 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), 2015.
- [113] P. Arbolea, B. Mohamed and I. El-Sayed, "DC Railway Simulation Including Controllable Power Electronic and Energy Storage Devices", IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 5, pp. 5319-5329, 2018.
- [114] I. Szenasy, "Improvement the energy storage with ultracapacitor in metro railcar by modeling and simulation", 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008.
- [115] D. Iannuzzi, F. Ciccarelli and D. Lauria, "Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks", Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 21, no. 1, pp. 321-337, 2012.
- [116] R. Barrero, X. Tackoen and J. Van Mierlo, "Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network", 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008.
- [117] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, D. Lauria and P. Natale, "Optimal Control of Stationary Lithium-Ion Capacitor-Based Storage Device for Light Electrical Transportation Network", IEEE Trans. Transp. Electr., vol. 3, no. 3, pp. 618-631, 2017.

- [118] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, K. Kondo and L. Fratelli, "Line-Voltage Control Based on Wayside Energy Storage Systems for Tramway Networks", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 884-899, 2016.
- [119] H. Kobayashi, S. Akita, T. Saito, K. Kondo, "A voltage basis power flow control for charging and discharging wayside energy storage devices in the DC-electrified railway system", 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 1–6, 2016.
- [120] Z. Yang, H. Zhong, A. Bose, Q. Xia and C. Kang, "Optimal Power Flow in AC–DC Grids With Discrete Control Devices", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 2, pp. 1461-1472, 2018.
- [121] Z. Yang, H. Zhong, Q. Xia, A. Bose, and C. Kang, "Optimal power flow based on successive linear approximation of power flow equations," *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 10, pp. 3654–3662, 2016.
- [122] A. Castillo, P. Lipka, J. P. Watson, S. S. Oren, and R. P. O. Neill, "A successive linear programming approach to solving the IV-ACOPF," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 2752–2763, Jul. 2016.
- [123] Z. Yang, H. Zhong, Q. Xia, A. Bose, and C. Kang, "Optimal power flow based on successive linear approximation of power flow equations," *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 10, pp. 3654–3662, 2016.
- [124] M. Viswanathan, *Digital modulations using Matlab*. [Columbia, Carolina del Sur], 2017.
- [125] "Energy (signal processing)", *En.wikipedia.org*, 2019. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_\(signal_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_(signal_processing)).

Δημοσιεύσεις σε Επιστημονικά Περιοδικά:

- V. Kleftakis, D. Lagos, C. Papadimitriou and N. Hatziargyriou, "Seamless transition between interconnected and islanded operation of DC Microgrids", IEEE Transactions on Smart Grid, pp. 1-1, 2017
- V. Kleftakis and N. Hatziargyriou, "Optimal control of reversible substations and wayside storage devices for voltage stabilization and energy savings in metro railway networks", IEEE Transactions on Transportation Electrification, pp. 1-1, 2019.
- C. Papadimitriou, V. Kleftakis and N. Hatziargyriou, "A Novel Method for Islanding Detection in DC Networks", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 8, no. 1, pp. 441-448, 2017
- C. Papadimitriou, V. Kleftakis and N. Hatziargyriou, "A novel islanding detection method for microgrids based on variable impedance insertion", Electric Power Systems Research, vol. 121, pp. 58-66, 2015
- C. Papadimitriou, V. Kleftakis and N. Hatziargyriou, "Control strategy for seamless transition from islanded to interconnected operation mode of microgrids", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 5, no. 2, pp. 169-176, 2016
- P. Kotsampopoulos, V. Kleftakis and N. Hatziargyriou, "Laboratory Education of Modern Power Systems using PHIL Simulation", IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1-1, 2017
- V. Papaspiliotopoulos, G. Korres, V. Kleftakis and N. Hatziargyriou, "Hardware-In-the-Loop Design and Optimal Setting of Adaptive Protection Schemes for Distribution Systems With Distributed Generation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 1, pp. 393-400, 2017
- P. Kotsampopoulos, A. Kapetanaki, G. Messinis, V. Kleftakis, N. Hatziargyriou, "A PHIL facility for Microgrids", International Journal of Distributed Energy Resources, Vol. 9, No. 1, pp. 71-86, January-March 2013
- K. Mentessidi, E. Rikos and V. Kleftakis, "Real-Time Simulation Technique of a Microgrid Model for DER Penetration", EAI Endorsed Transactions on Energy Web, vol. 1, no. 2, p. e2, 2014

Δημοσιεύσεις σε Συνέδρια:

- Papadimitriou, V. Kleftakis, N. Hatziargyriou, "DC microgrids for energy communities in the developing world", CIRED 2018 Oral session
- Vasilis Kleftakis, Alexandros Rigas, A. Vassilakis, Nikos D. Hatziargyriou, "Power-Hardware-in-the-loop simulation of a D-STATCOM equipped MV network interfaced to an actual PV inverter", IEEE 4th European Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Conference, At Copenhagen, Denmark, October 2013
- Panos Kotsampopoulos, Pavlos Georgilakis, Dimitris Lagos, Vasilis Kleftakis, Nikos Hatziargyriou, "FACTS Providing Grid Services: Applications and Testing", Energies. 12. 10.3390/en12132554.
- V Kleftakis, A Rigas, C Papadimitriou, N Katsoulakos, P Moutis, N Hatziargyriou, "Contribution to Frequency Control by a PMSG Wind Turbine in a Diesel-Wind Turbine Microgrid for Rural Electrification", 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, MedPower2014, November 2014, Athens
- P. Kotsampopoulos, V. Kleftakis, G. Messinis, N. Hatziargyriou, "Design, development and operation of a PHIL environment for Distributed Energy Resources", 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'2012), October 25-28 2012, Montreal, Canada
- Nikos Hatziargyriou, Panos Kotsampopoulos, Vasilis Kleftakis, Athanasios Vassilakis, Alexandros Rigas, "DER supporting the grid simulations by means of Power-Hardware-in-the-Loop", In proceeding of: 2013 IEEE PES General Meeting, Volume: GM2471 presentation in Panel "Control of Converter Interfaced DER Connected at Distribution Networks", July 2013, Vancouver, Canada
- C.N. Papadimitriou, V.A. Kleftakis, A. Rigas, N.D. Hatziargyriou, "DC-microgrid control strategy using DC-BUS signaling", 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, MedPower2014, November 2014, Athens
- V.A. Papaspiliotopoulos, Vasilis Kleftakis, Panos Kotsampopoulos, George N. Korres, Nikos D. Hatziargyriou, "Hardware-in-the-loop simulation for protection blinding and sympathetic tripping in distribution grids with high penetration of distributed generation", 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, MedPower2014, November 2014, Athens
- V. Papaspiliotopoulos, G. Korres, V. Kleftakis and N. Hatziargyriou, "Hardware-in-the-loop design and optimal setting of adaptive protection schemes for

distribution systems with distributed generation", 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2017

- Georgios Messinis, Vasilis Kleftakis, Iasonas Kouveliotis-Lysikatos, Alexandros Rigas, Athanasios Vassilakis, Panos Kotsampopoulos, Nikos D. Hatziargyriou, "Multi-microgrid laboratory infrastructure for smart grid applications", 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, MedPower2014, November 2014, Athens
- Panos Kotsampopoulos, Georgios Messinis, Athanasios Vassilakis, Vasilis Kleftakis, Alexandros Rigas, Nikos D. Hatziargyriou, "Laboratory education on distributed energy resources making use of an advanced infrastructure", 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, MedPower2014, November 2014, Athens
- N. Hatziargyriou, V. Kleftakis, F. Palaiogiannis, A. Dimeas, I. Vlachos, C. Katsanos, A. Zafeirakis and A. Tzevelekos, "Towards the modernisation of the supervisory control and data acquisition systems of the Hellenic electricity distribution network operator: considerations and steps forward", CIRED 2017
- A. Markou, V. Kleftakis, P. Kotsampopoulos and N. Hatziargyriou, "Improving existing methods for stable and more accurate Power Hardware-in-the-Loop experiments", 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2017
- D. Barakos, Panos Kotsampopoulos, Athanasios Vassilakis, Vasilis Kleftakis, Nikos D. Hatziargyriou, "Methods for stability and accuracy evaluation of power hardware in the loop simulations", 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, MedPower2014, November 2014, Athens
- K. Montesidi, M. Santamaria, M. Aguado, A. Vassilakis, A. Rigas, V. Kleftakis, P. Kotsampopoulos, "Power Hardware-In-The- Loop technique applied to a LV Network for integrating a Supercapacitor with an Average Model of STATCOM", IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES), Vienna, Austria, November 14, 2013
- K. Montesidi, E. Rikos, V. Kleftakis, P. Kotsampopoulos, M. Santamaria, M. Aguado, "Implementation of a microgrid model for DER integration in real-time simulation platform", IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), June 2014, Istanbul
- N.F. Guerrero-Rodríguez, Alexis B. Rey-Boué, A.Rigas, V.Kleftakis, "Review of Synchronization Algorithms used in Grid-Connected Renewable Agents", International conference on renewable energies and power quality (ICREPQ'14)

Κεφάλαιο σε Βιβλίο

- N. Hatziargyriou, V. Kleftakis, C. Papadimitriou and G. Messinis, "Microgrids in Distribution", Smart Grid Handbook, pp. 1-24, 2016